

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORCID :

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :
ORCID : - - -

Trabzon

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
İrem OFLAZ Tarafından Hazırlanan**

**Yüksek Termal İletkenliğe Sahip Nano Toz Katkılı Polifenilen Sülfür Kompozitlerin
Geliştirilmesi, Termal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 25 / 09 / 2025 gün ve 2121 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ümit ALVER

Üye : Prof. Dr. Özgür DEMİRCAN

Üye : Doç. Dr. Mustafa ASLAN

**Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü**

ÖNSÖZ

“Yüksek Termal İletkenliğe Sahip Nano Toz Katkılı Polifenilen Sülfür Kompozitlerin Geliştirilmesi, Termal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca desteğini, bilgisini ve tecrübesini benden esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Mustafa ASLAN’a teşekkürü bir borç bilirim. Hem lisans hem yüksek lisans sürecim boyunca beni yönlendiren, akıl veren, daima desteğini hissettiğim Prof. Dr. Ümit ALVER hocama da teşekkür ederim.

Tez çalışması süresince benden yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer hocalarım Öğr. Gör. Kutay ÇAVA’ya, Öğr. Gör. Dr. Hüseyin İPEK’e ve Öğr. Gör. Hüseyin Can AKSA’ya da teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak başta eşim Arş. Gör. Mücahit OFLAZ olmak üzere bu süre boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yoluma aydınlatan aileme de sonsuz teşekkür ederim.

İrem OFLAZ

Trabzon 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Yüksek Termal İletkenliğe Sahip Nano Toz Katkılı Polifenilen Sülfür Kompozitlerin Geliştirilmesi, Termal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Mustafa ASLAN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 18/09/2025

İrem OFLAZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. GİRİŞ	1
1.2. Kompozit Malzemeler	2
1.3. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları ve Genel Özellikleri	3
1.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	5
1.4.1. Matris Malzemesine Göre.....	5
1.4.2. Takviye Elemanına Göre	7
1.5. Polimer Matrisli Nano Kompozitler	9
1.5.1. Polimer	11
1.6. Polifenilen Sülfür (PPS)	14
1.6.1. Polifenilen Sülfür (PPS) Polimerinin Mekanik Özellikleri	16
1.6.2. Polifenilen Sülfür (PPS) Polimerinin Termal Özellikleri.....	17
1.6.3. Polifenilen Sülfür (PPS) Polimerinin Kullanımı, Sağladığı Avantajlar ve Kullanım Yerleri.....	18
1.7. Nano Katkı Türleri.....	19
1.7.1. Hegzagonal Bor Nitrür (h-BN).....	21
1.7.2. Grafen.....	24
1.7.3. Karbon Fiber (CF)	26
1.8. Polimer Nano Kompozitlerin Üretimi	28
1.8.1. Çift Vidalı Ekstrüder.....	30
1.9. Literatür Taraması	34
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	41
2.1. Kompozit Üretim Süreci.....	41
2.1.1. Kullanılan Malzemeler	41

2.1.2. Ön Hazırlık	41
2.1.3. Ekstrüzyon İşlemi	42
2.2. Analiz Yöntemleri	43
2.2.1. Termal Analiz Yöntemleri	43
2.2.2. Mikro Yapı Analizi.....	44
2.2.3. Mekanik Test Yöntemleri	44
2.2.4. Termal İletkenlik Analizi.....	45
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	46
3.1. Kompozit Test Numunelerine Uygulanan Mekanik Testler	46
3.1.1. Çekme Testi.....	46
3.1.2. Eğme Testi.....	51
3.2. Termal Analiz Yöntemleri	55
3.2.1. Termogravimetrik Analiz (TGA).....	55
3.2.2. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC).....	59
3.3. Mikro Yapı Analizi.....	64
3.4. Termal İletkenlik Analizi.....	67
4. SONUÇLAR.....	70
5. ÖNERİLER	71
6. KAYNAKLAR.....	72
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

Yüksek Termal İletkenliğe Sahip Nano Toz Katkılı Polifenilen Sülfür Kompozitlerin Geliştirilmesi, Termal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

İrem OFLAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Mustafa ASLAN
2025, 83 Sayfa,

Bu çalışmada, polifenilen sülfür (PPS) matrisli kompozitlerin mekanik ve termal özellikleri, farklı katkı malzemeleri ve oranları kullanılarak geliştirilmiştir. Katkı malzemesi olarak grafen (GR), karbon fiber (CF) ve hegzagonal bor nitrür (h-BN) kullanılmış olup katkıli kompozitlerin üretimi çift vidalı ekstrüder kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak saf PPS ve katkıli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi için test numuneleri üretilmiş, çekme ve 3 nokta eğme testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar polimer katkılarının mekanik özelliklerde iyileşme sağladığı fakat yüksek oranlardaki katkılarda rijitliği azalttığı belirlenmiştir. Termal kararlılıklarının belirlenmesi amacıyla TGA ve DSC analizleri yapılmıştır. TGA analizlerinden katkıli kompozitlerin saf PPS'e kıyasla daha geç bozunma gösterdiği, artan katkı oranlarında ağırlık kaybının azaldığı ve buna bağlı olarak termal kararlılığın %10 GR/PPS, %10 CF/PPS ve %20 h-BN/PPS numunelerinde yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. DSC analizlerinden ise düşük ve orta seviyelerdeki katkıların kristallenmeyi arttırdığı yüksek oranlarda ise zincir hareketliliğinin kısıtlanmasından kaynaklı azaldığı görülmüştür. Aynı zamanda katkıların camsı geçiş sıcaklığını (Tg) arttırması da malzemenin yüksek sıcaklıklara karşı daha dayanıklı hale geldiğini göstermiştir. Son olarak termal iletkenlik analizleri termal kamera ile incelenmiş ve sonuçlar ısı haritalamasında karşılaştırmalı olarak yapılmıştır. %20 h-BN katkıli PPS kompozitinin, diğer katkıli numunelerle kıyaslandığında en yüksek termal iletkenliği sağladığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: PPS, Hegzagonal Bor Nitrür (h-BN), Karbo Fiber (CF), Grafen (GR), Polimer kompozit, Termal iletkenlik

Master Thesis

SUMMARY

Development of Nanopowder Additive Polyphenylene Sulfide Composites with High Thermal Conductivity and Investigation of Their Thermal and Mechanical Properties

İrem OFLAZ

Karadeniz Technical University
Institute of Science
Department of Metallurgical and Materials Engineering
Supervisor: Doç. Dr. Mustafa ASLAN
2025, 83Pages,

In this study, the mechanical and thermal properties of polyphenylene sulfide (PPS) matrix composites were improved by using different additives and their ratios. Graphene (GR), carbon fiber (CF), and hexagonal boron nitride (h-BN) were used as additives, and the composites were produced using a twin-screw extruder. First, test specimens were produced to investigate the mechanical properties of pure PPS and the composites with additives, and tensile and 3-point bending tests were conducted. The results indicated that polymer additives improved mechanical properties but reduced stiffness at higher additive ratios. TGA and DSC analyses were performed to determine thermal stability. From the TGA analyses, it was concluded that the composites with additives showed a slower degradation compared to pure PPS, that weight loss decreased with increasing additive ratios, and that, accordingly, thermal stability was higher in the 10% GR/PPS, 10% CF/PPS, and 20% h-BN/PPS samples. DSC analyses showed that low and medium levels of additives increased crystallinity, while high levels decreased it due to restriction of chain mobility. At the same time, the additives' increased glass transition temperature (T_g) also indicated that the material became more resistant to high temperatures. Finally, thermal conductivity analyses were performed using a thermal camera, and the results were compared using heat mapping. It was concluded that the 20% h-BN-added PPS composite provided the highest thermal conductivity compared to the other additive samples.

Key Words: PPS, Hexagonal Boron Nitride (h-BN), Carbon Fiber (CF), Graphene (GR), Polymer composite, Thermal conductivity

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Takviye ve matris arayüzeyi gösterimi.....	2
Şekil 2. Kompozit malzemelerin kullanım alanları	4
Şekil 3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	5
Şekil 4. Takviye elemanına göre kompozit malzemeler.....	7
Şekil 5. Polimer nanokompozit yapı oluşumunun şematik gösterimi.....	11
Şekil 6. Polimer yapıya örnek: Polipropilen (PP).....	11
Şekil 7. (a) Termoplastik (b) termoset polimer.....	12
Şekil 8. Yüksek performanslı polimerler	15
Şekil 9. PPS'in molekül yapısı	15
Şekil 10. PPS'in oluşum reaksiyonu.....	16
Şekil 11. PPS birim hücresi	17
Şekil 12. Polimerlerde amorf ve kristalin bölgeler	20
Şekil 13. Bor nitrürün tabakalı yapısı	22
Şekil 14. Grafitin tabakalı yapısı	22
Şekil 15. Karbon atomlarından oluşan farklı türden yapılar.....	24
Şekil 16. Grafenin petek kristal yapısı.....	25
Şekil 17. Karbon fiberin üretim süreci.....	27
Şekil 18. Yerinde polimerizasyon yöntemi.....	29
Şekil 19. Çözeltide harmanlama yöntemi	29
Şekil 20. Ekstrüzyon hattı.....	31
Şekil 21. Ekstrüder vidası	32
Şekil 22. Matris ve katkı malzemelerinin elle karıştırılması.....	42
Şekil 23. Katkılı kompozit malzemelerin üretimi.....	43
Şekil 24. PPS ve kompozitlerine ait (a) eğme testi, (b) çekme testi	45
Şekil 25. Termal İletkenlik Ölçümü	45
Şekil 26. CF katkılı PPS kompozitlerine ait çekme testi sonucu gerilim-gerinim grafiği	46
Şekil 27. GR katkılı PPS kompozitlerine ait çekme testi sonucu gerilim-gerinim grafiği	48
Şekil 28. h-BN katkılı PPS kompozitlerine ait çekme testi sonucu gerilim-gerinim grafiği	49
.....	49
Şekil 29. CF katkılı PPS kompozitlerine ait eğme testi sonucu yük-sehim grafiği	51

Şekil 30. GR katkılı PPS kompozitlerine ait eğme testi sonucu yük-sehim grafiği.....	52
Şekil 31. h-BN katkılı PPS kompozitlerine ait eğme testi sonucu yük-sehim grafiği.....	54
Şekil 32. CF TGA grafiği	55
Şekil 33. GR TGA grafiği.....	56
Şekil 34. h-BN TGA grafiği	57
Şekil 35. GR/PPS kompozitlerinin DSC analizleri.....	59
Şekil 36. CF/PPS kompozitlerinin DSC analizleri.....	61
Şekil 37. h-BN/PPS kompozitlerinin DSC analizleri	62
Şekil 38. Hegzagonal bor nitrür (h-BN) katkılı PPS kompozit numunesine ait alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) görüntüsü	64
Şekil 39. Grafen (GR) katkılı PPS kompozit numunesine ait alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) görüntüsü	65
Şekil 40. Karbon fiber (CF) katkılı PPS kompozit numunesine ait alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) görüntüsü	65
Şekil 41. Termal analiz öncesi numunelerin yerleşim sırası	67
Şekil 42. %10 GR, %10 CF, %20 h-BN, Saf PPS numunelerinin termal analiz sonrası ısı haritası görüntüleri	67
Şekil 43. Farklı katkı oranlarındaki h-BN/PPS numunelerinin termal analiz öncesi yerleşim sırası	68
Şekil 44. %5 h-BN, %10 h-BN, %15 h-BN, %20 h-BN numunelerinin termal analiz sonrası ısı haritası görüntüleri	68

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Endüstride en çok kullanılan plastikler	13
Tablo 2. PPS'in özellikleri	16
Tablo 3. Bazı katkı türlerinin ısı iletkenlik değeri.....	21
Tablo 4. Hegzagonal bor nitrürün fiziksel özellikleri	23
Tablo 5. Grafen'in mekanik ve fiziksel özellikleri	25
Tablo 6. Karbon fiberin özellikleri	28
Tablo 7. Kompozit türleri ve % ağırlıkça oranları	42
Tablo 8. CF katkı ı PPS kompozitlerine ait çekme testi sonuçları.....	47
Tablo 9. GR katkı ı PPS kompozitlerine ait çekme testi sonuçları.....	49
Tablo 10. h-BN katkı ı PPS kompozitlerine ait çekme testi sonuçları	50
Tablo 11. CF katkı ı PPS kompozitlerine ait eğme testi sonuçları	52
Tablo 12. GR katkı ı PPS kompozitlerine ait eğme testi sonuçları.....	53
Tablo 13. h-BN katkı ı PPS kompozitlerine ait eğme testi sonuçları	54
Tablo 14. CF katkı ı PPS kompozitlerine ait TGA analiz sonuçları	56
Tablo 15. GR katkı ı PPS kompozitlerine ait TGA analiz sonuçları	57
Tablo 16. h-BN katkı ı PPS kompozitlerine ait TGA analiz sonuçları	58
Tablo 17. GR katkı ı PPS kompozitlerine ait DSC analiz sonuçları	60
Tablo 18. CF katkı ı PPS kompozitlerine ait DSC analiz sonuçları	61
Tablo 19. h-BN katkı ı PPS kompozitlerine ait DSC analiz sonuçları	63

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

MMK	:Metal Matrisli Kompozitler
PMK	:Polimer Matrisli kompozitler
SMK	:Seramik Matrisli Kompozitler
PP	:Polipropilen
PC	:Polikarbonat
PPE	:Polifenileter
TPU	:Termoplastik Poliüretan
ABS	:Akrilonitril Bütadien Stiren
PMMA	:Polimetilmetakrilat
POM	:Polioksimetilen
PA	:Poliamid
PET	:Polietilentereftalat
UHMWPE	:Ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen
PEI	:Polieterimid
PSU	:Polisülfon
PES	:Polietersülfon
PVDF	:Polivinilidenfluorür
PTFE	:Politetrafluoroetilen
PPS	:Polifenilensülfür
PEEK	:Polietereterketon
LCP	:Sıvı kristal polimer
PAI	:Poliamidimid
PI	:Poliimid
Na ₂ S	:Sodyum Sülfür
MPa	:Megapaskal
MgO	:Magnezyum Oksit
Al ₂ O ₃	:Alüminyum Oksit
Si ₃ N ₄	:Silisyum Nitrür

SiC	:Silisyum Karbür
ZnO	:Çinko Oksit
AlN	:Alüminyum Nitrür
BN	:Bor Nitrür
h-BN	:Hegzagonal Bor Nitrür
Å	:Latis sabiti
2D	:İki boyutlu
nm	:Nanometre
GPa	:Gigapaskal
CF	:Karbon Fiber
PE	:Polietilen
PVC	:Polivinilklörür
HDPE	:Yüksek Yoğunluklu Polietilen
in-situ	:Yerinde polimerizasyon
CNT	:Karbon Nanotüp
PS	:Polistiren
MWCNT	:Çok Duvarlı Karbon Nanotüpler
LDPE	:Düşük Yoğunluklu Polietilen
GNP	:Grafen Nanopelet
SG	:Sentetik Grafit
EG	:Genişletilmiş Grafit
rpm	:Dönüş hızı
dk	:dakika
mBN	:Mikrometre boyutundaki Bor Nitrür
nBN	:Nanometre boyutundaki Bor Nitrür
k	:Isıl iletkenlik katsayısı
m-BN/PPS	:Eriyik karıştırma ile hazırlanan Bor Nitrür/PPS numune kodu
p-BN/PPS	:Toz karıştırma ile hazırlanan Bor Nitrür/PPS numune kodu
c-BN/PPS	:Kaplama ile hazırlanan Bor Nitrür/PPS numune kodu

PTX60	:60 µm küresel aglomeralar (h-BN)
PT110	:45 µm trombosit yapılar (h-BN)
k_{eff}	:Termal iletkenlik
µm	:Mikrometre
TGA	:Termogravimetrik Analiz
DSC	:Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
N ₂	:Azot gazı
FE-SEM	:Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
Au	:Altın
GR	:Grafen
IR	:Kızılötesi
N	:Newton
T _g	:Camsı geçiş sıcaklığı
T _m	:Erime sıcaklığı
T _c	:Kristalleşme sıcaklığı
T _d	:Bozunma sıcaklığı
MΩ	:Megaohm
kN	:Kilonewton

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Gelişen teknolojiyle birlikte artan endüstriyel ihtiyaçlar, malzeme bilimi ve mühendisliğinde önemli gelişmelere yol açmıştır. Elektronik cihazların küçülmesi ve yüksek performans gereksinimleri, yenilikçi malzeme çözümleri arayışını hızlandırmıştır. Elektronikteki boyut küçültme, ısı birikimini ve ısı yönetimini daha kritik hale getirmiştir. Elektronik bileşenlerin yüksek sıcaklık altında çalışması, ısıнын verimli bir şekilde dağıtılması ihtiyacını doğurmuş ve bu durum cihazların verimliliği ve ömrü açısından büyük bir önem arz etmiştir. Bu bağlamda, yüksek termal iletkenlik özelliklerine sahip malzemelere olan talep giderek artmaktadır.

Polimerler, esneklik, hafiflik ve işlenebilirlik gibi avantajları sayesinde birçok endüstriyel uygulama alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, polimerlerin termal iletkenlikleri genellikle düşüktür ve dolayısıyla yüksek ısıya duyarlı uygulamalar için kullanımları uygun değildir. Bu sorunu aşmak amacıyla, polimerlere katkı maddeleri eklenerek termal iletkenliklerinin artırılması sağlanabilir. Nanoteknolojinin gelişmesiyle birlikte, nano boyuttaki partiküller polimer kompozitlerinde önemli bir yer tutmaya başlamıştır. Nano tozlar, polimerlerin termal iletkenlik, mekanik dayanıklılık ve elektriksel iletkenlik gibi özelliklerini geliştirmek için etkili bir yol sunmaktadır.

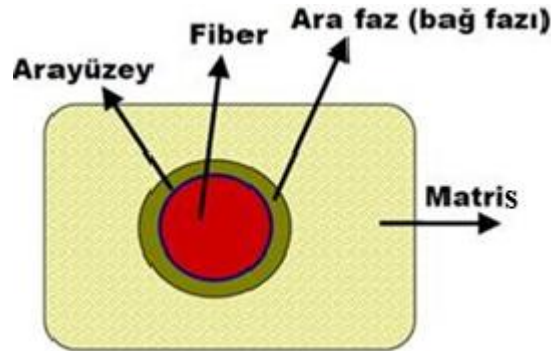
Nano tozların polimerlere sağladığı katkılar, sadece termal iletkenlik ile sınırlı değildir. Bu tür kompozitler, polimerlerin mekanik özelliklerini arttırmak, dayanıklılığını sağlamak ve bazı durumlarda elektriksel iletkenlik gibi farklı fonksiyonel özellikler kazandırmak amacıyla da kullanılmaktadır. Özellikle termal iletkenlik, elektriksel iletkenlik ve mekanik dayanım, yüksek performanslı elektronik sistemlerin verimli bir şekilde çalışabilmesi için kritik faktörlerdir. Bu nedenle, nano toz katkılı polimer kompozitlerinin geliştirilmesi ve bu malzemelerin özelliklerinin incelenmesi birçok endüstriyel uygulama açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, yüksek termal iletkenliğe sahip nano toz katkılı kompozitlerin geliştirilmesi ve bu kompozitlerin termal ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Nano tozların polimer matrisi ile etkileşimi ve bu etkileşimin malzeme özelliklerine olan etkileri ele alınacak ve bu malzemelerin potansiyel uygulama alanları tartışılacaktır.

Bu tez, polimer kompozitlerin özelliklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlayarak, nano toz katkılı yeni malzeme stratejilerinin geliştirilmesine katkı sunmaya amaçlamaktadır. Ayrıca, bu tür gelişmiş kompozitlerin endüstriyel tasarım süreçlerinde daha verimli ve fonksiyonel malzemelerin üretilmesine olanak tanıyacağı öngörülmektedir.

1.2. Kompozit Malzemeler

Doğal yapılardan hareketle geliştirilen kompozitler, farklı özellikteki malzemelerin bir araya getirilmesi ile elde edilmektedir (Kayrak,1999). Bir başka tanıma göre, farklı veya benzer gruplara ait en az iki malzemenin en iyi özelliklerinin makro düzeyde birleşmesiyle meydana gelen tek bir malzeme olarak da ifade edilmektedir (Şahin,2009). Mühendislik açısından kompozit malzemelerin en büyük avantajı, bileşenlerini oluşturan her bir malzemenin kendi özelliklerinden daha üstün bir yapı sergilemesidir (Smith,2001). Literatüre bakıldığında farklı kompozit tanımların bulunduğu görülmektedir. En genel haliyle kompozit malzemeleri tanımlayacak olursak, en az iki malzemenin makroskobik düzeyde birleşmesiyle meydana gelen yeni ve üstün özellikli malzeme grubu olarak ifade edilebilir.



Şekil 1. Takviye ve matris arayüzeyi gösterimi (URL-13)

Kompozit malzemeler, çekirdek görevi gören takviye elemanı ile onu saran matris fazının birleşiminden oluşmaktadır (Şekil 1). Kompozitlerde takviye elemanı olarak, kısa ve uzun elyafların yanı sıra whiskerler (kılcal kristaller) ile çeşitli boyutlarda kırılmış ve parçacıklı seramikler kullanılabilir. Bu kullanılan elemanların görevi, malzemeye gelen

yükü taşımak, matrisin rijitliğini ve mukavemetini arttırmaktır. Matris malzemesi ise takviye elemanını bir arada tutarak yük ve gerilim transferi sağlar. Ayrıca, birçok takviye elemanı gevrek ve kırılgan yapıya sahip olduğundan, matris bu elemanların yüzeylerini dış ve çevresel etkilere karşı koruma işlevi de göstermektedir.

1.3. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları ve Genel Özellikleri

Kompozitlerin tasarımı, kullanım alanına özgü gereksinimlere göre yapıldığından, özelliklerinin maddeler halinde verilmesi her zaman doğru bir yaklaşım değildir. Ancak, bu özellikleri doğrudan etkileyen dört ana faktör söz konusudur. Bunlar; takviye edilen katkının özellikleri, matris fazının özellikleri, mikroyapı ve arayüzey özellikleridir. Matris fazının veya takviye edilen katkı maddesinin tek başına sağlayamadığı özellikler kompozit malzemelerin hazırlanması ile elde edilebilmektedir. Bu durum, kompozit malzemelerin belirli avantajlar ve dezavantajlar sunmasını mümkün kılmaktadır. Kompozit malzemelerin genel olarak sağladığı avantajlar ve dezavantajlar şu şekilde verilebilir:

Yüksek mukavemet, kompozit malzemeler, kullanım alanlarının gereksinimlerine bağlı olarak mekanik mukavemeti değiştirilebilen ve gerektiğinde metallere kıyasla daha yüksek dayanım gösterecek şekilde tasarlanabilmektedir.

Hafiflik, metaller ile kıyaslandığında daha düşük yoğunluğa sahip olan kompozitler, birim ağırlık başına düşen mukavemet değerleri açısından hem metallere hem de plastiklere göre daha yüksek performans göstermektedir.

Elektriksel özellikler, uygun malzeme seçimi ile üstün elektriksel özelliklere sahip kompozit malzemeler üretilir. Bu sayede ihtiyaca ve kullanım alanına göre yalıtkan veya iletken yapının elde edilmesi mümkün hale gelir.

Korozyon Dayanımı, kompozit malzemeler, yüksek korozyon direncine sahip olup, hava koşullarına, korozyif ortamlara ve birçok kimyasal etkiye karşı dayanıklılık göstermektedir.

Şekillendirilebilme, kompleks parçalar tek bir işlemle şekillendirilebilir, bu da üretim sürecini kolaylaştırarak maliyet ve zaman açısından tasarruf sağlar.

Isı dayanımı, düşük ısı iletim katsayısına sahip malzemelerden oluşabilen kompozit malzemeler, yüksek sıcaklık koşullarında kullanılma imkanı sunmaktadır.

Bütün bu avantajlarının yanında dezavantajları da şu şekilde sıralanabilir;

İzotropi/anizotropi; kompozitlerin mekanik davranışı, malzeme içindeki yönlenmeye bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

Üretim maliyeti; kompozitlerin kalite düzeyi, üretim tekniklerinin doğruluğu ve hassasiyeti ile doğrudan ilişkilidir, bu durum imalat sürecinin özenli ve maliyetli olmasını gerektirir.

Kırılganlık, kırılgan yapıları nedeniyle kompozit malzemelere sonradan delik delme, kesme gibi işlemler uygulanması zordur veya özel teknikler gerektirir (Albayrak Arı, 2009).

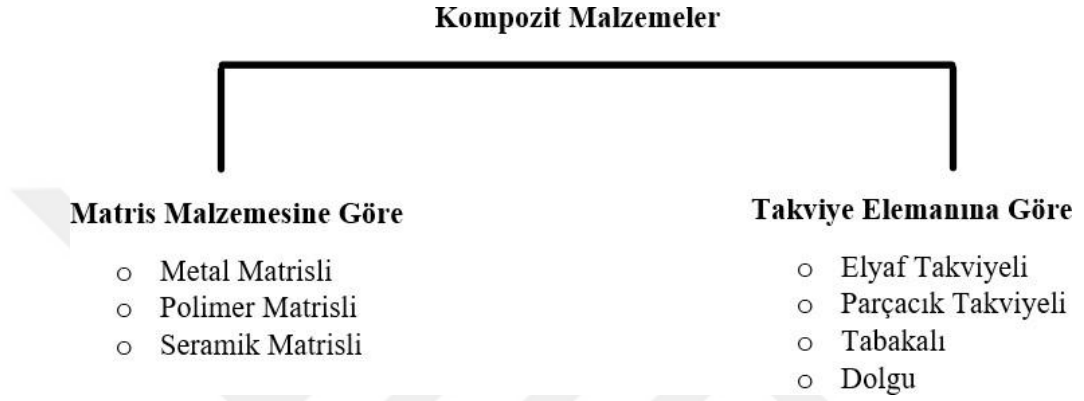


Şekil 2. Kompozit malzemelerin kullanım alanları (URL-14)

Kompozit malzemelerin göstermiş olduğu üstün mekanik, termal ve kimyasal özellikler bu malzeme grubunu kullanım alanı açısından oldukça geniş boyutlara ulaştırmıştır. Sahip oldukları hafiflik, yüksek mukavemet, korozyon direnci ve özelleştirilebilir yapıları sayesinde başta savunma, uzay ve havacılık sanayisi, otomobil endüstrisi, inşaat sektörü, sağlık ve medikal, spor ve müzik sektörü gibi daha birçok sektörde geleneksel malzemelerin yerine geçerek bu alanlarda oldukça yaygın bir kullanım alanı bulmuştur (Şekil 2). Aynı zamanda farklı sektörlerde sağladıkları avantajlar sayesinde mühendislik ve üretim süreçlerinde büyük bir dönüşüm yaratmanın yanında modern endüstriler için vazgeçilmez hale gelmiştir. Gelecekte gelişen teknoloji ile, kompozit malzemelerin kullanım alanlarının daha da genişleyebileceği ve yeni nesil mühendislik uygulamalarında önemli bir rol oynayacağı da öngörülebilmektedir.

1.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeleri oluşturan yapıya bakıldığında, bu yapının bir takviye elemanı ve onu çevreleyen bir matristen meydana geldiğini bilmekteyiz. Buradan yola çıkarak kompozit malzemeleri matris malzemesine ve takviye elemanına göre sınıflandırabiliriz (Şekil 3).



Şekil 3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

1.4.1. Matris Malzemesine Göre

Matris, kompozitlerde takviye fazını bir arada tutan ve malzemeye gerekli rijitliği ve mukavemeti sağlayan yapı olarak tanımlanmaktadır. İstenilen ve kullanım alanına bağlı olarak uygun özellikleri sergileyebilecek kompozit malzemelerin üretimini yapabilmek için üç farklı temel matris türü kullanılmaktadır. Bunlar; metal, seramik ve polimer matrisli kompozit malzemelerdir.

- **Metal Matrisli Kompozit Malzemeler (MMK)**

Metal matrisli kompozitler, matrisi sünek metal olan kompozitlerdir. Bu tür kompozit malzemeler, mevcut malzemelerin kullanım sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda kullanılabilir ve daha yüksek mukavemet değerlerine sahip olan malzemelere duyulan ihtiyaçtan yola çıkılarak 1960'lı yılların başında geliştirilmeye başlanmıştır (Mazumdar, 2002; Akbulut, 1995).

Metal matrisli kompozitler,

- Özgül dayanım,
- Özgül rijitlik,
- Sürünme direnci,
- Isıl iletkenliği,
- Düşük yoğunluk,
- Yüksek elektriksel iletkenlik,
- Yeniden üretilebilirlik,

gibi özellikleri arttırabilmektedir. Polimer matrisli kompozitlerle karşılaştırıldığında, daha yüksek sıcaklıklara dayanabilmeleri ve alev ile bozulmaya karşı dirençli olmaları, bu malzeme grubunun önemli avantajlarından biridir. Fakat, maliyetlerinin polimer matrisli kompozit malzemelere kıyasla daha yüksek olması kullanım açısından dezavantaj yaratmakta ve kullanıldıkları alanları önemli ölçüde sınırlandırmaktadır.

