



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ELEKTROMANYETİK KORUYUCU
ETKİNLİĞİNİN GELİŞTİRİLMESİ İÇİN
HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELERİN
TASARIMI VE ÜRETİMİ

Osman Fatih DAMNALI

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Osman Fatih DAMNALI tarafından hazırlanan “Elektromanyetik Koruyucu Etkinliğinin Geliştirilmesi İçin Hibrit Kompozit Malzemelerin Tasarımı Ve Üretimi” adlı tez çalışması 22/07/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Memduh KARA

.....

Danışman

Prof. Dr. Hüseyin Arıkan

.....

Üye

Doç. Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYRICI

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf UZUN

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

İkinci Tez Danışmanı : Doç. Dr. Volkan ESKİZEYBEK

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Osman Fatih DAMNALI

Tarih: 22.07.2025

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ELEKTROMANYETİK KORUYUCU ETKİNLİĞİNİN GELİŞTİRİLMESİ İÇİN HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELERİN TASARIMI VE ÜRETİMİ

Osman Fatih DAMNALI

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

2025, 134 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN
Prof. Dr. Memduh KARA
Doç. Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI
Dr. Öğr. Üyesi Yusuf UZUN

Teknolojinin son yıllarda göstermiş olduğu önemli gelişmeler ile birlikte çevremizde kullanılan elektronik cihazların sayısında önemli bir artış yaşanmaktadır. Bu artış etrafa yayılan elektromanyetik (EM) dalga sayısını ve yoğunluğunu da arttırmaktadır. Ortaya çıkan EM kirlilik, hem elektronik cihazların performansını olumsuz etkilemekte hem de insan sağlığı açısından risk oluşturmaktadır. Bu nedenle EM dalgalara karşı koruma sağlayan malzemelerin tasarımı ve üretimi stratejik bir önem taşımaktadır. Bu tez çalışmasında, vakum infüzyon yöntemi ile üretilen hafif, elektriksel iletken ve yüksek elektromanyetik koruyucu etkinliğe sahip çok fonksiyonlu bir polimer kompozit malzemenin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geri dönüştürülmüş selülozik kağıtların düzlemsel yöndeki elektriksel iletkenliğini (EC) ve elektromanyetik koruyucu etkinliğini (EMI SE) iyileştirmek amacıyla, mikro kalınlığa sahip, selüloz fiberler ile desteklenmiş karbon nanotüp (CNT), Grafen (GR) ve Bor Nitrür (BN) nanoparçacıkların takviye edilmesiyle 3 farklı nanokompozit film tasarlanmıştır: CNT Film, Bor Nitrür Film ve CNT/GR Hibrit Film. Büyütülebilir proseslere elverişli olan vakum filtrasyon yöntemi ile elde edilen her bir tabaka için farklı hacim ve yüzde ağırlıklara sahip nano takviyelerin eklenmesiyle farklı varyantlarda esnek ve elektriksel iletken nanokompozit filmler elde edilmiştir. Sandviç yapı oluşturacak şekilde tasarlanan üç katmanlı filmler karbon fiber kumaşlar arasına yerleştirilerek vakum infüzyon ve el yatıma (hand lay-up) yöntemleriyle epoksi reçinece zengin hale getirilmiş ve tabakalar arası bağlar mekanik olarak güçlendirilmiştir. Kalınlıkları 120 ile 470 mikrometre arasında değişen nanokompozit filmlerin elektriksel dirençleri en düşük 8.45 Ω , elektriksel iletkenlikleri en yüksek 11.82 S/m ve kesit alanına bağlı spesifik (özgül) iletkenliği ise en fazla 641.71 S/m olarak ölçülmüştür. En yüksek EMI koruyucu etkinliği CNT-BN-CNT sandviç yapısı içeren karbon fiber polimer kompozit grubu için 40.5 dB, en yüksek spesifik (kesit alanına bağlı) EMI koruyucu etkinliği 149.95 dB/mm olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, özgün bir mühendislik yaklaşımı sunan karbon fiber takviyeli polimer nanokompozit malzemenin, stratejik öneme sahip savunma, havacılık ve uzay teknolojileri başta olmak üzere elektronik, haberleşme, otomotiv ve sağlık sektöründe elektromanyetik koruma gerektiren uygulamalar için yüksek potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bor nitrür, Elektromanyetik koruyucu etkinliği, Fonksiyonel, Grafen, Karbon nanotüp, Polimer nanokompozit, Selüloz

ABSTRACT

Ph.D THESIS

DESIGN AND FABRICATION OF HYBRID COMPOSITE MATERIALS FOR ENHANCED ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE SHIELDING EFFECTIVENESS

Osman Fatih DAMNALI

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

2025, 134 Pages

Jury

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

Prof. Dr. Memduh KARA

Doç. Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYRICI

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf UZUN

In recent years, rapid technological advancements have led to a substantial increase in the number of electronic devices used in daily life, which has consequently elevated the intensity and density of electromagnetic (EM) waves in the environment. This phenomenon, referred to as electromagnetic pollution, adversely affects the performance of electronic systems and poses potential risks to human health. Therefore, the design and fabrication of materials capable of mitigating EM waves hold strategic significance. This thesis aims to develop a lightweight, electrically conductive, and high-performance multifunctional polymer composite with enhanced electromagnetic shielding effectiveness (EMI SE), fabricated via the vacuum infusion method. To improve the in-plane electrical conductivity (EC) and EMI SE of recycled cellulosic papers, three types of nanocomposite films were designed by incorporating cellulose fiber-supported carbon nanotubes (CNT), graphene (GR), and boron nitride (BN) nanoparticles: CNT film, BN film, and CNT/GR hybrid film. Using the scalable vacuum filtration process, flexible and conductive nanocomposite films were produced in various configurations by adjusting the volume and weight percentage of the nanofillers. These films were assembled into a three-layer sandwich structure, positioned between carbon fiber fabrics, and integrated with epoxy resin via vacuum infusion and hand lay-up techniques to achieve resin-rich matrices and mechanically reinforced interlayer bonds. The resulting nanocomposite films exhibited thicknesses ranging from 120 to 470 μm , with a minimum electrical resistance of 8.45 Ω , a maximum electrical conductivity of 11.82 S/m, and a highest specific conductivity (cross-sectional) of 641.71 S/m. The maximum EMI SE was recorded at 40.5 dB for the carbon fiber-reinforced polymer composite containing the CNT–BN–CNT sandwich configuration, while the highest specific EMI SE reached 149.95 dB/mm. These findings highlight the strong potential of the developed carbon fiber-reinforced polymer nanocomposite—based on an innovative engineering approach—for applications requiring electromagnetic protection in strategic sectors such as defense, aerospace, and space technologies, as well as in electronics, telecommunications, automotive, and healthcare industries.

Keywords: Boron nitride, Carbon nanotube, Cellulose, Electromagnetic interference shielding, Functionality, Graphene, , Polymer nanocomposite

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, vakum infüzyon yöntemi yoluyla üretilmiş ve tasarlanmış çok fonksiyonlu, elektriksel iletken ve elektromanyetik koruyucu etkinliğe sahip hafif bir polimer kompozit malzeme geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Doktora çalışmalarım boyunca, birikimlerini ve tecrübelerini paylaşan, yardımını, manevi desteğini, ilgisini ve sabrını esirgemeyen çok kıymetli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN'a çok teşekkür ederim.

Çalışmalarımın her aşamasında bana ışık olan ve hiçbir zaman yardımlarını benden esirgemeyen, akademik bakış açımı geliştirmemde ve araştırmamı derinleştirmemde büyük katkı sağlayan ikinci danışman hocam Sayın Doç. Dr. Volkan ESKİZEYBEK'e minnet ve şükranlarımı sunarım.

Bu zorlu ve yoğun süreçte gösterdiği sabır, anlayış ve manevi desteğiyle her zaman yanımda olan sevgili eşim Merve DAMNALI'ya; varlığıyla hayatıma neşe ve anlam katan canım kızım Elif Ada'ya; fedakârlıkları, duaları ve koşulsuz sevgileriyle daima arkamda duran sevgili anneme ve babama; son olarak, bana her zaman destek olan tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Osman Fatih DAMNALI
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER TABLOSU	x
ÇİZELGELER TABLOSU.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Elektromanyetik Dalgalar	5
2.1.1. Elektromanyetik dalgaların özellikleri.....	6
2.1.2. Elektromanyetik spektrum	7
2.1.3. Elektromanyetik dalga davranışı	12
2.2. Elektromanyetik Koruyucu Etkinliği	15
2.3. Elektromanyetik Koruyucu Etkinliğinin Hesaplanması	15
2.4. Elektriksel Geçirgenlik	19
2.4.1. Elektriksel geçirgenlik mekanizmaları	21
2.4.2. Frekansa bağlı geçirgenlik davranışı	21
2.4.3. Karbon nanotüp, grafen ve bor nitrid nanoparçacıkların geçirgenlik davranışları.....	21
2.5. Elektromanyetik Koruyucu Malzemeler.....	22
2.5.1. İletken malzemeler.....	22
2.5.2. Manyetik malzemeler	22
2.5.3. Dielektrik malzemeler.....	22
2.5.4. Kompozit malzemeler.....	23
2.5.5. Metamalzemeler.....	23
2.5.6. İyonize malzemeler	23
2.6. Elektromanyetik Koruyucu Etkinliği İle İlgili Literatür Çalışmaları	23
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	28
3.1. Kullanılan Malzemeler	29
3.2. Fonksiyonel Nanokompozit Film Üretim Prosesi	30
3.2.1. Çözelti hazırlama	31
3.2.2. Vakum filtrasyon yöntemi	34
3.2.3. Kurutma işlemi	34
3.2.4. Fonksiyonel nanokompozit filmlerin kalınlık kontrolü	35
3.3. Optimum Parametrelerin Belirlenmesi için FNK Film Üretimleri.....	36
3.3.1. Birinci grup: CNT ve hibrit FNK filmler.....	36

3.3.2. İkinci grup: İki tabakalı ve üç tabakalı CNT ve grafen FNK filmler	37
3.3.3. Üçüncü grup: Fonksiyonelleşmiş ve doplanmış takviye içeren FNK filmler	39
3.3.4. Dördüncü grup: Üç tabakalı CNT-BN-CNT yapılı FNK filmler	39
3.3.5. Beşinci grup: Cam elyaf ve karbon fiber takviyeli polimer kompozit yapıların tasarımı ve üretimi	40
3.4. Fonksiyonel Nanokompozit Filmlerin Kalınlık Ölçümleri.....	43
3.5. Karakterizasyon	44
3.5.1. Yapısal karakterizasyon	45
3.5.1.1. X-ışını kırınımı	45
3.5.1.2. Raman spektroskopisi	46
3.5.2. Morfolojik karakterizasyon.....	47
3.5.2.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	47
3.5.3. Elektriksel karakterizasyon.....	48
3.5.4. Elektromanyetik karakterizasyon	50
3.5.5. Termal iletkenlik karakterizasyonu	53
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	55
4.1. FNK Filmlerin Yapısal Karakterizasyonu	55
4.1.1. X-ray kırınımı	55
4.1.2. Raman spektroskopisi	58
4.2. FNK Filmlerin Morfolojik Karakterizasyonu.....	61
4.3. Fonksiyonel Nanokompozit Filmlerin Kalınlık Hesaplamaları.....	64
4.3.1. Birinci grup: CNT ve hibrit FNK filmlerin kalınlık hesaplamaları	66
4.3.2. İkinci grup: İki ve üç tabakalı FNK filmlerin kalınlık hesaplamaları.....	70
4.3.3. Üçüncü grup: Fonksiyonelleşmiş ve doplanmış takviye içeren FNK filmlerin kalınlık hesaplamaları	72
4.3.4. Dördüncü grup: Üç tabakalı CNT-BN-CNT yapılı FNK filmlerin kalınlık hesaplamaları	74
4.4. Fonksiyonel Nanokompozit Filmlerin Elektriksel İletkenlik Hesaplamaları	76
4.4.1. Birinci grup: CNT ve hibrit FNK filmlerin elektriksel direnç hesaplamaları	77
4.4.2. İkinci grup: İki ve üç tabakalı FNK filmlerin elektriksel direnç hesaplamaları	82
4.4.3. Üçüncü grup: Fonksiyonelleşmiş ve doplanmış takviye içeren FNK filmlerin elektriksel iletkenlik hesaplamaları	84
4.4.4. Dördüncü grup: Üç tabakalı CNT-BN-CNT yapılı FNK filmlerin elektriksel iletkenlik hesaplamaları	90
4.5. Fonksiyonel Nanokompozit Filmlerin Elektromanyetik Koruyucu Etkinliği Hesaplamaları	93
4.5.1. Birinci grup: CNT ve hibrit FNK filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinliği hesaplamaları	93
4.5.2. İkinci grup: 50 ml hacim ile üretilmiş FNK filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinliği hesaplamaları.....	96
4.5.3. Üçüncü grup: Fonksiyonelleşmiş ve doplanmış takviye içeren FNK filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinliği hesaplamaları.....	99
4.5.4. Dördüncü grup: Üç tabakalı CNT-BN-CNT yapılı FNK filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinliği hesaplamaları.....	103

4.5.5. Beşinci grup: Cam elyaf ve karbon fiber takviyeli polimer kompozit yapıların elektromanyetik koruyucu etkinliği hesaplamaları.....	106
4.6. Saf Selüloz ve BN Nano Takviyeli Filmlerin Termal İletkenlik Verileri.....	109
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	112
5.1 Sonuçlar	112
5.2. Öneriler	116
6. KAYNAKLAR	118



ŞEKİLLER TABLOSU

Şekil 2.1. Elektromanyetik dalganın şematik gösterimi	5
Şekil 2.2. Elektromanyetik spektrum	8
Şekil 2.3. Elektromanyetik spektrumun, görünür ve ultraviyole bölgelerini içeren optik spektrumu vurgulayan bölgeleri	12
Şekil 2.4. Elektromanyetik dalgaların davranışı.....	13
Şekil 2.5. Karbon nanotüp için tipik bir Cole-Cole yarım dairesi örneği.....	20
Şekil 2.6. Karbon fiber takviyeli polimer kompozit malzeme	27
Şekil 3.1. Fonksiyonel nanokompozit çözeltilerin hazırlanması	32
Şekil 3.2. Vakum filtrasyon işlemi	34
Şekil 3.3. Nanokompozit filmlerde haddeleme işlemi	35
Şekil 3.4. Laminasyon cihazı ile yönlü haddeleme işlemi	36
Şekil 3.5. Farklı parametrelerde üretilen FNK filmlerin isimlendirilmesi	37
Şekil 3.6. İki ve üç tabakalı olarak üretilen FNK filmlerin şematik resmi.....	38
Şekil 3.7. İki tabakalı fonksiyonel nanokompozit filmlerin isimlendirilmesi	38
Şekil 3.8. Fonksiyonelleştirilmiş ve doplanmış nano takviyeler içeren FNK filmler	39
Şekil 3.9. CNT-BN-CNT yapıları FNK filmler	40
Şekil 3.10. El yatırma (hand lay-up) yöntemiyle kompozit üretimi	41
Şekil 3.11. Vakum infüzyon yöntemi ile karbon fiber ve cam elyaf takviyeli kompozit üretimi	42
Şekil 3.12. Karbon fiber ve cam elyaf kumaşlar kullanılarak üretilen kompozit yapılar.....	43
Şekil 3.13. FNK filmlerin mikrometre ile kalınlık ölçümü	44
Şekil 3.14. FNK filmlerin multimetre ile direnç ölçümleri	48
Şekil 3.15. FNK filmlerin iki uçlu direnç ölçüm numunelerinin hazırlanması	49
Şekil 3.16. FNK filmlerin iki uçlu direnç ölçüm cihazına bağlanması	49
Şekil 3.17. İki uçlu (two probe) direnç ölçüm cihazı	50
Şekil 3.18. Elektromanyetik koruyucu etkinlik ölçüm cihazı	51
Şekil 3.19. CNT-BN-CNT hibrit ara tabakalı karbon fiber ve cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin elektromanyetik koruyucu etkinliklerinin ölçümü.....	52
Şekil 3.20. Saf selüloz ve BN katkılı selüloz filmlerin termal iletkenlik ölçümü deney seti.....	54
Şekil 4.1. Dört farklı nano takviye ve referans numune ile hazırlanmış FNK'ların XRD grafiği. a) Saf selüloz, b) CNT, c) GR, d) HİB, e) BN	56
Şekil 4.2. Dört farklı nano takviye ve referans numune ile hazırlanmış FNK'ların karşılaştırmalı XRD grafiği	57
Şekil 4.3. Dört farklı nano takviye ve referans numune ile hazırlanmış FNK'ların raman grafiği. a) Saf selüloz, b) CNT, c) GR, d) HİB, e) BN	60
Şekil 4.4. Tüm FNK filmlerine ait raman spektroskopisinin karşılaştırılması.....	61
Şekil 4.5. Matris malzemesi selüloz fiber ve nano boyutlu takviyelerin SEM görüntüleri. a) saf selüloz, b) CNT, c) GR, d) BN.....	62
Şekil 4.6. CNT ve Grafenin selüloz matris içerisindeki dağılımlarının karşılaştırılması. a)CNT, b)GR	64
Şekil 4.7. Birinci grup FNK filmlerin kalınlık değerlerinin karşılaştırılması	66
Şekil 4.8. Haddeleme işleminin optimizasyonu için üretilen FNK filmler	68
Şekil 4.9. Haddeleme öncesi ve sonrası FNK'ların kalınlık değişimleri.....	69
Şekil 4.10. İkinci grup FNK filmlerin kalınlık değerlerinin karşılaştırılması	71

Şekil 4.11. Üçüncü grup FNK filmlerin kalınlık değerlerinin karşılaştırılması	74
Şekil 4.12. Dördüncü grup FNK filmlerin kalınlık değerlerinin karşılaştırılması.....	76
Şekil 4.13. Birinci grup FNK filmlerin direnç değerlerinin karşılaştırılması.....	79
Şekil 4.14. Haddelme öncesi ve sonrası FNK'ların elektriksel direnç değişimleri	81
Şekil 4.15. İkinci grup FNK filmlerin direnç değerlerinin karşılaştırılması	83
Şekil 4.16. Üçüncü grup FNK filmlerin direnç değerlerinin karşılaştırılması (multimetre)	85
Şekil 4.17. FNK filmlerinin kesit alanı hesaplaması	88
Şekil 4.18. Üçüncü grup FNK filmlerin elektriksel iletkenlik değerlerinin karşılaştırılması.....	89
Şekil 4.19. Üçüncü grup FNK filmlerin spesifik elektriksel iletkenlik değerlerinin karşılaştırılması	89
Şekil 4.20. Dördüncü grup FNK filmlerin elektriksel iletkenlik değerlerinin karşılaştırılması.....	91
Şekil 4.21. Dördüncü grup FNK filmlerin spesifik elektriksel iletkenlik değerlerinin karşılaştırılması	92
Şekil 4.22. Birinci grup FNK filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinlik değerlerinin karşılaştırılması.....	95
Şekil 4. 23. İkinci grup FNK filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinlik değerlerinin karşılaştırılması.....	97
Şekil 4. 24. Üçüncü grup FNK filmlerin ortalama elektromanyetik koruyucu etkinlik değerlerinin karşılaştırılması.....	100
Şekil 4.25. Üçüncü grup FNK filmlerin en yüksek elektromanyetik koruyucu etkinlik değerlerinin karşılaştırılması.....	101
Şekil 4.26. Üçüncü grup FNK filmlerin spesifik elektromanyetik koruyucu etkinlik değerlerinin karşılaştırılması.....	102
Şekil 4.27. Dördüncü grup FNK filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinlik değerlerinin karşılaştırılması.....	104
Şekil 4.28. Dördüncü grup FNK filmlerin spesifik elektromanyetik koruyucu etkinlik değerlerinin karşılaştırılması.....	105
Şekil 4.29. Karbon fiber ve cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin ortalama ve en yüksek elektromanyetik korucu etkinlik değerlerinin karşılaştırılması	108
Şekil 4.30. Saf selüloz ve BN filmlerin her iki yüzeylerinin zamana bağlı ısınma ve soğuma değerleri.....	110

ÇİZELGELER TABLOSU

Çizelge 3.1. Tez çalışmasında uygulanan çalışma paketleri ve alt iş paketleri	29
Çizelge 4.1. Birinci grup FNK filmlerin kalınlık değerleri	66
Çizelge 4.2. Haddeme öncesi FNK filmlerin kalınlıkları	68
Çizelge 4.3. Haddeme sonrası FNK filmlerin kalınlıkları	68
Çizelge 4.4. İkinci grup FNK filmlerin kalınlık değerleri	71
Çizelge 4.5. Üçüncü grup FNK filmlerin kalınlık değerleri	73
Çizelge 4.6. Dördüncü grup CNT-BN-CNT yapıları FNK filmlerin kalınlık değerleri	75
Çizelge 4.7. Birinci grup FNK filmlerin direnç değerleri (Ω)	78
Çizelge 4.8. Haddeme öncesi FNK filmlerin elektriksel dirençleri	80
Çizelge 4.9. Haddeme sonrası FNK filmlerin elektriksel dirençleri	80
Çizelge 4.10. İkinci grup FNK filmlerin elektriksel dirençleri	82
Çizelge 4.12. Üçüncü grup FNK filmlerin direnç ölçümleri (multimetre)	84
Çizelge 4.13. Üçüncü grup FNK filmlerin direnç ölçümleri (iki problu ölçüm metodu)	87
Çizelge 4.14. Üçüncü grup FNK filmlerin kalınlığa bağlı elektriksel iletkenlik değerlerin hesaplanması	88
Çizelge 4.15. Dördüncü grup FNK filmlerin kalınlığa bağlı elektriksel iletkenlik değerlerin hesaplanması	90
Çizelge 4.16. Birinci grup FNK filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinlik değerlerinin hesaplanması	94
Çizelge 4.17. İkinci grup FNK filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinlik değerlerinin hesaplanması	97
Çizelge 4.18. Üçüncü grup FNK filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinlik değerleri	99
Çizelge 4.19. Üçüncü grup FNK filmlerin spesifik elektromanyetik koruyucu etkinlik değerleri	101
Çizelge 4.20. Dördüncü grup FNK filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinlik değerlerinin kalınlık faktörüne bağlı olarak karşılaştırılması	103
Çizelge 4.21. Karbon fiber ve cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin ortalama, en yüksek ve spesifik elektromanyetik koruyucu etkinlik değerleri	107
Çizelge 4.22. Saf selüloz ve BN filmlerin iki yüzeylerinin ısınma ve soğuma değerleri	109

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

V	: Elektromanyetik Dalganın Işık Hızı
c	: Işık hızı (300.000 km/sa)
n	: Kırılma İndisi
f	: Elektromanyetik Dalganın Frekansı
λ	: Elektromanyetik Dalganın Dalga Boyu
E	: Elektromanyetik Dalganın Enerjisi
h	: Planck Sabiti
Ag	: Gümüş
Cu	: Bakır
Al	: Alüminyum
Fe	: Demir
Ni	: Nikel
dB	: Desibel
P	: Dalga Gücü
H	: Manyetik Alan
Z_i	: Gelen Elektromanyetik Dalganın Empedansı
Z_s	: Malzemenin Empedansı
σ	: Elektriksel İletkenlik
μ	: Manyetik Geçirgenlik
δ	: Derinlik Mesafesi
A_{eff}	: Absorpsiyon Fraksiyonu
wt	: Yüzde Ağırlık

Kısaltmalar

EMD	: Elektromanyetik Dalga
EMI	: Elektromanyetik Girişim
CPC	: İletken Polimer Kompozit
CNT	: Karbon Nanotüp
CNTF	: Karbon Nanotüp Fiber
EMI SE	: Elektromanyetik Koruyucu Etkinliği
EC	: Elektriksel İletkenlik
TC	: Termal İletkenlik
GSE	: Göstergelme Etkinliği
SNA	: Skaler Ağ Analizörü
VNA	: Vektörel Ağ Analizörü
PNC	: Polimer Nanokompozit
TPU	: Termoplastik Poliüretan
GPC	: Grafen Polimer Kompozit
BN	: Bor Nitrür
GR	: Grafen
NMP	: N Metil Prolidon
FNK	: Fonksiyonel Nanokompozit
PVA	: Poli Vinil Alkol

1. GİRİŞ

Elektromanyetik alanlar, elektriksel ve manyetik bileşenlerin birbirleriyle etkileşime girerek oluşturduğu dalgalardır. Bu dalgalar, modern teknolojilerin neredeyse her alanında yer almakta olup; iletişimden tıbbi alanlara, savunma sanayinden havacılık ve uzaya kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Elektriksel ve elektronik cihazlar, telsiz iletişim sistemleri, mobil telefonlar, bilgisayarlar, uydu yayınları, navigasyon sistemleri ve Wi-Fi teknolojileri gibi teknolojiler, her gün karşılaştığımız ve kullandığımız elektromanyetik dalga oluşturan cihazlara örneklerdir (Zhang ve ark., 2024).

Teknolojik gelişmelerin ve buna bağlı olarak elektromanyetik dalga yayan cihazların sayısının hızla artmasıyla birlikte, elektromanyetik alanlar etrafımızda yayılmakta ve bu durum, elektromanyetik kirlilik olarak tanımlanmaktadır (Gao ve ark., 2024) Elektromanyetik (EM) dalgalar, elektronik cihazların sorunsuz çalışması için gerekli olsa da çevrede ve uzayda radyasyon birikimine neden olmaktadır. EM kirliliğinin artışı; çevre, sağlık ve diğer elektronik cihazların doğru bir şekilde çalışması üzerinde olumsuz etkiler yaratabilecek potansiyele sahiptir. Bununla birlikte EM etkileşim, elektromanyetik bozulmalar nedeniyle elektronik sistemlerin, cihazların ve ekipmanların komşu elektronik cihazlarla etkileşime girerek ticari ve askeri amaçlar için kullanılan elektronik cihazların performansının düşmesine ve arızalanmasına yol açabilir (Kumari ve ark., 2024; Yun ve ark., 2020). Bu sebeple, uçaklara binmeden önce mobil telefonların kapatılması istenir. Çünkü bu, hassas bileşenlerin arızalanmasına veya hava trafik kontrolü ile iletişim sinyalinin kesilmesine neden olabilir. Bu EM yayılımı, sadece hassas elektronik bileşenlere zarar vermekle kalmaz, aynı zamanda insan sağlığı ve çevre üzerinde ciddi etkiler yaratır. EM enerji, vücut hücrelerine yayılabilir. Bu da vücut sıcaklığının yükselmesine ve dolaylı olarak sağlık sorunlarına yol açabilir. Pek çok çalışma, elektromanyetik alanların biyolojik sistemlerdeki etkilerini araştırmış, bunun sonucunda genetik mutasyonlar, hücresel stres, baş ağrıları ve diğer sağlık sorunlarının ortaya çıkabileceği bildirilmiştir (Xiang ve ark., 2022). Ek olarak, elektromanyetik radyasyon kirliliği küresel bir çevresel sorun haline gelmiş ve etkilerini kontrol altına almak için acil önlemler gerektirmektedir. Bu sorunlarla mücadelede EM koruyucu malzemelerinin geliştirilmesi, en etkili stratejilerden biri haline gelmiştir (Yongqiang ve ark., 2022; Song ve ark., 2022). Bu bağlamda, elektromanyetik koruma yöntemleri ve

teknolojileri, bu alanlara karşı korunmanın sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır.

Elektromanyetik teorilere göre, EM koruma mekanizmasının en önemli yöntemi, radyasyonun malzeme yüzeyinde yansıtılması ve dalga enerjisinin malzeme içerisinde dağıtılmasıdır. Yüksek elektriksel iletkenliğe sahip malzemeler, genellikle daha fazla yansıma ve enerji kaybı göstererek daha iyi koruma performansı sergilemektedir. Yansıma, metal gibi iletken malzemelerin yüzeyinde, serbest yük taşıyıcıları (elektronlar veya delikler) tarafından gerçekleşir. Bu serbest yük taşıyıcıları, gelen elektromanyetik dalganın elektrik vektörü (E) ile etkileşime girerek EM dalgaları geri yansıtır (Zhou ve ark., 2018)

Gelişmiş elektronik sistemler için kullanılan EMI koruyucu malzemeler genellikle şu özelliklere sahip olmalıdır:

(i) Düşük yoğunluk: Elektronik cihazların hafif ve taşınabilir yapısını mümkün kılar.

(ii) İşlenebilirlik ve esneklik: Bu özellikler, malzemeleri esnek ve giyilebilir teknolojilerde önemli ölçüde çok yönlü hale getirir.

(iii) Fiziksel ve kimyasal dayanıklılık: Malzemenin performansını çeşitli ve potansiyel olarak zorlu ortamlarda korumasını sağlar (korozyona karşı direnç) (Nguyen ve ark., 2024)

Havacılık, otomotiv ve uçak endüstrisi gibi kritik sektörlerde istenmeyen elektromanyetik radyasyonu etkili bir şekilde azaltması için hafiflik, esneklik ve çevresel stabilite gibi temel özellikleri koruyarak yüksek performans standartlarını karşılayabilen malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu temel özelliklerin yanı sıra, bu malzemelerin yüksek termal iletkenlik, hızlı elektriksel yanıt ve etkili Joule ısıtma performansı gibi çok fonksiyonlu özelliklere sahip olması beklentisi de giderek artmaktadır (Yali Zhang ve Gu, 2022; Cheng ve diğerleri, 2022). Bu nedenle, çok fonksiyonlu yetenekleri entegre eden gelişmiş EM koruma malzemelerinin geliştirilmesi, araştırma ve yenilik alanında kritik bir odak noktası haline gelmiştir.

Geleneksel olarak, Fe, Ag, Ni ve Cu gibi metaller, yüksek elektriksel iletkenlikleri sayesinde elektromanyetik dalgaların etkili şekilde yansıtılmasını sağlayarak EM koruyucu malzemeleri olarak kullanılmaktadır. Özellikle EM dalgaların frekansı arttıkça, belirli bir koruma etkinliği seviyesi için gereken duvar (malzeme) kalınlığı giderek daha ince hale gelir. Gerekli kalınlık, döküm sınırlarını ve yapısal bütünlük gereksinimlerini aşar. Bu nedenle metalik elementler, metal-polimer kompozitler ve metal-filmler gibi

ultra ince metal bazlı koruma malzemeleri, kalınlık gereksinimini karşılamak için geniş bir şekilde araştırılmıştır. Ancak metaller, dūřuk esneklik, korozyon ve oksidasyona yatkınlık ve yūksək yoğunluk gibi sınırlamalara sahiptir. bu özellikler metalleri hafif ve esnek akıllı elektronik cihazlarda, havacılık ve savunma sanayi alanlarında kullanımını kısıtlamaktadır (Yali Zhang ve Gu, 2022).

Metallerin bu sınırlamaları nedeniyle araştırmacılar, hafiflik, esneklik, dūřuk yoğunluk, işlenme kolaylığı, kimyasal ve termal kararlılık ve en önemlisi ölçeklenebilirlik gibi özelliklerinden dolayı EMI (elektromanyetik girişim) koruma uygulamaları için polimerlere odaklanmıştır. Polimerler genellikle EMI dalgalarının yüzeye nüfuz etmesine olanak tanır. Bu da metallerde meydana gelen yansıma yerine emilim fenomeninin gerçekteşmesini sağlar (Lee ve ark., 2017).

Geleneksel metal koruma malzemelerine (Yi Li ve ark., 2021) kıyasla, ağır ve korozyona karşı hassas olan bu malzemelerin yerine, metal dolgular (Jia ve diğerleri, 2020; Shu, Cao ve Cao, 2021), diyamanyetik malzemeler (Shu ve ark., 2021) ve karbon bazlı malzemeler (Abbasi ve ark., Velasco, 2019) içeren iletken malzemelerle güçlendirilmiş polimer matrisli kompozitler, esneklikleri, kolay işlenebilirlikleri, mükemmel kararlılıkları ve korozyona dayanıklılık özellikleri (Liu ve ark., 2021) sayesinde bilimsel ve endüstriyel toplulukların büyük ilgisini çekmiştir. Özellikle karbon bazlı malzemelerle güçlendirilmiş CPC'ler (İletken Polimer Kompozitler), yüksek performanslı EMI gölgeleme malzemelerinin geliştirilmesi için umut verici bir yaklaşım sunmaktadır. Bu malzemeler, geleneksel metallerin sınırlamalarını aşmakla kalmaz, aynı zamanda modern esnek ve giyilebilir elektronik cihazların gereksinimlerini karşılar. CPC'lerin gölgeleme performansını artırmak ve hafif, sürdürülebilir EMI gölgeleme çözümlerine yönelik artan talebi karşılamak için daha fazla araştırma ve yenilik büyük önem taşımaktadır. Bunlar arasında, karbon nanomalzemeler, hafiflikleri, yüksek iletkenlikleri, kimyasal dayanıklılıkları ve ayarlanabilir dielektrik özellikleri nedeniyle EMI (Elektromanyetik Girişim) koruma malzemeleri alanında büyük ilgi görmektedir. Ancak zayıf mekanik ve termal özelliklere sahip olmaları, pratik kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır (Liu ve ark., 2021). Bu bağlamda, karbon nanotüp (CNT) filmler ve bunların kompozitleri, mükemmel iletkenlikleri, hafiflikleri, esneklikleri ve kimyasal olarak inert olmaları nedeniyle esnek ve ultra ince EMI koruma malzemeleri için en iyi adaylar olarak kabul edilmektedir (Gupta ve Tai, 2019; Micheli ve ark., 2010).

Bu tez çalışmasında, vakum infüzyon yöntemiyle tasarlanıp üretilen, elektriksel iletkenlik ve elektromanyetik koruma etkinliğine sahip hafif, çok fonksiyonlu bir

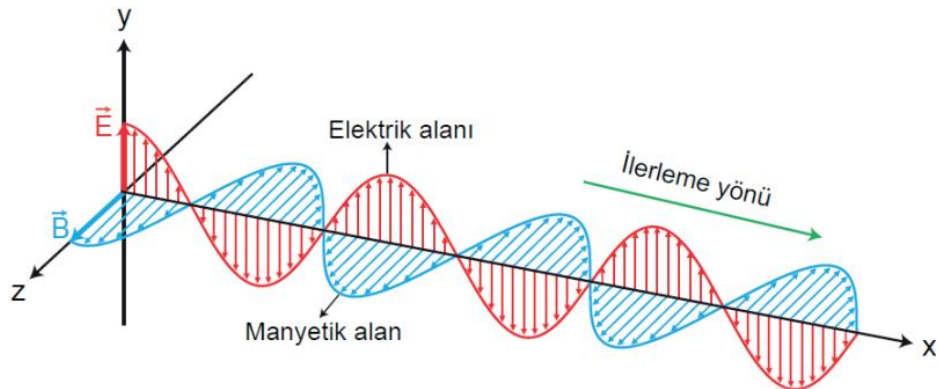
kompozit malzeme geliştirmeyi amaçlanmaktadır. Çalışma, EMI (Elektromanyetik Girişim) koruma özelliklerini çok işlevsellik ve hafif tasarım avantajlarıyla birleştirerek, savunma, havacılık ve uzay teknolojisi gibi ulusların gelecekteki küresel etkisini belirleyecek stratejik olarak önemli sektörlerin maliyet, zaman ve performans beklentilerini karşılamayı hedeflemektedir. Geri dönüştürülmüş selülozik kâğıtların düzlemsel elektrik iletkenliğini (EC) ve elektromanyetik koruma etkinliğinin (EMI SE) geliştirilmesi için farklı kompozisyonlara sahip tasarımlar oluşturulmuştur. Bu tasarımlar, çok işlevli mikro kalınlıktaki selüloz liflerin, karbon nanotüp, grafen ile doplanmış karbon nanotüp, fonksiyonelleştirilmiş karbon nanotüp ve grafen gibi nanopartiküllerle güçlendirilmesiyle elde edilen filmler, EM koruma sağlayan katmanlar olarak işlev görmektedir. Ölçeklenebilir süreçlere uygun vakum infüzyon yöntemi kullanılarak, her bir katman için iki farklı hacim ve üç farklı ağırlık yüzdesinde karbon tabanlı takviyeler ve bor nitrür (BN) ihtiva eden nanokompozit filmler üretilmiş ve çok fonksiyonlu tabakalı nanokompozit yapı elde edilmiştir. Kalınlıkları 120 ile 470 mikrometre arasında değişen nanokompozit filmlerin elektriksel dirençleri en düşük 8.45 Ω , elektriksel iletkenlikleri en yüksek 11.82 S/m ve kesit alanına bağlı spesifik (özgül) elektriksel iletkenliği ise en fazla 641.71 S/m olarak ölçülmüştür. En yüksek EMI koruyucu etkinliği CNT-BN-CNT sandviç yapısı içeren karbon fiber polimer kompozit grubu için 40.5 dB, en yüksek spesifik (kesit alanına bağlı) EMI koruyucu etkinliği 149.95 dB/mm olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, özđün bir mühendislik yaklaşımı sunan karbon fiber takviyeli polimer nanokompozit malzemenin, stratejik öneme sahip savunma, havacılık ve uzay teknolojileri başta olmak üzere elektronik, haberleşme, otomotiv ve sağlık sektöründe elektromanyetik koruma gerektiren uygulamalar için yüksek potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Elektromanyetik Dalgalar

Elektromanyetik dalgalar, elektrik ve manyetik alanların birbiriyle dik açılar yaparak salınımı sonucu meydana gelen ve enerji taşıyan dalgalardır. Bu dalgalar, elektriksel ve manyetik alanların bir arada hareket etmesiyle oluşur ve bir ortama ihtiyaç duymadan boşlukta ışık hızında yayılabilir. Yüklü parçacıkların hızlandırılması veya enerji seviyelerindeki değişiklikler, elektromanyetik dalgaların oluşumunun temel nedenlerindedir. Elektromanyetik dalgalar hem dalga hem de parçacık özellikleri gösterebilir. Bu ikili elektromanyetik dalgaların hem enerji taşıyan bir dalga gibi hem de foton adı verilen enerji paketleri halinde hareket etmesine olanak sağlar. Elektromanyetik dalgalar uzayda hareket ettiğinde, enerji kaybetmez. Ancak bir maddeye çarptığında enerji kaybeder, yansıtılabilir, kırılabilir, bükülebilir veya madde tarafından emilip ısı, elektrik gibi diğer enerji türlerine dönüştürülebilir (Micheli ve ark., 2010).

Bir elektromanyetik dalga, elektrik yüklü bir parçacık titreştiğinde üretilir. Titreşen yüklü bir parçacık, çevresindeki elektrik alanın da titreşmesine neden olur. Titreşen bir elektrik alan, dik olarak titreşen bir manyetik alan oluşturur. Benzer şekilde, titreşen bir manyetik alan, yüklü parçacık üzerinde etki ederek dik olarak bir elektrik alanı oluşturur. Bu iki titreşen alan türü (elektrik ve manyetik alanlar) Şekil 2.1’de görüldüğü gibi dik (90 derece) açıyla birbirine etki ederek elektromanyetik dalgayı oluşturur. Elektromanyetik dalga, her iki alana da dik olarak hareket eder. Bu nedenle elektromanyetik dalga bir enine dalgadır. Elektromanyetik dalgalar ne elektrik alan ne de manyetik alandır (Terms, 2014).



Şekil 2.1. Elektromanyetik dalganın şematik gösterimi

Elektromanyetik dalgaların kaynakları doğal kaynaklar ve yapay kaynaklar olmak üzere 2 çeşittir. Elektromanyetik fırtınalar ve güneş radyasyonu gibi doğal fenomenlerdir. Ancak çoğu durumda, elektromanyetik dalgalar diğer elektronik ekipman veya sistemlerden ya da belirli bir cihaz içindeki elektronik bileşenlerin birbirleriyle etkileşimlerinden kaynaklanmaktadır (Leysler ve Wong, 2009). Teknolojinin son yıllarda göstermiş olduğu gelişmelere bağlı olarak kullanılan elektronik cihazların sayısındaki artış da elektromanyetik dalga yayılımını önemli ölçüde arttırmaktadır. Elektromanyetik kirliliğe neden olan yapay kaynaklar, düşük ve yüksek frekansta elektromanyetik dalgalar yayarak çevremizde sürekli bir elektromanyetik alan oluşturan cihazlar veya elektronik bileşenlerdir. Bu cihazların çoğu günlük yaşamın vazgeçilmez parçalarıdır. Bu cihazları iletişim ve bağlantı, ev aletleri, ofis ekipmanları, aydınlatma sistemleri, eğlence ve multimedya cihazları, taşınabilir cihazlar ve sağlık ekipmanları olarak sıralayabiliriz.

2.1.1. Elektromanyetik dalgaların özellikleri

Bir elektromanyetik dalga, elektrik yüklü bir parçacık titreştiğinde üretilir. Titreşen yüklü bir parçacık, çevresindeki elektrik alanın da titreşmesine neden olur. Titreşen bir elektrik alan, dik olarak titreşen bir manyetik alan oluşturur. Benzer şekilde, titreşen bir manyetik alan, yüklü parçacık üzerinde etki ederek dik olarak bir elektrik alanı oluşturur. Bu iki titreşen alan türü (elektrik ve manyetik alanlar), dik (90 derece açıyla) birbirine etki ederek elektromanyetik dalgayı oluşturur. Elektromanyetik dalga, her iki alana da dik olarak hareket eder. Bu nedenle elektromanyetik dalga bir enine dalgadır. Elektrik ve manyetik alanların birbiriyle etkileşimi sayesinde ortaya çıkan bu dalgalar, geniş bir frekans aralığını kapsar (Terms, 2014). Elektromanyetik dalgaların temel özelliklerini şu şekilde sıralayabiliriz:

Hız: Elektromanyetik dalgalar, vakumda ışık hızında (yaklaşık 300.000 km/s) hareket eder. Ancak, bu hız, dalganın yayıldığı ortamın fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

Havanın içindeki hızı: Neredeyse vakumla aynıdır, yaklaşık olarak c (ışık hızı) değerindedir.

Kırılma indisi n olan bir ortamda hızı Denklem 1'de;

$$V = c/n \quad (1)$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada V elektromanyetik dalganın hızı, c ışık hızı, n kırılma indisidir.

Elektromanyetik dalgaların hızı, frekansından bağımsızdır ancak dalga boyu ortamda değişir.

Dalga Boyu ve Frekans: Bir elektromanyetik dalganın dalga boyu (λ), ardışık iki dalga tepesi veya çukuru arasındaki mesafedir. Frekans (f), dalganın bir saniyede yaptığı titreşim sayısını ifade eder. Dalga boyu, frekansla ters orantılıdır; yani frekans arttıkça dalga boyu kısalır (Denklem 2).

$$c = f \cdot \lambda \quad (2)$$

Burada c ışık hızı, f frekans ve λ dalga boyudur.

Enerji: Elektromanyetik dalgaların taşıdığı enerji (E), doğrudan frekanslarına bağlıdır. Daha yüksek frekansa sahip dalgalar daha fazla enerji taşır (Denklem 3).

$$E = h \cdot f \quad (3)$$

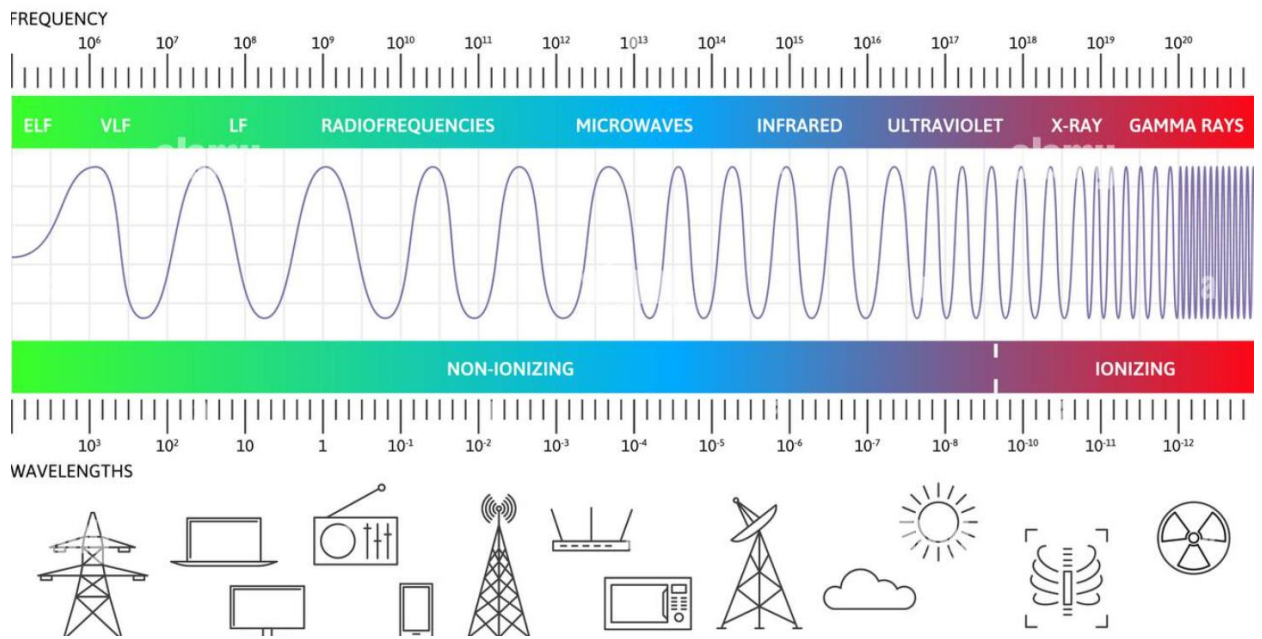
Burada E enerji, h Planck sabiti ve f dalga frekansıdır.

2.1.2. Elektromanyetik spektrum

Elektromanyetik spektrum, elektromanyetik radyasyonun en kısa dalga boyundan en uzun dalga boyuna kadar olan toplam dalga boyu aralığını kapsar. Bu dalga boyu aralığı, pratikte sıfırdan yakın sonsuzluğa kadar uzanır. Şekil 1'de gösterildiği gibi, radyo dalgaları, kızılötesi, görünür ışık, ultraviyole, X-ışınları ve gama ışınları gibi bölgelere geniş bir şekilde ayrılabilir. Bu bölme kesin değildir çünkü bir bölgeden diğerine geçiş kademeli olarak gerçekleşir. Bu durum Şekil 2.2'de şematik olarak gösterilmiştir ve burada görünür ve ultraviyole bölgeleri vurgulanmıştır. Işığın bu bölgelere ayrılması, aynı zamanda frekans fonksiyonu olarak da gösterilmiştir. Bu bölgelerdeki tüm elektromanyetik radyasyonların arasındaki tek farkın dalga boyu (ve frekans) olduğunu not etmek önemlidir. Farklı tanımlamalar, frekanslar arasındaki ilişki nedeniyle yapılır ve elektromanyetik radyasyonun etkileşime girebileceği çeşitli malzemelerdeki frekanslarla

bağlantılıdır. Örneğin, insan gözündeki görsel alıcılar, yalnızca 10^{14} ila 10^{15} s⁻¹ frekans aralığındaki elektromanyetik radyasyona (veya 400–700 nm) duyarlıdır, oysa X-ışınları, vücuttaki atom büyüklüğündeki özellikleri (0.1 nm) uyarmak için kullanılır (Ball, 2007).

Elektromanyetik spektrumun her bir bölgesi, farklı uygulama alanları için kullanılır ve her biri özel bir işlevi yerine getirir. Teknolojinin ilerlemesiyle, özellikle yüksek frekanslı bölgelere yönelik yeni uygulamalar artmakta, bununla birlikte spektrumun çeşitli kısımlarının korunması ve yönetilmesi ihtiyacı da ortaya çıkmaktadır (Terms, 2014)



Şekil 2.2. Elektromanyetik spektrum

2.1.2.1. Radyo dalgaları

Radyo dalgaları, elektromanyetik spektrumun düşük frekanslı ve uzun dalga boyuna sahip bir türüdür. Bu dalgalar, ışık ve kızılötesi gibi elektromanyetik dalgalarla aynı fiziksel prensiplere dayanır ancak enerjileri daha düşüktür. Dalga boyları kilometrelerce uzunluktan santimetrelere kadar olabilir. Bu dalgalar, elektrik yüklerinin hareketiyle meydana gelir ve frekanslarına bağlı olarak farklı uygulamalar için kullanılır.

Özellikleri: Frekans ve Dalga Boyu: Radyo dalgaları, çok düşük frekanslardan yüksek frekanslara kadar geniş bir aralığa yayılır. Dalga boyları, birkaç milimetreden binlerce kilometreye kadar değişebilir. Radyo dalgaları düşük enerji taşır. Bu nedenle, uzun mesafelerde bile yayılabilirler ve çevreye zarar vermezler.

Kullanım Alanları: Radyo ve televizyon yayınları, cep telefonları, Wi-Fi, Bluetooth, radar sistemleri ve uzay iletişimi (Heating, 2013).

2.1.2.2. Mikrodalgalar

Mikrodalgalar, elektromanyetik spektrumda radyo dalgaları ile kızılötesi ışınlar arasında yer alan bir dalga türüdür. Frekansları yaklaşık 300 MHz (megahertz) ile 300 GHz (gigahertz) arasında değişir ve dalga boyları milimetre ile bir metre arasında olabilir. Mikrodalgalar, özel olarak tasarlanmış elektronik cihazlar olan magnetronlar veya elektron vakum tüpleri (klystronlar) tarafından üretilir. Bu cihazlar, elektrik enerjisini mikrodalga frekanslarına dönüştürerek dalgaların yayılmasını sağlar.

Özellikleri: Mikrodalgaların dalga boyları oldukça kısadır, bu da onları küçük antenlerle verimli bir şekilde yayılabilir hale getirir. Yüksek frekansları sayesinde büyük miktarda veri taşıyabilirler. Kolaylıkla yönlendirilebilir ve dar bir demet halinde odaklanabilir. Bu özellik, özellikle radar ve haberleşme sistemlerinde büyük avantaj sağlar. Atmosferdeki su buharı ve yağmur tarafından emilebilir, bu nedenle sinyal kaybı yaşanabilir.

