



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYA PAKETLERİNDE POLİMER
NANOKOMPOZİT MALZEMELERİN KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özge YURUL DAĞ

Polimer Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Polimer Malzeme Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

ŞUBAT 2025

**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYA PAKETLERİNDE POLİMER
NANOKOMPOZİT MALZEMELERİN KULLANIMININ
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Özge YURUL DAĞ

(20420591002)

ORCID: 0000-0002-0725-2329

**Polimer Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Polimer Malzeme Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı**

Danışman: Doç. Dr. Meral AKKOYUN KURTLU

ORCID: 0000-0002-8113-5534

ŞUBAT 2025

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 20420591002 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Özge YURUL DAĞ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYA PAKETLERİNDE POLİMER NANOKOMPOZİT MALZEMELERİN KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Meral AKKOYUN KURTLU**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Yakup AYKUT**
Bursa Uludağ Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Fatma DEMİRCİ
Bursa Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi :
Savunma Tarihi : 7 Şubat 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, 223M505 numaralı TÜBİTAK 1002-A 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.

Öğrencinin Adı Soyadı: Özge YURUL DAĞ

İmzası:





Aileme,

ÖNSÖZ

Her zaman, her koşulda beni destekleyen, özellikle kariyer yolumda attığım her adımda yanımda olup, hem hayat arkadaşım hem de bir o kadar hayat mentorum olan sevgili eşime,

Koşulsuz sevgileriyle her daim yanımda hissettiğim, kendi ayaklarının üzerinde duran, güçlü bir kadın olmamda katkıları sonsuz olan, kendimi gerçekleştirmem konusunda önüme hiçbir zaman toplumsal cinsiyet rollerinin kısıtlayıcılığını engel olarak koymayan, değerlilerim: annem, babam, kardeşim, babaannem ve dedeme,

Yüksek lisans danışmanım olmayı kabul eden, çalışmak istediğim alan konusunda beni istediğim noktalara yönlendiren, saygıdeğer deneyimlerini ve bilgi birikimini benimle paylaşan, yaşadığım sorunlara karşı tutumuyla beni hep pozitif olmaya teşvik eden yüksek lisans tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Meral AKKOYUN KURTLU'ya,

TÜBİTAK 1002-A projesi kapsamında, tez içeriğime konu olan projenin yazım sürecinde ve tez çalışmam için gerekli test süreçlerinin yürütülmesi ile ilgili desteklerini esirgemeyen Sayın Öğr. Gör. Dr. Sibel TUNA'ya,

223M505 numaralı proje kapsamında, bu tez çalışmasını destekleyen TÜBİTAK'a, Saygı ve minnetle teşekkürlerimi sunarım.

Şubat 2025

Özge YURUL DAĞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	x
SEMBOLLER	xii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xvi
SUMMARY	xviii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1 Elektrikli Araçlar ve Batarya Sistemleri	3
2.1.1 Elektrikli araçlar.....	3
2.1.2 Elektrikli araçlardaki batarya sistemleri	4
2.2 Elektrikli Araçlarda Polimer Kompozitler İçin Kullanılan Polimerler	10
2.2.1 Polipropilen	10
2.2.2 Poliamid 6	13
2.3 Elektrikli Araçlarda Polimer Kompozitler için Kullanılan Katkılar	14
2.3.1 Karbon fiber	14
2.3.2 Cam fiber.....	15
2.3.3 Bor nitrür.....	16
2.3.4 Silisyum karbür	18
2.4 Elektrikli Araç Polimer Kompozitlerinde Kullanılan Uyumlaştırıcı Ajanlar ..	20
2.4.1 Silan bağlayıcı ajanlar	20
2.4.2 Titanat bağlayıcı ajanlar.....	21
2.5 Polimer Kompozitlerin Özellikleri.....	23
2.5.1 Polimer kompozitlerin termal iletkenlik özellikleri	23
2.5.2 Polimer kompozitlerin elektriksel iletkenlik özellikleri.....	24
2.5.3 Polimer kompozitlerin mekanik özellikleri.....	25
2.6 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Polimer Kompozitler	27
2.7 Polimer Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	28
2.7.1 Ekstrüzyon	28
2.7.2 Enjeksiyon kalıplama	30
2.7.3 Basınçlı kalıplama	31
2.7.4 Mekanik karıştırma	33
3. LİTERATÜR ÖZETİ	34
4. MALZEMELER VE YÖNTEM.....	36
4.1 Malzemeler.....	36
4.2 hBN ve SiC Katkıların Ti ile Kaplanması.....	36
4.3 PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC Polimer Nanokompozitlerin Üretimi	37
4.4 Polimer Nanokompozitlerin Karakterizasyon Yöntemleri.....	38

4.4.1 Yoğunluk analizi	38
4.4.2 Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopi	40
4.4.3 Taramalı elektron mikroskobu analizi	40
4.4.4 Mekanik özelliklerin incelenmesi	41
4.4.5 Elektriksel iletkenlik analizi.....	42
4.4.6 Diferansiyel taramalı kalorimetre analizi.....	42
4.4.7 Termal gravimetrik analiz	43
4.4.8 Termal iletkenlik analizi	44
4.4.9 Dikey yanma testi / UL 94-V	44
5. BULGULAR VE TARTIŞMALAR	45
5.1 Yoğunluk Analizi Sonuçları.....	45
5.2 FTIR Analiz Sonuçları	45
5.3 Taramalı Elektron Mikroskobu Analiz Sonuçları	47
5.4 Mekanik Özelliklerin İncelenmesi	49
5.4.1 Çekme testi sonuçları	49
5.4.2 Darbe testi sonuçları.....	52
5.5 Elektriksel İletkenlik Analizi Sonuçları	54
5.6 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Analizi Sonuçları	55
5.7 Termal Gravimetrik Analiz Sonuçları.....	59
5.8 Termal İletkenlik Analizi Sonuçları	60
5.9 Dikey Yanma Testi / UL 94-V	61
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	64
KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ.....	77

KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
AYM	: Avrupa Birliği yeşil mutakabat metni
cBN	: Kübik Bor Nitrür
CFRP	: Karbon fiber takviyeli polimerler
CH₃	: Metil grubu
COP21	: 21.Taraflar Konferansı (21st Conference of the Parties)
CPE	: Klorlanmış Polietilen
DSC	: Diferansiyel taramalı kalorimetre
EV	: Elektrikli araç (Electric Vehicle)
FTIR	: Fourier dönüşümlü kızıll�tesi spektrofotometri
GFRP	: Cam fiber takviyeli polimerler
hBN	: Hegzagonal Bor Nit�r
LEZ	: Kısıtlanmış emisyon bölgesi
LFP	: Lityum Demir Fosfat
Li-Ion	: Lityum iyon
LMO	: Lityum Manganez Oksit
LOI	: Sınırlayıcı oksijen indeksi
MWCNT	: Çok duvarlı karbon nanotüp
Na-NiCl	: Sodyum-Nikel klorür
NiCd	: Nikel Kadmiyum
Ni-MH	: Nikel-Metal Hidrit
NMC	: Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit
Pb	: Kurşun
PbO₂	: Kurşun Oksit
PP	: Polipropilen
SEM	: Taramalı elektron mikroskopu
SiC	: Silisyum Karbür
TBMM	: Türkiye Büyük Millet Meclisi
TGA	: Termal gravimetre analizi
Ti	: Tetraethyl Orthotitanate

TOGG : Türkiye'nin Otomobil Girişim Grubu
ULEZ : Ultra dūřuk emisyon bōlgesi
ZEZ : Sıfır emisyon bōlgesinde
Zn-Br₂ : Çinko-Brom



SEMBOLLER

%	: Yüzde
°C	: Derece santigrat
A	: Akıma karşı yüzeyin kesit alanı
Ah	: Amper-saat
d	: Yoğunluk
H	: Entalpi
Kg	: Kilogram
KJ	: Kilo joule
Km	: Kilometre
kWh	: Kilowatt
L	: Uzunluk
m	: Kütle
MPa	: mega Pascal
MΩ	: Mega Ohm
R	: Elektriksel özdirenç
S	: Siemens
T_C	: Kristalleşme sıcaklığı
T_m	: Erime sıcaklığı
V_{cisim}	: Cismin hacmi
Wh	: Watt-saat
X_c	: Kristalinite
μm	: Mikrometre
ρ	: Yoğunluk
σ	: Özdirenç

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Dünyadaki önemli şehirler ve karbon emisyon hedefleri [5,6].	5
Çizelge 2.2 : Dünyadaki bazı ülkelerin EV market payları (%) [5,6,7].	6
Çizelge 2.3 : EV'lerde kullanılan önemli batarya türlerinin önemli özellikleri [9].	7
Çizelge 2.4 : Li-Ion pillerin avantajları ve dezavantajları [9].	9
Çizelge 2.5 : Li-Ion pil kullanılan araçlarda batarya paketi ağırlıkları [9].	10
Çizelge 4.1 : PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC kompozitlerin formülasyonları.	37
Çizelge 5.1 : PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC kompozitlerin yoğunlukları.	45
Çizelge 5.2 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin çekme testi sonuçları.	50
Çizelge 5.3 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin darbe testi sonuçları.	53
Çizelge 5.4 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin elektriksel iletkenlik sonuçları.	55
Çizelge 5.5 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin DSC analiz sonuçları.	56
Çizelge 5.6 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin TGA analiz sonuçları.	59
Çizelge 5.7 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin termal iletkenlik sonuçları.	60
Çizelge 5.8 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin termal iletkenlik sonuçları.	62

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Li-Ion bataryanın şematik gösterimi [10].	8
Şekil 2.2 : Tesla Model S batarya paketi [10].	9
Şekil 2.3 : Tesla Model S batarya paketi [10].	12
Şekil 2.4 : Polipropilenin yapısal gösterimi [13].	12
Şekil 2.5 : İzotaktik, sindiyotaktik ve ataktik PP yapıları [15].	12
Şekil 2.6 : Poliamid 6'nın yapısal gösterimi [19].	13
Şekil 2.7 : Karbon fiber kullanım alanlarının sektörlere dağılımı (%) [24].	15
Şekil 2.8 : hBN'ün kristal yapısı [30].	17
Şekil 2.9 : cBN'ün kristal yapısı [30].	18
Şekil 2.10 : Silisyum karbür kristalinin tetrahedron yapısı [38].	19
Şekil 2.11 : Silisyum karbürün β -SiC ve α -SiC yapıları [39].	20
Şekil 2.12 : Organosilanların genel yapısı [42].	21
Şekil 2.13 : Tetraetil ortotitanatın kimyasal formülü [42].	23
Şekil 2.14 : Ekstrüzyon prosesi şeması [75].	30
Şekil 2.15 : Enjeksiyon kalıplama prosesinin şematik gösterimi [78].	31
Şekil 2.16 : Basınçlı kalıplama prosesinin şematik gösterimi [82].	32
Şekil 4.1 : Mekanik karıştırma ve basınçlı kalıplama ile örnek hazırlama [84].	38
Şekil 4.2 : Mekanik karıştırıcı (DLAB/OS20-S).	39
Şekil 4.3 : Basınçlı kalıplama cihazı (CARVER/12-12).	39
Şekil 4.4 : Hassas terazi uyumlu yoğunluk ölçüm kiti (Shimadzu/AUX321).	40
Şekil 4.5 : Thermoscientific Nicolet-IS50 FTIR cihazı.	40
Şekil 4.6 : Taramalı elektron mikroskopu (Carl Zeiss/Gemini 300).	41
Şekil 4.7 : Mekanik test cihazları: a) Çekme testi cihazı (Shimadzu/AGS-X), b) Darbe testi cihazı (INSTRON/CEAST9050).	41
Şekil 4.8 : Elektriksel iletkenlik ölçüm cihazı.	42
Şekil 4.9 : Diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı (TA Instruments/DSC25).	43
Şekil 4.10 : TGA cihazı (TA Instruments/SDT Discovery 650).	43
Şekil 4.11 : Termal iletkenlik analiz cihazı (Netzsch/LFA 467).	44
Şekil 4.12 : Dikey yanma testi (UL 94-V).	44
Şekil 5.1 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin yoğunluk ölçüm sonuçları.	46
Şekil 5.2 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin FTIR analizi sonuçları.	46
Şekil 5.3 : Saf PP ve PPX nanokompozitlerin x8000 büyütmede kaydedilen SEM görüntüleri: a) PP, b) PP20, c) PP40 ve d) PP50.	48
Şekil 5.4 : Saf PP ve PPTX nanokompozitlerin x8000 büyütmede kaydedilen SEM görüntüleri: a) PP, b) PPT20, c) PPT40 ve d) PPT50.	49
Şekil 5.5 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin elastik modül sonuçları.	51

Şekil 5.6 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin çekme dayanımı sonuçları.	52
Şekil 5.7 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin kopmadaki uzama sonuçları.	53
Şekil 5.8 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin darbe dayanımı sonuçları.	54
Şekil 5.9 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin elektriksel iletkenliklerinin hBN/SiC ve Ti/hBN/Ti/SiC oranına göre değişimi	55
Şekil 5.10 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin DSC termogramları, 1. ısıtma.	57
Şekil 5.11 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin DSC termogramları, 2. ısıtma.	57
Şekil 5.12 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin DSC termogramları, soğutma.	58
Şekil 5.13 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin kristalinite değerlerinin hBN/SiC ve Ti/hBN/Ti/SiC oranına göre değişimi.	58
Şekil 5.14 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin DSC termogramları.	59
Şekil 5.15 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin termal iletkenlik değerlerinin hBN/SiC ve Ti/hBN/Ti/SiC oranına göre değişimi.	61
Şekil 5.16 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin dikey yanma/UL 94-V testindeki damlatma ve yanma görüntüleri.	62
Şekil 5.17 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin katkı oranına göre yanma süresinin değişimi.	63

ELEKTRİKLİ ARAÇ BATARYA PAKETLERİNDE POLİMER NANOKOMPOZİT MALZEMELERİN KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Bu tez çalışmasında, elektrikli araç (EV) batarya paketlerinde kullanılmak üzere hibrit polimer nanokompozitler geliştirerek, bu nanokompozitlerin termal ve mekanik özelliklerinin iyileştirirken elektriksel yalıtımlarının korunması hedeflenmiştir. Elektrikli araçlara olan talep arttıkça, düşük menzil ve batarya performansı gibi temel sorunların çözülmesi önemli hale gelmiştir. Bu soruna karşı geliştirilebilecek çözümlerden biri de aracın ağırlığını azaltmaktır. Böylelikle enerji tüketimi azalacak ve batarya ömrü artabilecektir. Bu amaçla, hafif, maliyet açısından uygun ve geri dönüştürülebilir polimer nanokompozitlerin, otomotiv üretiminde kullanılan geleneksel ağır metallerin yerine bir alternatif olabilmeleri önem kazanmıştır.

Bu çalışmada, polimer matris olarak polipropilen (PP) seçilmiştir. İlk aşamada, PP'nin termal iletkenliğini ve mekanik dayanımını artırmak amacıyla eşit miktarlarda hegzagonal bor nitrür (hBN) ve silisyum karbür (SiC) katkıları, farklı toplam ağırlıkça oranlarda (%20, %40 ve %50) PP matris içerisine eklenerek PP/hBN/SiC nanokompozitler üretilmiştir. İkinci aşamada ise, katkıların polimer matrisi ile uyumunu artırabilmek ve nanokompozit yapının nihai özelliklerini iyileştirmek amacı ile, hBN ve SiC parçacıklarının tetraetil ortotitanat (Ti) ile kaplandığı PP/Ti/hBN/Ti/SiC polimer nanokompozit numuneler de benzer ağırlıkça oranları (%20, %40 ve %50) ile üretilmiştir. Numuneler, mekanik karıştırma ve basınçlı kalıplama yöntemleri ile karakterizasyon yöntemlerine uygun olarak hazırlanmışlardır.

Bu çalışma, polipropilen matrisine hexagonal bor nitrür ve silisyum karbür katkılarının eklenmesinin, malzemenin mekanik, termal, elektriksel ve yangın dayanım özellikleri üzerinde önemli iyileşmeler sağladığını göstermektedir. Katkı oranı arttıkça, polipropilenin elastik modülü %57 oranında artmış ve mekanik sertlik belirgin şekilde iyileşmiştir; ancak %40 ve %50 gibi yüksek katkı oranlarında bazı mekanik özelliklerde azalmalar gözlemlenmiştir. Ayrıca, titanat uyumlaştırıcı ajanının katkı maddelerinin homojen dağılımını sağlayarak esneklik ve darbe dayanımını artırdığı da bulunmuştur. Çekme dayanımında, özellikle %40 ve %50 katkı oranlarında belirgin azalma gözlemlenirken, titanat kaplamalı numunelerde çekme dayanımı daha az düşmüştür. Termal analizler, katkıların PP'nin ısı özelliklerini iyileştirirken, aşırı katkı oranlarının olumsuz etkiler yaratabileceğini de göstermiştir. Termal iletkenlik, %20 hBN/SiC katkılı numunelerde saf PP'ye kıyasla %216 artarken, titanat kaplamalı numunelerde bu artış %248'e çıkmıştır. Bu sonuçlar, polipropilen bazlı nanokompozitlerin endüstriyel uygulamalar için potansiyel taşıdığını ve optimizasyon gerekliliğini vurgulamaktadır.

Bu çalışma, Doç. Dr. Meral AKKOYUN KURTLU'un yürütücüsü olduğu 223M505 numaralı TÜBİTAK 1002-A projesi kapsamında tamamlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Polimer nanokompozitler, Silisyum karbür, Hegzagonal bor nitür, Tetraetil ortotitanat.



INVESTIGATION OF THE USE OF POLYMER NANOCOMPOSITE MATERIALS IN ELECTRIC VEHICLE BATTERY PACKS

SUMMARY

In this thesis, it was aimed to develop hybrid polymer nanocomposites for use in electric vehicle (EV) battery packs and to improve the thermal and mechanical properties of these nanocomposites while preserving their electrical insulation. Since the demand for electric vehicles is growing, addressing key issues such as limited driving range and battery performance becomes increasingly important. One of the primary challenges contributing to this issue is the weight of the vehicle, which directly increases energy consumption and battery life. Reducing vehicle weight is a promising solution, and lightweight, cost-effective, and recyclable polymer composites offer an alternative to traditional heavy metals used in automotive manufacturing.

In this study, polypropylene (PP) was selected as the polymer matrix. In the first stage, to increase the thermal conductivity and mechanical strength of PP, equal amounts of hexagonal boron nitride (hBN) and silicon carbide (SiC) fillers were added to the PP matrix at different total weight ratios (20%, 40% and 50%) to produce PP/hBN/SiC nanocomposites. In the second stage, to improve the compatibility of the additives with the polymer matrix and to improve the final properties of the nanocomposite structure, PP/Ti/hBN/Ti/SiC polymer nanocomposite samples in which hBN and SiC particles were coated with tetraethyl orthotitanate (Ti) were produced at similar weight ratios (20%, 40% and 50%). The samples were prepared in accordance with the characterization methods by mechanical mixing and compression molding techniques.

This study demonstrates that the addition of hexagonal boron nitride and silicon carbide nano fillers to the polypropylene matrix leads to significant improvements in the material's mechanical, thermal, electrical, and fire resistance properties. As the filler content increased, the elastic modulus of polypropylene improved by 57%, and mechanical stiffness was notably enhanced. However, some mechanical properties were observed to decrease at higher filler concentrations, such as 40% and 50%. Additionally, the use of titanate coupling agents was found to promote a more homogeneous distribution of the fillers, improving flexibility and impact resistance. Tensile strength showed a significant decrease, particularly at 40% and 50% filler concentrations, but the tensile strength of titanate-coated samples decreased less. Thermal analyses showed that the fillers improved the thermal properties of PP, while excessively high filler contents could lead to adverse effects. It is observed that, thermal conductivity increased by 216% for the 20% hBN/SiC-filled samples compared to pure PP, and this increase reached 248% for the titanate-coated samples. These results highlight the potential of polypropylene-based nanocomposites for industrial applications and emphasize the need for optimization.

This study was completed within the scope of TUBITAK 1002-A project numbered 223M505, whose director is Assoc. Prof. Dr. Meral AKKOYUN KURTLU.

Keywords: Polymer nanocomposites, Silicon carbide, Hexagonal boron nitride, Tetraethyl orthotitanate.



1. GİRİŞ

Günümüzde elektrikli otomobillerin önemi giderek artmakta ve otomobil firmaları, elektrikli araçlar üzerine yaptıkları çalışmalarını her geçen gün daha da geliştirmektedir. Bu bağlamda, batarya kapasitelerinin artırılması ve araçların hafifletilmesi gibi konulara odaklanılmaktadır. Elektrikli otomobillerin karşılaştığı en büyük sorunlardan biri, kısa menzildir. Gelecekte elektrikli otomobillerin, geleneksel içten yanmalı motorlu araçların yerini alabilmesi için bu engelin aşılması gerekmektedir. Bu doğrultuda yapılan çalışmalardan biri de araç ağırlığının azaltılmasıdır. Araç ne kadar hafif olursa, elektrik motorunun enerji tüketimi azalacak ve bataryalar daha uzun süre dayanacaktır. Böylece aracın menzili de artacaktır. Bugün otomotiv endüstrisi, fosil yakıtla çalışan araçların üretimini azaltmayı ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda karbon salınımını azaltacak elektrikli araçlar üretmeyi amaçlamaktadır. Son on yıl içinde bu yaklaşım, dünya çapında bir eğilim haline gelmiş ve 2016'da imzalanan Paris Anlaşması ile karbon emisyonunu düşürmek, küresel bir hedef ve zorunluluk olmuştur. Bu çalışmada, elektrikli araç batarya paketlerinde polimer kompozit malzeme kullanımına odaklanılacaktır.

Elektrikli araçların kısa menzilinin en önemli nedenlerinden biri, batarya teknolojisinin henüz yeterince gelişmemiş olmasıdır. Mevcut batarya teknolojileri, hala sınırlı enerji yoğunluğuna ve kapasiteye sahiptir ve bu durum da elektrikli araçların menzilini kısıtlamaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için çeşitli çözüm yolları geliştirilmekte, bunlardan biri ise araç ağırlığının azaltılmasıdır. Araç ne kadar hafif olursa, bataryanın sağladığı enerji daha verimli kullanılabilir ve menzil artırılabilir. Bu bağlamda, polimer ve polimer kompozit malzemeler, hafif, ucuz ve büyük hacimlerde geri dönüştürülebilen özellikleriyle önemli bir alternatif sunmaktadır. Geleneksel ağır metallerin yerine, bu tür kompozit malzemelerin kullanımı, araçların ağırlığının azaltılmasına yardımcı olabilir. Ayrıca, polimer kompozitler daha çevre dostu olup, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir rol oynayabilir. Bu nedenle, polimer kompozitlerin, elektrikli araçların batarya

paketlerinde ve diğ er bile senlerinde kullanılmak üzere uyarlanması büyük bir potansiyel taşımaktadır.

Polimer kompozitlerin en büyük zorluklarından biri, genellikle esnek olmamaları ve alev aldıklarında kolayca s nd r lemleridir. Bu sorunları açmak için literatürde, hegzaonal bor nitrür ve silisyum karbür gibi katkıların polimerlere eklenmesi yaygın bir c z m olarak öne çıkmaktadır. Bu katkıları, polimer kompozitlerin mekanik özelliklerini güçlendirmenin yanı sıra, termal iletkenliklerini de artırmaktadır. Böylece, kompozitlerin ısıı yönetimi iyile tirilirken, aynı zamanda elektriksel iletkenlikleri minimumda tutularak yalıtkanlıkları korunmaktadır. Bu  zellikler, polimer kompozitlerin hem elektrikli araç batarya paketlerinde hem de diğ er endüstriyel uygulamalarda daha verimli ve güvenli bir şekilde kullanılabilmelerini sağlayabilir. Ayrıca, hBN ve SiC gibi katkıları, polimer kompozitlerin alev alma özelliklerini de geliştirebilirler.

Bu tez çalışmasında, polimer matris olarak seçilen polipropilene, hegzaonal bor nitrür ve eşit miktarlarda silisyum karbür eklenerek, farklı ağırılık a oranlarda hBN/SiC (%20, %40 ve %50) içeren PP/hBN/SiC nanokompozitler üretilmiştir. Ayrıca, uyumlaştırıcı ajan olan tetraetil ortotitanat ile kaplanmış katkıları kullanarak PP/Ti/hBN/Ti/SiC polimer nanokompozitler hazırlanmıştır ve literatürde ilk kez incelenmiştir. Tüm nanokompozit yapıları, mekanik karıştırma ve basınçlı kalıplama yöntemleri ile üretilmiştir. Elde edilen numunelere yönelik termal ve elektriksel iletkenlik, mikroyapısı, yoğunluk, mekanik, termal kararlılık ve termal faz geçiş ve alev geciktiricilik analizleri tekrarlanan testlerle gerçekleştirilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Elektrikli Araçlar ve Batarya Sistemleri

2.1.1 Elektrikli araçlar

Elektrikli araçlar, çevresel sürdürülebilirliği teşvik etme ve karbon ayak izini azaltma açısından önem kazanmışlardır. Fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan karbon emisyonlarının çevreye verdiği zarar, iklim değişikliğinin başlıca nedenlerinden biri olarak gösterilmektedir. Buna ek olarak, mevcut fosil yakıt stoğunun azalması, erişilebilir fosil yakıtların maliyetlerinin artması, siyasal nedenler gibi sebepler ile de sürdürülebilirlik hedefleri dışında alternatif enerji kaynaklarının hayatımızda daha etkin yer almaları gerekmektedir. Karbon emisyonu açısından incelendiğinde, EV'ler sıfır emisyonlu bir ulaşım alternatifi sunarak çevresel zararın azaltılmasında hayati bir rol oynamaktadır. Elektrikli araçların yaygınlaşması, yalnızca çevre koruma açısından değil, aynı zamanda fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak enerji güvenliğini sağlamada ve sürdürülebilir kalkınmayı desteklemede de önemli fırsatlar sunmaktadır.

İklim krizi ile mücadelede Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı COP21 zirvesinde imzalanan Paris Anlaşması kritik rol oynamaktadır. Anlaşma, tüm ülkelerin ortak çalışması ile 2050 yılına kadar küresel sıcaklık artışının endüstrileşme dönemi öncesine kıyaslandığında 1,5°C ile sınırlı kalmasını hedefliyor. Paris Anlaşması'nda alınan kararlara göre ülkelerin, 2050 yılına kadar net sıfır hedefine ulaşması gerekmektedir. Türkiye, Avrupa Birliği'nin Aralık 2019'da açıkladığı AB Yeşil Mutabakat (AYM) çerçevesinde Yeşil Mutabakat Eylem Planı hazırlamış, Ekim 2021'de Paris Anlaşmasını TBMM'den geçirerek onaylamış ve 2053 yılında net sıfır emisyonu ulaşmayı hedeflemiştir [1, 2].

Dünyada birçok ülke, EV kabulünü teşvik etmek için yenilikçi düzenlemeler ve teşvik mekanizmaları geliştirmiştir. Örneğin, karbon emisyonlarını sınırlayan politikalar, vergi indirimleri, satın alma teşvikleri ve şarj altyapısının yaygınlaştırılması gibi uygulamaların yanı sıra Çizelge 2.1'de örnekleri sunulan şehirler ve benzerlerinde,

şehir içinde emisyon miktarı düzenleyen düşük ya da sıfır emisyon bölgeleri (LEZ, ZEZ) belirleyerek EV kullanımını artırmayı amaçlamışlardır.

Son yıllarda elektrikli araç teknolojisinde büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Hem global ve bölgesel politikalar hem de çevresel etmenler nedeni ile EV teknolojileri gelişmiş ve ülkelerde satılan elektrikli araçların oranları hızla yükselmiştir. Çizelge 2.2’de yıllara göre satılan elektrikli araçların bazı ülkelerdeki pazar paylarına yer verilmiştir. Ülkemizde ise, son iki yılda, özellikle yerli EV TOGG’un üretilmesi ve satışının teşvik edilmesi ile birlikte, EV pazar payları %10 seviyelerine kadar ulaşmıştır [3].

Elektrikli araçların yaygınlaşmasında en önemli faktörlerden biri, batarya teknolojilerinin gelişmesidir. EV’lerin verimliliği ve menzili, kullanılan bataryaların kapasitesine bağlıdır. Ancak batarya teknolojisindeki sınırlamalar, yüksek maliyet, sınırlı menzil, uzun şarj süreleri ve batarya ömrü gibi sorunlar, geniş kullanımı engellemektedir. Ayrıca, araçların ağırlığının azaltılması, enerji verimliliğini artırmak için kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, batarya ve araç ağırlık optimizasyonu, EV’lerin etkinliğini artırmak ve küresel benimsenmesini hızlandırmak için önemli bir öncelik taşımaktadır.