• **Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler (PMK)**

Polimer matrisli kompozitler, metal ve seramik matrisli kompozitlerle karşılaştırıldığında daha düşük maliyetli ve üretimi daha kolay malzemelerdir. Bununla birlikte, çalışma sıcaklıklarının sınırlı olması ve elastisite modüllerinin düşük olması, bu malzeme grubunun dezavantajları arasında yer almaktadır. Yapısal açıdan değerlendirildiğinde ise, metal ve seramik matrisli kompozitlere kıyasla daha karmaşık bir yapı sergilemektedirler.

Polimer matrisli kompozit malzemeler, termoset ve termoplastikler olarak iki gruba ayrılmaktadır. Takviye elemanı olarak da bu grupta en yaygın kullanılan malzemeler cam fiber ve karbon fiberdir. Bu takviyelerin yanı sıra kevlar fiber ve bor fiber de kullanılmaktadır (Ekinci,2007).

• **Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler (SMK)**

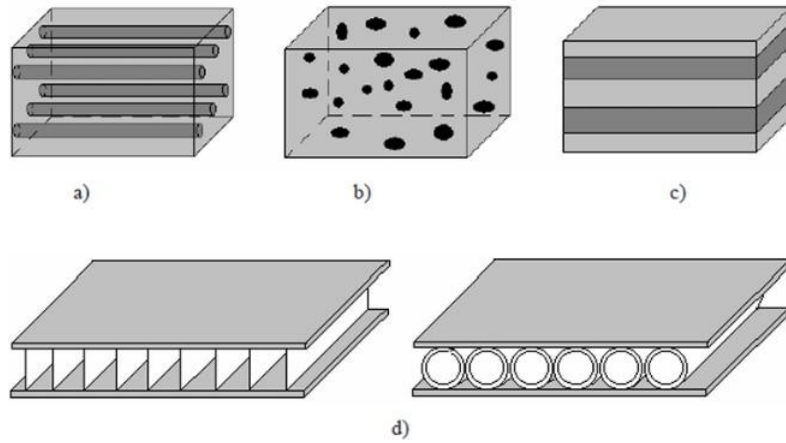
Yüksek sıcaklık uygulamalarında polimer matrisli kompozitler içerdikleri organik bileşikler nedeniyle kullanıma uygun olmazken, seramik malzemeler yüksek yoğunluğa sahip metallere alternatif olarak kullanılmaktadır.

Düşük yoğunlukları sayesinde hafif olan seramik malzemeler, yüksek oksidasyon direnci sayesinde yüksek sıcaklık koşullarında etkin bir şekilde kullanılabilmektedir. Fakat, seramikler çatlaklara karşı hassas olup kırılgan bir yapıya sahiptir. Bu kırılganlık, malzemelerin yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal kararlılık ve aşınma direnci gibi avantajlarını sınırlamakta ve bazı kritik sektörlerde kullanımını kısıtlamaktadır (Ha,1991).

Sahip oldukları bu kırılgan yapı onların en büyük dezavantajıdır. Bundan dolayı seramiklerin kırılma tokluğu değeri düşüktür. Ancak, parçacık, elyaf veya whisker formundaki seramiklerin başka bir seramik matris içerisine gömülmesiyle oluşturulan yeni nesil seramik matrisli kompozitler sayesinde kırılma tokluğu önemli ölçüde artırılabilir (Callister, 2014).

1.4.2. Takviye Elemanına Göre

Takviye elemanına göre kompozit malzemeler dört ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar; elyaf takviyeli, parçacık takviyeli, tabakalı ve dolgu takviyeli kompozit malzemelerdir (Şekil 4).



Şekil 4. a) Fiber takviyeli kompozit b) Parçacık takviyeli kompozit c) Tabakalı kompozit d) Sandviç kompozit (Sorucu,2007)

- **Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler**

Kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanılan fiberler, lif veya elyaf olarak da adlandırılmaktadır. Matris malzeme içinde yer alan bu takviyeler malzemenin en önemli mekanik dayanım elemanlarını oluşturmaktadır. Mühendislikte kullanılan birçok malzeme,

fiber formunda dayanım ve rijitlik açısından bakıldığında kütle halindeki durumlarına göre çok daha üstün özellikler gösterebilirler. Örneğin, karbon elyafların çekme mukavemetleri, kütle halindeki grafitle kıyasla çok daha yüksektir ve rijitliği de önemli ölçüde farklılık göstermektedir (Eren,2007).

Elyaf formunun seçimi, kompozit malzemenin kullanım alanına ve üretim yöntemine bağlı olarak belirlenir. Yapısal uygulamalarda daha çok uzun lifler tercih edilirken, yapısal olmayan uygulamalarda kısa lifler daha yaygın olarak kullanılır. Üretim yöntemlerine bakıldığında da, enjeksiyon ve baskı kalıplama süreçlerinde kesikli lifler tercih edilirken, elyaf sarma, profil çekme ve rulo sarım gibi yöntemlerde filament liflerin kullanımı önerilmektedir (Şahin,2009; Mazumdar,2002).

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler, ince elyafların matris fazı içerisinde dağılmasıyla oluşmakta olup, bu yapıların mekanik performansı büyük ölçüde elyafların matris içerisindeki yerleşim düzenine bağlıdır. Uzun elyafların belirli bir doğrultuda, birbirine paralel şekilde düzenlenmesi, bu yönde yüksek mukavemet sağlarken, elyafa dik doğrultuda daha düşük dayanım özellikleri gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, düzlem boyunca farklı yönlerde yerleştirilen elyaf takviyeleri, kompozit malzemenin iki ekseninde de dengeli mekanik özellikler sergilemesine olanak tanımaktadır. Öte yandan, matris fazında homojen olarak dağılan kısa elyaflar, kompozit malzemenin izotropik bir yapı kazanmasını sağlayarak her yönde benzer mekanik özellikler elde edilmesine katkıda bulunmaktadır (Sorucu,2007).

• Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler

Parçacık takviyeli kompozit malzemeler, mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla, küçük granül veya nano ölçekli katkı türlerinin matris fazına eklenmesiyle üretilmektedir. Bu malzemeler, bir veya iki boyutlu makroskobik partiküller ya da sıfır boyutlu mikroskobik ölçekteki çok küçük partiküllerin matris fazı ile bütünleşmesi sonucu oluşan yapılardır.

Partiküllerin boyutu ve dağılımı, kompozit malzemenin genel mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde belirleyici bir rol oynar. Makroskobik ve mikroskobik partiküller, malzemenin mukavemet, sertlik, aşınma direnci ve tokluk gibi özelliklerine farklı etkilerde bulunarak, istenilen performans kriterlerine göre optimize edilebilmektedir (Eren,2007).

- **Tabakalı Kompozit Malzemeler**

En az iki tabakanın birleşimiyle meydana gelen tabakalı kompozitler, çok katmanlı yapılar olarak tanımlanmaktadır. Yüksek mekanik dayanım ve performans gerektiren uygulamalarda ise genellikle üç veya daha fazla tabaka kullanılmaktadır. Bu tabakalar, farklı malzemelerden olabileceği gibi, aynı malzemenin farklı yönelimleriyle de bir araya getirilebilmektedir.

Tabakalı kompozit malzemelerin üretiminde, tabaka malzemesi olarak geniş bir malzeme yelpazesi kullanılabilmekte olup, en önemli husus tabakaların birbirleriyle uyum içinde çalışarak malzemenin mekanik özelliklerine olumlu katkı sağlayacak bir kompozisyonun oluşturulmasıdır (Eren,2007).

- **Dolgu Kompozit Malzemeler**

Dolgu kompozit malzemeler, yüksek rijitlik ve dayanım gerektiren hafif yapısal elemanların, özellikle kiriş ve panellerin tasarımında kullanılan bir kompozit malzeme sınıfıdır. Bu malzemeler, sandviç paneller olarak da adlandırılmakta olup, genellikle polimer köpük, ahşap ve petek yapılar gibi farklı dolgu malzemeleri içermektedir.

En yaygın kullanılan yapı ise petek yapısıdır. Petek yapı, ince metal veya kompozit folyoların altıgen hücreler oluşturacak şekilde şekillendirilmesiyle elde edilmekte ve bu hücreler yüzey düzlemine dik olarak yönlendirilmektedir.

Petek yapının mekanik performansı; hücre boyutu, hücre cidar kalınlığı ve kullanılan malzeme türüne bağlı olarak değişmekte olup, bu faktörler rijitlik ve mukavemet üzerinde doğrudan etkili olmaktadır (Callister,2014).

1.5. Polimer Matrisli Nano Kompozitler

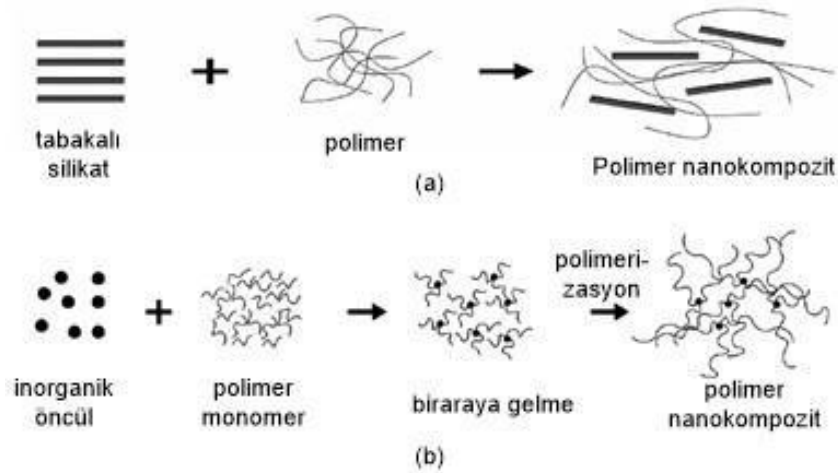
Kompozit malzemelerde, polimer esaslı matrislerin yanı sıra metal ve seramik türevi malzemelerde matris elemanı olarak kullanılmaktadır. Ancak, farklı matris türleri bulunmasına rağmen kompozit malzemelerin çoğu polimer esaslı matrislerle üretilmektedir (Bağcı,2006). Polimerlerin kullanım alanlarının giderek çeşitlenmesi, bu malzemelerin mekanik, ısı ve elektriksel özelliklerinin geliştirilmesini veya mevcut polimerlerin katkı

maddeleri ile istenilen özelliklere uyarlanmasını önemli hale getirmiştir. Bu amaçla yapılan araştırmaların sayısı da gün geçtikçe artış göstermektedir (Tavman vd.,2006).

Polimerler genel olarak fiberler ve tanecikler ile takviye edilmektedir (Şekil 5). Fiber takviyeli polimerik kompozit yapılarda, polimer matrisler farklı şekillere sahip fiberler ile güçlendirilirken, günümüzde nano boyuttaki taneciklerle de takviye edilmeye başlanmıştır. Bu tür kompozit malzemeler “polimerik nanokompozitler” olarak adlandırılmaktadır. Katkı maddesinin nanometrik boyutta olmasından kaynaklı, nanokompozitler yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahiptir. Bu özellik, düşük yoğunluklarda bile fazlar arası etkileşim alanını genişletmekte ve fiziksel ile mekanik özelliklerde belirgin iyileşmelere katkı sağlamaktadır (Yılmazbayhan,2006).

Nanokompozitler, saf polimerlere kıyasla önemli ölçüde geliştirilmiş mekanik, termal, optik ve fizikokimyasal özellikler sergilemektedir. Bu malzemelerin en önemli avantajlarından biri, nano boyutlu inorganik katkı maddelerinin polimerlerin ısı kararlılığını artırmasıdır. Birçok uygulamada, polimerik malzemelerin farklı sıcaklıklarda ve uzun süreli kullanımda boyutsal kararlılığını koruması, yani ısı kararlılığına sahip olması arzu edilmektedir (Yılmazbayhan,2006). Polimerlerin ısı iletkenliğini arttırmak amacıyla farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden bir tanesi, üretim aşamasında polimer matris içerisine yüksek ısı iletkenliğe sahip tanecik veya liflerin eklenmesidir. Bu katkı maddeleri, polimerin ısı iletkenliğini arttırmakta ve dolayısıyla malzemenin belirli uygulamalardaki performansını iyileştirmektedir. Ancak, bazı durumlarda bu katkılar polimerin mekanik özelliklerinde zayıflamalara neden olabilmektedir. Bundan dolayı, polimer bazlı nanokompozitlerin geliştirilmesinde hem ısı iletkenliği artıracak hem de mekanik dayanımı koruyacak optimal katkı bileşiminin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

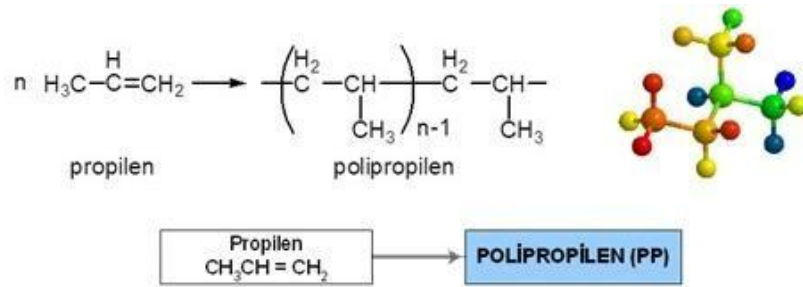
Genel olarak bakıldığında ise, polimer nanokompozitler temel olarak iki ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar, matris malzemesi olan polimer ve nano boyutlu katkı maddeleridir. Ancak bazı durumlarda, polimer malzeme ile katkı maddesi arasındaki etkileşimi arttırmak amacıyla üçüncü bir bileşen olarak uyumlaştırıcılar kullanılmaktadır. Uyumlaştırıcılar özellikle, polar yapıya sahip kil gibi dolgu maddeleri ile apolar yapılı ve ana zincirinde reaktif grup içermeyen poliolefinler gibi polimerlerin nanokompozitlerinin hazırlanmasında yaygın olarak tercih edilmektedir.



Şekil 5. Polimer nanokompozit yapı oluşumunun şematik gösterimi (URL-1)

1.5.1. Polimer

Polimerler, en basit tanımıyla monomer olarak adlandırılan küçük moleküllerin kimyasal bağlar ile birbirine eklenmesi sonucu oluşan, yüksek molekül ağırlıklı ve uzun zincir yapısına sahip bileşiklerdir. “Polimer” terimi, Yunanca kökenli olup, “mer” (parça) ve “poli” (çok) kelimelerinin birleşiminden türetilmiştir. Polimerler genellikle polimerizasyon adı verilen bir reaksiyon süreciyle reaktörlerde sentezlenmektedir (Akyüz,2001). Aşağıdaki şekilde polimer yapıya bir örnek oluşum verilmektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Polimer yapıya örnek: Polipropilen (PP) (URL-2)

Plastikler, geniş bir özellik yelpazesine sahip malzemelerdir ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Genel olarak plastiklerin başlıca özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

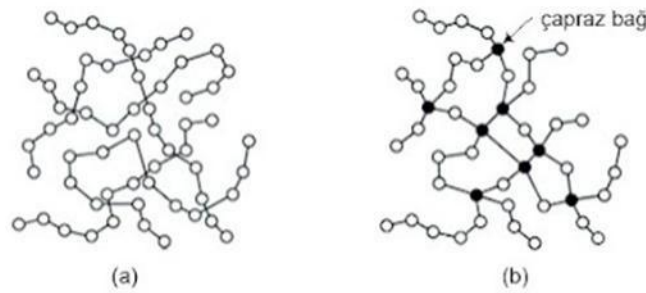
- Düşük yoğunluğa sahiptirler.
- Kolay şekillendirilebilir ve işlenebilirler.
- Katkı maddeleri ile fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri değiştirilebilir.

- Isı ve elektrik iletkenlikleri düşüktür.
- Saydam olabilmektedirler.
- Korozyona ve kimyasal maddelere karşı dayanıklıdırlar.
- Yeniden işlenebilir ve geri dönüştürülebilirler.

Mühendislik malzemesi olarak kullanılan polimerler, özelliklerine göre iki ana sınıfta incelenmektedir; termoplastikler ve termosetler. Hafif olmaları, kolay şekillendirilebilmeleri ve yüksek mekanik dayanımları bu malzemeleri endüstride yaygın olarak tercih edilmesinin başlıca sebepleridir (Callister vd.,2015).

Termoplastikler, oda sıcaklığında katı halde bulunmaktadır, ancak yüksek sıcaklıklarda yumuşayarak ergimektedir. Bu özellikleri sayesinde kolayca şekillendirilebilir ve farklı ürün formlarına dönüştürülebilmektedir. Termoplastik polimerlerin iç yapısı, rastgele dağılmış polimer zincirlerinden oluşmaktadır ve bu zincirler arasında belirli bir düzen bulunmamaktadır. Bununla birlikte, rastgele dağılmış zincirlerin devamında lamel ve kristalit olarak adlandırılan tabakalı kristal bölgeler yer almaktadır (Şekil 7a). Bu lameller, amorf bölgelerde düzensiz halde bulunan zincirlere kıyasla daha belirgin bir düzen içerisinde, katlanmış yapılar halinde bulunmaktadır (Yang vd.,2017; Chawla,2012).

Termoplastikler, uzun polimer zincirlerine sahip, yüksek molekül ağırlıklı viskoz yapıdaki malzemelerdir. Uzun zincir yapıları sayesinde, belirli bir erime sıcaklığının üzerinde eritilebilirler. Bu özellik, termoplastik malzemelerin katılaştıktan sonra yeniden eritilerek şekillendirilebilmesini sağlar ve dolayısıyla geri dönüştürülüp tekrar kullanılabilirler. Bununla birlikte, işleme sırasında kullanılan sıcaklıklar termoplastik malzemelerin bozunma sıcaklıklarına yakın olabileceğinden, sürekli geri dönüşüm süreçleri sonucunda termal bozunma meydana gelebilir. Bu da termoplastik polimerlerin geri dönüşüm özelliklerini kaybetmesine yol açabilir (Olgun,2020).



Şekil 7. (a) Termoplastik (b) termoset polimer (URL-3)

Termoset polimerler, içerisindeki moleküllerin birbirlerine çapraz bağlı bir yapı oluşturduğu malzemelerdir (Şekil 7b). Bu yapı, termoset polimerlerin ısıtıldıklarında yumuşamamalarını ve iç yapılarını bozulmadan korumalarını sağlar. Çapraz bağlar, moleküllerin birbirleri üzerinde kaymasını engelleyerek polimerlerin mukavemetini artırmaktadır. Bununla birlikte, termoset polimerlerin geri dönüştürülmesi mümkün değildir. Sıvı haldeyken, termoplastiklerin viskozitesi termosetlere kıyasla daha yüksek olduğundan, kompozit malzeme üretiminde termoplastikler daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Olgun,2020). Tablo 1.'de endüstride en yaygın kullanılan plastikler verilmiştir.

Tablo 1. Endüstride en çok kullanılan plastikler

TERMOPLASTİKLER	TERMOSETLER
Asetaller	Alkitler
Akrilikler	Alil
Floroplastikler	Kazein
Poliamidler	Aminoplastlar
Polietilen	Fenolikler
Polipropilen	Epoksiler
Polistiren	Dialiftalat
Polikarbonat	Poliester
Polifenilen eter	Melamin
Polifenilen sülfid	Poliüretan
Poliamidler	
Polisülfon	
Polivinil klorür	

Mühendislik plastikleri ise yüksek mekanik, termal ve kimyasal dayanım sunan özel polimer malzemeler olup geleneksel plastiklere kıyasla daha üstün performans özelliklerine sahiptir. Bu malzemeler genellikle ısıya, kimyasal maddelere, darbelere ve aleve karşı direnç gösterir.

Bununla birlikte, mühendislik plastikleri içinde değerlendirilen yüksek performanslı plastikler veya süper termal dirençli plastikler, daha yüksek sıcaklıklara dayanım gösterebilen gelişmiş polimerlerdir. Bu plastikler, havacılık, otomotiv, medikal ve

endüstriyel ekipman gibi zorlu koşullarda kullanılan alanlarda tercih edilmektedir. Mühendislik plastikleri, performans özellikleri ve morfolojik yapılarına göre üç ana gruba ayrılmaktadır:

1. Genel Amaçlı Mühendislik Plastikleri

- Amorf: Polikarbonat (PC), Polifenileter (PPE), Termoplastik Poliüretan (TPU), Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS), Polimetilmetakrilat (PMMA)
- Yarı-kristalin veya kristalin: Polioksimetilen (POM), Poliamid (PA), Polietilentereftalat (PET), Ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE)

2. Yüksek Performanslı Mühendislik Plastikleri

- Amorf: Polieterimid (PEI), Polisülfon (PSU), Polietersülfon (PES)
- Yarı-kristalin veya kristalin: Polivinilidenfluorür (PVDF), Politetrafluoroetilen (PTFE), Polifenilensülfür (PPS), Polietereterketon (PEEK), Sıvı kristal polimer (LCP)

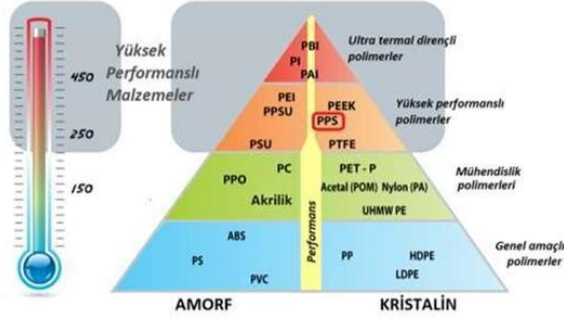
3. Süper Termal Dirençli Mühendislik Plastikleri

- Öne çıkan malzemeler: Poliamidimid (PAI), Poliimid (PI) (URL-4).

Bu mühendislik polimerleri arasında PPS bu tez çalışmasının odak noktasını oluşturmaktadır.

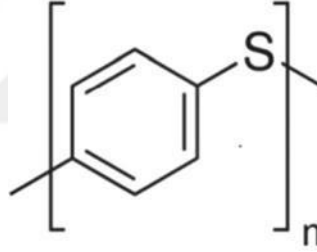
1.6. Polifenilen Sülfür (PPS)

Yüksek performanslı polimerler, malzeme biliminin gelişiminde önemli bir yere sahiptir (Şekil 8). Her geçen gün yeni polimerlerin geliştirilmesiyle birlikte bu alandaki bilgi birikimi artmakta ve üretilebilecek ürün yelpazesi genişlemektedir. Genel olarak yüksek sıcaklıklara, kimyasal maddelere, mekanik darbelere ve aleve karşı yüksek direnç gösteren bu polimer sınıfı, mühendislik uygulamalarında kritik bir rol oynamaktadır. Yeniliklerin en sık yaşandığı polimer gruplarından biri olan yüksek performanslı polimerler, dayanıklılık ve fonksiyonellik açısından üstün özellikler sunarak endüstriyel kullanım alanlarını sürekli olarak genişletmektedir.



Şekil 8. Yüksek performanslı polimerler (URL-5)

Polifenilen sülfür (PPS) polimeri de yüksek performanslı polimerler sınıfına ait bir termoplastik malzemedir. Moleküler yapısında kükürt bağları içeren aromatik halkalar barındıran PPS, organik bir termoplastik polimer olarak sınıflandırılmaktadır (Şekil 9). Düşük molekül ağırlığına sahip olan bu polimer, beyazımsı bir renkte olup yarı kristalin bir yapı göstermektedir.



Şekil 9. PPS'in molekül yapısı (Chen vd.,2021)

PPS, yüksek sıcaklık dayanımı, mekanik mukavemeti ve aşınma direnci gibi özellikleri nedeniyle geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Yaklaşık 200-260°C sıcaklığa kadar kararlılığını koruyabilen bu malzeme, asitler, bazlar ve çözücüler de dahil olmak üzere birçok kimyasal maddeye karşı yüksek direnç göstermektedir. Aynı zamanda düşük nem emme kapasitesi ve iyi elektriksel yalıtkanlık özellikleri ile öne çıkmaktadır.

Bu özellikleri sayesinde PPS polimeri, başta otomotiv, havacılık, elektronik ve kimya endüstrileri olmak üzere çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır. Motor parçaları, yakıt sistemleri, izolasyon malzemeleri, devre kartları ve kimyasal tesis ekipmanları gibi farklı uygulama alanlarında tercih edilen PPS, geleneksel plastiklere kıyasla daha üstün performans sunarak mühendislik plastikleri arasında önemli bir yere sahiptir (Braun vd.,2005).

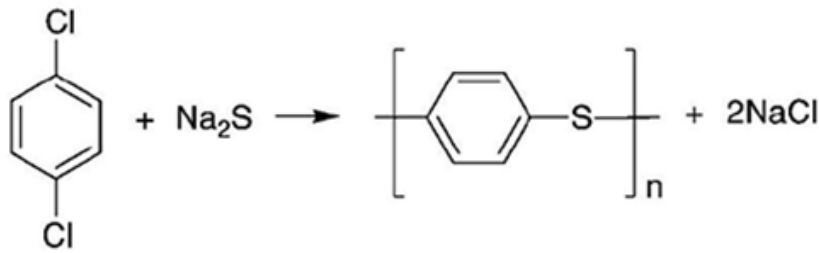
1.6.1. Polifenilen Sülfür (PPS) Polimerinin Mekanik Özellikleri

Polifenilen sülfür (PPS), termoplastik özelliklere sahip, yüksek performanslı bir mühendislik polimeridir. Dengeli mekanik ve kimyasal özellikleri sayesinde mühendislik uygulamalarında önemli bir yer tutmaktadır. İlk olarak Philips Chemical Company tarafından "Ryton" ticari adıyla üretilen PPS, yarı kristalin yapıya sahip aromatik bir polimerdir.

PPS, yüksek sıcaklıklara ve kimyasal maddelere karşı üstün dayanıklılığı ile bilinmektedir. Bu polimer, sodyum sülfid (Na_2S) ile p-diklorbenzenin ısı altında polikondenzasyon reaksiyonuna girmesiyle sentezlenmektedir (Şekil10). Elde edilen PPS, sağlamlığı, termal kararlılığı ve kimyasal direnci nedeniyle birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır (Ođian,2004). PPS'in özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. PPS'in özellikleri

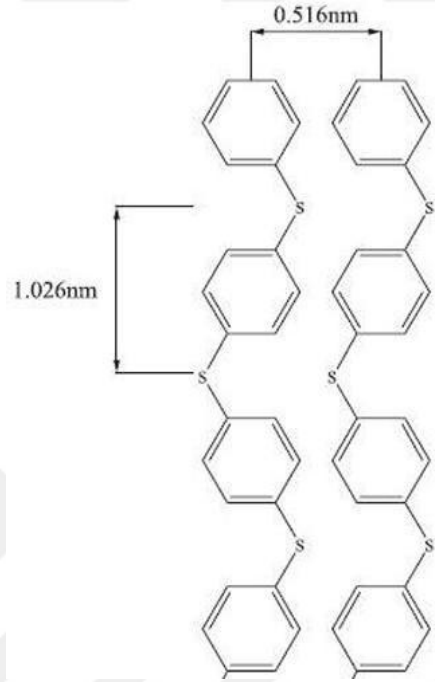
Malzeme Özelliği	Birim	Değer
Yoğunluk	g/cm^3	1,35
T _g	$^{\circ}\text{C}$	90
Erime Sıcaklığı (T _m)	$^{\circ}\text{C}$	280
Üst Çekme Dayanımı	MPa	76,6
Elastisite Modülü	MPa	3180
Termal İletkenliği	W/m.K	0,22



Şekil 10. PPS'in oluşum reaksiyonu (Kemmish,2011)

Kristal yapısı ortorombik olup, latis parametreleri $a = 0,867 \text{ nm}$, $b = 0,561 \text{ nm}$, $c = 1,026 \text{ nm}$ bu şekildedir (Rahate vd.,2013). Birim hücrede, sülfür grupları düzlemsel olarak zig-zag yapısında uzanarak genişletilmiş bir omurga oluşturur. Fenil halkaları, bu omurga

düzlemine 40-45° eğimli bir açıyla bağlanmaktadır (Şekil 11). Bağlanma açıları nedeniyle fenil halkalarının hareketliliği sınırlıdır. Bu yapısal özellik, PPS'in yüksek termal kararlılığa sahip olmasının temel nedenlerinden biridir (Nohara vd.,2006).



Şekil 11. PPS birim hücresi (Nohara vd.,2006)

1.6.2. Polifenilen Sülfür (PPS) Polimerinin Termal Özellikleri

Polifenilen sülfür (PPS) polimerinin erime noktası yaklaşık 285-290°C civarındadır. 200°C'ye kadar olan sıcaklıklarda, PPS'in sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özelliklerinde herhangi bir kayıp gözlemlenmez. Ancak, uzun süreli kullanımda maksimum kullanım sıcaklığı 218-240°C arasında değişmektedir.