Kullanım alanları: Uydu haberleşmesi, cep telefonu ağları ve kablosuz internet (Wi-Fi) mikrodalga teknolojisine dayanır. Uçaklar, gemiler ve hava durumu tahminlerinde kullanılan radar sistemleri, mikrodalgalar aracılığıyla çalışır. Mikrodalga fırınlar, su moleküllerini titreştirerek yiyecekleri hızlı bir şekilde ısıtır (Kuşlu ve Bayramoğlu, 2002).

2.1.2.3. Kızılötesi

Kızılötesi ışınlar, elektromanyetik spektrumda görünür ışığın hemen altında, mikrodalgalardan hemen yukarıda yer alan bir radyasyon türüdür. İnsan gözü tarafından algılanamayan bu ışınlar, sıcaklık ve enerji yayılımı ile ilişkilidir. Kızılötesi ışınların dalga boyu yaklaşık 700 nanometreden (nm) 1 milimetreye (mm) kadar değişir.

Özellikleri: Kızılötesi ışınların frekansı 300 GHz ile 400 THz (terahertz) arasında değişir. Dalga boyları ise milimetre ve mikrometre (μm) arasında olabilir. Genellikle ısı radyasyonu olarak bilinir. Tüm sıcak cisimler, belirli bir derecede kızılötesi ışınım yayar. Belirli yüzeylerden yansiyabilir veya emilebilir. Bu özellik, termal kameralar ve uzaktan algılama sistemlerinde kullanılır.

Kullanım alanları: Televizyon ve klima gibi cihazlar, kızılötesi sinyallerle kontrol edilir. Otomatik kapılar ve güvenlik sistemlerinde hareket algılamak için kullanılır.

Kızılötesi kameralar, karanlık ortamlarda bile nesnelere tespit edebilir. Kızılötesi ısıtıcılar, doğrudan nesnelere ısıtarak enerji verimliliği sağlar (Aihemaiti ve ark., 2025).

2.1.2.4. Görünür ışık

Görünür ışık, elektromanyetik spektrumda insan gözü tarafından algılanabilen bir radyasyon türüdür. Dalga boyu yaklaşık 380 nanometre (nm) ile 750 nanometre arasında değişir. Bu aralık, "görünür spektrum" olarak adlandırılır ve farklı renkleri oluşturur. Güneş, en güçlü doğal ışık kaynağıdır. Güneş ışığı, tüm görünür spektrumu içerir ve beyaz ışık olarak algılanır.

Özellikleri: Görünür ışığın farklı dalga boyları, farklı renklerle algılanır.

Kısa dalga boyu (380-450 nm): Mavi ve mor tonları

Orta dalga boyu (450-600 nm): Yeşil, sarı ve turuncu tonları

Uzun dalga boyu (600-750 nm): Kırmızı tonları

Kısa dalga boyuna sahip ışık daha yüksek enerji taşır (mor ve mavi ışık), uzun dalga boyuna sahip ışık ise daha düşük enerjiye sahiptir (kırmızı ışık).

Kullanım Alanları: Evler, sokaklar ve çalışma alanları, görünür ışık kaynaklarıyla aydınlatılır. Kameralar, mikroskoplar ve teleskoplar görünür ışığı kullanarak görüntüler oluşturur. Fiber optik sistemler, görünür ışığı kullanarak veri iletir.

2.1.2.5. Ultraviyole

Ultraviyole (UV) ışınları, elektromanyetik spektrumda görünür ışıktan daha kısa dalga boyuna ve daha yüksek enerjiye sahip bir ışınım türüdür. UV ışınlarının dalga boyu 10 nanometre (nm) ile 400 nanometre arasında değişir. İnsan gözü tarafından görülemez, ancak bazı canlılar ve özel cihazlar UV ışınlarını algılayabilir.

Özellikleri: Kısa dalga boyuna sahip UV ışınları daha yüksek enerji taşır. Bu yüksek enerji, biyolojik hücrelerde değişikliklere yol açabilir. Güneş, en güçlü doğal ultraviyole kaynağıdır. Güneş ışığının yaklaşık %10'u UV ışını içerir. Ozon tabakası ve atmosferdeki gazlar tarafından büyük ölçüde emilir. Yeryüzüne ulaşan UV miktarı, atmosferin durumu ve coğrafi konum gibi faktörlere bağlıdır.

Kullanım alanları: UV ışınları, mikroorganizmaları öldürerek hastane ekipmanlarının sterilizasyonunda kullanılır. Ciltte D vitamini üretimini tetikler. Su ve havadaki zararlı mikroorganizmaları yok eder. Plastik ve boya gibi malzemelerin dayanıklılığını test etmek için kullanılır. Uzaydaki cisimlerin ve atmosferin incelenmesinde UV teleskopları kullanılır (Dutta ve ark., 2020).

2.1.2.6. X ışınları

X ışınları, elektromanyetik spektrumda ultraviyole ışınlarından daha kısa dalga boyuna ve daha yüksek enerjiye sahip bir radyasyon türüdür. Dalga boyları yaklaşık 0,01 nanometre (nm) ile 10 nanometre arasında değişirken, frekansları 30 petahertz (PHz) ile 30 exahertz (EHz) arasında olabilir. Bu yüksek enerjili ışınlar, birçok malzemeden geçebilir ve bu özellikleri sayesinde tıbbi görüntüleme ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır.

Özellikleri: X ışınları, kısa dalga boylarına sahip olduğu için yüksek enerjilidir. Enerjileri genellikle 100 eV (elektron volt) ile 100 keV (kiloelektron volt) arasında değişir. Yumuşak dokulardan geçerken kemik ve metal gibi yoğun maddeler tarafından soğurur. Bu özellik, tıbbi ve güvenlik taramalarında kullanılır. Bazı malzemeleri floresan hale getirir, yani bu malzemeler x ışınlarına maruz kaldığında görünür ışık yayarlar.

Kullanım alanları: Kemik kırıkları, akciğer hastalıkları ve diş muayeneleri gibi tıbbi teşhislerde kullanılır. Bilgisayarlı tomografide vücudun detaylı kesitsel görüntülerini oluşturur. Metal ve kaynak hatalarını tespit etmek için kullanılır. Havalimanlarında güvenlik kontrollerinde çantaları incelemek için x ışınları kullanılır. X ışınları, proteinler ve kristallerin yapısını incelemek için kullanılır. DNA'nın yapısı da x ışını kırınımı (difraksiyonu) ile keşfedilmiştir (Dutta ve ark., 2020).

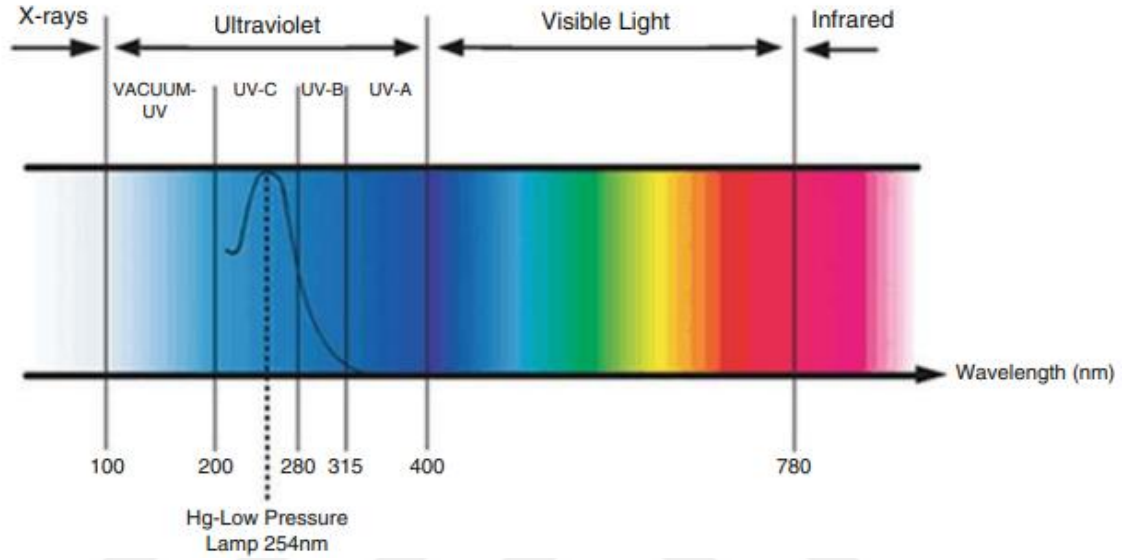
2.1.2.7. Gama ışınları

Gama ışınları, elektromanyetik spektrumun en kısa dalga boyuna ve en yüksek enerjisine sahip ışınım türüdür. Dalga boyları 0,01 nanometre (nm)'den daha kısa, frekansları ise 30 exahertz (EHz) ve üzerindedir. Bu yüksek enerjili ışınlar, radyoaktif atom çekirdeklerinin bozunması veya nükleer reaksiyonlar sonucunda oluşur.

Özellikleri: Gama ışınları, elektromanyetik spektrumda en kısa dalga boyuna (10^{12} metre civarında) ve en yüksek enerjiye (100 keV ile birkaç MeV arasında) sahiptir. Bu enerji düzeyi, hücrelerin DNA'sına zarar verebilir. Diğer elektromanyetik dalgalardan çok daha güçlüdür. Beton, çelik ve kalın kurşun levhalar bile gama ışınlarının tamamını emmekte zorlanabilir. Elektrik yükü taşımaz. Bu nedenle, manyetik alanlardan etkilenmezler ve doğrusal bir yol izlerler.

Kullanım Alanları: Gama ışınları, kanserli hücreleri yok etmek için kullanılır. Bu yöntem, tümörleri küçültmek ve kanser hücrelerini hedef almak için etkilidir. Tıbbi ekipmanları, gıdaları ve cerrahi aletleri sterilize etmek için kullanılır. Mikroorganizmaları

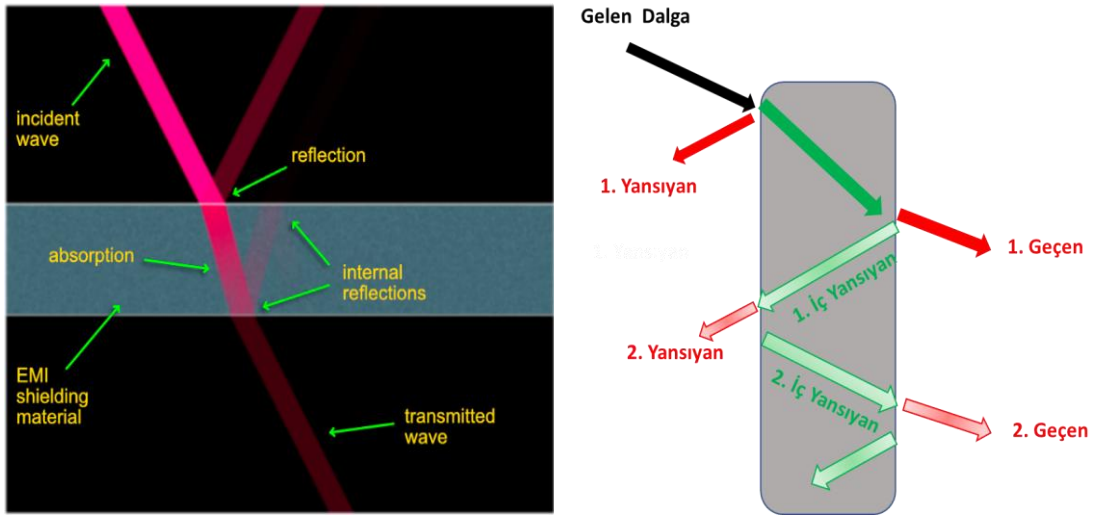
yok etme kapasitesi oldukça yüksektir. Evrenin en enerjik olaylarından biri olan gama ışını patlamaları, astronomların evrenin ilk dönemlerini incelemesine olanak tanır. Fermi Gama Işını Teleskobu gibi cihazlar, gama ışınlarını inceleyerek kara delikler ve nötron yıldızları hakkında bilgi sağlar. Nükleer reaktörlerde ve fisyon reaksiyonlarında gama ışınları yayılır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Elektromanyetik spektrumun, görünür ve ultraviyole bölgelerini içeren optik spektrumu vurgulayan bölgeleri

2.1.3. Elektromanyetik dalga davranışı

Elektromanyetik dalgalar, elektrik ve manyetik alanların birbirini indükleyerek yayılmasına dayanan dalgalardır. EMI (Elektromanyetik Girişim) kalkanlaması, elektromanyetik dalgaların uzayda iletimini sınırlamak için uygun kalkan malzemelerinin yerleştirilmesini ifade eder (Tian ve ark., 2023). Böylece korunan malzeme bozulmaz. Deneylerde gözlemlenen kalkanlama sonuçlarını anlamak için araştırmacılar, elektromanyetik alan teorisi, Eddy akım etkisi teorisi, iletim hattı teorisi gibi çeşitli kalkanlama mekanizmalarını önermiştir. Bunlar arasında, iletim hattı teorisi, hesaplama kolaylığı, anlaşılabilirliği ve yüksek doğruluğu nedeniyle yaygın olarak kabul edilen bir teori haline gelmiştir. Bu teoriye göre, elektromanyetik dalgalar kalkan malzemeleriyle karşılaştığında, elektromanyetik radyasyon veya elektromanyetik girişimin kalkanlanmasında Şekil 2.4'te gösterildiği üzere üç mekanizma gerçekleşebilir: yansıma (reflection), emilim (absorption) ve çoklu yansımalar (multi reflection) (Singh ve ark., 2018; Tian ve ark., 2023).



Şekil 2.4. Elektromanyetik dalgaların davranışı

2.1.3.1. Yansıma (Reflection)

Yansıma, elektromanyetik girişim kalkanlamasında baskın rol oynar. Elektromanyetik dalgalar, malzemenin yüzeyine çarptığında, dış serbest uzay ile kalkan malzeme arasındaki büyük empedans uyumsuzluğu nedeniyle hemen yansır. Yansıma, kalkan içindeki yüklü parçacıkların (serbest elektronlar ve delikler) elektromanyetik alanla etkileşiminin bir sonucudur. Kalkan malzemesinde yeterli serbest yük yoğunluğu gereklidir. Bu nedenle, kalkan elektriksel olarak iletken olmalıdır, Ancak özel olarak yüksek iletkenlik gerekmez (Song ve ark., 2021; Yan ve ark., 2015). Ayrıca, kompozitlerde iletken dolgu maddelerinin içeriği perkolasyon eşiğine ulaşmak zorunda değildir. Perkolasyon eşiği, bir malzemenin içinde iletken dolguların belirli bir oranda bulunduğu noktayı ifade eder. Bu eşik, malzemenin birden fazla iletken yol oluşturabileceği, yani elektriksel iletkenliğinin anlamlı bir şekilde arttığı ve malzemenin makroskobik olarak iletken hâle geldiği noktadır. Ancak iletken yolların sayısını artırmak, EMI kalkanlama etkisini önemli ölçüde iyileştirir. Yüksek iletkenlik, malzeme ile hava ortamı arasındaki empedans uyumsuzluğunu artırarak güçlü yansımaya neden olur. Bu nedenle, empedans uyumsuzluğunun artması veya iletkenliğin iyileştirilmesi, yansıma miktarını etkin bir şekilde artırabilir (Yan ve ark., 2015). Yansıma seviyesi, malzemelerin vakum geçirgenliği ile karşılaştırıldığında geçirgenlik büyüklüğü ve elektriksel iletkenliği ile yakından ilişkilidir. Genel olarak, elektriksel iletkenlik ne kadar yüksekse ve geçirgenlik ne kadar düşüğe, yansıma yoluyla EM dalgalarının kaybı o kadar fazla olur. Geleneksel malzemeler arasında manyetik olmayan metallere gümüş

(Ag), bakır (Cu), alüminyum (Al) vb. bulunur. Ortamın yüzeyinde sürekli iletken yol inşa etmek, yansıma miktarını önemli ölçüde artırabilir. Yüzey iletken katmanları veya yüksek içerikli metal dolgulu maddeler, genellikle yansıma yoluyla iyi EMI kalkanlama sağlayan örneklerdir. Ancak, yansıma temelli EMI kalkanlaması yalnızca kalkanlanan malzemenin bozulmasını engeller, ancak EM dalgalarını etkin bir şekilde tüketemez. Yansıtılan EM dalgaları uzayda iletimine devam eder ve ikinci derece elektromanyetik radyasyona yol açar. Bu nedenle, şu anda pek çok araştırma, emilim temelli EMI kalkanlama malzemelerinin geliştirilmesine odaklanmaktadır (Han ve ark., 2021).

2.1.3.2. Emilim (Absorption)

Emilim, toplam EMI kalkanlama verimliliğinde ikinci sırada yer alır ve malzemenin kalınlığı ile yakından ilişkilidir. Malzemenin yüzeyinde yansımayan elektromanyetik dalgalar içeriye girer ve dielektrik ile manyetik kayıplar nedeniyle sürekli olarak zayıflar. Emilim, esas olarak malzemenin dielektrik sabiti ve geçirgenliği ile ilgilidir (Tao ve ark., 2016). BaTiO₃ ve ZrO₂ gibi yüksek dielektrik sabitlerine sahip malzemeler, bol elektrik dipollerine sahip oldukları için emilim yoluyla yüksek kalkanlama verimliliği sağlayabilir. Fe₃O₄, ferrit, demir (Fe), nikel (Ni) ve bunların alaşımları, yeterli manyetik dipoller sağlayarak yüksek geçirgenlik sergiler ve bu nedenle emilim, toplam EMI kalkanlamada baskın rol oynar (Li ve ark., 2018). Elektriksel iletken nanoparçacıklar ile takviye edilmiş polimer nanokompozit malzemeler, elektromanyetik dalgaların kalkanlanmasında yine emilim üzerinden koruyucu etkinliği sağlamaktadır. Emilim verimliliği; EM dalgası frekansı, malzemenin kalınlığı ve geçirgenliğinin artmasıyla artar (Tao ve ark., 2016).

2.1.3.3. Çoklu yansıma (Multi reflection)

Çoklu yansımalar, elektromanyetik dalgaların farklı yüzeylerde veya kalkan içindeki arayüzlerde gerçekleşen yansımalarını ifade eder. EMI kalkanlamasında çoklu yansımalar önemli bir mekanizmadır. Bu yansımalar, elektromanyetik dalgaların geçtiği ortamlar arasındaki empedans uyumsuzluğundan kaynaklanır. Kalkanın yüzeyini geçen EM dalgaları, malzeme içinde hem emilime hem de çoklu yansımaya uğrar. Özellikle, kalkan içindeki elektromanyetik dalgaların çoklu yansımaları, gelen dalgalar ile kalkanlama elemanları arasındaki yeterli etkileşimler sayesinde ek elektromanyetik

enerjinin tüketilmesini mümkün kılar ve yüksek kalkanlama verimliliği sağlar (Tao ve diğeri, 2016) Yapılan çalışmalar, uygun yapılar tasarlanarak bu düzensiz iç yüzeylerin önemli ölçüde artırılabilceğini göstermiştir. Örneğin:

- Köpük veya gözenekli malzemelerdeki hava-malzeme yüzeyi,
- Kompozitlerdeki dolgu-matris arayüzü,
- Çok katmanlı malzemelerdeki iletken-iletken olmayan katman arayüzü (Tian ve ark., 2023)

Bu mekanizma sayesinde EM dalgaları tamamen emilir ve nihayetinde ısı formunda dağıtılır. EMI kalkanlama performansını artırmak için önemli bir strateji olarak kabul edilir. Son yıllarda, karmaşık bileşenler ve kalkan yapılarındaki bu çoklu yansımalar büyük ilgi çekmiş ve yeni bir araştırma dalgasını tetiklemiştir.

2.2. Elektromanyetik Koruyucu Etkinliği

Elektromanyetik koruma, elektrikli ve elektronik cihazların maruz kaldığı veya yaydığı elektromanyetik girişimin (EMI) etkilerini azaltmak veya ortadan kaldırmak amacıyla kullanılan bir tekniktir. Bu işlem, cihazların performansını korumak ve çevresel elektromanyetik dalgalardan etkilenmelerini önlemek için kritik öneme sahiptir.

Modern dünyada, kablosuz iletişim, yüksek frekanslı devreler ve yoğun elektronik bileşen kullanımı giderek arttığından, elektromanyetik kalkanlama, güvenilirlik ve performans açısından temel bir gereklilik haline gelmiştir.

Elektromanyetik kalkanlama, bir cihazın etrafını elektromanyetik dalgalara karşı geçirimsiz hale getiren özel malzemeler veya kaplamalar kullanılarak gerçekleştirilir. Bu malzemeler, elektromanyetik dalgaların emilmesini veya yansıtılmasını sağlayarak cihazların içini veya dışını korur.

2.3. Elektromanyetik Koruyucu Etkinliğinin Hesaplanması

Malzemenin koruma yeteneği, genellikle desibeller (dB) cinsinden ifade edilen EMI koruma etkinliği (EMI SE) ile ifade edilir. Malzemenin belirli bir konumundaki EMI SE, gelen enerji ile kalan enerji arasındaki oran olarak hesaplanabilir ve Denklem 4'te olduğu ifade edilir:

$$\text{EMI SE} = 10 \log\left(\frac{P_t}{P_i}\right) = 20 \log\left(\frac{E_t}{E_i}\right) = 20 \log\left(\frac{H_t}{H_i}\right) \quad (4)$$

Burada, P , E ve H sırasıyla düzlem dalgasının gücü, elektrik alanı ve manyetik alanı şiddetlerini temsil eder. \dot{I} ve t alt simgeleri, sırasıyla gelen ve iletilen elektromanyetik dalgaları ifade eder (Yang ve ark., 2010). Genel olarak, EMI, elektromanyetik spektrumda 10^4 Hz ile 10^{12} Hz arasındaki frekans aralığında meydana gelir. EMI SE seviyesi arttıkça, kalkanlardan geçen enerji miktarı azalır. 20-30 dB aralığındaki SE, minimum etkin aralık olarak kabul edilir ve çoğu durum için uygulanabilir. EMI SE değeri 30 dB olduğunda, malzeme gelen radyasyonun %99,9'unu engelleyebilir ki bu, çoğu ticari ve endüstriyel uygulama için gerekli değerdir. 20 dB'nin altındaki SE, etkisiz bir EMI korumasıdır.

Schelkunoff'un teorisine göre, toplam EMI SE (SE_T), yansıma kaybı (SE_R), soğurma kaybı (SE_A) ve çoklu yansıma kaybı (SE_M) zayıflamasının toplamı olarak ifade edilebilir (Denklem 5).

$$SE_T = SE_R + SE_A + SE_M \quad (5)$$

Yansıma kaybı, serbest uzay (örneğin hava) ile kalkan malzemesi arasındaki empedans uyumsuzluğundan kaynaklanır ve iletken malzeme içindeki yüklü parçacıkların elektromanyetik alanla etkileşimi sonucu oluşur. Bu empedans uyumsuzluğu nedeniyle, elektromanyetik dalgalar kalkanın yüzeyine dokunduklarında yansır. Düzlem dalga teorisi, genellikle malzemenin kendine özgü özellikleriyle ilişkili EMI SE'yi hesaplamak için kullanılır. Düzlem dalga teorisine göre, SE değeri, gelen elektromanyetik dalga (EMD) ile kalkan malzemesi arasındaki empedans farkına bağlıdır. Yansıma kaybı şu şekilde ifade edilebilir:

$$SE_R = 20 \log\left(\frac{Z_i}{4Z_s}\right) = 39.5 + 10 \log\left(\frac{\sigma}{2\pi f\mu}\right) \quad (6)$$

Denklem 6'da verilen Z_i gelen elektromanyetik dalgaların empedansını, Z_s malzemenin empedansını, σ elektriksel iletkenliği, μ manyetik geçirgenliği, f ise gelen elektromanyetik dalgaların frekansını temsil eder. Bu formüllerden, yansıma kaybı verimliliğinin, kalkan malzemesinin empedansı, geçirgenliği ve EMD frekansının artmasıyla azaldığını ve EMD empedansı ile kalkan malzemesinin iletkenliğinin artmasıyla arttığını çıkarabiliriz. Yüksek iletkenlik, yansıma zayıflamasından daha büyük

bir katkı sağlar. Bu nedenle, istenen koruma etkisi elde etmek için iletkenliğin genellikle 1 S/m olması gerekir.

Soğurma kaybı, kalkan malzemesi içindeki hareketli taşıyıcılar, elektrik dipoller, manyetik dipoller ve elektromanyetik dalgalar arasındaki etkileşimden kaynaklanır. Zayıflama katkısı üç ana bölümden türetilir:

- Yüksek konsantrasyona sahip taşıyıcıların yönlü hareketinden kaynaklanan ohmik kayıp
- İyon, oryantasyon, elektron ve ara yüzey kutuplaşması ile yönetilen dielektrik kayıp
- Eddy akımı kaybı, boyut rezonansı kaybı, doğal rezonans kaybı ve histerezis kaybı içeren manyetik kayıp

EMD enerjisi, nihayetinde soğurma kaybı ve dağılma yoluyla ısı enerjisine dönüşür. SE_A şu şekilde hesaplanabilir:

$$SE_A = 20 \left(\frac{t}{\delta} \right) \log e = 8.68 \left(\frac{t}{\delta} \right) \quad (7)$$

Denklem 7'deki t kalkanın kalınlığını, δ derinlik mesafesini temsil eder. Malzemenin kalınlığını artırmak, soğurma kaybını önemli ölçüde iyileştirebilir. Ayrıca, malzemenin elektriksel ve manyetik geçirgenliğini artırmak, soğurma kaybını artırabilir. Bu nedenle, iletken polimer kompozitlerin iletkenliğini artırmak, EMI SE'yi önemli ölçüde iyileştirebilir.

Çoklu yansıma kaybı, kalkanın içine giren elektromanyetik dalgaların diğer yüzeye ulaştıklarında yeniden yansıması ve iletilmesiyle oluşur. Bu, belirli bir malzeme içindeki farklı bölgelerdeki iletkenlik farklarına dayanır ve elektromanyetik dalgalar, iletim yolunu arttırarak hızla zayıflar, ta ki enerji tamamen dağılana kadar. SE_M , şu şekilde ifade edilebilir (Denklem 8):

$$SE_M = 20 \log (1 - e^{-2t/\delta}) = 20 \log (1 - 10^{SE_A/10}) \quad (8)$$

DeneySEL olarak, EMD'lerin kalkanlardan geçtikten sonra güç veya faz değişimi, ağ analizörü kullanılarak ölçülerek GSE (Göstergeme Etkinliği) elde edilebilir. Ağ analizörünün çalışma prensibi dalga kılavuzu teknolojisine dayanır ve bu teknoloji, skaler ağ analizörü (SNA) ve vektör ağ analizörü (VNA) olarak sınıflandırılabilir. SNA ile

karşılaştırıldığında, VNA karmaşık sinyalleri (kompleks permitivite ve permeabilite) ölçmek için kullanılabilir, bu nedenle daha yaygın olarak tercih edilir. Ayrıca, VNA sinyallerin yanıt genliğini ve çeşitli sinyallerin fazını da tespit edebilir. EMI GSE, elde edilen kompleks saçılım parametreleri (S parametreleri) olan S11 (veya S22) ve S12 (veya S21) hesaplanarak elde edilebilir (Tian ve ark., 2023).

İki portlu bir VNA'da, hem gelen hem de iletilen dalgalar, saçılım parametreleri (S11, S12 ve bunların karşılıkları S22, S21) ile matematiksel olarak ifade edilebilir (Şekil 3 (b)). Bu S parametreleri, yansıtma katsayısı ve iletim katsayısı ile ilişkilidir. S parametreleri, ileri yansıtma (S11), ters yansıtma (S22), ileri iletim (S12) ve geri iletim (S21) katsayıları olarak belirtilir.

EMI koruma teorisine göre, bir elektromanyetik dalga bir ortam yüzeyine ulaştığında, gelen güç yansıtma, absorpsiyon ve iletim gücü olarak üçe bölünür. İlgili güç katsayıları absorpsiyon (A), yansıtma (R) ve iletim (T) olup, bu katsayıların toplamı her zaman 1'e eşittir. R, A ve T'nin koruma katsayıları aşağıdaki 9, 10 ve 11. denklemler kullanılarak hesaplanabilir.

$$T = |S_{12}|^2 = |S_{21}|^2 \quad (9)$$

$$R = |S_{11}|^2 = |S_{22}|^2 \quad (10)$$

$$A = 1 - R - T \quad (11)$$

Ayrıca, SE_T (iletim göstergeleme etkinliği), SE_A (absorpsiyon göstergeleme etkinliği) ve SE_R (yansıtma göstergeleme etkinliği) aşağıdaki 12, 13 ve 14. denklemlerdeki gibi formüle edilebilir.

$$SE_T = 10 \log\left(\frac{1}{|S_{12}|^2}\right) = 10 \log\left(\frac{1}{|S_{21}|^2}\right) = 10 \log\left(\frac{1}{T}\right) \quad (12)$$

$$SE_R = 10 \log\left(\frac{1}{1-|S_{11}|^2}\right) = 10 \log\left(\frac{1}{1-|S_{22}|^2}\right) = 10 \log\left(\frac{1}{1-R}\right) \quad (13)$$

$$SE_A = 10 \log\left(\frac{1-|S_{11}|^2}{|S_{12}|^2}\right) = 10 \log\left(\frac{1-|S_{22}|^2}{|S_{21}|^2}\right) \quad (14)$$

Elektromanyetik girişim (EMI) kalkanlarının absorpsiyon zayıflatmasını daha iyi anlamak için, etkili absorpsiyon fraksiyonu (A_{eff}) kavramı Denklem 15'te tanımlanmıştır (Tian ve ark., 2023).

$$A_{\text{eff}} = \frac{1 - R - T}{1 - R} \times 100 \quad (15)$$

2.4. Elektriksel Geçirgenlik

Elektriksel geçirgenlik, bir malzemenin elektrik alanı etkisi altında yük taşıyıcılarını ve dipolleri nasıl kutuplayarak tepki verdiğini ifade eden temel bir fiziksel büyüklüktür. Bu özellik, malzemenin elektrik enerjisini depolama kapasitesini ve aynı zamanda enerjiyi kaybetme oranını belirler. Modern malzeme biliminde, özellikle nano ölçekli malzemelerin elektriksel geçirgenlik davranışları, yüksek performanslı elektronik, enerji depolama ve elektromanyetik dalga soğurma uygulamalarında kritik önem taşımaktadır. Hem gerçek hem de hayali (sanal) olmak üzere iki bileşenden oluşur. Gerçek bileşen (ϵ'), malzemenin elektrik enerjisini depolama kapasitesini ifade ederken; sanal bileşen (ϵ''), bu enerjinin ne ölçüde kayba uğradığını, bir başka deyişle, ısıya dönüştürülerek ortamdaki uzaklaştırıldığını göstermektedir (Denklem 16). Özellikle elektromanyetik koruma, radar soğurucu malzeme üretimi ve yüksek frekanslı iletişim uygulamaları gibi alanlarda ϵ'' bileşeni kritik öneme sahiptir. Bu tür uygulamalarda, malzemelerin elektromanyetik enerjiyi soğurma ve sönümleme yetileri değerlendirilmektedir. Kayıp tanjantı ($\tan \delta$) ise, enerji kaybı ile enerji depolama arasındaki oranı ortaya koymakta olup Denklem 17 ile tanımlanmaktadır. Yüksek kayıp tanjantı değerleri, elektromanyetik enerjinin etkili bir şekilde emilmesi ve dağıtılması açısından avantaj sağlamaktadır. Bu bağlamda, $\tan \delta$ parametresi, malzemenin elektromanyetik dalgalar karşısındaki performansının belirlenmesinde önemli bir gösterge olarak öne çıkmaktadır.

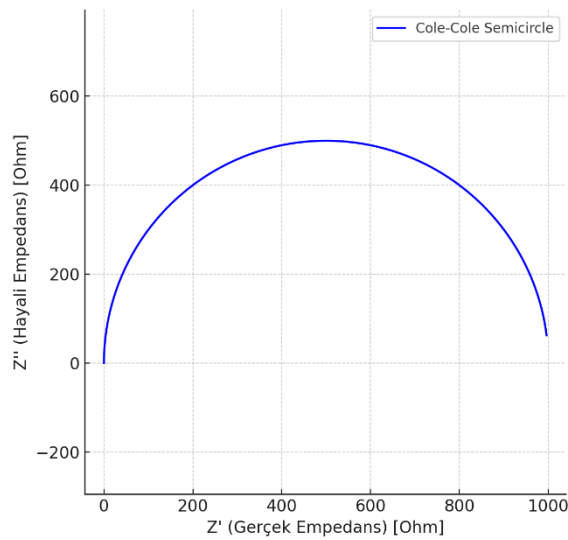
$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (16)$$

$$\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad (17)$$

Mikrodalga frekans aralığında kompozit malzemelerin dielektrik kayıpları esas olarak polarizasyon kaybı ve iletkenlik (kondüksiyon) kaybından kaynaklanmakta olup,

bu iki mekanizma sinerjistik ve rekabetçi bir ilişki içerisinde etkileşmektedir (Zhou ve ark., 2020). Debye gevşeme kuramı temel alınarak, kompozit malzemelerdeki polarizasyon gevşemesi Denklem 18 yardımıyla analiz edilebilmektedir. Bu bağlamda, gerçek geçirgenlik (ϵ') ile sanal geçirgenlik (ϵ'') arasındaki ilişki, teorik olarak bir yarım daire şeklindedir ve bu eğri, literatürde Cole-Cole yarım dairesi olarak adlandırılmaktadır (Cole , 1941).

Cole-Cole yarım dairesi, empedans spektroskopisi kapsamında, malzemelerin frekansa bağlı dielektrik davranışlarını grafiksel olarak analiz etmede kullanılan bir araçtır. Bu grafik, özellikle karmaşık yapıları dielektriklerin elektriksel özelliklerini incelemeye önemli bilgiler sunar. Yarım dairenin merkezinin konumu, malzemenin gevşeme sürecine dair ipuçları verir. İdeal Debye tipi sistemlerde, gevşeme tek zaman sabitine bağlı olduğunda yarım daire tam bir simetri gösterir. Ancak, yarım daire formundan sapmalar, farklı gevşeme sürelerinin bir arada bulunmasına ve bu durumun malzeme içindeki moleküler etkileşimler ile yapısal düzensizliklerden kaynaklandığına işaret eder (Zhang ve ark., 2022). Bu nedenle, Cole-Cole yarım dairesi sadece elektriksel davranışları analiz etmekle kalmaz, aynı zamanda malzemenin mikroyapısal özellikleri ve moleküler dinamikleri hakkında da bilgi sunar. Şekil 2.5'te tipik bir Cole-Cole yarım dairesi temsili olarak sunulmuştur. Eğrideki sapmalar, sistemin heterojenliğini ve çoklu gevşeme süreçlerini ortaya koymaktadır.



Şekil 2.5. Karbon nanotüp için tipik bir Cole-Cole yarım dairesi örneği

2.4.1. Elektriksel geçirgenlik mekanizmaları

Elektriksel geçirgenlik, malzemelerde meydana gelen farklı kutuplanma mekanizmalarının bir sonucudur. Bu mekanizmalar frekans aralığına göre çeşitlilik göstermektedir:

- Elektronik Polarizasyon: Atom çekirdeği ve elektron bulutu arasındaki yük dağılımının elektrik alan etkisiyle değişmesiyle oluşur. Çok yüksek frekanslarda aktiftir.
- İyonik Polarizasyon: Malzeme içindeki pozitif ve negatif iyonların zıt yönlerde hareketiyle meydana gelir ve genellikle orta-ileri frekanslarda etkili olur.
- Dipolar (Yönelimsel): Polarizasyon: Kalıcı dipollerin elektrik alan doğrultusunda hizalanmasıdır ve mikrodalga frekans aralığında önemli rol oynar.
- Uzak Yükü Polarizasyonu: Malzemenin farklı bölgelerindeki yüklerin birikmesi ile ortaya çıkar. Düşük frekanslarda ve özellikle kompozitlerde görülür.

2.4.2. Frekansa bağlı geçirgenlik davranışı

Elektriksel geçirgenliğin gerçek (ϵ') ve sanal (ϵ'') bileşenleri, uygulanan elektrik alanın frekansına bağlı olarak değişiklik gösterir. Düşük frekanslarda kutuplanma mekanizmaları aktif olup, enerji depolama kapasitesi ve kayıplar yüksektir. Frekans arttıkça, bazı kutuplanmaların zaman yanıtı gecikir ve geçirgenlik bileşenleri azalma eğilimi gösterir. Yüksek frekanslarda ise sadece elektronik polarizasyon devam eder ve geçirgenlik değerleri düşer. Bu frekans bağımlılığı, Debye gevşeme modeli ve Cole-Cole diyagramları ile analiz edilir.

2.4.3. Karbon nanotüp, grafen ve bor nitrür nanoparçacıkların geçirgenlik davranışları

Karbon nanotüpler (CNT), grafen ve bor nitrür gibi nano boyutlu malzemeler, elektriksel geçirgenlik alanında farklı ve üstün özellikler sergilerler. Karbon nanotüpler, yüksek elektriksel iletkenlikleri ve benzersiz morfolojileri sayesinde, kompozit malzemelerde elektriksel ve dielektrik özelliklerin iyileştirilmesinde önemli rol oynar. Bununla birlikte, nanotüplerin yapısal düzeni ve yüzey özellikleri, malzemenin geçirgenlik davranışını doğrudan etkiler.

Grafen, tek katmanlı karbon atomlarından oluşan iki boyutlu bir yapıya sahiptir ve yüksek özgül yüzey alanı ile olağanüstü elektriksel geçirgenlik sunar. Grafen bazlı

kompozitler, yüksek frekanslarda etkin dielektrik davranış sergileyerek elektromanyetik dalga soğurma uygulamalarında tercih edilir.

Bor nitrür (BN) nano parçacıkları ise elektriksel yalıtkanlıkları ve yüksek termal iletkenlikleri ile bilinir. BN bazlı kompozitlerde geçirgenlik genellikle dielektrik davranış ile ilişkilidir ve enerji kayıplarının kontrolünde önemli bir etkidir. Bu malzemeler, özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda yalıtkanlık ve enerji soğurma özelliklerinin dengelenmesinde kullanılır. Yüksek dielektrik dayanımı ve termal yönetim özellikleri ile güç elektroniği ve mikroelektronik cihazların performansını artırmaktadır.

2.5. Elektromanyetik Koruyucu Malzemeler

2.5.1. İletken malzemeler

Bu tür malzemeler, elektromanyetik dalgaların geçişini engelleyen veya zayıflatan iletken özelliklere sahiptir.

- Metaller: Alüminyum, bakır, çelik, gümüş gibi metaller, düşük elektriksel dirençleri nedeniyle elektromanyetik dalgaların etkisini azaltır.
- Karbon bazlı malzemeler: Karbon fiber ve grafen, elektromanyetik alanları sönmüleyebilen iletken özelliklere sahip materyallerdir.

2.5.2. Manyetik malzemeler

Manyetik malzemeler, elektromanyetik dalgaların manyetik bileşenini emme veya yönlendirme kapasitesine sahiptir.

- Ferritler: Ferritler, düşük frekansta manyetik özellikleri yüksek olan malzemelerdir ve elektromanyetik dalgaların manyetik bileşenini sönmüleyerek koruma sağlar.
- Demir oksit ve alüminyum: Yüksek manyetik geçirgenliğe sahip bu malzemeler, elektromanyetik dalgaların yönlendirilmesine yardımcı olur.

2.5.3. Dielektrik malzemeler

Dielektrik malzemeler, elektriksel iletkenlikleri düşük olup, genellikle elektriksel alanları sönmülemek amacıyla kullanılır.

- Polimerler: Elektriksel iletkenliği düşük olan polimerler, elektromanyetik dalgaların elektriksel bileşenlerini engellemek için kullanılır.
- Seramikler: Yüksek sıcaklıklara dayanıklı olan seramikler, elektromanyetik alanları absorbe ederek koruma sağlar.

2.5.4. Kompozit malzemeler

Kompozit malzemeler, farklı türdeki malzemelerin birleşiminden oluşur ve genellikle daha iyi performans sunar.

- Karbon nanotüpler ve metal matriks kompozitleri: Elektromanyetik dalgaların şiddetini düşürme konusunda oldukça etkilidirler.
- Metal-dielektrik kompozitler: Elektromanyetik dalgaların hem elektriksel hem de manyetik bileşenlerini sönmöleyen kompozitler.

2.5.5. Metamalzemeler

Metamalzemeler, yapılarında normalde doğal malzemelerde bulunmayan özelliklere sahip olan yapay olarak tasarlanmış malzemelerdir. Bu malzemeler, elektromanyetik dalgaları istedikleri şekilde yönlendirebilir.

- Plazmonik metamalzemeler: Optik ve mikrodalga frekanslarında, elektromanyetik dalgaları manipüle edebilen malzemelerdir.
- Dalga boyu bağımlı metamalzemeler: Farklı dalga boylarına karşı farklı koruma sağlayan malzemelerdir.

2.5.6. İyonize malzemeler

Bazı iyonize malzemeler, elektromanyetik dalgaları emme ve dağıtma kabiliyetine sahiptir.

- Yüksek iletkenliğe sahip sıvılar: Elektronların serbestçe hareket etmesine imkan vererek elektromanyetik dalgaların etkisini azaltır.

Bu sınıflandırma, elektromanyetik koruma sağlamak için yaygın olarak kullanılan malzemeleri ve yöntemleri kapsar. Çeşitli mühendislik disiplinlerinde kullanılacak bu malzemeler, tasarım aşamasında farklı özellikler ve performans seviyeleri göz önünde bulundurularak seçilir.

2.6. Elektromanyetik Koruyucu Etkinliği İle İlgili Literatür Çalışmaları

Metaller, elektriği mükemmel bir şekilde iletir ve elektromanyetik (EM) dalgaları yansıtabilir; bu nedenle metaller, EMI (Elektromanyetik Girişim) kalkanlama uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak metallerde kalkanlama mekanizması, EM dalgalarının yansımaya dayanır ve bu her zaman istenen bir seçenek değildir. Ayrıca, metallerin nispeten yüksek yoğunlukları ve üretim maliyetleri, EMI

kalkanlama uygulamalarında geniş kapsamlı kullanımını sınırlar. Bu sınırlamalar nedeniyle, araştırmacılar EMI kalkanlama uygulamaları için polimerlerin kullanımına odaklanmıştır. Polimerler; hafiflik, esneklik, düşük yoğunluk, kolay işlenebilirlik, kimyasal ve termal kararlılık ve en önemlisi ölçeklenebilirlik gibi özellikleriyle dikkat çeker. Polimerler genellikle, metallerde olduğu gibi yansımadan ziyade absorpsiyon olgusunun gerçekteşmesi için EMI dalgalarının yüzeyden geçmesine izin verir (Bheema ve ark., 2024).

Polimer nanokompozitler (PNC), elektriksel, termal, dielektrik, manyetik ve/veya mekanik özelliklerin benzersiz bir kombinasyonuna sahip bir malzeme sınıfını temsil eder. PNC özellikleri, kullanılan polimer ve dolgu malzemesine bağlı olarak EM dalga bastırma için özelleştirilebilir. Bu cazip özellikleri nedeniyle, polimer nanokompozitler EMI kalkanlama uygulamalarında metallere alternatif olarak değerlendirilmiştir (Choudhary ve ark., 2020).

Ayrıca, kayıplı dielektrik malzemeler ve/veya manyetik malzemeler içeren polimer bazlı kompozitler, EMI'yi ortadan kaldırmak ve elektronik cihazları istenmeyen EM dalgalardan absorpsiyon ve yansıma yoluyla korumak için kullanılır. Genel olarak, absorpsiyon ağırlıklı kalkanlama malzemeleri, ekipman için yansımaya kıyasla daha uygundur çünkü yansıma, yakındaki ekipmanlarda ek girişimlere neden olabilir. Bu sinyal girişiminden kaynaklanan sorunları hafifletmek için, elektronik sistemlerin normal işleyişini koruyacak etkili kalkanlama malzemelerine ihtiyaç vardır. EMI kalkanlama malzemeleri, düşük yoğunluk, yüksek absorpsiyon kapasitesi, ince, hafif ve geniş frekans bant genişliği gibi istenen özelliklere sahip olmalıdır. Malzeme seçimi, EMI kalkanlama malzemelerinin tasarımında da önemli bir rol oynar.

Son çalışmalar, mikrodalga frekans aralığında endüstriyel uygulamalarda elektronik cihazların ve elektrik sistemlerinin daha yaygın kullanımını nedeniyle düşük maliyetli ve etkili EMI kalkanlama malzemelerine artan talebi ortaya koymuştur. Ayrıca, geniş bant absorpsiyona uygun ince, hafif ve etkili kalkanlama malzemelerine yönelik çeşitli çalışmalar bildirilmiştir. Literatürde, karbon bazlı dolgu maddeleri, metal bazlı dolgu maddeleri ve iletken polimerler içeren etkili polimerik EMI kalkanlama malzemeleri rapor edilmiştir. Ancak, bu çalışmalarda zayıf dağılma, faz ayrımı ve yüksek dolgu içeriği gibi temel zorluklar bulunmaktadır. Bu sınırlamalar nedeniyle, etkili EMI kalkanlama malzemeleri elde etmek için çeşitli yapısal ve işleme stratejileri geliştirilmiştir (Bheema ve ark., 2024).

Yabin Guo ve ark. (2024), yaptığı çalışmada farklı boyutlarda iletken dolgu maddeleri kullanılarak oluşturulmuş hibrit iletken ağ içeren bir TPU/CNT, GN/CNT/FeCl₃, TPU/CNT kompozit filmi tasarlamıştır. Bu dolgu maddeleri sırasıyla 0 boyutlu (0D) FeCl₃, 1D karbon nanotüp (CNT) ve 2D grafen nano levha (GNP) içerir. Tasarlanan kompozit film, esneklik, hafiflik, ultra-verimli EMI kalkanlama performansı ve uzun süreli hizmet stabilitesi avantajlarına sahiptir. Hazırlanan kompozit film, 10,0 GHz'de 56,0 dB'lik çok yüksek EMI SE değeri sergilemektedir. Daha ilginç olanı, 1000 bükülme döngüsünden veya asidik/bazik çözeltiliye uzun süre daldırılmasından sonra, kompozit filmin EMI kalkanlama değeri neredeyse değişmeden kalmakta ve mükemmel stabilite göstermektedir.

Li ve ark. (2023), yüksek GNP içerikli GNPC'ler (grafen nano levha polimer kompozitleri) üretmek için uygulanabilir ve ölçeklenebilir bir strateji önermiştir. Bu stratejide, GNP'ler sıkıca yüz yüze temas etmiş ve düzlem yönünde sıralanmıştır. GNP/PU kompozitlerinin, güçlü EMI kalkanlama yeteneği ve üstün termal iletkenliği olduğu, 67.6 dB'ye kadar EMI SE ve 41.60 W/(m·K)'ye kadar son derece yüksek termal iletkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, GNP/PU kompozitleri mükemmel mekanik esneklik, EMI kalkanlama stabilitesi ve termal yönetim yetenekleri sergilemiştir.

Nguyen ve ark. (2024) tek duvarlı karbon nanotüpler (CNT) ve bor nitrür (BN) kullanılarak, termoplastik poliüretan (TPU) matrisinde EMI kalkanlama ve ısı dağılımının son derece verimli bir şekilde emilmesi için bir yapı önermiştir. İlk olarak, CNT ve BN tozları, hidrojen bağlarıyla desteklenen elektriksel ve termal iletken ağı iyileştirmek için yüzeylerinde işlevselleştirilmiştir. Karışım daha sonra TPU'ya eklenmiş ve ardından kolay bir katman-katman dökme yöntemiyle kompozit film üretilerek, yüksek iletkenliğe sahip CNT-BN-TPU yapısı oluşturulmuştur. Bu yapı, ısı dağılımında yüksek verimlilik için mükemmel düzlem dışı termal iletkenlik sağlamaktadır (maksimum 1.971 W/m.K). Ultra-geniş bant EMI SE, Ka-bandı (34 GHz)'de 90.66 dB ve W-bandı (100 GHz)'de 79.8 dB'lik dikkat çekici EMI kalkanlamasıyla, 100 µm kalınlığındaki bir film ile elde edilmiştir.

Zhang ve ark. (2022), Karbon nanotüp MXene/selüloz filmleri (CNTs MXene /CFs), çift katmanlı kaplama stratejisini kullanarak üretmiştir. Bu yaklaşımın çeşitli avantajları şunlardır:

Bu, organik kirleticiler üretmeden gerçekleştirilen çevre dostu bir üretim yöntemidir. Hazırlama süreci basittir ve seri üretim için kolayca ölçeklenebilir. MXene katmanı ile CNT katmanı arasında bir hetero yapı katmanı oluşur, bu da genel performansın

iyileştirilmesine katkı sağlar. Joule ısıtma performansı, foto termal dönüşüm özellikleri ve elektromanyetik girişim (EMI) zırlama performansları incelenmiştir. Yüksek esneklik ve hidrofiliklik özelliklerinden dolayı, güçlü arayüz etkileşimi (hidrojen bağı) oluşturarak MXene nano levhalarıyla uyumlu olan CF'ler matris olarak seçilmiştir. Yüksek elektriksel iletkenlik ve yüksek boy/en oranı nedeniyle hidrofilik CNT'ler, MXene ile hetero yapı oluşturmak için kullanılmıştır. MXene ve CNT'lerin avantajlarının birleştirilmesiyle hazırlanan filmler, 4 V uygulanan voltajda 154 °C Joule ısıtma performansı, 4 güneş altında 105 °C foto termal dönüşüm verimliliği ve olağanüstü 32,62 dB EMI kalkanlama verimliliği göstermiştir.

