



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**KARBON DOLGULU ESNEK İLETKEN POLİMER KOMPOZİTLERİN
DİRENÇ-GERİNİM HASSASİYETİNİN VE ELEKTROMANYETİK DALGA
KALKANLAMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KÜBRA GÜLEŞ

DANIŞMAN: DOÇ. DR. ALPER KAŞGÖZ

**YALOVA
ŞUBAT 2024**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
POLİMER MALZEME MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

KARBON DOLGULU ESNEK İLETKEN POLİMER KOMPOZİTLERİN
DİRENÇ-GERİNİM HASSASİYETİNİN VE ELEKTROMANYETİK DALGA
KALKANLAMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KÜBRA GÜLEŞ
205101020

DANIŞMAN: DOÇ. DR. ALPER KAŞGÖZ

YALOVA
ŞUBAT 2024

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım “Karbon Dolgulu Esnek İletken Polimer Kompozitlerin Direnç-Gerinim Hassasiyetinin ve Elektromanyetik Dalga Kalkanlama Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Kübra GÜLEŞ

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince ölçülemez desteği, sabrı ve rehberliği ile yanımda olan ve çalışmalarımın her saniyesi bana yardımcı olup destek ve tavsiyelerini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Alper KAŞGÖZ'e en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Tecrübeleri ve bilgilendirmeleriyle çalışmama ışık tuttuğu için danışmanıma minnettarım.

Çalışmalarında destek ve yardımlarını esirgemeyen bu süreçte laboratuvarında birlikte çalıştığım arkadaşlarıma teşekkür ederim. Benim için zorlu geçen bu süreçte her zaman yanımda olan sevgili arkadaşlarım Yaren ETYEMEZ ve Merve SEÇKİN'e destekleri için teşekkürlerimi iletiyorum.

Hayatımın her anında yanımda olan, bana inanıp maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemedi yoluma çıkan zorluklar karşısında güç verip, motive eden babam Ayhan GÜLEŞ ve annem Arzu GÜLEŞ'e teşekkürü borç bilirim. Ayrıca bu zorlu süreci benimle birlikte yaşayan, bana sonsuz sevgi ve destek veren sevgili kardeşlerim Rabia GÜLEŞ, Yakup GÜLEŞ ve Hacer GÜLEŞ'e teşekkürlerimi iletiyorum.

Şubat – 2024

Kübra GÜLEŞ



İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN	i
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xv
ÖZET.....	xxi
ABSTRACT.....	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1. Kompozit Malzemeler	5
2.1.1. Kompozit malzemelerin özellikleri	6
2.2 Kompozit Malzemelerin Tarihsel Gelişimi	7
2.3 Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler.....	9
2.4 Polimer Kompozitlerin Sınıflandırılması	9
2.4.1 Elyaf takviyeli polimer kompozit malzemeler (FRP).....	9
2.4.2 Partikül takviyeli polimer kompozitler.....	10
2.5 Polimer Kompozitlerin Kullanım Alanları.....	11
2.6 İletken Polimer Kompozitler	11
2.6.1 Perkolasyon eşiği terimi	13
2.7 İletken Polimer Kompozitlerde Kullanılan Dolgu Maddeleri	16
2.7.1 Karbon elyaf	17
2.7.2 Grafit.....	19
2.8 Gerinim Duyarlı Sensörler	21
2.8.1 İletken polimerler kompozitlerin gerinim sensörlerinde kullanılması.....	23
2.8.2 Esnek gerinim sensörleri	24
2.9 ECPC Tabanlı Gerinim Sensörlerinin Temelleri.....	27
2.9.1 ECPC'lerin iletken mekanizması	27
2.9.2 ECPC tabanlı gerinim sensörlerinin tepki mekanizması	29
2.10 Esnek Gerinim Sensörlerinin Kullanım Alanları	30
2.11 Termoplastik Poliüretan (TPU)	31
2.11.1 TPU özellikleri.....	34
2.11.2. TPU kullanım alanları.....	35



2.12 Elektromanyetik Dalgalar.....	36
2.12.1 Elektromanyetik dalgaların özellikleri	37
2.12.2 Elektriksel ve manyetik açıdan bir ortamın karakterize edilmesi.....	39
2.13 Elektromanyetik Kalkanlama	43
2.13.1 Elektromanyetik kalkanlama etkinliklerinin belirlenmesi.....	45
3. MALZEMELER VE METOT	49
3.1 Malzemeler	49
3.2 İletken Polimer Kompozitlerin Hazırlanması.....	50
3.3 Test ve Analiz Çalışmaları	52
3.3.1 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi	52
3.3.2 Çekme Testi	53
3.3.3 Sertlik ölçümü.....	53
3.3.4 İletkenlik ölçümü	54
3.3.5 Direnç-gerinim davranışının belirlenmesi	55
3.3.6 Elektromanyetik dalga kalkanlama performanslarının belirlenmesi	56
4. BULGULAR	57
4.1 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri.....	57
4.2 Çekme Testi Sonuçları	59
4.3 Sertlik (Shore A) Değerleri	61
4.4 İletkenlik Özellikleri.....	62
4.5 Direnç-gerinim Davranışı	64
4.6 Elektromanyetik Kalkanlama Özellikleri	66
4.6.1 Dielektrik parametrelerinin değerlendirmesi	66
4.6.2 Kalkanlama etkilerinin değerlendirilmesi.....	70
5. SONUÇLAR	79
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	113



SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

d	: Tünelleme bozulma parametresi
f	: Uygulanan frekans
P	: İletken dolgu maddesinin hacim oranı
P_c	: Perkolasyon eşiği
r	: Tünelleme mesafesi
μ	: Permeabilite
μ_r	: Bağlı permeabilite
μ_0	: Boşluğun permeabilite değeri
ε	: Permittivite
ε''	: Kaybolan enerji
ε'	: Depolanan enerji
ε^*	: Kompleks permittivite
ε_0	: Boşluğun permittivitesi
σ	: ECPC'nin iletkenliği
σ_0	: İletken dolgu maddesinin iletkenliği
σ_{tun}	: Tünelleme iletkenliği

KISALTMALAR

CB	: Karbon Siyahı
CF	: Karbon Elyaf
CFRP	: Karbon Fiberle Güçlendirilmiş Polimer
CNT	: Karbon Nanotüp
CPC	: İletken Polimer Kompozit
ECPC	: Elektriksel İletken Polimer Kompozit
EMC	: Elektromanyetik Uyumluluk
EMF	: Elektromanyetik Alan
EMI	: Elektromanyetik Girişim
ESD	: Elektrostatik Deşarj
FCPC	: Esnek İletken Polimer Kompozit
FRP	: Elyaf Takviyeli
PAN	: Poliakrilonitril
PVC	: Polivinil Klorür
SE	: Kalkanlama Etkinliği
SE _A	: Absorplama Esaslı Kalkanlama Etkinliği
SE _{MR}	: Çoklu Yansıma Esaslı Kalkanlama Etkinliği
SE _R	: Yansıma Esaslı Kalkanlama Etkinliği
SE _T	: Toplam Kalkanlama Etkinliği
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu
T _g	: Camı Geçiş Sıcaklığı
TPU	: Termoplastik Poliüretan
VNA	: Vektör Network Analizörü



TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. CPC malzemelerinin elektriksel özdirençlerine ve uygulamalarına göre sınıflandırılması.....	17
Tablo 2.2. Polyester ve polieter bazlı TPU arasındaki temel farklar	35
Tablo 2.3. ϵ'/ϵ'' oranına göre malzemelerin sınıflandırılması	42
Tablo 3.1. Ravathane 130 A60 fiziksel özellikleri.....	49
Tablo 3.2. Hazırlanan kompozitlerin bileşenleri ve isimlendirmesi	51





ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. 3D kompozit bileşenleri	5
Şekil 2.2. Kompozit bir malzemenin fazları	6
Şekil 2.3. Uçaklarda kullanılan elyaf takviyeli plastikler	11
Şekil 2.4. Elektrik iletkenliğinin dolgu içeriğine bağımlılığı.....	14
Şekil 2.5. Polimer kompozitte dolgu maddesi dağılımı (a) düşük içerikte, (b) yeterince yüksek içerikte iletken yol	14
Şekil 2.6. İletken dolgularla güçlendirilmiş polimer kompozitlerin perkolasyon bölgesi	15
Şekil 2.7. İletken polimerlerin ve iletken polimer kompozitlerin iletkenlik aralığı.....	15
Şekil 2.8. Karbon elyafın yapısı	19
Şekil 2.9. Grafitin kristal yapısı	20
Şekil 2.10. Gerinim sensörlerinin şematik gösterimi	22
Şekil 2.11. ECPC'lerin iletken mekanizmasının şematik gösterimi	28
Şekil 2.12. TPU kompleks morfolojisinin şematik gösterimi	33
Şekil 2.13. Sert ve yumuşak segment yapısı	34
Şekil 2.14. TPU'nun farklı kullanımları	36
Şekil 2.15. Elektromanyetik dalganın bileşenleri ve ilerleme yönünün şematik gösterimi.....	37
Şekil 2.16. Elektromanyetik dalga spektrumu	38
Şekil 2.17. Kapasitör içerisinde oluşan elektrik alan şematik gösterimi.....	41
Şekil 2.18. Elektromanyetik dalga kalkanlamada etkili olan mekanizmaların şematik gösterimi	45
Şekil 2.19. Saçılma parametreleri şematik gösterimi.....	46
Şekil 3.1.Karbon elyafın ayrıntılı yapısı	49
Şekil 3.2. Grafitin kimyasal yapısı	50
Şekil 3.3. Kompozit yapımında kullanılan Kökbir RTX-M40 marka melt mixer görüntüsü.....	50
Şekil 3.4. Hazırlanan kompozit filmlerden birinin görüntüsü.....	52
Şekil 3.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı	52
Şekil 3.6. AHP Plastik Makine/Tensile çekme cihazı.....	53
Şekil 3.7. 2mm kalınlığında hazırlanan kompozit bir film örneği	53
Şekil 3.8. Loyka LXA (Shore A) sertlik cihazı.....	54
Şekil 3.9. Keysight 34461A Multimeter cihazı.....	54



Şekil 3.10. İletkenlik ölçümü için hazırlanan bir örnek ve ölçüm uzunluğu için kullanılan aparat	55
Şekil 3.11. Uzamaya bağlı direnç testi için hazırlanan sistem	55
Şekil 3.12. VNA testinde kullanılan numuneleri hazırlamak için kullanılan cihaz ve hazırlanan örnekler.....	56
Şekil 3.13. Elektriksel geçirgenlik değerlerinin ölçümünde VNA test düzeneği	56
Şekil 4.1. (a,b) TP-CF(6)10, (c,d) TP-CF(6)20 SEM görüntüleri	57
Şekil 4.2. (a,b) TP-CF(150)25, (c,d) TP-CF(150)40 SEM görüntüleri.....	58
Şekil 4.3. (a,b) TP-GF25, (c,d) TP-GF40 SEM görüntüleri	59
Şekil 4.4. Kompozit örneklerinin dolgu oranı artışı ile (a) elastik modül, (b) çekme mukavemeti ve (c) uzama özelliklerinin değişimi	60
Şekil 4.5. Kompozitlerin sertlik (ShoreA) ölçümü.	62
Şekil 4.6. Kompozitlerin dolgu oranı-iletkenlik grafiği.....	64
Şekil 4.7. Kompozitlerin gerinim-direnç davranışı ölçümü.....	65
Şekil 4.8. TP-CF(6) ürün serisinin (a) ϵ' , (b) ϵ'' değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimi	67
Şekil 4.9. TP-CF(150) örnek serisinin (a) ϵ' , (b) ϵ'' değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimi	68
Şekil 4.10. TP-GF örnek serisinin (a) ϵ' , (b) ϵ'' değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimi	69
Şekil 4.11. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(6)5 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi	71
Şekil 4.12. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(6)10 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi	72
Şekil 4.13. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(6)15 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi	72
Şekil 4.14. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(6)20 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi	72
Şekil 4.15. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(150)5 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi.....	73
Şekil 4.16. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(150)10 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi.....	73
Şekil 4.17. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(150)15 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi	73
Şekil 4.18. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(150)20 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi.....	74
Şekil 4.19. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(150)25 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi	74



Şekil 4.20. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(150)30 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi	74
Şekil 4.21. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(150)35 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi.	75
Şekil 4.22. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(150)40 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi	75
Şekil 4.23. Farklı kalınlık değerlerinde TP-GF10 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi.....	75
Şekil 4.24. Farklı kalınlık değerlerinde TP-GF15 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi.....	76
Şekil 4.25. Farklı kalınlık değerlerinde TP-GF20 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi.....	76
Şekil 4.26. Farklı kalınlık değerlerinde TP-GF25 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi.....	76
Şekil 4.27. Farklı kalınlık değerlerinde TP-GF30 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi.....	77
Şekil 4.28. Farklı kalınlık değerlerinde TP-GF35 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi.....	77
Şekil 4.29. Farklı kalınlık değerlerinde TP-GF40 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi.....	77
Şekil 4.30. Farklı dolgu oranlarında (a) TP-CF(6), (b) TP-CF(150), (c) TP-GF ürün serileri için SE_R değerinin değişimi	78



KARBON DOLGULU ESNEK İLETKEN POLİMER KOMPOZİTLERİN DİRENÇ-GERİNİM HASSASİYETİNİN VE ELEKTROMANYETİK DALGA KALKANLAMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Gerinim algılama uygulamaları için iletken polimer kompozitlerin (CPC'ler) kullanımı son zamanlarda büyük ilgi uyandırmıştır. Esnek gerinime duyarlı CPC'ler, son yıllarda özellikle giyilebilir elektronikler, sağlık ekipmanları ve elektronik kaplamalar olmak üzere çeşitli alanlarda önemli bir rol oynamaktadır. Bu uygulamalarda çok çeşitli malzemeler kullanılmaktadır; ancak termoplastik poliüretan (TPU), elastomer benzeri davranışı, uygun esnekliği, işlenme kolaylığı, kimyasal stabilitesi ve çeşitli iletken malzemelerle kombinasyon kolaylığı nedeniyle öne çıkmaktadır. Termoplastik poliüretanların (TPU) bu özellikleri, esnek uzamaya duyarlı CPC'ler için daha iyi gerilebilirlik, daha yüksek hassasiyet ve daha geniş bir algılama aralığı sağlamaktadır. Karbon esaslı dolgu maddeleri, iyi mekanik ve iletkenlik özelliklerinden dolayı elastik gerilime duyarlı CPC'lerde yer bulmaktadır. Elektromanyetik kalkanlama özelliğine sahip polimer kompozitler de başta TPU olmak üzere farklı esnek polimerlerden hazırlanan ve gelişen teknoloji ile ilgi çeken konulardan biri haline gelmiştir.

Bu tez çalışmasında, karbon esaslı iletken dolgu maddeleri kullanılarak TPU matrisli iletken kompozitler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu kompozitlerde kullanılan farklı geometriye sahip dolgu maddelerinin, kompozitin mekanik, morfolojik, iletkenlik, gerinim duyarlılık ve elektromanyetik dalga kalkanlama özellikleri üzerindeki etkisini gözlemlemek amaçlanmıştır. Bu iletken kompozitlerde dolgu maddesi olarak karbon fiber ve grafit kullanılmıştır. Farklı geometri ve boyutlardaki karbon esaslı iletken dolgular kullanılarak, bu dolguların gerinim sensör hassasiyetine ve elektromanyetik kalkanlama özelliklerine etkisi tartışılmıştır.

Çalışmada hazırlanan kompozitlerin morfolojik özelliklerinin tayini taramalı elektron mikroskobu (SEM) aracılığıyla gerçekleştirilirken, ayrıca örneklerin artan dolgu oranıyla mekanik özellikleri ve sertlik sonuçları değerlendirilmiştir. Hazırlanan iletken kompozitlerin dolgu oranı ile iletkenlikleri arasındaki ilişki ve direnç-gerinim davranışları incelenmiştir. Son olarak bu kompozitlerin elektromanyetik özellikleri ve elektromanyetik dalga kalkanlama etkinlikleri değerlendirilmiştir. Bu tez çalışması sonucunda, farklı geometri ve boyutlardaki karbon esaslı dolguların gerinim sensör hassasiyeti ve elektromanyetik kalkanlama etkinliği üzerindeki etkisi tartışılmış olup, hem sensör hassasiyeti hem de elektromanyetik kalkanlama etkinliği optimum düzeyde olan TPU matrisli iletken polimer kompozitler belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İletken polimer kompozit, Gerinim duyarlı sensör, Karbon esaslı dolgu, Elektromanyetik kalkanlama



INVESTIGATION OF RESISTIVITY-STRAIN SENSITIVITY AND ELECTROMAGNETIC WAVE SHIELDING PROPERTIES OF CARBON-FILLED FLEXIBLE CONDUCTOR POLYMER COMPOSITES

ABSTRACT

The use of conductive polymer composites (CPCs) for strain sensing applications has attracted great interest recently. Flexible strain-sensitive CPCs have been playing an important role in various fields in recent years, especially in wearable electronics, healthcare equipment, and electronic coatings. A wide variety of materials are used in these applications; however, thermoplastic polyurethane (TPU) stands out due to its elastomer-like behavior, favorable flexibility, ease of processing, chemical stability, and ease of combination with various conductive materials. These properties of thermoplastic polyurethanes (TPU) provide better stretchability, higher sensitivity, and a wider detection range for flexible strain-sensitive CPCs. Carbon-based fillers find a place in elastic stress-sensitive CPCs due to their good mechanical and conductivity properties. Polymer composites with electromagnetic shielding properties have recently attracted the attention of researchers.

In this thesis, TPU matrix conductive composites were preproduced using carbon-based conductive fillers. It was aimed to observe the effect of fillers with different geometries used in these prepared composites on the mechanical, morphological, conductivity, strain sensitivity and electromagnetic wave shielding properties of the composite. Carbon fiber and graphite were used as fillers in these CPCs. By using carbon-based conductive fillers of different geometries and sizes, the effects of these fillers on strain sensor sensitivity and electromagnetic shielding properties are discussed.

While the morphological properties of the composites prepared in the study were determined by scanning electron microscopy (SEM), the mechanical properties and hardness results of the samples were evaluated with increasing filling ratio. The relationship between the filling ratio and conductivity of the prepared CPC's was observed. Additionally, the resistivity-strain behavior of CPC's was examined. Finally, the electromagnetic properties and electromagnetic shielding effectiveness of these composites were evaluated. As a result of this thesis study, the effect of carbon-based fillers of different geometries and sizes on strain sensor sensitivity and electromagnetic shielding effectiveness was discussed, and TPU matrix conductive polymer composites with optimum levels of both sensor sensitivity and electromagnetic shielding effectiveness were determined.

Keywords: Conductive polymer composite, Strain sensitive sensor, Carbon based filler, Electromagnetic shielding



1. GİRİŞ

İletken polimer kompozitler (CPC'ler), iletken bir dolgu maddesinin polimer matris içine dahil edildiği bir kompozit malzemedir. Bu malzemeler polimerlerin özelliklerini iletken katkı maddelerinin elektriksel iletkenliği ile birleştirir. İletken polimer kompozitler, polimer matrisinin arzu edilen özelliklerini korurken, dolgu faz üzerinden elektriksel iletkenlik sergileyecek şekilde tasarlanırlar. Yalıtkan bir polimerik matris içinde dağılmış, elektriksel olarak iletken dolgu maddelerine dayanan iletken polimer kompozitler, imalat kolaylığı, ayarlanabilir özellikleri ve geniş uygulama yelpazesi nedeniyle kapsamlı bir şekilde literatürde incelenmiştir [1–3]. Bir iletken polimer kompozitte polimer matris, iletken dolguları taşıyıcı görevi görür ve taşıyıcı faz olarak adlandırılır. Kullanılan yaygın polimerler arasında termoplastikler (örneğin polietilen, polipropilen, polikarbonat), ısıyla sertleşen reçineler (örneğin epoksi, fenolik) veya elastomerler (örneğin silikon) bulunmaktadır. Polimer seçimi spesifik uygulamaya ve gerekli özelliklere bağlıdır. CPC'ler son zamanlarda akıllı tekstiller [4,5], hareket sensörleri [6], sağlık izleme [7,8], ve giyilebilir elektronikler [9,10] için gerinim sensörleri olarak büyük ilgi görmüştür. Bu gerinim sensörlerinde, deformasyon altında dirençteki değişim, çevresel genim uyaranları için bir sinyal olarak kullanılmak üzere izlenir. Direnç-gerinim davranışını bu işlevlere daha iyi uyacak şekilde ayarlamak için, farklı en boy oranlarında dolgu maddesi kullanmak [11,12], hibrit bir dolgu maddesi kullanmak [13,14], polimer karışımları kullanmak [15,16] ve dolgu yüzeyinin işlevselleştirilmesi [17-19], gibi birçok yaklaşım önerilmiştir.

Temel olarak elastomerlere dayalı olan CPC'ler, nispeten büyük bir ölçekte ayarlanabilme yeteneğine sahiptir, bu da onları uzayabilir bir iletken için düşük uzamaya duyarlı CPC'ler [20,21] ve yüksek uzamaya duyarlı CPC'ler [22,23] gibi çeşitli uygulamalar için potansiyel olarak uygun kılmaktadır. Uzama ve bükülme kabiliyetine sahip esnek iletken polimer kompozitler (FCPC'ler), dokunsal algılama, sağlık hizmetleri, insan-makine etkileşimi ve yumuşak robotik alanlarında çok büyük potansiyel uygulamalara sahiptir [24]. İletken ağın deformasyonu, özellikle lokal bağlantıların veya iletken dolgu maddeleri arasındaki tünelleme mesafesinin [25-27] ve iletken dolgu maddelerinin oryantasyonunun [28,29], değişmesi, gerinim altında iletkenlikte değişikliğe neden olur. CPC'lerde bu değişiklikleri oluşturmak için uygulanan stresin polimerden iletken dolgu maddelerine iletilmesi gerekir.

Karbon dolgulu iletken polimer kompozitler, termoplastikler veya ısıyla sertleşen reçineler gibi bir polimer matristen ve karbon bazlı iletken dolgulardan oluşan kompozit malzemelerdir. Genellikle karbon siyahı, karbon fiberler, karbon nanotüpler (CNT'ler) veya grafit olan bu dolgu maddeleri serbest elektron üzerinden sağlanan bir iletkenliğe sahiptir ve kompozite elektriksel iletkenlik kazandırır. Elektriksel iletkenliğin yanı sıra mekanik mukavemet kazandırması anlamında da en yaygın kullanılan karbon dolgulardan biri sürekli veya kırılmış karbon lifleridir. Karbon fiber elektriksel olarak iletken bir malzemedir. Ancak elektrik iletkenliği, karbon fiberin türü, üretim süreci ve saflığı gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişebilir. Karbon fiber, grafene benzer şekilde altıgen bir kafes şeklinde düzenlenmiş karbon atomlarından oluşur. Karbon atomlarının bu altıgen düzeni, yapı içinde elektriği iletebilen delokalize pi elektronlarının varlığına izin verir. Bu nedenle karbon fiber doğası gereği elektriksel iletkenliğe sahiptir.

Grafit, belirgin bir kristal yapıya sahip, doğal olarak oluşan bir karbon türevidir. Çeşitli endüstriyel, teknolojik ve bilimsel uygulamalarda onu değerli kılan özelliklerin benzersiz birleşimi ile bilinir. Grafit, altıgen bir kafes veya bal peteği yapısında düzenlenmiş karbon atomlarından oluşur. Her karbon atomu, aynı katmandaki üç komşu karbon atomuyla güçlü kovalent bağlar oluşturarak iki boyutlu altıgen halkalardan oluşan bir tabaka oluşturur. Bu tabakalara grafen tabakaları denir. Grafit, üst üste yığılmış birden fazla grafen katmanından oluşur. Zayıf van der Waals kuvvetleri bu katmanları bir arada tutarak birbirlerinin üzerinden kolaylıkla kaymalarına olanak tanır. Bu özellik grafitte yağlayıcı ve kaygan özelliğini kazandırır. Grafit, altıgen yapısındaki delokalize pi elektronları nedeniyle mükemmel bir elektrik iletkenidir. Pillerdeki elektrotlar ve akım toplayıcılar gibi çeşitli elektrik ve elektronik uygulamalarda kullanılır.

Termoplastik poliüretan (TPU), hem termoplastiklerin hem de poliüretanın özelliklerini birleştiren bir tür polimer malzemedir. Çok çeşitli uygulamalara uygun olmasını sağlayan çok yönlülüğü, dayanıklılığı ve esnekliği ile bilinir. TPU termoplastik bir malzemedir, yani kimyasal bozunmaya uğramadan birçok kez eritilip yeniden şekillendirilebilir. Bu özellik, kolay işleme ve geri dönüşüme olanak sağlar. TPU elastomerik davranış sergileyerek ona esneklik ve orijinal şekline dönme

yeteneği kazandırır. Bu özellik, onu esneklik ve darbe direnci gerektiren uygulamalar için uygun hale getirir.

Elektromanyetik kalkanlama, elektromanyetik alanların bir ortamdan diğetine geçişini engelleyerek veya sınırlayarak elektromanyetik girişimi (EMI) veya elektromanyetik alanların dışarıya yayılmasını azaltmayı amaçlamaktadır. Elektromanyetik kalkanlama, özellikle elektronik cihazlar arasında oluşan elektromanyetik parazitleri azaltma ve elektromanyetik uyumluluk (EMC) sağlama amacını taşır. Elektromanyetik kalkanlama, özellikle hassas elektronik cihazlarda, tıbbi ekipmanlarda, askeri uygulamalarda ve diğere elektromanyetik uyumluluk gereksinimlerinin olduğu alanlarda önemlidir. Elektromanyetik kalkanlama teknikleri, elektromanyetik etkileşimleri sınırlamak ve elektromanyetik uyumluluğu artırmak için kullanılarak cihazların güvenilirliğini ve performansını sağlamak amacıyla uygulanır.

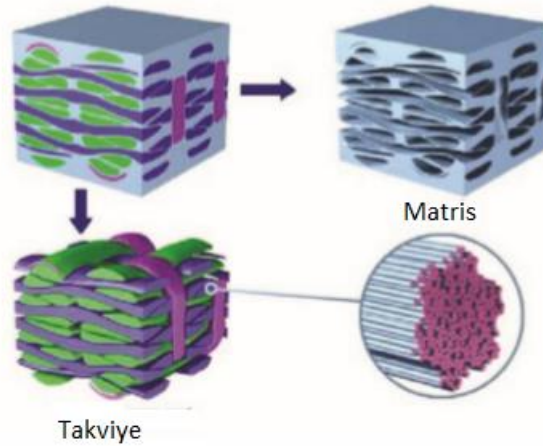
Bu tez çalışmasında, TPU bazlı esnek, çeşitli karbon dolgulu iletken kompozitler üretilmiştir. TPU, geniş uygulama yelpazesi, yüksek kopma uzaması ve karbon esaslı dolgu maddeleri ile iyi afinitesi nedeniyle matris olarak seçilmiştir. İletken dolgu malzemesi olarak karbon elyaf ve grafit tercih edilmiştir. Ayrıca iki farklı uzunluğa sahip karbon elyaf kullanılarak, hem dolgu geometrisinin hem de dolgu boyutunun kompozitin sensör özelliklerine ve elektromanyetik dalga kalkanlama özelliklerine etkisi araştırılmıştır.



2. GENEL BİLGİLER

2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler; belirli bir amaç doğrultusunda iki ya da daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı tür malzemelerin özelliklerini, yeni ve tek bir malzeme toplamak için, bileşenlerin kendi sınırlarını koruyacak şekilde makro düzeyde birleştirilmesi ile oluşturulan yeni ve yapay malzemeler olarak tanımlanabilir [30]. Bu malzemelerin genellikle özel özelliklere sahip olmaları amaçlanır ve birbiriyle kombin edilmiş malzemelerin avantajlarını bir araya getirirler. Genellikle metal, seramik, polimer gibi farklı malzemelerin kombinasyonlarından oluşabilirler. Genel olarak, bir kompozit malzeme iki farklı fazdan oluşur. Bunlardan biri, matris olarak adlandırılan sürekli, daha az sert ve daha zayıftır; diğeri süreksiz, daha sert ve sağlam, takviyedir [31]. Takviye malzemesinin kullanımındaki temel amaç; malzeme üzerine gelen yükün taşınması, matrisin rijitliğinin ve dayanımının artırılmasının sağlanmasıdır. Kompozit malzeme içinde matrisin fonksiyonu ise, çoğu gevrek ve kırılgan olan takviye elemanlarını dış ve çevresel etkilere karşı korumak, kompozit malzeme üzerine gelen yükü takviye elemanlarına iletmek ve tüm kompozit yapıyı bir arada tutmak olarak sıralanabilir. Şekil 2.1’de kompozit bir malzemenin bileşenlerinin şematik temsili gösterilmektedir.

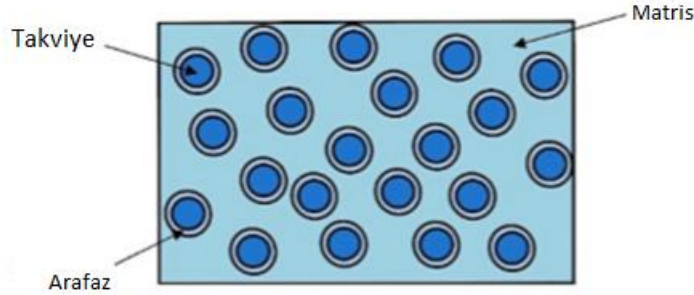


Şekil 2.1. 3D kompozit bileşenleri [32]

Kompozit sistemin fazları, kompozit malzemenin tipine ve uygulamasına bağlı olarak farklı roller oynamaktadır. Düşük ila orta performanslı kompozit malzemeler söz konusu olduğunda, genellikle kısa lifler veya parçacıklar biçimindeki takviye, bir

miktar sertleşme sağlayabilir, ancak malzemenin sadece sınırlı güçlendirilmesini sağlar. Öte yandan matris, malzemenin mekanik özelliklerini yöneten ana yük taşıyıcı bileşendir. Yüksek performanslı yapısal kompozitler durumunda, normalde sürekli olan elyaf takviyesi, elyaf yönündeki sertliğini ve mukavemetini belirleyen malzemenin omurgasıdır. Matris fazı, hassas fiberler, bağlanma, destek ve bir fiberden diğerine lokal stres transferi için koruma sağlar [33].

En yaygın olarak kullanılan modern kompozit malzemeler, bir polimer matrisinde yüksek mukavemetli ve yüksek modüllü fiberler içeren fiber takviyeli kompozitlerdir [33]. Bazı durumlarda, Şekil 3.2'de gösterildiği gibi, çeşitli kimyasal etkileşimler veya işleme etkileri nedeniyle takviye ve matris arasında interfaz olarak bilinen ek bir faz da vardır.



Şekil 2.2. Kompozit bir malzemenin fazları [34]

Takviye tipi, matris özellikleri, geometri ve faz dağılımı dahil olmak üzere birçok özellik kompozit malzemelerin özelliklerini kontrol eder. Malzeme sisteminin homojenliği, matristeki takviyenin dağılımına bağlıdır. Takviye dağılımının yüksek düzeyde homojen olmaması, kompozit malzemeyi daha heterojen hale getirir, böylece zayıf alanlarda başarısızlık olasılığını artırır. Takviye, kompozit sistemdeki ana yük taşıma bileşenidir [35]. Bununla birlikte, kompozit laminatın mekanik özellikleri çoğunlukla matris tarafından kontrol edilir. Matris fazı hassas lifleri korur ve destekler, ayrıca yükü bir liften diğerine aktarma amacına hizmet eder. Ara faz, esas olarak kompozit malzemelerin kırılma mekanizmalarını, kırılma tokluğunu ve stres zorlanma davranışını yönetir.

2.1.1. Kompozit malzemelerin özellikleri

Çoğu kompozit malzeme, yüksek mukavemete sahiptir ancak aynı zamanda hafiftir. Bu, özellikle kompozit malzemelerin havacılık ve uzay endüstrisinde kullanımlarında

önemli bir avantaj sağlamaktadır. Kompozitler özellikle uçakların hem iç mekan tasarımları hem de yapısal parçalarının üretiminde kullanılabilir. Uçaklarda kompozitlerin kullanımı hem maliyet düşürülebilir hem de gelişmiş mekanik özellikler sağlamanın yanında hafiflik gibi özelliklerini geliştirir. Kompozitlerin sahip olduğu bu özellikler uzay araçları için de çok büyük öneme sahiptir. Bu nedenle kompozit malzemeler uzay sektöründe de başlıca tercih edilen ürün grupları olmuştur. Havacılık sanayisinde; ticari, askeri ve sivil uçakların gövdeleri, kanatları kontrol panelleri ve pervaneleri kompozitlerin başlıca uygulama alanlarını oluşturmaktadır.

Ayrıca kompozit malzemeler, kimyasal maddelere karşı dirençli olabilirler, bu da özellikle endüstriyel uygulamalarda ve kimyasal işlemlerde kullanılmalarını sağlar. İhtiyaca bağlı olarak, kompozit malzemeler termal iletkenlik veya izolasyon özelliklerine sahip olabilirler. Üretim süreçlerindeki esneklik, karmaşık geometrilerin ve özel yüzeylerin kolayca üretilmesine olanak tanımaktadır. Elektriksel yalıtım veya iletkenlik özelliklerine sahip olabilirler, bu da teknoloji endüstrisinde kullanımını kolaylaştırır. Uygun şekilde tasarlandığında ve üretildiğinde, kompozit malzemeler genellikle uzun ömürlü ve dayanıklı olabilirler. Bunların yanı sıra kompozit malzemeler, iyi yorulma direnci, iyi sönümleme, düşük radar görünürlüğü ve düşük iletkenlik gibi diğer özelliklere de sahiptir.

Kompozitlerin sahip oldukları bu özellikler, inşaat ve yapı sektörü, savunma sanayi, otomotiv sektörü, denizcilik sektörü, enerji sektörü, spor malzemeleri imalatı, gıda ve tarım sektörü gibi daha birçok alanda kullanılmalarına olanak sağlamıştır. Kompozit malzemeler, örneğin inşaat sektöründe binaların yapı hücrelerinde, beton kalıplarında, yüzme havuzlarında, cephe panellerinde ve profillerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Enerji sektöründe rüzgar panellerinin kanatlarının yapımında, petrol-gaz endüstrisinde boru hatları, depolama tankları ve diğer yapısal bileşenlerde yine kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bunların yanında golf sopaları, tenis raketleri, kayak malzemeleri vb. bir çok spor ekipmanı üretiminde kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler ayrıca sağlık endüstrisi, antenler, kablo kanalları gibi elektrik-elektronik malzemeler, kara, demir ve deniz taşımacılığı gibi bir çok endüstride başlıca tercih edilen ürün gruplarıdır.

2.2 Kompozit Malzemelerin Tarihsel Gelişimi

Kompozit malzemelerin tarihsel gelişimi, insanlık tarihinde oldukça uzun bir süreç boyunca uzanır. İnsanlar, farklı malzemelerin kombinasyonu ile daha dayanıklı, hafif ve özelleştirilebilir özelliklere sahip malzemeler elde etme ihtiyacını uzun yıllar önce fark etmiştir. Antik dönemlerde M.Ö. 3000-3400 yılları arasında Mısırlılar, tuğla yapımında saman, çömlek yapımında çakıl taşları ve diğer katkı maddelerini kullanarak ilk kompozit malzemeleri üretmişler. M.Ö. 1000-1500'de Yunanlar ve Romalılar, yapı malzemelerinde ahşap ve taşın birleştirilmesiyle kompozit malzemeler kullanmaya başlamışlar. Orta Çağ 10. yy.'da Moğollar, yay yapımında kemiği, boynuzu ve ahşabı birleştirerek dayanıklı kompozit yaylar üretmişler. 14. yy.'da ok yapımında kullanılan sarmaşıklar, kirişler ve ahşapların kombinasyonu ile oluşturulan kompozit yapılar ortaya çıkmış. 18. yy.'da yelkenli gemilerin inşasında çeşitli ahşap türlerinin birleştirilmesiyle kompozit malzemeler kullanılmış.

Sanayi Devrimi'yle birlikte kompozit alanındaki gelişmeler daha da hızlanmıştır. 20. yy.'da sanayi devrimi ve plastiğin keşfi kompozit malzemelerin gelişimini hızlandırmış. İlk cam elyaf takviyeli plastikler (GRP) bu dönemde ortaya çıkmış. 1930'larda Polimer matrisli kompozitlerin gelişimi hızlanmış. Fenolik reçineli cam elyaf takviyeli kompozitler, elektrik ve kimya endüstrisinde kullanılmaya başlanmış. 1940'larda İkinci Dünya Savaşı sırasında uçak ve helikopter yapılarında kompozit malzemelerin kullanımı artmış. Bu dönemde fenolik reçineler ve cam elyaf yaygın olarak kullanılmaya başlanmış. 1950'lerde yüksek performanslı polimerlerin gelişimiyle birlikte, kompozit malzemelerin özellikleri daha da iyileştirilmiş ve özellikle, epoksi ve poliestere reçinelerinin kullanımı artmış. 1960'larda karbon elyafın keşfi, kompozit malzemelerin mukavemetini artırırken aynı zamanda hafifletme özelliklerini kazandırmış. Bu dönemde uzay ve havacılık endüstrilerinde kullanımı hızla yayılmış. 1980'lerde ileri düzey bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve üretim (CAM) teknolojileri, karmaşık kompozit parçaların daha etkili bir şekilde tasarlanmasını ve üretilmesini sağlamış.

2000'ler ile nanoteknolojinin gelişimi, nano malzemelerin kompozitlere entegrasyonunu mümkün kılarak malzeme özelliklerini daha da artırdı. Günümüzde kompozit malzemeler, otomotiv, havacılık, enerji, inşaat, spor malzemeleri ve daha birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek performanslı kompozitler, hafiflik, dayanıklılık ve isteğe göre özelleştirilebilen özelliklerinden

dolayı giderek daha fazla tercih edilmektedir. Kompozit malzemelerin tarihsel gelişimi, teknolojik ilerlemelerle birlikte sürekli olarak evrilmiş ve farklı endüstrilerde çeşitli avantajlar sağlamıştır.

2.3 Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler

Polimer esaslı kompozit malzemeler, 1980'li yıllardan bu yana kimyasal olarak ileri düzeyde rol oynamaya başlamıştır [36]. En hızlı büyüyen malzeme sınıflarından biri olan polimer kompozit malzemeler, özellikle düşük yoğunlukları, yüksek özgül mukavemet ve sertliklerinin ilgi çekici olduğu teknik uygulamalar için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu malzemelerin diğer bir avantajı ise özelliklerinin, ilgili teknik sorunların gerekliliklerine göre geniş bir aralıkta değiştirilebilmesi ve optimize edilebilmesidir. Farklı dolgu maddeleri ve / veya takviyeler içeren polimerik malzemeler de, sürtünme ve aşınmanın özel önem taşıdığı farklı endüstriyel uygulamalarda kullanımı gün geçtikçe artmaktadır [37]. Polimer kompozitler, matrisi termoplastik ya da termoset olan bir polimerin; dolgu fazını ise bir organik ya da inorganik dolgunun oluşturduğu kompozit yapılardır. Dolgu malzemesinin türü, boyutu, yüzey alanı, şekil veya geometrisi, kullanım oranı, yüzey özellikleri ve üretim şartları gibi birçok yapısal ya da fiziksel özellik, polimer kompozitlerin son özellikleri üzerinde de etkilidir.

2.4 Polimer Kompozitlerin Sınıflandırılması

Polimer kompozitler, polimer matrisi içinde takviye bir malzemenin (genellikle lifler veya partiküller) eklenmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Polimer kompozitlerin çeşitli türleri vardır ve bu türler, kullanılan polimer matrisi, güçlendirici malzeme ve üretim sürecine göre farklılık gösterir.

2.4.1 Elyaf takviyeli polimer kompozit malzemeler (FRP)

Kompozit malzemeler, kimyasal ve mekanik etkilerle makroskobik ölçekte iki veya daha fazla bileşenden oluşan malzemelerdir. Matris fazı ve takviye fazı olmak üzere iki farklı faz, bir kompozit malzemede birleşir. Takviye fazları genellikle elyaflar, tabakalar ve parçacıklardır ve bu takviye fazları matris fazına gömülmüştür [38]. Takviye malzemelerinin, kompozitlere üst düzey mukavemet ve sertlik sağlaması amaçlanmaktadır [39]. Takviye elemanları elyaf, tabakalar veya parçacıklar olabilir. Parçacık yapılı takviyeler yönlendirilemez, bu nedenle mekanik özellikler üzerindeki

etkileri çok sınırlıdır. Tabakalı yapılar son derece güçlüdür ancak matriste homojen olarak dağılması çok zordur. Lif yapılı takviye malzemeleri uzun ve daireseldir. Uzunlukları yönünde önemli ölçüde daha güçlüdürler. Liflerin mukavemeti ve sertliği nedeniyle, baskın olarak kompozit yapılarda takviye malzemesi olarak kullanılırlar [40]. Şu günlerde; karbon, aramid ve cam elyafları takviye malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

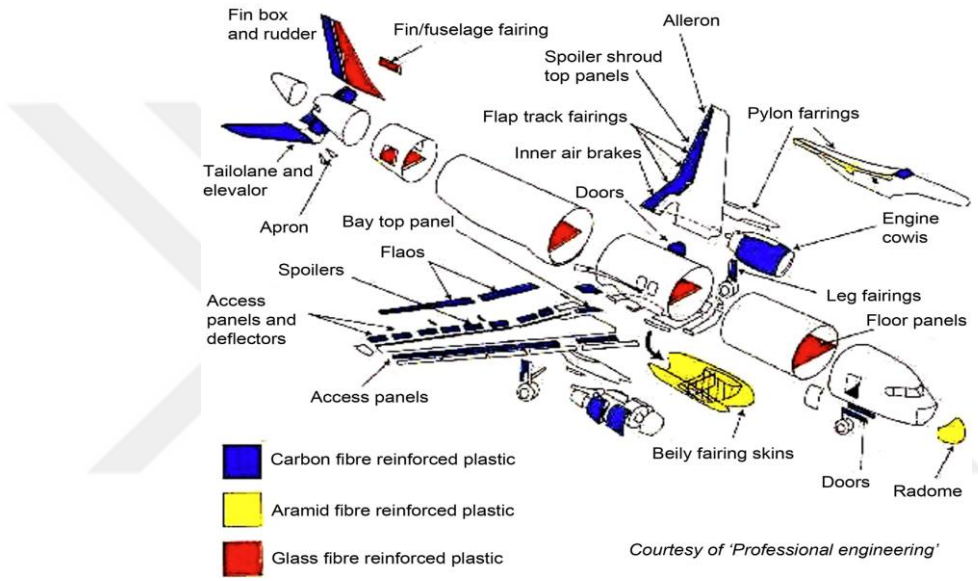
Cam ve karbon fiberler, havacılık, denizcilik ve otomotiv gibi yapısal uygulamalar için hafif kompozitlerin hazırlanmasında güçlendirilmiş malzemeler olarak kullanılmaktadır. Bu elyaflar, elyaf takviyeli polimer kompozitlerini (FRP) hazırlamak için epoksi ve doymamış polyester gibi nispeten uyumlu bir polimerik reçineye gömülür. FRP kompozitler, kullanılan geleneksel metaller ve alaşımlara göre yüksek mukavemet / ağırlık oranı, mükemmel korozyon ve yorulma direnci sergiler [41].