PPS, 200°C'nin altındaki sıcaklıklarda hiçbir çözücü içerisinde çözünmemektedir. Ancak, yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında bazı organik çözücüler içerisinde çözünme eğilimi göstermektedir. Bu özellikleri sayesinde PPS, yüksek sıcaklık ve kimyasal direnç gerektiren uygulamalarda tercih edilen mühendislik polimerlerinden biri olarak öne çıkmaktadır (Long,2007).

PPS'in kalıplama süreci, poliolefinlerle benzerlik göstermektedir. Ancak, önemli bir fark olarak PPS, daha yüksek erime sıcaklığı ve kalıp sıcaklığına sahiptir. PPS'in kalıplama işlemi için 315-330°C arasında bir erime derecesi gereklidir. Bu, polimerin uygun

işlenebilmesi ve istenilen özelliklerin elde edilmesi için gereken sıcaklık aralığıdır (Sinha,2009).

PPS polimeri, 120-150°C arasındaki kalıp sıcaklıklarında yüksek boyutsal kararlılığa sahip parçaların üretimine olanak tanır ve bu koşullarda parlak yüzeyler elde edilebilir. Ayrıca, 65°C'nin altındaki sıcaklıklarda darbe dayanımı yüksek olan parçalar üretilebilir. Bu özellikler, PPS'in akış ve mekanik özelliklerinde bir değişiklik olmadan sürekli olarak işlenebilmesine imkan verir, böylece farklı uygulamalar için uygun parçaların üretimi sağlanabilir.

Polifenilen sülfür (PPS), kristal yapıda bir aromatik polimer olup, kimyasal yapısı yüksek derecede kristalleşmeye elverişlidir. Bu polimer, yüksek erime noktasına ve ısı kararlılığına sahip olup, bu özellikleriyle zorlu koşullarda uzun süre dayanabilmektedir. PPS, aynı zamanda iyi kimyasal direnç gösterir ve yanmaya karşı dayanıklıdır. Bu özellikleri sayesinde, PPS sert ve mekanik özelliklerini çok yüksek sıcaklıklarda da koruyabilmektedir. Bu da PPS'in kalıplama ve kaplama uygulamalarında başarılı sonuçlar vermesine olanak tanır, böylece endüstriyel üretim süreçlerinde güvenle kullanılabilir.

1.6.3. Polifenilen Sülfür (PPS) Polimerinin Kullanımı, Sağladığı Avantajlar ve Kullanım Yerleri

Polifenilen sülfür (PPS), özellikle bilgisayar parçalarının yapımında, yüksek voltaj alanlarında, mekanik güç, yüksek ısı kararlılık ve kimyasal direnç gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Ayrıca, su altı aletleri, santrifüjler, pervane kanatları ve dişli pompaların yapımında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda, PPS'in üstün özellikleri, ürünlerin dayanıklılığını ve performansını artırmaktadır. Oldukça kristalin bir yapıya sahip olan polifenilen sülfür (PPS) polimeri, sahip olduğu üstün özellikler sayesinde yüksek performanslı termoplastik polimerler arasında önemli bir yer edinmiştir. Bu polimer, yüksek ısı dayanımının yanı sıra, klorlu hidrokarbonlar, bazı aminler ve halojen içeren gruplar dışında neredeyse tüm kimyasal maddelere karşı mükemmel direnç gösterir (Long,2007).

PPS polimeri, aynı zamanda mükemmel boyut stabilitesine sahiptir, nem absorpsiyonu düşüktür ve dielektrik özellikleri oldukça iyidir. Ancak, sürtünme katsayısı ve darbe dayanımı daha düşük seviyelerde kalmaktadır. PPS, yanmaz özellik taşır ve kendi kendini söndürebilir olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, sadece çok az miktarda çözücü absorbe edebilmesi nedeniyle, boyanması oldukça zordur (Sinha,2009).

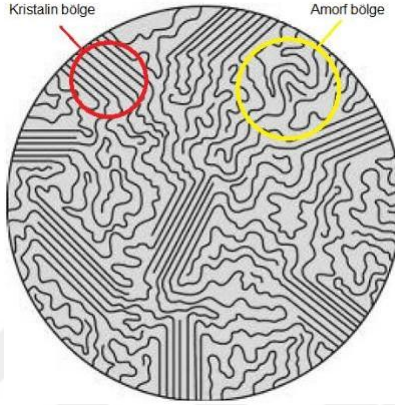
PPS polimeri, yüksek sıcaklıklarda bile minimum sünme gösterir, bu da onu uzun, ince ve kompleks yapıların üretimi için uygun hale getirir. Kalıplama süreci oldukça kolaydır, bu sayede istenilen kalıba üflenmesi ve şekillendirilmesi oldukça pratik bir şekilde yapılabilmektedir. Bu özellikler, PPS polimerini endüstriyel uygulamalarda, özellikle yüksek sıcaklık ve kimyasal dayanım gerektiren alanlarda tercih edilen bir malzeme haline getirmektedir (Cuppoletti,2011).

Enjeksiyonla kalıplama reçineleri, özellikle elektrik-elektronik ve endüstriyel makineler gibi sektörlerde en geniş kullanım alanlarına sahiptir. Ayrıca, haberleşme sistemleri, bilgisayar parçaları ve bobinler gibi uygulamalarda da kullanılır, özellikle yüksek voltaj alanlarında tercih edilir. Bu reçineler, mekanik güç, yüksek ısıl kararlılık ve kimyasal direnç gerektiren uygulamalarda önemli bir yer tutar. Su altı aletleri, santrifüjler, pervane kanatları ve dişli pompalar gibi endüstriyel ürünlerin üretiminde de kullanılmaktadır. Ayrıca, ısıya dayanıklı ve boyutsal kararlılığa sahip olmaları nedeniyle, otomotiv sanayinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu reçineler, egzoz gazı aşındırmalarına, etilen glikol ve benzine karşı dayanıklıdır. El aletleri üretiminde ise, bu reçineler ısıya ve aleve karşı dayanıklı olmalarının yanı sıra, geniş renk çeşitliliği sunmaları nedeniyle tercih edilmektedir. Bu uygulamalar arasında saç kurutma makineleri, bakım aletleri ve küçük mutfak aletleri yer alır. Ayrıca, PPS tozu elektrostatik kaplamalar ve besin maddelerinin ambalajlanmasında da kullanılarak, çok çeşitli endüstriyel ihtiyaçları karşılamaktadır (Chen vd.,2016).

1.7. Nano Katkı Türleri

Polimer malzemeler, düşük ısıl iletkenlik özelliklerinin yanı sıra yüksek işlenebilirlik, yüksek elektriksel direnç, yüksek kopma mukavemeti, korozyon direnci ve düşük maliyet gibi avantajları sayesinde endüstride geniş bir kullanım alanına sahiptir (Chen vd.,2016). Bu üstün özellikleri koruyarak ısıl iletkenlik gerektiren birçok uygulamada da yaygın şekilde tercih edilmektedir (Ngo vd.,2016). Ancak, polimerlerin doğası gereği düşük olan ısıl iletkenlik değerlerini artırmak amacıyla, yüksek oranda katkı malzemesi eklenmesi yoluyla ısıl iletken zincirler veya iletken ağlar oluşturulmaktadır (Liv d.,2013). Bu yöntem, polimer matrisin ısıl iletkenliğini iyileştirmekte ve malzemenin belirli uygulamalarda daha verimli hale gelmesini sağlamaktadır.

Polimerler, düzenli kristal yapılar ve rastgele dağılım gösteren amorf yapılar olmak üzere iki farklı moleküler yapıya sahiptir (Leung,2018). Amorf yapıların baskın olduğu durumlarda, polimer içindeki titreşim modları lokalize olma eğiliminde olup bu durum, malzemenin düşük ısı iletkenliğe sahip olmasına neden olmaktadır (Huang,2018). Şekil 12.'de, polimerlerin amorf ve kristal bölgeleri şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 12. Polimerlerde amorf ve kristalin bölgeler (URL-6)

Literatürde, polimerlerin ısı iletkenliğini artırmak amacıyla ısı iletken katkı malzemelerinin kullanımı üzerine çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Leung,2018). Bu katkı malzemeleri, metal, seramik ve karbon bazlı olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır (Han vd.,2010).

Polimer nanokompozitlerin ısı iletkenliğini artırmak amacıyla bakır nanopartikülleri (Boudenne vd.,2005), bakır nanotelleri (Rai vd.,2017), alüminyum lifleri (Danes vd.,2003), gümüş parçacıkları (Jouni vd.,2013) ve altın ile paladyum tozları (Kubat vd.,1993) gibi metalik katkı malzemeleri kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu tür dolgu malzemeleri aynı zamanda elektriksel iletkenliği de artırarak elektriksel yalıtım gerektiren uygulamalar için kısıtlayıcı bir faktör oluşturabilmektedir. Metalik katkı malzemelerinin elektriksel iletkenliği, oksidasyon veya yüzey işlemleri yoluyla belirli bir düzeyde ayarlanabilse de (Boudenne & Majeste,2005) yüksek ısı iletkenliğe sahip seramik katkı malzemeleri yalnızca elektriksel yalıtım özellikleri nedeniyle değil, aynı zamanda üstün termal kararlılıkları sebebiyle de daha fazla tercih edilmektedir.

Yüksek ısı iletkenliğe sahip tipik seramik nano dolgu malzemeleri arasında magnezyum oksit (MgO) (Ge,2014), alüminyum oksit (Al_2O_3) (Sim vd.,2005), silisyum

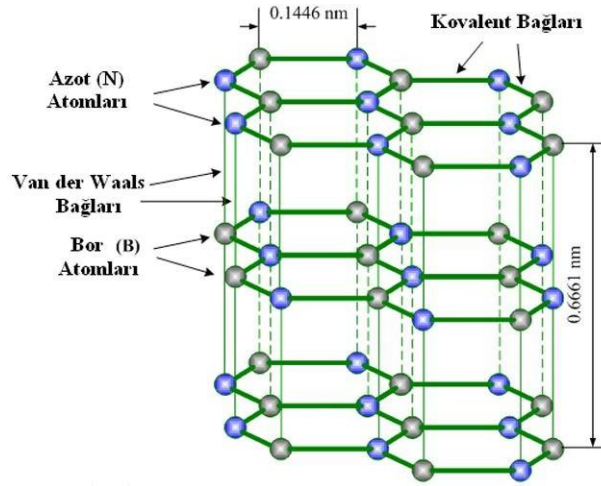
nitür (Si_3N_4) (Zhou vd.,2009), silisyum karbür (SiC) (Zhou & Guo,2009), çinko oksit (ZnO) (Mu & Diao,2007), alüminyum nitür (AlN) (Zhou vd.,2014) ve bor nitür (BN) (Kim & Kim,2014) bulunmaktadır. Metalik ve seramik katkı malzemeleriyle kıyaslandığında, nanoyapılı karbon bazlı katkı malzemeleri, üstün ısı iletkenlik özellikleri nedeniyle daha yoğun ilgi görmektedir. Karbon nanotüp, grafen ve grafit gibi karbon bazlı katkılar da genellikle yüksek ısı iletkenliğe ve yüksek elektriksel iletkenliğe ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Tablo3.'de bazı katkı malzemelerinin ısı iletkenlik değerleri verilmektedir.

Tablo 3. Bazı katkı türlerinin ısı iletkenlik değerleri

MALZEMELER	ISIL İLETKENLİK 25°C (W/MK)
Grafen	5000
Karbon Siyahı	6-174
Karbon Nanotüp	2000-6000
Bakır	483
Gümüş	450
Bor Nitür	250-300
Alüminyum Nitür	200

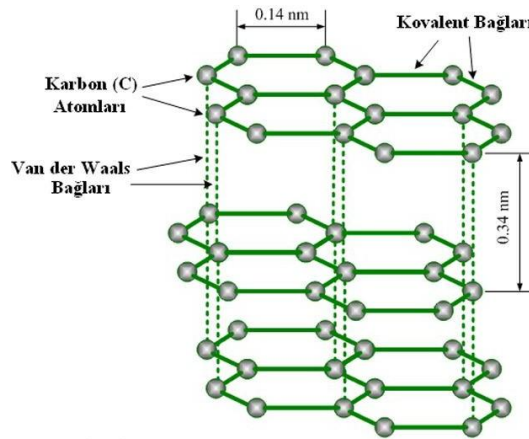
1.7.1. Hegzagonal Bor Nitür (h-BN)

Bor nitür (BN), sentetik olarak üretilen ve ticari öneme sahip bor bileşiklerinden biridir. İlk olarak 1842 yılında sentezlenmiştir (Balmain,1842). Kimyasal yapısında eşit sayıda bor ve azot atomu bulunmakta olup, bu atomlar kovalent bağlarla birbirine bağlanmıştır (Şekil 13). Tabakalar arasındaki etkileşim ise van der Waals kuvvetleri tarafından sağlanmaktadır ve bu etkileşim, malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 13. Bor nitrürün tabakalı yapısı

Bor nitrür (BN), karbon atomlarıyla aynı örgü yapıya sahip olup izoelektronik bir malzemedir. Bunun yanı sıra, halkasal yapıya sahip tabakalı bir yapı da içermektedir. Bu tabakalı yapı, karbonun grafit allotropuna benzemektedir (Şekil 14). Kristal yapısı dikkate alındığında, hekzagonal bor nitrür (h-BN) olarak adlandırılan bu form, grafitik bor nitrür olarak da bilinmektedir. Fiziksel olarak grafit siyah renkte olmasına rağmen, h-BN beyaz renkte olup bu nedenle "beyaz grafit" olarak tanımlanmaktadır (Haubner & Lux, 2002).



Şekil 14. Grafitin tabakalı yapısı (URL-7)

h-BN, kimyasal ve fiziksel özellikleri (ısıl, elektriksel, mekanik) bakımından yüksek kaliteli bir bileşik olup, çok çeşitli alanlarda kullanılabilen bir malzemedir. Malzeme ve seramik mühendisleri, h-BN'nin hem ısıl iletkenlik hem de elektriksel yalıtkanlık

özelliklerinden faydalanarak, elektrik ve elektronik uygulamalarda bu malzemeyi değerlendirmişlerdir.

h-BN, görünüm olarak alüminaya benzer, zehirsiz ve kaygan bir malzemedir. Seramik malzemeler arasında en düşük yoğunluğa sahip bileşiklerden biri olup, dokunulduğunda ipeksi bir doku hissi verir. Ayrıca, h-BN inert bir malzeme olup, asitlerle ve bazik ortamlarda kimyasal tepkimelere girmez Tablo 4.'de hegzagonal bor nitrürün fiziksel özellikleri verilmiştir (Balmain,1842; Öz,2013).

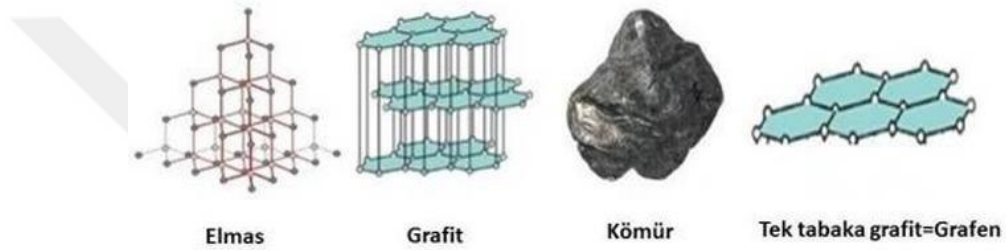
h-BN'den üretilen parçalar, işlenmesi kolay ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı özellikler gösterir. Isıl şoklara karşı kararlı olmasının yanı sıra, mükemmel elektriksel yalıtkanlık, bakır kadar iyi ısı iletkenlik ve UV ışınlarını yansıtma gibi özelliklere sahiptir. Ayrıca, mükemmel yağlayıcı özellikleri ile dikkat çeker. h-BN, boyalarda, diş çimentosunda, hareketli parçaların kayan bölümlerinde ve sürekli dönen türbin şaftlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Balmain,1842).

Tablo 4. Hegzagonal bor nitrürün fiziksel özellikleri (Balmain,1842; Mirkarimi,1997; Bello vd.,2005; Pierson,1975)

Özellik	h-BN
Yoğunluk (g/cm ³)	2,27
Termal iletkenlik, 25°C (W/cmK)	0,627 W/cmK (a ve b ekseninde) 0.015 W/cmK (c ekseninde)
Dielektrik sabiti	4,2
Erime sıcaklığı (°C)	2700
Oksitlenme sıcaklığı	980
Latis sabiti (Å)	a=b=2,504 c=6,661
Elektrik direnci (Ωcm)	3,0 x 10 ⁷ (a ve b ekseninde) 3,0 x 10 ⁹ (c ekseninde)
B-N arası mesafe (Å)	1,446

1.7.2. Grafen

Grafen, iki boyutlu bir bal peteği yapısında sıkıca paketlenmiş karbon atomlarının oluşturduğu düz bir tabaka olarak tanımlanır. Bu malzeme, sp^2 bağlarla yoğun şekilde paketlenmiş tek bir karbon atomu tabakasına sahip, iki boyutlu (2D) kristal bir yapıdır. Karbon atomlarının altıgen bir düzen içinde dizilmesi, grafene özgün fiziksel ve kimyasal özellikler kazandırmaktadır. Aynı zamanda grafenin sentezinin kolay olması ve yüksek verimle elde edilebilmesi, onun geniş bir uygulama alanına sahip olmasına yol açmaktadır (Meng & Chou,2015).



Şekil 15. Karbon atomlarından oluşan farklı türden yapılar (Ağızaçmak,2019)

Karbon atomlarının iki boyutlu altıgen yapısı, grafene özgün fiziksel ve kimyasal özellikler kazandırmaktadır. Özellikle, grafenin elektriği iletme kabiliyeti, onun en dikkat çekici özelliklerinden biridir. Karbon atomlarının dört valans elektronu bulunmakta olup, bunlardan üçü bağ yaparken, dördüncü elektron atom yörüngesinde serbest olarak hareket eder. Bu serbest elektronlar, grafene yüksek elektriksel iletkenlik kazandıran önemli bir faktördür. Metalik atomlardaki serbest elektronlar, çevreye enerji vererek ısı üretirken, grafen atomları 20 ile 22°C arasında elektronların geniş alanlarda bağ yapabilme özelliklerini gösterebilmektedir (Ebbesen,1994).

Karbon atomlarının iki boyutlu altıgen yapısına sahip grafen, doğal grafitten kolayca üretilen ucuz ve petrol dışı bir karbon allotropudur. Grafen, hafifliği, yüksek mukavemeti ve sertliği ile dikkat çekmekte olup, aynı zamanda yüksek elektriksel iletkenlik özelliğine sahiptir. Ayrıca, kolay ölçeklenebilirlik gibi avantajları sayesinde, gelecekte önemli bir elyaf türü olarak büyük potansiyel taşımaktadır (Xu & Wang,2016).

Grafen, optik şeffaflık, elektriksel iletkenlik, mekanik mukavemet ve termal iletkenlik gibi birçok üstün özellik sunan bir malzemedir. Grafen, yalnızca bir atom kalınlığında, tek

bir karbon atomu katmanından oluşur ve bu özelliği ona süper ince ve ultra hafif olma avantajı kazandırır. Grafenin kalınlığı sadece 0,35 nm olup, bu değer insan saçının kalınlığının yaklaşık 1/200.000'i kadardır. Bunun yanı sıra, grafenin yapısı oldukça karardır. Karbon atomları arasındaki bağlar, dışarıdan gelen kuvvetlere karşı yüksek dayanıklılık sağlar. Grafen, 0,77 mg/m² yoğunluğuyla son derece hafif bir malzeme olup, birim yapısı 0.052 nm² alana sahip, her atomun yalnızca iki karbon atomu ile bağ yaptığı ve üç birim halkası tarafından paylaşılan altıgen bir karbon halkasından oluşur (Şekil 16) (Zhen & Zhu,2018).



Şekil 16. Grafenin petek kristal yapısı (Meng & Chou,2015)

Yapılan çalışmalar sonucunda, oda sıcaklığında grafenin termal iletkenlik katsayısının $(4,84 \pm 0,44) \times 10^3$ ile $(5,30 \pm 0,48) \times 10^3$ W/mK aralığında olduğu ölçülmüştür. Diğer karbon türevlerinin termal iletkenlik katsayıları ise bu değerlerden daha düşük çıkmıştır. Grafenin bu üstün termal iletkenlik özellikleri, güçlü malzeme üretimi ve elektronik cihazların bileşenlerinin geliştirilmesi alanlarında yeni araştırmaların yapılmasını teşvik etmektedir (Ağızaçmak,2019). Tablo 5.'te grafenin özellikleri verilmiştir.

Tablo 5. Grafen'in mekanik ve fiziksel özellikleri (Mittal & Lee,2015; Dresselhaus & Saito, 2010)

Özellik	Grafen
Gerilme mukavemeti	130 GPa
Young modülü	1100 GPa
Elektrik iletkenliği	10^8 S/m
Termal iletkenlik	5300 W/mK
Akım taşıma kapasitesi	10^{12} - 10^{13} A/cm ²
Yoğunluk	0,16 mg/cm ³

Grafen, yüksek mekanik, optik, elektriksel ve termal özelliklere sahip bir malzeme

olup, doğal grafitte kıyasla daha düşük maliyetle üretilebilmesi nedeniyle bilim dünyasının ilgisini çekmiştir. Kullanım alanları sıralanacak olursa;

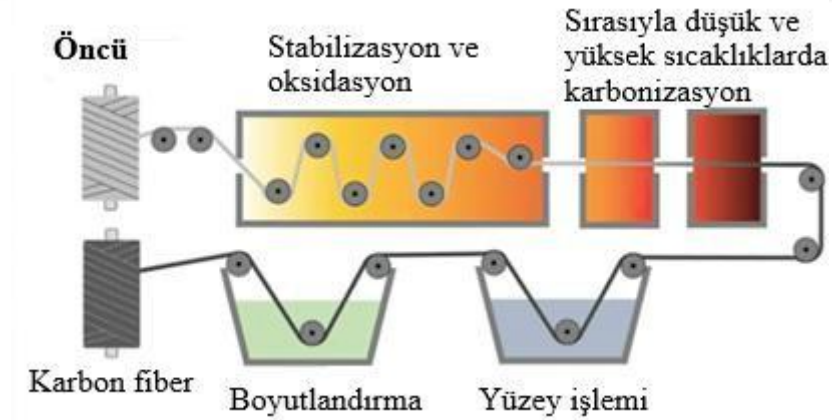
- Grafen, bilgisayar ve telefon gibi teknolojik cihazların ekranlarında ve işletim sistemlerinde kullanılabilen bir malzemedir.
- Grafen, güneş panellerinin ve pillerin daha uzun ömürlü olabilmesi için kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca, lityum pillerde anot, elektrot malzemesi ve yarıiletken olarak kullanılma potansiyeline sahiptir.
- Grafen, hidrojen depolama teknolojileri açısından da büyük önem taşımaktadır. Küresel ısınmanın artışı ve fosil yakıtların hızla tükenmesi, yeni enerji kaynakları arayışını zorunlu kılmaktadır. Hidrojen, elektrik ve ısınma enerjisi üretiminde kullanılabilecek bir kaynak olarak önemli bir potansiyele sahip olduğundan, verimli bir şekilde depolanması büyük bir gereklilik arz etmektedir.
- Grafen nano şeritler, sahip oldukları manyetik özellikler nedeniyle magnetoelektronik teknolojilerinde de önemli bir yer edinmektedir.
- Vücut içi iyonik sıvılara enjekte edilen grafen, yapısal bütünlüğünü koruyarak kalabildiği için biyolojik araştırmalarda kullanılabileceği öngörülmektedir. Ayrıca, bazı biyonik organların üretiminin mümkün olabileceği düşünülmektedir. Grafenin, ilerleyen yıllarda sağlık alanında daha yaygın bir şekilde kullanılma potansiyeli bulunmaktadır.
- Grafen tabanlı sensörlerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle atık sulardeki fosfat seviyelerinin izlenebilmesi için grafen tabanlı fosfat sensörleri kullanılmaktadır. Bu sensörler, suda yaşayan canlılar ve mikroorganizmaların yaşamlarını sürdürebilmeleri için kritik öneme sahiptir (İncebay,2015).

1.7.3. Karbon Fiber (CF)

Son yıllarda, karbon fiberler, yüksek performanslı kompozitlerin üretiminde en yaygın olarak kullanılan takviye elemanlarından biri haline gelmiştir. Karbon elyaf, diğer adıyla karbon fiber, ileri teknolojiyle üretilen ipliksi bir malzemedir. Katran (zift), naylon ve orlon gibi bileşenlerden oluşan bu fiber malzeme, çeliğe kıyasla yaklaşık 4,5 kat daha hafif olmasına rağmen 3 kat daha dayanıklıdır. Sahip olduğu bu üstün özellikler, karbon elyafın çeşitli endüstriyel ve teknolojik alanlarda kullanımını yaygınlaştırmaktadır.

Günümüzde karbon elyaf, uçaklar, roket sistemleri, uydular, yarış arabalarının iskelet sistemleri, inşaat sektörü, spor ve eğlence gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Karbon fiberin tercih edilme nedenleri arasında hafif yapısı, oksitlenmeye karşı dirençli olması ve bu sayede estetik bir avantaj sunması yer almaktadır. Ayrıca, uzun ömürlü olması ve çeliğe kıyasla daha düşük yoğunluğa sahip olması nedeniyle, yüksek ağırlık oranı gerektiren uygulamalar için benzersiz bir malzeme olarak öne çıkmaktadır.

Karbon elyaf üretimi dört temel aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak, oksidasyon aşamasında elyaflar hava ortamında 300°C'ye kadar ısıtılarak hidrojenin ayrılması ve oksijenin eklenmesi sağlanır. Bu süreçte elyafın rengi beyazdan siyaha döner. Ardından gelen karbonizasyon aşamasında, elyaflar yanıcı olmayan bir atmosferde 3000°C'ye kadar ısıtılarak tamamen karbonlaşır ve bu sıcaklık, elyafın sınıfını belirler. Daha sonra, yüzey iyileştirmesi aşamasında elyafın yüzeyi temizlenerek elektrolit banyosuna yatırılır ve böylece kompozit malzemenin reçinesine daha iyi yapışması sağlanır. Son olarak, kaplama işlemiyle elyaf, genellikle epoksi kullanılarak kaplanır ve bu sayede hem reçine ile uyumlu hale getirilir hem de sonraki işlemlerden korunur (Şekil 17) (URL-8). Tablo 6.'da karbon fiberin özellikleri verilmiştir.



Şekil 17. Karbon fiberin üretim süreci (URL-9)

Tablo 6. Karbon fiberin özellikleri (Newcomb & Chae, 2018)

Karbon Fiber	
Gerilme dayanımı (MPa)	2500-3000
Gerilme modülü (GPa)	200-700
Özgül ağırlık (g/cm ³)	1,75-1,96
Özellikler	-Yüksek modül
	-Elektriksel iletkenlik
	-Yüksek maliyet
	-Yüksek yorulma dayanımı
	-Çekmeye ve basmaya karşı yüksek dayanım
	-Yüksek termal iletkenlik

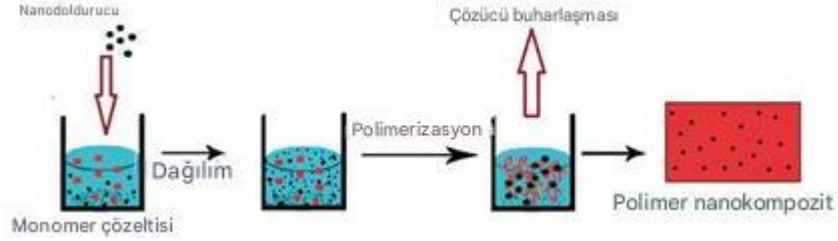
1.8. Polimer Nano Kompozitlerin Üretimi

Polimer nanokompozitlerin sentezi, bu malzemelerin özelliklerini geliştirmek amacıyla nano ölçekli katkı maddelerinin (nanopartiküller veya nanofiberler) polimer matrisi içerisinde homojen bir şekilde dağıtılmasını içeren bir süreçtir. Bu sentez işleminin temel hedefi, nano katkı maddelerinin polimer matrisi içinde düzgün bir dağılım göstermesini sağlamak ve bu dolgu maddeleri ile matris polimer arasında güçlü yüzey etkileşimleri oluşturmaktır.