2.1.2 Elektrikli araçlardaki batarya sistemleri

2.1.2.1 Batarya parametreleri ve çeşitleri

Elektrikli araçlar için batarya sistemleri, araçların en kritik bileşenlerden biridir. EV’lerde kullanılan bataryalar için önemli parametreler, aşağıda özetlenerek açıklanmışlardır [4].

- **Enerji kapasitesi:** Bir bataryanın depolayabileceği toplam şarj miktarını ifade eder ve genellikle amper-saat (Ah), miliamper-saat (mAh) cinsinden verilir. Bir bataryanın toplam enerji kapasitesini watt-saat (Wh) cinsinden bulabilmek için, amper-saat cinsinden verilen değerin, bataryanın çıkış gerilimi (volt) ile çarpılması gerekir.
- **Şarj durumu:** Bir bataryanın doluluk oranını % olarak ifade eder.
- **Enerji yoğunluğu:** Bataryanın birim hacim başına depolayabileceği enerji miktarını ifade eder ve genellikle watt-saat/litre (Wh/L) cinsinden ölçülür.

Çizelge 2.1 : Dünyadaki önemli şehirler ve karbon emisyon hedefleri [5,6].

Şehir (Ülke)	Önlem	Açıklama
Londra (Birleşik Krallık)	Ultra Düşük Emisyon Bölgesi (ULEZ)	Araçların ULEZ'e girebilmesi için sıkı emisyon standartlarını karşılaması gerekiyor.
Paris (Fransa)	Düşük Emisyon Bölgesi (LEZ)	Daha eski dizel ve benzinli araçlar için kısıtlamalar; 2030 yılına kadar tüm fosil yakıtlı araçların yasaklanması planlanıyor.
Amsterdam (Hollanda)	Sıfır Emisyon Bölgesi (ZEZ)	2030 yılına kadar tüm benzinli ve dizel otomobiller ile motosikletlerin yasaklanması planlanıyor; elektrikli ve hidrojen araçların teşviki yapılıyor.
Kopenhag (Danimarka)	Kapsamlı hareketlilik önlemleri	2025 yılına kadar karbon nötr olmayı hedefliyor; araç emisyonları azaltılıyor.
Barselona (İspanya)	Süperbloklar ve trafik kısıtlamaları	Belirli alanlarda trafiği sınırlamak için 'süperbloklar' uygulanıyor; araç emisyonlarını azaltıyor.
Oxford (Birleşik Krallık)	Sıfır Emisyon Bölgesi (ZEZ)	Şehir merkezinin bazı bölgelerinde ZEZ uygulanıyor; yalnızca sıfır emisyonlu araçlar ekstra ücret ödemediği giriş yapabiliyor.
Berlin (Almanya)	Düşük Emisyon Bölgesi (LEZ)	2020 yılından itibaren eski dizel araçları sınırlayan bir LEZ uygulamaya başladı. 2030'da kapsam genişletiliyor.
Brüksel (Belçika)	Düşük Emisyon Bölgesi (LEZ)	Daha eski dizel ve benzinli araçları sınırlayan bir LEZ uyguladı; hava kalitesini artırmak için standartları zamanla sıkılaştırmayı planlıyor.

- Spesifik enerji : Bataryanın birim kütle başına verebileceği enerji miktarıdır (Wh/kg). Gravimetrik enerji yoğunluğu olarak da adlandırılır. Spesifik enerjisi yüksek malzemelerden batarya üretmek, daha az kütle ile daha çok enerji depolamaya izin verir.
- Spesifik güç: Birim kütle başına verilebilen güç miktarıdır (Watt/kg).
- Şarj döngüsü: Bataryanın %100 boşalması ve dolması döngüsünü tanımlar.
- Menzil: Bataryanın döngü başına araca aldırabileceği yolu tanımlar (km/döngü).
- Batarya ömrü: Bir bataryanın toplam tutabileceği şarj döngüsü sayısıdır.
- İç direnç: Bataryanın iç direncidir. Termal kayıp ve ısınma miktarını belirleyen önemli bir faktördür.
- Etki ya da verimlilik: Bataryanın şarj edilen enerjiye oranla sunabildiği enerji miktarıdır (%).

Çizelge 2.2 : Dünyadaki bazı ülkelerin EV market payları (%) [5,6,7].

Ülke	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Norveç	6,1	13,8	22,4	29,1	39,2	49,1	55,9	74,7	86,2	87,6	90,4
İzlanda	1,3	2,1	3,6	5,6	11,7	17,2	22,6	45,0	54,7	56,1	64,0
İsveç	0,7	1,5	2,6	3,5	5,2	8,2	11,4	32,2	43,3	56,1	59,8
Hollanda	5,6	3,9	9,9	6,7	2,6	6,2	14,9	18,1	30,8	37,5	54,4
Çin	0,1	0,2	0,8	1,3	2,1	4,2	4,9	5,4	15,0	30,0	37,0
Almanya	0,2	0,6	0,9	1,8	2,7	2,5	3,2	10,7	18,4	31,4	24,6
Fransa	0,6	0,8	1,2	1,5	2,1	2,2	2,6	11,2	18,4	21,6	26,0
UK	0,6	1,2	1,8	1,3	2,1	2,5	3,2	10,7	18,4	22,9	23,9
USA	0,6	0,7	0,9	1,1	1,2	1,3	1,9	2,1	4,2	6,7	9,5
Japonya	0,4	0,9	1,1	1,0	0,9	1,0	1,1	1,9	2,1	2,5	3,6
Türkiye	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	1,1	10,0

EV’lerde kullanılan batarya çeşitleri aşağıdaki şekilde özetlenebilirler [8].

- Kurşun asit bataryalar (Pb-PbO₂): 1859 yılından itibaren kullanılan doldurulabilir pil çeşitlerindenidir. Bu bataryalar, çok düşük spesifik enerji (Wh/kg) ve enerji yoğunluğuna sahip olup, genellikle sülfürik asit içine batırılmış kurşun plakalardan oluşurlar. Bataryanın negatif plakasında, kurşun sülfat metale indirgenirken; pozitif plakasında kurşun oksit (PbO₂) oluşur. Bu kimyasal reaksiyonlar, bataryanın elektriksel enerjiyi depolamasını ve serbest bırakmasını sağlar. Kurşun asit bataryalar, GM EV1 ve Toyota RAV EV gibi elektrikli araçlarda kullanılmıştır.
- Nikel kadmiyum bataryalar (NiCd): 1990’larda kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmalarına rağmen, bu bataryalar yüksek hafıza etkisine sahip olduğundan verimlilikleri zamanla azalır. Ayrıca, çok düşük ömre sahip olmaları, kullanım sürelerini kısıtlayan önemli bir faktördür. Kadmiyum, oldukça pahalı bir malzeme olup, çevre için de kirletici bir özellik taşır. Bu nedenle, kadmiyum içeren bataryaların çevre dostu alternatiflere dönüştürülmesi konusunda çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.
- Ni-MH bataryalar: Ni-Cd pillerinin yerine geliştirilmiş ve daha çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmıştır. Bu bataryalarda, kadmiyum (Cd) yerine hidrojen alaşımı kullanılır, bu da çevresel açıdan daha az zararlıdır. Ni-MH bataryalar, Ni-Cd pillere göre daha uzun ömre sahiptir ve daha yüksek enerji yoğunluğu sunar. Ancak, yüksek hafıza etkisi yine de bu bataryaların dezavantajlarından biridir. Ni-MH bataryalar, Toyota Prius EV, GM EV1-v2 ve Toyota RAV4 EV-v2 gibi

elektrikli araçlarda kullanılmaya başlanmıştır ve bu araçlarda iyi bir performans sergilemişlerdir.

- Çinko brom ($Zn-Br_2$) bataryalar: Çinko brom çözeltisi iki ayrı tankta depolanır. Pozitif elektrot üzerinde, bromür iyonları brom gazına dönüşür ve bu reaksiyon, bataryanın enerji üretimini sağlar. Çinko brom piller, 1993 yılında T-star prototipinde kullanılmıştır. Yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler ve uzun ömürlü olabilirler.
- Sodyum nikel klorür bataryalar ($Na-NiCl$): "Zebra" olarak da adlandırılan, sodyum kükürt pillerine oldukça benzeyen bir batarya türüdür. Bu bataryalar, düşük sıcaklıklarda %30'a kadar daha fazla enerji sağlayabilme avantajına sahiptir. Ancak, en verimli çalışma aralığı $260-300^{\circ}C$ arasındadır. Yüksek enerji yoğunluğu, uzun ömür ve toksik maddeler içermemesi gibi özellikleri, onları çevre dostu bir alternatif haline getirmektedir. Ancak en verimli oldukları sıcaklıklar yüksek olduklarından, daha çok araçların sürekli çalıştırıldıkları toplu taşıma sistemleri için tercih edilmektedirler.
- Lityum-iyon bataryalar ($Li-Ion$): Katot ve anot arasında gerçekleşen geri dönüşümlü elektrokimyasal reaksiyon için gerekli iyonları sağlayan lityum tuzu içeren bir elektrolit kullanırlar. Bu bataryalar, bileşenlerinin hafifliği, yüksek enerji depolama kapasitesi, düşük iç dirençleri ve yüksek döngü sayıları ile öne çıkar. Ayrıca, hafıza etkisinin oldukça düşük olması, performanslarının uzun süre korunmasını sağlar.

Çizelge 2.3 : EV'lerde kullanılan önemli batarya türlerinin önemli özellikleri [9].

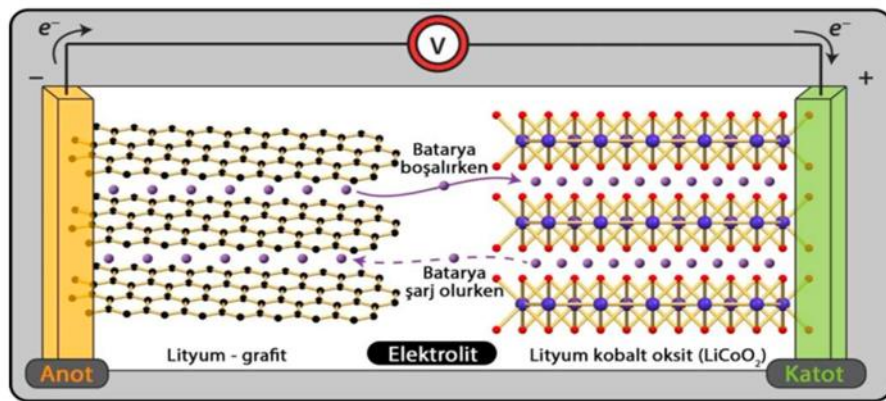
Pil Türü	Özgül Enerji (Wh/kg)	Enerji Yoğun. (Wh/L)	Özgül Güç (W/kg)	M_{100} (kg)
Kurşun-Asit	35-40	80-90	285	500 – 600
Ni-MH	50-70	100-140	200	300 – 400
ZEBRA ($Na-NiCl_2$)	100	160	170	200
Li-Ion	150-200	250-400	260	100 – 140

EV’lerde kullanılan dört önemli batarya sisteminin karakteristik özellikleri Çizelge 2.3’te verilmiştir. Çizelgede M_{100} , 20 kWh enerji ile 100 km gidebilmesi için gereken batarya kütlesi miktarıdır. Kıyaslamadan görüldüğü üzere, Li-Ion batarya sistemleri yüksek enerjiyi düşük kütlede sunabilmektedirler ve bu nedenle EV’lerden taşınabilir elektronik cihazlara kadar geniş bir kullanım alanına sahiptirler.

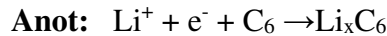
2.1.2.2 Li-ion bataryalar

Bir önceki bölümde özetlendiği üzere, Li-Ion bataryalar, günümüzde EV’ler ve şarj edilebilir hemen hemen her tür cihazda yaygınca kullanılmaktadırlar. Lityum Manganez Oksit (LMO), Lityum Nikel Manganez Kobalt Oksit (NMC) ve Lityum Demir Fosfat (LFP), performansları nedeniyle en yaygın kullanılan Li-Ion batarya çeşitleridir [9].

Li-ion piller, enerjiyi lityum iyonları şeklinde depolarlar ve bu iyonlar şarj ve deşarj sırasında pozitif ve negatif elektrotlar arasında hareket eder. Batarya şarj olurken, lityum iyonları katottan anoda elektrolit aracılığıyla geçer. Deşarj sırasında ise iyonlar tekrar katoda geri akar ve cihazları çalıştırmak için enerjiyi serbest bırakır. Bu tersine hareket eden iyonlar, bataryanın enerjiyi verimli bir şekilde depolayıp salmasını sağlar. Araca enerji vermekte olan, bir Li-NMC bataryanın, anot ve katodlarında gerçekleşen kimyasal reaksiyon, aşağıda Denklem 2.1’de verilmiştir. NMC bataryalar, EV’lerde en genel kullanılan Li-Ion batarya türüdür ve Tesla ile BMW gibi birçok araçta kullanılmaktadırlar.



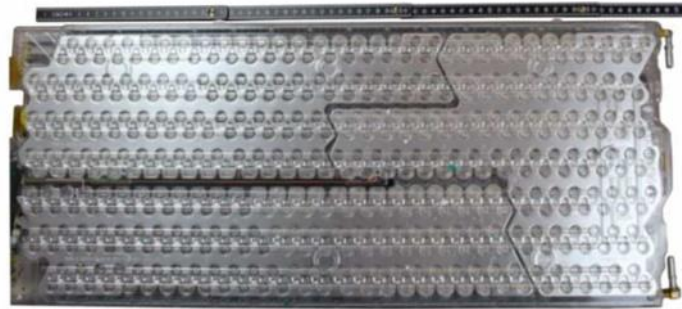
Şekil 2.1 : Li-Ion bataryanın şematik gösterimi [10].



Li-Ion pillerin avantajları ve dezavantajları, Çizelge 2.4’te listelenmişlerdir. Çizelgede verilen dezavantajların en önemlilerinden biri düşük sıcaklık performansıdır. Li-Ion piller -20°C - 60°C aralığında çalışabilir olsalar da en verimli 15°C - 35°C aralığında çalışmaktadırlar [11]. Bu nedenle, Li-Ion batarya paketi ve içerisindeki hücreler, çeşitli sistemler ile soğutulmalı, ayrıca dış etkenlerden de korunmalıdırlar. Buna ek olarak, enerji kapasitesini artırabilmek için de küçük hacim ve enerji kapasiteli hücreler, seri ve paralel bağlantılar ile yüksek enerji kapasiteli batarya paketlerine dönüştürülmektedirler. Örneğin Tesla Model S batarya paketinde, 74 hücre paralel bağlanarak yüksek gerilime sahip bir modül oluştururlar ve 6 modül seri bağlantı ile enerji kapasitesi artırılır. Tüm bu sistemler bir batarya paketini oluştururlar. Örnek olarak Tesla S Model batarya paketi Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.4 : Li-Ion pillerin avantajları ve dezavantajları [9].

Avantajlar	Dezavantajlar
Yüksek enerji yoğunluğu	Yüksek maliyet
Uzun ömür	Sıcaklık hassasiyeti
Düşük hafıza etkisi	Güvenlik riskleri
Hızlı şarj	Düşük sıcaklık performansı
Çevre dostu	Gerçek kapasite azalması



Şekil 2.2 : Tesla Model S batarya paketi [10].

2.1.2.3 Li-ion batarya paketleri

EV’lerde kullanılan Li-Ion batarya paketlerinin genel yapısı Şekil 2.3’de verilmiştir. Şekilde verilen kısımlardan kapak, taşıyıcı barlar ve taşıyıcı muhafaza, batarya kasasını oluştururlar. Çeşitli EV’lere ait batarya paketi bilgileri Çizelge 2.5’te verilmiştir. Bu çizelgede, ilgili aracın, batarya paketi, boş ağırlığı ve batarya kasası ağırlığı sıralanmıştır. Batarya kasası ağırlığı için %15’lik bir varsayım yapılmıştır. Listedeki görüleceği üzere, modern araçlar da dahil olmak üzere, standart kabul edilen 400 km menzile sahip herhangi bir EV’de batarya kasası ağırlığı yaklaşık 80 kg

olabilmektedir. Bataryanın spesifik enerjisini artırmak için, mevcut kullanılan alüminyum, çelik vb. malzemeler yerine, daha hafif, ancak batarya gerekliliklerini sağlayan malzemeler geliştirmek, hem EV’lerde menzil ve kapasite artışlarına olanak tanıyacak hem de ekonomik olarak daha uygun bataryalar üretilmesinin önünü açacaktır. Bu şartları sağlayabilecek en önemli malzemeler, polimer kompozitlerdir.

2.2 Elektrikli Araçlarda Polimer Kompozitler İçin Kullanılan Polimerler

2.2.1 Polipropilen

Polipropilen (PP), propilen monomerlerinin birbirine bağlanarak uzun zincirli polimerler oluşturmasıyla elde edilen bir termoplastik malzemedir. Propilen monomerlerinden PP sentezlemek için çeşitli yöntemler kullanılsa da, en yaygın süreç kristalleşebilir PP zincirlerinin üretilmesini sağlayan özel katalizörlerin kullanıldığı yöntemidir. Bu süreç, üstün fiziksel, mekanik ve termal özelliklere sahip olan “izotaktik” yarı kristal PP üretimiyle sonuçlanır. Yarı-kristal PP üretimi sırasında, daha düşük miktarlarda üretilen ve mekanik ile termal performansı oldukça düşük olan “ataktik” PP ise genellikle yapıştırıcılar ve sızdırmazlık ürünleri gibi yumuşak ve yapışkan uygulamalarda tercih edilir. PP polimerinin yapısal gösterrimi Şekil 2.4’de verilmiştir.

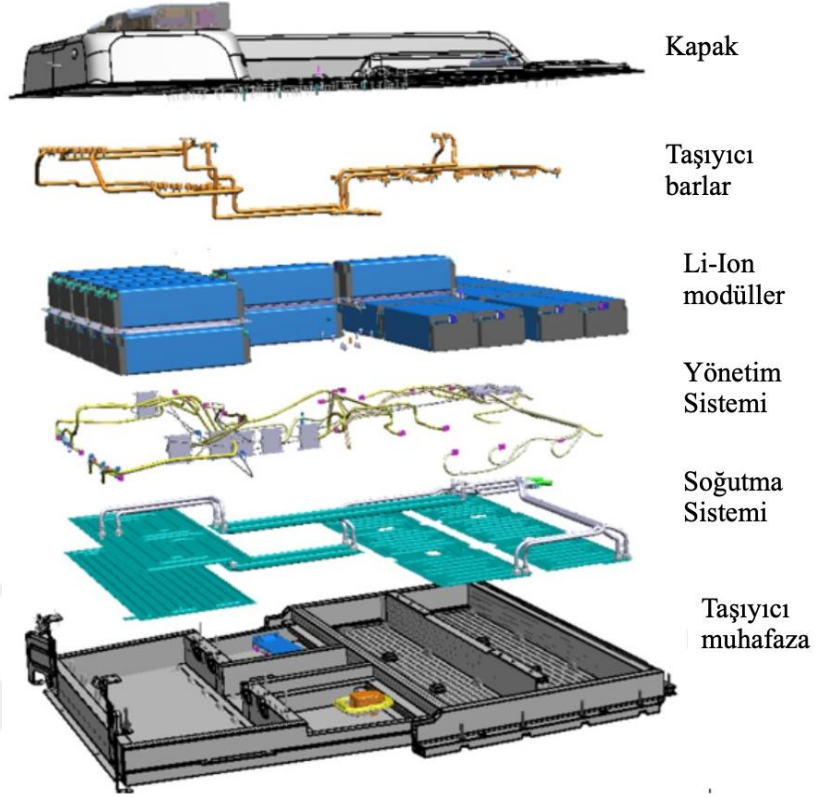
Çizelge 2.5 : Li-Ion pil kullanılan araçlarda batarya paketi ağırlıkları [9].

	Kapasite (kWh)	Menzil (km)	Batarya paketi (kg)	Boş araç (kg)	Batarya Kasası (kg)
Audi E tron 55	95	355	681	2490	102,2
Hyundai Kona	64	400	450	1685	67,5
Jaguar I-Pace	90	370	603	2133	90,5
Volkswagen e-Golf	36	190	344	1540	51,6
Nissan Leaf SV	30	172	290	1507	42,0
Chevrolet Bolt EV	60	238	427	1624	67,5
Tesla Model 3 Standart	75	402-518	460	1741	72,0
BMW i3	42	245	275	1486	30,0

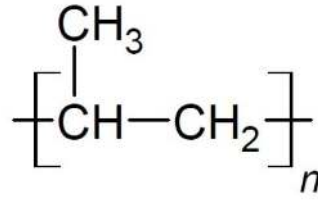
PP, α , β ve γ olmak üzere üç temel kristal formuna sahip polimorfik özellikler gösteren bir malzemedir. Ticari PP genellikle standart termal koşullarda α -kristal formunda kristalleşir. Ancak, β -kristal formu gibi darbe dayanımı ve diğer mekanik özelliklerde

üstünlük sağlayan yapılar, çekirdekletirici ajanlarla elde edilebilir. Yarı kristal yapıda olan PP, kristal ve amorf fazlardan oluşur ve bu fazların oranı polimer zincirinin yapısal özelliklerine ve kullanılan enjeksiyon, ekstrüzyon gibi işleme yöntemlerine bağlıdır. PP, düşük yoğunluk, yüksek sertlik, yüksek erime noktası ve güçlü darbe dayanımı gibi avantajlarıyla dikkat çeker. Bu özellikler, polimer zincirine etilen gibi ko-monomerlerin veya çeşitli katkı maddelerinin eklenmesiyle ya da zincir düzeninin ve uzunluğunun değiştirilmesiyle özelleştirilebilir [13, 14].

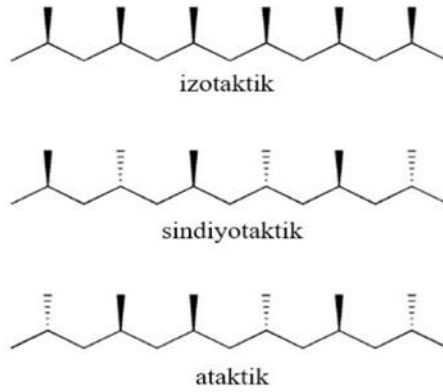
Polipropilen, ana zincirdeki metil gruplarının düzenine göre izotaktik, sindiyotaktik veya ataktik yapıda bulunabilir. İzotaktik PP, metil gruplarının zincir boyunca aynı yönde sıralandığı bir yapıya sahiptir ve bu düzen, malzemeye yüksek kristalinite, üstün mekanik dayanım ve termal stabilite kazandırır. Sindiyotaktik polipropilende metil grupları, zincir boyunca düzenli olarak karşılıklı konumlanır ve bu yapı, esneklik ve kimyasal direnç açısından avantaj sağlar. Ataktik PP’de ise metil grupları düzensiz bir şekilde yerleşmiştir, bu nedenle amorf yapıda olup yapışkan, yumuşak ve düşük mekanik özelliklere sahip bir malzeme olarak öne çıkar. İzotaktik, sindiyotaktik ve ataktik PP’nin şematik gösterimi Şekil 2.5’te verilmiştir [15]. Yarı-kristal katı formda bulunan ve büyük ölçüde izotaktik yapıya sahip polipropilen, yalnızca propilen monomeri içerdiği için homopolimer PP (HPP) olarak bilinir. Ancak, PP zincirlerinde %1 ile %8 arasında etilen gibi bir ko-monomer bulunması durumunda, bu polimer rastgele kopolimer (random copolymer - RCP) olarak adlandırılır. Eğer HPP, %45-65 etilen içeren bir karışık RCP fazı içeriyorsa, bu tür polipropilen darbe dayanımlı kopolimer (impact copolymer - ICP) olarak sınıflandırılır. Bu yapılar arasında izotaktik HPP genelde ticari olarak en yaygın kullanılan PP türüdür [16,17].



Şekil 2.3 : Tesla Model S batarya paketi [10].



Şekil 2.4 : Polipropilenin yapısal gösterimi [13].

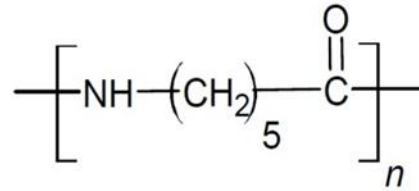


Şekil 2.5 : İzotaktik, sindiyotaktik ve ataktik PP yapıları [15].

2.2.2 Poliamid 6

Poliamid 6 (PA6), yaygın olarak Naylon 6 olarak bilinen, kaprolaktam, diammin, dikarboksilik asit gibi monomerlerin polimerizasyonu ile elde edilen bir termoplastik polimerdir. Polimerizasyon süreci, lakton halkasının açılması ve ardından yoğunlaşma reaksiyonları ile uzun zincirlerin oluşması ile gerçekleşir. PA6, yüksek mekanik dayanım, yüksek aşınma direnci ve termal stabilite gibi özellikleri nedeni ile geniş çapta kullanılan bir polimerdir. Polimerizasyon, farklı yöntemlerle gerçekleştirilebilse de, en yaygın olanı, kontrol edilen moleküler ağırlık ve istenilen polimer özelliklerini sağlamak için metal katalizörlerin kullanıldığı anyonik polimerizasyondur. PA6, kristal ve amorf fazların birlikte bulunduğu yarı kristalin bir yapıya sahiptir ve bu özelliği, çeşitli uygulamalar için genel performansını belirler. PA6, üstün mekanik özellikleri, yüksek erime noktası, kimyasal direnç ve belirli koşullar altında mekanik özelliklerini artırabilen nem emilimi ile ideal bir polimerdir. Ancak, nem emilimi, boyutsal stabilite ve elektriksel özellikleri etkileyebileceğinden işleme ve uygulama aşamalarında dikkate alınması gereken bir faktördür [18,19]. PA6'nın kristalin yapısı, yüksek dayanıklılık ve sertlik sağlarken, amorf bölgeler dayanıklılık ve darbe direnci sunar.

PA6, özelliklerini artırmak amacıyla cam elyafları veya katkı maddeleri gibi diğer malzemelerle karıştırılarak kompozit polimer haline dönüştürülebilir. Cam elyafları ile birleştiğinde, PA 6 daha sert hale gelir ve daha iyi boyutsal stabilite sağlar, bu da onu daha zorlu mühendislik uygulamaları için uygun hale getirir. Ayrıca, PA 6, diğer monomerlerle, örneğin adipik asit ile kopolimerize edilerek özelleştirilmiş özelliklere sahip kopolimerler oluşturulabilir [18].



Şekil 2.6 : Poliamid 6'nın yapısal gösterimi [19].

PA6'nın yapısal gösterimi Şekil 2.6'da verilmiştir. PA6, enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve üfleme kalıplama gibi çeşitli işleme teknikleri kullanılarak işlenebilir ve bu işleme yöntemi, nihai ürünün özelliklerini etkiler. Polimerin yüksek kristalinliği, genellikle yavaş soğutma ile elde edilirken, hızlı soğutma daha fazla amorf bölge

oluşmasına neden olabilir. PA 6'nın başlıca avantajları arasında yüksek gerilme dayanımı, darbe direnci, düşük sürtünme özellikleri ve aşınma direnci bulunur, bu da onu zorlu çevre koşullarındaki uygulamalar için uygun hale getirir. Özelliklerini katkı maddeleri ve karıştırma yoluyla değiştirme yeteneği ile birlikte gösterdiği çok yönlülük, onu çeşitli endüstrilerde yaygın bir şekilde kullanılan bir malzeme haline getirir [20].

