

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HAVA ARAÇLARINDA KULLANILMAK ÜZERE HİBRİT
NANOPARTİKÜL VE BAZALT ELYAF TAKVİYELİ
POLİ(FENİLEN SÜLFİD) MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEME
GELİŞTİRİLMESİ**

ÇAĞRI ASLAN

KOCAELİ 2024

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVACILIK BİLİMİ VE TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAVA ARAÇLARINDA KULLANILMAK ÜZERE HİBRİT
NANOPARTİKÜL VE BAZALT ELYAF TAKVİYELİ
POLİ(FENİLEN SÜLFİD) MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEME
GELİŞTİRİLMESİ

ÇAĞRI ASLAN

Prof. Dr. Nevin Gamze KARSLI YILMAZ

Danışman, Kocaeli Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Derya ÜNLÜ

Jüri Üyesi, Bursa Teknik Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Sedat SÜSLER

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 31.01.2024

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmanın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☒ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

ÇAĞRI ASLAN

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan “Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- ☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

ÇAĞRI ASLAN

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca tez konusunu seçmemde ve tez sırasında ihtiyaç duyduğum her alanda yardımlarını esirgemeyen bilgisi ve tecrübesiyle ufkumu açan çalışmamda büyük emeği olan kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Nevin Gamze KARSLI YILMAZ'a, Tez çalışmamda bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım değerli hocam Prof. Dr. Taner YILMAZ'a, teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmam sırasında laboratuvarında deneylerimi gerçekleştirirken bilgilerini ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Dr.Öğr.Üyesi Okan GÜL'e, çalışmamda fikir alışverişi yaptığım ve yardımlarını esirgemeyen kıymetli hocam ve arkadaşım Felid ÖKMEN'e teşekkür ederim.

Beni bugünlere kadar yetiştiren desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen sevgili annem Sevgi ASLAN'a, babam Aslan ASLAN'a ve kardeşim Çağla Filiz ASLAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Ocak-2024

Çağrı ASLAN

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
TABLolar DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	4
2.1. Kompozit Malzemeler	4
2.2. Matris.....	10
2.2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler	11
2.2.2. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler	13
2.2.3. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler	14
2.2.3.1. Polifenilen Sülfid	21
2.3. Takviye Elemanı	24
2.3.1. Partikül Takviyeli Kompozitler	24
2.3.2. Tabakalı Kompozitler	25
2.3.3. Hibrit Kompozitler.....	26
2.3.4. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler	26
2.3.4.1. Bazalt Elyaf.....	29
2.4. Nanoteknoloji.....	30
2.5. Karbon Temelli Yapılar ve Özellikleri	34
2.5.1. Fulleren ve Özellikleri	35
2.5.2. Karbon Nanotüp (CNT) ve Özellikleri	36
2.5.3. Grafen ve Özellikleri	37
2.5.3.1. Grafen Nanoplatelet ve Özellikleri	37
2.6. Bor Temelli Yapılar ve Özellikleri.....	39
2.6.1. Bor Karbür Partikülü	39
2.6.2. Bor Nitrür Partikülü	40
2.6.2.1. Hegzagonal Bor Nitrür	40
2.7. Polimer Nanokompozitler	41
2.8. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	42
2.8.1. Ekstrüzyon.....	42
2.8.2. Laboratuvar Ölçekli Karıştırıcılar	46
2.8.3. Enjeksiyonla Kalıplama	46
2.9. Kompozit Malzemelerin Karakterizasyon Yöntemleri	47
2.9.1. Çekme Testi.....	48
2.9.2. Dinamik Mekanik Analiz.....	49
2.9.3. Termogravimetrik Analiz.....	50
2.9.4. Aşınma Testi.....	51
2.9.5. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Analizi	52
2.9.6. Taramalı Elektron Mikroskobu	53
2.10. Çalışmanın Özgün Yanı.....	54

3. LİTERATÜR TARAMASI.....	56
3.1. PPS Matrisli Kompozitlerle İlgili Yapılan Çalışmalar	56
3.2. Bazalt Elyaf Takviyeli Kompozitlerle İlgili Yapılan Çalışmalar	58
3.3. Grafen Nanoplatelet Takviyeli Kompozitlerle İlgili Yapılan Çalışmalar	59
3.4. Hegzagonal Bor Nitür Takviyeli Kompozitlerle İlgili Yapılan Çalışmalar	61
3.5. Hibrit Kompozitlerle İlgili Yapılan Çalışmalar	63
4. MALZEMELER VE YÖNTEM.....	66
4.1. Malzemeler	66
4.2. Yöntem	66
4.3. Karakterizasyon.....	69
4.3.1. Çekme Testi.....	69
4.3.2. Adhezif Aşınma Testi	69
4.3.3. Termogravimetrik Analiz.....	70
4.3.4. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Analizi	71
4.3.5. Dinamik Mekanik Analiz	71
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	73
5.1. Çekme Testi	73
5.2. Adhezif Aşınma Testi.....	80
5.3. Termogravimetrik Analiz	84
5.4. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Analizi	87
5.5. Dinamik Mekanik Analiz	91
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	94
KAYNAKLAR	97
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	107
ÖZGEÇMİŞ.....	108

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1.	Emisyon azaltımı için malzeme gelişimi ve tasarım gereklilikleri	6
Şekil 2. 2.	Boeing 787 uçağında kullanılan kompozit malzemelerin ve diğer malzemelerin kullanım oranları	6
Şekil 2. 3.	A380 uçağında kullanılan kompozit malzemelerin türleri	7
Şekil 2. 4.	Kompozit malzemeyi oluşturan matris ve takviye fazının şematik gösterimi.	9
Şekil 2. 5.	Kompozit malzemelerin matris ve elyaf türüne göre sınıflandırılması.	11
Şekil 2. 6.	Polimerlerin zincir yapıları ve özellikleri	16
Şekil 2. 7.	Kristal ve amorf yapıların şekilleri.	17
Şekil 2. 8.	Termoset malzemede şekillendirildikten sonra oluşan çapraz bağlar	18
Şekil 2. 9.	A) Elastomerlerin kuvvet uygulanmadan önceki zincir yapısı B) Elastomerlere kuvvet uygulandıktan sonraki zincir yapısı	19
Şekil 2. 10.	Termoplastik malzemenin moleküler yapısının şematik gösterimi.....	19
Şekil 2. 11.	Termoplastik malzemelerin fiyat/performans, yarı kristal ve amorf oluşlarına göre sınıflandırılmaları	22
Şekil 2. 12.	PPS'in kimyasal yapısı	23
Şekil 2. 13.	PPS malzemesinin uygulama alanları.....	23
Şekil 2. 14.	Bazalt elyafın mekanik özellikleri.....	29
Şekil 2. 15.	Nanometre boyutlarının diğer boyutlara göre sınıflandırılması	31
Şekil 2. 16.	Nanomalzemelerin boyutlarına göre sınıflandırılması	32
Şekil 2. 17.	Nanomalzemelerin etkileri ve uçakta kullanıldıkları yerler.....	33
Şekil 2. 18.	Formları farklı olan nano karbon yapıların boyutlarına göre sınıflandırılması	35
Şekil 2. 19.	Farklı altıgen sayısına bağlı Fulleren çeşitleri	36
Şekil 2. 20.	a) Grafit, b) Grafen ve c) Grafen nano plateletlerin formları	38
Şekil 2. 21.	Bor karbürün kristal yapısı.....	40
Şekil 2. 22.	Hegzagonal bor nitrürün kimyasal yapısı	41
Şekil 2. 23.	Polimer nanokompozitlerin havacılık ve uzay sektörü için önemi	42
Şekil 2. 24.	Tek vidalı ekstrüderin şematik gösterimi.....	44
Şekil 2. 25.	Ekstrüder vidası ve bölümlerinin gösterimi.....	44
Şekil 2. 26.	Çift vidalı ekstrüderlerin dönüş yönüne göre sınıflandırılmaları	45
Şekil 2. 27.	Laboratuvar ölçekli konik çift vidalı mikro harmanlayıcı	46
Şekil 2. 28.	Enjeksiyon kalıplama cihazının bileşenlerinin gösterimi.	47
Şekil 2. 29.	Çekme testi cihazı ve bileşenleri	48
Şekil 2. 30.	Polimerik bir malzemenin gerilme-gerinim eğrisi	49
Şekil 2. 31.	TGA cihazı ve bileşenleri	51
Şekil 2. 32.	Pin-on-disk cihazı ve bileşenleri.	52
Şekil 2. 33.	DSC analizi cihazının bileşenleri	53
Şekil 2. 34.	SEM'in çalışma mekanizması.....	54
Şekil 4. 1.	Laboratuvar tipi mikro karıştırıcı	67
Şekil 4. 2.	Enjeksiyon kalıplama makinesi.....	67
Şekil 4. 3.	"Shimadzu AG-X " marka çekme test cihazı.	69
Şekil 4. 4.	"Nanovea" marka aşınma test cihazı	70
Şekil 4. 5.	"TA Instruments-Q500" model TGA test cihazı.	70
Şekil 4. 6.	"TA Instruments-Q200" model diferansiyel taramalı kalorimetri analizi cihazı.....	71

Şekil 4. 7.	“TA Instruments-Q800” model dinamik mekanik analiz cihazı	72
Şekil 5. 1.	Sadece hBN ve sadece GnP içeren kompozitlerin oda sıcaklığında çekme testlerinden elde edilen gerilme-gerinim eğrileri ve SEM mikrografları	75
Şekil 5. 2.	Hibrit takviyeli kompozitlerin oda sıcaklığında çekme testlerinden elde edilen gerilme-gerinim eğrileri	77
Şekil 5. 3.	Sadece hBN ve sadece GnP içeren kompozitlerin 70°C'de çekme testlerinden elde edilen gerilme-gerinim eğrileri.	78
Şekil 5. 4.	Hibrit takviyeli kompozitlerin 70°C'de çekme testlerinden elde edilen gerilme-gerinim eğrileri	79
Şekil 5. 5.	Sadece hBN ve sadece GnP içeren kompozitlerin adhezif aşınma testlerinden elde edilen sürtünme katsayısı eğrileri.	82
Şekil 5. 6.	Hibrit takviyeli kompozitlerin adhezif aşınma testlerinden elde edilen sürtünme katsayısı eğrileri.....	84
Şekil 5. 7.	Sadece hBN ve sadece GnP içeren kompozitlerin TGA'dan elde edilen termal bozunma eğrileri.	86
Şekil 5. 8.	Hibrit takviyeli kompozitlerin TGA'dan elde edilen termal bozunma eğrileri.	86
Şekil 5. 9.	Sadece hBN ve sadece GnP içeren kompozitlerin DSC termogramları.	89
Şekil 5. 10.	Hibrit takviyeli kompozitlerin DSC termogramları.	89
Şekil 5. 11.	Sadece hBN ve sadece GnP içeren kompozitlerin dinamik mekanik analizden elde edilen kompleks modül eğrileri.....	92
Şekil 5. 12.	Hibrit takviyeli kompozitlerin dinamik mekanik analizden elde edilen kompleks modül eğrileri.....	93

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2. 1. Metal ve kompozit malzemelerin avantajları ve dezavantajları.....	9
Tablo 2. 2. Uçaklarda kullanılan metal matrisli kompozitler ve özellikleri.....	12
Tablo 2. 3. Uçaklarda kullanılan seramik matrisli kompozitler ve özellikleri	13
Tablo 2. 4. Uçaklarda kullanılan polimer matrisli kompozitlerin çeşitleri, özellikleri ve uygulama alanları.	21
Tablo 2. 5. Bazalt, cam ve karbon elyafların seçilmiş özelliklerinin karşılaştırılması	30
Tablo 4. 1. Kompozit malzemeyi oluşturmada kullanılan malzemeler ve özellikleri	66
Tablo 4. 2. Malzeme kodu ve kompozitte kullanılan takviyelerin bileşim oranları.....	68
Tablo 5. 1. Numunelerin çekme testi sonuçları	73
Tablo 5. 2. Numunelerin ortalama sürtünme katsayısı sonuçları	81
Tablo 5. 3. Numunelerin TGA sonuçları.....	85
Tablo 5. 4. Numunelerin DSC analiz sonuçları.....	88

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
B	: Bor
B ₂ O ₃	: Bor oksit
B ₄ C	: Bor karbür
BN	: Bor nitrür
C ₆₀	: Fulleren
CO ₂	: Karbondioksit
E*	: Kompleks modülü,
E''	: Kayıp modülü, (MPa)
E'	: Depo modülü, (MPa)
H ₃ BO ₃	: Borik asit
Mg	: Magnezyum
Ni	: Nikel
NO _x	: Azot oksit
SiC	: Silisyum karbür
T _{%5}	: %5 ağırlık kaybının meydana geldiği termal bozunma sıcaklığı, (°C)
T _{%40}	: %40 ağırlık kaybının meydana geldiği termal bozunma sıcaklığı, (°C)
T _c	: Kristalleşme sıcaklığı, (°C)
T _g	: Camı geçiş sıcaklığı, (°C)
Ti	: Titanyum
TiB ₂	: Titanyum diborür
TiC	: Titanyum karbür
TiN	: Titanyum nitrür
TiO ₂	: Titanyum oksit
T _m	: Erime sıcaklığı, (°C)
w	: Takviye ve dolguların kompozit içerisindeki ağırlıkça oranı
(X _c) _{rel}	: Kristalinite oranı, (%)
ΔH	: Erime entalpisi
ΔH _m ⁰	: Ham matrisin erime entalpisi, (J/g)
ΔH _c	: Soğuk kristallenme entalpisi, (J/g)
ΔH _m	: Erime entalpisi, (J/g)

Kısaltmalar

AHP	: Alüminyum Hipofosfiti
APTES	: Aminopropiltrietoksisilan
AWJ	: Abrasive Water Jet (Aşındırıcı Su Jeti İşleme)
BF	: Bazalt Elyaf
BNNT	: Bor Nitrür Nanotüp
CER	: Cycloaliphatic Epoxy Resin (Sikloalifatik Epoksi Reçine)
CF	: Carbon Fiber (Karbon Elyaf)
CMC	: Ceramic Matrix Composites (Seramik Matrisli Kompozitler)
CNT	: Carbon Nanotube (Karbon Nanotüp)

CNT-NH ₂	: Amin Karbon Nanotüp
COF	: Sürtünme Katsayısı
DMA	: Dinamik Mekanik Analiz
DSC	: Differential Scanning Calorimetry (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre)
DWNT	: Double-Walled Carbon Nanotubes (Çift Duvarlı Nanotüp)
EG	: Extended Grafit (Genişletilmiş Grafit)
GF	: Cam Elyaf
GNP	: Grafen Nanoplatenet
GO	: Grafen Oksit
h-BN	: Hegzagonal Bor Nitrür
m-CNT	: Modifiye Edilmiş Karbon Nanotüp
MMC	: Metal Matrisli Kompozitler
MWNT	: Multi-Walled Carbon Nanotubes (Çok Duvarlı Nanotüp)
PA	: Poliamid
PBO	: 1,4 fenilen-bis-oksazolin
PBS	: Polibutilen suksinat
PBT	: Polibütillen Tereftalat
PEEK	: Polieter Eter Keton
PI	: Poliimid
PLA	: Poli(Laktik Asit)
PMC	: Polimer Matrisli Kompozitler
PP	: Polipropilen
PPS	: Poli(fenilen sülfid)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SWNT	: Single-Walled Carbon Nanotubes (Tek Duvarlı Nanotüp)
TGA	: Termogravimetrik Analiz
TPE	: Termoplastik Elastomerler

HAVA ARAÇLARINDA KULLANILMAK ÜZERE HİBRİT NANOPARTİKÜL VE BAZALT ELYAF TAKVİYELİ POLİ(FENİLEN SÜLFİD) MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEME GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasının amacı, bazalt fiber (BF) takviyeli polifenilen sülfid (PPS) matrisli kompozitlere farklı ağırlık oranlarında hem tek başına hem de hibrit olarak hegzagonal bor nitrür (hBN) ve/veya grafen nanoplatelet (GnP) ilavesinin kompozit özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Kompozitlerin mekanik, tribolojik, termal ve termomekanik özellikleri, farklı ortam sıcaklıklarında (23°C ve 70°C) çekme testi, adhezif aşınma testi, termogravimetrik analiz, diferansiyel taramalı kalorimetre analizi ve dinamik mekanik analiz gibi analizler kullanılarak değerlendirilmiştir. 70°C'de yapılan çekme testinin sonuçları, BF takviyeli kompozitlere ağırlıkça %0,3 GnP ve ağırlıkça %1 hBN ilavesinin çekme dayanımında %40'luk bir artış sağladığını göstermiştir. Buna ek olarak, ağırlıkça %0,3 GnP ve ağırlıkça %10 hBN içeren kompozit, yüksek sıcaklık çekme mukavemetinde %25 artış, sürtünme katsayısı değerinde %37 düşüş ve T_{40%} termal bozunma sıcaklığında 10°C iyileşme göstermiştir. Ayrıca, analiz sonuçları BF takviyeli PPS matrisli kompozitlere GnP ve hBN'nin hibrit olarak dahil edilmesinin yüksek sıcaklık çekme dayanımı, adhezif aşınma direnci ve termal direnç özelliklerini geliştirdiğini göstermiştir. Sonuç olarak, GnP ve hBN'nin hibrit kullanımının, elektriksel özelliklerin yanı sıra mekanik, tribolojik ve termal performansın gerekli olduğu ileri kompozit uygulamaları için kompozitlere üstün özellikler sağladığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bazalt Elyaf, Grafen Nanoplatelet, Hegzagonal Bor Nitrür, Mekanik Özellikler, Poli(fenilen sülfid).

DEVELOPMENT OF HYBRID NANOPARTICLE AND BASALT FIBER REINFORCED POLY(PHENYLENE SULFIDE) MATRIX COMPOSITE MATERIALS FOR USE IN AIRCRAFT

ABSTRACT

The aim of this study was to investigate the effects of the addition of hexagonal boron nitride (hBN) and/or graphene nanoplatelets (GnP) to basalt fiber (BF) reinforced polyphenylene sulfide (PPS) matrix composites at different weight ratios, both alone and hybrid, on the composite properties. Mechanical, tribological, thermal, and thermomechanical properties of the composites were evaluated using analyses such as tensile test at different ambient temperatures (23°C and 70°C), adhesive wear test, thermogravimetric analysis, differential scanning calorimeter analysis, and dynamic mechanical analysis. The results of the tensile test at 70°C showed that the addition of 0.3 wt.% GnP and 1 wt.% hBN to the BF-reinforced composites resulted in a 40% increase in tensile strength. In addition, the composite containing 0.3 wt.% GnP and 10 wt.% hBN showed a 25% increase in high-temperature tensile strength, a 37% decrease in coefficient of friction value, and a 10°C improvement in $T_{40\%}$ thermal decomposition temperature. Furthermore, the analysis results showed that the hybrid inclusion of GnP and hBN to the BF-reinforced PPS matrix composites improved the high-temperature tensile strength, adhesive wear resistance, and thermal resistance properties. As a result, it is concluded that the hybrid use of GnP and hBN provides superior properties to the composites for advanced composite applications where mechanical, tribological and thermal performance is required along with electrical properties.

Keywords: Basalt Fiber, Graphene Nanoplatelet, Hexagonal Boron Nitride, Mechanical Properties, Polyphenylene Sulfide.

1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknolojiyle beraber daha sağlam ve güçlü malzemelere olan talep gün geçtikçe artarken geleneksel malzemeler yeni teknolojik ürün ihtiyaçlarını karşılamakta yetersiz kalmaktadır. Bu eksikliği gidermek üzere yapılan araştırmalar sonucunda, beklenen performans kriterlerini sağlayan kompozit malzemeler geliştirilmiş olup geliştirilen bu yüksek performanslı malzemelerin uygulamalarını ise havacılık, denizcilik, savunma gibi birçok alanda görmek mümkündür. Özellikle havacılık alanında yüksek dayanımlı, korozyona dayanıklı ve hafif malzemeler tercih edildiğinden bu özellikleri taşıyan polimerik kompozit malzemeler havacılık sektörü için vazgeçilmezdir.

Kompozit malzeme, iki veya daha fazla türde malzemenin bir araya gelerek özellik olarak kendini oluşturan malzemelerden daha üstün özellikte bir malzeme oluşturması olarak tanımlanmaktadır. Kompozit malzeme, matris malzemesi ve takviye malzemesi olmak üzere iki bileşenden oluşur. Matris malzemesi, kompozit malzeme yapısının bütünlüğünü sağlarken, takviye malzemesi ise uygulanan yükü taşır. Kompozit malzemelerde metal, seramik ve polimerik olmak üzere birden fazla matris çeşidi vardır. Havacılık sektöründe en fazla kullanılan matris malzemesi çeşidi ise polimerlerdir.

Polimerlerin takviye edilmedikleri durumda diğer malzemelere göre mekanik özellikleri oldukça zayıftır. Polimerlere ancak elyaf veya dolgu malzemeleri takviyesiyle birlikte istenilen özelliklere ulaşılır. Özellikle uçaklarda, takviye edilmiş polimerler sayesinde düşük yoğunlukta, yüksek spesifik mukavemet, spesifik modül ve rijit yapıya sahip malzemeler kullanılmaktadır. Polimerler kendi içlerinde termoplastik, termoset ve elastomer olmak üzere üçe ayrılmaktadırlar. Matris malzemesinin termoset olması kompozit malzemeye sertlik, rijitlik ve sürünme direnci, elastomer olması ise esneklik ve uzamada artış gibi özellikler sunmasına rağmen termoplastik olması üretilen kompozitlere yüksek sıcaklıklara dayanım, ısı kararlılık, tekrar tekrar üretilme gibi üstün özellikler sağlar.

Termoplastik matris malzemelerinin kompozit yapılara sağladıkları gelişmiş özelliklerden dolayı polifenilen sülfid (PPS) de son zamanlarda özellikle havacılık sektöründe kullanımı artan termoplastik bir mühendislik polimeridir. İyi mekanik mukavemet, yüksek sıcaklık direnci, yüksek boyutsal kararlılık, mükemmel solvent

direnci ve işleme kolaylığı gibi arzu edilen özellikleri nedeniyle PPS, birçok mühendislik uygulamasında kullanılır. Sağlamış olduğu özellikler sebebiyle uçakların iniş takımlarında, yolcu koltuklarında, uçak kontrol yüzeylerinde ve uçağın başka iç ve dış parçaları da dahil birçok bileşeninde PPS kullanılmaktadır. Diğer taraftan PPS düşük kopma uzamasına sahip kırılğan bir polimerdir. Bu nedenle PPS'ye elyaf ve/veya partikül gibi çeşitli takviye elemanlarının ilavesiyle bu olumsuz özelliklerinin azaltılması ve/veya ortadan kaldırılması amaçlanır. PPS ile en yaygın kullanılan elyaf çeşitleri karbon elyaf ve cam elyafıdır.

Bununla birlikte, günümüzde, tehlikesiz, reaktif olmayan doğal elyaf çeşitleri, polimerik kompozitlerde kullanılmak üzere sentetik elyaf çeşitlerine alternatif bir takviye olarak dikkat çekmektedir. Bu kapsamda, kompozit malzeme üretiminde takviye elemanı olarak, karbon elyaf ve cam elyaf özelliklerine yakın özellikte ve daha düşük üretim maliyetinde, mineral bazlı oluşundan dolayı çevreye zararsız bir elyaf olan bazalt elyaf (BF) tercih edilmektedir. BF, iyi modül, yüksek mukavemet, yüksek sıcaklık direnci, mükemmel stabilite, iyi kimyasal dirence sahip inorganik bir elyaf olup işlenmesi kolaydır, toksik değildir, ayrıca doğal bir elyaf olması sebebiyle çevre dostudur.

Üstün mekanik özelliklere sahip bir kompozit üretmek için gerekli olan bir diğer faktör ise takviye malzemesi ile matris malzemesi arasındaki ara yüzey etkileşiminin iyi olmasıdır. Zira zayıf ara yüzey etkileşimine sahip olan kompozitlerde elyaf-matris ara yüzeyindeki boşluklar elyaftan matrise yük aktarımı sırasında bu bölgede kusurlara ve/veya çatlak oluşumuna neden olmaktadır. Bu durumu ortadan kaldırmak ve ara yüzey etkileşimini iyileştirmek amacıyla elyaf takviyeli kompozitlere çeşitli modifikasyon yöntemleri uygulanır. Elyaf takviyesine eş zamanlı olarak çeşitli partiküller ve/veya elyaf türleri kullanmak suretiyle hibrit kompozit malzemeler geliştirmek ve üretmek bu yöntemlerin en güncel olanlarından birisidir. Böylece üretilen hibrit takviyeli kompozit malzemelerin performansları iyileşmekte ve potansiyel uygulama alanları genişlemektedir.

Bu tez kapsamında, önce PPS matrise BF takviye edilmiş, ardından BF takviyeli PPS matrisli kompozitlere farklı oranlarda sadece hegzagonal bor nitrür (h-BN) ve sadece grafen nanoplatelet (GNP) takviye edilmiş, son olarak ise h-BN ve GNP partiküllerini farklı oranlarda ve aynı anda içeren hibrit takviyeli kompozitler üretilmiş, böylece hibrit

etkinin kompozit özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Uygulanan karakterizasyon testleri aracılığıyla üretilen kompozit malzemelerin mekanik, tribolojik ve ısı özellikleri incelenmiştir.

Çalışmanın 2. bölümünde, kompozit malzemeler ile ilgili, bu tezde kullanılan malzemeler özelinde, genel bilgiler verilmiş, ayrıca kompozitlerin üretim ve karakterizasyon yöntemleri anlatılmıştır. Ayrıca ilk bölümün sonunda bu tez çalışmasının özgün yanına değinilmiştir. Çalışmanın 3. bölümünde, bu tez çalışması kapsamında kullanılan malzemeler özelinde literatür araştırması yapılmış ve araştırma sonuçları derlenerek sunulmuştur. Çalışmanın 4. bölümünde, bu tez çalışması kapsamında kullanılan malzemeler, kompozit üretim yöntemleri ve kompozitlere uygulanan testler anlatılmıştır. Çalışmanın 5. bölümünde, üretilen kompozitlere uygulanan karakterizasyon testleri sonucunda elde edilen bulgular yorumlanarak sunulmuştur. Çalışmanın 6. bölümünde ise bu tez çalışmasının sonucu ve bu sonuca yönelik önerilere yer verilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde ilk olarak kompozit malzemeler ve bileşenleri hakkında bilgi verilmiştir. Ardından nanokompozitler, kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ve kompozit malzemelerin karakterizasyon yöntemleri incelenmiştir. Sonrasında çalışmanın kapsamı ve özgün yanı aktarılarak bu bölüm tamamlanmıştır. Bölüm içerisinde, çalışmada kullanılan malzemelere ait genel bilgilere de yer verilmiştir.

2.1. Kompozit Malzemeler

Teknolojinin gelişmesi ile daha güçlü yapı elemanlarına olan talep de artmaktadır. Günümüzde halen kullanılmakta olan yapı elemanları Metaller, Seramikler, Polimerler ve Kompozitlerdir (Staab, 2015). Kompozit malzemeler sahip oldukları yüksek mukavemet, korozyon direnci, yüksek sıcaklıklara dayanma, hafiflik ve kolay üretim gibi üstün özellikleri sayesinde metal, polimer, seramik gibi geleneksel malzemelere kıyasla daha çok tercih edilmektedirler (Alemour ve diğ., 2019).

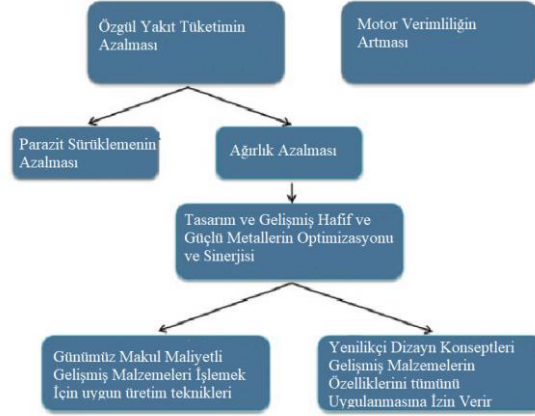
Kompozit malzemelerin tarihini incelediğimizde çok eski yıllardan bu yana kullanıldıkları görülmektedir. Kompozit malzeme kullanımının ilk örneği, günümüzde de hala belli bölgelerde kullanılan saman takviyeli kilden yapılmış kerpiç evlerdir. Saman ve kil tek başlarına kullanıldıklarında istenilen mukavemeti veremeseler de bir araya geldiklerinde tek başlarına taşıyabilecekleri yükün üstüne çıkmışlardır. Kompozit malzemelerin geçmişte kullandığına dair örnekler literatürde oldukça fazladır. M.Ö. 1500 yıllarda Mısırda bambu ile güçlendirilmiş çamur duvarlar ve M.S. 1800'lerden sonra da kılıç yapımında lamine metaller kullanılmıştır. 1930'lu yıllarda cam elyaf takviyeli reçinelerin geliştirilmesiyle havacılık, denizcilik gibi sektörlerde uygulanmaya başlanmış ve kompozit malzemelerin kullanımı artmaya başlamıştır. 1970'lerden bu zamana kadarda karbon, bor, aramid elyaf türlerinin geliştirilmesiyle kompozit malzemelerin kullanımı da artmaya devam etmiştir. (Kaw, 2006).

Kompozit malzemeler havacılık endüstrisi için oldukça önemlidirler. Uçaklarda kullanılan metal alaşımlara kıyasla daha hafiflerdir ve yapısal dayanımları yüksektir. Bu da uçak performansının ve yakıt verimliliğinin artmasına katkı sağlamaktadır. Havacılık tarihinde kompozit malzeme kullanımı incelendiğinde 1903 yılında Wright kardeşlerin

gerçekleştirdiği başarılı uçuştan sonra yapılan yeni tip uçaklarda kullanılan kompozit malzeme miktarının sürekli arttığı görülmektedir. Bunun nedeni uçaklarda kullanılan malzemelerin özgül ağırlığının düşürülmesinin istenmesi ve aynı zamanda malzemelerin hasar toleransı ve korozyon direnci özelliklerinin de kompozit malzeme kullanarak artırılmasıdır. Tasarımcılar uçak tasarımlarını yaparken başlangıçta yalnızca özgül ağırlığı dikkate alsalar da ilerleyen zamanda korozyon ve hasar toleransını da hesaplarına katmaya başlamışlardır. (Yılmaz ve Evci, 2015). 1930'lu yıllarda cam elyafın geliştirilmesiyle uçaklarda kompozit malzeme kullanılmaya başlanmıştır. 1950'li yıllara gelindiğinde ilk yolcu uçağı olan Boeing 707'de %2 oranında cam elyaf takviyeli kompozit malzeme kullanılmıştır. 1970'li yıllarda ise kompozitler için yeni bir dönem başlamıştır. Bu dönemde Boeing 747 uçağında %1 oranında ve Avrupa'nın en büyük yolcu uçaklarından birisi olan Airbus 300'de %4 oranında kompozit malzeme kullanılmıştır. Bu da kompozit malzemelerin kullanımının giderek artması ve alüminyum alaşımları içinde, perçinsiz birleştirme tekniklerinin geliştirilmesinde kaydedilen ilerlemeyle birlikte, uçak yapılarının evriminde önemli bir adım değişikliğinin yolunu açmıştır. Ancak uçak yapılarında metal malzemeler yerine kompozit malzemelerin uygulanması hızlı bir şekilde gerçekleşmemiştir. 1987 yılında Airbus 320 uçağında yaklaşık %68 oranında alüminyum alaşımları kullanılırken yalnızca yaklaşık %15 oranında kompozit malzeme kullanılmıştır. Bunun başlıca nedeni havacılık sektörü için istenilen özellikte kompozit malzemelerin üretim yöntemlerinin pahalı olması, kompozit malzeme teknolojisinde bilgi yetersizliği ve uzun süreli kompozit malzeme kullanımında oluşacak hasarlar ile ilgili (malzeme yorulması, nem, radyasyon gibi çevresel faktörler kaynaklı hasarlar, vb.) yeterli bilgi sahibi olunmamasıdır. (Pantelakis ve Tserpes, 2020).

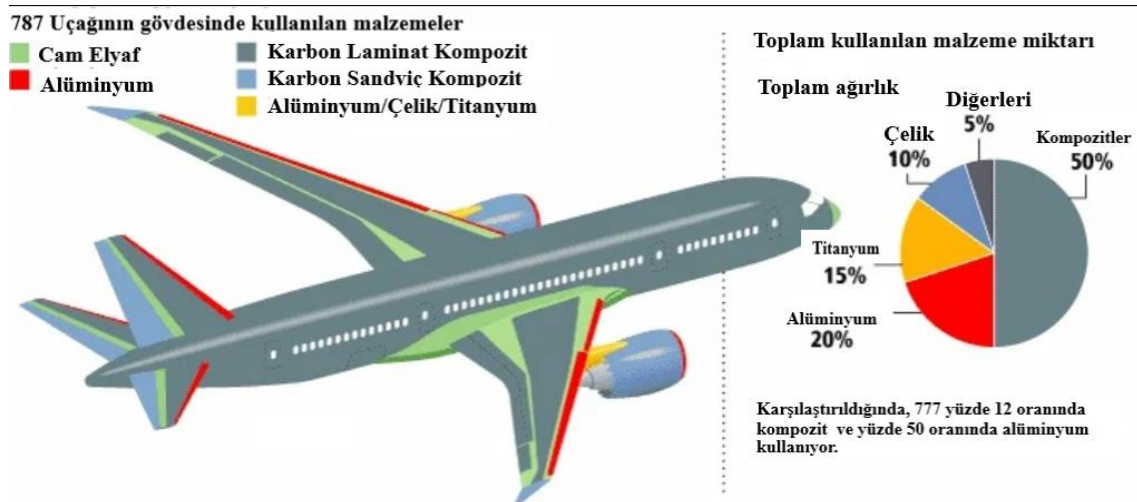
Kompozit malzemeler konusunda yapılan çalışmaların artmasıyla ve çevresel faktörler, hava araçlarının güvenliği ve maliyet faktörlerinin de göz önünde bulundurulmasıyla hava araçlarında kompozit malzeme kullanım oranları giderek artmaya devam etmektedir. Bu artışın en büyük nedeni, uçaklarda kullanılan yüksek yoğunluklu metal malzemeler yerine daha hafif malzemeler olan kompozitlerin kullanılmasıyla yakıt tüketiminin azaltılıp uzun vadede ekonomik kazanç elde edilmesidir. Ekonomik kazancın yanı sıra hava araçlarının çevresel olarak oluşturduğu CO₂ emisyonunun ve NO_x emisyonunun da azaltılması hedeflenmektedir. Kompozit malzeme kullanımı ile CO₂ emisyonunda %50 oranında, NO_x emisyonunda %80 oranında, dışarıya oluşan gürültü

seviyesinde ise %80 oranında azalma sağlanmıştır. (Pantelakis ve Tserpes, 2020). Şekil 2.1’de Emisyon azaltımı için malzeme gelişimi ve tasarım gereklilikleri gösterilmiştir.



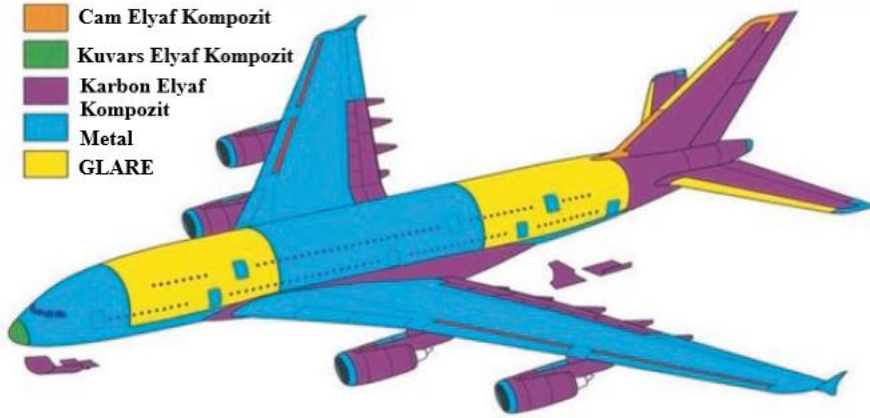
Şekil 2. 1. Emisyon azaltımı için malzeme gelişimi ve tasarım gereklilikleri (Pantelakis ve Tserpes, 2020).

Kompozit malzemelerin yukarıda bahsedilen avantajlarından faydalanmak için Airbus, A380 uçağını geliştirmiş buna karşılık Boeing de 787 Dreamliner uçağını kullanıma sunmuştur. Boeing 787 Dreamliner uçağının alüminyum alaşımlarına kıyasla kompozit oranı, diğer üretilen Boeing uçaklarına göre daha fazladır. Bu uçakla birlikte karbon tabakalı ve karbon sandviç kompozit yapılarına geçiş sağlanmıştır. Şekil 2.2’de Boeing 787 uçağında kullanılan kompozit malzemelerin ve diğer malzemelerin kullanım oranları gösterilmiştir. (Kukreja ve Löfström, 2023)



Şekil 2. 2. Boeing 787 uçağında kullanılan kompozit malzemelerin ve diğer malzemelerin kullanım oranları (Kukreja ve Löfström, 2023).

Airbus A380 uçağı ise 2005 yılında ilk uçuşunu gerçekleştirmiştir ve ağırlığının %61'i alüminyum alaşımlarından, %22'si kompozit malzemelerden, geri kalan ağırlığı ise diğer malzemelerden oluşmaktadır. Diğer Airbus uçaklarına kıyasla A380'de daha az alüminyum alaşımı kullanılmış olup kullanılan kompozit malzeme oranında diğer uçaklara göre artış sağlanmıştır. İlk kez A380 uçağının gövde bölümünde metal malzeme yerine alüminyum matrisli kompozit malzeme GLARE kullanılmıştır. GLARE kullanılmasıyla metal malzemeye kıyasla daha düşük yoğunluklu, darbe direnci yüksek ve yorulma özellikleri daha iyi olan bir malzemeye geçiş yapılmıştır. A380 uçağında, artan karbon elyaf takviyeli kompozit malzeme ve GLARE oranı ile toplam 15 ton ağırlık azalımı sağlanmıştır. Aşağıdaki Şekil 2.3'te A380 uçağında kullanılan malzemelerin türleri hakkında bilgi verilmiştir. (Pantelakis ve Tserpes, 2020).



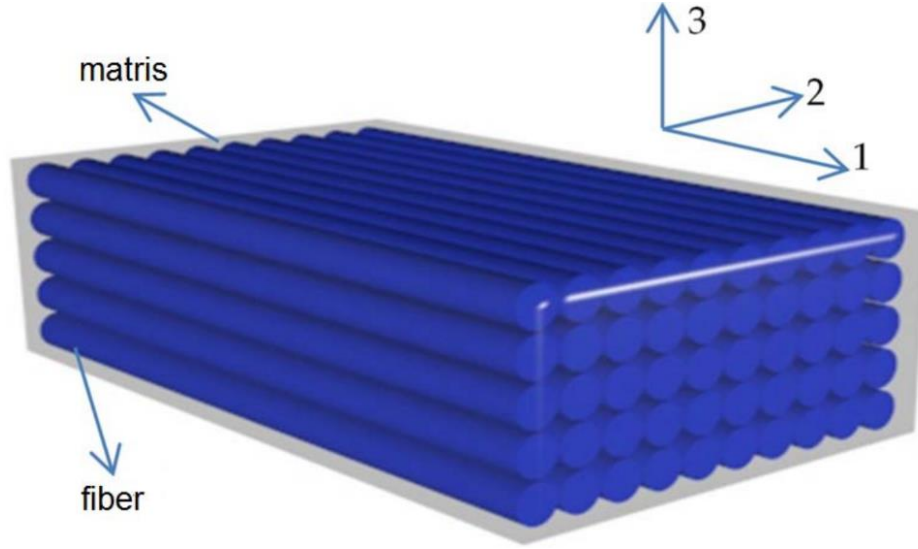
Şekil 2. 3. A380 uçağında kullanılan kompozit malzemelerin türleri (Pantelakis ve Tserpes, 2020).