Polimer nanokompozitlerin sentezi için farklı avantajlara ve zorluklara sahip çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Yaygın olarak tercih edilen sentez yöntemleri arasında solüsyon temelli yöntemler, ergiyik karıştırma ve yerinde polimerizasyon (in-situ) gibi yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerin seçimi, istenen malzeme özelliklerine ve uygulama alanına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Yerinde polimerizasyon, polimerin nano katkı maddelerinin varlığında sentezlenmesini içeren bir yöntemdir. Bu süreç, monomerlerin dağılmış nano katkı maddeleri etrafında polimerizasyonunu sağlayarak, katkı maddelerinin polimer matrisi içerisinde homojen bir şekilde dağılmasına olanak tanır (Şekil 18) ve güçlü yüzey etkileşimleri oluşturarak malzemenin mekanik ve termal özelliklerini iyileştirir. Özellikle,

polimer matrisi ile kimyasal olarak uyumlu olan nano katkı maddeleri için yerinde polimerizasyon yöntemi oldukça uygundur (Shen,2006).



Şekil 18. Yerinde polimerizasyon yöntemi (URL-10)

Çözeltide harmanlama yönteminde ise öncelikle polimer uygun bir çözücü veya çözücü karışımı içerisinde çözülür. Daha sonra nanopartiküller, polimer çözeltisine eklenerek homojen bir dağılım sağlamak amacıyla karıştırılır. Nihai ürün, çözücünün uzaklaştırılmasıyla elde edilir (Şekil 19). Bu yöntemin temel prensibi, nanopartiküller ile çözücü arasındaki etkileşim sonucunda nanopartiküller arasındaki Van der Waals kuvvetlerinin zayıflatılması ve bunun sonucunda polimer zincirlerinin nanopartiküller arasına daha kolay difüze olabilmesidir. Ancak, yüksek miktarda çözücü kullanımı ve buna bağlı olarak saflaştırma maliyetlerinin artması, bu yöntemin en büyük dezavantajları arasında yer almakta olup, ticari ölçekte tercih edilmemesinin başlıca nedenlerindendir (Wang,2002a).

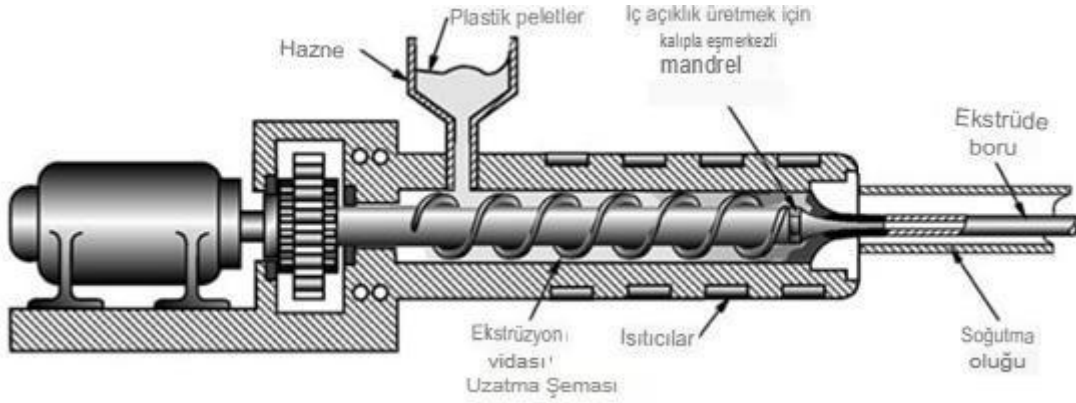


Şekil 19. Çözeltide harmanlama yöntemi (URL-11)

Nanopartiküllerin polimer ile doğrudan karıştırılarak ısıtılması veya nanopartiküllerin polimer eriyiğine eklenmesi temelinde gerçekleştirilen eriyikte harmanlama yöntemi, kompozit ve nanokompozitlerin hazırlanmasında en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemin diğer iki yönteme göre bazı avantajları bulunmaktadır. Bunlardan ilki, çözücü kullanımına gerek duyulmamasıdır. Bu durum hem ekonomik açıdan hem de çevresel açıdan daha sürdürülebilir ve temiz bir yöntem sunmaktadır. Bir diğer avantajı ise, halihazırda polimer şekillendirme işlemlerinde yaygın olarak kullanılan ticari proseslerle uyumlu olmasıdır. Özellikle çift vidalı ekstruderler, polimer ve nanopartiküllerin harmanlanmasında en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir (Ren,2005; Wang,2002b).

1.8.1. Çift Vidalı Ekstrüder

Ekstrüzyon teknolojisi, polimerlerin işlenmesi ve çeşitli endüstriyel ürünlerin üretimi açısından temel bir imalat yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Özellikle çift vidalı ekstruderler, polimer matrislerine katkı maddelerinin homojen bir şekilde dağıtılması, malzemelerin eritilmesi ve istenilen şekil özelliklerinin kazandırılması süreçlerinde önemli bir rol üstlenmektedir. Çift vidalı ekstrüder sistemleri, birbirine geçen (intermeshing) veya paralel konumlandırılmış iki vidanın senkronize çalışması prensibine dayanır (White & Corcoran, 2001). Geleneksel tek vidalı ekstruderlere kıyasla, çift vidalı sistemler daha geniş bir hammadde yelpazesi ile çalışabilmekte ve proses sırasında farklı parametrelerin hassas kontrolüne imkan tanımaktadır. Bu özellikler, reaktif ekstrüzyon, yüksek dolgu oranlı bileşik üretimi ve ısıya duyarlı polimerlerin işlenmesi gibi özel uygulamalarda çift vidalı ekstruderleri vazgeçilmez bir teknoloji haline getirmiştir (Rauwendaal, 2014). Günümüzde bu makineler, plastik endüstrisinin yanı sıra gıda, ilaç ve biyomalzeme üretimi gibi çok çeşitli sektörlerde de etkin bir şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 20. Ekstrüzyon hattı (URL-12)

Ekstrüzyon hattında üretimi yapılacak olan malzeme grubu birkaç ardışık işlem adımı ile gerçekleştirilir.

1. Hammadde Hazırlığı

Ekstrüzyon süreci, plastik hammaddelerin hazırlanması ile başlamaktadır. Hammadde, genellikle granül veya toz formundaki polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polivinil klorür (PVC) gibi termoplastik polimerlerden oluşmaktadır. Bu malzemeler, ekstrüderin besleme ünitesine aktarılır. Hammadde seçimi, üretilmek istenen ürünün mekanik ve kimyasal özelliklerini doğrudan etkilemektedir (Rosato & Rosato, 2004).

2. Erime ve Karıştırma

Besleyici üniteden alınan plastik malzeme, vida veya vida sistemine sahip bir ekstrüder içerisinde ilerletilirken aynı zamanda ısıtılır. Vida hareketi, hem mekanik karıştırma hem de sürtünme ile erimeyi teşvik eder. Bu aşamada sıcaklık, basınç ve vida hızı gibi işlem parametreleri dikkatlice izlenmekte ve kontrol edilmektedir. Homojen bir eriyik elde edilmesi, ürün kalitesi açısından kritik öneme sahiptir (Tadmor & Gogos, 2006).

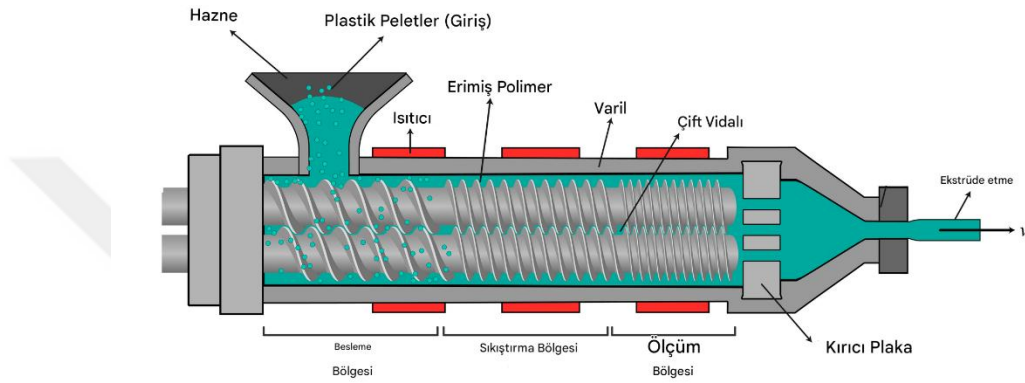
3. Soğutma

Kalıptan çıkan sıcak plastik profil, soğutma ünitesine alınarak katılaşması sağlanır. Soğutma genellikle su banyosu veya hava akımı kullanılarak gerçekleştirilir. Soğutma işlemi, malzemenin boyutsal kararlılığını ve mekanik dayanımını artırır. Bu aşamada kontrollü bir soğuma sağlamak, iç gerilmeleri minimize ederek ürün kalitesini iyileştirir (Rauwendaal, 2014).

4. Kesme ve Bitirme

Soğutulan plastik profil, istenilen ölçülerde kesilir. Kesme işlemini takiben, yüzey işlemleri, delik açma veya montaj destekleri ekleme gibi son işleme adımları gerçekleştirilebilir. Bu bitirme işlemleri, ürünün estetik ve fonksiyonel özelliklerini optimize etmek için önemlidir.

- **Ekstrüder Vidası**



Şekil 21. Ekstrüder vidası (URL-15)

Çift vidalı ekstrüderler, genellikle silindir (namlu) içerisinde yer alan iki adet helezonik vida ve bu vidaların döndüğü motor sistemi, ısıtma/soğutma elemanları, besleme üniteleri ve kontrol mekanizmalarından oluşur. Şekil 21’de iki vida, birbirine geçmiş (intermeshing) ya da birbirine temas etmeden paralel şekilde yerleştirilebilir. Vida konfigürasyonu, ekstrüderin sunduğu karıştırma yoğunluğu, malzeme taşıma verimliliği ve ürün kalitesi üzerinde doğrudan etkili olmaktadır (Gogos & Erdmenger, 2012).

İşlem sırasında, hammaddeler besleme haznesinden ekstrüderin girişine alınır. Burada vidaların dönme hareketiyle birlikte ileri doğru taşınır ve ısıtıcı bölgeler aracılığıyla sıcaklık kontrollü bir şekilde eritilir. Aynı anda, vidaların özel geometrik tasarımı sayesinde hem aksel hem de radyal yönde bir karıştırma kuvveti uygulanır. Bu özellik, polimer matrisinin katkı maddeleri ile homojen bir şekilde karışmasını sağlar (Tadmor & Gogos, 2006).

• Çift Vidalı Ekstrüzyonların Avantajları ve Uygulama Alanları

Çift vidalı ekstrüderler, sundukları yüksek işleme kapasitesi ve çok yönlülükleri sayesinde, polimer işleme endüstrisinde kritik bir öneme sahiptir. Bu makinelerin en belirgin avantajlarından biri, malzeme üzerinde uyguladıkları yoğun karıştırma ve kesme kuvvetleri ile homojen bir ürün yapısı elde etmeye olanak sağlamalarıdır. Özellikle, doldurulmuş polimerler, renk masterbatchleri ve reaktif ekstrüzyon işlemleri gibi kompleks formülasyonların işlenmesi için ideal bir ortam sunarlar (Rauwendaal, 2014).

Çift vidalı sistemler, vida konfigürasyonu ve çalışma parametrelerinin geniş bir aralıkta ayarlanabilmesine imkan vererek, proses esnasında ürün özelliklerinin hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak tanır. Ayrıca, düşük eriyik sıcaklıkları ile çalışabilmeleri, ısıl bozulmaya hassas malzemelerin işlenmesini mümkün kılar (Tadmor & Gogos, 2006). Aynı zamanda, çeşitli hammaddelerin aynı anda beslenebilmesi ve işlenebilmesi sayesinde üretim süreçlerinde esneklik ve verimlilik artışı sağlanmaktadır.

Başlıca uygulama alanları şunlardır:

- Polimer bileşiklerinin üretimi
- Reaktif ekstrüzyon
- Gıda endüstrisinde işleme
- İlaç endüstrisinde kontrollü salım sistemleri üretimi
- Biyobozunur malzeme ve kompozit üretimi

Bu yönleriyle çift vidalı ekstrüder teknolojisi, farklı sektörlerin ihtiyaçlarına yenilikçi çözümler sunmaktadır.

Bu çalışmada, polifenilen sülfür (PPS) polimerine farklı katkı oranlarında grafen (GR), karbon fiber (CF) ve hegzagonal bor nitrür (h-BN) katkılanmıştır. Kompozitlerin üretimi çift vidalı ekstrüder kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan tez çalışması ile ilgili literatürde var olan çalışmalar bir sonraki sayfada tartışılmıştır.

1.9. Literatür Taraması

Zhou ve Arkadaşları (2007), bor nitrür (BN) takviyeli yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) kompozitlerinin ısı iletkenlik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada, farklı hacimce %0 ile %40 arasında BN toz konsantrasyonlarına sahip HDPE/BN kompozitleri hazırlanmış ve bu kompozitlerin termal özellikleri detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu analizler sonucunda sırasıyla hacimce %15-25-35 toz konsantrasyonundaki kompozitlerin ısı iletkenlikleri 0,45-0,76-1,02 W/m.K olarak ölçülmüştür. Elde edilen veriler, BN içeriği arttıkça kompozitlerin ısı iletkenliğinin belirgin bir şekilde arttığını göstermektedir. Özellikle, %35 BN içeren kompozit, 0,45 W/m.K'den 1,02 W/m.K'ye kadar önemli bir artış sağlamıştır. Bu sonuçlar, bor nitrürün, polietilen gibi düşük termal iletkenliğe sahip polimerlerin ısı performansını arttırmada oldukça etkili bir takviye olduğunu ortaya koymaktadır (Zhou & Liu, 2007). Hyunwoo Oh ve arkadaşları (2019), polimetil metakrilat (PMMA) kompozitlerinin silanize edilmiş bor nitrür (BN) ile takviye edilerek yüksek ısı iletkenlik sağlanması için in-situ polimerizasyon yöntemiyle üretilmesini incelemektedir. BN, yüksek ısı iletkenliği gösteren bir malzeme olup, silanizasyon işlemi BN'nin yüzeyini modifiye ederek PMMA matrisiyle daha iyi uyum sağlamasını ve daha yüksek termal iletkenlik elde edilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada ağırlıkça %18, 38, 60 ve %70 oranları çalışılmış olup %70 BN içerikli kompozit, PMMA'nın termal iletkenliğinden 17,8 kat daha yüksek olan 3,73 W/m.K değerine ulaşmıştır (Oh & Kim, 2019).

TabkhPaz ve arkadaşları (2016), karbon nanotüp (CNT) ve hekzagonal bor nitrür (hBN) içeren polimer kompozitlerinin ısı iletkenliğini incelemişlerdir. Çalışma, bu nanomalzemelerin polimer matrislerine dahil edilmesinin, polimerlerin ısı iletim performansını nasıl önemli ölçüde arttırabileceğini araştırmaktadır. Nanokompozitlerin üretim sürecinde, PS/CNT'lerden oluşan bir masterbatch kullanılmış ve çift vidalı ekstrüder yardımıyla çeşitli CNT yüklemeleriyle nanokompozitler hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan masterbatch, %20 ağırlıkça PS/CNT'lerden oluşmaktadır. Bu masterbatch, çeşitli CNT yüklemeleriyle (%0,5, 1, 2, 3,5, 5 ve 10 ağırlıkça) nanokompozitlere seyretilmiştir. hBN/PS nanokompozitleri üretimi için ise çözelti karıştırma yöntemi ve sıkıştırma kalıplama kullanılmıştır. Kompozitlerdeki nanopartikül konsantrasyonun hacimce %13,1 CNT ve hacimce %6,3 hBN için termal iletkenliği sırasıyla %170 ve %300'e kadar arttırdığı görülmüştür (TabkhPaz & Park, 2016).

Liu ve arkadaşları (2022), h-BN/polimid kompozit filmleri üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada hem düzlem içi hem de düzlem dışı termal iletkenlik performanslarını aynı anda iyileştirmeyi başarmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre, %30 dolgu içeriğine sahip h-BN/polimid kompozit filmleri, saf polimid ile karşılaştırıldığında, düzlem içi termal iletkenlik'te %1233 ve düzlem dışı termal iletkenlik'te ise %150 oranında bir artış göstermiştir. Bu bulgular, h-BN'nin düşük ısı iletkenliğe sahip polimid polimerlerine etkili bir şekilde takviye olabileceğini ve düzlem içi ve düzlem dışı yönlerde ısı iletkenlik iyileştirmelerinde önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır (Liu & Wang, 2022).

Hu ve arkadaşları (2021), yönlendirilmiş h-BN/Silikon kauçuk kompozitlerini ideal tematik arayüz malzemesi olarak karakterize etmişlerdir. Çalışmalarında, ürettikleri kompozitlerin esnekliğini korurken, 7,62 W/m.K'lik termal iletkenlik değerini artırmayı başardıklarını rapor etmişlerdir. Bu bulgu, h-BN'nin silikon kauçukla birleşerek, kompozitlerin termal iletkenliğini önemli ölçüde iyileştirdiğini ve aynı zamanda kompozitlerin mekanik özelliklerini koruduğunu göstermektedir (Hu & Zhang, 2021).

Su ve arkadaşları (2018), sikloalifatik epoksi reçinesi kullanarak, çok katmanlı grafen ve h-BN dolgu maddeleriyle yüksek termal iletkenlik ve iyi elektriksel izolasyon özelliklerine sahip kompozitler üretmişlerdir. Çalışmalarında, hibrit dolgu malzemesi eklenmesinin, kompozitlerin yüksek düzlem içi termal iletkenliğe ulaşmasını sağladığını belirtmişlerdir. Bu bulgu, grafen ve h-BN gibi nanomalzemelerin kombinasyonunun hem termal iletkenlik hem de elektriksel izolasyon özelliklerini geliştirmede etkili bir strateji olduğunu ortaya koymaktadır (Su & Zhang, 2018).

Paszkiewicz ve arkadaşları (2018) tarafından yürütülen çalışmada, düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) matrisli nanokompozitlerin elektriksel ve termal iletkenlik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) ile MWCNT/grafen (GNP) hibrit takviyeler kullanılmıştır. Çift vidalı ekstrüzyon yöntemiyle hazırlanan nanokompozitlerde, MWCNT'ler %1,5 ila %20 arasında değişen ağırlık oranlarında, hibrit sistemler ise %3, %5 ve %20 toplam dolgu içeriğiyle, MWCNT:GNP oranları 1:1 ve 3:1 olacak şekilde değerlendirilmiştir. LDPE bazlı nanokompozitlerin elektriksel ve termal iletkenliklerinin, matris içerisindeki karbon nano dolgu maddesi içeriğinin artışıyla birlikte yükseldiği gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, iletkenlikteki iyileşmenin, nano parçacıkların homojen dağılımı ve iyi ayrışmasıyla daha da arttırılabileceğini ortaya koymaktadır. Bu durum, özellikle küçük boyut ve yüksek en-boy oranına sahip dolgu maddeleri kullanıldığında, polimer nanokompozitlerde parçacık aglomerasyonu gibi kritik işleme problemlerinin önemiyle ilişkilidir (Paszkiewicz vd., 2018).

Deng ve arkadaşları (2014), grafen nanoparçacıklar (GNP) ile güçlendirilmiş polifenilen sülfür (PPS) kompozitlerini eriyik karıştırma yöntemiyle hazırlamışlardır. Bu çalışmada, GNP'nin kompozitlerin izotermal kristalleşme kinetiği, morfolojisi ve termal iletkenlik özellikleri üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. GNP'lerin, PPS matrisi içerisinde katmanlı ve homojen bir şekilde dağılması, kristalleşme davranışını olumlu yönde etkilemiş ve kristalleşme hızında belirgin bir artışa yol açmıştır. GNP'ler ayrıca, kompozitlerin sferolitik yapısını (yuvarlak, katmanlı kristal büyüme) iyileştirerek düzenli bir yapının oluşmasına yardımcı olmuştur. Termal iletkenlik açısından yapılan ölçümler, GNP'lerin katmanlı yapısının ısı iletim yolları oluşturduğunu ve böylece kompozitlerin termal iletkenliğini önemli ölçüde arttırdığını göstermektedir. Artan GNP içeriği ile termal iletkenlik değerlerinde anlamlı bir artış gözlemlenmiş ve bu artış, özellikle yüksek sıcaklıklarda daha belirgin olmuştur. Özellikle, %30 kütle oranında GNP içeren PPS kompoziti, 30 °C'de 1,156 W/m.K ve 110 °C'de 1,350 W/m.K termal iletkenlik değerlerine ulaşmış; bu da saf PPS'ye kıyasla üç kattan fazla bir artışa işaret etmektedir (Deng vd., 2014).

Deng ve arkadaşları (2015) tarafından yapılan çalışmada, polifenilen sülfür (PPS) matrisine karbon nanotüpler (CNT) ve karbon lifi (CF) eklenerek kompozitlerin termal iletkenliği incelenmiştir. Eriyik karıştırma yöntemiyle hazırlanan PPS/CNT kompozitlerinde, CNT içeriği %8'e çıkarıldığında, 30 °C'de 0,33 W/m.K olan termal iletkenlik, %50 oranında artış göstererek 0,50 W/m.K'ye ulaşmıştır. Ayrıca, CF ve CNT'nin hibrit etkisiyle, kompozitlerin termal iletkenliği daha da iyileştirilmiştir (Deng vd.,2015).

Tantug ve arkadaşları (2020), polifenilen sülfür (PPS) matrisine sentetik grafit (SG) ekleyerek termal iletkenliğini artırmaya yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Farklı ağırlık oranlarında (%10, %30 ve %50) SG içeren PPS kompozitleri, çift vidalı ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, %50 SG içeriğine sahip PPS kompozitinin düzlem içi (in-plane) termal iletkenliği 6,54 W/m.K, düzlem dışı (through-plane) termal iletkenliği ise 1,5 W/m.K olarak ölçülmüştür. Bu değerler, saf PPS'nin termal iletkenliğinden sırasıyla 32 kat ve 8 kat daha yüksektir. Ayrıca, mekanik özellikler üç noktalı eğilme ve Charpy testleriyle değerlendirilmiş ve SG eklemenin mekanik özellikler üzerinde önemli bir olumsuz etkisi olmadığı bulunmuştur (Tantug vd.,2020).

Jiang ve arkadaşları (2017), elektronik paketleme uygulamalarına yönelik yüksek termal iletkenlik ve iyi elektriksel yalıtım özellikleri sunan hegzagonal bor nitrür (h-BN) takviyeli kompozitler üzerine yenilikçi bir çalışma gerçekleştirmiştir. Geleneksel eriyik karıştırma yöntemlerinin termal performans açısından sınırlı kaldığı durumlara alternatif olarak, polifenilen sülfür (PPS) ile kaplanmış çekirdek-kabuk yapıları BN parçacıkları (BN/PPS) kullanılarak üç boyutlu ayrıştırılmış (segregated) yapıya sahip kompozitler geliştirilmiştir. Hazırlanan kompozit, %40 hacim oranında BN içeriğiyle 4.15 W/m.K gibi yüksek bir termal iletkenlik göstermiştir. Bu değer, saf PPS reçinesinin (0.22 W/m.K) yaklaşık 16 katı ve aynı BN oranına sahip geleneksel PPS/BN karışım kompozitinin (2.45 W/m.K) yaklaşık 1,69 katı daha yüksektir (Jiang & Sui, 2017).

Wang ve arkadaşları (2012), yüksek ısı ve elektriksel iletkenliğe sahip genişletilmiş grafit/polifenilen sülfür (EG/PPS) kompozitlerinin hazırlanmasına yönelik etkili bir yöntem geliştirmiştir. Çalışmalarında, EG'nin PPS matrisine yüksek oranlarda eklenebilmesi için önce katı hâlde yüksek hızlı döner karıştırma (25.000 rpm, 3 dk) uygulanmış, ardından ergitme işlemi (300 °C, 10 dk) gerçekleştirilmiştir. Bu ön karıştırma aşaması sayesinde EG'nin gevşek ve gözenekli yapısı bozulmuş, kısmen eksfoliye olmuş ve PPS tozları yüzeyine etkin şekilde tutunarak sonraki ergitme aşamasında yüksek dolgu oranlarında bile homojen dağılım sağlanabilmiştir. Elde edilen kompozitler 300 °C'de ve iki aşamalı sıkıştırma kalıplama yöntemiyle şekillendirilmiş, ardından iletkenlik testleri için numuneler hazırlanmıştır. Sonuçlar, EG içeriğinin artmasıyla birlikte kompozitlerin ısı iletkenliğinde önemli bir artış olduğunu göstermiştir. Saf PPS'in ısı iletkenliği 0,22 W/m.K iken, ağırlıkça %5, 10, 15, 20 ve 30 EG katkısıyla bu değer sırasıyla %126, %330, %748, %1217 ve %2721 oranında artmıştır. %60 EG katkısında ise 15,8 W/m.K'ye ulaşılmış ve bu, %6770'lik bir artış anlamına gelmiştir (Wang & Li, 2012).

Wu ve arkadaşları (2015), polifenilen sülfür (PPS) matrisine çok katmanlı karbon nanotüpler (MWCNT) ve genişletilmiş grafit (EG) gibi karbon bazlı dolgu maddelerini farklı oranlarda ekleyerek kompozitlerin ısı iletkenliğini arttırmayı hedeflemişlerdir. Çalışmada, MWCNT'ler PPS tozu ile yüksek hızlı döner mikserde (25.000 rpm, 3 dakika) karıştırılmış, ardından bu ön-karışımlar 300 °C'de eritilerek homojenleştirilmiştir. Daha sonra, bu karışımlara sırasıyla %0, 10 ve 20 oranlarında bor nitrür (BN) ilave edilmiştir. Aynı prosedür, EG içeren numuneler için de uygulanmış ve EG içeriği %0 ile 20 arasında değiştirilmiştir. Tüm karışımlar sıcak presleme yöntemiyle kompozit örnekler haline getirilmiştir. Yapılan iletkenlik analizlerinde, yalnızca karbon dolgusu içeren kompozitlerde ısı iletkenliğinin sınırlı oranda arttığı, ancak BN katkısıyla bu artışın daha belirgin hale geldiği görülmüştür. PPS/CNT sistemine %20 BN eklendiğinde ısı iletkenlik 0.97 W/m.K'ye, PPS/EG sistemine %20 BN eklendiğinde ise 2.82 W/m.K'ye ulaşmıştır (Wu & Zhang, 2015).

Gu ve arkadaşları (2017), yüksek ısı iletkenliğe sahip ve elektriksel olarak yalıtkan (mBN/nBN)/PPS kompozitlerini, mikrometre boyutundaki bor nitrür (mBN) ve nanometre boyutundaki bor nitrür (nBN) hibrit dolgularını kullanarak geliştirmişlerdir. (ağırlıkça %1 ile %60 arasında katkı içeriği) Bu kompozitler, mekanik bilyalı öğütme ve sonrasında sıcak presleme yöntemiyle üretilmiştir. Hibrit dolgu oranı arttıkça kompozitlerin ısı iletkenlik katsayısı (k) önemli ölçüde iyileşmiştir. Hibrit mBN/nBN dolgular, PPS matrisinde heterojen çekirdeklenme rolü oynayarak kristallenme ve ısı iletken yolların oluşumunu teşvik etmiştir ve bu da saf PPS matrisinin 0.22 W/m.K olan ısı iletkenlik değerini, ağırlıkça %60 oranında (2:1 oranında mBN:nBN) hibrit dolgu içeren kompozitte 2.638 W/m.K'ye ulaştırmıştır (Gu & Zhang, 2017). Kim ve arkadaşları (2011), polifenilen sülfür (PPS) matrisine bor nitrür (BN) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) ekleyerek yüksek termal iletkenliğe sahip kompozitler geliştirmeyi amaçlamışlardır. Elde ettikleri en yüksek termal iletkenlik değeri, ağırlıkça %50 BN ve %1 MWNT içeren kompozitte 1,74 W/m.K olarak ölçülmüştür. Bu değer, saf PPS'nin 0,22 W/m.K olan termal iletkenliğinin yaklaşık 8 katıdır. (Kim vd., 2011).

Kim ve arkadaşları (2016), düşük oranlarda çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ve bor nitrür (BN) içeren PPS (polifenilen sülfür) matrisli hibrit kompozitler geliştirmiştir. Kompozit üretiminde, eriyik karıştırma yöntemi ile hazırlanmış MWCNT/PPS peletlerinin yüzeyine epoksi bağlayıcı aracılığıyla BN kaplaması yapılmış ve bu sayede çekirdek-kabuk yapı ılı peletler elde edilmiştir. Çekirdek-kabuk yapı ılı kompozitlerin üretiminde, BN ve MWCNT içeren peletler öğütölerek elenmiş, epoksi ile kaplanmış ve daha sonra ilgili dolgu parçacıklarıyla yüzey modifikasyonu yapılmıştır.