Bu tez çalışmasında, vakum infüzyon yöntemi ile üretilen hafif, elektriksel iletken ve yüksek elektromanyetik koruyucu etkinliğe sahip çok fonksiyonlu bir polimer kompozit malzemenin geliştirilmesi amaçlanmıştır (Şekil 2.6). Geri dönüştürülmüş selülozik kağıtların düzlemsel yöndeki elektriksel iletkenliğini (EC) ve elektromanyetik koruyucu etkinliğini (EMI SE) iyileştirmek amacıyla, mikro kalınlığa sahip, selüloz fiberler ile desteklenmiş karbon nanotüp (CNT), Grafen (GR) ve Bor Nitrür (BN) nanoparçacıkların takviye edilmesiyle 3 farklı nanokompozit film tasarlanmıştır: CNT Film, Bor Nitrür Film ve CNT/GR Hibrit Film. Büyütülebilir proseslere elverişli olan vakum filtrasyon yöntemi ile elde edilen her bir tabaka için farklı hacim ve yüzde ağırlıklara sahip nano takviyelerin eklenmesiyle farklı varyantlarda esnek ve elektriksel iletken nanokompozit filmler elde edilmiştir. Sandviç yapı oluşturacak şekilde tasarlanan üç katmanlı filmler karbon fiber kumaşlar arasına yerleştirilerek vakum infüzyon ve el yatıma (hand lay-up) yöntemleriyle epoksi reçinece zengin hale getirilmiş ve tabakalar arası bağlar mekanik olarak güçlendirilmiştir. Kalınlıkları 120 ile 470 mikrometre arasında değişen nanokompozit filmlerin elektriksel dirençleri en düşük 8.45 Ω , elektriksel iletkenlikleri en yüksek 11.82 S/m ve kesit alanına bağlı spesifik (özellik) iletkenliği ise en fazla 641.71 S/m olarak ölçülmüştür. En yüksek EMI koruyucu etkinliği CNT-BN-CNT sandviç yapısı içeren karbon fiber polimer kompozit grubu için 40.5 dB, en yüksek spesifik (kesit alanına bağlı) EMI koruyucu etkinliği 149.95 dB/mm olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, özgün bir mühendislik yaklaşımı sunan karbon fiber takviyeli polimer nanokompozit malzemenin, stratejik öneme sahip savunma, havacılık ve uzay teknolojileri başta olmak üzere elektronik, haberleşme, otomotiv ve sağlık sektöründe elektromanyetik koruma gerektiren uygulamalar için yüksek potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 2.6. Karbon fiber takviyeli polimer kompozit malzeme



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, teknolojinin gelişimine paralel olarak artan elektronik cihaz sayısının neden olduğu elektromanyetik kirliliğin azaltılması amacıyla, esnek, hafif, elektriksel olarak iletken ve çok fonksiyonlu bir polimer nanokompozit malzeme geliştirilmiştir. Üretilen bu fonksiyonel nanokompozitlerde farklı elektriksel iletken nanoparçacık türleri (karbon nanotüp – CNT, grafen ve türevleri), çeşitli ağırlıkça yüzde oranları (%wt) ve farklı çözelti hacimleri kullanılmıştır. Bu parametreler doğrultusunda elde edilen farklı morfoloji ve türdeki nanokompozit filmlerin kalınlık ve elektriksel iletkenlik değerlerinin, elektromanyetik koruyucu etkinlik (EMK) performansı üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir.

Tez çalışması kapsamında izlenen yöntem, dört ana çalışma paketi ve alt başlıkları altında Çizelge 3.1’de yapılandırılmıştır.

1. Üretim Süreçleri: Belirlenen parametrelere uygun olarak nano parçacık içeren çözeltiler hazırlanmış (1.1), vakum filtrasyon yöntemi ile fonksiyonel filmler üretilmiş (1.2) ve kurutma (1.3) ile haddeleme (1.4) işlemleri uygulanmıştır. Bunu takiben üç tabakalı sandviç yapıların oluşturulması (1.5) ve fiber takviyeli polimer kompozit üretimi (vakum infüzyon ve el yatırma yöntemi ile) (1.6) gerçekleştirilmiştir.

2. FNK’ların Gruplandırılması: Üretilen filmler içerik ve yapı özelliklerine göre; CNT ve hibrit filmler (2.1), iki veya üç tabakalı CNT ve grafen filmler (2.2), fonksiyonelleştirilmiş veya doplanmış filmler (2.3), üç tabakalı CNT-BN-CNT sandviç yapılar (2.4) ve cam elyaf/karbon fiber takviyeli polimer kompozitler (2.5) olmak üzere sınıflandırılmıştır.

3. Karakterizasyon: Filmlerin yapısal (3.1) ve morfolojik (3.2) özellikleri incelenmiş; kalınlık ölçümleri (3.3), elektriksel iletkenlik ölçümleri (3.4), elektromanyetik koruyucu etkinlik ölçümleri (3.5) ve termal iletkenlik hesaplamaları (3.6) yapılmıştır.

Son olarak 4. Optimizasyon ve Karşılaştırma aşamasında (4.1–4.2), farklı parametreler kullanılarak üretilen fonksiyonel nanokompozit filmlerin performanslarının optimize edilmesi (4.1) ve karşılaştırmalı performans analizi (4.2) gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.1. Tez çalışmasında uygulanan çalışma paketleri ve alt iş paketleri

Çalışma Paketleri	Alt İş Paketleri
1. Üretim Süreçleri	1.1. Çözelti Hazırlama 1.2. Vakum Filtrasyon 1.3. Kurutma 1.4. Haddeleme 1.5. Tabakalı Sandviç Yapı Oluşturma 1.6. Fiber Takviyeli Polimer Kompozit Üretimi (Vakum İnfüzyon ve El Yatırma)
2. FNK'ların Gruplandırılması	2.1. CNT ve Hibrit FNK Filmler 2.2. İki/Üç Tabakalı CNT ve Grafen FNK Filmler 2.3. Fonksiyonelleşmiş/Doplanmış/Hibrit FNK Filmler 2.4. Üç Tabakalı CNT-BN-CNT Sandviç Yapılar 2.5. Cam Elyaf/Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler
3. Karakterizasyon	3.1. Yapısal Karakterizasyon 3.2. Morfolojik Karakterizasyon 3.3. Kalınlık Ölçümleri 3.4. Elektriksel İletkenlik Ölçümleri 3.5. EM Koruyucu Etkinlik Ölçümleri 3.6. Termal iletkenlik Hesaplamaları
4. Optimizasyon & Karşılaştırma	4.1. Süreç Optimizasyonları 4.2. Karşılaştırmalı Performans Analizi

3.1. Kullanılan Malzemeler

Tez çalışmasında, farklı morfolojik ve yapısal özelliklere sahip yüksek saflıktaki nano boyutlu takviye malzemeleri kullanılmıştır. Kullanılan nanoparçacıklar ve teknik özellikleri aşağıda detaylandırılmıştır.

Çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT), >%96 saflık oranına sahip olup, 8–18 nm dış çap aralığında üretilmiştir. Grafen, %99,9 saflıkta, 3 nm kalınlıkta, yaklaşık 1,5 µm ortalama parçacık çapında ve 800 m²/g özgül yüzey alanına sahiptir. %32 ağırlıkça grafen ile doplanmış karbon nanotüpler (G-CNT) içerisinde kullanılan grafen %99 saflıkta ve 5 nm kalınlığında olup, karbon nanotüplerin saflığı >%97 (ağırlıkça) seviyesindedir. Karboksil (-COOH) grubu ile fonksiyonelleştirilmiş çok duvarlı karbon nanotüpler (CNT-COOH), >%96 saflıkta ve 8–18 nm dış çap aralığındadır. Hekzagonal bor nitrür (h-BN) nanoparçacıkları ise >%99,85 saflığa sahip olup, 65–75 nm parçacık boyutuna ve tipik altıgen kristal yapıya sahiptir.

Üretilen fonksiyonel kompozit malzemelerde matris fazı olarak, geri dönüştürülmüş A4 kâğıtlarından elde edilen selüloz kullanılmıştır. Film oluşumunda homojen bir dispersiyon sağlanabilmesi amacıyla, CNT, G-CNT, CNT-COOH ve HİB grupları için çözücü olarak distile (saf) su tercih edilmiştir. Grafen dispersiyonları, yüksek verimlilikte dağılım elde edebilmek için N-Metil Prolidon (NMP) (Across Organics, %99 saflık) içerisinde hazırlanmıştır. Bor nitrür (BN) nanoparçacıklarının

dispersiyonunda ise, homojenlik sağlamak amacıyla çözeltiliye ağırlıkça %10 oranında polivinil alkol (PVA) ilave edilmiştir. Vakum infüzyon sürecinde bağlayıcı sistem olarak 25 °C’de yaklaşık 600–900 mPa·s viskoziteye, ~1,15 g/cm³ yoğunluğa ve oda sıcaklığında kürlenme özelliğine sahip epoksi reçine ve sertleştirici kullanılmış; takviye elemanları olarak ise yüksek mekanik performansa sahip karbon fiber kumaşlar ile mekanik dayanımı artırıcı ve kimyasal direnç sağlayıcı cam elyaf kumaşlar tercih edilmiştir.

Film üretim sürecinde, elektriksel ve elektromanyetik koruma performansının olumsuz yönde etkilenmemesi için, elektriksel iletkenliği yüksek nanoparçacıkların dispersiyonunda NMP haricinde herhangi bir kimyasal çözücü kullanılmamıştır. Çalışma kapsamında kullanılan tüm çözücüler ve kimyasallar, analitik derecede saflık standartlarını karşılamaktadır.

3.2. Fonksiyonel Nanokompozit Film Üretim Prosesi

Geleneksel metaller, güçlü elektriksel iletkenlikleri sayesinde elektromanyetik girişimi (EMI) azaltmada etkileyici bir kapasite göstermektedir. Bu metaller genellikle yüzeylerinde elektromanyetik dalgaların önemli bir kısmını yansıtarak gelen dalgaların zayıflamasına neden olurlar. Bununla birlikte, metal tabanlı zırhlama malzemelerinin kullanımı, korozyona yatkınlıkları, yüksek yoğunlukları, sınırlı esneklikleri ve pahalı üretim süreçleri nedeniyle kısıtlanmaktadır. Ayrıca, bu malzemeler önemli yüzey yansımalarına yol açarak ikinci dereceden elektromanyetik dalga kirliliğine katkıda bulunurlar. Bu nedenle, metal tabanlı zırhlama malzemelerinin sınırlamalarını aşmak için iletken polimer kompozitler (CPC’ler) umut verici bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. CPC’ler, düşük yoğunluk, mükemmel anti-korozyon etkileri, yüksek mekanik esneklik ve düşük işleme maliyeti gibi birçok avantaj sunmaktadır (Bheema ve diğerleri, 2024)

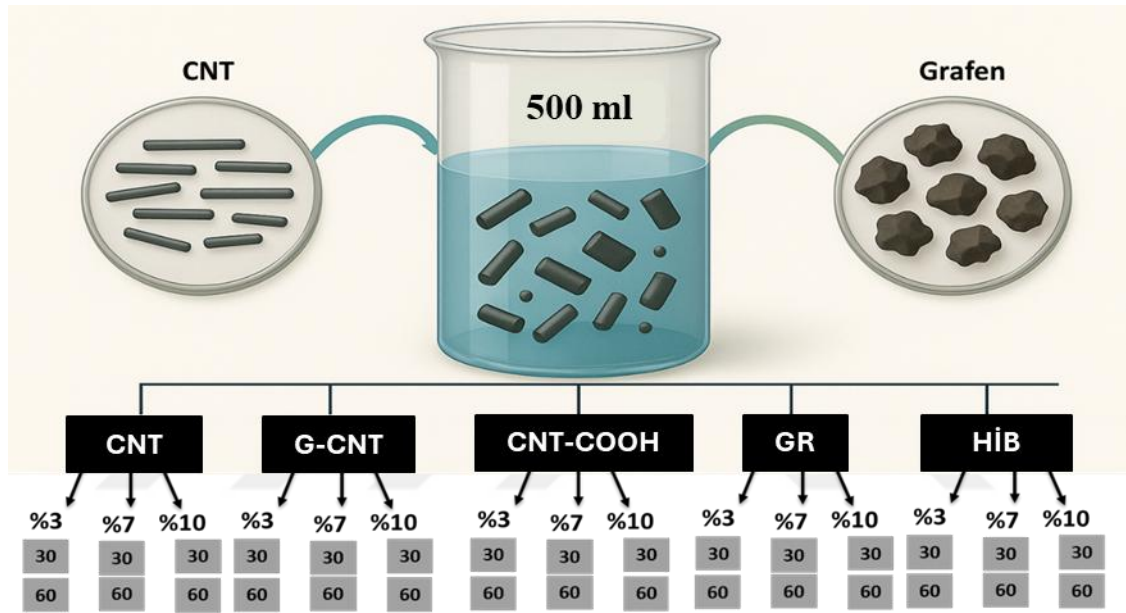
Polimerler arasında selüloz, çevre dostu ve yüksek biyouyumluluğa sahip bir malzemedir. Yüksek mekanik özellikleri ve boyut oranının yanı sıra, düşük maliyet, hafiflik ve yüksek işlenebilirlik gibi birçok avantaja sahip olduğu için selüloz, çekici bir malzeme olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle, selüloz, kompozit malzemelerde sıklıkla kullanılmaktadır. Selüloz aerojelleri, üç boyutlu (3D) gözenekli bir yapıya sahiptir. Ayrıca, bir matris olarak kullanıldığında etkili bir ısı transfer yolu oluşturabilir ve mekanik özellikleri iyileştirebilir. 3D yapı oluşturarak, büyük bir özgül yüzey alanı, düşük yoğunluk ve yüksek gözeneklilik gibi çeşitli avantajlara da sahiptir (Kim ve Kim, 2023).

3.2.1. Çözelti hazırlama

Geri dönüşüm prosesi ile elde edilen esnek selülozik matris malzemesine elektriksel iletkenlik ve elektromanyetik koruyucu etkinliği özelliklerini kazandırabilmek için yapısına elektriksel iletkenlik değeri yüksek olan karbon tabanlı nano takviyelerinin eklenmesi tasarlanmıştır. Her iki farklı malzeme grubuna ait üstün özelliklerin tek bir malzemede toplanması ve fonksiyonel hale gelebilmesi için uygulanacak olan en iyi yaklaşım nanokompozit malzeme oluşturmaktır. Selüloz matris ve elektriksel iletken nano takviyelerin birleştirilmesi yolu ile elde edilecek olan fonksiyonel nanokompozit malzemenin iyi bir elektromanyetik koruyucu etkinliğe sahip olması adına 1 boyutlu CNT, 2 boyutlu GR, Grafen ile doplanmış CNT, COOH ile fonksiyonelleştirilmiş CNT'ler, CNT/GR hibrit nano parçacıklar ve BN takviye olarak seçilmiştir. Grafen, yapısındaki polar olmayan karbon-karbon bağlarından dolayı saf suda homojen bir şekilde dağılım göstermemektedir. Bu sebeple çözelti oluştururken CNT ve türevleri olan nano takviyeler ile birlikte GR tek başına kullanılmayıp CNT ve GR'nin aynı anda bulunduğu Hibrit nano takviyeler kullanılmıştır. Belirtilen bu nano boyutlu takviye elemanlarının ağırlıkça değişen oranlarda kullanımının üretilen filmlerin elektriksel iletkenlik ve elektromanyetik koruyucu etkinlik (EMI SE) performansına etkilerini araştırmak amacıyla, üç farklı ağırlıkça yüzde oranı (%3, %7 ve %10) belirlenmiştir. Ayrıca, aynı türde nano takviye ve aynı yüzde oranlar kullanılarak hazırlanan fonksiyonel filmlerin, farklı kalınlık değerlerinde sergilediği elektromanyetik davranışları incelemek üzere iki farklı çözelti hacmi (30 ml ve 60 ml) tercih edilmiştir. Sandviç yapıdaki CNT–BN–CNT tabakalı filmlerin kalınlık kontrolünü sağlamak ve tek tabakalı filmler ile karşılaştırmalı analiz gerçekleştirebilmek amacıyla ise söz konusu hacimlerin iki katı olan 60 ml ve 120 ml çözelti hacimleri kullanılarak ilave numuneler üretilmiştir.

Nanokompozitin elektriksel iletkenlik ve elektromanyetik koruyucu özelliklerinin malzemenin tüm bölgelerinde eşit veya birbirine çok yakın olması hedeflenmektedir. Homojen nanokompozitlerin üretilebilmesi için, homojen çözeltilerin hazırlanması büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, nanokompoziti oluşturan katkı maddelerinin çözelti içinde dengeli bir şekilde dağılmasını sağlayacak uygun çözücülerin belirlenip kullanılması gereklidir. Karbon nanotüpler, saf suda homojen olarak dağılırken, grafen için aynı durum geçerli değildir. Grafenin dağılım sorununu gidermek amacıyla, saf suya %10 oranında N-Metil Prolidon (NMP) eklenerek yeni bir çözücü sistemi geliştirilmiştir (atıf Word NMP).

Farklı parametreler ile hazırlanmış olan tüm çözeltiler için; selüloz kaynağı olarak evrak imha makinesinde eşit şekilde kırılmış ve ağırlığı 1000 mg olan geri dönüştürülmüş A4 kağıtları, elektriksel iletken nanoparçacıkların selüloz içerisinde homojen dağılmasını sağlayan 500 ml hacminde çözücüler standart olarak kullanılmıştır (CNT, G-CNT, CNT-COOH ve Hibrit parçacıklar için 500 ml saf su, Grafen için hem 500 ml saf su hem de 450 ml saf su + 50 ml NMP çözücüler kullanılarak farklı çözeltiler elde edilmiştir). Ağırlıkça %3, %7 ve %10 nanoparçacık içeren çözeltiler için sırasıyla 30 mg, 70 mg ve 100 mg nano takviyeler ilave edilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Fonksiyonel nanokompozit çözeltilerin hazırlanması

CNT, G-CNT, ve CNT-COOH için: Geri dönüşümlü selülozik kağıtlar, evrak imha makinesi kullanılarak eşit şekilde kırıldıktan sonra, 1000 mg tartılarak 500 ml saf suya eklendi. Ağırlıkça %3, %7 ve %10 nano takviye içeren çözeltiler için sırasıyla 30 mg, 70 mg ve 100 mg nano takviyeler hassas terazide tartılarak saf su ve selüloz içerisine ilave edilmiştir.

Grafen için: Grafenin çözelti içinde homojen bir şekilde dağılması için CNT'den farklı olarak, 1:10 oranında NMP ve saf su içeren bir çözelti hazırlandı. Bu karışım için 50 mg NMP ve 450 mg saf su kullanıldı. Elde edilen 500 ml'lik çözeltiye, CNT çözeltisinde olduğu gibi 1000 mg kırılmış selülozik kağıt ve istenen ağırlık oranına uygun miktarda grafen eklendi.

Hibrit grup için; İlave edilecek olan nano takviyelerin ağırlıkça yarısı CNT yarısı da GR olacak şekilde tartılarak (%3 için = 15mg CNT + 15mg GR) saf su ve selüloz içerisine ilave edilmiştir

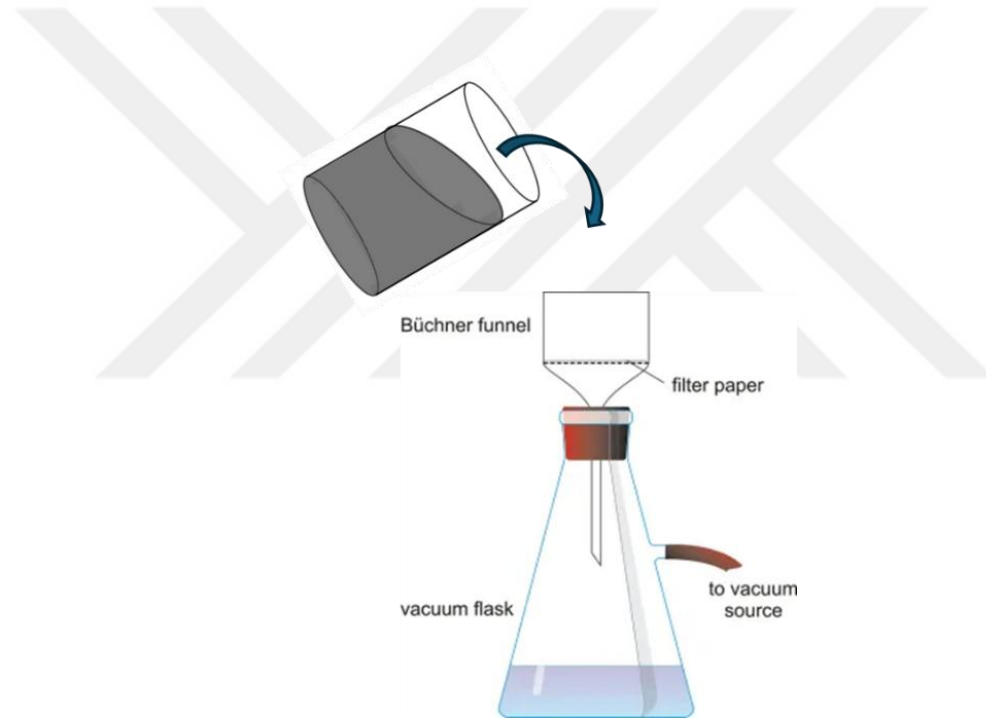
Hazırlanan çözeltiler üç farklı fiziksel karıştırma işleminden geçirildi. İlk olarak, çözelti 20.000 rpm hızında çalışan bir mutfak tipi bar blender kullanılarak 30 dakika boyunca çözelti sıcaklığı göz önünde bulundurularak kademeli olarak (10dk + 10dk + 10dk) karıştırıldı. Yüksek sıcaklıkların (~75-80°C) oluşmasını engellemek için, çözelti kademeli olarak 10'ar dakika aralıklarla 800 rpm hızında çalışan manyetik bir karıştırıcıya buz banyosu ile birlikte alındı. Bu işlemde sonra 1 saat boyunca 200W gücünde uçlu sonikatör ile ses titreşimleriyle etkili bir dağılma sağlayan sonikasyon işlemine tabi tutuldu. Uçlu sonikasyon, banyo tipi sonikasyona kıyasla çözelti homojenitesi açısından daha iyi sonuçlar vermektedir. Çözeltinin sıcaklığını kontrol altında tutmak amacıyla 15 dakikalık manyetik karıştırmanın ardından 1 saat uçlu sonikasyon tekrar uygulandı. Filtrasyon öncesinde, çözelti manyetik karıştırıcıda 15 dakika boyunca karıştırılarak homojen bir yapı elde edildi.

Karıştırma süreci yaklaşık 3 saat 30 dakika sürmekte olup, mekanik karıştırma yoluyla nano parçacıkların çözelti içinde etkili bir şekilde dağılması sağlanmıştır. Homojen bir karışım elde edilmesi, malzemenin elektriksel ve mekanik özelliklerini doğrudan etkilediği için kritik bir adımdır. Homojen dağılım sağlanamadığında, nano yapılar bir araya gelerek mikro ölçekte aglomerasyonlar oluşturur ve bu durum malzemenin elektriksel iletkenliğini ve mekanik dayanımını olumsuz yönde etkileyebilir.

Çözeltiye ilave edilen nano yapıların selüloz matris malzeme ile birleştirilip iletken çözeltilerin hazırlanması aşamasında herhangi bir kimyasal bağlayıcı (yüzey aktif madde) kullanılmamıştır. Bu süreçte kullanılacak olan kimyasallar, nano takviyelerin selüloz yüzeyinde oluşturduğu elektriksel yolu engelleyerek malzemenin hem elektriksel iletkenliğini hem de elektromanyetik koruyucu etkinliğini düşürebilir. CNT'lerin selüloz matrisiyle birleşmesi sonucunda oluşan sürekli ağ yapısı, selülozu elektriksel olarak iletken hale getirmektedir. Ancak, yüzey aktif madde varlığında CNT ağları elektriksel bir yol oluşturamaz. Bunun nedeni, CNT'lerin yalıtkan özellik gösteren yüzey aktif madde ile kaplanmasıdır. Ayrıca, malzemenin mekanik ve elektriksel özelliklerini negatif şekilde etkilememesi için fonksiyonel nanokompozit film üretimi sırasında kullanılan kimyasalların, üretim sonrasında çözeltilerden arındırılması gerekmektedir. Bu ek işlem (post-process), hem maliyetleri artırmakta hem de üretim sürecinde zaman kaybına yol açmaktadır.

3.2.2. Vakum filtrasyon yöntemi

Üç farklı fiziksel karıştırma aşamasının ardından, homojen bir yapıya ulaşan çözeltiler, manyetik karıştırıcı eşliğinde oda sıcaklığına kadar soğutuldu. Oda sıcaklığına ulaşan çözeltiler, vakum pompasına bağlı filtrasyon cihazında, filtre işlemine geçmeden önce farklı kağıt kalınlıklarına göre farklı hacimlerde hazırlandı. Hazırlanan çözeltiler 30 ve 60 ml miktarlarında olup, her biri yaklaşık 1 bar basınç altında selüloz nitrat filtre kağıdına dökülerek her biri filtre edildi (Şekil 3.2). Filtrasyon işleminin ardından, filtre kağıt yüzeyinde kalan fonksiyonel nanokompozit film, saf su ile yıkanarak malzemenin özelliklerini olumsuz etkileyebilecek kirleticilerden (empüriteler) arındırıldı. Fonksiyonel nanokompozit film üretim sürecinde kimyasal bağlayıcı kullanılmadığı için, herhangi bir kimyasal temizleme (post-process) işlemi yapılmamıştır.



Şekil 3.2. Vakum filtrasyon işlemi

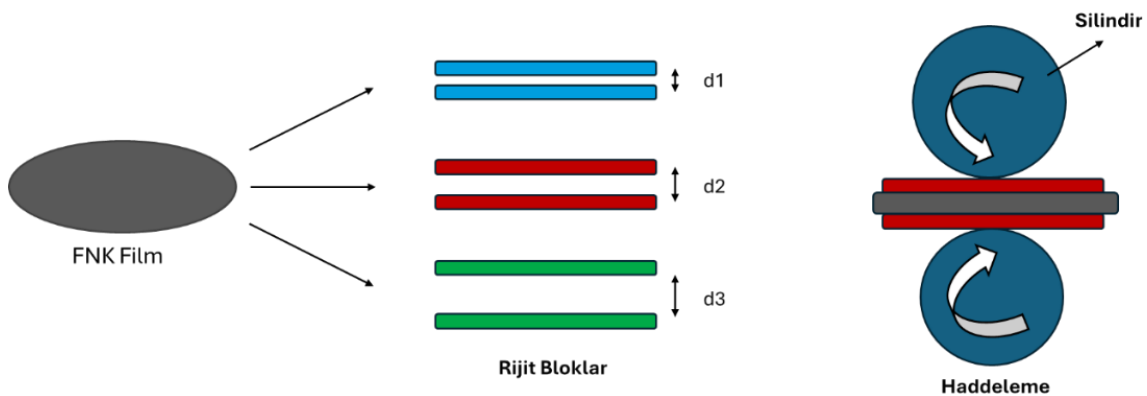
3.2.3. Kurutma işlemi

Filtrasyon işleminin ardından filtre kağıtta biriken fonksiyonel nanokompozit filmler içerisindeki sıvı fazdan tamamen ayrılmamış şekilde bulunur. Oluşturulan CNT ve Hibrit nanokompozit filmlerin elektriksel iletkenlik özelliklerinin yüksek olması için film içerisinde bulunan sıvının tamamen uzaklaştırılması gerekir. Bu sebeple filtre kağıdıyla birlikte filmlerin fiziksel olarak birbirinden ayrıştırılmasından önce sabit ve kontrol edilebilir sıcaklık ortamında kurutma işleminin yapılması planlanmıştır. Daha önceden 50°C'ye ayarlanmış etüv fırınına yerleştirilen filmler 25 dakika süreyle

kurutulmuştur. Bu kurutma işleminin en kritik noktası, fonksiyonel filmlerin fırında bekletilme süresidir. Yapılan optimizasyonlara göre, 20 dakikadan daha kısa sürelerle yapılan kurutmalarda, film içerisinde sıvı formda bulunan çözücüler tam olarak buharlaşmamaktadır. Bu durumun, fonksiyonel filmlerin elektriksel ve elektromanyetik özellikleri üzerinde olumsuz etkiler yarattığı belirlenmiştir. Kurutma süresi 30 dakikanın üzerinde olduğunda ise fonksiyonel filmlerin filtre kağıdına yapıştığı ve herhangi bir solvent kullanmadan düzgün bir şekilde ayrılmadığı gözlemlenmiştir. Bu da fonksiyonel nanokompozit filmlerin yüzey özelliklerine (elektriksel yol oluşumu) zarar verdiği belirlenmiştir.

3.2.4. Fonksiyonel nanokompozit filmlerin kalınlık kontrolü

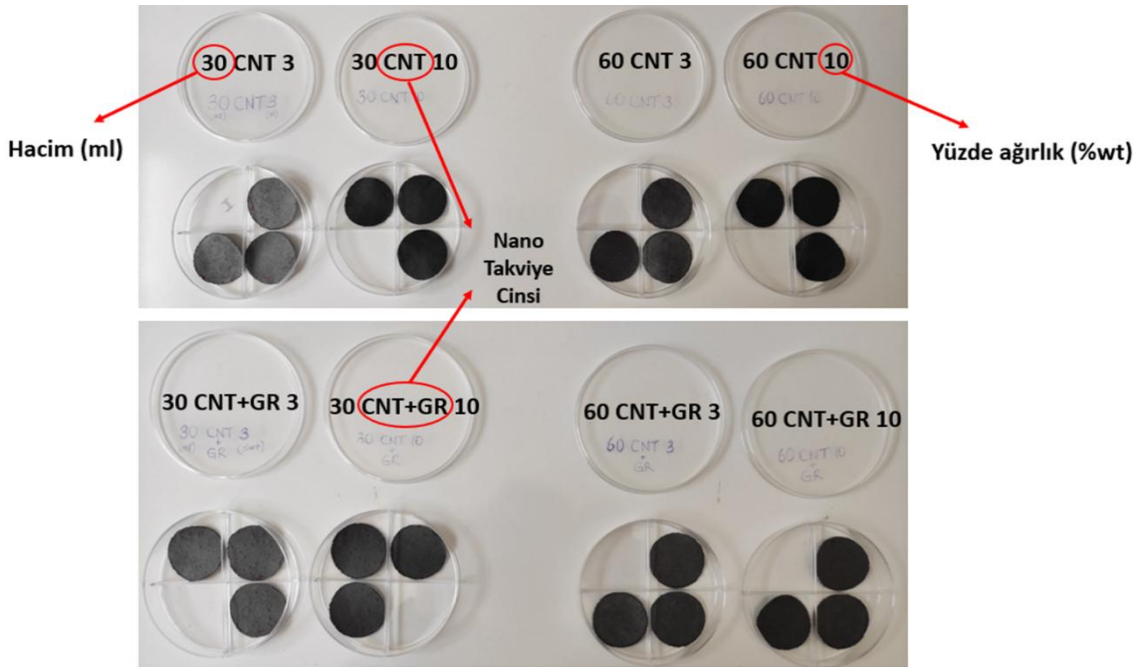
Farklı parametrelerle üretilmiş fonksiyonel nanokompozit film numunesinin her biri için 3'er tane olmak üzere CNT ve Hibrit film, kendi eksenleri etrafında fakat zıt yönlerde dönen merdaneler aracılığıyla haddeleme işlemine tabi tutulmuştur. Eşit özelliklerde ve şartlarda oluşturulan filmlerin farklı kalınlıklarda olmasını sağlamak adına, üç farklı kalınlıktaki rijit bloklar kullanılmıştır. Hacimleri ve nano takviyelerin yüzde ağırlıkları eşit olan filmler, farklı kalınlıklardaki bloklar arasında konumlandırılmıştır. Filmler, blokların içinde zıt yönlerde hareket eden silindirlere geçerken, bloklar arası kalınlık farklılıkları (d_1 , d_2 , d_3) nedeniyle değişen basınç seviyelerine maruz kalmaktadır. Söz konusu basınç farkları, aynı parametrelere sahip kağıtların haddeleme işlemi sonucunda farklı kalınlıklarda olmasına neden olmaktadır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Nanokompozit filmlerde haddeleme işlemi

içeren ve Şekil 3.5'te gösterilen kodlar oluşturulmuştur. Kodun ilk 2 hanesi hacmi, sonrasında yazılan harfler hangi cins nano takviye içeriğine sahip olduğu ve sonrasındaki rakam ise eklenen nano takviyenin ağırlıkça yüzdesini temsil etmektedir.

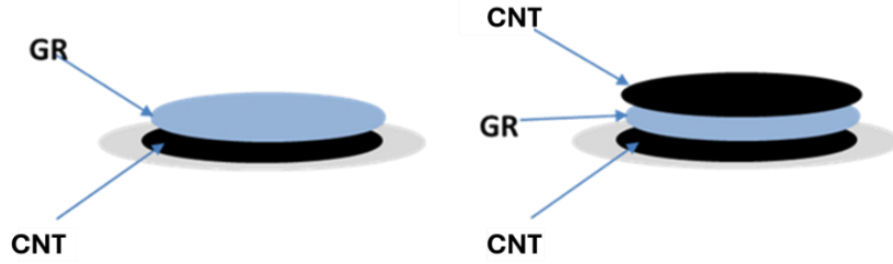
1.Grup FNK filmlerde saf su içerisinde matris malzeme olarak eklenen 1000mg selüloza göre ağırlıkça %3 ve %10 olmak üzere CNT, Grafen ve Hibrit nano takviyeler eklenmiştir. Sadece Grafen eklenerek üretilen filmlerin ön elektriksel direnç ölçümleri yapılırken çok yüksek direnç değerlerine sahip olduğu ve saf su, NMP (N-Metil Prolidone), DMF (Dimetil Formamid), DMSO (Dimetil Sülfoksit) gibi çözücüler kullanılmasına rağmen istenen homojenite sağlanamadığı için sadece Grafen ile üretilen FNK filmler hedeflenen elektriksel iletkenlik ve EM koruma için yeterli olmamaktadır.



Şekil 3.5. Farklı parametrelerde üretilen FNK filmlerin isimlendirilmesi

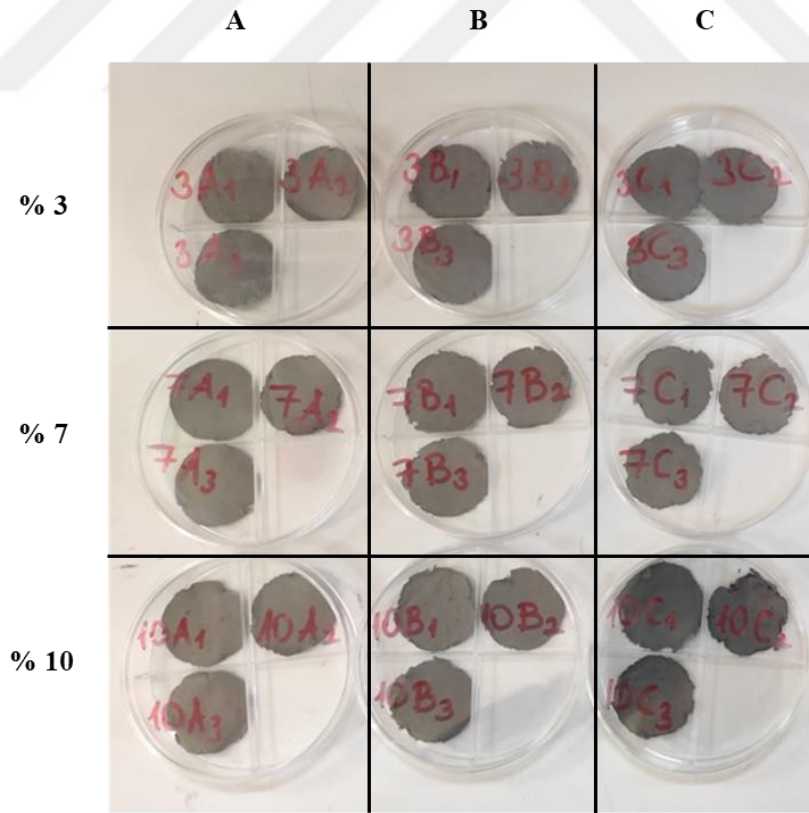
3.3.2. İkinci grup: İki tabakalı ve üç tabakalı CNT ve grafen FNK filmler

Ayrı ayrı üretilen karbon nanotüp ve hibrit katkıli fonksiyonel nanokompozit filmlere alternatif olarak yansıma yapmadan elektromanyetik dalgaların absorbe edilmesi ve malzeme kalınlığı boyunca çoklu yansımaya uğrayarak soğurulması prensibinden yola çıkılarak iki ve üç tabakalı fonksiyonel filmler de üretilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. İki ve üç tabakalı olarak üretilen FNK filmlerin şematik resmi

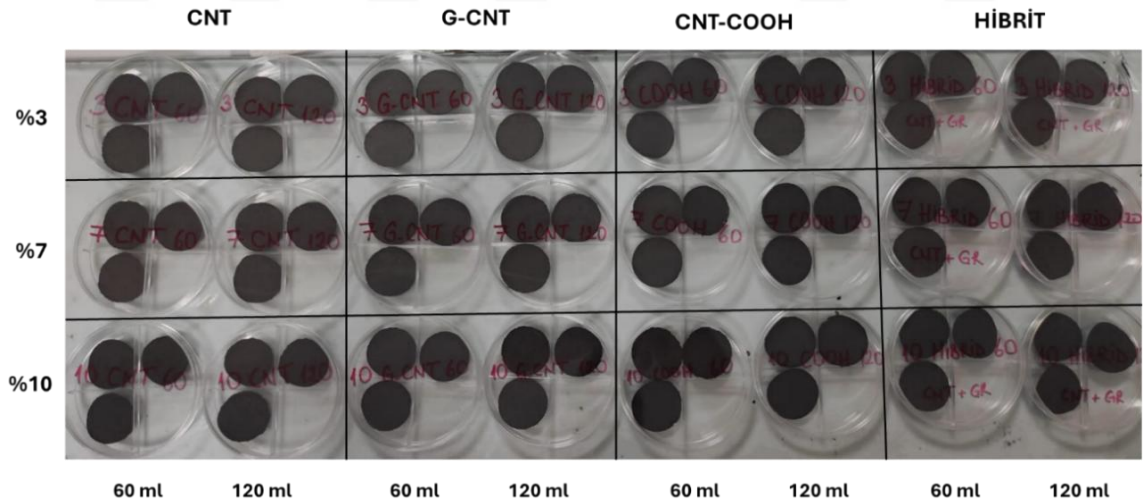
İki tabakalı bir arayüzey filmi oluşturmak için CNT ve GR nano katkılı selüloz nanofiberler, üç tabakalı arayüzey filmi oluşturmak için ise sırasıyla CNT-GR-CNT nano katkılı selüloz nanofiberlerin üretilmesi planlanmıştır. Bu kapsamda, ilave edilen nano yapıların malzemeye kazandırdığı özellikleri belirlemek için ağırlıkça %3-7-10 oranlarında nano takviye içeren 30, 50 ve 60 ml hacimlerde ve dolayısıyla farklı kalınlıklardaki selüloz nanofiberler geleneksel kağıt üretim prosesi kullanılarak üretilmiştir. Belirlenen 3 farklı parametreyle iki tabakalı 27, üç tabakalı 9 olmak üzere toplam 36 tane arayüzey tabakası elde edilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. İki tabakalı fonksiyonel nanokompozit filmlerin isimlendirilmesi

3.3.3. Üçüncü grup: Fonksiyonelleşmiş ve doplanmış takviye içeren FNK filmler

Selüloz matris içerisine ilave edilen nanoparçacıkların çeşitlendirilmesiyle en iyi elektromanyetik koruyucu etkinliğe sahip FNK filmlerin üretilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda tez çalışmasında karbon nanotüp ve grafen temelli nanoparçacıkların birbirleriyle doplanması veya karboksili gruplarıyla (-COOH) fonksiyonelleştirilmesinin FNK filmlerin elektriksel iletkenliklerine ve elektromanyetik koruyucu etkinliğine olan etkisini incelemek adına aynı parametrelere sahip karbon nanotüp (CNT), %32 grafen ile doplanmış karbon nanotüp (G-CNT), karboksili gruplarla fonksiyonelleştirilmiş karbon nanotüp (CNT-COOH), grafen (GR) ve karbon nanotüp ile grafenin eşit oranlarla eklenmesiyle elde edilen hibrit nanoparçacıklar (HİB) kullanılarak yeni FNK filmlerin üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.8). Parametreler; hacimsel olarak 60 ve 120ml'lik çözeltiler, ağırlıkça %3, 7 ve 10 oranlarında nanoparçacıklar kullanılmıştır. Vakum filtrasyon yöntemiyle üretilen, 50 °C sıcaklıkta 25 dk süreyle kurutulan ve ardından sabit aralıklı silindirleri bulunan laminasyon cihazıyla sıcak haddeleme işlemi gerçekleştirilen numuneler 24 saat süreyle oda sıcaklığında tam kurutmaya tabi tutulmuştur. Tam kurutma işlemi sonrası her bir FNK filmin kalınlığı mikrometre yardımı ile 5 farklı yerden ölçülerek ortalama kalınlık değerleri hesaplanmıştır.

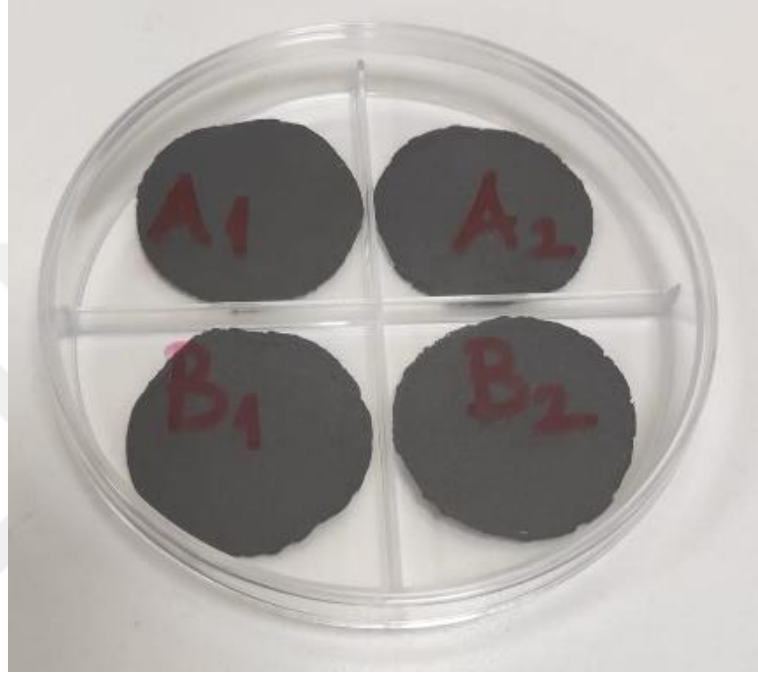


Şekil 3.8. Fonksiyonelleştirilmiş ve doplanmış nano takviyeler içeren FNK filmler

3.3.4. Dördüncü grup: Üç tabakalı CNT-BN-CNT yapıları FNK filmler

Farklı parametreler ile üretilen FNK filmleri içerisinde hem elektriksel iletkenlik hem de elektromanyetik koruyucu etkinlik değerleri ile diğer filmlerden daha fazla ön plana çıkan ve tezi amacına en fazla yaklaşılabilecek filmler CNT takviyeli selüloz

filmler olarak dikkat çekmektedir. Bu kapsamda oluşturulması planlanan yansıma - soğurma - çoklu yansıma mekanizmalarının en etkin şekilde kullanılarak yüksek EM koruma sağlayabilen FNK filmlerin iki elektriksel iletken CNT filmlerin arasına termal olarak iletken Bor Nitrür (BN) filmler konumlandırılarak CNT-BN-CNT tabakalı yapı üretilmiştir. Yine bu grup içerisindeki hacim ve yüzde ağırlık miktarlarının değiştirilmesiyle optimum özellikteki filmlerin üretilmesi amaçlanmıştır (Şekil 3.9).

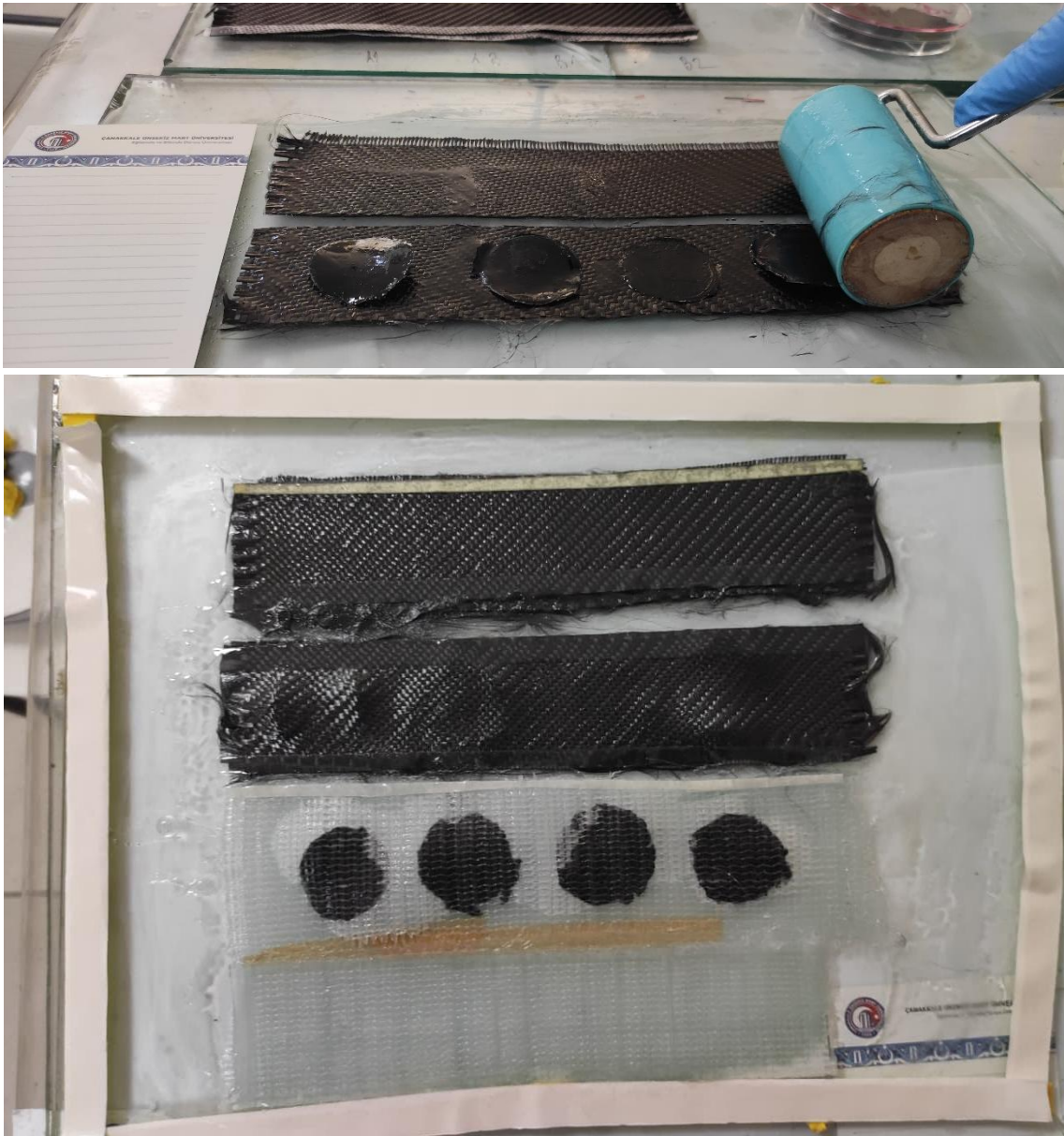


Şekil 3.9. CNT-BN-CNT yapıları FNK filmler

3.3.5. Beşinci grup: Cam elyaf ve karbon fiber takviyeli polimer kompozit yapıların tasarımı ve üretimi

Bu çalışmada, elektromanyetik girişim (EMI) koruyucu özellikleri optimize edilmiş çok katmanlı sandviç yapılar geliştirilmiştir. Bu EMI koruyucu sandviç yapıların özgün bir mühendislik yaklaşımıyla bir kompozit malzeme içerisine gömülmesiyle elde edilecek olan yeni nesil EM kalkanlama modeli, stratejik bir malzeme olarak tasarlanmıştır. Kompozit tasarım stratejisinin temelini, vakum infüzyon yöntemi kullanılarak iki CNT esaslı filmin arasına yerleştirilen BN katkılı bir film oluşturmaktadır. Böylece toplam üç katmandan oluşan ve her biri belirli fonksiyonel özelliklere sahip olan CNT-BN-CNT tipi bir sandviç yapı elde edilmiştir. Bu yapı; dış katmanlarda elektriksel iletkenliği yüksek CNT tabakaları, orta katmanda ise termal iletkenliği artırmayı hedefleyen BN tabakası içerecek şekilde düzenlenmiştir.