2010 yılında geliştirilen Airbus 350 uçağıyla beraber hareketli yapı elemanlarında metallerin yerine elyaf ile güçlendirilmiş polimerik kompozitler, hareketsiz yapı elemanlarında ise (pylon, motor, iniş takımları vb.) çelik yerine daha hafif ve mukavemeti yüksek olan titanyum alaşımları ve bazı özel metaller kullanılmıştır. Böylelikle A350 uçağının %52'sini kompozitler, %20'sini alüminyum alaşımları, %14'ünü titanyum, %7'sini çelik, kalan %7'lik kısmı ise diğer metaller oluşturmuştur. (Nijssen, 2015; Pantelakis ve Tserpes, 2020).

Yukarıda bahsedilen tarihsel sürece baktığımızda, kompozit malzemelerin, geçmişten günümüze kadar önem derecesini artırarak her sektörde özellikle de havacılık sektöründe yerini aldığı görülmektedir. Kompozit malzemelerin havacılık sektöründe kullanıma nedenleri ve bize sundukları faydalar aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir; (Thomas, 2019).

- Metaller yerine daha düşük yoğunluklu kompozit malzemelerin kullanımıyla birlikte toplam yapıda %20 ile %50 oranları arasında ağırlık azalışı sağlanmıştır. Böylece yakıt tüketimi de ağırlığa bağlı olarak azalmıştır.
- Üretilen yekpare uçak yapıları sayesinde ağırlıkta azalma sağlanmış ve daha yüksek mukavemet elde edilmiştir.
- Yüksek darbe direncine sahip kompozit malzemeler sayesinde motor, pylon, yakıt tanklarının bulunduğu yerlerde kazara oluşabilecek darbelere karşı darbe direnci özellikleri geliştirilmiştir.
- Farklı hava koşullarında faaliyet gösteren uçaklarda kullanılan metal malzemeler sürekli genleştiğinden bunu önlemek için termal stabilitesi yüksek olan kompozit malzemeler tercih edilmiştir.
- Birbirinden farklı metallerin teması sonucu oluşan galvanik korozyon, yorulma ve korozyon direnci oldukça yüksek kompozit malzemelerin kullanımıyla önlenmiştir.
- Kompozit malzemelerden yapılan uçak yapısal elemanlarının birleştirilmesi oldukça kolaylaşmıştır.

Kompozit malzeme, kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri tamamen birbirinden farklı iki veya daha fazla malzemenin, birbiri içinde çözünmeden bir araya getirilmesiyle ortaya çıkan ve fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri bir araya gelen malzemelerden farklı olan yeni malzemeye verilen addır. (Nijssen, 2015). Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerden biri takviye fazı diğeri ise matris fazı olarak tanımlanmaktadır. Bu malzemeler birbirinden farklı özelliklerde olup bir araya geldiklerinde oluşan malzeme diğer malzemelere göre düşük yoğunluğa, yüksek sertlik ve mukavemete sahip olup, kullanılan matris ve takviye fazının özelliklerine göre daha üstün özelliklere sahip olur. Şekil 2.4'te kompozit malzemeyi oluşturan takviye ve matris fazları gösterilmiştir.



Şekil 2. 4. Kompozit malzemeyi oluşturan matris ve takviye fazının şematik gösterimi (Younes ve diğ., 2012).

Kompozit malzemelerin üstün özelliklerinin sağladığı avantajlarına rağmen dezavantajları da vardır. Tablo 2.1’de hem kompozit malzemelerin avantajları ve dezavantajları gösterilmiş hem de bu özellikler metallerle karşılaştırılmıştır.

Tablo 2. 1. Metal ve kompozit malzemelerin avantajları ve dezavantajları (Pantelakis ve Tserpes, 2020).

Kompozit/Metal	Kompozit Malzemeler	Metaller
Avantajları	Yüksek mukavemet ve ağırlık oranı Farklı yönlerde farklı mekanik özellikler Korozyon direnci Darbe direnci Tasarım kolaylığı Yorulma direnci	Komplex şekiller Yüksek süneklik Tokluk İletkenlik Kolay üretim Çeşitli yöntemlerle birleştirilir Düşük üretim maliyeti
Dezavantajları	Düşük elektrik iletkenliği Düşük yangın direnci Kırılganlık Öngörülemezlik Geri dönüşüm eksikliği	Düşük mukavemet/ağırlık oranı Korozyon hasarına eğilim Düşük sürünme direnci

Kompozit malzemeleri daha iyi anlayabilmek için matris ve takviye fazını daha detaylı incelemek gerekmektedir.

2.2. Matris

Kompozit bir malzemeyi incelediğimizde 3 ana bileşenden oluştuğu görülmektedir. Bunlar;

- Matris
- Takviye elemanı
- Ara yüzeydir.

Kompozit malzemelerde takviye elemanı, sertlik mukavemet gibi yapısal özellikleri belirlerken matris ise kompozite uygulanan yükün takviye elemanına aktarılmasını, malzemenin yapısal olarak bütünlüğünün elyaf ile matris arasında bir ilişki oluşturarak korunmasını, çevresel ortamlardan gelecek hasarların önlemesini sağlar. Kullanılan matris malzemeleri genellikle elyaf türlerine göre daha düşük mekanik özelliklere sahip olsalar da kompozit malzemenin birçok mekanik özelliklerini etkilerler. Bu etkilenen özellikler genellikle mukavemet, kayma modülü, termal genleşme katsayısı, termal direnç ve yorulma mukavemetidir. (Kaw, 2006).

Malzemeler yapılarına göre homojen ve heterojen olarak sınıflandırılmaktadır. Homojen yapıya sahip yapılarda genellikle malzemenin her yerinde aynı özellik gözlemlenirken, kompozit malzemelerin yapılarıysa heterojen olup madde dağılımı ve özellikleri her yerde aynı değildir. Matris fazı sayesinde kompozit malzemelerde homojen özellik gözlemlenmektedir. (Saçak, 2002). Bu kapsamda, matris fazı sayesinde kompozit malzemelere gelen gerilimler karşılanarak elyafta meydana gelebilecek çatlama ve kopmalar önlenir ve böylece tok bir yapı sağlanmış olur. Ayrıca malzemeye gelecek basınçların karşılanması da matris malzemesinin özelliklerine bağlıdır. (Yastımoğlu ve Özkan, 2017). Kompozit malzeme üretimindeyse matrisin, kimyasal özelliği, ısıl direnci ve ekonomik koşulları gibi parametreleri önemli olduğu için dikkate alınmalıdır.

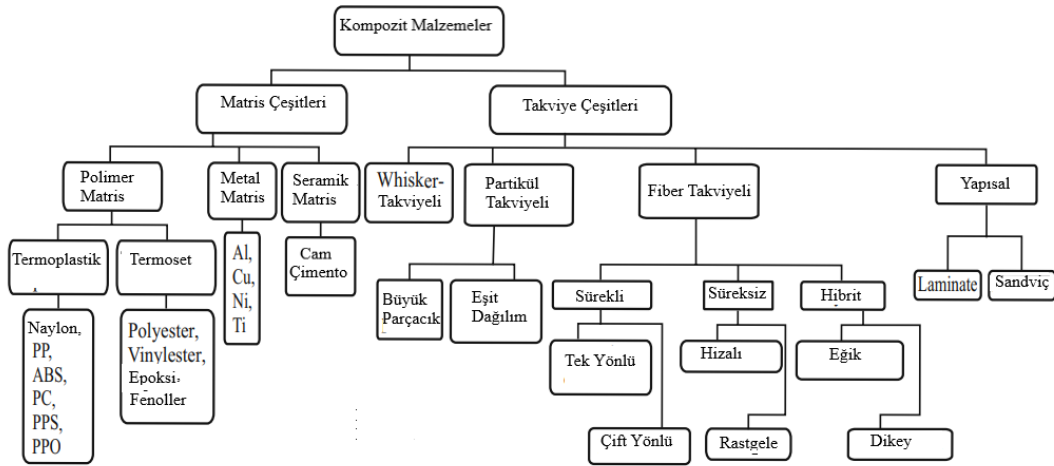
Matris ve elyafın bir araya gelmesiyle aralarında oluşan yüzeye ara yüzey denilmektedir. Kompozit malzemede, matris malzemesinin yukarıda bahsedilen özellikleri sergileyebilmesi için takviye elemanı ile matris fazının arasındaki bu ara yüzeyde iyi bir

etkileşim olması gerekmektedir. Eğer kompozit malzemede matris ile elyaf arasındaki ara yüzeydeki etkileşim zayıf olursa malzemeye gelen yükler altında kompozit malzeme iyi bir dayanım gösteremez. Yüksek bir matris-elyaf ara yüzey etkileşimi halinde ise sünek olan matris gelen yükü zorlanmadan elyafa aktarabilir. (Karataş, 2019).

Kompozitler kullanılan matris çeşitlerine göre üçe ayrılmıştır:

1. Metal Matrisli Kompozitler (MMC)
2. Seramik Matrisli Kompozitler (CMC)
3. Polimer Matrisli Kompozitler (PMC)

Şekil 2.5'te kompozit malzemelerin kullanılan matris ve elyaf türüne göre sınıflandırılması gösterilmiştir.



Şekil 2. 5. Kompozit malzemelerin matris ve elyaf türüne göre sınıflandırılması (Priyanka ve diğ., 2017).

2.2.1. Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

Matris fazı alüminyum (Al), titanyum (Ti), nikel (Ni), Magnezyum (Mg) gibi metallerden oluşan kompozit malzemelere metal matrisli kompozit malzeme denir. Metal matrisli kompozitler geleneksel malzemelere göre iyi mekanik ve termal özelliklere sahiptirler. Ayrıca geleneksel malzemelere kıyasla oldukça yüksek aşınma direnci ve termal iletkenlik gibi özellikler sergilerler.

Alüminyum alaşımlarının sergiledikleri düşük yoğunluk, yüksek dayanım, yüksek korozyon özellikleri sebebiyle alüminyum matrisli kompozitler genellikle otomobil sektöründe ya da hava araçlarının yapısal uygulamalarında kullanılmaktadırlar. Titanyum esaslı metal matrisli kompozitler sergiledikleri yüksek termal direnç ve korozyon direnci özellikleri nedeniyle havacılık uygulamalarında gaz türbinli motorların bileşenlerinde kullanılmaktadırlar. Magnezyum esaslı metal matrisli kompozitlerse düşük yoğunlukları sayesinde yapılarda ağırlık azalımı sağladıkları için Al alaşımları yerine tercih edilmektedirler ve uçaklarda dişli kutusu muhafazalarında kullanılmaktadırlar. Uçaklarda ağırlık azalımı sağlasalar da Mg alaşımlı kompozit malzemeler çabuk alev alabildikleri ve hızlı bir şekilde korozyona uğradıkları için bu kompozit malzemelerin uçaklarda kullanımı sınırlıdır. Metal matrisli kompozitler, özelliklerini geliştirmek için genellikle seramik takviyeli partiküller ile kullanılırlar. Bu partiküllere SiC, Al₂O₃, TiN, TiC, B₄C, TiB₂ örnek olarak verilebilir. Metal matrisli kompozitlere bu partiküllerin eklenmesiyle metal matrisli kompozitlerin mukavemeti ve elastisite modülü artmaktadır. Al alaşımlı metal matrisli kompozitlereyse gelişmiş özellikler göstermesi için SiC ve Al₂O₃ partikülleri eklenmektedir. (Sharma ve diğ., 2019).

Metal matrisli kompozit malzemeler sahip oldukları iyi mekanik özellikler sayesinde birçok alanda kullanılmaktadırlar. Dolayısıyla istenilen farklı mekanik özellikteki metal matrisli kompozit malzemelerin sanayi, uzay, otomobil ve havacılık sektöründeki uygulamalarını görmek mümkündür. Tablo 2.2’de metal matrisli kompozitlerin uçaklarda kullandıkları alanlar ve özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 2. 2. Uçaklarda kullanılan metal matrisli kompozitler ve özellikleri (Parveez ve diğ., 2022).

Matris Malzemesi	Takviye Malzemesi	Özellikleri	Uygulamaları
Titanyum	SiC	Yüksek darbe enerjisi Ağırlık azalışı (32 %)	İniş takımları
Al	Cu - Nb ,	Geliştirilmiş termal direnç	Motorlar
Al alaşımı (LM25)	SiC	Ağırlık azalışı Optimum performans Yakıt maliyetinde düşüş	Uçak kanatları

Tablo 2. 2. (Devam) Uçaklarda kullanılan metal matrisli kompozitler ve özellikleri (Parveez ve diğ., 2022).

Al alaşımı	SiC	Düşük yoğunluk Yüksek Elastite modülü Yüksek termal iletkenlik Titreşim önleme	Yakıt tankları ve fanlarda (F - 16 savaş uçağı)
Al alaşımı (AA6061)	Aktif Karbon	İyi termal direnç	Motorlar
Cu	Nb3Sn	Sürünme direnci Katılık	Motorlar

2.2.2. Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler

Seramik matrisli kompozit malzemeler genellikle yüksek mukavemet ve kırılma tokluğu gerektiren uçak yapılarında kullanılmaktadırlar. Buna ek olarak geleneksel malzemelere göre yüksek sıcaklıklara kadar mekanik özelliklerini koruyabilmektedirler. Erime sıcaklıkları oldukça yüksektir. Ayrıca aşınma dirençleri de diğer malzemelere göre yüksektir. Termal genleşme durumunda termal gerilmeleri önleyecek oldukça yüksek modüle ve düşük süneklığe sahiplerdir. Bu yüzden uçakların gaz türbin parçalarında, pistonlarda, rotorlarda ve yüksek sıcaklık gerektiren bölümlerindeki parçalarda kullanılmaktadırlar. (Parveez ve diğ., 2022). Tablo 2.3'te Uçaklarda kullanılan seramik matrisli kompozitler ve özelliklerini göstermektedir.

Tablo 2. 3. Uçaklarda kullanılan seramik matrisli kompozitler ve özellikleri (Parveez ve diğ., 2022).

Kompozitler	Matris	Takviye Malzemesi	Özellikleri	Kullanım Alanları
Cam-Seramik	Seramik	Cam Elyaf	Düşük ağırlık, Yüksek sıcaklık, Yüksek performans, Azaltılmış yakıt tüketimi	Uçaklarda, Yanma odası, Kompresör, Türbin
C/SiC	SiC	Karbon Elyaf	Yüksek tribolojik özellikler	Uçak frenlerinde
C/SiC	SiC	Karbon Elyaf	Bükülme gerilimi, Kırılma tokluğu	Türbin blade
C/SiC	SiC	Karbon Elyaf	1200 °C derece sıcaklığa dayanım	Uçak frenlerinde

Tablo 2. 3. (Devam) Uçaklarda kullanılan seramik matrisli kompozitler ve özellikleri (Parveez ve diğ., 2022).

SiC	SiC	Karbon Elyaf	Ağırlık azalımı, Sürünme direnci, Gelişmiş yük taşıma, Bakım masraflarında azalma	Uçak frenlerinde
C/SiC	SiC	Karbon Elyaf	Yüksek mukavemet ve oksidasyon direnci	Yapısal komponentler, Fren diskleri, Roket nozzle, Isı değiştirici
C/SiC	SiC	Karbon Elyaf	Düşük CTE, Erozyon direnci, Yüksek mukavemet, Mükemmel termal şok dayanımı	Jet kanatçıklarında
C/SiC	SiC	Karbon Elyaf	Düşük ağırlık ve yoğunluk, Yüksek sürünme direnci	Uçak fren sistemleri
C/SiC	SiC	Karbon Elyaf	Yüksek sürtünme katsayısı ve iyi mekanik özellikler	Uçak frenlerinde
SiC/SiC	SiC	Karbon Elyaf	Yüksek kırılma dayanımı	Motor yanma odasında
SiC/C	SiC	Karbon Elyaf	İyi spesifik özellikler	Flap
ZrB ₂ veya HfB ₂ / SiC veya Al ₂ O ₃	ZrB ₂ veya HfB ₂	SiC veya Al ₂ O ₃	Yüksek oksidasyon direnci	Roketlerde
Oksit/Oksit	Oksit	Oksit	Yüksek performans, Dayanıklılık, Ağırlık azalımı	Subsonik jet motorlarında

2.2.3. Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler

Bu tez kapsamında matris malzemesi olarak kullanılan ve termoplastik bir malzeme olan PPS’de dahil olmak üzere polimer matrisli kompozitler bu başlık altında ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Polimer, çok sayıda monomerin uygun koşullarda girdikleri polimerizasyon tepkimesi sonucunda oluşan, kimyasal bağlar ile bir araya gelmiş bir yapıdır. Polimer Yunanca ‘polis’ ve ‘meros’ kelimeleri birleşmesiyle ortaya çıkmıştır. Polis çok sayıda anlamına gelirken, meros ise parça anlamına gelmektedir. (Karataş, 2019). Polimerler karbon

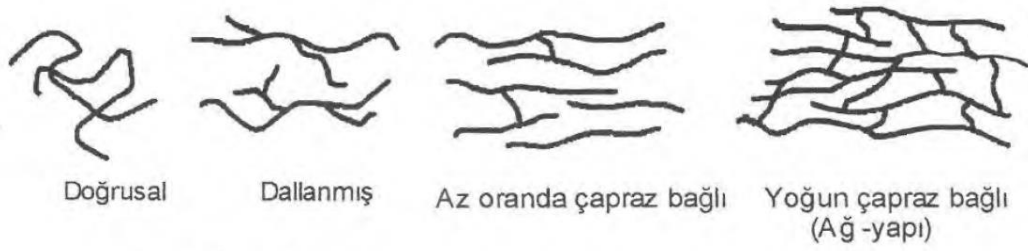
temelli oldukları için atomlar arası güçlü kovalent bağlar bulunurken polimerin yapısını oluşturan moleküller arası bağlarsa zayıftır. Monomer sayısı artıkça oluşan polimerin molekül ağırlığı da artmaktadır. Bu artış ile polimerin mukavemet değeri de artar ancak belli bir seviyeden sonra molekül ağırlığının mukavemet değerini yavaş bir şekilde artırdığı, artış hızının düştüğü gözlenmiştir. (Elmas, 2021). Polimerleri tek bir başlık altında sınıflandırmamız mümkün değildir. Bu yüzden polimerler dört kategori altında toplanmaktadır: (Karataş, 2019; Elmas, 2021).

- Doğal ve Sentetik polimerler
- Monomer çeşitlerine göre polimerler
- Zincir yapılarına göre sınıflandırılan polimerler
- Isı karşısında moleküler bağların yaptığı davranışa göre sınıflandırılan polimerler

Canlılarda veya doğada bulunan polimerlere doğal polimerler denilirken, laboratuvar ortamında geliştirilen polimerlere ise sentetik polimerler denilmektedir. Doğal polimerlere örnek olarak DNA, RNA, kauçuk verilebilir. Laboratuvar ortamında üretilen sentetik polimerlere örnek olarak ise poliamid, polipropilen, polistren verilebilir. Doğal polimerlere yapılan değişiklikler sonucu oluşan yarı sentetik polimerlereyse örnek olarak, selüloz verilebilir. (Saçak, 2002).

Polimerleri monomer türlerine göre sınıflandırdığımızda aynı tür monomerlerin bir araya gelerek oluşturdukları zincir yapısına homopolimer adı verilir. Eğer zincir yapısında iki farklı monomer varsa buna kopolimer, üç farklı monomer çeşidi bulunuyorsa buna da terpolimer denilmektedir. (Saçak, 2002; Beşergil, 2008).

Zincir yapılarına göre polimerler; doğrusal, dallanmış ve çapraz bağlı olarak sınıflandırılmıştır. Zincir yapılarına göre polimerlerin özellikleri de değişmektedir. Doğrusal polimerlerde ana zincir kovalent bağlarla başka monomer grubuna bağlı değildir. Dallanmış polimerlerde ana zincir kendi kimyasal yapısıyla aynı olan monomerlerle kovalent bağ kurar. Dallanmış polimerin başka yapıdaki zincir ile kovalent bağ kurarak birleşmesine ise çapraz bağlı polimer denir. (Birdal, 2008). Şekil 2.6'da polimerlerin zincir yapılarını ve ilişkileri gösterilmektedir.

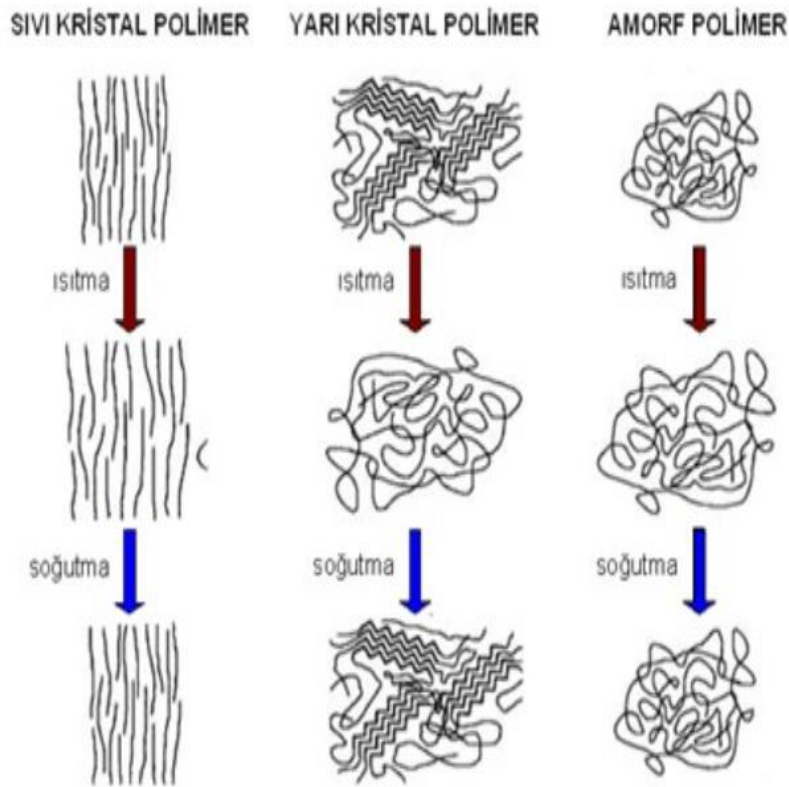


Şekil 2. 6. Polimerlerin zincir yapıları ve özellikleri (Saçak, 2002).

Doğrusal ve dallanmış polimerlerin arasındaki kimyasal bağlar kolayca kopabilir ve böylece polimer eriyebilir ancak aralarında çapraz bağ yapmış polimerler diğer zincirlerle kovalent bağ kurdukları için erimeleri veya çözünmeleri mümkün değildir. (Birdal, 2008).

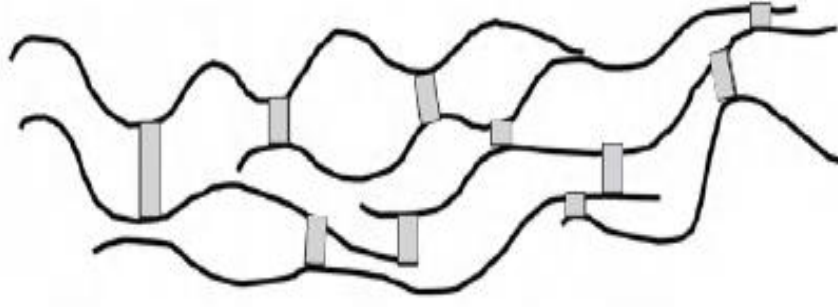
Isı karşısında moleküler bağların yaptığı davranışa göre polimerler üç sınıfa ayrılır. Bunlar termoset, elastomer ve termoplastik polimerlerdir. Bu sınıflandırmayı daha iyi anlamak için polimer malzemelerin zincir türlerini de incelememiz gerekmektedir. Polimer malzemeler zincirlerin düzenine göre amorf ya da kristalin biçiminde bulunurlar. Amorf zincir düzenine sahip polimerlerde çapraz bağ ve kristalleşme gözükmemektedir. Dallanmış zincir yapılarına sahiptir. Amorf yapılar polimere esneklik kazandırırken ayrıca çekme mukavemetini de artırmaktadır. Polimer amorf yapıdan oluşuyorsa camsı geçiş sıcaklığına (T_g) sahiptir. Camsı geçiş sıcaklığı T_g belli bir sıcaklıkta moleküllerin harekete geçmesi olarak tanımlanabilir genellikle amorf yapılarda görülmektedir. T_g polimerlerin mekanik özelliklerini etkilemekte olup T_g aralığında polimerlerin mekanik özellikleri düştüğü için bu aralıkta polimerler kullanılmaz. Kristal zincir yapılı polimerlerin zincirleri düzenli bir şekilde dizilmiştir. Bu yapının oluşması moleküller arası kimyasal bağlara ve zincirin yapısal şekline bağlıdır. Eğer zincirler doğrusal haldeyse kristalleşme oranı oldukça yüksektir. Dallanmış zincirler birbirine çok yaklaşmadığından genellikle amorf bir yapı oluştururlar. Çapraz bağlı zincir yapılarıysa amorf yapıdadır ancak çekme durumunda lineer hale geçtiğinden polimerin kristalleşme oranı artmaktadır. Kristal yapılar daha rijit olup kristalleşmeyle birlikte malzemeye sertlik vermektedir. Kristal yapılı polimerlerin çekme mukavemeti ve sürünme direnci daha yüksek olup yoğunluğu da daha fazladır. Kristal yapılarda erime sıcaklığı (T_m) dikkate alınmaktadır. Yarı kristalin polimerlerde kristal ve amorf oranına göre malzemeye T_g veya T_m etki etmektedir. Bu yapılardaki malzemeler genellikle T_g ve T_m arasında

kullanılmaktadır. Yarı kristalin polimerler adından anlaşılacağı gibi yapısında kristal yapı ile amorf yapıyı da bulundurmaktadır. Amorf bölgeler yapıya tokluk kazandırırken, kristal bölgelerse yapıya rijitlik sağlamaktadır. Özellikleri yapısındaki kristal oranına göre belirlenmektedir. Yarı kristal yapılar da hem T_g hem de T_m dikkate alınmaktadır. (Birdal, 2008; Karataş, 2019; Elmas, 2021; Saçak, 2002; Billmeyer, 1984; Nicholson, 2006; Beşergil, 2008). Aşağıda Şekil 2.7’de Kristal ve Amorf yapıların şekilleri gösterilmektedir. (Beşergil, 2008).



Şekil 2. 7. Kristal ve amorf yapıların şekilleri (Beşergil, 2008).

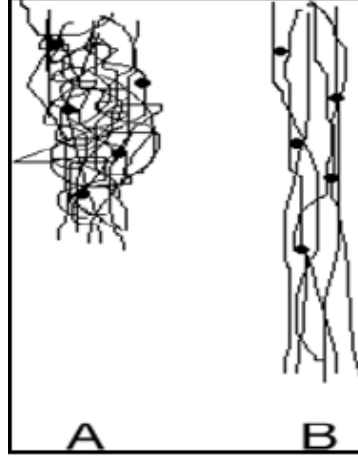
Termosetler yapılarında yüksek miktarda çapraz bağ içeren polimerlerdir. Polimerlerdeki çapraz bağ sayısı arttıkça sertlik ve rijitlik özelliği artmaktadır. Bu nedenle termosetler de sert ve rijit malzemelerdir. Termosetler şekillendirilmeden önce sıvı halde olup zincir yapılarıysa lineer haldedir. (Biron, 2018). Şekil 2.8’deyse termoset malzeme şekillendirildikten sonra oluşan çapraz bağlar gösterilmiştir.



Şekil 2. 8. Termoset malzemede şekillendirildikten sonra oluşan çapraz bağlar (Biron, 2018).

Termoset malzemelere şekil verildikten sonra ısı verildiğinde moleküller arası çapraz bağlar koptuğundan tekrardan kullanılamazlar. Ayrıca çapraz bağlar moleküllerin yer değiştirme hareketini kısıtladığından dolayı sürünme dayanımını artırırlar. Termoset malzemelere örnek olarak poliester ve epoksi verilebilir. Termoset malzemelerin uygulama alanları oldukça geniştir ve havacılık, savunma, denizcilik, spor gibi sıralanabilir. Havacılık alanında farklı termoset malzeme türlerinin genellikle uçakların motorlarında ve yapısal parçalarında kullanıldıkları görülmektedir. (Biron, 2018; Saçak, 2002; Kratz ve Hamerton, 2018)

Elastomerler, esnek ve elastik malzemelerdir. Uygulanan çekme kuvveti ile yüksek oranda uzama gösterirler. Çekme kuvveti ortadan kalktıktan sonra ise aynı hızda eski hallerine geri dönerler. Bu özelliklerini zincir yapılarındaki az sayıdaki çapraz bağa borçludurlar. Isıtıldıklarında yapılarındaki çapraz bağlar geri dönüşümsüz şekilde kopacağından termosetler gibi elastomerlerin de erimeleri mümkün değildir. Düzensiz halde amorf yapıda bulunan elastomerlerin uygulanan kuvvetle birlikte zincir yapıları düzenli bir hal alırken uygulanan kuvvetin kalkmasıyla ilk hallerine dönerler. Şekil 2.9’da elastomerlerin kuvvet uygulanmadan önce ve kuvvet uygulandıktan sonraki zincir yapıları gösterilmektedir. Elastomerlerin eski hallerine deformasyona uğramadan dönmelerinin sebebi ise yapılarındaki çapraz bağlardır. Elastomerler, termosetlere kıyasla daha az çapraz bağ yoğunluğuna sahiplerdir. Ayrıca düşük Young Modülüne sahip olup camsı geçiş sıcaklığı üstündeki sıcaklarda kullanılırlar. (Sucu, 2023).



Şekil 2. 9. A) Elastomerlerin kuvvet uygulanmadan önceki zincir yapısı B) Elastomerlere kuvvet uygulandıktan sonraki zincir yapısı (Sucu, 2023).

Elastomerlere örnek olarak kauçuk ve silikon verilebilir. Genel olarak kullanım alanları otomobil, medikal, havacılık ve spordur. Havacılıkta çoğunlukla uçak kapılarında, motor bileşenlerinde, aerodinamik yüzeylerde ve yangın bariyerlerinde kullanılırlar.

Termoplastik malzemeler lineer veya dallanmış zincir yapılarına sahiplerdir. Şekil 2.10'da termoplastik malzemenin moleküler yapısı gösterilmektedir. Düşük sıcaklıklarda katı halde bulunurken ısıtıldıklarında eriyik hale geçerler. Termoplastik malzemelerde moleküller arası zayıf elektrostatik çekim kuvvetleriyle polimer zincirleri bir arada durur. İçerdikleri zayıf kimyasal bağlar nedeniyle tekrar tekrar ısıtılıp, şekil verilerek kullanılabilirler.



Şekil 2. 10. Termoplastik malzemenin moleküler yapısının şematik gösterimi (Biron, 2018).

Termoplastiklerin zincir yapıları amorf ya da kristalin olabilir. Amorf yapılar yukarıda da anlatıldığı gibi belirli bir düzen halinde bulunmazlar. Bir polimerin yapısı tamamen kristal yapıda olamayacağı için burada bahsedilen kristalin yapı içinde amorf yapıları da içermektedir. Hem amorf hem de kristal yapıları bir arada içeren yapılar da yarı kristalin zincir yapıları olarak tanımlanmıştır. Poli(fenilen sülfid) (PPS), Polieter eter keton

(PEEK), Poliimid (PI), Polipropilen (PP), Poliamid (PA) termoplastiklere örnek olarak verilebilir. Termoplastikler çok geniş kullanım alanına sahip olmakla beraber havacılıkta genellikle çözücülere karşı dayanım gerektiren yerlerde kullanılmaktadırlar. (Biron, 2018; Saçak, 2002; Sucu, 2023; Bironson ve Bironson, 2015).

Yaygın olarak kullanılan kompozit türlerinden olan polimer matrisli kompozitler diğer kompozit türleriyle kıyaslandıklarında oldukça hafiflerdir. Bu özellikleri sayesinde kullanım yerlerinde ağırlıkta düşüş ve buna bağlı olarak da yakıt tüketiminde verimlilik sağlarlar. Bu nedenle polimer matrisli kompozitler askeri uçaklarda, sivil uçaklarda ve helikopter gibi hava araçlarında kullanılmaktadırlar. Polimer matrisli kompozitlerde matris malzemesi termoset veya termoplastik olabilir. Takviye elemanı olarak ise genel olarak elyaf kullanılmaktadır. Kompozitlerin özellikleri matris malzemesi, takviye elemanı, mikro yapı, üretim prosesi ve ara faz olmak üzere birçok parametreye bağlıdır. Polimer matrisli kompozitlerin önemli özelliklerinden birisi de kolay işlenebilir olmalarıdır. Ayrıca bu kompozitlerin mukavemetleri, darbe dirençleri ve yorulma dayanımları iyidir. Korozyona karşı dayanıklıdırlar ve aşınma dirençleri yüksektir. Diğer taraftan polimer matrisli kompozitlerin yüksek mukavemet değerleri düşük sıcaklıklarda geçerlidir ve yüksek sıcaklık uygulamalarında genellikle mukavemet değerleri düşmektedir. Ancak geliştirilen yeni yöntemlerle polimer kompozit malzemelerin kullanım sıcaklığının yükselmesi sağlanmaktadır. Polimer matrisli kompozitlerin iki büyük avantajı vardır. Bunlardan ilki üretilen kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin saf matris malzemesiyle kıyaslandığında oldukça yüksek olmasıdır. Diğer avantaj ise yüksek gerilimlerin olduğu yerlerde elyaf oryantasyonunun sağlanması halinde bu gerilimleri karşılayabilecek mukavemete ulaşabilmeleridir. Polimer kompozit malzemeler her sektörde oldukça fazla kullanılmaktadırlar. Ancak düşük yoğunluklarından dolayı sağladıkları ağırlık azalımı sebebiyle havacılık sektöründeki kullanımları diğer sektörlerle göre daha fazladır. Uçakların gövde bileşenlerinin birincil ve ikincil yapısal elemanlarında kullanımları da giderek artmaktadır. Tablo 2.4'te uçaklarda kullanılan polimer matrisli kompozitlerin çeşitleri, özellikleri ve uygulama alanları gösterilmiştir. (Parveez ve diğ., 2022; Sharma ve diğ., 2019; Karataş, 2019; Thomas, 2012; Biron, 2018).

Tablo 2. 4. Uçaklarda kullanılan polimer matrisli kompozitlerin çeşitleri, özellikleri ve uygulama alanları (Parveez ve diğ., 2022).

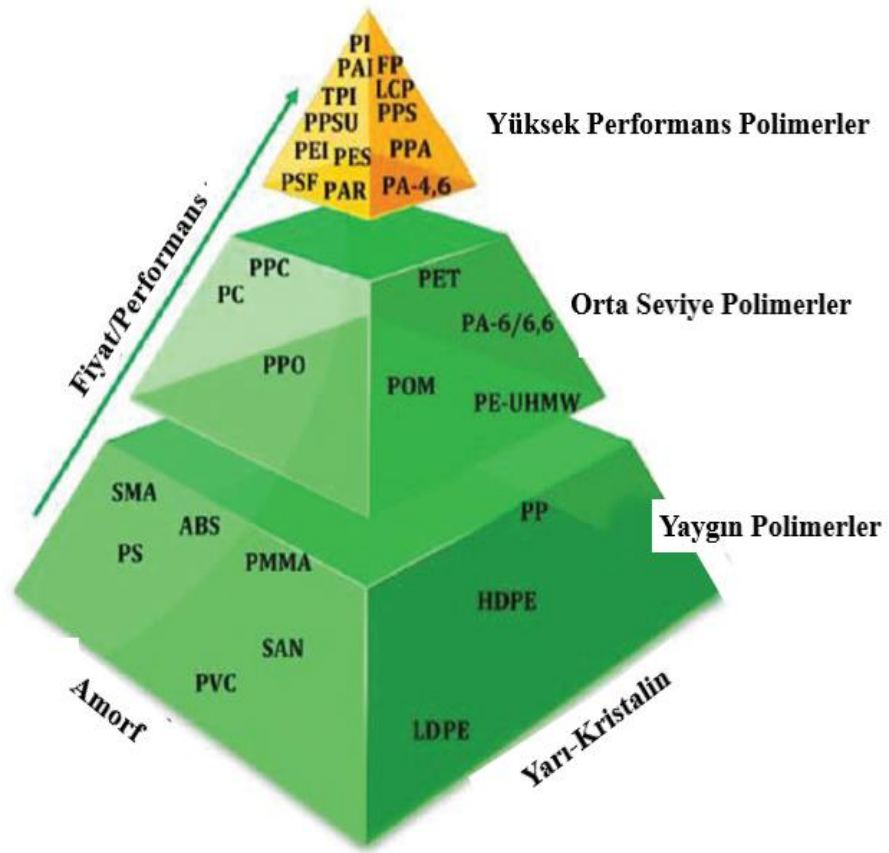
Matris	Takviye Malzemesi	Özellikleri	Kullanım Alanları
Polimer	Hibrit kenaf/Cam elyaf	Yüksek mukavemet, Erozyon direnci	Uçak frenlerinde
Polipropilen	Hibrit bambo/Cam elyaf	Gelişmiş çekme dayanımı ve yorulma dayanımı	Uçak yapısal yapılarında
Polimer	Ramie elyaf	Ağırlık azalımı	Uçak kanat kutuları
Polimer	Karbon elyaf	Dizayn kolaylığı, Yüksek katılık, Yüksek yanma ve alev gecikme, Yorulma direnci, Korozyon direnci, Yüksek mukavemet, Yüksek darbe direnci, Kırılma tokluğu	Uçak frenlerinde, Gövde, Cam framelerinde, Uçak kanatlarında, Rotor, Kuyruk birleşimlerinde, Braketlerde
Polilaktik Asit (PLA)	Cam elyaf	Gelişmiş çekme dayanımı, Gelişmiş eğilme dayanımı	Motor access kapısı, Kanatçıklar
Epoksi Reçine	Elyaf	İyi mekanik özellikler, Zararlı ışıya dayanımı	Uçak yapısal parçalarında
Epoksi Reçine	Karbon elyaf	Oksidasyon direnci, Yanma direnci, Gelişmiş mekanik özellikler	Aviyonik sistemlerde
Epoksi Reçine	Epoksi reçine karbon elyaf/S2-Cam elyaf	Yüksek mukavemet ve kırılma direnci	Uçak yapısal parçalarında
Silikon	Nano-karbon	Farklı sıcaklık arasında mükemmel performans değerleri, Kimyasala direnç, Yüksek elektrik iletimi, Oksidasyon direnci	Uçak yapısal parçalarında

2.2.3.1. Polifenilen Sülfid

Bu başlık altında bu tez çalışmasında kullanılan ve termoplastik bir matris malzemesi olan poli(fenilen sülfid) hakkında genel bilgiler verilmiştir.

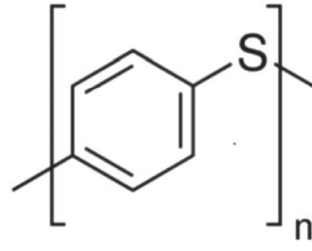
Bir önceki bölümde polimerlerin ısı karşısında sergiledikleri davranış açısından sınıflandırıldıklarında termoplastik, termoset ve elastomer olarak üçe ayrıldıkları anlatılmıştır. Termoplastik malzemeler lineer ve dallanmış yapılarından dolayı ısı işlem aracılığıyla şekillendirilmek suretiyle tekrar tekrar kullanılabilirken termoset ve elastomer malzemeler içerdikleri çapraz bağlardan dolayı ısı işlem uygulandıktan sonra

tekrar kullanılamamaktadırlar. Diğer taraftan termoset ve elastomer malzemelerin termal ve mekanik özellikleri termoplastik malzemelere göre daha gelişmiş olduğundan bu malzemelerin yerine kullanılabilecek yüksek termal ve mekanik özelliklere sahip termoplastik malzemelerin geliştirilmesi önemlidir. Şekil 2.11’de termoplastik malzemelerin fiyat/performans, yarı kristal ve amorf oluşlarına göre sınıflandırılmaları gösterilmiştir.