2.4.2 Partikül takviyeli polimer kompozitler

Partikül takviyeli polimer kompozitler, polimer matrisine katı partiküllerin eklenmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Bu partiküller genellikle cam, seramik, metal, karbon siyahı veya plastik gibi malzemelerden olabilirler. Partikül takviyeli polimer kompozitler, özellikle mukavemet, sertlik, aşınma direnci ve termal iletkenlik gibi özelliklerin geliştirilmesi amacıyla kullanılır. Partikül takviyeli kompozitler genellikle polimer matrisin mukavemetini artırır. Partiküller, matristeki gerilim dağılımını etkileyerek malzemenin genel mukavemetini artırmaya neden olur. Metal veya seramik partiküllerin eklenmesi, polimerin termal iletkenliğini artırır. Bu da malzemenin termal performansını iyileştirir. Partikül takviyeli kompozitler genellikle daha yüksek sertlik seviyelerine sahiptirler. Böylece, aşınma direnci ve çizilmeye karşı dayanıklılık gibi özellikler polimere kazandırılmış olur. Yine metal veya seramik partiküller, polimer matrisin aşınma direncini artırır ve sürtünme özelliklerini iyileştirir. Hafif partiküller (örneğin, polimer matrisli cam mikroküreler), kompozit malzemenin yoğunluğunu düşürür, böylece hafif ve düşük yoğunluklu malzemeler elde edilir. Karbon siyahı gibi iletken malzemeler kompozite elektriksel iletkenlik gibi özellikler kazandırabilir. Partikül takviyeli polimer kompozitler, özellikle belirli uygulama gereksinimlerine uygun olarak tasarlanabilen çok yönlü malzemelerdir. Bu kompozitler, bir dizi endüstriyel sektörde performansı artırmak için kullanılabilmektedir.

2.5 Polimer Kompozitlerin Kullanım Alanları

Polimer esaslı kompozitler, birçok mühendislik uygulamasında tercih edilen kompozit türüdür. Bu kompozitler sahip oldukları üstün mekanik özellikleri, darbe dayanımları, hafiflikleri, metallere göre düşük maliyetli olmaları, kolay işlenebilirlikleri ve korozyon dirençleri gibi avantajları nedeniyle özellikle uçak sanayisi, inşaat mühendisliği, gemi ve otomobil endüstrisi gibi birçok uygulamada geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle uçaklarda; kanatlar, türbin bıçakları gibi birincil uçak yapılarında polimer kompozit malzemeler kullanılmaktadır [42] .



Şekil 2.3. Uçaklarda kullanılan elyaf takviyeli plastikler [43]

Polimer kompozit malzemeler metallerle kıyaslandığında düşük elastik modül ve yüksek darbe dayanımı gibi özellikler gösterirler. Lif takviyeli sandviç yapılı kompozitler, düşük ağırlıklı alüminyum alaşımların üç katı, yüksek mukavemetli çelik ve titanyum alaşımların ise iki katı yorulma dayanımı gösterirler. Bu özellikleri sayesinde bu kompozit malzemeler elektrik-elektronik uygulamalarında, uzay araçları ve uçak yapılarında, inşaat sektöründe dış cephe kaplamaları ve yapısal elemanlarda, denizcilikte gemi gövdeleri, kayıklar ve sörf tahtaları gibi spor malzemelerinde, enerji sektöründe ise rüzgâr türbin kanatları ve güneş panel çerçevelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.6 İletken Polimer Kompozitler

İletken polimer matris kompoziti olarak da bilinen iletken polimer kompozit, iletken bir dolgu maddesinin bir polimer matrisine dahil edildiği kompozit bir malzemedir.

Bu malzemeler polimerlerin özelliklerini iletken katkı maddelerinin elektriksel iletkenliği ile birleştirir. İletken polimer kompozitler, polimer matrisin arzu edilen özelliklerini korurken, gelişmiş elektriksel iletkenlik sergileyecek şekilde tasarlanmıştır. Polimer matris, kompozitte temel malzeme görevi görür. Kullanılan yaygın polimerler arasında termoplastikler (örneğin polietilen, polipropilen, polikarbonat), ısıyla sertleşen reçineler (örneğin epoksi, fenolik) veya elastomerler (örneğin silikon) bulunur.

Dirençleri genellikle $10^{15} \Omega m$ civarında olan polimerlerin elektrik yalıtkanı olarak görev yapma yeteneği, elektrik ve elektronik alanlarında yaygın kullanımlarının temelini oluşturur. Bununla birlikte, malzeme tasarımcıları, yalıtkan polimerleri karbon siyahı, karbon fiber, metal parçacıkları gibi iletken bileşenlerle veya polianilin gibi iletken polimerlerle harmanlayarak polimerlere iletkenlik kazandırmaya çalıştılar [44]. Sonuç olarak, 1950'lerden bu yana, metalik iletken ($10^{-7} \Omega m$) ve yalıtım malzemeleri ($10^{15} \Omega m$) [45] arasındaki öz direnç sahip bir dizi sözde iletken polimer kompozit ortaya çıkmıştır; statik elektriğin dağıtılması için yarı iletken malzemelerin geleneksel uygulamasının yanı sıra, yerden ısıtma elemanları, elektronik ekipman [46], elektromanyetik girişim (EMI) koruması [47] gibi önemli stratejik malzemeler olarak birçok alanda uygulama alanı bulmaktadır. Metalik iletkenlerle karşılaştırıldığında iletken polimer kompozitler, şekillendirme kolaylığı, düşük yoğunluk, geniş elektriksel iletkenlik aralığı ve korozyon direnci gibi avantajlara sahiptir.

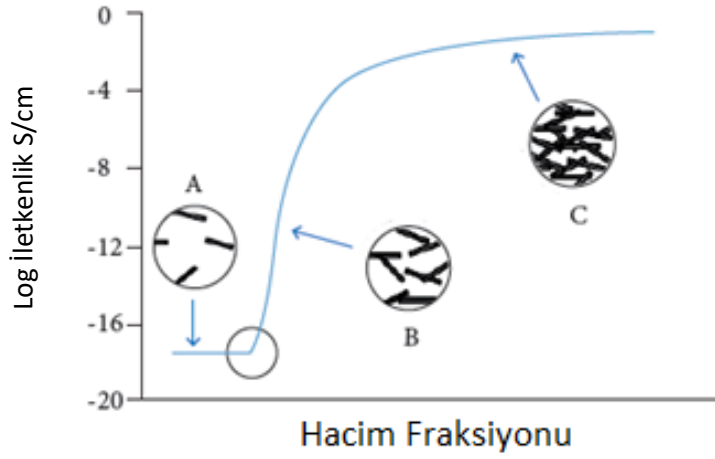
İletken polimer kompozitler (CPC'ler), yalıtkan bir polimer matrisinin karbon Siyahı (CB), karbon elyafları (CF), karbon nanotüp (CNT) gibi iletken dolgu maddeleri veya polimer matris boyunca iyi bir iletken yol oluşturan herhangi bir ilgili dolgu maddesi parçacıkları ile karıştırılmasıyla elde edilir [48]. CPC'ler yüksek elektrik iletkenliği, hafiflik, korozyona dayanıklılık ve iyi mekanik özellikler performansı gibi birçok ilginç özellik sergiler [48-50]. Bununla birlikte, kompozit matris içindeki iletken ağ yollarının morfolojisi ve yapısı, CPC'lerin daha iyi elektriksel iletkenliği için temel parametrelerdir [49]. Mevcut teknoloji, sensörler, devre cihazlarındaki bileşenler, batarya, yakıt hücresi elektrotları ve yakıt hücresi bipolar plakaları dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda CPC'ler öne çıkmaktadır [48,50-56].

Malzemenin elektriksel olarak iletken hale gelmesi için iletken fazın konsantrasyonunun, perkolasyon eşiğinin üzerinde olması gerekir. Çeşitli polimer matrislerdeki dolgu maddesi parçacıklarının elektriksel iletkenliği ile dolgu maddesi konsantrasyonları arasında var olan korelasyon genellikle bileşenlerin hacim fraksiyonuna ve dolgu maddesi morfolojisine bağlıdır [57,58]. Perkolasyon teorisi iki ana bölgeye ayrılır; perkolasyon eşiğinin altında ve perkolasyon eşiğinin üstünde. Perkolasyon eşiğinin altındaki bölgede, dolgu parçacıkları kompozit boyunca iletken ağ oluşturulmadan dağıldığından, elektriksel iletkenlik, düşük dolgu oranlarında yalıtıcı polimer matrisinin elektriksel iletkenliğine eşdeğerdir. Dolgu maddesi konsantrasyonları arttıkça, perkolasyon eşiği olarak bilinen belirli bir kritik hacim fraksiyonuna kadar sürekli iletken ağlar geliştirilir. Perkolasyon eşiğinin üstünde, elektriksel iletkenlik platosu düz kalana kadar dolgu maddesi konsantrasyonları arttıkça iletken ağ artar [57].

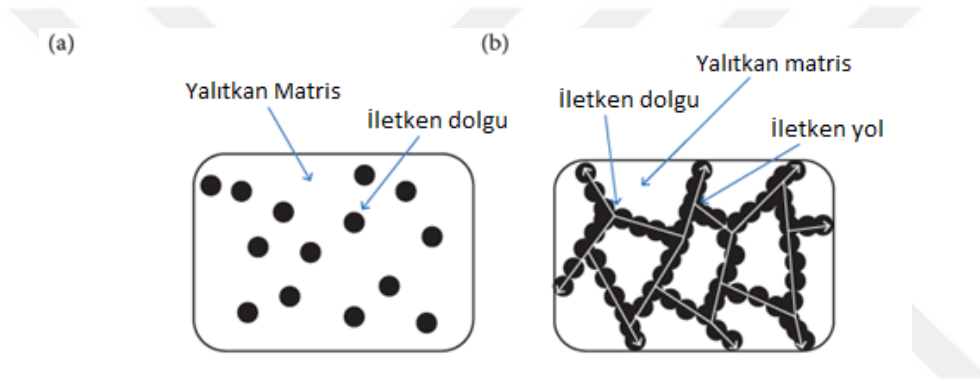
Son çalışmalar, dolgu maddesi dağılımı, şekil ve boyut, en-boy oranı, dolgu iletkenliği ve matris etkileşimi, polimer matrisin doğası, ıslanabilirlik, şekil, yönelim, yüzey enerjisi, işleme tekniği gibi polimer kompozitin elektriksel iletkenliğini etkileyebilecek çok sayıda faktör olduğunu bildirmiştir [48,57-68].

2.6.1 Perkolasyon eşiği terimi

Hafif, sağlam, iletken kompozit malzemeler; pil bileşenleri, elektrotlar, elektromanyetik girişim kalkanları, devre bileşenleri ve havacılık gibi birçok uygulamada kendilerine yer bulmaktadır [69-71]. Kompozit malzemelerin iletken uygulamalarda kullanılabilmesi için malzemelerin elektriksel iletkenliğinin ESD (Elektrostatik desarj) uygulamaları için 10^{-12} ile 10^{-8} S/cm aralığında, orta derecede iletkenlik uygulamaları için 10^{-8} ve 10^{-2} S/cm ve kalkanlama uygulamaları için 10^{-2} S/cm ve üzeri olması gerekmektedir. Bir kompozitin elektriksel iletkenliği, dolgu maddesi hacim fraksiyonuna bağlıdır (Şekil 2.4.), kompozitteki dolgu maddesi miktarı arttığında, dolgu maddesi parçacıkları birbirleriyle temas ederek, kompozit içindeki serbest elektronların kolaylıkla hareket etmesini sağlayan sürekli bir yol oluşturmaya başlar (Şekil 2.5'te gösterildiği gibi) ve sonuçta elektriksel iletkenlik daha yüksek seviyelere çıkacaktır. Bu iletken ağın oluşumu perkolasyon teorisinin prensiplerine dayanmaktadır [72-74].

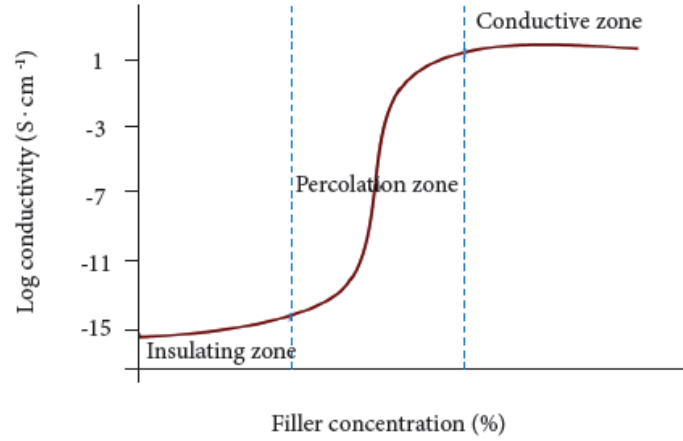


Şekil 2.4. Elektrik iletkenliğinin dolgu içeriğine bağımlılığı [73]



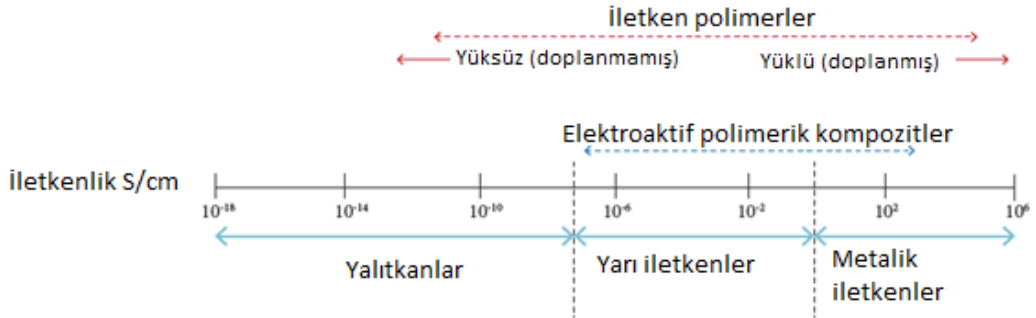
Şekil 2.5. Polimer kompozitte dolgu maddesi dağılımı (a) düşük içerikte, (b) yeterince yüksek içerikte iletken yol [71]

İletken dolgu maddesinin içeriği kademeli olarak arttığında kompozit malzeme perkolasyon eşiğine ulaşır. Bu eşikten sonra malzemedeki iletken dolgu içeriğindeki herhangi bir artış, Şekil 2.6.'da gösterildiği gibi iletken bir kompozit malzeme haline gelen kompozit malzemenin elektriksel iletkenlik değerinde büyük oranda artışa yol açacaktır. Bu davranış, iletken dolgu maddesinin dielektrik matris malzemesi boyunca iletken bir yol oluşturması nedeniyle oluşur; bu iletken yol, iletken dolgu içeriği perkolasyon eşiğinden yüksek olduğunda oluşur [75-77].



Şekil 2.6. İletken dolgularla güçlendirilmiş polimer kompozitlerin perkolasyon bölgesi [78]

Polimerlere iletken dolgu maddeleri eklenerek her uygulamaya uygun belirli özelliklere sahip malzemeler üretilebilir ve tasarlanabilir (Şekil 2.7.). Polimerlerin elektriksel iletkenlik değeri genellikle 10^{-14} ile 10^{-17} S/cm arasında değişmektedir. Diğer malzemelerin elektriksel iletkenlik değerleri ise karbon siyahı için 10^2 S/cm, Poliakrilonitril için 10^3 S/cm, karbon lifleri için 10^4 S/cm, grafit için 10^5 S/cm, alüminyum ve bakır gibi metaller için 10^6 S/cm'dir.



Şekil 2.7. İletken polimerlerin ve iletken polimer kompozitlerin iletkenlik aralığı [78,79]

İletken kompozitlerin elektriksel iletkenliği yukarıda da belirtildiği gibi dolgu maddesi tipine, şekline, boyutuna ve kompozitteki dolgu maddesi dispersiyonu ve dağılımına bağlıdır. Dolgu maddesinin özellikleri kompozitin iletkenliğinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Karbon, dolgu maddesi olarak kullanıldığında, küçük karbon parçacıklarından grafit ve karbon liflerine kadar birçok farklı şekilde kullanılabilir ve

her birinin iletkenliği farklıdır. Dolgu iletkenliği değeri, kompozitin elektriksel iletkenliğinin üst sınırı olacaktır. Parçacık boyutu gibi diğer dolgu özellikleri de elektriksel iletkenlik üzerinde etkili olabilir. Küresel parçacıklar için daha küçük parçacık boyutunun perkolasyon eşiğini düşüreceği gösterilmiştir. Aynı zamanda birden büyük en boy oranının (uzunluğun çapa oranı, l/d) yanı sıra daha geniş bir en boy oranı aralığının perkolasyon eşiğini düşüreceği de gösterilmiştir. Kompozitlerin yapıldığı ve ardından kalıplandığı yöntemin de elektrik iletkenliği üzerinde etkisi vardır; burada dolgu oryantasyonu kompozitlerin elektrik iletkenliği üzerinde etkiye sahiptir [80-83]. Bir kompozitin ekstrüzyon ve enjeksiyonla kalıplanması, farklı makinelerin ve kalıbın nozulünden geçen akış nedeniyle belirli bir yönde birden daha büyük bir en boy oranına sahip dolgu maddelerinin yönlendirilmesine sebep olabilir. Bu yönlendirilme, numune içinde anizotropik iletkenlik oluşturacaktır; bu da, iletkenliğin bir yönde diğerine göre daha büyük olacağı anlamına gelmektedir. Dolgu maddesinin ve polimerin yüzey özellikleri aynı zamanda kompozitin iletkenliği ve perkolasyon eşiği üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir. Dolgu maddesinin ve matrisin yüzey serbest enerjileri, iki malzeme arasındaki etkileşimi etkileyecektir; genel olarak, yüksek kompozit elektrik iletkenliği elde etmek için dolgu maddesinin ve polimerin yüzey enerjisi arasında daha küçük bir fark olması arzu edilir [84,85].

2.7 İletken Polimer Kompozitlerde Kullanılan Dolgu Maddeleri

Tek bir polimere veya çok fazlı bir karışıma dayanan polimer matris içinde dağılmış tek veya hibrit iletken dolgu maddelerinden (örneğin; karbon esaslı, metalik ve iletken polimerik parçacıklar) oluşan elektriksel olarak iletken polimer kompozitler (CPC'ler), akademik ve endüstriyel anlamda onlarca yıldır önemli ölçüde ilgi görmüştür [86-90]. İletken dolgular CPC'lerin özelliklerini belirlemede kritik bir rol oynar. Kullanılan dolgu maddelerine örnek olarak karbon elyaf, karbon siyahı, karbon nanotüpler, grafen, grafit gibi karbon esaslı maddeler veya bakır, alüminyum, çinko, nikel gibi metal parçaları verilebilir. Bu iletken dolgu malzemeleri, çeşitli uygulamalarda kullanılabilecek geniş bir malzeme yelpazesi sunar. Uygun dolgu malzemesi seçimi, belirli bir uygulama için gereken elektriksel, mekanik ve kimyasal özelliklere bağlı olarak yapılır.

CPC'lerin elektriksel özdirençlerine göre Tablo 2.1'de özetlenen antistatik malzemeler, elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlama malzemeler, sensörler ve iletkenler gibi farklı alanlarda kullanılabilirler [91-98].

Tablo 2.1. CPC malzemelerinin elektriksel özdirençlerine ve uygulamalarına göre sınıflandırılması [99]

Malzeme kategorisi	Özdirenç ($\Omega.cm$)	Uygulamalar
Yarı iletken malzemeler	10^7-10^9	Direnç bantları, hassas kağıtlar ve elektrostatik kayıt kağıtları
Anti-statik malzemeler	10^4-10^7	Antistatik saklama kapları, antistatik filmler
İletken malzemeler	10^0-10^4	İletken ince filmler, gerinim algılama malzemeleri, organik sıvı algılama cihazları
Son derece iletken malzemeler	$10^{-3}-10^0$	Metal yerine kullanılan malzemeler, iletken yapıştırıcılar ve kaplamalar ve baskılı devreler

2.7.1 Karbon elyaf

Karbon fiberler, çapı yaklaşık 5 ila 10 mikrometre (0,00020–0,00039 inç) olan ve çoğunlukla karbon atomlarından oluşan fiberlerdir [100]. CF yüksek performanslı yapılarda en sık kullanılan fiberlerden biridir. Karbon fiberler yüksek gerilme, basınç mukavemeti, yüksek tokluk gösterir. Ayrıca yüksek modül, mükemmel yorgunluk karakteristiği, düşük ağırlık ve mevcut en iyi korozyona dayanıklı malzemelerden biridir. Karbon fiberlerin bilinen ilk kullanımı, 1879'da Thomas Edison'un pamuk iplikleri veya bambu şeritleri pişirerek akkor ampul üzerinde çalışması sırasında atfedilir. Grafit ipliklerinin üretimine dair kanıtlar Bacon tarafından 1958'den başlayarak rapor edilmiş ve 1960'taki ufuk açıcı makalesi [101] ve patentiyi [102] doruğa ulaştırmıştır.

CF, malzeme özelliklerinin çok çeşitli termo-fiziksel özellikleri kapsadığı ve istenen uygulamaya göre uyarlanabildiği ve çok çeşitli malzeme özelliklerine izin verdiği ölçüde benzersiz bir malzemedir. PAN bazlı karbon fiberlerin son ısıl işlem sıcaklığının artırılmasıyla çekme modülünde, elektriksel iletkenlikte ve ısıl iletkenlikte artışlar elde edilebilir [103,104]. Bununla birlikte, yüksek derecede

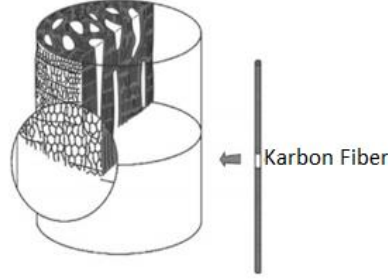
düzenli yapının büyük kristal tanecik oluşumu nedeniyle, PAN bazlı karbon fiberlerde çekme ve basınç dayanımı yanında, çekme modülü ile elektriksel ve termal iletkenlikte iyileştirmeler elde edilir.

Karbon fiberlere olan ilgi, 1950'lerin sonlarında, tekstil formlarındaki sentetik suni ipeklerin yüksek sıcaklıkta füze uygulamaları için karbon fiberler üretmek üzere karbonize edilmesiyle artmıştır. Yüksek performanslı karbon fiberlere yönelik teknik ve ticari atılım, suni ipek için %30'a karşı %50 olan daha yüksek karbon verimi ve daha basit imalat süreci nedeniyle daha ekonomik olduğu ortaya çıkan PAN işleminin tanıtılmasıyla 1960'ların sonlarında başladı. PAN bazlı fiberler ayrıca suni ipek bazlı fiberlere kıyasla üstün fiziksel özelliklere sahiptir. PAN elyafı bugün yüksek mukavemetli karbon elyafların üretimi için en önemli ve gelecek vaat eden öncü madde olarak kabul edilmektedir. Daha sonra karbon lifleri de çok ucuz bir öncül olan ziftten hazırlandı. En yaygın kullanılan ziftler petrol, asfalt, kömür katranı ve PVC'den elde edilenlerdir. Ziftli karbon fiberlerin özellikleri genellikle PAN karbon fiberlerden daha düşüktür, çünkü özel olarak işlenmemişse, pirolizden önce ziftler genellikle izotropiktir ve daha büyük düzlemlerin yönelimi, işlem sırasında gerilim altında 2000 ila 3000°C arasında yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilmediği sürece fiberlerde izotropi korunur. Bu işlem karbon fiberlere mükemmel performans özellikleri kazandırmasına rağmen çok pahalıdır.

Karbon fiber uygulamalarının iki ana sektörü, havacılık ve nükleer mühendisliği içeren yüksek teknoloji sektörü ve rulmanlar, dişliler, kamlar, fan kanatları vb. gibi mühendislik bileşenlerini ve otomobil gövdelerini içeren genel mühendislik, ulaştırma sektörüdür. Ancak iki sektörün ihtiyaçları temelde farklıdır. Karbon fiberlerin uçak ve havacılıkta büyük ölçekli kullanımı, maksimum performans ve yakıt verimliliğine bağlıdır; maliyet faktörü ve üretim gereklilikleri ise kritik değildir. Karbon fiberlerin genel mühendislik ve yüzey taşımacılığında kullanımında maliyet kısıtlamaları, yüksek üretim hızı gereklilikleri ve genellikle daha az kritik performans ihtiyaçları hakimdir. Bu durum hem üretim alanlarında iki farklı yaklaşımı hem de iki sektöre yönelik araştırmaları zorunlu kılmaktadır [105].

Sahip olduğu mükemmel mekanik özellikler karbon fiberin havacılık, inşaat mühendisliği, askeri, motor sporları ve diğer yarış sporlarında çok popüler olmasını sağlamıştır. Ancak cam elyafı, bazalt elyafı veya plastik elyaf gibi benzer elyaflarla

karşılaştırıldığında nispeten pahalıdırlar [106]. Bir karbon fiber üretmek için, karbon atomları, fiberin uzun eksenine az çok paralel olarak hizalanan kristallerde birbirine bağlanır, çünkü kristal hizalaması fibere yüksek bir mukavemet/hacim oranı verir. Binlerce karbon elyafı, tek başına kullanılabilen veya bir kumaş halinde dokunabilmek üzere bir araya getirilir.



Şekil 2.8. Karbon elyafın yapısı [107]

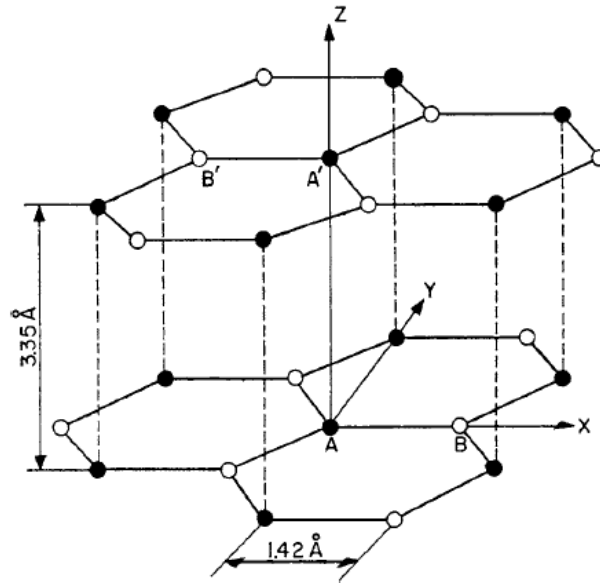
Karbon fiberler genellikle bir kompozit oluşturmak için diğer malzemelerle birleştirilir. Örneğin, bir plastik reçine ile nüfuz ettirildiğinde, çok yüksek bir mukavemet-ağırlık oranına sahip olan ve bir miktar kırılğan olmasına rağmen son derece sert olan, karbon fiberle güçlendirilmiş polimer (CFRP) oluşturur. Karbon fiberler ayrıca çok yüksek ısı toleransına sahip güçlendirilmiş karbon-karbon kompozitleri oluşturmak için grafit gibi diğer malzemelerle de birleştirilir. Karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler, uçak ve uzay aracı parçaları, yarış arabası gövdeleri, golf sopası milleri, bisiklet çerçeveleri, oltalar, otomobil yayları, yelkenli direkleri ayrıca hafiflik ve yüksek mukavemetin gerekli olduğu diğer birçok bileşenin yapımında kullanılır. Örneğin, karbon fiber kompozitler yapısal parçalar için 1020 çelikten beş kat daha güçlü ve yine de beş kat daha hafiftir. 6061 alüminyum ile karşılaştırıldığında, karbon fiber kompozitler yedi kat daha güçlü ve iki kat daha sert, ancak 1,5 kat daha hafiftir. Bu üstün özellikler fiber mikroyapısının sonuçlarıdır. Karbon fiberler elastiktir, sürünmeye dayanıklıdır ve mükemmel sönümleme özelliklerine sahiptir. Öte yandan, karbon fiberlerin bazı dezavantajları vardır. Kırılğandır ve düşük darbe direncine sahiptirler. Cam elyaflara kıyasla nispeten pahalıdırlar.

2.7.2 Grafit

Karbon, elmas, grafit ve fullerener olmak üzere üç formda bulunur. Elmas ve grafit arasındaki temel fark, karbon bağının elmasta sp^3 (tetrahedral) hibridizasyonunu ve grafitte sp^2 (trigonal) hibridizasyonunu içermesidir. Sonuç olarak, elmas üç boyutlu

bir kristal yapıya sahipken, grafit, bir AB dizisinde istiflenen karbon katmanlarından (her katman içinde kovalent ve metalik bağlarla veya HCP (Hexagonal Close Packing) kristal yapısı) ve lokalize bir π -orbital tarafından üretilen zayıf bir Van der Waals etkileşimi ile bağlanmasıyla oluşur [108]. Grafitteki karbon katmanlarına grafen katmanları denir.

Grafit, karbon elementinin kristal formudur. Yığılmış grafen katmanlarından oluşur. Grafit doğal olarak oluşur ve standart koşullar altında karbonun en kararlı formudur. Sentetik ve doğal grafit, kurşun kalemlerde, yağlayıcılarda ve elektrotlarda kullanılmak üzere büyük ölçekte tüketilmektedir. Yüksek basınç ve sıcaklık altında elmasa dönüşür. Anizotropiktir, katmanlar içinde iyi bir elektrik ve termal iletkenidir (düzlem içi metalik bağ nedeniyle) ve katmanlara dik olarak zayıf bir elektrik ve termal iletkenidir (katmanlar arasındaki zayıf Van der Waals kuvvetleri nedeniyle). Bu anizotropinin bir sonucu olarak, karbon katmanları birbirine göre oldukça kolay kayabilir, böylece grafit iyi bir yağlayıcı ve kurşun kalem malzemesi haline gelir.



Şekil 2.9. Grafitin kristal yapısı [108]

Anizotropi nedeniyle grafit, reaktantın (interkalat adı verilen) grafen katmanları arasında bulunmasına izin vererek, bileşikler oluşturan kimyasal reaksiyonlara girebilir. Bu tür reaksiyonlara interkalasyon denir. Ara katman ile grafit arasında yük aktarımının olduğu bir grafit ara bileşiği (GIC), elektriksel olarak grafitten daha iletken olma eğilimindedir. İletkenlik, elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlaması için yüksek etkinliğe yol açar. Çoğu GIC ısıtıldığında eksfoliye olabilir [109]. Eksfoliye

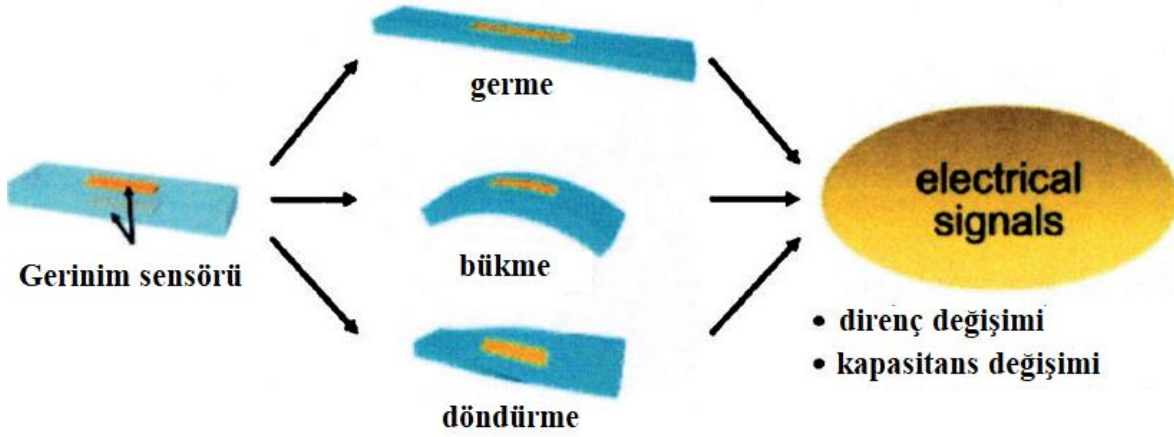
olmuş grafit pullarının bir bağlayıcı olmadan sıkıştırılması, mekanik kilitleme ile sonuçlanır, böylece esnek grafit conta malzemesi olarak bilinen esnek ve elastik bir tabaka oluşturulur.

Amorf karbon genellikle uzun menzilli bir düzen olmaması dışında bağları ve yapısı grafitte benzer olan karbonu ifade eder. AB istifleme sırası yoktur ve katmanlar genellikle düz değildir. Isıl işlem sonrasında amorf karbon, kristallik derecesini (grafitleşme derecesi olarak adlandırılır) artırır. Uygulamada kullanılan karbon fiberler gibi çok sayıda karbon tamamen grafit değildir ancak ısıl işlem sıcaklığına bağlı olarak farklı derecelerde grafitleşmeye sahip geniş bir geçişe sahiptir.

2.8 Gerinim Duyarlı Sensörler

Gerinim duyarlı sensörler, çeşitli uygulamalarda malzeme gerilimini ölçmek için kullanılan sensörlerdir. Bu sensörler, bir malzemenin mekanik gerilmesini veya deformasyonunu algılamak ve bu değişiklikleri bir ölçüm sinyaline dönüştürmek amacıyla tasarlanmıştır. Gerinim, bir malzemenin orijinal boyutlarına göre ne kadar değiştiğini ifade eder. Gerinim duyarlı sensörler, malzemenin mukavemeti, elastikiyeti ve diğer mekanik özellikleri hakkında bilgi sağlamak için kullanılmaktadır. Bu sensörler, inşaat, otomotiv, endüstriyel üretim ve birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Gerinim sensörü, direnç ve kapasitanstaki değişikliklere bağlı olarak mekanik deformasyonu çıkış sinyallerine dönüştüren bir cihazdır (Şekil 2.10). Metaller ve yarı iletkenlere dayanan geleneksel gerinim sensörleri şu anda çeşitli uygulamalar için kullanılmaktadır. Bu uygulamalar arasında yapısal sağlık izleme [110-113], biyomedikal uygulamalar [114-117], ve araştırma amaçlı gerilim dağılımı analizi yer almaktadır [118-123]. Süreçleri iyi geliştirilmiş olmasına ve düşük üretim maliyeti gerektirmesine rağmen, metallerin ve yarı iletkenlerin kırılma ve katı doğası, gerilebilirlik ve dayanıklılık açısından sınırlamalar ortaya koymaktadır. Ancak elektronik cilt (e-cilt) uygulamalarına odaklanan cihazlardaki son gelişmeler, %30'un üzerinde gerilimde çalışabilen esnek, gerilebilir ve hassas gerinim sensörlerine olan ihtiyacı ortaya koymaktadır.



Şekil 2.10. Gerinim sensörlerinin şematik gösterimi [124]

Gerinim algılama malzemelerini oluşturmak üzere esnek polimerleri ve iletken bileşenleri bir araya getirmek için çeşitli kompozit üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Kullanılan yöntemler ve ortaya çıkan gerinim sensörlerinin konfigürasyonuna bağlı olarak, esnek iletken polimer kompozit (FCPC) tabanlı gerinim sensörleri kabaca üç tipe ayrılabilir: (1) dolgulu tip FCPC bazlı gerinim sensörleri, (2) sandviç tipi FCPC bazlı gerinim sensörleri ve (3) adsorpsiyon tipi FCPC bazlı gerinim sensörleri. Bu farklı gerinim sensörleri farklı mikro yapılara sahiptir ve dolayısıyla belirgin biçimde farklı algılama performansları sergiler.

Dolgulu tip FCPC gerinim sensörleri genellikle iletken dolgu maddelerinin, özellikle karbonlu iletken dolgu maddelerinin, eritilerek bileşik oluşturma veya çözelti karıştırma yoluyla esnek bir polimer matris içine doğrudan dağıtılmasıyla üretilir. Genel olarak, iletken dolgu maddelerinin ve polimer parçacıklarının belirli bir sıcaklıkta kuru olarak harmanlandığı ve daha sonra örnekleri üretmek için sıcak preslendiği veya ekstrüzyona tabi tutulduğu erime bileşiği, basitliği nedeniyle üretimde kolaylıkla ölçeklendirilebilir. Çözelti karıştırma normalde dolgu maddelerini dağıtarak ve polimerleri bir solvent içinde ultrason veya mekanik karıştırma ile çözerek, ardından homojenleştirilmiş çözeltiyi dökerek ve iletken polimer kompozitleri elde etmek için sıcak kürlemeyle daha iyi bir iletken dolgu dispersiyonuna sahip CPC'ler üretebilir. Dolgulu tip FCPC'ler için, yalıtkan/iletken geçişini sağlamak amacıyla yalıtkan polimer matrisinde iletken dolgu maddelerinin nispeten yüksek oranda kullanılması gerekir; bu da yüksek Young modülüne, düşük esnekliğe, kompleks işlemeye ve malzemelerin yüksek maliyetine yol açar [125-127]. Örneğin yapılan bir çalışmada [128], eriyik harmanlama ve ekstrüzyon kalıplama

yoluyla karbon siyahı ile doldurulmuş termoplastik bir elastomere dayalı gerinim sensörlerini hazırlanmıştır. Gerinim sensörünün, yalnızca CB içeriği ağırlıkça %50'ye arttığında germe işlemi sırasında gerilimle birlikte elektrik direncinde monotonik bir değişiklik sergileyebildiği bulunmuştur. Ancak yüksek CB içeriği, algılama uygulamalarında kabul edilemeyecek derecede kırılgan bir kompozitle sonuçlanmış. Bu nedenle, perkolasyon eşiğini düşürmek ve CPC'lerin elektriksel iletkenliğini arttırmak için bir dizi strateji geliştirilmiştir. Son birkaç yılda, dolgu dispersiyonunun iyileştirilmesi [129-132], büyük en-boy oranlı dolgu maddelerinin eklenmesi, hibrit dolgu maddelerinin kullanılması [96,133-136] veya yeni hiyerarşik yapıların tasarlanması (çift perkolasyon yapıları [137], [138], ayrılmış yapılar [139-141], ve gözenekli yapılar [142,143]) gibi bazı stratejiler perkolasyon eşiğini düşürmek için uygulanmıştır. Örneğin, bir diğer çalışmada [130] farklı yüzey aktif maddelerin CNT/triblok kopolimer stiren-etilen/bütillen-stiren (SEBS) kompozitlerinin elektriksel iletkenliği ve gerinim algılama davranışları üzerindeki etkilerini araştırılmıştır. Ortaya çıkan CNT/SEBS kompozitlerinin elektriksel iletkenliğinin ve gerinim duyarlılığının, CNT'lerin dağıtıcı maddeleri olarak işlev gören uygun yüzey aktif maddelerin eklenmesiyle önemli ölçüde geliştirilebileceğini ve bunun da SEBS matrisindeki CNT topaklarının boyutunu azaltabileceğini bulmuşlardır.

Her ne kadar dolgulu tip FCPC'leri temel alan gerinim sensörleri bariz avantajlara sahip olsa da (düşük maliyetli ve büyük ölçekli üretim gibi), aynı zamanda birçok eksikliğe de sahiptirler. Örneğin, hem polimerlerin viskoelastik yapısından hem de dolgu maddeleri ile polimerler arasındaki etkileşimden kaynaklanan mevcut histerezis genellikle dinamik yükleme durumunda geri dönüşü olmayan bir algılama performansına yol açar. Ayrıca, bu tip gerinim sensörünün yüksek dolgu oranı, özellikle küçük gerinim altındaki gerinim duyarlılığı için gerinim hassasiyetini de etkileyebilir. Sonuç olarak, dolgulu tip FCPC'leri temel alan gerinim sensörleri, insan eklem hareketleri gibi büyük gerinimlerin tespit edilmesi için daha uygundur.

2.8.1 İletken polimerler kompozitlerin gerinim sensörlerinde kullanılması

İletken polimer kompozitler, gerinim sensörlerinde kullanılmak üzere ideal bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Bu tür sensörler, bir malzemenin mekanik gerilmesini veya deformasyonunu ölçmek için tasarlanmıştır. İletken polimer kompozitlerin bu uygulamadaki kullanım avantajları şunlardır:

Esneklik: İletken polimer kompozitler genellikle esnek ve hafif olduğundan, sensörün uygulanacağı yüzeye kolayca adapte olabilir. Bu özellik, çeşitli yüzeylere uyum sağlama ve çeşitli şekillerde kullanılabilme avantajı sağlar.

İletkenlik: İletken polimer kompozitler, karbon nanotüpler, grafen, karbon fiber, polianilin gibi malzemelerle takviye edilmiş olabilir. Bu malzemeler, elektriksel iletkenlik sağlar ve gerinim altında malzemenin elektriksel direncinde değişikliklerin ölçülmesini mümkün kılar.

Hassas Ölçüm: İletken polimer kompozit tabanlı gerinim sensörleri, malzemenin gerilmesiyle değişen elektriksel direnç özelliklerini kullanarak gerilim seviyelerini hassas bir şekilde ölçebilir.

Hızlı Yanıt Süresi: İletken polimer kompozit tabanlı sensörler, mekanik gerilmeye hızlı bir şekilde yanıt verebilirler, bu da gerilim değişikliklerini hızlı bir şekilde algılamalarını sağlar.

Dayanıklılık: Bu kompozitler, mekanik dayanıklılıkları sayesinde uzun ömürlü ve dayanıklı gerinim sensörleri olabilirler.

İletken polimer kompozit tabanlı gerinim sensörleri, giyilebilir teknolojilerden yapısal sağlık izleme sistemlerine kadar bir dizi uygulamada kullanılabilir. Bu kompozitlerle yapılan gerinim sensörleri, özellikle esnek elektronik cihazlar, giyilebilir teknolojiler, robotik sistemler, yapısal sağlık izleme ve spor ekipmanları gibi alanlarda kullanım potansiyeline sahiptir. Bu sensörler, malzeme gerilimi altındaki değişiklikleri hızlı ve hassas bir şekilde ölçerek çeşitli endüstriyel ve tıbbi uygulamalarda değerli bilgiler sağlayabilirler.

2.8.2 Esnek gerinim sensörleri

Esnek gerinim duyarlı sensörler, mekanik gerilme veya deformasyonu ölçmek ve bu değişiklikleri algılamak üzere tasarlanmış sensörlerdir. Bu tür sensörler, genellikle esnek substratlar veya malzemeler üzerine entegre edilmiş elemanlar içerir ve geniş bir uygulama yelpazesi için kullanılabilir. Esnek sensörler, genellikle elastomerik malzemeler, esnek polimerler veya ince film tabakaları kullanılarak yapılmaktadır, bu nedenle esnek ve yumuşak bir yapıya sahiptir. Bu özellik, sensörlerin çeşitli yüzeylere ve eğrilğe uyum sağlamasına izin verir. Esnek gerinim duyarlı sensörler, deformasyon veya gerilme altındaki malzeme özelliklerindeki değişiklikleri hassas bir şekilde

ölçebilir. Ayrıca bu sensör malzemeleri, bir dizi malzeme ile entegre edilebilir, bu da çeşitli uygulamalara uyarlanabilirlik sağlar. Örneğin, polimer materyaller, kumaşlar veya esnek elektronik devrelerle birleştirilebilir. Esnek gerinim duyarlı sensörler, mekanik değişikliklere hızlı bir şekilde yanıt verebilirler, bu da dinamik uygulamalarda kullanılmalarını sağlar. Giyilebilir teknolojilerde ve giysi entegrasyonunda kullanılabilir. Bu, spor ekipmanlarından sağlık izleme cihazlarına kadar bir dizi uygulama alanına olanak tanır. Genellikle dayanıklı malzemeler kullanılarak yapılmaktadır, tekrarlı deformasyonlara ve geniş çalışma aralıklarına dayanıklılık gösterirler. Dokunmatik ekranlarda, robotik cihazlarda ve insan-makine etkileşimi uygulamalarında kullanılabilir. Esnek sensörler, esnek elektronik bileşenlerle bütünleştirilebilir ve bükülebilir cihazlarda kullanılabilir.

