T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MWCNT, GNP, H-BN, BNNT İLE TAKVİYELENDİRİLMİŞ POLİFENİLEN SÜLFÜR (PPS) MATRİSLİ KOMPOZİTİN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Şükran GÜNEY YILMAZ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Doktora Programı

OCAK 2025

T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MWCNT, GNP, H-BN, BNNT İLE TAKVİYELENDİRİLMİŞ POLİFENİLEN SÜLFÜR (PPS) MATRİSLİ KOMPOZİTİN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Şükran GÜNEY YILMAZ
(20420949001)
ORCID: 0000-0002-0831-7593

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Doktora Programı

Danışman: Doç. Dr. Cihan KABOĞLU
ORCID: 0000-0002-6249-0565
İkinci Danışman: Doç. Dr. Yahya ÖZ
ORCID: 0000-0003-3784-0495

OCAK 2025

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün 230D001 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Bu tez, TM4121 numaralı TUSAŞ projesi ile desteklenmiştir.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Şükran GÜNEY YILMAZ

Eşime,

ÖNSÖZ

Doktora eğitimim boyunca bana rehberlik ederek verdiği destek ve katkılarından dolayı değerli danışman hocam Doç. Dr. Cihan KABOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım.
Bu çalışmada bana değerli katkılar sunan ve yardımlarını eksik etmeyen eş danışmanım Doç. Dr. Yahya ÖZ'e ve Dr. Merve ÖZKUTLU DEMİREL'e teşekkürlerimi sunarım.
TUSAŞ TM4121 projemizde birlikte çalıştığımız ekip arkadaşlarıma tüm destekleri için sonsuz teşekkür ederim.
Tez süreci boyunca izleme komitemde yer alarak tezimin ilerleyiş sürecinde fikirlerini ve desteklerini veren Doç. Dr. Şeyma Duman ve Dr. Öğretim Üyesi Ali Hüsnü BADEMLİOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.
Doktora tezim için TM4121 numaralı projeye destek veren Türk Havacılık ve Uzay Sanayi AŞ. teşekkürlerimi sunarım.
Bu doktora tezinin tamamlanması için 230D001 nolu proje desteği sağlayan Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinatörlüğüne teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte motivasyonumu hep yükselten, bana her zaman destek olan eşime teşekkür ederim. Her zaman ve her başarımda yanımda olan kıymetli aileme sonsuz teşekkür ederim.

Ocak 2025

Şükran GÜNEY YILMAZ
Metalurji ve Malzeme
Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **viii**
KISALTMALAR ..... **x**
SEMBOLLER ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Polimer Matrisli Nano Takviyeli Kompozit Malzemeler 2
1.2 Yüksek Performaslı Termoplastikler 5
1.2.1 Polifenilen sülfit 5
1.2.2 Polieter eter keton 6
1.2.3 Polieter keton keton 6
1.3 Karbon Bazlı Nanomalzemeler 8
1.3.1 Karbon siyahı 8
1.3.2 Grafen 8
1.3.3 Karbon nanotüp 9
1.3.4 Grafen nanoplatelet 9
1.4 Bor Bazlı Nano Takviyeler 10
1.4.1 Bor Nitrür 11
1.4.2 Bor Nitrür Nanotüp 11
1.5 Nano Takviyelerin Üretimi 12
1.6 Yüksek Performanslı Termoplastik Polimerlerin Sentez Yöntemi 15
1.7 Yüksek Performanslı Nanokompozit Malzemelerin Üretim Yöntemi 16
1.8 Termoplastik Nanokompozitlerin Havacılık Uygulamaları 19
1.9 Literatür Araştırması 21
1.10 Tezin Amacı 25
1.11 Tezin Hipotezi 26
2. MATERYAL VE METOT **27**
2.1 Çekme Testi 30
2.2 Çentiksiz Charpy Darbe Testi 31
2.3 Sertlik Testi 32
2.4 3 Nokta Eğme Testi 33
2.5 Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi 33
2.6 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Testi 34
2.7 Termogravimetrik Analiz 35
2.8 Dinamik Mekanik Analiz 35
2.9 Termal İletkenlik Testi 36
2.10 Elektriksel İletkenlik Testi 37

3. BULGULAR VE TARTIŞMA 38
3.1 Sıcak Pres İle Üretilen Nanokompozitlerin Çekme Testi 39
3.2 Sıcak Pres ile Üretilen Nanokompozitlerin Çentiksiz Darbe Testi 41
3.3 Sıcak Pres ile Üretilen Nanokompozitlerin Sertlik Testi 42
3.4 Sıcak Pres ile Üretilen Nanokompozitlerin 3 Nokta Eğme Testi 43
3.5 Sıcak Pres ile Üretilen Nanokompozitlerin SEM Analizi 44
3.6 Sıcak Pres ile Üretilen Nanokompozitlerin DSC Analizi 47
3.7 Sıcak Pres ile Üretilen Nanokompozitlerin TGA Analizi 49
3.8 Sıcak Pres ile Üretilen Nanokompozitlerin DMA Analizi 51
3.9 Sıcak Pres ile Üretilen Nanokompozitlerin Termal İletkenlik Testi 55
3.10 Sıcak Pres ile Üretilen Nanokompozitlerin Elektriksel İletkenlik Testi 57
3.11 Enjeksiyon Kalıplama ile Üretilen Nanokompozitlerin Çekme Testi 59
3.12 Enjeksiyon Kalıplama ile Üretilen Nanokompozitlerin Sertlik Testi 62
3.13 Enjeksiyon Kalıplama ile Üretilen Nanokompozitlerin 3 Nokta Eğme Testi 63
3.14 Enjeksiyon Kalıplama ile Üretilen Nanokompozitlerin SEM Analizi 65
3.15 Enjeksiyon Kalıplama ile Üretilen Nanokompozitlerin DSC Analizi 69
3.16 Enjeksiyon Kalıplama ile Üretilen Nanokompozitlerin TGA Analizi 70
3.17 Enjeksiyon ile Üretilen Nanokompozitlerin Termal İletkenlik Testi 73
4. SONUÇ VE ÖNERİLER 76
KAYNAKLAR 79
ÖZGEÇMİŞ 93

KISALTMALAR

BNNT : Bor nitrür nanotüp
CB : Karbon siyahı
CNT : Karbon nanotüp
CVD : Kimyasal buhar büyütme
DMA : Dinamik mekanik analiz
DSC : Diferansiyel taramalı kalorimetre
GNP : Grafen nano platelet
GO : Grafen oksit
H-BN : Hekzagonal bor nitrür
MWCNT : Çok duvarlı karbon nanotüp
PEEK : Polieter eter keton
PEKK : Polieter keton keton
PPS : Polifenilen sülfit
SEM : Taramalı elektron mikroskobu
SWCNT : Tek duvarlı karbon nanotüp
TGA : Termogravimetrik analiz
TPC : Termoplastik polimer kompozit

SEMBOLLER

°C	**:** Santigrat derece
GPa	**:** Gigapaskal
HV	**:** Vikers sertlik
MPa	**:** Megapaskal
N	**:** Newton
nm	**:** Nanometre
$T_{c,Ic}$	**:** Düşük sıcaklıklarda kristalleşme
T_c	**:** Kristalizasyon sıcaklığı
T_d	**:** Bozunma sıcaklığı
T_g	**:** Camsı geçiş sıcaklığı
T_m	**:** Erime sıcaklığı
TPa	**:** Terapaskal

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Termoplastik ve termosetlerin özellikleri..... **3**
Çizelge 1.2 : PPS, PEEK ve PEKK polimerlerinin özellikleri… **7**
Çizelge 1.3 : CNT ve GNP nano takviyelerin mekanik ve iletkenlik özellikler..... **10**
Çizelge 1.4 : BN ve BNNT nano takviyelerin özellikleri..... **12**
Çizelge 2.1 : PPS matris malzemesinin özellikleri…….....**27**
Çizelge 2.2 : Nano takviye malzemelerinin özellikleri **27**
Çizelge 2.3 : PPS nanokompozitlerinin ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama parametreleri **30**
Çizelge 3.1 : Sıcak Pres ile üretilen kompozitlerin çekme mukavemeti değerleri….**39**
Çizelge 3.2 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerin DSC değerleri…….**47**
Çizelge 3.3 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerin TGA değerleri…… **50**
Çizelge 3.4 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerin DMA değerleri……...**52**
Çizelge 3.5 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerin elektriksel iletkenlik değerleri…**57**
Çizelge 3.6 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen kompozitlerin çekme testi değerleri…….**59**
Çizelge 3.7 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen kompozitlerin DSC değerleri…….. **69**
Çizelge 3.8 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen kompozitlerin TGA değerleri……..**70**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Boeing 787 uçağının malzemelerine göre dağılımı..... **2**
Şekil 1.2 : Termoplastiklerin diğer malzemelere göre özelliklerinin kıyaslanması ... **4**
Şekil 1.3 : PPS moleküler yapısı **5**
Şekil 1.4 : PEEK molekül yapısı. **6**
Şekil 1.5 : PEKK moleküler yapısı..... **7**
Şekil 1.6 : (a) Karbon siyahı, (b) grafen, (c) SWCNT ve (d) MWCNT moleküler yapısı **9**
Şekil 1.7 : (a)BN, (b)BNNT moleküler yapısı **11**
Şekil 1.8 : Ekstrüzyon mekanizmasının şematiği..... **17**
Şekil 1.9 : Enjeksiyon kalıplama mekanizmasının şematiği **18**
Şekil 1.10 : Sıcak pres mekanizmasının şematiği..... **19**
Şekil 1.11 : Nanokompozit malzemelerin uçaklardaki uygulamaları..... **20**
Şekil 2.1 : Sıcak pres…… **28**
Şekil 2.2 : Nanokompozitlerin sıcak pres üretim parametreleri **28**
Şekil 2.3 : Sıcak pres ile üretilen nanokompozit levha ve çekme testi numuneleri... **29**
Şekil 2.4 : (a) Bilyalı öğütücü, (b) Ultrasonik karıştırma cihazları **29**
Şekil 2.5 : Çekme testi uygulanan cihaz görüntüsü..... **31**
Şekil 2.6 : Çentiksiz darbe deneyi uygulanan cihaz görüntüsü **32**
Şekil 2.7 : Sertlik deneyi uygulanan cihaz görüntüsü..... **32**
Şekil 2.8 : 3 nokta eğme deneyi uygulanan cihaz görüntüsü..... **33**
Şekil 2.9 : SEM analizi uygulanan cihaz görüntüsü..... **34**
Şekil 2.10 : DSC analizi uygulanan cihaz görüntüsü **34**
Şekil 2.11 : TGA analizinde uygulanan cihaz görüntüsü **35**
Şekil 2.12 : DMA analizi uygulanan cihaz görüntüsü..... **36**
Şekil 2.13 : Termal iletkenlik testi uygulanan cihaz görüntüsü..... **36**
Şekil 2.14 : Elektriksel iletkenlik testi uygulanan cihaz görüntüsü..... **37**
Şekil 3.1 : Sıcak pres ile üretilen PPS/MWCNT kompozitlerinin çekme testi grafiği……..……**39**
Şekil 3.2 : Sıcak pres ile üretilen PPS/GNP kompozitlerinin çekme testi grafiği **40**
Şekil 3.3 : Sıcak pres ile üretilen PPS kompozitlerinin darbe testi grafiği..... **41**
Şekil 3.4 : Sıcak pres ile üretilen PPS kompozitlerinin sertlik testi grafiği..... **42**
Şekil 3.5 : Sıcak pres ile üretilen PPS/ GNP kompozitlerinin eğme testi grafiği..... **43**
Şekil 3.6 : Sıcak pres ile üretilen PPS/ MWCNT kompozitlerinin eğme grafiği **44**
Şekil 3.7 : a) Saf PPS, b) %0,1 MWCNT, c) %0,5 MWCNT, d) %1 MWCNT, e) %5 MWCNT, f) %10 MWCNT SEM görüntüleri..... **45**
Şekil 3.8 : a) %0,1 GNP, b) %0,5 GNP, c) %1 GNP, d) %5 GNP, e) %10 GNP SEM görüntüleri..... **47**
Şekil 3.9 : Sıcak Pres ile üretilen kompozitlerin DSC ısıtma grafikleri **48**
Şekil 3.10 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerin DSC soğutma grafikleri **49**

Şekil 3.11 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerin TGA grafikleri..... **51**
Şekil 3.12 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerin depolamo modülü grafiği..... **53**
Şekil 3.13 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerin kayıp modülü grafiği..... **54**
Şekil 3.14 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerin tanδ grafikleri..... **55**
Şekil 3.15 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerin termal iletkenlik grafikleri..... **56**
Şekil 3.16 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerinin elektriksel iletkenlik grafikleri..... **58**
Şekil 3.17 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen karbon bazlı nano takviyeli kompozitlerin çekme grafikleri..... **60**
Şekil 3.18 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen bor bazlı nano takviyeli kompozitlerin çekme grafikleri..... **61**
Şekil 3.19 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen kompozitlerin sertlik grafikleri..... **62**
Şekil 3.20 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen karbon bazlı nano takviyeli kompozitlerin eğme grafikleri..... **63**
Şekil 3.21 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen bor bazlı nano takviyeli kompozitlerin eğme grafikleri..... **64**
Şekil 3.22 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen a) saf PPS, b)%0,1 MWCNT, c)%0,5 MWCNT, d)%1 MWCNT, e)%5 MWCNT ve f) %10 MWCNT takviyeli kompozitlerin SEM görüntüleri..... **65**
Şekil 3.23 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen a)% 0,1 GNP, b) %0,5 GNP, c) % 1 GNP, d)% 5 GNP ve e) % 10 GNP takviyeli kompozitlerin SEM görüntüleri..... **66**
Şekil 3.24 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen a)% 0,1 h-BN, b)% 0,5 h-BN, c)% 1 h-BN, d)% 5 h-BN ve e) % 10 h-BN takviyeli kompozitlerin SEM görüntüleri..... **67**
Şekil 3.25 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen a)%0,1 BNNT, b)%0,5 BNNT, c)%1 BNNT, d)%5 BNNT ve e) %10 BNNT takviyeli kompozitlerin SEM görüntüleri..... **68**
Şekil 3.26 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen karbon bazlı nano takviyeli kompozitlerin TGA grafikleri..... **71**
Şekil 3.27 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen bor bazlı nano takviyeli kompozitlerin TGA grafikleri..... **72**
Şekil 3.28 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen karbon bazlı nano takviyeli kompozitlerin termal iletkenlik grafikleri..... **74**
Şekil 3.29 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen bor bazlı nano takviyeli kompozitlerin termal iletkenlik grafikleri..... **75**

MWCNT, GNP, H-BN, BNNT İLE TAKVİYELENDİRİLMİŞ POLİFENİLEN SÜLFÜR (PPS) MATRİSLİ KOMPOZİTİN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Teknolojik ilerlemeler ve ağır çalışma koşulları, günümüzde kullanılan malzemelerin performans sınırları zorlanmaktadır. Bu durum, avantajlı özelliklere sahip kompozit malzemelerin geniş bir uygulama alanı bulmasını sağlar. Kompozit malzemelerin özellikleri eklenen takviye malzemesine, oranına ve uygulama yöntemine göre değişir. Malzeme boyutlarını nano ölçeğe düşürmek, güçlü bir faz-arayüzey etkileşimi sağlayarak kompozit malzemelerin özelliklerini geliştirir. Polimer nanokompozitler, benzersiz yapıları sayesinde çeşitli üstün özellikler ve birçok potansiyel uygulama alanı sunar. Polifenilen sülfür (PPS), hafifliği, yüksek mukavemeti, yüksek sıcaklıklara dayanımı, kolay erişilebilirliği ve üstün mekanik ile fiziksel özellikleri sayesinde özellikle havacılık endüstrisinde büyük ilgi görmektedir. Bir nanokompozit yapıda PPS termoplastik polimerinin, mekanik ve fiziksel özelliklerini daha da geliştirmek için nano takviyeler ile güçlendirilebilir. Nano takviyelerin matris içinde homojen dağılımı, mekanik, fiziksel, termal ve elektriksel iletkenlik özelliklerini iyileştirmek için çok önemlidir. Bu amaçla PPS polimerinin, mekanik, fiziksel ve iletkenlik özelliklerini iyileştirmek için çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT), grafen nanoplatelet (GNP), hekzagonal bor nitrür (h-BN) ve bor nitrür nanotüp (BNNT) ile takviye edilmiştir. Kompozit malzemeler, PPS matris malzemesinin farklı ağırlık oranlarında nano takviye malzemeler ile hem sıcak pres hem de enjeksiyon kalıplama ile üretimleri denenmiştir. Üretilen kompozit malzemelere çekme, darbe, üç nokta eğme, sertlik, DSC, TGA, DMA, SEM analizleri, termal ve elektriksel iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Kompozit malzemelerde, mekanik karıştırma sonrasında sıcak presli üretimlerinde aglomerasyonun oluşmasından dolayı mekanik özelliklerde düşüş gözlenmiştir. Termal iletkenlik özellikleri incelendiğinde, %10 ağırlıkça GNP eklendiğinde %490, %10 ağırlıkça MWCNT eklendiğinde ise %45 artış söz konusudur. Yarı iletken saf PPS'nin orta frekansta %10 ağırlıkça MWCNT eklendiğinde yaklaşık %222 oranında elektrik iletkenliği artarak iletken hale geldiği görülmüştür. Enjeksiyon kalıplama ile üretilen kompozitlerde öncesinde eriyik karıştırma yapıldığı için nano takviyeler PPS matrisi içerisinde SEM analizleri sonucunda homojen dağıldı gözlenmiştir. Bu da dört nano takviye malzemesi için de mekanik özekliklerin iyileşmesini sağlamıştır. Ayrıca termal iletkenlik değerinin ağırlıkça %10 MWCNT takviyelendirildiğinde %1375 oranında ciddi bir artışa sebep olduğu gözlenmiştir. Karbon ve bor bazlı nano takviyeli PPS kompozitlerinin üretimi için en uygun yöntemin eriyik karıştırma sonrası enjeksiyon kalıplama olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Kompozit malzeme, PPS, MWCNT, GNP, h-BN, BNNT.

INVESTIGATION OF TAILORED PROPERTIES OF POLYPHENYLENE SULFIDE (PPS) MATRIX COMPOSITE REINFORCED WITH MWCNT, GNP, H-BN, BNNT.

SUMMARY

Technological advancements and demanding working conditions challenge the performance limits of materials used today. This situation allows composite materials with advantageous properties to find wide application areas. The properties of composite materials depend on the type of additive material, its proportion, and the applied production method. Reducing the material dimensions to the nanoscale enhances the properties of composite materials by providing a strong phase-interface interaction. Polymer nanocomposites offer various superior properties and many potential application areas due to their unique structures.Polyphenylene sulfide (PPS) has garnered significant attention, especially in the aerospace industry, due to its lightweight, high strength, resistance to high temperatures, easy accessibility, and excellent mechanical and physical properties. In a nanocomposite structure, the mechanical and physical properties of the PPS thermoplastic polymer can be further enhanced by reinforcing it with nanofillers. The homogeneous dispersion of nanofillers within the matrix is crucial for improving mechanical, physical, thermal, and electrical conductivity properties. For this purpose, the PPS polymer was reinforced with multi-walled carbon nanotubes (MWCNT), graphene nanoplatelets (GNP), hexagonal boron nitride (h-BN), and boron nitride nanotubes (BNNT) to enhance its mechanical, physical, and conductivity properties. Composite materials were produced using both hot pressing and injection molding methods, incorporating the nanofillers into the PPS matrix material at different weight ratios.The produced composite materials were subjected to tensile, impact, three-point bending, hardness, DSC, TGA, DMA, SEM analyses, as well as thermal and electrical conductivity measurements. In composite materials, a decrease in mechanical properties was observed due to agglomeration occurring during hot pressing production following mechanical mixing. Regarding thermal conductivity, a 490% increase was achieved with the addition of 10 wt.% GNP, while a 45% increase was observed with 10 wt.% MWCNT. It was found that the electrical conductivity of the semiconducting pure PPS increased by approximately 222% with the addition of 10 wt.% MWCNT at mid-frequencies, rendering it conductive.In composites produced via injection molding, the nanofillers were observed to be homogeneously distributed within the PPS matrix as confirmed by SEM analyses, which was due to prior melt mixing. This homogeneity contributed to improved mechanical properties for all four types of nanofillers. Furthermore, the thermal conductivity significantly increased by 1375% when 10 wt.% MWCNT was added. It was determined that the most suitable production method for carbon- and boron-based nanofiller-reinforced PPS composites is injection molding following melt mixing.

Keywords: Composite material, PPS, MWCNT, GNP, h-BN, BNNT.

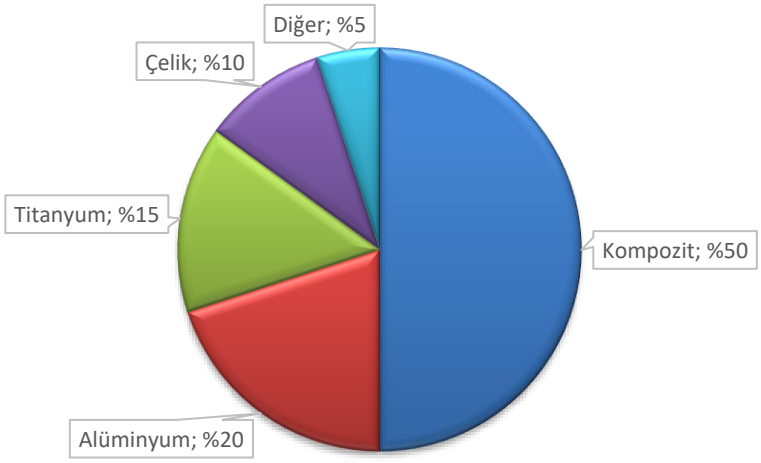
1. GİRİŞ

Teknolojinin sürekli gelişmesi, üstün özelliklere sahip malzemeler üzerine yapılan araştırmaları arttırmaktadır. Bu kapsamda kompozit malzemelere olan ilgi de aynı oranda yükselmektedir. Ancak, geleneksel kompozit malzemeler, yüksek sıcaklık dayanımı ve iletkenlik gibi belirli alanlarda istenen fiziksel ve kimyasal özellikleri sağlamakta yetersiz kalmaktadır. Polimelerin özelliklerini iyileştirmenin yaygın bir yolu, bu malzemelere nano takviyelerin eklenmesidir. Takviye malzemesinin türü, miktarı ve üretim yöntemi kompozit malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli rol oynamaktadır (Mefford ve diğ, 2017). Malzeme biliminde, genellikle termosetler olarak adlandırılan ısıyla kürlenen polimerler, yumuşak bir katı veya viskoz sıvı ön polimerinin geri döndürülemez şekilde sertleştirilmesiyle elde edilen polimer malzemelerdir. Termoplastik malzemeler ise, belirli bir sıcaklıkta şekillendirilebilen ve soğutulduğunda sertleşen geri dönüştürülebilir polimerlerdir. Sürdürülebilirlik ve geri dönüştürülebilirlik gerekliliklerini karşılayabilen termoplastik polimer matrisli kompozitler, karbon emisyonunu azaltma çabalarında öne çıkmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı termoplastik polimerler günümüzde otomotiv, uzay ve havacılık sektörlerinde tercih edilen bir polimer malzeme grubu haline gelmiştir (Ayre, 2018; Park ve diğ, 2019; Stewart, 2011).

Takviye malzemelerinin kompozit yapı içerisindeki homojen dağılımı, elde edilen malzemenin performansını doğrudan etkiler. Malzeme performansını koruyabilme yeteneği, takviye malzemesinin boyutlarının küçültülmesiyle elde edilir. Böylece matris/takviye malzemeleri arasındaki temas alanında artış meydana gelir. Doğada da yüzyıllardır kullanılan nanokompozitler, kemik, kabuk ve odun gibi dayanıklı yapılar olarak karşımıza çıkmaktadır (Ozkutlu ve diğ, 2021; Raquez ve diğ, 2013; Reddy, 2011). Literatürde ilk defa 1950'lerde tanımlanan nanokompozitler, 1976'da poliamid nanokompozitlerinin tanıtılmasıyla ivme kazanmış, Toyota'nın polimer/katmanlı kil mineral kompozitlerine dair çalışmaları sonrasında hem akademik hem de endüstriyel araştırmaların odağı haline gelmiştir (Okpala, 2013). Nano ölçekli malzeme

araştırmaları, bu malzemelerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin istenilen şekilde uyarlanabilmesi nedeniyle büyük önem taşır.

Havacılık endüstrisi, termoplastik polimerlerin kullanımı konusunda öncülük etmektedir. Uçak yapısal parçalarının yaklaşık %50'sinde polimer kompozitler kullanılmaktadır (Devaraju ve Alagar, 2021; Muthukumar ve diğ, 2021). Boeing 787, Şekil 1.1'de elde edilen verilerle ana kanat ve gövde bölümlerinde kompozitleri ana malzeme olarak kullanan ilk uçak olmuştur.



Şekil 1.1 : Boeing 787 uçağının malzemelerine göre dağılımı (Giurgiutiu, 2015).

Günümüzde modern uçakların yaklaşık %50'si kompozit malzemelerden oluşmakta olup, bu sayede geleneksel uçaklara kıyasla %20 daha az yakıt tüketilmekte ve karbon emisyonları azaltılmaktadır (Schmuck, 2021). İstenen özellikleri karşılamak için alternatif malzeme arayışı her geçen gün artmaktadır.

1.1 Polimer Matrisli Nano Takviyeli Kompozit Malzemeler

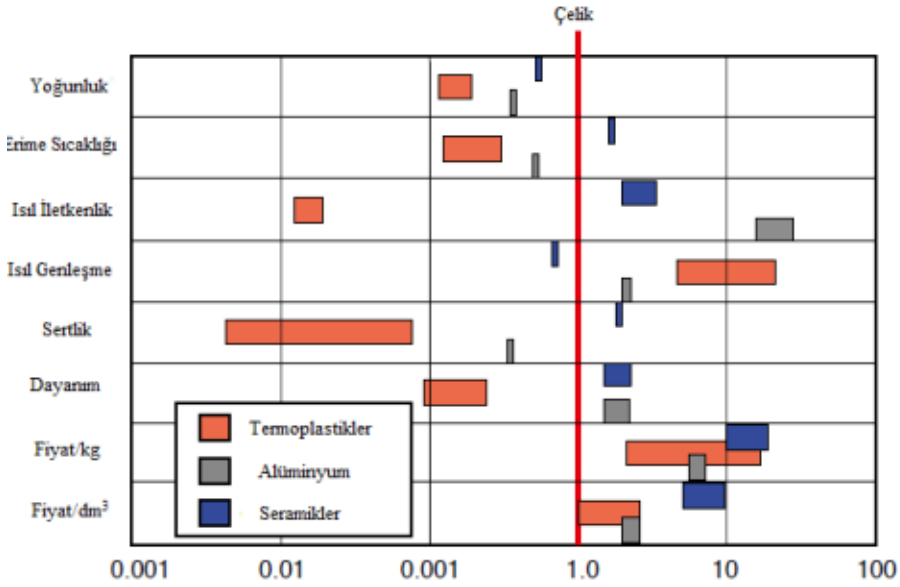
Polimer matrisli nano takviyeli kompozit malzemeler, fiziksel karışım veya kimyasal polimerleşme reaksiyonlarıyla üretilen ve homojen nano boyutta organik ya da inorganik takviye malzemeleri içeren polimer matrisler olarak tanımlanabilir. Bu kompozitlerdeki takviye maddeleri, çeşitli doğal veya sentetik polimerlerde, katmanlı materyaller, partiküller, lifli yapılar veya kümeler halinde bulunabilir (Huang ve diğ, 2012). Nanoyapılar, polimer matrisleriyle birleşerek sinerjik bir etki oluşturur ve bu nedenle son yıllarda kullanım alanları büyük bir artış göstermiştir (Gaddam ve diğ, 2016). Nanoyapıların kendilerine özel fiziksel ve kimyasal özellikleri, polimerlere

performans artışı sağlamakta ve bu özellikler, polimerlere havacılık, otomotiv endüstrisi, elektronik ve tıp gibi birçok alanda büyük bir potansiyel kazandırmaktadır (Huang ve diğ, 2012). Polimer matrisli nano takviyeli kompozitler, araç tamponlarından ileri düzey optoelektronik cihazlara kadar çok geniş bir kullanım yelpazesinde yer alabilmektedir (Crosby ve Lee, 2007). Nano takviye malzemelerin kompozit materyallerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin anlaşılması, nanokompozitlerin uygulama alanlarındaki başarılarının artırılmasında kritik bir rol oynamaktadır (Crosby ve Lee, 2007). Polimer matrisli nano takviyeli kompozitlerin kullanım alanları hızla genişlemektedir. Bu malzemelerin mevcut alanlardaki kullanımları arttıkça, aynı zamanda yeni uygulama alanlarında da yer bulmaya başlamaktadırlar. Mevcut alanlarda kullanımın yaygınlaşmasının yanı sıra, polimer matrisli nano takviyeli kompozitler, farklı sektörlerde de potansiyel uygulamalar geliştirmektedir. Polimer matrisler termoset ve termoplastik olarak ikiye ayrılırlar.

Termoplastikler, moleküller arasında zayıf, ancak molekül içi bağları oldukça güçlü olan doğrusal ya da dallanmış zincirli yapılar içerir.Bu yapıları sayesinde ısı ve basınç uygulandığında yeniden şekillendirilebilirler. Yarı kristal ya da amorf yapıda bulunabilen bu polimerlere polietilen, polipropilen, polistiren, naylonlar, polikarbonat, poliasetaller, poliamidimidler, polieter eter keton, polisülfon, polifenilen sülfit ve polieter imid gibi örnekler verilebilir (Thomas ve diğ, 2013). Termoplastiklerin doğrusal moleküler zincir yapıları, ısı uygulandığında moleküller arası bağların zayıflamasına ve zincirlerin sıvı gibi serbest hale geçmesine neden olur. Ancak, aşırı ısı uygulanması durumunda moleküler zincirler kırılarak malzemenin özellikleri bozulabilir. Buharlaşma nedeniyle iç yapıda bir değişiklik olmadığı sürece termoplastikler defalarca yeniden şekillendirilebilir. Şekil 1.2'de görüldüğü gibi diğer malzemelere göre avantajları mevcuttur (Osswald ve Menges, 2012).

Çizelge 1.1 : Termoplastik ve termosetlerin özellikleri.

Termoplastikler	Termosetler
Isı ve basınçla kolay şekillendirilir	Isıyla ayrıştırılamazlar
Yüksek kopma şekil değiştirme	Düşük kopma şekil değiştirme
Sınırsız raf ömrü	Sınırlı raf ömrü
Tekrar işlenebilirlik	Tekrar işlenemezler
Kısa kür süresi	Uzun kür süresi
Yüksek üretim sıcaklığı	Düşük üretim sıcaklığı



Şekil 1.2 : Termoplastiklerin diğer malzemelere göre özelliklerinin kıyaslanması.

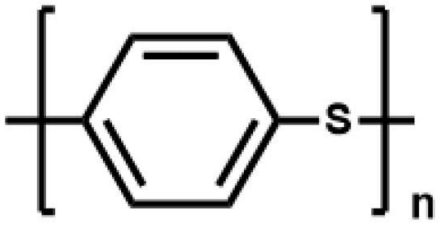
Termoset polimerler ise matris malzemesi olarak benzersiz avantajları nedeniyle sıklıkla tercih edilir (Chaudhary ve Ahmad, 2020). Genellikle sıvı halde bulunan termosetler, ısı etkisiyle veya kimyasal reaksiyonlar sonucunda sertleşir. Ancak, termoset polimerlerde polimerizasyon süreci geri dönüşü olmayan bir işlemdir; bu nedenle yüksek sıcaklıklarda bile yumuşamazlar (Çizelge 1.1) (Thomas ve diğ, 2013). Sertleşmemeleri için genellikle dondurucuda saklanmaları gerekir. Oda sıcaklığına çıkarıldıklarında 1 ila 4 hafta içinde sertleşmeye başlarlar ve şekillendirilmeleri mümkün olmayan bir duruma gelirler. Dondurucuda saklandıklarında raf ömürleri 6 ila 18 ay arasında değişir (Chaudhary ve Ahmad, 2020). Termosetlerin kimyasal yapılarına bağlı olarak çözünmez özellikte olmaları ve zorlu çevre koşullarına karşı uzun ömürlü olmaları önemli avantajlardır. Ancak, çok yüksek sıcaklıklar, çapraz bağların kopmasına ve yapının bozulmasına neden olabilir. Termoset polimerler, genellikle termoplastiklerden daha sert, dayanıklı ve boyutsal kararlılığı yüksek malzemelerdir. Vulkanize kauçuklar, epoksiler, fenolikler ve bazı polyester reçineleri gibi çapraz bağlı ve ağ yapılı polimerler, ısıyla sertleşen termosetlere örnek olarak verilebilir.

1.2 Yüksek Performaslı Termoplastikler

Yüksek performanslı termoplastikler, zorlu çalışma koşullarında üstün mekanik, termal ve kimyasal özellikler sunan, endüstriyel ve mühendislik uygulamalarında tercih edilen polimerlerdir. Havacılık endüstrisinde en çok tercih edilen termoplastik matrisler; polifenilen sülfür (PPS), polieter eter keton (PEEK), polieter eter keton (PEKK)'dur.

1.2.1 Polifenilen sülfür

PPS, yarı kristalin bir termoplastik polimer olarak, enjeksiyon kalıplama, üflemeli kalıplama ve ektrüzyon gibi sıcak şekillendirme yöntemlerine uygundur. Yüksek sıcaklık dayanımı, mekanik dayanım, kimyasal direnci ve boyutsal kararlılığı sayesinde zorlu koşullarda tercih edilmektedir (Fitzharris ve diğ, 2018; Furushima ve diğ, 2017; S. M. Khan ve diğ, 2016). Yüksek dayanıklılık, düşük yoğunluk ve işleme kolaylığıyla otomotiv, elektronik ve havacılık sektörlerinde yüksek performanslı uygulamalarda ön plana çıkmaktadır. Düşük darbe dayanımı nedeniyle kırılgan bir yapıya sahip olan PPS, birden fazla aromatik fenil halkası ve kükürt atomundan oluşur (Şekil 1.3). Kükürt grupları düzlemsel zikzak yapısı oluştururken, fenil halkaları bu yapıya 40-45° açıyla bağlanır. Bu bağlanma açısı, fenil halkalarının sınırlı hareket kabiliyetiyle birlikte, PPS'in yüksek termal özelliklerine katkı sağlar (Kemmish, 2011; Rahate ve diğ, 2013).



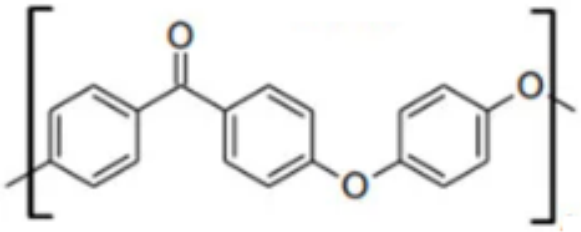
Şekil 1.3 : PPS moleküler yapısı (Y. Gao ve diğ, 2022).

PPS, diğer geleneksel polimerlere kıyasla daha yavaş kristalleşir ve mekanik özellikleri kristalinite derecesi ile yapısal morfolojisine bağlıdır. Kristalinite derecesinin yükselmesiyle mekanik özelliklerde iyileşme sağlanır, bu da elastik modül ve kimyasal direnç gibi özellikleri artırır. Kimyasal yapısı sayesinde PPS, yüksek erime sıcaklığına ve termal dirence sahiptir; çalışma sıcaklığı 200 °C, termal deformasyon sıcaklığı ise 260 °C'dir. Ayrıca PPS, yüksek alev direncine sahiptir. Oda sıcaklığında bilinen bir çözücüsü olmamakla birlikte yüksek kimyasal direnç gösterir;

ancak camsı geçiş sıcaklığı (T_g) aşıldığında kimyasal direnci düşebilir. PPS geri dönüştürülebilir yapısı sayesinde kolayca yeniden şekillendirilebilir (Furushima ve diğ, 2017; Kemmish, 2011; Rahate ve diğ, 2013; Shabaev ve diğ, 2019).

1.2.2 Polieter eter keton

PEEK, karbon, hidrojen ve oksijen atomlarını içeren, kararlı ve aromatik yapıda yarı kristalin bir termoplastik polimerdir (Miletić ve diğ, 2018; Silthampitag ve diğ, 2016). Polimer zincirlerinde Şekil 1.4'deki gibi yüksek miktarda fenil halkası ve güçlü hidrojen bağları oluşturan karbon içeriği, malzemenin sertliğini ve yüksek T_g değerine katkıda bulunur.



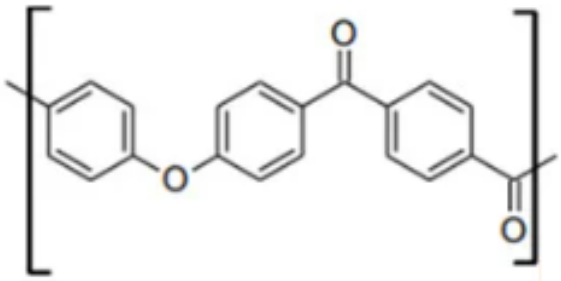
Şekil 1.4 : PEEK molekül yapısı (Doumeng ve diğ, 2021).

PEEK, ısı ve kimyasallara karşı mükemmel bir direnç sergiler. Ayrışma sırasında düşük duman ve minimum yanma gazı salınımı ile düşük alev oluşumu sağlaması, onu düşük yanıcılık gerektiren uygulamalar için ideal kılar. PEEK aynı zamanda yüksek biyouyumlu bir polimerdir. Konsantre sülfürik asit, PEEK'nu çözebilen tek kimyasal olarak bilinir. Yüksek sertlik ve dayanıklılık özellikleri gösteren PEEK, düşük sürtünme katsayısıyla yüksek sürtünme ve aşınma direncine sahiptir. Ayrıca PEEK, özellikle 143 °C'lik T_g'nin altındaki sıcaklıklarda düşük sürünme ve düşük büzülme özellikleri gösterir. PEEK, -60 °C ile 260 °C arasındaki sıcaklık aralığında özelliklerini kaybetmeden kullanılabilir. 334-345 °C'lik erime sıcaklığı (T_m) aralığına sahiptir (Kern ve Lehmann, 2012; Neumann ve diğ, 2014; Schmidlin ve diğ, 2010; L. Zhou ve diğ, 2014).

1.2.3 Polieter keton keton

PEKK, yarı krsitalin yapıda doğrusal bir polimerdir (Sakihara ve diğ, 2019). PEEK'e kıyasla ikinci bir keton grubunun varlığı nedeniyle %80 daha yüksek basınç dayanımı mekanik ve fiziksel özelliklere sahiptir (Şekil 1.5) (Klur ve diğ, 2019). Polimerler için performans piramidinin en üst kademesini temsil eder. Yüksek boyut kararlılığı,

mükemmel biyouyumluluk, düşük yoğunluk ve aşınma direnci gibi avantajlar sağlar (Fokas ve diğ, 2019; Oh ve diğ, 2018). 240-260 °C aralığında çalışma sıcaklığına sahiptir. Yaklaşık olarak 100 MPa çekme dayanımına (Çizelge 1.2), 50-60 J/m darbe dayanımına ve R110-120 sertlik değerine sahiptir. PEKK, otomotiv, havacılık, uzay ve tıp gibi çeşitli endüstrilerde geniş bir kullanım alanına sahiptir (Yahya ve diğ, 2022). Otomotiv sektöründe motor bileşenleri, elektrik araç parçaları ve yakıt hücrelerinde; havacılık sektöründe ise iç ve dış yapısal parçalar, yalıtım malzemeleri ve termal uygulamalarda kullanılır.



Şekil 1.5 : PEKK moleküler yapısı (Zol ve diğ, 2023).

Tıbbı alanda ise PEKK, implantlar ve cerrahi aletler için tercih edilir. PEKK'in dayanıklılığı ve termal kararlılığı, karmaşık parçaların üretiminde avantaj sağlar. Ayrıca enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve 3D baskı gibi çeşitli yöntemlerle kolayca şekillenebilir (Choupin ve diğ, 2017, 2018; Yan ve diğ, 2018).