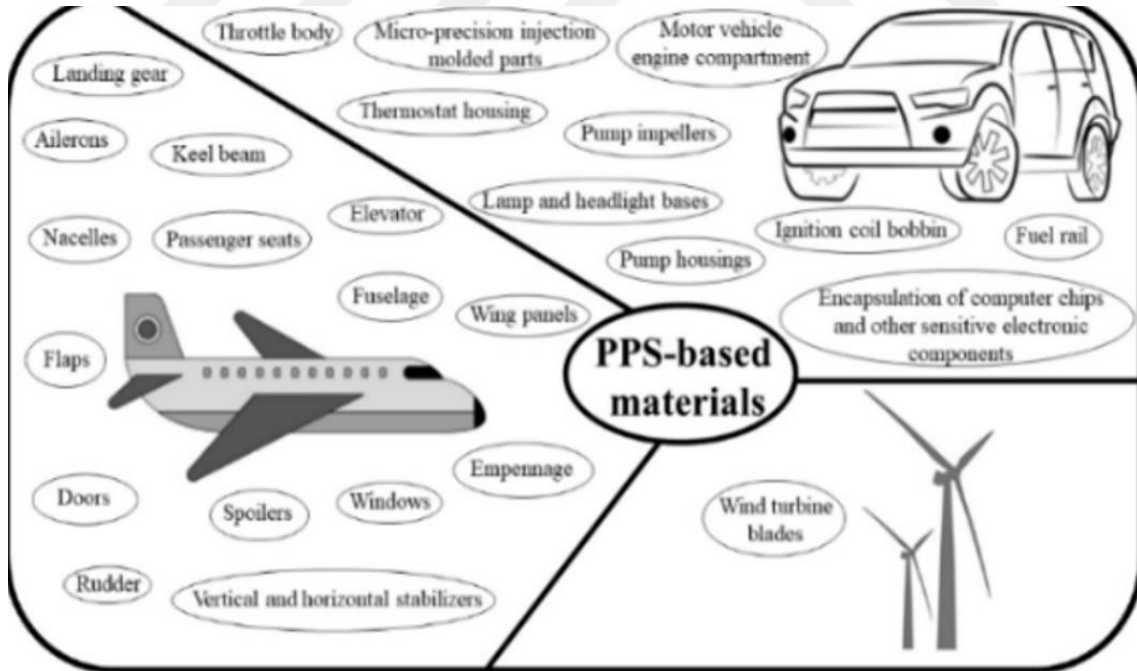
Şekil 2. 11. Termoplastik malzemelerin fiyat/performans, yarı kristal ve amorf oluşlarına göre sınıflandırılmaları (Zuo ve diğ., 2019).

Şekilde de görüldüğü gibi PPS yüksek performanslı bir mühendislik malzemesi olup gösterdiği üstün mekanik ve termal özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir. Yüksek performanslı termoplastik polimerlerin çoğu gibi aromatik gruplar içeren PPS’nin zincir yapısı yarı kristalin olup bulundurduğu aromatik halkalar ve yapısındaki kükürt sebebiyle organik bir polimerdir. (Zuo ve diğ., 2019; Chen ve diğ., 2020). Şekil 2.12’te PPS’nin kimyasal yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2. 12. PPS'in kimyasal yapısı (Chen ve diğ., 2020).

PPS, yüksek sıcaklıklara karşı direnç gösteren, termal kararlılığı yüksek ve 204-232 °C sıcaklıklar arasında kullanılabilen bir polimerdir. Yanmaya ve kimyasallara karşı direnci oldukça iyi olup elektriksel özellikleri de gelişmiştir. Bunların yanı sıra PPS'nin yoğunluğu düşük olup aşınma direnci de oldukça iyidir. PPS, başta havacılık olmak üzere otomobil, kimya, elektrik ve elektronik uygulamaları, rüzgâr türbinleri gibi çoğu alanda kullanılmaktadır. Uçaklarda genellikle yakıt tüketimini azaltmak ve ağırlık azalışı ile faydalı yüke yer açmak için kullanılmaktadır. PPS, uçakların kontrol yüzeylerinde, yolcu koltuklarında, uçakların yapısal elemanlarında kullanılmaktadır. Şekil 2.13'te PPS malzemesinin uygulama alanları gösterilmektedir.



Şekil 2. 13. PPS malzemesinin uygulama alanları (Montagna ve diğ., 2022).

Tüm bu avantajlarına rağmen PPS'nin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. PPS'nin kopma uzaması düşük olup kırılgenliği yüksektir. Ayrıca diğer termoplastik malzemelere

göre yüksek maliyeti de dezavantajlarından bir diğeridir. Bu sebeple saf PPS'ye çeşitli takviye elemanlarının ilave edilmesi suretiyle kompozitlerinin üretilmesi ve böylece mekanik ve termal özelliklerinin gelişmesi, böylece PPS'nin söz konusu dezavantajlarının ortadan kaldırılması amaçlanmaktadır. PPS'nin mekanik ve termal özelliklerini geliştirmek için takviye elemanı olarak genellikle cam elyaf, karbon elyaf, mineral partiküller kullanılmaktadır. (Kızıl, 2019; Montagna ve diğ., 2022; Chen ve diğ., 2020; Zuo ve diğ., 2019; Esatoğlu, 2018).

2.3. Takviye Elemanı

Takviye elemanı, kompozit malzemeyi oluşturan malzemelerden biridir. Kompozit malzemeye gelen yük takviye fazı sayesinde taşınmaktadır. Matris ile takviye fazı arasındaki arayüzey etkileşimi ne kadar iyi olursa gelen yükün takviye fazı aracılığıyla taşınması daha kolay olacaktır. Takviye fazı genel olarak malzemeye uygulanan yükü taşıdığından matris malzemesine göre daha sert ve mukavemeti daha yüksektir. Kompozit malzeme üretilirken seçilen üretim tekniği, takviye fazının türü, takviye fazı ile matris arasındaki arayüzey etkileşimi (ıslanabilirliği), elyafın yönlendirilmesi ve elyaf içeriği kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini etkilemektedir. Kompozit malzemelerde kullanılan elyafın fiziksel biçimi, üretilen yeni malzemenin özellikleri üzerinde çok etkili bir faktördür. Takviyeler temel olarak 3 farklı biçimde bulunmaktadır; parçacıklı, süreksiz ve sürekli elyaflar. Bir diğer sınıflandırma türüye kullanılan takviyenin türüne göre yapılmaktadır. Takviye elemanına göre sınıflandırılan kompozitlerse; (German, 2016; Kızıl, 2019; Reddy, 2018).

- Partikül takviyeli kompozitler
- Tabakalı kompozitler
- Hibrit kompozitler
- Elyaf takviyeli kompozit malzemelerdir.

2.3.1. Partikül Takviyeli Kompozitler

Mikro veya makro yapılardaki malzemelerin parçacıklar halinde matrise eklenmesiyle üretilen kompozit malzemelere partikül takviyeli kompozitler denilmektedir. Bu kompozitlere verilebilecek en iyi örnek betondur. Beton, çimento içine çakıl ve kum

tanelerinin birleşimi olan agrega malzemesinin eklenmesiyle oluşmaktadır. Partikül takviyeli kompozitlerde, parçacıkların eklenmesiyle az da olsa mukavemet artmaktadır ancak elyaf takviyeli ve tabakalı kompozitlere göre mukavemet artışı oldukça azdır. Partikül takviye kompozitler genellikle yüksek aşınma direncinin istenildiği yerlerde, plastiklerde iletkenlik oranının artırılması gereken yerlerde, çimentoya çakıl taşı eklenerek oluşturulan beton gibi sertlik istenilen yerlerde ve yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Partikül takviyeli kompozitlerin üretim maliyeti düşük olup, genellikle enjeksiyon ile kalıplama yöntemi ile kolayca üretilmektedirler. Partikül takviyeli kompozitler izotropik olup anizotropik elyaf takviyeli kompozitlere göre mekanik özelliklerinin belirlenmesi için daha az test gerekmektedir bu da partikül takviyeli kompozitlerin üretim maliyetini azaltmaktadır. Tüm bu avantajlara rağmen partikül takviyeli kompozitlerde partiküllerin matris içinde homojen bir şekilde dağılmadıkları durumda kompozit malzemenin mekanik özellikleri kötüleşmektedir. Mekanik özelliklerin bozulmasının nedeni özellikle homojen dağılımın olmadığı, partiküllerin aglomere halde bulunduğu (topaklandığı) partikül takviyeli kompozitlerde takviye-matris etkileşimini sağlayacak partikül yüzey alanının düşük olması ve partiküllerin uygulanan yükü taşımakta yetersiz kalmalarıdır. (Asi, 2018; Rajak ve diğ, 2019; German, 2016; Kızıl, 2019; Reddy, 2018).

2.3.2. Tabakalı Kompozitler

Farklı elyaf dizilimlerinde oluşturmuş tabakaların birleşimiyle meydana gelen yapılara tabakalı kompozit malzemeler denilmektedir. Tabakaların birleşimiyle yüksek mukavemet, yüksek sıcaklıklara dayanım, korozyona karşı direnç ve hafiflik gibi özellikler elde edilmektedir. Uçakların kanat ve kuyruk gibi yapısal parçalarında yüzey kaplama malzemesi olarak tabakalı kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Tabakalı kompozit malzemelere örnek olarak sandviç yapılı kompozitler verilebilir. (Tsai, 2018; İbrahim, 2022).

Sandviç yapılı kompozitler iki kompozit tabaka arasına daha hafif bir çekirdeğin yerleştirilmesiyle oluşturulan yapılardır. Çekirdeğin dayanım özellikleri tabakalarinkine göre düşüktür. Ortaya çıkan yapısal malzeme eğilmeye karşı oldukça dirençlidir. Sandviç kompozitler genellikle üstün mekanik özellikleri sayesinde havacılık, savunma sanayi,

denizcilik ve uzay uygulamaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır. (Tsai, 2018; İbrahim, 2022; Asi, 2018; Rajak ve diğ, 2019; Chawla, 2012).

2.3.3. Hibrit Kompozitler

Hibrit kompozit, matris malzemesine en az iki veya daha fazla türde takviye elemanının eklenmesiyle üretilen yeni nesil bir kompozit malzeme türüdür. Hibrit kompozitlerde, birden fazla türde takviye elemanın eklenmesi ve bu takviye malzemelerinin birbirlerinin eksik/zayıf yönlerini tamamlaması sebebiyle geleneksel kompozit malzemelere göre daha yüksek mekanik özellikler elde edilir. Örneğin elyaf takviyeli bir kompozit malzemedede, elyaf-matris arayüzey etkileşimi iyi olmadığı durumda yapıda kusurlar ve çatlaklar meydana gelir. Bu kompozit malzemeye partikül ilavesiyle üretilecek hibrit kompozitlerde ise ortaya çıkacak hibrit etki sayesinde elyaf ve matris etkileşimi artacak olup kompozitin mekanik özellikleri de iyileşecektir. Aynı zamanda partikül takviyeli bir kompozit malzemeye elyaf takviyesiyle, yük taşıma kabiliyeti yetersiz olan partiküllerin bu zayıf özelliğinin elyaf tarafından telafi edilecek olması üretilen kompozit malzemenin özelliklerinin iyileşmesini sağlayacaktır. Dolayısıyla, hibrit etkinin kompozit malzemelerde ortaya çıkan sınırlamaları azalttığı ve daha üstün malzeme özelliklerine ulaşıldığı söylenebilir. (Kızıl, 2019; Şükür, 2020; Karşı, 2014).

2.3.4. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler

Elyaf takviyeli kompozitler, matris malzemesine sürekli veya kırılmış (süreksiz) elyaf ilavesiyle üretilmektedir. Diğer takviye çeşitlerine göre sağladığı yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve malzemeye verdiği sertlik gibi özellikler nedeniyle elyaf takviyeli kompozitlerin kullanımı daha yaygındır. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler üstün özellikleri nedeniyle mühendislik uygulamalarında tercih edilmekte olup tercih edilme sebepleri üç maddede açıklanabilir: (Chawla, 2012; Nijssen, 2015).

1. Bir yapı, mikro yapısal olarak ne kadar küçük olursa malzemedede oluşacak kusurlar da o kadar az olmaktadır. Elyaf boy-çap oranına bakıldığında çapı artan elyafın kompozit malzemenin mukavemetini azalttığı, çapı azalan elyafın ise kompozit malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmektedir.

2. Elyaf takviyeli kompozitlerde elyafın sahip olduğu yüksek en/boy oranı sayesinde kompozit malzemeye gelen yükün büyük kısmının matris aracılığıyla elyafa aktarılması ve elyaf tarafından taşınması sağlanmaktadır.
3. Bir elyafın modül değeri veya sertliği düşük ve çapı düşük olduğunda esneklik oranı aynı oranda artmaktadır. Elyaf esneklik oranı ise kompozit malzeme üretiminde çeşitli avantajlar sağlamaktadır.

Elyafta en yüksek mukavemet değerine boylaması bir düzlemde dizildiklerinde ulaşılmaktadır ve bu durum metallerde olmayan anizotropik özelliğin kompozit malzemede ortaya çıkmasına olanak sağlamaktadır. Bu yüzden kompozit malzemede elyafın geometrisi ve yönlenmesi oldukça önemlidir. Kompozit malzemede elyafın yönlenmesi değiştirilerek anizotropik özelliğin etkisiyle farklı mekanik özelliklerde kompozit malzemeler üretilebilmektedir. (Chawla, 2012).

Kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılan bazı elyaf türleri şunlardır:

- Karbon Elyaf (CF)
- Cam Elyaf (GF)
- Aramid Elyaf (Kevlar)
- Bor Elyaf
- Bazalt Elyaf (BF)

Karbon, tartışmasız doğada bulunan en üstün özelliklere sahip elementtir. Karbon atomlarının kendi aralarında da bağ yapabilmeleri çeşitli formlarda bulunabilmelerini sağlar. Grafen, karbon elyaf, fulleren, karbon nanotüp gibi üstün özellikli karbon temelli malzemeler, karbon atomlarının kendi aralarında yaptıkları kimyasal bağlar sayesinde üretilmektedir. Karbon temelli bu malzemeler içerisinde olan karbon elyaf da ağırlıkça %92 oranından fazla karbon içeren, lif şeklinde olan ve sahip olduğu üstün mekanik özellikler ve kimyasal direnç sayesinde diğer elyaf türleri içerisinde öne çıkan bir elyaf türüdür. Çeliğe kıyasla oldukça hafif ve spesifik dayanımı yüksek bir malzeme olan karbon elyaf, yüksek çekme dayanımı, sertlik, yorulma direnci gibi önemli özelliklere sahiptir. Diğer elyaf türleriyle karşılaştırıldığında en güçlü özelliği ise yüksek elastik modülü özelliğidir. Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler çok çeşitli sektörlerde kullanılmakta olup havacılıkta ise uçakların gövde, kanat, kuyruk gibi birincil yapısal

parçalarının yapımında kullanılmaktadır. (Chand, 2000; Chawla, 2012; Shirvanimoghaddam ve diğ., 2017).

Cam elyaf, çeşitli üretim teknikleriyle üretilen ve birçok uygulamada kullanılan en eski elyaf türlerinden biridir. Cam elyaf takviyeli kompozitler, yüksek mukavemet, kimyasal direnç ve sertlik gibi özellikleri sayesinde havacılık, elektronik ve otomotiv uygulamalarında sıkça kullanılmaktadırlar. Kullanılan üretim yöntemi ile hammadde ve kimyasallara bağlı olarak farklı özelliklere sahip cam elyaf türleri üretilmektedir. E-Cam en çok kullanılan cam elyaf türü olup iyi yalıtım özelliğine sahiptir. C-Camı yüksek kimyasal dayanım gerektiren durumlarda kullanılmaktadır. S-Camı ise yüksek maliyetli bir cam olup havacılık endüstrisinde oldukça tercih edilmektedir. (Sathishkumar ve diğ., 2014; Karataş ve Gökkaya, 2018).

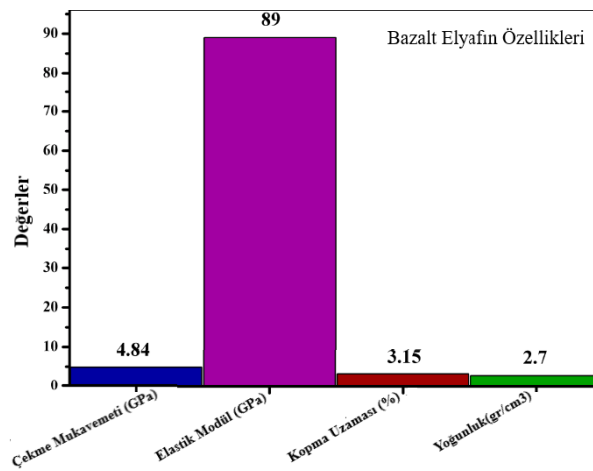
Aramid elyaf (ticari adıyla Kevlar), poliamiddan üretilen bir elyaf türüdür. Aramid elyaf, hafifliğinin yanı sıra yüksek mukavemet, darbe direnci ve yorulma direnci özelliklerine sahip yüksek performanslı bir elyaf türüdür. Aramid elyafın en sık kullanıldığı alanlar kurşun geçirmez yelek yapımı, gemi gövdesi yapımı ve sivil yapıların güçlendirilmesi çalışmalarıdır. Aramidin meta-aramid ve para-aramid olmak üzere iki çeşidi mevcuttur. Meta-aramid bazlı elyaf ısıya karşı yüksek direnç ve yanmama özellikleri nedeniyle koruyucu giysi ve yalıtkan malzeme yapımında kullanılmaktadır. Para-aramid bazlı elyaf ise üstün mekanik özellikleri sayesinde mühendislik malzemelerinin yapımında kullanılmaktadır. Aramid elyaf kimyasallara karşı dirençli olmasına rağmen asit ortamında kullanılamamaktadır. Aramid elyaf düşük basma dayanımı nedeniyle uçaklarda karbon elyaf ile hibrit şekilde kumanda yüzeylerinde kullanılmaktadır. (Prashanth ve diğ., 2017; Chawla, 2012; Nijssen, 2015).

Bor elyaf, ince bir flamanın üstüne bor kaplanarak üretilen ve bu yönüyle başlı başına bir kompozit malzeme olan bir elyaf türüdür. En belirgin özelliği yüksek çekme gerilimine sahip olmasıdır. Bükülmeye karşı oldukça dirençli olduğundan yüksek basma dayanımı özelliğine de sahiptir. Yüksek maliyeti nedeniyle bor elyaf kullanımı çok yaygın değildir ancak havacılık gibi performansa önem verilen sektörlerde gerekli yerlerde bor elyaf kullanılmaktadır. (Taj ve diğ., 2007; Chawla, 2012; Nijssen, 2015).

2.3.4.1. Bazalt Elyaf

Bazalt elyaf bu tez çalışmasında takviye malzemesi olarak kullanıldığından diğer elyaf türlerinden ayrı olarak bu başlık altında anlatılmıştır.

Bazalt, erimiş lavların katılaşmasıyla oluşan gri renkte bir kaya biçimidir. İlk olarak 1923 yılında Amerikalı bilim insanları tarafından bulunup geliştirilmiştir. Bazalt elyaf, mekanik özellikleri, çevreci oluşu ve hammadde olarak temin edilmesinin kolay olması sebepleriyle son zamanlarda araştırmacıların dikkatini çekmeye başlamıştır. Maliyet/performans temelinde değerlendirildiğinde bazalt elyaf cam elyaf ile karbon elyafın arasındadır. Dünya çapında bazalt rezervi en zengin ülke Rusya'dır. Genellikle endüstriyel alanlarda, sivil yapılarda ve onların güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bazalt elyaf üretilen son malzemeye yüksek mekanik özellikler, hafiflik ve alev geciktiricilik sağlamaktadır. Bu özelliklerin çoğu karbon elyaf kullanımı ile de sağlanabilmesine rağmen karbon elyaf kompozit malzemelerde ayrıca kırılabilirliğe ve strese karşı düşük dayanıma sebep olmaktadır. Karbon elyafın bu zayıf özelliklerinden dolayı bazı uygulamalarda bazalt elyaf tercih edilmektedir. Bazalt taşının 1500-1700 °C'de eritilip çekme ağızlarından geçirilmesiyle üretilen bazalt lifleri diğer kimyasallarla reaksiyona girdiklerinde çevreye zehirli gaz salınımı yapmazlar. Yüksek modül, mukavemet, sıcaklık dayanımı, ısıl stabilite ve kimyasal direnç özelliklerine sahip inorganik bir elyaf olan bazalt elyafın işlenmesi kolaydır, toksik değildir ve çevre dostudur. Şekil 2.14'te bazalt elyafın mekanik özellikleri gösterilmektedir. (Dhand ve diğ, 2015).



Şekil 2. 14. Bazalt elyafın mekanik özellikleri (Dhand ve diğ, 2015).

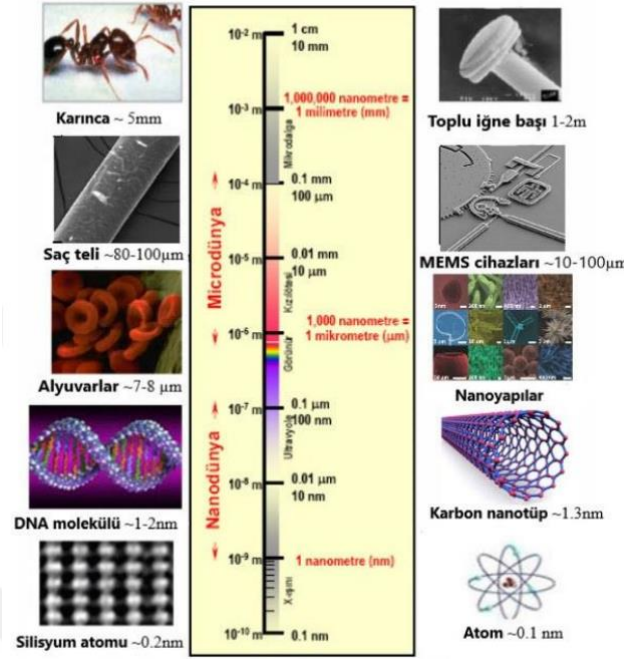
Yapılan çalışmalarda, E-Glass türü cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerle kıyaslandığında bazalt elyaf takviyeli polimer kompozitlerin basınç dayanımı ve Young modülü özelliklerinin daha iyi olduğu ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca bazalt elyaf takviyeli kompozitlere nanopartiküller eklenmesiyle kompozit malzemenin yüzey özelliklerinin ve mekanik özelliklerinin geliştiği de gözlemlenmiştir. Daha hafif, daha dayanıklı ve daha düşük maliyetli bir son ürün elde edilme potansiyeli sebebiyle bazalt elyafın en uygun kullanım yöntemlerinden biri polimer matrise karbon elyafla hibrit takviye edilmesidir. Aşağıda Tablo 2.5'te bazalt, cam ve karbon elyaf türlerinin seçilmiş özelliklerinin karşılaştırılması yer almaktadır. (Dhand ve diğ., 2015; Singha, 2012; Lach ve diğ., 2021).

Tablo 2. 5. Bazalt, cam ve karbon elyafların seçilmiş özelliklerinin karşılaştırılması (Lach ve diğ., 2021).

Özellikler	Bazalt Elyaf	Karbon Elyaf	Cam Elyaf (E-Tipi)
Elyaf Çapı (μm)	6-21	5-15	6-21
Yoğunluk (g/cm^3)	2,7	1,6-2,0	2,54
Çekme Gerilmesi (GPa)	3,0-4,8	3,5-6,0	3,1-3,8
Kopma Uzaması (%)	3,1	1,5-2,0	4,7
Elastite Modülü (GPa)	90-100	72,5-75,5	83-86
Sıcaklık Dayanımı ($^{\circ}\text{C}$)	-260-750	-50-700	-50-380

2.4. Nanoteknoloji

Nanoteknoloji, çok disiplinli ve disiplinler arası uygulama alanına sahip olan, malzeme üretiminden elektroniğe, optikten mekaniğe birçok alanda metrenin milyarda bir büyüklüğündeki atom ve moleküllerin ortaya çıkardığı ve 1-100 nm arasında üretilen nano yapıların özelliklerinin incelendiği bir alandır. 100 nm'nin altındaki yapılardaki mekanik, elektriksel, kimyasal özellikler mikro ve makro boyutlardaki malzemelerle kıyaslanamayacak kadar gelişmiştir. Bunun nedeni üretilen nano boyuttaki malzemelerin en az bir boyutlarının nm ölçeğinde olması durumunda artan yüzey alanları sayesinde mekanik, optik, elektriksel özelliklerinin de değişmesidir. Üretilen nano boyuttaki malzemelerin üstün özelliklerinin bir diğer nedeni de boyutları küçüldükçe atom çapındaki özelliklere yaklaşılmasıdır. Şekil 2.15'te nanometre boyutunun diğer boyutlara göre sınıflandırılması gösterilmektedir. (Değirmenci, 2019).

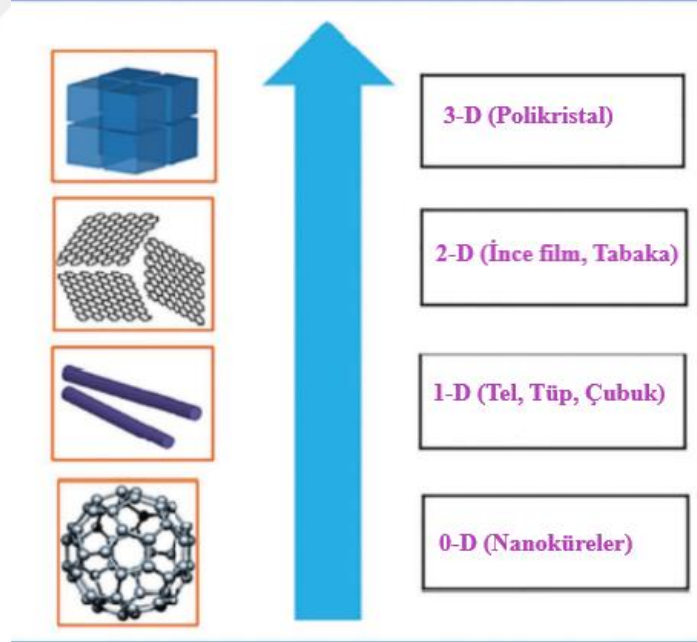


Şekil 2. 15. Nanometre boyutlarının diğer boyutlara göre sınıflandırılması (Değirmenci, 2019).

Nanoteknolojinin ilk ortaya çıkışı 4. yy.'da Romalılar tarafından kullanılmış ve antik dünyanın en eski cam işleme örneklerinden biri olan Lycurgus Kupası ile olmuştur. Bu kupanın özelliği ışık altında renk değiştirmesidir. Bu kupanın gizemi ancak 1990 yılında çözülmüştür. İçerisinde bulunan 50 ile 100 nm boyutlarında altın ve gümüş parçacıklarından dolayı ön taraftan ışık geldiğinde yeşil arka taraftan ışık geldiğindeyse kırmızı renkte görünmektedir. Michael Faraday ise 1857 yılında küçük altın parçacıkları içeren kolloidal karışımların elektriksel ve optik özelliklerini araştırdığı çalışmayla bu alana oldukça büyük katkı sağlamıştır. Nanoparçacıkların boyutlarını ise ilk defa 1925 yılında Richard Zsigmondy ölçmüş ve nanometre kavramını ilk defa kullanmıştır. Bu alanın ilerlemesini sağlayan bir diğer bilim insanı olan Richard Feynman 29 Aralık 1959 yılında Amerika Fizik Cemiyeti'nde yaptığı "Aşağıda Daha Çok Yer Var" başlıklı konuşmada atom ve molekül düzeyinde üretim yapılabileceğini ve Van der Waals bağlarının bu düzeylerde çok daha büyük önem kazandığını, yer çekiminin etkisinin azaldığını ifade etmiştir. Gerd Binnig ve Heinrich Rohrer tarafından 1981 yılında icat edilen taramalı tünelleme mikroskobu ile nano boyuttaki atomlar görüntülenmiştir. Nano boyuttaki atomları görüntülemek için geliştirilen bir diğer cihazsa atomik kuvvet mikroskobudur. 1985 yılında Richard E. Smalley, Harold W. Kroto ve Robert F. Curl tarafından karbonun bir allotropu olup elmas kadar sert bir yapıya sahip olan 60 karbonlu

(C₆₀) formu keşfedilmiştir. 1nm büyüklüğündeki C₆₀, çelikten mukavemet olarak daha güçlü olup ısı ve sıcaklık geçirgenliği de oldukça iyidir. Ayrıca bu malzeme plastiğe kıyasla oldukça hafiftir. Karbon nanotüplerse Sumio Iijima tarafından 1991 yılında keşfedilmiş olup, C₆₀'a benzer şekilde mekanik özellikleri, ısı ve elektrik iletkenliği gibi özellikleri de benzer oranda gelişmiştir. (Ersöz ve diğ., 2018).

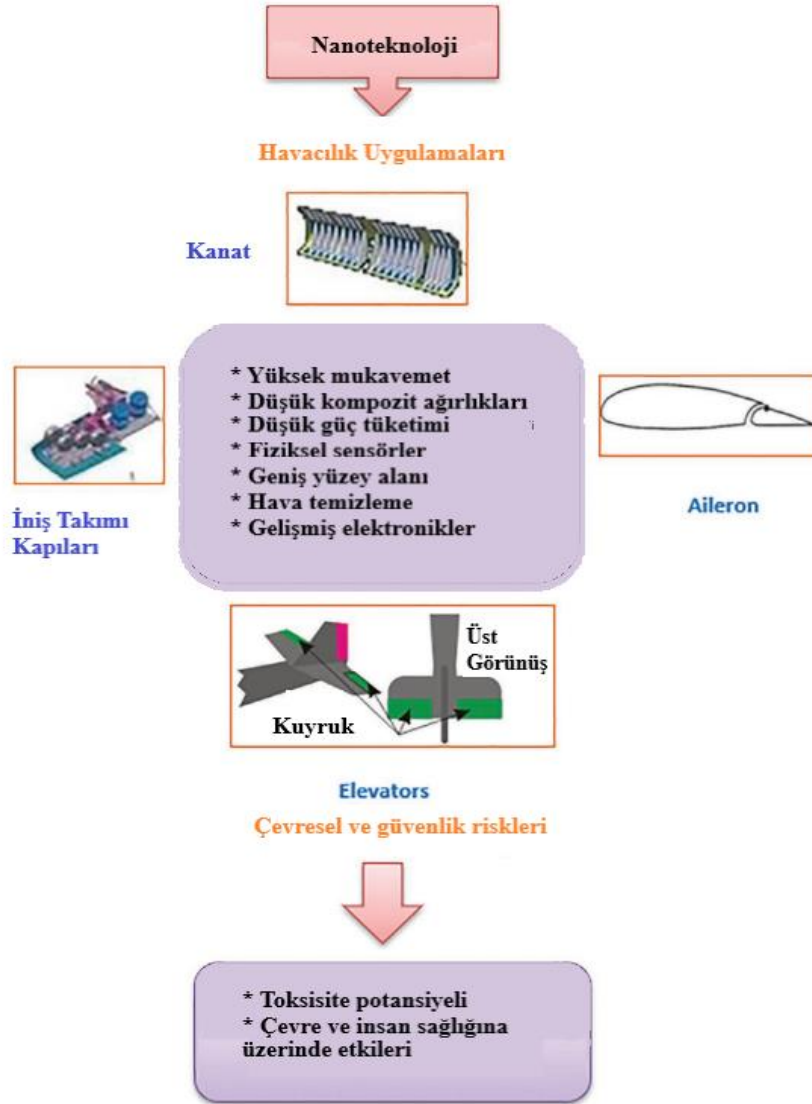
Nanomalzemelerde boyut oldukça önemlidir. Tasarlanan malzemelerin çoğunun özellikleri boyutuna göre değişmektedir. Bunun nedenlerinden biri en az bir boyutu nano ölçeğe getirilen nano malzemede yüzey alanının artmasıdır. Artan yüzey alanı nano malzemenin kimyasal reaksiyona girme eğiliminin artmasına ve bu da malzemenin mekanik, elektriksel ve ısıl davranışının değişmesine sebep olmaktadır. Bir diğer neden ise kuantum faktörü olarak gösterilmektedir. Atomik seviyede, kuantum etkileri, nano malzemelerin özelliklerinin gelişmesinde çok büyük önem taşımaktadır. Bir malzemenin nano malzeme olarak adlandırılabilmesi için bileşenlerden birinin en az bir dış ölçüsünün nano boyutta olması gerekmektedir. Şekil 2.16'da Nanomalzemelerin boyutlarına göre sınıflandırılmaları gösterilmektedir. (Veeman ve diğ., 2021; Ersöz ve diğ., 2018).



Şekil 2. 16. Nanomalzemelerin boyutlarına göre sınıflandırılması (Veeman ve diğ., 2021).

Sahip oldukları üstün özellikler sebebiyle nano malzemeleri her sektörde olduğu gibi havacılık sektöründe de görmek mümkündür. Havacılık alanında tercih edilmelerinin

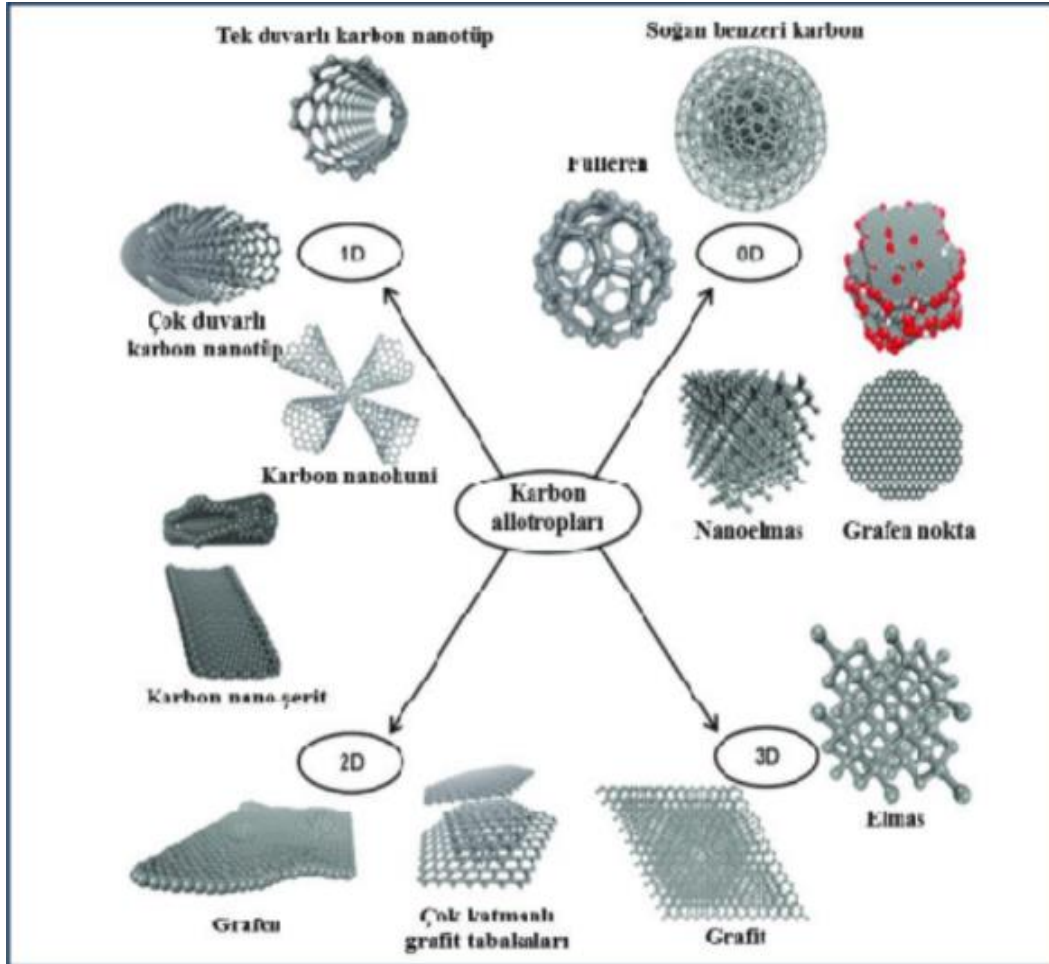
başlıca sebebi düşük yoğunlukları sebebiyle sağladıkları ağırlık azalışı ve dolayısıyla yakıt maliyetinde yarattıkları düşüştür. Ayrıca kaplama malzemelerinde kullanıldıkları durumda malzemede oluşacak herhangi bir hasar durumunda tamirin geleneksel malzemelere göre daha kolay olduğu bilinmektedir. Nano malzemeler sayesinde süper iletken malzemelerin üretilmesiyle haberleşme sistemlerinin verimliliğinin de artması sağlanmıştır. Bu sebeple nano malzemeler hava araçlarının yapısal elemanlarında, motor parçalarında, haberleşme sistemlerinde kullanılmaktadır. Şekil 2.17’de Nanomalzemelerin etkilerini ve uçakta kullanıldıkları yerleri göstermektedir. (Veeman ve diğ., 2021).



Şekil 2. 17. Nanomalzemelerin etkileri ve uçakta kullanıldıkları yerler. (Veeman ve diğ., 2021).

2.5. Karbon Temelli Yapılar ve Özellikleri

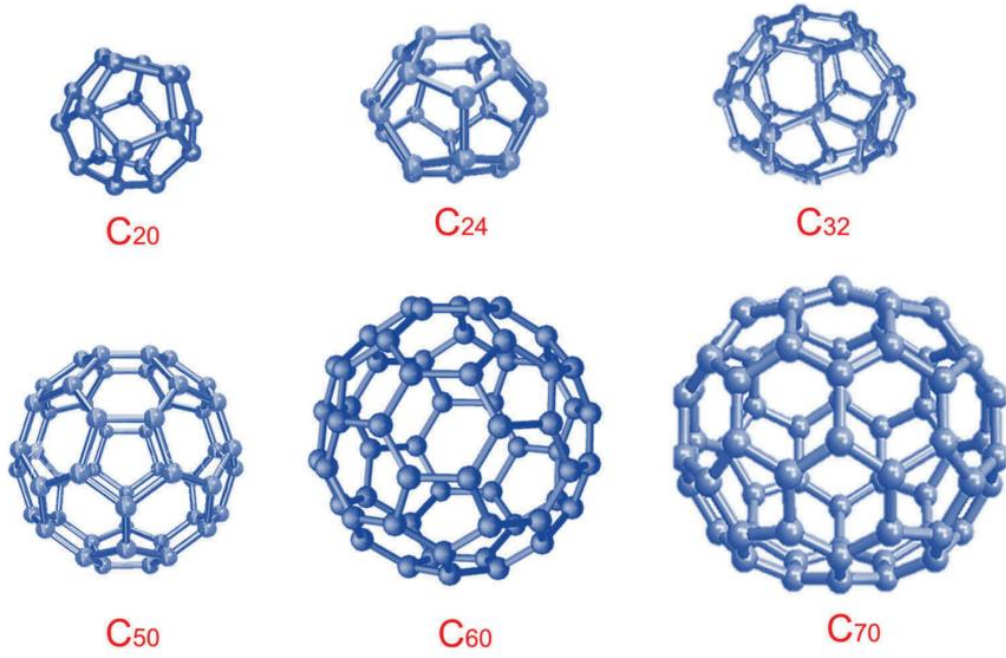
Karbon elementi yaşam için eşsiz ve vazgeçilmezdir. Evrendeki en yaygın altıncı element olan karbon ayrıca insan vücudunda da oksijende sonra en fazla miktarda bulunan element olma özelliğindedir. Karbon atomları hem kendi aralarında hem de diğer elementlerle kolay bağ yapabildiklerinden doğada birçok farklı şekilde bulunmaktadır. Karbon atomlarının farklı şekillerde bir araya gelerek oluşturdukları çeşitli yapılara karbon yapılar denilmektedir. Karbonun organik bileşiklerin ve biyomoleküllerin dışında çeşitli yapıların içindeki varlığı 200 yıl önce gösterilmiştir. Bunlar üç boyutlu olan elmas ve grafitir. Her ikisi de karbon atomlarından oluşmasına rağmen farklı özelliktedirler. Öyle ki elmas sert ve yalıtkanken grafit tam tersine iletken olup yumuşak bir malzemedir. Bu farklılık karbon atomlarının bağlanma şeklinden kaynaklanmaktadır. Öyle ki elmas tetrahedral sp^3 karbon atomlarından oluşurken grafit Van der Waals bağları aracılığıyla bir arada duran grafen tabakalarından oluşmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte karbon bağlarının oluşturduğu farklı yapılar da gün yüzüne çıkmaya devam etmektedir. 1985 yılında fulleren olarak bilinen C_{60} molekülü bulunmuştur. Bu molekül altıgen ve beşgen olarak dizilen 60 sp^2 karbondan oluşmakta olup küresel bir biçimdedir. Karbon nano malzemelerin gelişimi tek boyutlu karbon nanotüplerin (CNT) katkısıyla devam etmiştir. CNT boyutları ve şekli nedeniyle fullerenden tamamen farklıdır. En son izole edilip bulunan karbon bileşiği ise grafitten türetilmiş iki boyutlu grafendir. Son yıllarda tek katmandan veya birden fazla katmandan oluşan ve iyi mekanik ve elektro optik özellikler sergileyen grafene olan ilgi ve bu alanda yapılan çalışmalar artmıştır. Fullerenler, karbon nanotüpler, grafenler olağanüstü termal, elektriksel, optik ve mekanik özelliklerinin yanı sıra yüksek en boy oranları ve çok yüksek spesifik yüzey alanları nedeniyle en çok göze çarpan karbon nanoyapılarıdır. Bu özellikleri sayesinde kompozit uygulamalarında karbon nano yapıların kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Aşağıda gösterilen şekil 2.18.'de formları farklı olan nano karbon yapıların boyutlarına göre sınıflandırılması gösterilmektedir. (Değirmenci, 2019; Georgakilas ve diğ., 2015; Ersöz ve diğ., 2018; Yıldız, 2019).