Bu süreç sonunda BN kaplı MWCNT/PPS ve MWCNT kaplı BN/PPS peletleri hazırlanmıştır. Sıcak presleme ile şekillendirilen numuneler, istenilen boyut ve kalınlıkta işlenerek testlere hazırlanmıştır. Termal iletkenlik sonuçlarına göre, BN içeriği %30'a ulaştığında ısı iletkenliği yaklaşık 0.6 W/m.K seviyesine ulaşmıştır. Buna karşın yalnızca %3 MWCNT içeren kompozitlerde iletkenlik 0.3 W/m.K civarında kalmıştır. Hibrit dolgu kullanılan kompozitlerde ise, %10 BN ve %2 MWCNT içeren BN-10/MWCNT-2/PPS yapısı yaklaşık 0.4 W/m.K seviyesine ulaşırken, %20 BN ve %1 MWCNT içeren BN-20/MWCNT-1/PPS yapısı 0.5 W/m.K değerine ulaşmıştır (Kim & Kim, 2016).

Kim ve arkadaşları (2016), bor nitrür (BN) takviyeli polifenilen sülfür (PPS) kompozitlerinin üretimi için üç farklı yöntem uygulayarak, bu yöntemlerin termal iletkenlik performanslarına etkisini incelemişlerdir. Uygulanan yöntemler sırasıyla eriyik karıştırma (m-BN/PPS), toz karıştırma (p-BN/PPS) ve çekirdek-kabuk yapıları BN kaplamalı PPS (c-BN/PPS) olarak sınıflandırılmıştır. Hazırlanan bu üç farklı kompozit yapısının termal iletkenlik özellikleri, düzlem içi (in-plane) ve düzlem dışı (through-plane) yönlerde karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, saf PPS, en düşük termal iletkenlik değerlerini göstermiş; düzlem dışı yönde yaklaşık 0.24 W/m.K, düzlem içi yönde ise yaklaşık 0.27 W/m.K değerlerine ulaşmıştır. m-BN/PPS yapısı, düzlem dışı yönde 0.38 W/m.K, düzlem içi yönde ise 0.85 W/m.K termal iletkenlik sunmuştur. p-BN/PPS kompoziti, düzlem dışı yönde 0.90 W/m.K, düzlem içi yönde ise 1.00 W/m.K seviyelerine ulaşmıştır. c-BN/PPS kompoziti ise en yüksek termal performansı göstermiş; düzlem dışı yönde 1.10 W/m.K, düzlem içi yönde ise 1.30 W/m.K termal iletkenlik değerlerine erişmiştir (Kim & Kim, 2016).

Khan ve arkadaşları (2013), polifenilen sülfür (PPS) matrisli kompozitlerin termal iletkenlik özelliklerini incelemek amacıyla, farklı oranlarda karbon fiber (CF), çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ve grafen nanoparçacıklar (GNP) içeren numuneler hazırlamışlardır. Yapılan ölçümler, en yüksek efektif termal iletkenlik değerinin, PPS'ye %30 ağırlık (%22,44 hacim) oranında GNP eklendiğinde elde edildiğini göstermiştir. Bu oran, saf PPS'nin termal iletkenlik değerini (0,22 W/m.K) yaklaşık dokuz kat artırarak 1,91 W/m.K seviyesine çıkarmıştır. Ayrıca, %20 ağırlık (%13,85 hacim) MWCNT ve %30 ağırlık (%20,82 hacim) CF içeren PPS bazlı kompozitlerin efektif termal iletkenlikleri sırasıyla 0,87 W/m.K ve 0,96 W/m.K olarak ölçülmüştür (Khan & Adinkrah, 2013).

Leung ve arkadaşları (2012), matris malzemesi olarak %66,7 sabit hacim oranında polifenilen sülfür (PPS) kullanmış; dolgu maddesi olarak ise amino silan ile yüzey modifiye edilmiş iki farklı boyutta hekzagonal bor nitrür (hBN) (PTX60 – 60 µm küresel aglomeralar ve PT110 – 45 µm trombosit yapılar), zift bazlı karbon fiber (CF) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) kullanmışlardır. PTX60/PT110 oranları 4:1, 3:1 ve 2:1 olacak şekilde hibritlenmiştir. Bu hibrit yapıların termal iletkenlikleri (k_{eff}), saf PPS'nin 0,22 W/m.K değerine kıyasla sırasıyla 1,97 W/m.K (4:1) ve 2,04 W/m.K (3:1) seviyelerine ulaşmıştır. Karşılaştırma amacıyla sadece PTX60 içeren BN1'in k_{eff} 'i 1,77 W/m.K, yalnızca PT110 içeren BN5'in k_{eff} 'i ise 1,55 W/m.K olarak ölçülmüştür. BN/CF serisinde, hBN PTX60 ve CF dolgu maddeleri 4:1, 3:1 ve 2:1 oranlarında hibritlenmiştir. CF'nin ikincil dolgu maddesi olarak kullanılması, hBN trombositlerin köprülenmesine rağmen termal iletkenlikte sınırlı bir artış sağlamıştır. BN/CNT serisinde ise hBN PTX60 ve MWCNT dolgu maddeleri kullanılmış; 4:1 ve 3:1 oranlarında hibritlendiğinde, elde edilen kompozitlerin k_{eff} değerleri sırasıyla 2,10 W/m.K ve 2,16 W/m.K'ye ulaşmıştır (Leung vd., 2012).

Jiang ve arkadaşlarının (2011) çalışması, PPS (polifenilen sülfür) matrisi içerisinde çok katmanlı karbon nanotüplerin (MWCNT) kullanımıyla elde edilen kompozitlerin hem üretim sürecini hem de mekanik özelliklerini incelemektedir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, MWCNT takviyesinin PPS'nin performansını anlamlı ölçüde iyileştirdiği ortaya konmuştur. Özellikle, %8 oranında MWCNT içeren kompozitlerde Young modülünde %36 ve çekme dayanımında %12'lik artış elde edilmiştir. Eğilme özellikleri açısından ise eğilme modülü %20, eğilme dayanımı ise %14 oranında artış göstermiştir (Jiang & Bai, 2011).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Kompozit Üretim Süreci

2.1.1. Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada matris malzemesi olarak yüksek sıcaklık dayanımı ve kimyasal kararlılığı ile bilinen polifenilen sülfür (PPS), takviye fazı olarak ise üç farklı katkı maddesi kullanılmıştır;

- Hegzagonal bor nitrür (h-BN), Ege Nanotek firmasından temin edilmiş olup, ortalama partikül boyutu 50 nm, 99.9% saflıkta, termal iletkenliği artırmak amacıyla tercih edilmiştir.
- Grafen, Ege Nanotek firmasından temin edilmiş olup, ortalama partikül boyutu 5-8 nm, 99.5% saflıkta ve yüksek yüzey alanı ile hem termal hem elektriksel iletkenliğe katkı sağlamak amacıyla kullanılmıştır.
- Karbon elyaf, fakültemiz bünyesinde öğütülmüş olup, ortalama partikül boyutu 80 mikrondur. Termal iletkenliğe katkı sağlamak, mekanik mukavemeti arttırmak amacıyla kullanılmıştır.

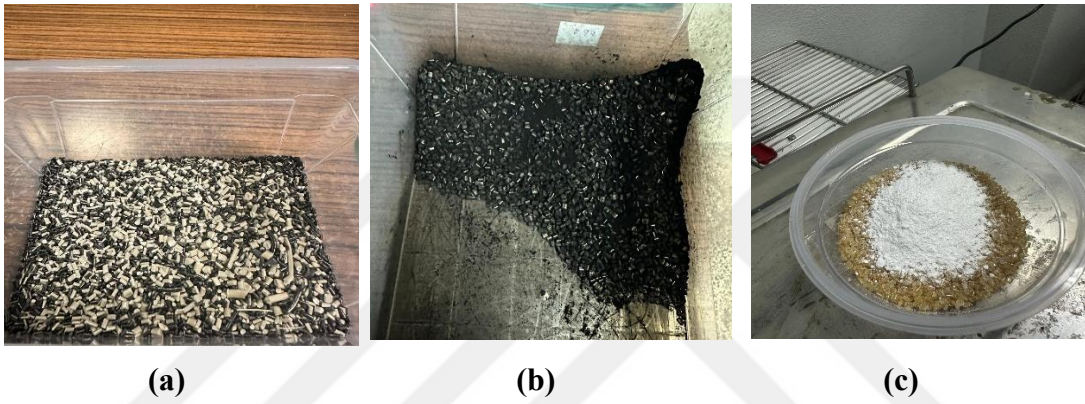
2.1.2. Ön Hazırlık

Kompozit üretimine başlanmadan önce PPS ve katkı maddeleri etüv fırınında kurutularak nemden arındırılmaya çalışılmıştır. Bu adım, yüksek sıcaklıkta işleme sırasında hidroliz ve gözenek oluşumunu önlemek için kritik öneme sahiptir. PPS matrisli kompozit malzemelerde 3 farklı katkı malzemesi kullanılmıştır, bunlar sırasıyla h-BN, grafen ve karbon fiberdir. Tablo 7’de üretilen kompozit malzemelerin türleri ve ağırlıkça oranları verilmiştir.

Tablo 7. Kompozit türleri ve % ağırlıkça oranları

Kompozit	PPS (%)	h-BN (%)	Grafen(%)	Karbon Fiber(%)
PPS+h-BN	95-90-85-80	5-10-15-20	-	-
PPS+Grafen	99-97-95-90	-	1-3-5-10	-
PPS+Karbon fiber	99-97-95-90	-	-	1-3-5-10

Şekil 22 ‘de kurutulan malzemeler, belirtilen oranlarda tartıldıktan sonra ilk olarak elle karıştırılarak birbirleri içerisinde homojenleştirilmiştir.



Şekil 22. Matris ve katkı malzemelerinin elle karıştırılması a) PPS+CF karışımı b) PPS+GR karışımı c) PPS+h-BN karışımı

2.1.3. Ekstrüzyon İşlemi

Karıştırılan malzemeler, çift burğu ekstruder kullanılarak üretilmiş ve üretime dair görsel Şekil 23’te verilmiştir. Şekil 23’te görüldüğü gibi kompozit üretiminde ana besleme kullanılmıştır. Karıştırılan malzemeler kontrollü bir şekilde ana besleme hunisinden üretim hattına verilmiştir. Beş ısıtma bölegsine sahip olan ekstruder da işlem sıcaklıkları 280°C-295°C arasında ayarlanmış, vida dönüş hızı 50 ila 110 rpm arasında değiştirilmiştir. Katkı türüne ve cihazın torkuna bağlı olarak işlem sıcaklıkları ve vida dönüş hızı, üretimin akışına göre değişkenlik göstermiştir. Ergiyik halde nozülünden çıkan kompozit filamentler soğuk su banyosundan geçirilerek soğutulmuş ve kırılarak pelet forma getirilmiştir.



Şekil 23. Katkılı kompozit malzemelerin üretimi

2.2. Analiz Yöntemleri

2.2.1. Termal Analiz Yöntemleri

- **Termogravimetrik Analiz (TGA)**

PPS ve kompozit malzemelerin termal kararlılıklarının nicel olarak değerlendirilmesi amacıyla termogravimetrik analiz (TGA) yapılmıştır. Bu yöntem, numunelerin artan sıcaklık karşısında gösterdiği kütle kaybı eğilimlerini ortaya koyarak, bozunma davranışları hakkında detaylı bilgi sağlamaktadır. Termogravimetrik analizden elde edilen veriler; gaz akış hızı, ısıtma oranı, numune miktarı ve partikül boyutu gibi çeşitli deneysel parametrelere bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle, doğru analiz ve karşılaştırma yapabilmek için tüm deneysel koşullar sabitlenmiş ve numuneler bu sabit parametreler altında analiz edilmiştir.

Termogravimetrik analizler Perkin Elmer TGA 4000 tipi bir cihazda gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, 30°C başlangıç sıcaklığından başlayarak 750°C'ye kadar olan sıcaklık aralığında yapılmıştır. Isıtma işlemi sırasında ortam atmosferi olarak inert bir gaz olan azot tercih edilmiş ve gaz akış hızı 10 °C/dk olarak ayarlanmıştır.

- **Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Analizi**

Hegzagonal bor nitrür, grafen ve karbon fiber katkılarının cam geçiş sıcaklığı (T_g) üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla, saf PPS ve katkılı kompozit malzemelerden sabit miktarda alınan numuneler üzerinde diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi yapılmıştır.

DSC analizleri Hitachi 7020 model, Japan cihazında gerçekleştirilmiştir. Numuneler 50 °C'den başlanarak 280 °C'ye kadar 15 °C/dk ısıtma hızıyla ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 2 dakika boyunca izotermal olarak bekletilmiştir. Ardından aynı hızla 280 °C'den 50 °C'ye kadar kontrollü bir şekilde soğutma işlemi uygulanmıştır. Analiz, inert atmosfer sağlanması amacıyla 30 ml/dk hızda azot (N₂) gazı verilerek gerçekleştirilmiştir.

2.2.2. Mikro Yapı Analizi

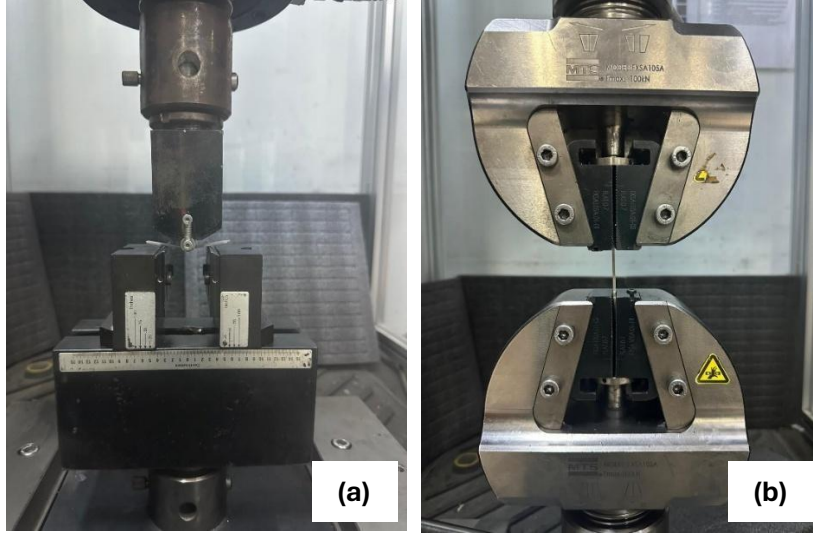
- **Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu (FE-SEM)**

Nanokompozit malzemelerde inorganik partiküllerin dağılımını belirlemek amacıyla çeşitli analiz teknikleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, alan emisyonlu taramalı elektron mikroskopisi (FE-SEM) yöntemi tercih edilmiştir. Analizde, örnek üzerine odaklanan elektron demeti enerji kaybı yaşamadan (yansıma ve kırılma olmadan) numune yüzeyinden geçerek yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edilir. Farklı bölgelerden alınan görüntüler sayesinde, inorganik dolgu maddesinin kompozit içerisindeki dağılımının homojenliği değerlendirilebilmektedir.

Morfolojik incelemeler Thermo Scientific Apreo 2S model FE-SEM cihazı ile yapılmıştır. Analiz öncesinde her numune vakum altında kurutulmuş ve numune yüzeyinin elektriksel iletkenliğini arttırmak amacıyla altın (Au) kaplama işlemi uygulanmıştır. Katkı malzemelerin matris fazı içinde görüntülenmesinde 500x ve 1.000x büyütme gerçekleştirilmiştir.

2.2.3. Mekanik Test Yöntemleri

Test numunelerinin çekme testleri ASTM D638 ve eğme testleri ISO178 standardına göre MTS model 45 elektromekanik test cihazında (10 kN yük hücresi kullanılarak) çapraz kafa hızı çekme testi için 10 mm/dk, eğme testi için 2 mm/dk olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Her bir test grubu için aynı numune grubundan elde edilen 4 verinin ortalaması alınmıştır. Şekil 24'de çekme ve eğme testlerine ait görsel verilmiştir.



Şekil 24. PPS ve kompozitlerine ait (a) eğme testi, (b) çekme testi

2.2.4. Termal İletkenlik Analizi



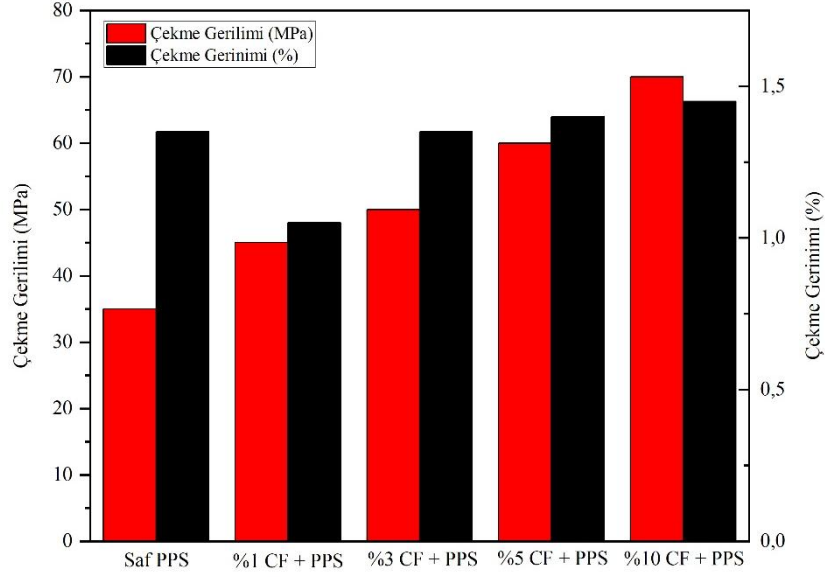
Şekil 25. Termal İletkenlik Ölçümü

Numunelerin termal iletkenliklerini incelemek amacıyla kızılötesi (IR) termografi yöntemi kullanılmıştır. Ölçümler FLIR C2 marka termal kamera ile gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sırasında çevresel koşullar sabit tutulmuş, oda sıcaklığı 25 ± 2 °C seviyesinde korunmuştur. Her bir numune, belirli bir süre boyunca ısı kaynağına maruz bırakılmış ve ısınma süresi boyunca yüzey sıcaklık dağılımları kaydedilmiştir. Elde edilen termal görüntüler, cihazın kendi yazılımı (FLIR Tools) aracılığıyla analiz edilerek yüzey sıcaklık değişimleri zamana bağlı olarak değerlendirilmiştir. Bu yöntemle, farklı numunelerin ısı iletkenlik performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

3.BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Kompozit Test Numunelerine Uygulanan Mekanik Testler

3.1.1. Çekme Testi



Şekil 26. CF katkılı PPS kompozitlerine ait çekme testi sonucu gerilim-gerinim grafiği

Şekil 26’da verilen çekme eğrilerinden görüldüğü üzere, saf PPS yaklaşık 35 MPa maksimum çekme dayanımı göstermiştir. Karbon fiber (CF) katkısı ile birlikte malzemenin çekme dayanımında bir artış gözlenmiştir. %5 ve %10 CF katkılı kompozitler sırasıyla yaklaşık 60 MPa ve 70 MPa çekme dayanımı değerlerine ulaşarak, saf PPS’e göre oldukça yüksek bir mekanik performans sergilemiştir. Bu sonuç, karbon fiberlerin yüksek elastisite modülü sayesinde PPS matrisinde yük transferini etkin bir şekilde gerçekleştirdiğini göstermektedir (Fu vd., 2008).

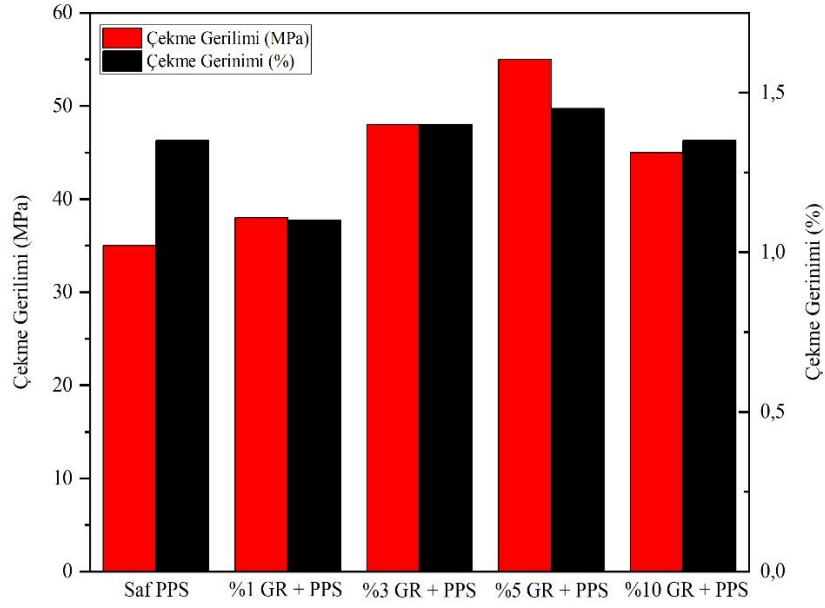
%1 ve %3 CF katkılı kompozitlerde ise çekme dayanımında sınırlı bir artış gözlenmiştir. Bu durum, düşük oranlarda fiberlerin matris içerisinde homojen dağılım gösterememesine ve bu nedenle yük transferinde etkin rol oynayamamasına bağlanabilir. Katkı oranının arttırılmasıyla birlikte, fiber-matris ara yüzey etkileşiminin güçlendiği ve fiberlerin yük taşıma kapasitelerinin de arttığı görülmektedir.

Çekme gerinimi değerleri ise, saf PPS'in daha sünek bir davranış sergilediğini, karbon fiber katkısının ise malzemenin gevrekleşme eğilimini arttırdığını göstermiştir. Özellikle %10 CF katkılı numune, yüksek çekme dayanım değeri göstermesine rağmen kopma gerinim değeri saf PPS'e göre daha düşük kalmıştır. Bu sonuç, literatürde de, fiber katkısının polimer matrisin rijitliğini arttırırken sünekliğini azalttığını da doğrulamaktadır (Mortazavian & Fatemi, 2015; Fu vd., 2008; Zhou vd., 2020; Li vd., 2018).

Tablo 8. CF katkılı PPS kompozitlerine ait çekme testi sonuçları

Malzeme	Çekme Gerilimi (MPa)	Elastikiyet Modülü (GPa)	Akmadaki Çekme Gerinimi (%)	Kopmadaki Çekme Gerinimi (%)
Saf PPS	35 MPa	3,4	0,45	1,35
%1 CF+PPS	45 MPa	4,4	0,42	1,05
%3 CF+PPS	50 MPa	4,2	0,45	1,35
%5 CF+PPS	60 MPa	4,6	0,46	1,40
%10 CF+PPS	70 MPa	4,8	0,48	1,45
Ortalama	52	4.28	0.452	1.32
Standart Sapma	12.4	0.47	0.022	0.13

Çekme testi sonucundan elde edilen elastikiyet modülü, çekme gerilimi, akmadaki ve kopmadaki çekme gerinimi değerleri Tablo 8'de verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere en yüksek kopma anındaki çekme gerinim değerleri %5 ve %10 CF katkılı malzemelere ait olup değerleri sırasıyla %1,40 ve %1,45'dir. Karbon elyaf katkısı PPS'nin mekanik performansını belirgin şekilde artırmıştır. Çekme dayanımı yaklaşık iki kat artarken, elastikiyet modülü de önemli ölçüde yükselmiştir. Bu durum, liflerin matris içinde etkin yük aktarımı sağladığını ve kompozitin hem rijit hem dayanıklı hale geldiğini göstermektedir.



Şekil 27. GR katkılı PPS kompozitlerine ait çekme testi sonucu gerilim-gerinim grafiği

Şekil 27’de verilen çekme grafiğine göre, saf PPS’nin çekme dayanımının yaklaşık 35 MPa olduğu görülmekte olup grafen katkısı ile matrisin mekanik özelliklerinde artış gözlemlenmiştir. %1 ve %3 GR katkılı PPS yaklaşık olarak sırasıyla 38 MPa ve 48 MPa çekme dayanımı göstermiştir.

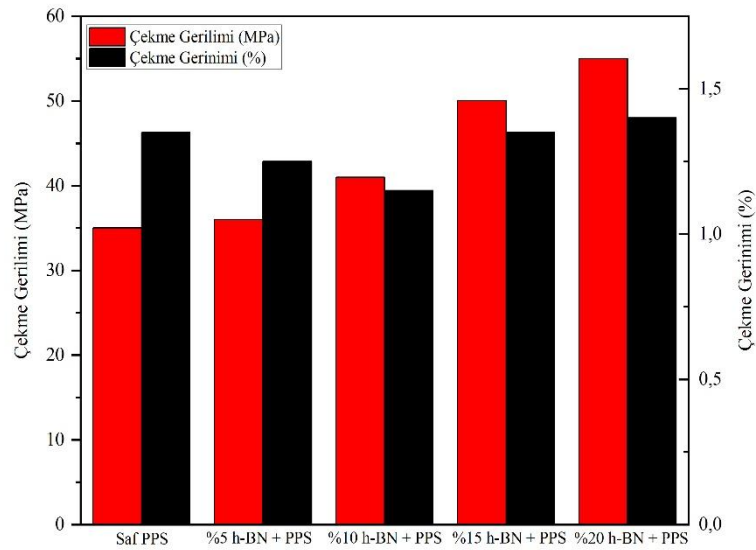
%5 GR katkılı PPS ise 55 MPa ile en yüksek çekme dayanımını sergilemiştir. Bu sonuç, grafen katkısının matris içinde nispeten homojen dağıldığını ve yük transferini etkin bir şekilde gerçekleştirdiğini göstermektedir. %10 GR katkılı PPS’te ise çekme dayanımının 45 MPa seviyesine düşmesi dikkat çekmiştir. Bu azalma, yüksek katkı oranlarında aglomerasyon oluşumu ve matris sürekliliğinin bozulması ile ilişkilendirilebilir.

Bu sonuçlar, literatür ile uyumludur. Daha önce yapılan çalışmalarda da özellikle %1 ve %5 arasındaki düşük grafen katkılarında polimer matrislerin çekme dayanımının arttığı ancak kopma uzamasının azaldığı rapor edilmiştir (Singh vd., 2011; Mittal vd., 2015; Kuilla vd., 2010).

Tablo 9. GR katkılı PPS kompozitlerine ait çekme testi sonuçları

Malzeme	Çekme Gerilimi (MPa)	Elastikiyet Modülü (GPa)	Akmadaki Çekme Gerinimi (%)	Kopmadaki Çekme Gerinimi (%)
Saf PPS	35	3,4	0,45	1,35
%1 GR+PPS	38	4,2	0,42	1,10
%3 GR+PPS	48	4,4	0,45	1,40
%5 GR+PPS	55	4,5	0,48	1,45
%10 GR+PPS	45	4,3	0,46	1,35
Ortalama	44.2	4.16	0.452	1.33
Standart Sapma	7.44	0.39	0.022	0.12

Çekme testi sonucundan elde edilen elastikiyet modülü, çekme gerilimi, akmadaki ve kopmadaki çekme gerinimi değerleri Tablo 9’da verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere en yüksek kopma anındaki çekme gerinim değerleri %3 ve %5 GR katkılı malzemelere ait olup değerleri sırasıyla %1,40 ve %1,45’dir. Grafen katkısı PPS matrisinin çekme dayanımını ve rijitliğini önemli ölçüde artırırken, optimum katkı oranı %3–5 olarak belirlenmiştir. Daha yüksek grafen oranlarında topaklanma nedeniyle mekanik özelliklerde düşüş gözlenmiştir. Bu tür nanokompozitler, yüksek mekanik dayanım ve ısı kararlılık gerektiren ileri mühendislik uygulamalarında kullanılabilir.