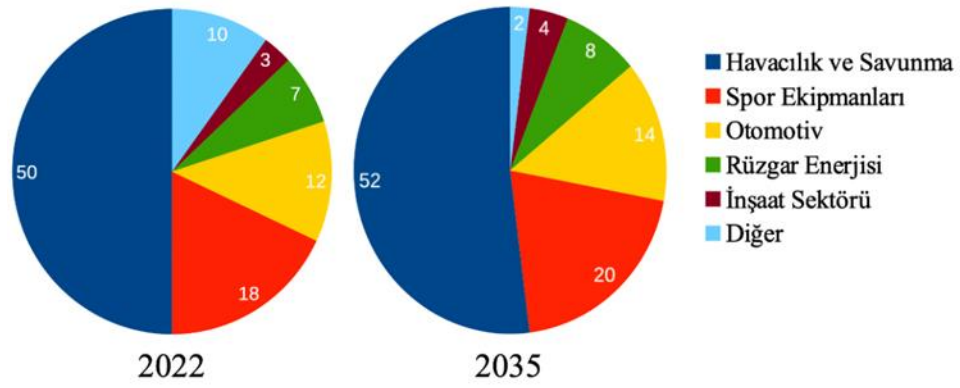
2.3 Elektrikli Araçlarda Polimer Kompozitler için Kullanılan Katkılar

2.3.1 Karbon fiber

Karbon fiber, son derece güçlü, hafif ve dayanıklı bir mühendislik malzemesidir. Çelikten beş kat daha güçlü ve iki kat daha sert olmasına rağmen, aynı zamanda çok daha hafiftir. Bu özellikler nedeni ile, mühendislik uygulamalarında özellikle tercih edilir. Karbon fiberin polimer matrislerine takviye edici bir dolgu maddesi olarak kullanılması, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini artırarak daha hafif, dayanıklı ve ısıya karşı dirençli yapılar elde edilmesini sağlar. Ayrıca, karbon fiberin yüksek mukavemet ve hafiflik oranı ile dayanıklılığı, özellikle güçlü ve hafif yapısal bileşenler gerektiren uygulamalarda kullanılmasını sağlar [21].

Karbon fiber üretimi, kimyasal ve mekanik işlemlerle gerçekleşir. İlk olarak, yüksek kaliteli polimerler veya doğal organik malzemeler, çok yüksek sıcaklıklara ısıtılarak uzun lifler haline getirilir. Ardından karbonlaşma süreci ile, liflerin içindeki atomlar şiddetli bir şekilde titreştirilir ve karbon olmayan atomların dışarı atılması sağlanır. Sonuçta, sıkıca kilitlenmiş karbon atomları zincirlerinden oluşan bir lif yapısı meydana gelir [22].

Karbon fiberin üretiminde iki ana tür bulunur: pan bazlı karbon fiber ve pitch bazlı karbon fiber. Pan bazlı karbon fiberler, daha düzgün lif yapısına ve yüksek dayanıklılığa sahip olup, genellikle yüksek performanslı kompozitlerde tercih edilir. Pitch bazlı karbon fiberler ise daha kalın ve büyük liflere sahip olup, yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılır. Pitch bazlı karbon fiberler, yüksek modül ve termal iletkenlik sağlar, ancak gerilme dayanımı ve basınç dayanımı açısından pan bazlı karbon lifleriyle karşılaştırıldığında daha düşük performans gösterir [23].



Şekil 2.7 : Karbon fiber kullanım alanlarının sektörlere dağılımı (%) [24].

Karbon fiberin avantajları arasında yüksek mukavemet, düşük ağırlık, yüksek sıcaklık dayanımı, kimyasal dayanıklılık, uzun ömür ve düşük bakım ihtiyacı yer alır. Ayrıca, termal iletkenlik avantajı sayesinde elektronik uygulamalarda da kullanılır. Polimer matrislerinde takviye olarak kullanıldığında ise, kompozitlerin mekanik özelliklerini artırarak daha hafif, dayanıklı ve ısıya karşı dirençli malzemeler elde edilmesini sağlar. Bu nedenler ile, karbon fiber, mühendislik ve endüstri alanlarında vazgeçilmez bir malzeme haline gelmiştir. Hafiflik, mukavemet ve dayanıklılık gibi avantajları ile yüksek performanslı ürünlerin üretiminde sıklıkla tercih edilmekte olsa da, yüksek maliyetler nedeni ile üretim verimliliğinin artırılmasına ihtiyaç bulunmaktadır. Endüstriyel karbon fiber kullanımı, 2022 yılında 160000 ton olarak gerçekleşmiştir ve 2035 yılında bu miktarın 415000 tona yükselmesi beklenmektedir. Bu miktarların endüstrilere göre kullanımı Şekil 2.7’de verilmiştir [24].

2.3.2 Cam fiber

Cam fiber, yüksek dayanıklılık ve hafiflik özellikleriyle bilinen bir kompozit malzeme takviye elemanıdır. Çelikten daha hafif olmasına rağmen benzer dayanıklılık sunar ve bu nedenle inşaat, otomotiv, havacılık ve denizcilik gibi birçok sektörde tercih edilir. Cam fiber, polimer matrisleriyle birleşerek kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini artırır, yapısal bileşenlere dayanıklılık, esneklik ve hafiflik kazandırır [25,26].

Cam fiber üretimi, silika (SiO_2) gibi hammaddelerin yüksek sıcaklıklarda eritilmesiyle başlar. Eritilen cam, ince lifler haline getirilir ve ardından çeşitli kimyasal bileşenlerle harmanlanarak istenilen özelliklere göre bir fiber elde edilir. İlk olarak, cam fiberin özelliklerini iyileştirmek için silika, alüminyum oksit (Al_2O_3), kalsiyum oksit (CaO) ve magnezyum oksit (MgO) gibi bileşenler belirli oranlarda karıştırılır. Daha sonra,

harmandan elde edilen karışım, yaklaşık 1400°C sıcaklıkta eritilir, bu işlem camın homojen bir eriyik haline gelmesini sağlar. Eritilen cam, ince, mikron çapında lifler haline getirilir ve istenilen uzunlukta kesilir. Lifler, kimyasal direnç ve işlenebilirliklerini artırmak için özel kaplamalarla işlenir. Bu kaplamalar, fiberlerin polimer matrislerle uyumlu hale gelmesini de sağlar [26].

Cam fiber, yüksek çekme dayanımı, düşük ağırlık, iyi elektriksel yalıtım, kimyasal direnç ve nem direnci gibi avantajlara sahiptir. Bu özellikleri sayesinde, cam fiber, kompozit malzemelerin ısıya, neme ve kimyasal maddelere karşı dayanıklılığını artırarak, bu malzemelerin daha uzun ömürlü ve güvenilir olmasını sağlar. Elektriksel yalıtım özellikleri nedeniyle, cam fiber, elektronik endüstrisinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Cam fiber, genellikle polyester veya epoksi benzeri polimerlerle birleştirilerek, dayanıklı ve hafif kompozit malzemeler oluşturulmasında tercih edilir.

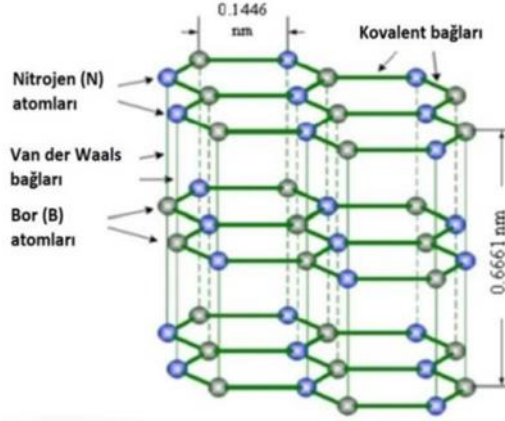
Cam fiber, karbon fibere kıyasla daha düşük mukavemet ve rijitlik değerlerine sahip olmasına rağmen, düşük maliyeti ve yaygın bulunabilirliği sayesinde, özellikle daha düşük maliyetli çözümler gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Cam fiber endüstriyel kullanımı, 2022 yılında 500.000 ton civarında gerçekleşmiştir ve 2030 yılına kadar bu miktarın 800.000 tona çıkması beklenmektedir [27].

2.3.3 Bor nitrür

Bor nitrür (BN), bor ve nitrojenin birleşmesiyle oluşan sentetik kristal bir bileşiktir. Endüstriyel bir seramik çeşidi olarak, özellikle elektriksel yalıtkanlar ve kesici aletlerde sınırlı ancak önemli uygulama alanlarına sahiptir [28]. Bor nitrürün, temel olarak, hegzagonal bor nitrür (hBN) ve kübik bor nitrür (cBN) diye adlandırılan kristal yapıları vardır. Bu iki yapı, bor nitrürün fiziksel özelliklerini ve kullanım alanlarını büyük ölçüde etkiler.

hBN, borik oksit (B_2O_3) ile amonyak (NH_3) gazının ısıtılmasıyla üretilir. Moleküler düzeyde, hBN altıgen halkalardan oluşan katmanlı bir yapıya sahiptir. Bu yapı, karbon minerali olan grafitte benzer özellikler gösterir. Ancak, grafitten farklı olarak hBN, elektriksel iletkenliği düşük, termal iletkenliği ise yüksek olan bir malzemedir. Bu özellikleri, onu özellikle yüksek sıcaklık uygulamaları ve elektriksel yalıtım gereksinimleri için ideal bir malzeme haline getirir. hBN'nin yapısı, birbirine zayıf van der Waals bağları ile bağlı olan altıgen halkaların düzenlenmesinden meydana gelir. Bu katmanlar arasında kolayca kayma hareketi olabilir, bu da hBN'nin kayganlık

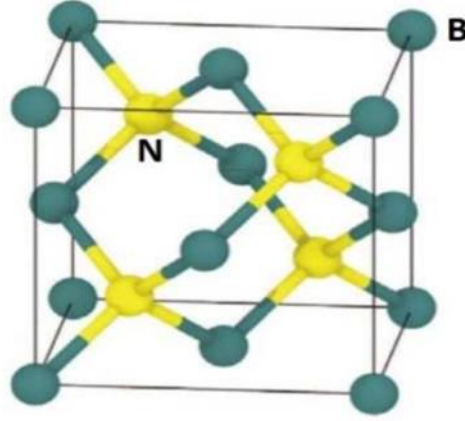
özelliğini açıklar. Bu katmanlı yapı, düşük sürtünme katsayısı ve yüksek sıcaklık dayanıklılığı sağlamasına olanak tanır. hBN'ün kristal yapısı Şekil 2.8'de verilmiştir [29,30].



Şekil 2.8 : hBN'ün kristal yapısı [30].

Kübik bor nitrür (cBN), genellikle hBN'in aşırı yüksek basınca (6 ile 9 gigapaskal) ve sıcaklığa (1500 °C ile 2000 °C) maruz bırakılarak elde edilir. Bu işlem, hBN'nin küçük kristal formda cBN'ye dönüşmesini sağlar. cBN'nin yapısı, elmasın kristal yapısına benzer şekilde düzenlendiği gözlemlenmiştir. Bu benzerlik, cBN'nin sertliğini açıklar. Mohs sertlik ölçeğinde, cBN pırlantadan sonra ikinci sıradadır ve maksimum sertlik değeri 10'a yaklaşır. Bu özelliği, cBN'yi sentetik elmas gibi, sert çeliklerin işlenmesinde tercih edilen bir malzeme yapar. cBN, aynı zamanda çok yüksek oksidasyon sıcaklıklarına da dayanabilir. 1900 °C'nin üzerinde oksitlenme eğiliminde olan cBN, 800 °C'nin üzerinde oksitlenen elmastan çok daha yüksek bir çalışma sıcaklığına sahiptir. Bu özellik, onu özellikle yüksek sıcaklık ve aşındırıcı koşullarda çalışan metal işleme ve kesme aletlerinde tercih edilen bir malzeme yapmıştır. cBN'ün kristal yapısı Şekil 2.9'da verilmiştir [31].

hBN, aynı zamanda kompozit malzemelerde, özellikle polimer dolgusu olarak da kullanılır. Polimerlere eklenen hBN, bu malzemelerin ısı iletkenliklerini artırarak, daha dayanıklı ve termal olarak kararlı hale gelmelerini sağlar. Ayrıca, hBN'nin kayganlık özellikleri, polimer kompozitlerinin sürtünme katsayısını düşürür ve aşınma direncini artırır. Bu nedenle, hBN, elektronik, otomotiv ve havacılık endüstrilerinde, ısıya dayanıklı polimer kompozitlerinin geliştirilmesinde önemli bir bileşen olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.9 : cBN'nin kristal yapısı [30].

Bor nitrür (BN), özellikle hBN ve cBN formları, sahip olduğu benzersiz fiziksel özellikler ve çok yönlülüğü sayesinde sanayi uygulamalarında geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. hBN, düşük elektriksel iletkenlik ve yüksek termal iletkenlik gibi özellikler ile dikkat çekerken, cBN, yüksek sertlik ve oksidasyon sıcaklıkları ile ön plana çıkar.

2.3.4 Silisyum karbür

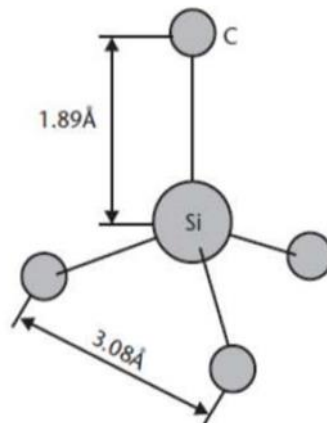
Silisyum karbür (SiC), yüksek sertlik, mükemmel termal iletkenlik, kimyasal inertlik ve aşınma direnci gibi olağanüstü özelliklere sahip bir malzemedir. Bu özellikler, SiC'nin mühendislik, malzeme bilimi ve endüstriyel uygulamalarda önemli bir yer edinmesine neden olmuştur. SiC, 1891 yılında Edward Acheson tarafından ilk kez yüksek elektrik akımı uygulanarak, petrol koku ve kil karışımını yüksek sıcaklıkta reaksiyona sokulması ile sentezlenmiştir. İlk başta, elde ettiği bileşiği karbon-alüminyum oksit (korindon) karışımı olarak tanımlayarak "carborundum" adıyla ticarileştirmiş olsa da, ürettiği bileşiğin aslında silisyum karbür olduğunu fark ederek aşındırıcı olarak ticari alanda kullanmaya başlamıştır [34,35].

Silisyum karbür, özellikle aşınmaya karşı yüksek direnci, yüksek ısı iletkenliği ve mekanik özellikleri sayesinde endüstride geniş alanlarda kullanılmıştır. Otomotiv endüstrisinde ise, motor parçaları, fren diskleri, süspansiyon sistemleri ve çeşitli aşınmaya karşı dayanıklı bileşenlerde kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv fren sistemlerinde, SiC'nin kullanımı, daha düşük sıcaklık artışı ve yüksek termal dayanıklılık sağlayarak fren performansını artırmaktadır. SiC'nin yüksek sertlik ve aşınma direnci, fren disklerinin daha uzun süre dayanmasını sağlar ve aracın genel performansını iyileştirir. Ayrıca, SiC'nin kullanıldığı motor bileşenleri, yüksek

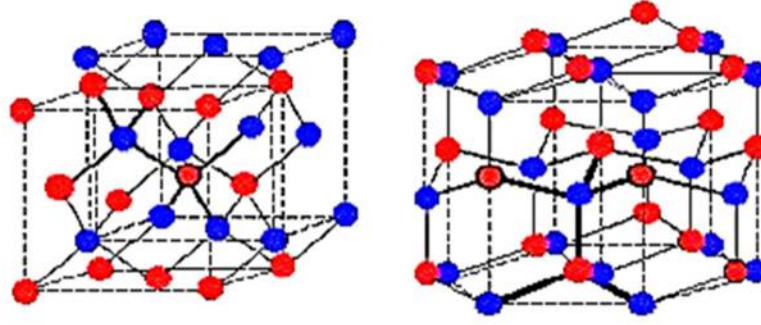
sıcaklık ve basınca dayanıklı olup, motor verimliliğini artırarak güvenliği ve performansı iyileştirir [36].

Ek olarak, SiC'nin, polimer matrisli kompozitlerde de kullanımı, otomotiv sektöründe önemli bir yer tutmaktadır. Bu malzeme, kompozitlerin mekanik dayanımını artırırken, aynı zamanda ağırlıklarını artırmadan dayanıklılık sağlar. SiC'nin bu özelliği, özellikle yakıt verimliliği gereksinimlerinin yüksek olduğu elektrikli ve hibrit araçlar için önemlidir. SiC, sadece araç bileşenlerinde değil, aynı zamanda otomotiv elektroniği alanında da büyük bir potansiyele sahiptir. Elektrikli araçlar ve hibrit araçlarda, SiC çipleri, güç elektroniği uygulamalarında kullanılmaktadır. SiC yarı iletkenleri, daha yüksek verimlilik ve daha düşük enerji kaybı sağlayarak, batarya şarjı ve enerji yönetimini optimize etmeye yardımcı olmaktadır. Ayrıca, SiC çipleri yüksek sıcaklıklara dayanıklı olduğundan, daha küçük ve daha hafif elektronik bileşenlerin üretimine olanak tanır, bu da elektrikli araçların daha verimli olmasına katkı sağlar [37].

Silisyum karbür, silisyum ve karbon atomlarının güçlü kovalent bağlarla birleştiği bir yarı iletkenidir. Kristal yapısında, her silisyum atomu merkezde yer alırken, dört karbon atomu etrafında bağlanarak bir tetrahedron oluşturur. Bu yapıda, iki tip tetrahedron bulunur: Birincisi, c-ekseni boyunca 180° döndürülen bir tetrahedron olup, aynada yansıyan versiyonu ise ikincisidir. Silisyum karbürün kristal yapısında, silisyum ve karbon atomları arasındaki mesafe $1.89 \text{ \AA}$, karbon atomları arasındaki mesafe ise $3.08 \text{ \AA}$ 'dir. SiC'nin karakteristik tetrahedron yapısı Şekil 2.10'da verilmiştir [38].



Şekil 2.10 : Silisyum karbür kristalinin tetrahedron yapısı [38].



Şekil 2.11 : Silisyum karbürün β -SiC ve α -SiC yapıları [39].

Silisyum karbür, farklı kristal yapılarıya sahip bir malzemedir ve tüm bu yapılar, her bir atomun dört heteroatomla tetrahedral şekilde bağlanmasıyla karakterize edilir. Bu yapılar, atom katmanlarının farklı şekillerde paketlenmesiyle oluşan politipler olarak kabul edilebilir. Yapılan araştırmalar sonucunda, bu politipler, birim hücredeki tabakaların sayısını ve kristal sistemini belirten harfler kullanılarak sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırma, kristalin kübik (C), hegzagonal (H) veya rombohedral (R) sistemlere ait olduğunu belirtir. Silisyum karbürün temel olarak iki ana kristal yapısı vardır: Birincisi, β -SiC olarak bilinen kübik yapı, diğeri ise α -SiC olarak adlandırılan hegzagonal ve rombohedral yapılarıya sahip kristal yapılarıdır, ve gösterimleri Şekil 2.11’de verilmiştir [39].

2.4 Elektrikli Araç Polimer Kompozitlerinde Kullanılan Uyumlaştırıcı Ajanlar

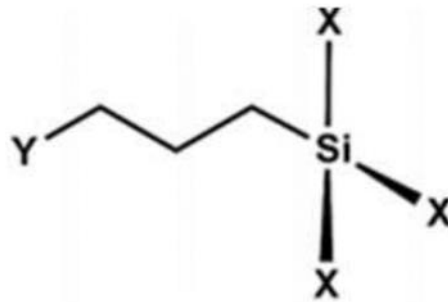
2.4.1 Silan bağlayıcı ajanlar

Silanlar, silikon atomlarının organik veya inorganik gruplara bağlandığı kimyasal bileşiklerdir. Genel olarak, bir silan, bir silikon atomunun alkil veya fonksiyonel gruplarla bağlandığı bileşiklerdir. Bu bileşikler, özellikle organik polimerlerin inorganik malzemelerle bağlanmasında önemli bir rol oynar. Silanlar, özellikle suya ve kimyasallara karşı dayanıklılığı artıran ve malzeme yüzeylerinde güçlü bağlar oluşturan özellikleriyle öne çıkar. Silanlar, genellikle hidroliz ve kondensasyon reaksiyonlarıyla üretilir. Bu süreçte, silikon tetraklorür (SiCl_4) gibi bileşikler, su veya alkollerle reaksiyona girerek alkoksi gruplarının eklenmesini sağlar ve silan bileşiği oluşur [40-42].

Silan bağlayıcı ajanlar, $\text{Y}-(\text{CH}_2)_n\text{-Si-X}_3$ formülüne sahip olup, X grubu hidroliz olabilen alkoksi, halojen veya amin gibi bir grup içerir. Y grubu ise organo-fonksiyonel bir grup olup, polimer ile uyumluluğun sağlanmasında önemli bir rol

oyunar. Organosilanların şematik gösterimleri Şekil 2.12’de verilmiştir [42]. Bu ajanlar, katkı maddelerinin yüzeylerindeki hidroksil gruplarıyla reaksiyona girerek sağlam ve kararlı bağlar oluşturur. Bu yüzeyler arasında genellikle zayıf bağlar bulunur, ancak silanlar, moleküler köprüler oluşturarak kararlı ve dayanıklı bağlar kurar. Bu bağlar, suya ve kimyasal maddelere karşı dirençli olup, malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirir. Silanların etkinliği, yüzeydeki hidroksil gruplarıyla reaksiyona girerek organik ve inorganik fazlar arasında güçlü kovalent bağlar oluşturmaktan kaynaklanır. Bu bağlar, malzemenin dayanıklılığını, elastikiyetini ve uzun ömürlülüğünü artırırken, su ve gaz geçişini engeller.

Silanlar ayrıca, kompozit malzeme yüzeylerinin daha homojen bir şekilde kaplanmasını sağlar ve işlem sonrası tutunma gücünü artırır. Silan bağlayıcıları, özellikle otomotiv, inşaat, elektronik ve uzay sanayileri gibi yüksek performans gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılır. Otomotiv sektöründe, silanlar metal ve plastik yüzeylerin birbirine bağlanmasında, kaplama sistemlerinde ve kompozit parçaların dayanıklılığının artırılmasında önemli bir rol oynar. Silanlar, araçların hafifliğini, dayanıklılığını ve çevresel etkilere karşı dirençlerini artırarak, paslanma ve boya kalitesini iyileştirir. Ayrıca, çok amaçlı yapıştırıcılar da sıklıkla silan bazlıdır. Bu yapıştırıcılar, özellikle metal, plastik ve cam gibi malzemelerin bağlanmasında kullanılır ve yüksek tutunma gücü ile çevresel faktörlere karşı dayanıklıdır [41].



Şekil 2.12 : Organosilanların genel yapısı [42].

2.4.2 Titanat bağlayıcı ajanlar

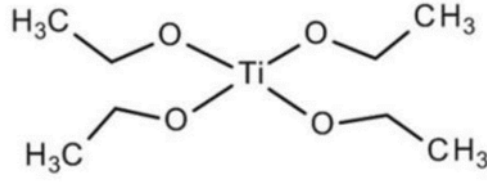
Titanatlar, titanyum atomunun organik veya inorganik gruplarla birleşiminden oluşan ve yüzey modifikasyonu ile polimer kompozitlerin performansını artırmak için kullanılan bileşiklerdir. Bu ajanlar, polimerler ile inorganik katkı maddeleri arasında moleküler köprüler oluşturarak kimyasal bağlanmayı güçlendirir ve malzeme özelliklerini iyileştirir. Yüksek sıcaklık dayanımı ve kimyasal kararlılıkları sayesinde,

titanatlar silanlara alternatif olarak birçok endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Titanatlar, genellikle titanyum izopropoksit veya benzeri organometalik bileşiklerin uygun organik ya da inorganik gruplarla reaksiyonu sonucu elde edilir. Üretim sırasında alkoksi gruplar, titanyum atomuna bağlanarak, hem organik hem de inorganik yüzeylerle reaksiyon yeteneği kazanmasını sağlar. Bu süreç, titanatların kimyasal bağlanma ve yüzey uyumu özelliklerini optimize etmek için dikkatle tasarlanmalıdır [43].

Titanatlar, genellikle $XO-Ti/(OY)_3$ formülüyle tanımlanır. Burada XO, alkoksi grubu olarak inorganik yüzeyle reaksiyona girerken, OY kısmı polimerle uyumu sağlayan organik fonksiyonel gruplardır ve polimer türüne göre seçilmelidirler. Örneğin, termoplastiklerde benzil veya bütül grupları, termosetlerde amino veya metakril grupları ve bağlayıcı gruplar olarak pirofosfat veya karboksil grupları kullanılabilir. Titanatlar, polimerlerin uyumsuzluklarını gidermek, inorganik katkı maddeleriyle kimyasal bağlanmayı güçlendirmek ve kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için kullanılır. Ayrıca, homojen madde dağılımını ve neme karşı dayanıklılığı artırır. Yeni nesil titanat bağlayıcıları, işlem sırasında ön işleme gerek duymaz, diğer katkı maddeleriyle kolayca karışabilir ve eski titanatlara göre daha uygun maliyetlidir [44].

Polimer kompozitlerin üretiminde sıklıkla alkoksit titanatlar tercih edilir. Farklı titanat türleri, kompozitlerin özelliklerine göre seçilir. Yeni nesil neolkoksi titanatlar, monoalkoksi titanatlardan yalnızca substratla reaksiyona giren kısmında farklılık gösterir. Bu farklılık, titanatların kompozitlerde daha verimli bir bağlanma ve güçlendirme sağlamasını mümkün kılar [45].

Silanlar özellikle cam, seramik veya silika gibi yüzeylerde kimyasal bağlanma amaçlı ürünlerde tercih edilir iken, titanatlar ise metal yüzeylerde, polimerlerde ve cam elyaflarda bağlanmayı artırmak için kullanılır. Bu tez çalışmasında, kimyasal formülü $(C_2H_5O)_4Ti$ olan titanat bağlayıcı ajanlarından tetraetil ortotitanat kullanılmıştır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 : Tetraetil ortotitanatın kimyasal formülü [42].

2.5 Polimer Kompozitlerin Özellikleri

2.5.1 Polimer kompozitlerin termal iletkenlik özellikleri

Termal özellikler, polimerik malzemelerin temel karakteristiklerinden biri olup, malzemenin mekanik davranışını, dayanıklılığını ve kullanım ömrünü önemli ölçüde etkiler. Metal ve seramik malzemelere kıyasla daha zayıf termal özelliklere sahip olan polimerik malzemelerin performansı, kararlı, rijit, aromatik veya heterosiklik halkalı yapılar içeren polimer zincirlerinin kullanılmasıyla artırılabilir. Ayrıca, inorganik nano dolguların polimer matrise eklenmesiyle malzemelerin ısıl dayanımı önemli ölçüde iyileştirilebilmektedir. Örneğin, silika, titanyum dioksit veya çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) gibi nano dolgular, polimer matrislerde termal stabiliteyi ve yanma geciktirici özellikleri artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır [46]. Polimer nanokompozitler, saf polimerlere göre daha yüksek sıcaklıkta bozunma gösterir veya bozunma hızında bir azalma sergiler. Bu durum, oldukça düşük seviyelerde nano dolgu kullanıldığında bile gözlemlenebilmektedir [47]. Nano dolguların polimerlerin ısıl özelliklerine sağladığı bir diğer önemli katkı ise yanma geciktirici özelliklerdir. Yüksek miktarlarda kullanılan geleneksel inorganik maddelerin yerine, düşük miktardaki bu maddelerin nano dolgularla sinerjik etkileşimi sonucu yanma gecikmesi sağlanabilmektedir [48]. İnorganik nano dolguların ısıl özelliklere etkisi, bariyer modeli ile açıklanmaktadır. Bu modele göre, ısı etkisiyle uçucu gazların ayrılması sonucu güçlü bir polimer-inorganik tabaka oluşmakta ve bu tabaka, ısıl özellikleri iyileştirmektedir [49]. Bu tabaka, yalnızca termal stabiliteyi artırmakla kalmaz, aynı zamanda oksijen ve ısı transferini sınırlayarak polimerin daha yüksek sıcaklıklarda dayanım göstermesini sağlar. Polimer yüzeyinde meydana gelen bu tabaka, kütle ve ısı transferine karşı bir bariyer görevi görerek bozunma ürünlerinin yüzeye ulaşmasını sınırlandırır [47].

Polimerik malzemelerin ısı özellikleri, dolgu türü ve miktarına bağlı olarak önemli değişiklikler gösterebilir. Örneğin, saf polimerlerin camsı geçiş sıcaklığı (T_g) genellikle 50-150°C arasında değişirken, karbon nanotüp gibi nano dolguların eklenmesiyle bu sıcaklık %10-50 oranında artırılabilir. Ayrıca, polimer nanokompozitlerde termal bozunma sıcaklığı (T_d) saf polimere kıyasla yaklaşık 20-100°C kadar yükselebilmektedir. Termal iletkenlik değerleri de nano dolgu türüne bağlı olarak değişir; silika ile zenginleştirilmiş kompozitlerde termal iletkenlik 0.1-0.5 W/mK seviyelerinden başlayarak karbon bazlı dolgularla 1-5 W/mK'ye kadar çıkabilir. Bu iyileştirmeler, polimerlerin daha zorlu termal koşullarda performans göstermesine olanak tanır [50].