Şekil 2. 18. Formları farklı olan nano karbon yapıların boyutlarına göre sınıflandırılması. (Değirmenci, 2019).

2.5.1. Fulleren ve Özellikleri

Fullerenler en az 20 veya üstü karbonun bir araya gelip beşgen veya altıgen halkalar içerecek şekilde karbon moleküllerin kafes şeklinde oluşmasıyla ortaya çıkmıştır. n bir tam sayı olmak üzere C_{20+n} şeklinde kapalı formüle sahip yapılardır. C_{60} fullerenin en yaygın kullanılan formudur. Diğer nano karbonlar gibi fulleren de polimer takviyeli kompozitler için takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Fullerenlerin polimerlere takviye elemanı olarak katılmalarıyla üretilen kompozit malzemelerde Young modülü, mekanik özellikler, camsı geçiş sıcaklığında artış gözlenmektedir. Altıgen sayısına bağlı olarak farklı şekillerde fullerenler üretilebilir. Şekil 2.19'da farklı altıgen sayısındaki fulleren çeşitleri gösterilmektedir. (Georgakilas ve diğ., 2015; Kausar, 2020)



Şekil 2. 19. Farklı altıgen sayısına bağlı Fulleren çeşitleri (Kausar, 2020).

Fullerenler güneş pilleri ve optik cihazlar gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Havacılık alanında ise fullerenler, yangın geciktirici özellikleri sebebiyle, uçak gövdesi dış kaplamalarındaki kompozit malzemelerin takviyesinde yıldırımdan korunmak amaçlı kullanılırlar.

2.5.2. Karbon Nanotüp (CNT) ve Özellikleri

Karbon nanotüpler grafenden birkaç yıl önce keşfedilmiş, bir boyutlu, altıgen kafes biçiminde, grafene benzer şekilde sp^2 hibritleşmesi yapmış ve iyi elektriksel ve mekanik özelliklere sahip malzemelerdir. Basit bir karbon nanotüp tek grafen duvarının silindirik şekilde sarılmasıyla oluşmuştur. Tek duvarlı nanotüpler (SWNT) içi boş bir duvara sahiplerdir. Çapları 0,4-2 nm olarak değişmekte olup uzunlukları da birkaç mikrometredir. Grafen duvarlarının sayısına bağlı olarak çift duvarlı (DWNT) veya çok duvarlı (MWNT) karbon nanotüpler üretilebilir. CNT'ler çözücüde dağılmayıp yapısındaki Van der Waals bağları sayesinde güçlü bir şekilde bir arada tutunurlar. Nanotüplerin oluşumu bir grafen tabakasının belirli açı ve doğrultularda yuvarlanması olarak tanımlanmaktadır. Üretilen CNT'lerin çoğunluğu kompozit malzemelerde ve ince filmlerde kullanılmaktadır. CNT'ler aynı zamanda polimer matrisli kompozitlerde dolgu ve/veya takviye malzemesi olarak kullanılarak kompozitin elektriksel ve mekanik

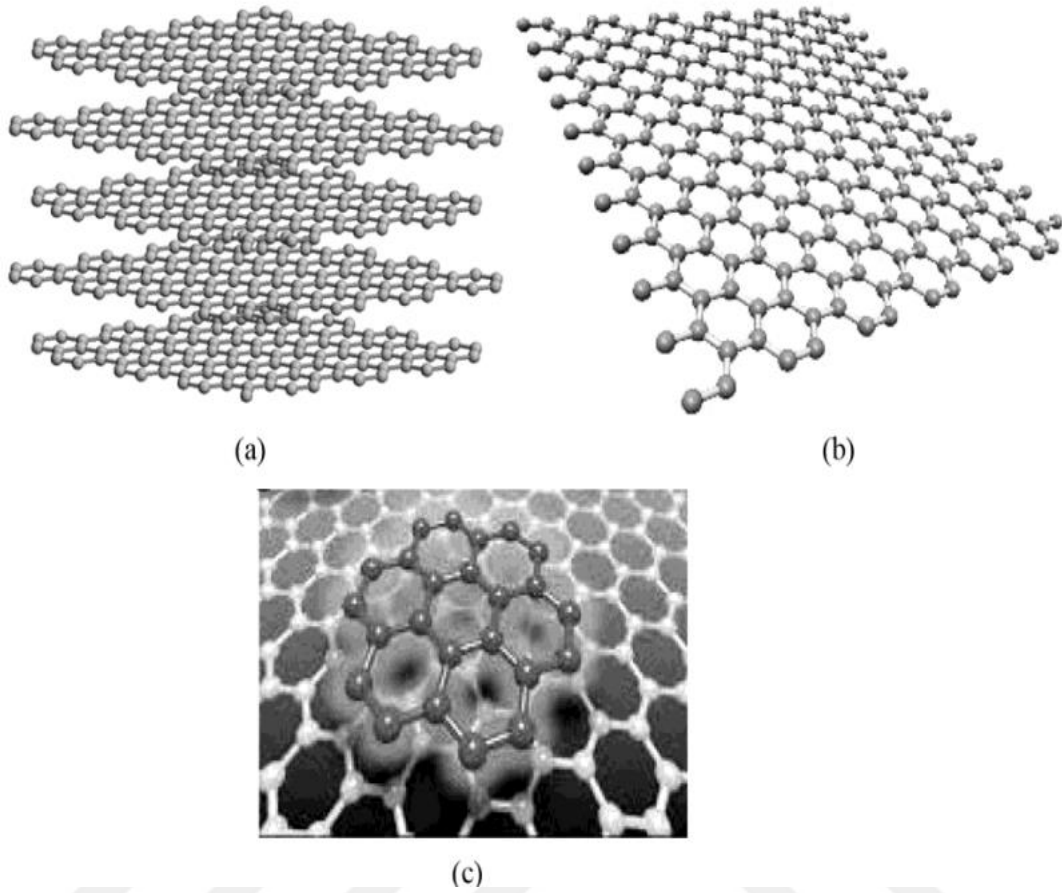
özelliklerini arttırmaktadır. Genel olarak elektronik ve enerji alanında kullanılan CNT'ler havacılık alanındaysa uçaklarda kullanılan kompozit yapılarda, uçakların buzlanma önleyici sistemlerinde ve haberleşme sistemlerinde kullanılmaktadırlar. Örneğin F-35 uçaklarının kanat uçları CNT içeren nano malzemeler kullanılarak geliştirilmiştir. (Joshi ve Chatterjee, 2016; Veeman ve diğ., 2021; Değirmenci, 2019)

2.5.3. Grafen ve Özellikleri

Grafen de karbon nanotüp ve fulleren gibi farklı alanlarda kullanılmak üzere malzeme geliştirilmesine katkı sağlayan karbon temelli bir nano malzeme çeşididir. Grafen, karbon atomlarının hegzagonal şekilde bir araya gelerek oluşturduğu iki boyutlu bir malzemedir. Grafen üstün elektriksel ve termal iletkenliği ve mekanik özellikleriyle bilinen bir malzemedir. Kurşun kalemin hammadde olan grafit birden fazla grafen tabakasının üst üste gelmesiyle oluşur. Üç boyutlu olup kırılgan bir yapısı vardır. Grafen günümüzde başta havacılık sektörü olmak üzere, çevre, tıp, mühendislik gibi birçok alanda kullanılmakta ve bu alandaki araştırmalar devam etmektedir. Grafen havacılık sektöründe hafiflik ve darbe dayanımı gerektiren uçak yapılarında kullanılır. Ayrıca grafen yüksek elektriksel iletkenliği sayesinde kanatlara entegre edilmiş buz çözme sistemlerinde kullanılmaktadır. Elektromanyetik kalkanlama özelliği sayesinde ise hava araçlarının radarda görünmemesini sağlayacak özel boyaların geliştirilmesinde kullanılmakta ve bu alanlardaki araştırmalara hala devam edilmektedir. Grafen günümüze kadar üretilmiş en ince malzemedir. Bu yüzden metallere kıyasla çok daha iyi mekanik özellikler sergiler ve sergilediği bu üstün özellikleri 120° açıyla bağlanmış C-C karbon atomlarının bağlanma şekline borçludur. (Ersöz ve diğ., 2018; Yıldız, 2019; Değirmenci, 2019)

2.5.3.1. Grafen Nanoplatelet ve Özellikleri

Grafen nanoplatelet (GNP) kendi arasında oldukça güçlü kovalent bağlara sahip olup plakaları arasındaysa zayıf Van der Waals bağları olan iki boyutlu bir nanomalzemedir. Şekil 2.20'de grafit, grafen ve grafen nano plateletlerin formları gösterilmiştir.



Şekil 2. 20. a) Grafit, b) Grafen ve c) Grafen nano plateletlerin formları (Anwar ve diğ., 2015).

GNP'ler nispeten düşük maliyetli malzemeler olup polimerler ile kullanıldıklarında kompozit malzemelerin çekme modülünü artırma özelliğindedirler. GNP'ler düşük miktarda ilave edildikleri ve yapı içerisinde homojen dağıldıkları durumda kompozit malzeme özelliklerinin iyileşmesine yardımcı olurlar. GNP'lerin geniş yüzey alanı, Van der Waals kuvvetlerinde artışa ve güçlü π - π etkileşimine neden olduğundan dağılımda sorunlar ortaya çıkabilmekte ve aglomera olmaları (topaklanmaları) söz konusu olabilmektedir. İyi mekanik, termal ve elektriksel özelliklerinden dolayı oldukça tercih edilen malzemeler olan GNP'lerin kompozit malzemelerde kullanılmaları tokluğu artırıp iç enerjinin dağılmasını sağlamaktadır. GNP kullanımı birçok sektörde olduğu gibi havacılık sektöründe de önemli bir yere sahiptir. Yüksek mekanik özellikleri sayesinde hava araçlarının yapısal parçalarında ya da uçakların kontrol yüzeylerinde kullanımları örnek olarak verilebilir. (Yıldız, 2019; Kuan ve diğ., 2018; Anwar ve diğ., 2015).

2.6. Bor Temelli Yapılar ve Özellikleri

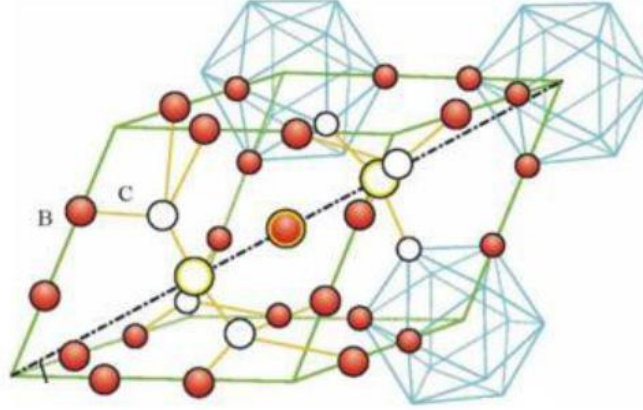
Dünyaya kıyasla rezervinin en yüksek olduğu yer ülkemiz olan bor madeni, yapısında içerdiği farklı oranlarda bor oksit sayesinde oluşan doğal bir bileşiktir. Bor mineralli bileşikler suda çözülebildikleri için doğada oldukça fazla bulunurlar. Borun diğer elementlerle bileşik yapma eğilimi karbon gibi yüksektir. Bu yüzden doğada saf halde bor elementine rastlanmaz. Aynı karbon atomu gibi borun da allotropları bulunmaktadır. Yarı iletken olan bor elementinin saflığı arttıkça iletkenlik derecesi de artmaktadır. Borun kimyasal özellikleri tanecik yapısının büyüklüğüne, şekline ve yapısına bağlıdır. Amorf yapıdaki bor minerali reaksiyona kolay girebilirken kristal yapıya sahip bor minerali kolay bir şekilde reaksiyona girememektedir. (Yazıcı, 2021; Kalaycı, 2021)

Bor bileşiği bor karbür, hegzagonal bor nitrür veya kübik bor nitrür şeklinde bulunabilir. Bor bileşiklerinin nano boyutta üretimleri sayesinde iyileşen özellikleriyle birlikte elektronik, mekanik, sağlık, havacılık gibi birçok alanda kullanımları söz konusudur. Bu bileşiklerin nano boyutlarda üretilmeleri halinde özelliklerinin iyileşme sebebi ise nano boyutlarda sergilenen düşük çap ve yüksek yüzey alanı/hacim oranı özelliğidir. Bu yapıların kompozit malzemelerde dolgu/takviye olarak kullanılmalarıyla mukavemet ve ısı direnç özelliklerinde artış sağlamaları ve bu sebeple uzay ve havacılık uygulamalarında kullanılmaları mümkündür. (Köklü, 2012).

2.6.1. Bor Karbür Partikülü

Bor karbür (B_4C) siyah elmas olarak da adlandırılmakta olup bor atomunun oluşturmuş olduğu önemli birleşiklerden birisidir. 1858 yılında keşfedilmiş olup kimyasal formülü ise 1934 yılında B_4C olarak belirlenmiştir. Ark fırınlarında karbon ile borik asit (H_3BO_3) veya bor oksitin (B_2O_3) indirgenmesiyle elde edilmiştir. B_4C aleve dayanıklı bir malzeme olup, fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle oldukça dikkat çekmektedir. Kristal yapıdadır ve moleküller arası güçlü kovalent bağları bulunmaktadır. Oldukça sert bir malzemedir ve aşındırma kabiliyeti yüksektir. Bu yüzden genellikle kompozit malzemelerde ve yüksek aşınma direnci gerektiren malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır. Elaste modülü yüksek yoğunluğu düşük bir bileşiktir. Nöron emilimi yüksek olduğundan reaktörlerde ve radyasyonu engelleyen duvarların üretiminde kullanılmaktadır. Kristal yapısı en kararlı olan bor yapısı rombohedral olan bor karbür

yapısıdır. Bununla birlikte yapıdaki bor miktarı artıkça bileşiğin sertlik değeri de düşmektedir. Şekil 2.21’de bor karbürün kristal yapısı gösterilmektedir. (Yazıcı, 2021; Köklü 2012)



Şekil 2. 21. Bor karbürün kristal yapısı (Yazıcı, 2021).

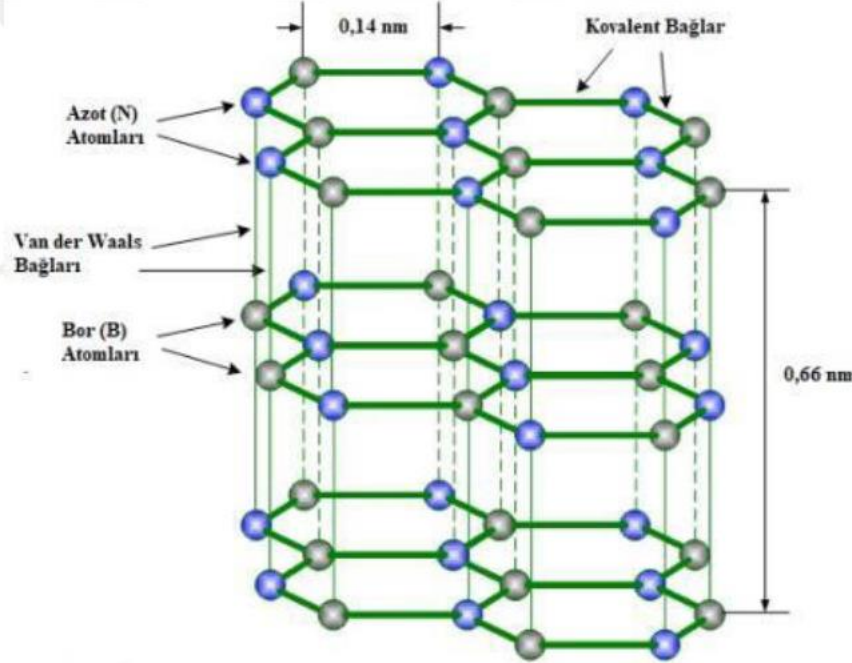
2.6.2. Bor Nitrür Partikülü

Bor nitrür (BN), C’nin yerini B ve N atomlarının almasıyla meydana gelmiş ve bu yönüyle grafit benzer özelliklere sahip, kristal yapıya sahip bir birliktir. Hegzagonal (h-BN), kübik (c-BN), rhombohedral (r-BN) gibi farklı kristal yapılarda bulunabilen BN ilk olarak İngiliz bilim insanı W. H. Balmain tarafından 1840 yılında erimiş borik asit ve potasyum siyanür kullanılarak üretilmiştir. Yüksek ısı iletkenliğe sahip BN genellikle uçakların fren sistemlerinde kullanılır. Bunun sebebi BN tabakaları arasındaki bağ kuvvetlerinin az olması, bu nedenle düzensiz dizilim göstermeleri ve aralarındaki boşluklardan dolayı ani ısı değişimlerine karşı dayanıklı olmalarıdır. Ayrıca BN yüksek elektriksel dirence ve mükemmel yağlama özelliğine sahiptir ve böylece aşınma direncini yükseltmektedir. (Yazıcı, 2021; Joy ve diğ., 2020; Köklü, 2012).

2.6.2.1. Hegzagonal Bor Nitrür

Bor nitrür kristal yapısının hegzagonal olması halinde ortaya çıkan bileşiğe hegzagonal bor nitrür (h-BN) denilmektedir. h-BN’ye grafit ile benzer özelliğe sahip olmasından dolayı aynı zamanda beyaz grafit de denilmektedir. İki boyutlu olup sp^2 hibritleşmesi

yapan ve toksik olmayan h-BN yapısında, bor ve nitrojen atomları aralarındaki güçlü kovalent bağlar sayesinde birbirlerine bağlanmışlardır. Ancak diğer taraftan h-BN tabakaları arasında zayıf Van der Waals bağları bulunduğundan bazı durumlarda tabakaların kayması veya aralarında boşluklar oluşması söz konusu olabilir. Hegzagonal bor nitrür, kimyasal kararlılık, elektriksel iletkenlik, ısı iletkenlik ve yağlayıcılık gibi özelliklere sahip bir malzemedir. Bu özellikleri sayesinde h-BN'nin birçok alanda kullanımı söz konusudur. Bu alanlardan birisi de havacılık sektörüdür. Özellikle gelecekte uçakların gaz türbinli motor sistemlerinin yerine geçmesi planlanan elektrikli itki sistemlerinde yalıtım amaçlı h-BN takviyeli kompozitler geliştirilmesi çalışmaları yapılmaktadır. Şekil 2.22'de hegzagonal bor nitrürün kimyasal yapısı gösterilmiştir. (Kalaycı, 2021; Yu ve diğ., 2017; Luna ve diğ., 2023).

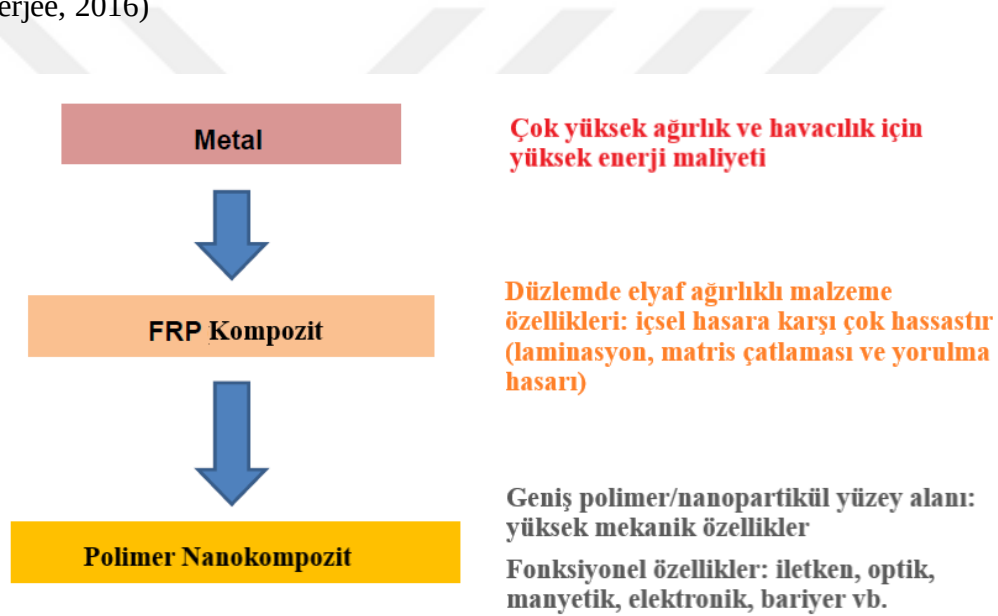


Şekil 2. 22. Hegzagonal bor nitrürün kimyasal yapısı (Kalaycı, 2021).

2.7. Polimer Nanokompozitler

Polimer nanokompozitler sergiledikleri üstün özellikler nedeniyle günümüzde havacılık sektöründe kullanımları oldukça artmış olan malzemelerdir. Polimer nanokompozitler, nano malzemelerin polimerik matris içerisine takviye elemanı olarak ilave edilmesiyle üretilen malzemelerdir. Bu takviye elemanları küresel, lif veya tabaka şeklinde

olabilmektedir. Geleneksel polimerik kompozitlere kıyasla polimerik nanokompozitlere daha düşük miktarda takviye malzemesi yüklenmesi gerekmektedir. Bunun sebebi nanokompozite eklenen takviye malzemesi miktarının yüksek miktarda olması halinde nano takviye malzemelerinin topaklanmaları ve oluşan topakların kusur gibi davranarak malzemenin özelliklerini kötüleştirmesidir. Polimer nanokompozitler havacılık uygulamaları için termal stabilite ve alev geciktiricilik gibi önemli özellikler sağlamaktadırlar. Ayrıca iyi elektronik ve optik özellikler sağlamanın yanı sıra malzeme dayanıklılığı, yüksek darbe dayanımı ve enerji emilimi gibi havacılık sektörü için önemli birçok özelliğin de malzemede iyileşmesini sağlamaktadırlar. Şekil 2.23'te polimer nanokompozitlerin havacılık ve uzay sektörü için önemi açıklanmıştır. (Joshi ve Chatterjee, 2016)



Şekil 2. 23. Polimer nanokompozitlerin havacılık ve uzay sektörü için önemi (Joshi ve Chatterjee, 2016).

2.8. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Bu bölümde, tez çalışmasında üretilen kompozit malzemeler için kullanılan üretim yöntemleri ele alınmıştır.

2.8.1. Ekstrüzyon

Ekstrüzyon, polimerik kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan bir üretim yöntemi olup ekstrüder adı verilen bir cihazda, eriyik hale getirilmiş termoplastığın, belirli hız,

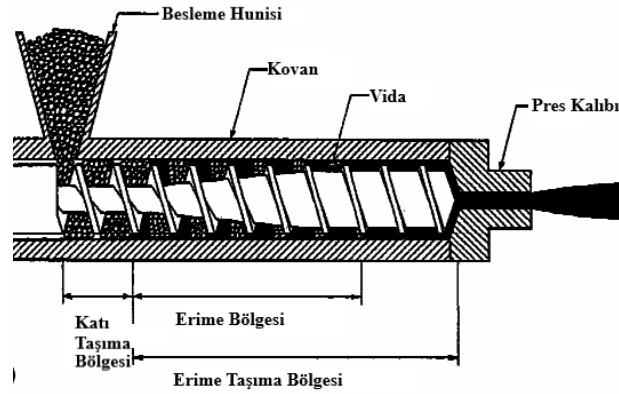
sıcaklık ve basınç altında bir kalıp aracılığıyla şekillendirilmesi işlemidir. Termoplastik polimerler genellikle eritilerek işlenirler. Eritilmiş polimerler yüksek viskoziteye sahip olup kayma incilmesi (shear thinning) davranışı gösterirler. Kayma incilmesi, kayma hızının artmasıyla akışkan viskozitesinin azalması durumudur. Ayrıca sıcaklık artışıyla da viskozite azalmaktadır. Ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama yöntemlerinin çalışma prensibi temel olarak şu adımları içermektedir. İlk olarak polimer belirli bir sıcaklık değerine kadar ısıtılıp eriyik hale getirilir. Eriyik hale gelen polimer şekillendirme ünitesine doğru pompalanır. Ardından istenilen şekil ve boyutlarda polimer malzeme üretilip en sonunda soğuyarak katılaşması sağlanır. Basit bir ifadeyle vidalı ekstrüderler beslenen malzemeleri eritme kapasitesine sahip polimer pompalardır. Vidalı ekstrüderler, ısıtılmış bir kovan içinde dönen bir veya iki Arşimet vidasından oluşurlar. En çok kullanılan türleri ise tek vidalı ekstrüderlerdir. (Vlachopoulos ve Strutt, 2003).

Ekstrüder beş farklı kısımdan oluşmaktadır. Bunlar vida, kovan, kalıp, besleyici kısım ve kontrol panelidir. Bu kısımlar yukarıda bahsedilen temel prosesin özelliklerini icra eder. Besleyiciden beslenen polimer dönen Arşimet vidası sayesinde hem karıştırılır hem de belirli bir sıcaklıkla eritilir. Eritilen polimer yine vida yardımıyla kalıba gönderilir. Vida iletimde de görev aldığı için tasarımı uygun bir biçimde yapılmalıdır. (Kızıl, 2019; Karslı Yılmaz, 2014).

Kontrol paneli vidanın dönüş hızının ayarlandığı ve takip edildiği yer olup bunun dışında da kuvvetin ve bölgesel sistem sıcaklığının takip edildiği yerdir. (Karataş, 2019; Karslı Yılmaz, 2014).

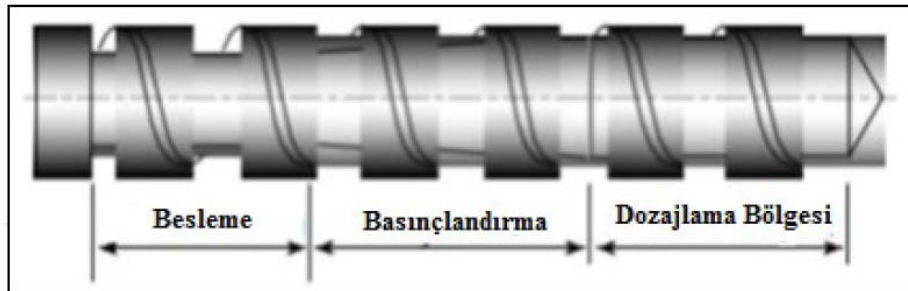
Kovan vidanın ve eriyik haldeki malzemenin bir arada tutulduğu yerdir. Genellikle kovanın aşınma direnci vidaya göre daha fazladır. Bunun nedeniyse kovanın bakım ve yedek parça maliyetinin vidaya göre daha yüksek olmasıdır. (Karataş, 2019; Karslı Yılmaz, 2014).

Kalıp, eriyik polimerin aktığı yer olup ekstrüderin son kısmında yer alır ve ayrıca malzemeye istenen şeklin de verildiği yerdir. Vida gibi kalıp tasarımı da oldukça önemlidir. Gerekli soğumanın sağlanabilmesi ve herhangi bir kusur oluşmaması için kalıp yolluklarının tasarımı son derece kritiktir. Şekil 2.24'te tek vidalı ekstrüderin şematik gösterimi verilmiştir. (Kızıl, 2019; White ve Kim, 2010).



Şekil 2. 24. Tek vidalı ekstrüderin şematik gösterimi (Vlachopoulos ve Strutt, 2003).

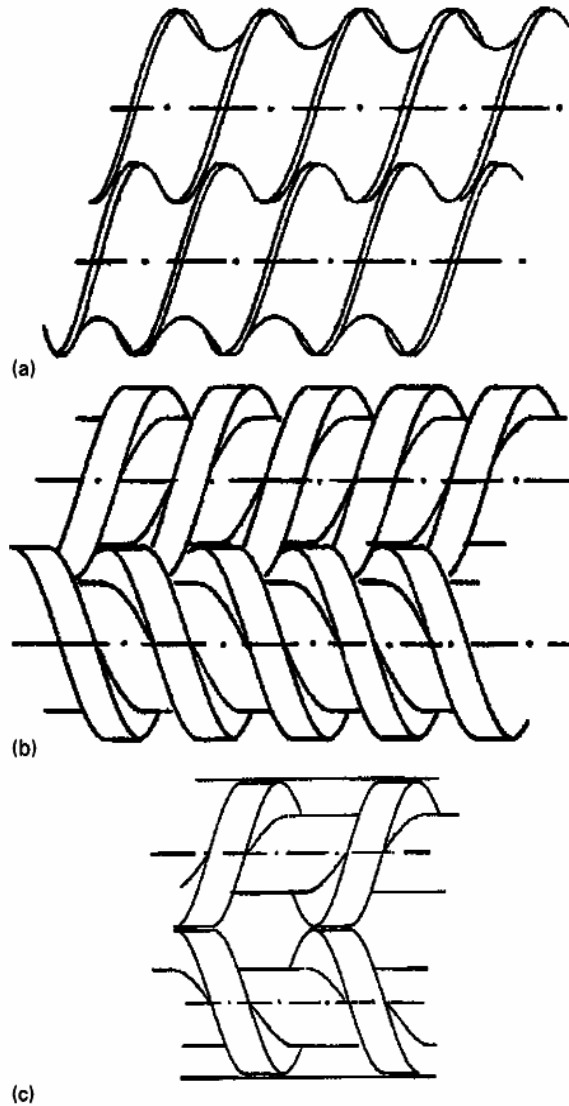
Ekstrüder vidası, besleme, basınçlandırma ve dozajlama olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Besleme kısmı vidanın en uzun kısmını oluşturan ve ilk ısıtmanın yapıldığı yerdir. Burada moleküller yapılarını halen korumaktadırlar. Basınçlandırma noktasına geldiğinde polimerin erimesi başlar. Bununla birlikte vida dişinin büyüklüğüne göre de basınçlandırma etkisi değişmektedir. Ardından polimer, diş büyüklüğünün en düşük, basıncın en yüksek olduğu dozajlama bölgesine geçer. Burada eriyik haldeki polimer kalıplamaya geçerek istenilen şekil ve boyutta üretimi tamamlanır. Şekil 2.25'te ekstrüder vidası ve bölümleri gösterilmiştir. (Karataş, 2019; Karşı Yılmaz, 2014).



Şekil 2. 25. Ekstrüder vidası ve bölümlerinin gösterimi. (Karataş, 2019).

Tek vidalı ekstrüderlerin yanı sıra çift vidalı ekstrüderler de bulunmaktadır. Son yıllarda termoplastik üretiminde çift vidalı ekstrüderlerin kullanımı daha yaygın hale gelmiştir. Çift vidalı ekstrüderlerde alıkonma süresi ve karıştırma etkisi tek vidalı ekstrüderlere göre daha iyidir. Bununla birlikte çift vidalı ekstrüderlerin tek dezavantajı maliyetleridir. Vida tasarımı çoğunlukla modülerdir ve bu da neredeyse sınırsız sayıda olası vida konfigürasyonuna olanak sağlar. Çift vidalı ekstrüderler vidaların dönüş yönüne göre üç

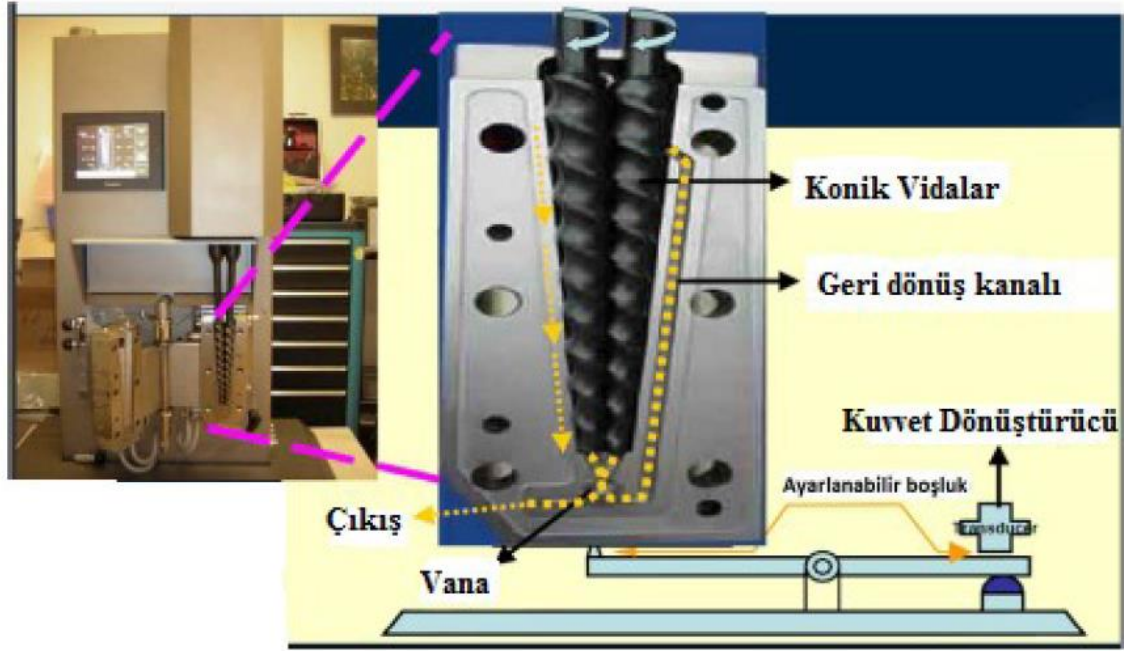
şekilde sınıflandırılmaktadır. Bunlar, dönüş yönüne göre aynı yönde dönen çift vidalı ekstrüderler, dönüş yönüne göre ters yönde dönüp birbirine geçen çift vidalı ekstrüderler ve dönüş yönüne göre ters yönde dönüp birbirine geçmeyen çift vidalı ekstrüderler şeklindedir. Şekil 2.26'da çift vidalı ekstrüderlerin dönüş yönüne göre sınıflandırılmalarını göstermektedir. (Vlachopoulos ve Strutt, 2003; Karataş, 2019; Kızıl, 2019; White ve Kim, 2010).



Şekil 2. 26. Çift vidalı ekstrüderlerin dönüş yönüne göre sınıflandırılmaları a) Dönüş yönüne göre aynı yönde dönen çift vidalı ekstrüder b) Dönüş yönüne göre ters yönde dönüp birbirine geçen çift vidalı ekstrüder c) Dönüş yönüne göre ters yönde dönüp birbirine geçmeyen çift vidalı ekstrüder (Vlachopoulos ve Strutt, 2003).

2.8.2. Laboratuvar Ölçekli Karıştırıcılar

Bu üretim yöntemi genellikle araştırmalarda kullanılacak laboratuvar tipi test numunelerinin üretilmesinde kullanılmaktadır. Diğer üretim yöntemlerine göre daha küçük hacimli olup üretim kapasitesi düşüktür. Ayrıca hem düşük maliyet hem de zamandan tasarruf avantajlarına sahiptir ve hem sürekli hem de kesikli üretim proseslerinde kullanılabilir. Bu çalışmada da 290 °C sıcaklığında ve 100 rpm vida hızında laboratuvar ölçekli konik çift vidalı mikro harmanlayıcı (micro compounder) kullanılarak polimerik kompozit numuneler üretilmiştir. Şekil 2.27’de laboratuvar ölçekli konik çift vidalı mikro harmanlayıcı gösterilmiştir (Karşlı Yılmaz, 2011; Karataş, 2019).

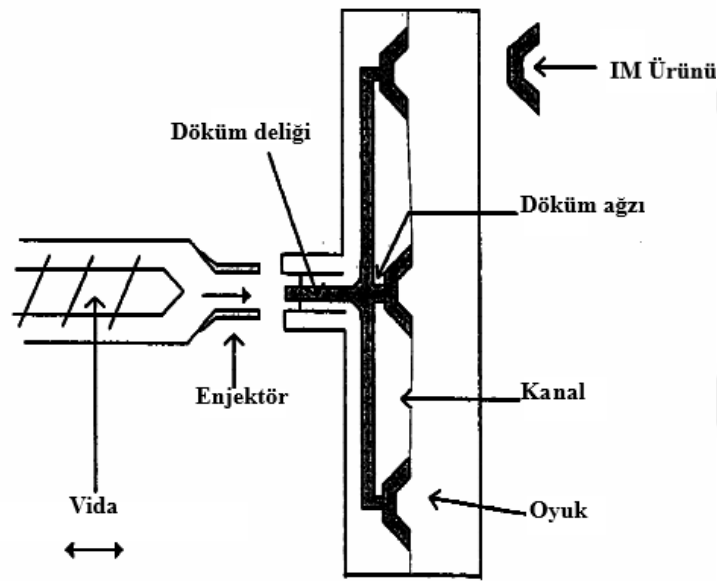


Şekil 2. 27. Laboratuvar ölçekli konik çift vidalı mikro harmanlayıcı (Karşlı Yılmaz, 2011).

2.8.3. Enjeksiyonla Kalıplama

Enjeksiyonla kalıplama iki aşamadan oluşan döngüsel bir işlemdir. İlk olarak vidanın dönmesiyle ısınan polimer eriyik hale getirilir ardından vidanın ileri doğru hareketi ile eriyik polimer kalıba gönderilir. Kalıba gönderilen eriyik polimerin soğuma ve katılaşma sırasında büzülmesini dengelemek için kalıba daha fazla polimer gönderilmektedir. Malzeme yüksek basınç altında belirli bir süre kalıpta tutulur. Polimerlerin enjeksiyonla kalıplanmasında, kalıba giden eriyik polimer yolu bir yollukla başlar ve bir geçit

aracılığıyla çok sayıda kalıp gözüne ayrılır. Birçok polimerik ürünün üretiminde enjeksiyonla kalıplama yöntemi kullanılır. Enjeksiyonla kalıplamada viskoz etkilerin yarattığı sıcaklık artışı kaynaklı ısınmayı azaltmak ve ayrıca kalıbı kolay doldurmak için düşük viskoziteli termoplastik malzemelerin kullanımı tercih edilir. Ayrıca kullanılacak polimer ve takviye malzemesi türüne göre sıcaklık, basınç ve zaman temelinde proses şartları belirlenir. Böylece kalıptan çıkacak malzemenin kullanabilir olması sağlanır. Şekil 2.28’de enjeksiyonla kalıplama cihazının bileşenleri gösterilmiştir. (Vlachopoulos ve Strutt, 2003; Karataş, 2019)



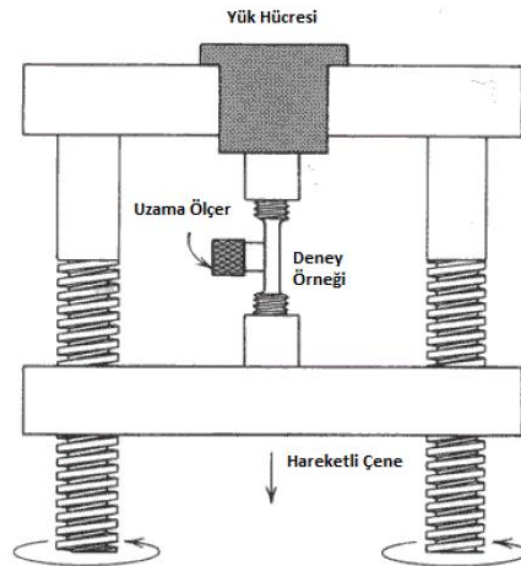
Şekil 2. 28. Enjeksiyon kalıplama cihazının bileşenlerinin gösterimi. (Vlachopoulos ve Strutt, 2003).