Üretilen bu üç katmanlı film yapısı, farklı takviye elemanlarıyla birlikte kompozit hale getirilmiştir. İlk olarak, CNT–BN–CNT yapısı iki adet cam elyaf takviyeli kumaş katmanı arasına yerleştirilmiş ve el yatırma (hand lay-up) yöntemi ile epoksi reçine uygulanarak kompozit malzeme haline getirilmiştir. İkinci olarak ise, aynı sandviç yapı bu kez iki adet karbon fiber dokuma kumaş arasına yerleştirilerek aynı üretim yöntemiyle kompozit haline getirilmiştir (Şekil 3.10). Her iki yapı için de reçine homojenliğini sağlamak ve boşluksuz bir yapı elde etmek amacıyla vakum destekli infüzyon işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.10. El yatırma (hand lay-up) yöntemiyle kompozit üretimi



Şekil 3.11. Vakum infüzyon yöntemi ile karbon fiber ve cam elyaf takviyeli kompozit üretimi

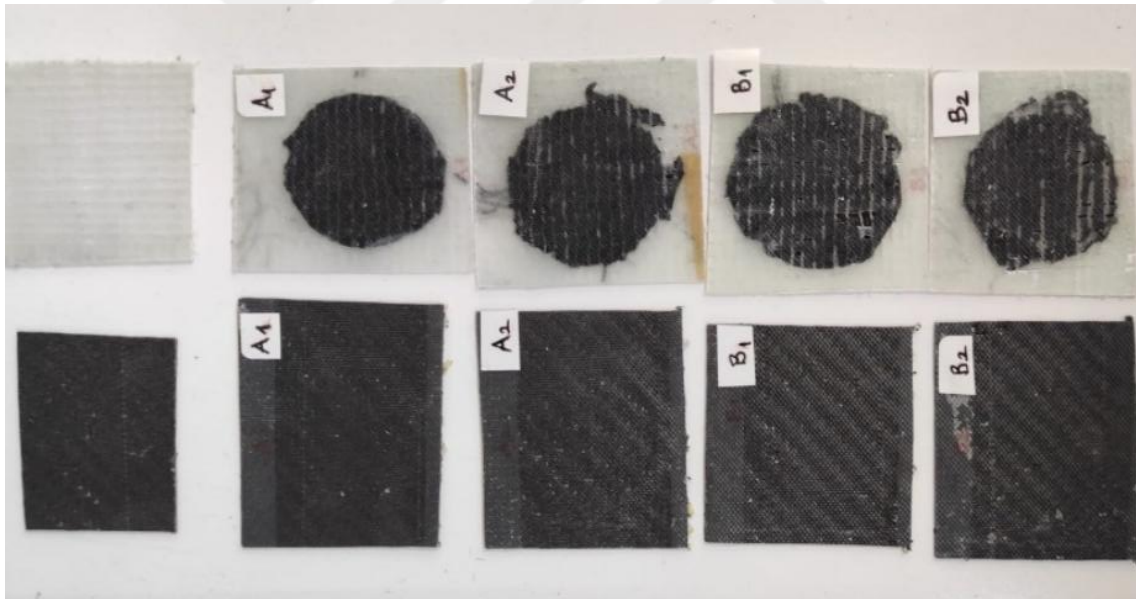
Çalışma kapsamında, kompozitlerin EMI koruyucu performansını etkileyen parametreleri araştırmak amacıyla dört farklı varyasyona sahip sandviç yapılar tasarlanmıştır. Bu varyasyonlar, CNT filmlerinin hacmi ve BN içeriğinin değişimiyle elde edilmiştir:

CNT içeriği sabit %10 ağırlık oranında tutulmuş, ancak her bir CNT tabakası için 30 ml ve 60 ml olmak üzere iki farklı hacim seçilmiştir.

Ara katman olarak kullanılan BN katkılı filmde ise sabit 30 ml hacim kullanılmış; ancak BN oranı %5 ve %10 olmak üzere iki farklı ağırlıkça katkı düzeyine göre hazırlanmıştır.

Bu sayede, her biri farklı CNT hacmi ve BN oranı içeren dört farklı sandviç yapı varyantı oluşturulmuş ve bu yapıların elektromanyetik koruyucu etkinlik performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Böyle bir tasarım yaklaşımı, sadece katkı maddelerinin miktarlarının değil, aynı zamanda takviye kumaş türünün (cam elyaf ve karbon fiber) EMI performansı üzerindeki etkisinin de değerlendirilmesine olanak tanımaktadır (Şekil 3.12).

Elde edilen bu CNT/BN/CNT hibrit ara tabakalı karbon fiber takviyeli polimer kompozit yapılar, ileri düzey elektromanyetik koruma uygulamaları için çok işlevli, optimize edilebilir ve üretilebilirliği yüksek malzeme alternatifleri sunmaktadır.



Şekil 3.12. Karbon fiber ve cam elyaf kumaşlar kullanılarak üretilen kompozit yapılar

3.4. Fonksiyonel Nanokompozit Filmlerin Kalınlık Ölçümleri

Elektriksel iletkenlik ve elektromanyetik koruyucu etkinliğinde, koruma sağlayacak malzemenin kalınlığı önemli bir parametredir. Elektromanyetik olarak koruma gerektiren elektronik cihazlar küçük, boyutsal ve tasarım olarak sınırlı veya hafif bir malzeme olarak tasarlanabilir. Bu sebeple üretilen fonksiyonel nanokompozit filmlerin kalınlığının mikrometre boyutlarında, kontrol edilebilir olması gerekmektedir.

Aynı zamanda film kalınlığının malzemenin elektriksel iletkenliği ve elektromanyetik koruyucu etkinliğine olan etkisinin incelenebilmesi için üretilen filmlerin kalınlıkları mikrometre ile 5 farklı yerden ölçülmüştür (Şekil 3.13). Bu 5 kalınlık değerinin en ince ve en kalın değerleri çıkarılarak kalan 3 kalınlık değerinin ortalaması FNK film kalınlığını belirlenmiştir.



Şekil 3.13. FNK filmlerin mikrometre ile kalınlık ölçümü

3.5. Karakterizasyon

Vakum filtrasyon yöntemi ile elde edilen tek tabakalı ve çok tabakalı (sandviç yapı) FNK filmlerin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla; bu malzemelerin morfolojik, yapısal, elektriksel, EM koruyucu etkinliği ve termal iletkenlik özelliklerini incelemeye yönelik çeşitli karakterizasyon tekniklerinden yararlanılmıştır. Uygulanan analiz yöntemleri nanokompozit filmlerin yüzey topografyası, iç yapısal düzeni, elektriksel iletkenlik düzeyleri, elektromanyetik koruyucu etkinliği BN nano takviyesinin termal iletkenlik performanslarının detaylı bir şekilde ortaya konulmasını sağlamıştır. Böylelikle, üretim parametrelerinin ve katkı malzemelerinin nihai film özellikleri üzerindeki etkileri çok boyutlu olarak değerlendirilebilmiştir. Aşağıda filmler için gerçekleştirilen karakterizasyon çeşitleri başlıklar halinde açıklamalarıyla birlikte sunulmuştur.

3.5.1. Yapısal karakterizasyon

Yapısal karakterizasyon, bir malzemenin iç yapısının, morfolojisinin, faz bileşiminin, kristal yapısının ve atomik/moleküler düzeninin belirlenmesi amacıyla yapılan inceleme ve analizler bütünüdür.

FNK'larda yapısal karakterizasyon, nanoparçacıkların matris içindeki dağılımını, yönelmesini, tabakalar arası bağlanmayı ve olası aglomerasyonları ortaya koyarak, elde edilen elektriksel, termal ve elektromanyetik özelliklerin nedenlerini anlamada kritik rol oynar.

3.5.1.1. X-ışını kırınımı

X-ışını Kırınımı (X-ray Diffraction, XRD), katı haldeki kristal yapılı malzemelerin atomik düzeydeki yapısal düzenini belirlemek amacıyla kullanılan güçlü bir analiz yöntemidir. Bu teknik, bir malzemenin kristal yapısını, faz bileşimini, örgü parametrelerini, kristalin boyutunu, iç gerilmeleri ve kristal yönelimini nicel ve nitel olarak incelemeye olanak tanır. XRD'nin temel prensibi, bir kristal yapıya gönderilen X-ışınlarının kristal düzlemlerinden kırınımına uğraması ve bu kırınımın belirli açılarda yapıcı girişim göstererek karakteristik desenler oluşturmasıdır. Bu kırınım desenleri, Bragg Yasası ($n\lambda = 2d \cdot \sin\theta$) temel alınarak analiz edilir. Burada, λ X-ışınının dalga boyunu, d kristal düzlemleri arası mesafeyi ve θ kırınım açısını ifade eder (Atıf).

Bu tez çalışmasında farklı türde nano yapılar içeren FNK numunelerin kristal yapılarının karşılaştırmalı analizi amacıyla X-ışını kırınımı (XRD) yöntemi uygulanmıştır. Her bir numune, %10 ağırlıkça oranında nano katkı içerecek şekilde ve 60 ml'lik sabit hacimde hazırlanmıştır. Yapısal analizlerin sağlıklı ve anlamlı şekilde değerlendirilebilmesi için, herhangi bir nano katkı içermeyen saf selüloz bazlı filmler referans örnek olarak kullanılmıştır. XRD analizlerinden elde edilen kırınım desenleri incelenerek, her bir katkı türüne ait karakteristik kristal fazların varlığı, yeni faz oluşumları, katkı-matris etkileşiminden kaynaklanan yapısal değişimler ve kristalinite farklılıkları belirlenmiştir. Özellikle 2θ değerlerinde gözlemlenen karakteristik piklerin konumları, şiddetleri ve genişlikleri kullanılarak, FNK'ların yapısal özellikleri detaylı olarak yorumlanmıştır. Bu sayede, farklı nano takviyelerin (örneğin CNT, grafen, BN, hibrit sistemler) selüloz matris içindeki kristal yapı üzerindeki etkileri sistematik olarak ortaya konmuştur.

3.5.1.2. Raman spektroskopisi

Raman spektroskopisi, moleküllerin titreşimsel ve diğer düşük frekanslı enerji düzeylerindeki geçişlerini inceleyerek, bir maddenin kimyasal ve yapısal özelliklerini belirlemeye yarayan, temassız ve tahribatsız bir karakterizasyon tekniğidir. Raman spektroskopisinin çalışma prensibi, yüksek enerjili bir monokromatik ışık kaynağının (genellikle lazer) bir numuneye yönlendirilmesi ve bu ışığın maddeyle etkileşimi sonucunda meydana gelen saçılmaların analizine dayanır. Saçılan ışığın büyük çoğunluğu elastik saçılma (Rayleigh saçılması) ile aynı dalga boyuna sahipken, çok küçük bir kısmı enerji alışverişine bağlı olarak inelastik saçılma (Raman saçılması) gösterir. Bu inelastik saçılma sonucu oluşan dalga boyu değişimi, maddenin karakteristik titreşim modlarını yansıtır ve “Raman shift” (cm^{-1}) olarak spektrumda kaydedilir. Raman spektroskopisi, özellikle moleküller arası bağlar, simetri, kristalinite ve fonksiyonel gruplar hakkında detaylı bilgi verir. Yüksek hassasiyetle hem organik hem de inorganik bileşenleri analiz edebilmesi sayesinde çok çeşitli bilimsel alanlarda kullanılmaktadır (Atıf).

CNT ve grafen katkılı selüloz filmlerin yapısal karakterizasyonunda Raman spektroskopisi önemli rol oynar. Bu tür çalışmalarda genellikle:

D bandı ($\sim 1.350 \text{ cm}^{-1}$): Yapıdaki kusurları ve bozulmaları gösterir,

G bandı ($\sim 1.580\text{--}1.600 \text{ cm}^{-1}$): Sp^2 hibritleşmiş karbon yapılarına işaret eder,

D/G oranı, özellikle CNT ve grafen takviyeli kompozitlerin kristalinite düzeyinin karşılaştırılmasında yaygın olarak kullanılır. Bu oran arttıkça, yapıdaki düzensizliklerin arttığı anlaşılır (Atıf).

Bu tez çalışmasında, farklı türde nano yapılar içeren fonksiyonel nano kompozit (FNK) numunelerin moleküler ve kristalin yapılarına ilişkin detaylı bilgi elde edebilmek amacıyla Raman spektroskopisi yöntemi uygulanmıştır. Her bir numune, %10 ağırlıkça oranında nano katkı içerecek şekilde ve 60 ml sabit hacimde hazırlanmıştır. Karakterizasyon sonuçlarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmesi için, herhangi bir nano katkı içermeyen saf selüloz bazlı filmler referans numuneler olarak kullanılmıştır. Raman analizleri sonucunda elde edilen spektrumlar incelenerek, her bir katkı türüne özgü karakteristik bantlar tanımlanmış; özellikle karbon bazlı katkıların (CNT, grafen) kristal yapıları, kusur oranları ve katkı-matris etkileşimleri D ve G bantları üzerinden değerlendirilmiştir. BN katkılı numunelerde ise B–N bağlarına karşılık gelen karakteristik Raman piklerinin varlığı ve konumları analiz edilmiştir. Saf selülozun özgün titreşim modları ile katkı sonrası oluşan bant kaymaları ve şiddet değişimleri karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır. Elde edilen Raman spektrumlarında bantların

konumları (Raman shift, cm^{-1}), pik şiddetleri ve özellikle D/G oranları gibi parametreler kullanılarak, katkıların yapısal bütünlüğe etkisi, kusur düzeyi, kristalinite ve homojen dağılım durumu sistematik olarak değerlendirilmiştir. Bu sayede, farklı nano yapıların selüloz matrisi ile olan etkileşimleri ve bu etkileşimlerin kompozitlerin genel yapısal düzeni üzerindeki yansımaları detaylı şekilde ortaya konmuştur.

3.5.2. Morfolojik karakterizasyon

3.5.2.1. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), malzeme yüzeylerinin morfolojik özelliklerini yüksek çözünürlükte görüntülemek amacıyla kullanılan güçlü bir karakterizasyon tekniğidir. SEM, klasik optik mikroskoplardan farklı olarak, örnek yüzeyine odaklanmış yüksek enerjili bir elektron demeti göndererek çalışır. Yüzeğe çarpan bu elektronlar, örnekten çeşitli sinyallerin (sekonder elektronlar, geri saçılan elektronlar, karakteristik X-ışınları vb.) açığa çıkmasına neden olur. Toplanan bu sinyaller, malzemenin yüzey topografyası, kompozisyonu ve mikroyapısal özellikleri hakkında detaylı bilgi sağlar. SEM'in başlıca avantajları arasında yüksek büyütme oranı (10x ila 100.000x arası), geniş alan derinliği ve nanometre ölçeğinde çözünürlük kapasitesi yer almaktadır. Bu yönüyle, özellikle nanoyapıların, kompozit malzemelerin, ince filmlerin ve yüzey modifikasyonlarının analizinde vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir.

Bu tez çalışmasında, farklı nano yapılarla takviye edilmiş fonksiyonel nano kompozit (FNK) filmlerin yüzey morfolojilerini ve mikro-yapısal özelliklerini incelemek amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) (JEOL SEM 7100 EDX) ile görüntüleri alınarak analizi gerçekleştirilmiştir. Her bir numune, %10 ağırlıkça nano katkı içerecek şekilde ve 60 ml sabit hacimde hazırlanmış olup, katkısız saf selüloz filmler karşılaştırmalı değerlendirme için referans numuneler olarak kullanılmıştır. Numune yüzeyindeki görüntü kalitesinin artırılması için 5-8 nm kalınlığında Au-Pd karışımı ile kaplanmıştır. SEM analizleri ile FNK'ların yüzey yapılarındaki değişimler, nano katkıların dağılımı, aglomerasyon durumu, gözenek yapısı ve yüzey homojenliği detaylı olarak gözlemlenmiştir. Her bir katkı türüne (CNT, Grafen, BN ve Hibrit sistemler) ait tipik morfolojik yapılar ve bu yapıların selüloz matrisi ile olan fiziksel uyumu SEM görüntüleri üzerinden yorumlanmıştır. Elde edilen yüksek çözünürlüklü SEM mikro-görüntüleri, FNK'ların iç yapısal organizasyonuna ve katkıların matris içerisindeki dağılım kalitesine dair görsel kanıtlar sunmuştur. Özellikle potansiyel aglomerasyon

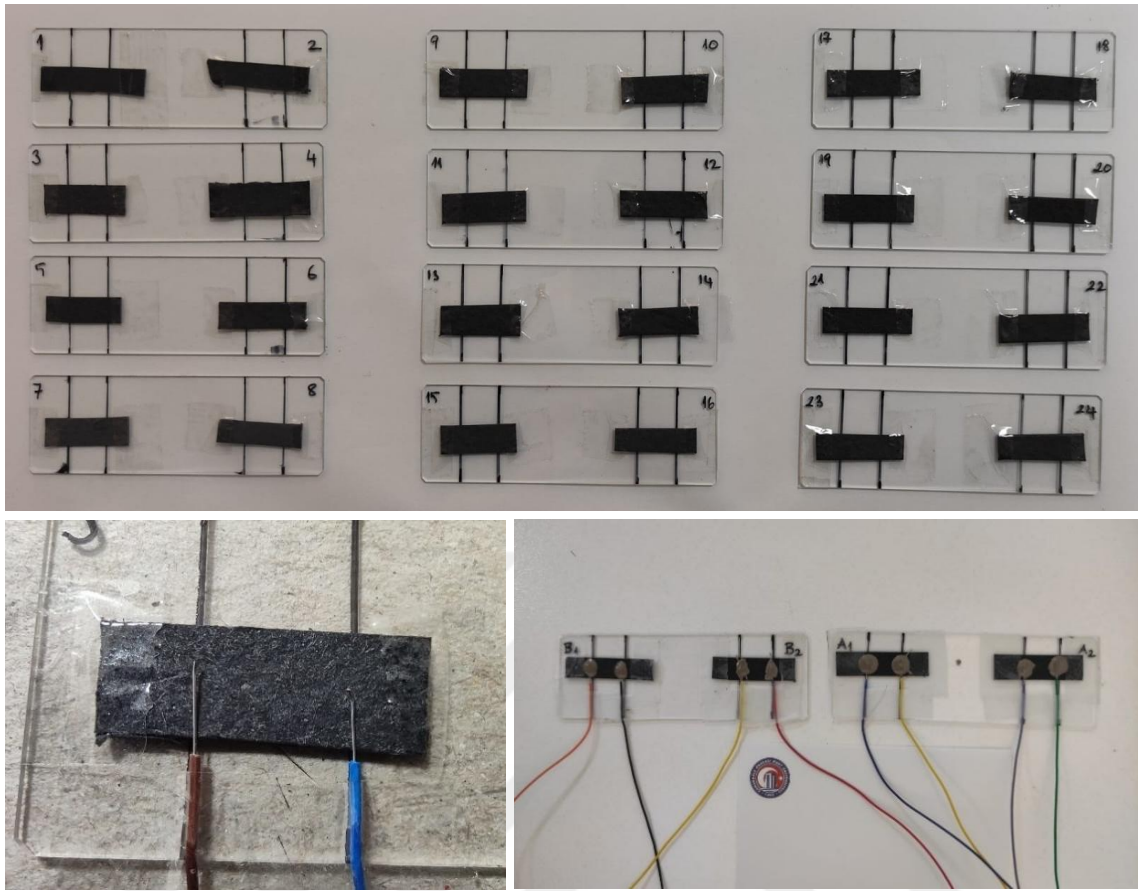
bölgeleri gibi parametreler, malzemenin elektriksel ve mekanik performansı ile doğrudan ilişkilendirilmiştir. Bu kapsamda, her bir katkı malzemesinin FNK'ların mikroyapısal bütünlüğü üzerindeki etkisi karşılaştırmalı ve sistematik biçimde analiz edilmiştir.

3.5.3. Elektriksel karakterizasyon

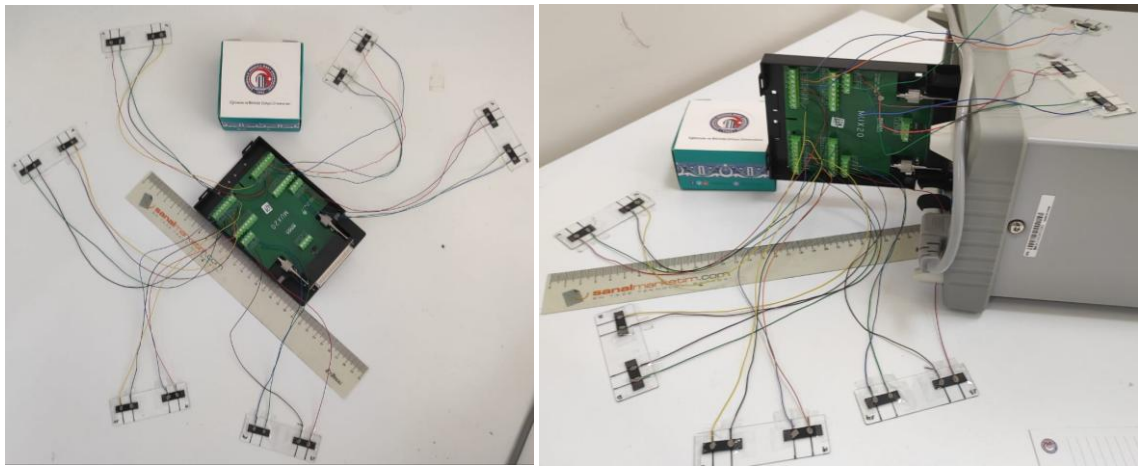
Matris malzeme içerisine eklenen aynı parametrelere sahip CNT, %32 grafen ile doplanmış karbon nanotüp (G-CNT), karboksili gruplarla fonksiyonelleştirilmiş karbon nanotüp (CNT-COOH), grafen (GR) ve karbon nanotüp ile grafenin eşit oranlarla eklenmesiyle elde edilen hibrit nanoparçacıklı (HİB) takviye malzemelerinin eklenmesiyle üretilen tüm FNK filmlerin elektriksel iletkenliklerinin belirlenmesi ve bu iletkenlik değerlerinin filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinliğine olan etkisini kapsamlı ve detaylı bir şekilde yorumlanması adına multimetre (Şekil 3.14) ve iki uçlu elektriksel direnç ölçüm cihazı (two probe method) kullanılarak Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'da gösterildiği şekilde numuneler hazırlanır ve soketin ilgili portlarına bağlanmıştır. Şekil 3.17'deki iki uçlu (two probe) direnç ölçüm cihazı ile elektriksel direnç ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bölüm 3.4'te hesaplanan film kalınlıklarının elektriksel direnç ve dolayısıyla elektriksel iletkenliğe olan etkisini daha net belirleyebilmek için kalınlığa bağımsız spesifik elektriksel iletkenlik değerleri de hesaplanarak karşılaştırmalı şekilde araştırma sonuçları ve tartışma kısmında verilmiştir.



Şekil 3.14. FNK filmlerin multimetre ile direnç ölçümleri



Şekil 3.15. FNK filmlerin iki uçlu direnç ölçüm numunelerinin hazırlanması



Şekil 3.16. FNK filmlerin iki uçlu direnç ölçüm cihazına bağlanması



Şekil 3.17. İki uçlu (two probe) direnç ölçüm cihazı

3.5.4. Elektromanyetik karakterizasyon

Elektromanyetik koruyucu etkinlik, bir malzemenin elektromanyetik dalgaların geçişini engelleme veya zayıflatma yeteneğini nicel olarak ifade eden bir performans ölçütüdür. Bu kavram, EM dalgaların kontrol altına alınmasını gerektiren birçok ileri teknoloji alanında kritik öneme sahiptir. Özellikle elektronik devreler, haberleşme sistemleri, tıbbi cihazlar ve savunma sanayisi gibi uygulamalarda, dış kaynaklı elektromanyetik sinyallerin zararlı etkilerini azaltmak ve içsel sinyallerin dışarıya sızmasını önlemek için yüksek EMI koruma sağlayan malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır.

Elektromanyetik koruyucu etkinlik genellikle desibel (dB) cinsinden ifade edilir ve malzemenin elektromanyetik dalgayı ne ölçüde soğurduğu, yansıttığı ve iletimini engellediği gibi üç temel bileşene dayanır: yansıma (reflection), soğurma (absorption) ve çoklu iç yansıma (multiple internal reflection). Bu bileşenlerin toplamı, malzemenin toplam koruyucu seviyesini belirler. Teorik olarak, EMI SE şu şekilde formüle edilebilir:

$$SE \text{ (dB)} = R + A + B.$$

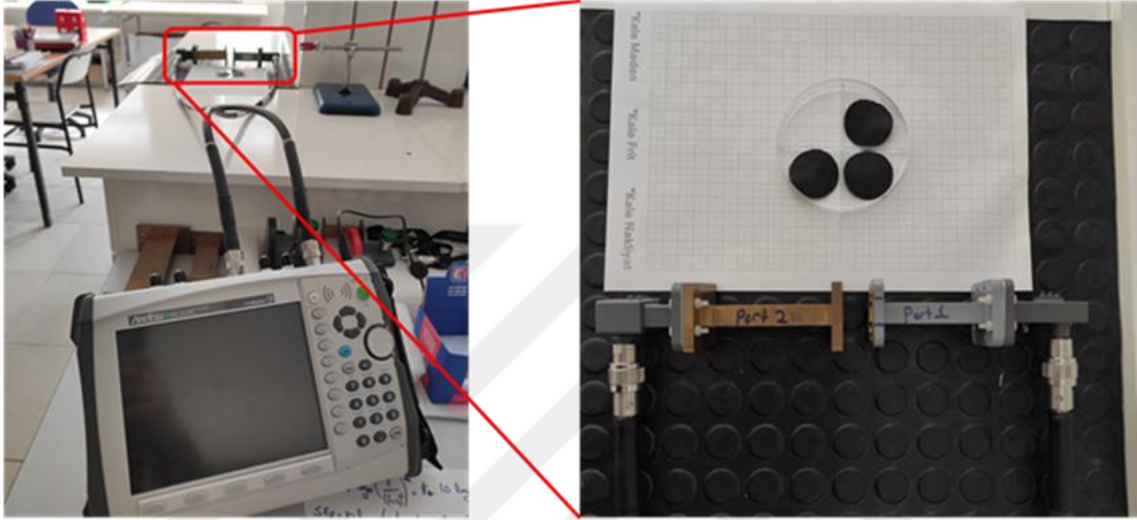
Burada;

R = Yansıma kaybı (reflection loss),

A = Soğurma kaybı (absorption loss),

B = İç yansıma katkısıdır (özellikle ince filmlerde önemlidir).

Üretilen tüm filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinlik değerlerinin ölçülmesi için Anritsu marka ölçüm cihazı kullanılmıştır. Cihazın sahip olduğu iki port arasına filmlerin yerleştirilmesiyle bir porttan diğerine sağlanan elektromanyetik dalganın ne kadarının diğer porta geçiş sağladığı ve ne kadarının yansıdığı tespit edilmesi prensibine dayanan metot ile ölçümler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.18). Ölçümü yapan cihaz ekranında S11, S12, S21 ve S22 olmak üzere 4 farklı bölüm vardır (Şekil 3.19) .



Şekil 3.18. Elektromanyetik koruyucu etkinlik ölçüm cihazı

S12 bölümünde cihaz tarafından oluşturulan grafik ve değerler bir excel dosyasına aktarılarak veriler tablo haline getirilmiştir. Tablodaki S12 değerleri elektromanyetik koruyucu etkinlik değerini dB cinsinden veren denklem ile hesaplanmakta ve nümerik olarak sıralanmaktadır (Denklem 18).

$$SET = 10 \log(|S12|^2) = 10 \log(|S21|^2) = 10 \log(1/T) \quad (18)$$

Elde edilen veriler ile ilgili FNK filmlerin en yüksek EM koruyucu etkinliği, ortalama EM koruyucu etkinliği ve film kalınlığının hesaplamalara ilave edilmesiyle spesifik EM koruyucu etkinlik değerleri (SSE) elde edilmektedir (Denklem 19).

$$SSE \text{ (dB/mm)} = \frac{SE(\text{max})}{t(\text{mm})} \quad (19)$$

Burada t; FNK film kalınlığının mm cinsinden değeridir.

Her bir numune için tek tek oluşturulan bu excel tablolarından elde edilen en yüksek dB değeri, o numunenin en yüksek elektromanyetik koruyucu etkinliğe sahip olduğu değer olarak alınmıştır. Yine her bir film için 3 kez bu test yapılarak ortalama elektromanyetik koruyucu etkinlik değeri hesaplanmıştır.



Şekil 3.19. CNT-BN-CNT hibrit ara tabakalı karbon fiber ve cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin elektromanyetik koruyucu etkinliklerinin ölçümü

3.5.5. Termal iletkenlik karakterizasyonu

Saf selüloz ve bor nitrür (BN) katkılı fonksiyonel filmlerin termal iletkenlik özelliklerini karşılaştırmalı olarak değerlendirebilmek amacıyla laboratuvar ortamında kontrollü bir deney düzeneği kurulmuştur. Deney kapsamında, yaklaşık 200 mikrometre kalınlığında iki farklı film numunesi üretilmiştir: biri yalnızca saf selüloz içeren, diğeri ise %10 oranında BN katkısı içeren filmlerdir. Her iki film de 30 ml hacminde çözeltiler kullanılarak vakum filtrasyon yöntemiyle hazırlanmış ve benzer kalınlıkta elde edilerek karşılaştırılabilir duruma getirilmiştir.

Termal karakterizasyon deneyinde, film numunelerine uygulanan harici enerji kaynağı olarak 40 Watt gücünde akkor flamanlı bir ampul kullanılmıştır. Işık kaynağı, her iki film numunesine de eş zamanlı olarak 10 cm mesafeden yönlendirilmiş ve böylece yüzeylerin ısınım yoluyla eşit miktarda enerji alması sağlanmıştır. Bu yöntemde, iletilen ısının film boyunca nasıl yayıldığını gözlemleyebilmek için, her bir film numunesinin ön ve arka yüzeylerine temas eden termokupl sensörleri yerleştirilmiştir. Termokupullar yardımıyla, filmlerin ısınma süresince ön ve arka yüzeylerindeki sıcaklık değişimleri her dakika izlenmiş ve kaydedilmiştir. Elde edilen sıcaklık verileri kullanılarak, Fourier'in ısı iletim yasası temel alınmak suretiyle her bir numunenin etkin termal iletkenlik katsayısı hesaplanmıştır. Aynı zamanda, yüzey sıcaklık farklarının zamana bağlı değişimi incelenerek, her iki film için ısı iletim davranışı karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir (Şekil 3.20).

Bu deneysel yaklaşım, selüloz bazlı kompozit filmlere BN katkısının ısıl performansa olan katkısını doğrudan değerlendirmeye olanak sağlamış; katkılı ve katkısız yapıların yüzey ısı dağılımı ve iletim kapasitesi arasındaki farkları ortaya koymuştur. Elde edilen veriler, BN gibi yüksek termal iletkenliğe sahip seramik katkıların, selüloz matrisi içinde homojen olarak dağıtılması durumunda, ısıl yönetim özelliklerini belirgin şekilde iyileştirebileceğini göstermektedir.



Şekil 3.20. Saf selüloz ve BN katkılı selüloz filmlerin termal iletkenlik ölçümü deney seti

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu tez kapsamında, elektromanyetik girişim (EMI) koruyucu olarak tasarlanan ve geleneksel kağıt üretim prosesi (paper-making method) ile laboratuvar ortamında üretilen fonksiyonel nanokompozit filmlerin kapsamlı bir şekilde yapısal, morfolojik, elektriksel ve termal özellikleri analiz edilmiştir. Çalışmada kullanılan selüloz esaslı film matrisleri, çeşitli nano katkılarla (özellikle karbon nanotüpler ve bor nitrür nanopartikülleri) işlevsel hale getirilmiş ve çok katmanlı mimarilerle zenginleştirilerek performansları iyileştirilmiştir.

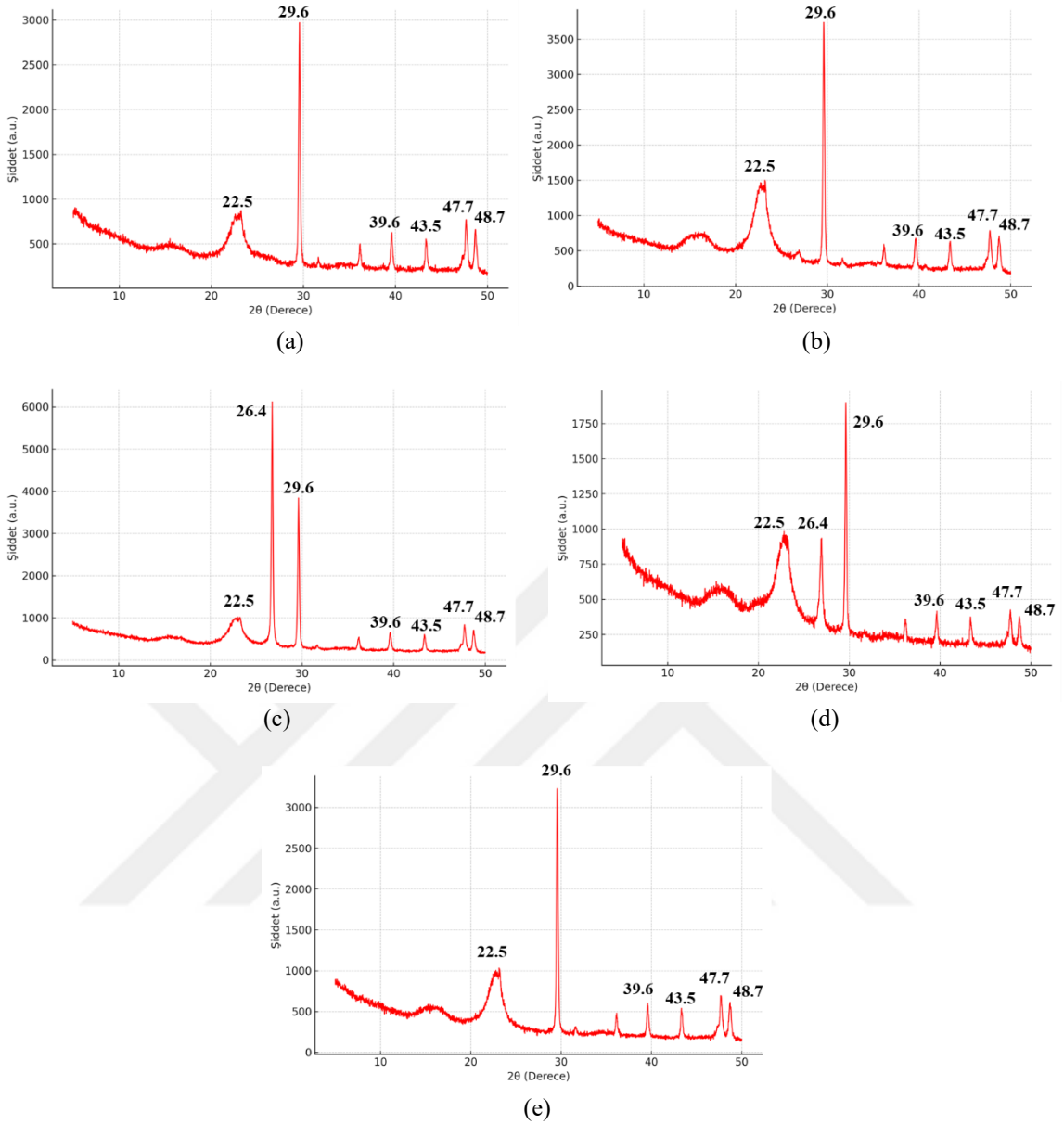
FNK filmlerin ve hibrit (CNT/BN/CNT) ara tabakalı karbon fiber ve cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin çok yönlü performanslarını ortaya koymak amacıyla yapılan test ve karakterizasyon yöntemlerinden elde edilen bulgular aşağıda geniş bir şekilde karşılaştırmalı olarak açıklanmıştır.

4.1. FNK Filmlerin Yapısal Karakterizasyonu

4.1.1. X-ray kırınımı

Bu çalışmada, vakum filtrasyon yöntemi ile üretilen ve sabit hacim ile aynı ağırlıkça yüzde oranlarında farklı nano takviyeler içeren kompozit filmlerin kristal yapılarının incelenmesi amacıyla X-ışını kırınımı (XRD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, $0-50^\circ$ 2θ aralığında elde edilen kırınım desenleri kullanılmış ve tüm numuneler aynı ölçüm parametreleri altında değerlendirilmiştir. Elde edilen XRD desenleri sırasıyla; referans olarak kullanılan saf selüloz filmi (Numune 1), CNT katkılı film (Numune 2), GR katkılı film (Numune 3), CNT ve GR'nin birlikte yer aldığı hibrit film (Numune 4) ile BN içeren film (Numune 5) numunelerine aittir. Her bir desen, ilgili katkı malzemesinin selüloz matrisi içerisindeki etkisini yansıtan karakteristik pikler, pik konumları, yarı genişlik değerleri ve şiddet değişimleri üzerinden kristalinlik derecesi ile yapısal değişimleri ortaya koymaktadır (Şekil 4.1)

Çalışmanın sonunda, beş farklı film numunesine ait XRD desenleri Şekil 4.2'de tek bir grafik üzerinde üst üste getirilerek kapsamlı bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu karşılaştırmalı analiz, nano takviyelerin film yapısında meydana getirdiği kristalografik değişimleri, yeni faz oluşumlarını, pik şiddeti ve konumlarındaki kaymaları referans film ile karşılaştırarak değerlendirme imkânı sunmuştur. Böylece, farklı nano katkıların selüloz bazlı kompozit filmler üzerindeki kristal yapı etkileri bütüncül bir bakış açısıyla ortaya konmuştur (Şekil 4.2).



Şekil 4.1. Dört farklı nano takviye ve referans numune ile hazırlanmış FNK'ların XRD grafiği. a) Saf selüloz, b) CNT, c) GR, d) HİB, e) BN

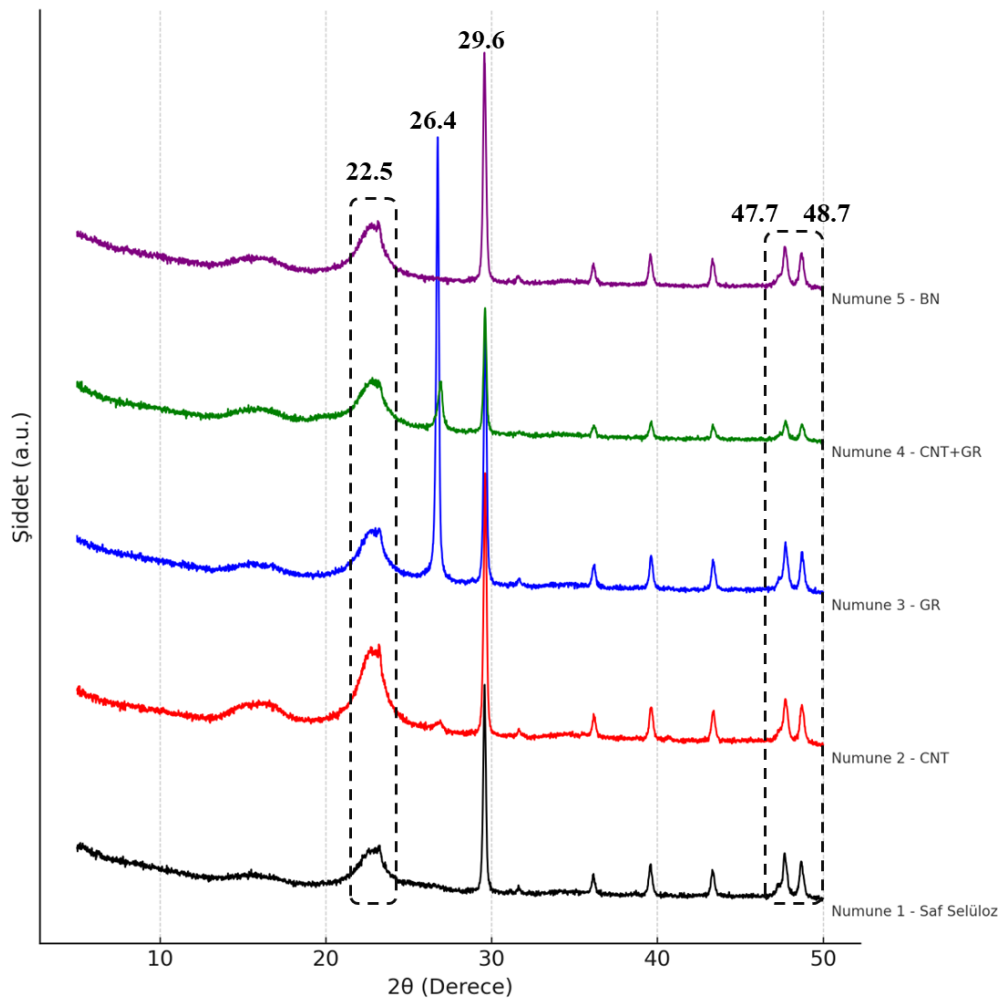
Şekil 4.1'de sunulan XRD desenleri, saf selüloz ile farklı nano takviye türleri (CNT, GR, HİB ve BN) içeren kompozit filmlerin kristalografik özelliklerini ortaya koymaktadır. Saf selüloz numunesi, literatürde raporlanan selüloz-II fazına ait karakteristik difraksiyon piklerini (yaklaşık $2\theta \approx 12-13^\circ$ ve $22-23^\circ$ civarında) göstermekte olup bu pikler kristalin bölgeye karşılık gelen örgü düzlemlerini temsil etmektedir.

CNT katkılı film, selüloz matrisine eklenen karbon nanotüplerin varlığıyla birlikte yaklaşık $2\theta \approx 25-26^\circ$ civarında CNT'lere özgü (002) grafitik düzlem pikini ortaya çıkarmaktadır. Bu pik, literatürde raporlanan karbon nanotüp tabanlı kompozitlerde

gözlemlenen tipik yapısal özelliklerle uyumludur. GR katkıli filmde ise benzer konumda, ancak daha geniş ve nispeten düşük şiddetli bir (002) grafen piki görülmekte, bu durum grafen tabakalarının kısmen düzensiz istiflenmesinden kaynaklanmaktadır.

Hibrit katkıli numune, hem CNT hem de GR'ye ait difraksiyon özelliklerini bir arada sergilemekte; literatürdeki hibrit karbon takviyeli selüloz kompozitlerde bildirildiği gibi bu yapı, pik şiddetinde artış ve pik yarı genişliğinde daralma eğilimi göstermektedir. Bu durum, iki karbon yapısının birlikte kullanımıyla artan kristalin düzenin bir göstergesi olarak yorumlanabilir.

BN katkıli numune ise $2\theta \approx 26,7^\circ$ civarında hekzagonal bor nitrüre (h-BN) özgü (002) piki sergilemekte olup, bu pik konumu ve keskinliği literatürde raporlanan h-BN tabanlı polimer kompozitlerle uyumludur. Ayrıca, BN katkısı selüloz piklerinin şiddetini nispeten azaltmış, bu da amorf faz oranında artışa işaret etmektedir.



Şekil 4.2. Dört farklı nano takviye ve referans numune ile hazırlanmış FNK'ların karşılaştırmalı XRD grafiği

4.1.2. Raman spektroskopisi

Bu çalışmada, vakum filtrasyon yöntemi kullanılarak üretilen ve sabit hacim ile aynı ağırlıkça yüzde oranlarında farklı nano takviyeler içeren kompozit filmlerin Raman spektroskopisi analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, her bir film türüne ait karakteristik yapısal özelliklerin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Elde edilen Raman spektrumları sırasıyla; referans olarak kullanılan saf selüloz filmi, karbon nanotüp (CNT) katkılı film, grafen (GR) katkılı film, CNT ve GR'nin birlikte yer aldığı hibrit film ile bor nitrür (BN) içeren film numunelerine aittir. Her bir spektrum, ilgili katkı malzemesinin selüloz matrisi içerisindeki etkisini yansıtan belirgin pikler ve yapısal değişimleri ortaya koymaktadır. Çalışmanın sonunda, tüm film örneklerine ait Raman spektrumları tek bir grafik üzerinde üst üste getirilerek kapsamlı bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu karşılaştırmalı analiz, nano takviyelerin film yapısında meydana getirdiği değişimleri, pik şiddetlerini ve konumlarını referans filmle karşılaştırarak değerlendirme imkânı sunmuştur. Böylece, farklı nano katkıların selüloz bazlı kompozit filmler üzerindeki yapısal etkileri daha bütüncül bir bakış açısıyla analiz edilmiştir.

Şekil 4.3 detaylı bir şekilde incelendiğinde saf selülozun Raman spektroskopik analiz sonucunda, numunede $\sim 1090 \text{ cm}^{-1}$ civarında gözlemlenen güçlü C–O–C gerilme bandı, örneğin selüloz temelli yapıların karakteristik bir göstergesidir. Spektrumda karbon bazlı katkıların (CNT, GR) tipik D ($\sim 1370 \text{ cm}^{-1}$) ve G ($\sim 1590 \text{ cm}^{-1}$) bantlarının bulunmaması, numunenin katkısız ve organik bazlı olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, yapının hem kimyasal saflığına hem de yarı kristalin doğasına işaret etmektedir. Yoğunluk artışı ve simetrik pik yapısı, malzemenin yüksek saflıkta olduğunu ve Raman aktif bileşenlerin baskın olduğunu desteklemektedir. Karbon bazlı iletken katkılarla (CNT, GR vs.) kıyaslandığında, bu spektrum daha çok yalıtkan, dielektrik karakterli bir doğal polimeri temsil eder.

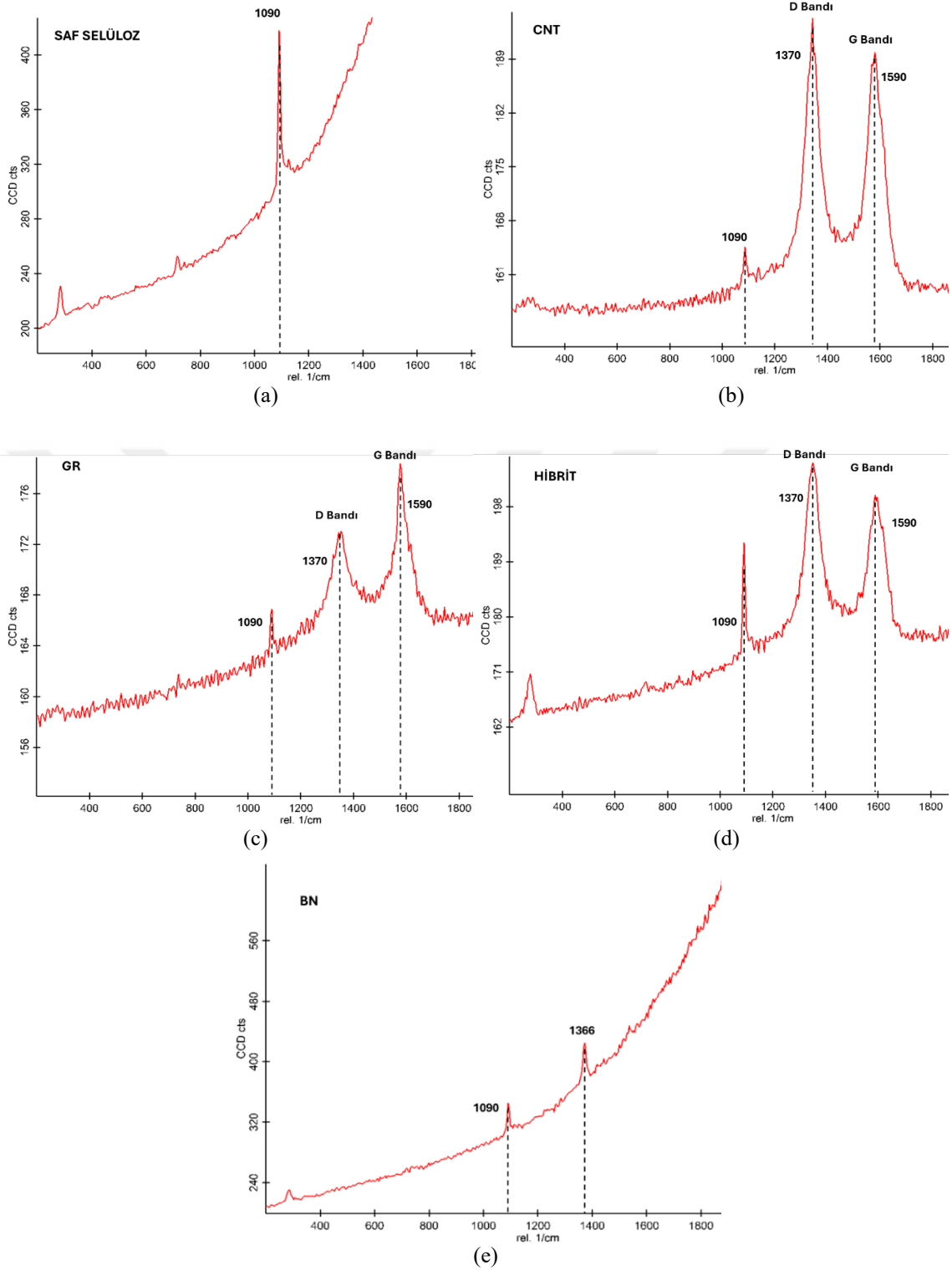
CNT filmin spektrumunda $\sim 1370 \text{ cm}^{-1}$ ve $\sim 1590 \text{ cm}^{-1}$ civarında yer alan iki belirgin pik dikkat çekmektedir. Bu pencerede görülen D ve G bantları, karbon bazlı iletken yapılar olan CNT için tipiktir. Piklerin keskinliği ve yüksekliği, karbon yapısının belirgin kristalin özellikler gösterdiğini temsil etmektedir. D bandı CNT'deki sp^3 hibritleşmesini, yapısal düzensizlikleri ve fonksiyonel grupları işaret eder. G bandı ise CNT/GR'nin düzlemsel yapısal bütünlüğü ve elektriksel iletkenliği temsil etmektedir.

GR filmin Raman spektrum sonuçlarına göre, numune spektrumunda $\sim 1370 \text{ cm}^{-1}$ ve $\sim 1590 \text{ cm}^{-1}$ gözlenen D ve G bantları, karbon bazlı iletken yapılar olan GR katkısını

doğrulamaktadır. Bu iki bandın şiddeti birbirine oldukça yakın olup, D/G oranının ~ 1 civarında olduğu değerlendirilmektedir. Bu durum, yapıda hem kristalin sp^2 yapılar hem de belirli düzeyde kusur/ sp^3 içeriği bulunduğunu göstermektedir. Ek olarak, 1090 cm^{-1} civarındaki C–O–C piki, selüloz matrisinin varlığını ortaya koymakta ve bu kompozitin hem yapısal hem de iletkenlik açısından dengeli bir fonksiyonel filme işaret ettiği sonucunu doğurmaktadır.