Çizelge 1.2 : PPS, PEEK ve PEKK polimerlerinin özellikleri (Arif ve diğ, 2020; Gu ve diğ, 2014; Leung ve diğ, 2011; X. Yang ve diğ, 2017).

	PPS	PEEK	PEKK
Density (g/cm^3)	1,43	1,3	1,29
T_g (°C)	81-97	143-157	153-177
T_m (°C)	280-295	322-346	347-373
Çekme Mukavemeti (GPa)	48-86	70-103	100-116
Termal İletkenlik (W/mK)	0,22	0,25	0,20

Çizelge 1.2'deki polimerler incelendiğinde PPS, yüksek sıcaklık gerektiren diğer polimerlere kıyasla işlenebilirlik açısından belirgin avantajlar sunmaktadır. Bu durum, PPS'in termal stabilitesi ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi özelliklerini korurken, işleme sırasında daha düşük enerji ve zaman maliyetleri yaratmasıyla ilgilidir. Ayrıca PPS, PEEK ve PEKK polimelerine kıyasla, genellikle daha düşük maliyetli olduğu görülmektedir (Furushima ve diğ., 2017). Bu maliyet avantajı, PPS'in geniş bir

uygulama yelpazesinde tercih edilmesini sağlamaktadır. PPS, performans ve maliyet arasındaki dengeyi başarılı bir şekilde sağlayarak hem ekonomik hem de teknik açıdan önemli avantajlar sunmaktadır.

1.3 Karbon Bazlı Nanomalzemeler

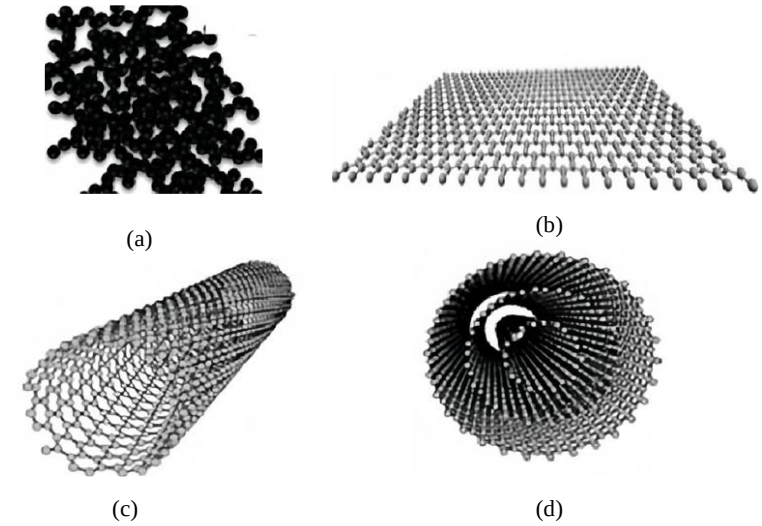
Karbon bazlı nanomalzemeler, yüksek çekme dayanımı, düşük yoğunluk, yüksek esneklik, üstün termal ve elektriksel iletkenlik gibi özelliklere sahiptir. Karbon siyahı (CB), grafen, grafen nanoplatalet (GNP) ve karbon nanotüpler (CNT) karbon bazlı nano takviyelere örnek verilebilir (Harussani ve diğ, 2022).

1.3.1 Karbon siyahı

Üstün elektriksel iletkenliği ve kimyasal kararlılığı nedeniyle iletken polimerik kompozitlerde en sık uygulanan nano takviye malzelerinden biridir. Bununla birlikte karbon siyahı, güçlü Van der Waals kuvveti nedeniyle kümeler halinde toplanır ve iletkenlik sağlar (Alam ve diğ, 2014; S. Zhou ve diğ, 2017). Polimer molekülleri ile etkileşime giren CB, kompozitin fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirici özellikler de göstermektedir (Shepherd ve diğ, 2016). CB, sahip oldukları küçük boyutlarından dolayı tek boyutlu ve iki boyutlu nano takviye malzemelerinden daha fazla avantaj sunar.

1.3.2 Grafen

Grafen, altıgen bir petek örgüsüne bağlı tek bir grafit katmanına verilen isimdir.Tek katmanlı grafen, Şekil 1.6 a'daki gibi tamamen iki boyutlu bir malzemedir. Grafen yüksek termal iletkenlik, mekanik ve elektriksel özellik sunmaktadır (Balandin ve diğ, 2008; Lee ve diğ, 2008; Williams ve diğ, 2007). Tek tabakalı grafenin yaklaşık 40 N/m kırılma gücüne ve 1 TPa elastik modülüne sahip olduğu görülmektedir (Lee ve diğ, 2008). Oda sıcaklığındaki termal iletim değerleri yaklaşık olarak 5000 W/mK civarındadır (Geim, 2009). Yüksek termal iletkenlik, elastik özellikler ve yüzey / hacim oranının birleşimi, grafeni polimerik malzemelerin termal, mekanik ve bariyer özelliklerinin güçlendirilmesi için eşsiz bir aday yapmaktadır (Mortazavi ve diğ, 2013; Mortazavi ve Ahzi, 2012; Stankovich ve diğ, 2006).



Şekil 1.6 : (a) Karbon siyahı, (b) grafen, (c) SWCNT ve (d) MWCNT moleküler yapısı (Harussani ve diğ, 2022).

1.3.3 Karbon nanotüp

CNT'ler, silindirik veya çubuk benzeri karbon yapılarına sahip allotroplardır. Tek duvarlı karbon nanatüpler (SWCNT) ve çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) olarak iki ana türe ayrılırlar. SWCNT'ler tek bir karbon atomu katmanının silindirik bir şekle dönüşmesiyle oluşur, MWCNT 'ler ise iç içe geçmiş iki veya daha fazla karbon atomu katmanına sahiptir. CNT'ler yüksek termal ve elektriksel iletkenlikleri, yüksek mekanik dayanımı sebebiyle kompozit malzemelerde nano takviye olarak tercih edilmektedir. MWCNT'lerin seri üretim kolaylığı, düşük maliyet ve kimyasal kararlılık özelliklerinden dolayı SWCNT'lere göre tercih edilebilir. CNT'ler yüksek sertlik, düşük yoğunluk, yüksek dayanım, elektriksel iletkenlik ve optik özellikler gibi çok yönlü özelliklere sahiptir (Bethune ve diğ, 1993). CNT'ler savunma sanayinde kurşun geçirmez yeleklerde, uçak kanatlarında ve otomotiv sanayinde yüksek performanslı kompozitlerde, ayrıca elektronik alanında yüksek kapasiteli hızlı şarj edilebilir lityum iyon pillerin geliştirilmesi için elektrotlarda ve ince film malzemelerinde, organik el tipi ekranlar için esnek elektrotlarda, süper kapasitörlerde ve kimyasal ve biyo sensörlerde kullanılabilir (Byrne ve Gun'ko, 2010; Sangoi, 2003).

1.3.4 Grafen nanoplatelet

GNP'ler, iki boyutlu nano parçacık yapısında üst üste dizilmiş grafen katmanlarından meydana gelir. Bu yapıların özellikleri, atomik katman sayısı, platelet yapısının biçimi, oksijen içeriği ve parçacık boyutu gibi fiziksel ve kimyasal özelliklere göre

değişiklik gösterir (Montazeri ve diğ, 2010; Sheshmani ve diğ, 2013). GNP'ler, hafif yapıları, yüksek en-boy oranları, elektriksel ve termal iletkenlikleri, dayanıklılıkları, uygun maliyetleri ve düzlemsel yapıları gibi avantajlı özellikleriyle öne çıkar (Çizelge 1.3) (Öztürkmen ve diğ, 2023; Sengupta ve diğ, 2011; S.-Y. Yang ve diğ, 2011). Yüksek kaliteli GNP'ler doğal grafitten üretilebilir; bu da onları, bazı uygulama alanlarında CNT'lere ekonomik bir alternatif haline getirir (Chung, 2016; Li ve diğ, 2008; Naz ve diğ, 2016; S. K. Yadav ve Cho, 2013).

Çizelge 1.3 : CNT ve GNP nano takviyelerin mekanik ve iletkenlik özellikler (Dresselhaus ve diğ, 2004; Fang ve diğ, 2020; Lekawa-Raus ve diğ, 2014; Osmani ve diğ, 2014; Sang ve diğ, 2019; Shimamura ve diğ, 2014; Zhu ve diğ, 2002).

	CNT	GNP
Çekme Mukavemeti (GPa)	10-63	2×10^2
Termal İletkenlik (W/mK)	3×10^3	4×10^3
Elektriksel İletkenlik (S/cm)	$1{,}4 \times 10^3$	10^4-10^5
Yoğunluk (g/cm^3)	2,1	2,2

GNP ve CNT'ler, diğer karbon bazlı nano takviyelere kıyasla daha fazla tercih edilmektedir çünkü üstün mekanik, elektriksel ve termal özellikler sunarlar. Bu nano takviyeler, yüksek yüzey alanları sayesinde polimer matrisi ile güçlü bir bağ kurarak kompozit malzemelerin dayanıklılığını ve iletkenliğini artırır. Ayrıca, düşük yoğunlukları ile kompozitlerin hafif olmasını sağlarken, yüksek sıcaklık dayanıklılıkları ve termal iletkenlikleri, onları ısıya duyarlı uygulamalar için ideal hale getirir. CNT ve GNP'nin işlenmesi daha kolaydır ve genellikle daha düşük maliyetli üretim süreçlerine sahiptir. Bu nedenlerle MWCNT ve GNP, diğer karbon bazlı nano takviyelere göre daha geniş bir uygulama alanına sahiptir ve mühendislik malzemeleri için tercih edilen takviye materyalleri arasında öne çıkmaktadır (Dresselhaus ve diğ, 2004; Montazeri ve diğ, 2010; Sangoi, 2003; Sheshmani ve diğ, 2013;).

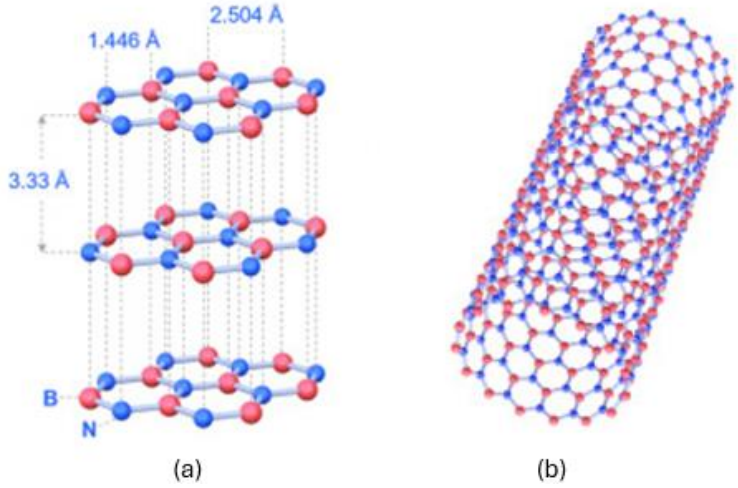
1.4 Bor Bazlı Nano Takviyeler

Bor esaslı nano takviyeler, yüksek termal kararlılık, sertlik ve aşınma direnci, elektriksel ve termal iletkenlik ile yüksek yüzey alanı/hacim oranı gibi benzersiz özelliklerinden dolayı kompozit malzemelerde kullanılmaktadır. Ancak, maliyet ve işleme zorlukları gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Farklı boyutsal yapılara

sahip bor esaslı nano takviyelere örnek olarak Bor nitrür (BN) ve Bor nitrür nanotüp (BNNT) gösterilebilir.

1.4.1 Bor Nitrür

BN, Şekil 1.7'de görüldüğü gibi bor ve azot elementlerinden oluşan bir bileşik olup, kimyasal yöntemlerle üretilmektedir. Genellikle bor oksit, karbon ve azotun 1450-1600 °C sıcaklık aralığında reaksiyona sokulmasıyla elde edilir (Hwang ve diğ, 2010). BN'nin, altıgen ve kübik olmak üzere iki farklı kristal yapısı bulunmaktadır. h-BN, grafitle aynı kristal yapıya sahip olması nedeniyle "beyaz grafit" olarak da adlandırılır. Bu malzeme, yüksek kimyasal kararlılığı, yüksek oksidasyon sıcaklığı, yüksek elektriksel direnci, termal iletkenliği, yüksek hidrojen depolama kapasitesi ve geniş bant aralığı (5,5 eV) gibi özellikleriyle önemli bir yere sahiptir (Lin et ve diğ, 2007). BN, seramik malzemeler arasında en düşük yoğunluğa sahiptir. İnert bir atmosferde 3000 °C'ye, hava ortamında ise 1400 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır. Ayrıca 0-2000 °C arasındaki ani sıcaklık değişimlerine karşı dirençlidir (Qiu ve diğ, 2009). BN'nin üretim yöntemi; katalizörler, reaksiyon ortamı ve başlangıç malzemesi gibi faktörlere bağlı olarak nanotüp, nanokapsül, nanoparçacık ve nanokümeler gibi çeşitli nanoyapılar oluşturur.



Şekil 1.7 : (a)BN, (b)BNNT moleküler yapısı (Y. Lu ve diğ, 2023).

1.4.2 Bor Nitrür Nanotüp

BNNT'ler, bor ve azot atomlarının altıgen bir kafes yapısında düzenlenmesiyle oluşan nanotüplerdir. Benzersiz derecede yüksek bir Young modülüne sahip olduklarından, oldukça sert ve dayanıklıdırlar. Yüksek esneklik gösterirler ve büyük şekil değişimlerine kırılmadan dayanabilirler. Son derece hafif olmaları, BNNT'leri hafif

kompozit malzemelerde ideal bir seçenek haline getirir. Bunun yanı sıra, BNNT'ler elektriksel olarak yalıtkan özellik taşır (Chopra ve Zettl, 1998; Golberg ve diğ, 2010; Ishigami ve diğ, 2003; J. Wang ve diğ, 2009). Kimyasal maddelere karşı oldukça dirençlidirler ve sert kimyasallara maruz kaldıklarında bile yapısal bütünlüklerini korurlar. Düşük bir termal genleşme katsayısına sahip oldukları için sıcaklık değişimlerinden fazla etkilenmezler. Ayrıca mükemmel bir termal iletkenlik sergileyerek ısıyı verimli bir şekilde iletebilirler (Çizelge 1.4). Yüksek bir erime noktasına sahiptirler. Kompozit malzemelerde, mukavemet ve sertliği artırmak amacıyla takviye malzemesi olarak tercih edilirler (Chen ve diğ, 2004; Zhi ve diğ, 2008).

Çizelge 1.4 : BN ve BNNT nano takviyelerin özellikleri (Arenal ve diğ, 2011; Belkerk ve diğ, 2016; Chang ve diğ, 2006).

	BNNT	h-BN
Çekme Mukavemeti (GPa)	61,1	68-215
Termal İletkenlik (W/mK)	350-2400	600
Elektriksel İletkenlik (S/cm)	$3{,}33 \times 10^{-3}$	$10^{-14} – 10^{-6}$
Yoğunluk (g/cm^3)	2,08 – 2,27	2,1

Her iki nano takviye malzemesi mükemmel termal iletkenlik sunarken, elektriksel yalıtkanlıklarını koruyarak, özellikle elektronik ve ısı yönetimi uygulamalarında benzersiz bir avantaj sağlar. BNNT, karbon nanotüplere benzer yapısıyla kompozitlerin mekanik mukavemetini artırırken, h-BN ise aşınma direnci ve yapısal stabilite sağlar. Ayrıca, düşük yoğunlukları ile hafif malzeme ihtiyacını karşılar ve çevresel olarak daha az zararlı üretim süreçlerine sahiptir. Bu özellikler, h-BN ve BNNT'yi yüksek performanslı kompozit malzemeler için ideal takviyeler haline getirmektedir (Chen ve diğ, 2004; Golberg ve diğ, 2010; Lin et ve diğ, 2007).

1.5 Nano Takviyelerin Üretimi

Nano malzemelerin özellikleri, büyük ölçüde kullanılan üretim yöntemlerine bağlı olarak farklılık gösterir. Kristalin yapılar, saflık, boyut, ürün kalitesi, mekanik dayanım ve iletkenlik gibi özellikler, seçilen üretim tekniğine göre belirgin şekilde değişebilir. Bu nedenle, nanomalzemeler için üretim yönteminin belirlenmesinde hedeflenen özellikler, kullanım alanı, ekonomik ve endüstriyel gereklilikler, güvenlik,

çevresel etkiler ve üretim süreçleri gibi çeşitli faktörlerin dikkate alınması gereklidir. Uygun üretim yöntemlerinin seçimi, nano malzemelerin geniş bir uygulama yelpazesinde etkin bir şekilde kullanılmasını sağlar ve bu malzemelerin potansiyellerini tam anlamıyla ortaya çıkarmalarına olanak tanır (C. Gao ve diğ, 2012). Geçmiş yıllarda, farklı uygulama alanlarına uygun CNT'ler üretmek, yüksek saflıkta ürünler elde etmek, işlevselleştirilmiş nanotüpler geliştirmek ve seri üretime uygun yöntemler tasarlamak amacıyla çeşitli CNT üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında lazer ablasyonu, ark deşarjı, kimyasal buhar biriktirme (CVD), buhar fazı büyümesi ve elektroliz gibi hidrotermal sentez teknikleri yer alır. CNT üretiminde, genellikle katı ya da gaz fazında karbon içeren hammaddeler ve çoğunlukla geçiş metalleri içeren katalizörler kullanılmaktadır (Balasubramanian ve Burghard, 2005; C. Gao ve diğ, 2012). Bor bazlı nano takviye malzemeleri de farklı yöntemlerle üretilebilir. Bu üretim yöntemleri arasında ark deşarjı, lazer ablasyonu, bilyalı öğütme, tavlama ve CVD yer alır. BN ise plazma işlemi, CVD, mekanik alaşımlama ve sol-jel teknikleri ile üretilebilir (Gogotsi, 2006). Grafen üretiminde kullanılan başlıca yöntemler, grafen oksit (GO) indirgeme, kimyasal buhar biriktirme (CVD), epitaksiyel büyüme, iyon implantasyonu ve soyulma teknikleri olarak sıralanabilir (Gayathri ve diğ, 2014).

CVD, gaz fazındaki kimyasal bileşiklerin, ısıtılmış bir alt malzeme üzerine katı halde biriktirildiği bir üretim yöntemidir. Bu süreçte, biriktirilmek istenen kimyasal bileşik, kapalı bir reaktörde gaz fazına dönüştürülür ve sıcaklığın etkisiyle alt malzemenin yüzeyine yerleşir. CVD yönteminde, üretilecek malzemenin özelliklerini belirleyen temel parametreler sıcaklık, basınç, gaz akış hızı ve tepkimeye giren gazların konsantrasyonlarıdır. Bu parametreler kontrollü bir şekilde ayarlandığında, CVD ile 1 ila 100 nm boyut aralığında, yüksek saflıkta malzemeler üretmek mümkündür (Baig ve diğ, 2021; Parlak, 2011; Pierson, 1999).

Sol-jel yöntemi, temel olarak üç ana adımdan oluşur: çözelti hazırlama, jelleşme ve çözücünün buharlaştırılması. Bu süreçlere ek olarak, nanomalzemelerin elde edilmesi için genellikle kalsinasyon işlemi uygulanır ve bu adım sonucunda nano malzeme üretimi tamamlanır. Sol-jel yöntemiyle üretilen nanomalzemelerin özellikleri üzerinde etkili olan temel parametreler, çözünme hızı, jelleşme süresi ve kullanılan öncül maddelerin yapısıdır. Bu yöntem, hızlı uygulanabilirliği, kalınlığın kontrol edilebilirliği, karmaşık şekilli parçaların kolaylıkla üretilebilmesi ve düşük maliyet

gibi birçok avantaja sahiptir. Bu özellikleriyle, sol-jel yöntemi nano malzeme üretiminde dikkat çeken bir yöntemdir (Baig ve diğ, 2021; Hench ve West, 2002; Sakka, 2005).

Ark deşarj yöntemi, plazma üretimi için anot ve katot gibi elektrotları içeren bir tekniktir. Bu elektrotlar genellikle argon veya helyum gibi bir arka plan gazının bulunduğu kapalı bir atmosfer odasında, yatay ya da dikey olarak yerleştirilir. Anot, toz haldeki hammadde ile doldurulurken, katot karşı pozisyona yerleştirilir. Oda, gaz veya sıvı bir ortamla doldurulduktan sonra güç kaynağı devreye alınır ve elektrotlar birbiriyle temas ettirilerek bir elektrik arkı oluşturulur. Bu ark, yüksek sıcaklıklara ulaşarak plazma oluşumunu başlatır. Sıcaklık etkisiyle toz halindeki hammadde süblimleşerek gaz fazına geçer. Oluşan sıcaklık farkı nedeniyle bu gaz, katoda doğru soğuyarak birikmeye başlar. Ark, belirli bir süre boyunca uygulanır ve ardından elektrik akımı kesilerek işlem sonlandırılır. Böylece, elde edilen nanomalzemeler katot yüzeyinde toplanır. Ark deşarj yöntemiyle üretilen nanomalzemelerin boyutları, elektrik arkının yoğunluğu ve süresi gibi işlem parametrelerine ve kullanılan hammaddenin özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Yüksek enerjili bir ark, malzemelerin buharlaşarak gaz fazına geçmesine ve ardından nanopartiküller oluşturmasına neden olabilir. Bu nanopartiküllerin boyutları, işlem parametrelerinin dikkatlice kontrol edilmesiyle optimize edilebilir (Arora ve Sharma, 2014; Das ve diğ, 2016; Subrahmanyam ve diğ, 2009).

Mekanik öğütme, bilyalı öğütme olarak da bilinen, kimyasal reaksiyon gerektirmeyen ve yukarıdan aşağıya doğru yapılan nano malzeme üretim yöntemlerinden biridir. Mekanik öğütme, kuru ve ıslak sistemler olmak üzere iki farklı şekilde uygulanabilir. Bu yöntem, tane boyutlarını mikron seviyesinin çift haneli altına indirgemeyi mümkün kılar. Yöntemin basitliği ve tekrarlanabilirliği, onu geniş bir uygulama alanında kullanılabilir hale getirir (Stolle ve Ranu, 2014). Ancak, bilyalı değirmenlerde kullanılan bilyalar, malzemelerin kirlenmesine neden olabilir. Bu durum, nanomalzemelerin saflığını olumsuz etkileyebilir ve istenmeyen bileşiklerin veya kirleticilerin varlığına yol açabilir (T. Yadav ve diğ, 2012).

Lazer ablasyon yöntemi, sıvı veya gaz ortamında bir katı hedef yüzeye lazer ışını uygulanarak hedef malzemenin sıcaklığını artırmayı ve bu sayede malzemenin buharlaşmasını sağlamayı içerir. Buharlaşan malzeme ve ortamda bulunan moleküllerin etkileşimiyle iyon üretimi ve ışık emisyonu meydana gelir, bu da ortamda

plazma fazının oluşmasına yol açar. Ardından, bu plazma çok hızlı bir şekilde soğutulur ve nano boyutta parçacıklar elde edilir. Bu yöntemle, buharlaşan malzemenin hızla soğutulması sayesinde 10 nm'den daha küçük boyutlarda yüksek saflıkta malzemeler üretmek mümkündür. Ancak, lazer ablasyon işlemi nanomalzemelerin saflığını ve kirlilik seviyesini etkileyebilir. Başlangıç malzemesinin saflığı yeterli değilse ya da işlem sırasında kirlilik oluşursa, üretilen nano malzemelerin saflığı olumsuz yönde etkilenebilir. Bu yöntem, özellikle buhar fazında kullanılabilen nano boyutlu parçacıklar için tercih edilen bir üretim tekniğidir ve SWCNT'ler gibi malzemelerin seri üretiminde de yaygın olarak kullanılır (Lange ve diğ, 2003; Lawrence, 2017; Stafe ve diğ, 2013)

1.6 Yüksek Performanslı Termoplastik Polimerlerin Sentez Yöntemi

Polimerler özel üretim süreçleriyle sentezlenir ve polimer zincirleri kimyasal reaksiyonlarla oluşturulur. Süreç, sıcaklık, basınç, zaman ve katalizörlerin kontrollü kullanımını gerektirir. Çözelti polimerizasyon yöntemi genellikle PPS sentezi için kullanılır. Çözelti polimerizasyonunda, PPS monomeri uygun bir çözücüde bir polimerizasyon reaksiyonuna tabi tutulur. Bu polimerizasyon yöntemi, toplu polimerizasyonda sıklıkla karşılaşılan sıcaklık kontrolü zorluğunu ortadan kaldırır. Polimerizasyon, gaz, sıvı veya katı fazların mevcut olabileceği homojen veya heterojen bir ortam yaratarak uygun bir çözücü veya seyreltici içinde gerçekleştirilebilir. Bu işlemin temel avantajı, çözücü veya seyrelticinin varlığı nedeniyle ortamın düşük viskozitesidir ve bu da daha kolay sıcaklık kontrolüne olanak tanır. Ek olarak, bu yöntemle polimerin jelleşmesi ve radikal transfer yoluyla istenmeyen çapraz bağlanma önlenebilir. Ancak, bir çözücünün varlığı, çözücüye zincir transfer reaksiyonları nedeniyle daha yavaş polimerizasyon hızlarına ve polimerin daha düşük molekül ağırlığına yol açar (Melo ve diğ, 2001; Schmeltzer ve diğ, 2008).

PEEK polimeri tipik olarak yoğunlaşma polimerizasyon yöntemiyle sentezlenir. Polimerizasyon, iki veya daha fazla fonksiyonel grubun birleşmesiyle basit molekülleri kovalent bağlarla bağlama sürecidir (Archer ve Lovell, 1995). Bu, polimerlerin oluşumu ve tipik olarak H_2O, HCI, NH_3, CH_3COOH, NaBr, CO_2 gibi küçük moleküllerin ayrılmasıyla sonuçlanır. Yoğunlaşma polimerizasyonunda, yoğunlaşma reaksiyonları yoluyla bir polimer elde etmek için en az iki noktada

yoğunlaşma geçirebilen monomerler gerekir. Polimer zincirleri, bu noktalarda ardışık yoğunlaşma reaksiyonları (polikondensasyon) ilerlemeleri yoluyla oluşur. PEEK polimeri, bu yöntemde 4,4'-diflorobenzofenon ve 1,4-diflorobenzen gibi monomerlerle uygun bir çözücüde bir yoğunlaşma reaksiyonuna girer. Elde edilen polimer çözücüden ayrılır, yıkanır ve şekillendirme işlemleri için hazırlanır (Pohl ve Saini, 2008). PEKK sentezi için, 4,4'-diflorobenzofenonun nitrasyonu, sülfürik asit varlığında nitrojen gazı kullanılarak gerçekleştirilir ve diflorodinitrobenzen elde edilir. Bu ürün sodyum hidrosülfit ile indirgenir. Yoğunlaşma reaksiyonu yoluyla PEKK polimerini üretir (Y. Wang ve diğ, 2014).

Bu yüksek performanslı termoplastik polimerlerin sentezi, özel kimyasal reaksiyonlar ve işlemler gerektirebilir. Sentez yöntemleri, kullanılan monomerlerin özelliklerine ve hedef polimerin istenen özelliklerine bağlı olarak değişebilir. Polimerizasyon işlemi genellikle kontrollü sıcaklık, basınç ve reaksiyon koşulları altında gerçekleştirilir. Sentezden sonra, polimerler uygun işleme ve şekillendirme yöntemleriyle istenen ürünlere dönüştürülebilir.

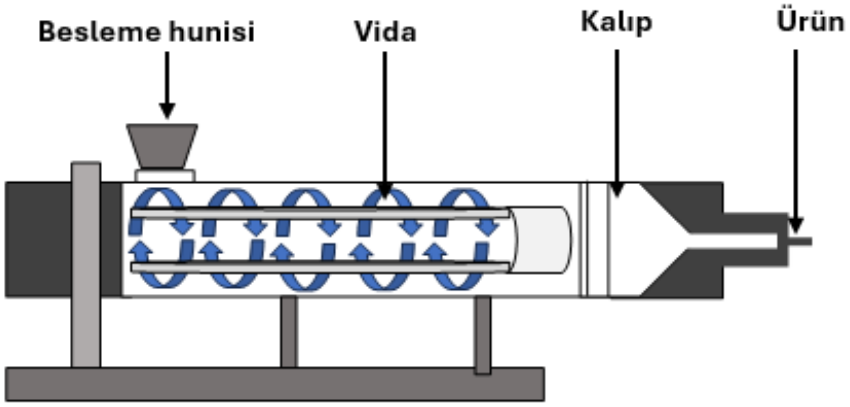
1.7 Yüksek Performanslı Nanokompozit Malzemelerin Üretim Yöntemi

Polimerler, çeşitli takviye malzemeleriyle güçlendirildiğinde yüksek mukavemet, termal ve elektriksel iletkenlik gibi avantajlar kazanır ve bu sayede geleneksel malzemelere bir alternatif olabilir. Günümüzde, termoplastik polimerlerin mukavemet ve iletkenlik performansı, nano boyutlu takviye malzemeleriyle, özellikle karbon ve bor allotroplarıyla geliştirilebilir. CNT ve GNP gibi karbon allotropları, BN ve BNNT gibi bor allotropları polimerlerde yaygın olarak kullanılır. Polimer matris nanokompozitleri kimyasal ya da mekanik işlemlerle üretilebilir. Bu alanda karşılaşılan en büyük zorluklardan biri, nano boyutlu parçacıkların polimer matrisinde homojen ve düzgün bir şekilde dağılmasını sağlamaktır (S.-Y. Yang ve diğ, 2011). Nano , mikro ölçekte aglomerasyon eğilimindedir, bu da nano parçacıkların matris içinde dağılmasını engelleyerek nanokompozitlerin performansını olumsuz etkiler. Bu aglomerasyon eğilimini önlemek için ultrasonikasyon gibi dispersiyon teknikleri kullanılır; bu yöntemler, parçacık kümelerini kırarak matriste daha homojen bir dağılım sağlamak için yüksek hızlı karıştırma ve bilyalı öğütme gibi yöntemlerle desteklenir. Nano parçacıkların yüzey fonksiyonelleştirilmesi de yüzey özelliklerini değiştirerek ve parçacıklar arasındaki çekici kuvvetleri azaltarak aglomerasyonu

önlemede etkilidir. Aynı şekilde, yüzey aktif maddelerle yapılan takviyeler, nano parçacıkların stabilize edilmesine yardımcı olur. Üretim yöntemi ve koşullarını kontrol etmek de aglomerasyonu azaltarak kompozit yapının homojenliğine katkı sağlar. Yüksek performanslı termoplastik matrislerin çeşitli nano takviyelerle kompozit malzeme üretmek için farklı üretim yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemler, matris ve takviye malzemelerinin eritilerek kalıplama yoluyla birleştirilmesine dayanır. Yüksek performanslı termoplastik polimer nanokompozitler incelendiğinde endüstride plastik enjeksiyon kalıplama ve sıcak pres gibi yöntemlerle üretildiği görülmektedir.

Enjeksiyon kalıplama yöntemi, termoplastik polimer malzemelerin işleme sıcaklıklarına kadar ısıtılarak akışkan hale getirilmesi, ardından eriyikler ekstrüderle pelet haline getirilmesi ve son aşamada enjeksiyon kalıplama işlemini içerir. Plastik enjeksiyon kalıplamada polimer hammadde olarak toz, granül ya da pelet şeklinde malzemeler kullanılır. Ekstrüder yardımıyla yapılan mekanik eriyik karıştırma Şekil 1.8'da belirlenen oranlardaki kompozit karışımları mekanizmada pelet haline getirilir, nano takviye malzemelerinin polimer matris içinde homojen olarak dağılmasına yardımcı olarak polimer matrislerin güçlendirilmesini sağlar.

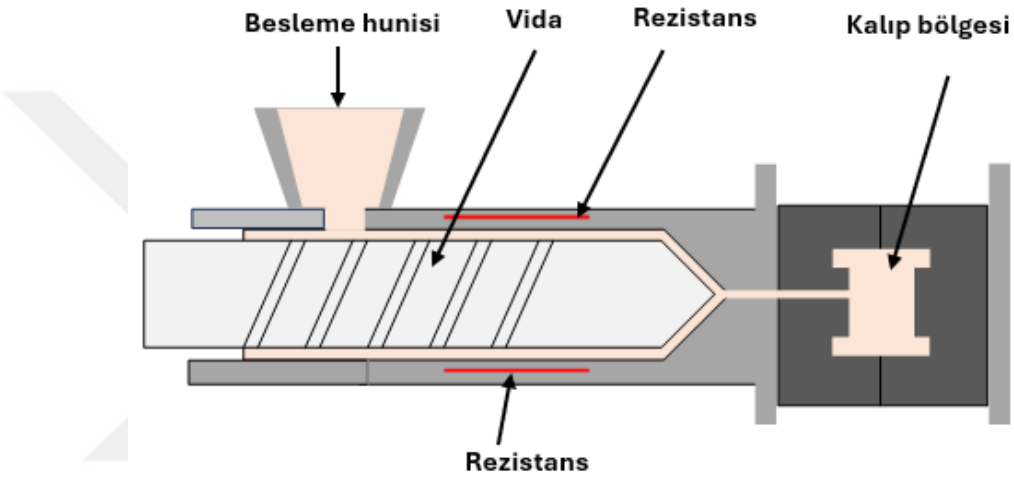
Pelet haline getirilmiş nanokompzitler Şekil 1.9'deki enjeksiyon kalıpla mekanizmasında besleme hunisine yerleştirilir. Bir enjeksiyon kalıplama süreci şu temel adımları içerir: kalıbın kapatılması, ergimiş veya yumuşak haldeki plastiğin kalıp boşluğuna enjekte edilmesi, plastiğin soğuyup katılaşması için kalıbın bir süre kapalı tutulması, kalıbın açılması ve son olarak bitmiş ürünün kalıptan çıkarılmasıdır (Harper, 2000).



Şekil 1.8 : Ekstrüzyon mekanizmasının şematiği.

Başarılı bir kalıplama işlemi, yalnızca uygun malzeme seçimi ve doğru kalıp tasarımıyla değil, aynı zamanda enjeksiyon parametrelerinin doğru şekilde

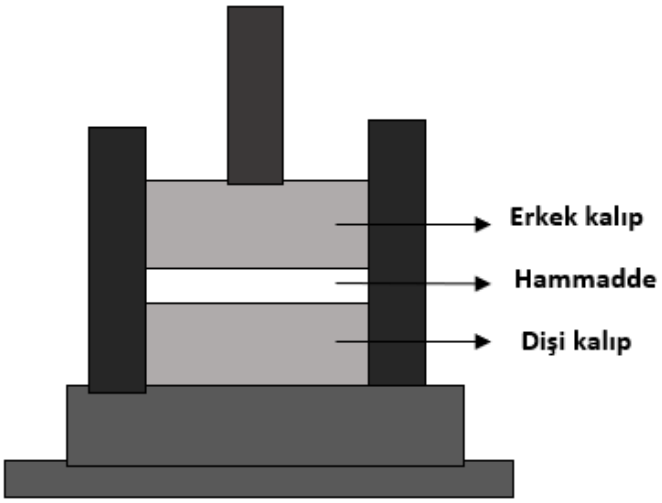
ayarlanmasıyla mümkündür. Ekonomik açıdan, kalıplamadaki hedef, her bir parçanın yüksek kalitede ve kısa bir kalıplama çevrimi içinde üretilmesidir. Enjeksiyon kalıplama sürecinde sıcaklık, basınç, süre ve hız gibi parametrelerin ayarlanması, üretilen parçaların çekme, çarpılma, mukavemet, ağırlık ve kalıntı gerilme gibi özelliklerini doğrudan etkiler. Bu süreçte, ekstrüder ve kalıp hattının yeterli miktarda malzeme ile dolması, hedeflenen polimer ürünlerin üretimi için belirli bir tüketim gerektirir. Ancak, üretim parametrelerinin optimize edilmesiyle, seri üretim sırasında enjeksiyon kalıplamada parametreler çok az değişiklik gösterir ve bu stabilite yöntemin tercih edilme sebeplerindendir.



Şekil 1.9 : Enjeksiyon kalıplama mekanizmasının şematiği.

Sıcak pres veya sıcak sıkıştırma kalıplama Şekil 1.10'da şematiği gösterilen yöntem, malzemelerin belirli sıcaklıklarda eritilip sıkıştırılarak kalıplara dökülmesiyle çalışır. Bu süreçte, önceden belirlenmiş boyutlara sahip erkek ve dişi kalıplar kullanılır. Seri üretim için tercih edilen yöntemlerden biri olan sıcak pres, farklı takviye malzemeleriyle zenginleştirilmiş polimer kompozitlerinin üretimini mümkün kılar. Ayrıca, toz polimer matris ve takviye malzemeleri, çeşitli karıştırma teknikleriyle işlendikten sonra kalıplama işlemi ile son ürüne dönüştürülür (Olabisi ve Adewale, 2016; Peters, 2007). Sıcak presleme sürecinde dikkat edilmesi gereken en önemli unsurlardan biri, uygun kalıp malzemesinin seçimidir. Kalıp, yüksek sıcaklıklarda işlenen tozla reaksiyona girmemeli ve presleme sırasında uygulanan basınca maruz kaldığında herhangi bir plastik deformasyona uğramamalıdır. Yöntemin dezavantajları arasında yüksek maliyetli bir frekans jeneratörüne ihtiyaç duyulması ve kalıbın yerleşiminin son derece düzenli yapılması gerekliliği bulunmaktadır. Kalıp doğru yerleştirilmediği takdirde, ısının düzgün bir şekilde dağılması mümkün olmaz.

Sistemin temel zorluğu, sıcaklık dağılımını homojen bir şekilde sağlamanın oldukça güç olmasıdır. Manyetik alan, kalıp içerisine yalnızca 0,5 ile 3 mm arasında nüfuz edebilir, bu da ısının kalıp içerisinde tamamen ısıl iletkenlik yoluyla yayılmasına neden olur. Bu durum, özellikle kalıbın merkezini ısıtmayı oldukça zorlaştırmaktadır. Ayrıca, bu yöntemde karşılaşılan bir diğer sorun, çok yüksek ısıtma oranlarında ortaya çıkan sıcaklık farklarının, kalıbın zarar görmesine yol açma riskidir.



Şekil 1.10 : Sıcak pres mekanizmasının şematiği.

Enjeksiyon kalıplama yöntemi sıcak pres üretim yöntemi ile karşılaştırıldığında seri üretim için daha uygun bir yöntemdir. Karıştırma ekstrüderi ile basınçlı bir şekilde polimer üretilmesi öncesinde kalıp yolluğunun doldurulması ve üretim sonrasında ekstrüder yolluğunda arta kalan hammadde miktarının fazla olması sebebiyle takviye parametreleri çok olan ve üretim hammaddesi kısıtlı miktarda olan üretimlerde özellikle hammaddelerin birim fiyatlarının yüksek olduğu düşünüldüğünde sıcak pres yöntemi enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretime göre daha uygundur.

1.8 Termoplastik Nanokompozitlerin Havacılık Uygulamaları

Termoplastik kompozitler, uçakların hem yapısal hem de yapısal olmayan parçalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. 1990'larda iniş takımı kapıları ve kirişler ile başlayan bu uygulamalar, zamanla taban panelleri gibi parçalara kadar yayılmıştır (Şekil 1.11). Airbus, A340-600 ve A380 modellerinde termoplastik kaplamalar, paneller ve ön kenarlar kullanarak bu malzemelerin büyük bir destekçisi olmuştur. Günümüzde TPC'ler ticari uçaklar, jetler ve askeri helikopterlerde klips, braket, takoz ve taban paneli gibi küçük bileşenlerde de yaygın şekilde tercih

edilmektedir. Örneğin, Gulfstream'in G650 modelinin dümen ve kuyruk kısmı tamamen TPC'lerden üretilmiştir. İç parçalarda ise tepsiler, koltuk çerçeveleri gibi termoplastik kompozitler yaygın olarak kullanılmaktadır. Airbus A330 ve A340'ın yan duvar ve tavan bağlantı raylarında termoplastik kompozitlerin tercih edilmesi, bu malzemelerin kabin içindeki önemini artırmaktadır. Sivil havacılıkta termoplastiklerin kullanımı, üretim yöntemlerindeki yeniliklerle birlikte hızlı bir artış göstermiştir.