Giyilebilir akıllı cihazların hızla gelişmesiyle birlikte, yüksek performanslı akıllı esnek gerinim sensörlerine olan talep de artmaktadır. İnsan hareketi algılama [144-154], vücut sağlığı izleme [155], yapay kaslar, yumuşak robotik cilt [156], insan-makine arayüzleri [157], ve yapısal sağlık izleme [158] dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda büyük umutlar sergilemektedirler. Bununla birlikte, geleneksel gerinim sensörleri genellikle metallerden veya inorganik yarı iletkenlerden oluşur ve sınırlı algılama aralıkları (%5) nedeniyle yüksek gerinim algılama yeteneklerine yönelik zorunlu gereksinimi karşılayamaz [138,159-169]. Ayrıca, karmaşık hazırlık süreci ve yüksek imalat maliyeti de bunların uygulanmasını ve geliştirilmesini kısıtlamaktadır. Bu nedenle, yeni akıllı esnek gerinim sensörleri acil talep görmekte ve ilgili araştırma çalışmaları da son derece umut verici konular olarak ortaya çıkarmaktadır.

Son zamanlarda fonksiyonel polimer bazlı kompozitler, elektrik/termal iletken malzemeler [170-174], alev geciktiriciler [175-178], dielektrikler [179-183], elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlaması [184-186], kendi kendini iyileştirme [187,188], biyoimmobilizasyon [189], enerji [190-194], çevre iyileştirme [195,196], korozyon önleyici kaplama [197] ve sensörler [198,199] alanlarında büyük potansiyel sergilemiştir. Bütün bunlar, polimer matrisinin (örneğin, düşük yoğunluk, kolay işlenme ve iyi esneklik) ve işlevsel dolgu maddelerinin (örneğin, yüksek termal/elektrik iletkenliği, manyetizma ve mükemmel mekanik özellik) özelliklerinin mükemmel kombinasyonuna atfedilir. Bunlar arasında, elektriksel olarak iletken polimer kompozitlerin (ECPC'ler), germe, sıkıştırma ve bükme dahil olmak üzere

farklı dış gerilimlere [200-202] göre elektriksel direncin değişimine dayanan akıllı esnek gerinim sensörleri için ilgi çekici adaylar olduğu ortaya çıkmıştır. Polimer matrisin iyi esnekliği ve gerilebilirliği, ECPC bazlı gerinim sensörlerinin örölmesine [203,204], cilde takılabilir [155] ve giyilebilir olmasına [205,206] olanak tanır ve geleneksel olanlara göre üstünlüğünü bu alanlarda gösterir. Bu nedenle, yeni nesil ECPC tabanlı akıllı esnek gerinim sensörlerinin araştırılmasına büyük çaba sarf edilmiştir.

Normal olarak ECPC'ler, uygun işleme teknolojisi (örneğin, çözelti karıştırma, eriyik birleştirme, yerinde polimerizasyon, sprey kaplama, döndürerek kaplama ve daldırmalı kaplama) kullanılarak iletken dolgu maddelerinin yalıtkan bir polimerik matris ile kombinasyonu yoluyla elde edilir. Artan dolgu oranıyla birlikte, bitişik iletken dolgu maddelerinin birleşimine dayalı olarak sürekli iletken ağlar oluşturulur ve yalıtkan/iletken geçişi genellikle elektriksel perkolasyon eşiği (P_c) olarak adlandırılan kritik bir içerikte gözlemlenir [207]. Daha düşük bir P_c 'ye sahip ECPC'ler, üretim maliyetini etkili bir şekilde azaltabilir ve iyi elektriksel özellikleri temelinde ECPC'lerin işlenebilirliğini ve mekanik özelliklerini koruyabilir [208,209]. Bu nedenle, bu hedefe ulaşmak için yüksek en boy oranlı nano dolguların veya sinerjistik çift dolguların eklenmesi [210,211] ve özel faz morfolojisinin oluşturulması (örneğin, ayrılmış yapı [212,213], çift perkolasyon yapısı [214,215] ve gözenekli yapı [216]). Ayrıca akıllı esnek gerinim sensörleri olması, polimer matris ve iletken dolgu seçimi, algılama performansı açısından çok önemli faktörlerdir. Genel olarak, termoplastik poliüretan (TPU) [217,218], kauçuk [219,220], ecoflex [221], ve poli(dimetilsiloksan (PDMS) dahil olmak üzere yüksek oranda uzamaya ve iyi esnekliğe sahip elastomerler [222], önceki çalışmalarda en yaygın olarak seçilen polimerlerdir ve geniş bir gerinim aralığına sahip gerinim sensörlerinin imalatı için büyük potansiyel uygulamalar göstermektedir. Bu arada, karbon esaslı dolgular (örn. karbon nanotüpleri (CNT'ler), karbon siyahı (CB), grafen ve karbon fiber (CF)) [223,224] iletken polimerler (örn. PEDOT:PSS, PPy ve PANI) [225,226] ve nanometaller (örneğin, gümüş nanotel/nanopartiküller, altın nanotabakalar ve Cu nanotel) [227-229] genellikle kompozitlere mükemmel elektriksel iletkenlik özelliği kazandırmak için kullanılır. Daha sonra etkili bir iletken ağ oluşturmak amacıyla bunları bir araya getirmek için uygun bir işleme tekniği belirlenir.

ECPC tabanlı gerinim sensörlerinin mevcut araştırma durumuna bakıldığında, geniş bir algılama aralığı, yüksek hassasiyet, yüksek çözünürlük, hızlı yanıt, iyi dayanıklılık ve mükemmel çevresel kararlılık, karşılanması gereken zorunlu özellikleridir. Çalışma prensibinin esas olarak ECPC'lerin harici bir gerilime/strese maruz kalması durumunda iletken ağın yeniden düzenlenmesinden kaynaklanan elektriksel direnç değişimine dayandığı bilinmektedir. Genel olarak iletken dolgunun türü ve geometrik morfolojisi iletken ağ morfolojisini etkileyerek sensörün algılama performansı üzerinde önemli etkiler yaratır [230,231] Ayrıca, özel bir iletken ağın inşası da ECPC'lerin algılama davranışını ayarlamak için etkili bir yöntemdir [232]. Dolayısıyla, yukarıda belirtildiği gibi bu zorunlu özellikleri elde etmek için, iletken dolgu tipinin seçimi ve morfolojisi ile özel işleme teknolojisini kullanan oldukça aktif bir iletken ağ tasarımı, dikkate alınması gereken iki önemli faktördür.

Şimdiye kadar ECPC'ler hakkında yayınlanan inceleme makaleleri esas olarak ECPC'lerin elektriksel özelliklerinin düzenlenmesine odaklanılmıştır. Örneğin, yapılan bir çalışmada, ayrılmış bir yapı ve çift perkolasyon yapısı tasarlanarak, kontrol edilebilir elektriksel özelliklere sahip ECPC'lerdeki son zamanlardaki kapsamlı ilerlemeyi sistematik olarak gözden geçirilmiştir [99]. Başka bir çalışmada, iletken ağın morfolojisini ayarlamak için kullanılan işleme yaklaşımlarını ve bunların ECPC'lerin elektriksel özellikleri üzerindeki etkilerini tamamen özetlenmiştir. Bu arada, ECPC'lerin çok işlevli özellikleri (örneğin gerinim ve hasar algılama, gerilebilir iletken, sıcaklık algılama, buhar ve sıvı algılama, şekil hafızası ve termoelektrik malzemeler) de kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [18]. Yapılan bir başka çalışmada, ayrılmış bir yapıya sahip CPC'lerin perkolasyon davranışlarının etki faktörlerini sistematik olarak tartışılmış ve algılama/termoelektriklik/EMI kalkanlama alanlarındaki potansiyel uygulamaları da gözden geçirilmiştir [91].

2.9 ECPC Tabanlı Gerinim Sensörlerinin Temelleri

2.9.1 ECPC'lerin iletken mekanizması

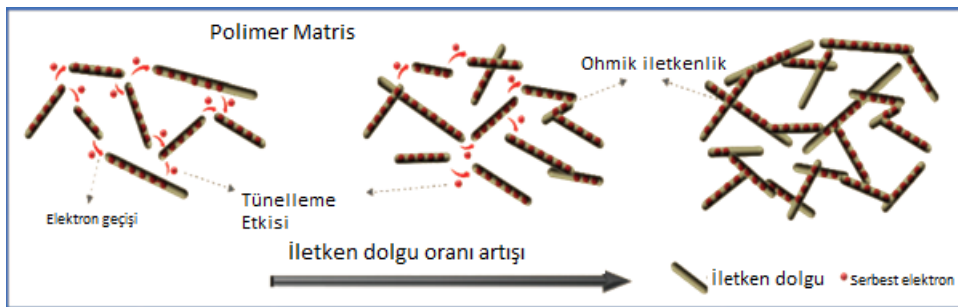
Polimerlerin fizikokimyasal özellikleri (örneğin, erime indeksi, kristallik ve moleküler polarite) ve iletken dolgu maddelerinin yapısı ve morfolojisindeki farklılıklar nedeniyle, iletken dolgu maddesinin polimer matrisindeki dağılım durumu, ECPC'lerin hazırlanma süreci sırasında ön görülemez. Dolayısıyla kompozit içerisinde oluşan iletken mekanizma için henüz belirli bir sonuç yoktur.

Genel olarak ECPC'lerin iletim mekanizması, iletken dolgu oranıyla yakından ilişkilidir ve biri tünelleme (tunneling) etkisi ve diğeri ohmik [233,234] iletkenlik olmak üzere iki ana tipte sınıflandırılabilir (Şekil 2.10). Bir tünelleme etkisi esas olarak, çoğu dolgu maddesinin karıştırma işlemi sırasında bir polimer tabakası ile kaplandığı ve serbest elektron enerjisinden daha yüksek bir bariyer oluşturduğu, daha düşük dolgu yüküne sahip ECPC'lerde mevcuttur. Klasik mekanik teorisine göre serbest bir elektronun enerjisi bariyer yüksekliğinden düşük olduğunda bariyerden atlaması mümkün değildir ve bu da etkin elektronik iletimi engeller. Bununla birlikte kuantum mekaniği, bariyer yüksekliğinden daha düşük enerjiye sahip mikroskobik parçacıkların hala bariyerden atlama olasılığına sahip olduğunu kanıtlıyor; buna genellikle tünelleme etkisi denir. ECPC'ler için Balberg, denklem (1): [235] olarak ifade edilen tünel iletim modelini önermiştir.

$$\sigma_{\text{tun}} \propto \exp (-r/d) \quad (2.1)$$

burada σ tünelleme iletkenliğini temsil eder, r tünelleme mesafesini (bitişik iletken dolgunun merkezi arasındaki en kısa mesafe) temsil eder ve d tünelleme bozulma parametresini temsil eder. Açıkça görülmektedir ki σ , r ile ters orantılıdır, dolayısıyla r , bitişik iletken dolgu maddeleri arasındaki yük transferini kontrol etmek için önemli bir parametredir [236].

Genellikle r , dolgu maddesi oranındaki artışla azalır ve daha yüksek bir σ 'ya neden olur. Dolgu oranı perkolasyon eşiğine yükseltildiğinde, polimer matris içinde dağıtılan iletken ağlar inşa edilir ve serbest elektronların hareketi için nispeten düşük dirençli elektrik yolları sağlanır, böylece Ohmik iletkenlik bu durumda yavaş yavaş ana iletken mekanizma haline gelir.



Şekil 2.11. ECPC'lerin iletken mekanizmasının şematik gösterimi [237]

Makro açıdan bakıldığında, dolgu içeriğindeki artışla birlikte tünelleme etkisinden Ohmik iletkenliğe geçiş, genel olarak perkolasyon teorisi olarak tanımlanan ECPC'lerin iletkenliğinin ani geçişi ile ilişkilidir. Flory'nin jelleşme teorisine göre, Kirkpatrick ve Appel, Pc'nin üzerindeki dolgu oranı ile ECPC'lerin iletkenliği arasındaki ilişkiyi tanımlamak için kullanılan, denklem (2) olarak ifade edilen klasik istatistiksel perkolasyon modelini önermişlerdir.

$$\sigma = \sigma_0(P - P_c)^t \quad (2.2)$$

burada P , iletken dolgu maddesinin hacim oranını temsil eder, σ ve σ_0 sırasıyla ECPC'lerin ve iletken dolgu maddesinin iletkenliğini temsil eder ve t , ECPC'lerde oluşturulan iletken ağın boyutsallığını tahmin etmek için kullanılan bir ölçeklendirme faktörüdür. Genel olarak, iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) iletken ağların, t sırasıyla 1,1–1,3 ve 1,6–2,0 aralığında olduğunda elde edildiği kabul edildi. Elbette bazı çalışmalarda, ayrılmış yapıya [238,239] ve gözenekli yapıya sahip ECPS'ler de dahil olmak üzere iletken dolgu maddesinin karmaşık dağılımı nedeniyle daha yüksek veya daha düşük t değerleri de gözlemlenmiştir [98,216].

2.9.2 ECPC tabanlı gerinim sensörlerinin tepki mekanizması

ECPC tabanlı gerinim sensörleri bir tür dirençli tip sensördür ve tepki mekanizmaları esas olarak iletken ağların harici stress/strain üzerindeki değişimine dayalıdır ve uyarıları bir direnç sinyaline aktarır. Pc'nin üzerinde dolgu oranına sahip ECPC'ler genellikle kararlı bir algılama davranışı sağlamak için seçilmektedir. Yukarıda tartışılan iletken mekanizmaya dayanarak, uygulanan gerinim genliğine göre genellikle farklı algılama mekanizmaları önerilmektedir: (1) küçük bir gerinim genliği altında, komşu dolgu maddeleri arasındaki bağlantıların tahrip edilmesi kolay değildir ve tünelleme mesafesinin değişmesi direnç değişikliğine katkıda bulunarak küçük bir algılama sinyaline neden olur; (2) gerinim genliği arttıkça, bazı tünelleme yollarının tünelleme mesafesinin ayrılma mesafesinden daha büyük olduğu ortaya çıkar. Bu arada iletken dolgu maddesi arasındaki bazı doğrudan bağlantılar ayrılarak tüm iletken ağın tahrip olmasına yol açar. Bütün bunlar şüphesiz dirençte küçük gerinim genliğine göre daha büyük bir değişime neden olur, dolayısıyla daha güçlü bir algılama sinyali gösterir [240,241].

Bu durumun tersi olarak, dış gerilim ortadan kaldırıldığında, çoğu iletken yol, polimer matrisinin iyi esnekliği nedeniyle tamamen başlangıç durumuna geri dönecektir.

Bununla birlikte, polimerin moleküler zincirinin histerezis etkisi ve kararsız iletken yolun tamamen yok olması nedeniyle geri dönüşü olmayan bazı iletken yollar hala mevcuttur. Tüm bunlar, ECPC'lerin artık direncine (başlangıç değerinden daha yüksek direnç) yol açma eğilimindedir ve bu da bir gerinim sensörü olarak kullanıldığında kötü geri kazanılabilirliğe neden olur. Bu durumda, iletken ağı stabilize etmek için döngüsel gerilim veya sıkıştırma, uygun bir polimer matrisinin seçilmesi ve özel bir iletken ağ tasarlanması sıklıkla benimsenir ve ECPC'lere kararlı algılama davranışı kazandırır.

2.10 Esnek Gerinim Sensörlerinin Kullanım Alanları

Esnek gerinim duyarlı sensörlerin yukarıda bahsedilen sahip olduğu özellikler, bir dizi uygulamada kullanılmalarına ve endüstriyel, tıbbi, spor, giyilebilir teknoloji ve robotik gibi alanlarda çeşitli ihtiyaçları karşılamalarına olanak tanımaktadır. Bu sensörler, malzemenin deformasyonunu izlemek ve bu veriyi çeşitli uygulamalarda kullanmak için kullanılır. Esnek gerinim duyarlı sensörler, geniş bir uygulama yelpazesine sahip olduklarından birçok endüstri ve alan için önemli bir teknoloji haline gelmiştir. Bu tip sensörlerin bazı kullanım alanları aşağıda verilmiştir.

Giyilebilir Teknoloji: Esnek sensörler, giyilebilir cihazlarda, akıllı tekstillerde ve giysi entegrasyonunda kullanılmaktadır. Bu sensörler, vücut hareketlerini, aktivite düzeyini ve fiziksel sağlık parametrelerini izlemek için kullanılabilir.

Tıbbi Uygulamalar: Esnek gerinim sensörleri, medikal cihazlar ve implantlar için kullanılabilir. Örneğin, bu sensörler, protezlerin kullanımını optimize etmek, hareket bozukluklarını izlemek veya hastaların fiziksel terapilerini takip etmek için kullanılabilir.

Spor ve Performans İzleme: Bu tür sensörler, sporcuların hareketlerini izlemek, antrenman verilerini toplamak ve performanslarını analiz etmek için kullanılabilir. Ayrıca, spor ekipmanlarına entegre edilebilirler.

Robotik ve Otomasyon: Esnek gerinim sensörleri, robot kolları, manipülatörler ve diğer robotik sistemlerin gerilimini veya deformasyonunu izlemek için kullanılabilir. Böylece, robotların çevresel değişikliklere adapte olmalarını sağlar.

Akıllı Yapılar ve Yapısal Sağlık İzleme: Esnek sensörler, binaların, köprülerin ve diğer altyapıların gerilim durumlarını izlemek ve yapısal sağlık izlemesi yapmak için kullanılabilir.

Elektronik Cihazların Kullanıcı Arayüzleri: Esnek sensörler, dokunmatik yüzeylerde kullanıcı etkileşimini geliştirmek için kullanılabilir. Esnek ekranlar ve dokunmatik kontrol sistemleri için idealdirler.

Oyun ve Eğlence: Oyun kumandaları, sanal gerçeklik (VR) sistemleri ve interaktif oyun cihazları gibi eğlence uygulamalarında esnek gerinim sensörleri kullanılabilir.

Endüstriyel Otomasyon: Esnek sensörler, endüstriyel makinelerin gerilim ve deformasyonunu izlemek, üretim hatlarını optimize etmek ve makine güvenliği için kullanılabilir.

Uzay ve Havacılık: Uzay araçları, uçaklar ve diğer hava taşıtlarında esnek sensörler, malzeme gerilimini ve deformasyonunu izleyerek yapısal sağlık izlemesi ve bakım uygulamalarında kullanılabilir.

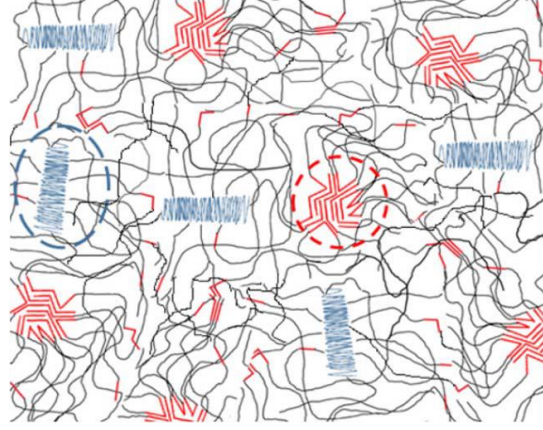
2.11 Termoplastik Poliüretan (TPU)

İlk kez 1937 yılında Otto Bayer tarafından keşfedilen poliüretanlar, makromolekülün geri kalan içeriğine bakılmaksızın, moleküler omurgasında önemli sayıda üretan bağı bulunan polimer serisini kapsar [242]. Üretan bağı, bir izosiyanat grubu ile bir hidroksil grubu arasındaki reaksiyon yoluyla oluşturulur. Bu polimerlerle ilgili ilk çalışmalar diizosiyanatları diollerle reaksiyona sokarak doğrusal poliüretanlar oluşturmaya odaklanmış, ancak çok çeşitli özelliklere sahip çok sayıda polimerin üretilebileceği hızlı bir şekilde fark edilmiştir [243]. İlk çalışmalar polyester bazlı poliollere odaklanmıştır; bununla birlikte, polieter bazlı poliollerin sağladığı gelişmiş hidrolitik stabilite ve çok yönlülük, bunların poliüretan sentezinde tercih edilen bir öncü haline geldiği görülmüştür [243]. Günümüzde poliollerin, izosiyanatların ve zincir uzatıcıların seçimi, poliüretanların yumuşak termoplastik elastomerlerden yapıştırıcılara, kaplamalara, esnek köpüklere ve sert termosetlere kadar çeşitlenmesine olanak tanımaktadır.

Poliüretanlar hem termoset hem de termoplastik formda geniş uygulama alanı bulmuştur. Bu kadar çeşitli uygulamaların nedenlerinden biri poliüretanların ayarlanabilir kimyasıdır. Polioller, izosiyanatlar ve zincir uzatıcılar (kısa zincirli

dioller) poliüretanın ana yapı taşlarıdır ve farklı yapı blokları seçilerek çok farklı özellikler elde edilebilir. Sert segmentler ve yumuşak segmentler, farklı sertliklere sahip olmaları nedeniyle poliüretanların en önemli özellikleridir. Sert segment alternatif izosiyanat ve zincir uzatıcı dizilerini içerirken, yumuşak segment esnek poliöl zinciridir. Her iki segment türü de kovalent bağlarla birbirine bağlanır, böylece aslında blok kopolimerler oluştururlar. Sert segmentlerde üretan bağları mevcut olduğundan, güçlü hidrojen bağları nedeniyle yumuşak segment matrisinde kendiliğinden birleşebilir ve sert alanlar oluşturabilirler. TPU kompleks morfolojisinin şematik gösterimi Şekil 2.12’de gösterilmektedir. Sert alanların (kırmızı alanlar) ve yumuşak bölüm kristallerinin (yarı kristal yumuşak bölüm durumunda mavi alanlar) bir ana fazda (matris) dağıldığı bir mikrofazla ayrılmış morfolojidir. Yumuşak segment kristalizasyonu yalnızca kullanılan yumuşak segmentlerin kristalleşme kabiliyetine sahip olması ve yeterince yüksek molekül ağırlığına sahip olması durumunda meydana gelir.

Doğrusal poliüretanlar için bu sert alanlar fiziksel çapraz bağlantı görevi görür. Sonuç olarak lineer poliüretanlar düşük sıcaklıklarda elastomerik özellikler sergiler ve aynı zamanda yüksek sıcaklıklarda (erime noktasının üzerinde) işlenebilmektedir. Bununla birlikte, farklı bölümlerin hacim oranları, her bölümün kimyasal bileşimi, her bölümün molekül ağırlığı ve molekül ağırlık dağılımı gibi birçok değişkenin yanı sıra işleme değişkenleri, bu fiziksel olarak çapraz bağlı ağların morfolojisini ve dolayısıyla mekanik ve termal davranışını belirler. TPU’lar geniş çapta araştırılmaktadır ve bunların mekanik, termal ve tribolojik [244] özelliklerinin, molekül mimariyi [245], sert segmentin tipini [246], sert segmentin uzunluğunu ve içeriğini [247,248], yumuşak segmentin uzunluğu [249], ve genel $[NCO]/[OH]$ oranını [250,251] değiştirerek değiştirildiği gösterilmiştir. TPU yapısını etkileyen çeşitli parametrelerin birbirine bağımlılığı nedeniyle sonuçların doğru yorumlanması bazen zordur. TPU özellikleri karmaşık morfolojileri tarafından güçlü bir şekilde kontrol edilir ve bu nedenle TPU’ların termal ve mekanik özellikleri analiz edilirken morfoloji dikkate alınmalıdır. TPU’lar karmaşık bir morfolojiye sahiptir ve globüller, fibriller, lameller ve küresel yapılar gibi farklı morfolojik özellikler TEM ve AFM çalışmaları tarafından rapor edilmiştir [252]. Bu tür alanlar, sert ve yumuşak segmentler arasındaki termodinamik uyumsuzluk, sert bölümler arasındaki güçlü hidrojen bağ etkileşimleri ve sert bölümlerin kristalleşmesi nedeniyle oluşur [253].

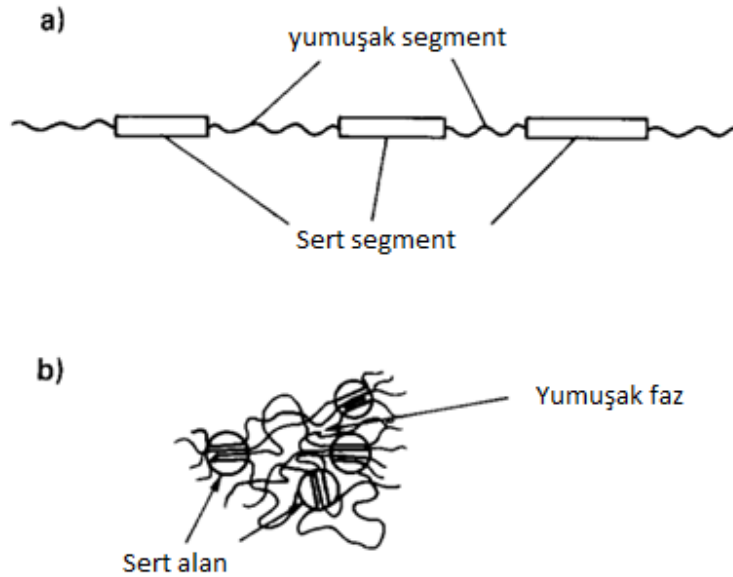


Şekil 2.12. TPU kompleks morfolojisinin şematik gösterimi [254]

TPU'lar, alternatif sert ve yumuşak segmentlerden oluşan doğrusal, blok kopolimerlerdir. Yumuşak bölümler, molekül ağırlığı 1000-4000 g/mol olan uzun zincirli diollerden (çoğunlukla polyester, polieter veya polikaprolakton bazlı) oluşurken, sert bölümler genellikle alternatif diizosiyanatlardan ve kısa zincir genişletici dizilerinden oluşur [242]. Segmentler arasındaki termodinamik uyumsuzluk, faz ayrımına ve ardından nano ölçekli bir dokuya sahip sert ve yumuşak alanlara yönelik organizasyona neden olur; bu, TPU'lara farklı mekanik özelliklerini ve termoplastik faydalarını verir [255-257].

Esnek, amorf yumuşak alanlar öncelikle TPU'nun elastik doğasını etkiler ancak yine de polimerin sertliği, yırtılma mukavemeti ve elastik modülü üzerinde bir miktar etkiye sahiptir. Tipik olarak oda sıcaklığında camsı geçiş sıcaklıklarının (T_g) üzerindedirler ve dolayısıyla düşük sıcaklıklarda TPU performansını kontrol ederler. Bunun aksine, sert ve tipik olarak yarı kristalli sert alanlar öncelikle elastik modülü, sertliği, yırtılma mukavemetini ve eriyik işlenebilirliğini etkiler [242]. Bununla birlikte, sert alanlar aynı zamanda fiziksel çapraz bağlantılar gibi davranarak yumuşak alan fazına elastomerik özellikler kazandırır [258]. Bu nedenle, TPU'ların mekanik özellikleri, sert ve yumuşak alanların karmaşık mikrofaz morfolojisinden güçlü bir şekilde etkilenir. Bunlar sırasıyla sert/yumuşak segment kompozisyon oranları, segmental çözünürlük parametreleri ve ilgili uyumluluk, sert ve yumuşak segmentlerin moleküler ağırlığı ve polidispersitesi ve TPU'nun termal ve işlem geçmişi gibi faktörlere bağlıdır [259-265]. Benzersiz mikrofaz morfolojisi, diğer elastomerlerin çoğuyla karşılaştırıldığında TPU'lara daha yüksek bir çekme mukavemeti ve dayanıklılık kazandırır [264] ve

kovalent çapraz bağlanmanın yokluğu, TPU'ların hem eritilmesine hem de çözeltiyle işlenmesine olanak tanır. Bununla birlikte, sürekli veya döngüsel yükleme altında kimyasal çapraz bağlanmanın yokluğu, sert alanların yeniden yapılandırılabilmesi bir dereceye kadar plastik akışa yol açar, bu da büyük histeretik kayıplara ve zayıf sürünme direncine neden olur [266,267]. Nano dolgu maddelerinin bu karmaşık nano ölçekli morfolojiye akıllıca dahil edilmesi ve çeşitli sistem bileşenleri arasındaki etkileşim seviyesinin karakterizasyonu, mevcut araştırmacılar için büyüleyici bir mücadeleyi temsil etmektedir. Benzer şekilde, bu sistemlerdeki tipik olarak orta derecede sert alan Tg, agresif ortamlarda üst kullanım sıcaklıklarını ve yüksek sıcaklık performansını ve kimyasal veya boyutsal stabiliteyi ciddi şekilde sınırlar.



Şekil 2.13. Sert ve yumuşak segment yapısı [242]

2.11.1 TPU özellikleri

TPU, yüksek elastikiyet ve esneklik özelliklerine sahiptir. Bu nedenle, esnek plastik ürünlerin ve elastomerlerin üretiminde sıkça kullanılır. Ayrıca iyi aşınma direnci, darbe direnci ve yırtılma direnci gibi mekanik özelliklere sahiptir, bu da dayanıklı ve uzun ömürlü uygulamalara olanak tanır. TPU, yüksek mukavemet, düşük sıcaklık koşullarında esnekliğini koruyabilme, özelliklerine sahiptir. Ayrıca TPU, çeşitli kimyasallara karşı direnç gösterir ve belirli formları oldukça şeffaf olabilir, bu da optik uygulamalarda kullanılabilmesine olanak tanır.

Özetlemek gerekirse TPU yüksek aşınma direnci, düşük sıcaklık performansı, yüksek kesme mukavemeti, yüksek elastikiyet, şeffaflık, yağ ve gres direncine sahiptir. Ayrıca TPU'lar yumuşak segmentinin kimyasına göre iki gruba ayrılır. Bunlardan biri polyester bazlı TPU'lar (esas olarak adipik asit esterlerinden elde edilir) diğeri ise polieter bazlı TPU'lardır (esas olarak tetrahidrofuran (THF) eterlere dayalı). Bu iki tip TPU'nun özellikleri Tablo 2.2'de gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Polyester ve polieter bazlı TPU arasındaki temel farklar

Özellik	Polyester esaslı TPU	Polieter esaslı TPU
Aşınma direnci	A	A
Mekanik özellikler	A	B
Düşük sıcaklık esnekliği	B	A
Isı dayanımı	B	D
Hidrolyz direnci	D	A
Kimyasal direnç	A	C
Mikrobiyalere karşı direnç	D	A
Adezyon gücü	B	B

(A = mükemmel; B = iyi; C = kabul edilebilir; D = zayıf)

Düşük sıcaklıklarda esnek ve/veya aşınmaya dayanıklı TPE istendiğinde TPU doğru seçimdir. Ek olarak mükemmel hidrolyz ve mikrobiyal direncinin gerekli olduğu durumlarda ve ayrıca aşırı düşük sıcaklık esnekliğinin önemli olduğu durumlarda polieter bazlı TPU, yağ ve gres direncinin daha önemli olduğu durumlarda ise ester bazlı TPU tercih edilmelidir. Sabit açık renk ve sararmama performansı gerektiğinde alifatik izosiyanat bazlı alifatik TPU kullanılmalıdır.

2.11.2. TPU kullanım alanları

Esnek ve dayanıklı yapısı nedeniyle, TPU giyim, ayakkabı tabanları, spor ekipmanları ve elastik kumaşlarda kullanılabilir. Otomotiv sektöründe, TPU aksam ve parçalarda, conta malzemelerinde, elastomer parçalarında ve kaplama malzemelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca TPU, tıbbi cihazlar, cerrahi malzemeler ve esnek implantlar gibi tıbbi uygulamalarda kullanılabilir. Bunların yanında elektrik ve elektronik uygulamalarda, esnek elektronikler, esnek sensörler, kablo kaplamaları ve elektrik izolasyon malzemelerinde kullanılır. Bunların yanında esnek ambalaj malzemeleri, gıda kaplamaları ve ambalaj contaları gibi ambalaj uygulamalarında TPU kullanılabilir. Spor ekipmanları, açık hava giyim ve ayakkabılar gibi dayanıklı ve esnek malzemelerin kullanıldığı ürünlerde TPU bulunabilir. TPU'nun dayanıklılığı

ve aşınma direnci, makine parçalarında ve kaplamalarında avantaj sağlar. Bu geniş özellik yelpazesi, çeşitli endüstrilerde ve uygulamalarda kullanılmasını sağlamaktadır. Ayrıca TPU'nun sahip olduğu esnek ve elastik özellikler, esnek gerinim sensörleri gibi uygulamalarda kullanımını sağlamaktadır. TPU'nun yaygın kullanım alanları arasında esnek hortum ve borular, cep telefonu düğmeleri, madencilik ve maden işleme ekipmanları, fotovoltaik hücre kapsülleme ve atık su arıtma ekipmanları da bulunmaktadır. Ayrıca çeşitli tiplerdeki fonksiyonel nano dolgu maddelerinin TPU ana polimerlerine dahil edilmesi, tipik TPU özellik profillerini genişletebilir, mekanik ve tribolojik performansı [268,269] daha yüksek çalışma sıcaklıklarında boyutsal stabiliteyi [270] gaz bariyeri ve alev geciktirme performansını [271,272] elektriksel özelliklerini [270-273] ve biyolojik özelliklerini [274-276] iyileştirebilir.

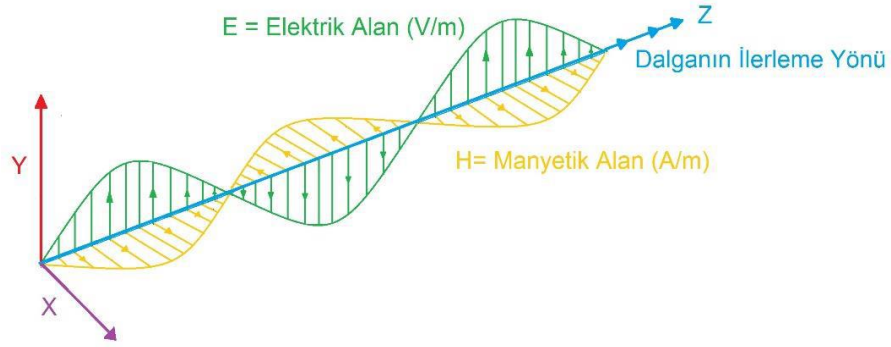


Şekil 2.14. TPU'nun farklı kullanımları

2.12 Elektromanyetik Dalgalar

Elektromanyetik dalgalar, elektrik ve manyetik alanlardaki dalga benzeri enerji taşıyan elektromanyetik radyasyon formudur. Bu dalgalar, boşlukta veya bir ortamda yayılabilir ve çeşitli frekansta olabilir. Elektromanyetik dalgalar, elektrik yüklü parçacıkların hareketinden kaynaklanır.

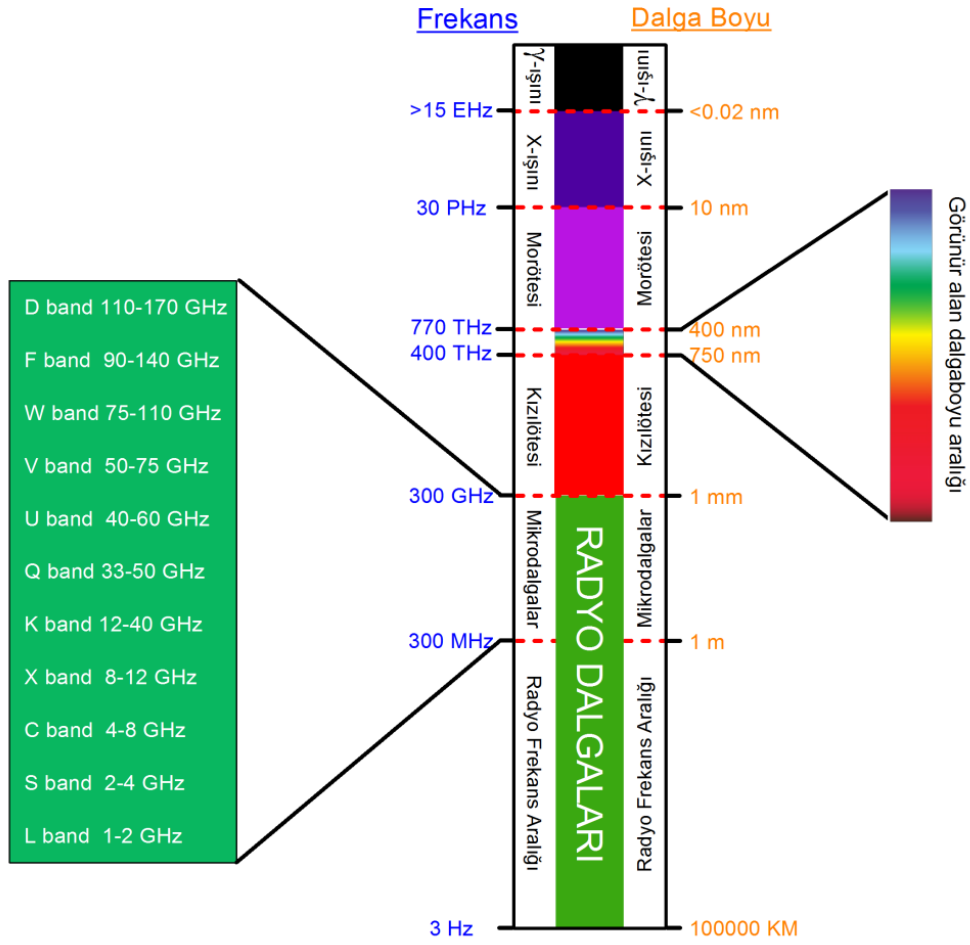
Elektromanyetik radyasyon, elektromanyetik ışınım ya da elektromanyetik dalga (genellikle EM radyasyon veya EMR) bir vakum veya maddede kendi kendine yayılan dalgalar formunu alan bir olgudur. Elektromanyetik dalgalar, yüklü bir parçacığın ivmeli hareketi sonucu oluşan, birbirine dik elektrik ve manyetik alan bileşeni bulunan ve bu iki alanın oluşturduğu düzleme dik doğrultuda yayılan, yayılmaları için ortam gerekmeyen, boşlukta c (ışık hızı) ile yayılan enine dalgalardır [277].



Şekil 2.15. Elektromanyetik dalganın bileşenleri ve ilerleme yönünün şematik gösterimi [278]

2.12.1 Elektromanyetik dalgaların özellikleri

Elektromanyetik dalgalar, dalga boyu ve frekans gibi özelliklere sahiptir. Dalga boyu, bir dalganın bir tam periyodunun uzunluğudur, frekans ise bir saniyedeki dalga sayısını belirtir. İki büyüklük arasındaki ilişki, hız (genellikle ışık hızı) ile çarpımı kullanılarak ifade edilir. Elektromanyetik dalgalar, elektromanyetik spektrum içinde yer alır. Bu spektrum, radyo dalgalarından mikrodalgalar, görünür alan dalgaları, mor ötesi ışıma, X-ışınlarına ve gama ışınlarına kadar geniş bir aralığı kapsar. Farklı frekans aralıkları, farklı türde elektromanyetik radyasyonu temsil eder. Elektromanyetik dalgalar, vakumda ışık hızında yayılır. Farklı ortamlarda yayılma hızları değişebilir. Elektromanyetik dalgalar, enerjiyi taşıırken parçacıkların yayılma yönüne dik olarak salınan transversal dalgalar olarak adlandırılır. Bu, dalga boyunun yönünde ilerlerken titreşen elektrik ve manyetik alanları içerir. Farklı özelliklere sahip bu dalgaların frekans ve dalga boyu bilgileri Şekil 2.16’de verilen “elektromanyetik spektrum” da gösterilmektedir.



Şekil 2.16. Elektromanyetik dalga spektrumu [278]

Radyo dalgaları, elektromanyetik spektrumun bir bölümünü oluşturan ve genellikle iletişim amacıyla kullanılan elektromanyetik dalgaların bir türüdür. Bu dalgalar, genellikle radyo iletişimi, televizyon yayını, telsiz iletişim, kablosuz iletişim ve diğer uzaktan iletişim teknolojilerinde kullanılır. Radyo dalgalarının frekans aralığı geniş bir yelpazeye yayılmaktadır, bu da çeşitli uygulamalara olanak tanır. Radyo dalgaları, elektromanyetik spektrumun alt ucunda yer alır ve frekansları genellikle 300 MHz'den düşük dalgalardır. Radyo dalgaları genellikle serbest atmosferde yayılır ve engellere oldukça dayanıklıdır. Bu özellikleri, radyo dalgalarını iletişim için ideal kılmaktadır. Radyo dalgaları, antenler aracılığıyla gönderilip alınabilir.

Mikrodalgalar, elektromanyetik spektrumun radyo dalgaları ile mikrodalga bölgesi arasında yer alan elektromanyetik dalgaların bir türüdür. Genellikle frekansları 300 MHz ile 300 GHz arasında değişir. Mikrodalga terimi, bu dalgaların dalga boyunun

kısa olmasından kaynaklanmaktadır; mikrodalga fırınları ve kablosuz iletişim sistemleri gibi birçok pratik uygulama bu tür dalgaları kullanmaktadır.

Kızılötesi dalgalar, elektromanyetik spektrumun görünür ışık ve mikrodalga arasındaki bölgesinde yer alan elektromanyetik dalgaların bir türüdür. Kızılötesi radyasyon, dalga boyu açısından genellikle 0.78 mikrometre ile 1 milimetre arasında değişir. Bu dalgalar, genellikle sıcak nesneler tarafından yayılan veya emilen termal radyasyonu temsil eder. Frekans aralığı 300 GHz-400 THz arasındadır.

Görünür alan dalgaları, insan gözünün algılayabildiği elektromanyetik dalga boylarını içerir ve genellikle 400 ila 750 nanometre arasında değişen bir dalga boyu aralığına sahiptir.

Görünür ışık, birçok doğal ve yapay kaynaktan gelmektedir. Güneş ışığı, görünür ışığın en önemli doğal kaynağıdır. Ampuller, LED'ler ve diğer aydınlatma kaynakları ise yapay görünür ışık üretir. Görünür alan dalgaları, renkli nesnelerin, resimlerin ve çevresel detayların gözlemlenmesi için önemlidir.

30 PHz ile 15 EHz arasında frekansa sahip olan elektromanyetik dalgalar X-ışınları olarak adlandırılmaktadır ve 10 pm'den daha düşük dalga boyuna sahip elektromanyetik dalgalar Gama ışınları olarak adlandırılmaktadır [278].

2.12.2 Elektriksel ve manyetik açıdan bir ortamın karakterize edilmesi

Bir ortamın elektriksel ve manyetik özellikleri, elektromanyetik alan teorisinde önemli bir rol oynar. Elektriksel ve manyetik özellikler, malzemenin yanıtını ve davranışını belirler. Bu özellikler, bir ortamın karakterizasyonu için kullanılan çeşitli parametreler ve kavramlar aracılığıyla tanımlanabilir. Bir ortamın elektriksel ve manyetik açıdan karakterize edilmesini sağlayan temel kavramlar şu şekildedir:

Permittivite (Dielektrik Sabiti): Bir ortamın elektriksel özelliklerini tanımlayan bir kavramdır. Permittivite, bir malzemenin elektrik alan içindeki tepkisini belirler. Yükler arasındaki etkileşim ve elektrik alanın geçirgenliği üzerinde etkilidir. Frekansa bağlı olarak değişen bir özelliktir.

Permeabilite: Manyetik alan içindeki bir malzemenin tepkisini tanımlayan bir kavramdır. Permeabilite, bir malzemenin içinde manyetik alanın nasıl geçtiğini ve malzemenin manyetik özelliklerini belirler. Frekansa bağlı olarak değişebilir.

İletkenlik (Conductivity): Bir ortamın elektrik akımını ne kadar iyi iletme yeteneğini belirten bir özelliktir. Yük taşıyan serbest yüklerin (genellikle elektronlar) hareket kabiliyeti ile ilgilidir. İletken malzemeler, elektrik akımını iyi iletirken, yalıtkan malzemeler bu akımı zayıf bir şekilde iletir.

Direnç (Resistance): İletkenlikle ilişkilidir ve bir malzemenin elektrik akımına karşı direncini ölçer. Yüksek direnç, düşük iletkenlik anlamına gelir.

Polarizasyon: Elektrik alan içindeki bir malzemenin atom veya moleküllerinin nasıl polarize olduğunu ifade eder. Bu özellik, bir malzemenin elektrik alan içinde nasıl davrandığını belirler.