CNT ve GR'nin birlikte bulunduğu Hibrit filmlerin Raman spektroskopisi incelendiğinde, yaklaşık 1090 cm^{-1} , 1370 cm^{-1} , ve 1590 cm^{-1} civarında üç belirgin bant bulunmaktadır. Bu durum numunenin hem selüloz esaslı olduğunu, hem de CNT/GR gibi karbon bazlı iletken katkıları içerdiğini göstermektedir. Raman spektral analiz sonuçlarına göre, CNT katkılı filmde yaklaşık 195 birim, GR katkılı filmde ise yaklaşık 180 birim seviyesine ulaşan karakteristik G bandı yoğunlukları, hibrit yapıdaki filmde belirgin bir artış göstererek 210 birim seviyesini aşmıştır. Bu artış, hibrit filmde hem CNT hem de GR fazlarının birlikte ve etkin şekilde bulunduğunu göstermektedir. G bandının şiddetindeki bu yükselme, iki farklı karbon bazlı nano yapının sinerjik etkileşim içinde olduğunu ve karbon yapılarının katkısını artırdığını ortaya koymaktadır. Elde edilen bu bulgu, hibrit kompozitin yalnızca her iki katkı fazını fiziksel olarak içerdiğini değil, aynı zamanda bu fazların yapısal olarak etkin biçimde entegre olduğunu da doğrulamaktadır.

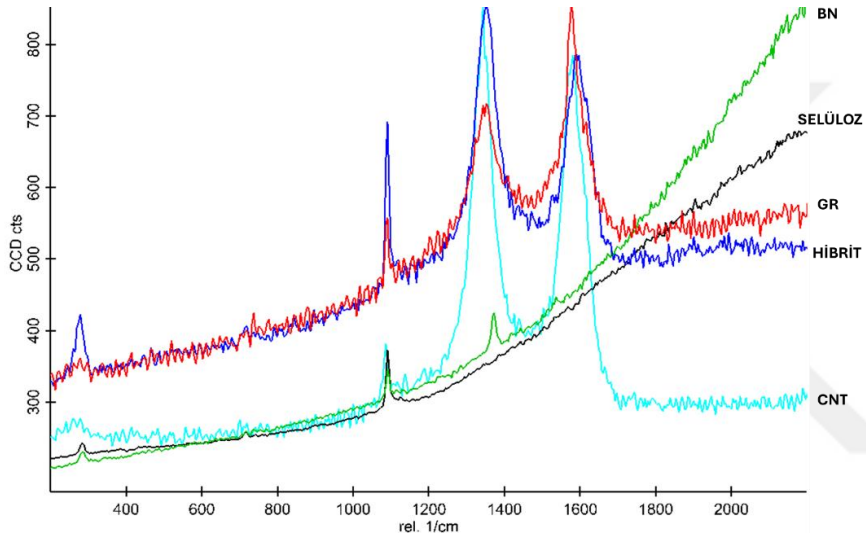
İncelenen BN filmin Raman spektrumunda, yaklaşık 1366 cm^{-1} civarında belirgin bir pik gözlemlenmiş olup bu bant, hegzagonal bor nitrür (h-BN) yapısına özgü E_{2g} düzlemsel vibrasyon moduna karşılık gelmektedir. Pik yapısının dar ve simetrik olması, BN'nin yüksek kristalinliğe sahip olduğunu göstermekte ve katkısız, yapısal olarak homojen bir film elde edildiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca spektrumda 1090 cm^{-1} civarında gözlenen ikincil bir pik, selüloz esaslı matrisin yapısal izlerini taşımaktadır. Bu bulgular, BN katkısının matris içinde etkin biçimde dağıtıldığını ve film yapısının hem optik hem de termal uygulamalarda kullanılabilecek nitelikte olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 4.3. Dört farklı nano takviye ve referans numune ile hazırlanmış FNK'ların raman grafiği. a) Saf selüloz, b) CNT, c) GR, d) HİB, e) BN

Farklı katkı türleriyle hazırlanan selüloz temelli nanokompozit filmlerin Raman analizleri, malzemelerin yapısal düzeni, kristalinlik derecesi ve katkıların matris

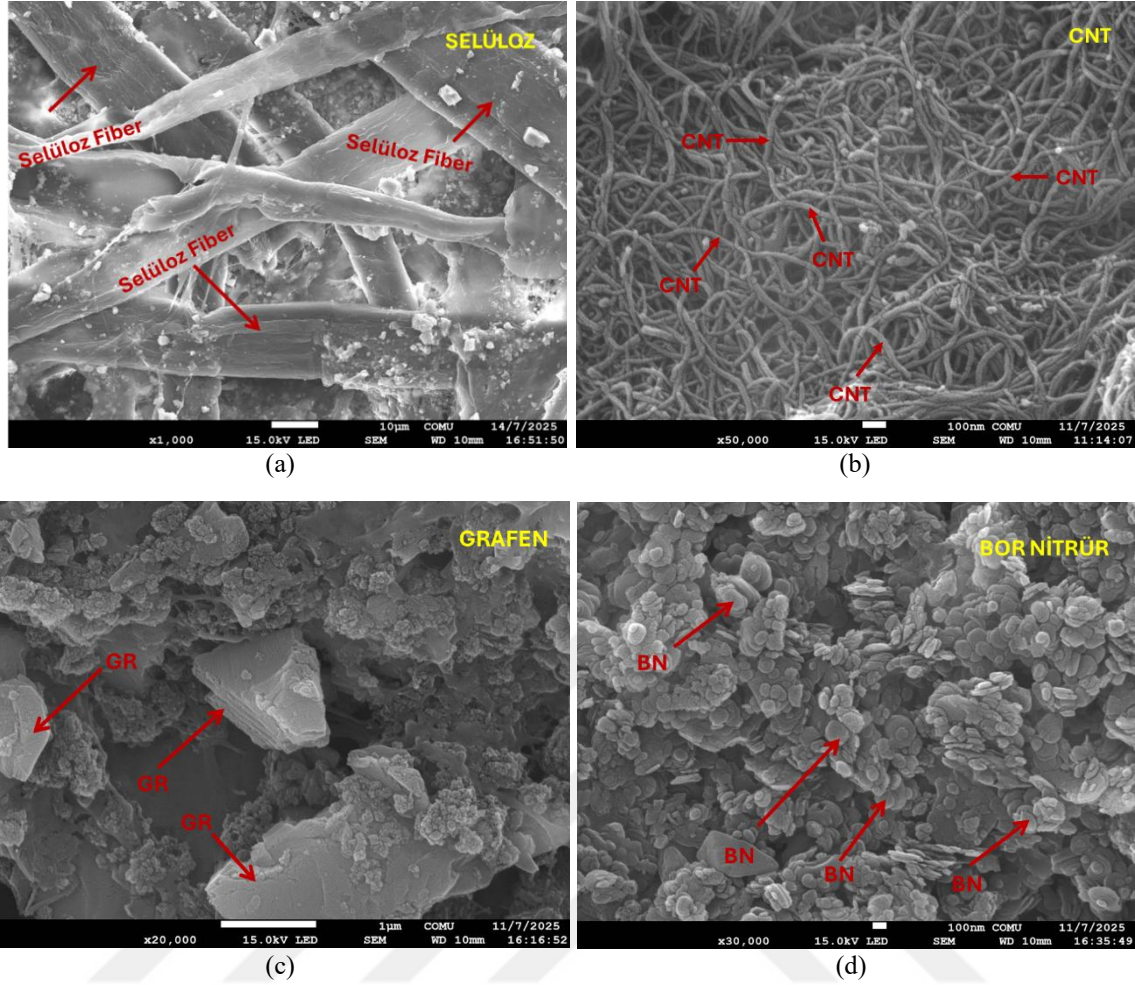
içerisindeki etkinliğine ilişkin önemli ipuçları sağlamaktadır. Özellikle hibrit katkılı filmler, D ve G bantlarının yüksek şiddetiyle birlikte katkıların etkin dağılımını ve etkileşimini yansıtarak en yüksek Raman aktifliğini göstermiştir. BN katkılı filmler ise, Raman aktifliğin düşük olmasına rağmen, karakteristik E_{2g} bandı ile yapının kristalin ve saf BN içerdiğini doğrulamaktadır. Bu kapsamlı spektral değerlendirme, her bir katkının film performansına olan etkisinin yapısal düzeyde takip edilmesini mümkün kılarak, malzeme tasarımında rasyonel seçimler yapılmasına zemin hazırlamaktadır. Bu beş farklı FNK filmin Raman spektroskopisi tek bir grafikte Şekil 4.4'te paylaşılarak detaylı analiz ve karşılaştırma yapmaya imkan sağlamaktadır.



Şekil 4.4. Tüm FNK filmlerine ait raman spektroskopisinin karşılaştırılması

4.2. FNK Filmlerin Morfolojik Karakterizasyonu

Bu çalışmada, geleneksel kağıt üretim sürecine benzer şekilde vakum filtrasyon yöntemiyle elde edilen FNK filmlerde, selüloz matris yapısı ve buna entegre edilen CNT, GR, Hibrit ve BN nano takviyelerinin morfolojik dağılımı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile detaylı biçimde incelenmiştir. Bu analizler, yapısal düzenin elektriksel ve mekanik performansa etkilerini değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir.



Şekil 4.5. Matris malzemesi selüloz fiber ve nano boyutlu takviyelerin SEM görüntüleri. a) saf selüloz, b) CNT, c) GR, d) BN

FNK filmlerin morfolojik karakterizasyonu, katkı malzemelerinin selüloz matris içerisindeki dağılım davranışlarını değerlendirmek amacıyla taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Analizler, ağırlıkça %10 oranlarda CNT, BN ve Grafen katkılı örnekler üzerinde yapılmıştır.

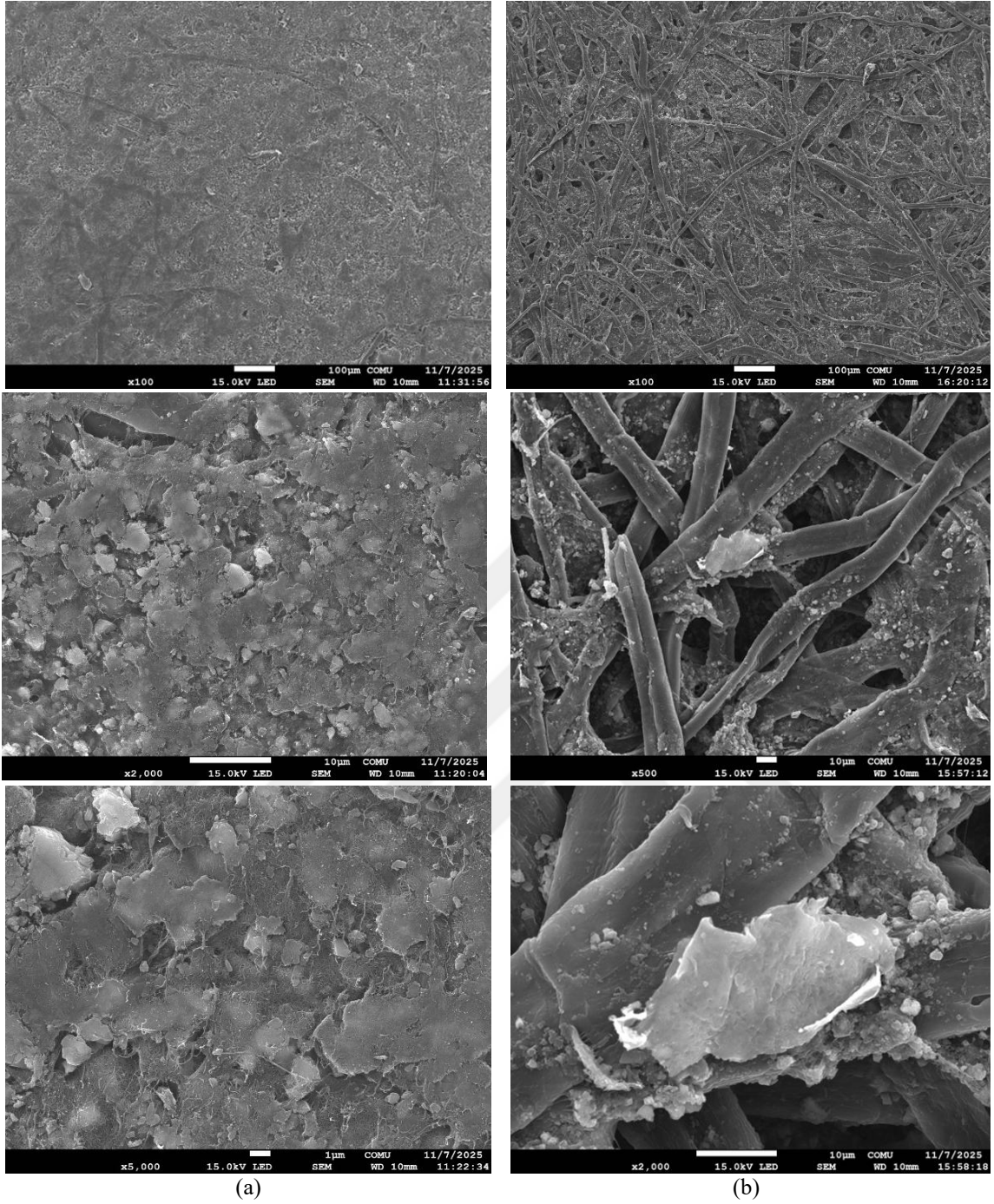
Şekil 4.5'teki SEM görüntüleri, CNT'lerin selüloz lifleri boyunca düzenli ve ağ benzeri bir yapı oluşturduğunu ortaya koymuştur. CNT'ler, liflerin yüzeyine paralel şekilde yönelmiş, zaman zaman lifler arasında köprü oluşturarak üç boyutlu bir iletken ağ yapısı meydana getirmiştir. Bu morfoloji, CNT'lerin dispersiyonunun başarılı olduğunu ve uygulanan sonikasyon-karıştırma-filtrasyon kombinasyonunun fiziksel karışımı yeterince homojen hâle getirdiğini göstermektedir.

Benzer şekilde, bor nitrür (BN) nanopartikülleri de matris içerisinde dağılmış küçük yığınlar hâlinde gözlemlenmiştir. Parçacıklar çoğunlukla selüloz liflerinin çevresine tutunmuş, bazı durumlarda ise lifler arası boşluklara yerleşerek kompozitin iç yapısına bütünleşmiştir. Bu homojen dağılımda BN film üretim aşamasında PVA dağıtıcı

çözeltilinin kullanılması da etkili olmuştur. BN'nin dağılımı homojenliğe yakın bir yapıya işaret etmekte, bu da BN'nin polar yapısının selüloz ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

Buna karşılık, grafen katkılı numunelerde, yaprak benzeri yapıların lif yüzeyinde düzensiz kümeler oluşturduğu ve bazı bölgelerde belirgin şekilde topaklanmalar (aglomere yapılar) meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Bu topaklanmalar, özellikle yüksek katkı oranlarında yaygın olarak görülmüş, grafen tabakalarının istiflenmiş hâlde kalabildiği alanlar oluşmuştur. Bu durum, grafenin hidrofilik ortamda yeterince kararlı dispersiyon sağlayamaması ve selülozla etkileşiminin sınırlı kalması ile açıklanabilir. Ayrıca, grafenin yüksek yüzey alanına sahip olması ve π - π etkileşimleri aracılığıyla kendi üzerine katlanma eğilimi göstermesi, bu aglomerasyonların temel nedenidir.

Şekil 4.6'daki CNT ve GR takviyeli FNK filmlerin yüzey morfolojilerine ilişkin elde edilen SEM görüntüleri incelendiğinde, CNT katkılı numunelerde karbon nanotüplerin selüloz matris içerisinde oldukça homojen bir şekilde dağıldığı ve bu durumun özellikle düşük büyütme SEM görüntülerinde selüloz liflerinin netliğini önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir. Lif benzeri yapılar, CNT'lerin matrise entegre oluşu ve yüksek yüzey etkileşimi sayesinde mat bir görüntüye dönüşerek neredeyse seçilemez hale gelmiştir. Buna karşın, grafen katkılı filmlerde ise selüloz lif yapılarının çok daha belirgin şekilde görülebildiği, bu durumun ise grafen partiküllerinin matrise düzensiz ve heterojen bir şekilde dağılmasından kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Grafen yapılarının matriste topaklanma eğiliminde olması, yer yer aglomerasyonların oluşmasına neden olmuş ve bu durum, hem yapısal homojenliği olumsuz etkilemiş hem de potansiyel fonksiyonel özelliklerin istenen düzeyde gelişmesini sınırlamıştır. Dolayısıyla, SEM analizleri CNT'lerin selüloz matrisiyle daha güçlü bir etkileşim sergileyerek yapıya daha bütüncül bir katkı sağladığını, buna karşın grafenin ise dispersiyon kabiliyetindeki zayıflık nedeniyle mikroyapısal bütünlüğü bozduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.6. CNT ve Grafenin selüloz matris içerisindeki dağılımlarının karşılaştırılması. a)CNT, b)GR

4.3. Fonksiyonel Nanokompozit Filmlerin Kalınlık Hesaplamaları

Film kalınlığı, fonksiyonel nanokompozit malzemelerin performansını doğrudan etkileyen temel yapısal parametrelerden biridir. Bu parametre, hem elektriksel iletkenlik hem de elektromanyetik dalga koruma etkinliği (EMI shielding effectiveness, Specific SE) açısından belirleyici rol oynamaktadır.

Elektriksel iletkenlik açısından, film kalınlığı, iletim yollarının sürekliliğini ve taşıyıcı hareketliliğini etkileyen fiziksel bir sınır oluşturmaktadır. Yeterli kalınlığa sahip olmayan filmler, iletken nano yapılar (örneğin CNT, grafen vb.) matriste homojen bir şekilde dağılmış olsa dahi, elektriksel perkolasyon eşiğine ulaşmakta yetersiz kalabilir. Bu durumda, elektron taşınımı kesintiye uğrayarak film boyunca sürekli bir iletkenlik sağlanamaz. Öte yandan, çok kalın filmler de iç gerilim, kuruma kusurları ve katkıların homojen olmayan dağılımı gibi nedenlerle iletkenlikte dalgalanmalara yol açabilir. Dolayısıyla, optimum kalınlık değeri, katkı türüne ve film yapısına bağlı olarak dikkatle belirlenmelidir.

Elektromanyetik dalga koruma etkinliği (EMI SE) açısından bakıldığında ise film kalınlığı, hem yansıtma (reflection), hem soğurma (absorption) hem de çoklu iç yansıma (multiple internal reflection) mekanizmalarının etkinliğini etkiler. İnce filmler, gelen EM dalgalarının yeterli miktarda soğurulmasını sağlayamayabilirken; yeterince kalın olmayan yapılar, özellikle düşük frekanslı EM dalgalara karşı zayıf koruma gösterir. Ayrıca, kalınlık arttıkça malzemenin EM dalgaları absorplama süresi ve yolu da uzar, bu da koruma performansını artırabilir. Ancak, çok kalın filmler uygulama açısından esneklik, hafiflik ve mekanik dayanım gibi kriterlerde olumsuzluk yaratabilir.

Sonuç olarak, film kalınlığı, hem elektriksel iletim yollarının sürekliliği hem de EM dalga etkileşim mekanizmalarının etkinliği bakımından hassasiyetle kontrol edilmesi gereken kritik bir değişkendir. Bu nedenle, üretilen FNK filmlerin kalınlık ölçümleri, deneysel tutarlılığı sağlamak ve yapısal analizlerde karşılaştırılabilirlik elde etmek amacıyla dijital mikrometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir numune, üretim parametrelerine (nano katkı türü, katkı oranı ve çözelti hacmi) göre sınıflandırılmış ve her gruptaki filmlerin kalınlık değerleri sistematik olarak beş farklı noktadan ölçülerek ortalama film kalınlığı belirlenmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları tablo formatında sunulmuş, her grup kendi içinde değerlendirilmeye alınarak kalınlık farklarının malzeme homojenliği, elektriksel iletkenlik ve EM koruyucu etkinliği üzerindeki etkileri yorumlanmıştır. Bu karşılaştırmalı analiz, katkı materyallerinin film oluşumu üzerindeki yapısal etkilerini daha iyi anlayabilmek adına önemli bir referans niteliği taşımaktadır. Tez çalışmasında her bir FNK film grubunun kalınlık ölçümleri detaylı biçimde gerçekleştirilmiş ve performans analizleriyle ilişkilendirilerek değerlendirilmiştir.

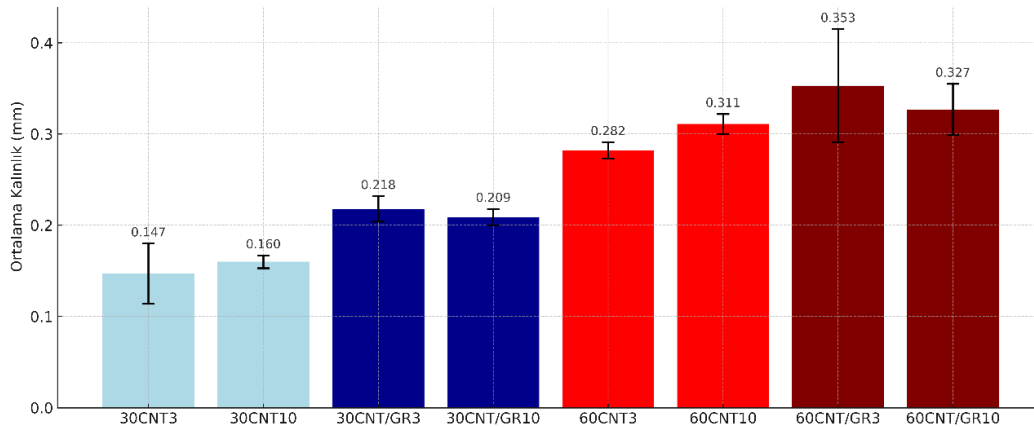
4.3.1. Birinci grup: CNT ve hibrit FNK filmlerin kalınlık hesaplamaları

1.Grup FNK filmlerde saf su içerisinde matris malzeme olarak eklenen 1000mg selüloza göre ağırlıkça %3 ve %10 olmak üzere farklı takviye türleri (CNT ve CNT/GR hibritleri) ve çözelti hacimleri (30 ml ve 60 ml) kullanılarak üretilen FNK (Fonksiyonel Nanokompozit) filmlerin kalınlıklarına ilişkin veriler sunulmuştur. Her bir numune grubu için ayrı ayrı yapılan üç tekrarın ardından, ortalama kalınlık değerleri hesaplanarak Çizelge 4.1'e yansıtılmıştır. Her bir parametre için 3'er tane film üretilmiş olup her birinin kalınlıkları mikrometre yardımı ile ölçülmüştür.

Çizelge 4.1. Birinci grup FNK filmlerin kalınlık değerleri

No	Numune	Kalınlık (mm)	Ortalama Kalınlık (mm)	No	Numune Adı	Kalınlık (mm)	Ortalama Kalınlık (mm)
1	30CNT3_1	0.140	0.147	13	60CNT3_1	0.273	0.282
2	30CNT3_2	0.183		14	60CNT3_2	0.291	
3	30CNT3_3	0.118		15	60CNT3_3	0.284	
4	30CNT10_1	0.166	0.159	16	60CNT10_1	0.295	0.311
5	30CNT10_2	0.153		17	60CNT10_2	0.318	
6	30CNT10_3	0.160		18	60CNT10_3	0.321	
7	30CNT/GR3_1	0.233	0.217	19	60CNT/GR3_1	0.351	0.353
8	30CNT/GR3_2	0.215		20	60CNT/GR3_2	0.413	
9	30CNT/GR3_3	0.205		21	60CNT/GR3_3	0.294	
10	30CNT/GR10_1	0.203	0.209	22	60CNT/GR10_1	0.331	0.327
11	30CNT/GR10_2	0.205		23	60CNT/GR10_2	0.351	
12	30CNT/GR10_3	0.219		24	60CNT/GR10_3	0.298	

Çizelge 4.1'deki veriler, film üretim sürecindeki parametre değişimlerinin nihai ürünün fiziksel özelliklerine olan etkisini karşılaştırmalı olarak değerlendirme açısından önem taşımaktadır. Elde edilen ortalama kalınlık değerlerine ait görsel karşılaştırma ise standart sapmaları ile birlikte Şekil 4.7'de sütun grafiği olarak sunulmuştur.



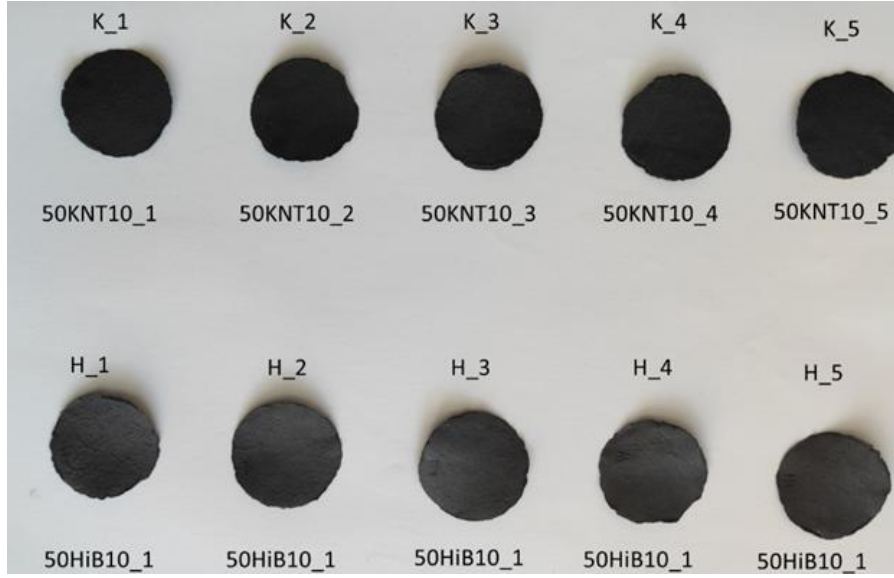
Şekil 4.7. Birinci grup FNK filmlerin kalınlık değerlerinin karşılaştırılması

Birinci grupta yer alan fonksiyonel nanokompozit (FNK) filmlerin kalınlık ölçümleri incelendiğinde, numunelerin ortalama kalınlıklarının yaklaşık 150 µm ile 350 µm aralığında değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Film üretiminde kullanılan çözelti hacmi ile elde edilen kalınlık değerleri arasında anlamlı bir ilişki gözlemlenmiş; 60 ml çözelti hacmiyle üretilen filmlerin, 30 ml çözelti ile üretilenlere kıyasla yaklaşık %50 oranında daha yüksek ortalama kalınlığa sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, film kalınlığının üretim sırasında kullanılan başlangıç çözeltisi miktarıyla doğrudan orantılı olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışmanın ileri aşamalarında, sandviç yapı tasarımına uygun çok katmanlı FNK malzemelerin elde edilmesi planlanmaktadır. Bu kapsamda, CNT/BN/CNT gibi üç tabakalı konfigürasyonların, cam elyaf ve karbon fiber kumaş katmanları arasında yerleştirilmesi hedeflenmektedir. Bu tür bir mühendislik tasarımında, toplam yapı kalınlığının 600–750 µm aralığında olması öngörülmektedir. Bu nedenle, her bir ara film tabakasının optimum performans gösterebilmesi ve katmanlar arası bütünlüğün sağlanabilmesi açısından, tekil FNK filmlerin kalınlıklarının yaklaşık 200–250 µm seviyesinde tutulması gerektiği değerlendirilmektedir. Bu kalınlık aralığı, hem elektromanyetik koruyucu performans hem de mekanik ve termal dayanım açısından tasarlanan kompozit yapının bütüncül işlevselliğini destekleyecek şekilde belirlenmiştir. Elde edilen kalınlık verileri, ilerleyen analizlerde performans-parametre ilişkilerinin kurulması açısından temel teşkil etmektedir.

4.3.1.1. Haddeleme işleminin optimizasyonu ve film kalınlığına etkisi

Birinci grup FNK filmlerinde, haddeleme işleminin film kalınlığı üzerindeki etkisini değerlendirmek ve süreç parametrelerini optimize etmek amacıyla karşılaştırmalı bir çalışma yürütülmüştür. Bu doğrultuda, çözelti hacmi sabit 50 ml ve nano takviye oranı %10 (ağırlıkça) olarak belirlenmiş; hem yalnızca CNT içeren hem de CNT/GR hibrit takviyesi ile hazırlanan filmler üretilmiştir (Şekil 4.8). Her iki nano takviye sistemine ait toplam 10 adet filmin haddeleme öncesi ve sonrası kalınlık değerleri ölçülerek, mekanik işlem uygulamasının film yapısı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Elde edilen karşılaştırmalı veriler ışığında, istenen film kalınlığına ulaşılması ve yapısal bütünlüğün korunması açısından haddeleme sürecine ait parametreler optimize edilmiştir. Böylece, fonksiyonel performansı yüksek, homojen ve hedefe uygun FNK filmler elde edilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 4.8. Haddelme işleminin optimizasyonu için üretilen FNK filmler

Haddelme öncesi ve sonrası için film kalınlık değerleri Çizelge 4.2 ve 4.3'te, karşılaştırmalı bir şekilde sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Haddelme öncesi FNK filmlerin kalınlıkları

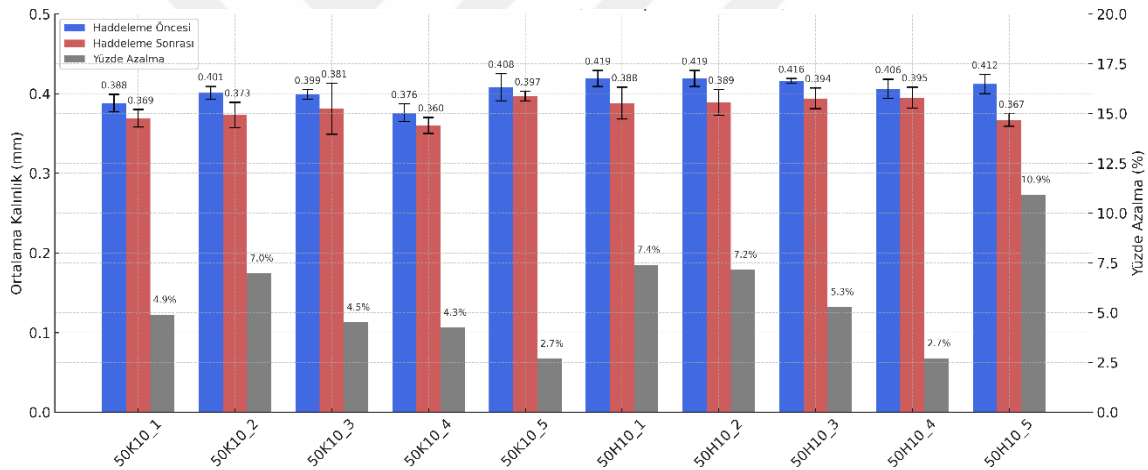
No	Numune Adı/Ölçüm Sayısı	1	2	3	4	5	Ortalama (mm)
1	50K10_1	0.382	0.408	0.390	0.376	0.386	0.388
2	50K10_2	0.394	0.403	0.394	0.414	0.398	0.401
3	50K10_3	0.391	0.394	0.405	0.409	0.396	0.399
4	50K10_4	0.368	0.371	0.375	0.394	0.371	0.376
5	50K10_5	0.410	0.402	0.421	0.383	0.426	0.408
6	50H10_1	0.412	0.408	0.417	0.426	0.432	0.419
7	50H10_2	0.437	0.417	0.415	0.405	0.420	0.419
8	50H10_3	0.418	0.423	0.401	0.418	0.418	0.416
9	50H10_4	0.395	0.420	0.423	0.401	0.392	0.406
10	50H10_5	0.414	0.406	0.424	0.426	0.389	0.412

Çizelge 4.3. Haddelme sonrası FNK filmlerin kalınlıkları

No	Numune Adı/Ölçüm Sayısı	1	2	3	4	5	Ortalama (mm)
1	50K10_1	0.371	0.358	0.365	0.364	0.388	0.369
2	50K10_2	0.367	0.403	0.370	0.368	0.357	0.373
3	50K10_3	0.430	0.376	0.391	0.352	0.354	0.381
4	50K10_4	0.368	0.356	0.349	0.364	0.361	0.360
5	50K10_5	0.401	0.396	0.400	0.388	0.401	0.397
6	50H10_1	0.393	0.417	0.377	0.386	0.369	0.388
7	50H10_2	0.376	0.385	0.403	0.391	0.392	0.389
8	50H10_3	0.381	0.402	0.411	0.391	0.387	0.394
9	50H10_4	0.400	0.389	0.396	0.408	0.384	0.395
10	50H10_5	0.368	0.368	0.370	0.372	0.359	0.367

Çizelge 4.2 ve 4.3'te yer alan veriler, haddeleme işleminden önce ve sonra ölçülen film kalınlıklarının karşılaştırmalı bir değerlendirmesini sunmaktadır. Her iki film grubu için de, haddeleme sonrasında kalınlıklarda belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Bu durum, mekanik sıkıştırma işleminin filmlerin iç yapısını daha yoğun ve kompakt hale getirdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle katkı tipi farklılıkları dikkate alındığında, hibrit katkılı filmlerin (50H10 serisi) haddeleme sonrası daha kalınlık değişimlerinin daha dengeli olduğu görülmektedir. Bu durum, hibrit takviyelerin matris içerisinde daha iyi dağılmış olabileceğini ve mekanik işlem sırasında yapının bütünlüğünü daha iyi koruduğu ile ilgili ön ipuçları verebilir. Fakat morfolojik ve yapısal olarak görüntülemeler alınmadıkça kesin bir çıkarım yapmak doğru değildir.

Haddeleme öncesi ve sonrasında yapılan film kalınlık ölçümlerinin doğru bir şekilde karşılaştırılabilmesi ve yüzdesel olarak farkın tespit edilmesi için Şekil 4.9'daki grafik oluşturulmuştur.



Şekil 4.9. Haddeleme öncesi ve sonrası FNK'ların kalınlık değişimleri

Şekilde verilen grafik, %10 CNT ve CNT/GR (hibrit) içeren FNK filmlerin, 50 ml çözelti hacmi kullanılarak üretildikten sonra haddeleme öncesi ve sonrası elde edilen ortalama kalınlık değerlerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Aynı zamanda, her bir numune için hesaplanan yüzde kalınlık azalması gri sütunlarla görselleştirilmiştir. Grafik, her bir numunenin beş tekrarlı ölçümden elde edilen ortalamalarını ve standart sapmalarını da içermektedir.

Analiz edilen 10 farklı numune arasında, haddeleme işleminin kalınlık üzerinde belirgin bir etki yarattığı görülmektedir. Haddeleme öncesi ortalama kalınlık değerleri

genellikle 0.388–0.419 mm aralığında değişirken, haddeleme sonrası bu değerlerin çoğu durumda %2.7 ila %10.9 arasında azaldığı tespit edilmiştir (ortalama %5,7).

50H10_5 nolu filme bakıldığında kalınlık 0,412 mm'den 0,367 mm'ye yaklaşık %10 kadar incelmıştır. (Diğerlerine göre biraz daha nemli şekilde haddelenmesinden kaynaklı olduğu düşünölmektedir)

Öte yandan, yalnızca tek tip katkı içeren filmlerde (50K10 serisi) kalınlık değişimleri daha dalgalı olup, bu durum yer yer düzensiz sıkışmaların oluştuğuna işaret etmektedir. Bu bağlamda, haddeleme işleminin yalnızca film kalınlığını azaltmakla kalmamış, aynı zamanda katkı türüne bağlı olarak yapısal düzenlilik üzerinde de etkili olmuştur.

4.3.2. İkinci grup: İki ve üç tabakalı FNK filmlerin kalınlık hesaplamaları

Ayrı ayrı üretilen karbon nanotüp ve hibrit katkıli fonksiyonel nanokompozit filmlere alternatif olarak EM dalgaların malzeme kalınlığı boyunca çoklu yansımaya uğratarak soğurulması prensibinden yola çıkılarak iki ve üç tabakalı fonksiyonel filmler de üretilmiş ve kalınlıkları hesaplanarak Çizelge 4.4 oluşturulmuştur. Çizelgedeki numune isimlendirmelerinde kullanılan kısaltmaların anlamları, verilerin daha doğru yorumlanabilmesi amacıyla aşağıda açıklanmıştır.

2 tabakalı film yapısı

A: 15ml CNT + 15ml GR,

B: 25ml CNT + 25ml GR,

C: 30ml CNT + 30ml GR'yi temsil etmektedir

3 tabakalı film yapısı

X: 15ml CNT + 15ml GR + 15ml CNT,

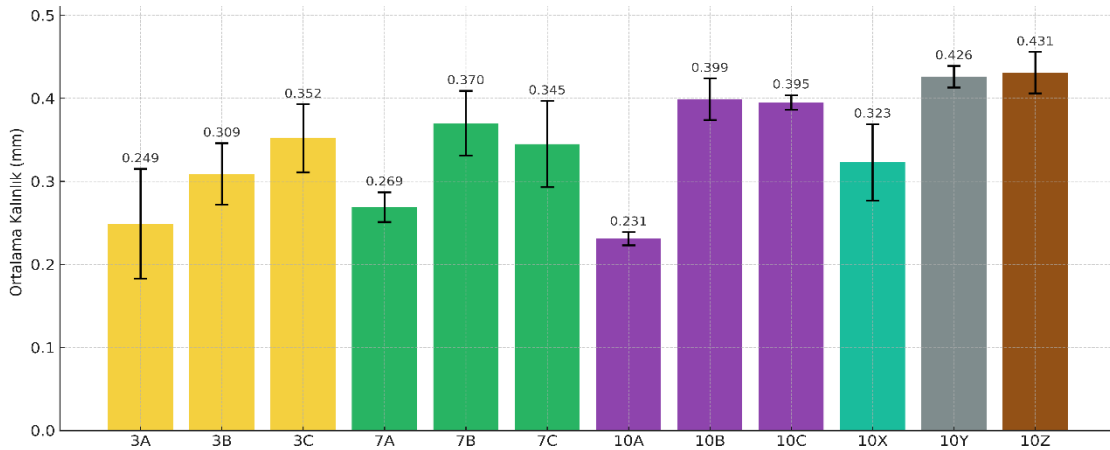
Y: 25ml CNT + 25ml GR + 25ml CNT,

Z: 30ml CNT + 30ml GR + 30ml CNT'yi temsil etmektedir

Çizelge 4.4. İkinci grup FNK filmlerin kalınlık değerleri

No	Numune Adı	Kalınlık (mm)	Ortalama Kalınlık (mm)	No	Numune Adı	Kalınlık (mm)	Ortalama Kalınlık (mm)
1	3A_1	0.324	0.249	19	10A_1	0.223	0.231
2	3A_2	0.217		20	10A_2	0.233	
3	3A_3	0.205		21	10A_3	0.238	
4	3B_1	0.351	0.309	22	10B_1	0.372	0.399
5	3B_2	0.289		23	10B_2	0.420	
6	3B_3	0.286		24	10B_3	0.406	
7	3C_1	0.400	0.349	25	10C_1	0.403	0.395
8	3C_2	0.332		26	10C_2	0.386	
9	3C_3	0.325		27	10C_3	0.397	
10	7A_1	0.257	0.271	28	10X_1	0.367	0.323
11	7A_2	0.261		29	10X_2	0.312	
12	7A_3	0.290		30	10X_3	0.284	
13	7B_1	0.411	0.360	31	10Y_1	0.433	0.425
14	7B_2	0.364		32	10Y_2	0.430	
15	7B_3	0.334		33	10Y_3	0.412	
16	7C_1	0.307	0.345	34	10Z_1	0.432	0.439
17	7C_2	0.404		35	10Z_2	0.456	
18	7C_3	0.325		36	10Z_3	0.429	

Çizelge 4.4'te, ikinci grup FNK filmlerine ait kalınlık ölçüm sonuçları verilmiştir. Farklı nano takviye içerikleri ve numune kodlarına göre gruplanan filmler için her bir numuneden üç tekrar ölçümü alınmış ve ortalama kalınlık değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu veriler, film üretim parametrelerinin kalınlık üzerindeki etkisini değerlendirmek açısından önem arz etmektedir. Özellikle nano takviye oranındaki artışın ve yapısal kombinasyon farklılıklarının film kalınlığı üzerindeki etkileri bu tablo yardımıyla izlenebilmektedir. Çizelgede sunulan ortalama değerlerden yararlanılarak, numune gruplarının kalınlık dağılımları görsel olarak daha açık şekilde yorumlanabilmesi amacıyla aşağıdaki Şekil 4.10'da standart sapmalı bir sütun grafiği oluşturulmuştur.



Şekil 4.10. İkinci grup FNK filmlerin kalınlık değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.10'daki grafiğe göre, ikinci grup FNK filmlerinin ortalama kalınlık değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafik incelendiğinde, numune grupları arasında belirgin kalınlık farklılıkları olduğu görülmektedir. Özellikle 10Z numunesi, 0.431 mm'lik ortalama değeriyle tüm gruplar arasında en yüksek kalınlığa sahip film olarak öne çıkmaktadır. Buna karşılık, en düşük kalınlık değeri 0.231 mm ile 10A numunesinde ölçülmüştür. 3A, 7A ve 10X gibi bazı grupların ise 0.25–0.32 mm aralığında yer alarak daha ince film oluşumuna eğilimli olduğu gözlemlenmiştir. Çok katmanlı bir sandviç kompozit yapının uygun kalınlıklarda üretilmesi adına A ve X grubunun sahip olduğu hacimler ile üretilen filmler mevcut haddeleme prosesiyle hedeflenen film kalınlıklarına en yakın değerdedir. Ayrıca grafik üzerinde yer alan hata çubukları, her numune grubunda elde edilen değerlerin dağılımını göstermekte ve ölçüm güvenilirliği açısından karşılaştırmalı bir bakış sunmaktadır.

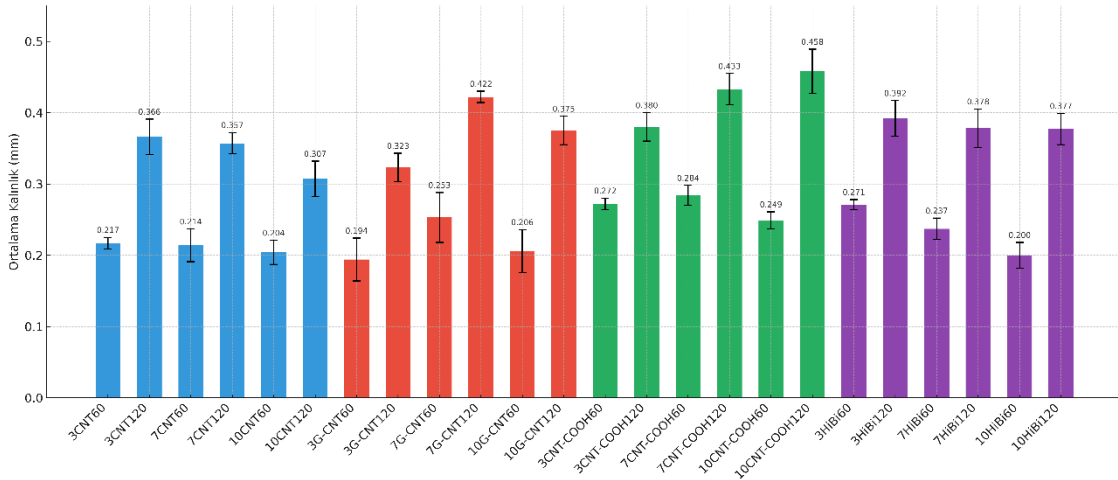
4.3.3. Üçüncü grup: Fonksiyonelleşmiş ve doplanmış takviye içeren FNK filmlerin kalınlık hesaplamaları

Ağırlıkça %3, 7 ve 10 oranları kullanılarak 60 ve 120 ml hacimlerde karbon nanotüp (CNT), %32 grafen ile doplanmış karbon nanotüp (G-CNT), karboksili gruplarla fonksiyonelleştirilmiş karbon nanotüp (CNT-COOH), grafen (GR) ve karbon nanotüp ile grafenin eşit oranlarla eklenmesiyle elde edilen hibrit nanoparçacıklar (HİB) kullanılarak üretilen FNK filmlerin kalınlıkları Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Üçüncü grup FNK filmlerin kalınlık değerleri

No	Numune Adı	Kalınlık (mm)	Ortalama Kalınlık (mm)	No	Numune Adı	Kalınlık (mm)	Ortalama Kalınlık (mm)
1	3CNT60_1	0.210	0.217	37	3G-CNT60_1	0.180	0.194
2	3CNT60_2	0.215		38	3G-CNT60_2	0.237	
3	3CNT60_3	0.227		39	3G-CNT60_3	0.164	
4	3CNT120_1	0.383	0.366	40	3G-CNT120_1	0.289	0.323
5	3CNT120_2	0.376		41	3G-CNT120_2	0.337	
6	3CNT120_3	0.340		42	3G-CNT120_3	0.342	
7	7CNT60_1	0.198	0.214	43	7G-CNT60_1	0.247	0.253
8	7CNT60_2	0.245		44	7G-CNT60_2	0.260	
9	7CNT60_3	0.198		45	7G-CNT60_3	0.251	
10	7CNT120_1	0.374	0.357	46	7G-CNT120_1	0.427	0.422
11	7CNT120_2	0.356		47	7G-CNT120_2	0.413	
12	7CNT120_3	0.340		48	7G-CNT120_3	0.425	
13	10CNT60_1	0.200	0.200	49	10G-CNT60_1	0.193	0.206
14	10CNT60_2	0.182		50	10G-CNT60_2	0.202	
15	10CNT60_3	0.218		51	10G-CNT60_3	0.222	
16	10CNT120_1	0.345	0.307	52	10G-CNT120_1	0.412	0.375
17	10CNT120_2	0.319		53	10G-CNT120_2	0.375	
18	10CNT120_3	0.257		54	10G-CNT120_3	0.339	
19	3CNT-COOH60_1	0.271	0.272	55	3HiB60_1	0.282	0.271
20	3CNT-COOH60_2	0.263		56	3HiB60_2	0.267	
21	3CNT-COOH60_3	0.282		57	3HiB60_3	0.263	
22	3CNT-COOH120_1	0.450	0.380	58	3HiB120_1	0.413	0.392
23	3CNT-COOH120_2	0.353		59	3HiB120_2	0.449	
24	3CNT-COOH120_3	0.338		60	3HiB120_3	0.315	
25	7CNT-COOH60_1	0.292	0.284	61	7HiB60_1	0.220	0.237
26	7CNT-COOH60_2	0.273		62	7HiB60_2	0.267	
27	7CNT-COOH60_3	0.288		63	7HiB60_3	0.223	
28	7CNT-COOH120_1	0.445	0.433	64	7HiB120_1	0.400	0.378
29	7CNT-COOH120_2	0.477		65	7HiB120_2	0.390	
30	7CNT-COOH120_3	0.377		66	7HiB120_3	0.345	
31	10CNT-COOH60_1	0.258	0.249	67	10HiB60_1	0.194	0.200
32	10CNT-COOH60_2	0.258		68	10HiB60_2	0.203	
33	10CNT-COOH60_3	0.232		69	10HiB60_3	0.204	
34	10CNT-COOH120_1	0.477	0.458	70	10HiB120_1	0.354	0.377
35	10CNT-COOH120_2	0.509		71	10HiB120_2	0.440	
36	10CNT-COOH120_3	0.387		72	10HiB120_3	0.336	

Üç tabakalı sandviç yapının tasarımında, alt ve üst tabakaları oluşturacak FNK filmlerin toplam hacimleri dikkate alınarak, çift taraflı kullanım esasına göre çözelti hacimleri belirlenmiştir. Bu doğrultuda, alt ve üst tabakalar için sırasıyla 30'ar ml (toplamda 60 ml) ve 60'ar ml (toplamda 120 ml) çözelti kullanılarak farklı film grupları hazırlanmıştır. Böylece her bir film, çift katmanlı uygulamaya uygun olacak şekilde üretim hacmini temsil etmektedir. Yapının orta tabakasında ise, termal iletkenlik ve elektromanyetik dalga soğurma işlevi üstlenecek şekilde konumlandırılması planlanan BN katkılı filmler yer almaktadır. Bu üçlü yapı birlikte değerlendirildiğinde, toplam sandviç kalınlığının hedeflenen mühendislik uygulamalarıyla uyumlu olacak biçimde 600-750 μm aralığında sınırlandırılması öngörülmüştür. Bu sınır, hem malzemenin mekanik bütünlüğü hem de çok katmanlı yapılarla uyumlu bir entegrasyon açısından kritik öneme sahiptir.