Polimerik malzemelerin ısı iletkenlikleri, genellikle 0.1-0.5 W/mK gibi düşük seviyelerde olup, metaller ve seramiklerle karşılaştırıldığında oldukça azdır. Ancak, inorganik nano dolguların eklenmesi bu özelliği büyük ölçüde geliştirebilir. Örneğin, çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) veya grafen nanoplateleri kullanılarak termal iletkenlik 3-10 W/mK seviyelerine kadar çıkarılabilir. Bu artış, ısının polimer matrisi boyunca daha etkili bir şekilde dağılmasını sağlayarak kompozitin termal yönetimini iyileştirir. Silika veya alümina gibi seramik nano dolgular ise hem termal dayanımı artırır hem de termal iletkenlikte orta düzeyde iyileşme sağlar. Bu özellikler, özellikle elektronik cihazların ısı yönetiminde ve yüksek sıcaklık uygulamalarında polimer kompozitlerin kullanımını mümkün kılar [50].

2.5.2 Polimer kompozitlerin elektriksel iletkenlik özellikleri

Polimerik malzemelerin elektriksel özellikleri, özellikle elektronik, elektrikli cihazlar ve kompozit malzeme uygulamalarında önemli bir rol oynamaktadır. Saf polimerler genellikle düşük elektriksel iletkenlik değerlerine sahipken, bu özellik, nanoyapılı dolgular eklenerek önemli ölçüde değiştirilebilir [51].

Nano dolguları elektriksel özelliklerine bağlı olarak iki gruba ayırabiliriz: iletken ve yalıtkan nano dolgular. Elektriksel iletkenlik gösteren ve polimer matrisin elektriksel iletkenliğini artıran nano dolgulara karbon nanotüp, karbon siyahı, metaller ve metal bileşikleri örnek verilebilir [52-54]. Bu tür iletken dolguların, polimer nanokompozitlerin elektriksel özelliklerinde önemli iyileşmelere yol açtığı ve özellikle elektronik uygulamalarda kullanım potansiyeli sağladığı bilinmektedir.

Elektriksel iletkenliğin, kullanılan dolgu malzemesinin türüne, miktarına ve dağılımına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Özellikle, karbon nanotüpler, grafen, iletken polimerler ve metalik nanoparçacıklar, polimer matrislerde iletkenlik artışı sağlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nano dolgular, polimerin elektriksel iletkenliğini, miktarına bağlı olarak önemli ölçüde artırabilir ve bazı durumlarda, bu kompozitler, saf metallerin elektriksel iletkenliğine yaklaşabilir. Tabakalı silikat, silika (SiO_2), titanyum dioksit (TiO_2), alümina (Al_2O_3) gibi nano dolgular ise nanokompozitlerin dielektrik özelliklerinde iyileşmeler sağlayabilen dolgulardır [55-57]. Bu tür yalıtkan dolgular, elektriksel direnç özelliklerini artırarak, polimer kompozitlerin dielektrik dayanımını ve elektriksel izolasyon karakteristiklerini geliştirmektedir.

Polimer nanokompozitlerin elektriksel direnç özellikleri, nano dolguların oluşturduğu iletkenlik yolunun yapısına bağlıdır. Çoğu zaman, nano dolguların ağırlıklı miktarları polimerin elektriksel direnç değerini artırabilir, çünkü yeterli iletken ağ yapısı oluşmadığında, elektriksel iletkenlik sınırlı kalır. Ancak, uygun miktarda ve düzgün dağılmış dolgu ile, elektriksel iletkenlikte büyük bir artış sağlanabilir. Örneğin, karbon nanotüplerin polimer kompozitlerine eklenmesiyle elektriksel iletkenlik, 10^{-7} S/cm'den 10^{-2} S/cm seviyelerine kadar çıkabilir. Elektriksel iletkenlikteki bu iyileşmeler, özellikle antistatik özellikler, esnek elektronikler ve akıllı tekstil uygulamaları gibi birçok endüstriyel alanda kullanım potansiyeli sağlar. Ayrıca, polimer kompozitlerin elektriksel iletkenliğini artırmak, onların elektromanyetik girişim koruması sağlama yeteneklerini de iyileştirebilir. Bu nedenle, elektriksel iletkenliği yüksek polimer nanokompozitler, çok çeşitli modern teknolojik uygulamalarda faydalı olabilirler [51].

2.5.3 Polimer kompozitlerin mekanik özellikleri

Polimer kompozitlerin mekanik özellikleri, dolgu maddelerinin türü, boyutu ve oranına bağlı olarak önemli ölçüde iyileştirilebilir. Özellikle inorganik dolgu maddelerinin polimer matrisle % 1-10 ağırlık oranında harmanlanması, bu özelliklerin iyileştirilmesini sağlar. Mikro ya da nano boyutlu dolgu maddeleri için ise bu oran genellikle %20-50 arasında değişir [58]. Inorganik dolgu maddeleri, polimerlerden daha yüksek yoğunluğa sahip olduğundan, dolgu maddeli polimerlerin yoğunlukları genelde saf polimerlerden daha yüksektir.

Polimerlerin metal ve seramik gibi diğer malzemelere göre öne çıkan avantajlarından biri olan düşük yoğunluk, hafiflik özellikleri, dolgu maddesi kullanımı ile zayıflayacağından, mümkün olan en düşük dolgu maddesi miktarının kullanılması, hafiflik gerektiren uygulamalarda tercih edilir [59]. Ayrıca, genellikle rijit yapıya sahip olan dolgu maddelerinin fazla miktarda kullanılması, elde edilen polimer kompozitin sertliğini artırırken, aynı zamanda kırılabilirlik, esneklik kaybı ve işlenebilirlik zorluklarına yol açar [60]. Polimer kompozitlerde ise bu dezavantajların etkisi minimum seviyeye iner ve bazı durumlarda iyileşmeler gözlemlenebilir.

Dayanım ve tokluk, polimer kompozitlerin en önemli mekanik özelliklerindendir. Elyaf ve tabaka şeklindeki nanopartiküller, yüksek boy/en oranları sayesinde polimer matrisinin dayanım ve modül değerlerinde önemli iyileşmeler sağlayabilirler. Ancak, yüksek boy/en oranına sahip bu partiküllerle hazırlanan kompozitlerin tokluğu genellikle artmaz ve bazı durumlarda düşüş gösterebilir [61]. Tanecik yapısındaki partiküllerde durum farklıdır. Boy/en oranı bir olan, büyük yüzey alanına ve yüksek yüzey enerjisine sahip küresel partiküller, polimer matris ile dolgu maddesi arasında güçlü ara yüzey etkileşimi oluşturarak, sadece dayanım ve elastiklik modülü değil, aynı zamanda tokluğun da iyileşmesini sağlarlar [62,63].

Polimer kompozitlerin mekanik özellikleri, bileşenlerin hacim oranlarına ve kendi mekanik özelliklerine de bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Ancak kompozitlerde, sabit hacim fraksiyonunda dolgu maddesinin boyutunun küçülmesi, polimer dolgu ara yüzeyinin çok fazla büyümesine ve partikül çapının azalmasıyla komşu partiküller arasındaki mesafenin kısılmasına neden olur. Bu da partiküller arasında bir ağ yapısının oluşmasına ve dolgu maddesi hacim oranının yanı sıra polimer matrisin mekanik özelliklerinin gelişmesine yol açar [64]. Partikül boyutu, yüzey özellikleri ve dağılımının yanı sıra, kompozitin hazırlanma yöntemi de mekanik özellikler üzerinde etkili olan önemli parametrelerdendir. Eş-anlı polimerizasyon yöntemi ile hazırlanan poli(dimetil siloksan)-silika kompozitinin dayanımının, nano dolgunun bu yöntemle daha iyi dağılması sayesinde diğer yöntemlerle hazırlanan kompozitlere göre daha yüksek olduğu bildirilmiştir [65]. Partikül yüzey modifikasyonu, partikül-partikül etkileşimini ve yüzey enerjisini azaltarak partiküllerin aglomerasyonunu engellediği ve daha homojen bir dağılım sağlayarak mekanik özelliklerin gelişmesine katkıda bulunduğu da belirtilmiştir [66]. Mikro boyutlu dolgu maddeleriyle hazırlanan kompozitlerin elastiklik modülü değerlerinin partikül boyutundan etkilenmediği,

ancak kompozitlerde modül değerlerinin dolgunun boyutunun küçülmesiyle arttığı tespit edilmiştir. Çekme dayanımının partikül boyutunun küçülmesiyle arttığı, ancak yüksek oranda nano boyutlu dolgu içeren kompozitlerde partikül dağılımının düzgün olmaması nedeniyle çekme dayanımının mikro boyutlu dolgu içeren kompozitlerden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir [67].

2.6 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Polimer Kompozitler

Polimer kompozitlerin en önemli avantajı, düşük ağırlıklarıdır. Elektrikli araçlarda ağırlık azaltımı, menzil artışını doğrudan etkilemesine rağmen, polimerlerin mekanik dayanım ve termal iletkenlik gibi özelliklerinin de metaller, özellikle çelik ve alüminyum ve bunları içeren alaşımlar ile benzer seviyelerde olmalarının sağlanması gerekmektedir.

EV'lerde yaygın olarak kullanılan polimer kompozitler arasında karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP) ve cam fiber takviyeli polimerler (GFRP) bulunmaktadır. CFRP'ler, yüksek dayanıklılıkları nedeni ile, gövde panelleri ve batarya muhafazaları gibi yapısal bileşenler için ideal olarak değerlendirilmekle beraber maliyetleri oldukça fazladır. Yalnızca bazı yarış araçlarının batarya kasalarında CFRP'lerin, deneysel olarak kullanıldığı görülmüştür. GFRP'ler, CFRP'lere göre daha az dayanıklı olsalar da daha uygun maliyetli olduklarından, iç panel ve trim gibi yapısal olmayan parçalarda kullanılmaktadırlar. Ayrıca, polipropilen, poliüretan ve epoksi bazlı reçineler gibi polimerler, takviye edici fiberlerle birleşerek, belirli elektrikli araç (EV) uygulamaları için özel özelliklere sahip kompozitler oluşturmak amacıyla sıklıkla kullanılırlar. Bu malzemeler, araç performansını optimize etmeye, sürüş menzilin artırmaya ve ağırlığı azaltarak enerji verimliliğine katkıda bulunmaya yardımcı olabilirler [68].

Elektrikli araçlarda kullanılan polimer kompozitler metal katkı, seramik katkı ve hibrit katkı olarak sınıflandırılabilirler.

Polimer matrisine metal katkı malzemeleri yerleştirerek kompozit polimer elde edildiğinde, polimer kompozitlerin termal ve elektriksel iletkenlikleri iyileşmekle birlikte, saf polimer matrisine kıyasla kompozitin termal iletkenliğini de belirgin şekilde artırabilmektedir [69]. Ancak, metalik parçacıkların polimerlere eklenmesi, kompozitlerin elektriksel iletkenliğini yükseltirken, aynı zamanda dielektrik bozulma

gerilimini de azaltabilir. Bu nedenle, metalik katkılar genellikle elektriksel yalıtımın veya dielektrik dayanımın önemli olmadığı özel uygulamalarda tercih edilmektedir.

Polimer matrise seramik malzemeler katkılıandığında, katkıların yapısal özelliklerine bağlı olarak oluşan kompozit malzemenin elektriksel yalıtkanlığını ve termal iletkenliğini artırabilmektedirler. Seramikler, genellikle yüksek sertlik, yüksek sıcaklık dayanımı ve kimyasal direnç gibi özelliklere sahip olduklarından, polimer kompozitlerin mekanik performansını da iyileştirebilirler. Bununla birlikte, seramik katkıların polimer matrise entegrasyonu, homojen bir dağılım sağlanmadığı takdirde kompozitlerin performansını olumsuz yönde etkileyebilir.

Seramiklerin türü, boyutları, şekilleri ve yüzey modifikasyonları, oluşan kompozitin özelliklerini belirlemede önemli rol oynamaktadır. Örneğin, yüksek sıcaklık ve basınç altında, bor nitrürün hegzagonal yapısı, kübik yapıya (cBN) dönüşebilir. hBN anizotropik termal iletkenlik gösterirken, cBN izotropik termal iletkenlik göstermektedir. Bu davranış katkılanan polimer kompozitin de yapısal özelliklerini etkilemektedir. Bir başka örnek olarak, silisyum karbür (SiC) katkılı polimer kompozitlerinde termal iletkenliği artmaktadır [70,71].

Hibrit katkı malzemeleri, ısı iletkenliği artırmak amacıyla genellikle ısı iletken kompozitlere dahil edilerek hibrit katkılı polimer kompozitler elde edilebilir. Farklı boyutlardaki veya türlerdeki katkı malzemelerinin kombinasyonu ile daha verimli bir ısı iletkenlik ağı oluşturulur. Bu sistem, küçük katkı malzemelerinin büyük olanların arasındaki boşlukları doldurarak sürekli iletken yollar oluşturmaya yardımcı olur. Bu katkı malzemelerinin stratejik kombinasyonu, katkı yoğunluğunu artırarak genel ısı iletkenliği optimize eder ve ısı dağılımını iyileştirir [72].

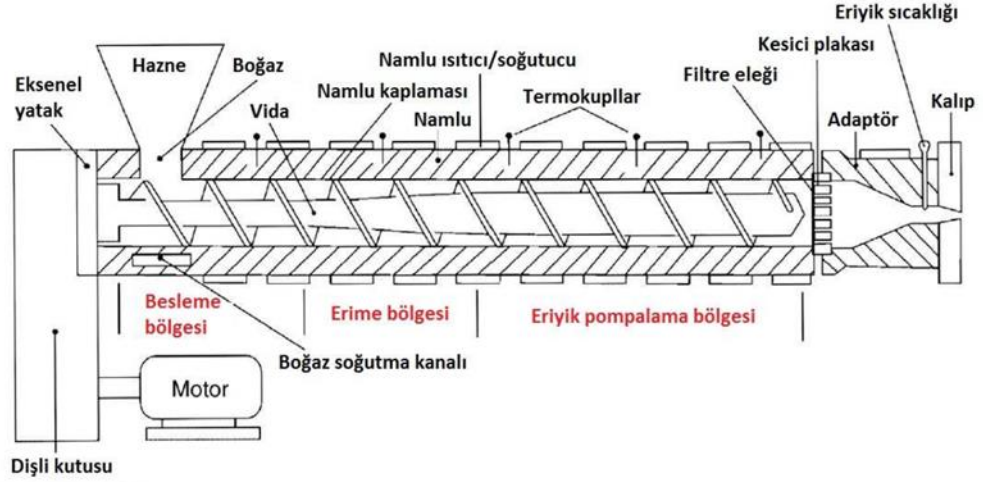
2.7 Polimer Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

2.7.1 Ekstrüzyon

Ekstrüzyon, polimer endüstrisinde yaygın olarak kullanılan, özellikle otomotiv parçaları üretiminde, inşaat sektöründe ve çeşitli plastik ürünlerin imalatında önemli rol oynayan bir kompozit yöntemidir. Bu süreç, yumuşatılmış ya da eritilmiş malzemenin bir kuvvet ile açık uçlu bir kalıptan geçirilerek sabit ya da değişken kesitli ürünler elde edilmesinde tercih edilir [73,74]. Ekstrüzyon prosesinin şematik gösterimi Şekil 2.14'de verilmiştir [75]. Granül halindeki polimer malzeme, namlunun giriş

noktasından içeri alınır ve burada dönmekte olan vida malzemeyi namlunun içerisine doğru iter. Bu süreçte namlu, genellikle malzemeyi uygun erime sıcaklığına ulaştırmak için birkaç bağımsız ısıtma bölgesine sahip olabilir. Bu ısıtma bölgeleri sıcaklığı kademeli olarak arttırır ve polimerin dengeli bir şekilde erimesine olanak tanırken aşırı ısınmaya bağlı bozulmaları da engellemeyi amaçlar. Namlunun yüzeyine yerleştirilen ısıtma elemanları, malzemeyi eritirken, sıcaklık hassas ölçüm cihazları olan termokupllarla kontrol edilir. Eriyik hale gelmiş malzeme, besleme vidası yardımıyla kalıba iletilir ve burada kalıp tarafından belirlenen şekli alır. Kalıptan çıkan ürün, hava akımı veya su banyosu gibi yöntemlerle soğutulurak son formuna ulaşır. Ekstrüzyon, kesiti değişken malzeme üretimleri için de uygulanabilmektedir [71]. Kalıp tasarımının değiştirilmesiyle malzeme, sürekli üretim sırasında yuvarlak, kare, dikdörtgen gibi basit şekillerin yanı sıra karmaşık ve özel profillere dönüştürülebilir. Bu özellik, ekstrüzyonun, borular, pencereler, otomotiv parçaları ve elektrik kabloları gibi birçok farklı ürünün üretilmesi için ideal bir yöntem olmasını sağlar.

1960'larda, tek vida ekstrüzyon teknolojisi ve vida tasarımında önemli gelişmeler yaşanmıştır. Deneysel araştırmalar, polimer granüllerin, vida kanalı içinde hızla katı yataklar oluşturduğunu ve bu yatakların vida boyunca ilerlerken, yüzeydeki ısı transferiyle kademeli olarak eridiğini göstermiştir. Bu süreçte, vida yüzeyindeki sürtünmeden kaynaklanan yüksek viskozite nedeniyle önemli miktarda ısı üretilir. Bu yenilik, modern vidaların uzun sıkıştırma bölgesine sahip olmasını sağlamış ve polimer erime mekanizmalarını daha verimli hale getirmiştir [73]. Polimerlerin ekstrüzyonu, metallerden farklı olarak, granül malzeme sürekli sağlandığı müddetçe kesintisiz bir işlem olarak gerçekleştirilebilir. Bu yöntem ağırlıklı olarak termoplastiklerin üretiminde tercih edilirken, elastomerler ve termoset malzemeler de bu yöntemle işlenebilmektedir. Elastomer ve termosetlerin ekstrüzyonunda, malzeme ısıtma ve eritme sırasında çapraz bağlama reaksiyonları gösterir. Ekstrüzyonla üretilen termoplastik ürünler, istenirse termoform yöntemi ile farklı şekillere dönüştürülebilir. Yüksek üretim verimliliği, düşük malzeme kaybı ve karmaşık geometrilere sahip ürünlerin üretimine imkan tanınması nedeniyle ekstrüzyon, modern üretim teknolojilerinde önemli bir yer tutar.



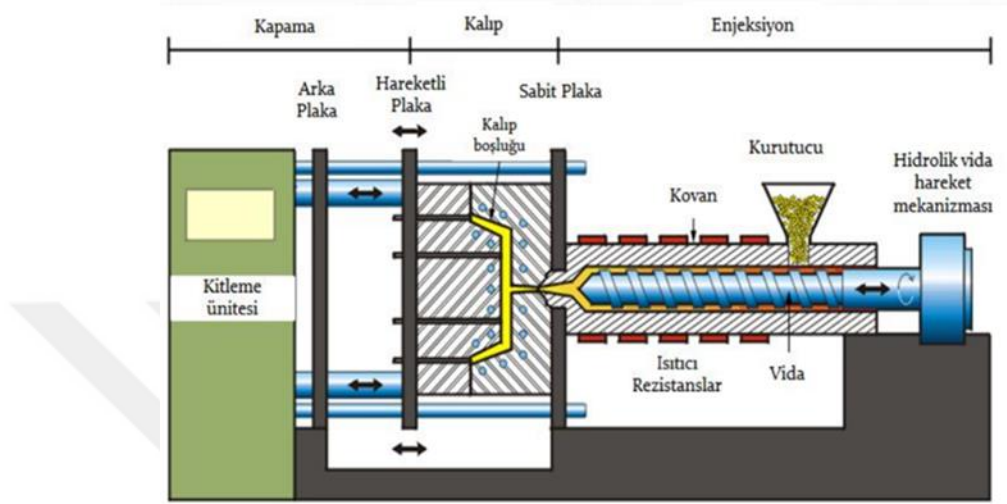
Şekil 2.14 : Ekstrüzyon prosesi şeması [75].

Ekstrüzyon prosesinin en önemli parametreleri sıcaklık, vida hızı, basınç ve erimiş polimerin viskozitesi olarak özetlenebilirler. Sıcaklık, eriyiğin durumu ve kalitesi üzerinde belirleyici olup, ürün kalitesi, proses stabilitesi, kristalleşme davranışı ve polimerin moleküler ağırlığını doğrudan etkiler. Vida hızı, polimerin eritilmesinde kullanılan mekanik enerji ile birlikte eriyiğin pompalama bölgesine etkili bir şekilde aktarılmasını sağlar; doğru ayarlanmadığında proses verimliliği düşebilir. Basınç, vidanın dönme hareketiyle oluşur ve eriyiğin kalıba doğru iletiminde kritik rol oynar. Düşük basınç, polimerin istenilen şekle ulaşmasını engellerken, yüksek basınç motor arızalarına yol açabilir. Erimiş polimerin viskozitesi ise akış davranışını etkiler; yüksek viskozite daha fazla enerji gerektirirken, düşük viskozite ürün kalitesini olumsuz etkileyebilir. Bu dört parametrenin uyumlu bir şekilde kontrolü, başarılı bir ekstrüzyon süreci için hayati öneme sahiptir [74].

2.7.2 Enjeksiyon kalıplama

Enjeksiyon kalıplama, polimerlerin seri üretimi için kullanılan, genellikle ek bir işleme ihtiyaç duymayan ve yüksek verimlilik sağlayan önemli bir üretim yöntemidir. Bu yöntem, karmaşık şekillerin ve detayların hassas bir şekilde üretilmesine olanak tanır. Enjeksiyon kalıplama prosesinin şematik gösterimi Şekil 2.15'te verilmiştir. Günümüzde, çoğu enjeksiyon kalıplama makinesi, belirli limitler içinde tüm kalıp tipleriyle uyumlu çalışabilen evrensel makinelerdir. Bu süreç, polimer malzemenin eriyik hale getirilip yüksek basınç altında kapalı bir kalıba enjekte edilmesiyle başlar. Parça, kalıp içinde soğuyarak katılaşır ve sonrasında kalıptan çıkarılır. Enjeksiyon kalıplama, otomotiv, elektronik, tıbbi cihazlar ve tüketim ürünleri gibi birçok

endüstride yaygın olarak kullanılır. Enjeksiyon kalıplamanın önemli adımları, malzemenin ısıtılması, eriyik hale getirilmesi, ardından kalıba yüksek basınçla enjekte edilmesi, soğutma işlemi ve son olarak kalıbın açılmasıyla şekillenen parçanın çıkarılmasıdır. Her aşama dikkatli bir kontrol gerektirir, çünkü parçanın kalitesi ve hassasiyeti bu adımların doğru bir şekilde gerçekleştirilmesine bağlıdır.



Şekil 2.15 : Enjeksiyon kalıplama prosesinin şematik gösterimi [78].

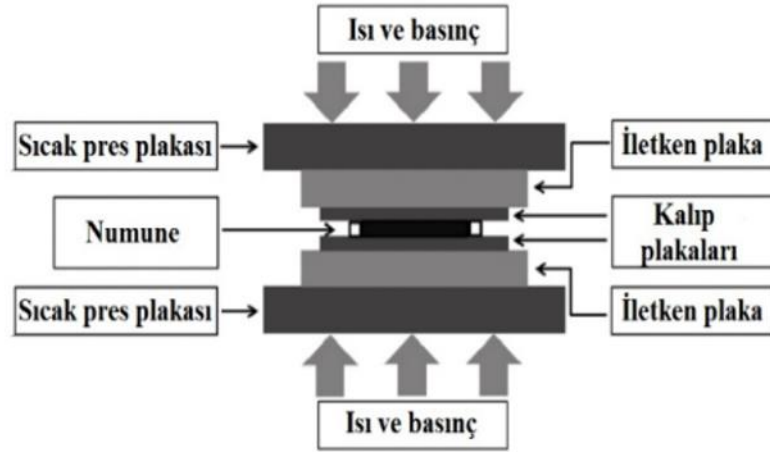
Bu yöntemin avantajları arasında yüksek üretim hızları, karmaşık geometrilere sahip parçaların hassas bir şekilde üretilebilmesi ve büyük hacimli üretim yapılabilmesi bulunur. Ayrıca, otomatikleşmiş süreçler sayesinde iş gücü maliyetleri de önemli ölçüde düşer. Ancak, başlangıçtaki kalıp tasarımı maliyetleri ve üretim sırasında oluşan malzeme israfı gibi zorluklar da mevcuttur. Ayrıca, kalıp değişiklikleri ve özel üretim gereksinimleri nedeniyle esneklik sınırlamaları da ortaya çıkabilir [78].

2.7.3 Basınçlı kalıplama

Basınçlı kalıplama, polimer granülleri veya tozlarının açık ve ısıtılmış bir kalıp boşluğuna yerleştirilmesi, ve ardından kalıbın kapatılarak malzeme üzerine basınç uygulanması ile malzemenin kalıp boşluğunun tüm yüzeylerine eşit şekilde yayılmasının sağlandığı bir kompozit üretim yöntemidir. Bu prosesin şematik gösterimi Şekil 2.16’da verilmiştir.

Bu yöntemle farklı boyutlarda, kalınlıklarda ve karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesi mümkündür. Elde edilen parçaların yüksek mukavemete sahip olmaları nedeni ile endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. Termoset kompozitler, basınçlı kalıplamada en yaygın kullanılan malzeme grubunu oluşturur. Termosetler,

işlem sırasında gerçekleşen çapraz bağlanma reaksiyonlarıyla daha dayanıklı bir yapıya kavuşur ve böylece üretilen parçaların ömrü uzar. Bu yöntemde düşük malzeme kaybı ve üstün yüzey kalitesi ile ürün elde edilebilmesi, yöntemi ekonomik ve verimli bir üretim seçeneği haline getirmektedir [75, 79-81].



Şekil 2.16 : Basınçlı kalıplama prosesinin şematik gösterimi [82].

Basınçlı kalıplama işleminde dört ana adım bulunmaktadır. İlk olarak, istenilen parçanın boyutlarına uygun, yüksek mukavemetli ve iki parçalı bir metal kalıp hazırlanır ve ısıtıcı plakalarla ısıtılır. Ardından, kompozit malzeme kalıbın şekline göre ön şekillendirilir; bu adım, nihai parçanın performansını artırmaya yardımcı olur. Sonrasında, ön şekillendirilmiş malzeme ısıtılmış kalıba yerleştirilir ve kalıp, parçanın kalınlığına ve kullanılan malzemeye bağlı olarak 55 ila 135 bar arasında değişen yüksek bir basınçla sıkıştırılır. Son olarak, ısıtıcılar kapatılır ve kalıbın soğutulması için su akışı sağlanır; kalıp belirli bir sıcaklığa soğuduktan sonra açılır ve şekillendirilmiş ürün kalıptan çıkarılır [80].

Basınçlı kalıplamanın önemli avantajları şu şekilde özetlenebilir: İlk olarak, bu yöntem, metal parçalara kıyasla daha güçlü, sert, hafif ve korozyona karşı daha dirençli olan gelişmiş kompozitlerin kullanımına olanak tanır. Ayrıca, basınçlı kalıplama yöntemi ile karmaşık geometrilere sahip parçaların üretimi daha mümkündür. Her ne kadar enjeksiyon kalıplama hızına ulaşmasa da daha komplike şekillerin üretilmesine imkan verebilmektedir [81].

2.7.4 Mekanik karıştırma

Mekanik karıştırma, kompozit malzeme üretiminde yaygın olarak kullanılan bir işleme yöntemidir. Bu süreç, polimer matrisi ile takviyelerinin, mekanik enerji kullanılarak karıştırılması ile gerçekleşir. Mekanik karıştırma, üretilen kompozit malzeme bileşenlerinin homojen bir şekilde dağılmasını ve yüksek performanslı kompozitlerin üretimini sağlar. Bu yöntem, genellikle düşük maliyetli ve yüksek verimli bir üretim süreci olarak tercih edilir. Karıştırma işlemi sırasında, malzeme bileşenleri belirli sıcaklık ve hız koşullarında işlenebilir [83].

Mekanik karıştırma, genellikle sıcak presleme, ekstrüzyon veya enjeksiyon kalıplama gibi diğer kompozit üretim yöntemleriyle birlikte kullanılır [84]. Karıştırma işlemi, polimer matrisi içinde takviyelerin düzgün bir şekilde dağılmasını sağlamak için özel karıştırıcılar veya viskoziteyi kontrol eden ekipmanlar kullanılarak yapılır. Bu süreç, yüksek mukavemet, sertlik ve dayanıklılık gibi özelliklere sahip kompozit malzemelerin üretimi için idealdir. Ayrıca, bu yöntem, farklı malzeme türlerinin bir araya getirilmesiyle yeni nesil kompozit malzemelerin geliştirilmesine olanak tanır.

Bu yöntemin en önemli avantajlarından biri, düşük maliyetle yüksek hacimli üretim yapabilmesidir. Bu, özellikle endüstriyel üretimlerde, büyük miktarlarda kompozit malzeme üretmek isteyen firmalar için büyük bir avantaj sağlar. Ayrıca, artık malzeme miktarının azaltılabilmesi, malzeme israfını azaltmakta ve çevre dostu bir üretim seçeneği sunmaktadır. Mekanik karıştırma yöntemi, çok çeşitli takviyelerin ve polimerlerin birleştirilmesine olanak tanıyarak, özelleştirilmiş kompozitler üretmek için geniş bir yelpazede kullanılmaktadır.

Bu çalışmada hazırlanacak olan PP/hBN/SiC ve titanat kaplı PP/Ti/hBN/Ti/SiC numunelerinin hazırlanması için, önce mekanik karıştırma, sonra da basınçlı kalıplama yöntemleri izlenmiştir [84].

3. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu bölümde, EV batarya paketlerinde ihtiyaç duyulan hafiflik, yüksek dayanım, termal iletkenlik ve elektriksel yalıtkanlık gereksinimlerini karşılayabilecek, hibrit seramik katkılı polimer kompozit olarak polipropilen (PP) matrisine hBN ve SiC katkılı polimer kompozitlere yer verilecektir.

Literatürde polistiren, PP ve bor nitrür kullanılarak oluşturulan hibrit kompozitlerin yüksek termal iletkenlik ($> 5,5 \text{ W/m.K}$) değerine sahip olduğu ölçülmüş ve bu kompozitlerin birçok alanda termal yönetim malzemesi olarak kullanımının uygun olduğu bildirilmiştir [85]. Bir diğer çalışmada ise klorlanmış polietilen (CPE) ve çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) kullanılarak, polimer kompozit numuneler oluşturulmuş ve bu numunelerin karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, mekanik karıştırma yöntemi ile elde edilen kompozitler düşük perkolasyon eşiğine sahiptirler ve daha az katkı maddesi ile, malzemenin bütünlüğü bozulmadan, elektriksel ve termal iletkenlik değerlerindeki etkiler gözlemlenebilmiştir [84].

Bor nitrür, yalıtkan bir seramik malzemedir ve hegzagonal yapıda oluşturulduğunda (hBN) elektriksel olarak yalıtandır ve termal iletkenliği yüksektir ($29\text{-}300 \text{ W/m.K}$). Buna ek olarak, alev geciktirici özellikleri de bulunmaktadır. Literatürde poliamid 6 polimerine katılan hBN'nin alev geciktirici etkisi olduğu ve oluşturulan kompozitin UL 94 testlerinden V-0 sınıflandırmasına girebileceği gösterilmiştir [86]. Ayrıca, gözenekli BN'ün de benzer şekilde alev geciktirici ve yangına karşı koruyucu etkisi olduğu ve yangın riski bulunan geri dönüşüm işlemlerinde kullanılabileceği değerlendirilmiştir [32,33]. Literatürde, %29 hBN içeren kompozitlerin 0.721 W/m.K termal iletkenlik değeri elde etmesiyle, eksfoliye edilmiş hBN parçacıklarının termoplastik kompozitlerin termal iletkenliğini artırdığı ve mekanik özelliklerini bozmadan bunu sağladığı gösterilmiştir [87].

Öte yandan SiC ise, olağanüstü sertliği, yüksek ısı iletkenliği ($30\text{-}490 \text{ W/m.K}$) ve kimyasal korozyona karşı direncinin yanı sıra, yüksek sıcaklıklarda bozulmaya karşı dayanıklılığı ve alevlenmezliği sayesinde mükemmel alev geciktirici özellikler

sergileyen son derece dayanıklı ve termal olarak kararlı bir malzemedir [88]. SiC'ün silikon kauçuk kompozitlerinde katkı maddesi olarak kullanılması sonucunda, ağırlıkça %10 SiC eklenmesiyle kauçuğun sınırlayıcı oksijen indeksi (LOI) değerinin %10,5 arttığı ve UL-94 V-0 sınıflandırmasına ulaştığı sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca, PANI-co-PAA/f-SiC filmlerde, nano boyutunda katkı maddesinin konsantrasyonu arttıkça termal stabilite, kimyasal direnç ve alev geciktirici özelliklerde belirgin bir iyileşme gözlemlenmiştir [89]. Reaksiyon bağlı silisyum karbür kompozitlerinin üretiminde kullanılan karbon partiküllerinin ve karbon fiberin içerik artışı ile mikroyapı değişimi ve mekanik davranış incelenmiştir. Kompozitler, alçı kalıba döküm yöntemi ve sıvı silisyum infiltrasyonu kullanılarak üretilmiş ve tavlama işlemi ile kırılma tokluğunun %49 oranında arttığı rapor edilmiştir[90].

Tetraetil ortotitanat (Ti), sıvı bir kimyasal olup, başlıca titanyum bazlı malzemelerin sentezinde ve çeşitli titanyum oksit kaplamalarının üretiminde kullanılır. Nem varlığında hidrolize olarak titanyum hidroksit oluşturma ve ardından titanyum oksitten oluşan katı bir ağ kondense etme yeteneğine sahip olduğu için sol-jel süreçlerinde ince filmler, kaplamalar ve seramiklerin üretimi için yaygın olarak kullanılır. Isıya dayanıklı ve korozyona dirençli bir madde olduğundan, elektronik cihazlar, optik bileşenler ve katalizörler gibi ileri düzey malzeme uygulamalarında kullanılabilir. Ayrıca literatürde, PVC/CaCO₃ polimer nanokompozitlerinde, titanat bağlayıcı ajanının kullanımı, polimer matrisini yumuşatarak matrisin modülünü düşürmüştür. Tarama elektron mikroskobu incelemeleri, titanatın partikül-matris bağını iyileştirdiğini ve partiküller etrafında boşluk oluşumunu engellediğini göstermiştir. Bu iyileşmiş bağlanma, sonlu elemanlar analizine göre, partiküller etrafındaki matrisin plastikliğini azaltmış ve kompozitlerin sertleştirme verimliliğini düşürmüştür [91].

Literatürde hem uyumlaştırıcı olmadan, hem de uyumlaştırıcı ajan kullanılarak çalışılmış PP/hBN/SiC kompozitlerine dair bir çalışma bulunmamaktadır. Ayrıca bu kompozit yapılarında, uyumlaştırıcı olarak titanat kullanımını da içeren bir çalışma bulunamamıştır.

4. MALZEMELER VE YÖNTEM

4.1 Malzemeler

Bu çalışmada matris olarak, Aplus firmasından toz halinde tedarik edilen polipropilen (PP100) kullanılmıştır. Firma tarafından PP hammaddesinin yoğunluğu 0,897-0,905 gr/cm³, erime sıcaklığı 160°C ve parçacık boyutu ise ortalama 100 mikron olarak bildirilmiştir.

Polimer kompozit üretiminde, katkı olarak eklenecek olan hBN, Bortek firmasından tedarik edilmiştir. Malzemenin yoğunluğu üretici firma tarafından 2,27 gr/cm³ olarak verilmiştir ve parçacıkların ortalama çapı 121 nanometredir [92]. Bir diğer katkı malzemesi SiC ise, Nanokar firmasından elde edilmiştir, yoğunluğu 3,07-3,15 gr/cm³ ve ortalama parçacık boyutu 45-75 mikrometre aralığındadır.

Nanokompozit malzemelerde uyumlaştırıcı ajan olarak kullanılan tetraetil ortotitanat, Sigma Aldrich firmasından temin edilmiştir, sıvı formdadır ve yoğunluğu 1,08 gr/cm³ olarak verilmiştir.

4.2 hBN ve SiC Katkılarının Ti ile Kaplanması

Hibrit polimer kompozit numunelerde kullanılan katkıların matris içerisinde eşit ve homojen dağılımının sağlanabilmesi amacı ile ilk önce eşit miktarlarda hBN ve SiC tartılmış ve farklı beherlere alınmıştır. Ardından, katkıların yüzeyinde bulunan nemin giderilmesi için toz halindeki katkılar 100°C sıcaklıkta yaklaşık 2 saat boyunca etüvde kurutulmuştur. Daha sonra, her katkıya etanol eklenerek, hazırlanan karışımlar 10 dakika süresince manyetik karıştırıcıda 1000 devir/dakika ile karıştırılmıştır. Devamında, uyumlaştırıcı ajan Ti her bir karışıma ağırlıkça %2,5 oranda ilave edilmiştir ve yaklaşık 2 saat boyunca mekanik karıştırıcıda kaplamanın tamamlanması için karıştırılmaya devam edilmiştir [93,94]. Son aşamada ise, uyumlaştırıcı ajan içeren ve içermeyen katkılar, nemden ve kalan etanol'den arındırılmak amaçlı etüvde 100°C sıcaklıkta yaklaşık 2 saat boyunca kurutulmuşlardır.

4.3 PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC Polimer Nanokompozitlerin Üretimi

Bu çalışmada tetraetil ortotitanat uyumlaştırıcı ajanı ile kaplanmış hekzagonal bor nitrür ve silisyum karbür katkılı polipropilen üretimi ile yüksek ısı iletken ve aynı zamanda elektriksel olarak yalıtkan bir polimer nanokompozit elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla PP matrise hBN ve SiC katkıları eklenmiş ve uyumlaştırıcı ajan olarak Ti kullanılmıştır. Kompozit yapıların üretimi mekanik karıştırma ve basınçlı kalıplama yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Polimer matris-katkı arayüzey etkileşiminin ve toplam katkı oranının etkilerini araştırmak amaçlı, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC kompozitler farklı katkı oranlarında (ağırlıkça %20, %40 ve %50) Ti içeren ve içermeyen numuneler olarak üretilmiştir (Çizelge 4.1). Literatürde bulunan son araştırmalar, hibrit kompozitlerde 1:1 oranında hazırlanan kompozitlerin maksimum termal iletkenliğe ulaşılmasını sağladığını göstermektedir [70]. Bu nedenle, bu çalışmada üretilecek olan hibrit nanokompozitler 1:1 ağırlıkça oranında hazırlanmıştır. Numunelerin adlandırılmasında, PP, saf polipropileni temsil etmektedir. PPX şeklindeki adlandırılmalarda X, PP harici toplam hBN/SiC katkı yüzdesini ifade etmektedir. PPX adlandırılmalarda, eş miktardaki hBN ve SiC katkılarının kütle oranları toplamda %X şeklindedir. Benzer şekilde PPTX adlandırmaları PP/Ti/hBN/Ti/SiC numunelerini temsil etmektedir ve toplamda eşit miktarlardaki Ti/hBN ve Ti/SiC katkılarını içermektedir.

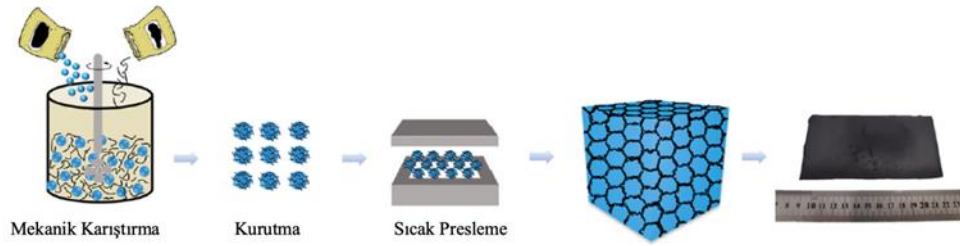
Çizelge 4.1 : PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC kompozitlerin formülasyonları.

Numune Adı	PP oranı (Ağ.%)	hBN oranı (Ağ.%)	SiC oranı (Ağ.%)	Ti/hBN oranı (Ağ.%)	Ti/SiC oranı (Ağ.%)
PP	100	-	-	-	-
PP20	80	10	10	-	-
PP40	60	20	20	-	-
PP50	50	25	25	-	-
PPT20	80	-	-	10	10
PPT40	60	-	-	20	20
PPT50	50	-	-	25	25

PP, PPX ve PPTX numunelerinin hazırlanması için literatürde de kullanılan mekanik karıştırma ve ardından basınçlı kalıplama yöntemleri seçilmiştir [82,84]. Mekanik

karıştırma ve basınçlı kalıplama aşamalarının şematik gösterimi Şekil 4.1’de verilirken, basınçlı kalıplama aşamasının detaylı gösterimi Şekil 2.16’da verilmiştir.

Hazırlanan hBN ve SiC ile uyumlaştırıcı ajan kaplı Ti/hBN ve Ti/SiC katkılarının PP matrise homojen bir şekilde karıştırılması, Çizelge 4.1’de verilen formülasyonlara bağlı olarak mekanik karıştırıcıda 10 dakika süresince 1000 devir/dakika karıştırma hızında gerçekleştirilmiştir [84]. Daha sonra, elde edilen homojen karışımlar, Şekil 4.3’de gösterilen basınçlı kalıplama için kalıplara dökülmüş ve 5 dakika boyunca, 5 MPa basınç uygulayarak 200°C sıcaklıkta şekillendirilmiştir [85]. Soğutma aşamasından sonra basınçlı kalıplama işlemi tamamlanmıştır. Mekanik karıştırma işlemi Şekil 4.2’de gösterilen DLAB/OS20-S cihazında yapılırken, basınçlı kalıplama işlemi Şekil 4.3’te gösterilen, 12 tonluk basınçlı kalıplama cihazında (CARVER/12-12) gerçekleştirilmiştir. Basınçlı kalıplama işlemi sırasında polimer matrisin tamamen eriyik olması amacı ile PP’nin erime sıcaklığı olan 160°C üzerine 40°C çıkılarak 200°C sıcaklığında şekillendirme yapılması kararlaştırılmıştır.



Şekil 4.1 : Mekanik karıştırma ve basınçlı kalıplama ile örnek hazırlama [84].

4.4 Polimer Nanokompozitlerin Karakterizasyon Yöntemleri

Elde edilen numunelerin karakterizasyonu için üretilen örneklerden çeşitli ebatlarda kesitler alınarak PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin yoğunluk, kimyasal, mikroyapısal, mekanik, termal, elektriksel ve yanma özellikleri incelenmiştir. Bu özelliklerin incelenmesi için yapılan testler ve detayları bu kısımda verilmiştir.

4.4.1 Yoğunluk analizi

Hazırlanan numunelerin yoğunlukları, Shimadzu/AUX321 hassas terazi uyumlu yoğunluk ölçüm kiti kullanarak (Şekil 4.4) ölçülmüştür. Şekil 4.5’de gösterilen cihaz Arşimet prensibine göre çalışmaktadır. Malzemelerin yoğunluğu (d) Denklem 4.1 ile hesaplanmaktadır.

$$d = \frac{m_{hava}}{V_{cisim}} = \frac{m_{hava} \times d_{su}}{(m_{hava} - m_{su})} \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’de m_{hava} numunenin havadaki ve m_{su} numunenin sudaki kütlesi, V_{cisim} cismin hacmi, d_{su} ise kullanılan saf suyun oda sıcaklığındaki yoğunluğudur ve 1 g/cm^3 değeri olarak alınmıştır.



Şekil 4.2 : Mekanik karıştırıcı (DLAB/OS20-S).



Şekil 4.3 : Basınçlı kalıplama cihazı (CARVER/12-12).

4.4.2 Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopi

Hazırlanan numunelerin bileşen analizleri için Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopi (FTIR) ölçümleri, 500-4000 cm^{-1} dalga sayısı aralığında Thermoscientific/Nicolet-IS50 (Şekil 4.5) cihazı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 4.4 : Hassas terazi uyumlu yoğunluk ölçüm kiti (Shimadzu/AUX321).



Şekil 4.5 : Thermoscientific Nicolet-IS50 FTIR cihazı.

4.4.3 Taramalı elektron mikroskobu analizi

Üretilen PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin mikroyapısal özelliklerini anlamak adına taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yüksek büyütme oranları ile görüntüleri kaydedilmiştir. Bu çalışmada hazırlanan numunelerin görüntüleri Carl Zeiss/Gemini 300 taramalı elektron mikroskobu (Şekil 4.6) ile $\times 3000$, $\times 5000$ ve $\times 8000$ büyütme oranları ile elde edilmiştir. Analiz öncesinde hazırlanan numuneler, altın/paladyum (Au/Pd) alaşımı ile kaplanarak görüntü almaya hazır hale getirilmiştir.



Şekil 4.6 : Taramalı elektron mikroskobu (Carl Zeiss/Gemini 300).

4.4.4 Mekanik özelliklerin incelenmesi

4.4.4.1 Çekme testi

Çizelge 4.1.'de kompozisyonları verilen tüm polimer kompozit numunelerin çekme dayanımı testleri SHİMADZU/AGS-X mekanik test cihazı (Şekil 4.7a)) kullanılarak oda sıcaklığında, 10 kN kuvvet ve 5 mm/dk çekme hızı ile gerçekleştirilmiştir. Bu amaç ile her bir numuneden beş adet örnek ASTM D638 standardında bağlı olarak hazırlanmıştır. Elde edilen sonuçlar nanokompozitlerin elastik modülü, çekme dayanımı ve kopmadaki uzama değerlerini tespit edilmesini sağlamıştır.



(a)



(b)

Şekil 4.7 : Mekanik test cihazları: a) Çekme testi cihazı (Shimadzu/AGS-X), b) Darbe testi cihazı (INSTRON/CEAST9050).

4.4.4.2 Darbe testi

Hazırlanan tüm polimer kompozit numunelerin darbe testleri INSTRON/ CEAST9050 5 J kapasiteli Charpy darbe test cihazı (Şekil 4.7b)) kullanılarak ISO 179 standardına bağlı olarak yapılmıştır. Bu testlerde her numune için hazırlanan beş örneğin darbe altında darbe dayanımları ölçülmüştür.

4.4.5 Elektriksel iletkenlik analizi

Bu çalışmada üretilen tüm nanokompozitlerin elektriksel iletkenlik ölçümlerinde, Şekil 4.8’de gösterilen Keithley 6517B multimetre ve Keithley 8009 öz direnç test aleti kullanılmıştır. Numunelerin her birinden 3 farklı örnek (boyut: 90×90×0,5 mm) hazırlanarak her biri için hacimsel öz direnç değerleri ölçülmüştür. Elektriksel iletkenlik parametresi ise Denklem 4.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem 4.2’de σ (S/m): elektriksel iletkenlik, L : numune kalınlığı (m), A : akıma karşı yüzeyin kesit alanı (m²) ve R ise elektriksel öz direnç değeridir.

$$\sigma = \frac{L}{RA} \quad (4.2)$$



Şekil 4.8 : Elektriksel iletkenlik ölçüm cihazı.

4.4.6 Diferansiyel taramalı kalorimetre analizi

Polimer kompozit numunelerin termal faz geçiş analizleri TA Instruments/DSC25 model (Şekil 4.9), diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazı kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin kristalizasyon sıcaklıkları (T_c), erime sıcaklıkları (T_m) ve kristalizasyon ve erime anındaki entalpi değişimi değerleri (ΔH_c ve ΔH_m), sabit azot akışı altında ısıt-soğut-ısıt döngüsü ile ölçülmüştür. Numuneler önce 20°C’den 10°C/dk hızda 250°C’ye kadar ısıtılmış, ardından aynı hızda 20°C’ye kadar soğutulmuş ve yine aynı hızda ikinci ısınma fazında yeniden 250°C’ye kadar

ısıtılmıştır. Numunelerin kristalleşme oranları (χ_c) Denklem 4.3 ile hesaplanmıştır. Denklem 4.3’de ΔH_{PP}^0 , %100 kristal PP için erime entalpisi ve w_i ise ilgili numune içerisindeki PP’nin kütleli oranını belirtmektedir. Bu çalışmada literatürdeki değerler taranarak güncel $\Delta H_{PP}^0=188,9 \text{ J/g}$ değerine ulaşılmış ve kristalleşme oranları hesaplamasında bu değer kullanılmıştır [95-97].

$$\chi_c = \frac{\Delta H_m}{w_i \Delta H_{PP}^0} \times 100 \quad (4.3)$$



Şekil 4.9 : Diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı (TA Instruments/DSC25).

4.4.7 Termal gravimetrik analiz

Hazırlanan nanokompozitlerin termal dayanım sıcaklıkları TA Instruments/SDT Discovery 650 termal gravimetrik analiz (TGA) cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 4.10). TGA analizi esnasında numuneler, 35°C’den 10°C/dk ısıtma hızında 900°C sıcaklığına kadar, azot gazı atmosferinde ısıtılmışlardır. Bu testler sonucunda malzemelerin kütle kayıplarının sıcaklık ile değişimi gözlemlenmiştir.



Şekil 4.10 : TGA cihazı (TA Instruments/SDT Discovery 650).

4.4.8 Termal iletkenlik analizi

Bu çalışmada üretilmiş olan tüm nanokompozitlerin termal iletkenlikleri (W/m.K) Netzsch/LFA 467 termal iletkenlik analiz cihazı ile oda sıcaklığında ölçülmüştür (Şekil 4.11).

4.4.9 Dikey yanma testi / UL 94-V

Hazırlanan polimer numunelerinin alev geciktiricilik özellikleri dikey yanma testi (UL 94-V) ile incelenmiştir. UL 94-V, plastik malzemelerin dikey alev karşısında nasıl tepki verdiğini değerlendiren bir yanıcılık testidir. Malzemeler, 10 saniye içinde sönen ve damlama yapmayan V-0, 30 saniye içinde sönen ve az miktarda damlama yapan V-1, 30 saniye içinde sönen ancak pamuğu tutuşturabilecek kadar damlamalar yapan V-2 olarak sınıflandırılırlar [98]. Bu şartları sağlamayan malzemeler için dikey yanıcılık değerlendirilmesi verilmez. Bu çalışmada gerçekleştirilen UL 94-V testinde numunelerin dikey yanma özellikleri, 3 tekrarlı olarak Şekil 4.12’de verilen düzenekte gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.11 : Termal iletkenlik analiz cihazı (Netzsch/LFA 467).



Şekil 4.12 : Dikey yanma testi (UL 94-V).

5. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

5.1 Yoğunluk Analizi Sonuçları

Bu çalışmada kullanılan ve ağırlıkça katkı oranları Çizelge 4.1’de verilen saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitler için elde edilen yoğunlukların ortalama değerleri ve standart sapmaları Çizelge 5.1’de verilmiştir. Ayrıca, numunelerin yoğunlukları Şekil 5.1’de sunulmuştur.

Elde edilen sonuçlara göre, hBN/SiC veya Ti/hBN/Ti/SiC toplam katkı oranı arttıkça kompozit numunelerin yoğunluklarının arttığı gözlemlenmiştir. Katkıların (hBN ve SiC) yoğunluğu PP’den yüksek olduğundan dolayı bu sonuçlar öngörülebilir [59]. Ayrıca, uyumlaştırıcı ajan içeren ve içermeyen numunelerin sonuçları karşılaştırıldığında benzer bir davranış olduğu görülmüştür ve toplam katkı oranı arttıkça, yoğunluk değerinde bir artış olduğu gözlemlenmiştir.

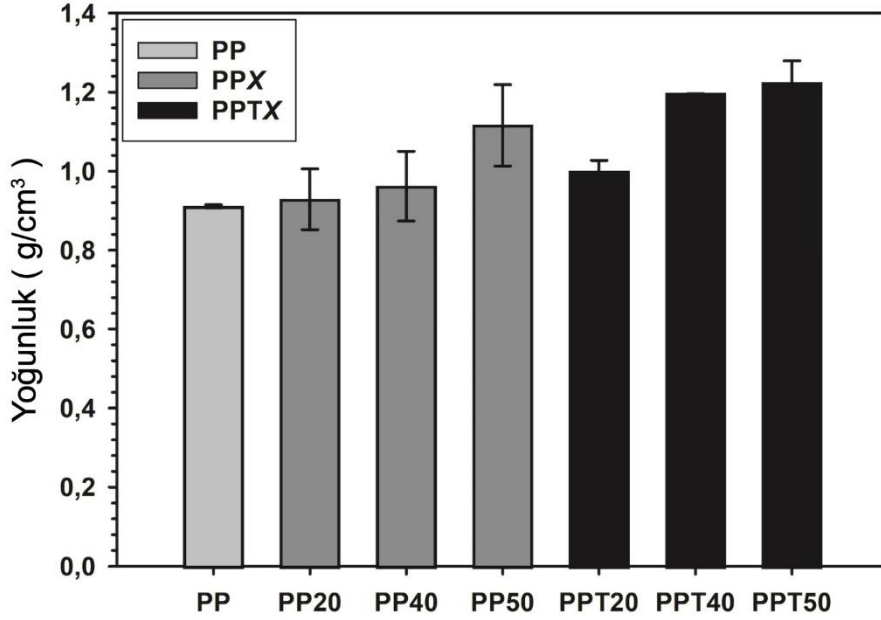
Çizelge 5.1 : PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC kompozitlerin yoğunlukları.

Numune Adı	Yoğunluk (g/cm ³)
PP	0,911 ± 0,004
PP20	0,929 ± 0,077
PP40	0,962 ± 0,088
PP50	1,116 ± 0,103
PPT20	1,000 ± 0,027
PPT40	1,1960 ± 0,0003
PPT50	1,223 ± 0,056

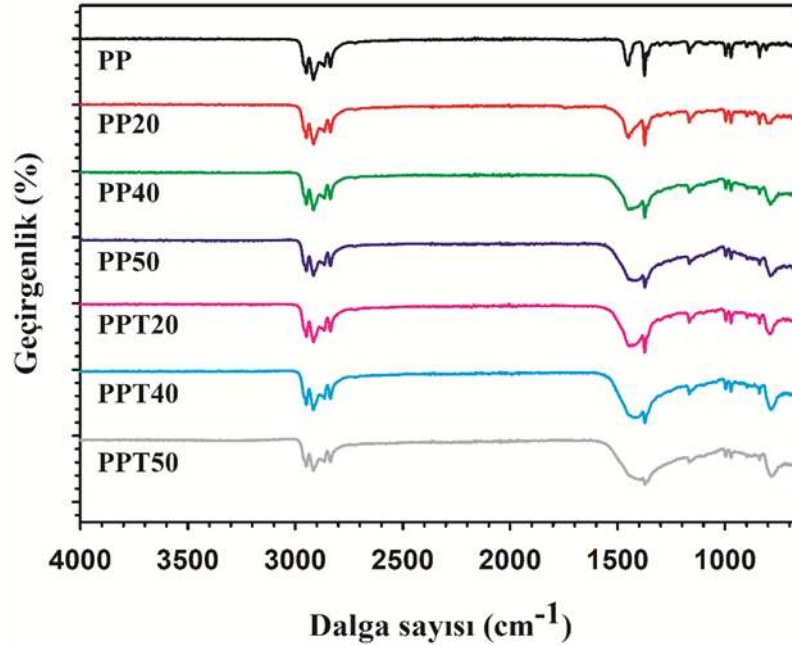
5.2 FTIR Analiz Sonuçları

Bu çalışmada üretilen saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin FTIR spektrumları Şekil 5.2’de verilmiştir. Numunelerin FTIR spektrumları incelendiğinde, saf polipropilenin 2950-2836 cm⁻¹ bandında karakteristik CH₃ ve CH₂ gerilimlerine ait pikler, 1375 cm⁻¹ bandında bulunan C-H gerilmesine ait pikler, farklı katkı miktarları içeren kompozit yapılarda, belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir.

Özellikle, SiC ve hBN katkıları, polimer matrisinde seyrelmeye sebebiyet verdiği için, PP'ye ait spesifik pik şiddetlerinde ($2950\text{-}2836\text{ cm}^{-1}$ bandı), katkı maddesi artışına bağlı olarak doğru orantılı bir azalma gözlemlenmektedir [99].



Şekil 5.1 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin yoğunluk ölçüm sonuçları.



Şekil 5.2 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin FTIR analizi sonuçları.