Şekil 28. h-BN katkılı PPS kompozitlerine ait çekme testi sonucu gerilim-gerinim grafiği

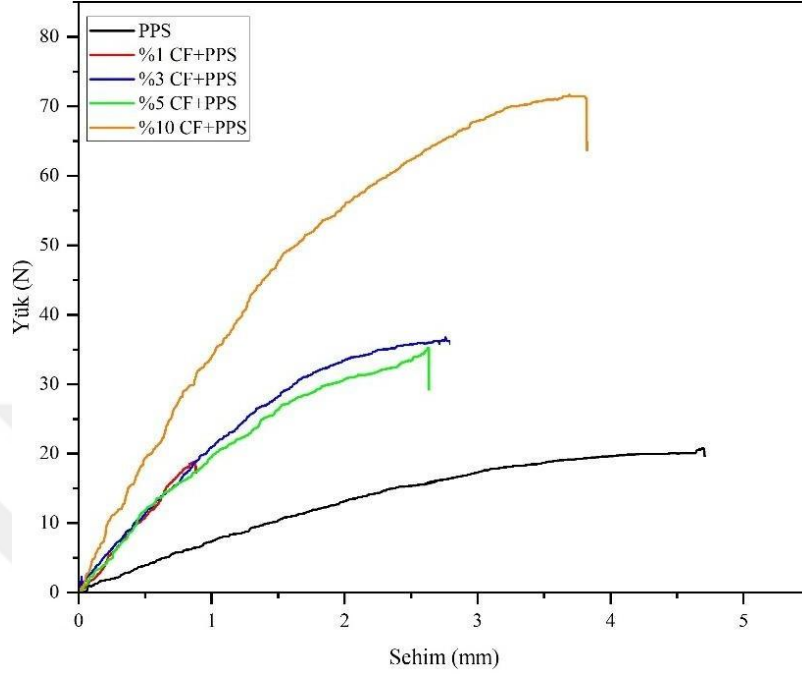
Şekil 28 incelendiğinde, hBN katkısı ile kompozitlerin mekanik özelliklerinde belirgin iyileşmelerin olduğu gözlemlenmiştir. %5 hBN katkılı PPS, 36 MPa, %10 hBN katkılı PPS ise yaklaşık 41 MPa çekme dayanımı göstermiştir. Bu katkı oranındaki artış, matris ile takviye fazı arasındaki yük transferini daha etkin hale getirmiştir. %15 hBN katkılı PPS, yaklaşık 50 MPa çekme dayanımı ile mekanik dayanımda önemli bir artış sergilemiştir. %20 hBN katkılı PPS’de yaklaşık 55 MPa ile en yüksek çekme dayanımını göstermiştir. Bu sonuçlar, hBN katkısının yüksek yüzey alanı sayesinde matris ile daha güçlü bir etkileşim kurmasına bağlanabilir. Literatürde de benzer sonuçlar rapor edilmiştir. Düşük katkı oranlarında hBN’nin eklenmesi mekanik dayanımı arttırmakta, ancak daha yüksek oranlardaki katkının matrisin sünekliğini azalttığı ifade edilmiştir (Lei vd., 2013; Jiang vd., 2016). Bunun nedeni ise, hBN’nin rijit yapısı nedeniyle deformasyon kabiliyetini sınırlaması ve matris içindeki yük transferini zorlaştırmasıdır. Ayrıca yüksek katkı oranlarında hBN katkısının homojen dağılmasının zorlaşması ve aglomerasyon oluşumları, süneklik kaybına sebebiyet vermektedir (Lin vd., 2017; Li & Wang., 2018; Kim & Macosko., 2019; Shtein vd., 2015).

Tablo 10. h-BN katkılı PPS kompozitlerine ait çekme testi sonuçları

Malzeme	Çekme Gerilimi (MPa)	Elastikiyet Modülü (GPa)	Akmadaki Çekme Gerinimi (%)	Kopmadaki Çekme Gerinimi (%)
Saf PPS	35	3,4	0,45	1,35
%5 hBN+PPS	36	4	0,43	1,25
%10 hBN+PPS	41	3,8	0,42	1,15
%15 hBN+PPS	50	4,2	0,46	1,35
%20 hBN+PPS	55	4,4	0,48	1,40
Ortalama	43.4	3.96	0.448	1.30
Standart Sapma	8.4	0.34	0.022	0.084

Çekme testi sonucundan elde edilen elastikiyet modülü, çekme gerilimi, akmadaki ve kopmadaki çekme gerinimi değerleri Tablo 10’da verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere en yüksek kopma anındaki çekme gerinim değerleri %15 ve %20 hBN katkılı malzemelere ait olup değerleri sırasıyla %1,35 ve %1,40’dır. h-BN katkısı, PPS matrisinin çekme dayanımını ve sertliğini önemli ölçüde artırırken, sünekliği bir miktar azaltmıştır. Bu tür kompozitler, yüksek mekanik dayanım ve boyutsal kararlılık gerektiren mühendislik uygulamalarında (örneğin elektrik-elektronik parçalarda veya otomotivde) kullanılmaya uygundur.

3.1.2. Eğme Testi



Şekil 29. CF katkılı PPS kompozitlerine ait eğme testi sonucu yük-sehim grafiği

Saf PPS ve farklı oranlarda CF katkılı PPS kompozitlerinin üç nokta eğme testine ait yük–sehim eğrileri Şekil 29’da verilmiştir. Verilen grafiğe göre, saf PPS yaklaşık 20 N maksimum yük taşıyabilmiş ve düşük eğilme dayanımı göstermiştir. Karbon fiber ilavesi ile birlikte eğilme dayanımında bir artış gözlenmiştir. %1 CF katkılı numunede saf PPS’e kıyasla sınırlı bir artış görülmüş olup maksimum yük 15-20 N seviyelerinde kalmıştır.

%3 ve %5 katkılı numunelerde ise eğilme dayanımı önemli ölçüde artmış ve bu katkılı kompozitler 30-35 N aralığında maksimum yük taşımıştır. Eğilme testinde en yüksek değer %10 CF katkılı kompozit numuneden elde edilmiş olup maksimum 70 N yük taşıyarak saf PPS’in 3,5 katı dayanım göstermiştir.

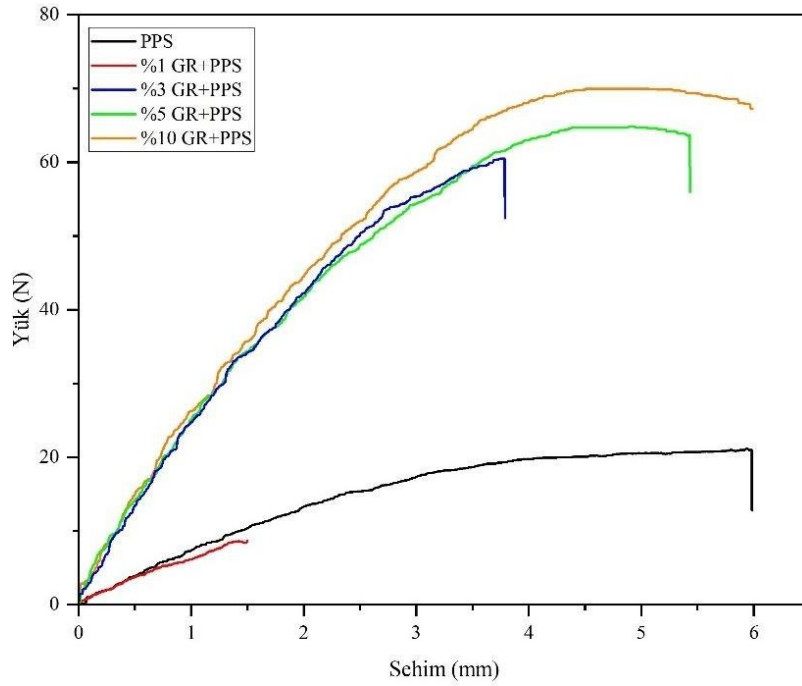
Elde edilen sonuçlar, CF katkısının matriste yük taşıma kapasitesini ve rijitliğini arttırdığını göstermektedir. Bunun yanı sıra, katkı oranı arttıkça numunelerin gevrek kırılma eğilimi gösterdiği, eğri üzerindeki ani yük düşüşlerinden anlaşılmaktadır.

Bu bulgular, literatürde de benzer şekilde, CF katkısının polimer matrislerde eğilme dayanımını ve modülünü arttırdığı yönündeki çalışmalarla uyumludur. (Khan vd., 2016; Alsaadi vd., 2018; Zhang & Wang., 2020).

Tablo 11. CF katkılı PPS kompozitlerine ait eğme testi sonuçları

Malzeme	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Modülü (GPa)	Maksimum Yük (N)
Saf PPS	75,8	2,5	20
%1 CF+PPS	68,2	9,4	18
%3 CF+PPS	132,6	10,4	35
%5 CF+PPS	125	9,4	33
%10 CF+PPS	265,1	15,6	70
Ortalama	133.3	9.46	35.2
Standart Sapma	73.8	4.36	19.0

Eğme testi sonucundan elde edilen eğilme dayanımı, eğilme modülü ve maksimum yük değerleri Tablo 11’de verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere maksimum yükte en yüksek değeri %10 CF katkılı numune vermiştir. Bu, karbon elyafların PPS matrisiyle iyi yapışma sağladığını, yük transferinin etkin olduğunu ve malzemenin hem sert hem dayanıklı hale geldiğini göstermektedir.



Şekil 30. GR katkılı PPS kompozitlerine ait eğme testi sonucu yük-sehim grafiği

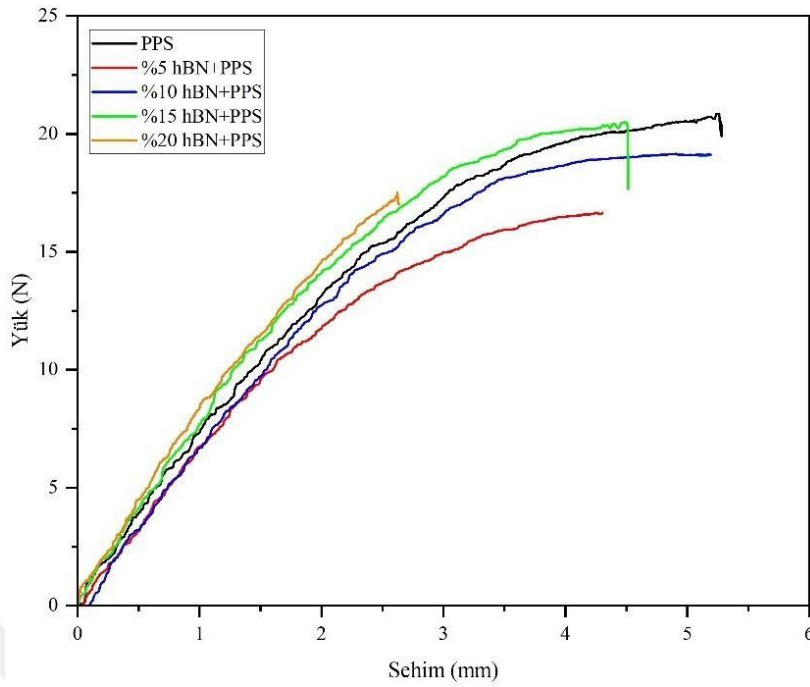
Şekil 30’da saf PPS ve farklı oranlarda GR katkılı PPS kompozitlerinin üç nokta eğme testlerinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Saf PPS numunesi yaklaşık 20 N maksimum yük taşımış olup bu değere karşılık eğilme dayanımı 75 MPa olarak hesaplanmıştır. %1 katkı içeren numune saf PPS’e kıyasla düşük bir yük taşıma kapasitesi göstermiştir. GR oranının artmasıyla birlikte %3 ve %5 GR katkılı numunelerde dayanımda belirgin bir iyileşme olmuş ve taşıdıkları maksimum yükler sırasıyla 60 N ve 65 N olmuştur. Maksimum yükte en yüksek değeri %10 GR katkılı numune göstermiştir. Bu numune yaklaşık 72 N yük taşımış ve buna karşılık eğilme dayanımı yaklaşık 272 MPa olarak hesaplanmıştır.

Bu bulgular, GR katkısının ana matriste eğilme dayanımını ve rijitliğini önemli ölçüde arttırdığını göstermektedir. %3 ve üzeri katkı oranlarında yük taşıma kapasitesinde artış gerçekleşmiş olup, %10’luk katkıda optimum değerlere ulaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan grafen katkısının polimer matrislerde yük taşınımını iyileştirdiği, matris ile katkı ara yüzey etkileşimini arttırdığı ve mekanik özellikleri geliştirdiğine dair bulgularla uyumluluk göstermektedir (Wang vd., 2019; Kumar vd., 2021; Zhao., 2018).

Tablo 12. GR katkılı PPS kompozitlerine ait eğme testi sonuçları

Malzeme	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Modülü (GPa)	Maksimum Yük (N)
Saf PPS	75	2,5	20
%1 GR+PPS	45	2,5	12
%3 GR+PPS	227	6,8	60
%5 GR+PPS	246	7,2	65
%10 GR+PPS	272	7,5	72
Ortalama	173	5.3	45.8
Standart Sapma	92.8	2.05	24.1

Eğme testi sonucundan elde edilen eğilme dayanımı, eğilme modülü ve maksimum yük değerleri Tablo 12’de verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere maksimum yükte en yüksek değeri %10 GR katkılı numune vermiştir. Düşük oranlarda (özellikle %1) grafen topaklanması dayanımı düşürürken, %3–10 aralığında yüksek mukavemet, rijitlik ve yük taşıma kapasitesi elde edilmiştir.



Şekil 31. h-BN katkılı PPS kompozitlerine ait eğme testi sonucu yük-sehim grafiği

Şekil 31 incelediğinde saf PPS numunesi 20 N maksimum yük taşımıştır ve bu değere karşılık gelen eğilme dayanımı 75 MPa olarak hesaplanmıştır. %5 katkılı numunede maksimum yük 17 N'a düşmüş ve eğilme dayanımı azalmıştır. %10 ve üzeri oranlarda tekrar artmış ve %15 katkı oranında saf PPS seviyesine ulaşmıştır. Bununla birlikte eğilme modülünde ise düzenli bir artış gözlenmiştir.

Bu bulgular, literatürde hBN'nin polimer matrislerde yük transferini artırarak eğilme modülünü yükselttiğini, ancak yüksek oranlarda aglomerasyon oluşumları nedeniyle dayanımın sınırlanabileceğini belirten çalışmalarla uyumludur (Wang vd., 2019; Chen., 2020; Yu., 2018).

Tablo 13. h-BN katkılı PPS kompozitlerine ait eğme testi sonuçları

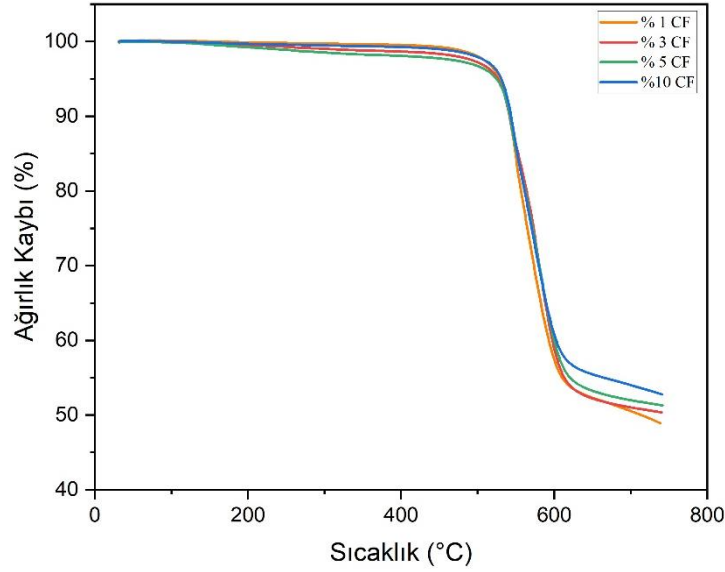
Malzeme	Eğilme Dayanımı (MPa)	Eğilme Modülü (GPa)	Maksimum Yük (N)
Saf PPS	75	2,5	20
%5 hBN+PPS	64,4	2,71	17
%10 hBN+PPS	72	3,02	19
%15 hBN+PPS	79,5	3,33	21
%20 hBN+PPS	75,8	3,44	20
Ortalama	73.7	3.0	19.4
Standart Sapma	5.25	0.35	1.62

Eğme testi sonucundan elde edilen eğilme dayanımı, eğilme modülü ve maksimum yük değerleri Tablo 13’de verilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere maksimum yükte en yüksek değeri %15 hBN katkılı numune vermiştir.

3.2. Termal Analiz Yöntemleri

3.2.1. Termogravimetrik Analiz (TGA)

Termogravimetrik analiz (TGA), bir malzeme kütlesinin artan sıcaklık veya artan zamanla birlikte değişimini ölçen bir termal analiz yöntemidir. Katkılı kompozit malzemelere ait TGA termogramları Şekil 32, Şekil 33 ve Şekil 34’te verilmiştir. Şekil 32’de CF katkısının, kompozit malzemelerin termal bozunma davranışı üzerindeki etkisi görülmektedir.



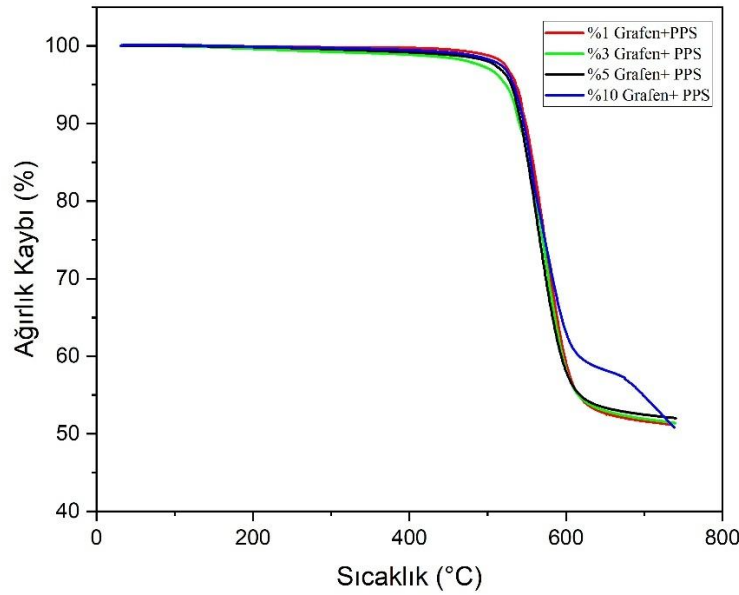
Şekil 32. CF TGA grafiği

Elde edilen TGA verilerine göre, 0–500 °C aralığında tüm numuneler oldukça kararlı bir yapı göstermekte ve bu sıcaklık aralığında belirgin bir ağırlık kaybı gözlenmemektedir. Bu aralıkta meydana gelen küçük kayıplar, genellikle nemin uzaklaşması veya uçucu bileşenlerin buharlaşmasından kaynaklanmaktadır. Tüm numunelerde ağırlık kaybı yaklaşık olarak 520 °C ile 620 °C sıcaklık aralığında gerçekleşmiştir. Karbon fiber oranı arttıkça, kompozitlerin toplam ağırlık kaybında belirgin bir azalma gözlenmiştir.

%1 CF içeren numunede 800 °C sonunda yaklaşık %48 oranında ağırlık kaybı gerçekleşirken, bu değer %3 CF için %47, %5 CF için %45 ve %10 CF için %43 oranındadır (Tablo14). Katkı oranının artmasıyla birlikte ağırlık kaybı oranının azalması, numunenin termal kararlılığını arttırdığını göstermektedir. 700 °C ve üzeri sıcaklıklarda bozunma büyük ölçüde tamamlanmıştır. %10 CF içeren kompozit, en düşük kütle kaybı ile en iyi termal performansı göstermiştir.

Tablo 14. CF katkılı PPS kompozitlerine ait TGA analiz sonuçları

Numune	Bozunma Başlangıç Sıcaklığı (°C)	Ani Kütle Kaybı Aralığı (°C)	Kütle Kaybı (%)
%1 CF + PPS	550	550-620	48
%3 CF + PPS	555	550-620	47
%5 CF + PPS	560	550-620	45
%10 CF + PPS	565	550-620	43



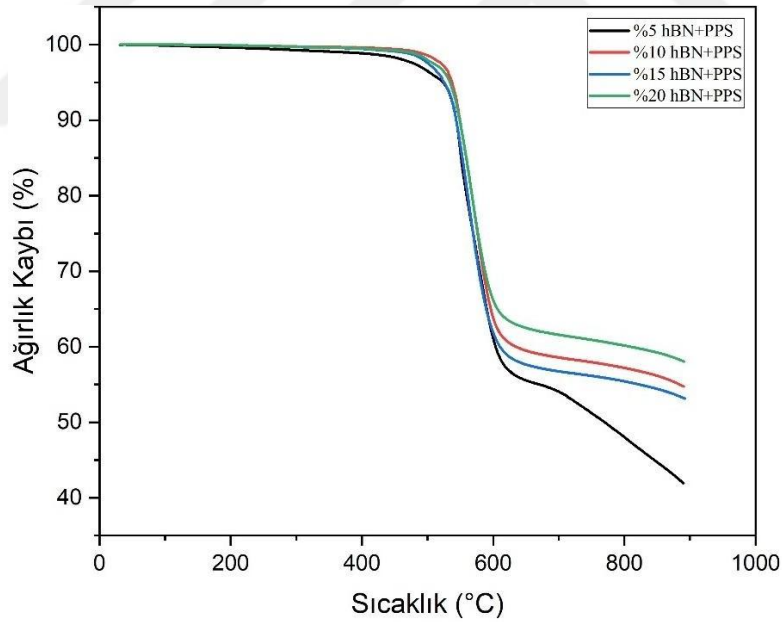
Şekil 33. GR TGA grafiği

Şekil 33 GR katkısının, kompozit malzemelerin termal bozunma davranışı üzerindeki etkisini göstermektedir. Yaklaşık 550–600 °C aralığında, polimer matris bozunmaya başlamış ve bozunmasına bağlı olarak ani bir ağırlık kaybı gerçekleşmiş ve bu durum 700 °C'ye kadar devam etmiştir. %3 grafen katkılı numunede, diğer katkılı numunelere kıyasla daha fazla ağırlık kaybına uğradığı görülmüştür ve ağırlık kaybı %49'a yükselmiştir.

Bu artış, düşük oranlı grafen katkısının matris içinde homojen olarak dağılmaması ya da matris ile tam uyum sağlayamaması sonucu oluşmuş olabilir kanısına varılmıştır. Özellikle %5 ve %10 grafen katkılı numuneler, yaklaşık %46 ve %45 oranında bir ağırlık kaybı ile daha kararlı bir yapı göstermiştir (Tablo 15). En düşük ağırlık kaybı %10 grafen katkılı kompozitte görülmüş olup, bu numune en yüksek termal kararlılığa sahip yapı olarak değerlendirilebilir.

Tablo 15. GR katkılı PPS kompozitlerine ait TGA analiz sonuçları

Numune	Bozunma Başlangıç Sıcaklığı (°C)	Ani Kütle Kaybı Aralığı (°C)	Kütle Kaybı (%)
%1 GR + PPS	550	550-620	47
%3 GR + PPS	555	550-625	49
%5 GR + PPS	560	550-630	46
%10 GR + PPS	570	560-650	45



Şekil 34. h-BN TGA grafiği

Şekil 34'te ise farklı h-BN katkı oranlarına sahip PPS kompozitlerinin 25-1000 °C sıcaklık aralığındaki TGA termogramı verilmiştir. Bu numunelerde de 500 °C'ye kadar oldukça düşük seviyede bir ağırlık kaybı olduğu görülmüştür. Numunelerde ağırlık kaybı 500–650 °C sıcaklık aralığında gerçekleşmiştir. %5 h-BN katkılı numune, bu aralıkta en erken ve en fazla ağırlık kaybı gösteren numune olmuştur (Tablo 16).

%20 h-BN katkısı içeren numune ise daha geç bozunmaya başlamış ve daha az kütle kaybı gerçekleşmiştir. Termal bozunma sıcaklığındaki artışın nedeni CF, GR ve h-BN'nin saf polimere kıyasla daha yüksek ısı kapasitesi ve termal iletkenlik değerlerine sahip olmasıdır (Gül, 2020; Rybiński vd., 2021; Gültekin vd., 2021).

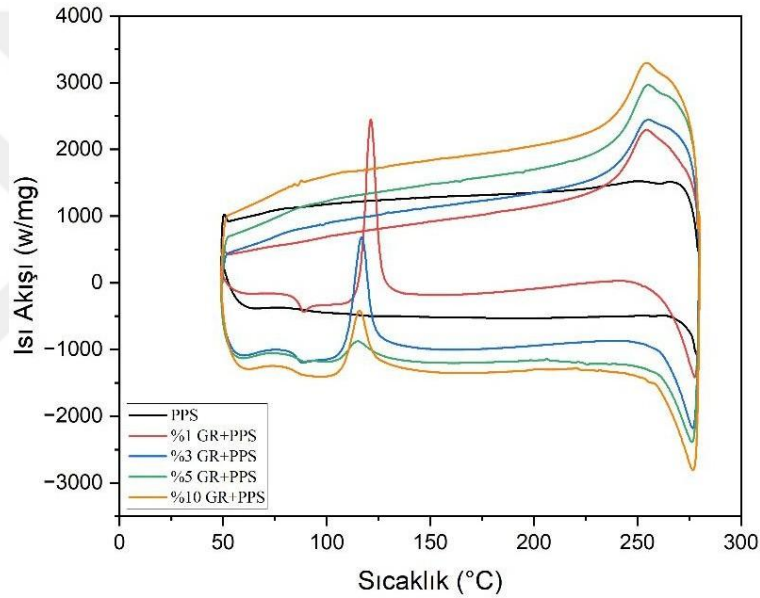
Tablo 16. h-BN katkılı PPS kompozitlerine ait TGA analiz sonuçları

Numune	Bozunma Başlangıç Sıcaklığı (°C)	Ani Kütle Kaybı Aralığı (°C)	Kütle Kaybı (%)
%5 h-BN + PPS	540	540-620	58
%10 h-BN + PPS	555	550-630	52
%15 h-BN + PPS	565	560-650	47
%20 h-BN + PPS	580	570-670	42

Yapılan TGA analizleri sonucunda, her üç katkı grubunda da katkı oranının artması ile kompozit malzemelerin termal kararlılığı belirgin şekilde artmıştır. Yüksek katkı içeren malzemeler, daha geç bozunma göstermiştir. Bu durum, nano boyuttaki katkı maddelerinin ısı absorblayıcı olarak hareket ederek bozunma sürecini geciktirmesiyle açıklanabilir (Rybiński vd., 2021; Mosanenzadeh vd., 2016; Khalaj vd., 2020). Bu bulgular, katkı miktarındaki artışın kompozit yapıların ısıl dayanımını iyileştirdiğini ve yüksek sıcaklık uygulamaları açısından avantaj sağladığını ortaya koymuştu

3.2.2. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)

Kompozit malzemeler üzerinde gerçekleştirilen DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) analizleri, bu yapıların termal davranışları hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Bu yöntem malzemelerin camsı geçiş sıcaklığı (T_g), erime sıcaklığı (T_m), kristalleşme sıcaklığı (T_c) ve bozunma sıcaklığı (T_d) gibi karakteristik noktalarını ölçmektedir. Ayrıca DSC sonuçları, kompozitlerin termal kararlılığının ve katkı malzemesi ile polimer matris arasındaki etkileşimlerin incelenmesine de olanak tanır. (Le & Huang, 2015).



Şekil 35. GR/PPS kompozitlerinin DSC analizleri

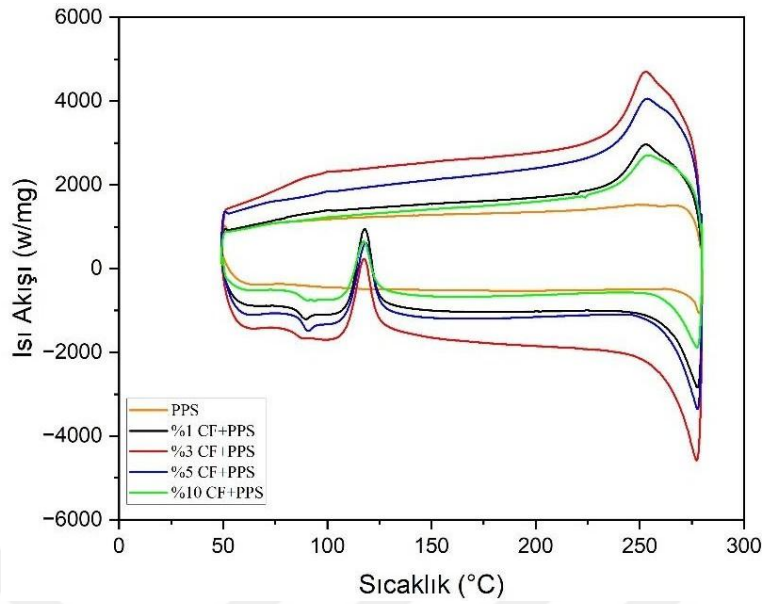
Şekil 35'te saf PPS ile farklı oranlarda (%1, %3, %5 ve %10) grafen takviyeli PPS kompozitlerinin DSC eğrileri verilmiştir. Saf PPS' in DSC analizinde, 270-280°C aralığında belirgin bir erime piki görülmektedir. Soğuk kristalizasyon sıcaklıkları (T_{cc}) yaklaşık 110–130 °C civarındadır. Bu pik daha önce tamamen kristalleşmemiş bir polimerin, ısıtma sırasında camsı halden kristal hale geçişi anlamına gelmektedir. Bu amorf bölgeler, malzemenin camsı geçiş sıcaklığının üzerinde ısıtıldığında hareket kazanmakta ve zincirler tekrardan düzenlenip kristal yapıya dönüşmektedir. %5 ve %10 grafen katkılı numunelerde soğuk kristalizasyon piklerinin daha keskin ve daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu sonuç, grafen katkısının ana matriste nükleasyon ajanı gibi davranarak kristallenme sürecini hızlandırdığını ve kristal büyümesini kolaylaştırdığını ortaya koymaktadır.