Şekil 4.11. Üçüncü grup FNK filmlerin kalınlık değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.11'deki grafikte genel olarak, çözelti hacminin artması film kalınlığını artırıcı bir etki yaratmaktadır. Ancak takviye türüne bağlı olarak bu artışın boyutu değişmektedir. CNT-COOH katkılı filmler, yüksek fonksiyonel yüzey alanı nedeniyle daha kalın yapılar oluştururken, G-CNT ve hibrit filmler daha düzensiz bir kalınlık profili göstermektedir. Bu bulgular, FNK film tasarımında hedeflenen kalınlık değerine ulaşmak için yalnızca nano takviye oranı ve hacminin değil, aynı zamanda nano takviyenin kimyasal yapısı ve yüzey etkileşim kapasitesinin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Bu kapsamda, 120 ml çözelti hacmi ile hazırlanan filmlerin kalınlık değerleri, hedeflenen toplam yapı kalınlığı göz önünde bulundurulduğunda, sınır değere oldukça yakın ya da kısmen üzerinde konumlanmaktadır. Bu durum, söz konusu filmlerin doğrudan kullanılabilirliğini sınırlandırabileceği gibi, haddeleme veya mekanik sıkıştırma gibi ikincil işlem adımlarıyla kalınlıkların yeniden optimize edilmesini gerekli kılabilir. Bu bulgu, çok katmanlı yapı tasarımlarında sadece katkı içeriği değil, aynı zamanda çözelti hacmi ve üretim parametrelerinin bütüncül şekilde değerlendirilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

4.3.4. Dördüncü grup: Üç tabakalı CNT-BN-CNT yapıları FNK filmlerin kalınlık hesaplamaları

Elektromanyetik girişim (EMI) koruması ve termal iletkenlik performansı bir arada hedeflenerek tasarlanan CNT-BN-CNT tabanlı üç tabakalı sandviç yapılar yönelik dört farklı yapılandırma oluşturulmuştur. Her bir yapı, dış katmanlarda yüksek elektriksel iletkenliğe sahip CNT katkılı filmler, orta katmanda ise termal iletkenliği ve

elektromanyetik soğurmayı destekleyen BN katkılı filmler içermektedir. Bu sayede hem yansıtıcı hem de soğurucu mekanizmaların optimize edildiği çok işlevli kompozit sistemler geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Hazırlanan yapı konfigürasyonları aşağıda belirtilmiştir:

A1 Yapısı: 10CNT30 (üst) + 5BN30 (orta) + 10CNT30 (alt)

A2 Yapısı: 10CNT60 (üst) + 5BN30 (orta) + 10CNT60 (alt)

B1 Yapısı: 10CNT30 (üst) + 10BN30 (orta) + 10CNT30 (alt)

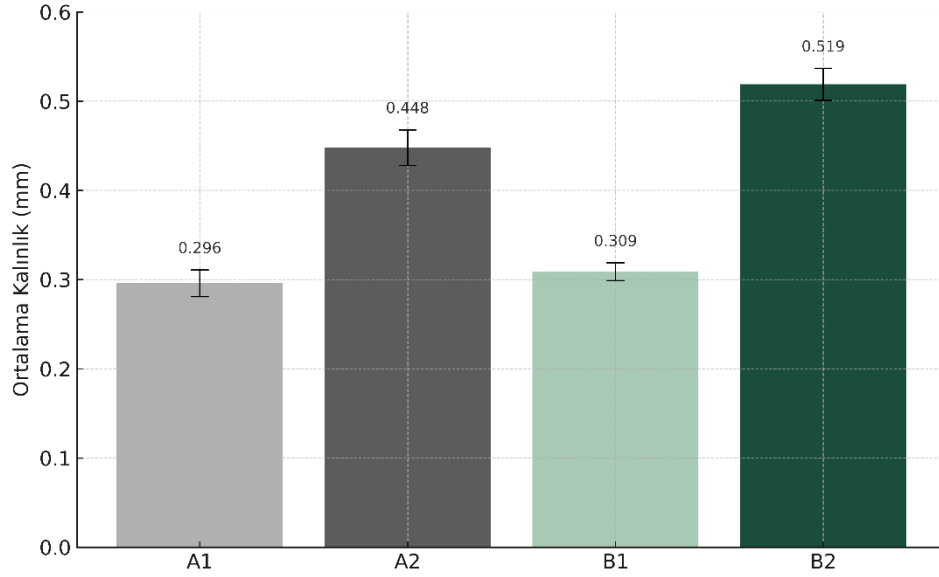
B2 Yapısı: 10CNT60 (üst) + 10BN30 (orta) + 10CNT60 (alt)

Hazırlanan tüm üç tabakalı sandviç yapılar için elde edilen toplam film kalınlıkları, deneysel olarak ölçülmüş ve karşılaştırmalı şekilde değerlendirilmiştir. Ölçüm sonuçları, her bir yapının hedeflenen 600–750 mikrometre aralığında olup olmadığını değerlendirmek amacıyla bir tablo halinde sunulmuştur. Bu yapıların her biri, CNT ve BN katkı oranları ile çözelti hacmi bakımından farklı kombinasyonları temsil etmektedir. Yapılar arasında özellikle BN tabakasının katkı oranı (%5 ve %10) ve CNT tabakalarının çözelti hacmi (30ml ve 60ml) parametreleri değiştirilerek toplam yapı kalınlığının nasıl etkilendiği analiz edilmiştir (Çizelge 4.6).

Çizelge 4.6. Dördüncü grup CNT-BN-CNT yapılı FNK filmlerin kalınlık değerleri

No	Numune Adı	Kalınlık (mm)	Ortalama Kalınlık (mm)	No	Numune Adı	Kalınlık (mm)	Ortalama Kalınlık (mm)
1	A1_1	0.272		7	B1_1	0.301	
2	A1_2	0.312	0.296	8	B1_2	0.315	0.309
3	A1_3	0.303		9	B1_3	0.311	
4	A2_1	0.454		10	B2_1	0.501	
5	A2_2	0.425	0.448	11	B2_2	0.540	0.519
6	A2_3	0.464		12	B2_3	0.516	

Çizelgede yer alan veriler, A1, A2, B1 ve B2 numune gruplarına ait üç katmanlı CNT–BN–CNT sandviç yapılarının mikrometre (μm) ve milimetre (mm) cinsinden ölçülmüş toplam kalınlık değerlerini içermektedir. Her yapı, üç tekrarlı ölçümle temsil edilerek üretim tutarlılığı değerlendirilmiş, çözelti hacmi ve katkı içeriğinin toplam kalınlık üzerindeki etkileri incelenmiştir.



Şekil 4.12. Dördüncü grup FNK filmlerin kalınlık değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.12’deki grafiğe göre, özellikle CNT tabakalarının çözelti hacminin toplam yapı kalınlığı üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu, BN katkı oranının ise kalınlıktan çok yapısal yoğunluk ve dağılım homojenliği üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Haddelme prosesindeki tekrar sayısının ve haddelme yönünün arttırılması neticesinde bu 3 tabakalı sandviç yapının kalınlığı belirtilen seviyelerde tutulmak istenmiştir. Bu kapsamda, A1 ve B1 yapıları yaklaşık 300 μm kalınlık ile hedeflenen optimum aralıktan çok daha ince filmlerin üretildiği sonuçlarını sunarken, A2 ve B2 gibi yüksek hacimli konfigürasyonlar da yeniden optimize edilen haddelme prosesi sayesinde hedeflenen kalınlık eşğine yakın değerlerde olduğu ölçülmüştür. Dolayısıyla da her iki grubun ikincil işlemlerle yeniden optimize edilmesine gerek kalmadan fiber takviyeli kumaşların arasında çoklu EM dalga soğurucu ve yansıtıcı olarak kullanılabilir olduğunu açıkça göstermektedir.

4.4. Fonksiyonel Nanokompozit Filmlerin Elektriksel İletkenlik Hesaplamaları

Fonksiyonel nanokompozit malzemelerde elektriksel iletkenlik, elektromanyetik girişim (EMI) koruma performansının en kritik belirleyicilerinden biridir. Bir malzemenin elektromanyetik dalgalara karşı etkili bir bariyer görevi görebilmesi, büyük ölçüde iletkenliğine bağlı olarak yansıtma (reflection) ve soğurma (absorption) mekanizmalarını devreye sokabilme kapasitesiyle ilişkilidir. Yüksek elektriksel iletkenliğe sahip malzemeler, gelen elektromanyetik dalganın önemli bir kısmını yüzeyde yansıtarak sistemin içine geçmesini engeller. Bu, özellikle iletken nano yapılar (örneğin

karbon nanotüpler, grafen vb.) ile zenginleştirilmiş kompozit filmlerde daha belirgin hale gelir. Elektriksel iletkenliğin artması, malzeme içerisindeki serbest taşıyıcı yoğunluğunu yükseltir ve bu da yüzeyde yansıtılan enerji miktarını artırarak EMI koruma etkinliğini güçlendirir. Bununla birlikte, yansımanın ötesinde elektriksel iletkenlik, elektromanyetik enerjinin malzeme içinde soğurulması sürecine de katkı sunar. Elektron hareketliliği yüksek olan bir yapı, içinden geçen EM dalgaları ile daha etkin etkileşime girerek enerjiyi ısıya dönüştürür ve sistemin arkasına geçmesini engeller. Bu durum, özellikle çok tabakalı yapılar ve hibrid katkılar içeren filmlerde daha karmaşık ancak etkili bir EMI koruma mekanizması oluşturur.

Fonksiyonel nanokompozit filmlerde elektriksel iletkenlik; katkı türü, katkı oranı, dağılım homojenliği, matris malzemesi ile etkileşim gibi birçok parametreye bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Bu nedenle her bir film grubunda yapılan elektriksel iletkenlik hesaplamaları, yalnızca malzemenin temel fiziksel özelliğini değil, aynı zamanda EMI performansının doğrudan göstergesini temsil eder. Bu kapsamda, çalışmada yer alan beş farklı film grubu için gerçekleştirilen elektriksel iletkenlik analizleri alt başlıklarda çizelgeler halinde karşılaştırmalı bir şekilde sunulmuştur.

4.4.1. Birinci grup: CNT ve hibrit FNK filmlerin elektriksel direnç hesaplamaları

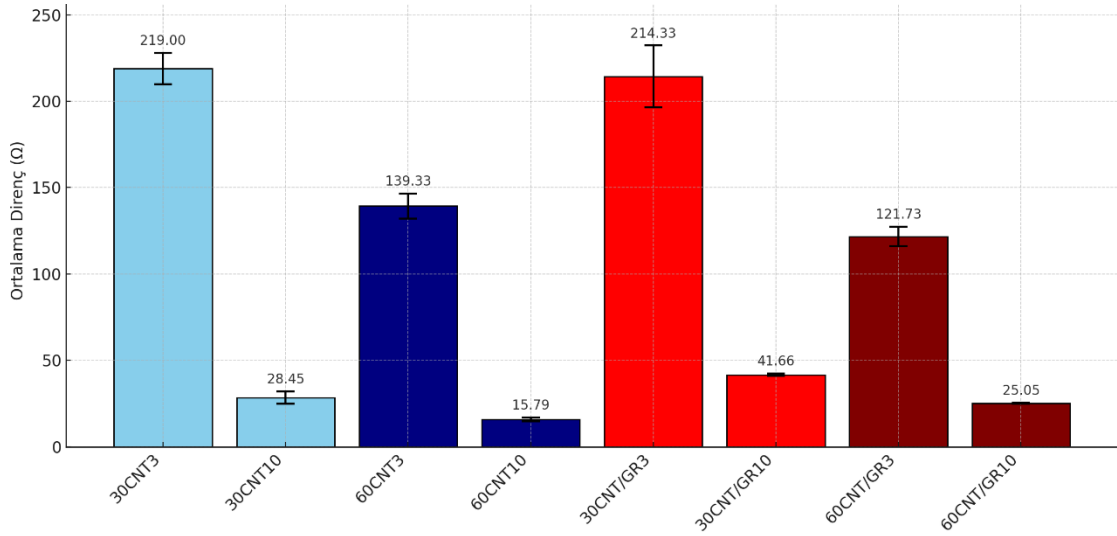
Farklı yüzde ağırlıklarda (%3 ve %10) iki farklı nano takviye malzeme (CNT ve Hibrit) kullanılarak 30 ml ve 60 ml hacimlerde 8 farklı bileşene sahip tek tabakalı toplam 24 ve 3 farklı hacimde (30, 50 ve 60ml) ve 3 farklı yüzde ağırlıklarda (%3, 7 ve 10) iki tabakalı toplam 30 adet elektriksel iletken filmler elde edilmiştir. Bu filmlerin her biri için elektriksel direnç testi uygulanarak Çizelge 4.7'de direnç cinsinden verilen karşılaştırmalı iletkenlik değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 4.7. Birinci grup FNK filmlerin direnç değerleri (Ω)

No	Numune Adı	Direnç (Ω)	Ortalama Direnç (Ω)	No	Numune Adı	Direnç (Ω)	Ortalama Direnç (Ω)
1	30CNT3_1	225.00		13	60CNT3_1	143.20	
2	30CNT3_2	223.40	219.00	14	60CNT3_2	143.80	139.33
3	30CNT3_3	208.60		15	60CNT3_3	131.00	
4	30CNT10_1	24.76		16	60CNT10_1	16.94	
5	30CNT10_2	29.20	28.45	17	60CNT10_2	15.34	15.79
6	30CNT10_3	31.38		18	60CNT10_3	15.08	
7	30CNT/GR3_1	228.40		19	60CNT/GR3_1	117.20	
8	30CNT/GR3_2	220.40	214.33	20	60CNT/GR3_2	120.00	121.73
9	30CNT/GR3_3	194.20		21	60CNT/GR3_3	128.00	
10	30CNT/GR10_1	42.36		22	60CNT/GR10_1	24.90	
11	30CNT/GR10_2	41.62	41.66	23	60CNT/GR10_2	25.42	25.05
12	30CNT/GR10_3	41.00		24	60CNT/GR10_3	24.82	

Birinci grup FNK filmlerin iletkenlik verilerine göre, film grupları arasında belirgin farklılıklar gözlemlenmektedir. Bu farklar, temel olarak kullanılan nano katkı türü, katkı oranı, çözelti hacmi, dağılım homojenliği ve üretim parametreleri gibi değişkenlerden kaynaklanmaktadır. Elektriksel iletkenlik, özellikle elektromanyetik girişim (EMI) koruma performansı ile doğrudan ilişkili olduğundan, bu veriler aynı zamanda malzemelerin fonksiyonel etkinliğini yorumlamak açısından da kritik öneme sahiptir.

Çizelge 4.7'deki filmlere ait direnç değerleri, her bir grup için üç tekrar ölçüm alınarak ortalama hale getirilmiş ve Şekil 4.13'te karşılaştırmalı sütun grafiği olarak sunulmuştur. Direnç ölçümleri, elektriksel iletkenliğin tersini temsil ettiğinden, daha düşük direnç değerleri, malzemenin daha yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olduğunu, dolayısıyla elektromanyetik dalgalara karşı daha güçlü yansıtıcı koruma potansiyeli taşıdığını göstermektedir. Filmlerin elektriksel iletkenliklerinin EMI üzerindeki etkilerini daha kapsamlı değerlendirebilmek amacıyla, Bölüm 4.5'te sunulan çizelgelere EMI değerlerinin yanı sıra ilgili elektriksel direnç ve iletkenlik verileri de eklenmiştir.



Şekil 4.13. Birinci grup FNK filmlerin direnç değerlerinin karşılaştırılması

30CNT3 ve 60CNT3 numuneleri, sırasıyla 219.00 Ω ve 139.33 Ω direnç değerleri ile yüksek direnç göstermiştir. Bu durum, düşük CNT içeriğinin film boyunca sürekli bir iletken ağ yapısı oluşturmakta yetersiz kaldığını ve elektron taşınımında engellerin daha fazla olduğunu göstermektedir. CNT içeriği %10'a çıkarıldığında, direnç değerleri 30CNT10 için 28.45 Ω ve 60CNT10 için 15.79 Ω 'a kadar düşmüştür. Bu önemli azalma, CNT'lerin ağ yapısını tamamlayarak iletken yolları artırmasıyla ilişkilidir. Özellikle 60CNT10 numunesinin en düşük direnç değerine sahip olması, hem yüksek CNT içeriği hem de yüksek çözelti hacminin iletken ağ oluşumunu desteklediğini göstermektedir.

Hibrit gruplara bakıldığında 30CNT/GR3 numunesi, 214.33 Ω ile CNT3 ile benzer düzeyde yüksek direnç göstermektedir. Bu, düşük CNT oranı ile birlikte GR takviyesinin tek başına iletkenlik performansını iyileştirmede yetersiz kaldığını düşündürmektedir.

CNT oranı %10'a çıkarıldığında direnç değeri 41.66 Ω 'a düşmüştür (30CNT/GR10). Ancak bu değer, saf CNT'li 30CNT10'a göre hala yüksektir (41.66 Ω > 28.45 Ω). Bu da hibrit yapıların iletkenlik açısından saf CNT'ye kıyasla daha dağınık bir ağ yapısı oluşturduğunu ve perkolasyon ağını desteklemektense kısmen bozabileceğini veya topaklanma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Benzer eğilim 60 ml çözelti grubunda da gözlenmektedir. 60CNT/GR3 ve 60CNT/GR10 numunelerinde direnç değerleri sırasıyla 121.73 Ω ve 25.05 Ω olarak belirlenmiştir. Bu değerler CNT içeriği arttıkça iletkenliğin arttığını (dirençin düştüğünü) yinelemektedir. Bu bağlamda, katkı oranı kadar, katkılar arası etkileşim ve dağılım homojenliği de elektriksel iletkenlik üzerinde belirleyici bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

4.4.1.1. Haddeme işleminin optimizasyonu ve elektriksel iletkenliğe etkisi

Haddeme işleminin elektriksel iletkenlik üzerine etkisini incelemek ve süreç parametrelerini iletkenlik performansı açısından optimize etmek amacıyla karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, çözelti hacmi sabit 50 ml ve nano takviye oranı ağırlıkça %10 olarak belirlenmiş; biri yalnızca CNT içeren, diğeri ise CNT/GR hibrit takviyeli olmak üzere iki farklı sistemde üretilen 5'er adet toplamda 10 film numunesinin haddeme öncesi (Çizelge 4.8) ve haddeme sonrası (Çizelge 4.9) elektriksel direnç değerleri ölçülmüş ve bu değerlerden yola çıkılarak elektriksel iletkenlikleri hesaplanmıştır.

Çizelge 4.8. Haddeme öncesi FNK filmlerin elektriksel dirençleri

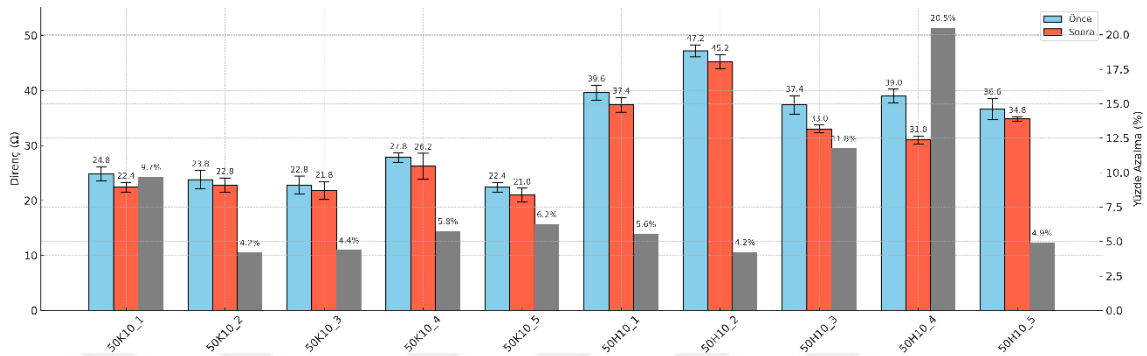
No	Numune/Ölçüm Sayısı	1	2	3	4	5	Ortalama (Ω)
1	50K10_1	26	25	24	26	23	24.8
2	50K10_2	26	25	23	23	22	23.8
3	50K10_3	24	20	23	23	24	22.8
4	50K10_4	27	28	29	27	28	27.8
5	50K10_5	23	22	23	23	21	22.4
6	50H10_1	38	39	41	39	41	39.6
7	50H10_2	47	46	47	49	47	47.2
8	50H10_3	35	37	39	37	39	37.4
9	50H10_4	37	40	39	40	39	39.0
10	50H10_5	38	36	34	39	36	36.6

Çizelge 4.9. Haddeme sonrası FNK filmlerin elektriksel dirençleri

No	Numune/Ölçüm Sayısı	1	2	3	4	5	Ortalama (Ω)
1	50K10_1	23	23	22	23	21	22.6
2	50K10_2	22	24	23	24	21	22.8
3	50K10_3	19	23	23	23	22	22.0
4	50K10_4	26	23	29	25	28	26.2
5	50K10_5	21	19	21	22	22	21.0
6	50H10_1	36	38	36	38	39	37.4
7	50H10_2	40	38	38	38	38	38.4
8	50H10_3	33	33	34	33	32	33.0
9	50H10_4	31	31	30	31	32	31.0
10	50H10_5	35	35	35	34	35	34.8

Haddeme sonrası tüm CNT takviyeli filmlerde direnç değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Bu durum, CNT ağ yapısının haddeme etkisiyle daha iyi yönelmesi ve temas noktalarının artmasıyla açıklanabilir. En yüksek azalma oranı %8.87 ile 50K10_1 numunesinde gerçekleşmiştir (Şekil 4.14).

Hibrit takviyeli filmler için de haddeleme sonrası dirençte azalma gözlenmiştir. Bu düşüş CNT'ye göre daha belirgindir. Özellikle 50H10_2 ve 50H10_4 numunelerinde %18.6 ve %20.5 gibi yüksek oranlı direnç düşüşleri dikkat çekmektedir (Şekil 4.14). Bu, GR'nin haddeleme ile daha homojen dağıldığını ve CNT ile olan etkileşiminin iyileştiğini göstermektedir.



Şekil 4.14. Haddeleme öncesi ve sonrası FNK'ların elektriksel direnç değişimleri

Sıcak haddeleme işlemi sırasında FNK filmlerde gözlemlenen elektriksel direnç azalmasının yalnızca yapısal sıkışma ve iletken dolgu ağlarının daha etkin temas kurmasıyla sınırlı olmadığı, aynı zamanda filmlerin bünyesinde yer alan az miktardaki sıvı fazın bu işlem esnasında tamamen uzaklaşmasının da iletkenlik üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Özellikle vakum filtrasyonla üretilen ve ardından kısa süreli ortam koşullarında kurutulan FNK yapılar, nem ya da çözücü kalıntılarını kısmen muhafaza edebilir. Bu sıvı faz, dielektrik özellikleri nedeniyle iletken ağların sürekliliğini olumsuz yönde etkileyebilir. Sıcak haddeleme sırasında uygulanan ısı ve basınç birleşimi, bu kalıntıların tamamen uzaklaştırılmasına imkân sağlayarak, CNT, grafen gibi iletken nano yapılar arasında daha doğrudan, kesintisiz bir elektriksel bağlantı kurulmasına katkıda bulunur.

CNT'ler daha düzenli yönelme eğilimi gösterdiğinden, direnç düşüşü sınırlı ama istikrarlıdır. Buna karşılık GR içeren hibrit sistemlerde başlangıçta görülen topaklanmaların haddeleme ile kırılarak daha etkin bir dağılım göstermesi, iletken ağların oluşumunu ciddi biçimde desteklemiştir.

Sonuç olarak haddeleme işlemi, hem CNT hem de CNT/GR hibrit takviyeli FNK filmlerde film içindeki iletken ağ yapılarının sürekliliğini artırarak elektriksel performansı artırıcı bir etki yaratmıştır. Özellikle CNT içeren yapılar, haddeleme sonrasında daha düşük direnç ve dolayısıyla daha yüksek iletkenlik göstermiştir. Ancak

hibrit sistemler, işlem sonrası daha büyük oranda direnç düşüşü göstererek sürecin bu tür yapılar için daha kritik bir iyileştirici rol oynadığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, FNK film üretiminde hem malzeme seçimi hem de işlem parametrelerinin optimize edilmesi açısından önemli bir referans niteliğindedir.

4.4.2. İkinci grup: İki ve üç tabakalı FNK filmlerin elektriksel direnç hesaplamaları

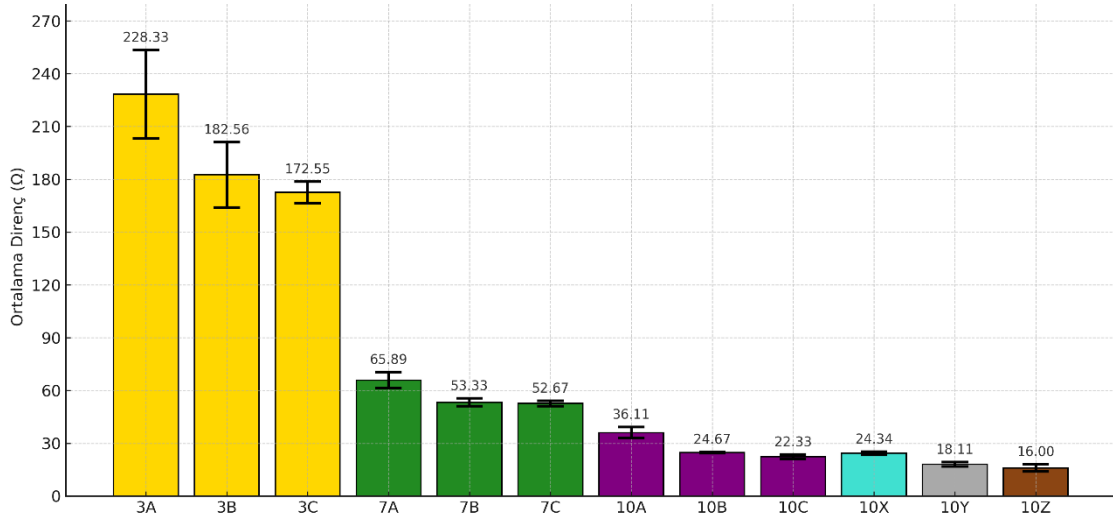
Farklı yüzde ağırlıklarda (%3, %7 ve %10) iki farklı nano takviye malzeme (CNT ve GR) kullanılarak 30 ml (15+15), 50 ml (25+25) ve 60 ml (30+30) hacimlerde 9 farklı bileşene sahip iki tabakalı ve 3 farklı bileşene sahip üç tabakalı olmak üzere toplam 12 varyantlı ve 3'er tekrarlı 36 adet filmin elektriksel performansını karşılaştırmalı şekilde ortaya koymaktadır. Her bir film için ayrı ayrı gerçekleştirilen direnç ölçümleri sonucunda, ilgili örnek grubuna ait ortalama direnç değerleri hesaplanarak Çizelge 4.10'da direnç cinsinden verilen karşılaştırmalı iletkenlik değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 4.10. İkinci grup FNK filmlerin elektriksel dirençleri

No	Numune Adı	Direnç (Ω)	Ortalama Direnç (Ω)	No	Numune Adı	Direnç (Ω)	Ortalama Direnç (Ω)
1	3A_1	201.33		19	10A_1	39.00	
2	3A_2	232.33	228.33	20	10A_2	33.00	36.11
3	3A_3	251.33		21	10A_3	36.33	
4	3B_1	162.00		22	10B_1	24.67	
5	3B_2	179.00	182.56	23	10B_2	25.00	24.67
6	3B_3	206.67		24	10B_3	24.33	
7	3C_1	179.33		25	10C_1	23.67	
8	3C_2	170.33	172.55	26	10C_2	22.00	22.33
9	3C_3	168.00		27	10C_3	21.33	
10	7A_1	69.67		28	10X_1	23.67	
11	7A_2	67.33	65.89	29	10X_2	25.67	24,34
12	7A_3	60.67		30	10X_3	23.67	
13	7B_1	51.67		31	10Y_1	19.00	
14	7B_2	52.00	53.33	32	10Y_2	18.67	18.11
15	7B_3	56.33		33	10Y_3	16.67	
16	7C_1	51.00		34	10Z_1	15.00	
17	7C_2	55.33	52.67	35	10Z_2	14.33	16.00
18	7C_3	51.67		36	10Z_3	18.67	

12 farklı varyantta üretilen FNK filmler arasında yapılan elektriksel karakterizasyon sonucunda, en düşük elektriksel direnç dolayısıyla en yüksek elektriksel iletkenlik değerlerine sahip gruplar, sırasıyla 10Z, 10Y ve 10X kodlu, %10 oranında nano katkı içeren ve üç tabakalı yapı formunda üretilmiş film grupları olmuştur. Bu yapılar, çok katmanlı konfigürasyonlarının yanı sıra yüksek katkı oranları sayesinde CNT'ler

arasında kararlı iletim yolları oluşturarak elektriksel akımın etkin bir şekilde iletilmesine olanak sağlamıştır. Numuneler arasındaki karşılaştırmanın daha doğru bir şekilde yapılabilmesi için yine karşılaştırmalı ve standart sapmaları içeren sütun grafiklerine başvurulmuştur (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. İkinci grup FNK filmlerin direnç değerlerinin karşılaştırılması

3A, 3B, ve 3C gruplarına ait numuneler (No: 1–9) yüksek direnç değerleriyle dikkat çekmektedir (En yüksek ortalama direnç: 3A serisi → 228.33 Ω). Bu gruplar CNT ve GR'nin düşük konsantrasyonlarda ve/veya yetersiz dağılımlar içeren iki tabakalı yapılardır.

7A, 7B, 7C serileri (No: 10–18), direnç açısından orta seviyede olup ortalama direnç değerleri 65.89 Ω – 52.67 Ω aralığında değişmektedir. Bu numunelerde CNT ve GR'nin ağırlıkça artması sebebiyle elektriksel iletkenliği artıracak şekilde daha iyi dağılım ve ağ yapısı sergilemiştir.

10Z, 10Y, 10C, 10X, 10B, 10A grupları (No: 19–36), direnç açısından en iyi performansı sergilemektedir. En düşük ortalama direnç: 16.00 Ω ile 10Z grubu oluştururken bu grubu 18.11 Ω ile 10Y serisi takip etmektedir.

Sonuç olarak bu grafik; nano takviye türü, yapısal konfigürasyon (katman sayısı), yüzdesel oranlar ve çözeltideki hacim gibi parametrelerin elektriksel iletkenlik performansı üzerinde doğrudan etkili olduğunu açıkça göstermektedir. CNT ve GR katkı miktarının artmasıyla birlikte elektriksel iletkenliğin doğrusal bir artış eğilimi gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu durum, hem katkı malzemesinin iletkenlik karakteristiğini hem de filmler içerisinde oluşan perkolasyon ağlarının katkı oranına bağlı

olarak güçlendiğini göstermektedir. Dolayısıyla, katkı tipi kadar katkı miktarı da FNK filmlerin elektriksel performansında belirleyici bir rol oynamaktadır. Özellikle üç tabakalı CNT-GR-CNT sandviç yapısı, iletim yollarının sürekliliği sayesinde elektriksel iletkenlik açısından en verimli tasarımı sunmaktadır. Bu analiz, yüksek iletkenlik hedefleyen FNK film tasarımları için yol gösterici niteliktedir.

4.4.3. Üçüncü grup: Fonksiyonelleşmiş ve doplanmış takviye içeren FNK filmlerin elektriksel iletkenlik hesaplamaları

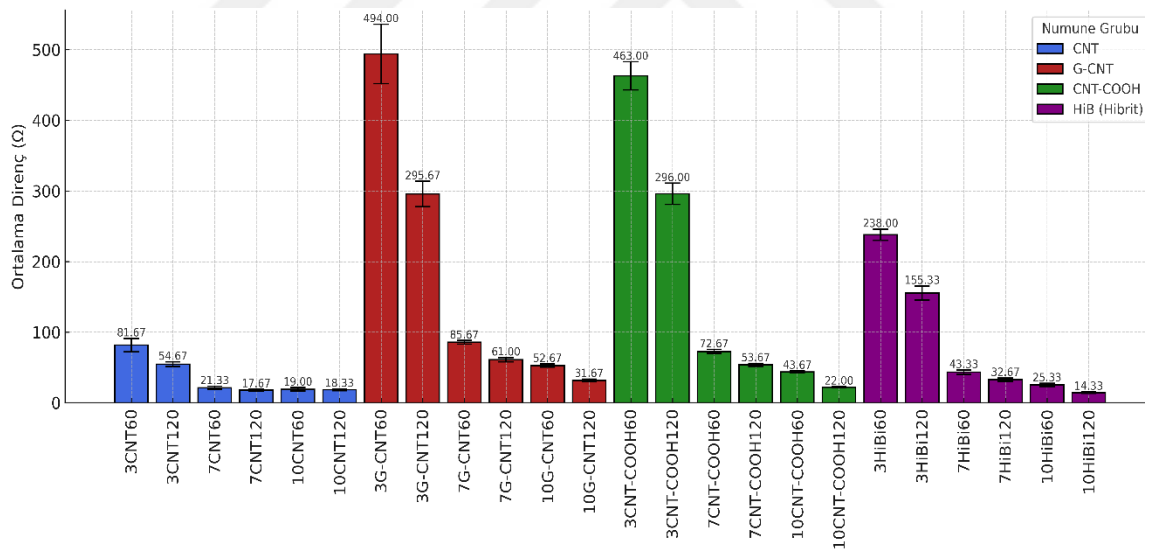
Ağırlıkça %3, 7 ve 10 oranları kullanılarak 60 ve 120 ml hacimlerde karbon nanotüp (CNT), %32 grafen ile doplanmış karbon nanotüp (G-CNT), karboksili gruplarla fonksiyonelleştirilmiş karbon nanotüp (CNT-COOH), grafen (GR) ve karbon nanotüp ile grafenin eşit oranlarla eklenmesiyle elde edilen hibrit nanoparçacıklar (HİB) kullanılarak üretilen filmlerin dirençleri multimetre ve iki problu direnç ölçüm metodu ile ölçülerek Çizelge 4.12'deki veriler elde edilmiştir. Her bir farklı parametredeki FNK filmleri için ölçümler çok kez tekrarlanarak ortalama direnç değerleri ohm (Ω) cinsinden elde edilmiştir.

Çizelge 4.11. Üçüncü grup FNK filmlerin direnç ölçümleri (multimetre)

No	Numune	Direnç (Ω)	Ortalama Direnç (Ω)	No	Numune	Direnç (Ω)	Ortalama Direnç (Ω)
1	3CNT60_1	76	81.67	37	3CNT-COOH60_1	485	463.00
2	3CNT60_2	93		38	3CNT-COOH60_2	457	
3	3CNT60_3	76		39	3CNT-COOH60_3	457	
4	3CNT120_1	59	54.67	40	3CNT-COOH120_1	271	296.00
5	3CNT120_2	53		41	3CNT-COOH120_2	314	
6	3CNT120_3	52		42	3CNT-COOH120_3	303	
7	7CNT60_1	22	21.33	43	7CNT-COOH60_1	73	72.67
8	7CNT60_2	23		44	7CNT-COOH60_2	70	
9	7CNT60_3	19		45	7CNT-COOH60_3	75	
10	7CNT120_1	17	17.67	46	7CNT-COOH120_1	55	53.67
11	7CNT120_2	18		47	7CNT-COOH120_2	51	
12	7CNT120_3	18		48	7CNT-COOH120_3	55	
13	10CNT60_1	19	19.00	49	10CNT-COOH60_1	43	43.67
14	10CNT60_2	17		50	10CNT-COOH60_2	43	
15	10CNT60_3	21		51	10CNT-COOH60_3	45	
16	10CNT120_1	20	18.33	52	10CNT-COOH120_1	22	22.00
17	10CNT120_2	17		53	10CNT-COOH120_2	20	
18	10CNT120_3	18		54	10CNT-COOH120_3	24	
19	3G-CNT60_1	499	494.00	55	3HiB60_1	236	238.00
20	3G-CNT60_2	471		56	3HiB60_2	224	
21	3G-CNT60_3	512		57	3HiB60_3	254	
22	3G-CNT120_1	286	295.67	58	3HiB120_1	151	155.33
23	3G-CNT120_2	287		59	3HiB120_2	150	
24	3G-CNT120_3	314		60	3HiB120_3	165	

25	7G-CNT60_1	86		61	7HiB60_1	43	
26	7G-CNT60_2	88	85.67	62	7HiB60_2	40	43.33
27	7G-CNT60_3	83		63	7HiB60_3	47	
28	7G-CNT120_1	60		64	7HiB120_1	34	
29	7G-CNT120_2	60	61.00	65	7HiB120_2	29	32.67
30	7G-CNT120_3	63		66	7HiB120_3	35	
31	10G-CNT60_1	54		67	10HiB60_1	28	
32	10G-CNT60_2	53	52.67	68	10HiB60_2	26	25.33
33	10G-CNT60_3	51		69	10HiB60_3	22	
34	10G-CNT120_1	33		70	10HiB120_1	16	
35	10G-CNT120_2	32	31.67	71	10HiB120_2	12	14.33
36	10G-CNT120_3	30		72	10HiB120_3	15	

Çizelge 4.12 kapsamında sunulan deneysel direnç verilerinin istatistiksel olarak karşılaştırılabilirliğini artırmak ve elde edilen ölçüm sonuçlarını görsel olarak daha anlaşılır hale getirmek amacıyla, her bir numuneye ait ortalama direnç değerleri esas alınarak Şekil 4.16’da bir sütun grafiği oluşturulmuştur. Söz konusu grafik, her bir numunenin elektriksel direnç değerlerini görsel olarak ortaya koymaktadır. Ayrıca grafikteki değerler standart sapma değerleri ile birlikte gösterilerek grafiksel doğruluk güçlendirilmiştir.



Şekil 4.16. Üçüncü grup FNK filmlerin direnç değerlerinin karşılaştırılması (multimetre)

Şekil 4.16’deki verilerden yola çıkarak numune grupları arasında ortalama en düşük direnç değerleri CNT grubunda gözlemlenmiştir. Özellikle 10CNT120 numunesi 18.33 Ω ile en düşük dirençli numune olmuştur. CNT oranı arttıkça ve çözeltideki hacim yükseldikçe dirençte belirgin bir azalma gerçekleşmiştir. Bu durum, CNT’lerin film içerisinde iyi dağıldığını ve sürekli bir iletken ağ oluşturduğunu göstermektedir.

En yüksek direnç değerlerine sahip grup G-CNT olmuştur. Özellikle 3G-CNT60 ve 3G-CNT120 numunelerinde sırasıyla 494.00 Ω ve 295.67 Ω gibi çok yüksek dirençler gözlenmiştir. Bu değerler, grafen ile doplanmış CNT'nin saf CNT'ye kıyasla daha zayıf elektriksel iletkenlik gösterdiğini ve film içerisinde homojen dağılmakta zorlandığını düşündürmektedir.

Karboksil (-COOH) gruplarıyla fonksiyonelleştirilmiş CNT-COOH yapılarının direnç değerleri, G-CNT grubuna kıyasla daha düşük olmakla birlikte, CNT ve HiB gruplarına göre oldukça yüksek seviyelerde kalmaktadır. Fonksiyonelleştirme işlemi, CNT'lerin film matrisi içerisindeki dağılımını iyileştirerek morfolojik homojenliği artırmış olsa da, bu yapıların elektriksel iletkenliklerini önemli ölçüde azaltmıştır. Bu durum, taşıyıcı ağ yapısının sürekliliğini zayıflatarak iletim yollarının etkinliğini sınırlamıştır. Dolayısıyla, G-CNT ile birlikte kullanılan CNT-COOH yapılarının yüksek elektromanyetik koruma performansı sergileyen bir koruyucu sistem oluşturmak için uygun olmadığı, özellikle yüksek iletkenlik gerektiren uygulamalarda sınırlı fayda sağlayacağı değerlendirilmektedir.

CNT ve GR'nin aynı anda kullanılmasıyla oluşturulan HiB grubu geniş direnç aralığına sahip olduğu için elektriksel performansı CNT'ye göre daha karmaşık olduğu hipotezini ortaya koymaktadır. 10HiB120 numunesi 14.33 Ω ile tüm numuneler arasında en düşük direnç değerini sergilemiş, bu da hibrit yapıların CNT ve GR'nin sinerjik etkisiyle çok iyi bir iletkenlik sağlayabileceğini göstermektedir. Öte yandan, 3HiB60 ve 3HiB120 numunelerinde dirençlerin yüksek olması (238.00 Ω ve 155.33 Ω), düşük oranlarda veya hacimlerde GR'nin topaklanma eğilimi göstermesiyle açıklanabilir.

Çizelge 4.13, iki problu doğrudan ölçüm yöntemi kullanılarak hesaplanan elektriksel direnç değerlerini göstermektedir. Ölçümler, film yüzeyine aralarında 1 cm mesafe bırakılarak yerleştirilen iki bakır telin, iletkenliği artırmak amacıyla gümüş pasta kullanılarak sabitlenmesiyle oluşturulan test düzeni üzerinden gerçekleştirilmiştir. Her bir numunenin ölçümü aynı noktadan 20 kez tekrarlanarak yapılmış, elde edilen direnç verilerinin ortalaması alınarak nihai değerler o numuneye ait ortalama direnç değeri olarak hesaplanmıştır. Bu yaklaşım, ölçüm hassasiyetini artırmakla birlikte, sistematik hata olasılığını azaltarak her numunenin temsil niteliği yüksek bir direnç değerinin elde edilmesini sağlamıştır.

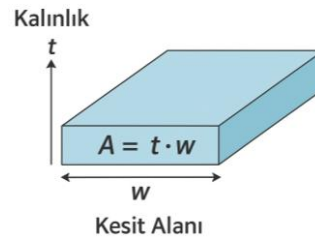
Çizelge 4.12. Üçüncü grup FNK filmlerin direnç ölçümleri (iki problu ölçüm metodu)

Ölçüm Sayısı	3CNT60	3CNT120	7CNT60	7CNT120	10CNT60	10CNT120
1	68.76	43.76	47.67	18.90	20.65	8.46
2	68.85	43.76	47.26	18.90	20.66	8.46
3	69.30	43.76	47.44	18.83	20.63	8.46
4	69.03	43.76	47.42	18.83	20.64	8.46
5	70.25	43.75	47.41	18.83	20.64	8.46
6	70.25	43.75	47.39	18.83	20.63	8.46
7	70.25	43.75	47.40	18.83	20.64	8.46
8	68.25	43.75	47.36	18.84	20.62	8.46
9	68.25	43.75	47.16	18.84	20.61	8.46
10	68.25	43.75	47.12	18.84	20.61	8.46
11	68.25	43.75	47.10	18.84	20.61	8.46
12	67.97	43.75	47.08	18.84	20.60	8.46
13	67.97	43.75	47.05	18.84	20.59	8.46
14	67.74	43.75	47.03	18.84	20.58	8.47
15	67.74	43.75	47.00	18.84	20.57	8.47
16	67.74	43.75	46.98	18.84	20.56	8.47
17	67.64	43.74	46.97	18.84	20.56	8.47
18	67.51	43.74	46.90	18.84	20.55	8.47
19	67.51	43.74	46.90	18.84	20.57	8.47
20	67.51	43.74	46.90	18.84	20.58	8.47
Ortalama Direnç (Ω)	68.52	43.75	47.20	18.90	20.62	8.46

Elektriksel direnç, elektromanyetik koruyucu etkinliğin belirlenmesinde temel belirleyici parametrelerden biri olduğundan Çizelge 4.13'te yer alan ortalama direnç değerleri temel alınarak, üretilen FNK filmlerin elektriksel performansları nicel olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, filmlere ait doğrudan ölçülen direnç değerleri kullanılarak elektriksel iletkenlik değerleri (S/m) hesaplanmış ve bu veriler, Çizelge 4.14'te sistematik biçimde sunulmuştur. Ayrıca, malzeme kalınlıklarının iletkenlik üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla, Denklem 20'de verilen formüle göre özgül (spesifik) iletkenlik değerleri de (S/m) hesaplanarak tabloya eklenmiştir. Bu analiz sayesinde, film kalınlığının elektriksel iletkenliğe olan katkısı ortaya konmuş ve farklı takviye türlerinin iletkenlik açısından performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

$$\sigma = \frac{L}{R \times A} \quad (20)$$

Burada σ iletkenlik (S/m), L problar arası mesafe (m), R direnç (Ω), A ise kesit alanını (m²) temsil etmektedir (Şekil 4.17). Kesit alanı FNK filminin kalınlığının genişliği ile metre cinsinden çarpılması ile elde edilmektedir.



Şekil 4.17. FNK filmlerinin kesit alanı hesaplaması

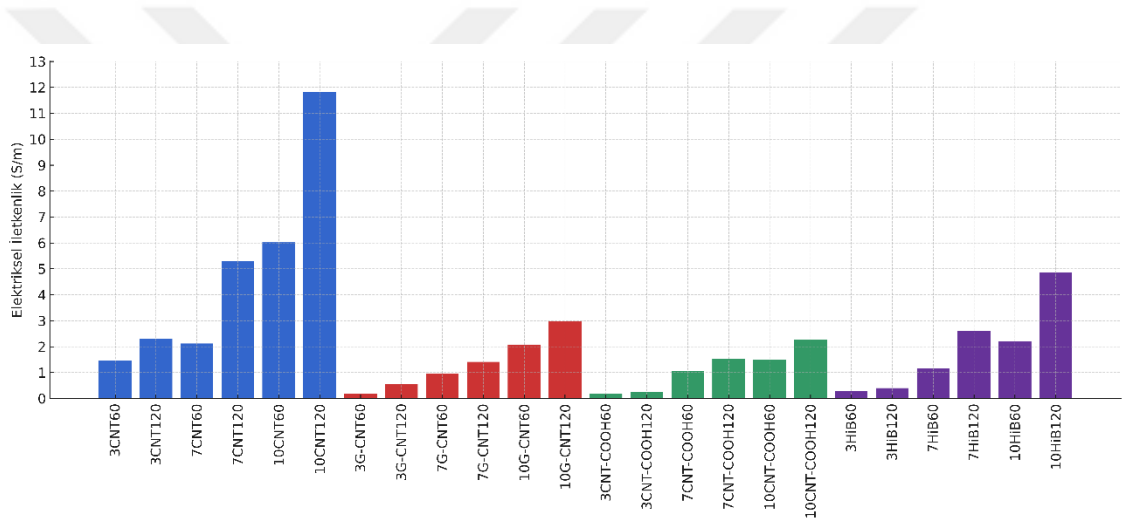
Çizelge 4.13. Üçüncü grup FNK filmlerin kalınlığa bağlı elektriksel iletkenlik değerlerin hesaplanması

No	Numune	Ortalama Kalınlık (m)	Kesit Alanı (m ²)	Ortalama Direnç (Ω)	Elektriksel İletkenlik (S/m)	Alana Bağlı Elektriksel İletkenlik (S/m)
1	3CNT60	0.000217	0.00000130	68.52	1.46	112.09
2	3CNT120	0.000363	0.00000218	43.75	2.29	104.95
3	7CNT60	0.000214	0.00000128	47.20	2.12	165.00
4	7CNT120	0.000357	0.00000214	18.90	5.29	247.01
5	10CNT60	0.000200	0.00000122	16.62	6.02	501.40
6	10CNT120	0.000307	0.00000184	8.46	11.82	641.71
7	3G-CNT60	0.000194	0.00000116	526.15	0.19	16.33
8	3G-CNT120	0.000323	0.00000194	178.79	0.56	28.86
9	7G-CNT60	0.000253	0.00000152	105.43	0.95	62.48
10	7G-CNT120	0.000422	0.00000253	70.96	1.41	55.66
11	10G-CNT60	0.000206	0.00000124	48.01	2.08	168.52
12	10G-CNT120	0.000375	0.00000225	33.81	2.96	131.45
13	3CNT-COOH60	0.000272	0.00000163	543.02	0.18	11.28
14	3CNT-COOH120	0.000380	0.00000228	405.78	0.25	10.81
15	7CNT-COOH60	0.000284	0.00000170	93.32	1.07	62.89
16	7CNT-COOH120	0.000433	0.00000260	65.30	1.53	58.95
17	10CNT-COOH60	0.000249	0.00000149	66.04	1.51	101.35
18	10CNT-COOH120	0.000458	0.00000275	44.21	2.26	82.31
19	3HiB60	0.000271	0.00000163	342.57	0.29	17.95
20	3HiB120	0.000392	0.00000235	248.41	0.40	17.12
21	7HiB60	0.000237	0.00000142	86.02	1.16	81.75
22	7HiB120	0.000378	0.00000227	38.60	2.59	114.23
23	10HiB60	0.000200	0.00000120	45.36	2.20	183.72
24	10HiB120	0.000377	0.00000226	20.63	4.85	214.29

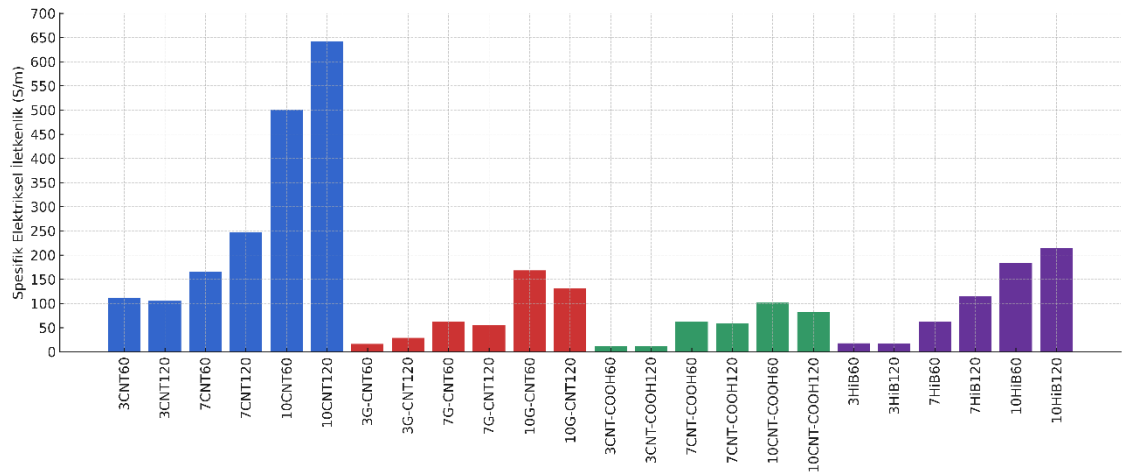
Yapılan elektriksel karakterizasyon çalışmaları sonucunda, mutlak elektriksel iletkenlik açısından en yüksek performansa sahip FNK filmi, 11.82 S/m ile 10CNT120 numunesi olmuştur. Bu değer, diğer tüm grupların üzerinde yer almakta ve bu numunenin içerisinde oluşturulan CNT bazlı iletken ağ yapılarının oldukça etkili bir şekilde oluştuğunu göstermektedir. 10CNT60 numunesi ise 6.02 S/m değeri ile ikinci sırada yer almakta ve CNT miktarının iletkenlik üzerindeki etkisini desteklemektedir. Benzer durum spesifik (özgül) elektriksel iletkenlikler için de kısmen geçerli olmaktadır. yani elektriksel iletkenlik değeri film kalınlığına oranlandığında, sonuçlar farklılık göstermiştir. Bu analizde 10CNT120 numunesi, yaklaşık 641.71 S/m değeriyle en yüksek spesifik

iletkenliğe sahip yapı olarak öne çıkmıştır. Daha kalın bir yapıya sahip olan 10CNT120 filminin, yüksek mutlak iletkenliği sebebiyle rağmen kalınlık faktörü nedeniyle ikinci sıraya gerilemiştir.