Saf PP yapısında 1375 cm^{-1} 'de görülen pik, CH_3 gruplarının simetrik deformasyon titreşimlerine bağlıdır. Aynı bantta hBN katkısına bağlı olarak B-N bağlarının düzlem içi gerilmesinden kaynaklı pik oluşması beklenmektedir. Farklı katkı oranlarına sahip

numunelerin FTIR spektrumları, saf PP ile kıyaslandığında, katkı oranı arttıkça, 1375 cm^{-1} civarında spektral bir genişleme olduğu görülmektedir [96, 100-103].

hBN'nin B-N-B gerilmesinden kaynaklı olarak 780 cm^{-1} bölgesindeki pik meydana gelmesi beklenir. SiC için ise baskın beklenen pikin 800-1100 cm^{-1} civarında gelmesi gerekir. FTIR spektrumlarından görülebileceği gibi, bu aralıktaki piklerde, katkı oranına bağlı olarak şiddet artışı gözlemlenmektedir. Yine aynı pik alanında, uyumlaştırıcı ajan kullanılan numunelerin, daha geniş bir spektralde pik verdiği tespit edilmiştir [104-109].

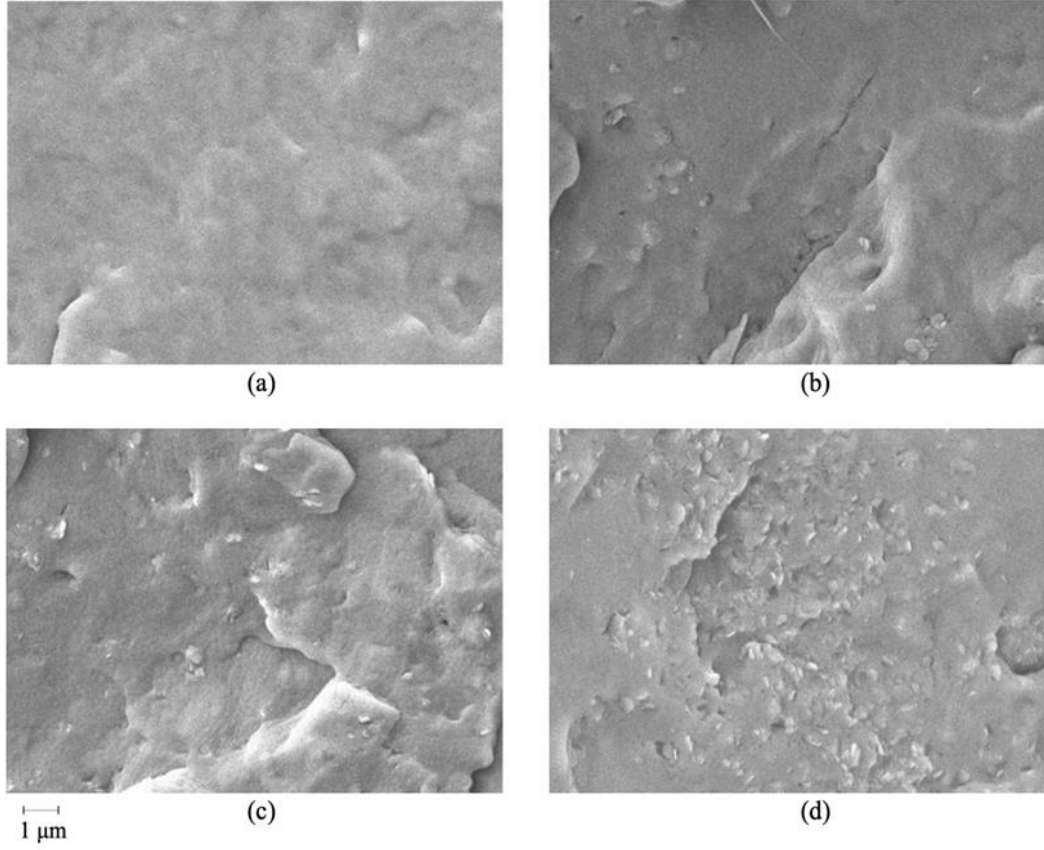
FTIR analiz sonuçları, hBN/SiC ve Ti/hBN/Ti/SiC katkıların PP matrisine başarılı bir şekilde dahil olduğunu göstermektedir. Katkı oranları arttıkça, belirgin kaymalar, pik genişlemeleri ve yoğunluk değişiklikleri gözlemlenmiştir, bu durum da katkı-matris etkileşimlerinin güçlendiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar Ti/hBN/Ti/SiC katkıların, hBN/SiC katkıları ile kıyasla daha belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

5.3 Taramalı Elektron Mikroskobu Analiz Sonuçları

Hazırlanan saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin SEM görüntüleri x8000 büyütme oranında kaydedilmiştir. Saf PP numunesi ile hBN/SiC katkılı nanokompozitlerin karşılaştırmalı görüntüleri Şekil 5.3'de, saf PP numunesi ile Ti ile kaplanmış katkıları (Ti/hBN/Ti/SiC) içeren nanokompozitlerin görüntüleri ise Şekil 5.4'de sunulmuştur. Şekil 5.3 incelendiğinde, PP/hBN/SiC nanokompozit yapısında katkıların homojen bir şekilde dağılmadığı ve hBN/SiC toplam katkı oranı arttıkça topaklanmaların olduğu gözlemlenmiştir. Bu topaklanmaların boyutları genellikle 1-5 μm arasında değişmekte ve yüzeyin belirli bölgelerinde yoğunlaşarak nanokompozitin homojenliğini olumsuz etkilemektedir. Literatürde, hBN içeren PP kompozitlerinde dolgu maddesi oranı arttıkça topaklanmaların olduğu ve bunun da malzemenin mekanik özelliklerini etkilediği rapor edilmiştir [87].

Diğer taraftan, Şekil 5.4'de, titanat uyumlaştırıcı ajanının etkisini anlamak adına yapılan analizler, bu ajanın katkı maddelerinin nanokompozit matris içinde daha homojen bir şekilde dağılmasına yardımcı olduğunu göstermektedir. Titanat kaplamanın, katkı maddelerinin yüzey enerjisini düşürerek PP matrisiyle uyumunu artırdığı ve böylece daha iyi dağılma özellikleri sağladığı düşünülmektedir.

Literatürde, titanate uyumlaştırıcı ajan kullanımının, polimer nanokompozitlerinde partikül dispersiyonunu iyileştirerek mekanik ve termal özellikleri artırdığına dair bulgular mevcuttur [91].



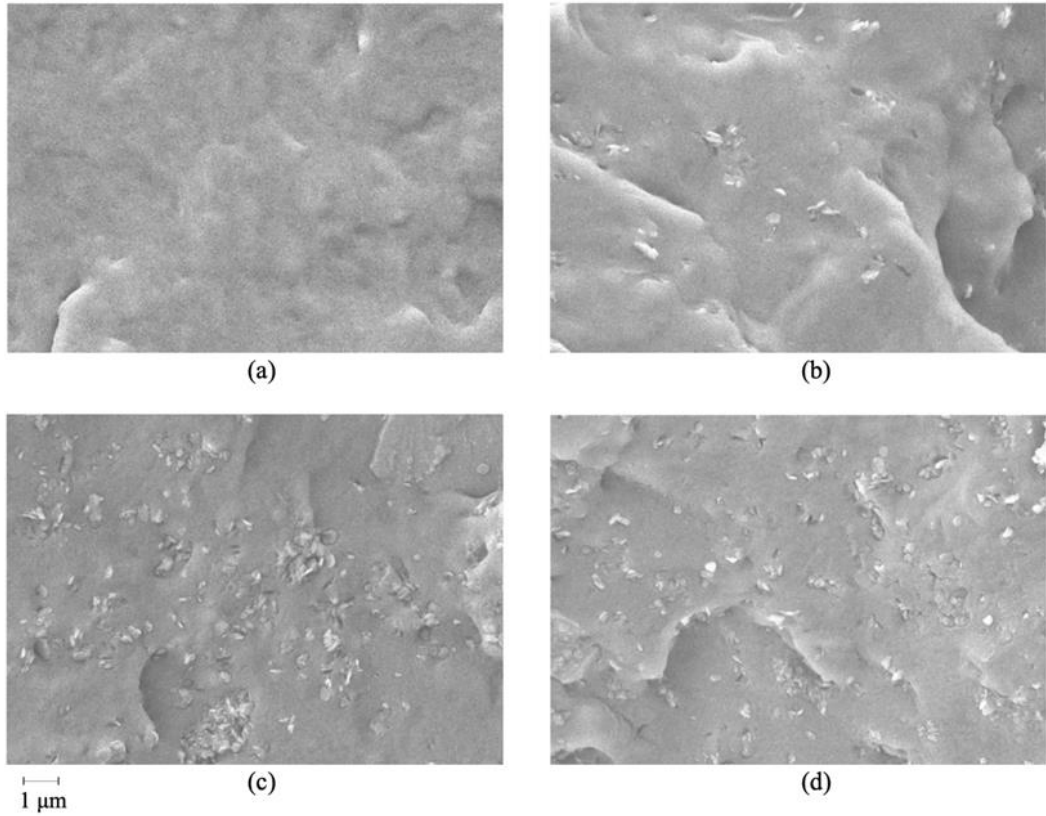
Şekil 5.3 : Saf PP ve PPX nanokompozitlerin x8000 büyütmede kaydedilen SEM görüntüleri: a) PP, b) PP20, c) PP40 ve d) PP50.

Sonuç olarak, SEM analizleri, nanokompozitlerin mikroyapısındaki katkıların homojenliği ve dağılımının, kullanılan uyumlaştırıcı ajan türüne ve katkı oranına bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. hBN/SiC katkılarının yüksek konsantrasyonlarda topaklanma eğilimi sergilediği, ancak titanat kaplı hBN/SiC katkılarının bu sorunu önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Bu bulgular, nanokompozit tasarımında uyumlaştırıcı ajan seçiminin kritik önemini vurgulamakta ve literatürdeki benzer çalışmalarla uyum göstermektedir.

5.4 Mekanik Özelliklerin İncelenmesi

5.4.1 Çekme testi sonuçları

Bu çalışmada üretilen saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin elastik modülü, çekme dayanımı ve kopmadaki uzama değerleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.2’de özetlenmiştir ve sırası ile numunelerin elastik modülü, çekme dayanımı ve kopmadaki uzama değişimleri Şekil 5.5, 5.6 ve 5.7’de sunulmuştur.



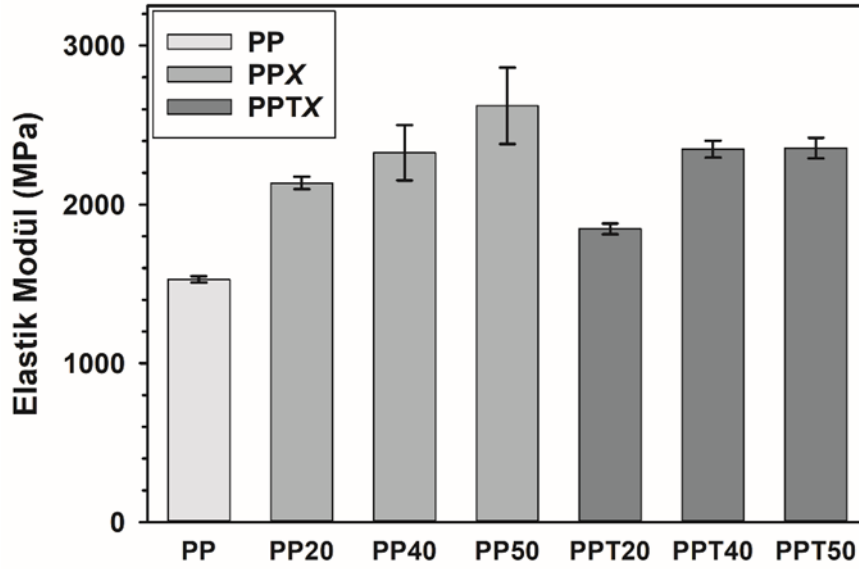
Şekil 5.4 : Saf PP ve PPTX nanokompozitlerin x8000 büyütmede kaydedilen SEM görüntüleri: a) PP, b) PPT20, c) PPT40 ve d) PPT50.

Şekil 5.5’den görüleceği üzere, malzemelerin elastik modülü, PP içindeki katkı oranıyla neredeyse doğrusal olarak artmaktadır ve saf PP’ye kıyasla tüm numunelerin elastik modülünün daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, genel anlamda kompozit yapıların sertliğinin ve kırılabilirliğinin arttığını göstermektedir. Ancak, bu artışın titanat ile kaplanmış katkılar ile üretilen nanokompozitlerde daha düşük seviyede olduğu anlaşılmıştır. Bu sonuçlar literatürdeki Ti ile uyumlaştırılmış PP kompozitler için elde edilen sonuçlar ile örtüşmektedir [87,90,110].

Çizelge 5.2 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin çekme testi sonuçları.

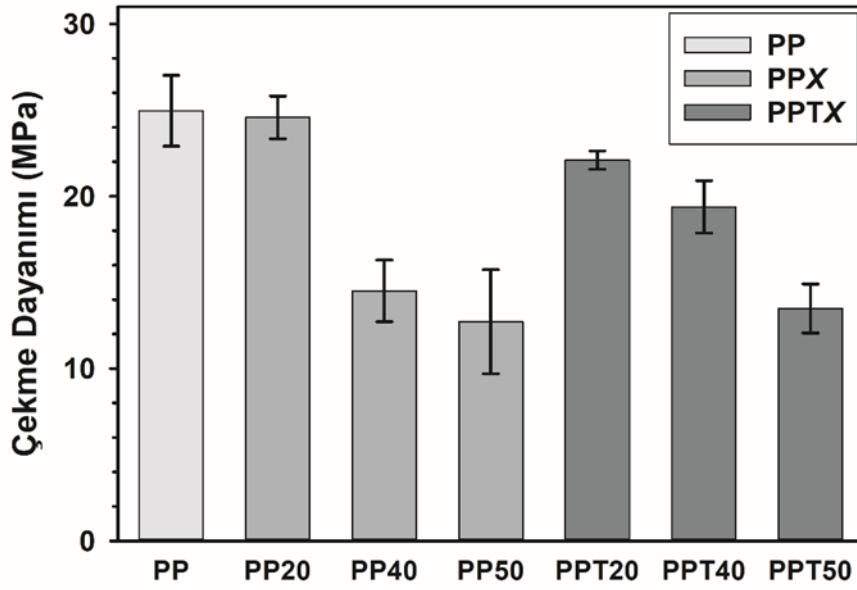
Numune Adı	Elastik Modül (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopmadaki Uzama (%)
PP	1529 ± 19	24,96 ± 2,05	3,27 ± 0,49
PP20	2136 ± 39	24,57 ± 1,24	1,98 ± 0,16
PP40	2326 ± 174	14,50 ± 1,80	0,86 ± 0,18
PP50	2621 ± 240	12,72 ± 3,03	0,65 ± 0,15
PPT20	1847 ± 34	22,10 ± 0,53	2,360 ± 0,003
PPT40	2349 ± 53	19,39 ± 1,51	1,50 ± 0,15
PPT50	2355 ± 65,17	13,49 ± 1,430	0,90 ± 0,14

Nanokompozit numunelerin çekme dayanımı değerleri incelendiğinde, Şekil 5.6'dan görüleceği üzere katkı miktarı arttıkça çekme dayanımı bir düşüş sergilemiştir ve bu eğilimin yüksek katkı oranlarında (ağ.%40 ve ağ.%50) daha belirgin olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, kompozit yapılarda perkolasyon eşiği ile açıklanabilir. Bu kritik katkı oranı öncesi ve sonrası yapı içerisindeki katkıların dağılımı değişmektedir ve bu nedenle farklı davranışlar elde edilebilmektedir [111]. Eşik katkı oranına kadar matris içerisinde katkıların iyi bir dağılımı sağlanabilirken, bu kritik noktadan sonra, homojen bir dağılım sağlanamaz ve yapı içerisinde katkıların topaklanmasından dolayı, mekanik özelliklere bir düşüş gözlemlenir. SEM görüntüleri nanokompozitlerde gözlemlenen bu düşüş eğilimini desteklemektedir. Uyumlaştırıcı ajanın etkisi değerlendirildiğinde, özellikle ağırlıkça %40 Ti/hBN/Ti/SiC içeren kompozit yapının çekme dayanımında, hBN/SiC içeren kompozit yapıya kıyasla, %34 değerinde bir artış olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.5 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin elastik modül sonuçları.

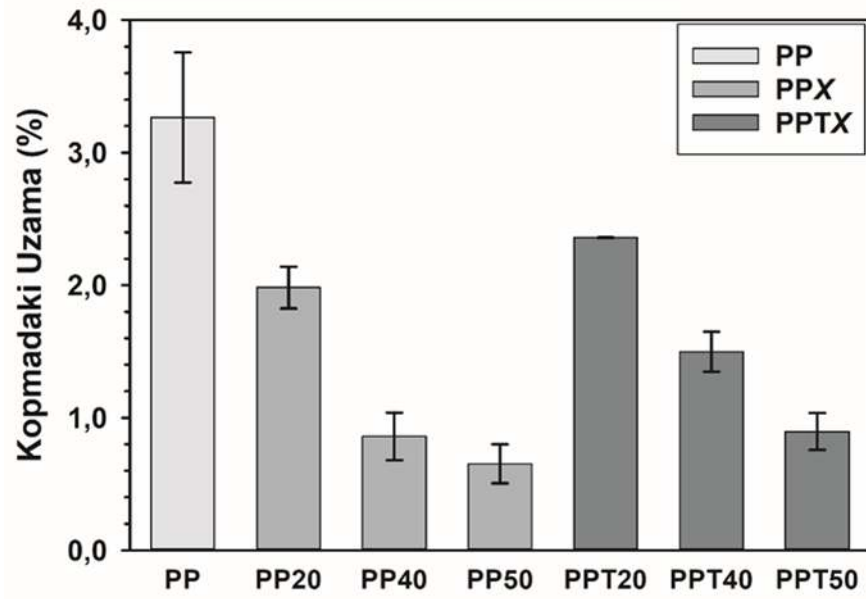
Şekil 5.7’de verilen kopmadaki uzama sonuçlarına göre ise, PPX ve PPTX numunelerinde, uzama oranının katkı miktarı ile doğru orantılı olarak azaldığı görülmektedir. Ayrıca, Ti kaplaması ile hazırlanan numunelerde (PPTX), kopmadaki uzama oranının PPX numunelere kıyasla daha yüksek olduğu ve esnekliğin bir miktar geri kazanıldığı gözlenmiştir. Bu sonuçlara göre Ti uyumlaştırıcı ajan ile kaplamanın nanokompozitlerin esnekliğini belli ölçüde geri kazanmalarını sağladığı söylenebilir. Özellikle ağırlıkça %40 Ti/hBN/Ti/SiC katkılı kompozit yapının kopmadaki uzamasında, hBN/SiC içeren kompozit yapı ile kıyasla, %57 değerinde bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada gözlemlenen çekme testi sonuçları, literatürde bulunan kompozit malzemelerdeki tipik eğilimlerle uyumlu olduğu anlaşılmıştır [90,110,111]. Katkılarının eklenmesi elastik modülünü artırmakta ancak çekme dayanımını ve kopmadaki uzama değerlerini azaltarak PP’yi, özellikle daha yüksek katkı oranlarında daha kırılgan hale getirmektedir. Ti ile kaplanmış katkıları içeren PPTX nanokompozitlerinde ise, uyumlaştırıcı olmayan nanokompozitlere kıyasla maksimum gerilme korunmuş ve kırılganlık azalmıştır.



Şekil 5.6 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin çekme dayanımı sonuçları.

5.4.2 Darbe testi sonuçları

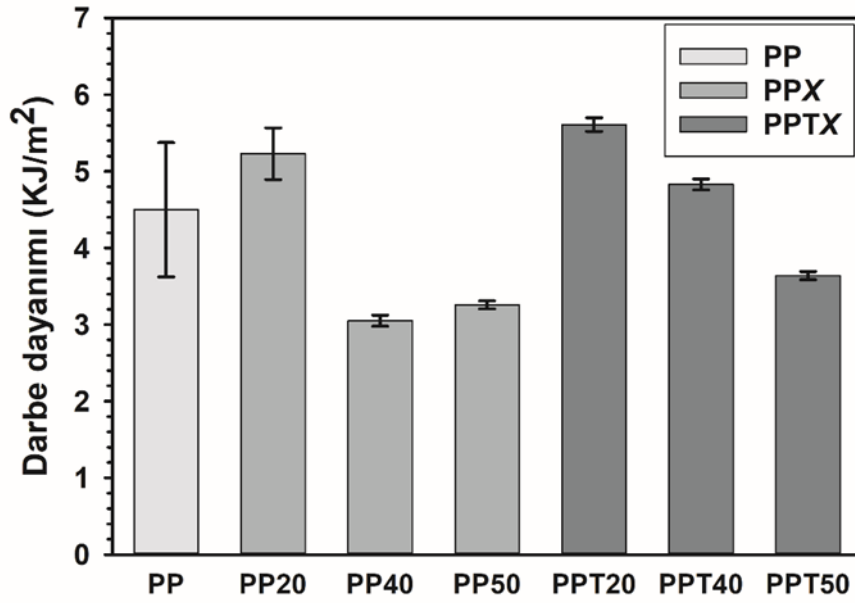
Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin darbe dayanımı değerleri Çizelge 5.3’de özetlenmiş ve Şekil 5.8’de sunulmuştur. Darbe testi sonuçları incelendiğinde hem PPTX hem de PPX numunelerinde katkı miktarı arttıkça darbe emiciliği düşüş eğiliminde olduğu görülmektedir. PPTX ve PPX numuneleri karşılaştırıldığında, uyumlaştırıcı olarak Ti kullanımının, kaplamasız katkılara kıyasla önemli bir etkisinin olduğu sonucuna varılabilir. Genel olarak elde edilen sonuçlar, artan katkı oranının darbe dayanımını azalttığı katkılı polimer kompozitlerin genel davranışı ile tutarlıdır ve uyumlaştırıcı ajan kullanımının özellikle ağırlıkça %40 Ti/hBN/Ti/SiC katkılı kompozit yapının darbe dayanımında, hBN/SiC içeren kompozit yapı ile kıyasla, %63 değerinde bir iyileştirme sağladığı gözlemlenmiştir [110,112,120-122].



Şekil 5.7 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin kopmadaki uzama sonuçları.

Çizelge 5.3 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin darbe testi sonuçları.

Numune Adı	Darbe dayanımı (KJ/m ²)
PP	4,50 ± 0,875
PP20	5,23 ± 0,338
PP40	3,05 ± 0,071
PP50	3,26 ± 0,053
PPT20	5,61 ± 0,088
PPT40	4,83 ± 0,071
PPT50	3,64 ± 0,053



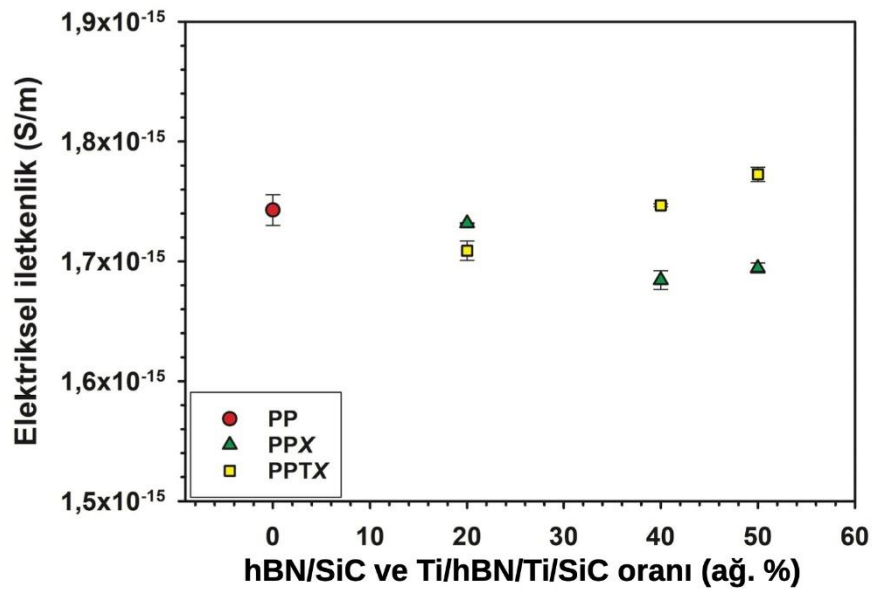
Şekil 5.8 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin darbe dayanımı sonuçları.

5.5 Elektriksel İletkenlik Analizi Sonuçları

Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin elektriksel iletkenlik analiz sonuçları Çizelge 5.4 ve Şekil 5.9’da verilmiştir. Saf PP numunesi için elde edilen elektriksel iletkenlik değeri, literatürde verilen 1×10^{-15} - 1×10^{-18} S/m aralığı ile örtüşmektedir [113]. Ayrıca, tüm nanokompozitlerin elektriksel iletkenlikleri, yalıtkanlık sınırı olan 10^{-6} S/m değerine göre ihmal edilebilir olduklarından, tamamı elektriksel yalıtkanlıklarını korumaktadırlar [114]. Şekil 5.9’da görüldüğü üzere, hBN/SiC katkılı PPX numunelerinde katkı oranı arttıkça elektriksel iletkenlik lineer olarak azalmaktadır. Bu durum Ti/hBN/Ti/SiC katkılı PPTX numunelerinde ise, PPT20 için PP’ye kıyasla yaklaşık %3 oranında bir azalmaya yol açmıştır. Ardından ise Ti/hBN/Ti/SiC katkı oranı arttıkça, elektriksel iletkenlik lineer olarak artmıştır. Bu sonuçlara göre hBN/SiC katkısının elektriksel iletkenliği azalttığı, Ti/hBN/Ti/SiC katkısının ise PP kompozitlerinde iletkenliği arttırdığı, ancak bu değişimler oransal olarak düşük seviyelerde kaldıklarından dolayı numunelerin yalıtkanlıklarının devam ettiği çıkarımı yapılabilir.

Çizelge 5.4 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin elektriksel iletkenlik sonuçları.

Numune Adı	Elektriksel iletkenlik (S/m)
PP	$1,743 \times 10^{-15} \pm 1,279 \times 10^{-17}$
PP20	$1,731 \times 10^{-15} \pm 4,477 \times 10^{-19}$
PP40	$1,684 \times 10^{-15} \pm 7,803 \times 10^{-18}$
PP50	$1,694 \times 10^{-15} \pm 4,199 \times 10^{-18}$
PPT20	$1,709 \times 10^{-15} \pm 8,092 \times 10^{-18}$
PPT40	$1,747 \times 10^{-15} \pm 1,220 \times 10^{-18}$
PPT50	$1,773 \times 10^{-15} \pm 6,043 \times 10^{-18}$



Şekil 5.9 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin elektriksel iletkenliklerinin hBN/SiC ve Ti/hBN/Ti/SiC oranına göre değişimi

5.6 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre Analizi Sonuçları

Bu çalışmada hazırlanan PPX ve PPTX ile saf PP numunelerin gerçekleştirilen DSC analizi sonuçları, 1. ısıtma için Şekil 5.10'da, 2. ısıtma için Şekil 5.11'de ve soğutma için Şekil 5.12'de verilmiştir. Ayrıca bu sonuçlar, hesaplanan kristalleşme oranları ile birlikte Çizelge 5.5'da özetlenmiştir. Numunelerin kristalleşme oranları Denklem 4.3 kullanılarak hesaplanmıştır ve katkı (hBN/SiC ve Ti/hBN/Ti/SiC) oranına bağlı olarak değişimleri Şekil 5.13'de sunulmuştur.

DSC analizi sonuçları, hBN/SiC veya Ti/hBN/Ti/SiC katkıların eklenmesinin PP matrisinin termal özelliklerini etkilediğini ve erime davranışı ile kristalleşmede bazı

farklılıklara yol açtığını göstermektedir. PPX ve PPTX numunelerinde kristalleşme oranlarının saf PP'ye kıyasla daha yüksek olduğu görünmektedir.