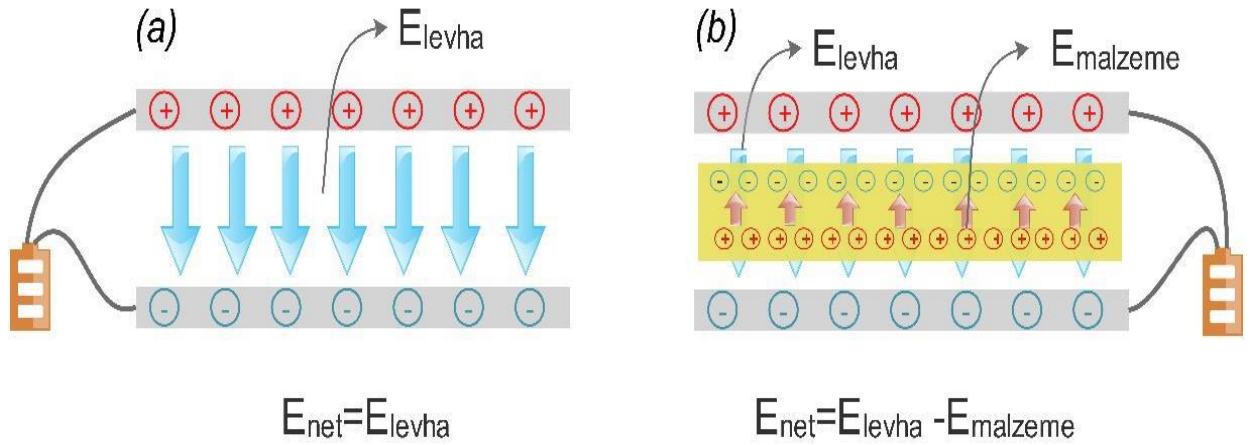
Bu özellikler, Maxwell'in denklemleri gibi elektromanyetizma teorileri içinde yer alan parametrelerdir. Bu parametreler, elektromanyetik dalgaların bir ortamda nasıl yayıldığını, yansıdığını ve soğurulduğunu anlamamıza yardımcı olur. Elektriksel ve manyetik özellikler, malzemelerin elektromanyetik etkileşimlerini modelleme, elektrik devrelerini analizi, elektromanyetik uyumluluk ve diğer birçok uygulamada önemli bir rol oynamaktadır.

Daha önce bahsedildiği gibi elektromanyetik dalgalar boşlukta ışık hızında, geri yansıma olmadan ve neredeyse kayıpsız bir şekilde ilerleyebilirler. Fakat elektromanyetik dalgaların bu özellikleri ilerlediği ortama ve ilerleme sırasında karşılaşacağı ortamlara göre farklılık gösterebilir, bu durumda belirli koşullar altında dalganın geri yansıması veya sönümlenerek gücünü kaybetmesi gibi durumlar meydana gelebilir.

Yukarıda belirtilmiş olan kavramlardan, bir ortamın ya da malzemenin karakterize edilmesindeki temel parametreler olan “elektriksel geçirgenlik sabiti (permittivite, ϵ)” ve “manyetik geçirgenlik sabiti (permeabilite, μ)” terimlerinin bilinmesi gerekmektedir.

Permittivite (ϵ); (+) ve (-) iki Coulomb yükü arasında oluşan bir elektrik alana karşı, yükler arasında bulunan ortamın ya da malzemenin gösterdiği direnci belirten bir sayıdır [4]. Dielektrik katsayısı, elektriksel geçirgenlik katsayısı ve permittivite olarak bilinen bu kavramın daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 2.17’de bir tarafı artı diğer tarafı eksi yüklerle yüklenmiş bir kapasitör şematik olarak gösterilmiştir.

Şekil 2.17 (a)'da iki levha arasının vakum olduğu düşünülürse artı yükten eksi yüke doğru bir elektrik alan oluşur (mavi oklarla gösterilmiştir). Fakat bu iki plaka arasında Şekil 2.17 (b)'deki gibi bir dielektrik malzeme konulursa malzeme içerisindeki moleküller artı ve eksi kutuplara göre polarize olur. Böylece bu malzeme içerisinde levhalar tarafından oluşturulan elektrik alanının tam tersi yönde bir elektrik alan oluşur (kırmızı oklarla gösterilmiştir) ve birbirlerine ters olan bu iki elektrik alanının sonucunda oluşan net elektrik alanda bir azalma olur. Permitivite de malzemenin kendi içerisinde oluşturduğu bu ters elektrik alanın şiddetinin bir göstergesidir diyebiliriz. Bu değer sayısal olarak artması malzeme içerisindeki polarizasyonun ve buna bağlı olarak oluşan ters elektrik alan şiddetinin artması, bu nedenle de levhalar arasındaki net elektrik alanın azalması anlamına gelmektedir [278].



Şekil 2.17. Kapasitör içerisinde oluşan elektrik alan şematik gösterimi [278]

Permitivite değerleri belirlenirken uygulanan elektrik alan ve malzemenin polarize olması arasında bir zaman farkı (faz farkı) meydana gelir. Bu fark Permitivite değerinin reel ve sanal kısımlardan oluşan bir kompleks sayı olmasını gerektirir, kompleks permitivite değeri (ϵ^*) şeklinde gösterilir ve formülü Denklem 2.3 gösterilmiştir[278].

$$\epsilon^* = \epsilon' + j\epsilon'' \quad (2.3)$$

Burada ϵ' permitivitenin reel kısmıdır ve depolanan enerjiyi temsil eder, ϵ'' ise sanal kısımdır ve kaybolan enerjiyi temsil etmektedir. Ayrıca malzemelere belirli bir frekans uygulanması sonucu iletkenliklerinin (σ_{ac}) hesaplanmasında da kullanılmaktadır. Bu iletkenlik değerinin hesaplanması için kullanılan formül Denklem 2.4 verilmiştir.

Bu denklemde f , Hz cinsinden uygulanan frekansı gösterirken ϵ_0 boşluğun permitivite değerini göstermektedir. Vakumun permitivite değeri (ϵ_0), 8.854×10^{-12} F/m referans alınır.

$$\sigma = 2\pi f \epsilon_0 |\epsilon''| \quad (2.4)$$

Permitivitenin sanal kısmının reel kısmına oranı faz farkı ($\tan \delta$) olarak adlandırılır. Bu değer elektromanyetik malzemelerin sınıflandırılmasında temel gösterge olarak kullanılır. Bu orana göre malzemelerin sınıflandırılması Tablo 2.3'te gösterilmektedir.

Tablo 2.3. ϵ'/ϵ'' oranına göre malzemelerin sınıflandırılması [278]

ϵ'/ϵ''	Özellik	İsimlendirilmesi
0	Kayıpsız ortam	Mükemmel yalıtkan malzeme
$\ll 1$	Düşük kayıplı ortam	Dielektrik malzeme
≈ 1	Kayıplı ilerleme ortamı	-
$\gg 1$	Yüksek kayıp ortamı	İletken malzeme
∞	Yansıtıcı	Mükemmel iletken malzeme

Tabloda verilen değerlere göre, ϵ''/ϵ' değeri sıfır olan malzemeler mükemmel yalıtkan malzeme olarak adlandırılmış ve bu malzemelerde elektrik alanın kayıpsız şekilde ilerlediği kabul edilmiştir. ϵ''/ϵ' değeri birden büyük olan malzemeler iletken malzeme olarak değerlendirilmiş ve bu malzemelerin içinde enerjisini kaybederek ilerlediği kabul edilmiştir. ϵ''/ϵ' değeri sonsuz olan malzemeler mükemmel iletken malzeme olarak gösterilmiş ve bu malzemelerin içine giremediği böylece tamamıyla geri yansıdığı kabul edilmiştir.

Permeabilite ya da manyetik geçirgenlik katsayısı (μ) ise bir malzemenin ya da ortamın manyetik alana maruz kalması durumunda kendi içinde manyetik alan oluşturabilme kapasitesinin bir göstergesidir [279]. Bir malzemenin ya da ortamın permeabilite değeri belirtilirken de bağıl permeabilite (μ_r) değerleri kullanılmaktadır. Bağıl permeabilite değeri (μ_r) malzemenin ya da ortamında mutlak permeabilite değerinin (μ), $4\pi \times 10^{-7}$ (Henry/m) olan boşluğun (ya da vakumun) permeabilite değerine (μ_0) oranlanmasıyla elde edilir.

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \quad (2.5)$$

2.13 Elektromanyetik Kalkanlama

Elektrik mühendisliğinde elektromanyetik koruma, iletken veya manyetik malzemelerden yapılmış bariyerlerle bir boşluktaki elektromanyetik alanı (EMF) azaltma veya yeniden yönlendirme uygulamasıdır. Başka bir deyişle elektromanyetik kalkanlama, elektromanyetik alanların bir ortamdan diğerine geçişini engelleyerek veya sınırlayarak elektromanyetik girişimi (EMI) veya elektromanyetik alanların dışarıya yayılmasını azaltmayı amaçlayan bir dizi teknik ve malzeme kullanımını ifade eder. Elektromanyetik kalkanlama, özellikle elektronik cihazlar arasında oluşan elektromanyetik parazitleri azaltma ve elektromanyetik uyumluluk (EMC) sağlama amacını taşır. Kalkanlama radyo dalgalarının, elektromanyetik alanların ve elektrostatik alanların eşleşmesini azaltabilir. Elektrostatik alanları bloke etmek için kullanılan iletken bir kılıf aynı zamanda Faraday kafesi olarak da bilinir. Azalma miktarı büyük ölçüde kullanılan malzemeye, kalınlığına, korunan hacmin boyutuna ve ilgi alanlarının frekansına ve kalkandaki deliklerin gelen elektromanyetik alana karşı boyutuna, şekline ve yönelimine bağlıdır. Elektromanyetik kalkanlama ile ilgili temel kavramlar ve kullanılan teknikler aşağıda verilmiştir.

Faraday Kafesi: Faraday kafesi, iletken malzemelerden yapılmış bir yapıdır ve içindeki elektromanyetik alanları dış ortama kapatır. Bu kafes, elektromanyetik radyasyonun içeri girmesini veya dışarı çıkmasını önleyerek elektromanyetik kalkanlama sağlar. Faraday kafesi dalganın etkisinin iletken bir yüzeyde elektron hareketleri ile iletilecek yöne indüklenmesi prensibine dayanır. Faraday kafesinin yüzey iletken yoğunluğuna bağlı olarak yansıtma etkisini de gösterir. Soğurma etkisi ise ortam dielektrik ve manyetik özelliklerine bağlı olarak geçiş sırasında EM dalganın çoklu saçılma ve soğurulması ile ısıya dönüşmesidir.

EMI Kaplama ve Boya: Elektromanyetik dalgalara karşı dirençli kaplama ve boyalar, cihazların dış yüzeylerine uygulanarak elektromanyetik kalkanlama sağlar. Bu malzemeler, elektromanyetik enerjiyi emebilir veya yansıtabilir.

Ferromanyetik Malzemeler: Ferrit gibi ferromanyetik malzemeler, elektromanyetik alanları absorbe ederek ve yönlendirerek kalkanlama sağlar. Bu malzemeler genellikle manyetik alanları çeker ve absorbe eder.

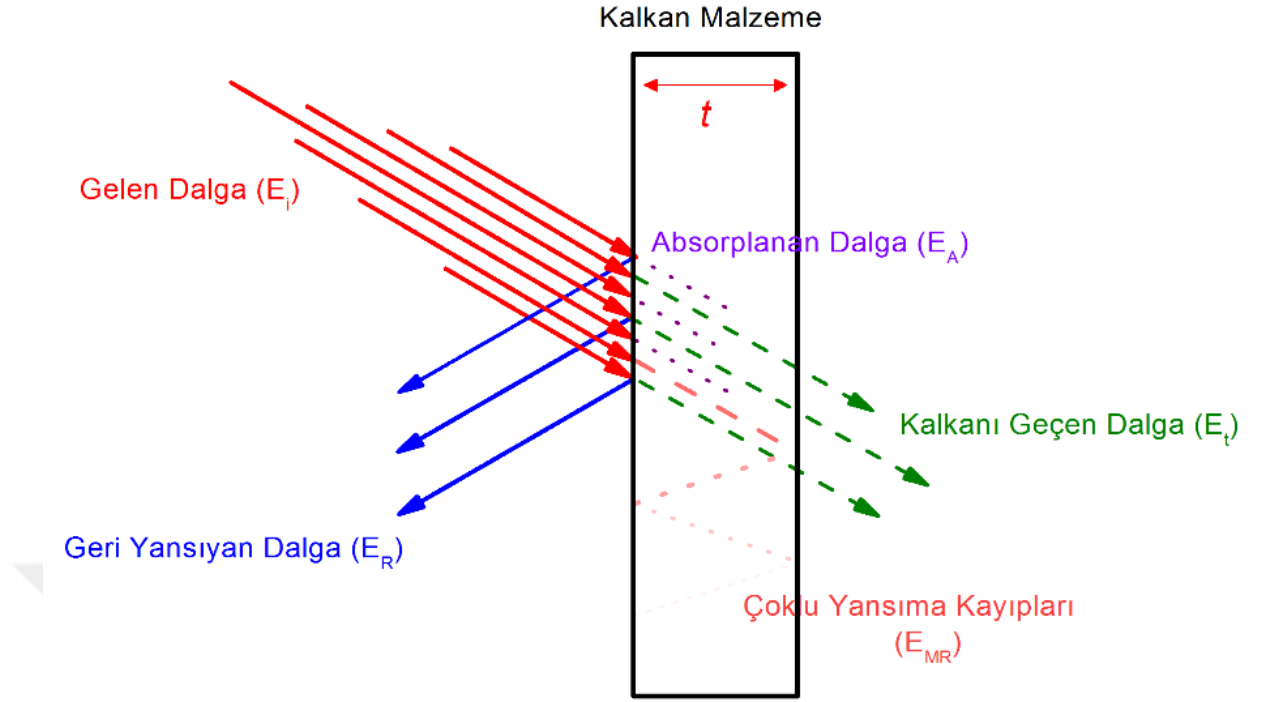
Yüksek Frekanslı Filtreler: Elektronik devrelerde, elektromanyetik kalkanlama için yüksek frekanslı filtreler kullanılabilir. Bu filtreler, belirli frekanslardaki

elektromanyetik girişimi engelleyerek cihazların diğeri cihazlara veya dış ortama parazit yaymasını önler.

Kablo Kalkanlama: Elektromanyetik alanların kablo hatları üzerinden yayılmasını engellemek için kablo kalkanları kullanılabilir. Kalkanlar, elektromanyetik alanı absorbe eder veya yansıtarak kalkanlama sağlar.

Elektromanyetik kalkanlama, özellikle hassas elektronik cihazlarda, tıbbi ekipmanlarda, askeri uygulamalarda ve diğeri elektromanyetik uyumluluk gereksinimlerinin olduğu alanlarda önemlidir. Elektromanyetik kalkanlama teknikleri, elektromanyetik etkileşimleri sınırlamak ve elektromanyetik uyumluluğu artırmak için kullanılarak cihazların güvenilirliğini ve performansını sağlamak amacıyla uygulanır. Savunma sanayisinde, kritik öneme sahip yapıların duvarlarında kullanılmaktadır. Yapılar için kullanımı beton harcına katkılama yaparak veya elektromanyetik kalkanlama etkisine sahip boya üreterek kullanılır. Temel olarak iletken maddeler kullanılarak dalga elektrik enerjisine çevrilerek absorbe edilir ya da saçıcı yani gözenekli maddeler kullanılarak dalga saçılıma uğraması sağlanır [280].

Elektromanyetik radyasyon, birleşik elektrik ve manyetik alanlardan oluşur. Elektrik alanı iletken içindeki yük taşıyıcıları (yani elektronlar) üzerinde kuvvetler üretir. İdeal bir iletkenin yüzeyine bir elektrik alanı uygulandığında, iletken içindeki yükün yer değıştirmesine neden olan ve içeriye uygulanan alanı iptal eden bir akım indüklenir ve bu noktada akım durur. Benzer şekilde, değışen manyetik alanlar, uygulanan manyetik alanı bozacak girdap akımları üretir. Sonuç olarak elektromanyetik radyasyon iletkenin yüzeyinden yansıtılır: iç alanlar içeride kalır ve dış alanlar dışarıda kalır. Elektromanyetik kalkanlama, elektromanyetik dalganın kalkan olarak kullanılan yazılımın geri yansıtılması, malzeme içinde soğurulması ve yine malzeme içinde çoklu yansıtılması olmak üzere üç mekanizma ile gerçekteşmektedir (Şekil 2.18) [281-283]. Bu verinin etkinliğı ise kalkan malzemesinin elektriksel/manyetik özelliklerine, genişliğıne, kalınlığına ve dalganın frekansına bağılı olarak değışiklik göstermektedir.



Şekil 2.18. Elektromanyetik dalga kalkanlamada etkili olan mekanizmaların şematik gösterimi [278]

Bir malzemenin pratikte etkili olan absorplama ve yansıtma mekanizmaları üzerinden gerçekleşen kalkanlamalarının hangi parametrelere bağlı olarak nasıl değiştiğini değerlendirmek gerekirse; elektromanyetik dalgayı yansıtma performansının (SE_R) artan iletkenlikle arttığı, frekans ve permeabilite değeriyle ise azaldığı görülürken, kalınlıktan bağımsız hareket ettiği görülmektedir. Soğurma esaslı gerçekleşen kayıpların (SE_A) ise, kalınlığa (t), elektriksel iletkenliğe, elektromanyetik dalganın frekans değerine ve permeabilite değerlerine bağlı olarak arttığı görülmektedir (Denklem 2.6, 2.7).

$$SE_R(dB) = -20 \log (\eta_0 / \eta_s) = 39,5 + 10 \log \sigma / 2\pi f \mu \quad (2.6)$$

$$SE_A = -8,68 t \sqrt{\sigma \times f \times \mu} \quad (2.7)$$

$$SE_{MR} = 20 \log_{10} |1 - \rho_I^2 e^{-2\gamma t}| \quad (2.8)$$

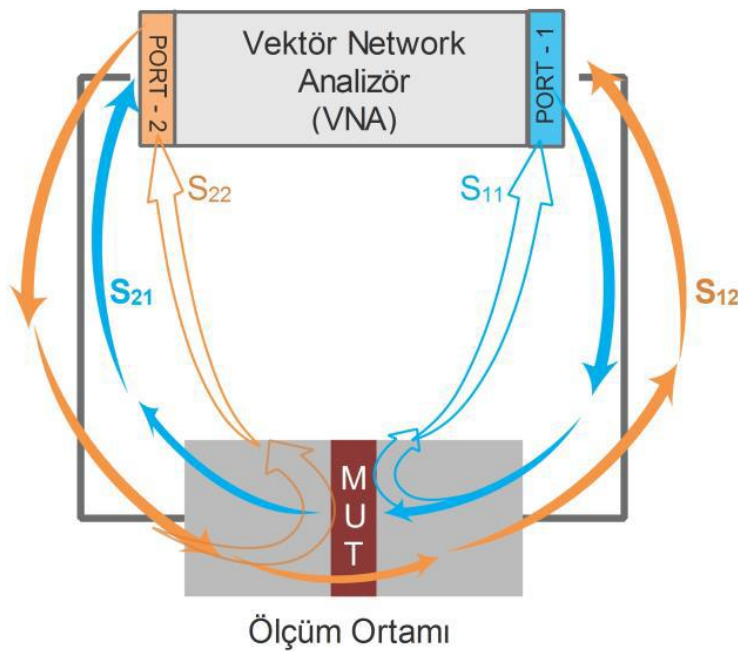
2.13.1 Elektromanyetik kalkanlama etkinliklerinin belirlenmesi

Elektromanyetik kalkanlama etkinliklerinin (SE_T , SE_A ve SE_R) hesaplanmasında öncelikle, hedef frekans aralığında permitivite (ϵ' , ϵ'') ve permeabilite (μ' , μ'') değerleri belirlenmeli. Elde edilen bu değerler yukarıda verilen denklemlerde

2.6 – 2.8’de yerine konularak SE_A , SE_R ve SE_{MR} , bu değerlerin toplanmasıyla da SE_T hesaplanır.

Permittivite ve permeabilite değerlerinin özellikle elektromanyetik kalkanlama uygulamaları için önemli olan GHz seviyelerindeki değerleri ise saçılma (S) parametreleri olarak adlandırılan kompleks sayılar üzerinden çeşitli algoritmalar kullanılarak hesaplanmaktadır [284-286]. Saçılma parametreleri, dış etkilerden yalıtılmış bir ölçüm ortamında örnek üzerine gönderilen bir elektromanyetik dalganın test örneğini geçmesi ya da geri yansımaları durumundaki büyüklük ve faz açısı değerlerindeki değişimleri gösteren bir sayıdır.

Saçılma parametrelerinin belirlenmesinde test yapılacak malzemenin (material under test, MUT) katı toz, levha, film ya da sıvı olmasına göre farklı yöntemlerle gerçekleştirilebilir. GHz düzeyinde frekanslara sahip saçılma parametrelerinin saptanmasında yalıtılmış oda, dalga kılavuzu ve koaksiyel hat iletim tekniği yöntemleri tercih edilmektedir. Test malzemesinin özelliklerine göre farklılık gösterebilen fakat teoride aynı olan bu yöntemlerde ölçüm sistemi tercih edilen frekans aralığına uygun bir “vektör network analizör” (VNA) ve bunun yanında test yapılacak malzemenin yerleştirildiği, ayrıca dış etkilerin ölçümü etkilemesine engel olmak amacıyla bir kalkan görevi görebilecek ölçüm ortamından oluşmaktadır (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Saçılma parametreleri şematik gösterimi [278]

Şekil 2.18’de görüldüğü gibi sistemde 2 adet port ve 4 adet saçılma parametresi (S_{11} , S_{12} , S_{21} ve S_{22}) mevcuttur. Saçılma parametrelerinin isimlendirmesinde bulunan numaralar dalganın çıkış ve giriş noktalarını belirtmektedir. Örnek olarak S_{11} , 1 numaralı porttan çıkıp tekrar 1 numaralı porta dönen dalgaları temsil etmektedir. Yine bu mantıkla bakıldığında S_{12} , 1 numaralı porttan çıkıp, test numunesi üzerinden geçerek 2 numaralı porta dönen elektromanyetik dalgaları simgelemektedir. Böylece S_{11} ve S_{22} numunenin dalgayı geri yansıtma kapasitesiyle ilişkilidir. Aynı şekilde S_{12} ve S_{21} numunenin elektromanyetik dalgayı kalkanlama kapasitesi ile ilişkilidir diyebiliriz. Ayrıca S_{11} ve S_{22} numune üzerinden geri dönen dalganın gücünün, numune üzerine gelen elektromanyetik dalganın gücüne oranını belirler. Aynı şekilde S_{12} ve S_{21} ise numuneyi geçmeyi başaran elektromanyetik dalganın gücünün, numune üzerine gelen dalganın gücüne oranını belirlemekte yardımcı olur. Ölçüm yapılan malzemelerin homojen veya izotropik olduğu düşünüldüğünde $S_{11}=S_{22}$ ve $S_{12}=S_{21}$ varsayımı yapılır ve hesaplama işlemlerinde bu değerlerden hangisinin kullanıldığının bir önemi bulunmamaktadır.



3. MALZEMELER VE METOT

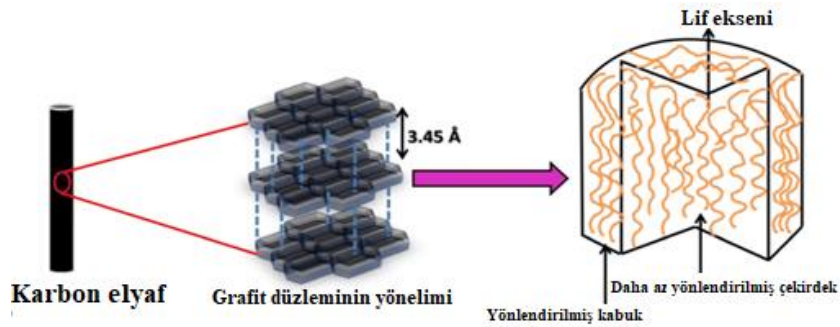
3.1 Malzemeler

Tez kapsamında hazırlanan iletken kompozit malzemelerde, esnek polimer matris olarak polyester esaslı TPU kullanılmıştır. TPU, Ravathane 130 A60 ticari adıyla Ravago Petrochemicals Production Inc., Türkiye’den temin edilmiştir. Kompozit malzemelerde iletken dolgu malzemesi olarak kullanılan grafit ve karbon elyaflar KP Kompozit Pazarı A.Ş. ve Nanokar Kimyaevi Maddeler San.ve Tic.Ltd. Şti.’den temin edilmiştir.

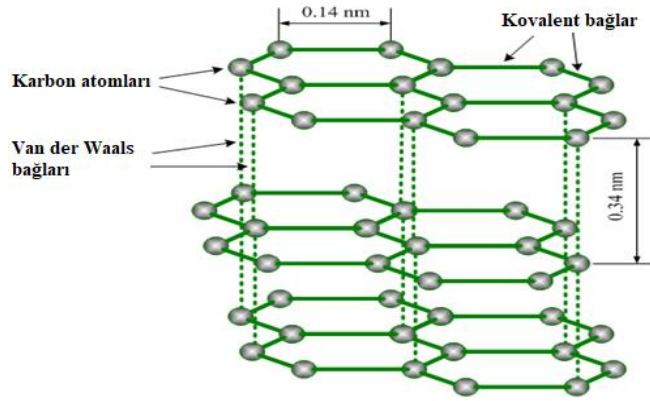
Dolgu maddeleri olarak farklı geometrik yapıya sahip karbon esaslı dolgular seçilmiştir. Bu dolgulardan biri tabakalı yapıya sahip ortalama parçacık boyutu 44 µm olan, %99 saflıktaki grafit tozu ve elyaf formunda geometriye sahip dolgu maddesi olarak 6 mm uzunluğa sahip kırılmış karbon elyaf ve buna ek olarak 150 mikron boyutunda öğütülmüş karbon elyaf kullanılmıştır.

Tablo 3.1. Ravathane 130 A60 fiziksel özellikleri

Özellik	Değer	Birim
Sertlik	61	Shore A
Yoğunluk	1,14	g/cm ³
%100 uzamada çekme gerilimi	2	MPa
%300 uzamada çekme gerilimi	4,5	Mpa
Kopma mukavemeti	22	Mpa
Kopma uzaması	900	%
Yırtılma mukavemeti	75	N/mm
Aşınma direnci	40	mm ²



Şekil 3.1. Karbon elyafın ayrıntılı yapısı



Şekil 3.2. Grafitin kimyasal yapısı

3.2 İletken Polimer Kompozitlerin Hazırlanması

Bu tez çalışmasında farklı geomerilere sahip karbon esaslı dolgu maddeleriyle TPU matrisli iletken polimer kompozitler hazırlanmıştır. Kompozit malzemeler her dolgu maddesi için farklı dolgu oranlarında eriyik karıştırma yöntemi ile hazırlanmıştır. Şekil 3.1’de kompozitlerin hazırlanması için kullanılan Kökbir RTX-M40 marka melt-mixer verilmiştir. Ayrıca Tablo 3.2’de tez kapsamında hazırlanan kompozitlerin bileşenleri ve isimleri gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Kompozit yapımında kullanılan Kökbir RTX-M40 marka melt mixer görüntüsü

Tablo 3.2. Hazırlanan kompozitlerin bileşenleri ve isimlendirmesi

Örnek	TPU (%)	Grafite (%)	Karbon Elyaf (150 micron)(%)	Karbon Elyaf (6 mm)(%)
TP-GF10	90	10		
TP-GF15	85	15		
TP-GF20	80	20		
TP-GF25	75	25		
TP-GF30	70	30		
TP-GF35	65	35		
TP-GF40	60	40		
TP-CF(150)5	95		5	
TP-CF(150)10	90		10	
TP-CF(150)15	85		15	
TP-CF(150)20	80		20	
TP-CF(150)25	75		25	
TP-CF(150)30	70		30	
TP-CF(150)35	65		35	
TP-CF(150)40	60		40	
TP-CF(6)5	95			5
TP-CF(6)10	90			10
TP-CF(6)15	85			15
TP-CF(6)20	80			20

Kompozit malzemeler hazırlanırken yukarıda da belirtildiği gibi eriyik karıştırma metodu kullanılmıştır. Burada öncelikle tabloda gösterilen oranlara uygun olarak ürünlerin hassas terazide tartımları yapıldıktan sonra üretim aşamasına geçilmiştir. Üretim aşamasında ilk önce TPU 190°C sıcaklıkta 50 rpm vida dönme hızında eriyik hale getirilmiştir. TPU malzemesi tamamen eriyik bir hale geldikten sonra dolgu maddeleri aşamalı olarak bu eriyik polimer içerisine dahil edilmiştir. Bütün dolgu malzemesi eklendikten sonra homojen yapı oluşması için 2 dk yine aynı sıcaklık ve vida hızında karıştırılmıştır. Bütün örnekler için bu prosedür tekrarlanmış ve hazırlanan bu kompozitlerden, sıcak presle (190°C) 0,5 mm ve 2 mm kalınlıklarında kompozit filmler.



Şekil 3.4. Hazırlanan kompozit filmlerden birinin görüntüsü

3.3 Test ve Analiz Çalışmaları

3.3.1 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi

Hazırlanan kompozit malzemelerin matris-dolgu etkileşiminin gözlemlenmesi ve morfolojik yapılar hakkında fikir sahibi olmak amacıyla örneklerin SEM analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz için örnekler öncelikle sıvı azotla kırılmış daha sonra ölçüm için kesit alanları altın ile kaplanmıştır. Ölçümde FEI Inc., Inspect S50 model bir taramalı elektron mikroskobu kullanılmış ve 10.00 kV’de incelemeler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.5. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı

3.3.2 Çekme Testi

Örneklerin çekme testi için AHP Plastik Makine/Tensile çekme cihazı kullanılmıştır. Bu ölçümde ölçümünde 2 mm kalınlığındaki filmlerden 1 cm genişliğinde ve yaklaşık 5 cm uzunluğunda parçalar kesilmiştir.



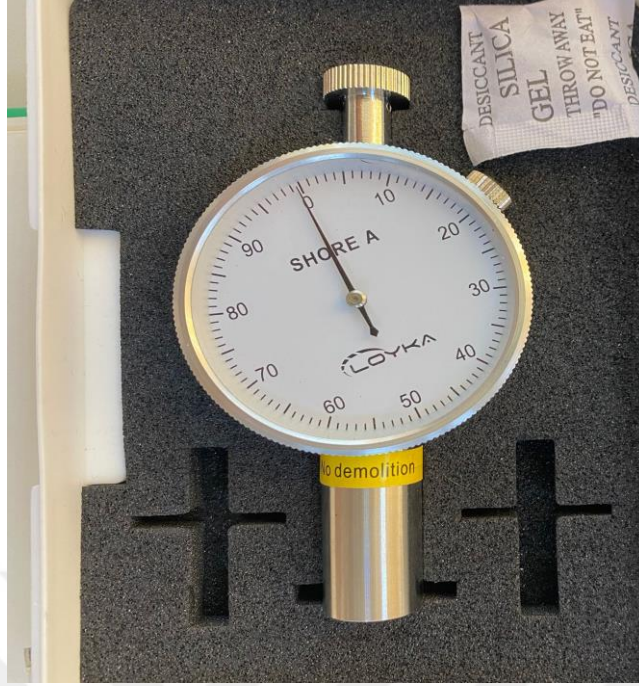
Şekil 3.6. AHP Plastik Makine/Tensile çekme cihazı

3.3.3 Sertlik ölçümü

Sertlik ölçümleri için, hazırlanan 2 mm kalınlıktaki kompozit filmler kullanılmıştır. Bu ölçüm için Loyka LXA (Shore A) sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.7. 2mm kalınlığında hazırlanan kompozit bir film örneği



Şekil 3.8. Loyka LXA (Shore A) sertlik cihazı

3.3.4 İletkenlik ölçümü

Kompozit malzemelerin iletkenlik sonuçlarının belirlenmesi için direnç ölçümleri Keysight 34461A Multimeter cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bu test için, hazırlanan 0,5 mm kalınlığındaki kompozit filmlerden 10 cm uzunluğunda ve 1 cm genişliğinde parçalar kesilmiştir. Bu parçalar öncelikle vakum etüvde 60°C sıcaklıkta bir saat bekletildikten sonra ölçüm uzunluğu 5 cm olacak şekilde numunelerin direnç ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.9. Keysight 34461A Multimeter cihazı.



Şekil 3.10. İletkenlik ölçümü için hazırlanan bir örnek ve ölçüm uzunluğu için kullanılan aparat

3.3.5 Direnç-gerinim davranışının belirlenmesi

Kompozit malzemelerin gerinim sensör özelliklerini belirlemek için uzamaya bağlı olarak malzemenin gerinim-direnç davranışı incelenmiştir. Bu test için yine AHP Plastik Makine/Tensile çekme cihazı ve Keysight 34461A Multimeter cihazları kullanılmıştır. Teste kullanılan numuneler iletkenlik ölçümü için hazırlanan numunelerle aynı boyutlarda hazırlanmıştır. Numune çekme cihazına yerleştirildikten sonra ölçüm uzunluğu 50 mm olacak şekilde Keysight 34461A Multimeter cihazının elektrotları numune üzerinde sıkıştırılmıştır (Şekil 3.6). Daha sonra ilk ölçüm uzunluğunun %5'i kadar sabit çekme hızı uygulanmıştır. Her %5 uzamada numunenin direnç değeri ölçülüp not edilmiştir.



Şekil 3.11. Uzamaya bağlı direnç testi için hazırlanan sistem

3.3.6 Elektromanyetik dalga kalkanlama performanslarının belirlenmesi

Örneklerin elektromanyetik dalga kalkanlama performanslarının değerlendirilmesi için 2 mm kalınlığında hazırlanan kompozit filmlerden iç çapı 3 mm, dış çapı ise 7 mm olan yuvarlak parçalar kesilmiştir. Hazırlanan örneklerin elektromanyetik dalga kalkanlama özellikleri Keysight marka N9926A kodlu Vektör network analizörü (VNA) ölçüm düzeneği ve Keysight marka 85055AR03 kodlu koaksiyel airline numune tutucu kullanılarak belirlenmiştir. Ölçümler 1-14 GHz frekans aralığında gerçekleştirilmiş olup bu testle örneklerin permitivite (ϵ' , ϵ'') değerleri belirlenmiştir.



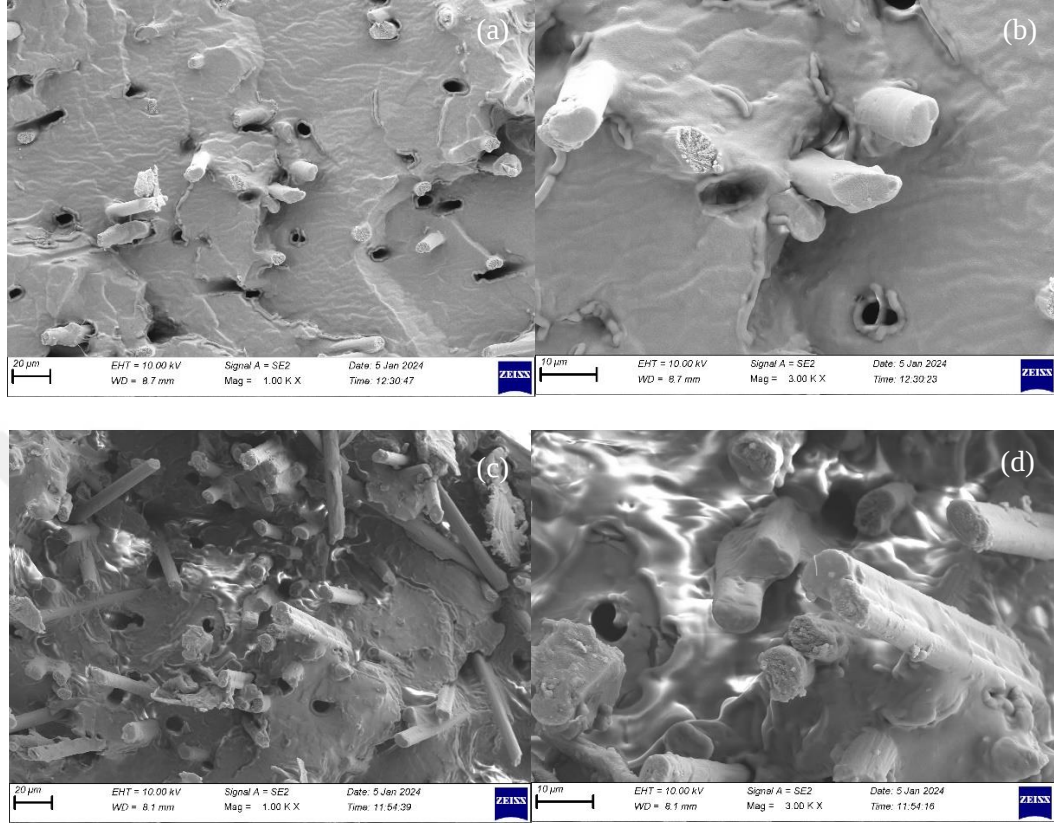
Şekil 3.12. VNA testinde kullanılan numuneleri hazırlamak için kullanılan cihaz ve hazırlanan örnekler



Şekil 3.13. Elektriksel geçirgenlik değerlerinin ölçümünde VNA test düzeneği

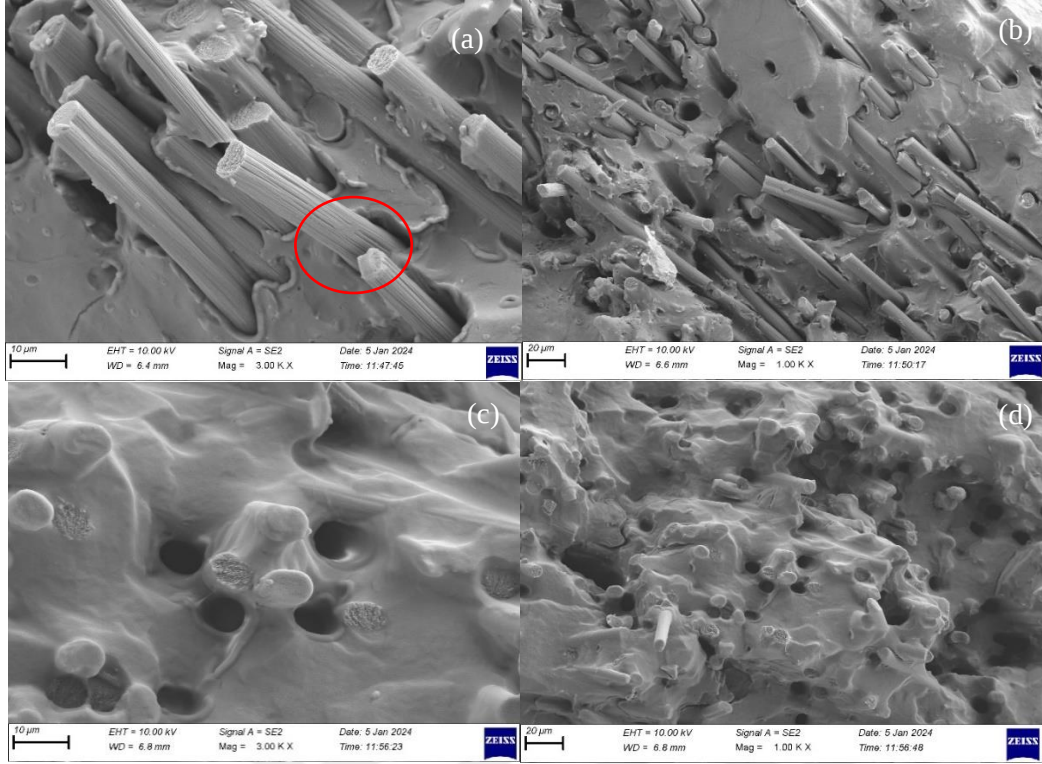
4. BULGULAR

4.1 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri



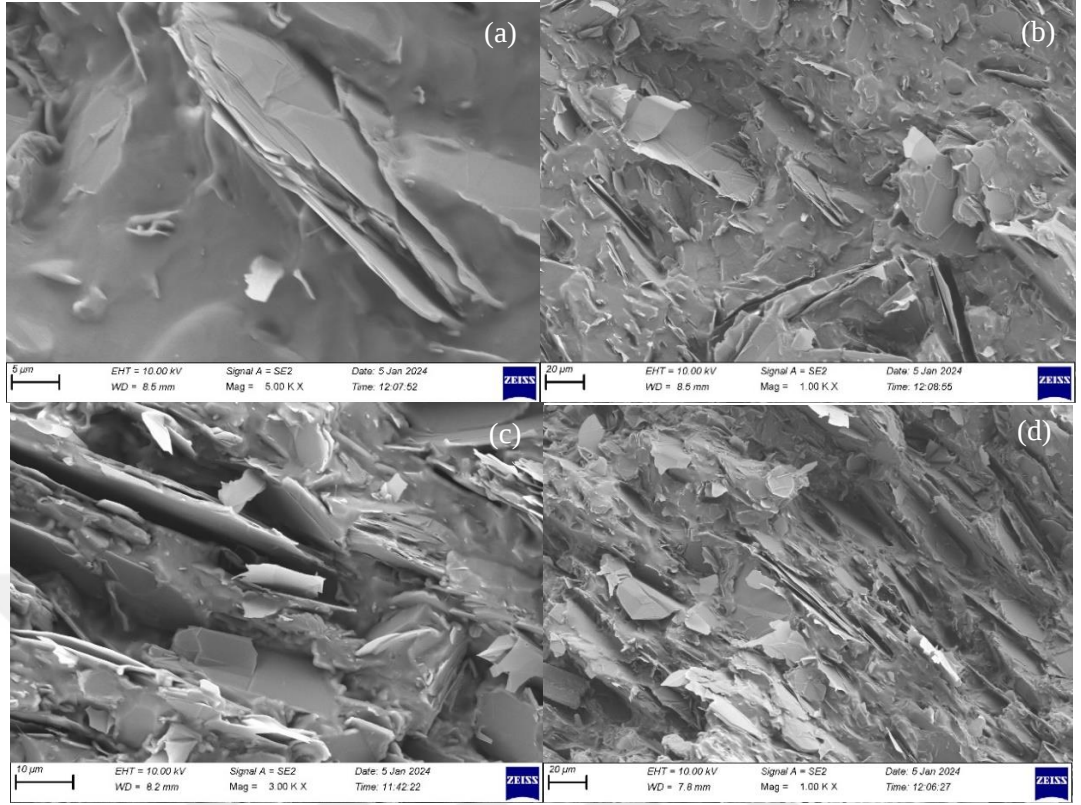
Şekil 4.1. (a,b) TP-CF(6)10, (c,d) TP-CF(6)20 SEM görüntüleri

Şekil 4.1’de TP-CF ürün örnek serisinden %10 ve %20 karbon elyaf dolgulu kompozitlerin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.1 (b) ve (d)’de görüldüğü gibi dolgu maddesi ile matris arasında iyi bir etkileşim bulunmaktadır. Bu kompozitlerde görülen matris-dolgu arasındaki ara yüzey etkileşimlerinin güçlü olması kullanılan karbon elyafın yüzey işlemi görmüş olabileceğini düşünmemize neden olmuştur. Görüntülerde ayrıca dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise dolgu maddelerinin birbirlerine çok yakın hatta bazı noktalarda temas ediyor olmasıdır. Bu durum özellikle iletkenlik için çok büyük bir öneme sahiptir. Karbon elyafların birbirlerine temas etmesiyle kompozit içerisinde iletken bir ağ oluşmaktadır. Bu durum SEM görüntülerinde açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.2. (a,b) TP-CF(150)25, (c,d) TP-CF(150)40 SEM görüntüleri

Şekil 4.2’de 150 mikron uzunluğundaki karbon elyaf ile hazırlanmış kompozitlerden %25 ve %40 oranlarında dolgu içeriğine sahip kompozitlerin SEM görüntüleri verilmiştir. Burada ilk dikkat çeken özellikle Şekil 4.2 (a) ve (b)’de görüldüğü gibi bu kompozitler için karbon elyaf-TPU arayüzey özelliklerinin diğer karbon elyaf ile hazırlanan kompozitlerdeki gibi iyi olmamasıdır. Şekilde de görüldüğü gibi dolgu ve matris arasında boşluklar mevcuttur. Bu durumun kullanılan dolgunun geri dönüşüm ürünü olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu karbon elyafın matrisle olan arayüzey etkileşimlerini iyileştirecek bir yüzey işlemine uğramadığı görülmektedir. Bunların yanında, Şekil (c) ve (d) incelendiğinde dolgu oranının artmasıyla karbon elyafların matris ile daha uyumlu bir hal aldığı görülmektedir. Burada ayrıca dolguların birbiriyle, iletken ağ oluşturabilecek bir temas halinde oldukları da görülmektedir.