Çizelge 4.14'te hesaplanan elektriksel iletkenlik ve kesit alanına bağlı spesifik (özgül) elektriksel iletkenlik değerlerinin karşılaştırmalı olarak analiz edilebilmesi ve doğru şekilde yorumlanabilmesi amacıyla, ilgili veriler Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da sütun grafikleri ile görselleştirilmiştir. Bu grafiksel sunum, farklı nano takviye türleri ve üretim parametrelerinin iletkenlik üzerindeki etkilerini daha belirgin bir biçimde ortaya koymakta; ayrıca hem doğrudan ölçülen hem de kalınlık ve kesit alanı dikkate alınarak hesaplanan iletkenlik değerlerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 4.18. Üçüncü grup FNK filmlerin elektriksel iletkenlik değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.19. Üçüncü grup FNK filmlerin spesifik elektriksel iletkenlik değerlerinin karşılaştırılması

Bu bulgular, yalnızca iletken dolgu oranının değil, aynı zamanda film kalınlığının da elektriksel performans üzerinde belirleyici olduğunu ortaya koymaktadır. Elektromanyetik dalgaların sönümlenmesi ve film içi akım iletimi açısından ince fakat yoğun CNT ağına sahip yapıların, iletkenlik verimliliği açısından daha avantajlı olduğu söylenebilir. Bu durum, gelecekteki FNK tasarımlarında yalnızca dolgu miktarı değil, optimum film kalınlığının da dikkatle kontrol edilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

4.4.4. Dördüncü grup: Üç tabakalı CNT-BN-CNT yapılı FNK filmlerin elektriksel iletkenlik hesaplamaları

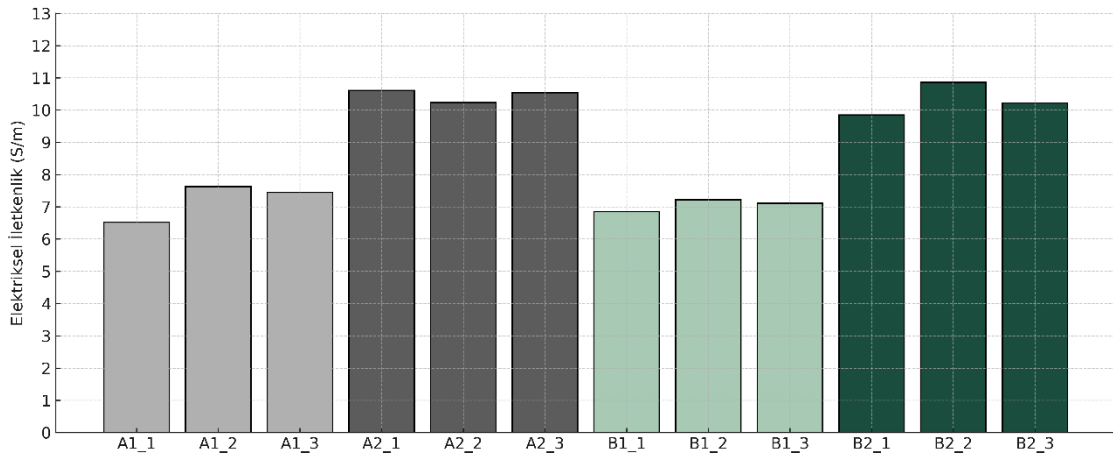
EMI koruması ile termal iletkenlik performansını eş zamanlı olarak optimize etmek amacıyla tasarlanan CNT–BN–CNT tabanlı üç tabakalı sandviç yapıların elektriksel karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, numunelerin elektriksel direnç değerleri multimetre ve iki uçlu direnç ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüş, ardından bu değerler temel alınarak SI birim sistemine uygun şekilde S/m cinsinden elektriksel iletkenlik hesaplamaları yapılmıştır (Çizelge 4.15). Elde edilen veriler ile, aynı anda numune kalınlıkları dikkate alınarak spesifik elektriksel iletkenlik değerleri de hesaplanmış ve böylece yapısal kalınlığın elektriksel performans üzerindeki etkisi ortaya konmuştur.

Çizelge 4.14. Dördüncü grup FNK filmlerin kalınlığa bağlı elektriksel iletkenlik değerlerin hesaplanması

No	Numune	Ortalama Direnç (Ω)	Ortalama Kalınlık (m)	Kesit Alanı (m^2)	Elektriksel İletkenlik (S/m)	Kesit Alanına Bağlı Elektriksel İletkenlik (S/m)
1	A1_1	15.2	0.000222	0.00000133	6.58	493.91
2	A1_2	12.9	0.000314	0.00000255	7.75	411.46
3	A1_3	13.3	0.000333	0.00000187	7.52	376.32
4	A2_1	9.4	0.000454	0.00000272	10.64	390.54
5	A2_2	8.1	0.000425	0.00000189	10.2	400.16
6	A2_3	9.6	0.000464	0.00000322	10.42	374.16
7	B1_1	14.6	0.000301	0.00000181	6.85	379.25
8	B1_2	13.7	0.000315	0.00000341	7.3	386.2
9	B1_3	14.4	0.000311	0.00000133	7.14	374.19
10	B2_1	10.1	0.000521	0.00000313	9.9	319.63
11	B2_2	9.2	0.000568	0.00000200	10.87	386.2
12	B2_3	9.9	0.000536	0.00000272	10.1	314.9

Farklı çözelti hacimlerine ve yüzde ağırlık oranlarına sahip CNT ve BN katkılı numunelerin iletkenlik performanslarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmek amacıyla Şekil 4.20 ve 4.21’de hazırlanan elektriksel iletkenlik ve kesit alanına bağlı spesifik

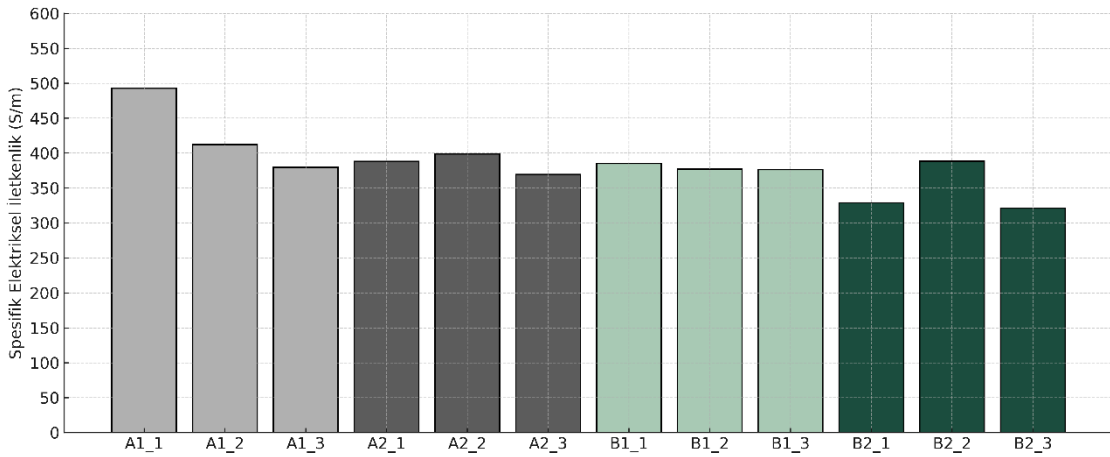
elektriksel iletkenlik sütun grafikleri, Çizelge 4.15'te sunulan veriler temel alınarak oluşturulmuştur. Grafik, sandviç yapıdaki çok katmanlı FNK sistemlerin sadece mutlak elektriksel iletkenlik değerlerini değil, aynı zamanda spesifik iletkenlik düzeylerini de dikkate alarak analiz edilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu yaklaşım, EMI koruması hedeflenen sistemlerde elektriksel verimliliğin daha bütüncül bir bakış açısıyla değerlendirilmesine ve nihayetinde üstün EMI koruyucu etkinliğe sahip olmasını sağlamaktadır.



Şekil 4.20. Dördüncü grup FNK filmlerin elektriksel iletkenlik değerlerinin karşılaştırılması

Elektriksel iletkenlik değerleri, numunelerin ortalama direnç ölçümleri esas alınarak değerlendirildiğinde, en yüksek iletkenlik 10.87 S/m ile B2_2 numunesinde elde edilmiştir. Bu numuneyi sırasıyla A2_1 (10.64 S/m) ve A2_3 (10.42 S/m) numuneleri takip etmektedir. Elde edilen bulgular, özellikle A2 ve B2 gruplarının, yani %10 oranında CNT içeren ve 120 ml hacmindeki çözeltilerle hazırlanmış filmlerin, düşük elektriksel direnç ve daha optimize yapısal parametreler sergilediğini göstermektedir. Bu sonuçlar, 120 ml çözelti hacminin (her biri 60 ml olacak şekilde alt ve üst katman olarak uygulanmıştır) üretim sürecinde homojen dağılımı ve yeterli film kalınlığını sağladığını, böylece elektriksel taşıma kabiliyetini artırarak iletkenlik değerlerini yükselttiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, bu filmlerin kalınlık parametresi belirli sınırlar içinde tutulduğunda, elektromanyetik girişim (EMI) koruyucu etkinliğin de maksimize edilebileceği öngörülmektedir. Dolayısıyla, %10 CNT takviyeli ve çift katmanlı (üst-alt) yapıdaki 120 ml çözeltiyle üretilen FNK filmlerin, hem yapısal tutarlılık hem de fonksiyonel performans açısından en uygun yapılandırma olduğu değerlendirilmektedir.

Bulgular ters yönde incelendiğinde, en düşük elektriksel iletkenlik değeri A1_1 numunesinde 6.58 S/m olarak kaydedilmiştir. Bu değeri sırasıyla B1_1 (6.85 S/m) ve B1_3 (7.14 S/m) numuneleri takip etmektedir. Düşük iletkenlik performansına sahip bu numuneler, ortak olarak 60 ml'lik çözelti hacmi ile üretilmiş film gruplarına (A1 ve B1 serileri) aittir. Bu durum, çözelti hacminin, elde edilen filmlerin mikro yapısı ve elektriksel taşıma yolları üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Düşük hacimli çözeltiler, matris içerisindeki nano takviyelerin homojen dağılımını sınırlandırmakta ve bu da iletkenlik performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca, yetersiz film kalınlığı ya da süreksiz yapılar, elektrik akımının geçişini zorlaştırarak daha yüksek direnç ve dolayısıyla daha düşük iletkenlik değerlerine neden olmaktadır. Bu bağlamda, 60 ml çözelti hacmiyle hazırlanan FNK filmlerin, elektriksel iletkenlik açısından sınırlı performans sunduğu ve daha yüksek hacimli üretim parametrelerinin tercih edilmesinin fonksiyonel etkinliği artırabileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.21. Dördüncü grup FNK filmlerin spesifik elektriksel iletkenlik değerlerinin karşılaştırılması

Spesifik elektriksel iletkenlik, malzemenin kalınlığı ve kesit alanı gibi geometrik faktörler dikkate alınarak normalize edilmiş bir iletkenlik ölçütü sunar. Bu yönüyle özellikle çok ince ya da kalın filmler arasındaki performans karşılaştırmasında daha objektif bir gösterge olarak öne çıkar.

Bu bağlamda, en yüksek spesifik iletkenlik değeri 493.91 S/m ile A1_1 numunesinde elde edilmiştir. Bu film, yüksek bir direnç değerine (15.2Ω) sahip olmasına rağmen, oldukça ince ($222 \mu\text{m}$) bir kalınlığa ve küçük kesit alanına sahip olduğundan dolayı bu metrikte öne çıkmıştır. Bu durum, filmin yüksek özgül performans sunduğunu ve düşük hacimle efektif bir koruma sağlayabileceğini göstermektedir. İkinci en yüksek

değer 411.46 S/m ile A1_2 numunesine aittir. Bu da A serisinin özellikle daha düşük kalınlık ve dar kesit alanı sayesinde spesifik performans açısından avantaj sağladığını göstermektedir. Bu örnekler, sadece iletkenlik değil, aynı zamanda film geometrisinin de uygulama bazlı değerlendirmelerde kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

4.5. Fonksiyonel Nanokompozit Filmlerin Elektromanyetik Koruyucu Etkinliği Hesaplamaları

Her bir FNK numunesinin elektromanyetik koruyucu etkinlik performansını belirlemek amacıyla, Anritsu marka test cihazı kullanılarak Port 1 ve Port 2 arasına numuneler yerleştirilmiş ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Her film örneği için üç ayrı tekrar yapılarak ölçümlerden elde edilen değerler çizelgeler ve sütun grafikleri oluşturularak karşılaştırmalı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda, her numune için en yüksek EMI koruma (dB cinsinden en yüksek değer) ve ortalama EMI (ortalama dB değeri) hesaplanmıştır. Elde edilen bu veriler, EMI koruyucu etkinliğinin nicel olarak değerlendirme imkanı sunmuş; tekrar edilen ölçümler sayesinde istatistiksel güvenilirlik artırılmıştır.

4.5.1. Birinci grup: CNT ve hibrit FNK filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinliği hesaplamaları

Birinci grup numunelere ait (CNT ve CNT/GR takviyeli) EMI koruyucu etkinlik ölçümleri doğrultusunda gerçekleştirilen hesaplamalar ve analizler sonucunda, karşılaştırmalı değerlendirmelere olanak tanıyan Çizelge 4.16 oluşturulmuştur. Her bir film türünden üçer adet üretilerek, elde edilen veriler sistematik biçimde raporlanmış ve EMD zayıflatma performansları ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Bu yöntemsel yaklaşım, farklı üretim parametrelerinin koruyucu etkinlik üzerindeki etkilerini belirleyebilmek ve film yapılarının performans farklarını karşılaştırmalı şekilde ortaya koyabilmek açısından anlamlı bir karşılaştırma zemini sunmaktadır.

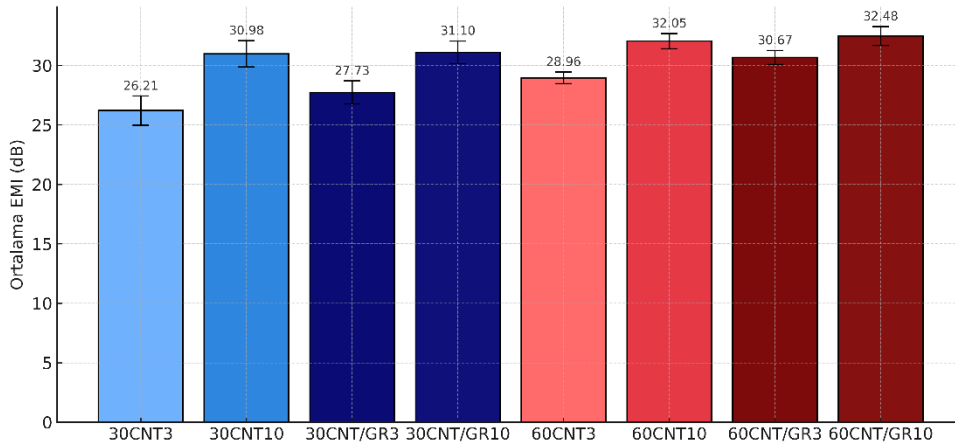
Çizelge 4.15. Birinci grup FNK filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinlik değerlerinin hesaplanması

No	Numune	EMI (dB)	Ortalama EMI (dB)	No	Numune	EMI (dB)	Ortalama EMI (dB)
1	30CNT3_1	27.62		13	60CNT3_1	29.45	
2	30CNT3_2	25.48	26.21	14	60CNT3_2	28.96	28.96
3	30CNT3_3	25.53		15	60CNT3_3	28.47	
4	30CNT10_1	29.70		16	60CNT10_1	31.37	
5	30CNT10_2	31.67	30.98	17	60CNT10_2	32.95	32.05
6	30CNT10_3	31.56		18	60CNT10_3	31.84	
7	30CNT/GR3_1	26.88		19	60CNT/GR3_1	30.19	
8	30CNT/GR3_2	28.79	27.73	20	60CNT/GR3_2	31.35	30.67
9	30CNT/GR3_3	27.52		21	60CNT/GR3_3	30.48	
10	30CNT/GR10_1	30.04		22	60CNT/GR10_1	32.83	
11	30CNT/GR10_2	31.88	31.10	23	60CNT/GR10_2	33.00	32.48
12	30CNT/GR10_3	31.39		24	60CNT/GR10_3	31.54	

Çizelge 4.16’da yer alan verilere göre, farklı oranlarda CNT ve/veya grafen katkısı içeren FNK filmlerin EMI koruyucu performansları detaylı biçimde karşılaştırılmıştır. Her bir film numunesi için yapılan üç tekrarlı ölçümler sonucunda elde edilen en yüksek ve ortalama koruyucu (dB) değerleri, malzeme formülasyonu ve üretim parametrelerinin EMI koruyucu etkinliği üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir.

Çalışmada elde edilen bulgular, 60 ml çözelti hacmiyle hazırlanan film gruplarının, genellikle 30 ml çözelti ile üretilen eşdeğerlerine kıyasla daha yüksek elektromanyetik koruma performansı sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu eğilim, özellikle CNT katkılı örnekler arasında belirgin olmakla birlikte yaklaşık 1-3 dB’lik bir farkı ortaya çıkarmaktadır.

Bununla birlikte, selüloz matrise entegre edilen nano takviye yapılarının ağırlıkça oranı artırıldıkça, tüm film gruplarında elektromanyetik koruyucu etkinliğin anlamlı düzeyde arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, kullanılan nano yapıların (CNT ve/veya grafen) film içerisindeki iletken yol ağlarını güçlendirerek, elektromanyetik dalgaların soğurulması ve/veya yansımaları yoluyla etkin koruma sağladığını açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 4.22. Birinci grup FNK filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinlik değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.22’de nano takviyelerin türüne göre yapılan karşılaştırmalarda, hibrit takviye (CNT/GR) içeren FNK filmlerin, yalnızca CNT içeren filmlere kıyasla az miktarda da olsa (ortalama 1dB) daha yüksek EMI koruyucu etkinlik değerleri sunduğu belirlenmiştir. CNT grubunun, CNT/GR (hibrit) grubuna kıyasla daha yüksek elektriksel iletkenlik göstermesine rağmen, elektromanyetik (EM) koruyucu etkinliğin CNT/GR grubunda çok az bir farkla daha yüksek çıkmasının, hibrit yapının oluşturduğu çok yönlü dağılım ağı ve çoklu yansıma mekanizmasını daha etkin şekilde sağlamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. CNT’ler elektriksel iletkenlik açısından üstün bir performans sergilerken, grafenin geniş yüzey alanı ve tabakalı yapısı, elektromanyetik dalgaların soğurulması ve iç yapıda çoklu yansımaya uğraması açısından katkı sağlamaktadır. Bu sinerjik etki, özellikle CNT ve GR'nin homojen bir şekilde dağıldığı hibrit sistemlerde, elektriksel iletkenliğin tek başına yeterli bir kriter olmadığını, EMI koruma performansının mikro yapısal özellikler ve iç yansıma mekanizmalarıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

CNT/GR hibrit filmler incelendiğinde, 60 ml çözelti ile hazırlanan 60CNT/GR10 grubu, en yüksek 32.48 dB değeri ile en yüksek bireysel EMI koruma performansını ortaya koymuştur. 60CNT10, 30CNT/GR10 ve 30CNT10 grupları sırasıyla 32.05 dB, 31.10 dB ve 30.98 dB ortalama EMI koruyuculuğu ile yüksek değerleri sunmuştur. Bu bulgular, hem katkı oranının artırılmasının hem de çözelti hacminin genişletilmesinin, filmler boyunca daha homojen bir yapının elde edilmesini sağladığını ve bu durumun elektromanyetik ekranlama üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, hem katkı türü (CNT/GR) hem de üretim parametreleri (oran ve çözelti hacmi) birlikte değerlendirildiğinde, %10 oranında hibrit takviye (CNT/GR) içeren ve 60 ml çözelti hacmiyle üretilen FNK filmler, elektromanyetik koruma uygulamaları açısından en yüksek EMI koruma performansını sergilemiştir. Bu performansa oldukça yakın sonuçlar ise, aynı oranda ve hacimdeki saf CNT takviyesi içeren numunelerde gözlemlenmiştir. GR'nin tek başına topaklanma oluşturmaksızın homojen bir şekilde dağılabilmesi ve iletken ağ yapısına katkı sağlayabilmesi, CNT/GR hibrit filmlerde elektromanyetik koruyucu etkinlik üzerinde önemli bir sinerjik etki oluşturabileceğini göstermektedir.

4.5.2. İkinci grup: 50 ml hacim ile üretilmiş FNK filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinliği hesaplamaları

İlk film grubuna ait sonuçların standardizasyonunu değerlendirmek ve elde edilen ölçüm verilerinin tutarlılığını kontrol etmek amacıyla, 50 ml çözelti hacmiyle hazırlanmış iki farklı FNK film grubu üretilmiştir. Bu gruplardan ilki, ağırlıkça %10 CNT içeren tek takviyeli yapıda olup "50K10" olarak adlandırılmış; diğeri ise eşit miktarlarda CNT ve Grafen içeren hibrit takviyeli yapı olup "50H10" grubu olarak tanımlanmıştır.

Her iki gruba ait filmler, beşer kez test edilerek en yüksek ve ortalama EMI koruyucu etkinlik değerleri 8.200 GHz ile 12.400 GHz aralığındaki frekanslarda ölçülmüş ve ayrı ayrı hesaplanmıştır. Böylece, hem üretim sürecinin tekrarlanabilirliği hem de nano takviye türlerinin koruyucu performans üzerindeki etkisi güvenilir şekilde karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalı yaklaşım, selüloz matrise ilave edilen nano parçacık türlerinin elektromanyetik koruyuculuk açısından tutarlılığını değerlendirmek adına önemli bir referans noktası oluşturmuştur (Çizelge 4.17).

Ayrıca, çizelgede her bir numuneye ait ortalama kalınlık ve elektriksel direnç değerlerine de yer verilerek, bu parametrelerin elektromanyetik girişim (EMI) koruyucu etkinliği üzerindeki etkilerinin daha net ve karşılaştırmalı bir biçimde ortaya konulması amaçlanmıştır.

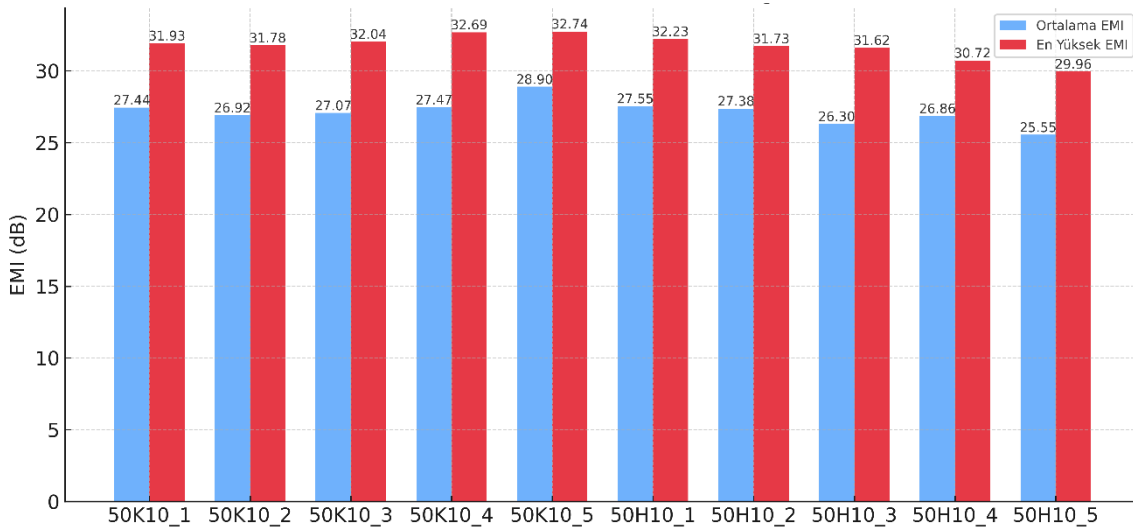
Elektromanyetik koruyucu etkinlik değerleri ortalama EMI ve en yüksek EMI koruyucu etkinlik değerleri Çizelge 4.17'de; film kalınlıklarının dahil edilmesiyle elde edilen ve denklem 21'deki formül ile hesaplanan film kalınlığına (t) bağlı spesifik EMI SSE (Specific Shielding Effectiveness) değerleri dB/mm cinsinden yine Çizelge 4.17'de birlikte verilmiştir.

$$SSE \text{ (dB/mm)} = \frac{SE \text{ (dB)}}{t \text{ (mm)}} \quad (21)$$

Çizelge 4.16. İkinci grup FNK filmlerin elektromanyetik korucu etkinlik değerlerinin hesaplanması

No	Numune	Ortalama Kalınlık (mm)	Ortalama Direnç (Ω)	Ortalama İletkenlik (S/m)	Ortalama EMI (dB)	En Yüksek EMI (dB)	Spesifik EMI (dB/mm)
1	50K10_1	0.369	22.33	3.64	27.44	31.93	86.53
2	50K10_2	0.373	22.67	3.71	26.92	31.78	85.20
3	50K10_3	0.381	22.33	3.69	27.07	32.04	84.09
4	50K10_4	0.360	26.33	3.64	27.47	32.69	90.81
5	50K10_5	0.397	21.00	3.46	28.90	32.74	82.47
6	50H10_1	0.388	37.33	3.63	27.55	32.23	83.07
7	50H10_2	0.389	38.00	3.65	27.38	31.73	81.57
8	50H10_3	0.394	32.67	3.80	26.30	31.62	80.25
9	50H10_4	0.395	31.33	3.72	26.86	30.72	77.77
10	50H10_5	0.367	35.00	3.91	25.55	29.96	81.63

Çizelge 4.17’de, farklı numune gruplarına ait ortalama, en yüksek ve spesifik EMI değerleri karşılaştırmalı olarak yer almaktadır. Numuneler, 50K10 ve 50H10 olmak üzere iki ana gruba ayrılmakta; burada "K" CNT (Karbon Nanotüp) takviyeli yapıları, "H" ise CNT/GR (hibrit) takviyeli yapıları temsil etmektedir. Her bir grup, beş farklı numuneyi içerecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 4. 23. İkinci grup FNK filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinlik değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.23’teki sütun grafiğinden elde edilen bulgulara göre, CNT takviyeli 50K10 grubu, genel olarak hem ortalama hem de en yüksek EMI değerleri bakımından CNT/GR hibrit takviyeli 50H10 grubuna göre daha yüksek EMI performansı sergilemiştir. Özellikle 50K10_5 numunesi, 32.74 dB en yüksek EMI değeri ile en dikkat çekici

performansa ulaşırken, bu numuneyi 32.74 dB ile 50K10_5 ve 32.04 dB ile 50K10_3 takip etmektedir. Ortalama EMI değerleri açısından da 50K10_5 (28.90 dB), 50K10_1 (27.44 dB) ve 50K10_3 (27.07 dB) gibi numuneler öne çıkmaktadır.

Buna karşılık, CNT/GR hibrit takviyeli 50H10 grubunda EMI değerlerinde daha belirgin dalgalanmalar gözlemlenmiş olup, bazı numunelerde performans kaybı daha net hissedilmektedir. Özellikle 50H10_5 numunesi, yalnızca 25.55 dB maksimum EMI değeri ile tüm örnekler arasında en düşük EMI performansını sergilemiştir. Ortalama EMI değerleri açısından ise 50H10_1 (27.55 dB) ve 50H10_2 (27.36 dB) numuneleri nispeten daha yüksek değerler sunarken, 50H10_3 (26.30 dB) ve 50H10_5 (25.55 dB) gibi örneklerde düşüş dikkat çekicidir.

Spesifik EMI koruma değerleri bakımından en yüksek performans, 90.81 dB/mm ile 50K10_4 numunesinde elde edilmiştir. Bu numuneyi sırasıyla 50K10_1 (86.53 dB/mm), 50K10_2 (85.20 dB/mm) ve 50K10_3 (84.09 dB/mm) numuneleri takip etmektedir. Genel olarak CNT takviyeli 50K10 grubu, ortalama olarak 84.42 dB/mm civarında bir spesifik EMI değeri sergileyerek, CNT/GR hibrit takviyeli 50H10 grubuna kıyasla daha üstün bir elektromanyetik zayıflama kapasitesi göstermiştir.

Buna karşılık, CNT/GR hibrit takviyeli 50H10 grubu numunelerinde spesifik EMI değerlerinin daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. En yüksek spesifik EMI değeri bu grupta 83.07 dB/mm ile 50H10_1 numunesine aitken, en düşük değer ise 77.05 dB/mm ile 50H10_3 numunesinde ölçülmüştür. 50H10 grubunun ortalama spesifik EMI değeri yaklaşık 80.83 dB/mm düzeyinde olup, 50K10 grubuna kıyasla yaklaşık %4.3 oranında daha düşük performans göstermektedir.

Bu veriler ışığında genel olarak , CNT içeriğinin daha istikrarlı bir dağılım sağladığı ve elektriksel iletkenlik açısından daha etkin bir iletim ağı oluşturduğu düşünülmektedir. Buna karşılık, hibrit CNT/GR sistemlerinde, özellikle grafenin matris içerisinde topaklanma eğilimi göstermesi, iletim yollarını sekteye uğratarak EMI koruyucu etkinliği olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Sonuç olarak, her iki grup arasında belirgin farklar bulunmakta olup, CNT içeriği yüksek FNK filmlerinin elektromanyetik koruma performansı açısından daha avantajlı bir yapı sunduğu görülmektedir.

4.5.3. Üçüncü grup: Fonksiyonelleşmiş ve doplanmış takviye içeren FNK filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinliği hesaplamaları

Bu çalışmada, farklı türde nano yapılar içeren FNK filmlerin elektromanyetik EMI koruyucu etkinliği performansları değerlendirilmiştir. Kullanılan nano takviyeler; saf karbon nanotüp (CNT), %32 oranında grafen ile doplanmış karbon nanotüp (G-CNT), karboksil grupları ile fonksiyonelleştirilmiş karbon nanotüp (CNT-COOH), saf grafen ve karbon nanotüp ile grafenin eşit oranlarda birleştirilmesiyle elde edilen hibrit nanoparçacıklar (HİB) şeklinde sınıflandırılmıştır.

Söz konusu FNK filmler, 8.200 GHz ile 12.400 GHz aralığını kapsayan geniş bir frekans bandında test edilerek, EMI koruma düzeyleri belirlenmiştir. Bu analizler sonucunda, her bir katkı türü için üçer adet film örneği üretilmiş ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda hem ortalama hem de en yüksek EMI değerleri, karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmesi amacıyla Çizelge 4.18'de sunulmuştur.

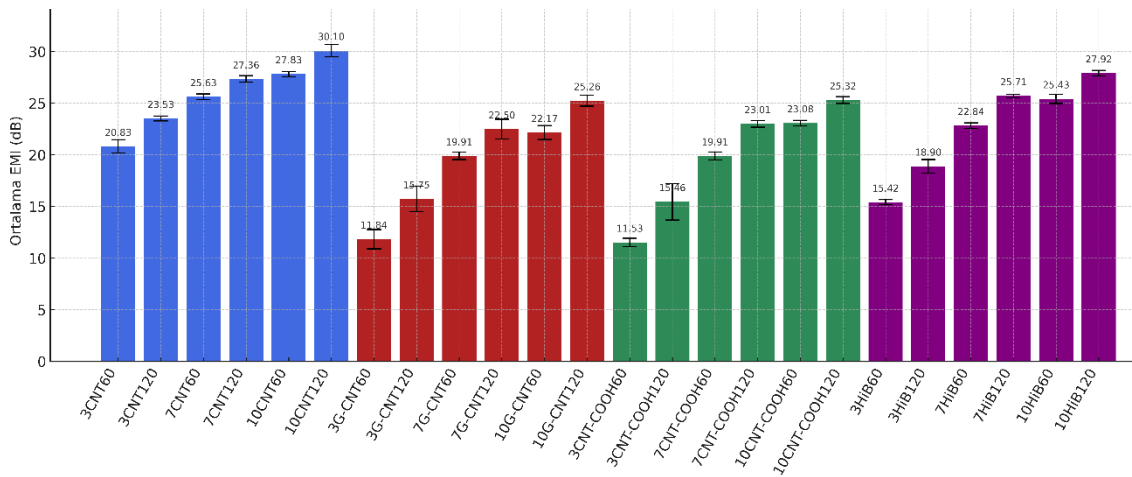
Bu kapsamlı değerlendirme ile, farklı fonksiyonel katkı maddelerinin EMI performansına olan etkisi net bir şekilde ortaya konmuş, özellikle iletkenlik özellikleri, yapısal homojenlik ve katkı-matris etkileşimi gibi faktörlerin EMI zayıflama kapasitesi üzerindeki rolü detaylı biçimde analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, gelecekteki EMI koruma uygulamalarında uygun takviye seçiminin belirlenmesi açısından önemli çıkarımlar sağlamaktadır.

Çizelge 4.17. Üçüncü grup FNK filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinlik değerleri

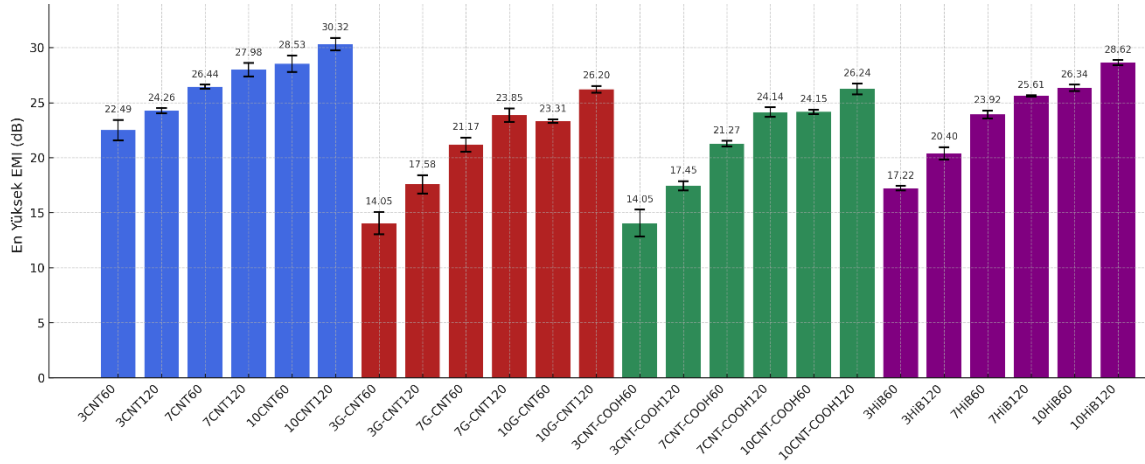
No	Numuneler	Ortalama EMI (dB)	En yüksek EMI (dB)	No	Numuneler	Ortalama EMI (dB)	En yüksek EMI (dB)
1	3CNT60	20.83	23.05	13	3G-CNT60	11.84	14.98
2	3CNT120	23.53	24.76	14	3G-CNT120	15.75	18.47
3	7CNT60	25.63	26.66	15	7G-CNT60	19.91	21.48
4	7CNT120	27.36	28.62	16	7G-CNT120	22.50	24.11
5	10CNT60	27.83	28.68	17	10G-CNT60	22.17	23.45
6	10CNT120	29.44	30.82	18	10G-CNT120	25.26	26.38
7	3CNT-COOH60	11.53	14.28	19	3HİB60	15.42	17.41
8	3CNT-COOH120	15.46	18.53	20	3HİB120	18.90	20.95
9	7CNT-COOH60	19.91	21.64	21	7HİB60	22.84	24.06
10	7CNT-COOH120	23.01	24.53	22	7HİB120	25.71	26.76
11	10CNT-COOH60	23.08	24.27	23	10HİB60	25.43	26.61
12	10CNT-COOH120	25.32	26.37	24	10HİB120	27.92	28.66

Çizelge 4.18’te sunulan veriler ışığında, film kalınlığından bağımsız olarak değerlendirildiğinde, en yüksek EMI koruma kapasitesine sahip numune 10CNT120 olarak ölçülmüştür. Bu film grubu, ortalama 30.82 dB’lik elektromanyetik koruyucu etkinlik (EMI-SE) değeri ile tüm gruplar arasında en yüksek performansı sergilemiştir. Bu grubu sırasıyla 10CNT60 (28.68 dB) ve 10HİB120 (28.66 dB) numuneleri takip etmiştir. Bu bulgular, hem yüksek CNT oranının hem de üretimde kullanılan çözelti hacminin EMI koruyuculuğu üzerinde önemli rol oynadığını açıkça göstermektedir.

Aynı üretim parametreleri temel alındığında, en iyi EMI koruma etkinliğini sunan film gruplarının, CNT takviyeli ve HİB takviyeli yapılar olduğu görülmüştür. Buna karşılık, CNT-COOH ve G-CNT nano takviyelerin kullanılmasıyla üretilen FNK filmler, beklenen düzeyde EMI koruma performansı sergileyememiştir. Bu durumun temelinde, söz konusu yapıların film matrisi içerisinde yeterli iletken ağlar oluşturamaması ve bu nedenle elektriksel taşıma mekanizmasının zayıf kalması yatmaktadır. Nitekim yalnızca grafen nanoparçacıkları kullanılarak üretilen 3GR, 7GR ve 10GR kodlu numunelerin, hem multimetre hem de iki problu cihazlarla yapılan ölçümlerinde oldukça yüksek direnç değerleri tespit edilmiştir. Bu yüksek direnç değerleri, bu filmlerin elektromanyetik dalgaları etkin biçimde zayıflatma kapasitesini sınırlandırmıştır. Şekil 4.24 ve 4.25’te FNK filmlerin ortalama ve en yüksek EMI koruma değerleri sütun grafikleri şeklinde karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4. 24. Üçüncü grup FNK filmlerin ortalama elektromanyetik koruyucu etkinlik değerlerinin karşılaştırılması



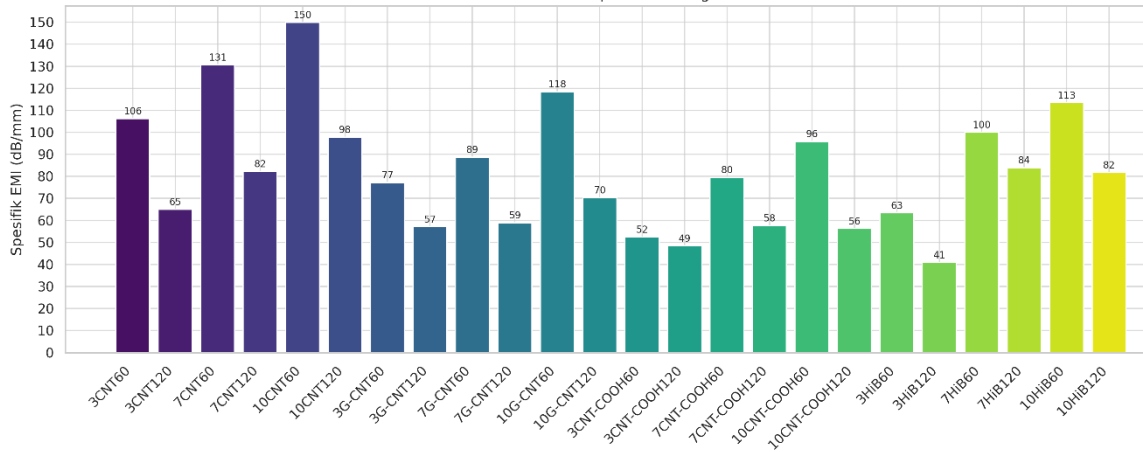
Şekil 4.25. Üçüncü grup FNK filmlerin en yüksek elektromanyetik koruyucu etkinlik değerlerinin karşılaştırılması

Film kalınlığı dikkate alındığı spesifik elektromanyetik koruyucu etkinlik (SSE) hesaplamalarında, EMI performans sıralamasında anlamlı değişiklikler gözlenmiştir (Çizelge 4.19). Bu değer, birim film kalınlığı başına düşen EMI koruma performansını temsil ettiğinden, özellikle ince film gruplarında çarpıcı sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 4.18. Üçüncü grup FNK filmlerin spesifik elektromanyetik koruyucu etkinlik değerleri

No	Numune	Kalınlık (mm)	En Yüksek EMI (dB)	Spesifik EMI (dB/mm)
1	3CNT60	0.217	23.05	106.22
2	3CNT120	0.394	25.61	65.00
3	7CNT60	0.204	26.66	130.69
4	7CNT120	0.348	28.62	82.24
5	10CNT60	0.191	28.64	149.95
6	10CNT120	0.315	30.82	97.84
7	3G-CNT60	0.194	14.98	77.22
8	3G-CNT120	0.323	18.47	57.18
9	7G-CNT60	0.242	21.48	88.76
10	7G-CNT120	0.415	24.11	58.10
11	10G-CNT60	0.198	23.45	118.43
12	10G-CNT120	0.375	26.38	70.35
13	3CNT-COOH60	0.272	14.28	52.50
14	3CNT-COOH120	0.382	18.53	48.51
15	7CNT-COOH60	0.272	21.64	79.56
16	7CNT-COOH120	0.421	24.34	57.81
17	10CNT-COOH60	0.255	24.27	95.18
18	10CNT-COOH120	0.466	26.37	56.59
19	3HiB60	0.271	17.18	63.39
20	3HiB120	0.392	20.95	53.44
21	7HiB60	0.225	23.85	106.00
22	7HiB120	0.367	26.99	73.54
23	10HiB60	0.234	26.54	113.42
24	10HiB120	0.351	28.70	81.77

Çizelge 4.19'daki verilerden yola çıkarak en yüksek SSE değeri, 155.27 dB/mm ile 10CNT60 numunesinde hesaplanmıştır. Bu numuneyi, sırasıyla 134.42 dB/mm ile 7CNT60 ve 134.07 dB/mm ile 10HİB60 grupları takip etmiştir. Şekil 4.26'da film kalınlığına bağlı spesifik EMI koruyucu etkinlik değerleri karşılaştırmalı sütun grafiği şeklinde verilmiştir.



Şekil 4.26. Üçüncü grup FNK filmlerin spesifik elektromanyetik koruyucu etkinlik değerlerinin karşılaştırılması

Grafikte sunulan spesifik EMI değerleri incelendiğinde, çözelti hacmi parametresinin elektromanyetik zayıflama performansı üzerinde belirleyici bir rol oynadığı görülmektedir. Genel eğilim, aynı katkı türü ve oranıyla üretilen numunelerde, 60 ml çözelti hacmi kullanılarak elde edilen FNK filmlerin, 120 ml hacimli karşılıklarına kıyasla daha yüksek spesifik EMI değerleri sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu durum, film kalınlığının artmasıyla birlikte elektromanyetik zayıflama değerlerinin mutlak olarak artsa da, kalınlık başına düşen zayıflama kapasitesinin azaldığını, dolayısıyla spesifik EMI performansında bir seyrleme meydana geldiğini göstermektedir. Özellikle CNT ve fonksiyonelleştirilmiş CNT içeren yapılarda bu fark daha belirgin olup, bu yapıların iletkenlik ağlarının kalınlıkla birlikte homojenliğini yitirme eğiliminde olduğu değerlendirilmektedir. Hibrit sistemlerde ise çözelti hacmine bağlı değişimin görece sınırlı kaldığı ve katkı dağılımının daha düzensiz olması nedeniyle hacim etkisinin daha az belirgin olduğu anlaşılmaktadır. Sonuç olarak, çözelti hacmi, katkı türü ile birlikte değerlendirilmesi gereken kritik bir üretim parametresi olup, spesifik EMI performansını optimize etmede dikkate alınması gereken temel bir değişkendir.

4.5.4. Dördüncü grup: Üç tabakalı CNT-BN-CNT yapılı FNK filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinliği hesaplamaları

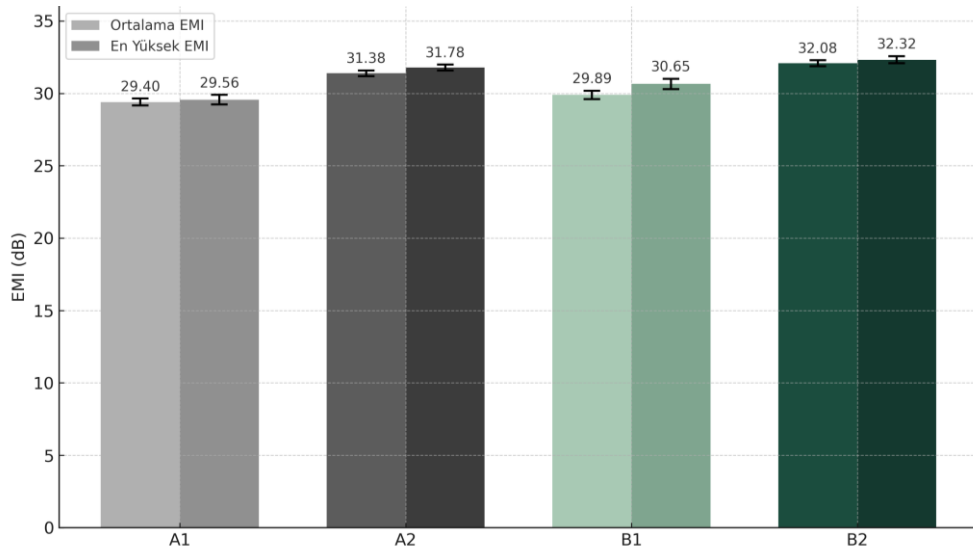
Elektromanyetik girişim (EMI) koruması ile termal iletkenlik performansını eş zamanlı olarak optimize etmek amacıyla tasarlanan CNT–BN–CNT tabanlı üç tabakalı sandviç yapıların elektromanyetik koruyucu etkinlik değerleri 8.200 GHz ile 12.400 GHz aralığındaki frekanslarda karakterize edilmiştir. Bu kapsamda, numunelerin elektromanyetik koruyucu etkinlik değerleri dB cinsinden ölçülmüştür. Elde edilen EM koruyucu etkinlik verileri, aynı zamanda numune kalınlıkları dikkate alınarak spesifik SSE değerleri de hesaplanmış ve böylece yapısal kalınlığın elektriksel performans üzerindeki etkisi ortaya konmuştur (Çizelge 4.20).

Çizelge 4.19. Dördüncü grup FNK filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinlik değerlerinin kalınlık faktörüne bağlı olarak karşılaştırılması

No	Numune	Kalınlık (mm)	Direnç (Ω)	İletkenlik (S/m)	Ortalama EMI (dB)	En Yüksek EMI (dB)	Spesifik EMI (dB/mm)
1	A1_1	0.222	15.2	6.58	27.64	28.90	130.18
2	A1_2	0.274	12.9	7.75	28.82	29.74	108.54
3	A1_3	0.263	13.3	7.52	28.62	29.56	112.40
4	A2_1	0.454	9.4	10.64	30.51	31.14	68.59
5	A2_2	0.425	9.8	10.20	30.55	31.23	73.48
6	A2_3	0.464	9.6	10.42	30.50	31.78	68.49
7	B1_1	0.301	10.6	6.85	28.10	29.04	96.48
8	B1_2	0.315	13.7	7.30	28.94	29.99	95.21
9	B1_3	0.311	9.1	7.14	29.66	30.65	98.55
10	B2_1	0.511	10.1	9.90	30.64	31.47	61.59
11	B2_2	0.548	9.2	10.87	31.08	32.46	59.23
12	B2_3	0.526	9.9	10.10	31.47	32.32	61.44

Çizelge 4.20’de yer alan üç tabakalı CNT–BN–CNT yapıdaki FNK filmlere ait ölçümler, hem en yüksek EMI koruma değerleri (dB), hem ortalama EMI koruma değerleri (dB), hem de kalınlık parametresini normalize eden spesifik EMI değerleri (dB/mm) dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Tüm gruplar genelinde, en yüksek EMI koruyucu etkinlik değeri 32.46 dB ile B2_2 numunesinde elde edilmiştir. Bu değeri 32.32 dB ile B2_3, 31.78 dB ile A2_3 ve 31.74 dB ile B2_1 numuneleri takip etmektedir. Bu sonuçlar, B2 serisinin diğer gruplara kıyasla genel olarak daha yüksek EMI performansı sunduğunu göstermektedir.