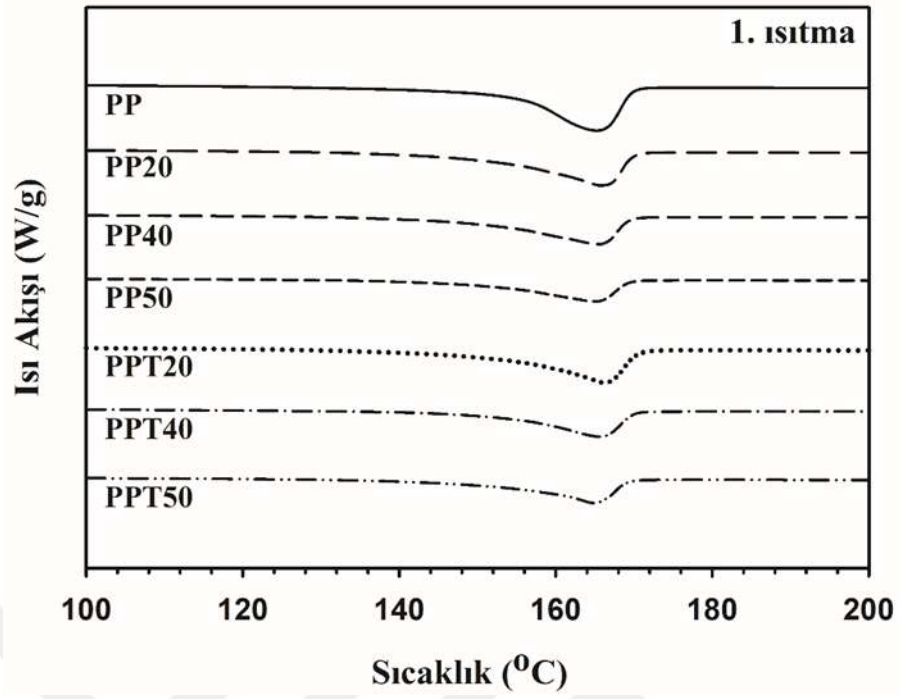
Tüm numuneler, katkıların eklenmesinden sonra, özellikle ağırlıkça %40 katkılı nanokompozitlerde, 161,7 °C'den 163,6 °C'ye ve titanat bağlayıcı ajanın varlığında 164,9 °C'ye hafifçe artan tek bir erime endotermik pik göstermiştir. 200 °C'den oda sıcaklığına kadar bir soğutma işleminden sonra belirlenen kristalleşme sıcaklığı, ters bir eğilim izleyerek saf PP ile kıyasla 115,3 °C'den farklı nanokompozitler için en fazla 129,4 °C'ye kadar artmıştır.

Çizelge 5.5 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin DSC analiz sonuçları.

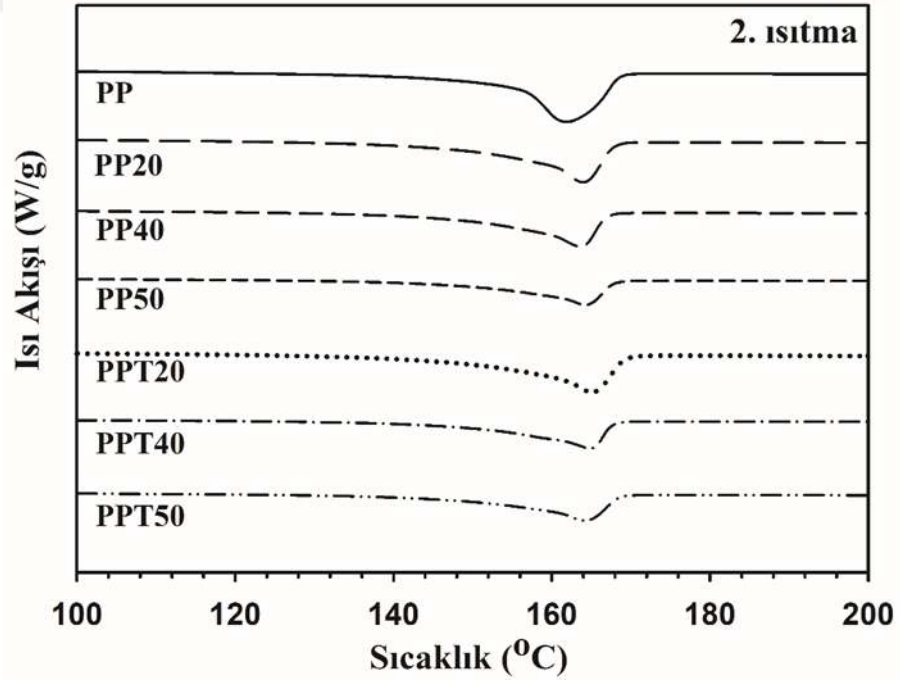
Numune Adı	1. Isıtma		2. Isıtma		Soğutma		X_c (%)
	T_m (°C)	ΔH_m	T_m (°C)	ΔH_m	T_c (°C)	ΔH_c	
PP	165,3	91,20	161,7	94,53	115,3	103,8	50,04
PP20	165,8	85,89	163,9	79,65	125,2	85,47	52,71
PP40	165,5	72,89	163,6	69,33	126,8	69,83	61,17
PP50	165,0	54,54	164,3	53,08	127,1	55,33	56,20
PPT20	166,2	86,36	165,1	83,43	126,5	85,17	55,21
PPT40	166,6	60,57	164,9	57,73	129,4	58,87	50,94
PPT50	164,9	58,18	164,2	58,93	127,2	61,30	62,39

Buna karşılık, PP matrisi içindeki katkıların eklenmesiyle kristalleşme oranı %50,04'ten en fazla PPT50 için %62,39'a çıkarıldığı görülmüştür. Bu durum, PP matrisinin kristalizasyonu için katkıların çekirdekleştirici etkisi ile açıklanabilir [85]. Öte yandan, bu çalışmada kullanılan farklı titanat uyumlaştırıcı ajanı ile katkıların kaplanması sonrası kristalleşme seviyesinin önemli ölçüde gelişmediği görülmektedir.

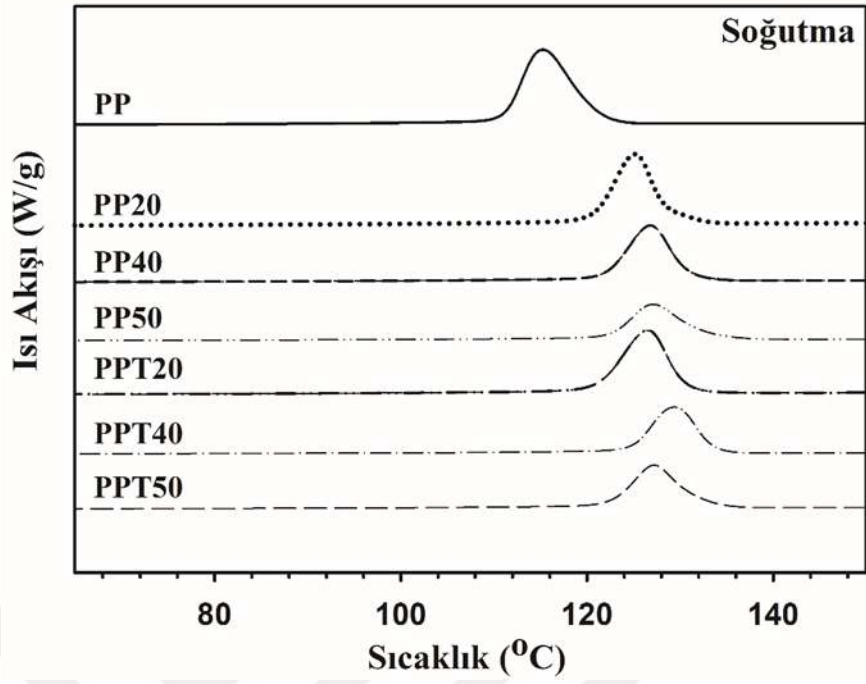
Kompozit yapı içerisinde bulunan kristalin bölgeler, daha yüksek modül değerleri sebebiyle, matris içerisinde katkı parçacıkları gibi davranarak kompozitin modül değerini iyileştirmektedir. Ancak, uygulanan titanat kaplama işleminin kristalleşme derecesinde önemli bir artışa neden olmadığından, bu durum ağırlıkça %40 Ti/hBN/Ti/SiC içeren kompozit yapının elastik modülünde, saf PP'ye kıyasla, %53,6 değerindeki önemli artışı açıklayamamaktadır.



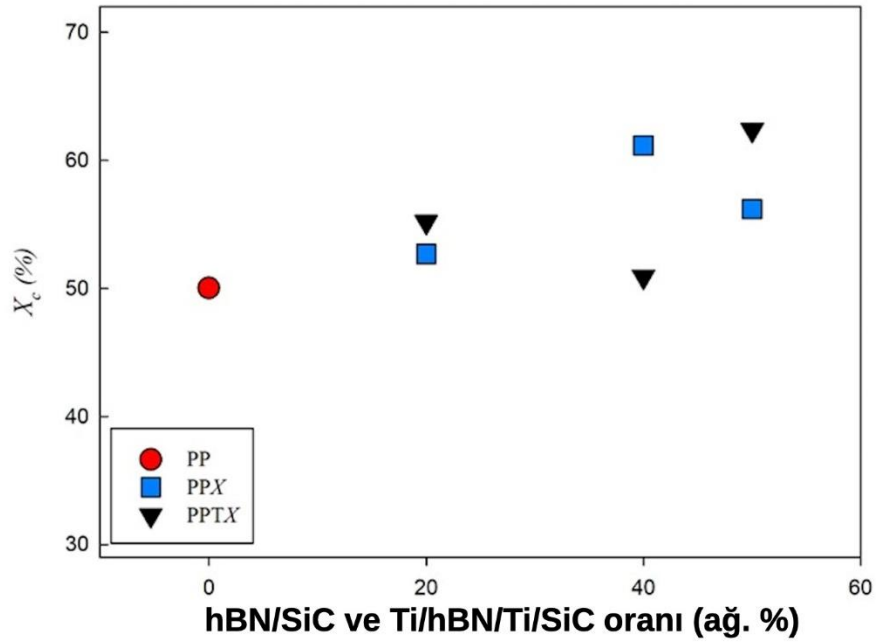
Şekil 5.10 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin DSC termogramları, 1. ısıtma.



Şekil 5.11 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin DSC termogramları, 2. ısıtma.



Şekil 5.12 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin DSC termogramları, soğutma.



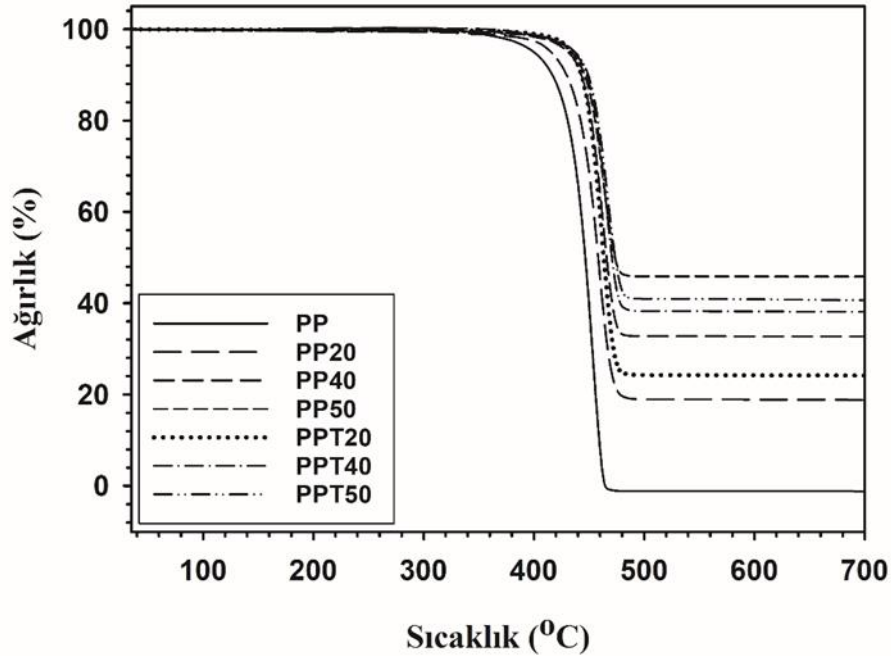
Şekil 5.13 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin kristalinite değerlerinin hBN/SiC ve Ti/hBN/Ti/SiC oranına göre değişimi.

5.7 Termal Gravimetrik Analiz Sonuçları

Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin termal gravimetrik analizleri sonucunda numunelerin T_{10} : kütlenin %10 değerine düştüğü sıcaklık, T_{max} : numunenin maksimum bozunma sıcaklığı ve yanma bittiğinde kalan kül oranı (%) değerleri elde edilmiştir. Numunelerin TGA termogramları Şekil 5.14’de sunulmuştur ve elde edilen T_{10} , T_{max} ve kül oranı değerleri Çizelge 5.6’da verilmiştir.

Çizelge 5.6 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin TGA analiz sonuçları.

Numune Adı	T_{10} (°C)	T_{max} (°C)	Kül Oranı (%)
PP	416,58	452,85	0,001
PP20	429,52	459,23	18,820
PP40	443,02	462,13	32,673
PP50	445,93	463,70	45,856
PPT20	442,85	462,49	24,154
PPT40	447,90	465,68	38,098
PPT50	449,27	467,07	40,611



Şekil 5.14 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin DSC termogramları.

Şekil 5.14’de görülebileceği gibi, tüm numuneler yaklaşık 400°C’den önce kütle kaybına uğramaz. Ti ile kaplanmış veya kaplanmış hBN/SiC katkılı PP’nin başlangıç bozunma sıcaklığı T_{10} yaklaşık 400°C’dir. Sonuçlar incelendiğinde, tüm kompozitlerin

termal bozunması bir aşamadan oluşmaktadır ve bu aşama 400°C-500°C aralığında PP matrisinin ısıl bozunma davranışını göstermektedir. Katkılar matrise eklendikten sonra PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin maksimum bozunma hızında T₁₀ bozunma sıcaklığının sırasıyla 416,58°C'den 445,93°C'ye ve 416,58°C'den 449,27°C'ye çıktığı görülmektedir. Ayrıca, titanat ile kaplanmış numunelerde, geliştirilmiş matris/katkı etkileşimi ve PP moleküler zincirinin termal hareketinin daha da kısıtlanması sebebiyle, PP/hBN/SiC kompozitlerine kıyasla kompozitlerin T_{max} değerini daha da iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürdeki bilgiler ile örtüşmektedir [90,116]. En yüksek artış ise ağırlıkça %50 Ti/hBN/Ti/SiC katkılı nanokompozit için elde edilmiştir.

5.8 Termal İletkenlik Analizi Sonuçları

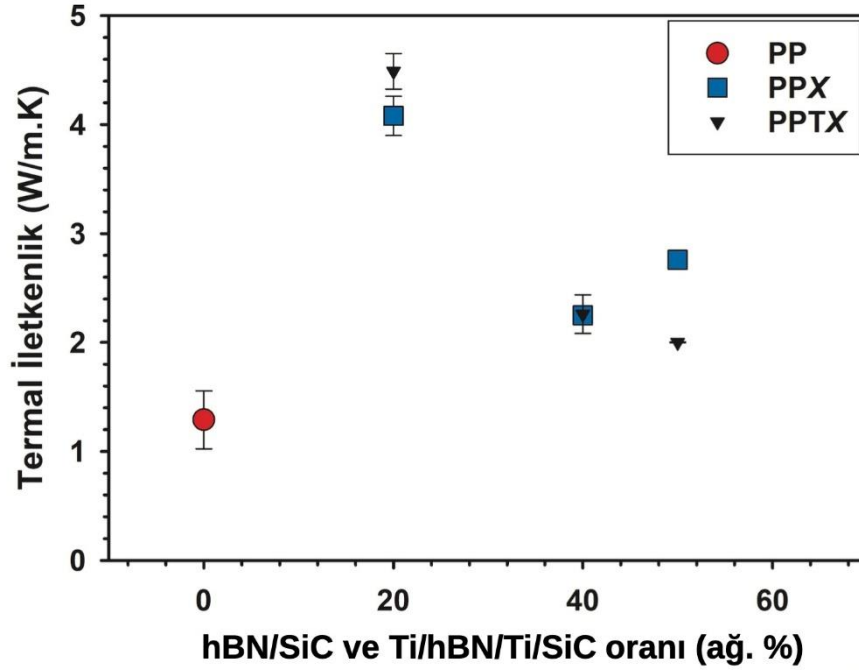
Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin termal iletkenlik sonuçları Çizelge 5.7'de özetlenmiş ve Şekil 5.15'de hBN/SiC ve Ti/hBN/Ti/SiC oranına bağlı olarak termal iletkenlik değerinin değişimi sunulmuştur.

Çizelge 5.7 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin termal iletkenlik sonuçları.

Numune Adı	Termal İletkenlik (W/m.K)
PP	1,29 ± 0,266
PP20	4,08 ± 0,180
PP40	2,25 ± 0,022
PP50	2,76 ± 0,004
PPT20	4,49 ± 0,164
PPT40	2,26 ± 0,178
PPT50	2,00 ± 0,004

Termal iletkenlik test sonuçları incelendiğinde, hBN ve SiC gibi katkıların polipropilen (PP) içerisine eklenmesinin tüm numunelerin termal iletkenliğini önemli ölçüde arttırdığı ve en yüksek artışın ağırlıkça %20 hBN/SiC ve Ti/hBN/Ti/SiC katkılı nanokompozitler için elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu durum, yapı içerisinde katkıların numunenin bir yüzeyinden diğer yüzeyine kadar düzgün bir iletken yol oluşturduğunu göstermektedir [87,111]. Bu optimum katkı oranında sonra, katkı miktarının artışı yapı içerisindeki katkıların topaklanmaya başlamasından kaynaklı termal iletkenlik değerinin düşmesine sebep olmuştur. Titanat ile kaplanmamış numunelerde, ağırlıkça %20 hBN/SiC katkılı nanokompozitin saf PP'ye kıyasla termal

iletkenlik değeriinde %216'lık bir artış görölmüştür. Titanat ile kaplanmış katkıları kullanıldığında bu artışın yine ağırlıkça %20 Ti/hBN/Ti/SiC katkılı nanokompozit için %248 değeriine ulaşmaktadır.



Şekil 5.15 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin termal iletkenlik değeriinin hBN/SiC ve Ti/hBN/Ti/SiC oranına göre değışimi.

5.9 Dikey Yanma Testi / UL 94-V

Hazırlanan saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin güvenlik yönetmelikleri gereğı yangın davranışlarını ve alev geciktiricilik özelliklerinin ölçülebilmeleri için dikey yanma testleri/UL 94-V yapılmıştır. Gerçekleştirilen testlerin sonuçları Çizelge 5.8'de, yanma süreleri ise Şekil 5.17'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre numunelerin tamamında alev yürümüş ve numuneler tamamen yanmıştır. Ayrıca numunelerden alev damlamış olup, damlayan alev referans pamuğunu da tutuşturmuştur. Gerçekleştirilen test sırasında alev damlamasını gösteren bir görüntü Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, numunelerin tamamı yandığı için, herhangi bir UL 94-V sınıflandırması yapılamamıştır. Son olarak Çizelge 5.8 incelendiğinde, Ti kaplanmış ya da kaplanmamış katkılı nanokompozitlerin tamamı, saf PP'den daha uzun süre yanmakta oldukları tespit edilmiştir. Burada katkı miktarının artması ile sürenin uzaması beklenen bir sonuç olsa da PP20, PPT20, PP40 ve PPT40 numunelerinde hemen hemen benzer sürelerde yanma görölmüştür. Ancak, PP50 ve PPT50 numunelerinin yanma süreleri, diğer

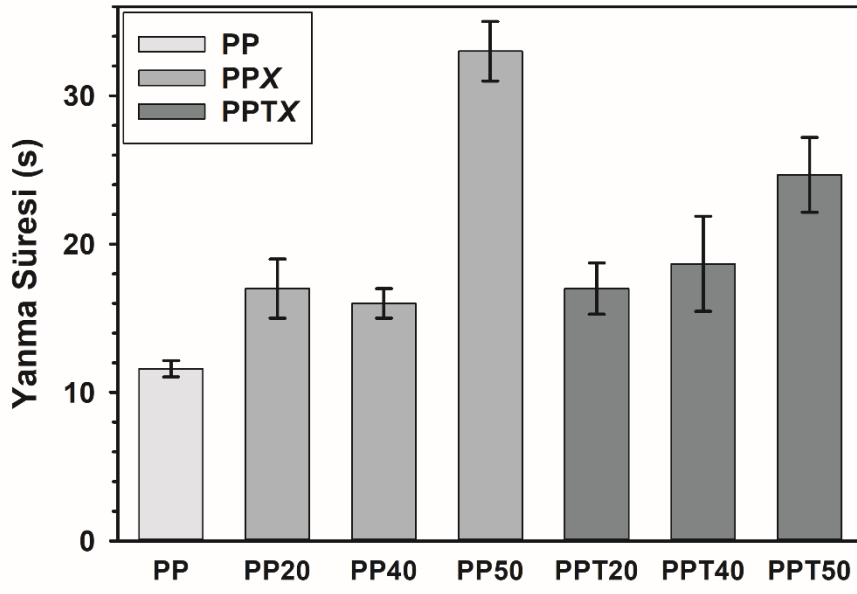
numunelere kıyasla belirgin şekilde artmıştır. Ayrıca, PPT50 numunesi, PP50 numunesinden yaklaşık 8,3 saniye daha hızlı yanmıştır. Yanma süresinin uzun olması, numunelerin uzunluklarının aynı olduğu dikkate alındığında, PP oranı azaldıkça ve katkı oranı arttıkça numunelerin daha yavaş yandığını göstermektedir. Bu sonuçlar literatürdeki hBN katkılı polimerlerin saf PP'ye göre daha yavaş yandıkları sonuçlar ile uyusmaktadır [17,32,117,118,119].

Çizelge 5.8 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin termal iletkenlik sonuçları.

Numune Adı	Yanma süresi (s)	Yanma durumu	Alev damlaması	Pamuk tutuşturma
PP	11,6 ± 0,550	Tamamı	Var	Var
PP20	17,0 ± 2,00	Tamamı	Var	Var
PP40	16,0 ± 1,00	Tamamı	Var	Var
PP50	33,0 ± 2,00	Tamamı	Var	Var
PPT20	17,0 ± 1,73	Tamamı	Var	Var
PPT40	18,7 ± 3,21	Tamamı	Var	Var
PPT50	24,7 ± 2,52	Tamamı	Var	Var



Şekil 5.16 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin dikey yanma/UL 94-V testindeki damlatma ve yanma görüntüleri.



Şekil 5.17 : Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin katkı oranına göre yanma süresinin değişimi.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, polipropilen matrise hegzagonal bor nitrür ve eşit miktarlarda silisyum karbür eklenerek, farklı katkı oranlarında PP/hBN/SiC, ve uyumlaştırıcı ajan tetraetil ortotitanat ile kaplanmış katkılar kullanarak aynı oranlarda PP/Ti/hBN/Ti/SiC polimer nanokompozitleri mekanik karıştırma ve basınçlı kalıplama yöntemleri kullanılarak üretilmiştir.

Yoğunluk analizi sonuçlarına göre, katkı oranı arttıkça numunelerin yoğunlukları da artmıştır ve bu durum, katkı maddelerinin yoğunluğunun PP'den yüksek olmasından dolayı beklenen bir sonuçtur. Ayrıca, uyumlaştırıcı ajan içeren ve içermeyen örneklerin benzer sonuçlar verdiği, katkı oranı arttıkça yoğunluğun da yükseldiği gözlemlenmiştir.

FTIR analizleri, hBN/SiC ve Ti/hBN/Ti/SiC katkılarının PP matrisine başarılı bir şekilde entegre olduğunu ortaya koymuştur. Katkı oranı arttıkça, matrisle etkileşimlerin güçlendiği, belirgin kaymalar ve pik genişlemelerinin gözlemlendiği görülmüştür. Ti/hBN/Ti/SiC katkılarının hBN/SiC katkılarından daha belirgin bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Kompozit numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelendiğinde, uyumlaştırıcı ajan olmayan katkıların PP matrisinde yeterince homojen dağılmadığı, katkı oranı arttıkça az da olsa topaklanmaların olduğu belirlenmiştir. Ancak, titanat uyumlaştırıcı ajanının kullanılmasının, katkı maddelerinin daha homojen bir şekilde dağılımını sağladığı ve bu sayede nanokompozitlerin daha düzgün bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Çalışılan numunelerin mekanik test sonuçlarına göre, elastik modül, katkı oranıyla doğru orantılı olarak artmış ve tüm numunelerin saf PP'ye göre daha sert olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, Ti kaplamalı katkı maddeleri kullanıldığında, elastik modül artışının daha düşük seviyelerde olduğu gözlemlenmişti. Çekme dayanımının ise düşük katkı oranlarında(%20) çok az, ancak özellikle yüksek katkı oranlarında (%40 ve %50) belirgin şekilde azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, perkolasyon eşiği

ile ilişkilendirilebilir ve katkıların yapıda homojen olmayan bir şekilde dağıldığı durumlarda mekanik özelliklerin azaldığı sonucu çıkartılabilir. Titanat kaplama ile yapılan nanokompozitlerde ise çekme dayanımının kaplamasız katkılı polimerlere göre arttığı görülmüştür. Kopma anındaki uzama, katkı oranı arttıkça azalmış, ancak Ti kaplamalı numunelerde uzama oranı daha yüksek, özellikle %40 Ti/hBN/Ti/SiC katkılı yapıda yaklaşık %57 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu, uyumlaştırıcı ajan olarak titanatın nanokompozitlerin esnekliğini geri kazandırma yeteneğine sahip olduğunu gösterebilir.

Darbe testleri sonuçlarına göre, katkı oranı arttıkça her iki grup numunede de darbe emiciliğinde bir azalma gözlemlenmiştir. Ancak, Ti kaplamalı numuneler (PPTX), kopma anındaki uzama değerindeki artışa benzer, kaplamasız numunelere (PPX) göre daha yüksek darbe dayanımı göstermiş ve özellikle %40 Ti/hBN/Ti/SiC katkılı kompozitler, hBN/SiC içerenlere göre %63 oranında iyileşme sağlamıştır. Bu sonuç, titanat uyumlaştırıcı ajanının darbe dayanımını artırmadaki ve kompozitlerin esnekliklerinin geri kazanımındaki etkisini göstermektedir.

Elektriksel iletkenlik test sonuçlarına göre, saf PP numunesinin elektriksel iletkenliği literatürde belirtilen değerlerle uyumludur ve tüm nanokompozitler, elektriksel iletkenlik açısından yalıtkanlık sınırının altında kalmaktadır. hBN/SiC katkılı PPX numunelerinde katkı oranı arttıkça elektriksel iletkenlik lineer olarak azalırken, Ti/hBN/Ti/SiC katkılı PPTX numunelerinde %3'lük bir azalma sonrası iletkenlik artmıştır. Sonuçlar, hBN/SiC katkısının elektriksel iletkenliği azalttığını, Ti/hBN/Ti/SiC katkısının ise iletkenliği artırdığını ancak her iki değişikliğin de yalıtkanlık özelliklerini etkilemeyecek kadar düşük seviyelerde kaldığını göstermektedir.

DSC analizleri, hBN/SiC ve Ti/hBN/Ti/SiC katkılarının PP matrisinin termal özelliklerini etkilediğini ve erime ile kristalleşme davranışında farklılıklara yol açtığını göstermektedir. Katkı oranı arttıkça, özellikle %40 katkılı nanokompozitlerde, kristalleşme oranı artmış ve erime sıcaklığı hafifçe yükselmiştir. Kristalleşme sıcaklığı, saf PP ile karşılaştırıldığında, farklı nanokompozitlerde 115,3°C'den 129,4°C'ye kadar yükselmiştir. Katkıların PP matrisinin kristalleşmesi üzerinde çekirdek oluşturuucu etkisi olduğu, ancak titanat uyumlaştırıcı ajanın kristalleşme seviyesinde önemli bir iyileşme sağlamadığı görülmüştür. Bu durum, titanat kaplamanın elastik modül üzerindeki etkisini açıklamakta yetersiz kalmıştır, ve %40

Ti/hBN/Ti/SiC içeren kompozitteki elastik modül artışı titanatın kristalleşme üzerindeki etkisiyle ilişkilendirilememiştir.

Saf PP, PP/hBN/SiC ve PP/Ti/hBN/Ti/SiC nanokompozitlerin termal gravimetrik analiz sonuçları, T_{10} , T_{max} ve kalan kül oranı gibi önemli termal özellikleri göstermektedir. Tüm numuneler yaklaşık 400°C'ye kadar kütle kaybına uğramamış, ancak katkı eklenmesiyle bozunma sıcaklıkları artmıştır. Ti ile kaplanmış numunelerde, matris ve katkı etkileşiminin güçlenmesi nedeniyle bozunma sıcaklıkları daha yüksek olmuştur. En yüksek artış, %50 Ti/hBN/Ti/SiC katkılı nanokompozitte gözlemlenmiştir ve bu sonuçlar literatürdeki bulgularla tutarlıdır.