Asıl kristalizasyon piklerine bakıldığında ısı akışı-sıcaklık grafiğinde saf PPS'e ait kristalleşme sıcaklığı (T_c) görülememektedir. Bu durum PPS'in amorf yapıda olmasından kaynaklanmaktadır. Düşük ve orta seviyelerdeki grafen katkısı PPS'in kristalizasyon davranışını olumlu yönde etkilerken, grafen katkısının %10'a çıkmasıyla kristalizasyon piki daha geniş hale gelmiş ve şiddeti düşmüştür. Bu durum, yüksek katkı oranlarında grafenin polimer zincir hareketliliğini kısıtlaması nedeniyle kristallenmenin sınırlanabileceğini göstermektedir.

Çalışmadan elde edilen DSC sonuçları, kompozit numunelerin camsı geçiş sıcaklığının (T_g) yaklaşık 80–90 °C aralığında olduğunu göstermektedir. Grafen katkısı ile T_g değerlerinde artış gözlenmiştir (Tablo 17). Bu artış, polimer zincirlerinin serbest hareketinin grafen tarafından sınırlandırılmasına bağlanabilir. Grafen ile polimer zincirleri arasında gelişen güçlü arayüzey etkileşimleri, zincir mobilitesini kısıtlamakta ve böylece camsı geçiş sıcaklığının daha yüksek değerlere çıkmasına sebep olmaktadır. Literatürde de benzer bulgular rapor edilmiştir. Liao ve arkadaşları (2014), in-situ polimerizasyon yöntemiyle sentezledikleri grafen/PMMA nanokompozitlerinde T_g'nin belirgin şekilde yükseldiğini bildirmiştir. Bu bulgular, yapılan çalışmada elde edilen sonuçların literatür ile uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır (Liao vd., 2014).

Tablo 17. GR katkılı PPS kompozitlerine ait DSC analiz sonuçları

Numune	T _g (°C)	T _m (°C)	T _c (°C)	T _{cc} (°C)
Saf PPS	-	280	-	115
%1 GR + PPS	87	279	255	120
%3 GR + PPS	88	279	256	125
%5 GR + PPS	89	278	256	128
%10 GR+PPS	90	278	254	132

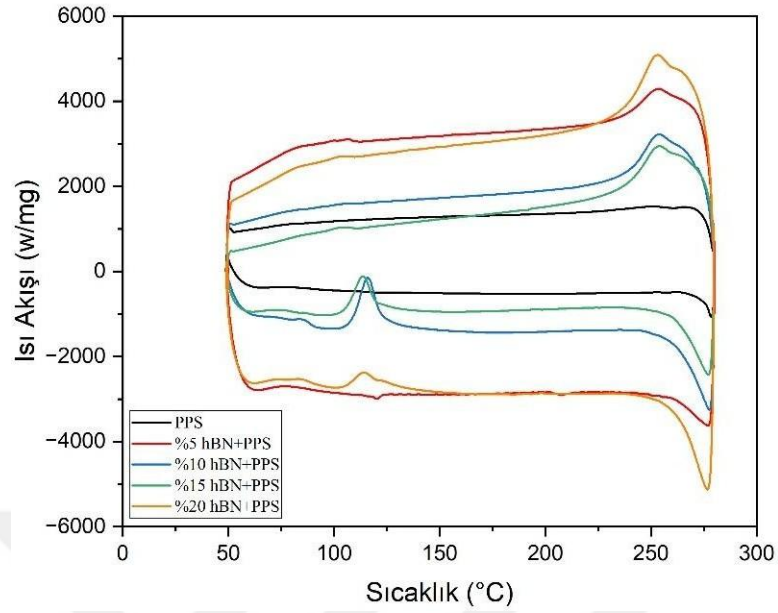


Şekil 36. CF/PPS kompozitlerinin DSC analizleri

Şekil 36’da saf PPS ile farklı oranlarda (%1, %3, %5 ve %10) karbon fiber (CF) takviyeli PPS kompozitlerinin ısıtma–soğutma döngülerinden elde edilen DSC eğrileri görülmektedir. Saf PPS’in erime sıcaklığı yaklaşık 280 °C civarında olup, CF katkısı ile erime sıcaklığında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Bu, CF ilavesinin PPS’in kristal kafes yapısını bozmadığını göstermektedir. Soğuk kristalizasyon sıcaklığının yaklaşık 115–130 °C olduğu, CF takviyesi ile daha yüksek değerlere çıktığı görülmektedir (Tablo 18). Özellikle %5 ve %10 CF içeren numunelerde soğuk kristalizasyon piklerinin daha keskin ve daha yüksek şiddette olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, karbon fiberlerin PPS matrisinde kristallenmeyi arttırdığını göstermektedir. Benzer şekilde literatürde de karbon fiberlerin PPS matrisinde heterojen çekirdeklenme (nükleasyon) etkisiyle kristalleşmeyi arttırdığı belirtilmektedir (Hossain & Lee, 2019).

Tablo 18. CF katkılı PPS kompozitlerine ait DSC analiz sonuçları

Numune	T _g (°C)	T _m (°C)	T _c (°C)	T _{cc} (°C)
Saf PPS	-	280	-	115
%1 CF + PPS	86	280	252	118
%3 CF + PPS	88	282	253	122
%5 CF + PPS	90	282	253	126
%10 CF + PPS	92	282	254	130



Şekil 37. h-BN/PPS kompozitlerinin DSC analizleri

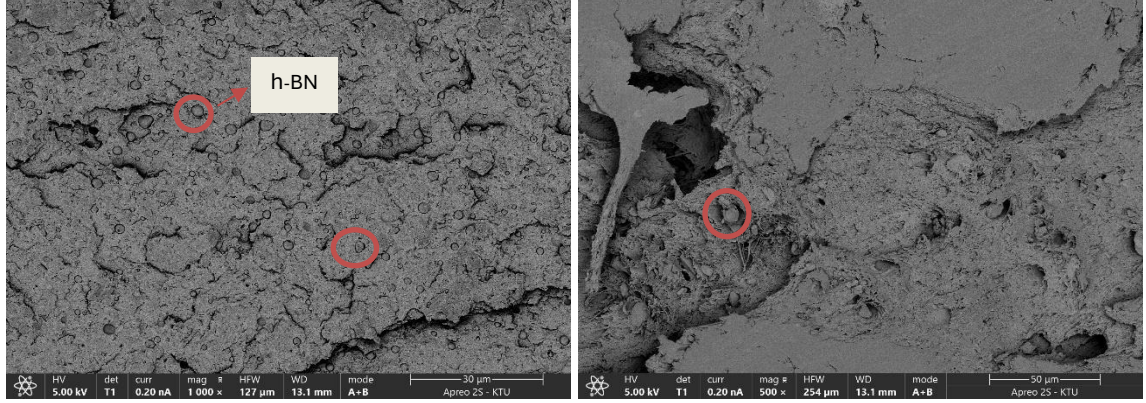
Bu çalışmada, farklı oranlarda h-BN katkıları içeren PPS kompozitinin ısı özellikleri DSC yöntemiyle incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, h-BN'nin PPS'in termal özelliklerini etkilediğini ve erime, kristallenme gibi faz geçişlerini değiştirdiğini göstermiştir. Siyah renkli olan saf PPS de yaklaşık 280°C civarında belirgin bir pik görülmektedir. Bu pik, PPS'in erime sıcaklığını ve termal davranışını belirlemekte olup, bu sıcaklıkta malzeme katı halden sıvı hale geçerken enerji alır. Grafikte camı geçiş sıcaklığı (T_g) net bir şekilde görülememektedir. Bu durum PPS'in amorf yapıda olmasından kaynaklanmakta ve h-BN katkılı kompozitlerde de PPS'e bağımlı kalarak amorf davranış sergiledikleri görülmektedir. Soğuk kristalizasyon pikleri 100–150 °C sıcaklık aralığında olup ısıtma sırasında amorf bölgelerin kristal hale geçişini göstermektedir. Erime pikleri 270-285 °C aralığında olup katkı oranı arttıkça erime pikleri daha keskin hale gelmiştir. %20 h-BN katkılı kompozitte ise pik biraz genişlemiş bu da yüksek dolgu oranının zincir hareketliliğini kısıtlamasına yorumlanmıştır (Tablo 19).

Hegzagonal bor nitrür (h-BN) oranı arttıkça PPS'in ısı davranışlarında önemli değişiklikler görülmüştür. h-BN katkısı, matrisin erime sıcaklığını düşürmüş ve erime sürecini geniş bir sıcaklık aralığına yaymıştır. Ayrıca, katkı oranı arttıkça kristallenme daha belirgin hale gelmiştir. Bu bulgular, h-BN'nin PPS'in termal özelliklerini etkilediğini, malzemenin termal dayanıklılığını arttırdığını ve kristallenme davranışını değiştirdiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, literatürdeki benzer çalışmalar ile de desteklenmektedir. Zhang ve arkadaşları (2012), h-BN'nin polimerlere katkı olarak eklenmesinin, malzemelerin termal iletkenliklerini arttırabileceğini ve erime karakteristiklerini değiştirdiğini belirtmektedir. Lee ve arkadaşları (2016), Raj ve arkadaşları (2018), tarafından yapılan çalışmalarda ise h-BN'nin polimerlerin kristallenme hızını arttırdığı ve buna bağlı olarak, daha fazla egzotermik tepkimeye neden olduğu vurgulanmıştır. Bu çalışmalar, özellikle yüksek h-BN katkısı ile kristallenme ve erime süreçlerinde gözlemlenen değişiklikleri doğrulamaktadır (Zhang vd., 2012; Raj vd., 2018).

Tablo 19. h-BN katkılı PPS kompozitlerine ait DSC analiz sonuçları

Numune	T _g (°C)	T _m (°C)	T _c (°C)	T _{cc} (°C)
Saf PPS	-	280	-	115
%5 h-BN + PPS	87	280	253	118
%10 h-BN + PPS	89	279	253	122
%15 h-BN + PPS	90	278	254	126
%20 h-BN + PPS	91	278	254	130

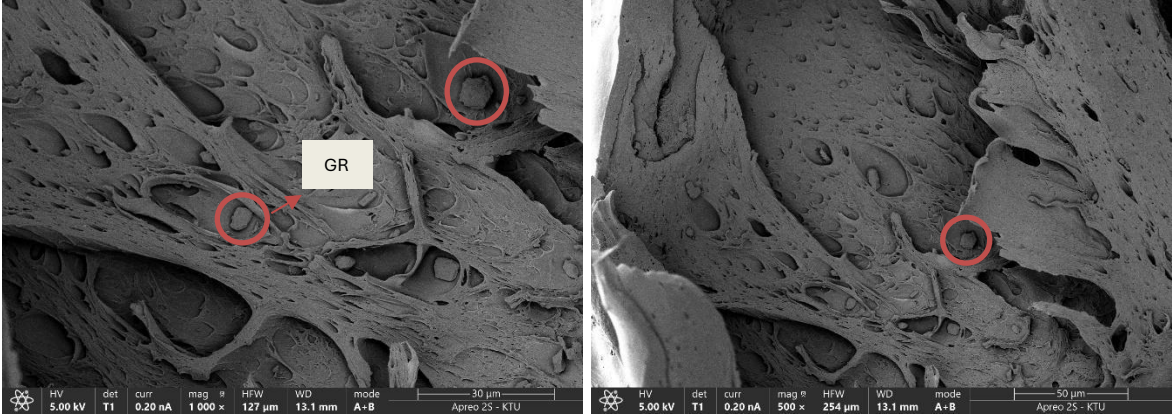
3.3. Mikro Yapı Analizi



Şekil 38. Hegzagonal bor nitrür (h-BN) katkılı PPS kompozit numunesine ait alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) görüntüsü

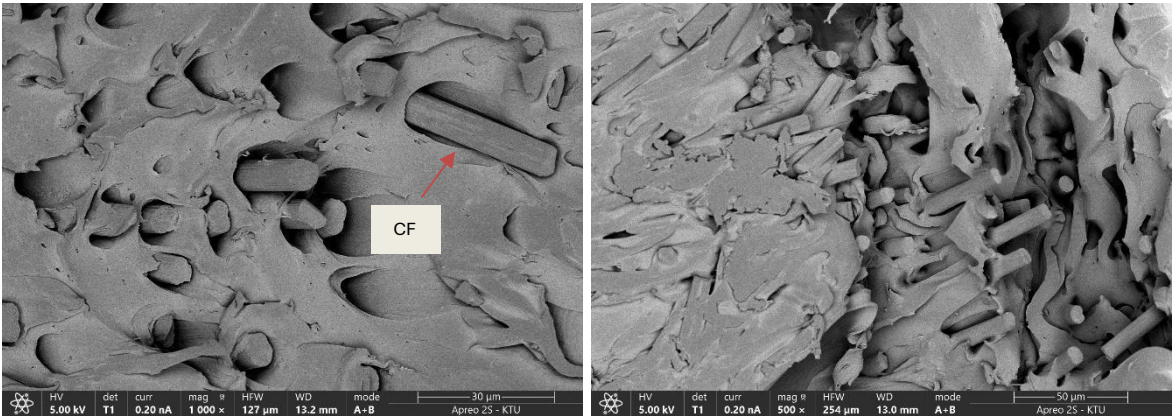
Şekil 38’de verilen FE-SEM görüntüsünde hekzagonal bor nitrür (h-BN) katkısı içeren PPS kompozitinin yüzey morfolojisi görülmektedir. Görüntüde h-BN parçacıklarının matris içerisinde homojen dağıldığı, ancak bazı bölgelerde aglomerasyonların bulunduğu görülmektedir. Bu aglomerasyonlar, h-BN’nin yüksek yüzey alanı ve tabakalı yapısının, parçacıklar arasında Van der Waals etkileşimleriyle birlikte kümelenme eğilimi göstermesinden kaynaklanabilir sonucuna varılmıştır. (Zhou & Li, 2018).

Matris ile takviye faz arasındaki ara yüzey bağlanması iyi olmakla birlikte, bazı bölgelerde kısmi ayrışma ve mikro boşluk oluşumları varlığı gözlenmektedir. Bu boşluklar, üretim sırasında matris ile takviye ara yüzeyinde yeterli ıslanmanın sağlanamaması veya soğuma sırasında oluşmuş olabilir kanısına varılmıştır. Mikro yapıdaki bu heterojenlikler, mekanik özellikler üzerinde olumsuz etki yaratarak çekme dayanımı ve uzama gibi değerlerin azalmasına neden olabilir. Özellikle daha yoğun ve kompakt bölgeler, mekanik testlerde elde edilen daha yüksek dayanım ve sertlik değerleri ile uyumludur.



Şekil 39. Grafen (GR) katkılı PPS kompozit numunesine ait alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) görüntüsü

Grafen katkılı PPS kompozitine ait kırık yüzey FE-SEM görüntüsü Şekil 39’da verilmiştir. Analizde, malzemenin yüksek oranda gözenekli olduğu ve boşlukların düzensiz dağıldığı görülmüştür. Bu gözenekli ve boşluklu yapı, üretim sürecinde oluşan gaz çıkışına bağlanabilir. Kompozit içerisinde grafen katkılarının yönlenmiş halde dağıldığı, ancak bazı bölgelerde ise yüksek yüzey enerjisi nedeniyle aglomera olduğu görülmektedir. Bu durum, katkının matris içinde tam homojen dağılmadığını ve arayüzey etkileşiminin zayıf olduğunu göstermektedir (Wang vd., & Yang, 2017).



Şekil 40. Karbon fiber (CF) katkılı PPS kompozit numunesine ait alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) görüntüsü

Karbon fiber katkılı PPS kompozit malzemesine ait kırık yüzeyin FE-SEM görüntüsü Şekil 40’da verilmiştir. FE-SEM analizinde, matris içerisinde yönelmiş ve gömülü halde bulunan karbon fiber katkılarının varlığı belirgin şekilde görülmektedir. Bazı fiberler, düzgün ve yönlenmiş yapıda, bazıları ise matristen ayrılmış veya kırılmış halde

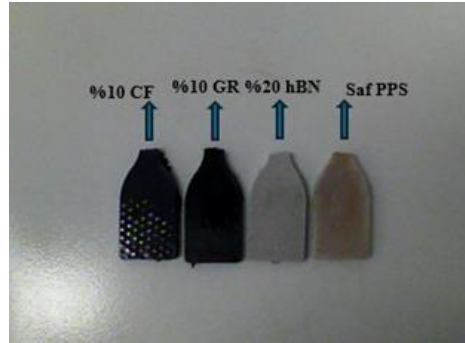
bulunmaktadır. Bazı bölgelerde ise yer yer boşlukların oluştuğu görülmüş olup, bu durum fiber ile matris arayüzünde tam yapışmanın sağlanamadığını göstermektedir. Söz konusu boşluklar, kompozit üretimi sırasında ıslanmanın yetersiz kalması veya arayüz etkileşiminin düşük olması nedeniyle ortaya çıkmış olabilir.

Kırık yüzeyde lif çekilmesi ve kırılması birlikte görülmüş olup, kompozitin karma kırılma davranışı (gevrek + sünek) sergilediği kanısına varılmıştır. (Fu & Hu, 2008).

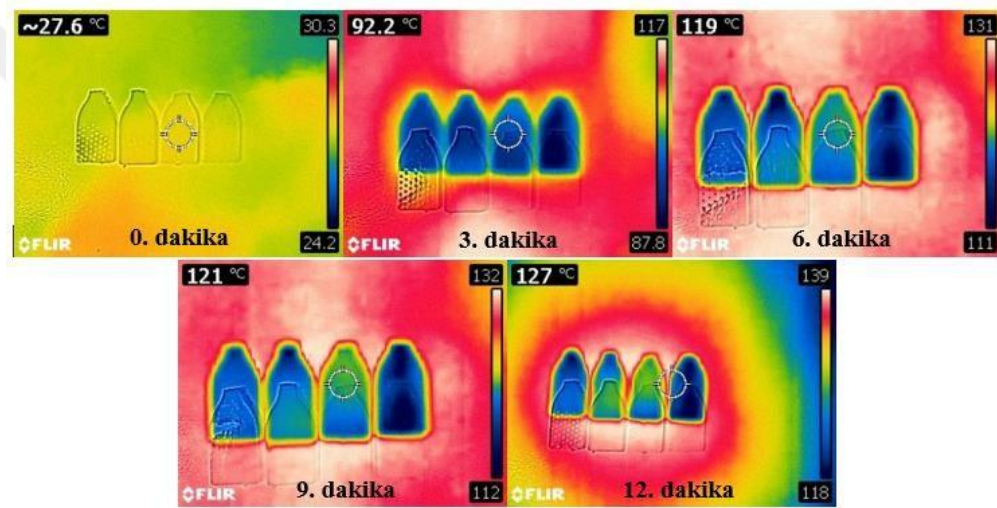
Kompozitlerin yapısal bütünlüğü ve mekanik performansı, kullanılan takviye türüne ve matris içindeki dağılıma göre büyük ölçüde değişir. SEM analizleri, grafen ilavesinin kompozitleri elektriksel olarak iletkenlik hale getirme potansiyeline sahip olmasına rağmen, matris içinde düşük homojenizasyon ve arayüz etkileşiminin zayıf kalması nedeniyle yapısal olarak en düşük performansı verdiğini göstermiştir.

Karbon fiber katkılı kompozitlerde ise mekanik dayanımın arttığı gözlemlenmiş olup buna karşın, lif ile matris arayüzünde görünen boşluklar ve lif çekilmesi gibi yapılar, arayüz etkileşiminin iyileştirilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Literatürde de benzer şekilde, karbon fiber ilavesinin mekanik dayanımı arttırdığı, fakat arayüz bağlanmasının zayıf olduğu durumlarda da dayanımı azaltabileceği ifade edilmektedir (Fu vd., 2008). Öte yandan, h-BN katkılı PPS kompozitlerinde, katkı malzemesinin matris içinde dağılımının kısmen homojen olduğu ve büyük boyutlarda aglomerasyonların bulunmadığı tespit edilmiştir. Bu yapı, kompozitin yapısal olarak bütünlüğünü korumasına katkı sağlamış ve diğer kompozit numunelere kıyasla daha dengeli bir mikroyapı sunmuştur. Zhou ve arkadaşları (2018), tarafından yapılan çalışmalarda da benzer olarak hBN'nin homojen dağılımının, kompozit malzemelerin ısı ve mekanik dayanımı üzerinde olumlu etkiler yarattığı bildirilmiştir (Zhou & Li, 2018).

3.4. Termal İletkenlik Analizi



Şekil 41. Termal analiz öncesi numunelerin yerleşim sırası

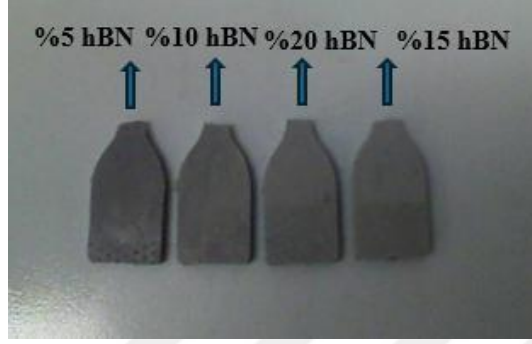


Şekil 42. %10 GR, %10 CF, %20 h-BN, Saf PPS numunelerinin termal analiz sonrası ısı haritası görüntüleri

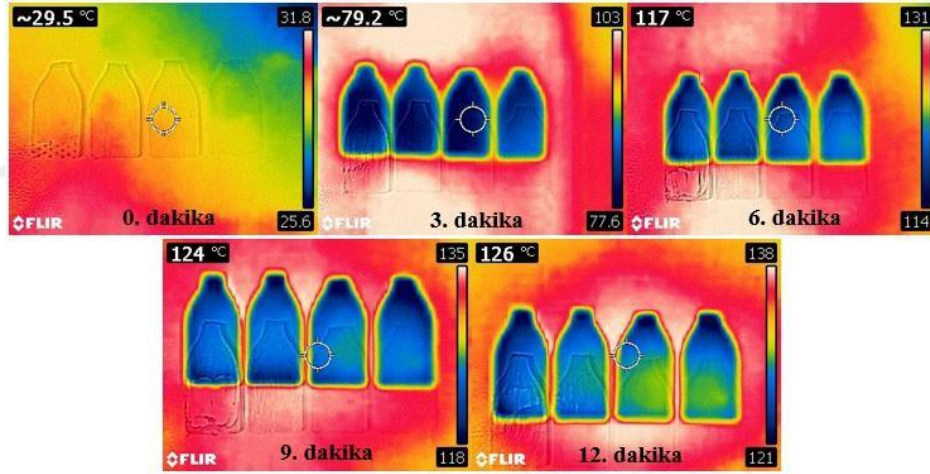
Şekil 42’de verilen termal kamera görüntülerinde, saf PPS ve en yüksek oranlarda katkılanmış kompozitlerin artan dakikalardaki yüzey sıcaklık dağılımları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. 6. dakika görüntülerinde sıcaklığın artmasıyla birlikte saf PPS numunesinde hala koyu mavi tonların korunması, ısının yüzeye daha yavaş yayıldığını göstermektedir. Buna karşın, %20 h-BN katkılı kompozitte açık mavi-yeşil tonlarının yaygın olması bu numunenin ısı iletiminin diğer numunelere kıyasla daha hızlı olduğunu gösterir. Burada h-BN katkısının termal iletimi diğer katkılara göre daha hızlı gerçekleştiği için numunenin yüzey sıcaklığının arttığı görülmektedir.

12.dakika görüntülerinde ise her iki numune arasındaki fark daha da belirginleşmiştir. Saf PPS numunesi 118 °C’ ye ulaşırken, %20 h-BN katkılı PPS numunesi 127 °C’ye ulaşmıştır. Ayrıca numune yüzeyindeki renk dağılımı incelendiğinde, saf PPS yüzeyinde

hala koyu mavi tonların hakim olduğu, %20 h-BN katkılı numunede ise yeşil tonlarına doğru bir geçişin gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum, h-BN katkısının termal iletkenliği arttırdığını ve matris içinde ısının daha etkin bir şekilde yayılmasını sağladığını ortaya koymaktadır. Literatürde de benzer bulgular rapor edilmiştir (Wang & Golberg, 2018).



Şekil 43. Farklı katkı oranlarındaki h-BN/PPS numunelerinin termal analiz öncesi yerleşim sırası



Şekil 44. %5 h-BN, %10 h-BN, %15 h-BN, %20 h-BN numunelerinin termal analiz sonrası ısı haritası görüntüleri

En yüksek katkı oranına sahip numuneler arasından, termal iletkenlik açısından en iyi özellikleri sergileyen %20 h-BN katkılı PPS numunesi olmuştur. Termal iletimi en iyi olan h-BN katkılı PPS numunesinde ise katkı oranlarının termal iletkenliği ne yönde etkileyeceği analiz edilmiştir. Termal analiz sonucu elde edilen yüzey sıcaklık dağılımları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Şekil 44.'de verilen termal analiz sonuçları incelendiğinde 6. dakikada sıcaklığın 117°C'yi bulmasının ardından numune üzerinde renk değişimleri başlamıştır. Termal analiz

9. dakikada 124 °C sıcaklığa ulaşmış olup %20 h-BN katkılı PPS numunesinin sağ-orta bölgelerinde renk değişimi açık maviden yeşile dönüşmeye başlamıştır. Analizin 12. dakikasında 126 °C’de ise numuneler arası renk değişimleri açıkça görülmektedir. Buna göre %20 h-BN katkılı PPS numunesinde 9. dakikadaki yeşil bölgeler 12. dakikada artık birçok alana yayılmıştır. Yeşil renklerin baskın olduğu bölgeler diğer renk tonlarına göre daha sıcaktır ve dolayısıyla ısı iletimi hızlı ve bu bölgelerde termal iletim yüksektir. Yapılan bu analiz sonucunda en iyi termal iletimi %20 h-BN katkı oranına sahip PPS numunesi vermiştir. Mavi ve koyu mavi tonlarının baskın olduğu %5 h-BN katkılı PPS numunesi ise termal iletimin en zayıf olduğu numune seçilmiştir.



4.SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında farklı katkı oranlarındaki h-BN, GR ve CF/PPS kompozitleri çift vidalı ekstrüder ile üretilmiştir. Farklı oranlardaki ve türdeki katkı ilavelerinin mekanik ve termal özelliklerde meydana getirdiği değişimler incelenmiştir.

PPS/CF, PPS/GR ve PPS/h-BN kompozitlerine FE-SEM, TGA, DSC, mekanik testler (çekme ve eğme) ve termal analizler yapılmıştır.

Yapılan test ve analizler neticesinde şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Mekanik testler incelendiğinde PPS numunesine ilave edilen katkıların genel olarak, saf PPS'e kıyasla mekanik dayanımda artış sağladıkları ancak rijitlikte azalmalar meydana getirdikleri belirlenmiştir.
- TGA analizleri sonucunda, her üç katkı grubunda da katkı oranının artmasıyla birlikte kompozit malzemelerin termal kararlılığı belirgin şekilde artmıştır. Yüksek katkı içeren malzemeler, daha geç bozunma göstermiştir. Bunun sonucunda; %10 CF, %10 GR ve %20 h-BN katkılı kompozitler saf PPS'e kıyasla daha yüksek termal kararlılığa sahip yapılar olarak belirlenmiştir.
- PPS polimeri içindeki mikro ve nano katkılar, saf PPS'e kıyasla katkılı kompozitlerde erime (T_m), kristallenme (T_c) ve camsı geçiş sıcaklıklarını (T_g) değiştirmiştir. Düşük ve orta seviyelerdeki katkıların kristallenmeyi olumlu yönde etkilediği, yüksek oranlardaki katkıların zincir hareketliliğini kısıtlanmasından kaynaklı kristallenmenin kısıtlanabileceği sonucuna varılmıştır. Camsı geçiş sıcaklığının (T_g) artması ise, polimer zincirlerinin katkılarla daha kısıtlı hale geldiğini ve malzemenin yüksek sıcaklıklara karşı daha dayanıklı olduğunu göstermiştir.
- PPS/CF, PPS/GR ve PPS/h-BN kompozitlerinin termal iletkenlikleri ısı haritasında incelendiğinde, saf PPS numunesi en yüksek yüzey sıcaklığına ulaşarak ısıyı bünyesinde tuttuğunu ve yavaş yavaş düşük termal iletkenlik sergilediğini doğrulamıştır. %20 h-BN katkılı numunenin ise diğer katkılı numunelere kıyasla ısı iletiminin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ve diğer numunelerle kıyaslandığında en yüksek termal iletkenliği sağladığı sonucuna varılmıştır.