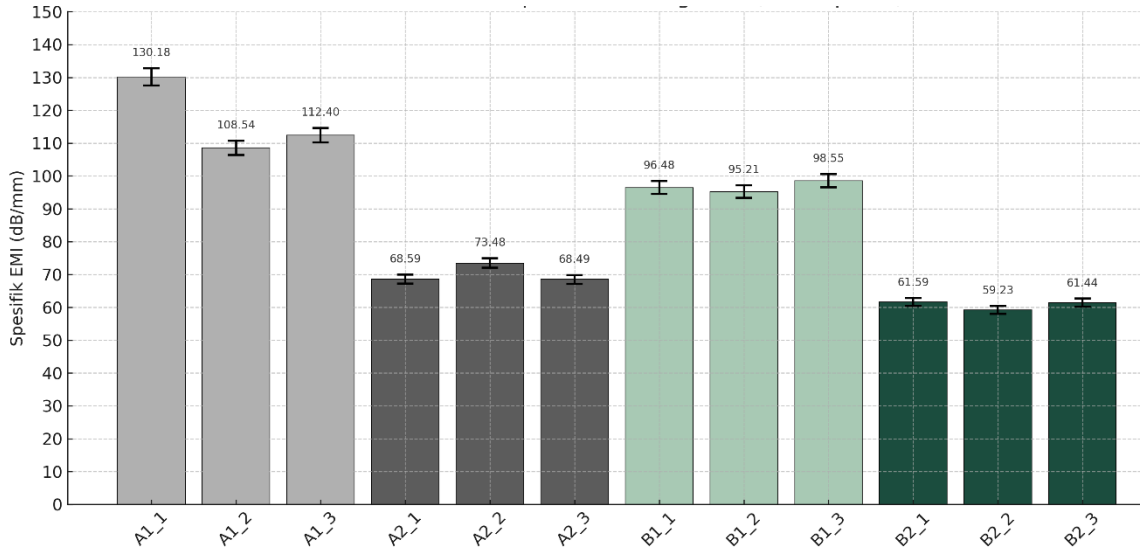
Ortalama EMI değerlerine bakıldığında ise, en yüksek değer 31.47 dB ile B2_1 numunesinde ölçülmüştür. Bunu 31.47 dB ile yine B2_2, 31.05 dB ile A2_3 ve 30.51 dB ile A2_1 numuneleri izlemiştir. Bu bulgular, B2 ve A2 serilerinde hem katman yapısının hem de parametrelerinin EMI performansı üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.27. Dördüncü grup FNK filmlerin elektromanyetik koruyucu etkinlik değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.27’de sunulan veriler, ortalama EMI değerleri ile maksimum EMI koruyucu etkinlik değerlerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Üretim parametrelerinin optimize edilmesi sonucunda, CNT takviyesiyle elde edilen FNK filmlerde hem film kalınlıklarının hem de elektriksel direnç değerlerinin düşük standart sapmalar göstermesi, ortalama ve maksimum EMI değerleri arasındaki farkın oldukça sınırlı kalmasına neden olmuştur. Bu durum, CNT takviyeli FNK filmlerin yapısal olarak yüksek bir homojenliğe sahip olduğunu ve elektromanyetik koruyucu performans açısından dar tolerans aralıklarında kararlı sonuçlar sunduğunu göstermektedir. Buna karşılık, hibrit CNT/GR katkılı FNK filmlerde benzer bir stabilite düzeyi sağlanamamıştır. Bu farklılık, grafenin dispersiyonundaki zorluklardan kaynaklanmakta olup, homojen dağılımın sağlanamaması film boyunca EMI performansında daha geniş varyasyonlara neden olmuştur.

Çizelge 4.20’deki verilerden yola çıkılarak Şekil 4.28’deki grafikte sunulan numunelere ait spesifik EMI değerleri, her bir film grubunun EMI koruyucu etkinlik performansını film kalınlığına normalize edilmiş şekilde karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Dikey ekseninde spesifik EMI değeri (dB/mm), yatay ekseninde ise her bir numune grubu (A1, A2, B1, B2) ve bunların üçer tekrarından oluşan alt gruplar yer almaktadır. Hata çubukları, ölçümlere ait standart sapmaları temsil etmektedir.



Şekil 4.28. Dördüncü grup FNK filmlerin spesifik elektromanyetik koruyucu etkinlik değerlerinin karşılaştırılması

Spesifik EMI değerleri karşılaştırmalı sütun grafiği Şekil 4.28’de görselleştirilmiştir. Spesifik EMI değerleri incelendiğinde tablo anlamlı şekilde değişmektedir. Kalınlık faktörü normalize edilmesiyle Grafik incelendiğinde, 60 ml çözelti hacmi kullanılarak üretilen A1 grubu ortalama olarak en yüksek spesifik EMI değerlerine sahiptir. Özellikle A1_1 numunesi, 130.18 dB/mm ile tüm numuneler arasında en üstün performansı sergilemiştir. A1 grubu genel olarak düşük kalınlıkta yüksek elektromanyetik koruma göstermekte olup, düşük standart sapma değerleriyle birlikte bu performansın oldukça kararlı olduğunu ortaya koymaktadır.

60 ml çözelti hacmi kullanılarak hazırlanan B1 grubu numuneleri, 96.75 dB/mm ortalama spesifik EMI koruma değeri ile, A1 grubunun ardından ikinci en yüksek performansı sergilemiştir. Her ne kadar 120 ml hacimle üretilen FNK filmler mutlak EMI koruyucu etkinlik açısından daha yüksek değerlere sahip olsa da, film kalınlığının dikkate alındığı spesifik EMI hesaplamalarında, 60 ml çözelti hacmi ile hazırlanan numunelerin birim kalınlık başına daha etkili bir elektromanyetik zayıflatma sağladığı görülmektedir. Bu durum, daha ince ve homojen yapıda üretilen FNK filmlerin, kalın filmlere kıyasla daha verimli bir EMI performansı sergileyebileceğini ortaya koymaktadır.

Kalınlık parametresinin dikkate alındığı spesifik elektromanyetik koruyucu etkinlik (SSE) hesaplamalarında, EMI performans sıralamasında anlamlı değişiklikler gözlenmiştir. Bu değer, film kalınlığı başına düşen EMI koruma performansını temsil ettiğinden, özellikle ince film gruplarında daha çarpıcı sonuçlar elde edilmiştir.

Kalınlık ve elektriksel direnç parametreleri EMI koruyucu etkinliği üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Özellikle kalınlıkla normalize edilen spesifik EMI değerleri, film geometrisinin EMI performansını anlamada kritik öneme sahiptir. A1_1 örneğinde olduğu gibi, düşük kalınlık (0.222 mm) ve orta düzey direnç (15.2 Ω) kombinasyonu, yüksek spesifik EMI değerine katkı sağlamaktadır. Bu durum, elektromanyetik koruyuculuğun sadece toplam zayıflama değil, aynı zamanda malzeme verimliliği açısından da değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Elektriksel direnç açısından incelendiğinde, en düşük direnç değeri (9.4 Ω) ile A2_1 ve A2_3 numunelerinde elde edilmiştir. Bu numuneler yüksek ortalama EMI değerleri ile dikkat çekmektedir. Bu, CNT içeriğinin homojen dağılımının ve yapısal sürekliliğin, elektriksel taşıma yollarını etkinleştirdiğini ve böylece EMI koruma performansını artırdığını göstermektedir. Öte yandan, daha yüksek direnç değerlerine sahip (örneğin A1_1: 15.2 Ω) numuneler, kalınlıkları düşük olduğu sürece spesifik EMI açısından avantaj sağlayabilmektedir. Bu da kalınlık ve direnç faktörlerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Sonuçlar genel olarak, üç katmanlı CNT–BN–CNT yapıların EMI koruyuculuk performansının, hem toplam kalınlık, hem CNT-BN dağılımı, hem de elektriksel iletkenliğe bağlı olarak anlamlı biçimde değiştiğini göstermektedir. Kalınlığı düşük, iletkenliği yüksek ve yapısal homojenliği sağlanmış numuneler, spesifik EMI koruyucu etkinlik performansı açısından ön plana çıkmaktadır. Bu nedenle, uygulama alanına bağlı olarak toplam EMI değeri yerine, spesifik EMI değerleri üzerinden değerlendirme yapılması, malzeme etkinliği ve maliyet optimizasyonu açısından daha rasyonel bir yaklaşım olacaktır.

4.5.5. Beşinci grup: Cam elyaf ve karbon fiber takviyeli polimer kompozit yapıların elektromanyetik koruyucu etkinliği hesaplamaları

Tezin amacını oluşturan, vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretilen 3 tabakalı CNT-BN-CNT filmlerinin cam elyaf ve karbon fiber kumaşlar arasına alınarak el yatırma (hand lay-up) yöntemiyle üretilmesi sonucunda elde edilen cam elyaf ve karbon fiber takviyeli polimer kompozit yapıların elektromanyetik koruyucu etkinlik değerleri yine 8.200 GHz ile 12.400 GHz aralığındaki frekanslarda ölçülmüştür (Çizelge 4.21).

Çizelge 4.20. Karbon fiber ve cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin ortalama, en yüksek ve spesifik elektromanyetik korucu etkinlik değerleri

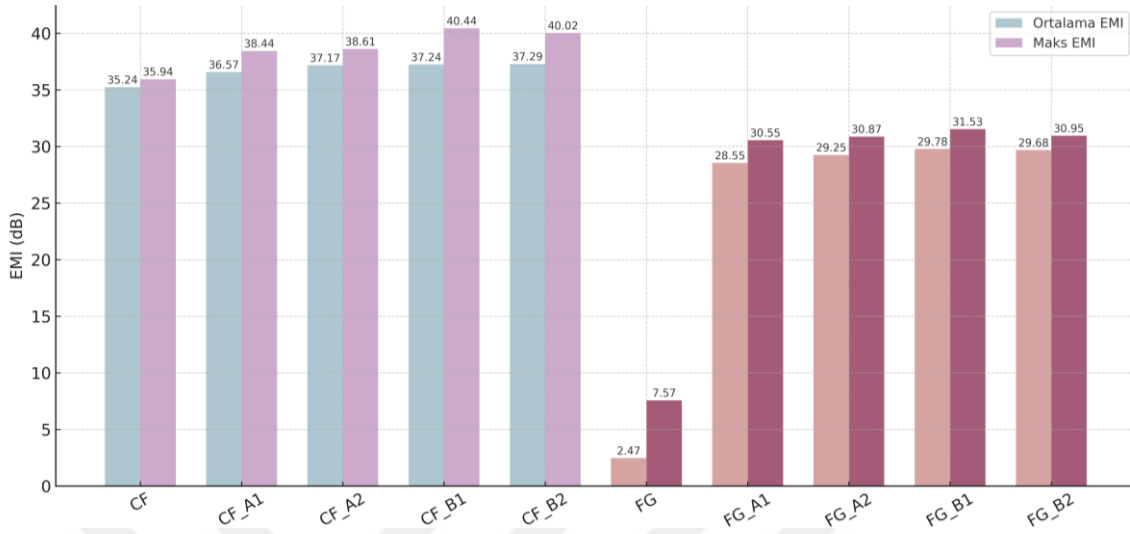
Numune	Kalınlık (mm)	Ortalama EMI (dB)	En Yüksek EMI (dB)	Spesifik EMI (dB/mm)
Karbon Fiber	0.793	35.24	35.94	45.32
CF_A1	1.066	36.57	38.44	36.06
CF_A2	1.301	37.17	38.61	28.56
CF_B1	1.023	37.24	40.44	39.53
CF_B2	1.075	37.29	40.02	37.23
Cam Fiber	0.965	2.47	7.57	7.84
FG_A1	1.464	28.55	30.55	20.87
FG_A2	1.465	29.25	30.87	21.07
FG_B1	1.366	29.78	31.53	23.08
FG_B2	1.575	29.68	30.95	19.65

Çizelgedeki veriler, aynı üç tabakalı FNK film yapılarının farklı yüzey takviyeleri (karbon fiber ve cam elyaf) ile birlikte kullanılması durumunda EMI koruma performansında belirgin farklar yarattığını göstermektedir. Karbon fiber (CF) takviyeli kompozitler, tüm metriklerde cam elyaf (FG) takviyeli kompozitlere kıyasla daha yüksek ortalama, en yüksek ve spesifik EMI koruyucu etkinliği değerlerine sahiptir.

Cam elyaf kumaşlar, erimiş silika (SiO₂) esaslı camın mikro boyutta lifler hâline getirilerek dokunmasıyla elde edilen ve yüksek mekanik dayanım sergileyen bir kompozit takviye malzemesidir. Düşük yoğunlukları, düşük termal genleşme katsayıları ve elektriksel iletkenliklerinin yok denecek düzeyde olması, bu malzemeleri özellikle hafiflik ve yalıtım gerektiren uygulamalar için uygun hâle getirmektedir. Ayrıca, sıcaklık ve kimyasal dayanım açısından da üstün performans sunmaları, cam elyaf kumaşların endüstriyel kullanım alanlarını oldukça genişletmiştir. Karbon fiber kumaşlarla karşılaştırıldığında, cam elyaf kumaşlar elektromanyetik dalgalara karşı zayıf bir bariyer oluşturur ve bu nedenle elektromanyetik koruyucu etkinlik (EMI SE) açısından aktif bir rol oynamaz. Ancak, mekanik mukavemetin ve çevresel dayanımın ön planda olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir.

Bu bağlamda, beşinci numune grubu kapsamında karbon fiber kumaş ile takviye edilmiş polimer kompozit yapıların yanında, alternatif bir referans grup olarak cam elyaf kumaş takviyeli kompozitler de üretilmiştir. Bu referans numune grubunun oluşturulmasındaki temel amaç, cam elyaf kumaşlar içerisine gömülen üç tabakalı CNT–BN–CNT yapının elektromanyetik koruyucu etkinliğini bireysel olarak değerlendirerek, karbon fiber takviyeli yapıların performansları ile karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirmektir (Şekil 4.29). Böylece, kumaş takviyesinden bağımsız olarak sandviç

yapının EMI performansına olan katkısı daha doğru ve izole bir şekilde analiz edilebilmiştir.



Şekil 4.29. Karbon fiber ve cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin ortalama ve en yüksek elektromanyetik koruyucu etkinlik değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 4.29'daki grafiğe göre karbon fiber kumaş ile takviye edilen numuneler, tüm ölçütlerde cam elyaf takviyeli numunelere göre önemli ölçüde daha yüksek EMI koruyucu etkinlik değerleri sergilemiştir. Ortalama EMI değerleri 35.24–37.42 dB aralığında, en yüksek EMI değerleri ise 35.94–40.42 dB arasında değişmektedir. Özellikle CF_B1 numunesi, 37.24 dB ortalama ve 40.44 dB maksimum EMI değeri ile en yüksek performansı göstermektedir. Bu sonuç, karbon fiber kumaşın elektriksel iletkenliği yüksek yapısal özellikleri sayesinde, CNT–BN–CNT sandviç yapı ile sinerjik bir etki yarattığını göstermektedir. Ayrıca, kalınlık değerlerindeki artışa rağmen EMI performansındaki düşüş gözlenmemekte, bu da yapısal bütünlüğün sürdüğünü göstermektedir.

Cam elyaf kumaş ile takviye edilmiş numuneler, elektriksel olarak yalıtkan özellikleri nedeniyle, önemli ölçüde daha düşük EMI koruyucu etkinlik değerleri sunmuştur. Saf FG'nin ortalama ve en yüksek EMI değerleri sırasıyla 2.47 ve 7.57 dB olarak ölçülmüştür. Cam elyaf kumaşlar arasına alınan numunelerin ortalama EMI değerleri 28.55–29.78 dB arasında iken, en yüksek EMI değerleri 30.55–31.53 dB arasında hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, cam elyaf kumaşın kendisinin elektromanyetik dalgaları zayıflatma kabiliyetinin sınırlı olduğunu, EMI performansının sadece gömülü CNT–BN–CNT sandviç yapıya bağlı olduğunu göstermektedir.

Kalınlık faktörünü normalize eden spesifik EMI değerleri incelendiğinde de benzer bir eğilim görülmektedir. Saf CF (45.32 dB/mm) ve CF_B1 (39.53 dB/mm) numuneleri en yüksek özgül EMI etkinliğini sunarken, cam elyaf takviyeli kompozitlerde bu değer en fazla 23.08 dB (FG_B1) seviyesinde kalmıştır. Bu, cam elyafın hafifliği ve maliyet avantajına rağmen, EMI koruyuculuğu bakımından karbon fiber takviyeli yapılara göre daha düşük performans sergilediğini göstermektedir.

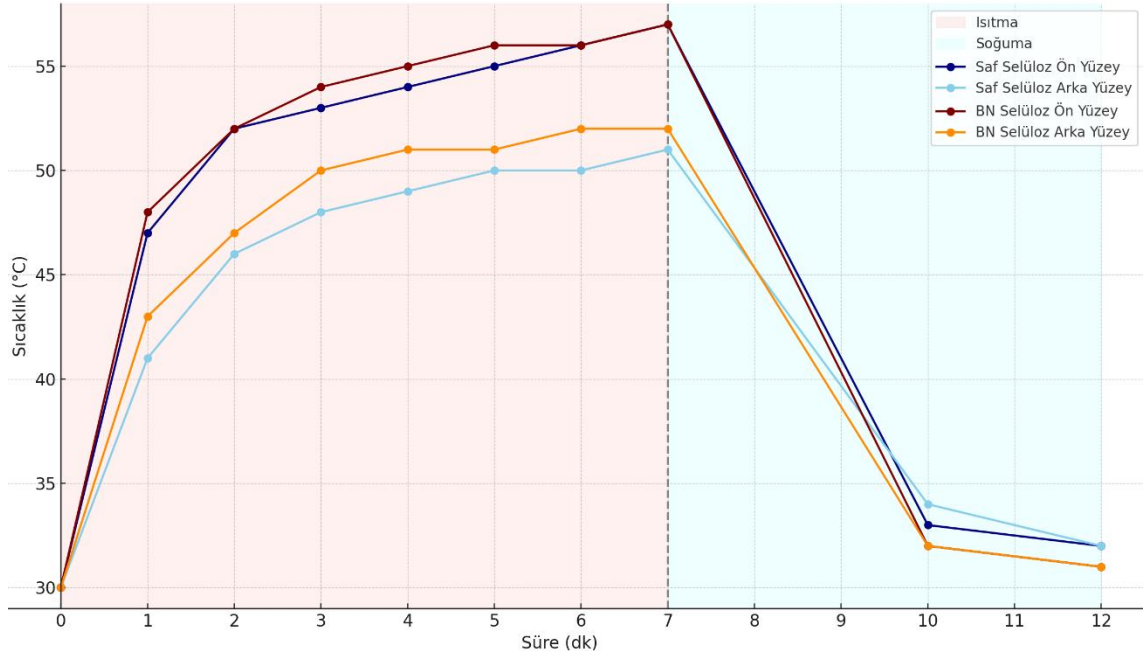
Karbon fiberin yüksek elektriksel iletkenliğe sahip lifli yapısı, CNT–BN–CNT film ile birlikte kullanıldığında iletim ve yansıma temelli EMI koruma mekanizmalarını etkinleştirmektedir. Bu durum, çok katmanlı yapı içerisinde elektriksel sürekliliği artırarak, elektromanyetik dalgaların daha etkin biçimde absorbe edilmesini veya yansıtılmasını sağlar. Cam elyaf ise esas olarak dielektrik özellik taşıyan ve elektriksel iletkenliği düşük olan bir yapıya sahiptir. Bu nedenle CNT–BN–CNT filmle birlikte kullanıldığında sadece absorpsiyon bazlı EMI koruma mekanizmasına katkı sağlar. Bu durum, toplam EMI koruma kapasitesini sınırlamaktadır. Ayrıca, karbon fiber dokusunun FNK filmle daha sıkı mekanik temas kurabilmesi, film yapısındaki nano yapılarla daha etkin arayüz oluşturmaya katkı sağlamaktadır. Bu da iletken yol ağlarının kopmadan süreklilik göstermesini ve dolayısıyla EMI koruma verimliliğinin artmasını sağlar.

4.6. Saf Selüloz ve BN Nano Takviyeli Filmlerin Termal İletkenlik Verileri

Yaklaşık 200 mikrometre kalınlıktaki saf selüloz ve bor nitrür (BN) katkılı filmlerin termal iletkenlik özelliklerini karşılaştırmalı olarak değerlendirebilmek amacıyla laboratuvar ortamında hazırlanan deney düzeneğinden elde edilen veriler Çizelge 4.22’de sunulmuş ve Şekil 4.30’da grafik haline getirilmiştir.

Çizelge 4.21. Saf selüloz ve BN filmlerin iki yüzeylerinin ısınma ve soğuma değerleri

Süre (dk)	SAF SELÜLOZ FİLM		BN SELÜLOZ FİLM	
	Ön Yüzey	Arka Yüzey	Ön Yüzey	Arka Yüzey
0	30°C	30°C	30°C	30°C
1	47°C	41°C	48°C	43°C
2	52°C	46°C	52°C	47°C
3	53°C	48°C	54°C	50°C
4	54°C	49°C	55°C	51°C
5	55°C	50°C	56°C	51°C
6	56°C	50°C	56°C	52°C
7	57°C	51°C	57°C	52°C
...				
10	33°C	34°C	32°C	32°C
12	32°C	32°C	31°C	31°C



Şekil 4.30. Saf selüloz ve BN filmlerin her iki yüzeylerinin zamana bağlı ısınma ve soğuma değerleri

Çizelge 4.18 ve Şekil 4.30'daki saf selüloz ve bor nitrür (BN) katkılı selüloz filmlerin hem ön hem de arka yüzeylerine ait sıcaklık değişimleri 12 dakikalık bir süre boyunca izlenmiştir. Grafik, 0–7. dakikalar arasında bir ısınma fazı ve ardından 7–12. dakikalar arasında bir soğuma fazını kapsamaktadır. Bu sıcaklık verilerinden yola çıkarak, her iki filmin termal iletkenlik katsayıları yaklaşık olarak hesaplanabilir.

Termal iletkenlik (k) hesaplaması için Denklem 22'deki Fourier'in ısı iletim yasası temel alınır:

$$q = -k \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (22)$$

Ancak doğrudan bu yasa yerine, literatürde yaygın olarak kullanılan basitleştirilmiş deneysel bir yaklaşım tercih edilmiştir. Özellikle ince film yapılarında, ön ve arka yüzey sıcaklık farklarının zamanla değişimi üzerinden etkin termal iletkenlik hakkında karşılaştırmalı bilgi edinilebilir.

Burada:

Isı kaynağı: 40 W'lık bir lamba

Film kalınlığı: Yaklaşık $200 \mu m = 0.0002 m$

Deney süresi: Isınma 0–7 dk, soğuma 7–12 dk

Isı iletiminin yalnızca tek ekseninde (ön → arka yüzey) gerçekleştiği kabul edilmiştir.

Literatürde ince film analizlerinde sıkça kullanılan ampirik yaklaşıma göre, arka yüzeye ulaşan maksimum sıcaklık seviyesi, film içindeki ısı geçiş etkinliğinin bir göstergesidir. Bu nedenle 7. dakikada ön ve arka yüzeyler arası sıcaklık farkı dikkate alınarak termal iletkenlik kıyaslaması yapılabilir.

Saf Selüloz Film:

- Ön yüzey: 57 °C
- Arka yüzey: 51 °C
- $\Delta T = 6$ °C
- Kalınlık $L=0.0002$ m

BN Katkılı Selüloz Film:

- Ön yüzey: 57 °C
- Arka yüzey: 52 °C
- $\Delta T = 5$ °C
- Kalınlık $L=0.0002$ m

$$\frac{k_{BN}}{k_{saf}} = \frac{1}{\Delta T_{BN}} / \frac{1}{\Delta T_{saf}} = \frac{6}{5} = 1,2$$

Yukarıdaki verilere göre, bor nitrür (BN) katkılı selüloz filmin termal iletkenliğinde yaklaşık %20 oranında bir iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir. Isınma sürecinde arka yüzeyin daha yüksek sıcaklıklara ulaşması, BN partiküllerinin film içinde ısı iletimini hızlandırıcı bir rol oynadığını göstermektedir. BN, yapısal olarak yüksek termal iletkenliğe sahip ve elektriksel olarak yalıtkan bir nanomalzeme olmasıyla bilinir. Bu nedenle selüloz matrise dahil edilmesi, ısıyı daha etkin şekilde arka yüzeye iletebilmesini sağlamıştır.

Bu sonuç, FNK sistemlerinde yalnızca elektriksel değil, aynı zamanda termal yönetim açısından da BN gibi katkıların önemini vurgulamakta ve çok işlevli (multi-functional) kompozit malzeme geliştirme çalışmalarında dikkate değer bir alternatif olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, EM dalgalara karşı koruma sağlayan, hafif, esnek ve çok fonksiyonlu nanokompozit (FNK) filmlerin ve bu filmlerin kompozit yapılarla bütünleşmiş formlarının tasarımı, üretimi ve çok yönlü değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, farklı iletken ve yarı iletken nano takviyeler (CNT, GR, G-CNT, CNT-COOH, HİB ve BN) farklı yüzde ağırlık (wt%) ve çözelti hacimlerinde vakum filtrasyon yöntemi ile üretilmiş, film kalınlığı haddeleme işlemi ile kontrol edilerek elektriksel iletkenlik, elektromanyetik koruyucu etkinlik (SE) ve spesifik EMI performansı (SE/t) arasındaki ilişkiler kapsamlı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, nano takviye türü, dolgu oranı, film kalınlığı ve tabakalı mimarinin birlikte optimize edilmesi ile yüksek ve kararlı EMI koruması sağlanabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, CNT–BN–CNT sandviç yapısının empedans uyumu, çoklu saçılma ve absorpsiyon mekanizmaları üzerinde sağladığı sinerjistik etkiler, geliştirilen malzemelerin hem bağımsız film olarak hem de karbon fiberli veya cam elyafı kompozitlerde etkin şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Bu karşılaştırmalar neticesinde elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır.

1) Çalışmanın kapsamı ve özgün katkısı:

Bu tezde, EM dalgalara karşı koruyucu etkinliği artırılmış, hafif ve esnek FNK film ve kompozit yapıların tasarımı, üretimi ve çok yönlü değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın özgün yönü;

(i) farklı iletken/yarı iletken nano takviyelerin (CNT, GR, CNT-COOH, hibrit CNT/GR ve BN) aynı metodoloji altında sistematik karşılaştırılması,

(ii) yüzde ağırlık (wt%) ve çözelti hacmi (ml) parametrelerinin eşzamanlı taranması,

(iii) film kalınlığının haddeleme ile kontrol edilerek EMI koruyucu etkinlik (SE) ve spesifik EMI performansı (SE/t) üzerindeki etkilerinin ayrıştırılması

(iv) elde edilen FNK'ların hem karbon fiberli (CFK) hem de cam elyafı (GFK) kompozitlerle bütünleştirilerek uygulamaya dönük performansın sınanmasıdır.

2) Malzeme tasarımı ve üretim-parametre ilişkileri

- Vakum filtrasyon ile üretilen FNK filmler, 3, 7 ve 10 wt% nano takviye oranları ve 30–60–120 ml çözelti hacimleri için üretildi; böylece perkolasyon davranışı ile kalınlık/yoğunluk değişimleri sistematik incelendi.

- Haddeme ile kalınlık düşürülerek (özellikle 50 ml ve %10 sabitlenmiş koşullarda) hedef kalınlığa yaklaşılmış, böylece iletken ağıın sürekliliği bozulmadan SE/t'nin optimize edilebildiği gösterilmiştir.

- Sandviç mimaride CNT–BN–CNT tabakalı tasarım, elektromanyetik empedans uyumu ve çoklu saçılmayı güçlendirip absorpsiyona dayalı zayıflatmayı artıran bir yaklaşım olarak doğrulanmıştır.

3) Yapısal ve morfolojik karakterizasyonun bulguları:

- XRD desenlerinde BN içeren filmlerde hegzagonal BN'nin karakteristik düzlemleri gözlenmiş; selüloz matrisi ile etkileşim kaynaklı pik genişlemeleri ve yoğunluk değişimleri, BN'nin tabakalı yapısının korunduğunu ancak matrisle gömülü halde dağıldığını göstermiştir.

- (BN-selüloz) ve (CNT/GR-selüloz) sistemlerinde görülen pik şiddeti ve genişliklerindeki farklılıklar, dolgu türüne bağlı kristallenme derecesi ve tabakalar arası mesafe varyasyonlarının iletim/absorpsiyon mekanizmalarına zemin hazırladığını ortaya koymuştur.

- SEM/Raman'dan elde edilen nitel bulgular ile hibrit CNT/GR ağlarının, tek başına CNT'ye kıyasla daha heterojen fakat daha etkili bir “çok ölçekli iletim yolu + arayüz kutuplanması” kombinasyonu sunduğu teyit edilmiştir.

4) Elektriksel iletkenlik–EMI koruyucu etkinlik ilişkisi

- Elde edilen sonuçlar, en yüksek iletkenliğin her zaman en yüksek SE'ye karşılık gelmediğini, iletkenlik dışında arayüz kutuplanması, kusur/doping kaynaklı dipol oluşumu ve çoklu saçılma katkılarının belirleyici olduğunu göstermiştir.

- CNT grubunun iletkenliği daha yüksek olsa dahi, hibrit CNT/GR filmlerin SE değerleri bazı koşullarda CNT'yi hafifçe aşmıştır; bu fark, grafenin tabakalı morfolojisinin CNT ağına eklediği yüzey alanı ile açıklanmaktadır.

- Spesifik performans metriği (SE/t) incelendiğinde, haddeme sonrası kalınlık azalsa dahi iletken ağıın sürekliliği korunduğunda SE'deki düşüşün sınırlı kaldığı; buna karşılık SE/t'nin belirgin şekilde iyileştiği görülmüştür.

5) Yüzde ağırlık (wt%) ve çözelti hacmi (ml) etkileri

- 3→7→10 wt% artışı ile perkolasyon ağının olgunlaştığı ve SE'nin doygunluğa ilerlediği gözlenmiştir; 7–10 wt% aralığı, iletim yollarının sürekli hale geldiği ve arayüz kutuplanması katkısının en verimli çalıştığı bölgeyi temsil etmektedir.

- Hacim parametresi film kalınlığını ve yoğunluk dağılımını etkileyerek empedans uyumu üzerinde rol oynamıştır. Deneysel veri setimizde, 60 ml çözelti hacmi ile hazırlanan %10 hibrit (CNT/GR) filmler, ortalama SE bakımından en yüksek performansı sunarken, saf CNT numuneleri bunu çok küçük bir farkla takip etmiştir.

- 120 ml'de kalınlık artışına rağmen empedans uyumunun bozulmasına bağlı yansıma ağırlıklı davranış artmış; 30 ml'de ise yetersiz ağ sürekliliği ve daha düşük absorpsiyon katkısı nedeniyle SE limitlenmiştir.

6) Kalınlık ve haddeme optimizasyonu

- Haddeme, SE üzerinde yalnızca geometrik bir azaltım etkisi yaratmamış, aynı zamanda yüzey pürüzlülüğü ve tabaka temasını iyileştirerek çoklu yansıma/absorpsiyonu artıran bir mikro-yapısal düzenleme işlevi görmüştür.

- İlgili grafikleri temel alan analizde, hedef kalınlığa doğru inceltildikçe SE/t ve malzeme verimliliğinin (koruma başına kütle/kalınlık) anlamlı biçimde yükseldiği; ancak aşırı inceltmede perkolasyon yollarının zedelenmesi riskinin ortaya çıktığı gösterilmiştir. Bu nedenle haddeme parametreleri, “iletken ağ bütünlüğünü koruyacak” eşik değerlerin üzerinde tutulmalıdır.

7) BN katkısının ısı/EM sinerjisi

- Isınma–soğuma deneylerinden türetilen grafikler, BN takviyesinin ısı yayılımı hızlandırdığını; ısınma evresinde ön–arka yüzey sıcaklık farkının daha hızlı dengelendiğini göstermiştir.

- BN'nin ısı iletkenlikte sağladığı bu iyileşme, sürekli test koşullarında sıcaklık gradyanlarını azaltarak iletken ağların termal kararlılığını desteklemekte ve uzun süreli EMI performansının stabil kalmasına katkı vermektedir.

- CNT–BN–CNT mimarisinde BN ara tabakası, hem ısı yönetimi iyileştirmekte hem de dalga–malzeme etkileşimini derinleştirerek absorpsiyon bileşenini artırmaktadır.

8) CNT–BN–CNT tabakalı tasarım ve kompozit entegrasyonu

- Tabakalı mimari, empedans uyumunu geliştirerek giriş yüzeyindeki ani yansımayı sınırlamış; dalganın malzeme içinde daha uzun yol katedip çoklu saçılma ve arayüz kutuplanması mekanizmalarını tetiklemesine olanak tanımıştır.

- CFK ile bütünleştirildiğinde, mevcut yüksek iletken iskelet sayesinde yansıma bileşeni zaten güçlüdür; FNK ara tabakası absorpsiyonu artırarak toplam zayıflatmayı yükseltmiştir.

- GFK ile bütünleştirildiğinde ise elektromanyetik koruma esasen FNK tabakasından sağlanmış; bu durum, FNK'nın tek başına hafif–esnek kalkan katmanı olarak kullanılabilirliğini kanıtlamıştır.

9) Mekanizma yorumu (çok ölçekli kayıp süreçleri)

- İletim kayıpları: Perkolasyonla oluşan CNT/CNT-GR ağları üzerinden Joule ısınması kaynaklı ohmik kayıplar.

- Çoklu saçılma: Hibrit ve tabakalı mimarinin getirdiği pürüzlü/çok tabakalı yol, iç saçılmayı artırarak dalga enerjisinin malzeme içinde tüketilmesini hızlandırır.

- Empedans uyumu: Özellikle tabakalı CNT–BN–CNT tasarımında giriş empedansının serbest uzaya yaklaşması ile dalganın malzemeye girişi kolaylaşır ve absorpsiyon ağırlıklı zayıflatma yükselir.

10) Tekrarlanabilirlik, belirsizlik ve istatistiksel güven

- Her film tipinden en az üç tekrar üretilerek ortalama \pm standart sapma değerleri raporlanmıştır; sapmalar, üretim sırasında dispersiyon/filtrasyon koşullarına duyarlılığı yansıtmaktadır.

- Standart sapmaların (grafiklerde) dar olduğu numunelerde üretim tekrarlanabilirliği yüksektir; hibrit CNT/GR grubunda homojen dispersiyon sağlandığında hem SE hem de SE/t'nin güven aralıkları daralmaktadır.

- Çevresel koşullar (nem/sıcaklık) ve frekans aralığı gibi dış değişkenlere duyarlılığın, uzun dönem kararlılık testleriyle desteklenmesi önerilir.

11) Uygulama potansiyeli ve mühendislik çıktıları

- Geliştirilen FNK filmler ve bunların kompozit entegrasyonları; hafiflik–esneklik–yüksek koruma üçlüsünü aynı anda sağlayarak taşınabilir elektronikler, kablolama/konektör kalkanları, insansız sistemler ve otomotiv/İHA platformları için ölçeklenebilir çözümler sunmaktadır.

- Haddeleme ile kalınlık ve SE/t kontrolü, uygulama gereksinimine göre “ince ama etkili” kalkan tasarımını mümkün kılar.

- CFK/GFK ile bütünleşmiş yapıların, mevcut kompozit üretim hatlarına ek proses gereksinimi oluşturmadan entegre edilebilmesi, teknolojiye geçiş maliyetini düşürmektedir.

Genel değerlendirme ve nihai çıkarımlar:

- Hibrit CNT/GR takviyesi, yalnızca iletkenliği değil; arayüz kutuplanması ve çoklu saçılmayı güçlendirerek absorpsiyon ağırlıklı zayıflatmayı artırmış, bazı koşullarda saf CNT’yi SE açısından sınırlı da olsa geçmiştir.

- %10 wt ve 60 ml koşulu, deneysel veri setimizde “SE ve SE/t arasında dengeli optimum” olarak öne çıkmıştır; bunu saf CNT’nin yakın performansı izlemiştir.

- BN katkısı ve CNT–BN–CNT tabakalı mimari, empedans uyumu ile ısı yönetimi aynı anda iyileştirerek uzun süreli ve kararlı EMI korumasına katkı vermiştir.

- Sonuçlar, malzeme seçimi (CNT/GR, BN), tabakalı yapı, proses (haddeleme) ve geometrinin (kalınlık) birlikte optimize edilmesiyle, hafif–esnek kalkanlarda yüksek ve istikrarlı bir EMI performansının mümkün olduğunu göstermektedir.

5.2. Öneriler

1. Araştırma ve Bilimsel Gelişim Odaklı Öneriler:

Geniş bant frekans karakterizasyonu: EMI koruyucu etkinlik (SE) ölçümleri daha geniş frekans aralıklarında (MHz–GHz spektrumunun tamamında) ve farklı polarizasyon modlarında gerçekleştirilerek malzemenin frekans bağımlı davranışı detaylandırılmalıdır.

Çevresel koşulların etkisi: Nem, sıcaklık döngüleri, UV maruziyeti gibi dış etkenlerin uzun süreli performansa etkileri incelenerek malzemenin ömür eğrileri (lifetime performance curves) oluşturulmalıdır.

Mekanik yükleme altında performans: Esneme, bükülme ve darbe etkilerinin EMI performansına yansımaları test edilerek özellikle esnek elektronikler ve giyilebilir teknolojiler için veri tabanı oluşturulmalıdır.

Nano takviye kombinasyon optimizasyonu: CNT, grafen, BN ve diğer 2D malzemelerin farklı oranlarda hibritleştirilmesiyle empedans uyumu–iletkenlik–absorpsiyon üçgeninde maksimum performansı verecek kompozisyonların belirlenmesi için çok değişkenli optimizasyon çalışmaları yapılmalıdır.

Tabakalı mimari modelleme: CNT–BN–CNT ve benzeri tabakalı yapılarda elektromanyetik dalga yayılımı ve absorpsiyon mekanizmalarının sayısal modelleme (FDTD, FEM) ile simüle edilmesi, deneysel bulgularla doğrulanarak tasarım süresini kısaltabilir.

2. Uygulama ve Sanayi Odaklı Öneriler:

Endüstriyel ölçek üretim: Vakum filtrasyon ve haddeleme yöntemlerinin büyütülebilir üretim proseslerine uyarlanması ile büyük boyutlu, homojen FNK filmler üretilebilir.

Hafif ve modüler kalkan sistemleri: Geliştirilen FNK tabakalarının, karbon fiber veya cam elyaf kompozitlerle modüler paneller şeklinde entegre edilmesi; otomotiv, havacılık, İHA ve savunma sanayi uygulamalarında hafiflik ve koruma avantajı sağlayabilir.

Giyilebilir teknolojiler: Esnek FNK filmler, düşük ağırlık ve mekanik uyumları sayesinde giyilebilir elektronikler, biyosensörler ve kablosuz iletişim cihazlarında elektromanyetik koruma amaçlı entegre edilebilir.

Yapısal sağlık izleme ile entegrasyon: EMI kalkan fonksiyonu yanında, iletken ağ yapısının sensör katmanı olarak kullanılmasıyla, malzemenin yapısal sağlık izleme (SHM) sistemlerine entegre edilmesi mümkündür.

6. KAYNAKLAR

- Abbasi, H., Antunes, M. ve Velasco, J. I. (2019). Recent advances in carbon-based polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding. *Progress in Materials Science*, 103, 319–373. doi:10.1016/j.pmatsci.2019.02.003
- Aihemaiti, A., Li, Z., Yin, S., Wang, X., Hu, Q., Zang, Z., ... Zhang, X. (2025). Study on the impact damage behavior and infrared radiation evolution characteristics of rock under different drop hammer velocities. *Infrared Physics & Technology*, 145, 105648. doi:10.1016/j.infrared.2024.105648
- Ball, D. W. (2007). The electromagnetic spectrum: A history. *Spectroscopy (Santa Monica)*, 22(3), 14–20.
- Bheema, R. K., J, G., Bhaskaran, K., Verma, A., Chavali, M. ve Etika, K. C. (2024). A review on recent progress in polymer composites for effective electromagnetic interference shielding properties – structures, process, and sustainability approaches. *Nanoscale Advances*, 6(23), 5773–5802. doi:10.1039/d4na00572d
- Cheng, J., Li, C., Xiong, Y., Zhang, H., Raza, H., Ullah, S., ... Che, R. (2022). Recent Advances in Design Strategies and Multifunctionality of Flexible Electromagnetic Interference Shielding Materials. *Nano-Micro Letters (C. 14)*. Springer Nature Singapore. doi:10.1007/s40820-022-00823-7
- Choudhary, H. K., Kumar, R., Pawar, S. P., Bose, S. ve Sahoo, B. (2020). Effect of Microstructure and Magnetic Properties of Ba-Pb-Hexaferrite Particles on EMI Shielding Behavior of Ba-Pb-Hexaferrite-Polyaniline-Wax Nanocomposites. *Journal of Electronic Materials*, 49(3), 1618–1629. doi:10.1007/s11664-019-07478-y
- Dutta, B., Kar, E., Sen, G., Bose, N. ve Mukherjee, S. (2020). Lightweight, flexible NiO@SiO₂/PVDF nanocomposite film for UV protection and EMI shielding application. *Materials Research Bulletin*, 124, 110746. doi:10.1016/j.materresbull.2019.110746
- Gao, Q., Wang, X., Schubert, D. W. ve Liu, X. (2024). Review on polymer/MXene composites for electromagnetic interference shielding applications. *Advanced Nanocomposites*, 1(1), 52–76. doi:10.1016/j.adna.2023.11.002
- Guo, Yabin, Chen, X., Wei, C., Luo, Y., Chen, J. ve Zhu, Y. (2024). Flexible conductive polymer composite film with sandwich-like structure for ultra-efficient and high-stability electromagnetic interference shielding. *Composites Science and Technology*, 255(April), 110717. doi:10.1016/j.compscitech.2024.110717
- Guo, Yongqiang, Qiu, H., Ruan, K., Zhang, Y. ve Gu, J. (2022). Hierarchically Multifunctional Polyimide Composite Films with Strongly Enhanced Thermal Conductivity. *Nano-Micro Letters*, 14(1), 1–13. doi:10.1007/s40820-021-00767-4

- Gupta, S. ve Tai, N. H. (2019). Carbon materials and their composites for electromagnetic interference shielding effectiveness in X-band. *Carbon*, 152, 159–187. doi:10.1016/j.carbon.2019.06.002
- Han, L., Song, Q., Li, K., Yin, X., Sun, J., Li, H., ... Wang, X. (2021). Hierarchical, seamless, edge-rich nanocarbon hybrid foams for highly efficient electromagnetic-interference shielding. *Journal of Materials Science & Technology*, 72, 154–161. doi:10.1016/j.jmst.2020.07.020
- Heating, R. F. (2013). Radyo Frekans Isıtma Yöntemi ve Gıda İş lemede Kullanımı, 11(2), 80–93.
- Jia, L. C., Zhou, C. G., Sun, W. J., Xu, L., Yan, D. X. ve Li, Z. M. (2020). Water-based conductive ink for highly efficient electromagnetic interference shielding coating. *Chemical Engineering Journal*, 384, 123368. doi:10.1016/j.cej.2019.123368
- Kim, J. ve Kim, J. (2023). Pyrolyzed cellulose/rGO aerogel composites via I2 treatment and silane surface functionalization with highly improved through-plane thermal conductivity and EMI shielding effectiveness. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 2782–2795. doi:10.1016/j.jmrt.2023.08.083
- Kumari, S., Dalal, J., Kumar, A., Pal, R., Chahal, R. ve Ohlan, A. (2024). Enhanced microwave absorption properties of conducting polymer@graphene composite to counteract electromagnetic radiation pollution: green EMI shielding. *RSC Advances*, 14(1), 662–676. doi:10.1039/d3ra07245b
- Kuşlu, S. ve Bayramoğlu, M. (2002). Mikrodalgalar ile materyaller arasındaki termal olan ve olmayan etkileşimlerin incelenmesi ve mikrodalga kimyası. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(3), 395–405.
- Lee, S. H., Kang, D. ve Oh, I. K. (2017). Multilayered graphene-carbon nanotube-iron oxide three-dimensional heterostructure for flexible electromagnetic interference shielding film. *Carbon*, 111, 248–257. doi:10.1016/j.carbon.2016.10.003
- Leyser, T. B. ve Wong, A. Y. (2009). Powerful electromagnetic waves for active environmental research in geospace. *Reviews of Geophysics*, 47(1), 1–33. doi:10.1029/2007RG000235
- Li, Y. K., Li, W. J., Wang, Z. X., Du, P. Y., Xu, L., Jia, L. C. ve Yan, D. X. (2023). High-efficiency electromagnetic interference shielding and thermal management of high-graphene nanoplate-loaded composites enabled by polymer-infiltrated technique. *Carbon*, 211(March). doi:10.1016/j.carbon.2023.118096
- Li, Yi, Xue, B., Yang, S., Cheng, Z., Xie, L. ve Zheng, Q. (2021). Flexible multilayered films consisting of alternating nanofibrillated cellulose/Fe₃O₄ and carbon nanotube/polyethylene oxide layers for electromagnetic interference shielding. *Chemical Engineering Journal*, 410, 128356. doi:10.1016/j.cej.2020.128356

- Li, Yong, Sun, N., Liu, J., Hao, X., Du, J., Yang, H., ... Cao, M. (2018). Multifunctional BiFeO₃ composites: Absorption attenuation dominated effective electromagnetic interference shielding and electromagnetic absorption induced by multiple dielectric and magnetic relaxations. *Composites Science and Technology*, 159, 240–250. doi:10.1016/j.compscitech.2018.02.014
- Liu, S., Qin, S., Jiang, Y., Song, P. ve Wang, H. (2021). Lightweight high-performance carbon-polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 145, 106376. doi:10.1016/j.compositesa.2021.106376
- Micheli, D., Apollo, C., Pastore, R. ve Marchetti, M. (2010). X-Band microwave characterization of carbon-based nanocomposite material, absorption capability comparison and RAS design simulation. *Composites Science and Technology*, 70(2), 400–409. doi:10.1016/j.compscitech.2009.11.015
- Nguyen, Q. D., Yi, Y. ve Choi, C. G. (2024). Highly conductive carbon nanotubes-boron nitride-thermoplastic polyurethane composite thin films with ultra broadband and efficient electromagnetic interference shielding up to 110 GHz and heat dissipation abilities. *Materials Today Physics*, 44(April), 101430. doi:10.1016/j.mtphys.2024.101430
- Nguyen, T. T. L., Cho, S. J., Ko, J., Nguyen, D. C. T., Kim, M. W., Kim, N. D., ... Joo, Y. (2024). Exceptional electromagnetic interference shielding using single-walled carbon nanotube/conductive polymer composites films with ultrathin, lightweight properties. *Carbon*, 230, 119567. doi:10.1016/j.carbon.2024.119567
- Shu, J.-C., Cao, W.-Q. ve Cao, M.-S. (2021). Diverse Metal–Organic Framework Architectures for Electromagnetic Absorbers and Shielding. *Advanced Functional Materials*, 31(23). doi:10.1002/adfm.202100470
- Singh, A. K., Shishkin, A., Koppel, T. ve Gupta, N. (2018). A review of porous lightweight composite materials for electromagnetic interference shielding. *Composites Part B: Engineering*, 149(March), 188–197. doi:10.1016/j.compositesb.2018.05.027
- Song, P., Liu, B., Liang, C., Ruan, K., Qiu, H., Ma, Z., ... Gu, J. (2021). Lightweight, Flexible Cellulose-Derived Carbon Aerogel@Reduced Graphene Oxide/PDMS Composites with Outstanding EMI Shielding Performances and Excellent Thermal Conductivities. *Nano-Micro Letters*, 13(1). doi:10.1007/s40820-021-00624-4
- Song, P., Ma, Z., Qiu, H., Ru, Y. ve Gu, J. (2022). High-Efficiency Electromagnetic Interference Shielding of rGO@FeNi/Epoxy Composites with Regular Honeycomb Structures. *Nano-Micro Letters*, 14(1), 1–13. doi:10.1007/s40820-022-00798-5
- Tao, Y., Li, P. ve Shi, S. Q. (2016). Effects of carbonization temperature and component ratio on electromagnetic interference shielding effectiveness of woodceramics. *Materials*, 9(7). doi:10.3390/ma9070540

- Terms, R. T. (2014). Encyclopedia of Color Science and Technology. Encyclopedia of Color Science and Technology. doi:10.1007/978-3-642-27851-8
- Tian, K., Hu, D., Wei, Q., Fu, Q. ve Deng, H. (2023). Recent progress on multifunctional electromagnetic interference shielding polymer composites. *Journal of Materials Science & Technology*, 134, 106–131. doi:10.1016/j.jmst.2022.06.031
- Xiang, Z., Wang, X., Zhang, X., Shi, Y., Cai, L., Zhu, X., ... Lu, W. (2022). Self-assembly of nano/microstructured 2D Ti3CNTx MXene-based composites for electromagnetic pollution elimination and Joule energy conversion application. *Carbon*, 189, 305–318. doi:10.1016/j.carbon.2021.12.075
- Yan, D. X., Pang, H., Li, B., Vajtai, R., Xu, L., Ren, P. G., ... Li, Z. M. (2015). Structured reduced graphene oxide/polymer composites for ultra-efficient electromagnetic interference shielding. *Advanced Functional Materials*, 25(4), 559–566. doi:10.1002/adfm.201403809
- Yang, Z., Peng, H., Wang, W. ve Liu, T. (2010). Crystallization behavior of poly(ϵ -caprolactone)/layered double hydroxide nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 116(5), 2658–2667. doi:10.1002/app
- Yun, T., Kim, H., Iqbal, A., Cho, Y. S., Lee, G. S., Kim, M. K., ... Koo, C. M. (2020). Electromagnetic Shielding of Monolayer MXene Assemblies. *Advanced Materials*, 32(9), 1–9. doi:10.1002/adma.201906769
- Zhang, S., Lan, D., Zheng, J., Zhao, Z., Jia, Z. ve Wu, G. (2024). Insights into polarization relaxation of electromagnetic wave absorption. *Cell Reports Physical Science*, 5(9), 102206. doi:10.1016/j.xcrp.2024.102206
- Zhang, Yali ve Gu, J. (2022). A Perspective for Developing Polymer-Based Electromagnetic Interference Shielding Composites. *Nano-Micro Letters*, 14(1), 1–9. doi:10.1007/s40820-022-00843-3
- Zhang, Yinhang, Wang, W., Xie, J., Dai, K., Zhang, F. ve Zheng, Q. (2022). Smart and flexible CNTs@MXene heterostructure-decorated cellulose films with excellent electrothermal/photothermal conversion and EMI shielding performances. *Carbon*, 200(August), 491–499. doi:10.1016/j.carbon.2022.08.040
- Zhou, E., Xi, J., Guo, Y., Liu, Y., Xu, Z., Peng, L., ... Gao, C. (2018). Synergistic effect of graphene and carbon nanotube for high-performance electromagnetic interference shielding films. *Carbon*, 133, 316–322. doi:10.1016/j.carbon.2018.03.023