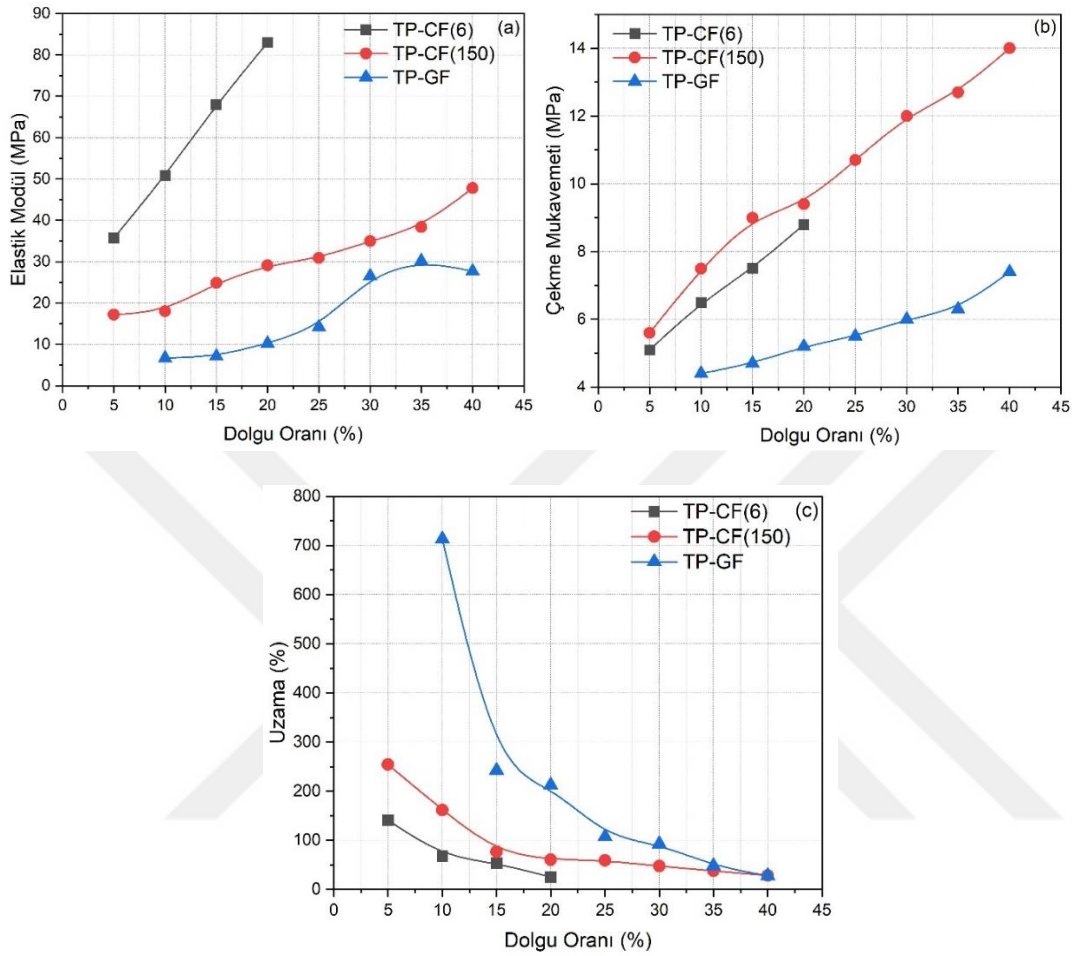
Şekil 4.3. (a,b) TP-GF25, (c,d) TP-GF40 SEM görüntüleri

Yukarıda Şekil 4.3'te grafit ile hazırlanan %25 ve %40 dolgu oranlarına sahip iletken polimer kompozitlerin SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde grafitin sahip olduğu tabakalı yapı açıkça görülmektedir. Bunun yanında kullanılan grafitin polimer matris ile uyumunun iyi olduğu da görüntülerde fark edilmektedir. Ayrıca dolgu oranının artmasıyla matris içerisinde grafit tabakalarının birbirleriyle olan temasının arttığı dikkat çekmektedir. Bunun yanında özellikle %40 dolgu oranında, grafitin TPU içerisinde neredeyse matrisin her yerinde homojen bir şekilde dağılmış olduğu görülmektedir. Bu durumun özellikle gerinim duyarlılığı için önemli bir avantaj sağlayacağı düşünülmektedir.

4.2 Çekme Testi Sonuçları

Örneklere uygulanan çekme testi sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 4.4'te verilmektedir. Şekilde örneklerin dolgu oranı artışıyla elastik modül, çekme mukavemeti ve kopma uzaması değerlerindeki değişim verilmiştir. Çekme testi sonucu elde edilen gerilim-uzama grafiğinde elastik deformasyonun gerçekleştiği bölgenin eğimi malzemenin elastik modülünü vermektedir. Çekme mukavemeti,

malzemenin kopmadan dayanabileceği maksimum gerilim değeridir. Kopma uzaması ise örneklerin boyunda meydana gelen maksimum uzama oranını vermektedir.



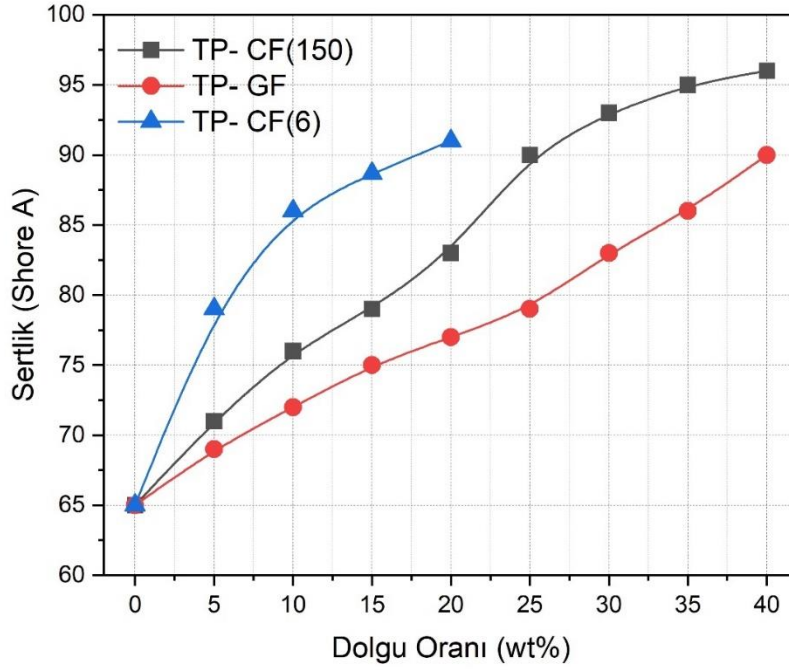
Şekil 4.4. Kompozit örneklerinin dolgu oranı artışı ile (a) elastik modül, (b) çekme mukavemeti ve (c) uzama özelliklerinin değişimi

TPU matris içerisine, göreceli olarak sert karbon esaslı dolgu maddelerinin eklenmesiyle malzemenin çekme özellikleri bazı yönlerden pozitif bazı yönlerden ise negatif olarak etkilenmektedir. Matris içerisine bu dolguların eklenmesiyle esnek yapısı sayesinde çok yüksek uzama değerlerine çıkabilen TPU'nun özellikle dolgu oranının artmasıyla uzama değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Bunun tam tersi olarak malzemenin elastik modülü ve çekme mukavemetinin, dolgu oranı artışıyla artması beklenmektedir. Böylece, esnek matris içerisine sert karbon esaslı dolgu maddelerinin eklenmesiyle hazırlanan kompozit malzeme, matris olarak kullanılan polimerin daha sert ve kırılğan olmasını sağlamaktadır diyebiliriz. Bu tez kapsamında hazırlamış olduğumuz kompozitlerin çekme testi sonucunda elde edilen elastik modül,

çekme mukavemeti ve kopma uzaması değerleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Burada beklenildiği gibi, dolgu oranı artışıyla uzama değerlerinin düşmesinin yanında elastik modüllerinin artması durumu gözlemlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde en yüksek modül değerlerine 6 mm uzunluğudaki karbon elyaf ile hazırlanan kompozitlerin sahip olduğu görülmektedir. Bunun yanında böylesine büyük boyuttaki dolgunun matris içine dahil edilmesi düşük dolgu oranlarında bile uzamanın, diğer dolgularla hazırlanan kompozitlere göre çok düşük olmasına neden olmuştur. Bu sonuçlara göre elastik modülü en yüksek ve uzama oranı en düşük kompozitler TP-CF(6) örnekleri olurken, elastik modülü en düşük fakat en iyi uzama sonuçlarını veren kompozitler ise TP-GF örnekleri olmuştur. TP-CF(150) örnekleri ise modül ve uzama sonuçlarında diğer kompozit örneklerinin tam ortasında yer alırken çekme mukavemeti sonuçlarında TP-CF(6) kompozitleriyle neredeyse aynı hatta daha iyi sonuçlar vermiştir.

4.3 Sertlik (Shore A) Değerleri

Esnek gerinim sensörleri için bir diğer önemli özellik olan sertlik ölçümü sonuçları Şekil 4.5'de gösterilmektedir. Sonuçlarda da görüldüğü gibi esnek TPU matris içerisine dahil edilen göreceli olarak sert dolgu maddeleri matrisin sertliğinin artmasına neden olmaktadır. Artan dolgu oranıyla sertliğin doğrusal olarak arttığı görülmektedir. En yüksek sertliğe, TP-CF6 kodlu ürün serisinin sahip olduğu dikkat çekmektedir. Bunun nedeni bu ürün serisinde kullanılan karbon elyaf boyutunun yüksek olmasıdır. Böylesine büyük boyutta ve sert bir dolgunun esnek matris içerisine dahil edilmesi, polimerin esnekliğinde büyük değişimlere sebep olmuştur. Bu etki kompozitin çekme testi sonuçlarında da değerlendirilmiştir. Bir diğer karbon elyaf ile hazırlanan serinin daha düşük sertliğe sahip olduğu görülmektedir. İletken dolgu malzemesi olarak grafitin kullanılmasıyla hazırlanan ürün serisi en düşük sertlik yani en iyi esneklik sonuçları vermiştir.



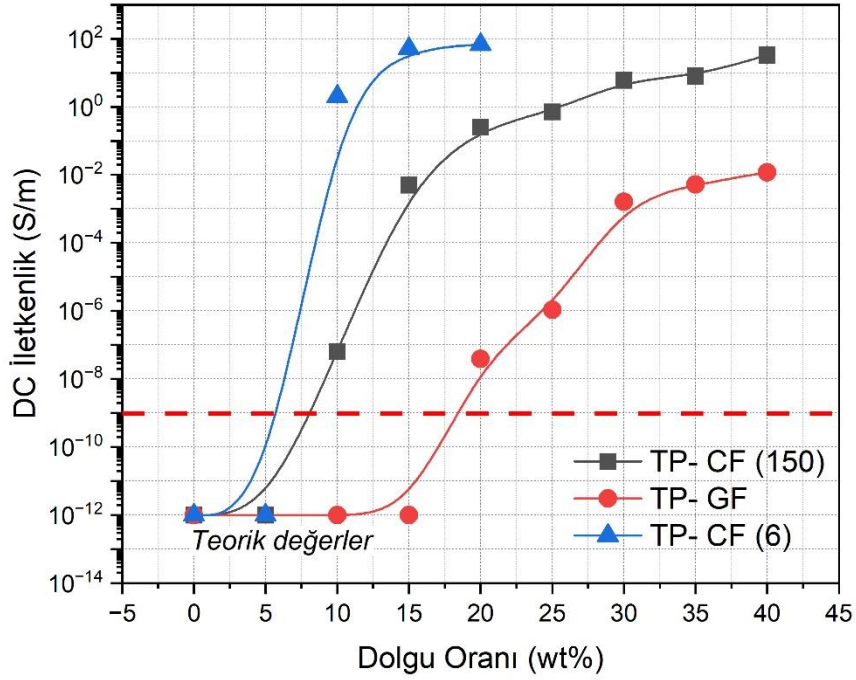
Şekil 4.5. Kompozitlerin sertlik (ShoreA) ölçümü

4.4 İletkenlik Özellikleri

Tez kapsamında hazırlanan örneklerin dolgu oranı artışıyla iletkenlik değerlerinin değişimi Şekil 4.6’da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde tez kapsamında kullanılan bütün kompozitler için, iletken dolgu maddesi oranı artışıyla kompozitlerin iletkenlik değerlerinin beklendiği şekilde arttığı görülmektedir. Düşük dolgu oranlarında her dolgu maddesi için iletkenlik değeri ölçülememiş olup bu dolgu oranları için 10^{-12} S/m teorik değeri varsayımı yapılmıştır. Kompozitler için iletken dolgu maddesi oranının artışıyla iletkenlikte ani bir artış olduğu sonuçlarda açık bir şekilde görülmektedir. Bu ani artış kompozit içerisindeki dolgu artışıyla iletken ağın oluşması ile literatürde açıklanmaktadır. Bu ağın oluştuğu kritik dolgu oranı perkolasyon eşiği olarak adlandırılmaktadır, bu konu ayrıntılı bir şekilde önceki bölümlerde anlatılmıştır. Bu ani iletkenlik artışının gerçekleştiği dolgu oranının altında kompozit içerisinde iletkenliği sağlayacak bir ağ bulunmamaktadır. Dolgu oranı artışıyla birlikte, iletken dolgu maddelerinin birbirlerine yaklaşması hatta temas etmesiyle elektronların hareket edebileceği bir yol oluşur. Böylece kompozit içerisinde iletkenliği sağlayacak bir ağ meydana gelmektedir.

Bu tez kapsamında hazırlanan kompozitlerin, farklı geometri ve boyutlara sahip dolgular için, farklı dolgu oranlarında bu iletken ağı oluşturduğu görülmektedir. Örneğin iki farklı karbon elyaf dolgu maddelerini karşılaştırdığımızda; 6 mm uzunluğundaki karbon elyaf ile hazırlanan kompozitlerde bu iletken ağı, 150 mikron boyutundaki karbon elyaf ile hazırlanan kompozitlerden daha düşük dolgu oranlarında oluştuğu görülmektedir. Burada dolgu boyutunun iletken ağ oluşumu üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. Örneğin TP-CF6 ürün serisinde, %20 dolgu oranında yaklaşık 10^2 S/m iletkenlik seviyesine ulaşılmışken, aynı dolgu oranında TP-CF150 sersinde iletkenlik değerinin 10^{-1} S/m'den biraz yüksek olduğu görülmektedir.

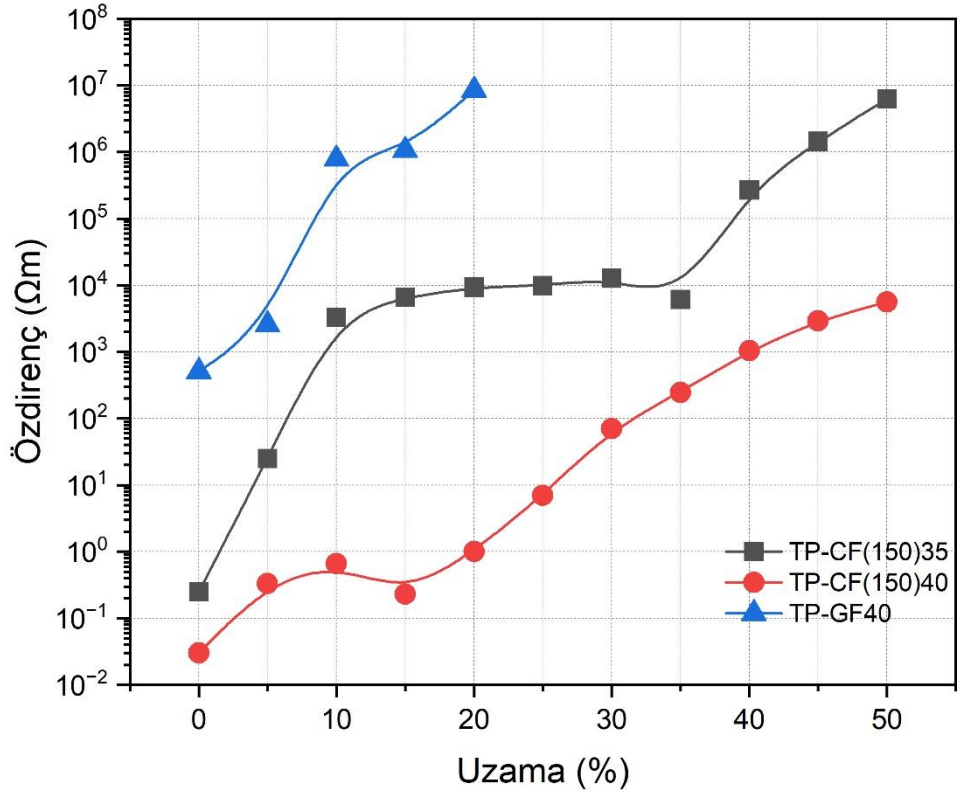
İletken kompozit malzemelerde dolgu geometrisin iletkenlik-dolgu oranı ilişkisini doğrudan etkilediği yine Şekil 4.6'da görülmektedir. Çalışmada grafit ile hazırlanan ürün serisinde her iki karbon elyaf ile hazırlanan kompozitlerden iletkenliğinin daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca yine grafit ile hazırlanan kompozitlerde iletken bir yol oluşturabilmek için karbon elyaflar ile hazırlanan kompozitlerden daha yüksek dolgu oranlarına çıkılması gerektiği gözlemlenmiştir. Burada benzer şekilde %20 grafit oranındaki iletkenlik değerine bakıldığında diğer dolgu maddelerine göre bu değerin çok düşük (yaklaşık 10^{-7} S/m) olduğu görülmektedir. Bu büyük farklılığın nedeninin dolgu maddelerinin en-boy oranı olduğu düşünülmektedir. Karbon elyaflar sahip oldukları yüksek en boy oranı nedeniyle daha düşük dolgu oranlarında iletken bir ağ oluşturmayı sağlayabilirler.



Şekil 4.6. Kompozitlerin dolgu oranı-iletkenlik grafiği

4.5 Direnç-gerinim Davranışı

İletken polimer kompozitlerin elektriksel özellikleri tamamen gömülü iletken ağlar tarafından sağlandığı için iletken ağı yapısı, bu kompozitlerin gerinim algılama davranışı üzerinde önemli bir rol oynamalıdır. Tez kapsamında hazırlanan kompozitlerin direnç-gerinim davranışı Şekil 4.7’de gösterilmektedir. Bu test çalışmaları için özellikle hazırlanan kompozitlerinden, her dolgu maddesi için perkolasyon eşiğindeki dolgu oranları ile hazırlanan örnekler seçilmiştir. Ayrıca TP-CF(6) kompozit serisi, hazırlanan diğer kompozit serilerine göre daha yüksek iletkenliğe sahip olmasına rağmen, bu ürün serisindeki kompozitlerle yapılan direnç-gerinim testlerinde düşük uzama oranlarında numunelerin koptuğu gözlemlenmiştir. Böylece bu dolgu malzemesi için direnç-gerinim davranışı sonuçları elde edilememiştir.



Şekil 4.7. Kompozitlerin gerinim-direnç davranışı ölçümü

Şekil 4.7’de gösterildiği gibi farklı dolgu içerikleri nedeniyle değişen başlangıç noktalarına rağmen, sergilenen genel model, tüm numuneler için gerinim ile birlikte direncin arttığı yönündedir. Bu sonuç daha önce yapılan çalışmalarla doğrulanmıştır [287,288]. Sonuçlar incelendiğinde TP-CF(150)40 örneğinin direnç değerlerinin uzamayla nerdeyse doğrusal olarak arttığı görülmektedir. Bu durumun tersi olarak TP-CF(150)35 kompozitinin direnç değerlerinin uzamayla lineer olarak artmadığı gözlemlenmiştir, fakat bu sapmaların ölçüm hatalarından oluşabileceği de düşünülmektedir. Burada TP-CF(150) ürün serisinde, dolgu içeriğindeki küçük değişikliklerin bile direnç-gerinim eğrisinin, eğiminde fark edilebilir bir kayma oluşturduğuna ve bu durumun geniş bir hassasiyet aralığına işaret ettiğine dikkat edilmelidir. Bu değerlendirmeye göre karbon elyaf oranının azalmasıyla duyarlılığın arttığı söylenebilir. Bunun nedeni olarak dolgu oranında perkolasyon eşiğine yaklaştıkça duyarlılığın arttığı düşünülmektedir. Perkolasyon noktasında dolgu maddelerinin oluşturduğu iletken ağ çok kritik bir yapıdadır. Bu durumda uygulanan

çok küçük bir gerinim bile bu ağın bozulmasına ve gerinim hassasiyetinin üst düzeyde olmasına neden olmaktadır. Yani başka bir deyişle bu durumun, polimer matris içerisindeki gömülü karbon elyafların arasındaki temas kaybından dolayı oluştuğu söylenebilir. Bunun yanında bir diğer dolgu maddesi olan grafit ile hazırlanan kompozit örneğinin direnç-gerinim sonuçları değerlendirildiğinde, bu kompozitin sahip olduğu iletken ağın %20 gibi küçük bir uzamada tamamen yok olduğu görülmektedir. Bu sonuçla birlikte TP-GF40 kompozitinin en iyi gerinim duyarlılığına sahip olduğu söylenebilir.

4.6 Elektromanyetik Kalkanlama Özellikleri

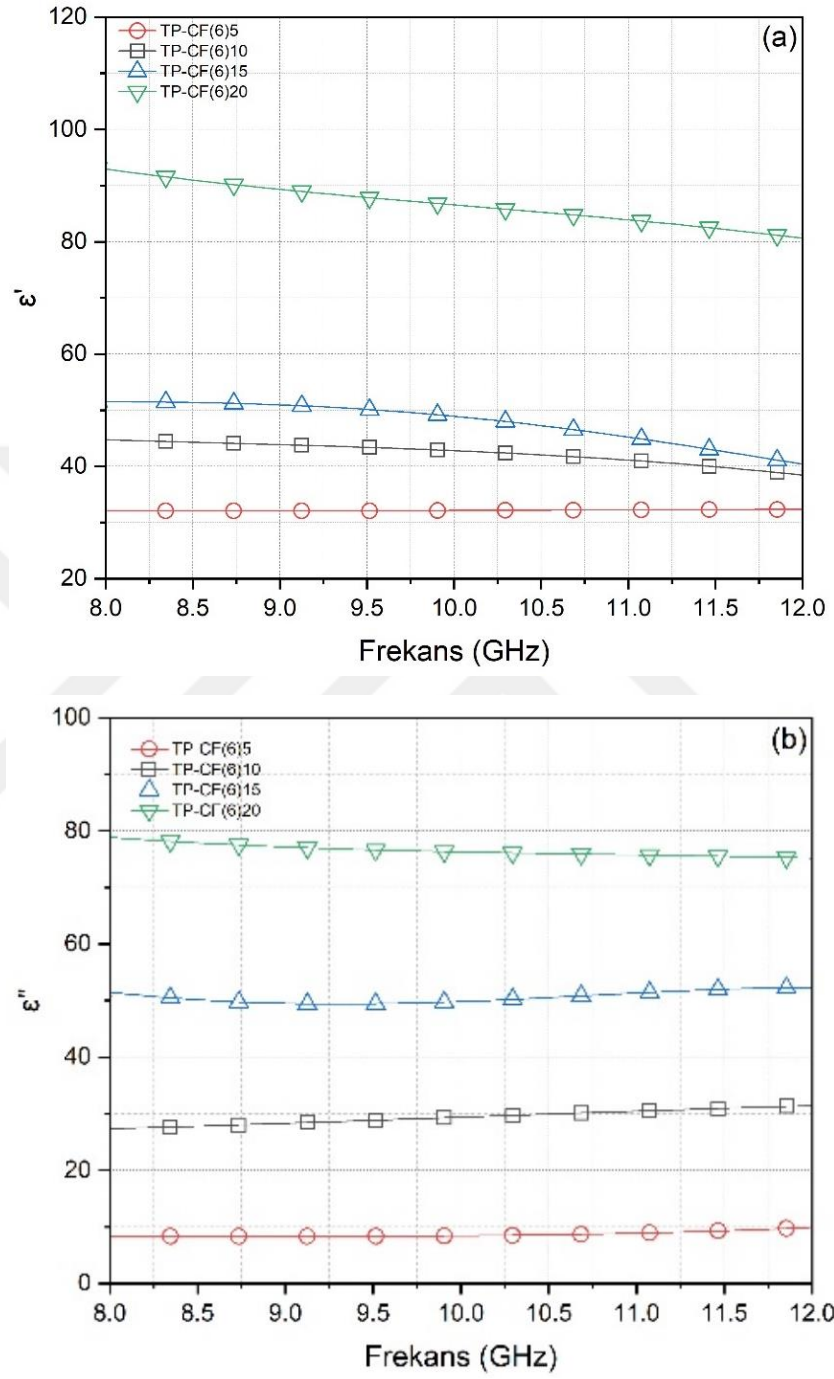
4.6.1 Dielektrik parametrelerinin değerlendirmesi

Farklı dolgu oranları ve farklı karbon esaslı dolgu tipleriyle hazırlanan kompozitlerin ϵ' ve ϵ'' değerlerinin 8-12 GHz frekans aralığındaki değişimi Şekil 4.8 - 4.10'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, tüm ürün serileri için dolgu oranı artışıyla ϵ' değerinin arttığı görülmektedir. ϵ' kompozit tarafından depolanan elektriksel yükü temsil etmektedir. Böylece, kompozit içerisindeki iletken dolgu miktarının artışıyla depolanan yükün arttığını görmekteyiz. Bu durumda kompozit içerisinde yük depolanmasını sağlayan mikro kapasitör benzeri yapıların oluştuğunu söyleyebiliriz. Dolgu oranı artışıyla bu kapasitör benzeri yapıların artmasıyla depolanan yük de artmaktadır.

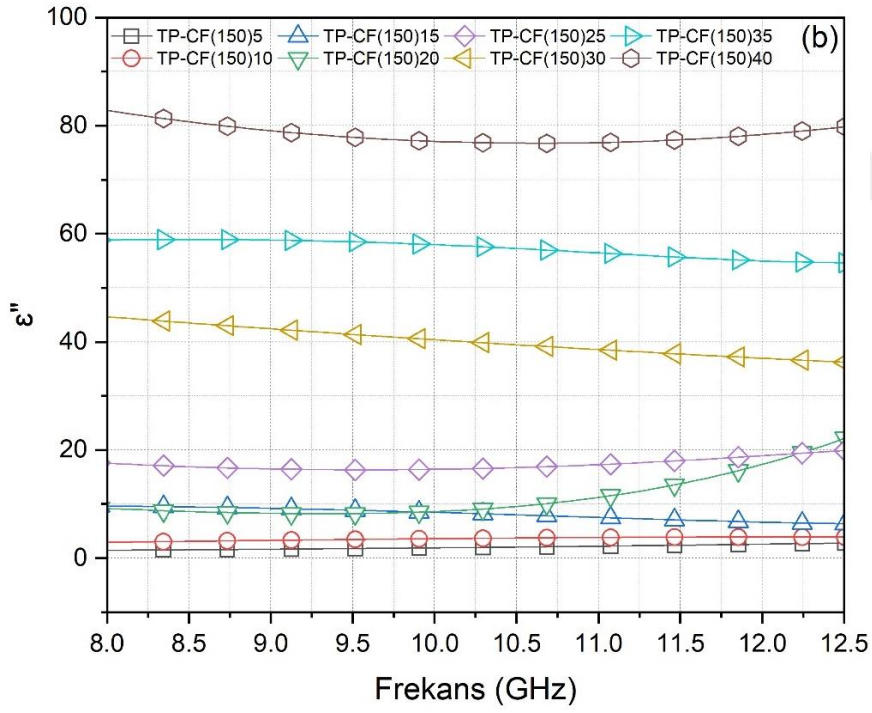
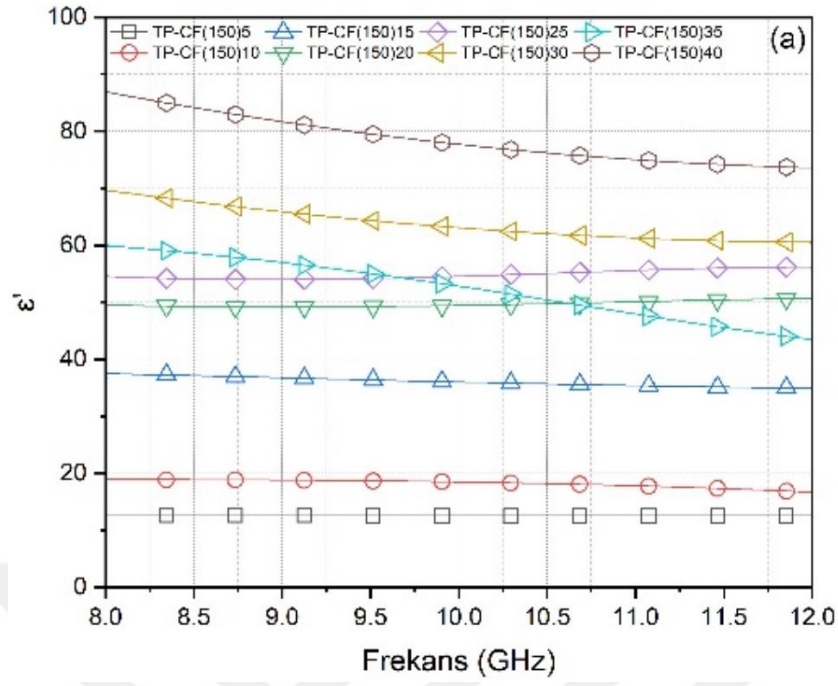
Örneklerin ϵ' değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimine bakıldığında, bütün örnekler için 8-12 GHz frekans aralığında belirgin bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Fakat özellikle karbon elyaf kullanılarak hazırlanan ürün serilerinde yüksek dolgu oranlarında frekans artışıyla ϵ' değerinde düşüşler görülmektedir. Malzemeye uygulanan yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaya cevap verecek yeterli süreyi bulamaması, bu durumun bir sebebi olarak, düşünülmektedir.

Farklı dolguların ϵ' değerine etkisi değerlendirildiğinde, örneğin bütün dolgu tiplerinde %20 oranla hazırlanmış kompozitlerin 10-10,5 GHz frekans aralığındaki depolanan enerjiye bakıldığında sıralama şu şekilde olacaktır: TP-CF(6)20 > TP-CF(150)20 > TP-GF20. Bu sonuçla özellikle dolgu boyutunun ϵ' değerinin üzerindeki etkisi görülmektedir. 6 mm uzunluğundaki karbon elyaf ile hazırlanan kompozitlerin elektriksel yükü daha iyi depoladığı görülmektedir. Hatta bu ürün serisi için %15 dolgu

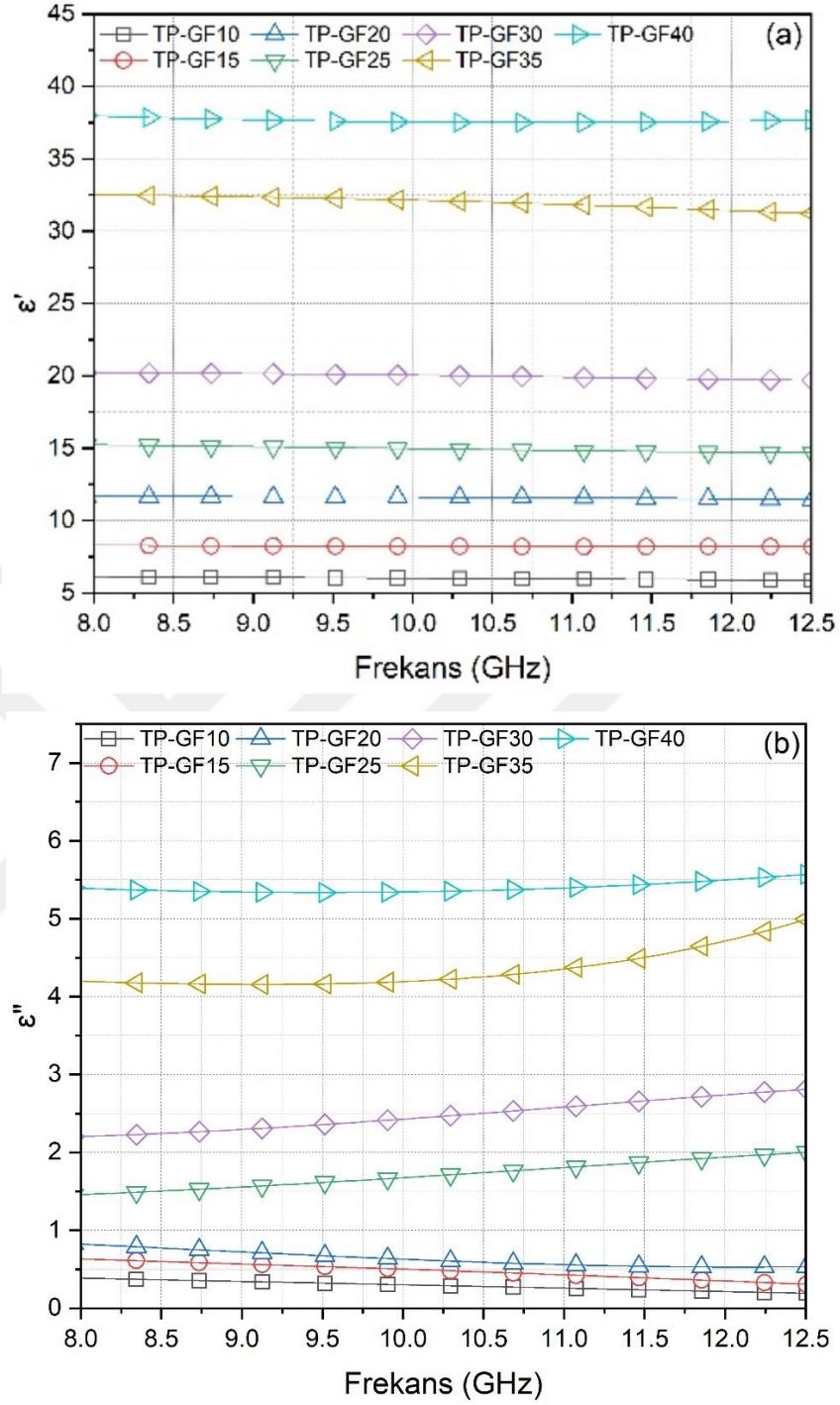
orandan %20 dolgu oranına çıkılmasıyla, ϵ' değerinde yüksek bir artış olduğu dikkat çekmektedir.



Şekil 4.8. TP-CF(6) ürün serisinin (a) ϵ' , (b) ϵ'' değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimi



Şekil 4.9. TP-CF(150) örnek serisinin (a) ϵ' , (b) ϵ'' değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimi



Şekil 4.10. TP-GF örnek serisinin (a) ϵ' , (b) ϵ'' değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimi

Şekil 4.8 - 4.10 (b) 'de verilen kompozitlerin farklı dolgu oranlarında frekansa bağlı olarak ϵ'' değerlerinin değişimi incelendiğinde, yine aynı şekilde dolgu oranı artışıyla bu değer de arttığı görülmektedir. ϵ'' , kompozit üzerinde ısı enerjisi olarak kaybolan enerjiyi temsil etmektedir. Farklı dolgu geometrilerine göre ϵ'' değerinin de

değerlendirmesi amacıyla yine aynı şekilde her ürün serisi için %20 dolgu oranlarındaki ε'' değerlerine 10-10.5 GHz frekans aralığında bakıldığında, ε' değeriyle aynı sıralama karşımıza çıkmaktadır: TP-CF(6)20 > TP-CF(150)20 > TP-GF20.

4.6.2 Kalkanlama etkilerinin değerlendirilmesi

Örneklerin kalkanlama etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla SE_A , SE_R ve SE_T değerleri denklem 2.6 ve 2.7'ye göre hesaplanmıştır.

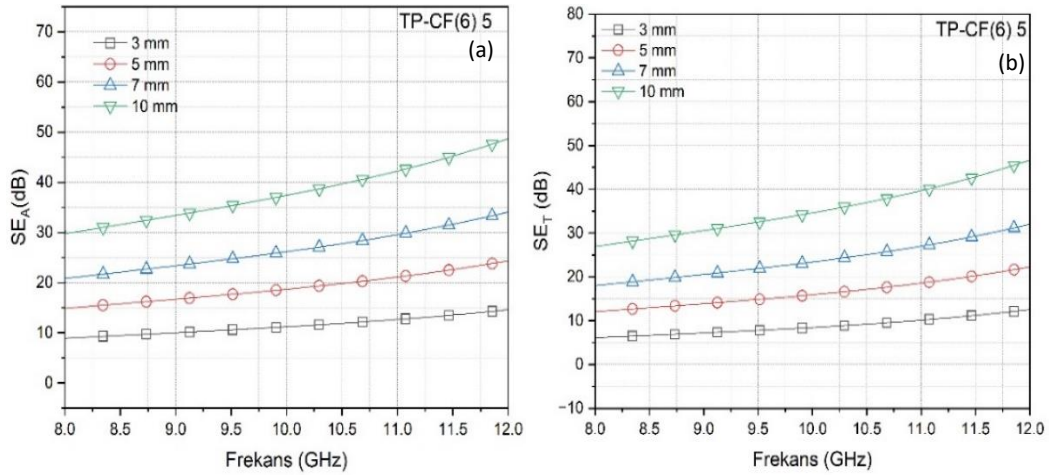
Şekil 4.11 - 4.29'da hazırlanan bütün örneklerin farklı kalınlık ve dolgu oranlarında SE_A ve SE_T değerlerinin değişimi verilmiştir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde kalınlık artışıyla tüm dolgu tiplerinde ve oranlarında SE_A değerlerinin arttığı görülmektedir (Şekil 4.11(a) - 29(a)). Dolgu tiplerinin kendi içerisinde kalınlık ile değerlendirmesi yapıldığında: örneğin TP-CF(6) ürün serisi için Şekil 4.11(a) – 4.14(a) grafiklerine bakıldığında her dolgu oranı için 5 mm kalınlığında ve 10-10.5 GHz frekans aralığında SE_A değerlerin dolgu oranı artışıyla birlikte arttığı görülmektedir. Aynı şekilde TP-CF(150) (Şekil 4.15(a) – 4.22(a)) ürün serisi için bakıldığında yine 5 mm kalınlığında dolgu oranı artışı ile SE_A değerlerindeki artış görülmektedir. TP-GF ürün serisi için de dolgu oranı artışıyla SE_A değerlerinde aynı davranışı sergilendiği Şekil 4.23(a) – 4.29(a)'da görülmektedir.

Ürün serilerinin birbirleriyle karşılaştırılması amacıyla her ürün serisi için %20 dolgu oranında, 5 mm kalınlığında ve 10-10.5 GHz frekans aralığında SE_A bakıldığında (Şekil 4.14(a), 4.18(a) 4.25(a)): TP-CF(6)20 > TP-CF(150)20 > TP-GF20 şeklinde bir sıralama oluşmaktadır. Bu sıralamanın elektriksel iletkenlikle orantılı olduğu dikkat çekmektedir. Ayrıca Denklem 2.7'de SE_A değerinin iletkenliğe ve frekansa bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Bu durumda iletkenlik testlerinde en yüksek değerlere sahip TP-CF(6) ürün serisinin, en yüksek SE_A değerine sahip olması beklenen bir sonuçtur.

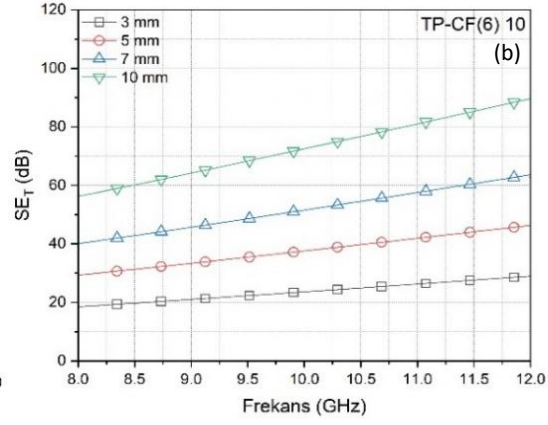
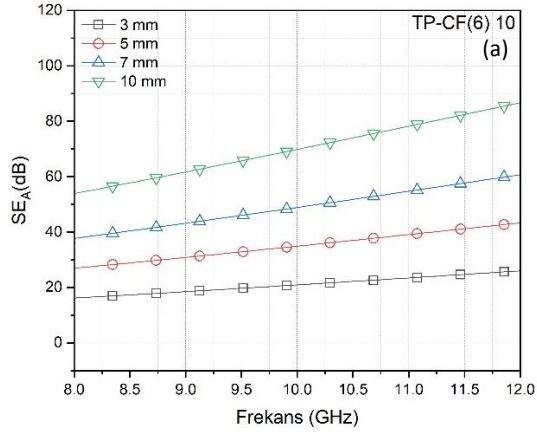
Şekil 4.30 (a,b,c)'de ürün serileri için artan dolgu oranı ve frekansa göre SE_R değerlerinin değişimi gösterilmektedir. Sonuçlara bakıldığında beklenildiği gibi tüm dolgu türleri için artan dolgu oranıyla SE_R değerlerinde artış görülmektedir. Artan frekansla ise bazı dolgu oranlarında küçük de olsa SE_R değerlerinde bir azalma tespit edilmiştir. Dolgu tiplerine göre bir karşılaştırma yapıldığında, bütün dolgu tipleri için %20 dolgu oranında ve 10-10.5 GHz frekans aralığında en yüksek SE_R değerine TP-

CF(6)20 ürünün sahip olduğu görülürken, en düşük SE_R değerine ise TP-GF(20) kompozitinin sahip olduğu belirlenmiştir.