2.9. Kompozit Malzemelerin Karakterizasyon Yöntemleri

Kompozit malzemeler çeşitli alanlarda ve çeşitli amaçlar için kullanılmaktadırlar. Kullanılan her bir kompozit malzeme için farklı mekanik, tribolojik, termomekanik ve termal özellikler aranmaktadır. Kompozit malzemelerin bu özelliklerinin belirlenmesi için birtakım test ve analizler yapılmaktadır. Bunların bazıları çekme testi, dinamik mekanik analiz (DMA), termogravimetrik analiz (TGA), aşınma testi, diferansiyel taramalı kalorimetre analizi (DSC) ve taramalı elektron mikroskopisi analizi (SEM) olarak sıralanabilir. Bu bölümde, kompozit malzemelerin karakterizasyonu için gerekli olan ve bu tez çalışmasında kullanılan test ve analizler değinilmiştir.

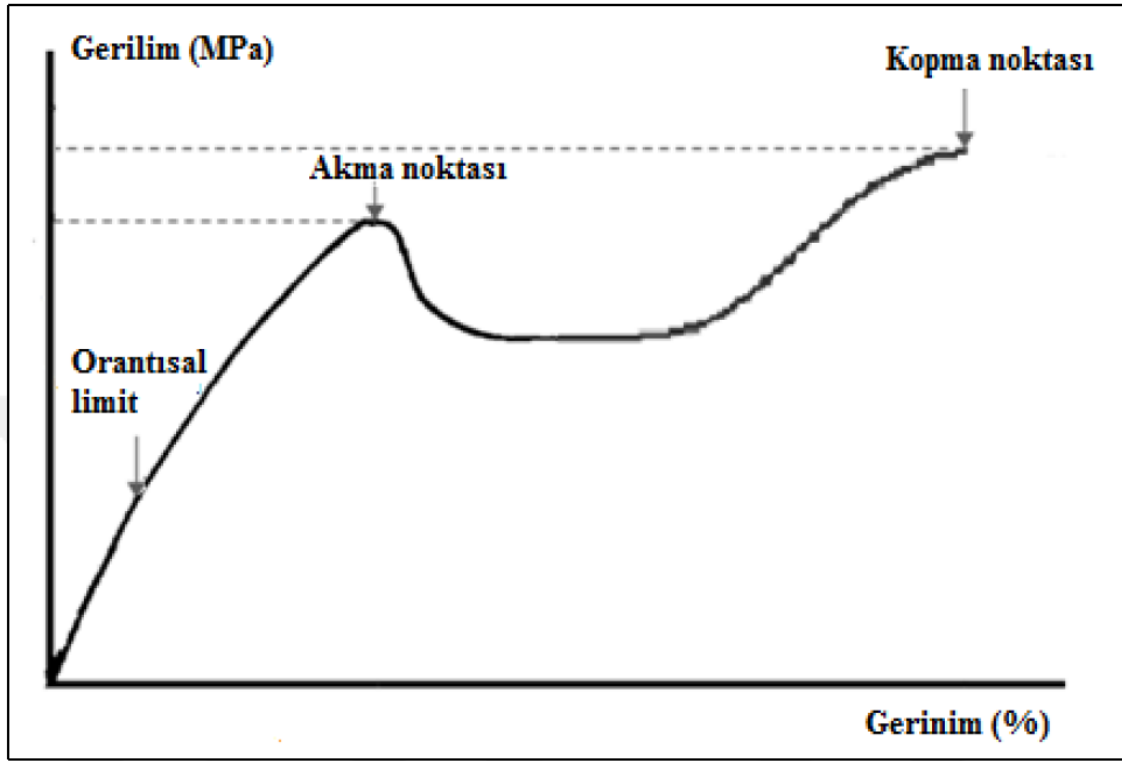
2.9.1. Çekme Testi

Çekme testi, bir malzemenin deforme olmadan önce dayanabileceği maksimum noktayı belirlememize yardımcı olan yani bir anlamda malzemenin dayanıklılığını ölçtüğümüz bir yöntemdir. Polimerik malzemelerin mekanik özelliklerinin bazıları da bu yöntemle belirlenebilmektedir. Polimerik malzemeye uygulanan kuvvetin sonucunda gerilim değeri belirli bir büyüklüğü aştığında malzemede plastik deformasyon ve elastik deformasyon olmak üzere iki farklı deformasyon ortaya çıkmaktadır. Elastik deformasyon, belirli bir kuvvet uygulanıp ardından bu kuvvet kaldırıldığında malzemenin tekrar eski haline döndüğü geçici şekil değişikliği olarak bilinir. Plastik deformasyon ise malzeme iç yapısındaki kusurlar nedeniyle malzemenin uygulanan bu kuvvetten sonra tekrar eski haline dönememesidir. Plastik deformasyon sınırlarının aşılmasıyla da malzemede kopma gözlemlenir. Bu test için kullanılan cihazlarda sabit alt çene ve hareketli üst çene arasında yerleştirilen malzeme uygulanan kuvvet ile uzamaya başlar ve değerler cihazdaki ekstansometreden elde edilir. Elde edilen değerlerle gerilme-gerinim grafiği ortaya çıkar ve malzemenin mekanik özellikleri buradan yorumlanır. Şekil 2.29’da çekme testi cihazı ve bileşenlerini göstermektedir. (Milisavljević ve diğ, 2012; Kumarasamy ve diğ, 2018; Karlı Yılmaz, 2011; Savaşkan, 1999).



Şekil 2. 29. Çekme testi cihazı ve bileşenleri (Karlı Yılmaz, 2011).

Gerilme-gerinim grafiği aracılığıyla akma noktasına kadar olan çekme dayanımı elde edilebilir. Ayrıca malzemenin elastisite modülü de bu grafikten elde edilir. Malzemenin elastisite modülü birim uzama başına düşen gerilme miktarını göstermektedir. Sıcaklık elastisite modülünü ve çekme dayanımını etkileyen parametrelerden biridir ve artan sıcaklıkla elastisite modülü ve çekme dayanımı azalmaktadır. Bu tez çalışmasında da üretilen kompozit malzemelerin çekme dayanımı hem oda sıcaklığında hem de 70 °C de araştırılmıştır. Gerilme-gerinim grafiğinin altındaki alan ise malzemenin tokluğunu vermektedir. Tokluk malzemenin uygulanan yük neticesinde absorbladığı enerjiyi ifade etmektedir. Sünek malzemelerin tokluğu gevrek malzemelere kıyasla daha fazladır. Şekil 2.30’da polimerik bir malzemenin gerilme-gerinim eğrisi verilmiştir. (Karataş, 2019; Milisavljević ve diğ, 2012; Kumarasamy ve diğ, 2018).



Şekil 2. 30. Polimerik bir malzemenin gerilme-gerinim eğrisi (Karataş, 2019).

2.9.2. Dinamik Mekanik Analiz

Dinamik mekanik analiz (DMA), polimerik malzemelerin termomekanik karakterizasyonu ya da viskoelastik davranışını incelemek için kullanılan bir yöntemdir. DMA’nın çalışma prensibi malzemeye uygulanan sinüzoidal gerilim sonucunda ortaya

ıkan gerilimin llmesine dayanmaktadır. Ölçülen gerilim sayesinde malzemenin kompleks modülü belirlenir. Kompleks modül malzemeye gönderilen gerilim sayesinde elde edilen iki farklı geri gerilimden oluşur. Bunlar elastik ve viskoz gerilimlerdir. Elastik ve viskoz gerilimlerin gerinim ile orantıları sonucunda ortaya elastik gerilimin gerinime oranı depo modülü (E') ve viskoz gerilimin gerinime oranı kayıp modül (E'') çıkar. Kayıp modülün depo modüle oranı ise sönümlleme faktörünü verir. Malzemeye uygulanan sıcaklığın ve gerilimin değışmesi kompleks modülün değışmesine yol açar. DMA yöntemiyle malzemenin camsı geçiş sıcaklığın tespit etmek ve diğerk moleküler hareketlere karşılık gelen geçişleri tanımlamak mümkündür. (Chartoff ve diğ., 2009; Markovi ve diğ., 2016; Karşlı Yılmaz, 2014).

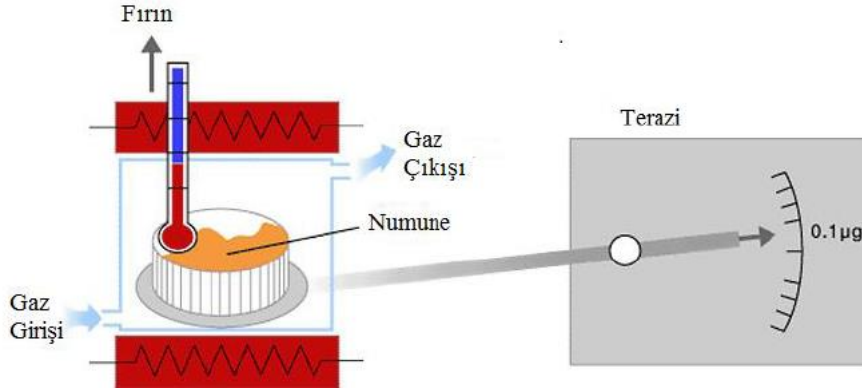
2.9.3. Termogravimetrik Analiz

Termogravimetrik analiz (TGA), malzemelerin fiziksel veya kimyasal özelliklerindeki değışim sonucunda malzemede meydana gelen kötü kaybını, zamanın veya sıcaklığın bir fonksiyonu olarak gözlemlememize olanak sağlayan bir analiz yöntemidir. TGA, buharlaşma, süblimleşme gibi faz geçişleri veya ayrışma, katı-gaz reaksiyonları gibi kimyasal reaksiyonlar hakkında bilgi sağlar. (Markovi ve diğ., 2016)

TGA kötü değışimine uğrayan malzemelerin özelliklerini belirlemek için kullanılmaktadır. TGA'nın yaygın uygulamaları şunlardır:

1. Karakteristik analiz yöntemiyle malzeme karakterizasyonu
2. Bozuma mekanizmaları ve reaksiyon kinetiğiki alışmaları
3. Malzeme içerisindeki organik içeriğinin belirlenmesi
4. Malzeme içerisindeki inorganik içeriğinin belirlenmesi

TGA cihazı mikro hassasiyette bir terazi, bir fırın, inert ya da bazen reaktif bir atmosfer oluşturmaya yarayan bir atmosfer kontrol nitesi ve bilgisayardan oluşmaktadır. Bu nitede kullanılan inert gazlar nitrojen, argon veya helyum olabilir. İndirgeme işleminin için ise oksitleyici oksijen veya hava gibi gazlar kullanılır. TGA'da polimerler genellikle artan sıcaklıkla kötü kaybına uğrarlar ancak kullanılan oksitleyici gazlar ile polimerde kötü artışı da gözlemlenebilir. şekil 2.31'de TGA cihazı ve bileşenleri gösterilmiştir. (Chartoff ve diğ., 2009; Markovi ve diğ., 2016; Karşlı Yılmaz, 2014).



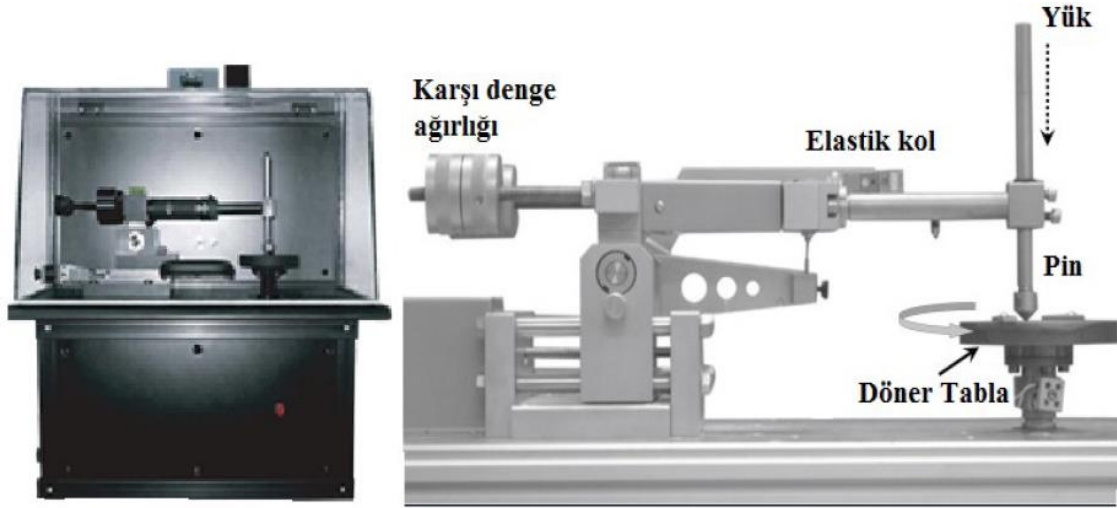
Şekil 2. 31. TGA cihazı ve bileşenleri (Gül, 2020).

2.9.4. Aşınma Testi

Aşınma, birbirine temas eden yüzeylerde, fiziksel veya kimyasal nedenlerle meydana gelen, istenmeyen malzeme kaybına verilen addır. Aşınmanın birden fazla çeşidi olmakla birlikte bu çeşitler meydana gelme mekanizmasına göre adhezif aşınma, abrasif aşınma, titreşim aşınması ve tabaka aşınması olarak adlandırılmaktadırlar. Bu tez çalışmasında test numunelerine pin-on-disk tipi adhezif aşınma testi uygulanmıştır. (Kızıl, 2019)

Adhezif aşınma, kayma sürtünmesi yapan malzeme çiftinin birleşip küçük parçalar halinde ana malzemeden ayrılmasıyla gerçekleşmektedir. Parçalar birbiri üstünden kayma sırasında küçük gerilmelerle akma sınırına ulaşır bu da malzemede soğuk kaynak etkisi yaparak malzemenin küçük parçalar halinden yüzeyden ayrılmasına sebep olur. (Gül, 2020).

Polimer matrisli kompozitlerin adhezif aşınma özelliği pin-on-disk tipi adhezif aşınma cihazı ile tespit edilebilmektedir. Bu test mekanizması, yüzeye dik gelen bir kol, aşındırıcı seramik malzemeden yapılmış bir top, malzemenin yerleştirileceği bir alan ve aşındırıcıyı hareket ettiren bir motordan oluşmaktadır. Malzeme cihaza sabitlendikten sonra belirli bir yük uygulanarak aşındırıcı ile test malzemesinin teması sağlanır. Test sonucunda aşındırılan numune ile aşındırıcı malzeme arasındaki sürtünme katsayısı elde edilir. Analiz edilen numune türüne göre uygulanacak test parametreleri değişiklik gösterir. Şekil 2.32’de pin-on-disk tipi bir adhezif aşınma cihazı ve bileşenleri gösterilmiştir. (Gül, 2020; Karataş, 2019; Çoban, 2011).

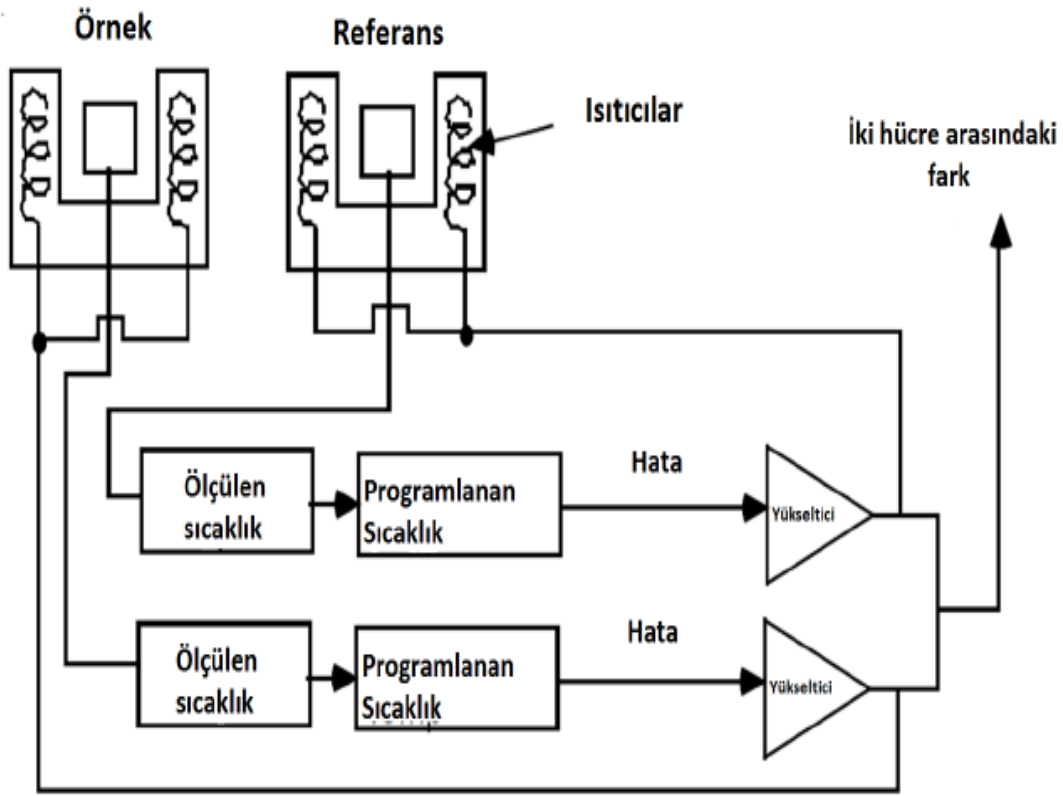


Şekil 2. 32. Pin-on-disk cihazı ve bileşenleri (Çoban, 2011).

2.9.5. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Analizi

Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi polimerlerin ısıyı olan tepkisini ölçmek için kullanılan bir yöntemdir ve polimerik malzemenin ısı kapasitesi, camsı geçiş sıcaklığı (T_g), kristalleşme sıcaklığı (T_c), erime sıcaklığı (T_m) gibi özelliklerini karakterize etmek için kullanılmaktadır. DSC analizi sonucunda elde edilen eğriye göre bu özellikler yorumlanmaktadır. DSC analizi, sabit ısıtma veya soğutma sırasında test numunesinde ve referans numunede meydana gelen ısı transferinin karşılaştırılması prensibine dayanmaktadır. (Drzeżdżon ve diğ., 2019).

DSC cihazında iki kap (DSC pan) bulunmaktadır. Kaplardan birine analiz edilecek numune koyulurken diğer kap boş bırakılarak referans numune olarak belirlenir. Ardından iki kap da belirlenen bir sıcaklık programıyla istenilen hızda belirli bir sıcaklık seviyesine getirilir. Isıtma veya soğutma sırasında, iki kabı aynı sıcaklık değerine getirmeye çalışıp boş kap ile içerisinde numune bulunan dolu kap arasında oluşan sıcaklık farkının dengelenmesi için kaplara belirli oranlarda enerji verilirken, iki kaba verilen enerjiler arasında fark oluşur. Oluşan bu fark aracılığıyla analiz edilen numunenin ısı özelliklerine karar verilir. DSC analiziyle camsı geçiş sıcaklığı, erime sıcaklığı gibi ısı özelliklerinin yanında polimerik malzemenin erime entalpisi (ΔH), yüzde kristallenme miktarı ($\%X_c$) gibi özellikler de hesaplanabilmektedir. Şekil 2.33'te DSC analizi cihazının bileşenleri gösterilmiştir. (Drzeżdżon ve diğ., 2019; Karlı Yılmaz, 2011).

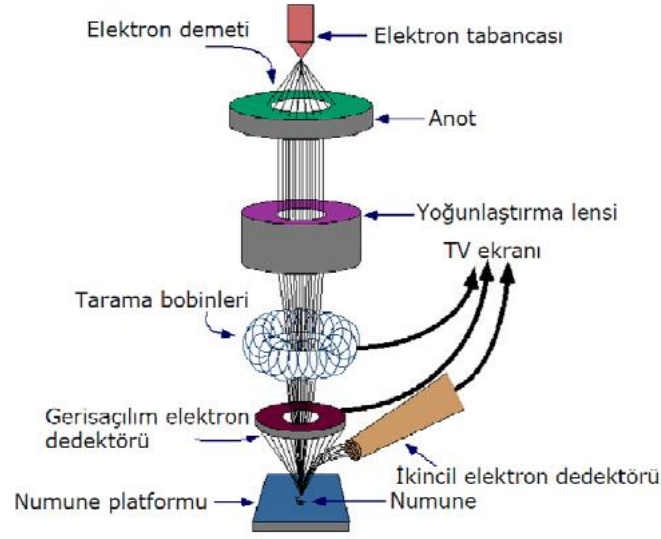


Şekil 2. 33. DSC analizi cihazının bileşenleri (Karşlı Yılmaz, 2011).

2.9.6. Taramalı Elektron Mikroskobu

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) bir tür elektron mikroskobu olup numuneye gönderdiği elektron ışınıyla numuneyi tarayarak malzemenin iç yapısı hakkında bilgi almamızı sağlayan bir cihazdır. (Markovi ve diğ., 2016; Karşlı Yılmaz, 2011).

Taramalı elektron mikroskobu analizinde malzemeye yoğunlaştırılmış elektron demeti gönderilir. Elektron demeti ile uyarılan atomlar sayesinde malzemedan ayrılan ikincil elektronlar toplanarak malzemenin morfolojisi hakkında bilgi elde edilir. Malzemenin taranması ve ikincil elektronların özel bir dedektörle toplanmasıyla yüzeyin morfolojisini gösteren bir görüntü oluşturulur. Oluşturulan bu görüntünün ekrana aktarılmasıyla süreç sonlandırılır. Malzemenin belli bölgelerinde nitel ve nicel analizler yapmak da SEM analizi ile mümkündür. Şekil 2.34'te SEM'in çalışma mekanizması gösterilmiştir. (Markovi ve diğ., 2016; Karşlı Yılmaz, 2011).



Şekil 2. 34. SEM'in çalışma mekanizması (Karlı Yılmaz, 2011).

2.10. Çalışmanın Özgün Yanı

Polimerler hayatımızda büyük bir yere ve öneme sahip malzemelerdir. Bu malzemelerden birisi olan PPS de üstün özellikleriyle ileri malzemelere ihtiyaç duyulan birçok sektörde kullanılmaktadır. PPS, özellikle yüksek performanslı ileri malzeme ihtiyacının fazla olduğu havacılık sektöründe yer bulan kompozit malzemelerin üretiminde kullanılmak için önemli bir mühendislik malzemesidir. PPS'nin havacılık sektöründe kullanımının hava araçlarına düşük ağırlık ve buna bağlı olarak yakıt tasarrufu sağlaması, ayrıca zorlu koşullarda iyi ve sürdürülebilir mekanik özellikler sergilemesi bu alandaki aranılabilirliğini arttırmaktadır.

Diğer taraftan saf/katkısız PPS'nin havacılık sektöründe kullanımı mekanik özellikler açısından yetersiz olması sebebiyle sınırlıdır. Bu sınırlı durumun üstesinden gelebilmek saf PPS'ye takviye malzemeleri ilave edilmesi ve böylece beklenen mekanik özelliklere ulaşılması çalışmaları yapılmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında da takviye elemanı olarak bazalt elyaf kullanılarak saf PPS'nin özelliklerinin iyileştirilmesine çalışılmıştır. Ayrıca bazalt elyafın yanı sıra PPS'ye h-BN ve GNP gibi nano takviye malzemelerinin eş zamanlı ilavesinin hem tek başına hem de hibrit etkisi incelenmiştir.

Bu amaçla ilk aşamada takviye elemanı olarak bazalt elyaf kullanılarak bazalt elyaf takviyeli PPS matrisli kompozitler üretilmiştir. Ardından BF takviyeli kompozitlere değişen ağırlık oranlarında sadece h-BN ve sadece GNP takviyesi yapılmış ve elyaf ve nano partikülün eş zamanlı ilavesinin yarattığı hibrit etki incelenmiştir. Son olarak ise BF takviyeli PPS matrisli kompozitlere her iki nano takviye malzemesi de değişen ağırlık oranlarında eş zamanlı olarak eklenmiş ve nano partiküllerin eş zamanlı kullanılmasının yaratabileceği hibrit etki incelenmiştir. Üretilen tüm kompozit malzemelerin mekanik, termal, termomekanik, morfolojik ve tribolojik özellikleri incelenmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Literatürde fiber takviyeli kompozitlere hibrit h-BN ve GNP ilavesinin tribolojik, mekanik ve termomekanik özellikler üzerindeki etkisini araştıran bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada BF takviyeli PPS matrisli kompozitlere h-BN ve GNP'nin hem ayrı ayrı hem de eş zamanlı olarak farklı ağırlık oranlarında eklenmiş olması ve hazırlanan kompozitlerin mekanik, tribolojik, termal ve termomekanik özelliklerinin incelenmiş olması çalışmanın özgün yanını oluşturmaktadır.

3. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, bu çalışmada kullanılan PPS, bazalt elyaf, GNP ve h-BN malzemeleri kullanılarak üretilen kompozit malzemeler konusunda literatürde yapılmış çalışmalar incelenmiş ve sonuçlar paylaşılmıştır.

3.1. PPS Matrisli Kompozitlerle İlgili Yapılan Çalışmalar

Stoeffler ve diğ., (2013) havacılık sektöründe kullanılan atık termoset matrisli kompozit malzemelerdeki kullanılmış karbon elyafı tekrar kullanabilir hale getirerek PPS reçineye ağırlıkça %20 ve %40 oranlarında geri dönüştürülmüş karbon elyaf ilave etmişlerdir. Üretilen kompozit malzemelerin çekme, eğilme, termogravimetrik ve darbe testleri yapılmış ve sonuçlar hem saf PPS hem de referans Panex 35 kodlu kısa karbon elyaf takviyeli PPS matrisli kompozitlerin özellikleri ile karşılaştırılmıştır. PPS'ye %40 oranında geri dönüştürülmüş karbon elyaf eklenmesiyle çekme modülü, maksimum çekme gerilimi ve tokluk değerlerinin saf PPS'ye kıyasla arttığı bulunmuştur. Ayrıca geri dönüştürülmüş karbon elyaf ile üretilen PPS matrisli kompozitin çekme gerilmesi özelliğinin Panex 35'e göre arttığı gözlenmiştir. Ağırlıkça %40 oranında karbon elyaf ile güçlendirilmiş PPS'nin darbe direncinin de saf PPS'ye oranla %250 arttığı bulunmuştur. Sonuç olarak PPS matrisli kompozitlerde kullanılan geri dönüştürülmüş karbon elyaf takviyesinin kompozit malzemenin özelliklerini geliştirdiği sonucuna varılmıştır.

Bora ve diğ., (2013) PPS'ye ağırlıkça % 0, 5, 10, 15, 20 ve 25 oranlarında titanyum dioksit (TiO_2) ekleyerek ürettikleri kompozit malzemelerin mekanik, termal, viskoelastik ve eroziv aşınma özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan bu çalışmadaki kompozit malzemeler çift vidalı ekstrüder ve enjeksiyonlu kalıplama yöntemleri kullanılarak üretilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda eğilme modülünün artan TiO_2 oranıyla arttığı ve en yüksek eğilme oranının %25 TiO_2 eklenmesiyle ortaya çıktığı bulunmuştur. Diğer yandan eğilme mukavemetinin %10 TiO_2 yüklenmesine kadar arttığı ancak daha yüksek oranlarda TiO_2 takviyesiyle eğilme mukavemetinin azaldığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca üretilen kompozit malzeme de artan TiO_2 oranıyla eroziv aşınma direncinin düştüğü ortaya çıkmıştır. DMA testi sonucunda TiO_2 ilavesiyle kayıp modül ve depolama modülünün arttığı bulunmuştur. Öyle ki %25'lik TiO_2 ilavesiyle depolama modülü 3 GPa'dan 4,5 GPa'a çıkmıştır.

Kızıl (2019), yüksek lisans tez çalışmasında, PPS'ye karbon elyaf ve bazalt elyaf olmak üzere iki farklı elyaf türü ilavesinin etkisini incelemiş ardından saf PPS'ye ve elyaf takviyeli PPS matrisli kompozitlere değişen ağırlık oranlarında ayrı ayrı bentonit ve zeolit ilavesiyle ortaya çıkacak hibrit etkiyi gözlemlemiştir. Bunun için üretilen kompozitlerin mekanik, termomekanik, tribolojik ve termal özelliklerini incelemiştir. Çekme testi sonuçları PPS'ye sadece bentonit ve sadece zeolit ilavesiyle çekme dayanımı değerlerinin düştüğünü göstermiştir. Hibrit etki incelendiğinde ise en yüksek çekme dayanımı değerini karbon elyafı ve bentoniti eş zamanlı içeren kompozitlerin sergilediği görülmüştür. Aşınma testi sonucunda hibrit etkinin sürtünme katsayısı değerlerini düşürdüğü görülmüştür. Üretilen kompozitlerin hepsinde takviye ilavesiyle ısı kararlılık artmıştır.

Gu ve diğ., (2014) PPS matrisli GNP takviyeli kompozitlerde GNP yüzeyinin fonksiyonel hale getirilmesinin mekanik ve termal özellikler üzerine etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda %5 oranında GNP takviyesinden sonra kompozit malzemenin mekanik özelliklerinde düşüş gerçekleşmiştir. Yüzeyi iyileştirilmiş GNP takviyeli PPS matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin saf GNP takviyeli kompozitlere göre daha iyi olduğu ortaya çıkarılmıştır. Ağırlıkça artan GNP miktarıyla termal iletkenlik artmıştır. Ayrıca etkileşimleri ve matris içine dağılımları daha iyi olduğundan yüzeyi iyileştirilmiş GNP takviyeli kompozitlerin termal iletkenliklerinin saf GNP takviyeli kompozitlerden daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Wu ve diğ., (2015) genişletilmiş grafit (EG) ve karbon nanotüp (CNT) takviyeli PPS matrisli kompozitlere değişen oranlarda BN ilavesiyle üretilen hibrit kompozitlerin termal ve elektriksel iletkenlik özelliklerini araştırmışlardır. CNT içeren kompozitlerin elektriksel iletkenlik değerlerinin diğer dolgu türlerini içeren kompozitlerin değerlerine göre daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Diğer yandan EG içeren kompozit malzemelerin termal iletkenlik değerlerinin ise diğer dolgu türlerini içeren kompozitlerin değerlerine göre yüksek olduğu görülmüştür. Hem CNT hem de EG içeren kompozit malzemelerde BN ile iyi bir sinerjik etkileşim kurulmuştur ve termal iletkenlik gözle görülür şekilde artmıştır.

3.2. Bazalt Elyaf Takviyeli Kompozitlerle İlgili Yapılan Çalışmalar

Yang ve diğ., (2015) poli(laktit asit)/bazalt elyaf (PLA/BF) kompozitlerine alüminyum hipofosfiti (AHP) ile modifiye edilmiş karbon nanotüp (m-CNT) ilavesinin kompozitlerin alev geciktiricilik, mekanik dayanım ve termal stabilite özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Kullanılan takviye malzemelerinin matris içerisinde homojen olarak dağıldıkları ve PLA ile m-CNT arasında sinerjik bir etkileşim meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte termal stabilite ve üretilen kompozit malzemelerin çekme mukavemeti artmıştır. Yapılan kalıntı analiziyle birlikte AHP ve PLA arasında oluşan reaksiyonla birlikte birçok mikro düzeyde kalıntının yüzeyde toplandığı ve yüzeyde biriken kalıntıların bazalt elyafın ısı iletimini engellediği gözlemlenmiştir.

Arslan ve Doğan, (2018) (3-aminopropil) trietoksisilan (AP), (3-glisidiloksiopropil) trimetoksisilan (GP) ve (3-trimetoksisilil) propilmetakrilat (MA) silan bağlayıcılarıyla modifiye edilmiş bazalt elyaf (BF) takviyeli poli(butilen tereftalat) (PBT) matrisli kompozitlerin mekanik, termomekanik ve morfolojik özelliklerini incelemişlerdir. silan bağlayıcıyla modifiye edilmiş BF ile takviye edilmiş PBT matrisli kompozitlerin çekme mukavemetlerinde ve elastik modüllerinde oldukça yüksek artış gözlemlenmiştir. Saf PBT sünek davranış sergilerken, silan bağlayıcıyla modifiye edilmiş BF ile takviye edilmiş PBT gevrek davranış sergilemiştir. Silan türlerinin mekanik özellikler üzerine etkileri ise şu şekilde sıralanmıştır: GP>AP>MA.

Zhang ve diğ., (2012) değişen ağırlık oranlarında bazalt elyaf (BF) takviyeli poli(butilen suksinat) (PBS) matrisli kompozit malzemelerin çekme, eğilme, darbe dayanımı ve termal özelliklerini incelemişlerdir. Bazalt elyaf ilavesiyle PBS'nin mekanik ve termal özelliklerinin iyileştiği görülmüştür. Kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemeti değerleri elyaf oranı arttıkça artmıştır. %15 oranında elyaf ilavesiyle üretilen kompozit malzemede en yüksek mukavemet değerlerine ulaşılmıştır. Yapılan SEM analiziyle matris ve elyafın birbiriyle iyi etkileşime girdiği gözlenmiştir.

Kim ve Park, (2020) Bazalt elyaf (BF) takviyeli epoksiye matrisli kompozitlere grafen oksit (GO) ilavesinin matris ve elyaf ara yüzey etkileşimi ve dolayısıyla mekanik özellikler üzerine etkisini incelemişlerdir. Kompozitlerin kayma mukavemeti GO

ilavesiyle artmıştır. Tüm özelliklerin aynı anda iyileşmesini sağlayan optimum GO oranı ağırlıkça %0,5 olarak bulunmuştur.

Mirzaei ve diğ., (2021) Polipropilen matrisli nanokompozitlere ağırlıkça %0, 0,75 ve 1,5 oranlarında GNP, ağırlıkça % 0, 7,5 ve 15 oranlarında kenaf elyaf ve ağırlıkça % 0, 7,5 ve 15 oranlarında bazalt elyaf eklemişlerdir. Ardından GNP, kenaf elyaf ve BF'yi belirli oranlarda kullanarak hibrit kompozit malzemeler üretmişler ve bu kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini ve yüzey morfolojisini incelemişlerdir. %0,75 oranında GNP ilavesiyle nano malzemenin yarattığı etki elyafın matrise daha iyi yapışmasını sağlamıştır. %1,5 oranında GNP ilavesiyle parçacıklar bir arada toplanmış bu da kusur gibi gözüktüğünden bükülme mukavemetini azaltmıştır. GNP'nin %1,5 ilavesiyle elastik modül artmıştır. Ağırlıkça %15 oranında kenaf ve bazalt elyaf eklenmesiyle bükülme mukavemeti artmıştır. Ağırlıkça %15 oranında kenaf ve bazalt elyaf eklenmesiyle elastik modül sırasıyla %46 ve %61 oranlarında artmıştır.

3.3. Grafen Nanoplatelet Takviyeli Kompozitlerle İlgili Yapılan Çalışmalar

Ghani ve diğ., (2021) poli(laktik asitin) (PLA) özelliklerini geliştirmek için nano dolgu takviyesi olarak GNP eklemişler ve üretilen kompozit malzemenin mekanik, elektriksel ve alev geciktiricilik özelliklerini geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Bunun için PLA'ya ağırlıkça %0, 0,1, 0,3, 0,5 ve 1,0 oranlarında GNP ekleyerek çift vidalı ekstrüderle ve enjeksiyon kalıplama yöntemiyle farklı oranlara sahip PLA/GNP nanokompozitleri üretmişlerdir. PLA'nın çekme mukavemeti GNP ilavesiyle artmıştır. En iyi çekme mukavemeti ağırlıkça %0,3 oranında GNP ilavesinde elde edilmiştir. Artan GNP oranıyla nano dolgunun PLA içindeki dağılımı kötüleşmiş ve gerilme mukavemeti azalmıştır. Aynı zamanda artan GNP miktarıyla Young modülü de artmıştır. Yapılan çalışmada en iyi sonucu ağırlıkça %0,3 oranında GNP içeren kompozitlerin sergilediği ortaya çıkarılmıştır.

Gao ve diğ., (2017) PLA'ya iki çeşit GNP takviye elemanı ilavesiyle üretilen kompozit malzemelerin elektriksel ve akış özelliklerini incelemişlerdir. Küçük yanal boyuta sahip GNP üretilen kompozit malzemenin iletkenliğini artırırken, büyük yanal boyuta sahip GNP'nin kompozit malzemenin iletkenliğinde bir değişiklik meydana getirmediği gözlemlenmiştir. Hibrit etkiyi gözlemlemek için iki GNP türü aynı anda PLA'ya ilave

edilmiştir. Çalışma sonucunda küçük yanal boyutlu GNP takviyesinde dinamik süzülme yoluyla oluşan iletken ağları arttırdığı ancak büyük yanal boyutlu GNP'lerin bu iletken ağları arttırmadığı sonucuna varılmıştır.

Karataş ve diğ., (2019) karbon elyaf takviyeli poliamid 6,6 (PA6,6) matrisli kompozitlere ara yüzey etkileşimini, mekanik ve termal özellikleri iyileştirmek için değişen oranlarda grafen nanoplatelet (GNP) ve 1,4 fenilen-bis-oksazolin (PBO) ilave etmişlerdir. PA6,6'ya ağırlıkça % 0,1 0,3 ve 0,5 oranlarında GNP ve ağırlıkça % 0 ve %1 oranlarında PBO ilave edilerek üretilen hibrit kompozitlere aşınma ve çekme testleri, dinamik mekanik analiz, diferansiyel taramalı kalorimetri analizi ve taramalı elektron mikroskopisi analizi uygulamışlardır. GNP'nin düşük ağırlık oranlarında sürtünme katsayısı (COF) değerinin ve aşınma miktarının azaldığı ancak %0,5 oranında GNP ilavesinden sonra aşınma oranının arttığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte eklenen PBO sayesinde COF miktarının azaldığını ve PBO'nun diğer malzemelerle arasındaki yüksek etkileşimi ortaya koymuşlardır. Sürtünme katsayısında en yüksek iyileşme ağırlıkça %0,5 oranında GNP ilavesiyle elde edilmiştir. Çekme dayanımı artan GNP miktarıyla artmıştır. PBO eklenmesiyle birlikte %0,5 oranında GNP ilavesi ile üretilen kompozit malzemenin çekme mukavemetinde artış gözlenmiştir. Sonuç olarak artan takviye malzemesi oranıyla PA6,6'nın mekanik, termal ve tribolojik özellikleri iyileşmiştir.

Deng ve diğ., (2014) poli(fenilen sülfid) (PPS) matrisle grafen nanoplatelet (GNP) ilavesiyle ürettikleri kompozitlerin morfolojisini ve termal özelliklerini araştırmışlardır. GNP ilavesi ile PPS'nin kristalleşme oranının arttığı görülmüştür. GNP ilavesi ile ısı iletkenlik artmıştır. En büyük ısı iletkenlik %30 oranında GNP ilavesiyle elde edilmiştir. Sonuçlar GNP içeren PPS kompozitlerin termal iletkenlik istenilen yerlerde kullanabileceğini göstermiştir.

Suresha ve diğ., (2020) grafen nanoplatelet (GNP) ve kısa karbon elyaf (SCF) takviyeli poliamid 66/termoplastik kopolyester elastomer (PA66/TCE) matrisli kompozitlerin yoğunluk, sertlik, çekme, bükülme ve darbe özelliklerini araştırmışlardır. Kompozitin sertliği takviye oranıyla birlikte artmıştır. %2 GNP ve %20 SCF eklenmesiyle PA66/TCE'ye kıyasla sertlik %30,55 oranında artmıştır. Çekme mukavemeti GNP'ye kıyasla SCF takviyesi oldukça artmıştır. GNP takviyesiyle birlikte belli bir miktar artış olsa da hibrit kompozitlerde mukavemet artışının büyük kısmı SCF takviyesi ile olmuştur.

Çalışma sonunda en iyi mekanik özellikleri sunan kompozit malzemenin ağırlıkça %2 oranında GNP ve %20 oranında SCF içeren kompozit olduğu bulunmuştur.

3.4. Hegzagonal Bor Nitrür Takviyeli Kompozitlerle İlgili Yapılan Çalışmalar

Gümüş ve diğ., (2021) epoksi matrisli bazalt elyaf (BF) takviyeli kompozitlere ağırlıkça %1 oranında hegzagonal bor nitrür (h-BN) ilavesinin mekanik özellikler ve işlenebilirlik üzerine etkisini araştırmışlardır. Kompozit malzemeler vakum torbalama yöntemiyle üretilmiş, ayrıca her bir kompozite ayrı hızlarda aşındırıcı su jeti işlemi (AWJ) uygulanmış ve böylece kompozitlerin işlenebilirlikleri hakkında bilgiler edinilmiştir. Kompozitlere h-BN ilavesiyle çekme ve eğilme mukavemetlerinde iyileşme gözlemlenmiştir.

Khalaj ve diğ., (2020) yüksek termal iletkenlik, düşük genleşme katsayısı ve optik bant aralığı ile dikkat çeken bir malzeme olan hegzagonal bor nitrürü farklı matris malzemeleriyle bir araya getirip kompozit malzemeler üretmişlerdir. Üretilen kompozit malzemelerde hem h-BN'nin yüksek ısı transferi sağlayıp termal iletkenliği artırıp arttırmadığı hem de yağlayıcı özellik sağlayıp aşınma direncini iyileştirip iyileştirmediği araştırılmıştır. Araştırma sonucunda, h-BN içeren polimerik kompozitlerin termal iletkenliğinin h-BN'nin kompozit çerisindeki diğer fonksiyonel malzemelerle ilişkisine, matris ile takviye elemanı arasındaki ara yüzey kuvvetine ve matris içinde dağılımına bağlı olduğu bulunmuştur. Ayrıca h-BN'nin yüksek kristallik, atomik düzgünlük ve en boy oranı özellikleri sayesinde, kompozit içerisinde ısının lokalize olmadan dağılımının sağlandığı görülmüştür h-BN içeren kompozitler h-BN yapısındaki kolay kayan katmanlar ve h-BN'nin düşük kayma mukavemeti sayesinde düşük sürtünme katsayısı sergilemişlerdir.

Su ve diğ., (2018) sikloalifatik epoksi reçine (CER) içerisine takviye elemanı olarak hem amin karbon nanotüp (CNT-NH₂) eklemişlerdir. Ayrıca hegzagonal bor nitrürün sağladığı termal iletkenlik ve elektriksel yalıtkanlık gibi özellikler sebebiyle kompozitlere hem yalnızca h-BN ilavesinin hem de hibrit h-BN/CNT-NH₂ ilavesinin etkisini incelemişlerdir. Üretilen h-BN/CER, h-BN/CNT-NH₂/CER ve h-BN ve CNT-NH₂/CER hibrit dolgu bazlı kompozitlerin mekanik, termal ve elektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda CER/CNT-NH₂/h-BN ve CER/h-BN ve

CNT-NH₂ kompozitlerin termal iletkenliğinin büyük oranda arttığı tespit edilmiştir. Bunun sebebi ise artan h-BN yüklemesiyle CNT-NH₂'nin rastgele dağılımının iyileşmesi olarak gösterilmiştir. Kompozitlere eklenen CNT-NH₂ takviyesiyle birlikte mekanik özellikler önemli ölçüde değişmiştir. Eklenen h-BN miktarıyla malzemenin gevrek hale geldiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte kopma uzaması azalmış Young modülü ise artan h-BN oranıyla artmıştır. Ancak CER/h-BN kompozitin çekme mukavemetinde önemli bir değişim meydana gelmemiştir. Bunun nedeniye pürüzsüz yüzeyle etkileşimin az olması olarak açıklanmıştır. CER/h-BN kompozitlere kıyasla daha pürüzlü bir yapıya sahip olan h-BN ve CNT-NH₂ hibrit takviyeli kompozitlerin çekme mukavemetindeyse artış gözlemlenmiştir.

Liu ve diğ., (2016) poli(eter eter keton) (PEEK) matrise ağırlıkça %1 ve %5 oranları arasındaki oranlarda hegzagonal bor nitrür ilave ederek üretilen kompozit malzemelerin aşınma özelliklerini, termal iletkenliklerini, morfolojilerini, mekanik ve termomekanik özelliklerini incelemişlerdir. h-BN ilavesiyle PEEK özelliklerinin genel olarak geliştiği gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %3 oranında h-BN ilavesiyle çekme mukavemeti 87,12 MPa'dan 98,51 MPa'ya yükselmiştir. Artan h-BN oranıyla birlikte matris içerisinde aglomerasyon meydana gelmeye başladığı için %3 ağırlık oranından sonra artan h-BN miktarıyla çekme mukavemetinde azalma gözlenmeye başlamıştır. Ayrıca kompozitlerin Young modülü artan h-BN ilavesiyle artmıştır. Aşınma oranı ise artan h-BN ilavesiyle azalmıştır. Saf PEEK ile %5 oranında h-BN içeren PEEK takviyeli kompozitlerin aşınma oranları karşılaştırıldığında %70 oranında azalma meydana geldiği görülmüştür. Bunun durum h-BN'nin yüzeyde yağlayıcı bir tabaka gibi davranarak gelen yükün çoğunu taşımasıyla açıklanmıştır. Ayrıca yüzeyde sürtünmeden dolayı oluşan yüksek ısının h-BN'nin yüksek termal iletkenliği sayesinde kolayca dağıldığı ifade edilmiştir. Saf PEEK ile karşılaştırıldığında ağırlıkça %5 oranında h-BN içeren nanokompozitlerde ısı iletkenliğinin %165,57 oranında arttığı görülmüştür.

Gültekin ve diğ., (2021) Epoksi matrise %0,5, 1, 2, 3, 4 ve 5 oranlarında hegzagonal bor nitrür ilavesinin termal, mekanik ve yapısal özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. h-BN'nin epoksi içerisinde homojen dağılması ve epoksi ile arasında iyi bir etkileşim meydana gelmesi için h-BN 3-aminopropiltrietoksilan (APTES) ile modifiye edilmiştir. APTES ile modifiye edilen h-BN'nin epoksi matris içerisinde daha homojen dağılım

sergilediği ve epoksinin özelliklerini modifiye edilmemiş h-BN takviyesine kıyasla daha fazla iyileştirdiği gözlemlenmiştir. APTES ile modifiye edilmiş h-BN takviyeli kompozitlerin camsı geçiş sıcaklığı değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Bu durum, polimer zincirlerinin hareketlerinin kısıtlanmasıyla açıklanmıştır. Ayrıca yüzeyi modifiye edilmiş h-BN'nin %0,5-5 arasında ilavesinin kompozitin çekme mukavemeti, elastisite modülü ve tokluk değerlerini arttırdığı ortaya çıkmıştır.

3.5. Hibrit Kompozitlerle İlgili Yapılan Çalışmalar

Karslı ve diğ., (2022) poli(fenilen sülfüd) (PPS) matrise karbon elyaf (CF), grafen nanoplatelet (GNP) ve terpolimer ilavesinin kompozitin termal, mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Terpolimer ve CF ağırlık oranları sırasıyla %2 ve %10 değerlerinde sabit tutulurken GNP ağırlık oranları %0,1, 0,3 ve 0,5 olarak değiştirilmiştir. Çalışma sonucunda yalnızca GNP ilavesinin çekme mukavemetini artırmadığı bulunmuştur. GNP ve CF takviyeli kompozitlerdeyse artan GNP miktarıyla çekme mukavemetinde iyileşme sağlanmıştır. PPS/CF takviyeli kompozitlere GNP ilavesiyle malzemeler arası oluşan kimyasal sinerjiden dolayı artan GNP miktarı ile çekme mukavemeti artmıştır. En yüksek çekme mukavemeti %0,5 oranında GNP içeren kompozitlerde elde edilmiştir. Eş zamanlı olarak GNP, CF ve terpolimer takviyeli kompozitlerde ağırlıkça %0,5 oranında GNP takviyesiyle birlikte çekme mukavemetinin oldukça arttığı gözlenmiştir. Aşınma testinde %0,5 oranında GNP ilavesiyle sürtünme katsayısının azaldığı bulunmuş, bunun nedeni olarak da GNP tabakalarının aralarında bulunan zayıf Van der Waals bağları sayesinde aşınma sırasında kolayca kaymaları gösterilmiştir.

Gül (2020) doktora tez çalışmasında, termoplastik poliester elastomere farklı oranlarda borik asit, hegzagonal bor nitrür, bazalt elyaf, cam elyaf ve karbon elyaf ilavesiyle üretilen kompozit malzemelerin tribolojik, mekanik, termal ve termomekanik özelliklerini incelemiştir. Ayrıca borik asit, h-BN ve bazalt elyafı yüzeylerini fonksiyonel hale getirmek için silanlama işlemi uygulamıştır. Borik asit ilave oranı ağırlıkça %0,25, 0,5 ve 1 olarak, hegzagonal bor nitrür ilave oranı ağırlıkça %1, 5 ve 10 olarak değiştirilmiş elyaf ilave oranı ise ağırlıkça %10 olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda borik asit ve h-BN içeren kompozitlerde bu malzemelerin yağlayıcı özellikleri nedeniyle sürtünme katsayısında azalma görülmüştür. Ayrıca elyaf ilavesi de kompozitlerin sürtünme

katsayılarında azalma sağlamıştır. Bazalt elyafa uygulana silanlama işlemi ile birlikte sürtünme katsayısı değerinde önemli bir düşüş meydana gelmiştir. h-BN ilavesiyle kompozitin çekme mukavemeti ve modül değerleri artmıştır ancak kopma uzamasında azalma meydana gelmiştir. H-BN'nin silanlanması ile mukavemet ve modül değerlerindeki artış daha da artmıştır. SEM fotoğrafları silanlanmış takviye malzemelerinin matris içindeki dağılımlarının daha homojen olduğunu göstermiştir. TGA sonucunda h-BN ilavesiyle bozunma sıcaklığının arttığı görülmüştür.

Szakács ve diğ., (2018) poliamid 6 (PA 6) matrise karbon elyaf, bazalt elyaf ve değişen oranlarda karbon nanotüp (CNT) ilavesiyle üretilen hibrit kompozitlerin mekanik ve morfolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, ortaya çıkan hibrit etkiyle çekme mukavemeti ve modül değerlerinin arttığı görülmüştür. Sadece partikül içeren kompozitlerde ise partiküllerin matris içerisinde homojen dağılmamaları sebebiyle çekme mukavemeti azalmıştır. SEM sonuçlarına göre elyaf ve partikülün eş zamanlı takviyesiyle partiküllerin matris içinde dağılımlarının daha homojen olduğu bu yüzden mekanik özelliklerin arttığı vurgulanmıştır. Araştırmacılar bu çalışmayla hibrit takviye ile üretilen kompozitlerin daha fazla yük taşıyacağı tezini kanıtlamışlardır.

Mosanenzadeh ve diğ., (2016) PLA'ya değişen oranlarda h-BN ve grafen nanoplatelet (GNP) ilavesiyle ortaya çıkacak hibrit etkinin kompozit özellikleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, ortaya çıkan hibrit etkiyle termal iletkenliğin saf PLA'ya göre yaklaşık 12 kat arttığını ve artan hibrit takviye oranıyla (GNP/h-BN) termal iletkenliğin daha çok arttırdığını bulmuşlardır. GNP oranını arttırıp h-BN oranını azalttıklarında ise termal iletkenliğin azaldığı ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni h-BN'nin ısı iletkenliğinin GNP'ye göre daha fazla olmasıyla açıklanmıştır. GNP ilavesiyle kompozitlerin mekanik özellikleri az da olsa azalırken elektriksel iletkenlik değerleri artmıştır. Morfolojik inceleme sonucu ise h-BN'nin düşük miktarlarda ilave edildiğinde matris içerisinde homojen ve küçük taneli olarak dağıldığını ancak artan h-BN takviye miktarıyla daha büyük taneli olarak kaldığını ortaya çıkarmıştır.

Hashim ve diğ., (2021) bazalt elyaf ve cam elyaf takviyeli epoksiye özelliklerini geliştirmek için değişen oranlarda grafen nanoplatelet eklemişlerdir. Bunun yanında GNP'nin epoksi matris içerisinde daha homojen dağılımını sağlamak ve topaklanmasını önlemek için matrise nano silika da ilave edilmiştir. Üretilen kompozitlerin mekanik

özellikleri yapılan testlerle incelenmiştir. Üretilen hibrit takviyeli kompozitlerden BF elyaf türü içeren kompozitin modülü GF elyaf türü içeren kompozitin modülünden %31 oranında daha yüksek bulunmuştur. Bununla birlikte hibrit takviyenin kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirdiği sonucuna varılmıştır.



4. MALZEMELER VE YÖNTEM

4.1. Malzemeler

Bu çalışmada kompozit malzeme üretimi için kullanılan malzemelerin detayları Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4. 1. Kompozit malzemeyi oluşturmada kullanılan malzemeler ve özellikleri

Malzeme	Ticari Adı/Firma	Özellikleri
PPS	Fortron®0205P4/Celanese	Form: Pelet Yoğunluk: 1,35 g/cm ³ Erime sıcaklığı: 280 °C Camsı geçiş sıcaklığı: 90 °C
Bazalt Elyaf	Bazalt Elyaf/Dost Kimya	Yoğunluk: 2,6 g/cm ³ Çekme mukavemeti: 4840 MPa Elastisite modülü: 89 GPa Çap: 9 µm
Grafen Nanoplatelet	GNP/Nanografi Nano Technology	Çap: 1,5 µm Kalınlık: 3 nm Saflık: %99,9 Spesifik yüzey alanı: 800 m ² /g
Hegzagonal Bor Nitrür	Hegzagonal Bor Nitrür/BORTEK®	Yoğunluk: 2,3 g/cm ³ Saflık: %99,97 Partikül büyüklüğü: 50-120 nm Form: Toz

4.2. Yöntem

PPS’ye sabit ve/veya değişen ağırlık oranlarında BF, GNP ve h-BN ilavesiyle, laboratuvar tipi mikro karıştırıcı kullanılarak, 290 °C kovan sıcaklığında, 100 rpm vida dönme hızında ve 3 dakika karıştırma süresinde kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’de bu çalışmada kullanılan laboratuvar tipi mikro karıştırıcı gösterilmiştir.



Şekil 4. 1. Laboratuvar tipi mikro karıştırıcı (DSMXplore, Hollanda).

Kompozit üretimi tamamlandıktan sonra karakterizasyon testleri için test numuneleri üretimi işlemi laboratuvar tipi enjeksiyonla kalıplama cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İşlem parametreleri olarak kovan sıcaklığı 290°C, kalıp sıcaklığı 25°C ve enjeksiyon basıncı 10 bar olarak belirlenmiştir. Şekil 4.2’de bu çalışmada kullanılan enjeksiyonla kalıplama cihazı gösterilmiştir.



Şekil 4. 2. Enjeksiyon kalıplama makinesi (DSM-Xplore, Hollanda).

Bazalt elyaf takviyeli PPS matrisli kompozitlere ağırlıkça %0,1, 0,3 ve 0,5 oranlarında sadece GNP ilave edilmiştir. GNP takviyesi kompozit üretimi sürecinde gerçekleşmiştir.

Bazalt elyaf takviyeli PPS matrisli kompozitlere ağırlıkça %1, 5 ve 10 oranlarında sadece h-BN ilave edilmiştir. H-BN takviyesi kompozit üretimi sürecinde gerçekleşmiştir.

Bazalt elyaf takviyeli PPS matrisli kompozitlerde hibrit partikül ilavesinin etkisini gözlemek için eş zamanlı olarak değişen ağırlık oranlarında h-BN ve GNP içeren kompozitler üretilmiştir. Tüm üretilen kompozitlerde bazalt elyaf ağırlık oranı %10 olarak sabit tutulmuştur. Çalışmada üretilen tüm numunelerin kodları ve bileşim oranları Tablo 4.2 de gösterilmiştir.

Tablo 4. 2. Malzeme kodu ve kompozitte kullanılan takviyelerin bileşim oranları.

No	Malzeme Kodu	PPS (ağırlıkça %)	BF (ağırlıkça %)	GnP (ağırlıkça %)	h-BN (ağırlıkça %)
1	PPS	100	0	0	0
2	PPS-BF	90	10	0	0
3	BF-1hBN	89	10	0	1
4	BF-5hBN	85	10	0	5
5	BF-10hBN	80	10	0	10
6	BF-0.1GnP	89,9	10	0,1	0
7	BF-0.3GnP	89,7	10	0,3	0
8	BF-0.5GnP	89,5	10	0,5	0
9	BF-0.1GnP-1hBN	88,9	10	0,1	1
10	BF-0.1GnP-5hBN	84,9	10	0,1	5
11	BF-0.1GnP-10hBN	79,9	10	0,1	10
12	BF-0.3GnP-1hBN	88,7	10	0,3	1
13	BF-0.3GnP-5hBN	84,7	10	0,3	5
14	BF-0.3GnP-10hBN	79,7	10	0,3	10
15	BF-0.5GnP-1hBN	88,5	10	0,5	1
16	BF-0.5GnP-5hBN	84,5	10	0,5	5
17	BF-0.5GnP-10hBN	79,5	10	0,5	10

4.3. Karakterizasyon

4.3.1. Çekme Testi

Numunelerin çekme testi ISO 527/5A standardına uygun, Shimadzu AG-X marka/model çekme test cihazı kullanılarak, iki farklı ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Çevre sıcaklığını kontrol etmek içinde test cihazına termostatik hazne bağlanmıştır. Numuneler oda sıcaklığında (23 °C) ve yüksek sıcaklıkta (70 °C), 5 mm/dk. çekme hızında test edilmişler ve çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri elde edilmiştir. Ortalama değerleri elde etmek için her numuneye en az 5 ölçüm yapılmıştır. Şekil 4.3'te çalışmada kullanılan çekme test cihazı gösterilmiştir (Shimadzu AG-X).



Şekil 4. 3. "Shimadzu AG-X " marka çekme test cihazı.

4.3.2. Adhezif Aşınma Testi

Numunelerin adhezif aşınma testleri Nanovea marka, pin-on-disk tipi standart tribometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test numunesi dönen bir disk üzerine sabitlenmiş olup sürtünme yarıçapı 4 mm, temas yükü 30 N'da sabit tutulmuş, kayma mesafesi 120 m ve diskin hızı 150 rpm olarak belirlenmiştir. Bu sayede 3 mm yarıçaplı seramik top ile farklı takviye oranlarına sahip kompozit numunelerin sürtünme katsayısı (coefficient of

friction-COF) eğrileri elde edilmiş ve ortalama sürtünme katsayısı değerleri belirlenmiştir. Şekil 4.4'te çalışmada kullanılan ‘‘Nanovea’’ marka aşınma test cihazı gösterilmiştir.



Şekil 4. 4. ‘‘Nanovea’’ marka aşınma test cihazı.

4.3.3. Termogravimetrik Analiz

Numunelerin ısı kararlılığı TGA cihazında gerçekleştirilen termogravimetrik analiz ile incelenmiştir. Bu amaçla azot atmosferi altında, ortam sıcaklığından 700 °C'ye kadar 20 °C/dk. ısıtma hızıyla, TA Instruments-Q500 marka/model TGA cihazı kullanılarak termogravimetrik analiz gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.5'te çalışmada kullanılan TGA test cihazı gösterilmiştir.



Şekil 4. 5. ‘‘TA Instruments-Q500’’ model TGA test cihazı.

4.3.4. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Analizi

Numunelerin camsı geçiş sıcaklığı (T_g), soğuk kristallenme sıcaklığı (T_c) ve erime entalpisi (ΔH_m) gibi ısı özelliklerini tespit etmek için 25 °C'den 340 °C'ye kadar 5 °C/dk. ısıtma hızında diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) analizi gerçekleştirilmiştir. TA Instruments-Q200 marka/model test cihazı ile gerçekleştirilen analizde kullanılan cihaz Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4. 6. “TA Instruments-Q200” model diferansiyel taramalı kalorimetri analizi cihazı.

Üretilen numunelerin relatif kristalinite derecesi (X_c)_{rel} aşağıda verilen denklem 4.1 ile hesaplanmıştır.

$$(X_c)_{rel} = \frac{\Delta H_m - \Delta H_c}{\Delta H_m^0 \times (1-w)} \quad (4.1)$$

Bu denklemde X_c (%)_{rel} relatif kristaliniteyi, ΔH_m (J/g) ve ΔH_c (J/g) sırasıyla numunenin erime entalpisini ve soğuk kristallenme entalpisini, ΔH_m^0 (J/g), DSC analizinden elde edilen saf PPS'nin erime entalpisini ve w numunelerin her bileşimi için takviyelerin/dolguların ağırlık oranını ifade etmektedir.

4.3.5. Dinamik Mekanik Analiz

Numunelerin termomekanik özelliklerini belirlemek üzere üç nokta eğme modunda, hava atmosferi altında, 2 °C/dk. ısıtma hızında, 15 µm salınım genliği ve 1 Hz frekansta, ortam sıcaklığından 145 °C'ye kadar ısıtmak suretiyle dinamik mekanik analiz (DMA)

gerçekleştirilmiştir. TA Instruments-Q800 marka/model DMA cihazı ile gerçekleştirilen analiz sonucunda numunelerin depo modülü (E') ve tan delta ($\tan\delta$) eğrileri elde edilmiştir. Şekil 4.7’de bu çalışmada kullanılan dinamik mekanik analiz cihazı gösterilmiştir.



Şekil 4. 7. “TA Instruments”-Q800 model dinamik mekanik analiz cihazı.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, bu tez çalışması kapsamında üretilen numunelere uygulanan çekme testi, adhezif aşınma testi, termogravimetrik analiz, diferansiyel taramalı kalorimetre analizi ve dinamik mekanik analiz sonuçlarına ve bu sonuçların yorumlanmasına yer verilmiştir.

5.1. Çekme Testi

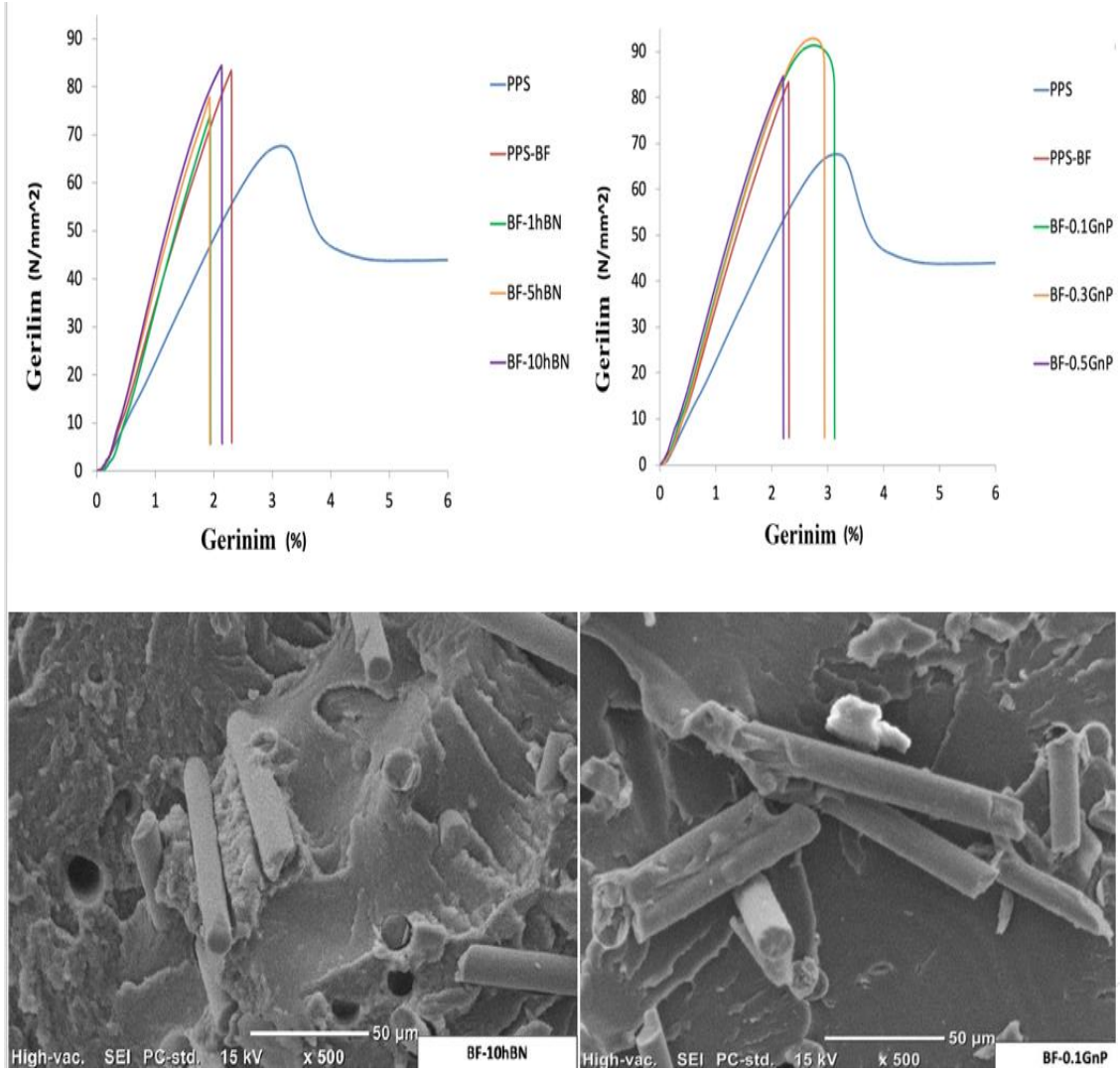
İki tip nano dolgu maddesinin ve bunların hibritlerinin BF takviyeli PPS kompozitlerinin çekme özellikleri üzerindeki etkisi, oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen çekme testleri aracılığıyla araştırılmıştır. Elde edilen ortalama çekme dayanımı değerleri Tablo 5.1'de gösterilmiştir. Numunelerin gerilme-gerinim eğrileri ve çekme kırılma yüzeylerinin SEM mikrografları Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5. 1. Numunelerin çekme testi sonuçları

Numune Kodu	Oda sıcaklığı (23 °C)	Yüksek sıcaklık (70 °C)
	Ort. Çekme Dayanımı (MPa)	Ort. Çekme Dayanımı (MPa)
PPS	67,04 ± 0,47	22,84 ± 0,41
PPS-BF	83,12 ± 0,53	42,64 ± 0,29
BF-1hBN	74,62 ± 0,67	50,64 ± 1,01
BF-5hBN	75,80 ± 0,93	58,90 ± 0,18
BF-10hBN	81,19 ± 0,68	51,66 ± 0,75
BF-0.1GnP	91,40 ± 0,01	43,77 ± 1,24
BF-0.3GnP	92,22 ± 0,83	43,70 ± 0,07

Tablo 5.1. (Devam) Numunelerin çekme testi sonuçları

BF-0.5GnP	83,14 ± 1,32	41,36 ± 0,32
BF-0.1GnP-1hBN	79,53 ± 0,39	57,01 ± 0,70
BF-0.1GnP-5hBN	79,88 ± 0,87	58,43 ± 1,52
BF-0.1GnP-10hBN	76,12 ± 0,86	57,41 ± 1,02
BF-0.3GnP-1hBN	78,95 ± 1,17	59,04 ± 0,94
BF-0.3GnP-5hBN	81,48 ± 1,10	58,46 ± 0,48
BF-0.3GnP-10hBN	79,77 ± 0,01	53,34 ± 1,03
BF-0.5GnP-1hBN	82,72 ± 0,10	58,07 ± 0,69
BF-0.5GnP-5hBN	82,77 ± 0,82	57,18 ± 0,36
BF-0.5GnP-10hBN	84,77 ± 1,17	51,40 ± 0,58

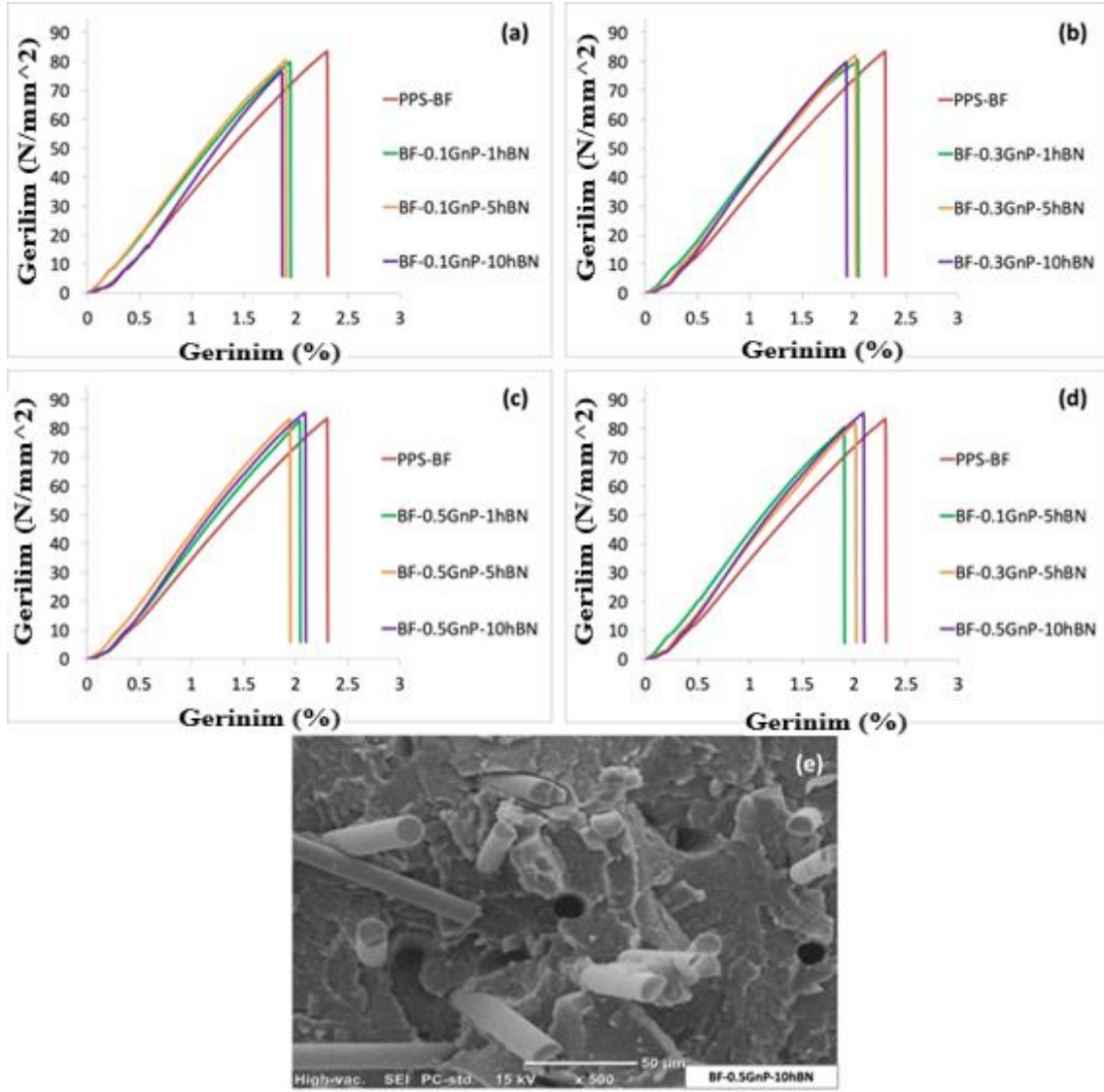


Şekil 5. 1. Sadece hBN ve sadece GnP içeren kompozitlerin oda sıcaklığında çekme testlerinden elde edilen gerilme-gerinim eğrileri ve SEM mikroagrafları.

Oda sıcaklığında gerçekleştirilen ve Şekil 5.1 ve Tablo 5.1'de gösterilen çekme testi sonuçlarına göre, ham PPS'ye tek başına BF ilavesinin çekme mukavemetini arttırdığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, BF takviyeli PPS kompozitlerin çekme mukavemeti değeri, ağırlıkça %1 ve %5 hBN ilavesi ile hafifçe azalmıştır. Buna ek olarak, kompozitlerin çekme mukavemeti değeri ağırlıkça %10 hBN ilavesiyle önemli ölçüde değişmemiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, işlenmemiş PPS, dolgunsuz formunda bile üstün mekanik mukavemet sergileyen bir polimerdir. Bu nedenle, BF takviyeli PPS'ye ağırlıkça %10'dan daha az hBN eklendiğinde çekme mukavemetindeki düşüşün, PPS matrisi ile hBN arasındaki zayıf etkileşimden kaynaklandığı ve kompozit yapıdaki hBN partiküllerinin bir defekti olarak davrandığı söylenebilir. (Karslı, 2023). Bu sonuçtan da

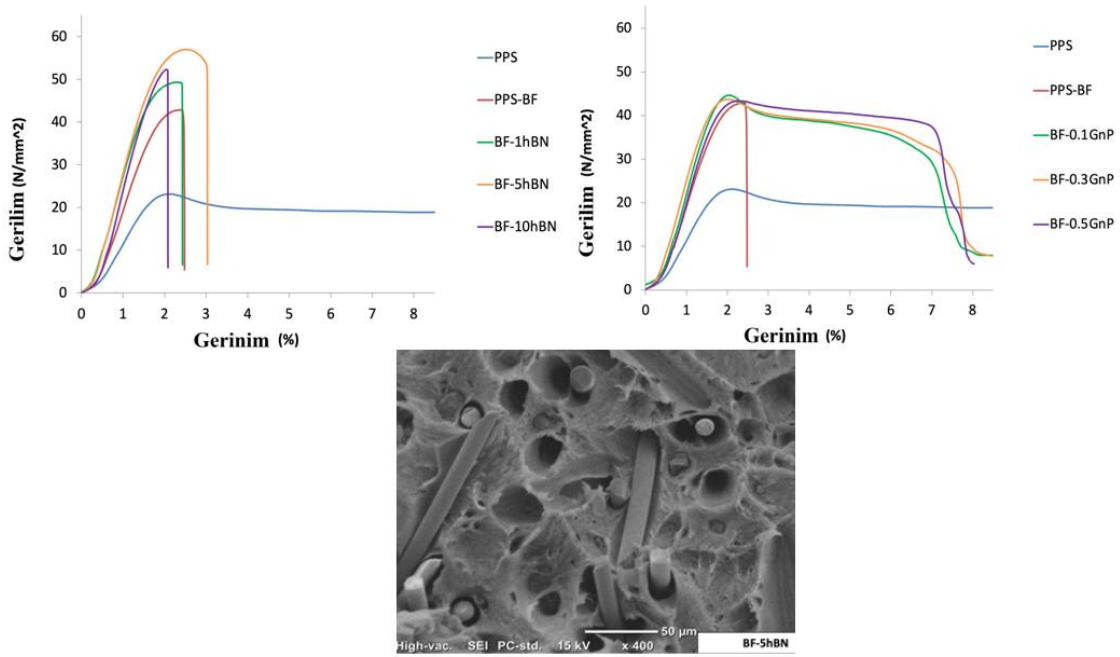
anlaşılacağı üzere mekanik özellikleri etkileyen optimum veya kritik bir hBN yükleme seviyesi vardır ve bu seviye mekanik perkolasyon seviyesi olarak adlandırılır. Bu optimum seviyenin hem altında hem de üstünde partiküller polimer matris içerisinde kusur noktaları olarak davranmakta ve mekanik özellikleri bozmaktadır. Bu seviyenin altındaki bozulma nanopartiküllerin yetersiz takviyesinden kaynaklanırken, bu seviyenin üzerindeki bozulma nanopartiküllerin topaklanmasından kaynaklanmaktadır. Öte yandan, bu kritik seviyede mekanik özellikler iyileştirilebilir. Ancak bu iyileştirme, partiküllerin yüksek yüzey alanı sayesinde partiküller ve polimer matris arasındaki arayüzeyde daha iyi stres transferi ile mümkündür. Çünkü nanopartikül dolgu polimer matrisli kompozitlerin nihai mekanik özellikleri sadece nanofiller miktarından etkilenmez, aynı zamanda polimer matris içindeki nanofiller dağılımı ve nanofiller ile polimer matris arasındaki arayüzey etkileşimi gibi diğer bazı faktörlerden de etkilenir. (Luna ve diğ., 2023).

Şekil 5.1 ve Tablo 5.1'de gösterildiği gibi, GnP'lerin yüksek yüzey alanı nedeniyle takviye edici bir etki meydana gelmiş ve BF takviyeli kompozitlere ağırlıkça %0,1 ve %0,3 GnP katılması çekme mukavemetini ve yüzde gerinimi önemli ölçüde artırmıştır. Bu sonuç, bu miktarlarda malzemede bazal düzlemleri çekme eksenine boyunca yönlendirilmiş GnP'lerden oluşan bir fraksiyonun oluşmasından ve uçlarında birbirleriyle temas ederek bir perkolasyon ağı oluşturmamasından çıkarılabilir. Malzemeye bir çekme yükü uygulandığında, yük, fraksiyonlanan GnP'lerin bazal düzlemleri boyunca yönlendirilmiş C-C kovalent bağları tarafından absorblanarak çekme mukavemetinde bir artışa neden olmuştur. Ancak, GnP'lerin miktarı arttıkça (ağırlıkça %0,5), plateletler arasındaki mesafe azalmaya başlamış, Van der Waals etkileşimleri nedeniyle toplanma eğilimi göstermiş ve nano plateletlerin bir perkolasyon ağı oluşturmak üzere yeniden yönlendirilmesi zorlaşmıştır (Joy ve diğ., 2020). Sonuç olarak, GnP'ler yapıda bir kusur gibi davranmaya başlamış ve hem çekme dayanımını hem de yüzde uzamayı azaltmıştır. Şekilden ve tablodan ağırlıkça %0,1 ve %0,3 GnP içeren kompozitlerin kırılma davranışının kırılmalardan sünekliğe doğru değiştiği de görülebilir. (Kim K ve Kim J, 2016; Karataş ve diğ., 2019; Deng ve diğ., 2014).



Şekil 5. 2. Hibrit takviyeli kompozitlerin oda sıcaklığında çekme testlerinden elde edilen gerilme-gerinim eğrileri.

Şekil 5.2 (a-e) ve Tablo 5.1’de BF takviyeli kompozitlere GnP ve hBN'nin hibrit olarak dahil edilmesinin, GnP'nin ağırlıkça %0,1 ve %0,3 yükleme seviyeleri için kompozitlerin çekme dayanımını ve yüzde uzamasını azalttığını göstermektedir. Bununla birlikte, çekme dayanımı ağırlıkça %0,5 GnP yükleme seviyesi için değişmemiştir. Bu sonuca dayanarak, hibrit nano dolguların dahil edilmesiyle dolgu-dolgu etkileşiminin arttığı, bunun da PPS matrisindeki stres konsantrasyonunun artmasına ve çekme dayanımının düşmesine neden olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, artan GnP ve hBN miktarları ile hibrit dolgu maddelerinin stres konsantrasyon bölgeleri olarak davranmaktan ziyade matrisi destekledikleri ve kompozitlerin çekme dayanımının değişmemesini sağladıkları sonucuna da varılabilir.

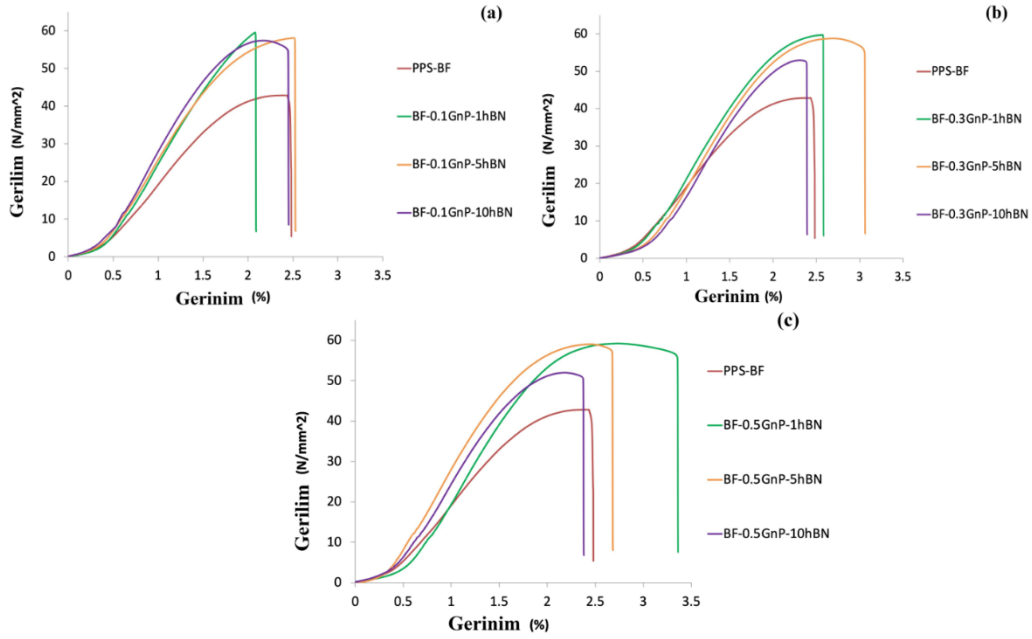


Şekil 5. 3. Sadece hBN ve sadece GnP içeren kompozitlerin 70°C'de çekme testlerinden elde edilen gerilme-gerinim eğrileri.