Şekil 1.11 : Nanokompozit malzemelerin uçaklardaki uygulamaları.

Nanoteknolojideki ilerlemelerle birlikte, daha güvenli ve çevre dostu teknolojiler geliştirilmesine katkı sağlayacak yeni nesil nanokompozitlerin üretimi mümkün olacaktır. Termoplastik nanokompozitler, hafif yapıları, yüksek dayanımları ve üstün termal-mekanik özellikleri sayesinde, havacılık gibi çeşitli alanlarda büyük bir potansiyele sahiptir. Ancak, daha verimli sonuçlar elde etmek adına kapsamlı araştırmalar gereklidir. Kontrollü morfoloji ve yüzey kimyasına sahip nanopartiküller, polimer matris içinde daha iyi dağılma ve uyumluluk sağlayabilir. Çok işlevli nanopartiküllerin termoplastik matrislere entegrasyonu ise elektriksel iletkenlik, termal iletkenlik, alev geciktiricilik ve kendini onarma gibi daha geniş bir özellik yelpazesi sunan malzemelerin ortaya çıkmasına katkı sağlayabilir. Bu özelliklerin bir arada sunulması, diğer mekanik özelliklerden ödün vermeden nanokompozitlerin performansını artırmak için oldukça önemlidir. Ayrıca, nanopartiküller ve polimer matris arasındaki güçlü bağlar, nanokompozitlerin mekanik dayanımını artırmada kritik bir rol oynar. Havacılık uygulamalarında geniş kullanım sağlamak için termoplastik nanokompozitler için ölçeklenebilir üretim süreçlerinin geliştirilmesi önemlidir. Yüksek servis sıcaklıklarına dayanıklı, yüksek performanslı termoplastikler

matris malzemeleri olarak kullanılırken, fiziksel performans gereksinimleri doğrultusunda elektriksel ve termal iletkenlik, termal kararlılık ve alev geciktiricilik sağlayan nano takviye malzemeleri tercih edilmektedir. (Giurgiutiu ve Soutis, 2012; Hassan ve diğ, 2021; Rathod ve diğ, 2017; Vora ve Vora, 2006; Zeyrek ve diğ, 2022)

1.9 Literatür Araştırması

PPS/GNP ve PPS/MWCNT nanokompozitlerinin mekanik özellikler üzerindeki etkileri birçok çalışmada incelenmiştir (Cho, 2008; Deng, Lin, Cao ve diğ, 2015; X. Jiang ve Drzal, 2012; Z. Jiang ve diğ, 2012; Karsli ve diğ, 2022; M. O. Khan ve diğ, 2013; Pan ve diğ, 2021; Wu ve diğ, 2009; Xing ve diğ, 2018; J. Yang ve diğ, 2009; R. Yang ve diğ, 2018; Yu ve diğ, 2009). Bu araştırmalar, PPS ile MWCNT'ler arasında iyi bir dağılım ve güçlü bir etkileşim olduğunu, bunun da kompozitlerin mekanik performansını belirgin şekilde iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Nanokompozitlerin özelliklerini ve bu özelliklerdeki gelişmeleri etkileyen faktörler arasında sentez yöntemi, işleme koşulları ve takviye maddesi boyutları gibi çeşitli parametreler bulunur. MWCNT'lerin takviye maddesi olarak kullanılmasının öne çıkan faydalarından biri, polimer matris ile güçlü bir yapışma sağlayabilmesidir. Yapılan testler, en/boy oranı yüksek ve boyutları küçük olan takviye maddelerinin kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirmede daha başarılı olduğunu göstermiştir. Wu ve ekibinin yaptığı bir çalışmada, MWCNT takviye maddeleri eriyik karıştırma yöntemiyle doğrudan PPS matrisine eklenmiştir (Wu ve diğ, 2009). PPS'ye ağırlıkça %9 oranında MWCNT eklendiğinde, çekme dayanımında %84, Young modülünde ise %200 oranında artış sağlanmıştır. Bu durum, kompozitlerin çekme dayanımı ve dinamik mekanik özelliklerinin önemli ölçüde artmasına katkıda bulunmuştur. Bir başka çalışmada (Pan ve diğ, 2021), PPS/MWCNT nanokompozitleri, saf PPS ile karşılaştırıldığında eğme dayanımında %29 oranında bir artış göstermiştir. Cho ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada ise MWCNT takviyeli PPS kompozitlerin eğme ve tribolojik özellikleri incelenmiştir (Cho, 2008). Kompozitler, basınç kalıplama yöntemiyle üretilmiştir. Deneylerde, %0,2 ile %10 arasında değişen hacim oranlarında MWCNT konsantrasyonuna sahip PPS-CNT kompozitleri için üç nokta eğme testleri ve sertlik ölçümleri yapılmıştır. PPS-%0,2 CNT kompoziti, en yüksek eğme dayanımını sergilemiştir. Sertlik açısından ise hacimce %0,2 MWCNT ilavesi bir iyileşme sağlamış ancak daha yüksek konsantrasyonlarda sertlik azalmıştır.

Xing ve çalışma arkadaşları tarafından yürütülen başka bir araştırmada (Karsli ve diğ, 2022), ağırllıkça %1 ve %5 GNP içeren PPS/GNP kompozitleri çift vidalı bir ekstruder ile üretilmiştir. PPS/GNP kompozitlerinin çekme dayanımı ve modülünde, saf PPS'ye göre önemli bir artış gözlemlenmiştir; bu durum, nanoplakaların heterojen çekirdeklenmesi ve PPS ile GNP'ler arasındaki arayüz etkileşimi ile açıklanmaktadır (X. Jiang ve Drzal, 2012; Karsli ve diğ, 2022; Xing ve diğ, 2018). Başka bir araştırmada ise, yüksek termal ve kimyasal dayanıklılığa sahip olduğu için PPS polimer matris olarak seçilmiştir (X. Jiang ve Drzal, 2012). PPS/GNP nanokompozitleri, katı hal bilyalı öğütme (SSBM) ve ardından sıcak pres kalıplama yöntemleriyle üretilmiştir. Bu nanokompozitlerin mekanik özelliklerinde iyileşme sağlandığı ve gaz geçirgenliğinin azaldığı bulunmuştur. Mekanik özelliklerdeki bu artış, matris ile takviye fazı arasındaki güçlü arayüz etkileşimine dayandırılmaktadır. Bu arayüz etkileşimi sayesinde, matris ve takviye fazı arasındaki yük transferi artmakta ve böylece malzeme yüzeyinde oluşabilecek çatlakların yayılması önlenmektedir. Bu durum, darbe enerjisinin emilimini artırarak kompozit malzemenin darbe dayanımını potansiyel olarak geliştirmektedir. Diğer yandan PPS/BN nanokompozitleri incelendiğinde nano takviye malzemesinin homojen dağılımı matris/takviye ara yüzeyinde düzgün bir bağlanma ile sonuçlanmaktadır. BN oranı arttıkça kompozit malzemelerde aglomerasyon gözlenmektedir. Saf PPS'in eğme dayanımı, %5 ağırlık oranında h-BN takviyelendirildiğinde %25 artmaktadır. Ancak artan h-BN takviyesiyle birlikte eğme dayanımı değeri azalmaktadır. %60 ağırlık oranında h-BN takviyelendirildiğinde, yaklaşık olarak %58 eğme dayanımında azalış gözlenmektedir (X. Yang ve diğ, 2017). Bu, matristeki h-BN nano takviye malzemesinin belirli bir yüzdeden sonra homojen bir şekilde dağılmadığını ve mekanik değerlerde bir azalmaya neden olduğunu gösterir. Nanokompozitlerdeki h-BN nano takviyesi, sınır yağlayıcı özellik sağlamaktadır (G. Liu ve diğ, 2021). Nanokompozitlerdeki h-BN içeriğindeki artış, sürtünme katsayısının azalmasına sebep olur (Joshi ve diğ, 2016; Tharajak ve diğ, 2015).

İletkenlik özellikleri incelendiğinde, GNP'nin PPS matrisine eklenmesiyle kompozit malzemelerin elektriksel ve termal iletkenlik değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir (Gu ve diğ, 2014; X. Jiang ve Drzal, 2012; M. O. Khan ve diğ, 2013; S.-H. Kim ve diğ, 2020). PPS matrisinde oluşan GNP ağ yapısı, yüksek düzeyde termal ve elektriksel iletkenlik sağlar. Gu ve ekibinin çalışmasında, GNP/PPS kompozitlerinin termal

iletkenliğini etkileyen GNP'nin hacim oranı araştırılmıştır (Gu ve diğ, 2014). Çalışmada, PPS matrisine sırasıyla %3,2, %6,5, %13,5, %21 ve %29,3 hacim oranlarında GNP ilave edilmiştir. Sonuç olarak, GNP'nin, geleneksel termal iletken takviyelerden daha düşük hacim oranlarında bile termal iletkenlikte belirgin bir iyileşme sağladığı bulunmuştur. PPS matrisinde %6 ile %21 arasındaki hacim oranlarında GNP, termal iletkenlikte hızlı bir artış göstermektedir. Benzer şekilde, Kim ve çalışma arkadaşları, PPS/GNP kompozitlerinin elektriksel iletkenliğini artırmayı ve GNP eklemesinin elektriksel özellikler üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamıştır (S.-H. Kim ve diğ, 2020). %5 ağırlık oranında GNP eklenen PPS matrisinde elektriksel iletkenlik %108 oranında artmıştır. PPS/MWCNT nanokompozitlerinde de hem termal hem de elektriksel iletkenlikte bir artış elde edilmiştir (Deng, Lin, Xu, ve diğ, 2015; Díez-Pascual ve Naffakh, 2013; Noll ve Burkhart, 2011; Wu ve diğ, 2009; J. Yang ve diğ, 2009; Yoo ve diğ, 2016; Yu ve diğ, 2009; M. Zhang ve diğ, 2016). MWCNT'lerin PPS matrisinde oluşturduğu ağ yapısı, PPS zincirlerinin termal hareketliliğini sınırlayarak nanokompozitin termal kararlılığını artırır (Díez-Pascual ve Naffakh, 2013; Yoo ve diğ, 2016). Ayrıca, GNP nanopartiküllerinin termal ve elektriksel iletkenlik açısından MWCNT'lerden daha etkili bir takviye malzemesi olduğu görülmüştür (M. O. Khan ve diğ, 2013). MWCNT ve GNP nano takviyelerin geniş yüzey alanına sahip olması, onların PPS matrisiyle iyi bir yapışma sağlamasını ve yüksek takviye yoğunlukları ile yüksek en/boy oranları sayesinde PPS matrisinde fonksiyonel bir takviye ağı oluşturmalarını kolaylaştıran önemli bir avantajdır. Polimer malzemelerde, h-BN nano takviyelerin eklenmesi iletkenlik özelliklerini arttırmaktadır. PPS polimerine %60 ağırlık oranında h-BN takviyelendirildiğinde, termal iletkenlik 1,1 W/mK değerine yükselmektedir (X. Yang ve diğ, 2017). Dielektrik sabiti incelendiğinde, h-BN takviyelendirilmesiyle orantılı olarak arttığı görülür. Nano takviye malzemesinin boyutu da termal iletkenliği etkiler. Bor bazlı nano takviye malzemesi BN'nin termal ve elektriksel iletkenliği belirli bir oranda artırabildiği, ancak mekanik değerlerin yüksek oranlarda olumsuz etkilendiği görülmektedir (K. Kim ve Kim, 2016; Leung ve diğ, 2011; X. Yang ve diğ, 2017).

Tamamlanmış çalışmalara bakıldığında, SEM analizleri, PPS/MWCNT ve PPS/GNP kompozit malzemelerde homojen bir takviye dağılımının sağlandığını ortaya koymaktadır (Deng ve diğ, 2014; Deng, Lin, Xu, ve diğ, 2015; Dydek ve diğ, 2021; Z. Jiang ve diğ, 2012; J. Yang ve diğ, 2009; Yoo ve diğ, 2016; Yu ve diğ, 2009; Zeng ve

diğ, 2017). Bununla birlikte, yüksek miktarda nano takviye maddesi içeren kompozitlerde aglomerasyon oluşumu da gözlemlenmiştir (Wu ve diğ, 2009). MWCNT takviye maddesinin oluşturduğu ağ yapısı, polimer matrisin zincir hareketliliği ve kristalleşme davranışı üzerinde belirgin bir etki yaratmaktadır (J. Yang ve diğ, 2009). DSC analizleri, nanotüplerin yapısında önemli bir hasar veya bozulma olmadığını ve kristalinite oranlarında kayda değer bir değişiklik meydana gelmediğini göstermiştir (J. Yang ve diğ, 2009; Yu ve diğ, 2009). Bununla birlikte, CNT ilavesi kristalleşme hızında bir düşüşe neden olmuştur (Z. Jiang ve diğ, 2012; J. Yang ve diğ, 2009; Yu ve diğ, 2009; Zeng ve diğ, 2017). Ayrıca, MWCNT takviyesi PPS matrisinin kristalleşme sıcaklığını belirgin bir şekilde artırmıştır (Cao ve diğ, 2016; Deng, Lin, Xu, ve diğ, 2015; Díez-Pascual ve Naffakh, 2013; Ribeiro ve diğ, 2015; Wu ve diğ, 2009; J. Yang ve diğ, 2009; R. Yang ve diğ, 2018; Zeng ve diğ, 2017). Karbon nanotüplerin %0,5 ağırlık oranında eklenmesi bu etkiyi sağlamıştır (J. Yang ve diğ, 2009). Benzer biçimde, GNP takviyesi de PPS'nin kristalleşme sıcaklığını artırmıştır (Deng ve diğ, 2014; Xing ve diğ, 2018). Ancak, CNT takviyesinin eklenmesi PPS polimerinin erime sıcaklığında belirgin bir değişikliğe yol açmamıştır (Z. Jiang ve diğ, 2012; Yoo ve diğ, 2016). Bununla birlikte, farklı bir çalışmada, PPS polimerine %5 ağırlık oranında MWCNT eklendiğinde erime sıcaklığının önce arttığı, ancak daha yüksek fraksiyonlarda azalma gösterdiği rapor edilmiştir (R. Yang ve diğ, 2018). PPS/GNP nanokompozitlerinde ise artan GNP içeriği erime sıcaklığında artışa yol açmıştır (Xing ve diğ, 2018). TGA sonuçlarına göre, saf PPS'nin bozunma sıcaklığı 453 °C'de başlamaktadır. Nanokompozitler ise 450 °C'ye kadar termal kararlılıklarını korurken, 500-650 °C arasında hızlı pirolize uğramaktadır (Díez-Pascual ve Naffakh, 2013; Yoo ve diğ, 2016). GNP ve MWCNT takviyeleri, nanokompozitlerin bozunma sıcaklıklarını yükseltmiştir (Díez-Pascual ve Naffakh, 2013; Yoo ve diğ, 2016). DMA sonuçları, T_g'nin altındaki artan CNT oranıyla elastik modülde sürekli bir artış olduğunu ve bu durumun kompozitlerin sertliğinde önemli bir iyileşmeye işaret ettiğini göstermektedir. Bununla birlikte, nano takviye oranı %2'den %5 ağırlık oranına yükseltildiğinde kompozit, en yüksek elastiklik modülüne ulaşmıştır (J. Yang ve diğ, 2009).

1.10 Tezin Amacı

Yüksek ısıya maruz kalan uygulamalarda, özellikle havacılık sektöründe, yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzemelere duyulan ihtiyaç oldukça fazladır. Zamanla, operasyonel menzilin genişlemesi, faydalı yük kapasitesinin artması ve yakıt verimliliği gibi gereksinimler nedeniyle metallerden daha hafif olan polimer malzemelerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Ancak, havacılık yapılarında kullanılan kompozit malzemeler, bazı dezavantajlar nedeniyle yaygın bir uygulama alanı bulmakta zorluk çekmektedir. Bu nedenle, havacılık yapılarına etkin bir şekilde entegre edilebilecek ve performansı çeşitli yönlerden artırabilecek ileri düzey malzemelerin geliştirilmesine yönelik bilimsel çalışmalara olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu alanda başlıca sorunlardan biri, kompozitlerin yüksek elektriksel direncinin elektromanyetik koruma, devreler, antenler ve yıldırım çarpması koruması gibi uygulamalarda zorluklar yaratmasıdır. Ayrıca, kompozitlerin düşük termal iletkenliği, buz çözme sistemlerinde elektrikli ısıtıcıların yükünü artırmaktadır. Üçüncü olarak, kompozitler, darbelere karşı daha az dirençlidir ve nem emilimi, çevresel bozulma ve yaşlanma gibi etkilerden dolayı hassasiyet göstermektedir. Bu sınırlamaların üstesinden gelmek için nanokompozitler, matris ve takviye malzemelerine bağlı olarak sundukları özelliklerle umut vadeden çözümler arasında yer almaktadır. G20 ülkelerinin karbon emisyonlarını azaltma çabalarında, polimerlerin matris malzemesi olarak kullanıldığı kompozitler, sürdürülebilirlik gerekliliklerini karşılamaları nedeniyle öne çıkmaktadır. Özellikle geri dönüştürülebilir veya biyolojik olarak parçalanabilir termoplastik nanokompozitlerin geliştirilmesi, sürdürülebilirlik kaygılarını ele alarak bu malzemeleri havacılık başta olmak üzere çeşitli sektörler için daha cazip bir seçenek haline getirmektedir.

Yüksek servis sıcaklıklarına dayanıklı yüksek performanslı termoplastik malzemeler, matris olarak tercih edilirken, elektriksel ve termal iletkenlik, termal kararlılık ve alev geciktiricilik gibi fiziksel performans gereksinimlerini karşılamak için nano takviye malzemeleri kullanılmaktadır. Kompozitlerin çok işlevli özelliklerindeki iyileşme, takviye maddelerinin geometrisi, boyutu, kompozitin morfolojisi ve matris içindeki homojen dağılıma bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Nano takviye malzemelerinin polimerlere entegrasyonu, mekanik özelliklerin geliştirilmesi ve ileri özelliklere sahip malzemelerin üretimi açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu yüzden, çalışmamızda PPS termoplastik polimeri, karbon bazlı (MWCNT, GNP) ve bor bazlı (h-BN, BNNT) nano takviyelerle nanokompozit malzemeler üretilecektir. Literatür araştırmaları sonucunda, nano takviyelerin ağırlıkça %0,1, %0,5, %1, %5 ve %10 oranlarında kullanılmasına karar verilmiştir. Üretilen nanokompozitlerin mekanik, termal ve elektriksel özelliklerini iyileştirmek çalışmanın temel hedefidir.

1.11 Tezin Hipotezi

PPS termoplastik polimerine MWCNT, GNP, h-BN ve BNNT nano takviyeler ile üretilen nanokompozitlerin, takviye malzemelerinin türüne ve oranına bağlı olarak hem mekanik hem de termal ve elektriksel iletkenlik özelliklerininin iyileştirilebileceği öngörülmektedir. Çekme testi ile malzemenin dayanımını, sertlik testi ile malzemenin yüzeyine uygulanan yük karşısında deformasyona gösterdiği direnci, darbe testi malzemenin ani yükler altında kırılmaya karışı direncini, eğme testi ile eğme dayanımı ve rijitliği ölçülerek mekanik performansının belirmesinde kritik rol oynamaktadır. DSC ve TGA testleri ile kompozit malzemenin termal davranış ve kararlığı belirlenmektedir. Termal iletkenlik testi kompozit malzemenin ısıyı iletme kapasitesini, elektrik iletkenlik testi ise elektrik akımını taşıma yeteneğini ölçerek iletkenlik performansını belirler.

Bu hipotez sayesinde, nano takviye malzemelerinin kompozit yapılar üzerindeki etkilerini araştırarak, belirli oranlarda nano takviye kullanımının performans arttırıcı etkilerini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

2. MATERYAL VE METOT

Yapılan bu çalışmada PPS polimeri Toray AŞ. (Japonya) firmasından temin edildi. Saf PPS polimerimizin özellikleri Çizelge 2.1'deki gibidir. Matris malzemesine belirlenen oranlarda eklenecek nano takviyeler, CVD yöntemiyle üretilen %99,9'un üzerinde saflığa sahip GNP , %96'nın üzerinde saflığa sahip MWCNT %99 saflıkta h-BN ve %99,8 saflıkta BNNT Nanografi AŞ. (Türkiye) firmasından temin edildi. Nanomalzemelerin özellikleri de Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 : PPS matris malzemesinin özellikleri.

	PPS
Yoğunluk (g/cm^3)	1,43
T_g (°C)	97,42
T_m (°C)	283.43

Literatürde çalışılmamış oranlar belirlenerek ağırlıkça %0,1-0,5-1-5-10 olacak şekilde polimer ve nanomalzemeler, kalıbın hacmine göre hassas bir terazi kullanılarak her grup için tartıldı. Homojen bir karışım elde etmek için malzemeler 30 dakika boyunca mekanik olarak karıştırıldı.

Çizelge 2.2 : Nano takviye malzemelerinin özellikleri.

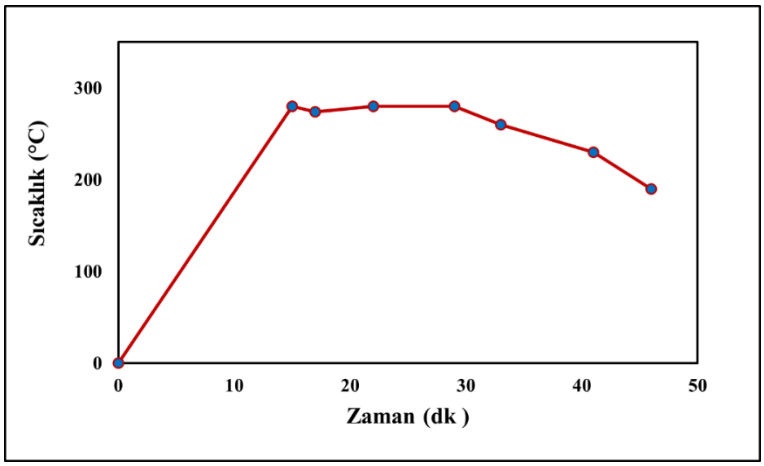
Özellikler	GNP	MWCNT	h-BN	BNNT
Saflık	<%99.9	<%96	%99	%99,8
Yoğunluk	1.9-2.2 g/cm^3	2.4 g/cm^3	-	2,29 g/cm^3
Sresifik Yüzey Alanı	170 m^2/g	220 m^2/g	25 m^2/g	-
Ortalama Partikül Çapı	18 µm	8-18 µm	-	-
Uzunluk	-	10-30 µm	5-20 µm	-
Kalınlık	5 nm	-	50 nm	65-75 nm

Daha sonra malzemeler 80 °C'de etüvde 6 sa kurutuldu. Bu malzemeler Şekil 2.1'deki sıcak pres kullanılarak üretime hazırlandı. Üretimi kolaylaştırmak için kompozit malzemeler levha formunda üretildi.



Şekil 2.1 : Sıcak pres.

Üretim öncesinde levha yüzeyini korumak için kalıp ayırıcı uygulandı. Pres sıcaklığı 280 °C'ye ayarlandı. 200 °C'deki kalıba malzeme dökülerek 280 °C'de presin içine yerleştirildi. Şekil 2.2'de gösterildiği gibi sıcaklık 280 °C'ye ulaştığında 7 dakika beklenildi. 280-260 °C arası 20 s su 10 s hava olacak şekilde soğutuldu. PPS yavaş kristalleşen bir polimer olduğundan, T_c aralığında (260-230 °C) toplam 8 dakikalık bir soğutma süresi elde etmek için 100 s hava soğutması ve ardından 20 s su olacak şekilde soğutma gerçekleştirildi. 230 – 190 °C arasında su ile hızlı soğutma uygulandı. Kalıp 190 °C'de açıldı.



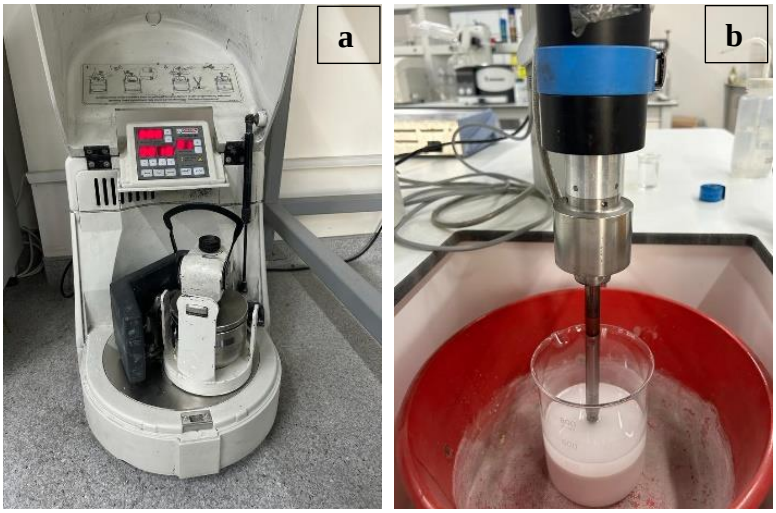
Şekil 2.2 : Nanokompozitlerin sıcak pres üretim parametreleri.

Şekil 2.3'de gibi levha halinde elde edilen nanokompozit malzeme test standartlarına uygun olacak şekilde CNC makinasında kesilerek belirlenen ölçülerde test numuneleri elde edildi. Elde edilen test numune yüzeyleri temizlenerek uygun test parametrelerine hazırlandı.



Şekil 2.3 : Sıcak pres ile üretilen nanokompozit levha ve çekme testi numuneleri.

Sıcak preste PPS/MWCNT ve PPS/GNP nanokompozitlerinin üretimi gerçekleşti. Bor bazlı nano takviyeli PPS/h-BN ve PPS/BNNT nanokompozitlerde mekanik karıştırmadan sonra gözle görülür topaklanmaların olduğu gözlendi. Deneme amaçlı birkaç levha üretilerek test yapıldığında aglomerasyondan dolayı olumsuz sonuçlar gözlendi. Aglomerasyonu önlemek için belirlenen oranlarda PPS polimerine takviyelendirilen bor bazlı nano takviyelerin homojen dağılması için alternatif karıştırma yöntemlerinden ultrasonik karıştırma ve bilyalı öğütücülü karıştırma yöntemi uygulandı.



Şekil 2.4 : (a) Bilyalı öğütücü, (b) Ultrasonik karıştırma cihazları.

Şekil 2.4'deki Ultrasonik karıştırma cihazında 1:3 toz/alkol oranı uygulanarak 50 hz hızda 2 sa boyunca karıştırma uygulandı. Bilyali öğütücülü karıştırmada ise 50 rpm hızda her 30 dk bir soğuma ve her soğumadan sonra yön değişimi uygulanarak 8 sa boyunca karıştırma yapıldı. Karıştırma işleminden sonra sıcak preste üretimleri gerçekleştirilen nanokompozitlerin test sonucunda topaklanmaların olduğu gözlendi.

PPS matris içerisinde nano takviyelerin homojen bir şekilde dağılmasını sağlamak için eriyik halde karıştırma işlemi belirlenerek ekstrüzyonda peletleme işlemi uygulandı. Peletleme işlemi ile malzemenin standart boyutlarda, işlenebilir formlarda olması sağlanmıştır. Ekstrüzyon sırasında uygulanan ısı (Çizelge 2.3) ve kesme kuvvetleri, nano takviyelerin matris içerisinde daha iyi dağılmasını sağlayarak nanokompozitin istenen fiziksel ve kimyasal özelliklerine ulaşmasına katkı da bulundu.

Çizelge 2.3 : PPS nanokompozitlerinin ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama parametreleri.

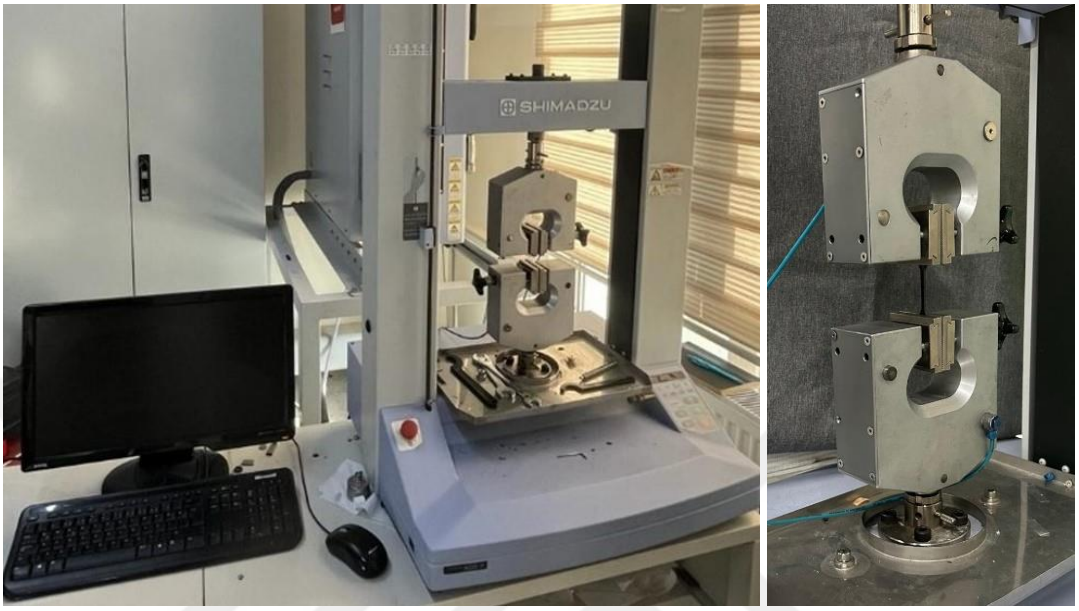
	Ektrüzyon	Enjeksiyon kalıplama
Sıcaklık	310-315 °C	310 °C
Kalıp sıcaklığı	-	105 °C
Vida dönme hızı	150 rpm	-

Peletleme işlemi tamamlandıktan sonra enjeksiyon kalıplama ile test numunelerinin standartlara uygun hassas geometri ve boyutlarda doğrudan üretilmesi sağlandı. Kesme işlemi sırasında oluşabilecek malzeme gerilmeleri veya heterojenlikleri ortadan kaldırılarak, daha hızlı bir üretim gerçekleştirildi. PPS/GNP, PPS/MWCNT, PPS/h-BN ve PPS/BNNT nanokompozitlerinin üretimi tamamlandı. Hem sıcak preste (PPS/MWCNT, PPS/GNP) için hem de enjeksiyonlu kalıplama (PPS/MWCNT, PPS/GNP, PPS/h-BN, PPS/BNNT) ile üretilen nanokompozitlerin mekanik, fiziksel ve iletkenlik özelliklerini belirleyebilmek için planan testler uygulandı ve sonuçları analiz edildi.

2.1 Çekme Testi

Bu çalışma kapsamında çekme testi, üretilen nanokompozit malzemelerin belirli bir statik yük altında plastik ve elastik davranışını incelemek ve bu malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla uygulandı. Çekme testleri SHIMADZU-AGS-X 10 kN (Japon) model Şekil 2.5'teki makine kullanılarak gerçekleştirildi. Çekme testi

ASTM D638 standardına uygun gerçekleşti. Test oda sıcaklığında 5 mm/dk çekme hızıyla gerçekleştirildi. Her gruptan 5 farklı numuneye test uygulanarak sonuçlar elde edildi. Çekme testi sonucunda nanokompozit malzemelerin yük taşıma kapasitesi, elastikli modülü ve kopma dayanımı gibi kritik mekanik özellikler belirlenir.



Şekil 2.5 : Çekme testi uygulanan cihaz görüntüsü.

2.2 Çentiksiz Charpy Darbe Testi

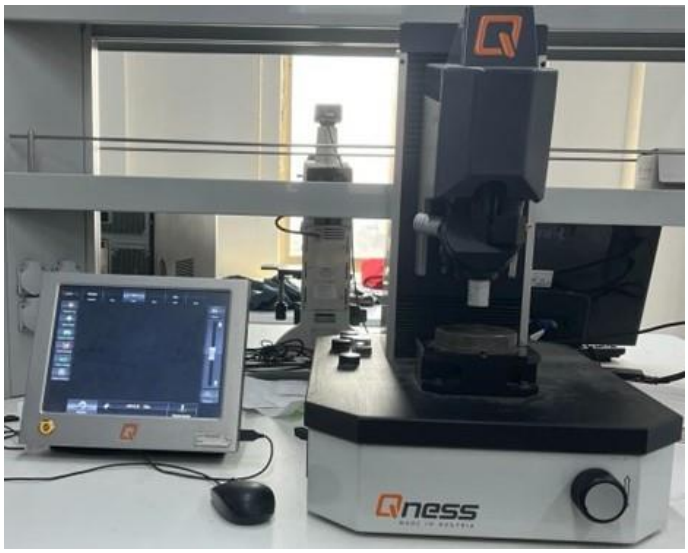
Malzemelerin dinamik gerilmelere karşı dayanımını ve dinamik yükler altında ne kadar direnç gösterebildiğini belirlemek amacıyla çentiksiz Charpy darbe testi uygulandı. Bu test yöntemi, malzemelerin dinamik yükleme sırasında ne kadar enerji emebildiğini ölçerek, sünek ya da gevrek bir davranış sergileyip sergilemediğini ortaya koyar. Test sırasında malzemeler, maksimum kırılma enerjileri temel alınarak değerlendirildi ve darbe etkisi altındaki davranışları gözlemlendi. Bu çalışmada, çentiksiz Charpy darbe testleri, Instron CEAST9050 (Instron Co., USA) model sarkaç çekiç darbe cihazı kullanılarak gerçekleştirildi (Şekil 2.6). Charpy darbe test numunelerinin hazırlanması ve ölçümler, ISO 179 standardına uygun olarak gerçekleştirildi. Analizde kullanılan vurucunun potansiyel enerjisi 15 joule'dür. Her farklı oran ve nano takviye malzemesi için 5 farklı numune test edildi.



Şekil 2.6 : Çentiksiz darbe deneyi uygulanan cihaz görüntüsü.

2.3 Sertlik Testi

Üretilen nanokompozit malzemelerde eklenen GNP, MWCNT, h-BN ve BNNT nano takviyelerin saf PPS polimerinin sertlik değerindeki değişimi belirlemek için sertlik testi uygulandı. P yükü ile malzeme üzerinde baskının bıraktığı dikdörtgen izin köşegenlerini ölçerek hesaplanarak belirlenir. Sertlik testi için Qness (Almanya) model mikro sertlik cihazı kullanıldı (Şekil 2.7). Numunelerin mikro sertlik değerleri 15 s boyunca 500 g yük altında ölçüldü. Her numuneden on ölçüm alındı.



Şekil 2.7 : Sertlik deneyi uygulanan cihaz görüntüsü.

2.4 3 Nokta Eğme Testi

Üretilen nanokompozitlerin saf PPS malzemeye kıyasla eğme dayanımındaki değişimi gözlemlemek için üç nokta eğme testi yapıldı. ASTM D790 standardına göre analiz edildi. Eğme testleri, üç nokta eğme modunda 1 mm/dk eğme hızında, SHIMADZU-AGS-X 10 kN (JAPAN) model mekanik test makinesi kullanılarak tamamlandı (Şekil 2.8). Sonuçları elde etmek için her farklı nanokompozit numune için 5 eğme testi yapıldı.



Şekil 2.8 : 3 nokta eğme deneyi uygulanan cihaz görüntüsü.

2.5 Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi

Üretilen nanokompozit malzemelerin mikro yapılarını ve matris içerisinde nano takviyelerin dağılımını ve matris/takviye arasındaki arayüzey etkileşimin gözlenmesi için mikroyapı analizi uygulandı. Mikro yapıların incelenmesi için numuneler Leica ACE600 model SEM numune kaplama makinesi (Almanya) kullanılarak altın/paladyum tozu tabakasıyla kaplandı. Analizler Şekil 2.9'deki Zeiss Gemini 300 SEM cihazı (Almanya) kullanılarak çoklu görüntüler alınarak gerçekleştirildi.



Şekil 2.9 : SEM analizi uygulanan cihaz görüntüsü.

2.6 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Testi

Bu çalışma kapsamında üretilen PPS ve PPS nanokompozitlerinin erime, camsı geçiş sıcaklıkları, faz geçişleri ve ısı kapasitelerini karakterize etmek amacıyla Şekil 2.10'daki TA Instruments DSC 250 Diferansiyel Taramalı Kalorimetri cihazında 30 °C ile 380 °C arasında 10 °C/dk ısıtma rejiminde DSC testi gerçekleştirildi. Ağırlıkça %0,1-1-10 takviyeli gruplara uygulandı.



Şekil 2.10 : DSC analizi uygulanan cihaz görüntüsü.

2.7 Termogravimetrik Analiz

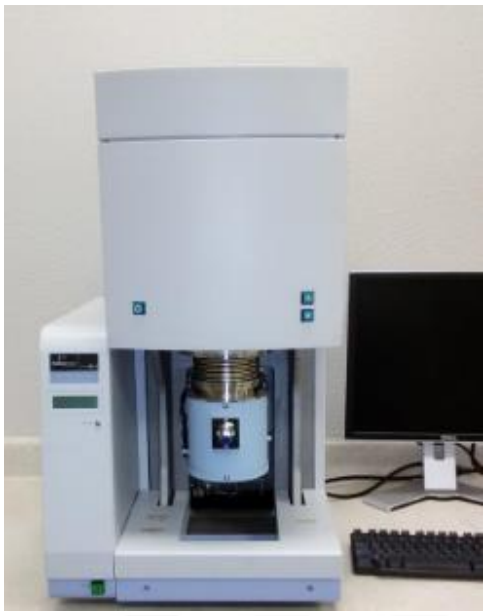
TGA, PPS nanokompozitlerinin termal kararlılığını ve bozunma davranışını analiz etmek için uygulandı. Bu yöntem malzemelerin sıcaklık artışıyla birlikte kütle kaybı davranışlarını analiz ederek termal özelliklerinin detaylı bir şekilde karakterize edilmesini sağlar. TGA testinde, PPS ve nanokompozitlerinin termal kararlılığını karakterize etmek için 50 °C ila 850 °C arasında değişen sıcaklık aralığında analiz edildi. Testler nitrojen atmosferi altında geçrçekleştirilerek, bu koşul malzemelerin oksidatif bozunma etkisinden arındırılarak yalnızca termal bozunma davranışlarının incelenmesini sağladı. TA Instruments / SDT 650 Eşzamanlı Termogravimetri / Diferansiyel Termal Analiz (TG/DTA) cihazında gerçekleştirildi (Şekil 2.11).



Şekil 2.11 : TGA analizinde uygulanan cihaz görüntüsü.

2.8 Dinamik Mekanik Analiz

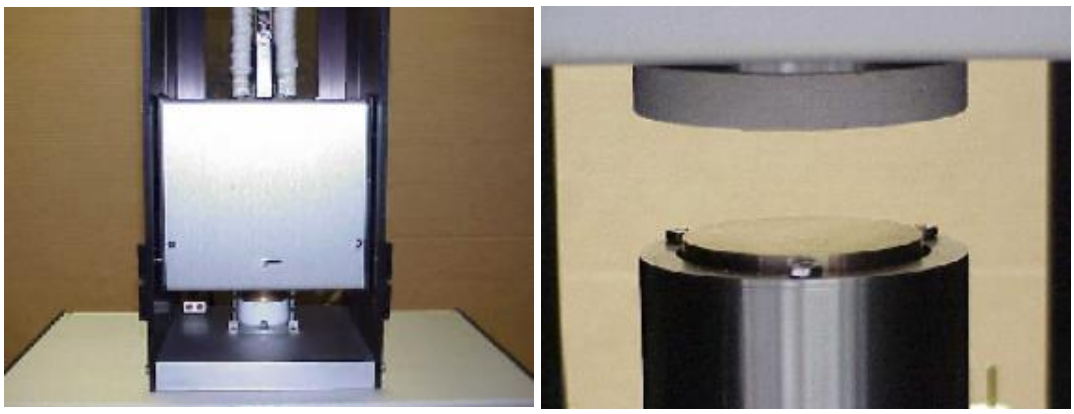
Çalışmada DMA, PPS nanokompozitlerinin çeşitli sıcaklık ve frekans koşullarındaki mekanik davranışını karakterize etmek için önemli bir yöntem olarak tercih edildi. DMA testi, 3 noktalı eğme modunda, 3x13x64 mm boyutlarında, 30-270 °C aralığında olup, malzemelerin farklı termal koşullar altında nasıl davrandığını inceleme imkânı sağlar. Testte 1 Hz frekansında 3 °C/dk ısınma rejimi uygulandı. ASTM D5023'e uygun olarak Perkin Elmer Pyris Diamond Dinamik Mekanik Analiz Cihazı (DMA) cihazında gerçekleştirildi (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 : DMA analizi uygulanan cihaz görüntüsü.

2.9 Termal İletkenlik Testi

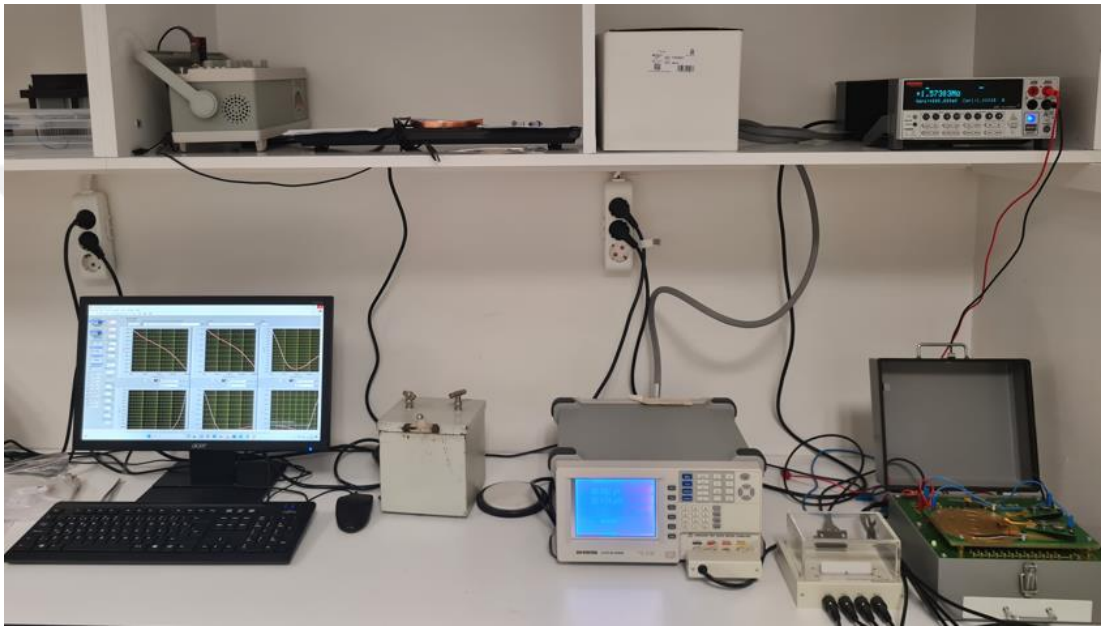
Termal iletkenlik testi PPS nanokompozitlerinin termal iletkenlik özelliklerini belirlemek amacıyla UnithermTM (Avusturya) cihazı kullanılarak gerçekleştirildi (Şekil 2.13). Termal iletkenlik testi, ASTM E1530 standardına uygun olarak 50 mm çapında ve 3,2 mm kalınlığındaki numunelere uygulandı. Her bir numune için üç farklı ölçüm alındı. ve test üç farklı sıcaklıkta (30-60-90°) gerçekleştirildi. Bu sayede malzemelerin sıcaklık değişimiyle birlikte termal iletkenlik özelliklerinin nasıl değişeceği gözlendi. Bu deneysel şartlar altında, PPS polimere eklenen nano takviyelerinin malzemenin termal iletkenlik özellikleri üzerindeki etkisi incelendi.



Şekil 2.13 : Termal iletkenlik testi uygulanan cihaz görüntüsü.

2.10 Elektriksel İletkenlik Testi

Elektriksel iletkenlik analizi, bir IEEE 488 kartı kullanan bir bilgisayar aracılığıyla hem Keithley 2400 SMU hem de GW Instek 8105 LCR ölçüm cihazlarıyla aynı anda gerçekleştirildi (Şekil 2.14). Keithley 2400 SMU ve GW Instek 8105 LCR elektrik empedans ölçüm sistemi kullanılarak, polarizasyon ve gevşeme mekanizmaları da dahil olmak üzere malzemelerin elektriksel ve dielektrik özellikleri, 10^2 Hz ile 10^6 Hz frekans aralığında 0,5 V rms voltaj altında belirlendi.



Şekil 2.14 : Elektriksel iletkenlik testi uygulanan cihaz görüntüsü.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

PPS nanokompozitlerin termal ve elektriksel iletkenliğini artırırken aynı zamanda mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştiren karbon ve bor bazlı nano takviyelerinin etkilerini inceleyen çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu nedenle, bu tez kapsamında, yüksek performanslı PPS polimerine ağırlıkça %0,1, %0,5, %1, %5 ve %10 oranlarında nano takviyeler eklenerek PPS/MWCNT ve PPS/GNP nanokompozitleri üretildi. Üretim, uygun parametrelerde sıcak pres yöntemiyle gerçekleştirildi. BNNT ve h-BN takviyeli PPS nanokompozitleri çok fazla topaklanmalara sebep olduğu için sıcak pres ile üretimleri gerçekleştirilmedi.

Homojen bir üretim elde etmek amacıyla, yine ağırlıkça %0,1, %0,5, %1, %5 ve %10 oranlarında MWCNT, GNP, h-BN ve BNNT nano takviyeler PPS polimerine takviyelendirildi ve bu karışımlar ekstrüderde eriyik karıştırma yöntemiyle pelet haline getirildi. Daha sonra, üretilen peletlerden enjeksiyon kalıplama yöntemiyle test numuneleri hazırlandı.

Fiziksel ve mekanik özellikleri değerlendirmek amacıyla çeşitli karakterizasyon yöntemleri uygulandı. Çekme, darbe, sertlik ve eğme testleri ile nano takviye oranlarının mekanik özelliklere etkisi analiz edildi. Nanokompozitlerin morfolojisi, dağılımı ve yapısal özellikleri SEM ile incelendi, termal kararlılıkları ise TGA ile değerlendirildi. Soğurulan enerji miktarını belirlemek için DSC ölçümleri gerçekleştirildi ve farklı sıcaklıklardaki mekanik davranışlarını gözlemlemek amacıyla DMA testleri yapıldı. Ayrıca, nanokompozitlerin termal ve elektriksel iletkenlik özellikleri analiz edilerek nano takviyelerin ve takviye oranlarının bu özelliklere etkisi incelendi.

Çalışmanın sonucunda, kullanılan matris ve takviye fazlar açısından en iyi uyumu sağlayan malzemeyi, nano takviyeler için ideal oranı ve üretim süreçlerinde en verimli yöntemi belirlemek hedeflenmektedir.

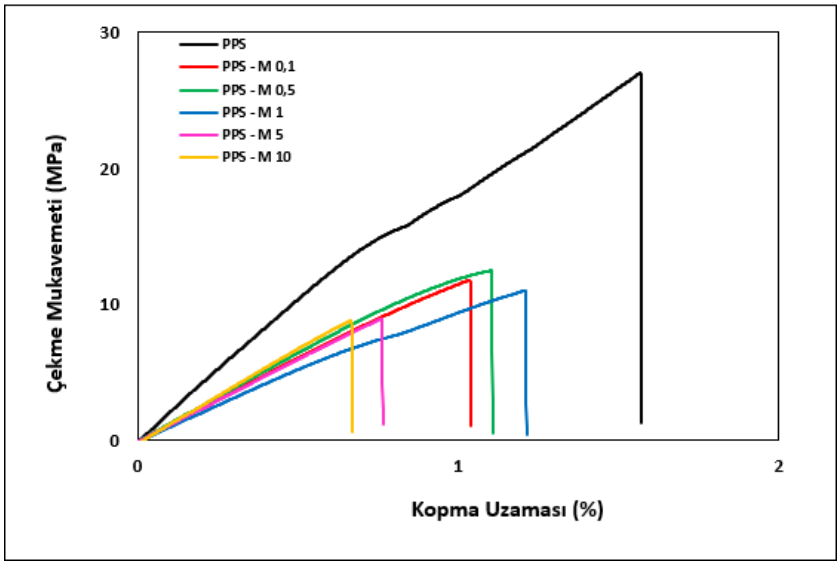
3.1 Sıcak Pres İle Üretilen Nanokompozitlerin Çekme Testi

Çizelge 3.1'de nano takviye malzemelerinin farklı kütle oranlarıyla üretilen nanokompozitlerin çekme dayanımı değerleri gösterilmektedir. Saf PPS polimerinin çekme dayanımı 26,49 ± 0,4 MPa'dır.

Çizelge 3.1 : Sıcak Pres ile üretilen kompozitlerin çekme mukavemeti değerleri.

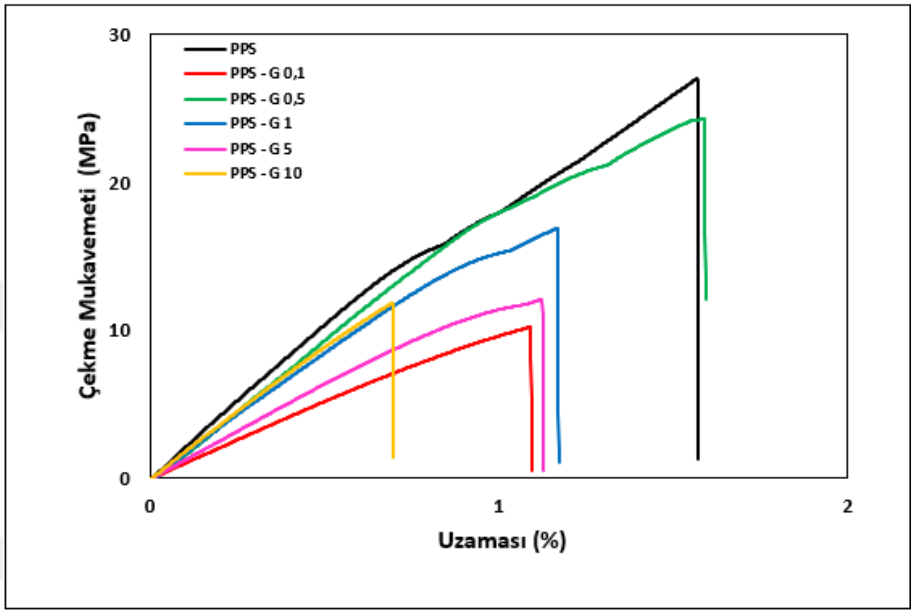
Matris	Nano takviye (%)	Çekme Mukavemeti (MPa)
PPS	0	26,493
	M 0,1	10,645
	M 0,5	12,302
	M 1	10,944
	M 5	8,894
	M 10	8,820
	G 0,1	10,611
	G 0,5	24,591
	G 1	16,782
	G 5	12,811
	G 10	11,740

PPS matrisine %0,1 ağırlık oranında MWCNT eklendiğinde çekme dayanımında yaklaşık %55'lik bir azalma görülmektedir. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi eklenen MWCNT oranı arttıkça çekme dayanımında da azalma görülmektedir. Ağırlıkça %0,5 takviyeli nanokompozit yaklaşık olarak %54, %1 eklendiğinde %58, %5 oranında %66, %10 ağırlık oranında eklendiğinde ise %67'lik bir azalma görülmektedir.



Şekil 3.1 : Sıcak pres ile üretilen PPS/MWCNT kompozitlerinin çekme testi grafiği.

Benzer şekilde Şekil 3.2 incelendiğinde GNP nano takviyeli kompozitlerde de çekme dayanımında azalma görülmektedir. %0,1 ağırlık oranında GNP eklendiğinde %60'lık bir azalma, %0,5 oranında %7'lik, %1 eklendiğinde %37'lik, %5'te ise %51 ve %10 ağırlık oranında eklendiğinde ise %55'lik bir azalma görülmektedir. Saf PPS ile karşılaştırıldığında her iki nano takviye malzemesi için de kopma uzamasında azalma gözlenmiş olup, bu durum nano takviye malzemelerinin eklenmesiyle kompozit malzemelerde gevrek kırılma meydana geldiğini göstermektedir.

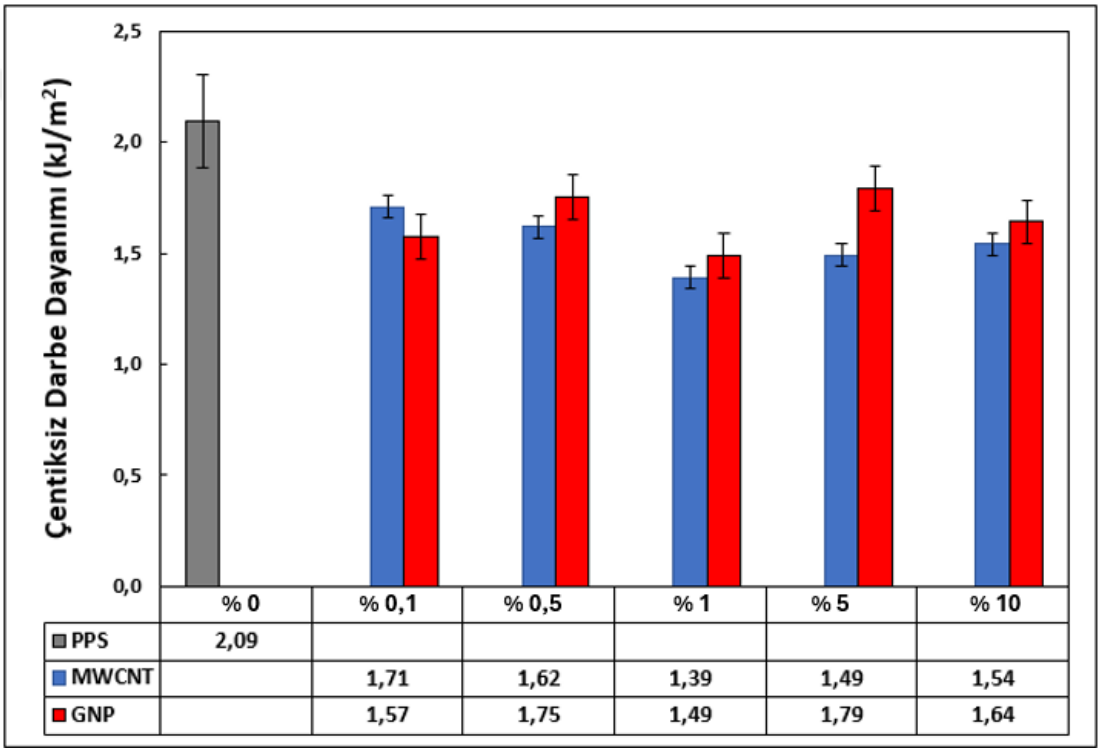


Şekil 3.2 : Sıcak pres ile üretilen PPS/GNP kompozitlerinin çekme testi grafiği.

Nano malzemelerin homojen dağılımı, nanokompozitin mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Nano takviye malzemesi, matris içerisinde homojen bir şekilde dağıtılmazsa, çekme dayanımında azalmaya yol açabilir (M. Q. Zhang ve diğ, 2002). Nano takviye malzemelerinin kümelenmesi, homojen dağılımı engeller ve gerilim transferini azaltarak çekme dayanımını düşürebilir. Hem CNT'ler hem de GNP'ler kümeleşmeye karşı güçlü bir eğilim gösterir (Punetha ve diğ, 2017; K. Zhou ve diğ, 2012). 3.5 SEM analizinde çekme numunelerinin kırık yüzeylerinden alınan görüntülerde gözlemlendiği gibi, çalışmamızda kompozit malzeme içinde aglomerasyonlar tespit ettik. Bu, elde edilen nanokompozit malzemelerde gözlemlenen çekme dayanımı değerlerindeki azalmayı açıklamaktadır.

3.2 Sıcak Pres ile Üretilen Nanokompozitlerin Çentiksiz Darbe Testi

Saf PPS için darbe dayanımı testi 2,09 kJ/m^2 değerini verirken, MWCNT ve GNP nano boyutlu takviye malzemelerinin darbe enerjisi performansı Şekil 3.3'de gösterildiği gibi artan takviye oranlarına göre değişmiştir. %0,1 ağırlık oranında MWCNT ile takviye edilmiş PPS kompozitlerde darbe dayanımı yaklaşık olarak %18 azalmaktadır. Yapıdaki MWCNT'nin artan takviye oranı incelendiğinde, PPS/MWCNT kompozitinin saf PPS'ye göre darbe dayanımını azaltarak ağırlıkça %1 MWCNT takviyelendirildiğinde yaklaşık olarak %33 azaltarak en düşük sertlik değeri olan 1,39 kJ/m^2'ye ulaştığı gözlenmiştir.



	% 0	% 0,1	% 0,5	% 1	% 5	% 10
PPS	2,09					
MWCNT		1,71	1,62	1,39	1,49	1,54
GNP		1,57	1,75	1,49	1,79	1,64

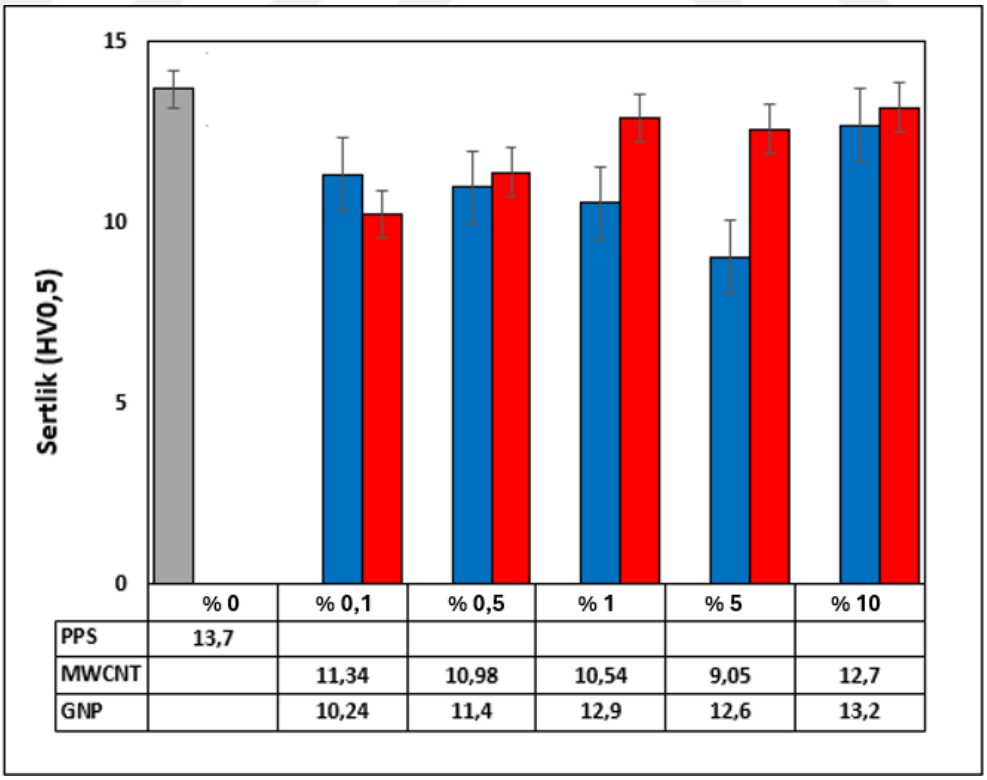
Şekil 3.3 : Sıcak pres ile üretilen PPS kompozitlerinin darbe testi grafiği.

PPS/GNP nanokompozitlerde de darbe dayanımında bir azalma görülmektedir. %0,1 ağırlık oranında GNP eklendiğinde darbe dayanımında yaklaşık %24'lük bir azalma görülmektedir. En düşük darbe dayanımı ağırlıkça %1 GNP takviyeli grupta yaklaşık olarak %28 azalarak 1,49 kJ/m^2 darbe dayanımı değerine ulaşmıştır. Nano malzemeler ile polimer matris arasındaki etkileşimler mekanik özellikleri etkileyebilir. Arayüz etkileşimleri zayıfsa, matris ile nano takviye malzemeleri arasında güçlü bağ oluşmaz. Arayüz etkileşimleri yetersiz veya homojen değilse, darbe enerjisinin aktarımı zayıflar ve kompozitin darbe dayanımında azalmaya yol açar (Díez-Pascual ve Naffakh, 2012).

Nano takviyeler malzeme yüzeyinde oluşabilecek çatklakların yayılmasını önleyici özellik gösteremez (X. Jiang ve Drzal, 2012; Karsli ve diğ, 2022; Xing ve diğ, 2018) .

3.3 Sıcak Pres ile Üretilen Nanokompozitlerin Sertlik Testi

Üretilen PPS, PPS/MWCNT ve PPS/GNP kompozitlerinin Vickers sertlik değerleri Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Saf PPS'nin sertlik değeri 13,7 HV'dir. MWCNT takviyeli nanokompozitlerde sertlik değerlerinde azalma görülmektedir. %0,1 ağırlık oranında MWCNT eklendiğinde yaklaşık %15'lik, %0,5' eklediğinde %19 bir azalma olmaktadır. %1 ağırlık oranında MWCNT eklendiğinde yaklaşık olarak %23, %5 eklendiğinde %33 bir azalış gözlemlenmiştir. %10 ağırlık oranında MWCNT eklendiğinde ise %7'lik bir azalma görülmektedir. Öte yandan GNP takviyeli kompozitlerde %0,1 ağırlık oranında ekleme ile yaklaşık %25, %0,5 eklendiğinde %16 bir azalış söz konusudur. %1 ve %10 ağırlık oranındaki GNP takviyeli kompozitler için standart sapma dikkate alındığında önemli bir değişim görülmemektedir. Homojen bir dağılım olmadığında, nano malzemelerin takviye edici etkisi homojen olmayan bölgelerde daha az olduğundan sertlik değeri beklenenden düşük çıkabilir (Cho, 2008).



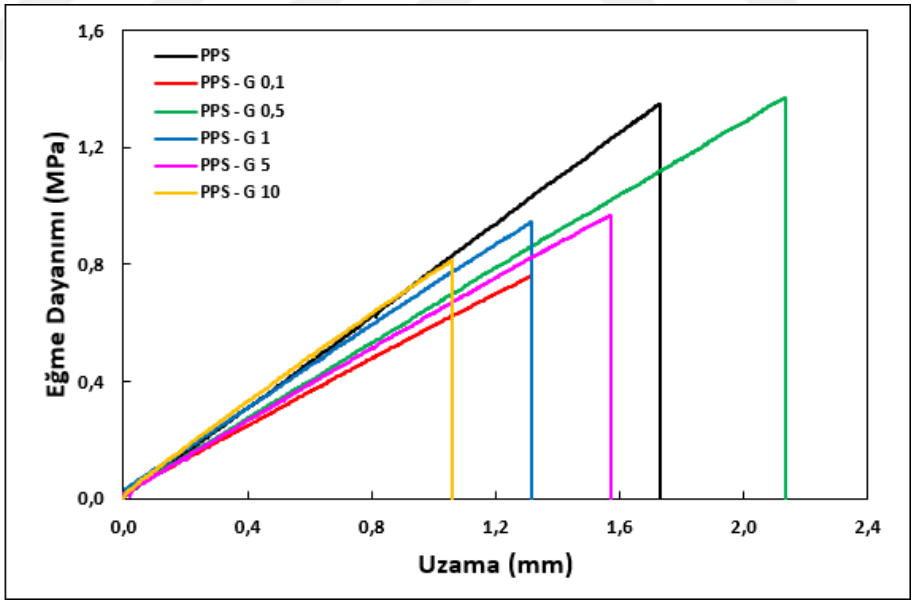
	% 0	% 0,1	% 0,5	% 1	% 5	% 10
PPS	13,7					
MWCNT		11,34	10,98	10,54	9,05	12,7
GNP		10,24	11,4	12,9	12,6	13,2

Şekil 3.4 : Sıcak pres ile üretilen PPS kompozitlerinin sertlik testi grafiği.

Literatür araştırmalarında da PPS matrise CNT takviyelendirildiğinde sertliğin sabit kaldığı ya da çok küçük artışa sebep olduğu gözlenmiştir (Díez-Pascual ve Naffakh, 2013). Bizim çalışmamıza benzer bir şekilde PPS/MWCNT nanokompozitleri sıcak pres ile üretilmiş ve sertlik değerleri incelendiğinde hacimce %0,2 MWCNT takviyelendirildiğinde az bir artış gözlenirken, %1'de takviye konsantrasyonu arttıkça sertlikte önemli ölçüde bir azalış gözlenmiştir (Cho, 2008).

3.4 Sıcak Pres ile Üretilen Nanokompozitlerin 3 Nokta Eğme Testi

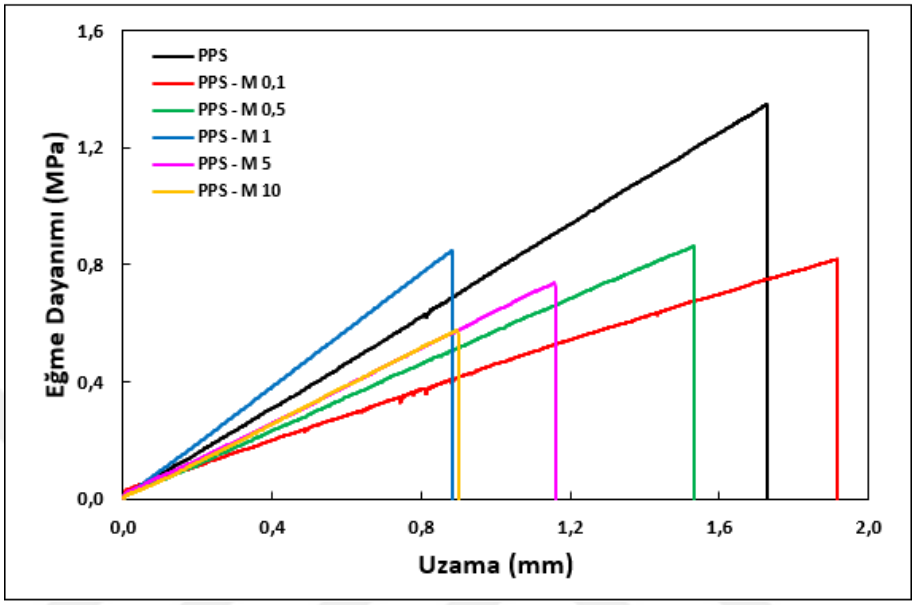
Şekil 3.5'de gösterildiği gibi, GNP nano takviyeli kompozit malzemelerde eğme mukavemetinde bir azalma gözlenmektedir. %0,1 ağırlık oranında GNP ilavesiyle yaklaşık %41'lik bir azalma meydana gelmektedir. %1 ağırlık oranında ilave edildiğinde %14, %5 ağırlık oranında %29, %10 ağırlık oranında ilave edildiğinde ise %29'luk bir azalma gözlenmektedir. Ağırlıkça %0,5 GNP takviyelendirildiğinde ise yaklaşık olarak %14 bir artış söz konusudur. Diğer oranlarda kopma uzamasında da azalış gözlenirken, ağırlıkça %0,5 GNP takviyeli grupta kopma uzaması da artmaktadır.



Şekil 3.5 : Sıcak pres ile üretilen PPS/ GNP kompozitlerinin eğme testi grafiği.

MWCNT nano takviyeli kompozitlerde ise %0,1 ağırlık oranında ilave edildiğinde yaklaşık %44, %0,5 ağırlık oranında %35, %1 ağırlık oranında ilave edildiğinde %37, %5 ağırlık oranında %44 ve %10 ağırlık oranında ilave edildiğinde %52'lik bir azalma gözlenmektedir (Şekil 3.6). MWCNT ve GNP'nin PPS'ye entegre edilmesi,

uyumsuzluk nedeniyle mekanik özelliklerde bir azalmaya yol açmıştır. Wang ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, %0,05 ağırlıkça üzeri GNP ilavesinin yapıda eğme dayanımında azalmaya neden olduğu gözlenmiştir (Z. Wang ve diğ, 2023). GNP ve MWCNT takviye malzemelerinin homojen dağılımının sağlanmasının zorluğu nedeniyle, daha düşük oranlarda daha etkili oldukları söylenebilir (Cho, 2008).

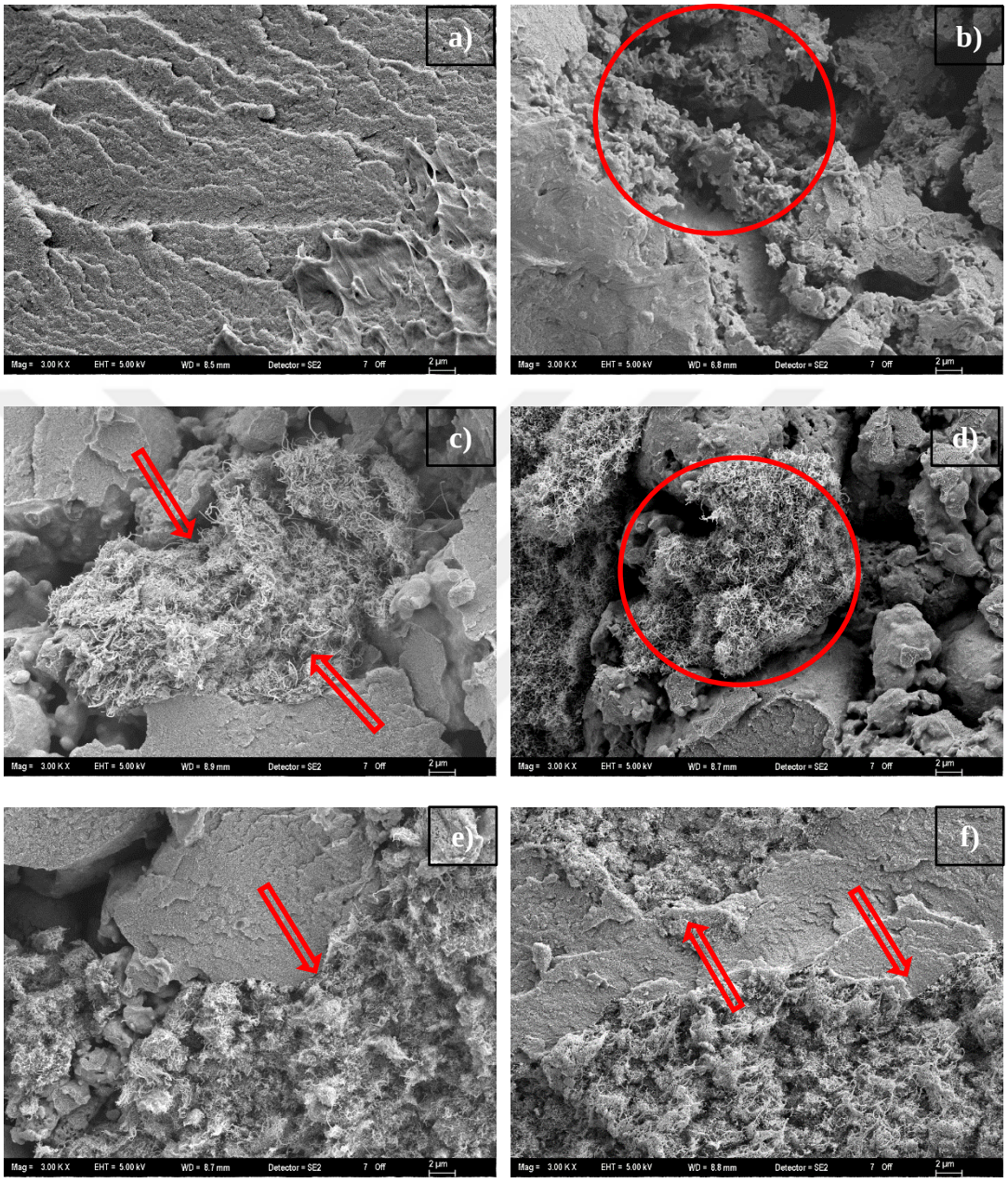


Şekil 3.6 : Sıcak pres ile üretilen PPS/ MWCNT kompozitlerinin eğme grafiği.

3.5 Sıcak Pres ile Üretilen Nanokompozitlerin SEM Analizi

Saf PPS, PPS/MWCNT ve PPS/GNP nanokompozitlerinin çekme testinden sonra elde edilen kırık yüzeylerinden SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 3.7 a) saf PPS morfolojisi incelendiğinde gevrek bir kırılma yüzeyi gözlenmektedir. Kırılma yüzeyindeki uzun çatlaklar ve boşluklar, çatlak yayılımını ve kırılmanın kolayca meydana geldiğini göstermektedir. Şekil 3.7 b) ağırlıkça %0,1 MWCNT takviyeli PPS/MWCNT nanokompozitinin kırık yüzey görüntüsü yer almaktadır. MWCNT'lerin dağılımında topaklanmanın meydana geldiği dikkat çekmektedir. Özellikle, nano takviye miktarının artmasıyla birlikte (Şekil 3.7 c, d, e, f), MWCNT takviyeli nanokompozitlerde belirgin bir aglomerasyon oluşumu gözlenmiştir. Aglomerasyonun oluşumunun temel nedeni, MWCNT'lerin sahip olduğu yüksek arayüz enerjisidir. Yüksek yüzey enerjisi, MWCNT'lerin birbirine yapışmasına neden olarak polimer matris içinde homojen dağılımlarını engellemektedir. (Wu ve diğ, 2009; R. Yang ve diğ, 2018). Aglomerasyonlar, polimer matris ve takviye fazı arasında

etkili bir yük aktarımını zorlaştırmakta ve kompozitin yapısal bütünlüğünü azaltmaktadır.

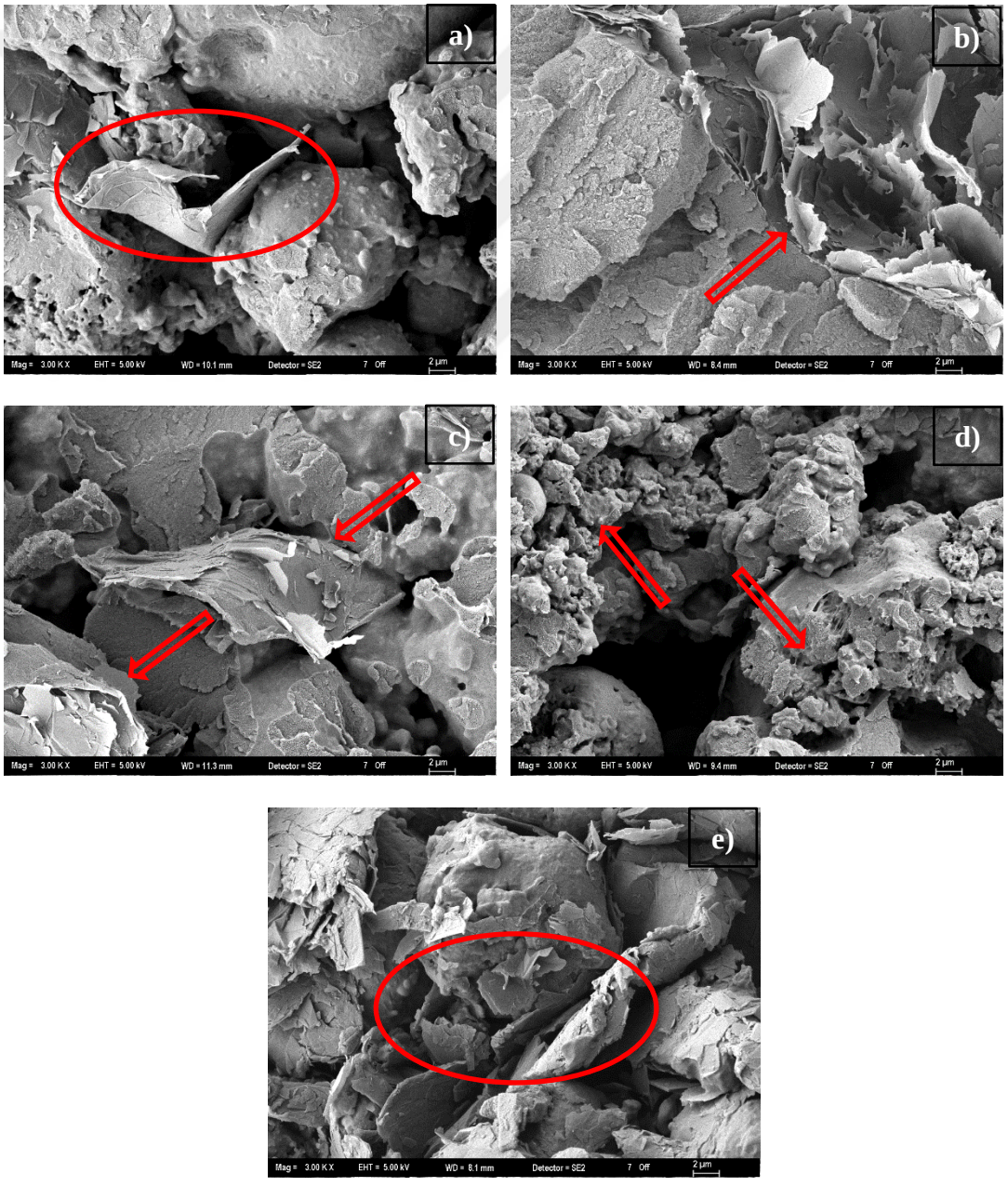


Şekil 3.7 : a) Saf PPS, b) %0,1 MWCNT, c) %0,5 MWCNT, d) %1 MWCNT, e) %5 MWCNT, f) %10 MWCNT SEM görüntüleri.

PPS/GNP nanokompozitleri incelendiğinde, kırık yüzeyi pürüzlü hale gelir ve bu da gevrekliğin arttığını gösterir. GNP'ler büyük yüzey alanlarına sahip oldukları için kompozit malzeme içerisinde daha serbest hareket etme eğilimindedirler. Bu, GNP'lerin bir araya gelerek aglomerasyon oluşturma olasılığını artırır (Wu ve diğ, 2009; R. Yang ve diğ, 2018). Şekil 3.8'de görüldüğü gibi, PPS/GNP

nanokompozitlerinde, GNP'lerin homojen olarak dağılmadığı ve aglomerasyona yol açtığı görülmektedir. GNP'lerin nanokompozit içerindeki ağırlıkça oranı arttıkça aglomerasyonun da arttığı gözlenmektedir. Sonuç olarak, GNP aglomerasyonunun birincil nedeni, Van der Waals kuvvetleri ve GNP'lerin yüzey özelliklerinden kaynaklanan nanoplateletler arasındaki çekici kuvvetlerdir (Karsli ve diğ, 2022; Xing ve diğ, 2018).

Her iki nano takviye maddesinde de kompozit malzemelerin homojen olarak dağılmadığı ve aglomerasyonların meydana geldiği görülmektedir (Karsli ve diğ, 2022; Xing ve diğ, 2018). Bu olgu, mekanik sonuçlarımızdaki azalmayı açıklamaktadır.



Şekil 3.8 : a) %0,1 GNP, b) %0,5 GNP, c) %1 GNP, d) %5 GNP, e) %10 GNP SEM görüntüleri.

3.6 Sıcak Pres ile Üretilen Nanokompozitlerin DSC Analizi

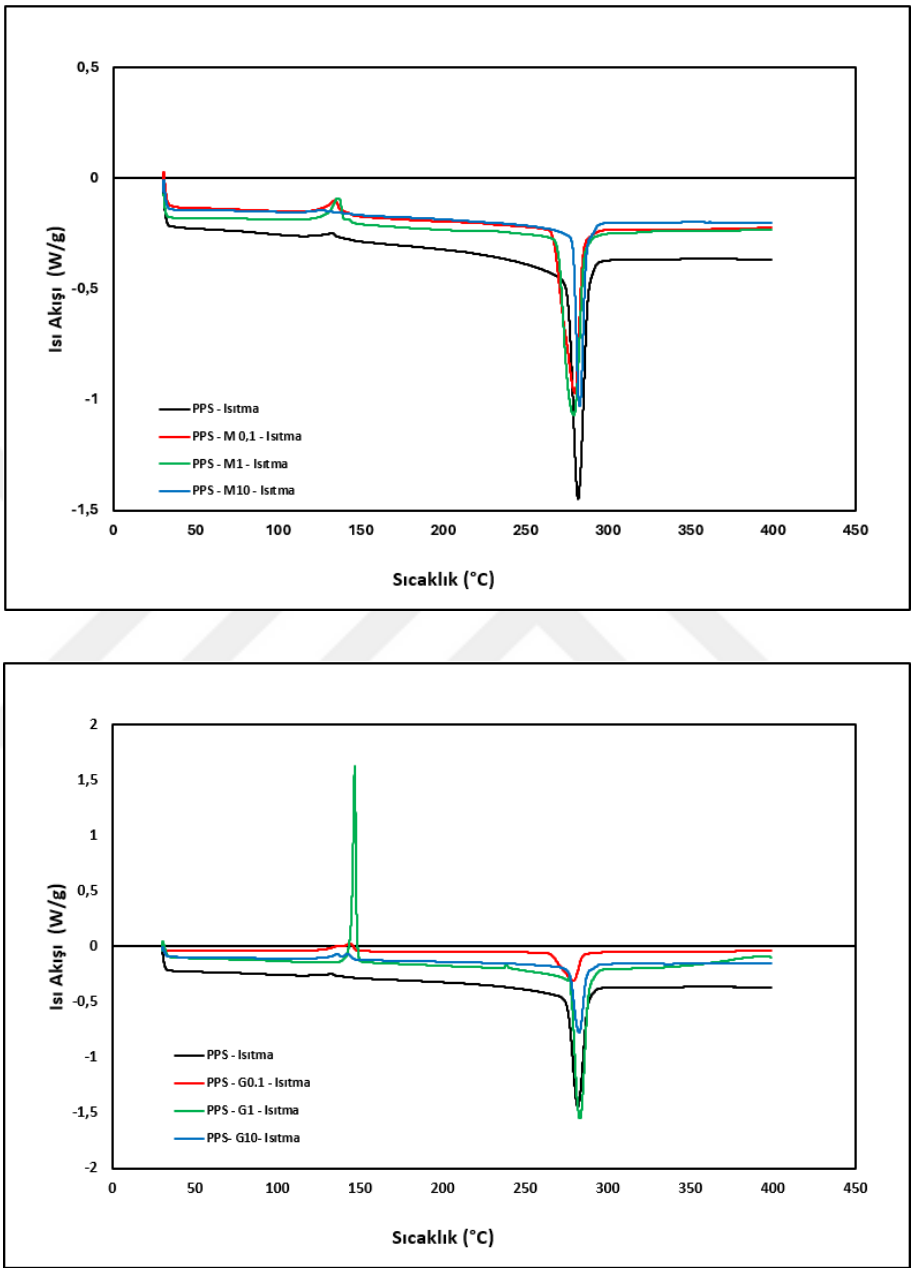
DSC testinden elde edilen veriler, %0,1-1-10 ağırlık oranında MWCNT eklenmesinin saf PPS'ye kıyasla T_m'de herhangi bir değişikliğe yol açmadığını göstermektedir. Dydek ve arkadaşlarının gerçekleştirdikleri çalışmada ise ağırlıkça %10'a kadar artan oranlarda MWCNT'yi PPS yapısına katmış ve elde edilen kompozit yapısında erime davranışında saf PPS'e göre değişim büyük oranda gözlenmemiş olup yapılan çalışma ile benzerlik göstermektedir (Dydek ve diğ, 2021). Benzer şekilde, Çizelge 3.2'deki gibi, saf PPS'ye kıyasla GNP eklendiğinde tüm oranlarda T_m'de herhangi bir değişiklik gözlenmediği söylenebilir. DSC'de, sıcaklık arttıkça, düşük sıcaklıkta kristalleşme ($T_{c,lc}$) ısıtma sırasında erimeden önce meydana gelirken, yeniden kristalleşme soğutma sırasında katılaşmadan sonra meydana gelir (Batista ve diğ, 2016; Jog ve diğ, 1994; Seo ve diğ, 1993).

Çizelge 3.2 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerin DSC değerleri.

Matris	Nano takviye (%)	T_m	T_{crc}	$T_{cıc}$	Entalpi(J/g) Isıtma	Soğutma	Kristalizasyon (%)
PPS	0	281,84	210,64	132,66	57,77	43,70	72,21
	M 0,1	279,95	209,90	134,61	45,21	31,41	56,57
	M 1	279,19	215,06	128,73	45,46	32,53	57,40
	M 10	282,70	205,50	126,83	33,31	26,95	46,27
	G 0,1	279,08	213,57	144,13	12,14	8,00	15,20
	G 1	283,06	224,63	146,73	35,34	44,47	44,63
	G10	282,56	217,10	142,96	26,82	20,50	37,25

Şekil 3.9'daki ısıtma eğrisi incelendiğinde saf PPS'nin $T_{c,lc}$'sinin 132,66°C olduğu görülmektedir. MWCNT ilavesinin $T_{c,lc}$ üzerindeki etkileri göz önüne alındığında %0,1 ve %1 ilave seviyelerinde bir değişim gözlenmezken, ağırlıkça %10 MWCNT ilavesi olan grupta bir düşüş olduğu saptanmıştır. Bu durum, yüksek oranlardaki MWCNT takviyelendirilmesi kritalleşme davranışı üzerinde etkili olabileceğini göstermektedir. GNP takviyeli PPS nanokompozitleri incelendiğinde, tüm GNP takviye oranlarında $T_{c,lc}$ bir artış gözlenmiştir. GNP'nin kristalleşme sürecini

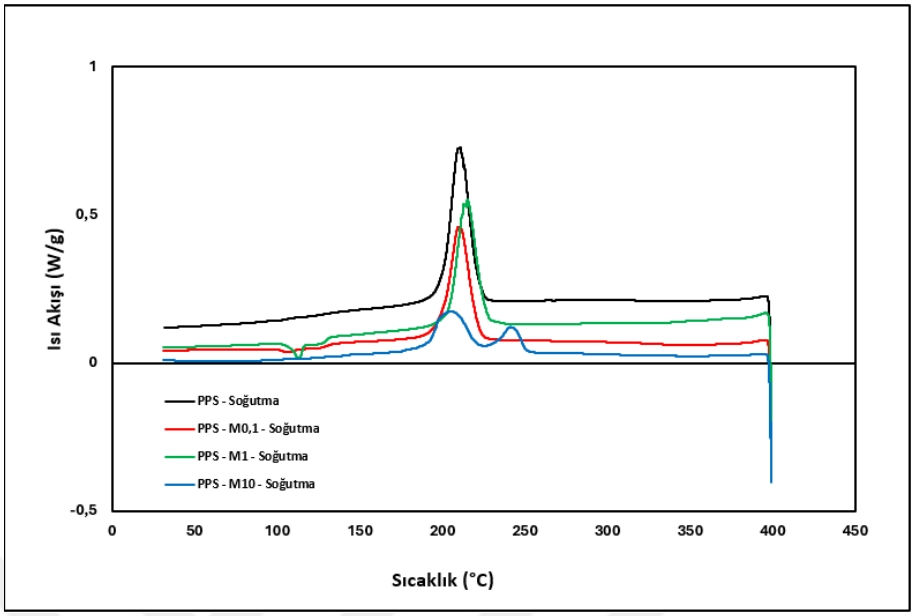
hızlandırıcı bir etkisi olduğu ve matris malzemesiyle güçlü bir etkileşim kurarak kristalleşme kinetiğini olumlu yönde etkileyebileceğini işaret etmektedir. Bu tür takviye maddelerinin, malzemenin termal özelliklerini optimize etme potansiyeline sahip olduğu görülmektedir (Xing ve diğ, 2018).

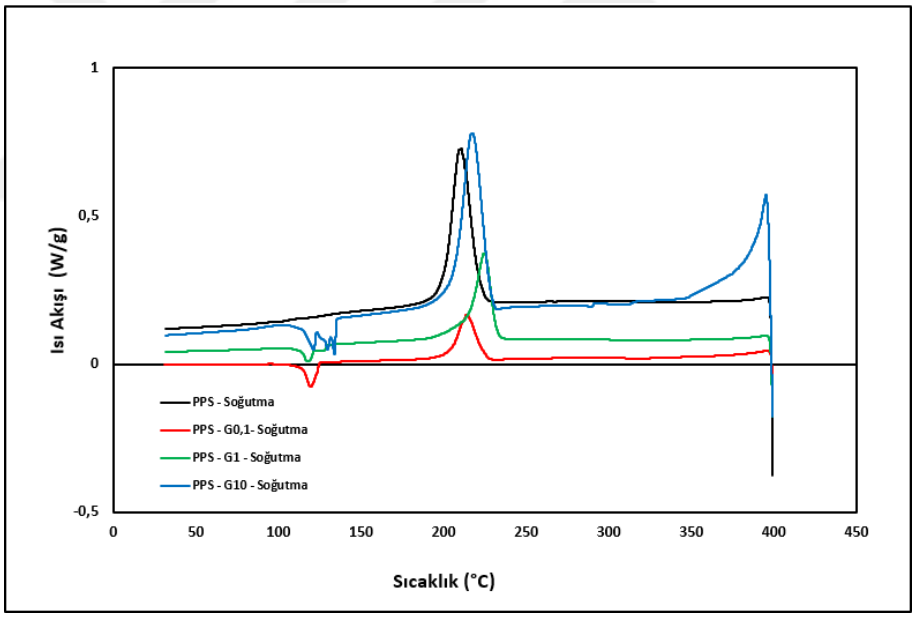


Şekil 3.9 : Sıcak Pres ile üretilen kompozitlerin DSC ısıtma grafikleri.

Şekil 3.10'da soğutma eğrisi incelendiğinde saf PPS'nin Tc,rc'sinin (yeniden kristalleşme sıcaklığı) 210,64°C olduğu bulunmuştur. Çalışma kapsamında yapılan üretimler göz önüne alındığında saf PPS'nin %72,21 kristalin olduğu, MWCNT takviyeli yapılarda ise kristalinitelerin %0,1, %1 ve %10 kütle kesirleri için sırasıyla

%56,57, %57,40 ve %46,27 olduğu görülmektedir. GNP takviyeli yapılarda ise kristalinitelerin sırasıyla %15,20, %44,63 ve %37,25 olduğu görülmektedir.





Şekil 3.10 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerin DSC soğutma grafikleri.

3.7 Sıcak Pres ile Üretilen Nanokompozitlerin TGA Analizi

TGA analizi, artan sıcaklıkla birlikte kütle kaybına odaklanarak yürütülmüş ve kalıntı kütlesi (%), türev ağırlığı (%/°C) ve ısı akışı (W/g) parametreleri analiz edilmiştir. PPS için, Çizelge 3.3'de T_d 539,97 °C olarak gösterilmiştir. Sıcaklık arttıkça kütle kaybı meydana gelmektedir. T_m yaklaşık 285 °C civarında gözlenmektedir. $T_{850°C}$'de hem T_d hem de kalıntı kütleleri incelendiğinde, saf PPS sırasıyla %72,35 ve %47,44'lük

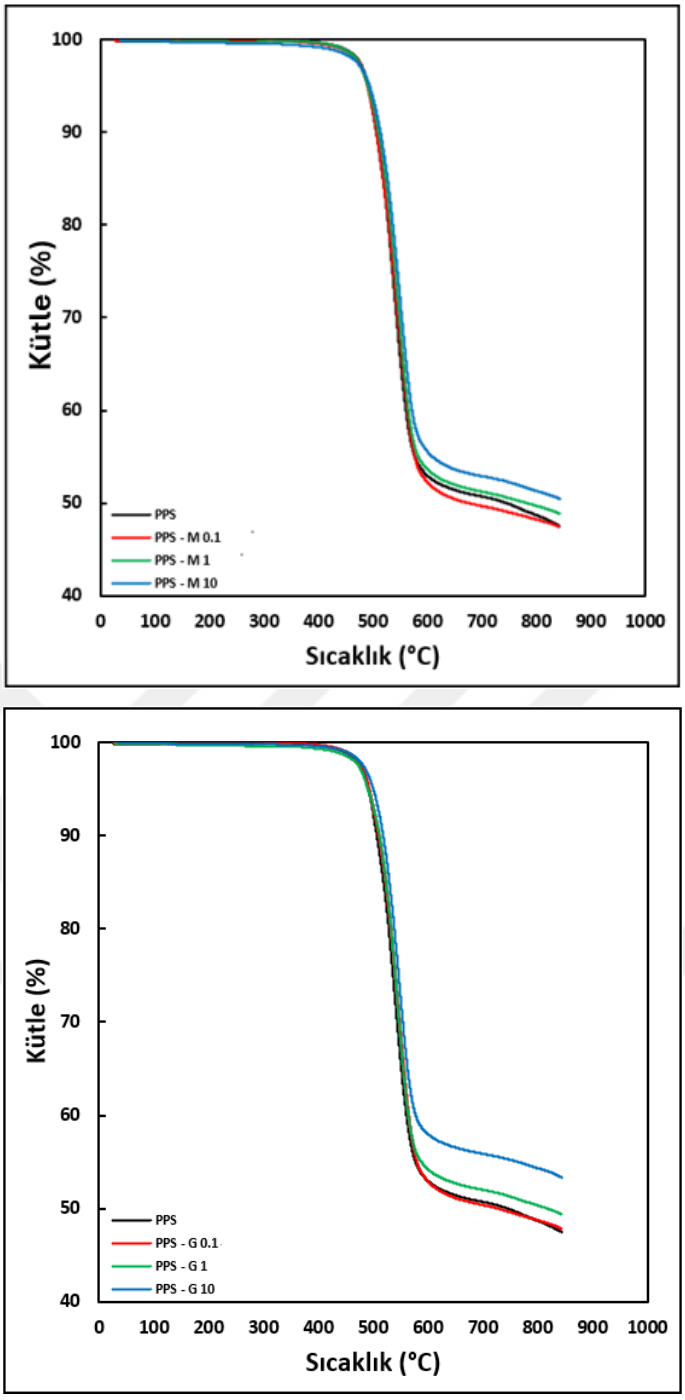
kalıntı kütleleri göstermektedir. MWCNT ve GNP ilavelerinin TGA üzerindeki etkisi T_d ve $T_{850\ °C}$ için değişmektedir. MWCNT ile takviyelendirilmiş kompozit yapılar incelendiğinde, ağırlıkça %0,1 takviyeli olan grup için T_d'de ~7°C'lik bir artış gözlemlenir ve sırasıyla %69,7 ve %47,39'luk kalıntı kütleleriyle 546,35°C'ye ulaşır. Ağırlıkça %1 takviyeli olan yapı için bu fark ~8°C'ye kadar artar ve T_d yaklaşık 547,2°C'ye ulaşır ve T_d için %70,87 ve $T_{850°C}$ için %48,79'luk kalıntı kütlelerine ulaşır.

Çizelge 3.3 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerin TGA değerleri.

Matris	Nano takviye (%)	Zaman (dk)	Bozunma sıcaklığı T_d (°C)	Isı Akışı W/g	Türev Ağırlığı % / °C	Kalıntı kütlesi (%)	Kütle 850 °C (%)
PPS	0	51,85	539,97	0,210	-0,676	72,35	47,44
	M 0,1	52,45	546,35	0,164	-0,611	69,70	47,39
	M 1	51,44	547,20	0,449	-0,672	70,87	48,79
	M 10	51,97	551,20	0,776	-0,633	71,21	50,41
	G 0,1	52,32	545,15	0,169	-0,647	71,80	47,82
	G 1	51,94	544,08	0,661	-0,712	72,21	49,32
	G 10	51,54	547,44	0,468	-0,660	74,16	53,31

Son olarak, ağırlıkça %10 takviyeli grupta T_d, %71,21'lik kalıntı kütlesi ile 551,20°C'ye ulaşırken, $T_{850°C}$'de kalıntı kütlesinin %50,51 olduğu görülmektedir. PPS'de MWCNT'nin varlığı T_d'yi artırmaktadır, ancak T_d'deki kalıntı kütlesi tüm takviyeli oranlar için saf PPS'ninkinden daha düşüktür.

GNP'nin PPS üzerindeki etkisi incelendiğinde, MWCNT'ye paralel ancak daha düşük seviyede bir T_d artışı görülmektedir. Şekil 3.11'de T_d'deki kalıntı kütleleri incelendiğinde, yapıdaki GNP varlığı arttıkça kalıntı kütlelerinin de arttığı görülmektedir. %0.1, %1 ve %10 ağır oranlarındaki nanokompozitlerde, T_d'deki kalıntı kütlelerinin sırasıyla %71,80, %72,21 ve %74,16 olduğu bulunmuş olup, önemli bir değişikliğe işaret etmemektedir. $T_{850°C}$'de, kalıntı kütlelerin sırasıyla %47,82, %49,32 ve %53,31 olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlar, GNP'nin yüksek sıcaklıklarda PPS'nin termal stabilitesini ve kalıntı oluşumunu artırıcı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. GNP'nin takviye oranına bağlı olarak kalıntı kütlesindeki artış, takviye maddesinin matris içinde daha dayanıklı bir yapı oluşturduğunu ve yüksek sıcaklıklarda bozunmaya karşı daha dirençli bir katkı sağladığını işaret etmektedir (Hu ve diğ, 2020; Perng, 2000).



Şekil 3.11 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerin TGA grafikleri.

3.8 Sıcak Pres ile Üretilen Nanokompozitlerin DMA Analizi

Saf PPS'in DMA sonuçlarına göre, kayıp modülü 104,76 °C sıcaklıkta 0,4 GPa olarak ölçülmüştür. Bunun yanı sıra, depolama modülü 2,5 GPa olarak belirlenmiş ve tanδ değeri 0,16 olarak Çizelge 3.4 gösterilmektedir. MWCNT ve GNP takviyeli nanokompozitler incelendiğinde, takviye malzemelerin aynı oranları dikkate alındığında kayıp modülünde benzerlikler gözlemlenmiştir (Şekil 3.13). Ancak,

depolama modülünü değerlendirirken, ağırlıkça %10 GNP eklenmesinin, %10 MWCNT takviyeli kompozitlere kıyasla daha yüksek bir depolama modülüyle sonuçlandığı gözlenmiştir. Bu durum, GNP'nin PPS matrisine daha etkili bir şekilde katkı sağladığını ve yüksek sıcaklık koşullarında daha üstün bir performans sunduğunu göstermektedir. (Xing ve diğ, 2018; J. Yang ve diğ, 2009).

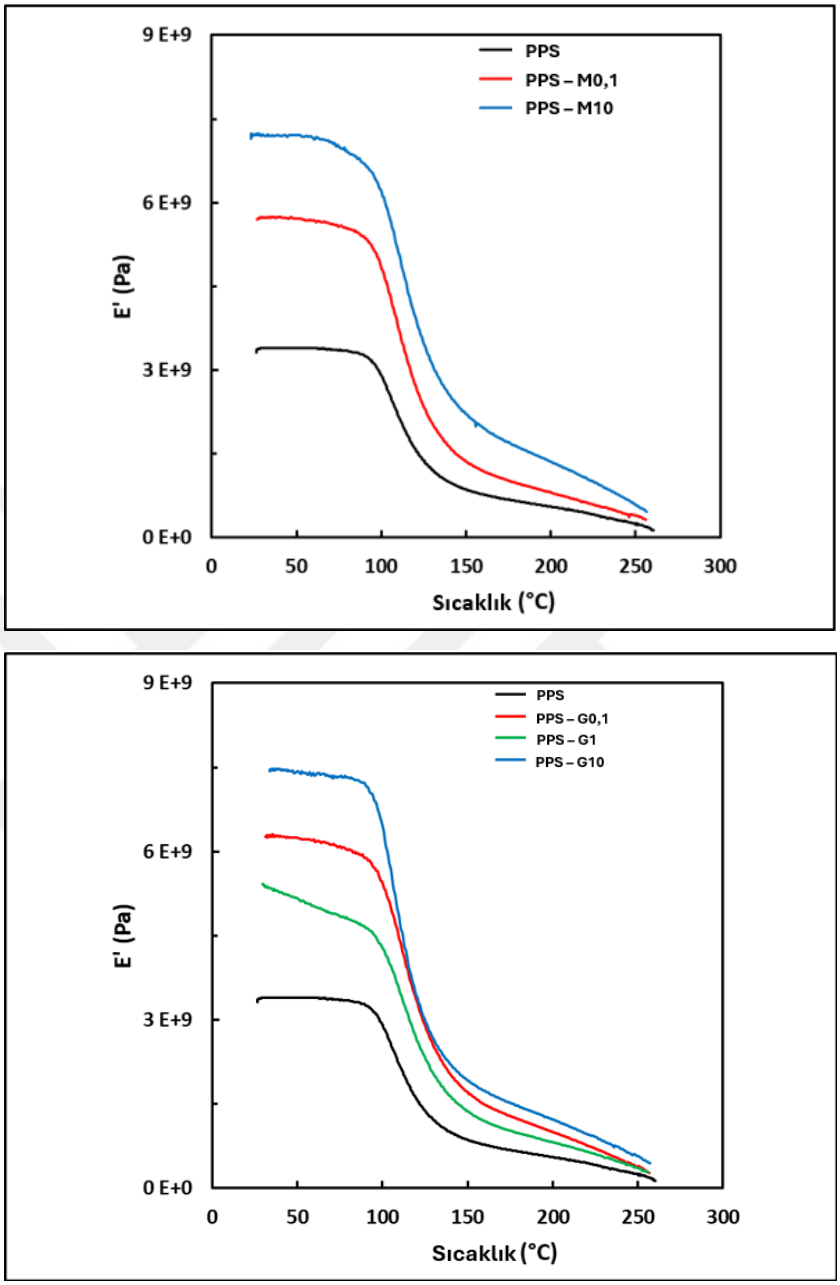
Çizelge 3.4 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerin DMA değerleri.

Matris	Nano takviye (%)	Sıcaklık (°C)	E' Elastik Modülü (Pa)	E'' Kayıp Modülü (Pa)	Tanδ (E''/E')
PPS	0	104,76	2,58E+09	4,04E+08	0,16
	M 0,1	106,59	4,17E+09	5,22E+08	0,13
	M 10	109,36	5,19E+09	5,66E+08	0,11
	G 0,1	113,23	4,04E+09	3,91E+08	0,10
	G 1	112,46	3,030E+09	3,95E+08	0,12
	G 10	107,37	5,21E+09	5,63E+08	0,11

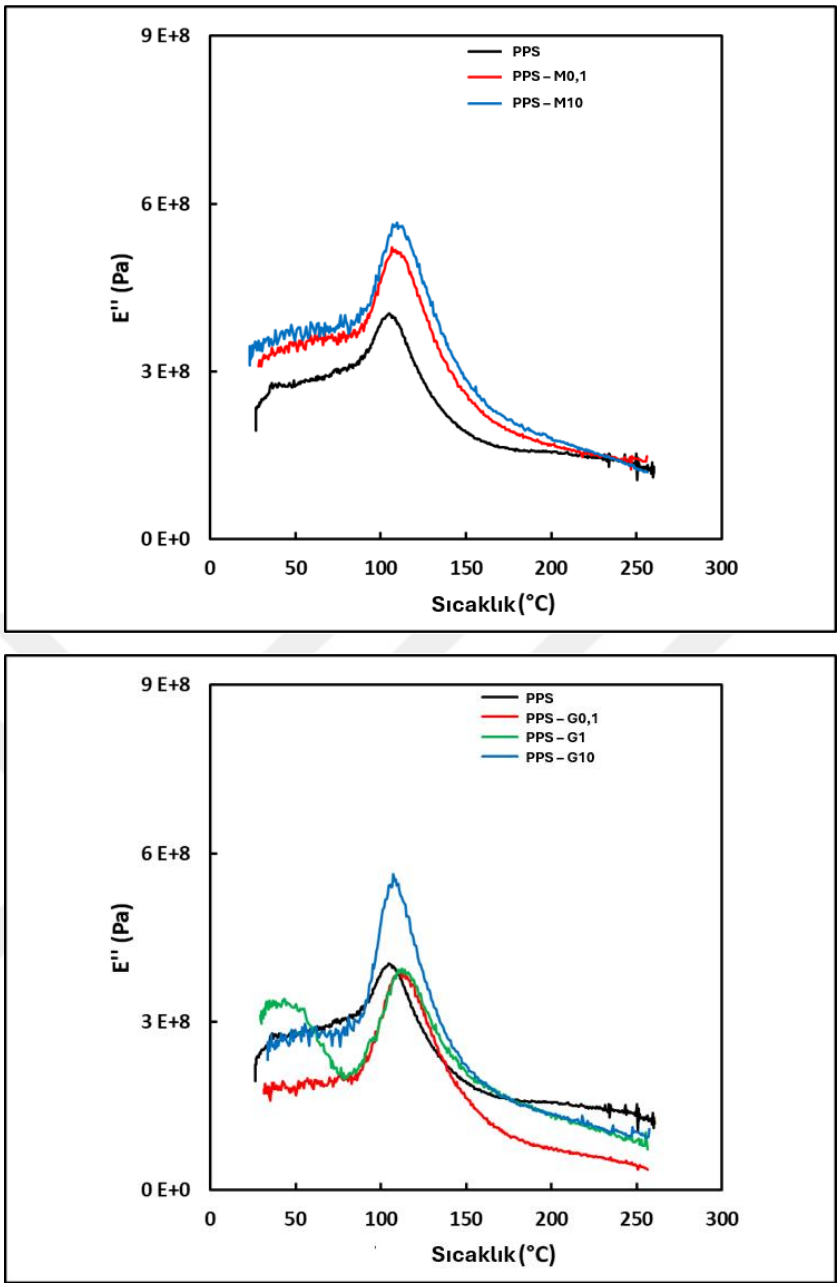
Takviye malzemesi içeriğinin artmasıyla birlikte, PPS matrisinin yüksek sıcaklıklardaki deformasyon direncinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, takviye malzemelerinin polimer yapısı üzerindeki güçlendirme etkisinin arttığını ortaya koymaktadır. Özellikle, hem MWCNT hem de GNP'nin PPS'e eklenmesi, malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirerek dinamik mekanik performansında kayda değer bir gelişme sağlamıştır. Bu iyileşmeler, nanokompozitlerin viskoelastik özelliklerinin yanı sıra yük taşıma kapasitesinde de önemli bir artışa neden olmuştur.

GNP takviyesinin depolama modülü üzerindeki etkisi, özellikle dikkat çekicidir (Şekil 3.12). GNP, iki boyutlu yapısı ve geniş yüzey alanı sayesinde PPS matrisine güçlü bir şekilde bağlanmakta ve matrisin yüksek sıcaklıklardaki stabilitesine önemli katkılar sağlamaktadır. GNP'nin bu özellikleri, malzemenin yük taşıma kapasitesini artırmakla kalmamakta, aynı zamanda termal dayanıklılığı da önemli ölçüde iyileştirmektedir. Bu durum, GNP takviyesinin nanokompozit yapılar içinde benzersiz bir avantaj sunduğunu ve yüksek sıcaklık koşullarında daha üstün bir performans sergilediğini göstermektedir. Sonuç olarak, GNP ve MWCNT takviyeleriyle geliştirilen PPS nanokompozitleri, üstün mekanik ve termal özellikleriyle yüksek sıcaklık uygulamaları için oldukça uygun malzemeler arasında yer almaktadır. Bu nanokompozitlerin mühendislik uygulamalarında sunduğu performans, onları

gelecekteki gelişmiş malzeme tasarımları için umut vadeden bir seçenek haline getirmektedir.

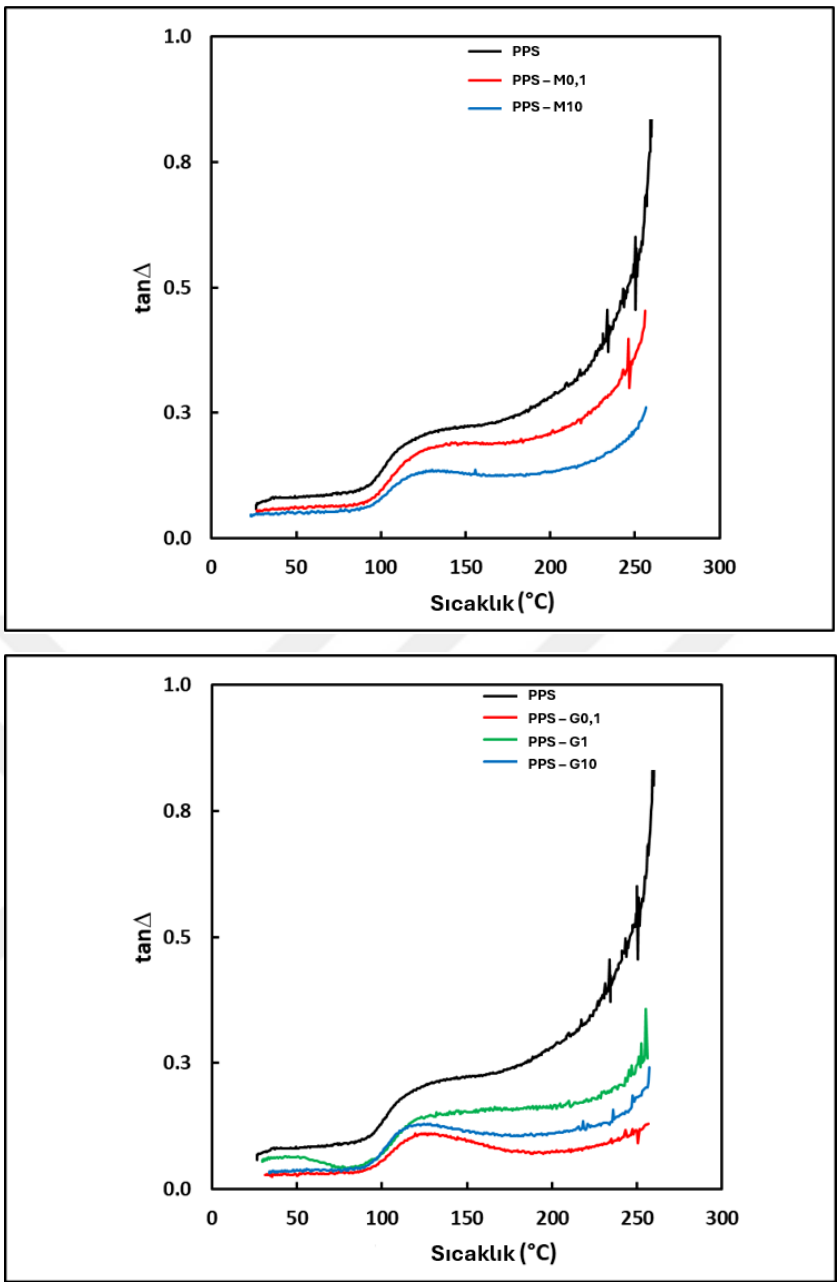


Şekil 3.12 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerin depolamo modülü grafiği.



Şekil 3.13 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerin kayıp modülü grafiği.

Şekil 3.14'teki tanδ/sıcaklık grafikleri incelendiğinde saf PPS'e göre MWCNT ve GNP takviyelendirildiğinde tüm oranlarda düştüğü gözlenmektedir. Bu da kompozitlerin nano takviye ilavesiyle daha elastik davranış gösterdiği görülmektedir. Termoplastik malzemelerde daha yüksek sıcaklıklarda tekrar bir tepe oluşturması erime ya da yumuşama davranışını göstermektedir.

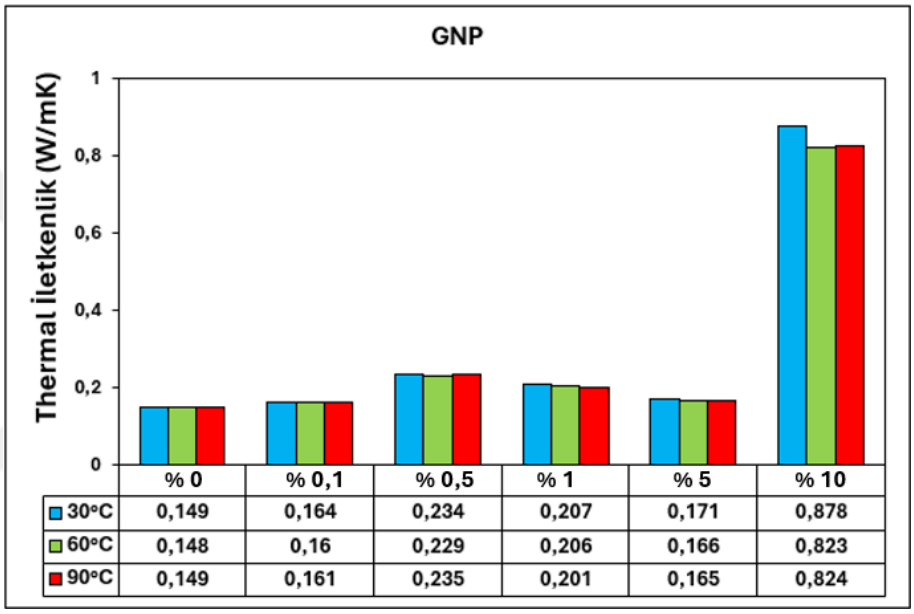


Şekil 3.14 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerin tanδ grafikleri.

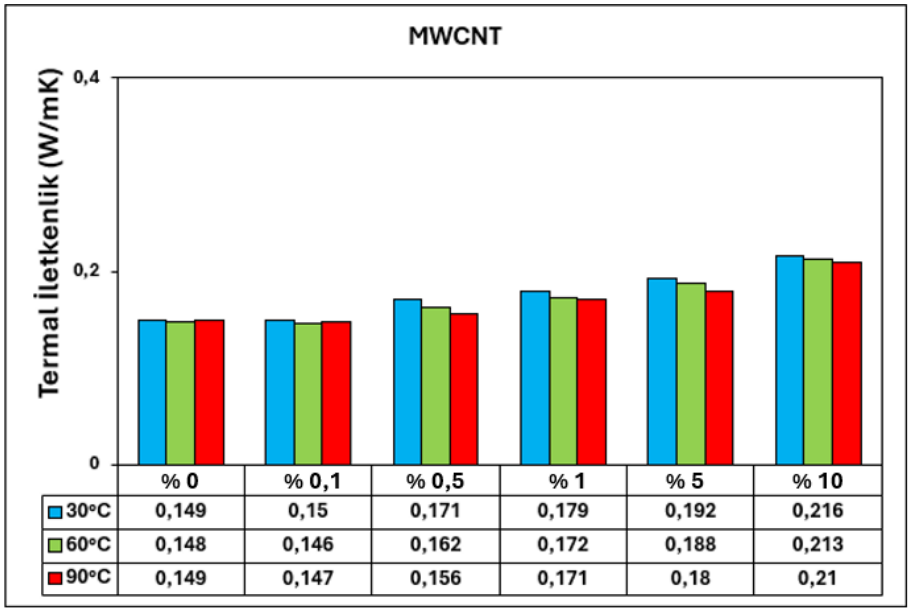
3.9 Sıcak Pres ile Üretilen Nanokompozitlerin Termal İletkenlik Testi

Termal iletkenlik testinde, her numune için üç farklı ölçüm alınmış ve test, Şekil 3.15'de görüldüğü gibi üç farklı sıcaklıkta (30-60-90 °C) gerçekleştirilmiştir. PPS matrisine GNP takviyesi ile ısıl iletkenlik değerinin arttığı gözlenmiştir. PPS matrisindeki GNP ağları ile iyi ısıl iletkenlik elde edilmiştir. Üretilen kompozit malzemelere ağırlıkça %10 GNP ilavesi ile ısıl iletkenlik değerinde yaklaşık %490 oranında artış sağlanmıştır. PPS/MWCNT nanokompozitleri incelendiğinde, MWCNT'lerin PPS matrisinde oluşturduğu ağ yapısının, PPS zincirlerinin termal

hareketliliğini engellediği, dolayısıyla PPS nanokompozitlerinin termal kararlılığını artırdığı görülmüştür (Díez-Pascual ve Naffakh, 2013; Wu ve diğ, 2009; J. Yang ve diğ, 2009; Yoo ve diğ, 2016). MWCNT takviyeli nanokompozitlerde, ağırlıkça %10 takviyelendirilmesi ile yaklaşık %45 oranında artış gözlenerek en yüksek değere ulaşılmıştır. Her iki nano takviye maddesi için de en yüksek oranlarda termal iletkenlikte önemli bir artış gözlenmektedir. Kompozitteki takviye malzemesi içeriği ağırlıkça %10 ulaştığında, GNP ve MWCNT parçacıkları matrisin yüzeyinde kümelenmektedir (Okutan ve diğ, 2023). Bu, termal iletkenlikte hızlı bir artışa neden olarak nispeten tam bir termal ağ oluşmaktadır.



	% 0	% 0,1	% 0,5	% 1	% 5	% 10
30°C	0,149	0,164	0,234	0,207	0,171	0,878
60°C	0,148	0,16	0,229	0,206	0,166	0,823
90°C	0,149	0,161	0,235	0,201	0,165	0,824



	% 0	% 0,1	% 0,5	% 1	% 5	% 10
30°C	0,149	0,15	0,171	0,179	0,192	0,216
60°C	0,148	0,146	0,162	0,172	0,188	0,213
90°C	0,149	0,147	0,156	0,171	0,18	0,21

Şekil 3.15 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerin termal iletkenlik grafikleri.

GNP nano takviye malzemesi, MWCNT ile karşılaştırıldığında termal iletkenlik özellikleri açısından daha etkili bir takviye malzemesi olduğu gözlenmektedir. MWCNT ve GNP nano takviye malzemelerinin avantajlarından biri, geniş yüzey alanları sayesinde PPS matrisiyle daha iyi yapışma sağlayabilmeleridir. Çalışmamızda nano takviyelerinin ilavesinin termal iletkenlik değerlerini artırdığı gözlenmiştir.

3.10 Sıcak Pres ile Üretilen Nanokompozitlerin Elektriksel İletkenlik Testi

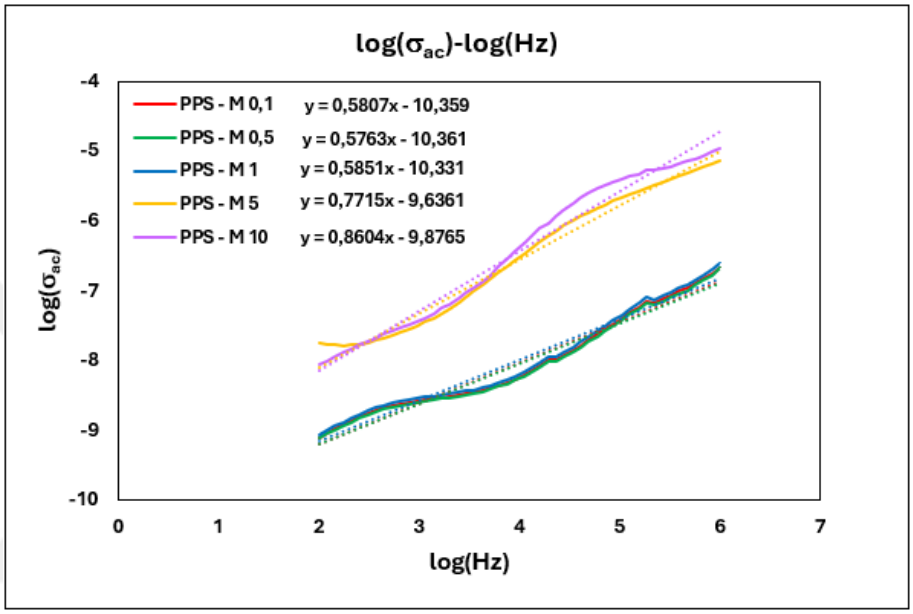
PPS/MWCNT ve PPS/GNP nanokompozitleri için 10^2 Hz ile 10^6 Hz aralığındaki AC modunda elektriksel iletkenlik performansı analiz edilmiştir. Elektriksel iletkenlik davranışı üç farklı frekans bölgesinde (düşük, orta ve yüksek frekans) incelenmiştir. Saf PPS için S-değeri karakteristikleri göz önüne alındığında, düşük frekans bölgesinde yarı iletken bölgesini gösteren 0,5846 değeri gözlemlenirken, orta frekans aralığında yalıtkan-yarı iletken bölgesinde 0,3167 değeri gözlemlenmiştir. Yüksek frekans aralığında, 0,7767'lik S-değeri yaklaşık %145 artarak iletkenliğe yaklaşmıştır (Çizelge 3.5).

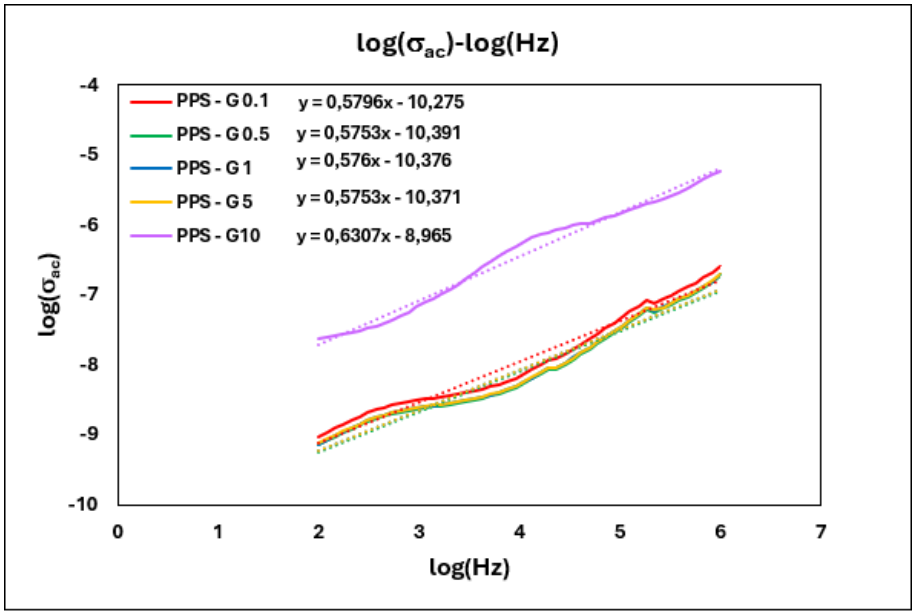
Çizelge 3.5 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerin elektriksel iletkenlik değerleri.

Matris	Nano takviye (%)	S Değeri 1.Bölge	2. Bölge	3. Bölge
PPS	0	0,5849	0,3167	0,7767
	M 0,1	0,5949	0,3189	0,7794
	M 1	0,5890	0,3228	0,7795
	M 10	0,5009	1,0204	0,6544
	G 0,1	0,5948	0,3204	0,7756
	G 1	0,5855	0,3189	0,7738
	G 10	0,3860	0,8966	0,5212

PPS/MWCNT nanokompozitleri değerlendirildiğinde, tüm oranlarda düşük frekans bölgesinde yarı iletken özellikler sergilemektedir. Orta frekans aralığında, S değeri %0,1 - %1 ağırlık takviyeli oranlar için düşük frekans bölgesine göre azalırken, ağırlıkça %10 MWCNT takviyeli grupta, saf PPS'ye kıyasla iletkenlikte yaklaşık %222'lik bir artış gözlemlenmiş ve bu da iletken özelliklere geçişi göstermektedir. Yüksek frekans bölgesinde, hem ağırlıkça %0,1 - %1 MWCNT takviyeli

nanokompozitler hem de saf PPS nanokompozitleri benzer iletkenlik performansı sergileyerek yarı iletken özellikler sergilemektedir. Ancak ağırlıkça %10 MWCNT takviyeli yapıda yaklaşık 0,65'lik S değeri yaklaşık %16 oranında azalarak yarı iletken bir performansa işaret ederken, PPS içerisinde aglomerasyon bölgeleri olasılığı ve dolayısıyla homojen dağılım elde edilememesi, MWCNT'nin yüksek frekans bölgesinde düşük iletkenlik özellikleri göstermesine neden olabilir (Okutan ve diğ, 2023).





Şekil 3.16 : Sıcak pres ile üretilen kompozitlerinin elektriksel iletkenlik grafikleri.

PPS/GNP nanokompozitleri incelendiğinde yalıtkan-yarı iletken ve yarı iletken-iletken bölgelerini geçemediği görülmektedir. Orta frekans aralığında ağırlıkça %10

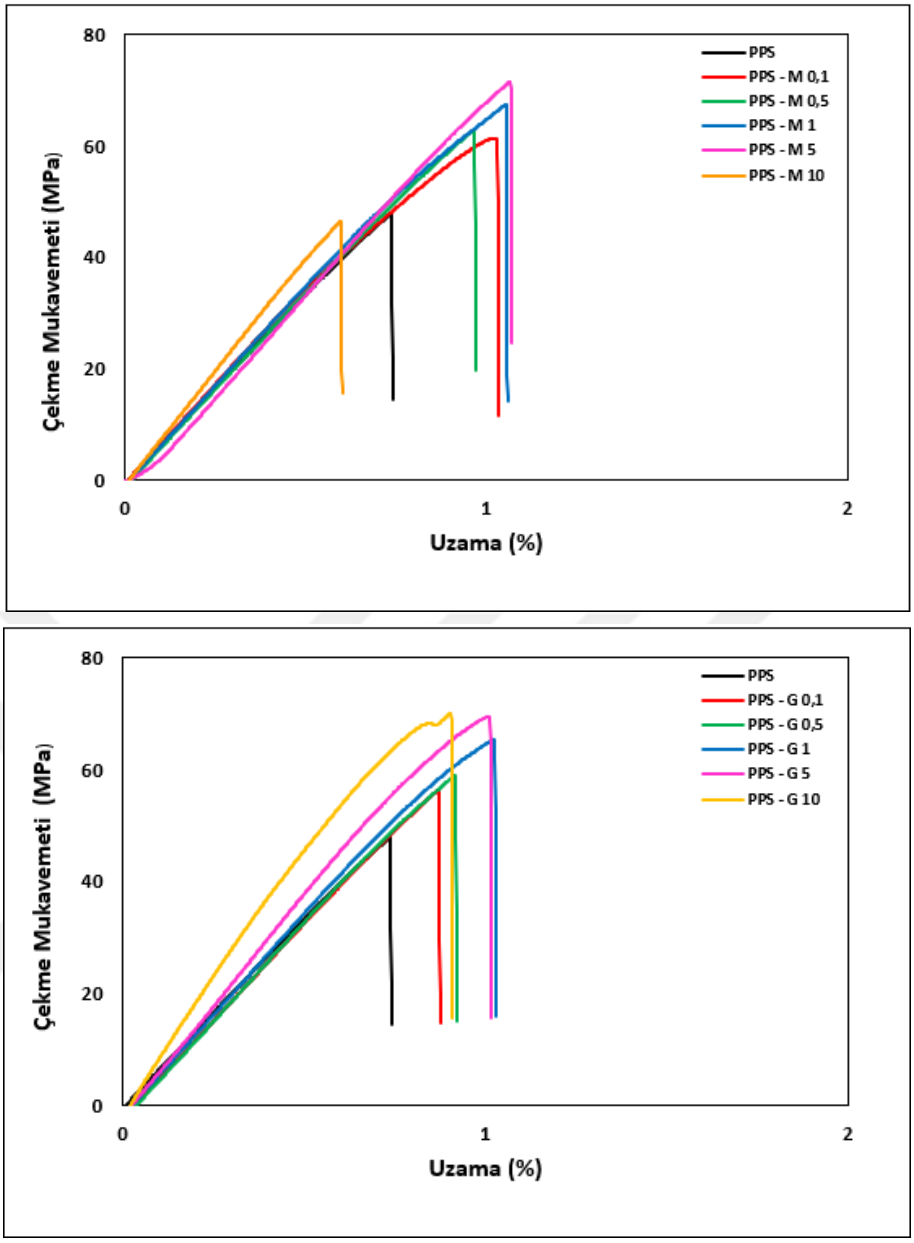
GNP eklendiğinde saf PPS'ye kıyasla %183'lük bir artış gözlemlenmesine rağmen iletkenlik seviyesine ulaşılamamaktadır (Şekil 3.16). GNP karakteristik yarı iletken performansı göstermektedir. Bu durum analiz sırasında uygulanan akımın potansiyel aglomerasyon bölgelerinden geçme olasılığını gündeme getirmektedir.

3.11 Enjeksiyon Kalıplama ile Üretilen Nanokompozitlerin Çekme Testi

Yaptığımız çalışmada 4 nano takviye için de çekme mukavemetinde artış söz konusudur. Saf PPS'in çekme mukavemeti 47,91 MPa olduğu gözlenmiştir (Çizelge 3.6). MWCNT takviyeli nanokompozitlerde ağırlıkça %10 takviyeli grup dışında diğer gruplarda bir artış söz konusudur. Saf PPS' göre ağırlıkça %5 MWCNT takviyeli nanokompozitlerin yaklaşık olarak %49,2 çekme mukavemetinde bir artış söz konusudur. Ağırlıkça %10 takviyeli grupta nano takviye ile matris malzeme ile yeterince etkileşimde bulunmaması ya da aglomerasyonun meydana gelmesi nanokompozitlerin çekme mukavemetini olumsuz etkilemiş olabilir. GNP takviyeli nanokompozitlerde ağırlıkça takviye oranı arttıkça çekme mukavemetinde de düzenli bir artış söz konusudur. %10 ağırlıkça GNP takviyeli nanokompozitlerde yaklaşık olarak %46 bir artış gözlenmiştir (Şekil 3.17).

Çizelge 3.6 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen kompozitlerin çekme testi değerleri.

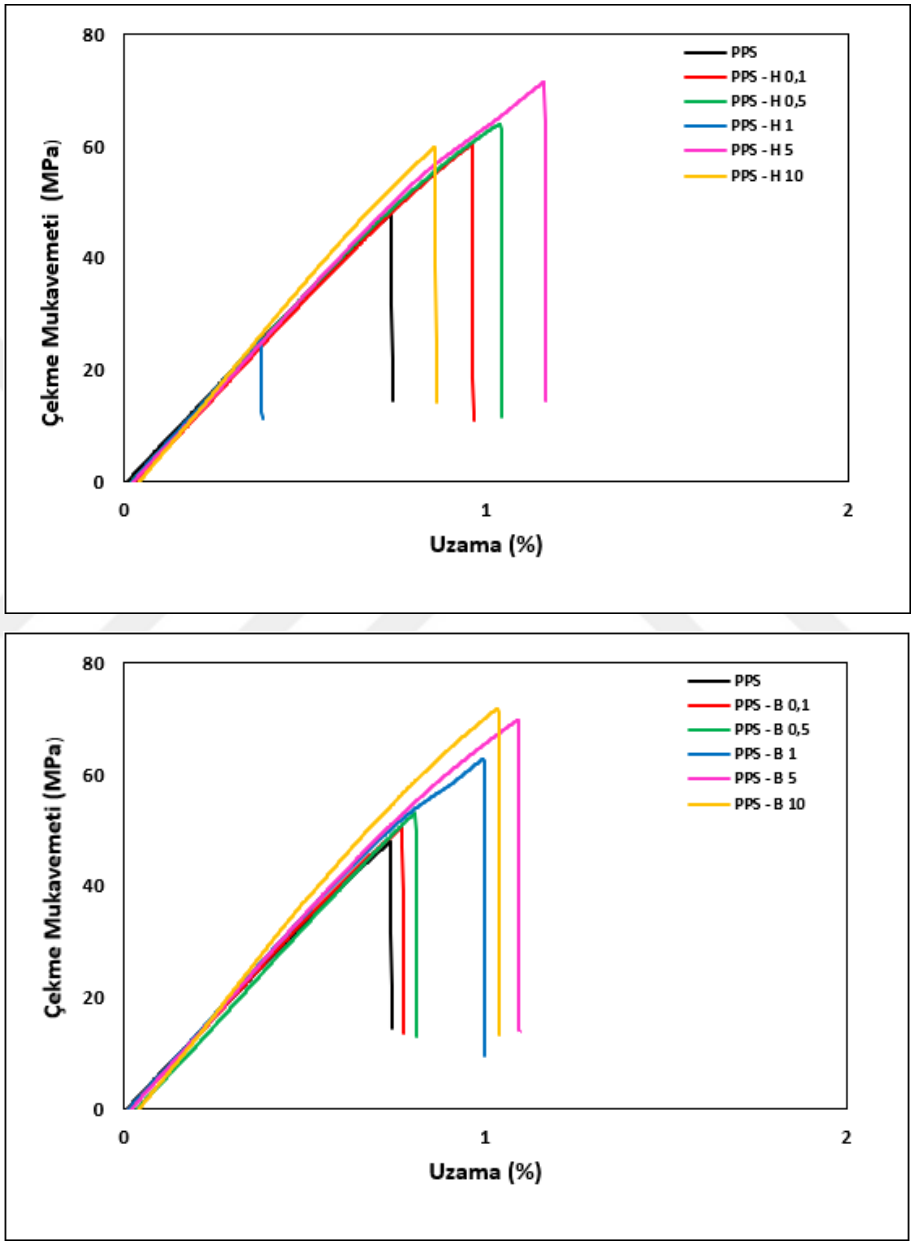
Matris	Nano takviye (%)	Çekme Mukavemeti (MPa)
PPS	0	47,91
	M 0,1	61,32
	M 0,5	62,86
	M 1	67,36
	M 5	71,50
	M 10	46,40
	G 0,1	56,39
	G 0,5	59,04
	G 1	65,46
	G 5	69,51
	G 10	70,10
	H 0,1	60,29
	H 0,5	63,92
	H 1	51,65
	H 5	71,44
	H 10	72,62
	B 0,1	50,50
	B 0,5	53,12
	B 1	62,86
	B 5	69,75
	B 10	71,85



Şekil 3.17 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen karbon bazlı nano takviyeli kompozitlerin çekme grafikleri.

H-BN nano takviyeli kompozitlerde ağırlıkça %10 takviyeli grupta yaklaşık olarak %52'lik bir artış söz konusudur. BNNT takviyeli nanokompozitlerde ise ağırlıkça %10 takviyeli grupta yaklaşık olarak %50 artış söz konusudur. Dört nano takviyeyi de incelediğimizde çekme mukavemetinde en etkili nano takviyenin h-BN olduğu gözlenmiştir. Çekme mukavemeti değerini 72,62 MPa'a arttırmıştır (Şekil 3.18). Literatür çalışmalarını incelediğimizde Wu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada; PPS matrisine ağırlıkça %9 MWCNT takviyelendirildiğinde çekme dayanımında %84, Young modülünde %200 artış gözlemlenmiştir (Wu ve diğ, 2009). GNP ile

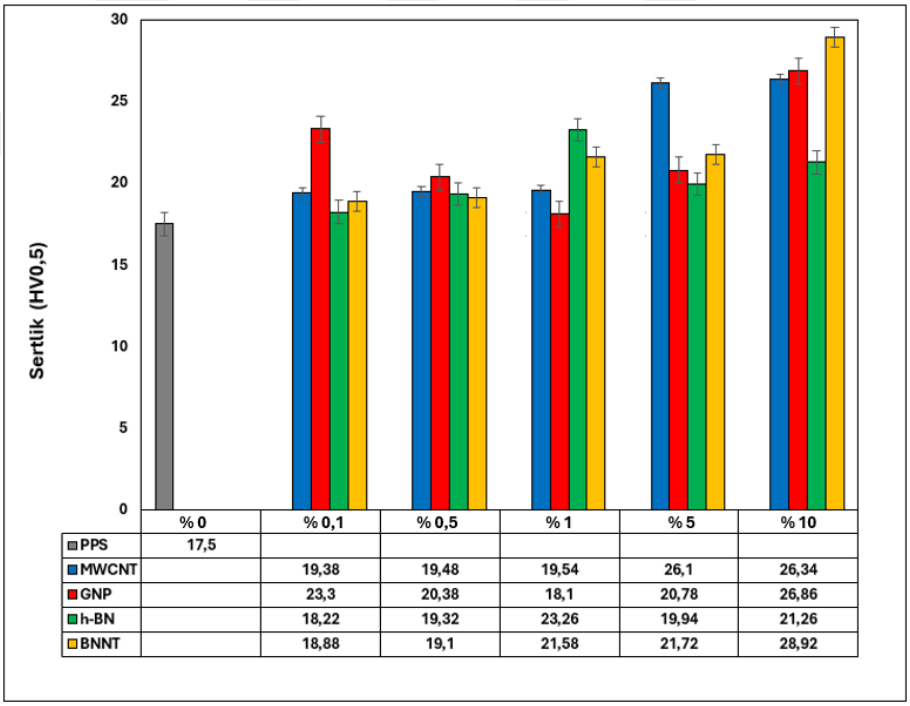
güçlendirilmiş PPS nanokompozitlerinde de çekme mukavemeti ve gerilme modülü önemli ölçüde arttırmıştır (X. Jiang ve Drzal, 2012; Karsli ve diğ, 2022; Xing ve diğ, 2018). Mekanik özelliklerdeki bu artış matris/takviye faz arasında arayüzey etkileşiminin iyi olmasına bağlanabilir. Nano takviyelerin eklenmesi ile PPS nanokompozitlerinin mekanik özelliklerinin arttığı gözlenmiştir (Z. Jiang ve diğ, 2012; K. Kim ve Kim, 2016; J. Yang ve diğ, 2009; R. Yang ve diğ, 2018; Yu ve diğ, 2009).



Şekil 3.18 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen bor bazlı nano takviyeli kompozitlerin çekme grafikleri.

3.12 Enjeksiyon Kalıplama ile Üretilen Nanokompozitlerin Sertlik Testi

Yaptığımız çalışma PPS matrise MWCNT, GNP, h-BN ve BNNT nano takviyeleri eklenerek enjeksiyon kalıplama ile üretilen nanokompozit malzemelerin sertlik değerlerini incelediğimizde saf PPS'in 17,5 HV olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.19). Dört nano takviye arasında sertliğin en çok artmasına sebep olan nano takviye BNNT olup, ağırlıkça %10 eklendiğinde yaklaşık olarak %65 arttırdığı gözlenmiştir. Saf PPS'e göre diğer nano takviyelerin artış oranlarını incelediğimizde MWCNT takviyeli grupta sertliğin en fazla arttığı ağırlıkça %10 takviyeli grupta yaklaşık olarak %50 artarak 26,34 HV'ye ulaşmasına sebep olmuştur. PPS/GNP nanokompozitlerinde yine en yüksek ağırlıkça %10 eklenen grupta yaklaşık olarak %51 sertliğin artmasını sağlamıştır. PPS/h-BN nanokompozitleri incelendiğinde ise; sertlik değerinin en yüksek seviyeye ulaştığı ağırlıkça %1 takviyeli grupta yaklaşık olarak %32 artmasını sağlayarak 23,26 HV değeri gözlenmiştir. Diğer yandan saf PPS polimerine kıyasla dört nano takviye için de tüm oranlarda sertlikte bir artış söz konusudur.



	% 0	% 0,1	% 0,5	% 1	% 5	% 10
PPS	17,5					
MWCNT		19,38	19,48	19,54	26,1	26,34
GNP		23,3	20,38	18,1	20,78	26,86
h-BN		18,22	19,32	23,26	19,94	21,26
BNNT		18,88	19,1	21,58	21,72	28,92

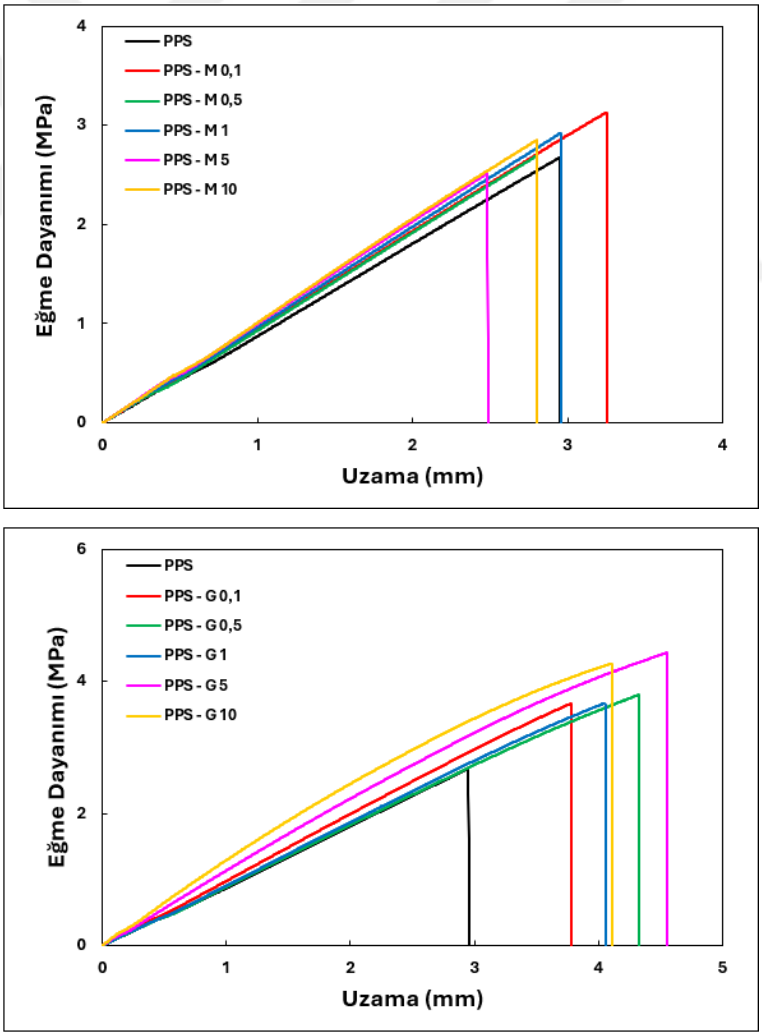
Şekil 3.19 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen kompozitlerin sertlik grafikleri.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde; PPS/CNT nanokompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Bizim çalışmamızla benzer olarak CNT'lerin direkt dahil edilmesiyle birlikte sertlik ve mukavemette küçük artışlara yol açtığı görülmüştür (Díez-Pascual ve Naffakh, 2013). Yapılan başka bir çalışmada da (Takahashi ve diğ, 2023); PPS

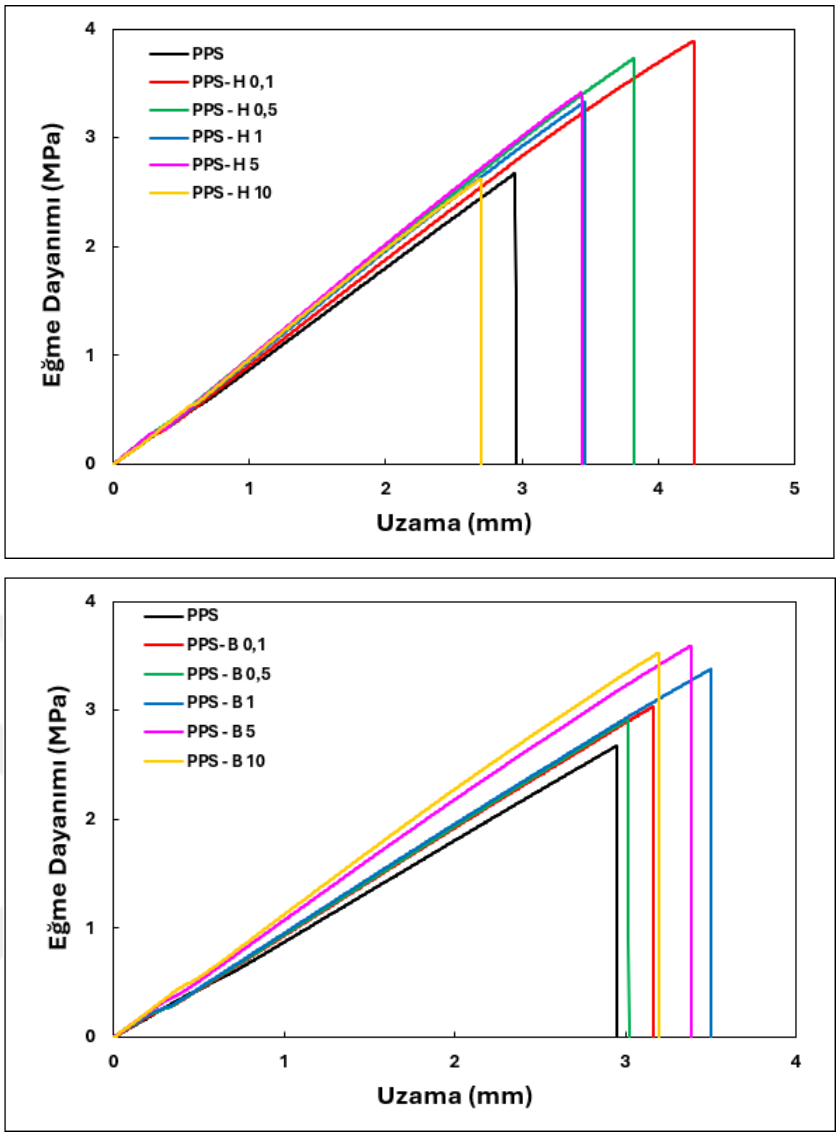
matrise CNT eklenmesi ile sertlikte artış gözlenmiştir. Ancak CNT'lerin ağırlıkça artışıyla birlikte sertlikte artış oranı azalmaktadır.

3.13 Enjeksiyon Kalıplama ile Üretilen Nanokompozitlerin 3 Nokta Eğme Testi

Enjeksiyon kalıplama ile üretilen PPS nanokompozitlerimizin 3 nokta eğme test sonuçlarını incelediğimizde, Şekil 3.20'de görüldüğü gibi PPS/MWCNT ve PPS/GNP nanokompozitlerinin saf PPS'e göre eğme dayanımının arttığı gözlenmektedir. PPS/MWCNT kompozitlerinde en yüksek eğme dayanımı ağırlıkça %0,1 takviyeli grup yaklaşık olarak eğme dayanımını %28 arttırmaktadır. PPS/GNP kompozitleri incelendiğinde ise; saf PPS'e göre tüm oranlarda eğme dayanımında bir artış söz konusudur, ancak en yüksek eğme dayanımı ağırlıkça %5 takviyeli grupta gözlenerek yaklaşık olarak %61 artmasını sağlamıştır.



Şekil 3.20 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen karbon bazlı nano takviyeli kompozitlerin eğme grafikleri**.**

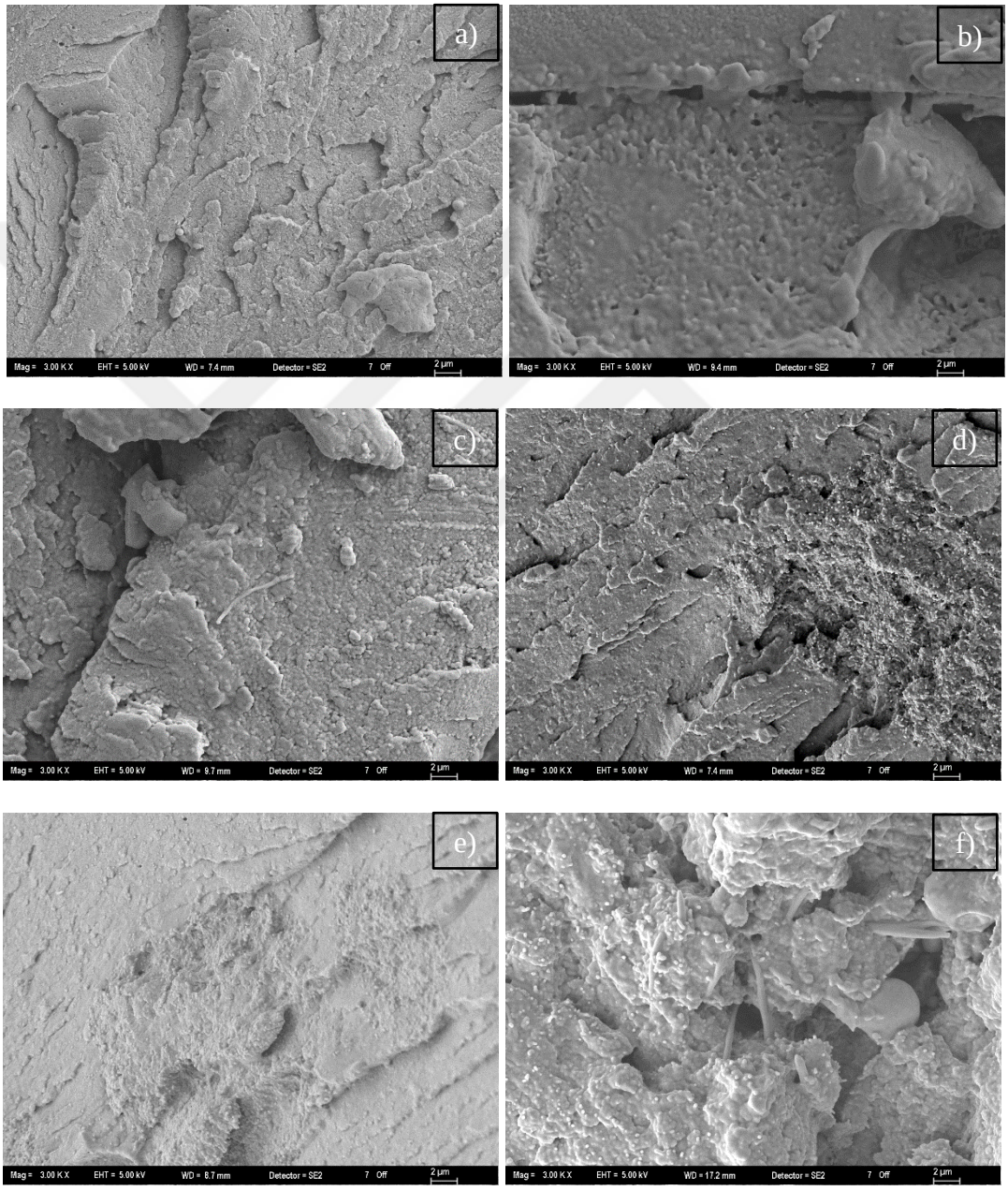


Şekil 3.21 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen bor bazlı nano takviyeli kompozitlerin eğme grafikleri.

Şekil 3.21'daki bor bazlı nano takviyelerin eğme dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde; her iki nano takviye için de eğme dayanımında saf PPS'e göre bir artış söz konusudur. Dört nano takviye arasında eğme dayanımının iyileşmesinde en etkili nano takviyenin GNP olduğu gözlenmiştir. Çalışmamızla benzer şekilde yapılan çalışmada; PPS/MWCNT nanokompozitleri enjeksiyon kalıplama ile üretilmiş ve eğme dayanımının arttığı gözlenmiştir (Z. Jiang ve diğ, 2012). Yapılan bir başka çalışmada ise düşük oranlardaki CNT takviyelendirildiğinde eğme dayanımı artarken eklenen oran arttıkça eğme dayanımında bir azalış gözlenmiştir (Cho, 2008).

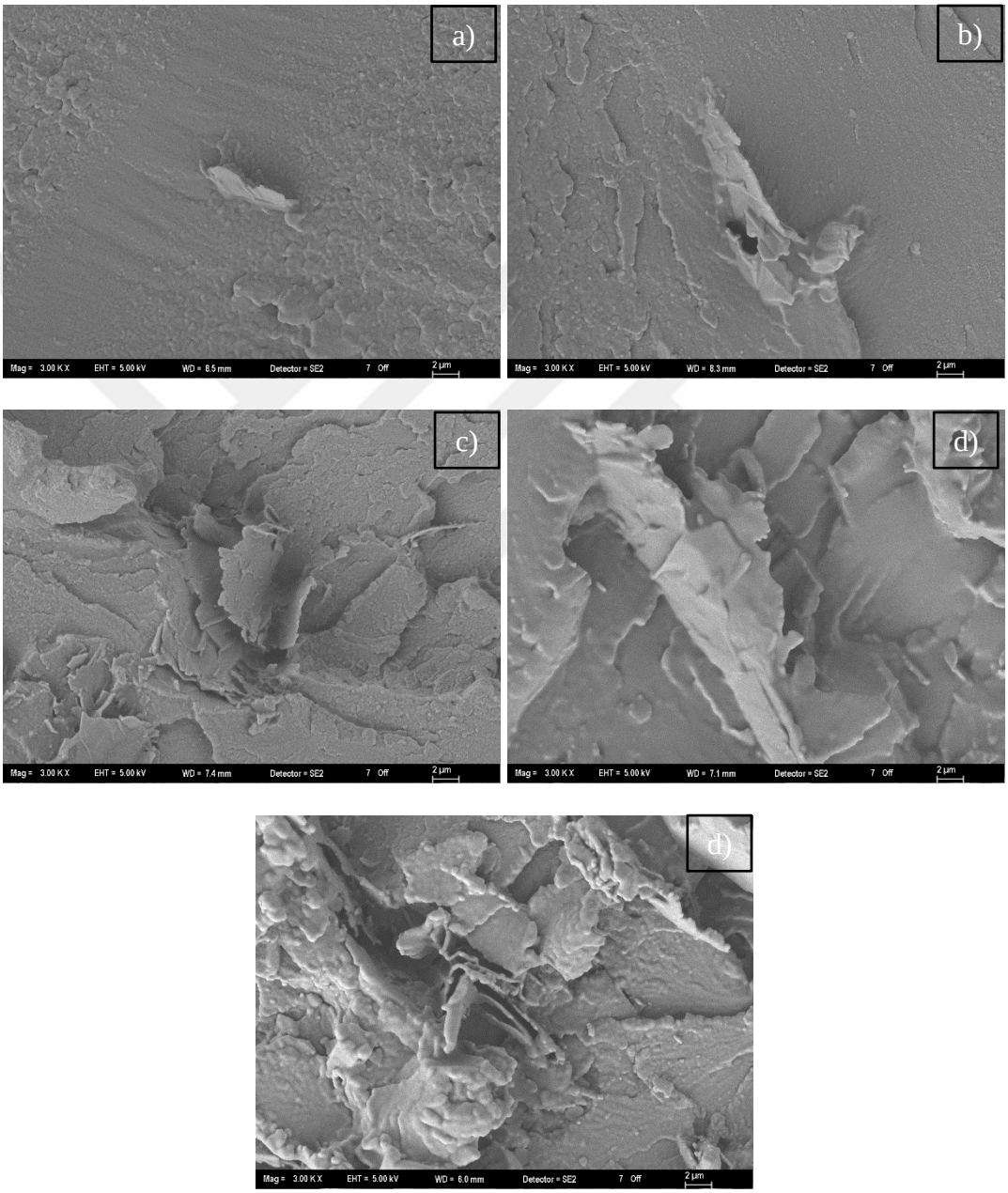
3.14 Enjeksiyon Kalıplama ile Üretilen Nanokompozitlerin SEM Analizi

Enjeksiyon kalıplama ile üretilen nanokompozitlerin çekme testinden sonra elde edilen kırık yüzeylerinden SEM göntüleri alınmıştır. Şekil 3.22 a'da saf PPS morfolojisi incelendiğinde çekme gerilmesi altında gevrek bir kırılma yüzeyi oluştuğu gözlenmektedir. Şekil 3.22 b'de MWCNT'lerin PPS matris içerisinde gömülü bir şekilde olduğu, bu da arayüzey bağlanmasının güçlü olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 3.22 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen a) saf PPS, b)% 0,1 MWCNT, c)% 0,5 MWCNT, d)%1 MWCNT, e)%5 MWCNT ve f) %10 MWCNT takviyeli kompozitlerin SEM görüntüleri.

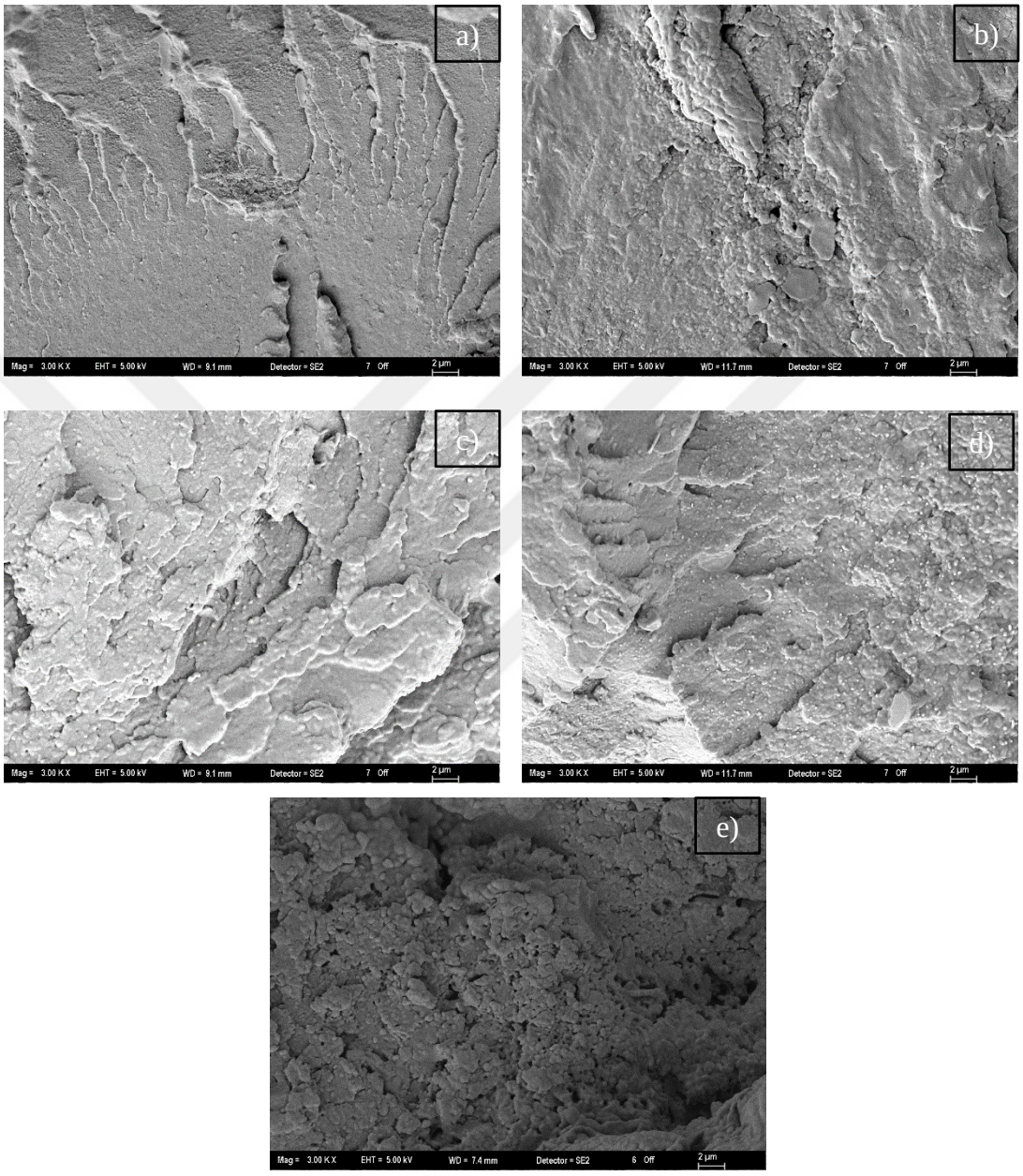
Şekil 3.22 d'de ise MWCNT'lerin varlığı çatlak ilerlemesini engellediği gözlenmektedir. Bu da MWCNT'lerin çekme mukavemetini arttırıcı etkisini desteklemektedir. Şekil 3.22 e'de pürüzlü bir yapı gözlenmektedir. Bu da hem sünek hem de kırılgan bir davranışın karışımı olabilir. Şekil 3.22 f'de boşluklu ve gözenekli yapılar bulunmaktadır. Bu kusurların varlığı çekme mukavemetindeki azalışı açıklamaktadır. Bu tür kusurlar takvite oranı ve üretim yöntemine bağlıdır.



Şekil 3.23 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen a)%0,1 GNP, b)%0,5 GNP, c)%1 GNP, d) %5 GNP ve e) %10 GNP takviyeli kompozitlerin SEM görüntüleri.

Şekil 3.23'deki PPS/GNP nanokompozitleri incelendiğinde tüm oranlarda GNP'lerin matris içerisinde sıkıca gömülü olduğu ve çevresinde çatlak oluşumunun olmadığı

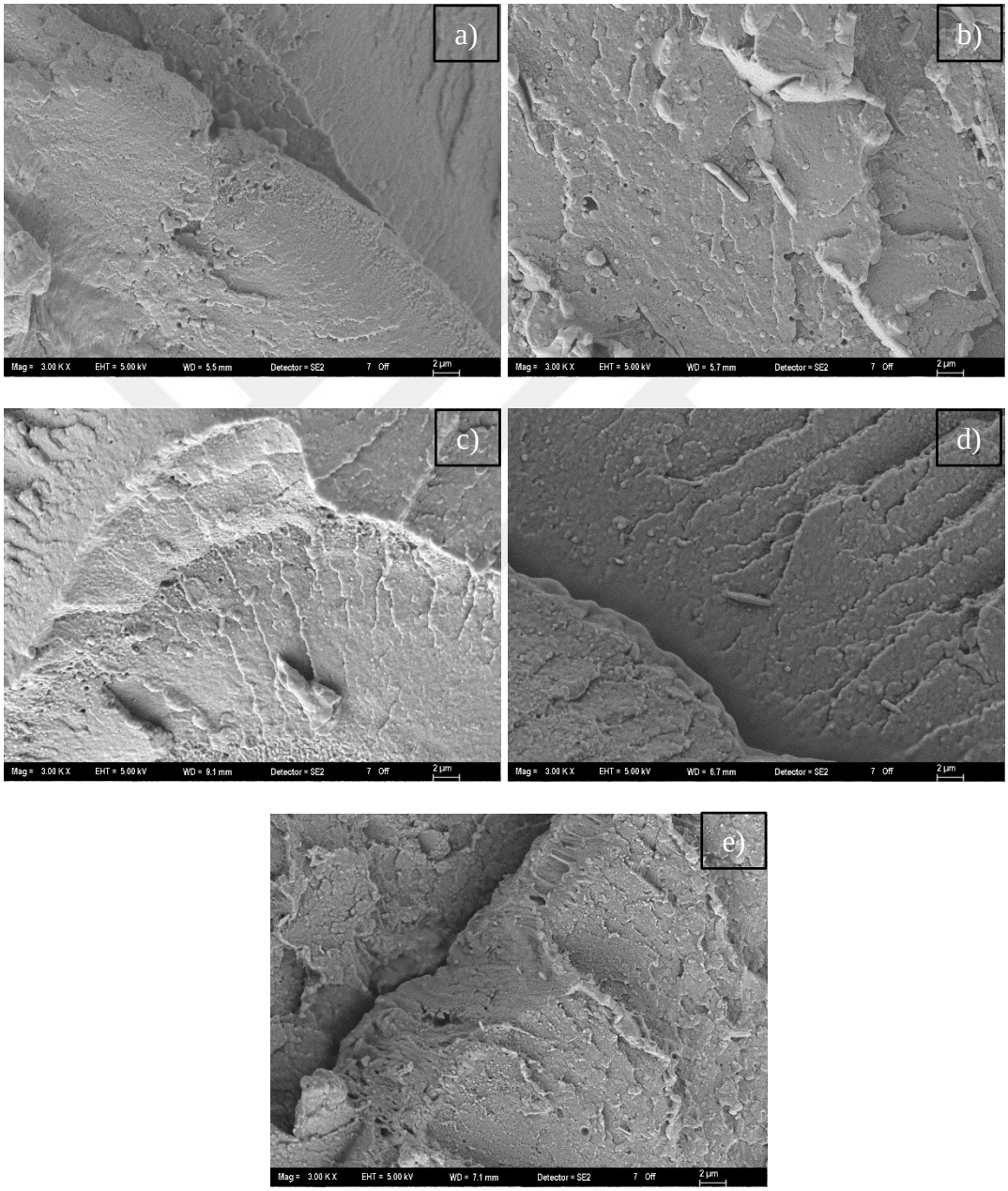
gözlenmektedir. Bu da PPS matris ile GNP nano takviyelerinin güçlü bir arayüzey bağlanmasının sağlandığının göstergesidir. Bu da mekanik özelliklerdeki artışı açıklamaktadır. Şekil 3.23 d'de GNP takviyesinin çekme yönünde hizalandığı gözlenmektedir. Bu çekme mukavemetinin anizotropik bir artışına yol açabilir.



Şekil 3.24 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen a)%0,1 h-BN, b)%0,5 h-BN, c)%1 h-BN, d)%5 h-BN ve e) %10 h-BN takviyeli kompozitlerin SEM görüntüleri.

PPS/h-BN kompozitlerinin Şekil 3.24'de SEM görüntüleri incelendiğinde yüzeyde eşit şekilde dağılmış küçük h-BN nano takviyeleri gözlenmektedir. PPS matris içerisinde h-BN takviye oranı arttıkça kırılma yüzeyleri daha pürüzlü bir hal almaktadır. Bu da sünek kırılma olduğu ve oran arttıkça çekme mukavemetinin artışını desteklemektedir.

Şekil 3.25'de PPS/BNNT kompozitlerinin SEM görüntülerinde uzun ve ince nanotüplerinin matris içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı gözlenmektedir. Bu da yük transferi kapasitesinin arttığını işaret eder. PPS matris içerisinde BNNT oranı arttıkça kırılma yüzey görüntüsünde pürüzler artmaktadır. Bu da nano takviye arttıkça daha sünek kırılma gerçekleştirdiğini bu da çekme mukavemetindeki artışı açıklamaktadır.



Şekil 3.25 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen a)%0,1 BNNT, b)%0,5 BNNT, c)%1 BNNT, d)%5 BNNT ve e) %10 BNNT takviyeli kompozitlerin SEM görüntüleri.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde; kompozit malzemede h-BN içeriği arttıkça, parçacıklar arasındaki ortalama mesafe azalır ve hareketsiz hale gelirler. h-BN nano takviye malzemelerinin homojen dağılımı, matris/takviye arayüzünde uygun bağlanma ile sonuçlanmakta bu da mekanik özellikleri olumlu etkilemektedir (L. Liu ve diğ, 2016; X. Yang ve diğ, 2017). Bizim çalışmamıza benzer şekilde PPS matrisine MWCNT takviyelendirildiğinde homejen dağılım sağlandığında mekanik özelliklerin iyileştiği gözlenmiştir (Yoo ve diğ, 2016; Yu ve diğ, 2009). MWCNT'ler PPS matris malzemesi içinde SEM analizlerinde homojen bir şekilde dağıldığı gözlendiğinde %8 ağırlıkça MWCNT/PPS nanokompozitler için Young modülünde %36'lık bir artış ve çekme dayanımında %13'lük bir artış sağlanmaktadır (Z. Jiang ve diğ, 2012). Bu da bizim SEM görüntülerimizi desteklemektedir.

3.15 Enjeksiyon Kalıplama ile Üretilen Nanokompozitlerin DSC Analizi

DSC analizi sonucunda elde ettiğimiz veriler Çizelge 3.7'de gösterilmektedir. MWCNT takviyeli kompozitler incelendiğinde; MWCNT'nin PPS matris içerisinde homojen dağılımı ve matrisle güçlü etkileşimi ile zincir hareketliliği nano takviye oranının artmasıyla kısıtlanarak T_g değerinde artışa sebep olmuştur. MWCNT'ler PPS'in kristal yapısını doğrudan etkilemez bu da T_m üzerinde çok büyük değişime sebep olmamıştır.

Çizelge 3.7 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen kompozitlerin DSC değerleri.

Matris	Takviye (%)	T_g (°C)	Isı Akışı T_g (W/g)	T_m (°C)	Isı Akışı T_m (W/g)	T_c (°C)	Isı Akışı T_c (W/g)
PPS	M 0,1	119,73	-0,50	280,90	-3,58	210,69	3,18
	M 1	121,10	-0,03	279,89	-2,11	214,61	3,15
	M 10	131,36	1,31	279,07	-3,64	224,95	3,57
	G 0,1	121,45	-1,28	280,74	-4,31	210,05	3,14
	G 1	121,37	-0,34	280,14	-3,25	216,61	3,48
	G 10	121,89	-0,62	279,74	-3,42	227,66	4,35
	H 0,1	121,09	-1,04	281,11	-4,80	207,70	3,27
	H 1	121,10	-0,33	279,87	-2,65	218,50	3,03
	H 10	123,18	-1,14	279,41	-3,72	227,11	4,95
	B 0,1	122,56	-0,74	280,95	-3,56	212,53	3,15
	B 1	113,99	0,26	280,50	-2,78	218,88	3,78
	B 10	114,88	-0,28	279,72	-2,50	229,04	5,22

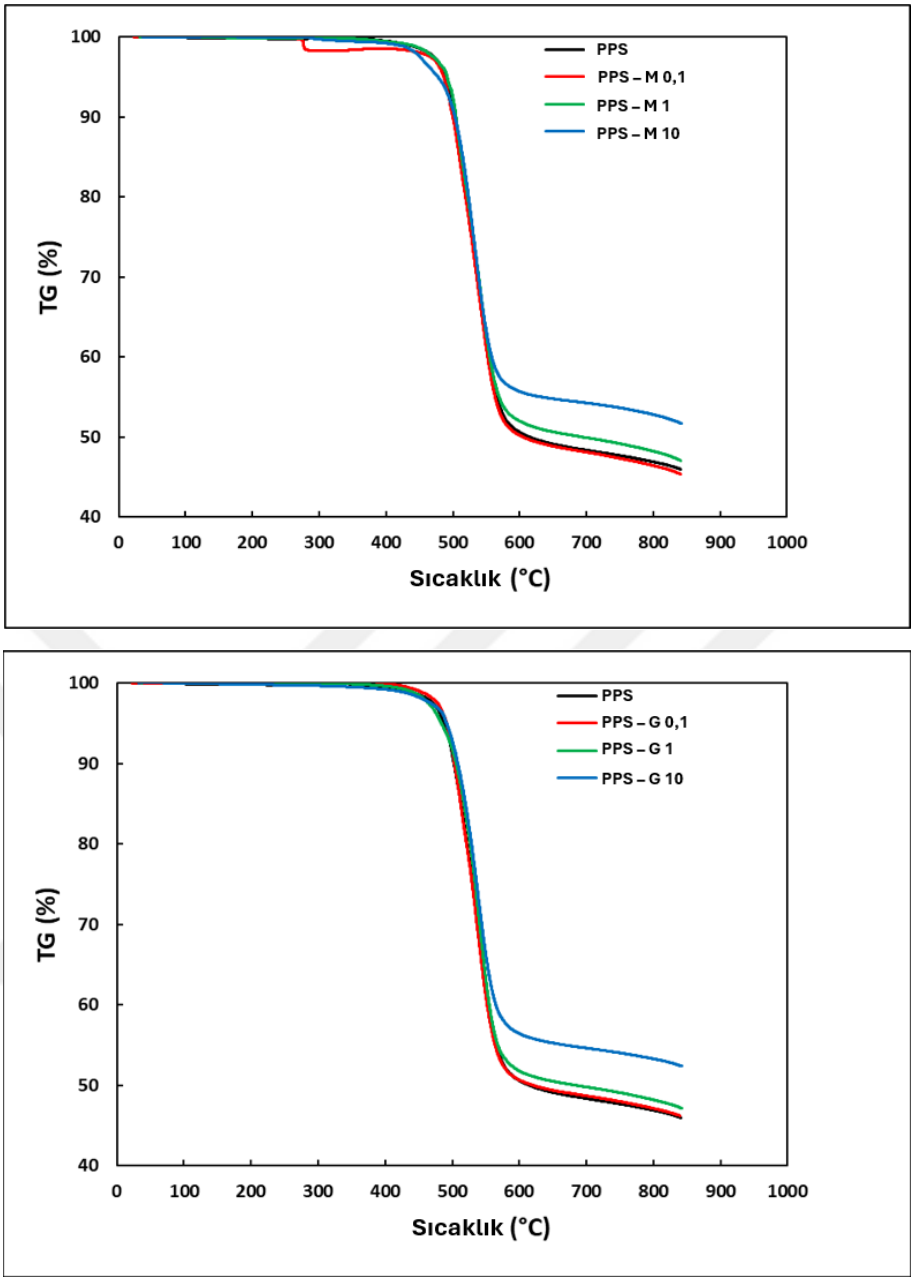
Diğer yanda MWCNT, çekirdekleyici ajan görevi görerek PPS'in daha yüksek bir sıcaklıkta kristalleşmesini sağlayarak T_c değerinde artışa sebep olmuştur. PPS/GNP kompozitleri incelendiğinde T_g ve T_m değerlerinde bir değişim gözlenmemektedir. T_c değeri incelendiğinde ise GNP çekirdeklenmeyi teşvik eden bir takviye malzemesi olduğu için T_c değerinde takviye oranın artmasıyla birlikte belirgin bir artış gözlenmiştir. PPS/h-BN kompozitlerinde de T_g değerinde bir değişim gözlenmemiştir. H-BN takviyesi T_m üzerinde doğrudan bir etki oluşturmamıştır. H-BN, PPS'in kristalleşme sürecini hızlandırmış, T_c değerinde bir artış söz konusudur. PPS matrisi içerisindeki BNNT takviyesinin varlığı T_g değerini olumsuz etkilemiştir. BNNT takviye oranı arttıkça T_g değeri düşmektedir. Kristal yapının daha düzenli olmasını destekleyerek T_c değerinde bir artışa sebep olmuştur. Yapılan diğer çalışmalar incelendiğinde ise çalışmamızla benzer olarak PPS matrisine eklenen nano takviye ile birlikte T_c değerinde büyük bir artış ve kristalizasyonda iyileşme gözlenmiştir (Dydek ve diğ, 2021; C. Lu ve diğ, 2016; Xing ve diğ, 2018).

3.16 Enjeksiyon Kalıplama ile Üretilen Nanokompozitlerin TGA Analizi

Enjeksiyon kalıplama ile üretilen kompozitlerin TGA analizleri incelendiğinde; saf PPS polimerinin bozunma sıcaklığı 538,68 °C, kalıntı kütlesi ise %69,75 olarak ölçülmüştür (Çizelge 3.8).

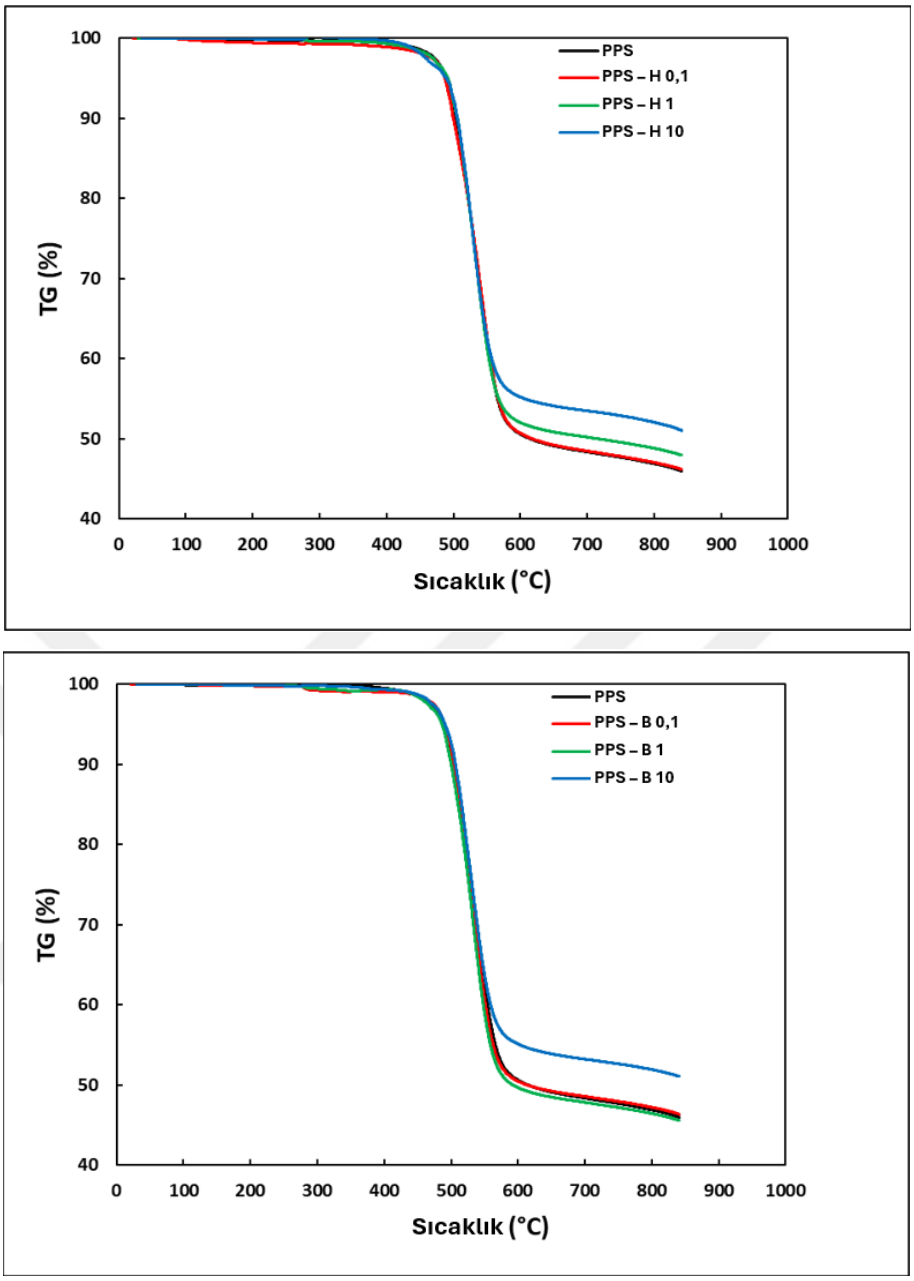
Çizelge 3.8 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen kompozitlerin TGA değerleri.

Matris	Takviye (%)	Zaman (dk)	Sıcaklık (°C)	DTA (Uv)	TG (%)	DTG (ug/min)
PPS	0	51,56	538,68	-0,48	69,75	-0,65
	M 0,1	51,94	535,26	0,43	70,33	-0,64
	M 1	51,54	539,83	-0,65	70,05	-0,65
	M 10	50,32	532,77	-0,22	73,97	-0,69
	G 0,1	52,37	539,49	-0,69	68,18	-0,72
	G 1	50,59	536,47	-0,52	73,32	-0,77
	G 10	51,22	538,70	-0,86	73,63	-0,68
	H 0,1	53,12	545,70	-0,55	65,71	-0,65
	H 1	51,26	534,12	-0,37	71,89	-0,72
	H 10	49,74	526,01	-0,35	77,80	-0,74
	B 0,1	52,24	537,12	-0,56	69,14	-0,71
	B 1	50,27	530,72	-0,33	72,02	-0,74
	B 10	49,59	518,44	-0,51	83,43	-0,66



Şekil 3.26 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen karbon bazlı nano takviyeli kompozitlerin TGA grafikleri.

PPS/MWCNT kompozit yapıları incelendiğinde ağırlıkça %0,1 ve %1 oranlarında bozunma sıcaklığında bir değişim gözlenmediği söylenebilir. Ağırlıkça %10 MWCNT takviyelendirildiğinde bozunma sıcaklığı 6 °C düşerek 532,72 °C'ye ulaşmıştır. Şekil 3.26'teki kalıntı kütle/sıcaklık grafikleri incelendiğinde ise MWCNT oranı arttıkça kalıntı kütle artmaktadır. PPS/GNP kompozitleri incelendiğinde bozunma sıcaklığında bir değişim gözlenmediği söylenebilir. Kalıntı kütleye baktığımızda ise ağırlıkça %0,1 GNP'li grupta bir azalış gözlense de takviye oranı arttıkça kalıntı kütle artmaktadır.



Şekil 3.27 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen bor bazlı nano takviyeli kompozitlerin TGA grafikleri.

PPS/h-BN kompozitlerini incelediğimizde; ağırlıkça %0,1 h-BN takviyeli grupta bozunma sıcaklığında belirgin bir artış gözlenirken, ağırlıkça %1 ve %10 h-BN takviyelendirildiğinde bozunma sıcaklığında saf PPS'e göre azalış gözlenmektedir. Şekil 3.27'te kalıntı kütle/sıcaklık grafiği incelendiğinde ağırlıkça %1 ve %10 h-BN takviyeli grupta kalıntı kütlenin arttığı gözlenmektedir. PPS/BNNT kompozitlerinde bozunma sıcaklığında belirgin bir azalış söz konusudur. PPS içerisinde BNNT takviyesinin etkisiyle kalıntı kütle oranı artmaktadır. takviye malzemesi oranı arttıkça, kalıntı kütle oranı artmaktadır çünkü takviye malzemeleri termal bozunmaya uğramaz

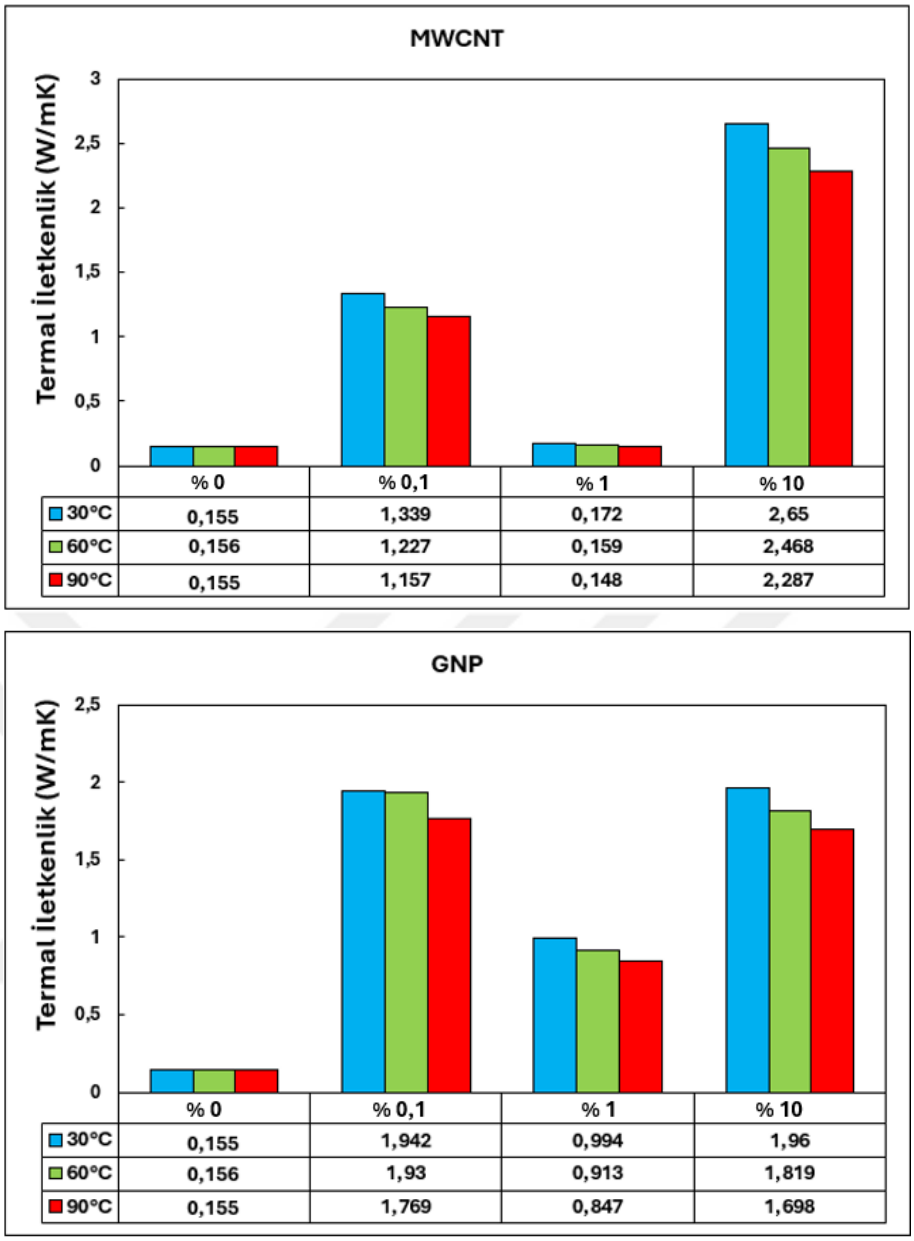
veya çok az bozunur (Perng, 2000). Dört nano takviye arasında termal kararlılığı iyileştirici en etkili h-BN takviyesi olduğu gözlenmiştir. H-BN termal bozunma sırasında uçucu bileşiklerin kaçmasını engelleyebilir, bu da PPS 'in bozunma sıcaklığının artmasına neden olabilir (Hu ve diğ, 2020).

3.17 Enjeksiyon ile Üretilen Nanokompozitlerin Termal İletkenlik Testi

Enjeksiyon kalıplama ile üretilen kompozitlere 3 farklı sıcaklıkta termal iletkenlik testi uygulanmıştır. Saf PPS polimerimizin termal iletkenlik değeri Şekil 3.28'da görüldüğü gibi 0,155 W/mK'dir. PPS/MWCNT kompozitlerini incelediğimizde ağırlıkça %0,1 takviyelendirildiğinde yaklaşık olarak %763 arttırdığı gözlenmiştir. %1 ağırlıkça takviyelendirildiğinde %10 , ağırlıkça %10 takviyelendirildiğinde ise %1375 arttırdığı gözlenmektedir. Bu da PPS matris içerisinde MWCNT takviyelerinin etkili bir termal ağ oluşturduğunu göstermektedir. MWCNT'lerin PPS matrisinde oluşturduğu ağ yapısı ile PPS zincirlerinin termal hareketliliğini engeller ve böylece PPS nanokompozitlerinin termal kararlılığını arttırmıştır (Díez-Pascual ve Naffakh, 2013; Yoo ve diğ, 2016)

PPS/GNP kompozitlerinin termal iletkenlik özelliklerinde ise; GNP ağılıkça %0,1, %1 ve %10 takviyelendirildiğinde sırasıyla termal iletkenlik değerleri yaklaşık olarak %1152, %541 ve %1164 oranlarında bir artış söz konusudur. Termal iletkenliğin iyileşmesi GNP'ler, grafen katmanlarının birkaç nano metre kalınlığındaki yığınlardan oluşur ve bu yapı, kompozit malzemede yüksek termal iletkenlik sağlamaktadır. Diğer yandan GNP'in iki boyutlu yapısı sayesinde, termal iletim yolları arttırılarak polimerin termal iletkenliğini büyük oranda iyileştirmektedir (Gu ve diğ, 2014).

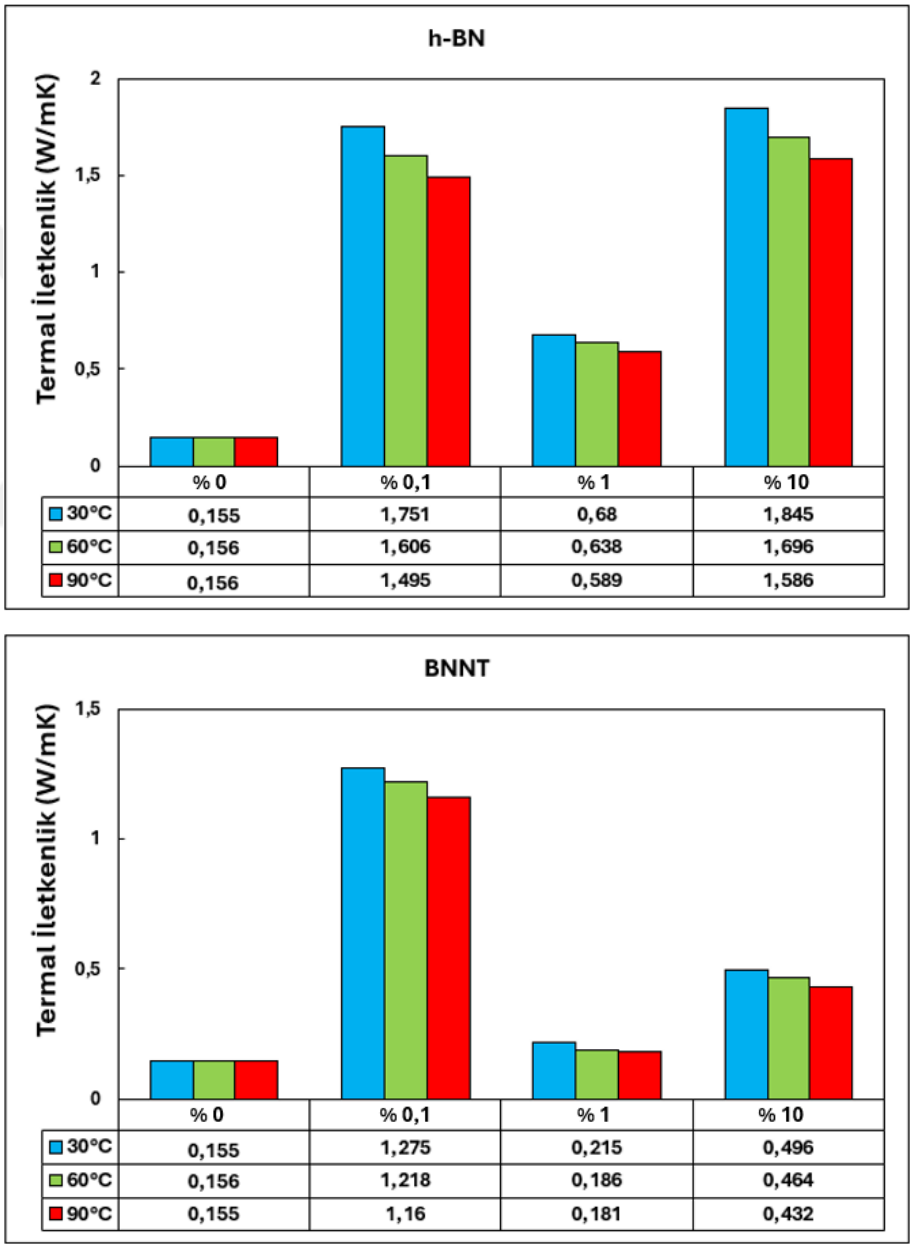
MWCNT ve GNP nano takviyeleri yüksek yüzey alanlarına sahiptir. Bu da matris malzeme ile geniş bir temas alanı sağlamaktadır. Bu temas, ısı transferinin daha verimli olmasını sağlayarak üretilen kompozit malzemelerin termal iletkenliğinde belirgin bir artış göstermektedir. Takviye oranı miktarı arttıkça termal iletkenlikte daha hızlı bir artış gözlenmektedir. Bunu sebebi de ısı iletim ağlarının daha yoğun hale gelmesinden kaynaklanmaktadır (Deng, Lin, Xu, ve diğ, 2015; X. Jiang ve Drzal, 2012; M. O. Khan ve diğ, 2013; J. Yang ve diğ, 2009).



Şekil 3.28 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen karbon bazlı nano takviyeli kompozitlerin termal iletkenlik grafikleri.

Bor bazlı nano takviyeli kompozitlerin Şekil 3.29'deki grafiklerinde termal iletkenlik değerlerinin tüm oranlarda saf PPS'e göre termal iletkenliklerinde artış gözlenmektedir. PPS/h-BN kompozitlerinde ağırlıkça %0,1, %1 ve %10 olacak şekilde takviyelendirildiğinde sırasıyla yaklaşık olarak %1029, %338 ve %1090 artış söz konusudur. H-BN nano takviyesi, PPS polimer zinciri ile güçlü fiziksel bağlar oluşturarak, ısı transferinin kolaylaşmasını sağlar. Bu da termal iletkenliğin artmasını destekler (K. Kim ve Kim, 2016).

PPS/BNNT kompozitlerinde en yüksek termal iletkenlik değeri ağırlıkça %0,1 takviyeli grupta gözlenmiştir. Bu da yaklaşık olarak % 722 seviyelerindedir. Ağırlıkça %1 ve %10 takviyelendirildiğinde saf PPS'e göre artış gözlenmiş olsa artış oranları sırasıyla yaklaşık olarak %38 ve %220'dir. Bu da BNNT'lerin bor ve nitrojen atomlarının düzenli dizilimi sayesinde fonon taşınımı desteklemektedir, bu da ısı iletiminde etkili bir yol sağlamaktadır. Nanotüpler lineer ve uzun yapısı sayesinde, polimer matris içerisinde kesintisiz bir termal iletim yolu oluşturur bu da termal iletkenliğin artmasına sebep olmaktadır (K. Kim ve Kim, 2016).



	% 0	% 0,1	% 1	% 10
30°C	0,155	1,751	0,68	1,845
60°C	0,156	1,606	0,638	1,696
90°C	0,156	1,495	0,589	1,586

	% 0	% 0,1	% 1	% 10
30°C	0,155	1,275	0,215	0,496
60°C	0,156	1,218	0,186	0,464
90°C	0,155	1,16	0,181	0,432

Şekil 3.29 : Enjeksiyon kalıplama ile üretilen bor bazlı nano takviyeli kompozitlerin termal iletkenlik grafikleri.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, toz formdaki PPS termoplastiğine %0,1 - %10 ağırlık aralığındaki seviyelerde GNP, MWCNT, h-BN ve BNNT takviye edilmiştir. Üretim sürecinde PPS/GNP ve PPS/MWCNT kompozitleri sıcak pres tekniğini kullanılarak üretilmiş, bor bazlı nano takviyelerin mekanik karıştırmadan sonra topaklanmasıyla sıcak pres ile başarılı üretim gerçekleştirilememiştir. Test sonuçlarının daha iyi analiz edilmesi ve üretimin daha homojen gerçekleştirilmesi için aynı ağırlık oranlarında toz karışımlar ilk önce eriyik karıştırma uygulanarak ekstrüzyonda pelet haline getirilerek, enjeksiyon kalıplama tekniğiyle dört nano takviye için de üretimler gerçekleştirilmiştir.

Sıcak pres ile üretilen nanokompozitlerde, nano takviye oranının artışıyla mekanik özelliklerde belirgin azalışlar gözlenmiştir. Termal ve elektriksel iletkenlikte ise iyileşmeler söz konusudur. GNP, termal iletkenlikte saf PPS'e göre %490 artışla daha etkili olurken, MWCNT nano takviyesi ise elektriksel iletkenlikte %222 artış gözlenerek üretilen nanokompozitin iletken olmasını sağlamıştır. SEM analizleri, sıcak pres ile üretilen kompozitlerde takviye oranı arttıkça aglomerasyonun meydana geldiğini bu da mekanik özelliklerin olumsuz etkilenmesini açıklamaktadır.

Enjeksiyon kalıplama ile üretilen kompozitleri incelediğimizde, saf PPS'in çekme mukavemeti 47,91 MPa olup, takviye oranlarının artışıyla çekme mukavemetinde özellikle h-BN takviyesiyle %52'ye varan artış gözlenmiştir. Sertlik değerinde BNNT'nin %10 oranında eklenmesiyle %65'lik bir artış sağlanmıştır. Eğme dayanımında en yüksek iyileşme %5 GNP takviyeli grupta %61 oranında gerçekleşmiştir. SEM analizleri, nano takviyelerin çatlak ilerlemesini engellediğini ve homojen dağıldığını göstermiştir. TGA analizlerinde h-BN takviyesi termal kararlılığı en fazla iyileştiren takviye olarak öne çıkmış, termal iletkenlikte ise %10 MWCNT ile %1375'lik bir artış elde edilmiştir.

Kompozit malzemelerin sıcak pres yöntemiyle üretiminde aglomerasyon oluştuğu ve bu durumun mekanik performansı düşürdüğü gözlenmiştir. Enjeksiyon kalıplama

yöntemi ise eriyik karıştırma sonrası homojen dağılım sağlayarak üstün mekanik dayanım, termal kararlılık ve iletkenlik özellikleri sunmuştur. Yüksek performanslı PPS polimer matris ve GNP, MWCNT, h-BN, BNNT gibi takviyeler başlangıç maliyetlerini artırsa da nanokompozitlerin uzun ömür, üstün özellikler ve düşük bakım gereksinimi gibi avantajları bu maliyetleri dengelemektedir. Hafiflikleri ve enerji tasarrufu sağlamaları sayesinde otomotiv, havacılık ve elektronik sektörlerinde ekonomik ve çevresel sürdürülebilirlik için ideal bir seçenek sunmaktadır.

Sıcak pres uygulamalarında aglomerasyon oluşumunu ve bunun mekanik özellikler üzerindeki olumsuz etkilerini minimize etmek için çeşitli stratejiler uygulanabilir. Daha düşük seviyelerde nano takviye maddesi kullanımı, malzeme içinde homojen bir dağılım sağlayarak aglomerasyon riskini azaltabilir ve hibrit malzemelerin üretimine olanak tanıyabilir. Yüzey modifikasyonları, takviye maddelerinin matrisle uyumunu artırarak bağlanma kalitesini iyileştirebilir ve aglomerasyon eğilimini azaltabilir. Dağıtıcı ajanların kullanımı, takviye malzemeleri arasındaki çekim kuvvetlerini azaltarak homojen bir yapı oluşmasını sağlayabilir. Ek olarak, malzemelerin uygun koşullarda depolanması ve işlenmesi, takviyelerin kararlılığını ve üretim süreçlerindeki etkinliğini artırabilir. Bu yaklaşımların bir arada kullanımı, sıcak presle üretilen kompozitlerin performansını belirgin şekilde iyileştirebilir.

Enjeksiyon kalıplama ile üretilen nanokompozit malzemelerin mekanik, fiziksel ve iletkenlik özelliklerini daha da geliştirmek için hibrit malzeme tasarımı etkili bir yöntem olabilir. Bu amaçla cam, karbon ve aramid gibi yüksek mukavemetli fiberlerle nanokompozit peletlerin birleştirilip enjeksiyon kalıplama ile kompozit malzemelerin üretilmesi, mekanik dayanımı daha da arttırabilir. Ayrıca GNP, MWCNT, h-BN ve BNNT gibi farklı nano takviyelerin bir arada kullanıldığı hibrit yapılar, özellikleri optimize ederek çok yönlü performans sunabilir. Fiber takviyeli çok katmanlı hibrit yapıların geliştirilmesiyle, hem yüksek dayanım hem de üstün termal ve elektriksel iletkenlik özellikleri elde edilebilir. Bu tür yenilikçi yaklaşımlar, PPS matrisli nanokompozitlerin daha geniş bir uygulama alanında kullanılmasını sağlayabilir.

Bu çalışmada üretilen yüksek performanslı nanokompozitlerin geri dönüşüm süreçleri, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik verimlilik açısından kritik bir öneme sahiptir. Özellikle PPS, sahip olduğu yüksek termal stabilite ve kimyasal dayanıklılık ile geri dönüştürülebilirlik açısından avantaj sağlayabilecek bir polimerdir. Üretilen

nanokompozitlerinin yaşam döngüsü analizinde, bu malzemelerin çevresel etkileri belirlenmektir. Üretim aşamasında kullanılan enerji ve malzeme miktarı, özellikle nano takviyelerin üretimi sırasında farklılık göstermektedir. Nanokompozitlerin üretim süreçlerinde enerji yoğun olmakta ve çevresel etkileri artmaktadır. Ayrıca, geri dönüşüm potansiyeli sınırlı olabilir, çünkü nanokompozitlerin geri işlenmesi sırasında özellik kayıpları yaşanabilir. PPS matrisli nanokompozitlerin geri dönüşüm süreçlerine uygunluğunun daha detaylı incelenmesi, sürdürülebilir üretim ve malzeme yönetimi stratejilerinin geliştirilmesinde kilit bir rol oynayacaktır. Geri dönüştürülebilir nanokompozitlerin tasarımı ve bu süreçlerin döngüsel ekonomi hedefleriyle uyumlu hale getirilmesi, hem bu yenilikçi malzemelerin uygulama alanlarını genişletecek hem de çevresel etkileri azaltarak daha sürdürülebilir teknolojilere olanak sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Alam, M. K., Islam, M. T., Mina, M. F., & Gafur, M. A. (2014)**.** Structural, mechanical, thermal, and electrical properties of carbon black reinforced polyester resin composites. *Journal of Applied Polymer Science*, *131*(13). https://doi.org/10.1002/app.40421

Archer, A. C., & Lovell, P. A. (1995). Formation of poly(1,4-phenylene sulfide) by solution polymerization of copper(I) 4-bromobenzenethiolate: Mechanistic interpretation of experimental observations. *Polymer*, *36*(22), 4327–4337. https://doi.org/10.1016/0032-3861(95)92230-C

Arenal, R., Wang, M.-S., Xu, Z., Loiseau, A., & Golberg, D. (2011). Young modulus, mechanical and electrical properties of isolated individual and bundled single-walled boron nitride nanotubes. *Nanotechnology*, *22*(26), 265704. https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/26/265704

Arif, M. F., Alhashmi, H., Varadarajan, K. M., Koo, J. H., Hart, A. J., & Kumar, S. (2020). Multifunctional performance of carbon nanotubes and graphene nanoplatelets reinforced PEEK composites enabled via FFF additive manufacturing. *Composites Part B: Engineering*, *184*, 107625. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107625

Arora, N., & Sharma, N. N. (2014). Arc discharge synthesis of carbon nanotubes: Comprehensive review. *Diamond and Related Materials*, *50*, 135–150. https://doi.org/10.1016/j.diamond.2014.10.001

Ayre, D. (2018). Technology advancing polymers and polymer composites towards sustainability: A review. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, *13*, 108–112. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.06.018

Baig, N., Kammakakam, I., & Falath, W. (2021). Nanomaterials: A review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges. *Materials Advances*, *2*(6), 1821–1871. https://doi.org/10.1039/D0MA00807A

Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, W., Calizo, I., Teweldebrhan, D., Miao, F., & Lau, C. N. (2008). Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene. *Nano Letters*, *8*(3), 902–907. https://doi.org/10.1021/nl0731872

Balasubramanian, K., & Burghard, M. (2005). Chemically Functionalized Carbon Nanotubes. *Small*, *1*(2), 180–192. https://doi.org/10.1002/smll.200400118

Batista, N. L., Olivier, P., Bernhart, G., Rezende, M. C., & Botelho, E. C. (2016). Correlation between degree of crystallinity, morphology and mechanical properties of PPS/carbon fiber laminates. *Materials Research*, *19*, 195–201. https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2015-0453

Belkerk, B., Achour, A., Zhang, D., Sahli, S., Djouadi, M.-A., & Yap, Y. K. (2016). Thermal conductivity of vertically aligned boron nitride nanotubes. *Applied Physics Express*, *9*, 075002. https://doi.org/10.7567/APEX.9.075002

Bethune, D. S., Kiang, C. H., de Vries, M. S., Gorman, G., Savoy, R., Vazquez, J., & Beyers, R. (1993). Cobalt-catalysed growth of carbon nanotubes with single-atomic-layer walls. *Nature*, *363*(6430), Article 6430. https://doi.org/10.1038/363605a0

Byrne, M. T., & Gun'ko, Y. K. (2010). Recent Advances in Research on Carbon Nanotube–Polymer Composites. *Advanced Materials*, *22*(15), 1672–1688. https://doi.org/10.1002/adma.200901545

Cao, L., Deng, S., He, Z., Lin, Z., Li, M., Zhang, P., & Li, W. (2016). Effects of carbon nanotube on mechanical, crystallization, and electrical properties of binary blends of poly(phenylene sulfide) and polyphthalamide. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *125*(2), 927–934. https://doi.org/10.1007/s10973-016-5484-9

Chang, C. W., Fennimore, A. M., Afanasiev, A., Okawa, D., Ikuno, T., Garcia, H., Li, D., Majumdar, A., & Zettl, A. (2006). Isotope Effect on the Thermal Conductivity of Boron Nitride Nanotubes. *Physical Review Letters*, *97*(8), 085901. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.085901

Chaudhary, V., & Ahmad, F. (2020). A review on plant fiber reinforced thermoset polymers for structural and frictional composites. *Polymer Testing*, *91*, 106792. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941820313180

Chen, Y., Zou, J., Campbell, S., & Caer, G. (2004). Boron Nitride Nanotubes: Pronounced Resistance to Oxidation. *Applied Physics Letters*, *84*. https://doi.org/10.1063/1.1667278

Cho, M. (2008). The Flexural and Tribological Behavior of Multi-Walled Carbon Nanotube–Reinforced Polyphenylene Sulfide Composites. *Materials Transactions*, *49*(12), 2801–2807. https://doi.org/10.2320/matertrans.MRA2008262

Chopra, N. G., & Zettl, A. (1998). Measurement of the elastic modulus of a multi-wall boron nitride nanotube. *Solid State Communications*, *105*(5), 297–300. https://doi.org/10.1016/S0038-1098(97)10125-9

Choupin, T., Fayolle, B., Régnier, G., Paris, C., Cinquin, J., & Brulé, B. (2017). Isothermal crystallization kinetic modeling of poly(etherketoneketone) (PEKK) copolymer. *Polymer*, *111*, 73–82. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.01.033

Choupin, T., Fayolle, B., Régnier, G., Paris, C., Cinquin, J., & Brulé, B. (2018). A more reliable DSC-based methodology to study crystallization kinetics: Application to poly(ether ketone ketone) (PEKK) copolymers. *Polymer*, *155*, 109–115. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.08.060

Chung, D. D. L. (2016). A review of exfoliated graphite. *Journal of Materials Science*, *51*(1), 554–568. https://doi.org/10.1007/s10853-015-9284-6

Crosby, A. J., & Lee, J. (2007). Polymer Nanocomposites: The "Nano" Effect on Mechanical Properties. *Polymer Reviews*, *47*(2), 217–229. https://doi.org/10.1080/15583720701271278

Das, R., Shahnavaz, Z., Ali, Md. E., Islam, M. M., & Abd Hamid, S. B. (2016). Can We Optimize Arc Discharge and Laser Ablation for Well-Controlled Carbon Nanotube Synthesis? *Nanoscale Research Letters*, *11*(1), 510. https://doi.org/10.1186/s11671-016-1730-0

Deng, S., Lin, Z., Cao, L., Xian, J., & Liu, C. (2015). PPS/recycled PEEK/ carbon nanotube composites: Structure, properties and compatibility. *Journal of Applied Polymer Science*, *132*(35). https://doi.org/10.1002/app.42497

Deng, S., Lin, Z., Xu, B., Lin, H., & Du, C. (2015). Effects of Carbon Fillers on Crystallization Properties and Thermal Conductivity of Poly(phenylene sulfide). *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, *54*(10), 1017–1024. https://doi.org/10.1080/03602559.2014.986802

Deng, S., Lin, Z., Xu, B., Qiu, W., Liang, K., & Li, W. (2014). Isothermal crystallization kinetics, morphology, and thermal conductivity of graphene nanoplatelets/polyphenylene sulfide composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *118*(1), 197–203. https://doi.org/10.1007/s10973-014-3958-1

Devaraju, S., & Alagar, M. (2021). Polymer Matrix Composite Materials for Aerospace Applications. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819724-0.00052-5

Díez-Pascual, A. M., & Naffakh, M. (2012). Towards the development of poly(phenylene sulphide) based nanocomposites with enhanced mechanical, electrical and tribological properties. *Materials Chemistry and Physics*, *135*(2), 348–357. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.04.057

Díez-Pascual, A. M., & Naffakh, M. (2013). Enhancing the thermomechanical behaviour of poly(phenylene sulphide) based composites via incorporation of covalently grafted carbon nanotubes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *54*, 10–19. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.06.018

Doumeng, M., Makhlouf, L., Berthet, F., Marsan, O., Delbé, K., Denape, J., & Chabert, F. (2021). A comparative study of the crystallinity of polyetheretherketone by using density, DSC, XRD, and Raman spectroscopy techniques. *Polymer Testing*, *93*, 106878. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106878

Dresselhaus, M., Dresselhaus, G., Charlier, J.-C., & Hernández, E. (2004). Electronic, thermal and mechanical properties of carbon nanotubes. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, *362*, 2065–2098. https://doi.org/10.1098/rsta.2004.1430

Dydek, K., Latko-Durałek, P., Sulowska, A., Kubiś, M., Demski, S., Kozera, P., Sztorch, B., & Boczkowska, A. (2021). Effect of Processing Temperature and the Content of Carbon Nanotubes on the Properties of Nanocomposites Based on Polyphenylene Sulfide. *Polymers*, *13*, 3816. https://doi.org/10.3390/polym13213816

Fang, C., Zhang, J., Chen, X., & Weng, G. J. (2020). Calculating the Electrical Conductivity of Graphene Nanoplatelet Polymer Composites by a Monte Carlo Method. *Nanomaterials*, *10*(6), Article 6. https://doi.org/10.3390/nano10061129

Fitzharris, E. R., Watt, I., Rosen, D. W., & Shofner, M. L. (2018). Interlayer bonding improvement of material extrusion parts with polyphenylene sulfide using the Taguchi method. *Additive Manufacturing*, *24*, 287–297. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.003

Fokas, G., Guo, C. Y., & Tsoi, J. K. H. (2019). The effects of surface treatments on tensile bond strength of polyether-ketone-ketone (PEKK) to veneering resin. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, *93*, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.01.015

Furushima, Y., Nakada, M., Yoshida, Y., & Okada, K. (2017). Crystallization/Melting Kinetics and Morphological Analysis of Polyphenylene Sulfide. *Macromolecular Chemistry and Physics*, *219*, 1700481. https://doi.org/10.1002/macp.201700481

Gaddam, R. R., Narayan, R., & Raju, K. (2016). Fluorescence spectroscopy of nanofillers and their polymer nanocomposites. In *Spectroscopy of polymer nanocomposites* (pp. 158–180). Elsevier. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323401838000070

Gao, C., Guo, Z., Liu, J.-H., & Huang, X.-J. (2012). The new age of carbon nanotubes: An updated review of functionalized carbon nanotubes in electrochemical sensors. *Nanoscale*, *4*(6), 1948–1963. https://doi.org/10.1039/C2NR11757F

Gao, Y., Zhou, X., Zhang, M., Lyu, L., & Li, Z. (2022). Polyphenylene Sulfide-Based Membranes: Recent Progress and Future Perspectives. *Membranes*, *12*(10), Article 10. https://doi.org/10.3390/membranes12100924

Gayathri, S., Jayabal, P., Kottaisamy, M., & Ramakrishnan, V. (2014). Synthesis of few layer graphene by direct exfoliation of graphite and a Raman spectroscopic study. *AIP Advances*, *4*(2), 027116. https://doi.org/10.1063/1.4866595

Geim, A. K. (2009). Graphene: Status and Prospects. *Science*, *324*(5934), 1530–1534. https://doi.org/10.1126/science.1158877

Giurgiutiu, V. (2015). *Structural Health Monitoring of Aerospace Composites*. Academic Press.

Giurgiutiu, V., & Soutis, C. (2012). Enhanced Composites Integrity Through Structural Health Monitoring. *Applied Composite Materials*, *19*(5), 813–829. https://doi.org/10.1007/s10443-011-9247-2

Gogotsi, Y. (2006). *Nanotubes and Nanofibers*. CRC Press.

Golberg, D., Bando, Y., Tang, C., & Zhi, C. (2010). Functional boron nitride nanotubes. *INEC 2010 - 2010 3rd International Nanoelectronics Conference, Proceedings*, 47–48. https://doi.org/10.1109/INEC.2010.5424445

Gu, J., Xie, C., Li, H., Dang, J., Geng, W., & Zhang, Q. (2014). Thermal percolation behavior of graphene nanoplatelets/polyphenylene sulfide thermal conductivity composites. *Polymer Composites*, *35*(6), 1087–1092. https://doi.org/10.1002/pc.22756

Harper, C. A. (2000). *Modern Plastics Handbook* (1st Edition). McGraw-Hill Education. https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780070267145

Harussani, M. M., Sapuan, S. M., Nadeem, G., Rafin, T., & Kirubaanand, W. (2022). Recent applications of carbon-based composites in defence industry: A review. *Defence Technology*, *18*(8), 1281–1300. https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.03.006

Hassan, T., Salam, A., Khan, A., Khan, S. U., Khanzada, H., Wasim, M., Khan, M. Q., & Kim, I. S. (2021). Functional nanocomposites and their potential applications: A review. *Journal of Polymer Research*, *28*(2), 36. https://doi.org/10.1007/s10965-021-02408-1

Hench, L. L., & West, J. K. (2002). *The sol-gel process*. ACS Publications; American Chemical Society. https://doi.org/10.1021/cr00099a003

Hu, Z., Hou, K., Gao, J., Zhu, G., Zhou, Z., Xiang, H., Qiu, T., & Zhu, M. (2020). Enhanced photo-stability polyphenylene sulfide fiber via incorporation of multi-walled carbon nanotubes using exciton quenching. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *129*, 105716. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105716

Huang, T.-C., Yeh, J.-M., & Lai, C.-Y. (2012). Polymer nanocomposite coatings. In *Advances in Polymer Nanocomposites* (pp. 605–638). Elsevier. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845699406500184

Hwang, H. J., Barakat, N. A. M., Kanjwal, M. A., Sheikh, F. A., Kim, H. Y., & Abadir, M. F. (2010). Boron nitride nanofibers by the electrospinning technique. *Macromolecular Research*, *18*(6), 551–557. https://doi.org/10.1007/s13233-010-0601-2

Ishigami, M., Aloni, S., & Zettl, A. (2003). Properties of Boron Nitride Nanotubes. *AIP Conference Proceedings*, *696*(1), 94–99. https://doi.org/10.1063/1.1639682

Jiang, X., & Drzal, L. T. (2012). Exploring the potential of exfoliated graphene nanoplatelets as the conductive filler in polymeric nanocomposites for bipolar plates. *Journal of Power Sources*, *218*, 297–306. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.07.001

Jiang, Z., Hornsby, P., McCool, R., & Murphy, A. (2012). Mechanical and thermal properties of polyphenylene sulfide/multiwalled carbon nanotube

composites. *Journal of Applied Polymer Science*, *123*(5), 2676–2683. https://doi.org/10.1002/app.34669

Jog, J. P., Bulakh, N., & Nadkarni, V. M. (1994). Crystallization of polyphenylene sulfide. *Bulletin of Materials Science*, *17*(6), 1079–1089. https://doi.org/10.1007/BF02757585

Joshi, M., Goyal, A., Patil, S., & Goyal, R. (2016). Tribological and thermal properties of hexagonal boron nitride filled high-performance polymer nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, *134*. https://doi.org/10.1002/app.44409

Karsli, N. G., Gul, O., & Yilmaz, T. (2022). Investigation of the Synergistic Effect of Addition the Hybrid Carbon Fiber, Graphene Nanoplatelet and Matrix Modifier to Poly(phenylene sulphide) on Physical Properties. *Fibers and Polymers*, *23*(4), 1059–1067. https://doi.org/10.1007/s12221-022-4215-z

Kemmish, D. J. (2011). *Practical Guide to High Performance Engineering Plastics*. Smithers Rapra.

Kern, M., & Lehmann, F. (2012). Influence of surface conditioning on bonding to polyetheretherketon (PEEK). *Dental Materials*, *28*(12), 1280–1283. https://doi.org/10.1016/j.dental.2012.09.010

Khan, M. O., Leung, S. N., Chan, E., Naguib, H. E., Dawson, F., & Adinkrah, V. (2013). Effects of microsized and nanosized carbon fillers on the thermal and electrical properties of polyphenylene sulfide based composites. *Polymer Engineering & Science*, *53*(11), 2398–2406. https://doi.org/10.1002/pen.23503

Khan, S. M., Gull, N., Munawar, M. A., Zia, S., Anjum, F., Iqbal, M. S., Shafiq, M., Islam, A., Awais, S. M., Butt, M. A., Butt, M. T. Z., & Jamil, T. (2016). Polyphenylene sulphide/carbon fiber composites: Study on their thermal, mechanical and microscopic properties. *Iranian Polymer Journal*, *25*(6), 475–485. https://doi.org/10.1007/s13726-016-0439-3

Kim, K., & Kim, J. (2016). BN-MWCNT/PPS core-shell structured composite for high thermal conductivity with electrical insulating via particle coating. *Polymer*, *101*, 168–175. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2016.08.062

Kim, S.-H., Woo, J. S., & Park, S.-Y. (2020). Poly(phenylene sulfide) Graphite Composites with Graphite Nanoplatelets as a Secondary Filler for Bipolar Plates in Fuel Cell Applications. *Macromolecular Research*, *28*(11), 1010–1016. https://doi.org/10.1007/s13233-020-8140-y

Klur, T., Hasan, I., Ottersbach, K., Stark, H., Fichte, M., Dirk, C., & Bourauel, C. (2019). PEKK-made indirect temporary crowns and bridges: A clinical pilot study. *Clinical Oral Investigations*, *23*(2), 771–777. https://doi.org/10.1007/s00784-018-2493-z

Lange, H., Sioda, M., Huczko, A., Zhu, Y. Q., Kroto, H. W., & Walton, D. R. M. (2003). Nanocarbon production by arc discharge in water. *Carbon*, *41*(8), 1617–1623. https://doi.org/10.1016/S0008-6223(03)00111-8

Lawrence, J. R. (2017). *Advances in Laser Materials Processing: Technology, Research and Applications*. Woodhead Publishing.

Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. (2008). Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene. *Science*, *321*(5887), 385–388. https://doi.org/10.1126/science.1157996

Lekawa-Raus, A., Patmore, J., Kurzepa, L., Bulmer, J., & Koziol, K. (2014). Electrical Properties of Carbon Nanotube Based Fibers and Their Future Use in Electrical Wiring. *Advanced Functional Materials*, *24*(24), 3661–3682. https://doi.org/10.1002/adfm.201303716

Leung, S. N., Khan, O. M., Chan, E., Naguib, H. E., Dawson, F., Adinkrah, V., & Lakatos-Hayward, L. (2011). Enhanced thermal conductivity of novel multifunctional polyphenylene sulfide composites embedded with heat transfer networks of hybrid fillers. *Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites 2011*, *7978*, 225–234. https://doi.org/10.1117/12.881896

Li, X., Zhang, G., Bai, X., Sun, X., Wang, X., Wang, E., & Dai, H. (2008). Highly conducting graphene sheets and Langmuir–Blodgett films. *Nature Nanotechnology*, *3*(9), Article 9. https://doi.org/10.1038/nnano.2008.210

Lin, L., Zheng, Y., Li, Z., shen, X., & Wei, K. (2007). A simple method to synthesize polyhedral hexagonal boron nitride nanofibers. *Solid State Sciences*, *9*(12), 1099–1104. https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2007.07.026

Liu, G., Zhang, L., Li, G., Zhao, F., & Zhang, G. (2021). BN–SiC ensembles to form tribofilm with excellent shielding effects in PEEK- stainless steel contacts for artificial joint. *Tribology International*, *156*, 106834. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106834

Liu, L., Xiao, L., Li, M., Zhang, X., Chang, Y., Shang, L., & Ao, Y. (2016). Effect of hexagonal boron nitride on high-performance polyether ether ketone composites. *Colloid and Polymer Science*, *294*(1), 127–133. https://doi.org/10.1007/s00396-015-3733-2

Lu, C., Yuan, Q., Simons, R., Hyra, P., Shen, J., Bateman, S., & Shen, S. (2016). Influence of SiC and VGCF Nano-Fillers on Crystallization Behaviour of PPS Composites. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, *16*(8), 8366–8373. https://doi.org/10.1166/jnn.2016.11680

Lu, Y., Zhao, R., Wang, L., & Songfeng, E. (2023). Boron nitride nanotubes and nanosheets: Their basic properties, synthesis, and some of applications. *Diamond and Related Materials*, *136*, 109978. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925963523003035

Mefford, C. H., Qiao, Y., & Salviato, M. (2017). Failure behavior and scaling of graphene nanocomposites. *Composite Structures*, *176*, 961–972. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.013

Melo, P. A., Sampaio, J. G., Biscaia, E. C., & Pinto, J. C. (2001). Periodic oscillations in continuous free-radical solution polymerization reactors—A general approach. *Chemical Engineering Science*, *56*(11), 3469–3482. https://doi.org/10.1016/S0009-2509(01)00023-9

Miletić, F., Jovančić, P., & Djenadić, S. (2018). Behavior Determining of Bucket Wheel Drive Depending on the Wear Impact of the Cutting Elements. *Procedia Structural Integrity*, *13*, 1644–1650. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.345

Montazeri, A., Javadpour, J., Khavandi, A., Tcharkhtchi, A., & Mohajeri, A. (2010). Mechanical properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites. *Materials & Design*, *31*(9), 4202–4208. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.018

Mortazavi, B., & Ahzi, S. (2012). Molecular dynamics study on the thermal conductivity and mechanical properties of boron doped graphene. *Solid State Communications*, *152*(15), 1503–1507. https://doi.org/10.1016/j.ssc.2012.04.048

Mortazavi, B., Benzerara, O., Meyer, H., Bardon, J., & Ahzi, S. (2013). Combined molecular dynamics-finite element multiscale modeling of thermal conduction in graphene epoxy nanocomposites. *Carbon*, *60*, 356–365. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.04.048

Muthukumar, C., Krishnasamy, S., Thiagamani, S. M. K., Jeyaguru, S., Siengchin, S., & Rajini, N. (2021). Polymers in Aerospace Applications. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820352-1.00077-8

Naz, A., Kausar, A., Siddiq, M., & Choudhary, M. A. (2016). Comparative Review on Structure, Properties, Fabrication Techniques, and Relevance of Polymer Nanocomposites Reinforced with Carbon Nanotube and Graphite Fillers. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, *55*(2), 171–198. https://doi.org/10.1080/03602559.2015.1055504

Neumann, E. A. F., Villar, C. C., & França, F. M. G. (2014). Fracture resistance of abutment screws made of titanium, polyetheretherketone, and carbon fiber-reinforced polyetheretherketone. *Brazilian Oral Research*, *28*, 1–5. https://doi.org/10.1590/1807-3107BOR-2014.vol28.0028

Noll, A., & Burkhart, T. (2011). Morphological characterization and modelling of electrical conductivity of multi-walled carbon nanotube/poly(p-phenylene sulfide) nanocomposites obtained by twin screw extrusion. *Composites Science and Technology*, *71*(4), 499–505. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.12.026

Oh, K. C., Park, J.-H., Lee, J., & Moon, H. S. (2018). Treatment of a mandibular discontinuity defect by using a fibula free flap and an implant-supported fixed complete denture fabricated with a PEKK framework: A clinical report. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, *119*(6), 1021–1024. https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2017.07.024

Okpala, C. C. (2013). Nanocomposites–an overview. *International Journal of Engineering Research and Development*, *8*(11), 17–23.

Okutan, M., Coşkun, R., Yalçın, O., Babuçoğlu, A. C., & Demir, A. (2023). Investigation of the dielectric and optic properties of rosehip seed extract loaded hydrogels. *Journal of Molecular Structure*, *1274*, 134480. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.134480

Olabisi, O., & Adewale, K. (2016). *Handbook of Thermoplastics*. CRC Press.

Osmani, R., Kulkarni, A., H., A., Bhosale, R., Ghodake, P., & Harkare, B. (2014). Carbon Nanotubes: An Impending Carter in Therapeutics. *International Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, *6*, 84–96.

Osswald, T. A., & Menges, G. (2012). *Materials science of polymers for engineers*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.

Ozkutlu, M., Bayram, G., & Dilek, C. (2021). Poly(methyl methacrylate)-octatrimethylsiloxy polyhedral oligomeric silsesquioxane composite syntactic foams with bimodal pores. *Journal of Polymer Research*, *28*(6), 221. https://doi.org/10.1007/s10965-021-02576-0

Öztürkmen, M. B., Özkutlu Demirel, M., Ağaç, Ö., Ece, R. E., & Öz, Y. (2023). Tailored multifunctional nanocomposites obtained by integration of carbonaceous fillers in an aerospace grade epoxy resin curing at high temperatures. *Diamond and Related Materials*, *135*, 109840. https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.109840

Pan, S., Shen, H., & Zhang, L. (2021). Effect of carbon nanotube on thermal, tribological and mechanical properties of 3D printing polyphenylene sulfide. *Additive Manufacturing*, *47*, 102247. https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102247

Park, S.-A., Jeon, H., Kim, H., Shin, S.-H., Choy, S., Hwang, D. S., Koo, J. M., Jegal, J., Hwang, S. Y., Park, J., & Oh, D. X. (2019). Sustainable and recyclable super engineering thermoplastic from biorenewable monomer. *Nature Communications*, *10*(1), Article 1. https://doi.org/10.1038/s41467-019-10582-6

Parlak, S. (2011). *Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) Yöntemiyle Li-iyon Pillere Uygun zxno Anot Geliştirilmesi* [Master's]. https://www.proquest.com/docview/2700374717/abstract/9AC055707BAD4C22PQ/1

Perng, L. H. (2000). Thermal decomposition characteristics of poly(phenylene sulfide) by stepwise Py-GC/MS and TG/MS techniques. *Polymer Degradation and Stability*, *69*(3), 323–332. https://doi.org/10.1016/S0141-3910(00)00077-X

Peters, E. (2007). *Plastics: Thermoplastics, Thermosets, and Elastomers* (pp. 335–355). https://doi.org/10.1002/9780470172551.ch11

Pierson, H. O. (1999). *Handbook of Chemical Vapor Deposition: Principles, Technology and Applications*. William Andrew.

Pohl, C., & Saini, C. (2008). New developments in the preparation of anion exchange media based on hyperbranched condensation polymers. *Journal of Chromatography A*, *1213*(1), 37–44. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2008.10.072

Punetha, V. D., Rana, S., Yoo, H. J., Chaurasia, A., McLeskey, J. T., Ramasamy, M. S., Sahoo, N. G., & Cho, J. W. (2017). Functionalization of carbon nanomaterials for advanced polymer nanocomposites: A comparison study between CNT and graphene. *Progress in Polymer Science*, *67*, 1–47. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2016.12.010

Qiu, Y., Yu, J., Yin, J., Tan, C., Zhou, X., Bai, X., & Wang, E. (2009). Synthesis of continuous boron nitride nanofibers by solution coating electrospun template fibers. *Nanotechnology*, *20*(34), 345603. https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/34/345603

Rahate, A. S., Nemade, K. R., & Waghuley, S. A. (2013). Polyphenylene sulfide (PPS): State of the art and applications. *Reviews in Chemical Engineering*, *29*(6), 471–489. https://doi.org/10.1515/revce-2012-0021

Raquez, J.-M., Habibi, Y., Murariu, M., & Dubois, P. (2013). Polylactide (PLA)-based nanocomposites. *Progress in Polymer Science*, *38*(10), 1504–1542. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.014

Rathod, V. T., Kumar, J. S., & Jain, A. (2017). Polymer and ceramic nanocomposites for aerospace applications. *Applied Nanoscience*, *7*(8), 519–548. https://doi.org/10.1007/s13204-017-0592-9

Reddy, B. (2011). *Advances in Diverse Industrial Applications of Nanocomposites*. BoD – Books on Demand.

Ribeiro, B., Botelho, E. C., & Costa, M. L. (2015). Electrical and Thermal study of carbon nanotubes reinforced poly (phenylene sulfide) nanostructured composites. *Polimeros-Ciencia E Tecnologia*, 94–100.

Sakihara, M., Taira, Y., & Sawase, T. (2019). Effects of sulfuric and vinyl sulfonic acid etchants on bond strength of resin composite to polyetherketoneketone. *Odontology*, *107*(2), 158–164. https://doi.org/10.1007/s10266-018-0375-0

Sakka, S. (2005). *Handbook of sol-gel science and technology. 1. Sol-gel processing*. Springer Science & Business Media.

Sang, M., Shin, J., Kim, K., & Yu, K. J. (2019). Electronic and Thermal Properties of Graphene and Recent Advances in Graphene Based Electronics Applications. *Nanomaterials*, *9*(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/nano9030374

Sangoi, R. (2003). Nanocomposites based on carbon nanotubes and poly (3-alkylthiophenes) for sensor and charge storage applications. *Theses*. https://scholarworks.rit.edu/theses/7042

Schmeltzer, R. C., Johnson, M., Griffin, J., & Uhrich, K. (2008). Comparison of salicylate-based poly(anhydride-esters) formed via melt-condensation versus solution polymerization. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, *19*(10), 1295–1306. https://doi.org/10.1163/156856208786052362

Schmidlin, P. R., Stawarczyk, B., Wieland, M., Attin, T., Hämmerle, C. H. F., & Fischer, J. (2010). Effect of different surface pre-treatments and luting materials on shear bond strength to PEEK. *Dental Materials*, *26*(6), 553–559. https://doi.org/10.1016/j.dental.2010.02.003

Schmuck, R. (2021). Global supply chain quality integration strategies and the case of the Boeing 787 Dreamliner development. *Procedia Manufacturing*, *54*, 88–94. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.07.014

Sengupta, R., Bhattacharya, M., Bandyopadhyay, S., & Bhowmick, A. K. (2011). A review on the mechanical and electrical properties of graphite and

modified graphite reinforced polymer composites. *Progress in Polymer Science*, *36*(5), 638–670. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.11.003

Seo, K. H., Park, L. S., Baek, J. B., & Brostow, W. (1993). Thermal behaviour of poly (phenylene sulfide) and its derivatives. *Polymer*, *34*(12), 2524–2527. https://doi.org/10.1016/0032-3861(93)90583-V

Shabaev, A. S., Khashirova, S. Y., Mamkhegov, R. M., Bashorov, M. T., Kunizhev, B. I., & Malamatov, A. H. (2019). The Effect of Heat Treatment Regimes of Polyphenylene Sulfides on their Thermal Properties. *Key Engineering Materials*, *816*, 72–77. XV INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE «NEW POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS». https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.816.72

Shepherd, C., Hadzifejzovic, E., Shkal, F., Jurkschat, K., Moghal, J., Parker, E. M., Sawangphruk, M., Slocombe, D. R., Foord, J. S., & Moloney, M. G. (2016). New Routes to Functionalize Carbon Black for Polypropylene Nanocomposites. *Langmuir*, *32*(31), 7917–7928. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b02013

Sheshmani, S., Ashori, A., & Arab Fashapoyeh, M. (2013). Wood plastic composite using graphene nanoplatelets. *International Journal of Biological Macromolecules*, *58*, 1–6. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2013.03.047

Shimamura, Y., Oshima, K., Tohgo, K., Fujii, T., Shirasu, K., Yamamoto, G., Hashida, T., Goto, K., Ogasawara, T., Naito, K., Nakano, T., & Inoue, Y. (2014). Tensile mechanical properties of carbon nanotube/epoxy composite fabricated by pultrusion of carbon nanotube spun yarn preform. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *62*, 32–38. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.03.011

Silthampitag, P., Chaijareenont, P., Tattakorn, K., Banjongprasert, C., Takahashi, H., & Arksornnukit, M. (2016). Effect of surface pretreatments on resin composite bonding to PEEK. *Dental Materials Journal*, *35*(4), 668–674. https://doi.org/10.4012/dmj.2015-349

Stafe, M., Marcu, A., & Puscas, N. N. (2013). *Pulsed Laser Ablation of Solids: Basics, Theory and Applications*. Springer Science & Business Media.

Stankovich, S., Dikin, D. A., Dommett, G. H., Kohlhaas, K. M., Zimney, E. J., Stach, E. A., Piner, R. D., Nguyen, S. T., & Ruoff, R. S. (2006). Graphene-based composite materials. *Nature*, *442*(7100), 282–286. https://www.nature.com/articles/nature04969

Stewart, R. (2011). Thermoplastic composites—Recyclable and fast to process. *Reinforced Plastics*, *55*(3), 22–28. https://doi.org/10.1016/S0034-3617(11)70073-X

Stolle, A., & Ranu, B. (2014). *Ball Milling Towards Green Synthesis: Applications, Projects, Challenges*. Royal Society of Chemistry.

Subrahmanyam, K. S., Panchakarla, L. S., Govindaraj, A., & Rao, C. N. R. (2009). Simple Method of Preparing Graphene Flakes by an Arc-Discharge Method. *The Journal of Physical Chemistry C*, *113*(11), 4257–4259. https://doi.org/10.1021/jp900791y

Takahashi, T., Tsubo, S., Inoue, K., Suzuki, R., Murata, H., & Tachibana, M. (2023). Effect of dispersibility of carbon nanotubes on the hardness and thermal properties of polyphenylene sulphide/carbon nanotube composites obtained using solution mixing and melt blending methods. *Materials Science and Engineering: B*, *295*, 116579. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921510723003215

Tharajak, J., Palathai, T., & Sombatsompop, N. (2015). Morphological and physical properties and friction/wear behavior of h-BN filled PEEK composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, *273*, 20–29. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.03.030

Thomas, S., Joseph, K., Malhotra, S. K., Goda, K., & Sreekala, M. S. (2013). *Polymer composites, biocomposites* (Vol. 3). John Wiley & Sons.

Vora, R. H., & Vora, M. (2006). 1,2′-Bis(4-aminophenoxy)benzene based designed fluoro-poly(ether-imide)/MMT clay nanocomposites: Synthesis and properties for high performance applications. *Materials Science and Engineering: B*, *132*(1), 90–102. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2006.02.050

Wang, J., Lee, C., Bando, Y., Golberg, D., & Yap, Y. K. (2009). *Multiwalled Boron Nitride Nanotubes: Growth, Properties, and Applications* (pp. 23–44). https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0086-9_2

Wang, Y., Wang, P., Xu, Q., Yan, T., & Cai, M. (2014). Synthesis and properties of novel copolymers of poly(ether ketone biphenyl ketone ether ketone ketone) and poly(ether ketone sulfone amide). *Journal of Polymer Research*, *21*. https://doi.org/10.1007/s10965-014-0533-1

Wang, Z., Xu, P., Zhou, K., Bi, C., & Sun, J. (2023). Flexural property characterization and structure analysis of graphene-reinforced polyphenylene sulfide prepared via low-cost pellet-based material extrusion additive manufacturing. *Polymer Engineering & Science*, *63*(10), 3382–3397. https://doi.org/10.1002/pen.26453

Williams, J. R., DiCarlo, L., & Marcus, C. M. (2007). Quantum Hall Effect in a Gate-Controlled p-n Junction of Graphene. *Science*, *317*(5838), 638–641. https://doi.org/10.1126/science.1144657

Wu, D., Wu, L., Zhou, W., Yang, T., & Zhang, M. (2009). Study on physical properties of multiwalled carbon nanotube/poly(phenylene sulfide) composites. *Polymer Engineering & Science*, *49*(9), 1727–1735. https://doi.org/10.1002/pen.21403

Xing, J., Deng, B., & Liu, Q. (2018). Effect of graphene nanoplatelets on the performance of polyphenylene sulfide composites produced by melt intercalation. *High Performance Polymers*, *30*(5), 519–526.

Yadav, S. K., & Cho, J. W. (2013). Functionalized graphene nanoplatelets for enhanced mechanical and thermal properties of polyurethane nanocomposites. *Applied Surface Science*, *266*, 360–367. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.12.028

Yadav, T., Yadav, R. M., & Singh, D. (2012). Mechanical Milling: A Top Down Approach for the Synthesis of Nanomaterials and Nanocomposites. *Nanoscience and Nanotechnology*, *2*, 22–48. https://doi.org/10.5923/j.nn.20120203.01

Yahya Öz, Yilmaz, B., & Evis, Z. (2022). A Review on Nanocomposites with Graphene Based Fillers in Poly(ether ether ketone). *Polymer Science, Series A*, *64*(3), 145–160. https://doi.org/10.1134/S0965545X22030117

Yan, M., Tian, X., Peng, G., Li, D., & Zhang, X. (2018). High temperature rheological behavior and sintering kinetics of CF/PEEK composites during selective laser sintering. *Composites Science and Technology*, *165*, 140–147. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.06.023

Yang, J., Xu, T., Lu, A., Zhang, Q., Tan, H., & Fu, Q. (2009). Preparation and properties of poly (p-phenylene sulfide)/multiwall carbon nanotube composites obtained by melt compounding. *Composites Science and Technology*, *69*(2), 147–153. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.08.030

Yang, R., Su, Z., Wang, S., Zhao, Y., & Shi, J. (2018). Crystallization and mechanical properties of polyphenylene sulfide/multiwalled carbon nanotube composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, *31*(11), 1545–1560.

Yang, S.-Y., Lin, W.-N., Huang, Y.-L., Tien, H.-W., Wang, J.-Y., Ma, C.-C. M., Li, S.-M., & Wang, Y.-S. (2011). Synergetic effects of graphene platelets and carbon nanotubes on the mechanical and thermal properties of epoxy composites. *Carbon*, *49*(3), 793–803. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.10.014

Yang, X., Tang, L., Guo, Y., Liang, C., Zhang, Q., Kou, K., & Gu, J. (2017). Improvement of thermal conductivities for PPS dielectric nanocomposites via incorporating NH2-POSS functionalized nBN fillers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *101*, 237–242. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.06.005

Yoo, T. J., Hwang, E.-B., & Jeong, Y. G. (2016). Thermal and electrical properties of poly(phenylene sulfide)/carbon nanotube nanocomposite films with a segregated structure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *91*, 77–84. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.09.022

Yu, S., Wong, W. M., Hu, X., & Juay, Y. K. (2009). The characteristics of carbon nanotube-reinforced poly(phenylene sulfide) nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, *113*(6), 3477–3483. https://doi.org/10.1002/app.30191

Zeng, L., Mou, H., Qiao, Y., Chen, G., Xu, J., & Liu, P. (2017). Processing, structure, and properties of multiwalled carbon nanotube–

poly(phenylene sulfide) composite fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, *134*(14). https://doi.org/10.1002/app.44609

Zeyrek, B., Aydogan, B., & Dilekcan, E. (2022). Review of thermoplastic composites in aerospace industry. *Int. J. Eng. Tech. Inf*, *3*, 1–6.

Zhang, M. Q., Rong, M. Z., Yu, S. L., Wetzel, B., & Friedrich, K. (2002). Effect of particle surface treatment on the tribological performance of epoxy based nanocomposites. *Wear*, *253*(9), 1086–1093. https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00252-1

Zhang, M., Wang, X., Li, C., Bai, Y., Cheng, B., & Li, Z. (2016). Effects of hydrogen bonding between MWCNT and PPS on the properties of PPS/MWCNT composites. *RSC Advances*, *6*(95), 92378–92386. https://doi.org/10.1039/C6RA19119C

Zhi, C. Y., Bando, Y., Tang, C. C., Huang, Q., & Golberg, D. (2008). Boron nitride nanotubes: Functionalization and composites. *Journal of Materials Chemistry*, *18*(33), 3900–3908. https://doi.org/10.1039/B804575E

Zhou, K., Gu, S.-Y., Zhang, Y.-H., & Ren, J. (2012). Effect of dispersion on rheological and mechanical properties of polypropylene/carbon nanotubes nanocomposites. *Polymer Engineering & Science*, *52*(7), 1485–1494. https://doi.org/10.1002/pen.23098

Zhou, L., Qian, Y., Zhu, Y., Liu, H., Gan, K., & Guo, J. (2014). The effect of different surface treatments on the bond strength of PEEK composite materials. *Dental Materials*, *30*(8), e209–e215. https://doi.org/10.1016/j.dental.2014.03.011

Zhou, S., Hrymak, A., & Kamal, M. (2017). Electrical and morphological properties of microinjection molded polypropylene/carbon nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, *134*(43), 45462. https://doi.org/10.1002/app.45462

Zhu, H. W., Xu, C. L., Wu, D. H., Wei, B. Q., Vajtai, R., & Ajayan, P. M. (2002). Direct Synthesis of Long Single-Walled Carbon Nanotube Strands. *Science*, *296*(5569), 884–886. https://doi.org/10.1126/science.1066996

Zol, S. M., Alauddin, M. S., Said, Z., Mohd Ghazali, M. I., Hao-Ern, L., Mohd Farid, D. A., Zahari, N. A. H., Al-Khadim, A. H. A., & Abdul Aziz, A. H. (2023). Description of Poly(aryl-ether-ketone) Materials (PAEKs), Polyetheretherketone (PEEK) and Polyetherketoneketone (PEKK) for Application as a Dental Material: A Materials Science Review. *Polymers*, *15*(9), Article 9. https://doi.org/10.3390/polym15092170