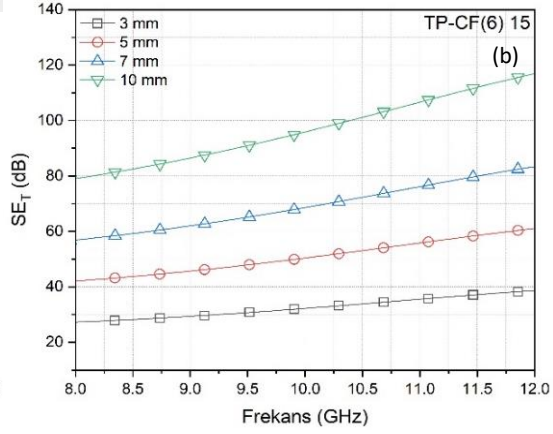
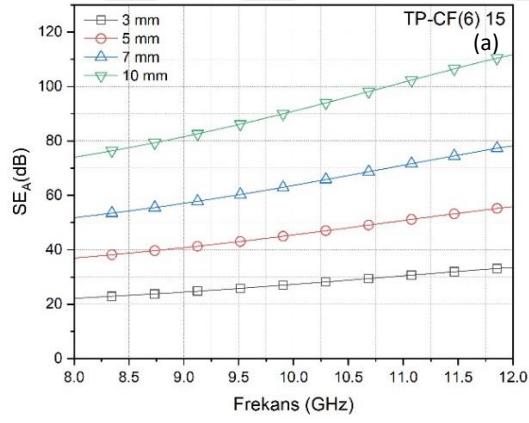
Şekil 4.11 – 4.29 (b)'de ayrıca SE_A ve SE_R değerlerinin toplamı olan SE_T 'nin farklı kalınlık ve dolgu oranlarında frekansa bağlı olarak değişimi de verilmektedir. SE_T ürünlerin kalkanlama özellikleri değerlendirilirken en önemli gösterge olarak bilinmektedir. Bu durumda örneklerin SE_T değerlerinin değişimine bakıldığında, tüm ürün serilerinde artan kalınlık ve dolgu oranıyla bu değer arttığı görülmektedir. Bu değer değişiminin değerlendirilmesinde bir farklılık yapılarak, tüm ürün serilerinden en yüksek dolgu oranlarına ve en yüksek kalınlığa sahip kompozitlerin (TP-CF(6)20 / TP-CF(150)40 / TP-GF40) karşılaştırılması yapıldığında (Şekil 4.14(b), 4.22(b) ve 4.29(b)); 10-10.5 GHz frekans aralığında, TP-CF(6)20'nin yaklaşık 120 dB, TP-CF(150)40'ın yaklaşık 120 dB ve TP-GF40 kompozitinin yaklaşık 25 dB SE_T değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durumda TP-CF(150) ürün serisinde dolgu oranı TP-CF(6) ürün serisine göre 2 katına çıkarıldığında elektromanyetik dalga kalkanlama özelliklerinde yaklaşık olarak aynı etkinlik sağlanabileceğini söyleyebiliriz. TP-GF ürün serisi ise bu özelliklerin değerlendirmesinde, dolgu oranı ve kalınlık artışı söz konusu olduğunda diğer ürün serileri ile aynı davranışı sergilemesine rağmen, elektromanyetik dalga kalkanlama etkinliğinin değerlendirilmesinde diğerlerinden çok geride olduğu görülmüştür.



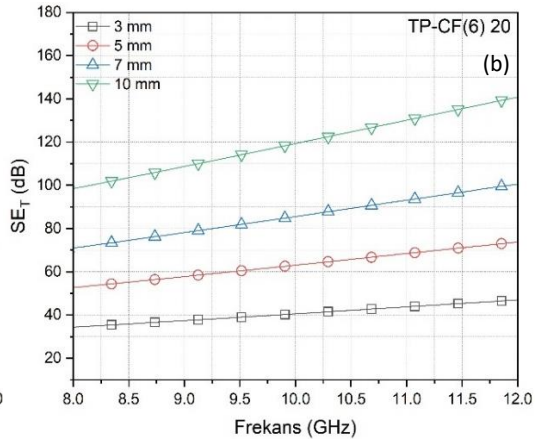
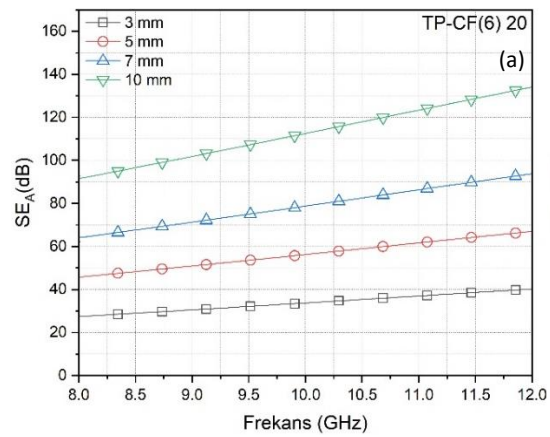
Şekil 4.11. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(6)5 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi



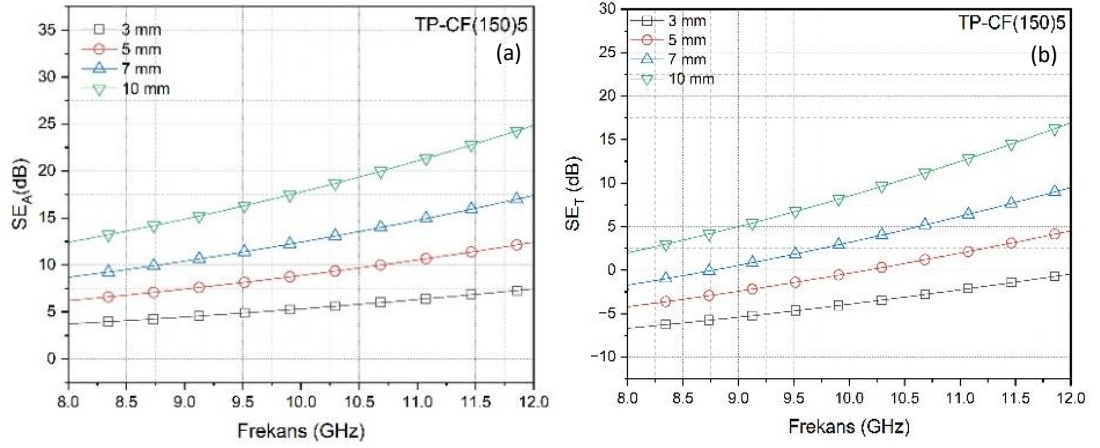
Şekil 4.12. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(6)10 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi



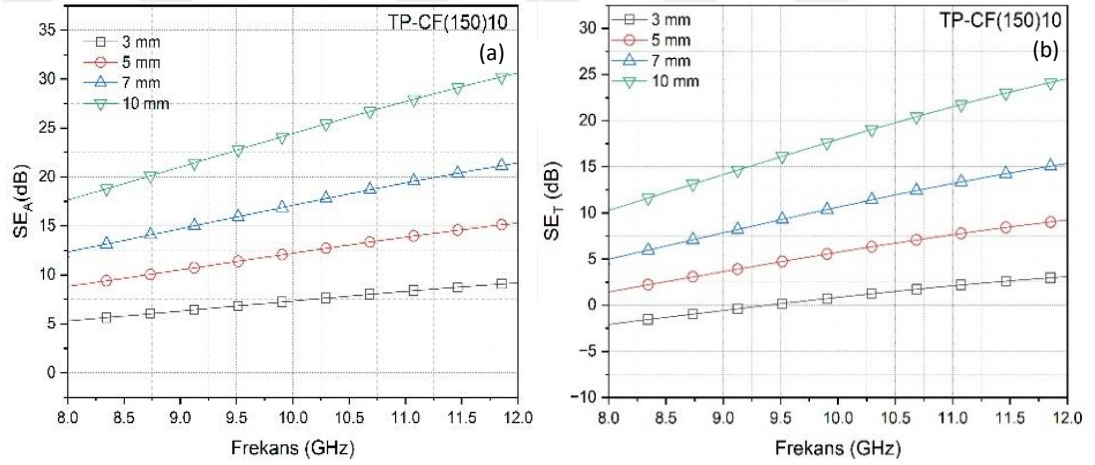
Şekil 4.13. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(6)15 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi



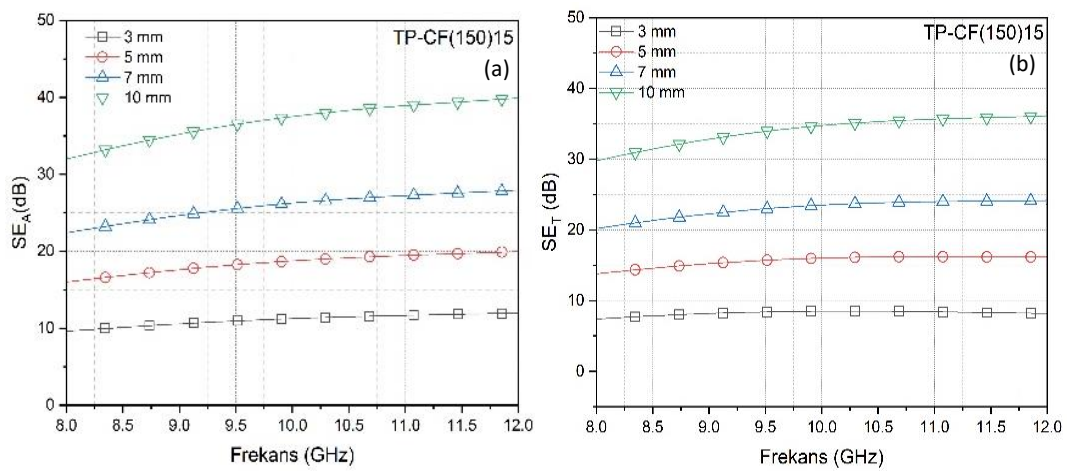
Şekil 4.14. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(6)20 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi



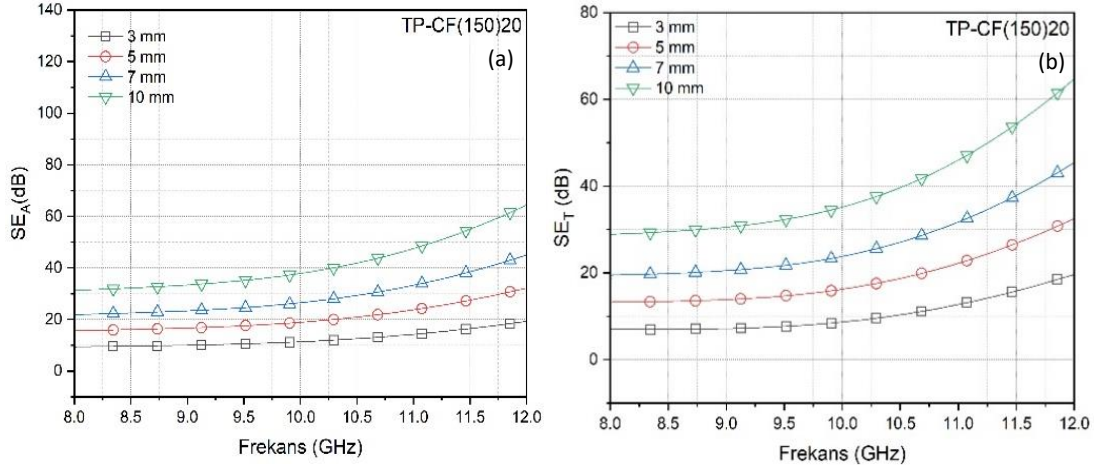
Şekil 4.15. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(150)5 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi



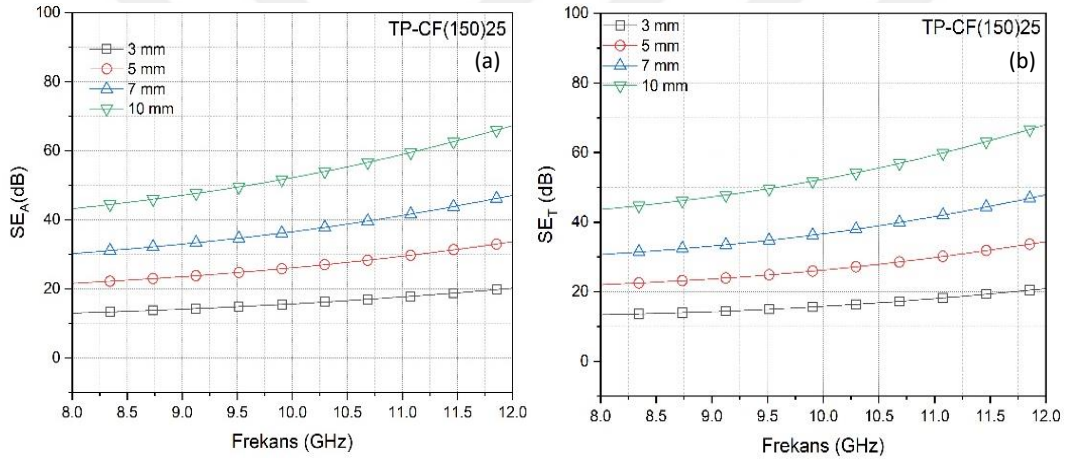
Şekil 4.16. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(150)10 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi



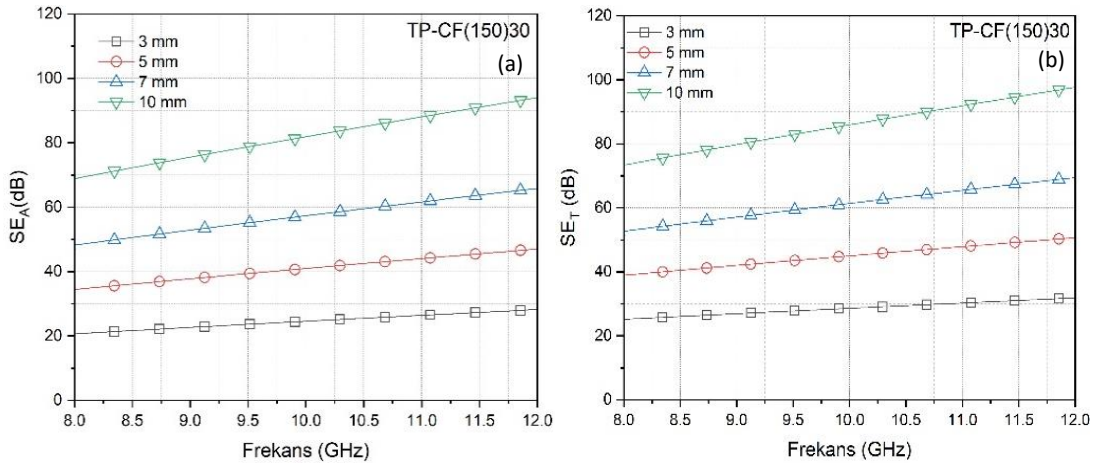
Şekil 4.17. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(150)15 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi



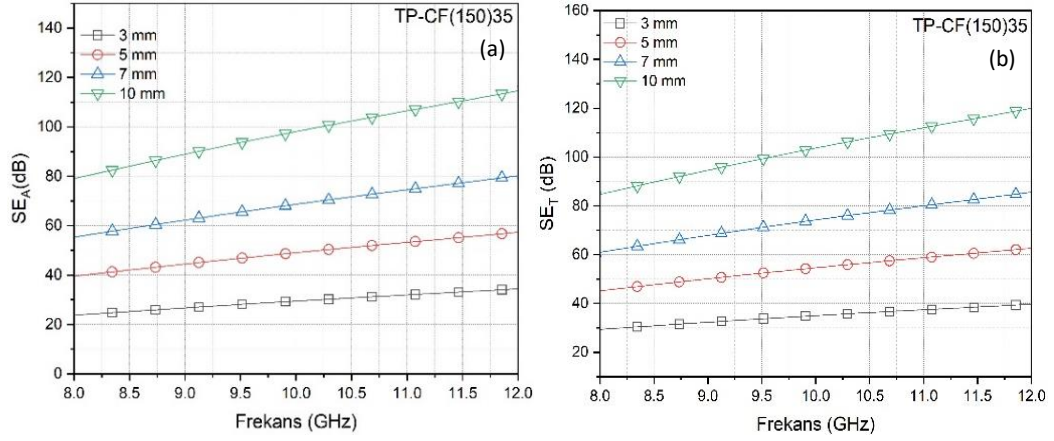
Şekil 4.18. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(150)20 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi



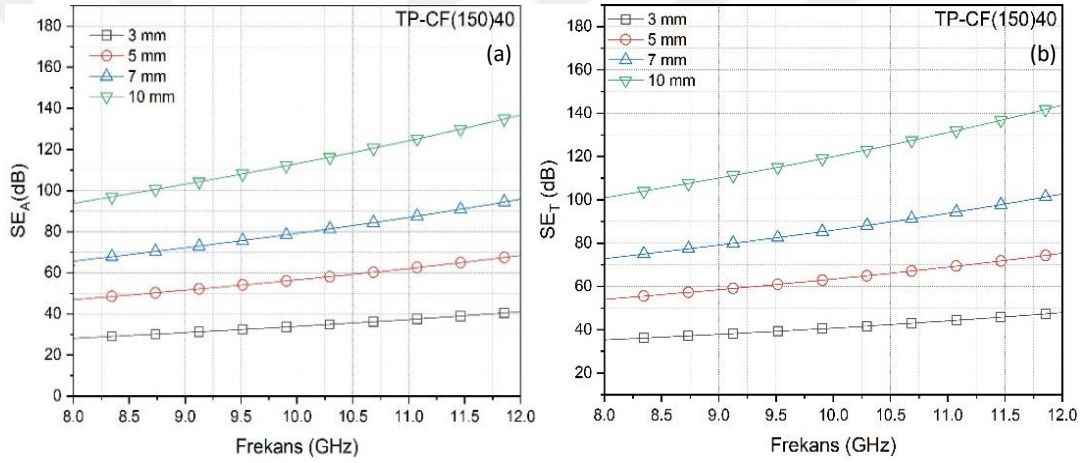
Şekil 4.19. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(150)25 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi



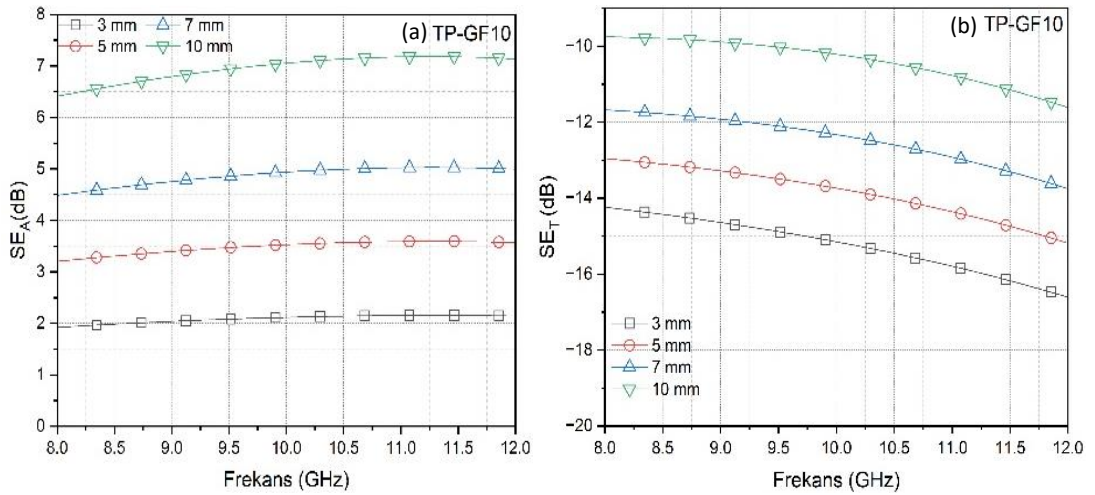
Şekil 4.20. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(150)30 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi



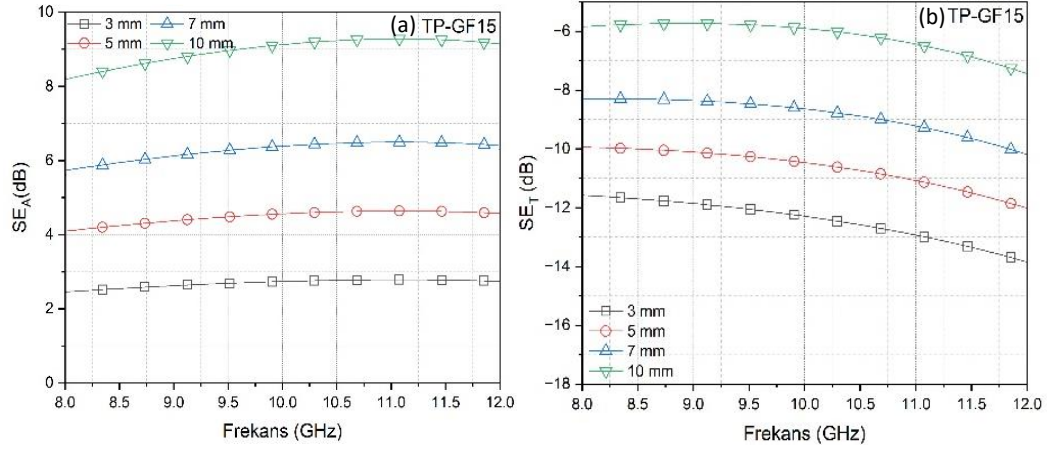
Şekil 4.21. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(150)35 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi.



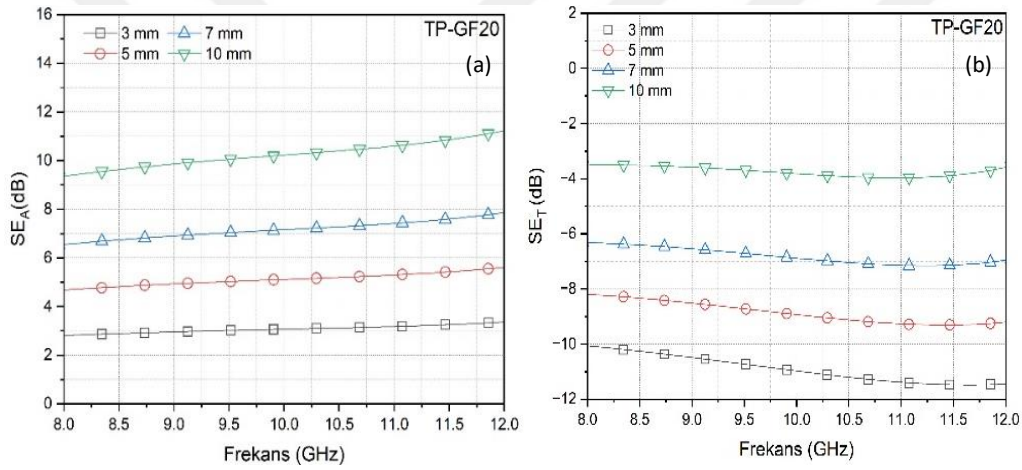
Şekil 4.22. Farklı kalınlık değerlerinde TP-CF(150)40 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi



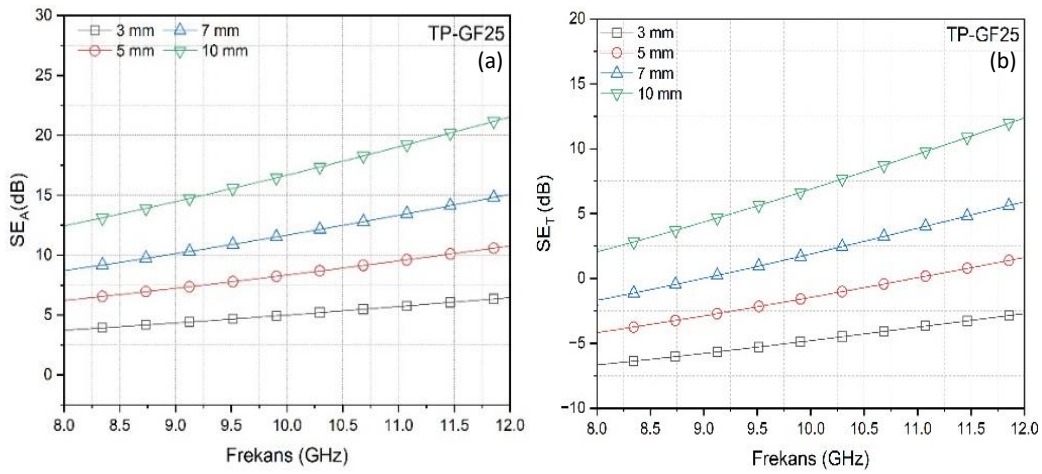
Şekil 4.23. Farklı kalınlık değerlerinde TP-GF10 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi



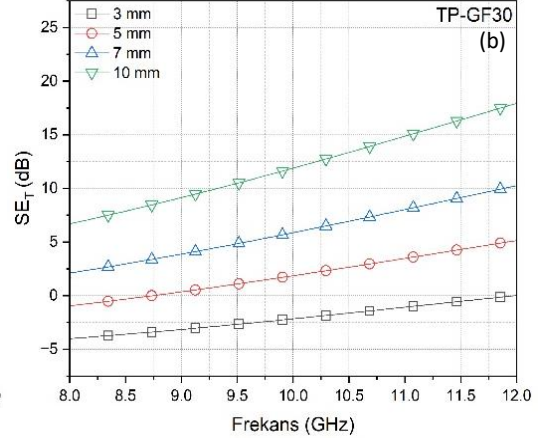
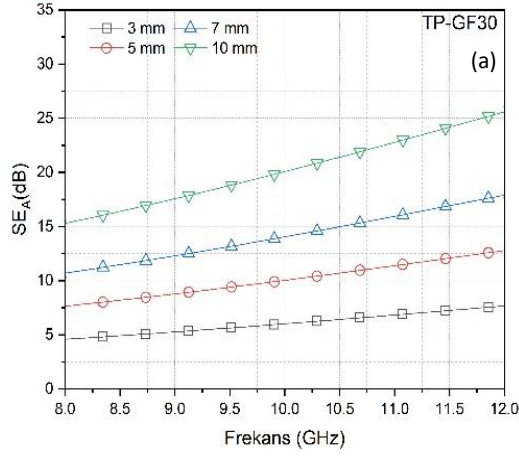
Şekil 4.24. Farklı kalınlık değerlerinde TP-GF15 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi



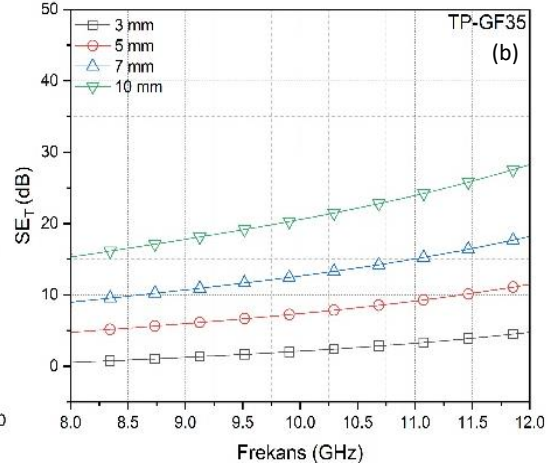
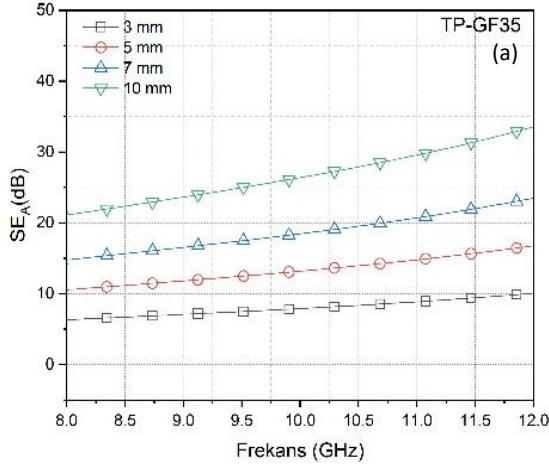
Şekil 4.25. Farklı kalınlık değerlerinde TP-GF20 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi



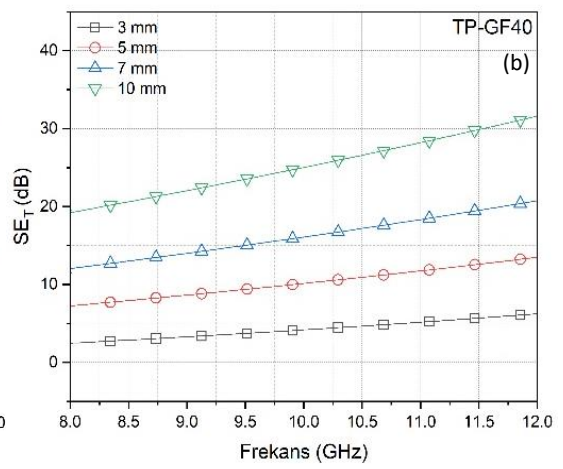
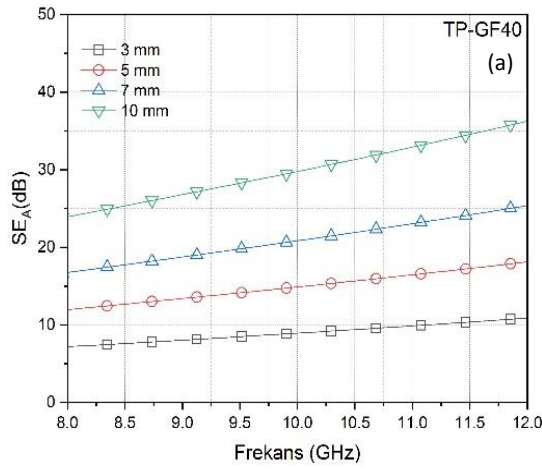
Şekil 4.26. Farklı kalınlık değerlerinde TP-GF25 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi



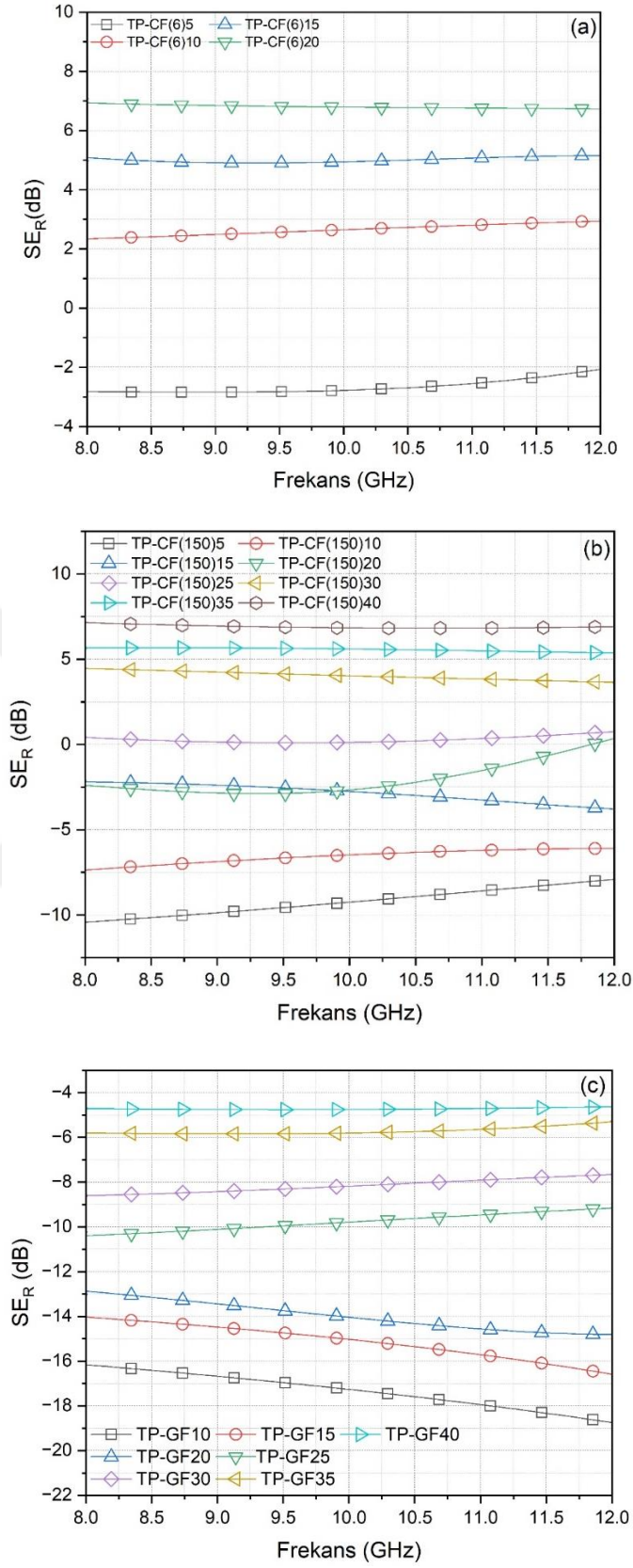
Şekil 4.27. Farklı kalınlık değerlerinde TP-GF30 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi



Şekil 4.28. Farklı kalınlık değerlerinde TP-GF35 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi



Şekil 4.29. Farklı kalınlık değerlerinde TP-GF40 örneğinin (a) SE_A ve (b) SE_T değerlerinin değişimi



Şekil 4.30. Farklı dolgu oranlarında (a) TP-CF(6), (b) TP-CF(150), (c) TP-GF ürün serileri için SE_R değerinin değişimi

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında farklı geometride ve farklı boyutlardaki karbon esaslı iletken dolgu malzemelerinin, bu dolgularla hazırlanan esnek iletken polimer kompozitlerin gerinim sensör özellikleri ve elektromanyetik dalga kalkanlama özelliklerine etkisi incelenmiştir. Hazırlanan iletken polimer kompozitlerde polimer matris olarak esnekliği ve karbon esaslı dolgularla uyumluluğu nedeniyle TPU seçilmiştir.

Hazırlanan kompozitlerin SEM görüntülerinde özellikle TP-CF(6)20 kompoziti için dolgu maddesi ile matris arasında iyi bir etkileşim olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu kompozit örneğinde dolgu maddelerinin birbirlerine çok yakın hatta bazı noktalarda birbirleriyle temas halinde oldukları gözlemlenmiştir. Kompozit içerisinde iletken dolgu maddelerinin teması kompozitin iletkenliği açısından çok büyük bir öneme sahiptir. Karbon elyafların birbirlerine temas etmesiyle kompozit içerisinde iletken bir ağ oluşmaktadır. Bu durum SEM görüntülerinde açık bir şekilde görülmektedir. TP-CF(150)25 kompozitinin SEM görüntüleri incelendiğinde ise dolgu ve matrisin birleşim noktalarında boşluklar olduğu görülmektedir. Bu durum bize bu kompozit serisi için dolgu-matris arayüzey etkileşiminin düşük olduğunu göstermektedir. Bu etkileşimin düşük olması kompozitin mekanik ve iletkenlik özelliklerinde negatif etki oluşturmuştur. TP-CF(150)40 ürününün SEM görüntülerine bakıldığında dolgu oranındaki artışla ara yüzey özelliklerinde iyileşmeler olduğu görülmüştür. Ayrıca TP-CF(150)40 kompozitinde de iletken dolguların matris içerisinde temas halinde olduğu görülmüştür. Bir diğer ürün serisinde TP-GF25 ve TP-GF40 ürünlerinin SEM görüntülerine bakıldığında burada kullanılan iletken dolgu malzemesi grafitin tabakalı yapısı açıkça görülmektedir. Bu tabakaların kompozit içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı ve bunun yanında yine bu dolguların da birbirleriyle temas halinde olduğu gözlemlenmiştir.

Kompozitlere uygulanan çekme testleri sonucunda elde edilen elastik modül, çekme mukavemeti ve kopma uzaması değerlerine bakıldığında, esnek ve uzaması yüksek bir polimer olan TPU içerisine dahil edilen sert karbon esaslı dolguların, kompozit malzemelerde modülü artırırken kopma uzaması değerlerinde düşüş olmasına neden olduğu görülmektedir. Bu durum beklenen bir sonuçtur. Polimer matris içerisine eklenen bu dolgular kompozitin daha sert ve kırılkan olmasına neden olmuştur. En yüksek elastik modül beklenildiği gibi TP-CF(6)20 kompozitinde görülmüştür. Bunun

nedeni kompozitte kullanılan elyaf uzunluğunun çok yüksek olmasıdır. Matris içerisine dahil edilen böylesine büyük dolgu malzemesi polimerin bazı mekanik özelliklerinde düşüşe neden olmuştur örneğin en yüksek modül değerine sahip TP-CF(6) serisi aynı zamanda en düşük uzama değerlerine sahiptir. Sonuç olarak çekme testi verilerine göre tüm kompozit serileri için dolgu oranı artışıyla elastik modül artarken uzama değerleri düşmüştür. Ayrıca TP-GF kompozit serisi en düşük elastik modül ve en iyi uzama sonuçlarını vermiştir.

Ürün serilerinin sertlik sonuçları ise çekme testi sonuçlarını destekler niteliktedir. Dolgu oranının artışıyla kompozitlerde sertlik artışı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca tahmin edildiği gibi TP-CF(6) ürünün serisi en yüksek sertlik değerlerine sahiptir. Bunun tersi olarak grafit dolgulu TP-GF ürün serisi grafitin sahip olduğu tabakalı yapı ve yağlayıcı etkisi nedeniyle en düşük sertliğe sahip ürün serisi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sonuç esnek gerinim sensörü oluşturulmasında önemli bir etkidir.

Hazırlanan karbon dolgulu kompozitlerin iletkenlik özelliklerine bakıldığında tüm ürün serileri için dolgu oranı artışıyla iletkenliğin arttığı görülmüştür. Dolgu oranı artışıyla SEM görüntülerinde de görüldüğü gibi iletken dolgu maddeleri birbirlerine temas ederek elektronların hareketi için bir yol oluşturur. Hazırlanan kompozitlerde, farklı geometri ve boyutlara sahip dolgular için, farklı dolgu oranlarında bu iletken ağı oluşturduğu görülmüştür. Örneğin iki farklı uzunluktaki karbon elyaf ile hazırlanan kompozitler için 6 mm uzunluktaki karbon elyaf ile hazırlanan kompozitin 150 mikron uzunluğundaki karbon elyafla hazırlanan kompozitten daha düşük dolgu oranında bu iletken ağı oluşturabildiği gözlemlenmiştir. TP-CF(6) ürün serisinde, %20 dolgu oranında yaklaşık 10^2 S/m iletkenlik seviyesine ulaşılmışken, aynı dolgu oranında TP-CF(150) sersinde iletkenlik değerinin 10^{-1} S/m'den biraz yüksek olduğu görülmüştür. Burda dolgu boyutunun iletkenlik üzerindeki etkisi tespit edilmiştir. Bunu yanında tabakalı yapıdaki grafit ile hazırlanan kompozitlerde ise her iki karbon elyaf ile hazırlanan kompozitlerden iletkenliğinin daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca yine grafit ile hazırlanan kompozitlerde iletken bir yol oluşturabilmek için karbon elyaflar ile hazırlanan kompozitlerden daha yüksek dolgu oranlarına çıkılması gerektiği gözlemlenmiştir. %20 grafit oranındaki iletkenlik değerine bakıldığında yaklaşık 10^{-7} S/m olduğu görülmektedir. Bu değer diğer dolgu maddeleriyle hazırlanan kompozitlerin ulaştığı iletkenlik seviyelerinden çok düşüktür.

Tez kapsamında hazırlanan iletken polimer kompozitlerin gerinim sensör duyarlılık özelliklerinin tayin edilmesi amacıyla örneklerin direnç-uzama davranışları incelenmiştir. Bu testler özellikle her ürün serisi için perkolasyon eşiğindeki dolgu içeriğine sahip kompozitlere uygulanmıştır. Perkolasyon noktasında iletken kompozitlerin gerinim duyarlılığı en iyi durumdadır. TP-CF(6) ürün serisi bu testler için uzama açısından geride kalmıştır. Bu durum çekme testi sonuçlarında da görülmektedir. Bu ürün serisiyle esnek bir gerinim duyarlı sensör hazırlamak, uzama özellikleri tarafından kısıtlanmaktadır. Diğer dolgu malzemeleri ile hazırlanan iletken polimer kompozitlere uygulanan bu test sonucunda genel olarak tüm numuneler için uzamayla birlikte direncin arttığı görülmüştür. Özellikle TP-CF(150) ürün serisi için dolgu oranındaki küçük bir değişiklikte bile gerinim duyarlılık hassasiyetinin arttığı görülmüştür. Bu değerlendirmeye göre karbon elyaf oranının azalmasıyla duyarlılığın arttığı söylenebilir. Bunun nedeni daha önce de belirtildiği gibi dolgu oranında perkolasyon eşiğine yaklaştıkça duyarlılığın arttığı düşünülmektedir. Bunun yanında bir diğer dolgu maddesi olan grafit ile hazırlanan kompozitin direnç-gerinim sonuçları değerlendirildiğinde, bu kompozitin sahip olduğu iletken ağırlık %20 gibi küçük bir uzamada tamamen yok olduğu görülmektedir. Bu sonuçla birlikte TP-GF40 kompozitinin en iyi gerinim duyarlılığına sahip olduğu söylenebilir.

Farklı dolgu oranları ve farklı karbon esaslı dolgu tipleriyle hazırlanan kompozitlerin ϵ' ve ϵ'' değerlerinin 8-12 GHz frekans aralığındaki değişimi ayrıca değerlendirilmiştir. Test sonuçlarına göre, tüm ürün serileri için dolgu oranı artışıyla ϵ' değerinin arttığı görülmektedir. Bu durumda kompozit içerisindeki iletken dolgu miktarının artışıyla depolanan yükün arttığını görmekteyiz. Örneklerin ϵ' değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimi değerlendirildiğinde ise, bütün ürünler için 8-12 GHz frekans aralığında belirgin bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Fakat özellikle karbon elyaf kullanılarak hazırlanan ürün serilerinde yüksek dolgu oranlarında frekans artışıyla ϵ' değerinde düşüşler dikkat çekmiştir. Farklı geometri ve boyutlardaki dolguların ϵ' değerine etkisi değerlendirildiğinde, belirli bir frekans aralığında kompozit tarafından depolanan enerji sıralamasının TP-CF(6)20 > TP-CF(150)20 > TP-GF20 şeklinde olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçla özellikle dolgu boyutunun ϵ' değerinin üzerindeki etkisi görülmektedir. 6 mm uzunluğundaki karbon elyaf ile hazırlanan kompozitlerin elektriksel yükü daha iyi depoladığı gözlemlenmiştir. Kompozitlerin frekansa bağlı olarak ϵ'' değerlerinin değişimi incelendiğinde ise, yine aynı şekilde dolgu oranı

artışıyla bu değerin de arttığı görülmüştür. Farklı dolgulara göre ε'' değerinin değerlendirmesi ise ε' değeriyle aynı sıralama karşımıza çıkmaktadır: TP-CF(6)20 > TP-CF(150)20 > TP-GF20.

Kompozitlerin elektromanyetik dalga kalkanlama özellikleri incelendiğinde kalınlık artışıyla tüm dolgu tiplerinde ve oranlarında SE_A değerlerinin arttığı görülmüştür. Dolgu tiplerinin kendi içerisinde değerlendirilmesi yapıldığında: tüm ürün serilerinde kalınlık ve dolgu oranı artışıyla SE_A değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Ürün serilerinin birbirleriyle karşılaştırılması amacıyla SE_A değerlerine bakıldığında: TP-CF(6)20 > TP-CF(150)20 > TP-GF20 gibi bir sıralama oluşmaktadır. Bu sıralamanın elektriksel iletkenlikle orantılı olduğu dikkat çekmektedir. Bu durumda iletkenlik testlerinde en yüksek değerlere sahip TP-CF(6) ürün serisinin, en yüksek SE_A değerine sahip olduğu görülmüştür. Ürün serileri için artan dolgu oranı ve frekansa göre SE_R değerlerinin değişimlerine bakıldığında beklenildiği gibi tüm dolgu türleri için, artan dolgu oranıyla SE_R değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Artan frekansla ise bazı dolgu oranlarında küçük de olsa SE_R değerlerinde bir azalma tespit edilmiştir. Dolgu tiplerine göre bir karşılaştırma yapıldığında ise en yüksek SE_R değerine TP-CF(6)'nın, en düşük SE_R değerine ise TP-GF ürün serisinin sahip olduğu tespit edilmiştir.