70°C'de gerçekleştirilen çekme testi sonuçlarını gösteren Şekil 5. 3 ve Tablo 5.1'den de görülebileceği gibi, BF takviyeli PPS kompozitlerin çekme dayanımı değeri sadece hBN ilavesiyle önemli ölçüde artmıştır. Özellikle ağırlıkça %5 hBN ilavesi çekme mukavemeti değerini yaklaşık %38 oranında artırmıştır. Bu durumun temel nedeni, hBN'nin PPS matrisinden daha yüksek bir termal iletkenliğe ve ısı kapasitesine sahip olmasıdır. Böylece 70°C'de hBN, PPS matrise göre çok daha fazla ısı absorbe etmiş ve absorbe ettiği ısıyı dağıtmıştır. Böylece yüksek sıcaklığın etkisiyle kompozitin çekme mukavemetinde meydana gelen azalma bir ölçüde engellenmiştir.

Bununla birlikte, Şekil 5.3 ve Tablo 5.1, BF takviyeli PPS kompozitin çekme dayanımı değerinin yalnızca GnP'nin dahil edilmesiyle değişmediğini, yüzde uzamanın ise önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Dolayısıyla, GnP ve hBN'nin termal iletkenliklerinin birbirine yakın değerlerde olmasına rağmen, GnP'nin 70°C'deki çekme testinde PPS matrisinin termal deformasyonunu hBN kadar engelleyemediği söylenebilir. Bu sonuç kompozit içerisindeki GnP miktarının nispeten düşük olmasına bağlanabilir. Çünkü literatürde de belirtildiği gibi termal iletkenlikte önemli bir iyileşme elde etmek için GnP için bir perkolasyon eşiğine ulaşmak gerekir ve bu perkolasyon eşiğine ulaşmak için minimum miktarda GnP'ye ihtiyaç vardır. Bu miktar genellikle ağırlıkça %6-20

aralığındadır, ancak bazı polimer matrisler için daha da yüksek olabilir (Xu, ve diğ., 2020). Ancak bu çalışmada kullanılan GnP miktarı bu perkolasyon eşiğinin oldukça altındadır.



Şekil 5. 4. Hibrit takviyeli kompozitlerin 70°C'de çekme testlerinden elde edilen gerilme-gerinim eğrileri

Şekil 5. 4(a-c) ve Tablo 5.1 incelendiğinde, hibrit nano dolgu içeren kompozitlerin yüzde uzama ve çekme dayanımı değerlerinin sadece BF takviyeli kompozitlere kıyasla önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Elde edilen bir diğer sonuç ise yapıdaki GnP miktarının artmasıyla yüzde uzamanın arttığı ve en yüksek çekme dayanımı değerlerinin ağırlıkça %0,1 ve 0,3 GnP ile ağırlıkça %1 ve 5 hBN miktarlarında elde edildiğidir. Dolgu maddesi-dolgu maddesi etkileşiminin kompozit içerisindeki termal iletken malzeme miktarını ve yapının termal iletkenliğini arttırdığı sonucuna varılabilir. Böylece, termal olarak iletken hibrit nano dolgular çok daha fazla ısı emerek ve bu sıcaklıkta çekme dayanımını artırarak 70°C'deki çekme testinde matrisin bütünlüğünü korumada daha fazla fayda sağlamıştır (Mosanenzadeh ve diğ., 2016; Joshi ve Chatterjee, 2016). Ayrıca, hibrit nano dolgu takviyeli kompozitteki GnP miktarı arttıkça, aynı çekme mukavemeti daha az hBN ilavesiyle elde edilebilmiştir. Böylece, BF takviyeli kompozitlere ağırlıkça %0,3 GnP ve ağırlıkça %1 hBN eklenerek, sadece BF takviyeli kompozitlere kıyasla çekme mukavemetinde %40'lık bir artış elde edilmiştir.

Tüm bu sonuçlar, hBN ve GnP ayrı ayrı nano dolgu maddesi olarak kullanıldığında, GnP'nin düşük yükleme seviyelerinde daha homojen dağılma kabiliyeti nedeniyle oda sıcaklığında çekme mukavemetine katkıda bulunduğunu ve hBN'nin yüksek termal iletkenliği nedeniyle yüksek sıcaklıkta çekme mukavemetine katkıda bulunduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, hBN ve GnP'nin hibrit kullanımı durumunda, yüksek sıcaklıkta aralarında sinerjik bir etki vardır ve bu da hem matris malzemesinin gerilme mukavemetine hem de yüksek sıcaklıktaki yüzde uzamaya daha fazla katkıda bulunur.

5.2. Adhezif Aşınma Testi

Sürtünme, birbirine karşı kayan iki yüzeye karşı koyan kuvvettir ve aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir:

$$F = \mu W \quad (5.1)$$

Bu denklemde F sürtünme kuvveti (N), μ sürtünme katsayısı (coefficient of friction-COF) ve W normal yüküdür (N). Bu denklem tribolojik özellikler açısından değerlendirildiğinde μ 'nın malzemelerin aşınma direncini belirlemede kritik bir faktör olduğu söylenebilir (Khalaj ve diğ., 2020). Bu nedenle, iki tip nano dolgu maddesinin ve bunların hibritlerinin BF takviyeli PPS kompozitlerinin tribolojik özellikleri üzerindeki etkisi adhezif aşınma testleri ile araştırılmıştır. Sürtünme katsayısı eğrileri Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Tablo 5.2'de gösterilmiştir.

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6, adhezif aşınma testinin başlamasından hemen sonra COF eğrilerinde ani bir artış olduğunu göstermektedir, çünkü seramik bilye numune yüzeyinden bir miktar malzeme kaldırmakta ve kaldırılan malzeme yüzey üzerinde aşındırıcı bir etki yaratmaktadır. COF eğrilerindeki bu ani artıştan sonra, eğri doğrusal hale gelir ve bu doğrusallaşma seramik bilye ile numune yüzeyi arasında bir transfer filmi oluşmasının sonucudur. Ancak her numune tipine ait eğride belirli bir kayma mesafesi değerinde doğrusallığın sona erdiği ve COF eğrilerinde dik ve keskin bir artış olduğu görülebilmektedir. Bu durum, malzemenin bütünlüğünün bu dik ve keskin artışa kadar korunmasına rağmen bu noktadan sonra korunamadığı ve COF'da keskin bir artış meydana geldiği anlamına gelmektedir. Dolayısıyla COF eğrisindeki bu keskin değişimin meydana geldiği kayma mesafesi değeri ne kadar düşükse malzemenin aşınma direncinin

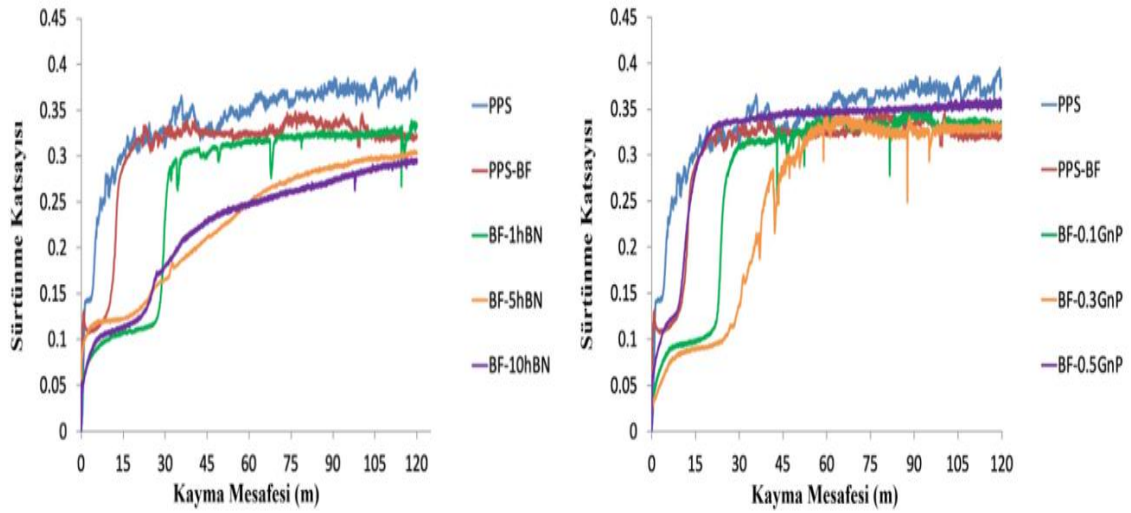
o kadar düşük, ne kadar yüksekse malzemenin aşınma direncinin o kadar yüksek olduğu sonucuna varılabilir (Sun ve diğ., 2021; Joshi ve Chatterjee, 2016).

Tablo 5. 2. Numunelerin ortalama sürtünme katsayısı sonuçları

Numune Kodu	Ortalama Sürtünme Katsayısı (COF)
PPS	0,324 ± 0,019
PPS-BF	0,304 ± 0,010
BF-1hBN	0,263 ± 0,005
BF-5hBN	0,241 ± 0,019
BF-10hBN	0,201 ± 0,002
BF-0.1GnP	0,281 ± 0,051
BF-0.3GnP	0,272 ± 0,028
BF-0.5GnP	0,315 ± 0,008
BF-0.1GnP-1hBN	0,290 ± 0,006
BF-0.1GnP-5hBN	0,288 ± 0,014
BF-0.1GnP-10hBN	0,252 ± 0,007

Tablo 5.2. (Devam) Numunelerin ortalama sürtünme katsayısı sonuçları

BF-0.3GnP-1hBN	$0,264 \pm 0,006$
BF-0.3GnP-5hBN	$0,241 \pm 0,010$
BF-0.3GnP-10hBN	$0,189 \pm 0,008$
BF-0.5GnP-1hBN	$0,293 \pm 0,007$
BF-0.5GnP-5hBN	$0,276 \pm 0,013$
BF-0.5GnP-10hBN	$0,272 \pm 0,028$

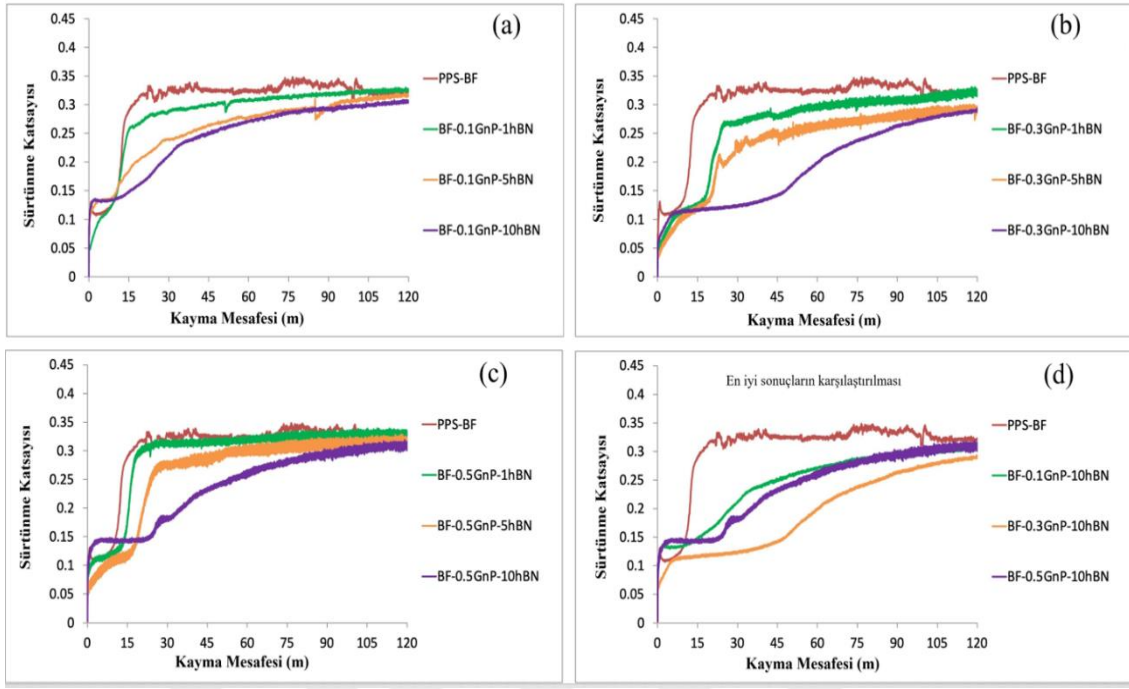


Şekil 5. 5. Sadece hBN ve sadece GnP içeren kompozitlerin adhezif aşınma testlerinden elde edilen sürtünme katsayısı eğrileri.

Şekil 5.5 ve Tablo 5.2'ye bu açıdan bakıldığında, saf PPS'ye BF eklenmesinin COF'u iyileştirdiği görülebilir. Bununla birlikte, COF'daki en önemli iyileşme kompozite hBN'nin dahil edilmesi ve artan hBN miktarı ile gerçekleşmiştir.

Malzemenin türüne bakılmaksızın, COF'un büyük ölçüde malzemenin yüzey özelliklerine ve yağlama koşullarına bağlı olduğu iyi bilinmektedir. Bu nedenle, polimerik malzemelerin aşınma direncini dolgu maddeleri kullanıp yapılarını değiştirerek iyileştirmek mümkündür (Khalaj ve diğ., 2020). Ancak kompozitin aşınma direncini iyileştirmede kullanılacak dolgu maddesinin etkinliği deforme olabilirliği ile ilgilidir. Bu durumda hBN, aşınma direncini artırmak için kullanılabilecek bir nano dolgu maddesi olarak düşünülebilir. Bunun nedeni, hBN'nin kayma gerilimi uygulandığında birbiri üzerinde kolayca kayan katmanlardan oluşması ve böylece hBN nano dolgu maddesi olarak kullanıldığında katı bir yağlayıcı görevi görerek sürtünme katsayısını azaltmasıdır. hBN'nin dahil edilmesiyle aşınma direncinin iyileştirilmesinin bir başka nedeni de hBN'nin yüksek termal iletkenliğidir. Bu termal iletkenlik nedeniyle, aşınma yüzeyinde sürtünme ile oluşan ısı kolayca dağıtılabilir, böylece yapıda hBN'nin varlığı ile polimer bütünlüğünün daha uzun süreli korunması sağlanır (Yu ve diğ., 2017; Luna ve diğ., 2023; Liu ve diğ., 2016).

hBN gibi, GnP de katmanlı yapısı ve katmanların birbiri üzerinde kayma kabiliyeti nedeniyle polimerik malzemelerin aşınma direncini artırmak için bir nano dolgu maddesi olarak kullanılabilir. Şekil 5.5 ve Tablo 5.2, kompozitlere ağırlıkça %0,1 ve %0,3 GnP eklenmesiyle COF'un azaldığını ve aşınma direncinin arttığını göstermektedir. Ancak, şekil ve tablo aynı zamanda GnP miktarı ağırlıkça %0,5'e çıktığında COF'un arttığını ve aşınma direncinin buna bağlı olarak kötüleştiğini göstermektedir. Ağırlıkça %0,5 GnP ilavesi ile aşınma direncindeki azalma, bu seviyede GnP'nin aglomerasyonunun bir sonucu olarak yorumlanabilir. Bu aglomeratların tabakaları arasındaki kaymanın azaldığı ve katı partiküller gibi davrandıkları söylenebilir. Böylece, aşınma sırasında matristen kolayca ayrılarak abrazif bir aşınma etkisi yaratmış ve sonuç olarak sürtünme katsayısını artırmışlardır. Bu sonuç çekme testi sonuçlarıyla da tutarlıdır. Benzer şekilde, Şekil 5.1 ve Şekil 5.3'e ağırlıkça %0,5 GnP ilavesiyle çekme mukavemetinin ağırlıkça %0,3 GnP içeren kompozite kıyasla azaldığını göstermektedir.



Şekil 5. 6. Hibrit takviyeli kompozitlerin adhezif aşınma testlerinden elde edilen sürtünme katsayısı eğrileri.

Şekil 5.6(a-d) ve Tablo 5.2 incelendiğinde, GnP ve hBN'nin hibrit ilavesinin COF değerlerini önemli ölçüde düşürdüğü ve özellikle ağırlıkça %0,3 GnP ve ağırlıkça %10 hBN içeren kompozitin tüm numune türleri arasında en düşük COF değerini ve en yüksek aşınma direncini sergilediği gözlemlenebilir. Buradan, hBN'nin katı yağlayıcı özelliğinin GnP'ye kıyasla çok daha etkili olduğu, bu nedenle GnP ile eş zamanlı kullanıldığında sinerjik bir etkiye katkıda bulunduğu ve sonuç olarak hibrit nano dolgu takviyeli kompozitlerin aşınma direncinde önemli bir iyileşme sağladığı sonucuna varılabilir.

Bu durum, hBN ve GnP'nin hibrit kullanımının termal iletkenlik üzerindeki sinerjik etkisinin bir sonucu olarak da yorumlanabilir. Böylece, yüksek sıcaklık çekme testi sonuçlarında gözlemlendiği gibi, adhezif aşınma testi sırasında aşınma yüzeyinde sürtünme ile oluşan ısının, GnP ve hBN'nin hibrit kullanımı ile artan termal iletkenlik nedeniyle PPS matrisinden daha kolay dağıtılabileceği sonucuna varılabilir. Bu durum, adhezif aşınması sırasında polimer bütünlüğünün uzun süreli korunmasını sağlamıştır.

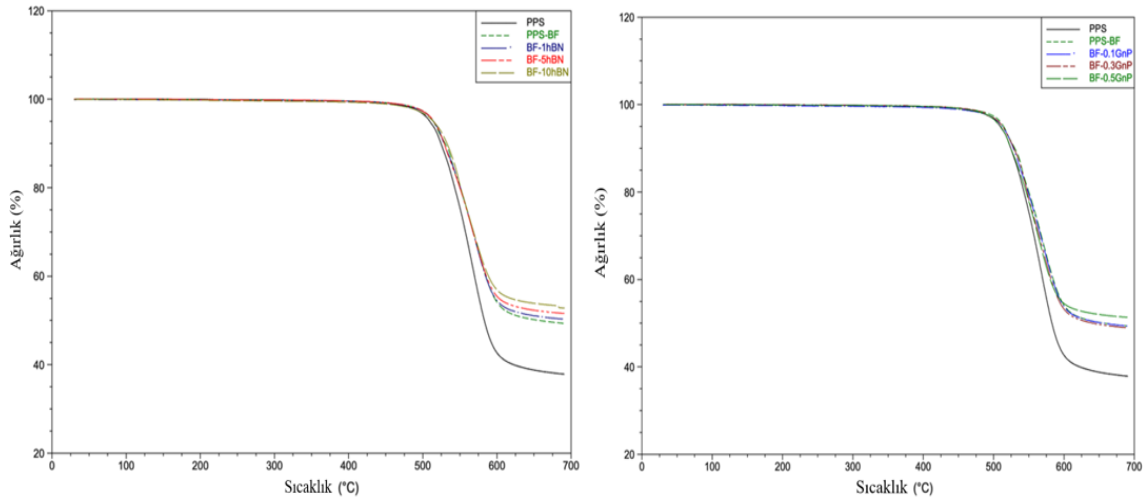
5.3. Termogravimetrik Analiz

Malzemelerin termal kararlılığı, TGA termogramlarından elde edilen %5 ağırlık kaybının meydana geldiği termal bozunma sıcaklığı ($T_{\%5}$) ve %40 ağırlık kaybının meydana

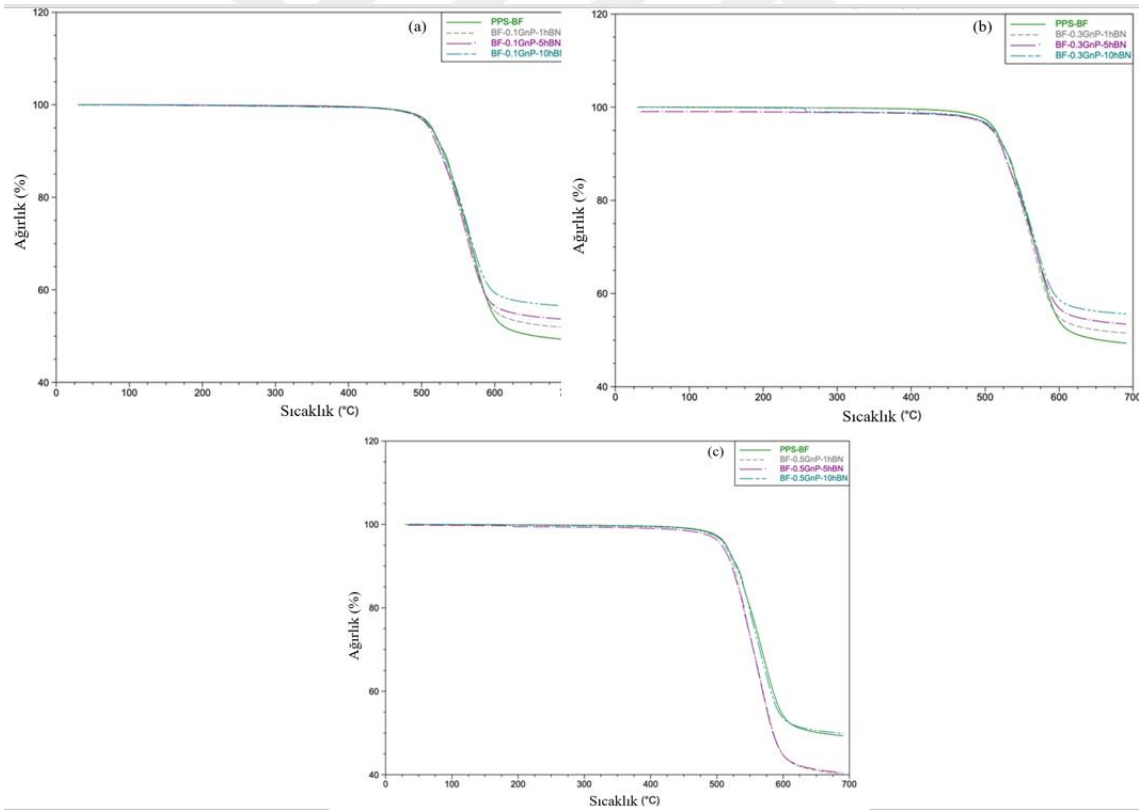
geldiği bozunma sıcaklığı ($T_{40\%}$) gibi bazı faktörler kullanılarak araştırılabilir. Bu çalışmada, numunelerin termal bozunma sıcaklıkları ($T_{5\%}$ ve $T_{40\%}$) TGA'dan elde edilmiş ve sonuçlar Tablo 5.3'te özetlenmiş ve numunelerin TGA eğrileri Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de gösterilmiştir.

Tablo 5. 3. Numunelerin TGA sonuçları.

No	Numune Kodu	$T_{5\%}$ (°C)	$T_{40\%}$ (°C)
1	PPS	509,5	569,8
2	PPS-BF	514,2	584,9
3	BF-1hBN	514,3	584,6
4	BF-5hBN	514,7	585,8
5	BF-10hBN	514,2	588,6
6	BF-0.1GnP	512,2	583,8
7	BF-0.3GnP	512,9	581,8
8	BF-0.5GnP	509,9	580,5
9	BF-0.1GnP-1hBN	513,8	584,3
10	BF-0.1GnP-5hBN	510,5	583,9
11	BF-0.1GnP-10hBN	512,9	595,8
12	BF-0.3GnP-1hBN	511,3	582,6
13	BF-0.3GnP-5hBN	509,7	587,7
14	BF-0.3GnP-10hBN	512,8	593,0
15	BF-0.5GnP-1hBN	512,0	569,6
16	BF-0.5GnP-5hBN	507,3	569,0
17	BF-0.5GnP-10hBN	513,5	581,3



Şekil 5. 7. Sadece hBN ve sadece GnP içeren kompozitlerin TGA'dan elde edilen termal bozunma eğrileri.



Şekil 5. 8. Hibrit takviyeli kompozitlerin TGA'dan elde edilen termal bozunma eğrileri.

Şekil 5.7'den ve Şekil 5.8'den de görülebileceği gibi, TGA sırasında oksidasyon gibi kimyasal reaksiyonlar nedeniyle herhangi bir ağırlık artışı olmamış, saf PPS'ye eklenen

BF, hBN ve GnP gibi takviyelerin yükleme seviyesi arttıkça 700°C'deki kalıntının ağırlık oranı da artmıştır. Tablo 5.3'ten saf PPS'nin $T_{5\%}$ ve $T_{40\%}$ değerlerinin BF, hBN ve GnP'nin dahil edilmesiyle önemli ölçüde arttığı görülebilir. Buna ek olarak hem sadece hBN hem de hBN ve GnP'nin hibrit katılımı, bazı kompozisyonlar için tek başına BF takviyeli kompozitlerin $T_{40\%}$ sıcaklığını iyileştirmiştir. Özellikle, "BF-0.1GnP-10hBN" ve "BF-0.3GnP-10hBN" kodlu kompozitler, sadece BF takviyeli kompozitle karşılaştırıldığında $T_{40\%}$ 'de yaklaşık 10 °C iyileşme sergilemiştir. Ancak hem sadece GnP ilavesinin termal bozunma sıcaklığını iyileştirememesi hem de ağırlıkça %0,5 GnP içeren hibrit nano dolgu takviyeli kompozitlerin termal bozunma sıcaklıklarındaki düşüş tablodan da görülebilmektedir.

Termal bozunma sıcaklığındaki artışın temel nedeni BF, hBN ve GnP'nin saf PPS'ye göre daha yüksek özgül ısı kapasitesi ve termal iletkenlik değerlerine sahip olmasıdır (Gül, 2020; Rybiński ve diğ., 2021; Gültekin ve diğ., 2021). Dolayısıyla kompozitler ısıtıldığında dolgu maddeleri matristen çok daha fazla ısı absorblamakta, ısıyı daha kolay dağıtmakta ve böylece matrisin termal kararlılığını korumaktadır. Ayrıca, özellikle hBN ve GnP gibi platelet formundaki dolgu maddelerinin bozunma süreci sırasında polimerik matris içinde fiziksel bariyer görevi gördüğü literatürden bilinmektedir. Çünkü bu platelet yapılı nano dolgu maddeleri ısı absorblayıcı olarak hareket ederek bozunma ürünlerini plakaları arasında hapsedebilir ve böylece bozunma sürecini geciktirebilir (Rybiński ve diğ., 2021; Mosanenzadeh ve diğ., 2016; Khalaj ve diğ., 2020). Bu mekanizmaya göre, ağırlıkça %0,5 GnP içeren kompozitlerde GnP'nin PPS'ye yeterli ısı direnci sağlayamamasının ve ısı bozunma sıcaklığının düşmesinin nedenleri; GnP'nin yeterli ısı iletkenliği sağlayacak ağırlık oranının nispeten düşük olması, ağırlıkça %0,5 yükleme seviyesinde GnP'nin aglomerasyonu ve dolayısıyla bozunma ürünlerini plakaları arasına hapsederek bozunmayı geciktirememesidir. GnP'nin bu dezavantajlarının ancak hBN ile hibrit olarak dahil edildiğinde ve hatta ağırlıkça %10 gibi yüksek bir hBN yükleme seviyesinde ortadan kaldırılabilirdiği de elde edilen bir diğer sonuçtur.

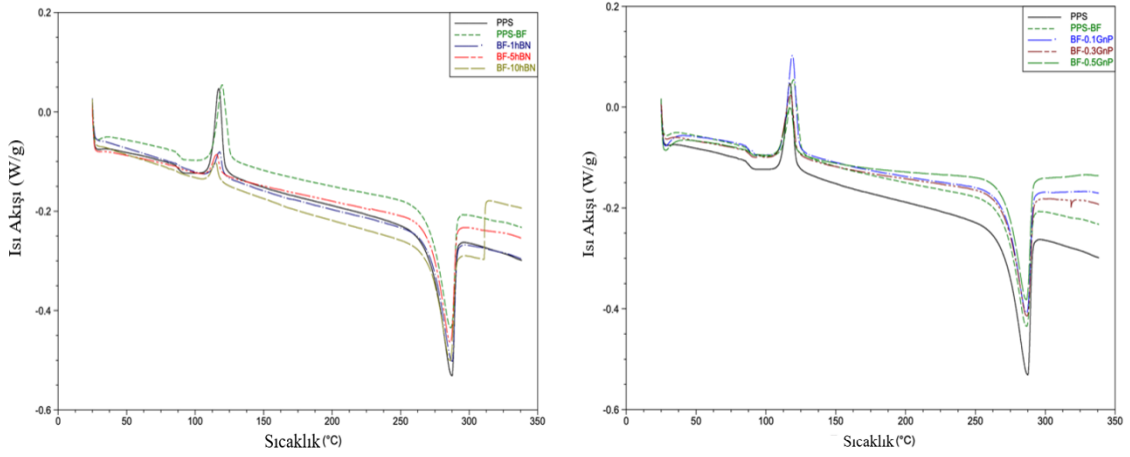
5.4. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Analizi

BF takviyeli PPS kompozitlerin termal özelliklerinin nano dolguların eklenmesiyle değişimi DSC analizi ile değerlendirilmiştir. Numunelerin DSC termogramları Şekil 5.9

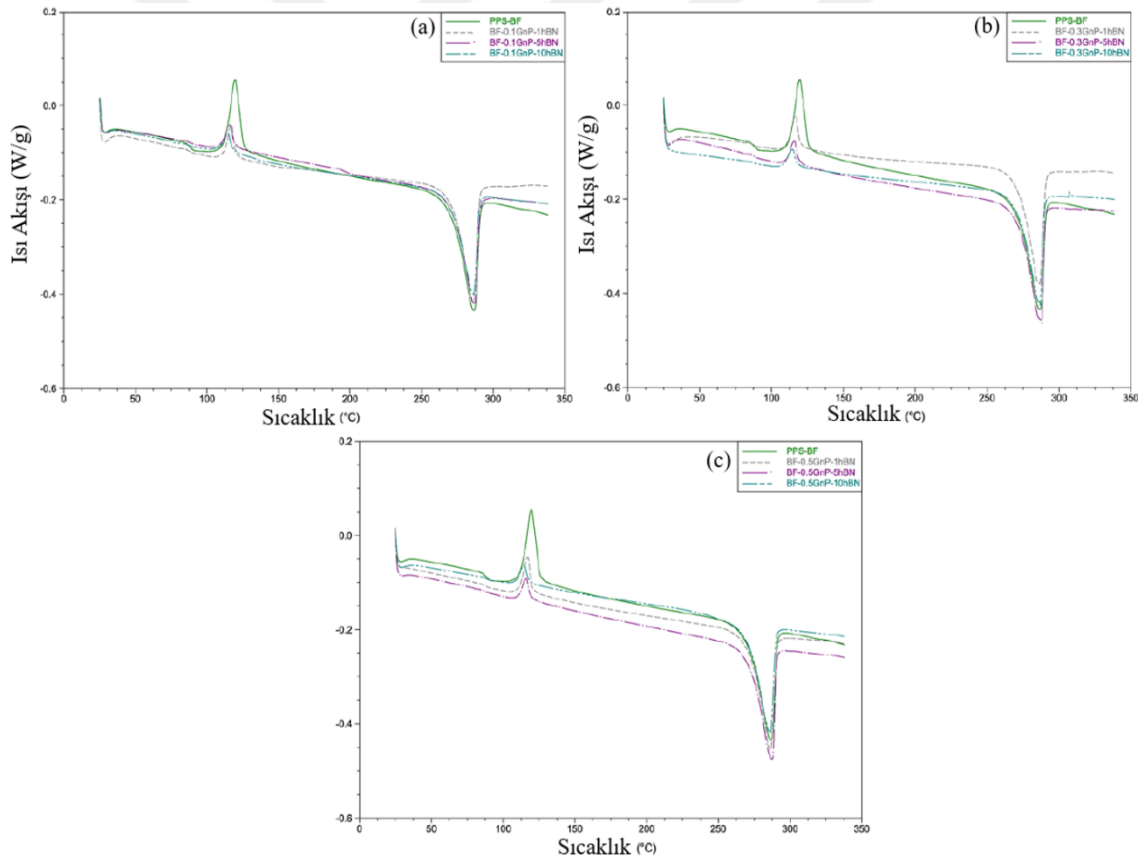
ve Şekil 5.10’da gösterilmiş olup, elde edilen ve hesaplanan ek sonuçlar Tablo 5.4’te sunulmuştur.

Tablo 5. 4. Numunelerin DSC analiz sonuçları.

No	Numune Kodu	T _g (°C)	T _c (°C)	ΔH _c (J/g)	X _c (%) _{rel}
1	PPS	88,1	111,4	15,1	100
2	PPS-BF	88,7	112,8	16,0	84,4
3	BF-1hBN	86,3	111,8	4,1	128,6
4	BF-5hBN	86,2	109,9	3,5	135,4
5	BF-10hBN	86,1	109,3	3,4	130,3
6	BF-0.1GnP	91,0	112,2	19,2	74,7
7	BF-0.3GnP	88,7	109,5	13,0	101,9
8	BF-0.5GnP	85,9	109,2	10,1	112,7
9	BF-0.1GnP-1hBN	90,4	111,9	5,6	126,4
10	BF-0.1GnP-5hBN	90,8	110,0	4,2	131,1
11	BF-0.1GnP-10hBN	86,0	108,9	3,2	125,5
12	BF-0.3GnP-1hBN	86,0	110,9	5,9	121,4
13	BF-0.3GnP-5hBN	86,0	110,3	4,2	135,4
14	BF-0.3GnP-10hBN	85,8	108,5	3,1	135,2
15	BF-0.5GnP-1hBN	85,9	111,4	5,8	119,4
16	BF-0.5GnP-5hBN	86,0	110,9	3,3	131,4
17	BF-0.5GnP-10hBN	86,1	109,2	3,2	139,1



Şekil 5. 9. Sadece hBN ve sadece GnP içeren kompozitlerin DSC termogramları.



Şekil 5. 10. Hibrit takviyeli kompozitlerin DSC termogramları.

Literatürden bilindiği üzere, polimerlerin camsı geçiş sıcaklığı, moleküler hareketlilik ve serbest hacim gibi birçok yapısal faktörden etkilenen karmaşık bir özelliktir (Gültekin ve

diğ., 2021). Bu çalışmada, saf PPS'nin T_g 'sinin serbest hacimden ve takviye malzemeleri ile PPS matrisi arasındaki etkileşimden etkileneceği tahmin edilmiştir.

Tablo 5.4'e bu açıdan bakıldığında, saf PPS'ye sadece BF ilavesinin T_g değerinde herhangi bir değişikliğe neden olmadığı, ancak BF takviyeli kompozitlere sadece hBN ilavesinin T_g değerini düşürdüğü görülebilir. BF'nin tek başına dahil edilmesinin PPS'nin zincir hareketliliğini etkilemediği, ancak hBN'nin dahil edilmesinin bunu kolaylaştırdığı sonucuna varılabilir. hBN ilavesinin T_g değeri üzerindeki etkisine literatürde de rastlanmaktadır (Gültekin ve diğ., 2021; Bozkurt ve diğ., 2021). Bu etki, hBN partiküllerinin yapıda yeterince homojen dağılmadığı ve bu nedenle aglomere olduğu, matris ile aglomere hBN partikülleri arasındaki zayıf arayüzey etkileşimi nedeniyle yapıdaki serbest hacim miktarının arttığı ve dolayısıyla T_g değerinin düştüğü şeklinde yorumlanabilir.

Buna ek olarak, Şekil 5.9, Şekil 5.10'da ve Tablo 5.4'te, T_c ve soğuk kristallenme entalpisinin azaldığını ve X_c 'nin yalnızca hBN'nin dahil edilmesiyle önemli ölçüde arttığını göstermektedir. T_c 'deki bu düşüş ve X_c 'deki artış, hBN partiküllerinin yapıda heterojen çekirdekleştirici ajanlar olarak hareket ettiği ve PPS'nin kristalleşmesini kolaylaştırdığı şeklinde yorumlanabilir. Ayrıca hBN partikülleri polimer zincirleri arasına girerek ısıtma sırasında polimer zincirlerinin birbirine yaklaşmasını engellemiş ve soğuk kristalleşmeyi önlemiştir.

Tablo 5.4 ve Şekil 5.9, Şekil 5.10'da ayrıca sadece ağırlıkça %0,1 GnP ilavesi ile T_g 'nin arttığını ve X_c 'nin azaldığını, ancak artan GnP miktarı ile T_g 'nin azaldığını ve X_c 'nin arttığını göstermektedir. GnP ilavesi ve artan GnP miktarı ile T_g ve X_c değerlerindeki bu değişim, serbest hacim ve takviye malzemeleri ile PPS arasındaki etkileşim gibi iki faktörle açıklanabilir. Böylece, ağırlıkça %0,1 GnP ilavesi ile GnP partiküllerinin yapıda daha homojen bir şekilde dağıldığı ve PPS zincirleri arasına kolayca girebildiği sonucuna varılabilir. Buna ek olarak, GnP'ler PPS matrisindeki serbest hacmin bir kısmını işgal etmiş ve polimer zincirlerinin moleküler hareketliliğini engellemiştir, her ikisi de zincir hareketliliğini azaltarak T_g 'de bir artışa ve zincirlerin kolayca kristalleşmesini engelleyerek X_c 'de bir düşüşe neden olmuştur. Ancak GnP miktarı arttıkça GnP'nin homojen dağılımı azalmış ve GnP aglomeraları oluşmaya başlamıştır. Sonuç olarak, PPS ve GnP aglomeraları arasındaki etkileşim azalmış ve serbest hacim artmış, bu da T_g 'de bir

düşüşe neden olmuştur. Buna ek olarak, GnP aglomeraları çekirdekleştirici ajanlar olarak hareket ederek matrisin kristalleşmesini kolaylaştırmış ve böylece X_c 'yi arttırmıştır (Karataş ve diğ., 2019).

Tablo 5.4'te gösterildiği gibi, aynı faktörler GnP ve hBN'nin hibrit katılımında termal özellikler üzerinde benzer etkilere sahip olmuştur. Yani, düşük GnP ve hBN miktarlarında T_g artmış, ancak artan GnP ve hBN miktarlarıyla T_g azalmış ve X_c önemli ölçüde artmıştır. Yapıdaki nano takviyelerin yükleme seviyesi arttıkça meydana gelen aglomerasyon nedeniyle serbest hacmin arttığı ve T_g 'nin azaldığı, ayrıca bu aglomeratların çekirdekleştirici ajan olarak hareket ederek X_c 'yi de artırdığı sonucuna varılabilir.

Ayrıca, soğuk kristallenme entalpi değerinin tüm numune tiplerinde hem hBN ilavesi hem de artan hBN miktarı ile önemli ölçüde azaldığı görülebilir. Bunun nedeni hBN'nin yüksek yükleme oranı ve yukarıda belirtildiği gibi hBN'nin polimer zincirlerinin soğuk kristalleşmesi üzerindeki engelleyici etkisidir.