5.ÖNERİLER

- Kullanılan katkıların matris içerisinde daha homojen dağılması için, ultrasonik karıştırma, yüzey modifikasyonu, solvent destekli yöntemler gibi farklı üretim teknikleri kullanılabilir.
- PPS dışında farklı polimer matrislerde aynı katkı malzemelerinin etkisi araştırılarak karşılaştırılmalı sonuçlar elde edilebilir.
- Katkıların ısı transfer mekanizmasına etkisini daha iyi anlamak amacıyla sayısal modelleme ve simülasyon üzerine çalışmalar yapılabilir. Böylelikle deneysel sonuçlar desteklenebilir ve optimizasyon yapılabilir.

6.KAYNAKLAR

- Ağızaçmak, S. (2019). Epitaksiyel grafende saçılma mekanizmaları. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir.
- Akbulut, H. (1995). Alümina fiber takviyeli Al-Si metal matriksli kompozit üretimi ve mikroyapı özellik ilişkilerinin incelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Doktora Tezi, 1995.
- Akyüz, Ö. F. (2001). Plastikler ve plastik enjeksiyon teknolojisine giriş. İstanbul: PAGEV Yayınları.
- Albayrak Arı, G. (2009). Polimer Nanokompozitlerin Özelliklerine Değişik Nanopartiküllerin Etkisinin İncelenmesi. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Alsaadi, M., Erklığ, A., & Bozkurt, Ö. Y. (2018). Mechanical and thermal behavior of carbon fiber reinforced polymer composites. *Polymer Composites*, 39(5), 1725–1733.
- Bağcı, D. (2006). Epoksi reçinesi ile nanokompozit sentezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Balmain, W. H. (1842). Bemerkungen über die Bildung von Verbindungen des Bors und Siliciums mit Stickstoff und gewissen Metallen. *Journal für Praktische Chemie*, 27, 422–430.
- Bello, I., Chong, Y. M., Leung, K. M., Chan, C. Y., Ma, K. L., Zhang, W. J., Lee, S. T., & Layyous, A. (2005). Cubic boron nitride films for industrial applications. *Diamond and Related Materials*, 14, 1784–1790.
- Boudenne, A., Ibos, L., Fois, M., Majeste, J. C., & Gehin, E. (2005). Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 36, 1545–1554.
- Boudenne, A., Ibos, L., Géhin, E., Fois, M., & Majesté, J. C. (2005). Anomalous behavior of thermal conductivity and diffusivity in polymeric materials filled with metallic particles. *Journal of Materials Science*, 40(16), 4163–4167.
- Braun, D., & Cherdron, H. (2005). Polymer synthesis: Theory and practice – Fundamentals, methods, experiments. Springer.
- Callister W., & Rethwisch D., (2015), Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Çev: Genel K., 8. Baskı, İstanbul, Nobel Yayınevi.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). Malzeme bilimi ve mühendisliği (Çev. Prof. Dr. K. Genel, s. 251). Nobel Yayınları.
- Chawla K. K., (2012), Composite Materials: Science and Engineering. Springer, New York, ABD

- Chen, H., Ginzburg, V. V., Yang, J., Yang, Y., Liu, W., Huang, Y., Du, L., & Chen, B. (2016). Thermal conductivity of polymer-based composites: Fundamentals and applications. *Progress in Polymer Science*, 59, 41–85.
- Chen, H., Ginzburg, V. V., Yang, J., Yang, Y., Liu, W., & Chen, B. (2020). Thermal conductivity and mechanical properties of polymer composites with hexagonal boron nitride. *Composites Science and Technology*, 188, 107973
- 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.
- Cuppoletti, J. (2011). Nanocomposites and polymers with analytical methods. In *Intech Press* (Vol. 1, Chap. 11, pp. 261–285).
- Danes, F., Garnier, B., & Dupuis, T. (2003). Predicting, measuring, and tailoring the transverse thermal conductivity of composites from polymer matrix and metal filler. *International Journal of Thermophysics*, 24(3), 771–784.
- Deng, S., Lin, Z., Xu, B., Qiu, W., Liang, K., & Li, W. (2014). Isothermal crystallization kinetics, morphology, and thermal conductivity of polyphenylene sulfide composites filled with graphene nanoplatelets. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 118(1), 1–7.
- Deng, S., Lin, Z., Xu, B., Qiu, W., Liang, K., & Li, W. (2015). Effects of carbon fillers on crystallization properties and thermal conductivity of polyphenylene sulfide composites. *Polymer Testing*, 46, 168–175.
- Dresselhaus, M. S., Jorio, A., Hofmann, M., Dresselhaus, G., & Saito, R. (2010). Perspectives on carbon nanotubes and graphene Raman spectroscopy. *Nano Letters*, 10(3), 751–758.
- Ebbesen, T. W. (1994). Carbon nanotubes. *Annual Review of Materials Science*, 24(1), 235–264.
- Ekinci, V.Ş. (2007). Alümina takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Eren, Y. (2007). Kompozit yapıların darbe etkisinin incelenmesi. Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya.
- Fu, S.-Y., Lauke, B., Mäder, E., Yue, C.-Y., & Hu, X. (2008). Effects of fiber length and fiber orientation distributions on the mechanical properties of short-fiber-reinforced polymers. *Composites Part B: Engineering*, 39(6), 933–961.
- Mortazavian, S., & Fatemi, A. (2015). Tensile and fatigue behaviors of plastics and polymer composites: A review. *Composites Part B: Engineering*, 77, 308–327.
- Fu, S.-Y., Lauke, B., Mäder, E., Yue, C.-Y., & Hu, X. (2008). Tensile properties of short-glass-fiber- and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(7), 1037–1045.

- Ge, Z., Ye, F., & Ding, Y. (2014). Composite materials for thermal energy storage: Enhancing performance through microstructures. *ChemSusChem*, 7(5), 1318–1325.
- Gogos, C. G., & Erdmenger, T. (2012). *Single-screw and twin-screw extrusion: Technology and principles*. Hanser Publishers.
- Gu, J., Guo, Y., Yang, X., Liang, C., Geng, W., Tang, L., Li, N., & Zhang, Q. (2017). Synergistic improvement of thermal conductivities of polyphenylene sulfide composites filled with boron nitride hybrid fillers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 95, 267–273.
- Gül, O. (2020). *Termoplastik Polyester Elastomer Matrisli Kompozitlerin Tribolojik ve Mekanik Özelliklerin Elyaf ve Partikül Takviye Malzemeleri Varlığında İyileştirilmesi*. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kocaeli, 2020.
- 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.
- Ha, J. (1991). *Toughening Mechanisms in Weak Matrix Ceramic Composites*, Doktora Tezi, University of Missouri–Rolla, Amerika.
- Han, Z., & Fina, A. (2011). Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review. *Progress in Polymer Science*, 36(7), 914–944.
- Haubner, R., Wilhelm, M., Weissenbacher, R., & Lux, B. (2002). Boron nitrides – Properties, synthesis and applications. In M. Jansen (Ed.), *High Performance Non-Oxide Ceramics II* (Vol. 15). Springer Verlag.
- Hossain, M. S., Kim, J. C., & Lee, J. H. (2019). Structure, mechanical and thermal properties of polyphenylene sulfide and polysulfone impregnated carbon fiber composites. *Polymers*, 11(684), 1–14.
- Hu, Q., Bai, X., Zhang, C., Zeng, X., Huang, Z., Li, J., Li, J., & Zhang, Y. (2021). Oriented BN/Silicone rubber composite thermal interface materials with high out-of-plane thermal conductivity and flexibility. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 143, 106681.
- Huang, C., Qian, X., & Yang, R. (2018). Thermal conductivity of polymers and polymer nanocomposites. *Materials Science & Engineering R*, 125, 1–28.
- İncebay H, (2015). *Grafen türevlerin sentezi ve Cu (II) iyonlarının elektrokimyasal tayininde kullanılması*. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Doktora Tezi. Konya, 2015.
- Jiang, X., Zhang, S., Li, Z., & Yang, R. (2016). Enhanced mechanical and thermal properties of PPS/hBN composites. *Polymer Composites*, 37(6), 1822–1830.

- Jiang, X., Yu, J., & Bai, Y. (2011). Effects of multi-walled carbon nanotubes on the mechanical properties of polyphenylene sulfide composites. *Composites Science and Technology*, 71(3), 322–327.
- Jiang, Y., Liu, Y., Min, P., & Sui, G. (2017). BN/PPS core-shell structure particles and their 3D segregated architecture composites with high thermal conductivities. *Composites Science and Technology*, 144, 63–69.
- Jouni, M., Boudenne, A., Boiteux, G., Massardier, V., Garnier, B., & Serghei, A. (2013). Electrical and thermal properties of polyethylene/silver nanoparticle composites. *Polymer Composites*, 34(5), 778–786.
- Kayrak, M. A. (1999). Havacılık kompozitleri ve mukavemet-maliyet analizleri. *Sivil Havacılık Yüksek Okulu Yayınları*, No. 09, Eskişehir, 1, 12–13, 69.
- Kemmish, D. (2011). *Practical Guide to High Performance Engineering Plastics*. Shrewsbury, <http://site.ebrary.com/id/10500344>. ISmithers Rapra Pub.
- 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.
- Khan, M., Leung, S., & Adinkrah, V. (2013). Effects of micro-sized and nano-sized carbon fillers on the thermal and electrical properties of polyphenylene sulfide based composites. *Polymer Engineering and Science*, 53(11), 2398–2406.
- Khan, S. M., Gull, N., Munawar, M. A., Zia, S., Anjum, F., Iqbal, M. S., ... & Butt, M. T. Z. (2016). Polyphenylene sulphide/carbon fiber composites: Study on their thermal, mechanical and microscopic properties. *Iranian Polymer Journal*, 25(5), 475–485.
- Kim, H., Abdala, A. A., & Macosko, C. W. (2019). Graphene/polymer nanocomposites. *Macromolecules*, 43(16), 6515–6530.
- Kim, J.-K., Lee, S.-H., & Kim, S.-J. (2011). Synergistic improvement of thermal conductivity of thermoplastic composites by hybrid fillers. *Polymer*, 52(4), 1055–1060.
- Kim, K., & Kim, J. (2016). Core-shell structured BN/PPS composite film for high thermal conductivity with low filler concentration. *Composites Science and Technology*, 134, 209–216.
- Kim, K., Kim, J., Choi, J., Yoo, S., & Kim, J. (2016). BN-MWCNT/PPS core-shell composites with high thermal conductivity at low filler loading. *Composites Science and Technology*, 130, 1–7.
- Kim, K., Kim, M., Hwang, Y., & Kim, J. (2014). Chemically modified boron nitride-epoxy terminated dimethylsiloxane composite for improving the thermal conductivity. *Ceramics International*, 40(1B), 2047–2056.

- Kubat, J., Kužel, R., Křivka, I., Bengtsson, P., Prokeš, J., & Stefan, O. (1993). Thick films based on glass and polymeric matrices, mechanism of conductivity. *Synthetic Metals*, 54(1–3), 187–194.
- Kuilla, T., Bhadra, S., Yao, D., Kim, N. H., Bose, S., & Lee, J. H. (2010). Recent advances in graphene-based polymer composites. *Progress in Polymer Science*, 35(11), 1350–1375.
- Kumar, R., Singh, R., & Hui, D. (2021). Advances in graphene-reinforced polymer composites: A review on mechanical and thermal properties. *Journal of Materials Science*, 56(10), 6097–6131.
- Le, M.-T., & Huang, S.-C. (2015). Thermal and Mechanical Behavior of Hybrid Polymer Nanocomposite Reinforced with Graphene Nanoplatelets. *Materials*, 8(8), Article 8.
- Lei, W., et al. (2013). High performance polymer composites with hexagonal boron nitride nanosheets. *Composites Science and Technology*.
- Leung, S. N. (2018). Thermally conductive polymer composites and nanocomposites: Processing–structure–property relationships. *Composites Part B: Engineering*.
- Leung, S. N., Khan, M. O., Chan, E., Naguib, H., Dawson, F., Lakatos, L., & Adinkrah, V. (2012). Synergistic effects of hybrid fillers on the development of thermally conductive polyphenylene sulfide composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 127(5), 3293–3301.
- Li, C., Zhao, G., Zhang, H., & Wang, X. (2018). Mechanical and thermal properties of PPS composites reinforced with short carbon fibers. *Polymer Composites*, 39(10), 3572–3581.
- Li, M., Wan, Y., Gao, Z., Xiong, G., Wang, X., Wan, C., & Luo, H. (2013). Preparation and properties of polyamide 6 thermal conductive composites reinforced with fibers. *Materials & Design*, 51, 257–261.
- Li, T., Guo, Y., Zhang, Y., & Wang, M. (2018). Thermal and mechanical properties of h-BN reinforced polymer composites. *Composites Science and Technology*, 168, 443–450.
- Liao, K. H., et al. (2014). *Macromolecules*, 47(3), 831–838.
- Lin, Y., et al. (2017). Hexagonal boron nitride nanostructures for polymer composites: A review. *Journal of Materials Science*.
- Liu, D., Shen, S., & Wang, Y. (2022). Improving in-plane and out-of-plane thermal conductivity of polyimide/boron nitride film with reduced graphene oxide by a moving magnetic field induction. *Composites Science and Technology*, 220, 109292.
- Long, A. C. (2007). *Composites forming technologies*. Woodhead Publishing Limited.

- Mazumdar, S. K. (2002). *Composites manufacturing: Materials, product and process engineering*. CRC Press LLC.
- Meng, F., Lu, W., Li, Q., Byun, J., Oh, Y., & Chou, T. (2015). Graphene-based fibers: a review. *Advanced Materials*, 27(35), 5113–5131.
- Mirkarimi, P. B., McCarty, K. F., & Meldin, D. L. (1997). Review of advances in cubic boron nitride film synthesis. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 21, 47–100.
- Mittal, G., Dhand, V., Rhee, K. Y., Park, S.-J., & Lee, W. R. (2015). A review on carbon nanotubes and graphene as fillers in reinforced polymer nanocomposites. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, 11–25.
- Mittal, G., et al. (2015). Polymer nanocomposites with graphene: A review. *Journal of Materials Chemistry A*.
- 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.
- Mu, Q., Feng, S., & Diao, G. (2007). Thermal conductivity of polymer composites filled with graphene oxide. *Journal of Applied Polymer Science*, 112(3), 1695–1703.
- Newcomb, B. A., & Chae, H. G. (2018). The properties of carbon fibers. In A. R. Bunsell (Ed.), *Handbook of properties of textile and technical fibres* (2nd ed., pp. 841–871). Woodhead Publishing.
- Ngo, I. L., & Byon, C. (2016). Thermal conductivity of particle-filled polymers. In A. Méndez-Vilas & A. Solano (Eds.), *Polymer Science Book Series, No. 1: Research Advances, Practical Applications and Educational Aspects* (pp. 554–565). Badajoz, Spain: Formatex Research Center.
- Nohara, L., Nohara, E., Moura, A., Gonçalves, J., & Rezende, M. (2006). Study of Crystallization Behavior of Poly(phenylene sulfide). *Polimeros-ciencia E Tecnologia - POLIMEROS*. 16. 10.1590/S0104 14282006000200009.
- Odian, G. G. (2004). *Principles of polymerization*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.
- Oh, H., & Kim, J. (2019). Fabrication of polymethyl methacrylate composites with silanized boron nitride by in-situ polymerization for high thermal conductivity. *Composites Science and Technology*, 172, 153–162.
- Olgun O. H., (2020). Termoplastik Matrisli Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Üretim Sürecinde İndüksiyonla Isıtmanın Etkileri. Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Manisa.
- Öz, M. (2013). Synthesis of hexagonal boron nitride in the existence of fluxing agents (Doctoral dissertation, Kimya Bölümü, Bolu)

- Paszkievicz, S., Szymczyk, A., Zubkiewicz, A., Subocz, J., Stanik, R., & Szczepaniak, J. (2018). Electrically and thermally conductive low density polyethylene-based nanocomposites reinforced by MWCNT or hybrid MWCNT/graphene nanoplatelets with improved thermo-oxidative stability. *Nanomaterials*, 8(4), 264.
- Pierson, H. O. (1975). Boron nitride composites by chemical vapor deposition. *Journal of Composite Materials*, 9, 228–240.
- Rahate, A., Nemade, K., & Waghuley, S. (2013). Polyphenylene Sulfide (PPS): State of the Art and Applications. *Reviews in Chemical Engineering*, 29(6), 471-489. doi:10.1515/revce-2012-0021.
- Rai, A., & Moore, A. L. (2017). Enhanced thermal conduction and influence of interfacial resistance within flexible high aspect ratio copper nanowire/polymer composites. *Composites Science and Technology*, 144, 70–78.
- Raj, R. M., et al. (2018). Influence of nano-fillers on the crystallization and melting behavior of polymer nanocomposites. *Polymer Engineering & Science*, 58(9), 1714-1722.
- Rauwendaal, C. (2014). *Polymer extrusion* (5th ed.). Hanser Publications.
- Ren, J., Huang, Y., Liu, Y., Tang, X., (2005). Preparation, characterization and properties of poly(vinyl chloride)/compatibilizer/organophilic-montmorillonite nanocomposites by melt intercalation. *Polymer Testing*. Vol.24, 316-323.
- Rosato, D. V., & Rosato, D. V. (2004). *Plastic product material and process selection handbook*. Elsevier.
- 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.
- Shen, J. (2006). *Application of nanoparticles in polymeric foams* (Doctoral dissertation, The Ohio State University). ProQuest Dissertations Publishing.
- Shtein, M., Nadiv, R., Buzaglo, M., Kahil, K., & Regev, O. (2015). Thermally conductive graphene–polymer composites: The effect of filler geometry. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(42), 23725–23730.
- Sim, L. C., Ramanan, S. R., Ismail, H., Seetharamu, K. N., & Goh, T. J. (2005). Thermal characterization of Al₂O₃ and ZnO reinforced silicone rubber as thermal pads for heat dissipation purposes. *Thermochimica Acta*, 430(1–2), 155–165.
- Singh, V., Jouen, C., & Balandin, A. A., et al. (2011). Graphene based materials: Past, present and future. *Progress in Materials Science*, 56(8), 1178–1271.
- Sinha, S. K. (2009). *Tribology of polymers and their composites: Environmental effects*. Indian Institute of Technology Kanpur, India.

- Smith, W. F. (2001). *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği* (3. basım; Çeviri Editörü: N. G. Kınıkoğlu). İstanbul: Literatür Yayınları.
- Sorucu, A. (2007). Orthotropic malzemelerde çatlak ilerlemesi ve kırılma tokluğu tayini. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Su, X., Zhang, H., & Zhang, Q. (2018). Synergistic enhancement of anisotropic thermal transport in flexible cycloaliphatic epoxy resin composites filled with multi-layer graphene and hexagonal boron nitride. *Composites Science and Technology*, 163, 1–9.
- Şahin, Y. (2009). *Kompozit malzemelere giriş*. Ankara: Gazi Kitabevi.
- TabkhPaz, M., Shajari, S., Mahmoodi, M., Park, D.-Y., Suresh, H., & Park, S. S. (2016). Thermal conductivity of carbon nanotube and hexagonal boron nitride polymer composites. *Composites Science and Technology*, 134, 1–8.
- Tadmor, Z., & Gogos, C. G. (2006). *Principles of polymer processing* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
- Tantug, G. S., Seki, Y., Sarikanat, M., Altay, L., Gulen, S., & Isbilir, A. (2020). Thermal conductivity and mechanical properties of synthetic graphite loaded polyphenylene sulfide composites. *AIP Conference Proceedings*, 2205(1), 020033.
- Tavman, D.H., & Turgut, A. (2006). Mikro ve nano boyutlu tanecik katkılı polimer kompozitlerin mekanik özellikleri. *Proceedings of 11th International Materials Symposium*, 570–575. Denizli, Türkiye.
- URL-1. (2025, Mart 15). Polimer matris nanokompozitler, PMNC (polymer matrix nanocomposites, PMNC): https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_71.html adresinden alınmıştır.
- URL-2. (2025, Mart 15). Ticari plastikler; polipropilen, polistiren, polivinilklorür (PP, PS, PVC): https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_664.html adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2025, Mart 15). Termoplastikler–termoset plastikler (thermoplastics–thermosets): <https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/termoplastikler-termoset-plastikler.html> adresinden alınmıştır.
- URL-4. (2025, Mart 20). Mühendislik plastikleri; PC, PET, ABS, PA, PMMA; POM [PDF]. Celal Bayar Üniversitesi.: http://besergil.cbu.edu.tr/7_muhendislik_plastikleri.pdf adresinden alınmıştır.
- URL-5. (2015, Nisan 24). W.A.H.P. *Plastics. What are high-performance plastics?*: <http://ain-plastics.com/what-are-high-performance-plastics/> adresinden alınmıştır.

- URL-6. (2025, Nisan 24). Hammadde Kurutma. Amorf ve kristalin plastik ne demektir? Hammadde Kurutma: <https://hammaddekurutma.com/kutuphane/oku/kristalizasyon/amorf-ve-kristalin-plastik-ne-demektir> adresinden alınmıştır.
- URL-7. (2025, Mayıs 2). Sırmacı Makine. Karakteristikler ve özellikleri. <https://www.grafitelektrot.com/karakteristikler-ve-ozellikleri/> adresinden alınmıştır.
- URL-8. (2025, Mayıs 5). Karbon fiber nedir, nerelerde kullanılır? Malzeme Bilimi.: <https://malzemebilimi.net/karbon-fiber-nedir-nerelerde-kullanilir> adresinden alınmıştır.
- URL-9. (2025, Mayıs 5). Structural carbon fibre research. E-Mobility Engineering.: <https://www.emobility-engineering.com/structural-carbon-fibre-battery-research/> adresinden alınmıştır.
- URL-10. (2025, Mayıs 10). Polymer nanocomposites with different types of nanofiller. In Nanocomposites – Recent Evolutions (pp.-): <https://doi.org/10.5772/intechopen.81329> adresinden alınmıştır.
- URL-11. (2025, Mayıs 10). BioRender. Nanocomposite: Solution Blending Method [Science template]. BioRender.: <https://www.biorender.com/template/nanocomposite-solution-blending-method> adresinden alınmıştır.
- URL-12. (2025, Mayıs 12). Alsan Plastik. Plastik Ekstrüzyon Nedir?: <https://alsanplastik.com.tr/plastik-ekstruzyon/> adresinden alınmıştır.
- URL-13. (2025, Mart 15). Finale ek Kompozit Malzemeler Dersi: Çalışma Konuları ve Çalışma Soruları [PDF]. Bartın Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü.: <https://cdn.bartın.edu.tr/metalurji/d7ee7cd9-f063-4669-8e1c-393503ed6ffb/finale-ek-kompozit-malzemeler-dersi-calisma-konulari-ve-calisma-sorulari.pdf> adresinden alınmıştır.
- URL-14. (2025, Mart 15). *Polimerik Nanokompozitler ve Kullanım Alanları [PDF]*. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 7(1), 111–118.: <https://acikerisim.aksaray.edu.tr/server/api/core/bitstreams/e61db2c3-51a4-48fd-ab24-300597037b1a/content> adresinden alınmıştır.
- URL-15. (2025, Eylül 21). Appropedia. Twin screw extruder design literature review (Türkçe). Appropedia.: https://www.appropedia.org/Twin_screw_extruder_design_literature_review/tr adresinden alınmıştır.
- Wang, D., Parlow, D., Yao, Q., & Wilkie, C. A. (2002-b). Melt blending preparation of PVC-sodium clay nanocomposites. *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 8(3), 139–150.

- Wang, D., & Wilkie, C. A. (2002-a). Preparation of PVC-clay nanocomposites by solution blending. *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 4(4), 238–245.
- Wang, S., Li, X., & Yang, J. (2017). Microstructure and mechanical properties of graphene nanoplatelets reinforced polyphenylene sulfide composites. *Composites Science and Technology*, 149, 59-66.
- Wang, X., Zhang, L., & Li, Y. (2012). Preparation of expanded graphite/poly (phenylene sulfide) composites with high thermal and electrical conductivity by rotating solid-state premixing and melt processing. *Journal of Materials Science*, 47(3), 1513–1520.
- Wang, X., Zhi, C., Watanabe, K., Taniguchi, T., & Golberg, D. (2018). Thermal conductivity of hexagonal boron nitride: From bulk to monolayer. *Nano Letters*, 18(4), 2491–2499.
- Wang, Y., Shi, Z., & Yin, J. (2019). Effect of graphene on the mechanical and thermal properties of polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 171, 62–72.
- Wang, Y., Shi, Z., Fang, J., & Xu, J. (2019). Mechanical, thermal and dielectric properties of h-BN reinforced polymer composites: A review. *Composites Part B: Engineering*, 164, 731–750.
- White, J. L., & Corcoran, J. M. (2001). *Twin screw extrusion: Technology and principles*. Hanser Publishers.
- Wu, X., Zhang, X., & Zhang, L. (2015). Preparation of PPS-carbon composites with high thermal conductivity. *Polymer Engineering & Science*, 55(5), 1100–1107.
- Xu, Z., Liu, Y., Zhao, X., Peng, L., Sun, H., Xu, Y., Ren, X., Jin, C., Xu, P., & Wang, M. (2016). Ultrastiff and strong graphene fibers via full-scale synergetic defect engineering. *Advanced Materials*, 28(30), 6449–6456.
- Yang C., Tian X., Liu T., Cao Y., Li D., (2017). 3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites: mechanism and performance. *Rapid Prototyping Journal* Vol. 23 Issue: 1, pp.209-215, [https:// doi.org/10.1108/RPJ-08-2015-0098](https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2015-0098).
- Yılmazbayhan, A. (2006). Maleik anhidritle graftlanmış oligomerlerin ve ipp/silikat nanokompozitlerin tepkimeli ekstrüzyon yöntemiyle sentezi ve karakterizasyonu. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Yu, J., Huang, X., Wu, C., Wu, X., & Jiang, P. (2018). Interfacial modification of boron nitride nanoplatelets for improved mechanical and thermal properties of polymer composites. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(15), 6644–6652.

- Zhang, Z., et al. (2012). Thermal conductivity and electrical properties of boron nitride nanocomposites. *Journal of Materials Science*, 47(16), 6032-6039.) (Lee, J. Y., et al. (2016). Effect of boron nitride on the crystallization behavior and thermal properties of polymer composites. *Polymer*, 103, 366-374.
- Zhang, X., Liu, L., Zhang, Y., & Wang, Q. (2020). Enhanced flexural and impact properties of carbon fiber reinforced polymer composites via improved fiber/matrix interfacial adhesion. *Composites Science and Technology*, 198, 108307.
- Zhao, X., Zhang, Q., Chen, D., & Lu, P. (2018). Enhanced mechanical properties of graphene/polymer composites via improved interfacial interaction. *Composites Part B: Engineering*, 155, 402–409.
- Zhen, Z., & Zhu, H. (2018). Structure and properties of graphene. In *Graphene* (pp. 1–12). Elsevier.
- Zhou, W. Y., Wang, C. F., Ai, T., Wu, K., Zhao, F. J., & Gu, H. Z. (2009). Thermal conductivity of polymer composites filled with graphene oxide. *Composites: Part A*, 40(5), 830–836.
- Zhou, W., Qi, S., An, Q., Zhao, H., & Liu, N. (2007). Thermal conductivity of boron nitride reinforced polyethylene composites. *Materials Research Bulletin*, 42(10), 1810–1817.
- Zhou, W., Yu, D., Min, C., Fu, Y., & Guo, X. (2009). Thermal conductivity of polymer composites filled with graphene oxide. *Journal of Applied Polymer Science*, 112(3), 1695–1703.
- Zhou, Y., Wang, Z., & Li, J. (2018). Influence of hexagonal boron nitride (hBN) fillers on the thermal conductivity and microstructure of polymer composites. *Composites Science and Technology*, 164, 1-9.
- Zhou, Y., Yao, Y., Chen, C. Y., Moon, K., Wang, H., & Wong, C. P. (2014). High thermal conductivity polymer composites filled with graphene oxide. *Scientific Reports*, 4, 4779.
- Zhou, Y., Liu, X., & Zhang, Q. (2020). Effect of fiber–matrix interfacial adhesion on mechanical properties of polymer composites. *Materials Today Communications*, 25, 101300.

ÖZGEÇMİŞ

İlköğretimi Trabzon'da Kanuni İlköğretim Okulu'nda bitirdikten sonra lise eğitimine 2013 yılında Affan Kitapçıoğlu Anadolu Lisesi'nde başladı. Lise eğitimini, 2017 yılında tamamlayarak aynı sene Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünü kazandı ve lisans eğitimine başladı. Öğrenim süresi boyunca çeşitli projelerde bursiyer olarak görev aldı. 2021 yılında bölüm birincisi olarak başarıyla mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans eğitimine başladı. Yüksek lisans eğitimi boyunca aktif bir şekilde çalışmalarını sürdürdü. 1 TÜBİTAK, 1 BAP projesinde yer aldı. 2023 yılında sunulmuş 3 bildirisi bulunmaktadır. Orta derecede İngilizce bilmektedir.