SE_A ve SE_R değerlerinin toplamı olan SE_T 'nin farklı kalınlık ve dolgu oranlarında frekansa bağlı olarak değişimi de değerlendirilmiştir. Bu sonuçlara göre tüm ürün serilerinde artan kalınlık ve dolgu oranıyla bu değerin arttığı görülmüştür. Bu değerin değişiminin değerlendirilmesi amacıyla kompozit serileri arasında bir karşılaştırma yapıldığında; 10-10.5 GHz frekans aralığında, TP-CF(6)20'nin yaklaşık 120 dB, TP-CF(150)40'ın yaklaşık 120 dB ve TP-GF40 kompozitinin yaklaşık 25 dB SE_T değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda TP-CF(150) ürün serisinde dolgu oranı, TP-CF(6) ürün serisine göre 2 katına çıkarıldığında elektromanyetik dalga kalkanlama özelliklerinde yaklaşık olarak aynı etkinlik sağlanabileceğini söyleyebiliriz. TP-GF ürün serisi ise bu özelliklerin değerlendirmesinde, dolgu oranı ve kalınlık artışı söz konusu olduğunda diğer ürün serileri ile aynı davranışı sergilemesine rağmen, elektromanyetik dalga kalkanlama etkinliğinin değerlendirilmesinde diğer ürün serilerinden çok geride olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak tüm analizler değerlendirildiğinde TP-CF(6) ürün serisi en iyi iletkenlik ve elektromanyetik dalga kalkanlama özelliklerine sahip olmasına rağmen, uzama ve

esnek gerinim sensör özellikleri açısından geride kalmaktadır. TP-GF ürün serisi ise esnek gerinim sensörleri için çok iyi gerinim duyarlılık ve esneklik özelliklerine sahip olmasının yanı sıra elektromanyetik dalga kalkanlama özelliklerinde çok geride kalmıştır. Bir başka kompozit serisi olan TP-CF(150) ise iletkenlik özellikleri açısından TP-CF(6) serisinden geride fakat TP-GF serisinden öndedir. Bu kompozitler sertlik olarak da diğer iki ürün serilerinin arasında sonuçlar vermiştir. Ayrıca TP-CF(150)35 kompoziti, gerinim duyarlılığı açısından değerlendirildiğinde, TP-GF40 ürünü kadar yüksek duyarlılığa sahip olmamasına rağmen kabul edilebilir duyarlılık sonuçları vermiştir. Bunların yanında TP-CF(150)40 kompozitinin, TP-CF(6)20 kompoziti ile neredeyse aynı elektromanyetik dalga kalkanlama özelliklerine sahip olduğu görülmüştür.

Böylece bu tez sonucunda TP-CF(150) kompozit serisininin %35 ve %40 dolgu oranlarında hazırlanan örneklerinin elektromanyetik dalga kalkanlama özelliğine sahip esnek gerinim sensör malzemesi geliştirilmesinde tercih edilebilir olması sonucuna varılmıştır.



KAYNAKLAR

- [1] Y. F. Zhao, M. Xiao, S. J. Wang, X. C. Ge, and Y. Z. Meng, "Preparation and properties of electrically conductive PPS/expanded graphite nanocomposites," *Compos Sci Technol*, vol. 67, no. 11–12, pp. 2528–2534, Sep. 2007, doi: 10.1016/j.compscitech.2006.12.009.
- [2] K. Dai, X. Bin Xu, and Z. M. Li, "Electrically conductive carbon black (CB) filled in situ microfibrillar poly(ethylene terephthalate) (PET)/polyethylene (PE) composite with a selective CB distribution," *Polymer (Guildf)*, vol. 48, no. 3, pp. 849–859, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.polymer.2006.12.026.
- [3] V. H. Pham, T. T. Dang, S. H. Hur, E. J. Kim, and J. S. Chung, "Highly conductive poly(methyl methacrylate) (PMMA)-reduced graphene oxide composite prepared by self-assembly of PMMA latex and graphene oxide through electrostatic interaction," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 4, no. 5, pp. 2630–2636, May 2012, doi: 10.1021/am300297j.
- [4] S. L. Gao, R. C. Zhuang, J. Zhang, J. W. Liu, and E. Mäder, "Class fibers with carbon nanotube networks as multifunctional sensors," *Adv Funct Mater*, vol. 20, no. 12, pp. 1885–1893, Jun. 2010, doi: 10.1002/adfm.201000283.
- [5] K. Cherenack, C. Zysset, T. Kinkeldei, N. Münzenrieder, and G. Tröster, "Woven electronic fibers with sensing and display functions for smart textiles," *Advanced Materials*, vol. 22, no. 45, pp. 5178–5182, Dec. 2010, doi: 10.1002/adma.201002159.
- [6] S. Yao and Y. Zhu, "Wearable multifunctional sensors using printed stretchable conductors made of silver nanowires," *Nanoscale*, vol. 6, no. 4, pp. 2345–2352, Feb. 2014, doi: 10.1039/c3nr05496a.
- [7] V. Eswaraiah, K. Balasubramaniam, and S. Ramaprabhu, "Functionalized graphene reinforced thermoplastic nanocomposites as strain sensors in structural health monitoring," *J Mater Chem*, vol. 21, no. 34, pp. 12626–12628, Sep. 2011, doi: 10.1039/c1jm12302e.
- [8] V. Eswaraiah, K. Balasubramaniam, and S. Ramaprabhu, "One-pot synthesis of conducting graphene-polymer composites and their strain sensing application," *Nanoscale*, vol. 4, no. 4, pp. 1258–1262, Feb. 2012, doi: 10.1039/c2nr11555g.
- [9] J. Zhong *et al.*, "Fiber-based generator for wearable electronics and mobile medication," *ACS Nano*, vol. 8, no. 6, pp. 6273–6280, Jun. 2014, doi: 10.1021/nn501732z.
- [10] T. Sekitani, Y. Noguchi, K. Hata, T. Fukushima, T. Aida, and T. Someya, "A rubberlike stretchable active matrix using elastic conductors," *Science (1979)*, vol. 321, no. 5895, pp. 1468–1472, Sep. 2008, doi: 10.1126/science.1160309.
- [11] C. Cattin and P. Hubert, "Piezoresistance in polymer nanocomposites with high aspect ratio particles," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 6, no. 3, pp. 1804–1811, Feb. 2014, doi: 10.1021/am404808u.

- [12] Z. M. Dang, M. J. Jiang, D. Xie, S. H. Yao, L. Q. Zhang, and J. Bai, "Supersensitive linear piezoresistive property in carbon nanotube/silicone rubber nanocomposites," *J Appl Phys*, vol. 104, no. 2, 2008, doi: 10.1063/1.2956605.
- [13] L. Lin *et al.*, "Modified resistivity-strain behavior through the incorporation of metallic particles in conductive polymer composite fibers containing carbon nanotubes," *Polym Int*, vol. 62, no. 1, pp. 134–140, 2013, doi: 10.1002/pi.4291.
- [14] J. Hwang *et al.*, "Poly(3-hexylthiophene) wrapped carbon nanotube/poly(dimethylsiloxane) composites for use in finger-sensing piezoresistive pressure sensors," *Carbon N Y*, vol. 49, no. 1, pp. 106–110, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.carbon.2010.08.048.
- [15] M. Ji, H. Deng, D. Yan, X. Li, L. Duan, and Q. Fu, "Selective localization of multi-walled carbon nanotubes in thermoplastic elastomer blends: An effective method for tunable resistivity-strain sensing behavior," *Compos Sci Technol*, vol. 92, pp. 16–26, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.compscitech.2013.11.018.
- [16] C. Su, L. Xu, C. Zhang, and J. Zhu, "Selective location and conductive network formation of multiwalled carbon nanotubes in polycarbonate/poly(vinylidene fluoride) blends," *Compos Sci Technol*, vol. 71, no. 7, pp. 1016–1021, May 2011, doi: 10.1016/j.compscitech.2011.03.012.
- [17] L. Lin *et al.*, "Towards tunable sensitivity of electrical property to strain for conductive polymer composites based on thermoplastic elastomer," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 5, no. 12, pp. 5815–5824, Jun. 2013, doi: 10.1021/am401402x.
- [18] H. Deng, L. Lin, M. Ji, S. Zhang, M. Yang, and Q. Fu, "Progress on the morphological control of conductive network in conductive polymer composites and the use as electroactive multifunctional materials," *Progress in Polymer Science*, vol. 39, no. 4. Elsevier Ltd, pp. 627–655, 2014. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2013.07.007.
- [19] Y. Hou, D. Wang, X. M. Zhang, H. Zhao, J. W. Zha, and Z. M. Dang, "Positive piezoresistive behavior of electrically conductive alkyl-functionalized graphene/polydimethylsilicone nanocomposites," *J Mater Chem C Mater*, vol. 1, no. 3, pp. 515–521, Jan. 2013, doi: 10.1039/c2tc00114d.
- [20] L. Lin, S. Liu, S. Fu, S. Zhang, H. Deng, and Q. Fu, "Fabrication of highly stretchable conductors via morphological control of carbon nanotube network," *Small*, vol. 9, no. 21, pp. 3620–3629, Nov. 2013, doi: 10.1002/sml.201202306.
- [21] G. Kettlgruber *et al.*, "Intrinsically stretchable and rechargeable batteries for self-powered stretchable electronics," *J Mater Chem A Mater*, vol. 1, no. 18, pp. 5505–5508, May 2013, doi: 10.1039/c3ta00019b.
- [22] E. T. Thostenson and T. W. Chou, "Real-time in situ sensing of damage evolution in advanced fiber composites using carbon nanotube networks,"

- Nanotechnology*, vol. 19, no. 21, May 2008, doi: 10.1088/0957-4484/19/21/215713.
- [23] H. Li, Z. Kang, Y. Liu, and S. T. Lee, "Carbon nanodots: Synthesis, properties and applications," *J Mater Chem*, vol. 22, no. 46, pp. 24230–24253, Dec. 2012, doi: 10.1039/c2jm34690g.
 - [24] D. Kang *et al.*, "Ultrasensitive mechanical crack-based sensor inspired by the spider sensory system," *Nature*, vol. 516, no. 7530, pp. 222–226, Dec. 2014, doi: 10.1038/nature14002.
 - [25] S. Zhang *et al.*, "Dynamic percolation in highly oriented conductive networks formed with different carbon nanofillers," *Colloid Polym Sci*, vol. 290, no. 14, pp. 1393–1401, Sep. 2012, doi: 10.1007/s00396-012-2661-7.
 - [26] L. Flandin, Y. Br  chet, and J.-Y. Cavaille  , "Electrically conductive polymer nanocomposites as deformation sensors." [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/compscitech
 - [27] R. Zhang, M. Baxendale, and T. Peijs, "Universal resistivity-strain dependence of carbon nanotube/polymer composites," *Phys Rev B Condens Matter Mater Phys*, vol. 76, no. 19, Nov. 2007, doi: 10.1103/PhysRevB.76.195433.
 - [28] H. Deng *et al.*, "Preparation of high-performance conductive polymer fibers through morphological control of networks formed by nanofillers," *Adv Funct Mater*, vol. 20, no. 9, pp. 1424–1432, May 2010, doi: 10.1002/adfm.200902207.
 - [29] S. Shang, W. Zeng, and X. M. Tao, "High stretchable MWNTs/polyurethane conductive nanocomposites," *J Mater Chem*, vol. 21, no. 20, pp. 7274–7280, May 2011, doi: 10.1039/c1jm10255a.
 - [30] M. S  nmez, *  stanbul Teknik   niversitesi, Fen Bilimleri End  stit  s  , Y  ksek Lisans Tezi*, vol. 42–45, 2009.
 - [31] N. L. Hancox, *Engineering mechanics of composite materials*, vol. 17, no. 2. 1996. doi: 10.1016/s0261-3069(97)87195-6.
 - [32] S. Van Hoa and P. Hubert, "eProceedings by : Electronic Publishing BytePress . com," *19th International Conference on Composite Materials*, 2013.
 - [33] N. L. Hancox, *Engineering mechanics of composite materials*, vol. 17, no. 2. 1996. doi: 10.1016/s0261-3069(97)87195-6.
 - [34] S. GUL, "EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF MECHANICAL EFFECT OF EXTERNALLY WEAK LAYERS IN THICK HYBRID COMPOSITES," *Submitted to the Faculty of Engineering and Natural Sciences in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science*, 2019.

- [35] L. Liu *et al.*, “Interfacial characterization, control and modification of carbon fiber reinforced polymer composites,” *Compos Sci Technol*, vol. 121, pp. 56–72, 2015, doi: 10.1016/j.compscitech.2015.08.002.
- [36] G. Naveen Kumar and C. Suresh Kumar, “Effect of the mechanical properties on polymer hybrid nanocomposites reinforced in epoxy,” *Mater Today Proc*, vol. 19, no. xxxx, pp. 277–282, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.07.208.
- [37] J. Vižintin, M. Kalin, K. Dohda, and S. Jahanmir, “Friction and Wear of Polymers and Composites,” *Tribology of Mechanical Systems*, no. July 2015, pp. 239–265, 2010, doi: 10.1115/1.802094.ch13.
- [38] M. Raghavedra, S. Hussain, V. Pandurangadu, and K. PalaniKumar, “Modeling and Analysis of Laminated Composite Leaf Spring under the Static Load Condition by using FEA,” *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, vol. 2, no. 4, pp. 1875–1879, 2012.
- [39] D. B. Miracle *et al.*, “ASM handbook,” vol. 21, p. 3470, 2001.
- [40] F. C. Campbell, *Manufacturing Process for Advanced Composites*. 2014. doi: 10.1007/s13398-014-0173-7.2.
- [41] M. Garg, S. Sharma, and R. Mehta, “Pristine and amino functionalized carbon nanotubes reinforced glass fiber epoxy composites,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 76, pp. 92–101, 2015, doi: 10.1016/j.compositesa.2015.05.012.
- [42] R. O. Ochola, K. Marcus, G. N. Nurick, and T. Franz, “Mechanical behaviour of glass and carbon fibre reinforced composites at varying strain rates,” *Compos Struct*, vol. 63, no. 3–4, pp. 455–467, Feb. 2004, doi: 10.1016/S0263-8223(03)00194-6.
- [43] S. Ibraheem and S. Bandyopadhyay, *A review of the structure-property research on hybrid-reinforced polymer composites*. Elsevier Ltd, 2017. doi: 10.1016/B978-0-08-100791-4.00007-0.
- [44] M. , Z. M. , & S. A. Narkis, “On the" curiosity" of electrically conductive melt processed doped-polyaniline/polymer blends versus carbon-black/polymer compounds,” *Polym Adv Technol*, pp. 525–528, 1997.
- [45] R. M. Scarisbrick, “Electrically conducting mixtures,” *J Phys D Appl Phys*, vol. 6, no. 17, p. 2098, Nov. 1973, doi: 10.1088/0022-3727/6/17/316.
- [46] A. Y. Xiao, Q. K. Tong, A. C. Savoca, and H. Van Oosten, “Conductive ink for through hole application,” *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, vol. 24, no. 3, pp. 445–449, Sep. 2001, doi: 10.1109/6144.946492.
- [47] S. De and J. White, “Short fibre-polymer composites,” 1996, Accessed: Dec. 15, 2023.

- [48] W. Thongruang, R. J. Spontak, and C. M. Balik, "Bridged double percolation in conductive polymer composites: an electrical conductivity, morphology and mechanical property study," *Polymer (Guildf)*, vol. 43, no. 13, pp. 3717–3725, Jun. 2002, doi: 10.1016/S0032-3861(02)00180-5.
- [49] J. F. Feller, P. Chauvelon, I. Linossier, and P. Glouannec, "Characterization of electrical and thermal properties of extruded tapes of thermoplastic conductive polymer composites (CPC)," *Polym Test*, vol. 22, no. 7, pp. 831–837, Oct. 2003, doi: 10.1016/S0142-9418(03)00020-5.
- [50] J. F. Feller, I. Linossier, and Y. Grohens, "Conductive polymer composites: comparative study of poly(ester)-short carbon fibres and poly(epoxy)-short carbon fibres mechanical and electrical properties," *Mater Lett*, vol. 57, no. 1, pp. 64–71, Nov. 2002, doi: 10.1016/S0167-577X(02)00700-0.
- [51] Chen Hui, H. B. Liu, J. X. Li, Yang Li, and Y. De He, "Characteristics and Preparation of Polymer/Graphite Composite Bipolar Plate for PEM Fuel Cells," <http://dx.doi.org/10.1177/0021998308101295>, vol. 43, no. 7, pp. 755–767, Mar. 2009, doi: 10.1177/0021998308101295.
- [52] S. Chunhui, P. Mu, Y. Qin, and Y. Runzhang, "Studies on Preparation and Performance of Sodium Silicate/Graphite Conductive Composites," <http://dx.doi.org/10.1177/0021998306061296>, vol. 40, no. 9, pp. 839–848, May 2006, doi: 10.1177/0021998306061296.
- [53] J. A. King, M. D. Via, J. M. Keith, and F. A. Morrison, "Effects of Carbon Fillers on Rheology of Polypropylene-based Resins," <http://dx.doi.org/10.1177/0021998309345335>, vol. 43, no. 25, pp. 3073–3089, Aug. 2009, doi: 10.1177/0021998309345335.
- [54] R. Dweiri and J. Sahari, "Electrical properties of carbon-based polypropylene composites for bipolar plates in polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC)," *J Power Sources*, vol. 171, no. 2, pp. 424–432, Sep. 2007, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2007.05.106.
- [55] E. Petrach, I. Abu-Isa, and X. Wang, "Percolation threshold study of a plastic–elastomeric matrix based composite material for bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells," <http://dx.doi.org/10.1177/0021998311434792>, vol. 46, no. 23, pp. 2959–2971, Jan. 2012, doi: 10.1177/0021998311434792.
- [56] Y. A. Balogun and R. C. Buchanan, "Enhanced percolative properties from partial solubility dispersion of filler phase in conducting polymer composites (CPCs)," *Compos Sci Technol*, vol. 70, no. 6, pp. 892–900, Jun. 2010, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2010.01.009.
- [57] R. Taherian, M. J. Hadianfard, and A. N. Golikand, "A new equation for predicting electrical conductivity of carbon-filled polymer composites used for bipolar plates of fuel cells," *J Appl Polym Sci*, vol. 128, no. 3, pp. 1497–1509, May 2013, doi: 10.1002/APP.38295.

- [58] R. Dweiri and J. Sahari, "RETRACTED: Microstructural image analysis and structure–electrical conductivity relationship of single- and multiple-filler conductive composites," *Compos Sci Technol*, vol. 68, no. 7–8, pp. 1679–1687, Jun. 2008, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2008.02.006.
- [59] I. Balberg, "A comprehensive picture of the electrical phenomena in carbon black–polymer composites," *Carbon N Y*, vol. 40, no. 2, pp. 139–143, Feb. 2002, doi: 10.1016/S0008-6223(01)00164-6.
- [60] W. Z. Cai, S. T. Tu, and J. M. Gong, "A Physically Based Percolation Model of the Effective Electrical Conductivity of Particle Filled Composites," <http://dx.doi.org/10.1177/0021998306062312>, vol. 40, no. 23, pp. 2131–2142, Dec. 2006, doi: 10.1177/0021998306062312.
- [61] R. D. Chippendale and I. O. Golosnoy, "Percolation effects in electrical conductivity of carbon fibre composites," *IET Conference Publications*, vol. 2011, no. 577 CP, pp. 186–187, 2011, doi: 10.1049/CP.2011.0094.
- [62] A. V. Goncharenko and E. F. Venger, "Percolation threshold for Bruggeman composites," *Phys Rev E Stat Phys Plasmas Fluids Relat Interdiscip Topics*, vol. 70, no. 5, p. 4, Nov. 2004, doi: 10.1103/PHYSREVE.70.057102/FIGURES/2/MEDIUM.
- [63] Y. R. Hernandez *et al.*, "Comparison of carbon nanotubes and nanodisks as percolative fillers in electrically conductive composites," *Scr Mater*, vol. 58, no. 1, pp. 69–72, Jan. 2008, doi: 10.1016/J.SCRIPTAMAT.2007.08.025.
- [64] B. K. Kakati, V. K. Yamsani, K. S. Dhathathreyan, D. Sathiyamoorthy, and A. Verma, "The electrical conductivity of a composite bipolar plate for fuel cell applications," *Carbon N Y*, vol. 47, no. 10, pp. 2413–2418, Aug. 2009, doi: 10.1016/J.CARBON.2009.04.034.
- [65] J. M. Keith, J. A. King, and R. L. Barton, "Electrical conductivity modeling of carbon-filled liquid-crystalline polymer composites," *J Appl Polym Sci*, vol. 102, no. 4, pp. 3293–3300, Nov. 2006, doi: 10.1002/APP.24748.
- [66] Y. P. Mamunya, V. V. Davydenko, P. Pissis, and E. V. Lebedev, "Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders," *Eur Polym J*, vol. 38, no. 9, pp. 1887–1897, Sep. 2002, doi: 10.1016/S0014-3057(02)00064-2.
- [67] A. Merzouki, N. Haddaoui, A. Uygun, and J. I. Velasco, "Electrical Conductivity Modeling of Polypropylene Composites Filled with Carbon Black and Acetylene Black," *International Scholarly Research Network ISRN Polymer Science*, vol. 2012, 2012, doi: 10.5402/2012/493065.
- [68] N. J. S. Sohi, S. Bhadra, and D. Khastgir, "The effect of different carbon fillers on the electrical conductivity of ethylene vinyl acetate copolymer-based composites and the applicability of different conductivity models," *Carbon N Y*, vol. 49, no. 4, pp. 1349–1361, Apr. 2011, doi: 10.1016/J.CARBON.2010.12.001.

- [69] D. Chung, "Composite materials: science and applications," 2010, Accessed: Jan. 05, 2024.
- [70] G. Kaur, R. Adhikari, P. Cass, M. Bown, and P. Gunatillake, "Electrically conductive polymers and composites for biomedical applications," *RSC Adv*, vol. 5, no. 47, pp. 37553–37567, Apr. 2015, doi: 10.1039/C5RA01851J.
- [71] I. A. Tsekmes, R. Kochetov, P. H. F. Morshuis, and J. J. Smit, "Thermal conductivity of polymeric composites: A review," *Proceedings of IEEE International Conference on Solid Dielectrics, ICSD*, pp. 678–681, 2013, doi: 10.1109/ICSD.2013.6619698.
- [72] T. J. Fiske, H. S. Gokturk, and D. M. Kalyon, "Percolation in magnetic composites," *J Mater Sci*, vol. 32, no. 20, pp. 5551–5560, 1997, doi: 10.1023/A:1018620407013/METRICS.
- [73] 048,919 KA McCullough - US Patent 6 and undefined 2000, "Thermally conductive composite material," *Google Patents*, 2000, Accessed: Jan. 05, 2024.
- [74] R. Clough and A. Sylwester, "Electrically conductive composite material," 1989, Accessed: Jan. 05, 2024.
- [75] S. Peters, "Handbook of composites," 2013, Accessed: Jan. 05, 2024.
- [76] E. P. Mamunya, V. V. Davidenko, and E. V. Lebedev, "Effect of polymer-filler interface interactions on percolation conductivity of thermoplastics filled with carbon black," *Compos Interfaces*, vol. 4, no. 4, pp. 169–176, 1996, doi: 10.1163/156855497X00145.
- [77] M. Ashby and K. Johnson, "Materials and design: the art and science of material selection in product design," 2013, Accessed: Jan. 05, 2024.
- [78] G. R. Ruschau, S. Yoshikawa, and R. E. Newnham, "Resistivities of conductive composites," *J Appl Phys*, vol. 72, no. 3, pp. 953–959, Aug. 1992, doi: 10.1063/1.352350.
- [79] F. Campbell, "Structural composite materials," 2010, Accessed: Jan. 05, 2024.
- [80] H. S. Göktürk, T. J. Fiske, and D. M. Kalyon, "Effects of particle shape and size distributions on the electrical and magnetic properties of nickel/polyethylene composites," *J Appl Polym Sci*, vol. 50, no. 11, pp. 1891–1901, Dec. 1993, doi: 10.1002/APP.1993.070501105.
- [81] K. Kalaitzidou, H. Fukushima, and L. T. Drzal, "A new compounding method for exfoliated graphite–polypropylene nanocomposites with enhanced flexural properties and lower percolation threshold," *Compos Sci Technol*, vol. 67, no. 10, pp. 2045–2051, Aug. 2007, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2006.11.014.

- [82] J. Y. Yi and G. M. Choi, "Percolation behavior of conductor-insulator composites with varying aspect ratio of conductive fiber," *J Electroceram*, vol. 3, no. 4, pp. 361–369, 1999, doi: 10.1023/A:1009913913732/METRICS.
- [83] S. G. Advani and C. L. Tucker, "The Use of Tensors to Describe and Predict Fiber Orientation in Short Fiber Composites," *J Rheol (N Y N Y)*, vol. 31, no. 8, pp. 751–784, Nov. 1987, doi: 10.1122/1.549945.
- [84] K. Nagata, H. Iwabuki, and H. Nigo, "Effect of particle size of graphites on electrical conductivity of graphite/polymer composite," *Compos Interfaces*, vol. 6, no. 5, pp. 483–495, 1998, doi: 10.1163/156855499X00161.
- [85] Y. Yin, T. J. Mays, and B. McEnaney, "The measurement of grain orientations in an extruded electrode graphite using image analysis," *Carbon N Y*, vol. 27, no. 1, pp. 113–115, Jan. 1989, doi: 10.1016/0008-6223(89)90163-2.
- [86] S. Stankovich *et al.*, "Graphene-based composite materials," *Nature* 2006 442:7100, vol. 442, no. 7100, pp. 282–286, Jul. 2006, doi: 10.1038/nature04969.
- [87] H. Deng, L. Lin, M. Ji, S. Zhang, M. Yang, and Q. Fu, "Progress on the morphological control of conductive network in conductive polymer composites and the use as electroactive multifunctional materials," *Prog Polym Sci*, vol. 39, no. 4, pp. 627–655, Apr. 2014, doi: 10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2013.07.007.
- [88] M. H. Al-Saleh and U. Sundararaj, "A review of vapor grown carbon nanofiber/polymer conductive composites," *Carbon N Y*, vol. 47, no. 1, pp. 2–22, Jan. 2009, doi: 10.1016/J.CARBON.2008.09.039.
- [89] J. Tiisanen, D. Vlasveld, and J. Vuorinen, "Review on the effects of injection moulding parameters on the electrical resistivity of carbon nanotube filled polymer parts," *Compos Sci Technol*, vol. 72, no. 14, pp. 1741–1752, Sep. 2012, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2012.07.009.
- [90] G. Mechrez *et al.*, "Highly-tunable polymer/carbon nanotubes systems: Preserving dispersion architecture in solid composites via rapid microfiltration," *ACS Macro Lett*, vol. 1, no. 7, pp. 848–852, Jul. 2012, doi: 10.1021/MZ300145A/SUPPL_FILE/MZ300145A_SI_001.PDF.
- [91] H. Pang, L. Xu, D. X. Yan, and Z. M. Li, "Conductive polymer composites with segregated structures," *Prog Polym Sci*, vol. 39, no. 11, pp. 1908–1933, Nov. 2014, doi: 10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2014.07.007.
- [92] R. A. Antunes, M. C. L. De Oliveira, G. Ett, and V. Ett, "Carbon materials in composite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells: A review of the main challenges to improve electrical performance," *J Power Sources*, vol. 196, no. 6, pp. 2945–2961, Mar. 2011, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2010.12.041.

- [93] P. C. Ma, N. A. Siddiqui, G. Marom, and J. K. Kim, "Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 41, no. 10, pp. 1345–1367, Oct. 2010, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2010.07.003.
- [94] T. Villmow, S. Pegel, A. John, R. Rentenberger, and P. Pötschke, "Liquid sensing: smart polymer/CNT composites," *Materials Today*, vol. 14, no. 7–8, pp. 340–345, Jul. 2011, doi: 10.1016/S1369-7021(11)70164-X.
- [95] H. Liu *et al.*, "Electrically conductive thermoplastic elastomer nanocomposites at ultralow graphene loading levels for strain sensor applications," *J Mater Chem C Mater*, vol. 4, no. 1, pp. 157–166, Dec. 2015, doi: 10.1039/C5TC02751A.
- [96] H. Liu *et al.*, "Electrically conductive strain sensing polyurethane nanocomposites with synergistic carbon nanotubes and graphene bifillers," *Nanoscale*, vol. 8, no. 26, pp. 12977–12989, Jun. 2016, doi: 10.1039/C6NR02216B.
- [97] W. Zhao, J. Kong, H. Liu, Q. Zhuang, J. Gu, and Z. Guo, "Ultra-high thermally conductive and rapid heat responsive poly(benzobisoxazole) nanocomposites with self-aligned graphene," *Nanoscale*, vol. 8, no. 48, pp. 19984–19993, Dec. 2016, doi: 10.1039/C6NR06622D.
- [98] H. Liu *et al.*, "Lightweight conductive graphene/thermoplastic polyurethane foams with ultrahigh compressibility for piezoresistive sensing," *J Mater Chem C Mater*, vol. 5, no. 1, pp. 73–83, Dec. 2016, doi: 10.1039/C6TC03713E.
- [99] L. Xie and Y. Zhu, "Tune the phase morphology to design conductive polymer composites: A review," *Polymer Composites*, vol. 39, no. 9. John Wiley and Sons Inc., pp. 2985–2996, Sep. 01, 2018. doi: 10.1002/pc.24345.
- [100] A. Chaudhary, V. Gupta, S. Teotia, S. Nimanpure, and D. K. Rajak, "Electromagnetic Shielding Capabilities of Metal Matrix Composites," *Encyclopedia of Materials: Composites*, vol. 1, pp. 428–441, Jan. 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.11828-4.
- [101] R. Bacon, "Growth, Structure, and Properties of Graphite Whiskers," *J Appl Phys*, vol. 31, no. 2, pp. 283–290, Feb. 1960, doi: 10.1063/1.1735559.
- [102] I. R. Bacon, "Filamentary graphite and method for producing the same," vol. 18, no. 2, pp. 23–209, Mar. 1958.
- [103] D. D. Edie, "The effect of processing on the structure and properties of carbon fibers," *Carbon N Y*, vol. 36, no. 4, pp. 345–362, Jan. 1998, doi: 10.1016/S0008-6223(97)00185-1.
- [104] L. Qiu, X. H. Zheng, J. Zhu, G. P. Su, and D. W. Tang, "The effect of grain size on the lattice thermal conductivity of an individual polyacrylonitrile-based carbon fiber," *Carbon N Y*, vol. 51, no. 1, pp. 265–273, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.CARBON.2012.08.052.

- [105] S. Chand, "Carbon fibers for composites," *J Mater Sci*, vol. 35, no. 6, pp. 1303–1313, 2000, doi: 10.1023/A:1004780301489.
- [106] T. -Badogiannis, E. -Tsouvalis, N. Theodoros Hasiotis -Efstratios Badogiannis, and -Nicolaos Georgios Tsouvalis, "Application of Ultrasonic C-Scan Techniques for Tracing Defects in Laminated Composite Materials," *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, vol. 57, pp. 192–203, 2011, doi: 10.5545/sv-jme.2010.170.
- [107] D. , H. S. V. , & T. S. W. Gay, *Composite materials: Design and applications*. 2002.
- [108] D. D. L. Chung, "Review: Graphite," *J Mater Sci*, vol. 37, no. 8, pp. 1475–1489, Apr. 2002, doi: 10.1023/A:1014915307738.
- [109] D. D. L. Chung, "Exfoliation of graphite," *J Mater Sci*, vol. 22, no. 12, pp. 4190–4198, Dec. 1987, doi: 10.1007/BF01132008/METRICS.
- [110] J. W. Ayres, F. Lalande, Z. Chaudhry, and C. A. Rogers, "Qualitative impedance-based health monitoring of civil infrastructures," *Smart Mater Struct*, vol. 7, no. 5, p. 599, Oct. 1998, doi: 10.1088/0964-1726/7/5/004.
- [111] S. Bhalla and C. K. Soh, "Structural Health Monitoring by Piezo-Impedance Transducers. I: Modeling," *J Aerosp Eng*, vol. 17, no. 4, pp. 154–165, Oct. 2004, doi: 10.1061/(ASCE)0893-1321(2004)17:4(154).
- [112] S. Bhalla, Y. W. Yang, J. Zhao, and C. K. Soh, "Structural health monitoring of underground facilities – Technological issues and challenges," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 20, no. 5, pp. 487–500, Sep. 2005, doi: 10.1016/J.TUST.2005.03.003.
- [113] S. Bhalla and C. K. Soh, "Structural impedance based damage diagnosis by piezo-transducers," *Earthq Eng Struct Dyn*, vol. 32, no. 12, pp. 1897–1916, Oct. 2003, doi: 10.1002/EQE.307.
- [114] J. G. Da Silva, A. A. De Carvalho, and D. D. Da Silva, "A strain gauge tactile sensor for finger-mounted applications," *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 51, no. 1, pp. 18–22, 2002, doi: 10.1109/19.989890.
- [115] S. J. Kirkpatrick and M. J. Cipolla, "High resolution imaged laser speckle strain gauge for vascular applications," <https://doi.org/10.1117/1.429970>, vol. 5, no. 1, pp. 62–71, Jan. 2000, doi: 10.1117/1.429970.
- [116] M. C. Carrozza, A. Eisinger, A. Menciassi, D. Campolo, S. Micera, and P. Dario, "Towards a force-controlled microgripper for assembling biomedical microdevices," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 10, no. 2, p. 271, Jun. 2000, doi: 10.1088/0960-1317/10/2/328.
- [117] M. Bertrand, J. Meunier, M. Doucet, and G. Ferland, "Ultrasonic biomechanical strain gauge based on speckle tracking," pp. 859–863, Jan. 2003, doi: 10.1109/ULTSYM.1989.67110.

- [118] T. Maeno, T. Kawai, and K. Kobayashi, "Analysis and design of a tactile sensor detecting strain distribution inside an elastic finger," *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 3, pp. 1658–1663, 1998, doi: 10.1109/IROS.1998.724836.
- [119] P. S. Vijayalakshmi, A. S. Veereshi, V. P. Jayade, M. R. Dinesh, and M. Kumar, "Finite Element Analysis of Stress and Strain Distribution in the Bone around the Implants used for Orthodontic Anchorage," *J Indian Orthod Soc*, vol. 46, no. 4, pp. 175–182, doi: 10.5005/jp-journals-10021-1085.
- [120] A. R. Hashima, A. A. Young, A. D. McCulloch, and L. K. Waldman, "Nonhomogeneous analysis of epicardial strain distributions during acute myocardial ischemia in the dog," *J Biomech*, vol. 26, no. 1, pp. 19–35, Jan. 1993, doi: 10.1016/0021-9290(93)90610-Q.
- [121] S. Veerabagu, K. Fujihara, G. R. Dasari, and S. Ramakrishna, "Strain distribution analysis of braided composite bone plates," *Compos Sci Technol*, vol. 63, no. 3–4, pp. 427–435, Feb. 2003, doi: 10.1016/S0266-3538(02)00219-1.
- [122] A. Rodríguez, G. Olvera, P. Fodor, and R. Colás, "Strain distribution analysis of hot forged seamless pipe fittings," *Materials Science and Technology*, vol. 16, no. 2, pp. 171–174, 2000, doi: 10.1179/026708300101507668.
- [123] A. H. Aydilek, M. Guler, and T. B. Edil, "Use of Image Analysis in Determination of Strain Distribution During Geosynthetic Tensile Testing," *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 65–74, Jan. 2004, doi: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2004)18:1(65).
- [124] J. Park, I. You, S. Shin, and U. Jeong, "Material approaches to stretchable strain sensors," *ChemPhysChem*, vol. 16, no. 6. Wiley-VCH Verlag, pp. 1155–1163, Apr. 27, 2015. doi: 10.1002/cphc.201402810.
- [125] J. Chen *et al.*, "A simple strategy to achieve very low percolation threshold via the selective distribution of carbon nanotubes at the interface of polymer blends," *J Mater Chem*, vol. 22, no. 42, pp. 22398–22404, Oct. 2012, doi: 10.1039/C2JM34295B.
- [126] S. Zhang, H. Deng, Q. Zhang, and Q. Fu, "Formation of conductive networks with both segregated and double-percolated characteristic in conductive polymer composites with balanced properties," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 6, no. 9, pp. 6835–6844, May 2014, doi: 10.1021/AM500651V/SUPPL_FILE/AM500651V_SI_001.PDF.
- [127] K. Cheah, M. Forsyth, G. S.-J. of P. Science, and undefined 2000, "Processing and morphological development of carbon black filled conducting blends using a binary host of poly (styrene co-acrylonitrile) and poly (styrene)," *Wiley Online Library* K Cheah, M Forsyth, GP Simon *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2000•Wiley Online Library, Accessed: Feb. 05, 2024.

- [128] C. Mattmann, F. Clemens, and G. Tröster, “Sensor for Measuring Strain in Textile,” *Sensors* 2008, Vol. 8, Pages 3719-3732, vol. 8, no. 6, pp. 3719–3732, Jun. 2008, doi: 10.3390/S8063719.
- [129] J. Hwang *et al.*, “Poly(3-hexylthiophene) wrapped carbon nanotube/poly(dimethylsiloxane) composites for use in finger-sensing piezoresistive pressure sensors,” *Carbon N Y*, vol. 49, no. 1, pp. 106–110, Jan. 2011, doi: 10.1016/J.CARBON.2010.08.048.
- [130] P. Costa, A. Maceiras, M. San Sebastián, C. García-Astrain, J. L. Vilas, and S. Lanceros-Mendez, “On the use of surfactants for improving nanofiller dispersion and piezoresistive response in stretchable polymer composites,” *J Mater Chem C Mater*, vol. 6, no. 39, pp. 10580–10588, Oct. 2018, doi: 10.1039/C8TC03829E.
- [131] V. Eswaraiah, K. Balasubramaniam, and S. Ramaprabhu, “Functionalized graphene reinforced thermoplastic nanocomposites as strain sensors in structural health monitoring,” *J Mater Chem*, vol. 21, no. 34, pp. 12626–12628, Aug. 2011, doi: 10.1039/C1JM12302E.
- [132] Y. Hou, D. Wang, X. M. Zhang, H. Zhao, J. W. Zha, and Z. M. Dang, “Positive piezoresistive behavior of electrically conductive alkyl-functionalized graphene/polydimethylsilicone nanocomposites,” *J Mater Chem C Mater*, vol. 1, no. 3, pp. 515–521, Dec. 2012, doi: 10.1039/C2TC00114D.
- [133] K. Ke, P. Pötschke, N. Wiegand, B. Krause, and B. Voit, “Tuning the Network Structure in Poly(vinylidene fluoride)/Carbon Nanotube Nanocomposites Using Carbon Black: Toward Improvements of Conductivity and Piezoresistive Sensitivity,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 8, no. 22, pp. 14190–14199, Jun. 2016, doi: 10.1021/ACSAMI.6B03451/ASSET/IMAGES/MEDIUM/AM-2016-034519_0010.GIF.
- [134] T. S. Natarajan *et al.*, “Strong Strain Sensing Performance of Natural Rubber Nanocomposites,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 9, no. 5, pp. 4860–4872, Feb. 2017, doi: 10.1021/ACSAMI.6B13074/ASSET/IMAGES/MEDIUM/AM-2016-130749_0014.GIF.
- [135] J. Y. Oh, G. H. Jun, S. Jin, H. J. Ryu, and S. H. Hong, “Enhanced Electrical Networks of Stretchable Conductors with Small Fraction of Carbon Nanotube/Graphene Hybrid Fillers,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 8, no. 5, pp. 3319–3325, Feb. 2016, doi: 10.1021/ACSAMI.5B11205/SUPPL_FILE/AM5B11205_SI_001.PDF.
- [136] K. Ke, V. Solouki Bonab, D. Yuan, and I. Manas-Zloczower, “Piezoresistive thermoplastic polyurethane nanocomposites with carbon nanostructures,” *Carbon N Y*, vol. 139, pp. 52–58, Nov. 2018, doi: 10.1016/J.CARBON.2018.06.037.
- [137] L. Duan, D. R. D’Hooze, M. Spoerk, P. Cornillie, and L. Cardon, “Facile and Low-Cost Route for Sensitive Stretchable Sensors by Controlling Kinetic and

Thermodynamic Conductive Network Regulating Strategies,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 10, no. 26, pp. 22678–22691, Jul. 2018, doi: 10.1021/ACSAMI.8B03967/SUPPL_FILE/AM8B03967_SI_001.PDF.

- [138] Y. Lin, S. Liu, S. Chen, Y. Wei, X. Dong, and L. Liu, “A highly stretchable and sensitive strain sensor based on graphene–elastomer composites with a novel double-interconnected network,” *J Mater Chem C Mater*, vol. 4, no. 26, pp. 6345–6352, Jun. 2016, doi: 10.1039/C6TC01925K.
- [139] L. F. Ma *et al.*, “Conductive thermoplastic vulcanizates (TPVs) based on polypropylene (PP)/ethylene-propylene-diene rubber (EPDM) blend: From strain sensor to highly stretchable conductor,” *Compos Sci Technol*, vol. 128, pp. 176–184, May 2016, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2016.04.001.
- [140] M. Wang *et al.*, “Enhanced electrical conductivity and piezoresistive sensing in multi-wall carbon nanotubes/polydimethylsiloxane nanocomposites via the construction of a self-segregated structure,” *Nanoscale*, vol. 9, no. 31, pp. 11017–11026, Aug. 2017, doi: 10.1039/C7NR02322G.
- [141] S. Wang, X. Zhang, X. Wu, and C. Lu, “Tailoring percolating conductive networks of natural rubber composites for flexible strain sensors via a cellulose nanocrystal templated assembly,” *Soft Matter*, vol. 12, no. 3, pp. 845–852, Jan. 2016, doi: 10.1039/C5SM01958C.
- [142] J. Oh *et al.*, “Pressure insensitive strain sensor with facile solution-based process for tactile sensing applications,” *ACS Nano*, vol. 12, no. 8, pp. 7546–7553, Aug. 2018, doi: 10.1021/ACSNANO.8B03488/SUPPL_FILE/NN8B03488_SI_001.PDF.
- [143] X. Wang *et al.*, “A highly stretchable carbon nanotubes/thermoplastic polyurethane fiber-shaped strain sensor with porous structure for human motion monitoring,” *Compos Sci Technol*, vol. 168, pp. 126–132, Nov. 2018, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2018.09.006.
- [144] Y. Wang *et al.*, “Wearable and Highly Sensitive Graphene Strain Sensors for Human Motion Monitoring,” *Adv Funct Mater*, vol. 24, no. 29, pp. 4666–4670, Aug. 2014, doi: 10.1002/ADFM.201400379.
- [145] X. Wu, Y. Han, X. Zhang, and C. Lu, “Highly Sensitive, Stretchable, and Wash-Durable Strain Sensor Based on Ultrathin Conductive Layer@Polyurethane Yarn for Tiny Motion Monitoring,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 8, no. 15, pp. 9936–9945, May 2016, doi: 10.1021/ACSAMI.6B01174/SUPPL_FILE/AM6B01174_SI_005.AVI.
- [146] G. H. Lim, N. E. Lee, and B. Lim, “Highly sensitive, tunable, and durable gold nanosheet strain sensors for human motion detection,” *J Mater Chem C Mater*, vol. 4, no. 24, pp. 5642–5647, Jun. 2016, doi: 10.1039/C6TC00251J.
- [147] C. S. Boland *et al.*, “Sensitive, high-strain, high-rate bodily motion sensors based on graphene-rubber composites,” *ACS Nano*, vol. 8, no. 9, pp. 8819–

- 8830, Sep. 2014, doi: 10.1021/NN503454H/SUPPL_FILE/NN503454H_SI_001.PDF.
- [148] J. J. Park, W. J. Hyun, S. C. Mun, Y. T. Park, and O. O. Park, “Highly stretchable and wearable graphene strain sensors with controllable sensitivity for human motion monitoring,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 7, no. 11, pp. 6317–6324, Mar. 2015, doi: 10.1021/ACSAMI.5B00695/SUPPL_FILE/AM5B00695_SI_003.AVI.
- [149] S. J. Park, J. Kim, M. Chu, and M. Khine, “Highly Flexible Wrinkled Carbon Nanotube Thin Film Strain Sensor to Monitor Human Movement,” *Adv Mater Technol*, vol. 1, no. 5, p. 1600053, Aug. 2016, doi: 10.1002/ADMT.201600053.
- [150] Z. Wang *et al.*, “Polyurethane/Cotton/Carbon Nanotubes Core-Spun Yarn as High Reliability Stretchable Strain Sensor for Human Motion Detection,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 8, no. 37, pp. 24837–24843, Sep. 2016, doi: 10.1021/ACSAMI.6B08207/SUPPL_FILE/AM6B08207_SI_001.PDF.
- [151] X. G. Yu *et al.*, “A wearable strain sensor based on a carbonized nano-sponge/silicone composite for human motion detection,” *Nanoscale*, vol. 9, no. 20, pp. 6680–6685, May 2017, doi: 10.1039/C7NR01011G.
- [152] S. Lee *et al.*, “Ag Nanowire Reinforced Highly Stretchable Conductive Fibers for Wearable Electronics,” *Adv Funct Mater*, vol. 25, no. 21, pp. 3114–3121, Jun. 2015, doi: 10.1002/ADFM.201500628.
- [153] Y. Zheng *et al.*, “A highly stretchable and stable strain sensor based on hybrid carbon nanofillers/polydimethylsiloxane conductive composites for large human motions monitoring,” *Compos Sci Technol*, vol. 156, pp. 276–286, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2018.01.019.
- [154] Y. Wang *et al.*, “Flexible electrically resistive-type strain sensors based on reduced graphene oxide-decorated electrospun polymer fibrous mats for human motion monitoring,” *Carbon N Y*, vol. 126, pp. 360–371, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.CARBON.2017.10.034.
- [155] J. D. Pegan *et al.*, “Skin-mountable stretch sensor for wearable health monitoring,” *Nanoscale*, vol. 8, no. 39, pp. 17295–17303, Oct. 2016, doi: 10.1039/C6NR04467K.
- [156] J. W. Zha, W. Huang, S. J. Wang, D. L. Zhang, R. K. Y. Li, and Z. M. Dang, “Difunctional Graphene–Fe₃O₄ Hybrid Nanosheet/Polydimethylsiloxane Nanocomposites with High Positive Piezoresistive and Superparamagnetism Properties as Flexible Touch Sensors,” *Adv Mater Interfaces*, vol. 3, no. 1, p. 1500418, Jan. 2016, doi: 10.1002/ADMI.201500418.
- [157] E. Roh, B. U. Hwang, D. Kim, B. Y. Kim, and N. E. Lee, “Stretchable, Transparent, Ultrasensitive, and Patchable Strain Sensor for Human-Machine Interfaces Comprising a Nanohybrid of Carbon Nanotubes and Conductive Elastomers,” *ACS Nano*, vol. 9, no. 6, pp. 6252–6261, Jun. 2015, doi: 10.1021/ACSNANO.5B01613/SUPPL_FILE/NN5B01613_SI_001.PDF.