5.5. Dinamik Mekanik Analiz

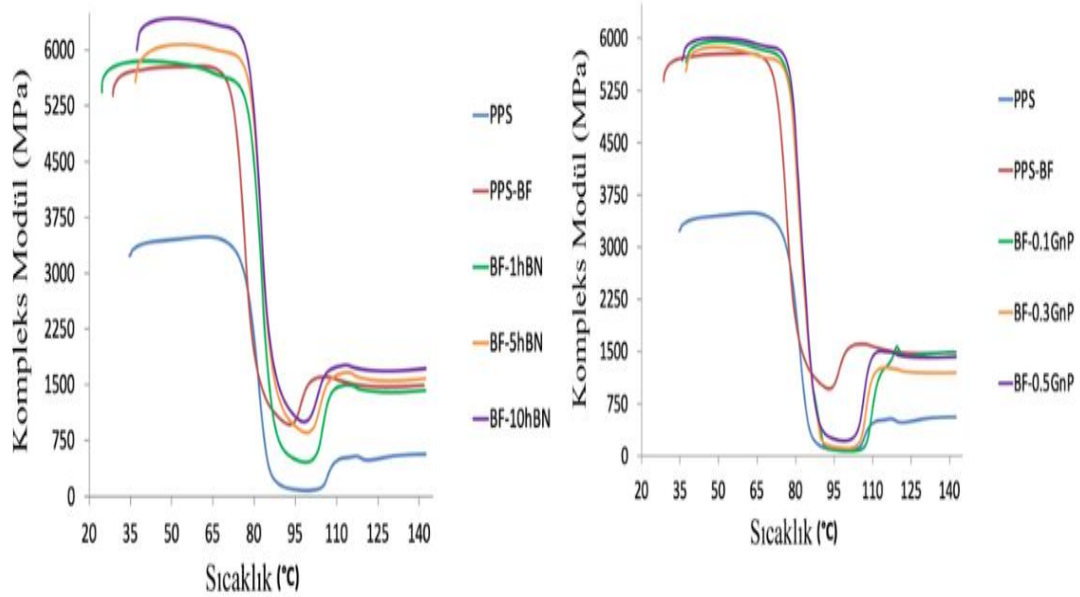
Kompozitlerin dinamik mekanik özellikleri, gerilme işlemi sırasında üretilen iki tür enerjinin miktarı incelenerek değerlendirilebilir. Bunlar depolanan enerji (elastik kısım) ve dağılan enerjidir (viskoz kısım). Bu şekilde, sinüzoidal (döngüsel) yüklemeye maruz bırakılarak gerilen malzeme için karmaşık modül (E^*) tanımlanmıştır:

$$E^* = E' + jE'' \quad (5.2)$$

Bu denklemde, E' (depolanan enerji) depo modülü ve E'' (dağılan enerji) kayıp modül olarak adlandırılır. Bu iki modülün oranı (E''/E') kayıp faktör (tan delta) olarak adlandırılır. Bu nedenle, bir malzemenin ısıtma sırasında sabit bir frekansta periyodik deformasyona tepkisini test etmek, dinamik mekanik özellikleri araştırmak için yaygın olarak kullanılan bir analiz tekniğidir.

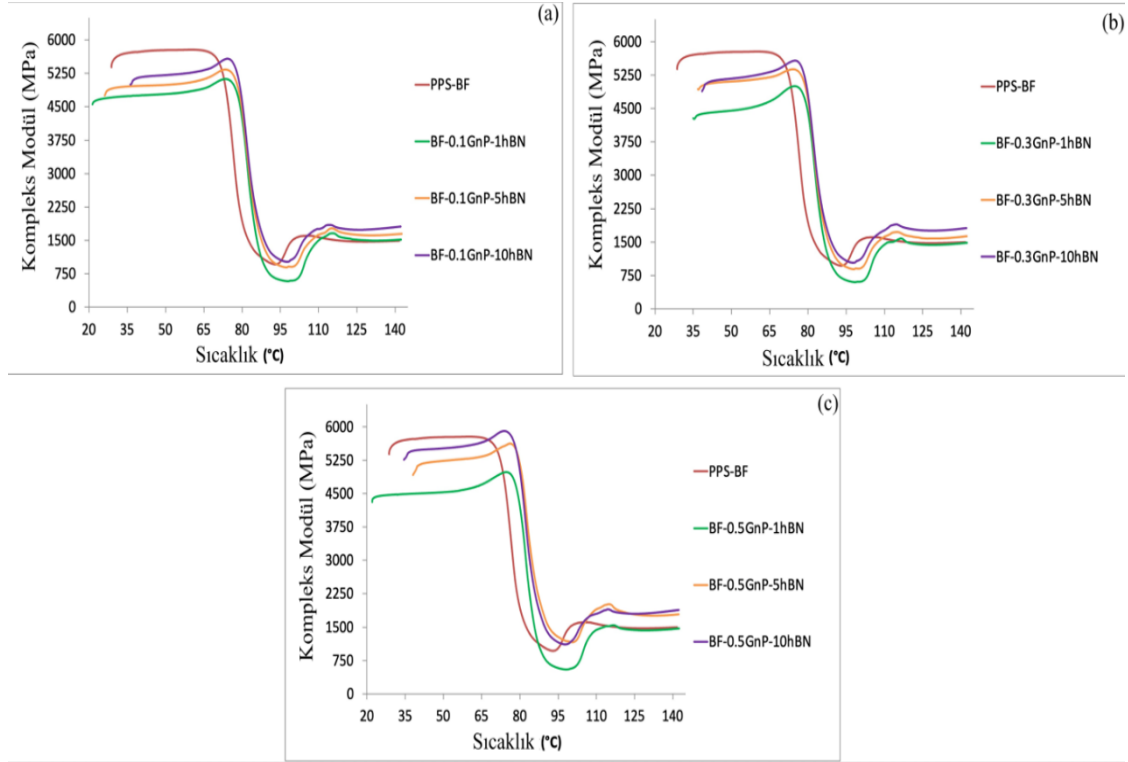
Bununla birlikte, polimerlerin dinamik mekanik özellikleri hem dolgu maddelerinin varlığından hem de matristeki homojen dağılım, şekil ve yükleme seviyesi, polimer matris ile arayüzey etkileşimi gibi bu dolgu maddeleriyle ilgili bazı faktörlerden büyük ölçüde etkilenir (Karataş ve diğ., 2019). Bu çalışmada, sıcaklığa bağlı dinamik bir özellik

olan kompozitlerin kompleks modülünü (E^*) elde etmek için DMA gerçekleştirilmiştir. Kompozitlerin kompleks modülünün sıcaklığın bir fonksiyonu olarak değişimi Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5. 11. Sadece hBN ve sadece GnP içeren kompozitlerin dinamik mekanik analizden elde edilen kompleks modül eğrileri.

Şekil 5.11'de gösterilen kompleks modül eğrilerine göre, BF'nin saf PPS'ye tek başına dahil edilmesinin kompleks modülü arttırdığı söylenebilir. Buna ek olarak, BF takviyeli PPS matris kompozitlerine sadece hBN ve sadece GnP'nin dahil edilmesi kompleks modülü artırmıştır. Özellikle, sadece ağırlıkça %10 hBN içeren kompozitler tüm numuneler arasında en yüksek kompleks modül eğrilerini sergilemiştir. Ağırlıkça %10 hBN içeren kompozitlerin kompleks modülünün neredeyse tüm sıcaklık aralığı için BF takviyeli kompozitten daha yüksek olduğu da görülebilir. Dolayısıyla, hBN ve GnP partiküllerinin ayrı ayrı kullanıldığında hem PPS matrisli hem de BF takviyeli PPS matrisli kompozitlere artan peklik (stiffness) ile etkili bir güçlendirme etkisi sağladığı söylenebilir.



Şekil 5. 12. Hibrit takviyeli kompozitlerin dinamik mekanik analizden elde edilen kompleks modül eğrileri.

Ayrıca, Şekil 5.12 (a-c), hBN ve GnP'nin hibrit olarak dahil edilmesi durumunda, kompleks modül değerlerinin camsı geçiş sıcaklığı bölgesine kadar olan kısımda azaldığını göstermektedir. Bununla birlikte, yaklaşık 100°C'den sonra, hibrit takviyeli kompozitler, özellikle yüksek hBN içeriğine sahip olanlar, sadece BF takviyeli kompozitlerden daha yüksek bir kompleks modül sergilemiştir. Yüksek sıcaklıklarda gözlemlenen kompleks modüldeki artış, hBN ve GnP'nin yüksek termal iletkenlik özellikleri nedeniyle yüksek sıcaklıklarda matrisin pekliğini korumaya katkıda bulunduğunu göstermektedir. hBN ve GnP'nin hibrit olarak dahil edilmesinin düşük sıcaklıklarda kompleks modülü azaltması, artan dolgu maddesi yüklemesi ve buna bağlı dolgu maddesi-dolgu maddesi etkileşimi ile dolgu maddelerinin homojen dağılımındaki azalma ile açıklanabilir. Böylece, aglomerasyondaki artış, azalan yüzey alanı nedeniyle arayüzey etkileşimini azaltmış, bu da kompleks modülde bir azalmaya neden olmuştur (Gül, 2020).

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın amacı, BF takviyeli PPS matrisli kompozitlere farklı ağırlık oranlarında hBN ve/veya GnP'nin hem tek başına hem de hibrit olarak dahil edilmesinin kompozitlerin mekanik, tribolojik, termal ve termomekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Bu amaçla, çekme testleri (23°C ve 70°C olmak üzere iki farklı ortam sıcaklığında), adhezif aşınma testleri, termogravimetrik analiz, diferansiyel taramalı kalorimetre analizi ve dinamik mekanik analiz gerçekleştirilmiştir.

Oda sıcaklığında yapılan çekme testi sonuçları, BF takviyeli PPS matrisli kompozitlerin çekme dayanımı değerinin ağırlıkça %1 ve %5 hBN ilavesiyle hafifçe düştüğünü, ağırlıkça %10 hBN ilavesiyle ise önemli ölçüde değişmediğini göstermiştir. Çekme dayanımındaki bu düşüşün nedeni, PPS matrisi ile hBN arasındaki zayıf etkileşim ve hBN partiküllerinin kompozit yapıda bir kusur olarak davranması olarak yorumlanmıştır. Ayrıca, BF takviyeli kompozitlere ağırlıkça %0,1 ve 0,3 GnP'lerin dahil edilmesi çekme dayanımını ve yüzde uzamayı önemli ölçüde artırırken, artan GnP miktarı (ağırlıkça %0,5) ile GnP'ler yapıda bir kusur gibi davranmaya başlamış ve hem çekme dayanımını hem de yüzde uzamayı azaltmıştır. Öte yandan, BF takviyeli kompozitlere GnP ve hBN'nin hibrit olarak dahil edilmesi, GnP'nin ağırlıkça %0,1 ve %0,3 yükleme seviyeleri için kompozitlerin çekme dayanımını ve yüzde uzamasını azaltmıştır. Bununla birlikte, çekme dayanımı ağırlıkça %0,5 yükleme seviyesi için bozulmamıştır.

Yüksek sıcaklıktaki çekme testi sonuçları, BF takviyeli PPS matrisli kompozitlerin çekme dayanımının yalnızca hBN ilavesiyle önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Özellikle, ağırlıkça %5 hBN ilavesi çekme dayanımı değerini yaklaşık %38 oranında artırmıştır. Bununla birlikte, BF takviyeli PPS matrisli kompozitin uzama yüzdesi sadece GnP ilavesiyle önemli ölçüde artarken, çekme dayanımı değeri değişmemiştir. Ayrıca, hibrit nano dolgu içeren kompozitlerin yüzde uzama ve çekme dayanımı değerleri, sadece BF takviyeli kompozitlere kıyasla önemli ölçüde artmıştır. En yüksek çekme dayanımı değerleri ağırlıkça %0,1 ve 0,3 GnP ile ağırlıkça %1 ve 5 hBN seviyelerinde elde edilmiştir. Öyle ki, BF takviyeli kompozitlere ağırlıkça %0,3 GnP ve ağırlıkça %1 hBN ilavesi, tek başına BF takviyeli kompozitlere kıyasla çekme dayanımında %40'lık bir artışa neden olmuştur. Sonuç olarak, GnP'nin düşük yükleme seviyelerinde daha homojen dağılma kabiliyeti nedeniyle oda sıcaklığında çekme dayanımına katkıda bulunduğu;

ancak hBN'nin daha fazla ısı absorblama ve dağıtma kabiliyeti nedeniyle yüksek sıcaklıkta çekme dayanımına katkıda bulunduğu sonucuna varılmıştır.

Adhezif aşınma testi sonuçları, kompozite tek başına hBN'nin dahil edilmesiyle ve artan hBN miktarıyla COF'da önemli bir iyileşme olduğunu göstermiştir. Ayrıca, ağırlıkça %0,1 ve %0,3 GnP'nin kompozitlere tek başına dahil edilmesiyle COF azalmış ve aşınma direnci iyileşmiştir. Ancak, GnP miktarı ağırlıkça %0,5'e çıkarıldığında COF artmış ve aşınma direnci buna bağlı olarak kötüleşmiştir. Ayrıca, GnP ve hBN'nin hibrit katılımı COF değerlerini önemli ölçüde düşürmüş ve özellikle ağırlıkça %0,3 GnP ve ağırlıkça %10 hBN içeren kompozit, tüm numune türleri arasında en düşük COF değerini ve en yüksek aşınma direncini sergilemiştir. Bu sonuçların, hem hBN ve GnP'nin etkili katı yağlayıcı özelliğinden hem de hBN ve GnP'nin hibrit uygulamada PPS'ye sağladığı yüksek termal iletkenlikten kaynaklandığı ve böylece sürtünme sırasında açığa çıkan ısının kolayca dağıtılmasıyla PPS matrisini koruduğu sonucuna varılmıştır.

TGA sonuçları, saf PPS'nin T_{5%} ve T_{40%} sıcaklıklarının BF, hBN ve GnP'nin dahil edilmesiyle önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Buna ek olarak, BF takviyeli kompozitlerin T_{40%} sıcaklığı, bazı bileşimler için yalnızca hBN'nin dahil edilmesinin yanı sıra hBN ve GnP'nin hibrit olarak dahil edilmesiyle iyileştirilmiştir. Özellikle, "BF-0.1GnP-10hBN" ve "BF-0.3GnP-10hBN" kodlu kompozitler, tek başına BF takviyeli kompozite kıyasla T_{40%}'de yaklaşık 10°C'lik bir iyileşme göstermiştir. Bununla birlikte, elde edilen bir diğer sonuç, GnP'nin tek başına dahil edilmesinin BF takviyeli kompozitlerin termal bozunma sıcaklığını artırmadığıdır. Saf PPS'nin termal bozunma sıcaklığındaki artışın temel nedeni BF, hBN ve GnP'nin saf PPS'ye göre daha yüksek özgül ısı kapasitesi ve termal iletkenlik değerlerine sahip olması olarak yorumlanmıştır. Bu etkinin bir diğer nedeni ise hBN ve GnP gibi platelet şeklindeki nano dolguların termal bozunma sırasında gaz bariyeri özelliği sağlaması olmuştur. Öte yandan, GnP'nin tek başına PPS'ye yeterli ısıl direnci sağlayamamasının nedenleri, yeterli ısıl iletkenliği sağlamak için GnP'nin ağırlık oranının nispeten düşük olması, ağırlıkça %0,5 yükleme seviyesinde GnP'nin topaklanması ve dolayısıyla gaz bariyeri özelliğini verimli bir şekilde yerine getirememesidir.

DSC analiz sonuçları, BF takviyeli kompozitlere tek başına hBN'nin dahil edilmesinin PPS'nin zincir hareketliliğini kolaylaştırdığını ve homojen olmayan dağılım,

aglomerasyon ve yapıdaki serbest hacim miktarındaki artış nedeniyle T_g değerini düşürdüğünü göstermiştir. Buna ek olarak, sadece hBN'nin dahil edilmesiyle, T_c azalmış ve X_c önemli ölçüde artmıştır çünkü hBN partikülleri yapıda heterojen çekirdekleştirici ajanlar olarak hareket etmiş ve PPS'nin kristalleşmesini kolaylaştırmıştır. Buna ek olarak, ağırlıkça %0,1 GnP ilavesi ile GnP partikülleri polimer zincirlerinin moleküler hareketliliğini engellemiş ve hem T_g 'de artışa hem de X_c 'de düşüşe neden olmuştur. Ancak GnP miktarı arttıkça aglomeralar oluşmaya başlamış ve serbest hacim artarak T_g 'nin düşmesine ve X_c 'nin artmasına neden olmuştur. Ayrıca, aynı faktörler GnP ve hBN'nin hibrit ilavesinde de termal özellikler üzerinde benzer etkilere neden olmuştur. Öyle ki, düşük miktarlarda GnP ve hBN ilavesi ile T_g artarken, artan GnP ve hBN miktarları ile T_g azalmış ve X_c önemli ölçüde artmıştır.

DMA sonuçları, BF takviyeli PPS matrisli kompozitlere sadece hBN ve sadece GnP'nin dahil edilmesinin kompleks modülü artırdığını göstermiştir. Özellikle, ağırlıkça %10 hBN içeren kompozitler tüm numuneler arasında en yüksek kompleks modül eğrilerini sergilemiştir. Bununla birlikte, kompleks modül değerleri hBN ve GnP'nin hibrit katılımı ile camsı geçiş sıcaklığı bölgesine kadar olan kısımda azalmıştır. Bununla birlikte, yaklaşık 100°C'den sonra, hibrit takviyeli kompozitler, özellikle yüksek hBN içeriğine sahip olanlar, sadece BF ile takviye edilenlere kıyasla daha yüksek kompleks modül sergilemiştir. Kompleks modülün 100°C'nin altında azalması, yapıdaki nano dolguların miktarının artmasıyla aglomerasyondaki artışa bağlanırken, 100°C'nin üzerindeki artış, nano dolguların yüksek termal iletkenliği nedeniyle yüksek sıcaklıklarda matrisin pekliğini korumadaki katkısına bağlanmıştır.

Tüm test sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, BF takviyeli PPS matrisli kompozitlere hBN ve GnP'nin hibrit olarak dahil edilmesinin, kompozitlerin yüksek sıcaklıktaki çekme mukavemetini, adhezif aşınma direncini ve termal direnç özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği sonucuna varılabilir. Bu nedenle, mekanik, tribolojik ve termal performansın yanı sıra elektriksel özelliklerin de gerekli olduğu kompozit uygulamalarında hBN ve GnP'nin hibrit kullanımının tavsiye edildiği söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Ab Ghani, N. F., Desa, M. M., Bijarimi, M. (2021). The evaluation of mechanical properties graphene nanoplatelets reinforced polylactic acid nanocomposites. *Materials Today: Proceedings*, 42, 283-287.
- Alemour B, Bradan O, Hassan MR (2019) A Review of Using Conductive Composite Materials in Solving Lightning Strike and Ice Accumulation Problems in Aviation. *J Aerosp Technol Manag*, 11,1919.
- Ansarouıdı, N. (2020). hBN VE MWCNT Katkılı PA66/CAM Nanokompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisanüstü Eğitim Enstitüsü, Samsun, 636590.
- Anwar, Z., Kausar, A., Rafique, I., Muhammad, B. (2015). Advances in Epoxy/Graphene Nanoplatelet Composite with Enhanced Physical Properties: A Review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 55(6), 643–662. doi:10.1080/03602559.2015.1098695
- Arslan, C., Dogan, M. (2018). The effects of silane coupling agents on the mechanical properties of basalt fiber reinforced poly(butylene terephthalate) composites. *Composites Part B: Engineering*, 146, 145–154. doi:10.1016/j.compositesb.2018.04
- Asi, D. (2018). Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerde İlave Olarak Kullanılan Parçacıkların Geometrisinin Kompozit Malzemelerin Fiziksel ve Mekaniksel Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. Doktora Tezi, Uşak Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uşak, 519001.
- Beşergil, B. (2008). Ticari Plastikler ve Mühendislik Plastikleri Polimerler. Prof. Dr. Bilsen Beşergil, http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_408.html, (Ziyaret Tarihi: 10 Ekim 2022).
- Billmeyer, F.W. (1984). *Textbook of Polymer Science* (3rd ed.). New York:John Wiley and Sons Inc.
- Birdal A. (2008). 2,3-DimerKaptosüksinik Asit Uç Gruplarını İçeren Akrilamid Polimerlerinin Sentezi Ve Fizikokimyasal Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 232416.
- Biron, M. (2018). *Thermoplastics and Thermoplastic Composites* (3rd ed). Elsevier, Butterworth-Heinemann: Oxford
- Bora, M. Ö., Coban, O., Avcu, E., Fidan, S., Sınmazçelik, T. (2013). The effect of TiO₂ filler content on the mechanical, thermal, and tribological properties of TiO₂/PPS composites. *Polymer composites*, 34(10), 1591-1599.

- Bozkurt YE, Yıldız A, Türkarslan Ö, Şaşal FN, Cebeci H (2021) Thermally conductive h-BN reinforced PEI composites: the role of processing conditions on dispersion states. *Materials Today Communications* 29:102854.
- Brinson, F., Brinson, C. (2015). *Polymer Engineering Science and Viscoelasticity An Introduction* (2nd ed). Boston, MA:Springer US.
- Chand, S. (2000). Carbon fibers for composites. *Journal of Materials Science*, 35(6), 1303–1313.
- Chartoff, R. P., Menczel, J. D., Dilman, S. H. (2009). *Thermal analysis of polymers: fundamentals and applications*, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Chawla, K. K. (2012). *Composite Materials Science and Engineering* (3rd ed). New York: Springer.
- Chen, G., Mohanty, A., Misra, M. (2021). Progress in research and applications of Polyphenylene Sulfide blends and composites with carbons. *Compos Part B-Eng*, 209:108553.
- Çoban O. (2011). Polimer Matrisli Kompozitlerde Partikül Takviyesinin Malzeme İç Yapısına, Mekanik ve Tribolojik Özelliklere Etkisi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 301643.
- Değirmenci, Ü. (2019). Karbon Tabanlı Yeni Hibrit Nano-Yapıların Modellenmesi ve Analizi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 605493.
- Deng, S., Lin, Z., Xu, B., Qiu, W., Liang, K., Li, W. (2014). Isothermal crystallization kinetics, morphology, and thermal conductivity of graphene nanoplatelets/polyphenylene sulfide composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 118, 197-203.
- Dhand V., Mittal G., Rhee K. Y., Park S. J., Hui D. (2015). A Short Review on Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites, *Composites: Part B*, 73, 166-180.
- Drzeżdżon, J., Jacewicz, D., Sielicka, A., Chmurzyński, L. (2019). Characterization of polymers based on differential scanning calorimetry based techniques. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 110, 51-56.
- Elmas, B. (2021). Üç Boyutlu (3D) Yazıcıda Üretilen Poliaktik Asit (PLA) Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 702119.
- Ersöz, M., Işıtan, A., Balaban, M. (2018). *Nanoteknoloji 1 Nanoteknolojinin Temelleri*. (1st ed.). Denizli: BilalOfset.

- Esatoğlu, L. (2018). Elyaf Takviyeli PPS Kompozitlerinin Sürtünme ve Aşınma Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 496233.
- Gao, Y., Picot, O. T., Zhang, H., Bilotti, E., Peijs, T. (2017). Synergistic effects of filler size on thermal annealing-induced percolation in polylactic acid (PLA)/graphite nanoplatelet (GNP) nanocomposites. *Nanocomposites*, 3(2), 67-75.
- Georgakilas, V., Perman, J. A., Tucek, J., Zboril, R. (2015). Broad family of carbon nano allotropes: classification, chemistry, and applications of fullerenes, carbon dots, nanotubes, graphene, nano diamonds, and combined superstructures. *Chem. Rev.* 115, 4744–4822. doi: 10.1021/cr500304f.
- German, M. R. (2016). *Particulate Composites Fundamentals and Applications*. Switzerland: Springer International Publishing.
- Gu, J., Du, J., Dang, J., Geng, W., Hu, S., Zhang, Q. (2014). Thermal conductivities, mechanical and thermal properties of graphite nanoplatelets/polyphenylene sulfide composites. *RSC Advances*, 4(42), 22101-22105.
- Gül, O. (2020). Termoplastik Polyester Elastomer Matrisli Kompozitlerin Tribolojik ve Mekanik Özelliklerin Elyaf ve Partikül Takviye Malzemeleri Varlığında İyileştirilmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 630196.
- Gültekin, K., Uğuz, G., Özel, A. (2021). Improvements of the structural, thermal, and mechanical properties of structural adhesive with functionalized boron nitride nanoparticles. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(21), 50491.
- Gumus, F. B., Ceritbinmez, F., Yapici, A. (2021). The effect of hexagonal nano boron nitride on mechanical performances and machinability behaviors of basalt fabric reinforced epoxy composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 235(23), 7161-7168.
- Hashim, U. R., Jumahat, A., Jawaaid, M. (2021). Mechanical properties of hybrid graphene nanoplatelet-nanosilica filled unidirectional basalt fibre composites. *Nanomaterials*, 11(6), 1468.
- İbrahim, M. (2022). Karbon Fiber Takviyeli Kompozitlerde Epoksi Matrise Karbon Nanotüplerin Eklenmesinin Kompozitin Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 718384.
- Joshi, M., Chatterjee, U. (2016). 8- Polymer nanocomposite: An advanced material for aerospace applications, Rana, S., Fanguero, R. (Ed.). *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering* (241-264). India:Woodhead Publishing,

- Joy, J., George, E., Haritha, P., Thomas, S., Anas, S. (2020). An overview of boron nitride based polymer nanocomposites. *Journal of Polymer Science*, 58(22), 3115-3141.
- Kaczmar, J. W., Pietrzak, K., & Włosiński, W. (2000). The production and application of metal matrix composite materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 106(1-3), 58–67. doi10.1016.
- Kalaycı, A. (2021). Havacılık Uygulamaları İçin Bor Katkılı Termoset Kompozit Malzemelerin Birleştirme Yöntemlerinin Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Fakültesi, Samsun, 688548.
- Karataş, E. (2019). Karbon Elyaf Grafen Nanoplatenet ve Zincir Uzatici Katkılarının Poliamit 6,6 Kompozitlerin Özellikleri Üzerine Eş Zamanlı Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 576701.
- Karatas, E., Gul, O., Karsli, N. G., Yilmaz, T. (2019). Synergetic effect of graphene nanoplatelet, carbon fiber and coupling agent addition on the tribological, mechanical and thermal properties of polyamide 6, 6 composites. *Composites Part B: Engineering*, 163, 730-739.
- Karataş, M., Gökkaya, H. (2018). A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. *Defence Technology*, 14, 318-326.
- Karslı Yılmaz N. G. (2011). Karbon Elyaf Takviyeli Termoplastik Karmaların Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 283046.
- Karslı Yılmaz N. G. (2014). Farklı Kaplama Malzemeleri ile Kaplanmış Karbon Elyaf Takviyeli Poliamit 6,6 ve Poli(Bütlen Tereftalat) Karmaların Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 360885.
- Karsli, N. G., Gul, O., Yilmaz, T. (2022). Investigation of the synergistic effect of addition the hybrid carbon fiber, graphene nanoplatelet and matrix modifier to poly (phenylene sulphide) on physical properties. *Fibers and Polymers*, 23(4), 1059-1067.
- Kausar, A. (2020). Fullerene Nanofiller Reinforced Epoxy Nanocomposites— Developments, Progress and Challenges. *Materials Research Innovations*, 1–11. doi:10.1080/14328917.2020.1748794.
- Kaw, K. (2006). *Mechanics of Composite Materials* (2nd ed.). 6000 Broken Sound Parkway NW: Taylor & Francis.

- Khalaj, M., Zarabi Golkhatmi, S., Alem, S. A. A., Baghchesaraee, K., Hasanzadeh Azar, M., Angizi, S. (2020). Recent progress in the study of thermal properties and tribological behaviors of hexagonal boron nitride-reinforced composites. *Journal of Composites Science*, 4(3), 116.
- Kim, K., Kim, J. (2016). BN-MWCNT/PPS core-shell structured composite for high thermal conductivity with electrical insulating via particle coating. *Polymer*, 101, 168-175.
- Kim, S. H., Park, S. J. (2020). Effect of graphene oxide on interfacial interactions and fracture toughness of basalt fiber-reinforced epoxy composites. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 20(11), 6760-6767.
- Kızıl, A. (2019). Doğal Mineral ve Elyaf Takviyeli Poli(Fenilen Sülfid) Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Özelliklerin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 576692.
- Köklü, M. (2012). Bor İçerikli Nano Malzeme Üretim Olanaklarının Araştırılması. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 330552.
- Kratz, J., Hamerton, I. (2018). Chapter 9- *The use of thermosets in modern aerospace applications*. Guo, Q. (Ed). Thermosets (3rd ed) (303-340). UK: Elsevier.
- Kuan, C.F., Chiang, C. L., Lin, S. H., Huang, W. G., Hsieh, W. Y., Shen, M. Y. (2018). Characterization and Properties of Graphene Nanoplatelets/XNBR Nanocomposites. *Polymers and Polymer Composites*, 26(1), 59–68. doi:10.1177/096739111802600107.
- Kukreja, B, S., Löfström, J. (2023). Composites in Aircraft Industry. Appropedia, https://www.appropedia.org/Composites_in_the_Aircraft_Industry, (Ziyaret Tarihi: 15 Şubat 2023).
- Kumarasamy, S., Abidin, M. S. Z., Bakar, M. A., Nazida, M. S., Mustafa, Z., & Anjang, A. (2018). Effects of high and low temperature on the tensile strength of glass fiber reinforced polymer composites. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 370, No. 1, p. 012021). IOP Publishing.
- Lach, M., Kluska, B., Janus, D., Kabat, D., Pławecka, K., Korniejenko, K., Guigou, D., Choińska, M. Effect of Fiber Reinforcement on the Compression and Flexural Strength of Fiber Reinforced Geopolymers. *Appl. Sci*, 11, 10443. <https://doi.org/10.3390/app112110443>
- Liu, L., Xiao, L., Li, M., Zhang, X., Chang, Y., Shang, L., Ao, Y. (2016). Effect of hexagonal boron nitride on high-performance polyether ether ketone composites. *Colloid and Polymer Science*, 294, 127-133.

- Liu, T., Wang, Y., Eyler, A., Zhong, W-H. (2014) Synergistic effects of hybrid graphitic nanofillers on simultaneously enhanced wear and mechanical properties of polymer nanocomposites. *Eur Polym J*, 55, 210–221.
- Luna, A. V., Santiago, D., McDarby, S. (2023). Composite Preparation and Characterization of h-BN as an Electrical Insulation Component for Electrified Aircraft Propulsion. *In Intern Report*.
- Markovi, G., Marinovi, M., Cincovi., Jovanovi, V.D., Samaržija-Jovanovi, S., Budinski-Simendi, J. (2016). *Polymer characterization* (II).
- Milisavljević, J., Petrović, E., Ćirić, I., Mančić, M., Marković, D., Đorđević, M. (2012). Tensile testing for different types of polymers. *In Danubia-Adria Symposium, University Of Belgrade, Serbia*, 29, 266-269
- Mirzaei, J., Fereidoon, A., Ghasemi-Ghalebahman, A. (2021). Experimental analysis of mechanical properties of graphene/kenaf/basalt reinforced hybrid nanocomposites using response surface methodology. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43(4). doi:10.1007/s40430-021-02936-3
- Montagna, L. S., Kondo, M. Y., Callisaya, E. S., Mello, C., Souza, B. R., Lemes, A. P., Botelho, E. C., Costa, M. L., Alves, M. C. S., Ribeiro, M. V., Rezende, M. C. (2022). A review on research, application, processing, and recycling of PPS based materials. *Polímeros Ciência e Tecnologia*, 32(1), e2022005.
- Mosanenzadeh, S. G., Khalid, S., Cui, Y., Naguib, H. E. (2016). High thermally conductive PLA based composites with tailored hybrid network of hexagonal boron nitride and graphene nanoplatelets. *Polymer Composites*, 37(7), 2196-2205.
- Nicholson, J.W. (2006). *The Chemistry of Polymers* (3rd ed). RCS Publishing, UK.
- Nijssen, R.P.L. (2015). *Composite Materials An Introduction*. In Holland University of Applied Sciences. Toray Advanced Composites.
- Pantelakis, S., Tserpes, K. (2020). *Revolutionizing Aircraft Materials and Processes*. Springer Nature Switzerland: Springer
- Parveez, B., Kittur, M., Badruddin, I., Kamangar, S., Hussien, M., Umarfarooq, M. (2022). Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications A Review. *Polymers*, 14(22), 5007.
- Prashanth, S., Subbaya M., Nithin, K., Sachhidananda, S. (2017). Fiber Reinforced Composites - A Review. *J Material Sci Eng*, 6(3), 341. doi:10.4172/2169-0022.100034.
- Priyanka, P., Dixit, A., Mali, H. (2017). High-Strength Hybrid Textile Composites with Carbon, Kevlar, and E-Glass Fibers for Impact-Resistant Structures. *A Review. Mechanics of Composite Materials*, 53(5), 981-1008.

- Rajak, D., Pagar, D., Kumar, R., Pruncu, C. (2019). Recent Progress of Reinforcement Materials A Comprehensive Overview of Composite Materials. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 965-986.
- Reddy, A. (2018). Particulate Reinforced Composites. JNTUH Hyderabad, https://jntuhceh.ac.in/web/tutorials/faculty/1677_PMMC.pdf (Ziyaret tarihi: 10 Ekim 2022).
- Rybiński P, Syrek B, Marzec A, Szadkowski B, Kuśmerek M, Śliwka-Kaszyńska M, Mirkhodjaev UZ (2021). Effects of basalt and carbon fillers on fire hazard, thermal, and mechanical properties of EPDM rubber composites. *Materials*, 14, 5245.
- Saçak, M. (2002). *Polimer Kimyası*. GAZİ Kitabevi, ANKARA.
- Şahin, A. E., Karşlı, N. G., Sınmazçelik, T. (2016). Comparison of the Mechanical, Thermomechanical, Thermal, and Morphological Properties of Pumice and Calcium Carbonate-Filled Poly(phenylene sulfide) Composites. *Polymer Composites*, 37(11), 160-3166.
- Sathishkumar, T., Satheeshkumar, S., Naveen, J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites – a review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33(13), 1258–1275.
- Savaşkan, T., (1999). *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi*. Trabzon: Derya Kitabevi, Akademi Kitabevi ve Kişisel Yayın.
- Sharma, A. K., Bhandari, R., Aherwar, A., & Rimašauskienė, R. (2019). Matrix materials used in composites A comprehensive study. *Materials Today Proceedings*, 21, 1559-1562.
- Shirvanimoghaddam, K., Hamim, S. U., Karbalaee Akbari, M., Fakhrhoseini, S. M., Khayyam, H., Pakseresht, A. H., Naebe, M. (2017). Carbon fiber reinforced metal matrix composites: Fabrication processes and properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 92, 70–96.
- Singha A. S., Rana A. K., Jarial R. K., (2013). Mechanical, Dielectric and Thermal Properties of Grewia Optiva Fibers Reinforced Unsaturated Polyester Matrix Based Composites, *Materials and Design*, 51, 924–934.
- Staab, GH. (2015). *Laminar Composites* (2nd ed). Butterworth-Heinemann, US.
- Stoeffler, K., Andjelic, S., Legros, N., Roberge, J., Schougaard, S. B. (2013). Polyphenylene sulfide (PPS) composites reinforced with recycled carbon fiber. *Composites Science and Technology*, 84, 65-71.

- Su, Z., Wang, H., Ye, X., Tian, K., Huang, W., He, J., Tian, X. (2018). Anisotropic thermally conductive flexible polymer composites filled with hexagonal boron nitride (h-BN) platelets and ammine carbon nanotubes (CNT-NH₂): Effects of the filler distribution and orientation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 109, 402-412.
- Sucu, Y, E. (2023). Termoplastik Kopolister Elastomer / Kalsit Kullanarak Hazırlanan Polimer Kompozitlerin Mekanik, Morfolojik ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 789509.
- Şükür, E. F., Önal, G. (2020). Graphene Nanoplatelet Modified Basalt/Epoxy Multi-Scale Composites With Improved Tribological Performance. *Wear*, 460, 203481.
- Sun L, Cao M, Xiao F, Xu J, Chen Y (2021) POSS functionalized graphene oxide nanosheets with multiple reaction sites improve the friction and wear properties of polyamide 6. *Tribol Int*, 154, 106747.
- Suresha, B., Hemanth, G., Hemanth, R., Lalla, N. P. (2020). Role of graphene nanoplatelets and carbon fiber on mechanical properties of PA66/thermoplastic copolyester elastomer composites. *Materials Research Express*, 7(1), 015325.
- Szakács, J., Mészáros, L. (2018). Synergistic effects of carbon nanotubes on the mechanical properties of basalt and carbon fiber-reinforced polyamide 6 hybrid composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 31(4), 553-571.
- Taj, S., Munawar, M., Khan, S. (2007). Natural Fiber Reinforced Polymer Composites. *Proc. Pakistan Acad Sci*, 44(2), 129-144.
- Thomas, G.P. (2019). Composites Used in the Aerospace Industry. AZoM, <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8152>, (Ziyaret Tarihi: 08 Şubat 2023).
- Thomas, S. (2012). *Polymer Composites* (1st ed.). Germany: John Wiley & Sons,
- Tsai, S. W., Hahn, H. T. (2018). *Introduction to composite materials*. Routledge.
- Veeman, D., Madabushi, S., Mahesh, V. (2021). Some Impact of Nanomaterials in Aerospace Engineering. Babu, B., Kumar, K. (Ed.), *Nanomaterials and Nanocomposites Characterization, Processing, and Applications* (1st ed.) (17-29). New York: CRC Press 10.1201/9781003160946-3.
- Vlachopoulos, J., Strutt, D. (2003). Polymer processing. *Materials science and technology*, 19(9), 1161-1169.
- Wang, Y., Zhang, J., Zhang J., Zhou, Z. (2017). Temperature Effects on Mechanical Properties of Woven Thermoplastic Composites for Secondary Aircraft Structure Applications, *MATEC Web of Conferences*, Harbin, China, 2017.

- White J.L., Kim E.K., (2010). *Twin screw extrusion: Technology and principles*, (2nd ed.), Munich.
- Wu, J., Wang, J., & Chen, F. (2015). Preparation of poly(p-phenylene sulfide)/carbon composites with enhanced thermal conductivity and electrical insulativity via hybrids of boron nitride and carbon fillers. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 30(3), 562–567. doi:10.1007/s11595-015-1189-3.
- Xu Z, Lin G, Sui G (2020) The synergistic effects on enhancing thermal conductivity and mechanical strength of hBN/CF/PE composite. *J Appl Polym Sci* 137:49212.
- Yang, W., Jia, Z., Chen, Y., Zhang, Y., Si, J., Lu, H., Yang, B. (2015). Carbon nanotube reinforced polylactide/basalt fiber composites containing aluminium hypophosphite: thermal degradation, flame retardancy and mechanical properties. *RSc advances*, 5(128), 105869-105879.
- Yastımoğlu, F., Özkan, A. (2017). Tekrarlanan Yükler Altında Kompozit Malzemelerin Yapılarının İncelenmesini Amaçlayan Deney Aygıtı Tasarımı, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5, 1, 56-66.
- Yazıcı, E. M. (2021). Bor Nanopartikülleri Katkılı Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Fakültesi, Samsun, 136221.
- Yıldız, M. (2019). Değişen Oranlarda Grafen Nanoplaka ile Katkılandırılan ZrC-TiC-%1CNT Kompozitlerin Spark Plazma Sinterleme Yöntemi ile Üretimi ve Karakterisasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 553889.
- Yılmaz, U., Evci, C. (2015). Havacılık ve Savunma Sektöründe Kompozit Malzemelerin Geleceği. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 14(2), 77-109.
- Younes, R., Hallal, A., Fardoun, F., Chehade, F. (2012). Comparative Review Study on Elastic Properties Modeling for Unidirectional Composite Materials. *Composites and Their Properties*, 17, 3, 391-408. doi:10.5772/50362.
- Yu, J., Zhao, W., Wu, Y., Wang, D., & Feng, R. (2018). Tribological properties of epoxy composite coatings reinforced with functionalized C-BN and H-BN nanofillers. *Applied Surface Science*, 434, 1311–1320. doi:10.1016/j.apsusc.2017.11.204.
- Zhang, Y., Yu, C., Chu, P. K., Lv, F., Zhang, C., Ji, J., Wang, H. (2012). Mechanical and thermal properties of basalt fiber reinforced poly(butylene succinate) composites. *Materials Chemistry and Physics*, 133(2-3), 845–849. doi:10.1016/j.matchemphys.2012.01.

Zuo, P., Tcharkhtchi, A., Shirinbayan, M., Fitoussi, J., Bakir, F. (2019). Overall investigation of PolyPhenylene Sulfide (PPS) from synthesis and process to applications, A review. *Macromolecular Materials and Engineering*, 304, 10.1002/mame.201800686.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Aslan, C., Karsli, N. G. (2023). Investigation of the synergetic effect of hybrid fillers of hexagonal boron nitride, graphene nanoplatelets and short basalt fibers for improved properties of polyphenylene sulfide composites. *Polymer Bulletin*, 1-24.



ÖZGEÇMİŞ

Çağrı Aslan, 2014 yılında Tekirdağ Anadolu Lisesinden mezun olduktan sonra, 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesinde, Uçak Gövde Motor Bakım lisans eğitimine başladı. 2019 yılında mezun olduktan sonra 2021 yılında Fen Bilimleri Enstitüsü, Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Programında yüksek lisans eğitimine başladı. 2020 yılı itibariyle Araştırma Görevlisi olarak 2 yıl çalıştıktan sonra şu an Gözen Digital Aviation şirketinde Sistem Uzmanı olarak görev yapmaktadır.