Termal iletkenlik testleri, hBN ve SiC gibi katkıların PP içeriğine eklenmesinin numunelerin termal iletkenliğini belirgin şekilde artırdığını göstermiştir. En yüksek artış, ağırlıkça %20 hBN/SiC ve Ti/hBN/Ti/SiC katkılı nanokompozitlerde gözlemlenmiştir. Bu katkı oranında, yapı içinde katkı maddelerinin düzgün bir iletken yol oluşturduğu anlaşılmaktadır. Ancak, katkı oranı daha da arttıkça, katkıların topaklanmaya başlaması sonucu termal iletkenlikte bir azalma görülmüştür. Titanat ile kaplanmamış numunelerde %20 hBN/SiC katkılı nanokompozitlerin termal iletkenliği saf PP'ye kıyasla %216 artarken, titanat kaplamalı numunelerde bu artış %248'e çıkmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, tüm numuneler yandığı için UL94-V sınıflandırması yapılamamıştır. Ti kaplanmış ve kaplanmamış katkılı nanokompozitlerin tamamı, saf PP'ye göre daha uzun süre yanmıştır, ancak PP20, PPT20, PP40 ve PPT40 numunelerinde yanma süreleri birbirine oldukça yakındır. PP50 ve PPT50 numunelerinin yanma süreleri ise diğer numunelere göre belirgin şekilde artmıştır. İlginç olarak, PPT50 numunesi, PP50 numunesinden yaklaşık 8,3 saniye daha hızlı yanmıştır. Bu bulgular, katkı oranı arttıkça numunelerin daha yavaş yandığını ve hBN katkılı polimerlerin literatürdeki bulgularla uyumlu olarak saf PP'ye göre daha yavaş yandığını göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, polipropilen matrisine hexagonal bor nitrür (hBN) ve silisyum karbür katkılarının eklenmesinin, malzemenin mekanik, termal, elektriksel ve yangın dayanım özellikleri üzerinde önemli değişikliklere yol açtığını ortaya koymuştur. Katkı oranı arttıkça, PP'nin mekanik sertliği ve elastik modülü belirgin bir şekilde iyileşmiş, ancak yüksek katkı oranları, bazı mekanik özelliklerde düşüşlere yol

açmıştır. Bu kompozit formülasyonu için literatürde ilk defa kullanılan Titanat uyumlaştırıcı ajanının, katkıların daha homojen bir şekilde dağılımını sağlayarak nanokompozitlerin esneklik ve darbe dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir. Termal analizler, katkıların PP'nin ısı özelliklerini iyileştirdiğini, ancak bazı durumlarda aşırı katkı oranlarının istenmeyen etkiler yarattığını göstermektedir. Sonuçlar, bu nanokompozitlerin endüstriyel uygulamalar için potansiyel taşıdığını ancak optimizasyon ve katkı oranlarının dikkatlice seçilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu çalışma, polipropilen bazlı nanokompozitlerin performansını artırmaya yönelik daha ileri araştırmalara zemin hazırlayacaktır.



KAYNAKLAR

- [1] Bouckaert, S., Pales, A. F., McGlade, C., Remme, U., Wanner, B., Varro, L., D'Ambrosio, D., & Spencer, T. (2021). *Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector*. International Energy Agency.
- [2] International Energy Agency. (2023). *Global EV Data Explorer*. International Energy Agency. Retrieved April 27, 2023, from <https://www.iea.org/reports/global-ev-data-explorer>.
- [3] Duvar English. (2023). Turkey's electric car sales surge eightfold in 2023, data shows. Duvar English. Retrieved December 19, 2023, from <https://www.duvarenglish.com/turkeys-electric-car-sales-surge-eightfold-in-2023-data-shows-news-64256>.
- [4] Battery University. (2021). *BU-105: Battery definitions and what they mean*. Battery University. Retrieved December 19, 2024, from <https://batteryuniversity.com/article/bu-105-battery-definitions-and-what-they-mean>
- [5] Wikipedia (2024). *Low-emission zone*. Retrieved December 19, 2024, from https://en.wikipedia.org/wiki/Low-emission_zone
- [6] Dodd, T. (2023). How cities are clamping down on traffic to help fight emissions. Time. Retrieved December 19, 2024, from <https://time.com/7020410/traffic-emissions>
- [7] Afseth, A. (2021). *Aluminum battery enclosure design*. Constellium. Retrieved December 19, 2024, from <https://www.cargroup.org/wp-content/uploads/2021/02/Aluminum-Battery-Enclosures-Constellium-February-2021-FINAL.pdf>
- [8] Sanguesa, J. A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F. J., & Marquez-Barja, J. M. (2021). A review on electric vehicles: Technologies and challenges. *Smart Cities*, 4(1), 372–404.
- [9] Chian, T. Y., Wei, W. L. J., Ze, E. L. M., Ren, L. Z., Ping, Y. E., Abu Bakar, N. Z., Faizal, M., & Sivakumar, S. (2019). A review on recent progress of batteries for electric vehicles. *International Journal of Applied Engineering Research*, 14(24), 4441–4461.
- [10] Yıldız, G. (2019). *Polimer kompozit esaslı Li-ion batarya paketlerinin geliştirilmesi ve özelliklerinin araştırılması*. (Yüksek lisans tezi). Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [11] Väyrynen, A., & Salminen, J. (2012). Lithium ion battery production. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 46, 80–85.

- [12] **Bala, A., & Chaitanya Kamaraju, M.** (2020). *Design and optimization of battery housing in electric cars* Yüksek lisans tezi, Chalmers University of Technology.
- [13] **Wypych, G.** (2017). *Handbook of foaming and blowing agents*. Elsevier.
- [14] **Karger-Kocsis, J., & Bárány, T.** (2019). *Polypropylene handbook*. Switzerland: Springer Nature, Springer.
- [15] **Maier, C., & Calafut, T.** (1998). *Polypropylene: The definitive user's guide and databook*. William Andrew.
- [16] **Karian, H.** (2003). *Handbook of polypropylene and polypropylene composites, revised and expanded*. CRC Press.
- [17] **Maddah, H. A.** (2016). Polypropylene as a promising plastic: A review. *American Journal of Polymer Science*, 6(1), 1–11.
- [18] **He, F.-M., Liu, B.-W., Chen, L., Guo, D.-M., Ding, X.-M., Xiao, Y.-F., et al.** (2021). Novel polyamide 6 composites based on Schiff-base containing phosphonate oligomer: High flame retardancy, great processability, and mechanical property. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 146, 106423. Elsevier.
- [19] **Saldivar-Guerra, E., & Vivaldo-Lima, E.** (2013). *Handbook of polymer synthesis, characterization, and processing*. John Wiley & Sons.
- [20] **Deopura, B. L., Alagirusamy, R., Joshi, M., & Gupta, B.** (2008). *Polyesters and polyamides*. Elsevier.
- [21] **Kubo, S., & Kadla, J. F.** (2005). Lignin-based carbon fibers: Effect of synthetic polymer blending on fiber properties. *Journal of Polymers and the Environment*, 13(2), 97–105.
- [22] **Park, S.-J.** (2015). *Carbon fibers*. Springer Series in Materials Science.
- [23] **Chahal, R., Adnan, A., Reifsnider, K., Raihan, R., Wu, Y. T., Vadlamudi, V., & Elenchezian, M. R. P.** (2018). Molecular dynamics for the prediction of the interfacial shear stress and interface dielectric properties of carbon fiber epoxy composites. *Material Science*.
- [24] **ChemAnalyst.** (2023). *Carbon fiber market*. ChemAnalyst. 1 Ocak 2025, <https://www.chemanalyst.com/industry-report/carbon-fiber-market-676>
- [25] **Türkmen, İ.** (2012). *Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerde elyaf tabaka sayısına bağlı mekanik özelliklerin ve darbe dayanımının incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı.
- [26] **Yurddaş, Ç., & Afşar, E.** (2000). *CTP Teknolojisi* (4th ed., pp. 8–44). Cam Elyaf.
- [27] **Cam Elyaf.** (2023). *Cam elyaf üretim süreci, teknik detaylar ve ileri teknolojiler*. Erişim: 1 Ocak 2025, <https://camelyaf.net/cam-elyaf-uretim-sureci-teknik-detaylar-ve-ileri-teknolojiler>
- [28] **Sato, K., Horibe, H., Shirai, T., Hotta, Y., Nakano, H., Nagai, H., Mitsuishi, K., & Watari, K.** (2010). Thermally conductive composite films of

hexagonal boron nitride and polyimide with affinity-enhanced interfaces. *Journal of Materials Chemistry*, 20, 2749–2752.

- [29] **Huang, X., Jiang, P., & Tanaka, T.** (2011). A review of dielectric polymer composites with high thermal conductivity. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 27(4).
- [30] **Majety, S., Cao, X. K., Dahal, R., Pantha, B. N., Li, J., Lin, J. Y., & Jiang, H. X.** (2012). Semiconducting hexagonal boron nitride for deep ultraviolet photonics. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 8268, 70.
- [31] **Chakraborty, P., Xiong, G., Cao, L., & Wang, Y.** (2018). Lattice thermal transport in super hard hexagonal diamond and wurtzite boron nitride: A comparative study with cubic diamond and cubic boron nitride. *Carbon*, 139, 85–93.
- [32] **Wang, J., Ai, K., & Lu, L.** (2019). Flame-retardant porous hexagonal boron nitride for safe and effective radioactive iodine capture. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(28), 16850–16858.
- [33] **Yıldız, G., & Akkoyun Kurtlu, M.** (2021). Thermal and electrical properties of aluminum nitride/boron nitride filled polyamide 6 hybrid polymer composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(22), 50516.
- [34] **Shaffer, P. T.** (1991). *Handbook of advanced ceramic materials*. Advanced Refractory Technologies Inc., New York.
- [35] **Pierson, H. O.** (1996). *Handbook of refractory carbides and nitrides*. Noyes Publications, New Jersey.
- [36] **Feng, Z. C., & Zhao, J. H.** (2000). *Silicon carbide materials, processing and devices*. Taylor & Francis Books Inc., New York.
- [37] **Çınar, F., Gençkan, D., & Yücel, O.** (2012). Spark plasma sintering of B₄C-SiC composites. *Solid State Science*, 14, 1660–1663.
- [38] **Zawrah, M. F., & Shaw, L.** (2003). Liquid-phase sintering of SiC in presence of CaO. *Ceramics International*, 30, 721–725.
- [39] **Fan, J., & Chu, P. K.** (n.d.). *Silicon carbide nanostructures, engineering materials and processes* (pp. 7–9).
- [40] **Şahan, G. B.** (2010). *Hidroksiapatit katkılı yapay kemik kompozitlerin mekanik özelliklerine bağlayıcı ajanların etkileri* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [41] **Bonfield, W., Tanner, K. E., & Wang, M.** (1998). Interfaces in analogue biomaterials. *Acta Materialia*, 7, 2509–2518.
- [42] **Uygun, Y.** (2024). *Titanat bağlayıcı ajanının odun tozu katkılı sert poliüretan köpük kompozitlerin özelliklerine etkisinin araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Bursa Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Polimer Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı.
- [43] **Azhari, C. H., Elshereksi, N. W., Ghazali, M., & Muchtar, A.** (2017). Review of titanate coupling agents and their application for dental composite fabrication. *Dental Materials Journal*, 36(5), 539–552.

- [44] **Aizawa, M., Miyama, H., & Nosaka, Y.** (1990). Behavior of titanate coupling agent on TiO₂ particles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 139, 324–330.
- [45] **Monte, S. J.** (2002). Neoalkoxy titanate and zirconate coupling agent additives in thermoplastics. *Polymer and Polymer Composites*, 10, 121–172.
- [46] **Lizundia, E., Oleaga, A., Salazar, A., & Sarasua, J. R.** (2012). Nano- and microstructural effects on thermal properties of poly(L-lactide)/multi-wall carbon nanotube composites. *Polymer*, 53(12), 2412–2421.
- [47] **Peng, Z., & Kong, L. X.** (2007). A thermal degradation mechanism of polyvinyl alcohol/silica nanocomposites. *Polymer Degradation and Stability*, 92(5), 1061–1071.
- [48] **Wei, P., Han, Z., Xu, X., & Li, Z.** (2006). Synergistic flame retardant effect of SiO₂ in LLDPE/EVA/ATH blends. *Journal of Fire Science*, 24(6), 487–498.
- [49] **Yurddaskal, M., Nil, M., Ozturk, Y., & Celik, E.** (2017). Synergetic effect of antimony trioxide on the flame retardant and mechanical properties of polymer composites for consumer electronics applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(6), 4557–4563.
- [50] **Yesaswi, C. S., Satya, S. K., Sahu, S. K., Badgayan, N. D., Murthy, P. S. R., Kumar, V. M. R., & Sreekanth, P. S. R.** (2022). Thermal properties of polymer nanocomposites. In M. E. Hoque, K. Ramar, & A. Sharif (Eds.), *Advanced polymer nanocomposites* (pp. 99-143). Woodhead Publishing.
- [51] **Yuan, M., Brokken-Zijp, J. C. M., Huijbregts, L. J., & De With, G.** (2008). Filler size effects on the conductivity of polymer nanocomposites: Semiconductive phthalocyanine nanoparticles in epoxy matrices. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 46(10), 1071–1076.
- [52] **Du, F., Scogna, R. C., Zhou, W., Brand, S., Fischer, J. E., & Winey, K. I.** (2004). Nanotube networks in polymer nanocomposites: Rheology and electrical properties. *Macromolecules*, 37(24), 9048–9055.
- [53] **Knite, M., Teteris, V., Kiploka, A., & Kaupužs, J.** (2004). Polyisoprene-carbon black nanocomposites as tensile strain and pressure sensor materials. *Sensors and Actuators A: Physical*, 110(1), 142–149.
- [54] **Chen, G., Wu, D., Weng, W., & Yan, W.** (2001). Dispersion of graphite nanosheets in a polymer matrix and the conducting property of the nanocomposites. *Polymer Engineering and Science*, 41(12), 2148–2154.
- [55] **Magaraphan, R., Lilayuthalert, R., Sirivat, A., & Schwank, J. W.** (2001). Preparation, structure, properties, and thermal behavior of rigid-rod polyimide/montmorillonite nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 61(8), 1253–1264.
- [56] **Roy, M., Nelson, J. K., MacCrone, R. K., Schadler, L. S., Reed, C. W., & Keefe, R.** (2005). Polymer nanocomposite dielectrics: The role of the

- interface. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 12(4), 629–643.
- [57] **Tanaka, T.** (2005). Dielectric nanocomposites with insulating properties. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 12(6), 914–928.
- [58] **Qian, J., He, P., & Nie, K.** (2004). Nonisothermal crystallization of PP/nano-SiO₂ composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 91(3), 1013–1019.
- [59] **Hasan, M., Zhou, Y., Mahfuz, H., & Jeelani, S.** (2006). Effects of SiO₂ nanoparticles on the thermal and tensile behavior of nylon-6. *Materials Science and Engineering A*, 429, 181–188.
- [60] **Xiong, C., Lu, S., Wang, D., Dong, L., Jiang, D.D., & Wang, Q.** (2005). **Microporous polyvinyl chloride: novel reactor for PVC/CaCO₃ nanocomposites.** *Nanotechnology*, 16, 1787–1792. 1013–1019.
- [61] **Cho, J.W., & Paul, D.R.** (2001). Nylon-6 nanocomposites by melt compounding. *Polymer*, 42, 1083–1094.
- [62] **Chen, N., Wan, C., Zhang, Y., & Zhang, Y.** (2004). Effect of nano-CaCO₃ on mechanical properties of PVC and PVC/Blendex blend. *Polymer Testing*, 23, 169–174.
- [63] **Sun, S., Li, C., Zhang, L., Du, H., & Gray, J.S.B.** (2006). Interfacial structures and mechanical properties of PVC composites reinforced by CaCO₃ with different particle sizes and surface treatments. *Polymer International*, 55, 158–164.
- [64] **Ozmusul, M. S.** (2006). Nanoscale structure and mechanical behavior of polymer nanocomposites. *PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute*.
- [65] **Sun, C.C., & Mark, J.E.** (1989). Comparisons among the reinforcing effects provided by various silica-based fillers in a siloxane elastomer. *Polymer*, 30(1), 104–106.
- [66] **Zuiderduin, W.C.J., Westzaan, C., Huetink, J., & Gaymans, R.J.** (2003). Toughening of polypropylene with calcium carbonate particles. *Polymer*, 44(1), 261–275.
- [67] **Cho, J.W., Joshi, M.S., & Sun, C.T.** (2006). Effect of inclusion size on mechanical properties of polymeric composites with micro and nano particles. *Composites Science and Technology*, 66(12), 1941–1952.
- [68] **Park, S.-J.** (2015). *Carbon fibers*. Springer Series in Materials Science.
- [69] **Yu SZ., Hing P., Hu X.** (2002). Thermal conductivity of polystyrene-aluminum nitride composite, *Composites A*, 33:289–92.
- [70] **Hong JP., Yoon SW., Hwang T., Oh JS., Hong SC., Lee Y., Nam JD.** (2012). High thermal conductivity epoxy composites with bimodal distribution of aluminum nitride and boron nitride fillers, *Thermochim. Acta.*, 537:70–5.
- [71] **Zhou TL., Wang X., Mingyuan GU., Liu XH.** (2008). Study of the thermal conduction mechanism of nano SiC/DGEBA/EMI-2,4 composites, *Polymer*, 49:4666–72.

- [72] **Chen, H., Ginzburg, V. V., Yang, J., Yang, Y., Liu, W., Huang, Y., Du, L., & Chen, B.** (2016). Thermal conductivity of polymer-based composites: Fundamentals and applications. *Progress in Polymer Science*, 59, 41–85.
- [73] **Chung, C. I.** (2020). *Extrusion of polymers: Theory and practice* (3rd ed.). Hanser Publishers.
- [74] **Echte, A.** (1993). *Handbuch der Technischen Polymerchemie* (pp. 74–83). VCH Verlagsgemeinschaft.
- [75] **Mount, E. M.** (2017). III. Extrusion processes. In *Applied plastics engineering handbook* (2nd ed., pp. 217–264). Processing, materials, and applications. Elsevier.
- [78] **Çavdar, A.** (2017). *Plastik enjeksiyon kalıpcılığında çarpılma ve iklimik koşullarda mekanik deformasyon önleme* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Konstrüksiyon Bilim Dalı.
- [79] **Tatara, R. A.** (2017). Compression molding. In *Applied plastics engineering handbook* (2nd ed., pp. 291–320). Elsevier.
- [80] **Wulfsberg, J., Herrmann, A., & Ziegmann, G.** (2014). Combination of carbon fibre sheet moulding compound and prepreg compression moulding in aerospace industry. *Procedia Engineering*, 81, 1601–1607.
- [81] **Chaitanya, S., Singh, A. P., & Singh, I.** (2017). Processing of lignocellulosic fiber-reinforced biodegradable composites. In *Natural fiber-reinforced biodegradable and bioresorbable polymer composites* (pp. 163–181). Elsevier.
- [82] **Penjumras, P., AbdulRahman, R., Talib, R. A., & Abdan, K.** (2016). Effect of silane coupling agent on properties of biocomposites based on poly(lactic acid) and durian rind cellulose. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 137, 012006.
- [83] **Walsh, D. J.** (1989). Polymer blends. In G. Allen & J. C. Bevington (Eds.), *Comprehensive polymer science and supplements* (pp. 135–154). Pergamon.
- [84] **Mao, Z., Zhou, Z., Zhang, J., & Wang, T.** (2022). Comparison between randomly distributed structure and 3D segregated structure in chlorinated polyethylene/MWCNT composites: electrical conductivity, mechanical property, flame resistance, and rheological property. *Chemical Engineering Journal*, 221, 109338.
- [85] **Liu, B., Li, Y., Fei, T., Han, S., Xia, C., Shan, Z., & Jiang, J.** (2020). Highly thermally conductive polystyrene/polypropylene/boron nitride T composites with 3D segregated structure prepared by solution-mixing and hot-pressing method. *Chemical Engineering Journal*, 385, 123829.
- [86] **Wang, L., Zhang, L., Fischer, A., Zhong, Y., Drummer, D., & Wu, W.** (2018). Enhanced thermal conductivity and flame retardancy of polyamide 6/flame retardant composites with hexagonal boron nitride. *Journal of Polymer Engineering*, 38(8), 767–774.

- [87] **Muratov, D. S., Vanyushin, V. O., & Luchnikov, L.** (2021). Improved thermal conductivity of polypropylene filled with exfoliated hexagonal boron nitride (hBN) particles. *Materials Research Express*, 8(3), 035301.
- [88] **Accuratus.** (2020). *Silicon carbide SiC material properties*. Accuratus. Retrieved December 20, 2024, from <https://accuratus.com/silicar.html>
- [89] **Patra, B., Biswal, A., Swain, S., Behera, L., & Swain, S. K.** (2024). Role of nano SiC in enhancement of mechanical, barrier, and flame-retardant properties of PANI-co-PAA films. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 63(5), 504–517.
- [90] **Shuang, L., Zhang, Y., Han, J., & Zhou, Y.** (2013). Effect of carbon particle and carbon fiber on the microstructure and mechanical properties of short fiber reinforced reaction bonded silicon carbide composite. *Journal of the European Ceramic Society*, 33(5), 887-896.
- [91] **Kemal, I., Whittle, A., Burford, R., Vodenitcharova, T., & Hoffman, M.** (2012). Toughening of unmodified polyvinylchloride through the addition of nanoparticulate calcium carbonate and titanate coupling agent. *Journal of Applied Polymer Science*, 127(3), 2339–2353.
- [92] **Kıvanç, M., Barutca, B., Koparal, A. T., Göncü, Y., Bostancı, S. H., & Ay, N.** (2018). Effects of hexagonal boron nitride nanoparticles on antimicrobial and antibiofilm activities, cell viability. *Materials Science and Engineering: C*, 91, 115–124.
- [93] **Monte, S. J.** (2001). Titanate and zirconate coupling agents in foamed polymers. *Cellular Polymers*, 20(3), 149–188.
- [94] **Monte, S. J., & Sugerman, G.** (1984). Processing of composites with titanate coupling agents - a review. *Polymer Engineering and Science*, 24, 1369–1382.
- [95] **Anstey, A., Codou, A., Misra, M., & Mohanty, A. K.** (2018). Novel compatibilized nylon-based ternary blends with polypropylene and poly(lactic acid): fractionated crystallization phenomena and mechanical performance. *ACS Omega*, 3, 2845–2854.
- [96] **López, J.P., Gironès, J., Méndez, J.A., El Mansouri, N.-E., Llop, M., Mutjé, P., & Vilaseca, F.** (2012). Stone-ground wood pulp-reinforced polypropylene composites: Water uptake and thermal properties. *BioResources*, 7(4), 5478-5487. doi:10.15376/biores.7.4.5478-5487.
- [97] **Tuna, S.** (2022). *Sıkıştırılmalı kalıplama yöntemi ile PLA esaslı polimerik kompozit köpüklerin üretimi ve özelliklerinin araştırılması*. (Doktora tezi). Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [98] **UL standards on flammability of plastic materials.** (2023). Northbrook, IL: Underwriters Laboratories.
- [99] **Lin, Y., Wang, S., Chen, X., & Li, Y.** (2011). Surface charges and optical characteristic of colloidal cubic SiC nanocrystals. *Journal of Applied Physics*, 109(4), 044301.
- [100] **Ployetchara, N., Suppakul, P., Atong, D., & Pechyen, C.** (2014). Blend of polypropylene/poly(lactic acid) for medical packaging application:

Physicochemical, thermal, mechanical, and barrier properties. *Energy Procedia*, 56, 201–210.

- [101] **Wypych, G.** (2012). *Handbook of Polymers*. ChemTec Publishing, 680 pages. ISBN 978-1-895198-47-8.
- [102] **Lin, S.** (2013). Review of *Handbook of Polymers* by George Wypych. *Polymers*, 5(1), 225–233.
- [103] **Linares, A. B., Jiménez, J. C., López, P., & Rojas de Gascue, B.** (2019). Biodegradability study by FTIR and DSC of polymer films based on polypropylene and cassava starch. *Orbital: The Electronic Journal of Chemistry*, 11(2), 71–82.
- [104] **NIST.** (2023). Chemical Book: Formaldehyde. Retrieved December 19, 2024, <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgiID=C10043115&Mask=80>.
- [105] **Li, S., Yang, T., Zou, H., Liang, M., & Chen, Y.** (2016). Enhancement in thermal conductivity and mechanical properties via large-scale fabrication of boron nitride nanosheets. *High Performance Polymers*, 29(3).
- [106] **Lee, D. J., Lee, B., Park, K. H., Ryu, H. J., Jeon, S., & Hong, S. H.** (2015). Scalable exfoliation process for highly soluble boron nitride nanoplatelets by hydroxide-assisted ball milling. *Nano Letters*, 15, 1238–1244.
- [107] **Yuan, F., Jiao, W. C., Yang, F., Liu, W. B., Liu, J. Y., & Xu, Z. H.** (2017). Scalable exfoliation for large-size boron nitride nanosheets by low-temperature thermal expansion-assisted ultrasonic exfoliation. *Journal of Materials Chemistry C*, 5, 6359–6368.
- [108] **Wu, X., Liu, H., Tang, Z. H., & Guo, B. C.** (2016). Scalable fabrication of thermally conductive elastomer/boron nitride nanosheets composites by slurry compounding. *Composites Science and Technology*, 123, 179–186.
- [109] **Lin, Y., Williams, T. V., Xu, T. B., Cao, W., Elsayed-Ali, H. E., & Connell, J. W.** (2011). Aqueous dispersions of few-layered and monolayered hexagonal boron nitride nanosheets from sonication-assisted hydrolysis: Critical role of water. *Journal of Physical Chemistry C*, 115, 2679–2685.
- [110] **Kulkarni, M. B., & Mahanwar, P. A.** (2016). Studies on effect of titanate-coupling agent (0.5, 1.5, and 2.5%) on the mechanical, thermal, and morphological properties of fly ash-filled polypropylene composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 29(3), 344–365.
- [111] **Yuan, W., Lu, Y., & Xu, S.** (2016). Synthesis of a new titanate coupling agent for the modification of calcium sulfate whisker in poly(vinyl chloride) composite. *Materials*, 9(8), 625.
- [112] **Zhang, Y., Zhang, L., Zhou, C., & Liu, J.** (2019). A high-performance selfhealing polymer electrolyte for flexible solid-state supercapacitors. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(29), 17314–17321.
- [113] **Paleo, A., Samir, Z., Aribou, N., Nioua, Y., Moreira, J., & Achour, M. E.** (2022). Electrical Properties of Polypropylene-Based Composites Melt-Processed with As-Grown Carbon Nanofibers. In *IntechOpen*.

- [114] **Callister, W. D., & Rethwisch, D. G.** (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). Wiley.
- [115] **Gironès, J., Méndez, J. A., Boufi, S., Vilaseca, F., & Mutjé, P.** (2007). Effect of silane coupling agents on the properties of pine fibers/polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 103(6), 3706–3717.
- [116] **Wang, Q., Zhang, Y., Liang, W., Wang, J., & Chen, Y.** (2020). Effect of silane treatment on mechanical properties and thermal behavior of bamboo fibers reinforced polypropylene composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 33(10), 1361–1378.
- [117] **Dogan, M., Dogan, S. D., Savas, L. A., Ozcelik, G., & Tayfun, U.** (2021). Flame retardant effect of boron compounds in polymeric materials. *Composites Part B: Engineering*, 222, 109088.
- [118] **Zhao, W., Kundu, C. K., Li, Z., Li, X., & Zhang, Z.** (2021). Flame retardant treatments for polypropylene: Strategies and recent advances. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 145, 106382.
- [119] **Chen, C. Q., Helbig, R., Engelbrecht, F., & Zeman, J.** (2001). Infrared absorption spectra of 4H silicon carbide. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 72(6), 717–720.
- [120] **Bárány, T., Izer, A., & Karger-Kocsis, J.** (2009). Impact resistance of all-polypropylene composites composed of alpha and beta modifications. *Polymer Testing*, 28(2), 176–182.
- [121] **Gnesin, G.G.** (1977). “Silicon carbide based materials”, *Metallurgy*, Moscow, 216.
- [122] **Lou, X., Zang, C., & Pan, H.** (2024). Enhancing flame retardancy and thermal insulation performance of silicone rubber composites using silicon carbide. *Journal of Physics: Conference Series*, 2706, 012003.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Özge YURUL DAĞ

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2018, Ege Üniversitesi, Kimya Bölümü

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Yurul Dağ, Ö., Akkoyun Kurtlu, M., & Tuna, S. (2024). Investigation of polypropylene nanocomposites for electric vehicle battery packs. *11th International European Congress on Advanced Studies in Basic Sciences*, November 11–13. Rome, Italy.