- [158] L. Yi *et al.*, “Nanoparticle monolayer-based flexible strain gauge with ultrafast dynamic response for acoustic vibration detection,” *Nano Res*, vol. 8, no. 9, pp. 2978–2987, Sep. 2015, doi: 10.1007/S12274-015-0803-1/METRICS.
- [159] C. Yan *et al.*, “Highly Stretchable Piezoresistive Graphene–Nanocellulose Nanopaper for Strain Sensors,” *Advanced Materials*, vol. 26, no. 13, pp. 2022–2027, Apr. 2014, doi: 10.1002/ADMA.201304742.
- [160] Y. Tang *et al.*, “Highly Stretchable and Ultrasensitive Strain Sensor Based on Reduced Graphene Oxide Microtubes-Elastomer Composite,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 7, no. 49, pp. 27432–27439, Dec. 2015, doi: 10.1021/ACSAMI.5B09314/SUPPL_FILE/AM5B09314_SI_001.PDF.
- [161] B. Song *et al.*, “Two-step hydrothermally synthesized carbon nanodots/WO₃ photocatalysts with enhanced photocatalytic performance,” *Dalton Transactions*, vol. 46, no. 45, pp. 15769–15777, Nov. 2017, doi: 10.1039/C7DT03003G.
- [162] X. Lou *et al.*, “Crystal Structure Modification Enhanced FeNb₁₁O₂₉ Anodes for Lithium-Ion Batteries,” *ChemElectroChem*, vol. 4, no. 12, pp. 3171–3180, Dec. 2017, doi: 10.1002/CELC.201700816.
- [163] H. Du *et al.*, “Carbon Nanomaterials in Direct Liquid Fuel Cells,” *The Chemical Record*, vol. 18, no. 9, pp. 1365–1372, Sep. 2018, doi: 10.1002/TCR.201800008.
- [164] Z. Sun *et al.*, “Experimental and simulation-based understanding of morphology controlled barium titanate nanoparticles under co-adsorption of surfactants,” *CrystEngComm*, vol. 19, no. 24, pp. 3288–3298, Jun. 2017, doi: 10.1039/C7CE00279C.
- [165] L. Zhang *et al.*, “Heterostructured TiO₂/WO₃ Nanocomposites for Photocatalytic Degradation of Toluene under Visible Light,” *J Electrochem Soc*, vol. 164, no. 14, pp. H1086–H1090, Dec. 2017, doi: 10.1149/2.0881714JES/XML.
- [166] Y. Zhang *et al.*, “Highly Efficient Fe-N-C Nanoparticles Modified Porous Graphene Composites for Oxygen Reduction Reaction,” *J Electrochem Soc*, vol. 165, no. 9, pp. H510–H516, Jun. 2018, doi: 10.1149/2.0991809JES/XML.
- [167] M. Amjadi, A. Pichitpajongkit, S. Lee, S. Ryu, and I. Park, “Highly stretchable and sensitive strain sensor based on silver nanowire-elastomer nanocomposite,” *ACS Nano*, vol. 8, no. 5, pp. 5154–5163, May 2014, doi: 10.1021/NN501204T/SUPPL_FILE/NN501204T_SI_003.AVI.
- [168] R. Rahimi, M. Ochoa, W. Yu, and B. Ziaie, “Highly stretchable and sensitive unidirectional strain sensor via laser carbonization,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 7, no. 8, pp. 4463–4470, Mar. 2015, doi: 10.1021/AM509087U/SUPPL_FILE/AM509087U_SI_001.PDF.

- [169] S. Chen, Y. Wei, X. Yuan, Y. Lin, and L. Liu, "A highly stretchable strain sensor based on a graphene/silver nanoparticle synergic conductive network and a sandwich structure," *J Mater Chem C Mater*, vol. 4, no. 19, pp. 4304–4311, May 2016, doi: 10.1039/C6TC00300A.
- [170] Y. Guo *et al.*, "Significantly enhanced and precisely modeled thermal conductivity in polyimide nanocomposites with chemically modified graphene via in situ polymerization and electrospinning-hot press technology," *J Mater Chem C Mater*, vol. 6, no. 12, pp. 3004–3015, Mar. 2018, doi: 10.1039/C8TC00452H.
- [171] Y. Pan, X. Liu, J. Kaschta, X. Hao, C. Liu, and D. W. Schubert, "Viscoelastic and electrical behavior of poly(methyl methacrylate)/carbon black composites prior to and after annealing," *Polymer (Guildf)*, vol. 113, pp. 34–38, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.POLYMER.2017.02.050.
- [172] W. Zhao, J. Kong, H. Liu, Q. Zhuang, J. Gu, and Z. Guo, "Ultra-high thermally conductive and rapid heat responsive poly(benzobisoxazole) nanocomposites with self-aligned graphene," *Nanoscale*, vol. 8, no. 48, pp. 19984–19993, Dec. 2016, doi: 10.1039/C6NR06622D.
- [173] J. Gu *et al.*, "Ultralow dielectric, fluoride-containing cyanate ester resins with improved mechanical properties and high thermal and dimensional stabilities," *J Mater Chem C Mater*, vol. 5, no. 28, pp. 6929–6936, Jul. 2017, doi: 10.1039/C7TC00222J.
- [174] C. Wang *et al.*, "Controllable Cross-Linking Anion Exchange Membranes with Excellent Mechanical and Thermal Properties," *Macromol Mater Eng*, vol. 303, no. 3, p. 1700462, Mar. 2018, doi: 10.1002/MAME.201700462.
- [175] Y. Gao *et al.*, "Synthesis of highly efficient flame retardant high-density polyethylene nanocomposites with inorgano-layered double hydroxides as nanofiller using solvent mixing method," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 6, no. 7, pp. 5094–5104, Apr. 2014, doi: 10.1021/AM500265A/ASSET/IMAGES/MEDIUM/AM-2014-00265A_0011.GIF.
- [176] Q. He *et al.*, "Flame-Retardant Polypropylene/Multiwall Carbon Nanotube Nanocomposites: Effects of Surface Functionalization and Surfactant Molecular Weight," *Macromol Chem Phys*, vol. 215, no. 4, pp. 327–340, Feb. 2014, doi: 10.1002/MACP.201300608.
- [177] X. Zhang, Q. He, H. Gu, H. A. Colorado, S. Wei, and Z. Guo, "Flame-retardant electrical conductive nanopolymers based on bisphenol F epoxy resin reinforced with nano polyanilines," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 5, no. 3, pp. 898–910, Feb. 2013, doi: 10.1021/AM302563W/SUPPL_FILE/AM302563W_SI_001.PDF.
- [178] Y. Feng *et al.*, "Synergetic Improvement in Thermal Conductivity and Flame Retardancy of Epoxy/Silver Nanowires Composites by Incorporating 'branch-

Like' Flame-Retardant Functionalized Graphene," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 10, no. 25, pp. 21628–21641, Jun. 2018, doi: 10.1021/ACSAMI.8B05221/SUPPL_FILE/AM8B05221_SI_001.PDF.

- [179] P. Xie *et al.*, "Silica microsphere templated self-assembly of a three-dimensional carbon network with stable radio-frequency negative permittivity and low dielectric loss," *J Mater Chem C Mater*, vol. 6, no. 19, pp. 5239–5249, May 2018, doi: 10.1039/C7TC05911F.
- [180] K. Sun *et al.*, "An overview of metamaterials and their achievements in wireless power transfer," *J Mater Chem C Mater*, vol. 6, no. 12, pp. 2925–2943, Mar. 2018, doi: 10.1039/C7TC03384B.
- [181] B. Qiu *et al.*, "Dielectric properties and magnetoresistance behavior of polyaniline coated carbon fabrics," *J Mater Chem C Mater*, vol. 3, no. 16, pp. 3989–3998, Apr. 2015, doi: 10.1039/C4TC02578D.
- [182] C. Cheng *et al.*, "Tunable and weakly negative permittivity in carbon/silicon nitride composites with different carbonizing temperatures," *Carbon N Y*, vol. 125, pp. 103–112, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.CARBON.2017.09.037.
- [183] J. Gu *et al.*, "Synchronously improved dielectric and mechanical properties of wave-transparent laminated composites combined with outstanding thermal stability by incorporating isozyme/POSS functionalized PBO fibers," *J Mater Chem C Mater*, vol. 6, no. 28, pp. 7652–7660, Jul. 2018, doi: 10.1039/C8TC02391C.
- [184] J. Guo *et al.*, "Polypyrrole-interface-functionalized nano-magnetite epoxy nanocomposites as electromagnetic wave absorbers with enhanced flame retardancy," *J Mater Chem C Mater*, vol. 5, no. 22, pp. 5334–5344, Jun. 2017, doi: 10.1039/C7TC01502J.
- [185] J. Li *et al.*, "Flexible, conductive, porous, fibrillar polymer–gold nanocomposites with enhanced electromagnetic interference shielding and mechanical properties," *J Mater Chem C Mater*, vol. 5, no. 5, pp. 1095–1105, Feb. 2017, doi: 10.1039/C6TC04780G.
- [186] K. Zhang *et al.*, "Ultralow percolation threshold and enhanced electromagnetic interference shielding in poly(L-lactide)/multi-walled carbon nanotube nanocomposites with electrically conductive segregated networks," *J Mater Chem C Mater*, vol. 5, no. 36, pp. 9359–9369, Sep. 2017, doi: 10.1039/C7TC02948A.
- [187] L. Yang *et al.*, "Constructing efficient mixed-ion perovskite solar cells based on TiO₂ nanorod array," *J Colloid Interface Sci*, vol. 534, pp. 459–468, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.JCIS.2018.09.045.
- [188] Z. Hu *et al.*, "Light triggered interfacial damage self-healing of poly(p-phenylene benzobisoxazole) fiber composites," *Nanotechnology*, vol. 29, no. 18, p. 185602, Mar. 2018, doi: 10.1088/1361-6528/AAB010.

- [189] Y. Li *et al.*, “3-D magnetic graphene oxide-magnetite poly(vinyl alcohol) nanocomposite substrates for immobilizing enzyme,” *Polymer (Guildf)*, vol. 149, pp. 13–22, Aug. 2018, doi: 10.1016/J.POLYMER.2018.06.046.
- [190] Y. Ma *et al.*, “Morphology-dependent electrochemical supercapacitors in multi-dimensional polyaniline nanostructures,” *J Mater Chem A Mater*, vol. 5, no. 27, pp. 14041–14052, Jul. 2017, doi: 10.1039/C7TA03279J.
- [191] H. Yi *et al.*, “Advanced asymmetric supercapacitors based on CNT@Ni(OH)₂ core-shell composites and 3D graphene networks,” *J Mater Chem A Mater*, vol. 3, no. 38, pp. 19545–19555, Sep. 2015, doi: 10.1039/C5TA06174A.
- [192] H. Wang, Z. Xu, H. Yi, H. Wei, Z. Guo, and X. Wang, “One-step preparation of single-crystalline Fe₂O₃ particles/graphene composite hydrogels as high performance anode materials for supercapacitors,” *Nano Energy*, vol. 7, pp. 86–96, Jul. 2014, doi: 10.1016/J.NANOEN.2014.04.009.
- [193] Y. Guo *et al.*, “Improved extraction of cobalt and lithium by reductive acid from spent lithium-ion batteries via mechanical activation process,” *J Mater Sci*, vol. 53, no. 19, pp. 13790–13800, Oct. 2018, doi: 10.1007/S10853-018-2229-0/METRICS.
- [194] W. Chen *et al.*, “Electrospun Flexible Cellulose Acetate-Based Separators for Sodium-Ion Batteries with Ultralong Cycle Stability and Excellent Wettability: The Role of Interface Chemical Groups,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 10, no. 28, pp. 23883–23890, Jul. 2018, doi: 10.1021/ACSAMI.8B06706/SUPPL_FILE/AM8B06706_SI_002.AVI.
- [195] J. Huang, Y. Cao, Q. Shao, X. Peng, and Z. Guo, “Magnetic Nanocarbon Adsorbents with Enhanced Hexavalent Chromium Removal: Morphology Dependence of Fibrillar vs Particulate Structures,” *Ind Eng Chem Res*, vol. 56, no. 38, pp. 10689–10701, Sep. 2017, doi: 10.1021/ACS.IECR.7B02835/SUPPL_FILE/IE7B02835_SI_001.PDF.
- [196] Y. Wang *et al.*, “Superhydrophobic and superoleophilic porous reduced graphene oxide/polycarbonate monoliths for high-efficiency oil/water separation,” *J Hazard Mater*, vol. 344, pp. 849–856, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2017.11.040.
- [197] Y. Zhang *et al.*, “Excellent corrosion protection performance of epoxy composite coatings filled with silane functionalized silicon nitride,” *Journal of Polymer Research*, vol. 25, no. 5, pp. 1–13, May 2018, doi: 10.1007/S10965-018-1518-2/METRICS.
- [198] H. Gu *et al.*, “Magnetoresistive conductive polymer-tungsten trioxide nanocomposites with ultrahigh sensitivity at low magnetic field,” *Polymer (Guildf)*, vol. 55, no. 3, pp. 944–950, Feb. 2014, doi: 10.1016/J.POLYMER.2013.12.024.

- [199] X. Cao *et al.*, “Strain sensing behaviors of epoxy nanocomposites with carbon nanotubes under cyclic deformation,” *Polymer (Guildf)*, vol. 112, pp. 1–9, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.POLYMER.2017.01.068.
- [200] J. Lee *et al.*, “Transparent, Flexible Strain Sensor Based on a Solution-Processed Carbon Nanotube Network,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 9, no. 31, pp. 26279–26285, Aug. 2017, doi: 10.1021/ACSAMI.7B03184/SUPPL_FILE/AM7B03184_SI_001.PDF.
- [201] X. Dong, Y. Wei, S. Chen, Y. Lin, L. Liu, and J. Li, “A linear and large-range pressure sensor based on a graphene/silver nanowires nanobiocomposites network and a hierarchical structural sponge,” *Compos Sci Technol*, vol. 155, pp. 108–116, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2017.11.028.
- [202] S. Ding *et al.*, “One-Step Fabrication of Stretchable Copper Nanowire Conductors by a Fast Photonic Sintering Technique and Its Application in Wearable Devices,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 8, no. 9, pp. 6190–6199, Mar. 2016, doi: 10.1021/ACSAMI.5B10802/SUPPL_FILE/AM5B10802_SI_003.AVI.
- [203] S. Seyedin, J. M. Razal, P. C. Innis, A. Jeiranikhameneh, S. Beirne, and G. G. Wallace, “Knitted Strain Sensor Textiles of Highly Conductive All-Polymeric Fibers,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 7, no. 38, pp. 21150–21158, Sep. 2015, doi: 10.1021/ACSAMI.5B04892/SUPPL_FILE/AM5B04892_SI_002.AVI.
- [204] Y. Q. Li *et al.*, “Multifunctional Wearable Device Based on Flexible and Conductive Carbon Sponge/Polydimethylsiloxane Composite,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 8, no. 48, pp. 33189–33196, Dec. 2016, doi: 10.1021/ACSAMI.6B11196/SUPPL_FILE/AM6B11196_SI_001.PDF.
- [205] S. Yao and Y. Zhu, “Wearable multifunctional sensors using printed stretchable conductors made of silver nanowires,” *Nanoscale*, vol. 6, no. 4, pp. 2345–2352, Jan. 2014, doi: 10.1039/C3NR05496A.
- [206] S. Gong *et al.*, “A wearable and highly sensitive pressure sensor with ultrathin gold nanowires,” *Nature Communications 2014 5:1*, vol. 5, no. 1, pp. 1–8, Feb. 2014, doi: 10.1038/ncomms4132.
- [207] G. Ambrosetti, C. Grimaldi, I. Balberg, T. Maeder, A. Danani, and P. Ryser, “Solution of the tunneling-percolation problem in the nanocomposite regime,” *Phys Rev B Condens Matter Mater Phys*, vol. 81, no. 15, p. 155434, Apr. 2010, doi: 10.1103/PHYSREVB.81.155434/FIGURES/8/MEDIUM.
- [208] A. Göldel, G. Kasaliwal, and P. Pötschke, “Selective Localization and Migration of Multiwalled Carbon Nanotubes in Blends of Polycarbonate and Poly(styrene-acrylonitrile),” *Macromol Rapid Commun*, vol. 30, no. 6, pp. 423–429, Mar. 2009, doi: 10.1002/MARC.200800549.
- [209] B. P. Grady, “Recent Developments Concerning the Dispersion of Carbon Nanotubes in Polymers,” *Macromol Rapid Commun*, vol. 31, no. 3, pp. 247–257, Feb. 2010, doi: 10.1002/MARC.200900514.

- [210] Y. H. Ji *et al.*, “Significantly enhanced electrical conductivity of silver nanowire/polyurethane composites via graphene oxide as novel dispersant,” *Compos Sci Technol*, vol. 132, pp. 57–67, Aug. 2016, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2016.07.002.
- [211] S. Zhao *et al.*, “Synergistic effect of carbon fibers on the conductive properties of a segregated carbon black/polypropylene composite,” *Mater Lett*, vol. 129, pp. 72–75, Aug. 2014, doi: 10.1016/J.MATLET.2014.04.189.
- [212] W. Zhai *et al.*, “Segregated conductive polymer composite with synergistically electrical and mechanical properties,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 105, pp. 68–77, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2017.11.008.
- [213] Y. Bao *et al.*, “Preparation and properties of carbon black/polymer composites with segregated and double-percolated network structures,” *J Mater Sci*, vol. 48, no. 14, pp. 4892–4898, Jul. 2013, doi: 10.1007/S10853-013-7269-X/METRICS.
- [214] Y. Lan *et al.*, “Electrically conductive thermoplastic polyurethane/polypropylene nanocomposites with selectively distributed graphene,” *Polymer (Guildf)*, vol. 97, pp. 11–19, Aug. 2016, doi: 10.1016/J.POLYMER.2016.05.017.
- [215] H. Bizhani, V. Nayyeri, A. A. Katbab, A. Jalali-Arani, and H. Nazockdast, “Double percolated MWCNTs loaded PC/SAN nanocomposites as an absorbing electromagnetic shield,” *Eur Polym J*, vol. 100, pp. 209–218, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.EURPOLYMJ.2018.01.016.
- [216] W. Huang *et al.*, “Flexible and Lightweight Pressure Sensor Based on Carbon Nanotube/Thermoplastic Polyurethane-Aligned Conductive Foam with Superior Compressibility and Stability,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 9, no. 48, pp. 42266–42277, Dec. 2017, doi: 10.1021/ACSAMI.7B16975/SUPPL_FILE/AM7B16975_SI_004.AVI.
- [217] M. Z. Seyedin, J. M. Razal, P. C. Innis, and G. G. Wallace, “Strain-Responsive Polyurethane/PEDOT:PSS Elastomeric Composite Fibers with High Electrical Conductivity,” *Adv Funct Mater*, vol. 24, no. 20, pp. 2957–2966, May 2014, doi: 10.1002/ADFM.201303905.
- [218] G. Li *et al.*, “Aligned flexible conductive fibrous networks for highly sensitive, ultrastretchable and wearable strain sensors,” *J Mater Chem C Mater*, vol. 6, no. 24, pp. 6575–6583, Jun. 2018, doi: 10.1039/C8TC01924J.
- [219] S. Zhao *et al.*, “Percolation threshold-inspired design of hierarchical multiscale hybrid architectures based on carbon nanotubes and silver nanoparticles for stretchable and printable electronics,” *J Mater Chem C Mater*, vol. 4, no. 27, pp. 6666–6674, Jul. 2016, doi: 10.1039/C6TC01728B.
- [220] Y. Wang *et al.*, “Ultra-stretchable, sensitive and durable strain sensors based on polydopamine encapsulated carbon nanotubes/elastic bands,” *J Mater Chem C Mater*, vol. 6, no. 30, pp. 8160–8170, Aug. 2018, doi: 10.1039/C8TC02702A.

- [221] U. H. Shin, D. W. Jeong, S. M. Park, S. H. Kim, H. W. Lee, and J. M. Kim, "Highly stretchable conductors and piezocapacitive strain gauges based on simple contact-transfer patterning of carbon nanotube forests," *Carbon N Y*, vol. 80, no. 1, pp. 396–404, Dec. 2014, doi: 10.1016/J.CARBON.2014.08.079.
- [222] R. Xu *et al.*, "Facile fabrication of three-dimensional graphene foam/poly(dimethylsiloxane) composites and their potential application as strain sensor," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 6, no. 16, pp. 13455–13460, Aug. 2014, doi: 10.1021/AM502208G/ASSET/IMAGES/MEDIUM/AM-2014-02208G_0008.GIF.
- [223] X. Liu, J. Krücker, G. Zheng, and D. W. Schubert, "Mapping the electrical conductivity of poly(methyl methacrylate)/carbon black composites prior to and after shear," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 5, no. 18, pp. 8857–8860, Sep. 2013, doi: 10.1021/AM4031517/ASSET/IMAGES/MEDIUM/AM-2013-031517_0006.GIF.
- [224] M. Qu *et al.*, "Electrical conductivity and mechanical properties of melt-spun ternary composites comprising PMMA, carbon fibers and carbon black," *Compos Sci Technol*, vol. 150, pp. 24–31, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2017.07.004.
- [225] Z. Zhou, X. Zhang, X. Wu, and C. Lu, "Self-stabilized polyaniline@graphene aqueous colloids for the construction of assembled conductive network in rubber matrix and its chemical sensing application," *Compos Sci Technol*, vol. 125, pp. 1–8, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2016.01.016.
- [226] G. Latessa, F. Brunetti, A. Reale, G. Saggio, and A. Di Carlo, "Piezoresistive behaviour of flexible PEDOT:PSS based sensors," *Sens Actuators B Chem*, vol. 139, no. 2, pp. 304–309, Jun. 2009, doi: 10.1016/J.SNB.2009.03.063.
- [227] H. C. Chu *et al.*, "Spray-Deposited Large-Area Copper Nanowire Transparent Conductive Electrodes and Their Uses for Touch Screen Applications," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 8, no. 20, pp. 13009–13017, May 2016, doi: 10.1021/ACSAMI.6B02652/SUPPL_FILE/AM6B02652_SI_003.MPG.
- [228] Y. Yang, Z. Li, W. Ji, C. Sun, H. Deng, and Q. Fu, "Enhanced dielectric properties through using mixed fillers consisting of nano-barium titanate/nickel hydroxide for polyvinylidene fluoride based composites," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 104, pp. 24–31, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2017.10.024.
- [229] H. Liu, L. li Zhu, Y. He, and B. wen Cheng, "A novel method for fabricating elastic conductive polyurethane filaments by in-situ reduction of polydopamine and electroless silver plating," *Mater Des*, vol. 113, pp. 254–263, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.MATDES.2016.10.027.
- [230] M. J. Jiang, Z. M. Dang, H. P. Xu, S. H. Yao, and J. Bai, "Effect of aspect ratio of multiwall carbon nanotubes on resistance-pressure sensitivity of rubber

- nanocomposites,” *Appl Phys Lett*, vol. 91, no. 7, Aug. 2007, doi: 10.1063/1.2772671/131635.
- [231] Y. Zheng *et al.*, “The effect of filler dimensionality on the electromechanical performance of polydimethylsiloxane based conductive nanocomposites for flexible strain sensors,” *Compos Sci Technol*, vol. 139, pp. 64–73, Feb. 2017, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2016.12.014.
- [232] N. Wang *et al.*, “A tunable strain sensor based on a carbon nanotubes/electrospun polyamide 6 conductive nanofibrous network embedded into poly(vinyl alcohol) with self-diagnosis capabilities,” *J Mater Chem C Mater*, vol. 5, no. 18, pp. 4408–4418, May 2017, doi: 10.1039/C7TC01123G.
- [233] T. H. Chiang and J. F. Wager, “Electronic conduction mechanisms in insulators,” *IEEE Trans Electron Devices*, vol. 65, no. 1, pp. 223–230, Jan. 2018, doi: 10.1109/TED.2017.2776612.
- [234] R. Brown and E. Simanek, “Rapid Communications Transition to Ohmic conduction in ultrasmall tunnel junctions.”
- [235] I. Balberg, “Tunneling and nonuniversal conductivity in composite materials,” *Phys Rev Lett*, vol. 59, no. 12, p. 1305, Sep. 1987, doi: 10.1103/PhysRevLett.59.1305.
- [236] I. Alig *et al.*, “Establishment, morphology and properties of carbon nanotube networks in polymer melts,” *Polymer (Guildf)*, vol. 53, no. 1, pp. 4–28, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.POLYMER.2011.10.063.
- [237] H. Liu *et al.*, “Electrically conductive polymer composites for smart flexible strain sensors: a critical review,” *Journal of Materials Chemistry C*, vol. 6, no. 45. Royal Society of Chemistry, pp. 12121–12141, 2018. doi: 10.1039/C8TC04079F.
- [238] W. Zhai *et al.*, “Segregated conductive CNTs/HDPE/UHMWPE composites fabricated by plunger type injection molding,” *Mater Lett*, vol. 229, pp. 13–16, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.MATLET.2018.06.114.
- [239] Y. Lin, S. Liu, J. Peng, and L. Liu, “Constructing a segregated graphene network in rubber composites towards improved electrically conductive and barrier properties,” *Compos Sci Technol*, vol. 131, pp. 40–47, Aug. 2016, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2016.05.012.
- [240] A. B. Oskouyi, U. Sundararaj, and P. Mertiny, “Tunneling Conductivity and Piezoresistivity of Composites Containing Randomly Dispersed Conductive Nano-Platelets,” *Materials 2014, Vol. 7, Pages 2501-2521*, vol. 7, no. 4, pp. 2501–2521, Mar. 2014, doi: 10.3390/MA7042501.
- [241] W. Luo, T. Wu, B. Chen, M. Liang, and H. Zou, “Highly Stretchable Conductors Based on Expanded Graphite Macroconfined in Tubular Rubber,” *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 9, no. 49, pp. 43239–43249, Dec. 2017, doi: 10.1021/ACSAMI.7B08866/SUPPL_FILE/AM7B08866_SI_005.AVI.

- [242] Z. S. Petrović and J. Ferguson, “Polyurethane elastomers,” *Prog Polym Sci*, vol. 16, no. 5, pp. 695–836, Oct. 1991, doi: 10.1016/0079-6700(91)90011-9.
- [243] G. Oertel, L. A.-(No Title), and undefined 1994, “Polyurethane handbook: chemistry, raw materials, processing, application, properties,” *cir.nii.ac.jp*, Accessed: Jan. 07, 2024.
- [244] B. Mailhot, K. Komvopoulos, B. Ward, Y. Tian, and G. A. Somorjai, “Mechanical and friction properties of thermoplastic polyurethanes determined by scanning force microscopy,” *J Appl Phys*, vol. 89, no. 10, pp. 5712–5719, May 2001, doi: 10.1063/1.1360215.
- [245] D. K. Chattopadhyay and K. V. S. N. Raju, “Structural engineering of polyurethane coatings for high performance applications,” *Prog Polym Sci*, vol. 32, no. 3, pp. 352–418, Mar. 2007, doi: 10.1016/J.PROGPOLYMSCI.2006.05.003.
- [246] C. P. Buckley, C. Prisacariu, and C. Martin, “Elasticity and inelasticity of thermoplastic polyurethane elastomers: Sensitivity to chemical and physical structure,” *Polymer (Guildf)*, vol. 51, no. 14, pp. 3213–3224, Jun. 2010, doi: 10.1016/J.POLYMER.2010.04.069.
- [247] B. S. Lee, B. C. Chun, Y. C. Chung, K. Il Sul, and J. W. Cho, “Structure and Thermomechanical Properties of Polyurethane Block Copolymers with Shape Memory Effect,” *Macromolecules*, vol. 34, no. 18, pp. 6431–6437, Aug. 2001, doi: 10.1021/MA001842L.
- [248] D. M. Crawford, R. G. Bass, and T. W. Haas, “Strain effects on thermal transitions and mechanical properties of thermoplastic polyurethane elastomers,” *Thermochim Acta*, vol. 323, no. 1–2, pp. 53–63, Dec. 1998, doi: 10.1016/S0040-6031(98)00541-3.
- [249] S. Alam, R. Gogoi, M. S. Alam, and U. K. Niyogi, “Effect of soft segment chain length on tailoring the properties of isocyanate terminated polyurethane prepolymer, a base material from polyurethane bandage EFFECT OF SOFT SEGMENT CHAIN LENGTH ON TAILORING THE PROPERTIES OF ISOCYANATE TERMINATED POLYURETHANE PREPOLYMER, A BASE MATERIAL FOR POLYURETHANE BANDAGE,” *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, pp. 2321–7308, 2013, Accessed: Jan. 07, 2024.
- [250] B. Pukánszky *et al.*, “Nanophase separation in segmented polyurethane elastomers: Effect of specific interactions on structure and properties,” *Eur Polym J*, vol. 44, no. 8, pp. 2431–2438, Aug. 2008, doi: 10.1016/J.EURPOLYMJ.2008.06.008.
- [251] C. Prisacariu, “Polyurethane elastomers: from morphology to mechanical aspects,” 2011, Accessed: Jan. 07, 2024.
- [252] E. Tocha, H. Janik, M. Dębowski, and G. J. Vancso, “MORPHOLOGY OF POLYURETHANES REVISITED BY COMPLEMENTARY AFM AND

- TEM,” *Journal of Macromolecular Science, Part B*, vol. 41 B, no. 4–6, pp. 1291–1304, Jul. 2002, doi: 10.1081/MB-120013098.
- [253] J. P. Sheth, D. B. Klinedinst, G. L. Wilkes, I. Yilgor, and E. Yilgor, “Role of chain symmetry and hydrogen bonding in segmented copolymers with monodisperse hard segments,” *Polymer (Guildf)*, vol. 46, no. 18, pp. 7317–7322, Aug. 2005, doi: 10.1016/J.POLYMER.2005.04.041.
- [254] V. Solouki Bonab and I. Manas-Zloczower, “Revisiting thermoplastic polyurethane, from composition to morphology and properties,” *J Polym Sci B Polym Phys*, vol. 55, no. 20, pp. 1553–1564, Oct. 2017, doi: 10.1002/polb.24413.
- [255] B. Chu, T. Gao, Y. Li, J. Wang, C. R. Desper, and C. A. Byrne, “Microphase Separation Kinetics in Segmented Polyurethanes: Effects of Soft Segment Length and Structure,” *Macromolecules*, vol. 25, no. 21, pp. 5724–5729, Oct. 1992, doi: 10.1021/MA00047A025/ASSET/MA00047A025.FP.PNG_V03.
- [256] M. J. Elwell, A. J. Ryan, H. J. M. Grünbauer, and H. C. Van Lieshout, “In-Situ Studies of Structure Development during the Reactive Processing of Model Flexible Polyurethane Foam Systems Using FT-IR Spectroscopy, Synchrotron SAXS, and Rheology,” *Macromolecules*, vol. 29, no. 8, pp. 2960–2968, Apr. 1996, doi: 10.1021/MA9511208.
- [257] C. W. Macosko *et al.*, “Dynamics of (Micro)phase Separation during Fast, Bulk Copolymerization: Some Synchrotron SAXS Experiments,” *Macromolecules*, vol. 24, no. 10, pp. 2883–2889, May 1991, doi: 10.1021/MA00010A038/ASSET/MA00010A038.FP.PNG_V03.
- [258] A. LILAONITKUL and C. SL, “PROPERTIES OF THERMOPLASTIC POLYURETHANE ELASTOMERS,” *PROPERTIES OF THERMOPLASTIC POLYURETHANE ELASTOMERS*, 1979.
- [259] S. Abouzahr, G. L. Wilkes, and Z. Ophir, “Structure-property behaviour of segmented polyether-MDI-butanediol based urethanes: effect of composition ratio,” *Polymer (Guildf)*, vol. 23, no. 7, pp. 1077–1086, Jul. 1982, doi: 10.1016/0032-3861(82)90411-6.
- [260] L. L. Harrell, “Segmented Polyurethans. Properties as a Function of Segment Size and Distribution,” *Macromolecules*, vol. 2, no. 6, pp. 607–612, 1969, doi: 10.1021/MA60012A008/ASSET/MA60012A008.FP.PNG_V03.
- [261] D. Martin, G. Meijs, ... G. R.-J. of A., and undefined 1996, “Effect of soft-segment CH₂/O ratio on morphology and properties of a series of polyurethane elastomers,” *Wiley Online Library* DJ Martin, GF Meijs, GM Renwick, PA Gunatillake, SJ Mccarthy *Journal of Applied Polymer Science*, 1996 • *Wiley Online Library*, Accessed: Jan. 07, 2024.
- [262] J. A. Miller, S. B. Lin, K. K. S. Hwang, K. S. Wu, P. E. Gibson, and S. L. Cooper, “Properties of Polyether-Polyurethane Block Copolymers: Effects of

- Hard Segment Length Distribution,” *Macromolecules*, vol. 18, no. 1, pp. 32–44, 1985, doi: 10.1021/MA00143A005/ASSET/MA00143A005.FP.PNG_V03.
- [263] S. L. Samuels and G. L. Wilkes, “The rheo-optical and mechanical behavior of a systematic series of hard-soft segmented urethanes,” *Journal of Polymer Science: Polymer Symposia*, vol. 43, no. 1, pp. 149–178, Jan. 1973, doi: 10.1002/POLC.5070430115.
- [264] T. A. Speckhard and S. L. Cooper, “Ultimate Tensile Properties of Segmented Polyurethane Elastomers: Factors Leading to Reduced Properties for Polyurethanes Based on Nonpolar Soft Segments,” *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 59, no. 3, pp. 405–431, Jul. 1986, doi: 10.5254/1.3538208.
- [265] C. B. Wang and S. L. Cooper, “Morphology and Properties of Segmented Polyether Polyurethaneureas,” *Macromolecules*, vol. 16, no. 5, pp. 775–786, 1983, doi: 10.1021/MA00239A014/ASSET/MA00239A014.FP.PNG_V03.
- [266] H. S. Lee and S. L. Hsu, “Structural changes and chain orientational behavior during tensile deformation of segmented polyurethanes,” *J Polym Sci B Polym Phys*, vol. 32, no. 12, pp. 2085–2098, Sep. 1994, doi: 10.1002/POLB.1994.090321215.
- [267] N. Reynolds, H. W. Spiess, H. Hayen, H. Nefzger, and C. D. Eisenbach, “Structure and deformation behaviour of model poly(ether-urethane) elastomers, 1. Infrared studies,” *Macromol Chem Phys*, vol. 195, no. 8, pp. 2855–2873, Aug. 1994, doi: 10.1002/MACP.1994.021950816.
- [268] H. Song, H. Qi, N. Li, and X. Zhang, “Tribological behaviour of carbon nanotubes/polyurethane nanocomposite coatings,” *Micro Nano Lett*, vol. 6, no. 1, pp. 48–51, Jan. 2011, doi: 10.1049/MNL.2010.0167/CITE/REFWORKS.
- [269] K. Yusoh, J. Jin, and M. Song, “Subsurface mechanical properties of polyurethane/organoclay nanocomposite thin films studied by nanoindentation,” *Prog Org Coat*, vol. 67, no. 2, pp. 220–224, Feb. 2010, doi: 10.1016/J.PORGCOAT.2009.10.003.
- [270] G. G. Silva *et al.*, “Thermoplastic Polyurethane Nanocomposites Produced via Impregnation of Long Carbon Nanotube Forests,” *Macromol Mater Eng*, vol. 296, no. 1, pp. 53–58, Jan. 2011, doi: 10.1002/MAME.201000276.
- [271] M. Berta, A. Saiani, C. Lindsay, and R. Gunaratne, “Effect of clay dispersion on the rheological properties and flammability of polyurethane-clay nanocomposite elastomers,” *J Appl Polym Sci*, vol. 112, no. 5, pp. 2847–2853, Jun. 2009, doi: 10.1002/APP.29771.
- [272] M. Heidarian, M. R. Shishesaz, S. M. Kassiriha, and M. Nematollahi, “Study on the effect of ultrasonication time on transport properties of polyurethane/organoclay nanocomposite coatings,” *J Coat Technol Res*, vol. 8, no. 2, pp. 265–274, Oct. 2011, doi: 10.1007/S11998-010-9297-7/METRICS.

- [273] M. Ashjari, A. R. Mahdavian, N. G. Ebrahimi, and Y. Mosleh, "Efficient dispersion of magnetite nanoparticles in the polyurethane matrix through solution mixing and investigation of the nanocomposite properties," *J Inorg Organomet Polym Mater*, vol. 20, no. 2, pp. 213–219, Jun. 2010, doi: 10.1007/S10904-010-9337-X/METRICS.
- [274] R. Y. Kanna *et al.*, "The antithrombogenic potential of a polyhedral oligomeric silsesquioxane (POSS) nanocomposite," *Biomacromolecules*, vol. 7, no. 1, pp. 215–223, 2006, doi: 10.1021/BM050590Z/ASSET/IMAGES/MEDIUM/BM050590ZN00001.GIF.
- [275] R. Y. Kannan, H. J. Salacinski, M. Odlyha, P. E. Butler, and A. M. Seifalian, "The degradative resistance of polyhedral oligomeric silsesquioxane nanocore integrated polyurethanes: An in vitro study," *Biomaterials*, vol. 27, no. 9, pp. 1971–1979, Mar. 2006, doi: 10.1016/J.BIOMATERIALS.2005.10.006.
- [276] S. Lee, "Multifunctionality of layered fabric systems based on electrospun polyurethane/zinc oxide nanocomposite fibers," *J Appl Polym Sci*, vol. 114, no. 6, pp. 3652–3658, Dec. 2009, doi: 10.1002/APP.30778.
- [277] "Elektromanyetik radyasyon - Vikipedi." Accessed: Jan. 08, 2024.
- [278] A. Kaşgöz, "Elektromanyetik dalga kalkanlama özelliğine sahip polimer kompozitlerin geliştirilmesi ve yapı-performans ilişkilerinin incelenmesi ," 2017.
- [279] X. C. Tong, "Advanced materials and design for electromagnetic interference shielding," 2016, Accessed: Jan. 08, 2024.
- [280] D. Yuping, L. Shunhua, and G. Hongtao, "Investigation of electrical conductivity and electromagnetic shielding effectiveness of polyaniline composite," *Sci Technol Adv Mater*, vol. 6, no. 5, pp. 513–518, Jul. 2005, doi: 10.1016/J.STAM.2005.01.002/XML.
- [281] M. H. Al-Saleh and U. Sundararaj, "Electromagnetic interference shielding mechanisms of CNT/polymer composites," *Carbon N Y*, vol. 47, no. 7, pp. 1738–1746, Jun. 2009, doi: 10.1016/J.CARBON.2009.02.030.
- [282] S. Geetha, K. K. S. Kumar, C. R. K. Rao, M. Vijayan, and D. C. Trivedi, "EMI shielding: Methods and materials—A review," *J Appl Polym Sci*, vol. 112, no. 4, pp. 2073–2086, May 2009, doi: 10.1002/APP.29812.
- [283] J. -C Huang, "EMI shielding plastics: A review," *Advances in Polymer Technology*, vol. 14, no. 2, pp. 137–150, Jun. 1995, doi: 10.1002/ADV.1995.060140205.
- [284] J. Baker-Jarvis, E. J. Vanzura, and W. A. Kissick, "Improved technique for determining complex permittivity with the transmission/reflection method," *IEEE Trans Microw Theory Tech*, vol. 38, no. 8, pp. 1096–1103, 1990, doi: 10.1109/22.57336.

- [285] P. G. Bartley and S. B. Begley, "A new technique for the determination of the complex permittivity and permeability of materials," *2010 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, I2MTC 2010 - Proceedings*, pp. 54–57, 2010, doi: 10.1109/IMTC.2010.5488184.
- [286] A. M. Nicolson and G. F. Ross, "Measurement of the Intrinsic Properties Of Materials by Time-Domain Techniques," *IEEE Trans Instrum Meas*, vol. 19, no. 4, pp. 377–382, 1970, doi: 10.1109/TIM.1970.4313932.
- [287] L. Duan *et al.*, "The resistivity-strain behavior of conductive polymer composites: Stability and sensitivity," *J Mater Chem A Mater*, vol. 2, no. 40, pp. 17085–17098, Oct. 2014, doi: 10.1039/c4ta03645j.
- [288] L. Lin *et al.*, "Towards tunable sensitivity of electrical property to strain for conductive polymer composites based on thermoplastic elastomer," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 5, no. 12, pp. 5815–5824, Jun. 2013, doi: 10.1021/am401402x.



ÖZGEÇMİŞ

Kübra GÜLEŞ, İstanbul Handan Hayrettin Yelkikanat Anadolu Teknik Lisesi'nden 2014 yılında mezun oldu. 2020 yılında Yalova Üniversitesi Polimer Mühendisliği Bölümü'nü bitirip, 2021 yılında Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Polimer Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı programında yüksek lisans eğitimine başladı. 2022 yılından beri kimya sektöründe çalışmaktadır. Şu an Kayalar Kimya Ar- Ge merkezinde Ar-Ge Mühendisi olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

Kübra GÜLEŞ, Doç. Dr. Alper KAŞGÖZ, Resistivity-strain behavior of conductive polymer composites-effect of using carbon filler in different geometry, 13. Uluslararası Lif ve Polimer Araştırmaları Sempozyumu, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi.