



**T.C.  
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**DOKTORA TEZİ**

**ELEKTROMANYETİK DALGA KALKANLAMA ÖZELLİĞİNE  
SAHİP POLİMER KOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ ve YAPI-  
PERFORMANS İLİŞKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**Alper KAŞGÖZ**

**Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Kimyasal Teknolojiler Programı**

**DANIŞMAN  
Doç. Dr. Ali DURMUŞ**

**Ekim, 2017**

**İSTANBUL**

Bu çalışma, 6.10.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Kimyasal Teknolojiler Programında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

**Tez Jürisi**




Doç. Dr. Ali DURMUŞ (Danışman)  
İstanbul Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Hüseyin YILDIRIM  
Yalova Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Saadet Kevser PABUCCUOĞLU  
İstanbul Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Hüseyin DELİGÖZ  
İstanbul Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi



Doç. Dr. Erhan SANCAK  
Marmara Üniversitesi  
Teknoloji Fakültesi



20.04.2016 tarihli resmi gazetede yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi'nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

## ÖNSÖZ

Beraber çalıştığımız yüksek lisans ve doktora eğitimim süresince akademik hayatımın şekillenmesinde büyük rol oynayan, akademik hayatın yanında günlük hayatla ilgili de önemli yönlendirmeler yaparak hayatıma çok değerli katkılarda bulunan değerli danışman hocam Doç. Dr. Ali DURMUŞ'a teşekkür ederim.

İstanbul Üniversitesinde görev yaptığım süre içinde yardımlarını esirgemeyen tüm Kimyasal Teknolojiler Anabilim Dalı üyelerine ve laboratuvar da beraber çalıştığımız arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca hayatımın şekillenmesine önemli rol oynayan ve hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Ahmet KAŞGÖZ ve Prof. Dr. Hasine KAŞGÖZ'e teşekkürü ayrıca bir borç bilirim.

Son olarak doktora süresince her türlü sıkıntıda büyük bir sabırla yanımda olan eşim Emine KAŞGÖZ'e, çalışmalar nedeniyle yeteri kadar ilgilenmediğim dönemlerde dahi yanımdan ayrılmayan oğlum Ömer KAŞGÖZ'e, uzakta olsalar dahi bütün hayatım boyunca hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen değerli aileme ve sevgili babaannem Cavide KAŞGÖZ'e teşekkür eder çalışmamın bilim dünyasına faydalı olmasını temenni ederim.

Ekim 2017

**Alper KAŞGÖZ**



# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ .....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	viii
TABLO LİSTESİ.....	xiv
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ .....	xv
ÖZET .....	xvii
SUMMARY .....	xix
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. GENEL KISIMLAR</b> .....	<b>4</b>
2.1. ELEKTROMANYETİK DALGALAR .....	4
2.1.1. Temel Özellikleri ve Sınıflandırılması .....	4
2.1.2. Elektromanyetik Dalga Teorisi.....	7
2.1.3. Elektriksel ve Manyetik Özellikler Açısından Bir Ortamın Karakterize Edilmesi .....	11
2.1.4. Elektromanyetik Dalganın Farklı Ortamlarda İlerlemesinin Matematiksel Analizi.....	15
2.2. ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA.....	19
2.2.1. Elektromanyetik Kalkanlamanın Mekanizması .....	20
2.2.2. Elektromanyetik Kalkanlama Etkinliklerinin Belirlenmesi .....	23
2.2.2.1. Yalıtılmış Oda Test Yöntemi ile Saçılma Parametrelerinin Belirlenmesi.....	24
2.2.2.2. Dalga Kılavuzu Yöntemiyle Saçılma Parametrelerinin Belirlenmesi .....	25
2.2.2.3. Koaksiyel Hat İletim Tekniğiyle Saçılma Parametrelerinin Belirlenmesi.....	26
2.2.3. Elektromanyetik Kalkanlamada Kullanılan Malzemeler .....	27
2.3. ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA UYGULAMALARINDA POLİMERLER VE POLİMER KOMPOZİTLER.....	30
2.4. RADAR SİSTEMLERİ VE RADAR'DA GÖRÜNMEZLİK TEKNOLOJİLERİ .....	38
2.4.1. RADAR Sistemleri.....	38
2.4.2. RADAR Sistemlerinden Gizlenmenin Temel Teorisi .....	40
2.4.3. RAM'ların Performanslarının Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi .....	41
2.4.4. RAM Olarak Kullanılan Malzemeler .....	45

2.5. RADAR SİNYALİNİ SOĞURABİLEN POLİMER KOMPOZİTLER.....	46
2.5.1. Manyetik Tanecik Dolgulu Polimer Kompozitler .....	46
2.5.2. Dielektrik Dolgularla Hazırlanmış Polimer Kompozitler .....	49
2.5.3. Karbon Dolgulu Polimer Kompozitler .....	49
2.5.4. Hibrit ve Farklı Tipte Dolgularla Hazırlanmış Polimer Kompozitler .....	52
2.5.5. Çok Katmanlı Polimer Kompozitler.....	53
2.5.6. RADAR Soğurucu Polimer Kompozitlerde Yapı-Performans İlişkisi.....	56
<b>3. MALZEME VE YÖNTEM.....</b>	<b>58</b>
3.1. MALZEMELER .....	58
3.1.1. Karbon Dolgular .....	58
3.1.2. Manyetik Dolgular.....	59
3.1.3. Hibrit Dolgular .....	59
3.2. ÖRNEKLERİN HAZIRLANMASI.....	59
3.3. TESTLER.....	61
3.3.1. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Analizleri .....	61
3.3.2. DC İletkenlik Testleri .....	61
3.3.3. Dinamik Mekanik Analiz (DMA) .....	61
3.3.4. Elektromanyetik Dalga Kalkanlama ve Soğurma Performanslarının Belirlenmesi.....	62
<b>4. BULGULAR.....</b>	<b>65</b>
4.1. KOMPOZİT HAZIRLAMA TEKNİĞİNİN PERFORMANS ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ.....	65
4.1.1. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Analizleri .....	66
4.1.2. Doğrusal Akım (DC) Altındaki Elektriksel İletkenlik Analizleri .....	69
4.1.3. Elektriksel Geçirgenlik (Permitivite) Değerlerinin Analizi .....	70
4.1.4. Yansıma Kaybı (RL) Analizleri .....	73
4.1.5. Kalkanlama Etkinliklerinin Analizi.....	76
4.2. TEK KATMANLI KARBON DOLGULU KOMPOZİTLERİN HAZIRLANMASI VE PERFORMANS ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ.....	78
4.2.1. Örneklerin Mikroyapısal Analizleri .....	79
4.2.2. Dinamik Mekanik Analiz .....	84
4.2.3. Doğrusal Akım Elektriksel İletkenlik Analizleri.....	93
4.2.4. Dielektrik Parametrelerin Analizi.....	97
4.2.5. Kalkanlama Etkinliklerinin Analizi.....	101
4.2.6. Yansıma Kaybı (RL) Analizleri .....	106

4.3. ÇOK KATMANLI KARBON POLİMER KOMPOZİT TASARIMININ BELİRLENMESİ .....	115
4.3.1. Tek Tip Karbon İçeren Çok Katmanlı RAM Tasarımlarının Belirlenmesi.....	117
4.3.2. Farklı Tipte Karbon İçeren Çok Katmanlı RAM Tasarımlarının Belirlenmesi .....	120
4.4. MANYETİK TANECİK KATKILI POLİMER KOMPOZİTLERİN HAZIRLANMASI VE PERFORMANS ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ.....	123
4.4.1. SEM Analizleri .....	124
4.4.2. Permitivite ve Permeabilite Değerlerinin Analizi .....	126
4.4.3. Yansıma Kaybı Analizleri .....	129
4.5. KARBON VE MANYETİK DOLGULARIN KARIŞIM VE HİBRİTLERİ İLE KOMPOZİT HAZIRLANMASI VE RL PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ .....	133
4.5.1. CNF/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Karışık Kompozitlerinin Hazırlanması ve Performans Testleri.....	135
4.5.1.1. SEM Analizleri.....	135
4.5.1.2. DC Elektriksel İletkenlik Analizleri .....	138
4.5.1.3. Permitivite ve Permeabilite Değerlerinin Analizleri.....	139
4.5.1.4. Yansıma Kaybı Analizleri .....	143
4.5.2. Ni/G Hibrit ve Karışık Dolgu İçeren Kompozitlerinin Hazırlanması ve RL Analizleri .....	146
4.5.2.1. SEM analizleri .....	146
4.5.2.2. Dielektrik Analizler.....	148
4.5.2.3. Yansıma Kaybı Analizleri .....	151
<b>5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....</b>	<b>155</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>167</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>180</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa No

Şekil 2.1: Elektromanyetik dalganın bileşenleri ve ilerleme yönünün şematik gösterimi .....	4
Şekil 2.2: Elektromanyetik dalga spektrumu .....	5
Şekil 2.3: Sınırları belirlenmiş bir V kontrol hacmindeki toplam yükün pozitif ve negatif olması durumundaki elektrik alan akışı ile manyetik akının şematik gösterimi .....	8
Şekil 2.4: Faraday deneyi düzeneği .....	10
Şekil 2.5: Elektrik akımı taşıyan bir kabloda manyetik alan oluşumu.....	11
Şekil 2.6: Kapasitör içerisinde oluşan elektrik alan şematik gösterimi .....	12
Şekil 2.7: Elektromanyetik dalganın farklı ortamlarda ilerlemesi ile ilgili matematiksel ifadeler.....	16
Şekil 2.8: (a)Toplantı salonunu ve (b)uçak savar kontrol ünitesinin elektromanyetik dalgalara karşı izolasyon uygulamaları.....	20
Şekil 2.9: Elektromanyetik dalga kalkanlamada etkili üç mekanizmanın şematik gösterimi.....	21
Şekil 2.10: Saçılma parametreleri şematik gösterimi.....	24
Şekil 2.11: Yalıtılmış oda yöntemi şematik gösterimi .....	25
Şekil 2.12: Dalga kılavuzu yönteminin şematik olarak gösterimi .....	26
Şekil 2.13: Koaksiyonel hat yönteminin şematik olarak gösterimi .....	26
Şekil 2.14: Polimer kompozitlerde iletken dolgu miktarı ile iletkenlik arasındaki değişimi .....	31
Şekil 2.15: Perkolasyon eşiğinin altında ve üstündeki dolgu miktarları için kompozitin mikro yapısının şematik gösterimi .....	32
Şekil 2.16: Farklı geometrideki yapılar için $A_f$ tanımlamaları .....	33
Şekil 2.17: 0.1-110 GHz aralığında kullanılan bazı RADAR sistemleri .....	39
Şekil 2.18: (a) Radar sinyallerinin başka tarafa yönlendirilmesi ve (b) uçak yüzeyi tarafından soğurulmasının şematik gösterimi .....	40
Şekil 2.19: RADAR sistemlerinden gizlenme özelliğine sahip F-22 Raptor savaş uçağı ve B-2 Spirit bombardıman uçağının fotoğrafları.....	41

<b>Şekil 2.20:</b> Arka kısmı PEC ile kaplanmış bir RAM’de elektromanyetik dalganın sönümlenmesi.....	42
<b>Şekil 2.21:</b> Tek katmanlı bir RAM için tipik <i>RL</i> -frekans grafiği.....	44
<b>Şekil 2.22:</b> (a-c) Karbon manyetik karışık dolgu içeren kompozitin şematik gösterimi, (b-d) Manyetik özellikli bileşen ile yüzeyi kaplanmış karbon dolgu (hibrit dolgu) içeren kompozitin şematik gösterimi .....	52
<b>Şekil 2.23:</b> (a) Tek katmanlı ve (b) çok katmanlı bir RAM’da elektromanyetik dalganın soğurulması .....	54
<b>Şekil 2.24:</b> Çok katmanlı bir RAM örneği.....	55
<b>Şekil 3.1:</b> Kullanılan (a) ekstruder ve (b) modüler vida setinin fotoğraf ile (c) kompozit hazırlamada kullanılan vida tasarımına ait teknik çizim .....	60
<b>Şekil 3.2:</b> Saçılma parametrelerinin ölçümünde kullanılan VNA ve ilgili test düzeneği .....	62
<b>Şekil 3.3:</b> VNA analizi için kullanılan örnek hazırlama cihazı ve hazırlanan örnekler .....	63
<b>Şekil 3.4:</b> Hava ve teflona ait deneysel olarak belirlenen $\epsilon'$ değerlerinin literatür değerleriyle karşılaştırılması .....	64
<b>Şekil 4.1:</b> Pyrograf® PR-24-XT-LHT kod numaralı karbon nanoelyafın SEM görüntüsü...67	
<b>Şekil 4.2:</b> (a-b) CNF20-sc-ms, (c-d) CNF20-sc-us ve (e-f) CNF20-ext örneklerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri .....	68
<b>Şekil 4.3:</b> CNF-ext, CNF-sc-us ve CNF-sc-ms serisi örneklerin dolgu hacim fraksiyonuna göre iletkenlik değerlerinin değişimi.....	69
<b>Şekil 4.4:</b> Farklı üretim yöntemleri ile hazırlanmış CNF içeren kompozitlerin dielektrik parametrelerin dolgu oranı ve frekansa bağlı değişimi.....	72
<b>Şekil 4.5:</b> CNF-sc-ms serisi kompozitlerin farklı kalınlık ve frekans değerleri için <i>RL</i> değişimleri.....	74
<b>Şekil 4.6:</b> CNF-sc-us serisi kompozitlerin farklı kalınlık ve frekans değerleri için <i>RL</i> değişimleri.....	75
<b>Şekil 4.7:</b> CNF-ext serisi kompozitlerin farklı kalınlık ve frekans değerleri için <i>RL</i> değişimleri.....	75
<b>Şekil 4.8:</b> CNF-sc-ms serisi kompozitlerin (a) $SE_R$ , (b) $SE_A$ ve (c) $SE_T$ değerlerinin frekansla değişimi (d=1 mm) .....	76
<b>Şekil 4.9:</b> CNF-sc-us serisi kompozitlerin (a) $SE_R$ , (b) $SE_A$ ve (c) $SE_T$ değerlerinin frekansla değişimi (d=1 mm) .....	76
<b>Şekil 4.10:</b> CNF-ext serisi kompozitlerin (a) $SE_R$ , (b) $SE_A$ ve (c) $SE_T$ değerlerinin frekansla değişimi (d=1 mm) .....	77

<b>Şekil 4.11:</b> (a-b) CB-10 ve (c-d) CB-30 örneklerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri .....	80
<b>Şekil 4.12:</b> (a-b) G-20 ve (c-d) G-120 örneklerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri .....	81
<b>Şekil 4.13:</b> (a-b) EG-5 ve (c-d) EG-40 örneklerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri .....	82
<b>Şekil 4.14:</b> (a-b) CNF-3 ve (c-d) CNF-20 örneklerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri .....	83
<b>Şekil 4.15:</b> (a-b) CNT-5 ve (c-d) CNT-20 örneklerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri .....	84
<b>Şekil 4.16:</b> CB serisi örneklerin dolgu oranı ve sıcaklığa bağlı olarak (a-b) $E'$ ve (c-d) $E''$ değerlerinin değişimi .....	87
<b>Şekil 4.17:</b> G serisi örneklerin dolgu oranı ve sıcaklığa bağlı olarak (a-b) $E'$ ve (c-d) $E''$ değerlerinin değişimi .....	87
<b>Şekil 4.18:</b> EG serisi örneklerin dolgu oranı ve sıcaklığa bağlı olarak (a-b) $E'$ ve (c-d) $E''$ değerlerinin değişimi .....	88
<b>Şekil 4.19:</b> CNF serisi örneklerin dolgu oranı ve sıcaklığa bağlı olarak (a-b) $E'$ ve (c-d) $E''$ değerlerinin değişimi .....	88
<b>Şekil 4.20:</b> CNT serisi örneklerin dolgu oranı ve sıcaklığa bağlı olarak (a-b) $E'$ ve (c-d) $E''$ değerlerinin değişimi .....	89
<b>Şekil 4.21:</b> Karbon dolgulu örneklerle modifiye-Guth modelinin uygulanması .....	90
<b>Şekil 4.22:</b> G ve EG nin fiziksel yapıları ve işleme sırasındaki fiziksel değişimleri .....	91
<b>Şekil 4.23:</b> Kompozitlerin $dc$ -iletkenlik değerleri (a) CB, EG, G serisi, (b) CNT, CNF serisi .....	94
<b>Şekil 4.24:</b> “Power-law” kuralının iletkenlik sonuçlarına uygulanması .....	96
<b>Şekil 4.25:</b> Hopping ve perkolasyon teorisine göre iletim sağlayan kompozitlerde mikro-yapısal durum şematik gösterimi .....	96
<b>Şekil 4.26:</b> Kompozit serileri için $\log \sigma - (-\varphi^{-1/3})$ grafikleri .....	97
<b>Şekil 4.27:</b> CB serisi örneklerin (a) $\varepsilon'$ ve (b) $\varepsilon''$ değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimi .....	98
<b>Şekil 4.28:</b> G serisi örneklerin (a) $\varepsilon'$ ve (b) $\varepsilon''$ değerlerinin frekansa bağlı değişimi .....	98
<b>Şekil 4.29:</b> EG serisi örneklerin (a) $\varepsilon'$ ve (b) $\varepsilon''$ değerlerinin frekansa bağlı değişimi .....	98
<b>Şekil 4.30:</b> CNF serisi örneklerin (a) $\varepsilon'$ ve (b) $\varepsilon''$ değerlerinin frekansa bağlı değişimi .....	99

<b>Şekil 4.31:</b> CNT serisi örneklerin (a) $\epsilon'$ ve (b) $\epsilon''$ değerlerinin frekansa bağlı değişimi .....	99
<b>Şekil 4.32:</b> (a) Bir devre elemanı olan Kapasitörlerin genel şematik gösterimi, (b) İletken kompozit yapıda dolgu oranına göre farklı özelliklerde oluşan mikro-kapasitör benzeri yapılar .....	100
<b>Şekil 4.33:</b> CB serisi örnekler için (a) $SE_R$ , (b) $SE_A$ ve (c) $SE_T$ değerlerinin değişimi (d=1 mm).....	102
<b>Şekil 4.34:</b> G serisi örnekler için (a) $SE_R$ , (b) $SE_A$ ve (c) $SE_T$ değerlerinin değişimi (d=1 mm).....	102
<b>Şekil 4.35:</b> EG serisi örnekler için (a) $SE_R$ , (b) $SE_A$ ve (c) $SE_T$ değerlerinin değişimi (d=1 mm).....	102
<b>Şekil 4.36:</b> CNF serisi örnekler için (a) $SE_R$ , (b) $SE_A$ ve (c) $SE_T$ değerlerinin değişimi (d=1 mm).....	103
<b>Şekil 4.37:</b> CNT serisi örnekler için (a) $SE_R$ , (b) $SE_A$ ve (c) $SE_T$ değerlerinin değişimi (d=1 mm).....	103
<b>Şekil 4.38:</b> En yüksek performansın elde edildiği örneklerin farklı kalınlıklardaki $SE_T$ eğrileri .....	106
<b>Şekil 4.39:</b> Karbon dolgulu örneklerin optimum kalınlık değerlerinde elde edilen RL-frekans grafikleri .....	109
<b>Şekil 4.40:</b> CB-10 örneği için kalınlık-frekans-RL sonuçlarını içeren dış hat grafiği .....	110
<b>Şekil 4.41:</b> G-40 örneği için kalınlık-frekans-RL sonuçlarını içeren dış hat grafiği .....	111
<b>Şekil 4.42:</b> EG-5 örneği için kalınlık-frekans-RL sonuçlarını içeren dış hat grafiği .....	112
<b>Şekil 4.43:</b> CNF-3 örneği için kalınlık-frekans-RL sonuçlarını içeren dış hat grafiği.....	113
<b>Şekil 4.44:</b> CNT-5 örneği için kalınlık-frekans-RL sonuçlarını içeren dış hat grafiği .....	114
<b>Şekil 4.45:</b> Tasarım optimizasyonunda kullanılan genetik algoritma.....	117
<b>Şekil 4.46:</b> GA ile belirlenen tek tip karbon dolgu içeren çok katmanlı RAM tasarımları.....	119
<b>Şekil 4.47:</b> Tek tip karbon dolgu içeren örneklerin RL (dB) -frekans grafikleri .....	120
<b>Şekil 4.48:</b> Farklı tipte karbon dolgu içeren çok katmanlı RAM tasarımları ve RL-frekans grafikleri .....	122
<b>Şekil 4.49:</b> (a-b) $Fe_3O_4$ -20 ve $Fe_3O_4$ -120 örneklerinin farklı büyütmelerdeki SEM fotoğrafları.....	125
<b>Şekil 4.50:</b> Ni-80 örneğine ait farklı büyütmelerdeki SEM fotoğrafları.....	125

<b>Şekil 4.51:</b> Farklı oranlarda Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> içeren örneklerin (a) $\epsilon'$ , (b) $\epsilon''$ , (c) $\mu'$ ve (d) $\mu''$ değerleri.....	127
<b>Şekil 4.52:</b> Farklı oranlarda baryum ferrit içeren örneklerin (a) $\epsilon'$ , (b) $\epsilon''$ , (c) $\mu'$ ve (d) $\mu''$ değerleri.....	128
<b>Şekil 4.53:</b> Farklı oranlarda lantanyum stronsiyum ferrit içeren örneklerin (a) $\epsilon'$ , (b) $\epsilon''$ , (c) $\mu'$ ve (d) $\mu''$ değerleri.....	128
<b>Şekil 4.54:</b> Farklı oranlarda nikel içeren örneklerin (a) $\epsilon'$ , (b) $\epsilon''$ , (c) $\mu'$ ve (d) $\mu''$ değerleri.....	129
<b>Şekil 4.55:</b> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> serisi örneklerin farklı kalınlık ve frekans değerlerindeki RL değerleri.....	131
<b>Şekil 4.56:</b> BaFe serisi örneklerin farklı kalınlık ve frekans değerlerindeki RL değerleri.....	131
<b>Şekil 4.57:</b> LaStFe serisi örneklerin farklı kalınlık ve frekans değerlerindeki RL değerleri.....	132
<b>Şekil 4.58:</b> Ni serisi kompozitlerin farklı kalınlık ve frekanslardaki RL değerleri.....	132
<b>Şekil 4.59:</b> (a-b-c) Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 20-CNF3 ve (d-e-f) Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 20-CNF10 örneklerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri.....	136
<b>Şekil 4.60:</b> (a-b-c) Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 80-CNF3 ve (d-e-f) Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 80-CNF10 örneklerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri.....	137
<b>Şekil 4.61:</b> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -CNF serisi örneklerin DC iletkenliklerinin değişimi.....	138
<b>Şekil 4.62:</b> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 10 – CNF <sub>x</sub> serisi kompozitlerin $\epsilon'$ , $\epsilon''$ , $\mu'$ ve $\mu''$ değerlerinin frekansla değişimi .....	139
<b>Şekil 4.63:</b> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 20 – CNF <sub>x</sub> serisi kompozitlerin $\epsilon'$ , $\epsilon''$ , $\mu'$ ve $\mu''$ değerlerinin frekansla değişimi .....	140
<b>Şekil 4.64:</b> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 40 – CNF <sub>x</sub> serisi kompozitlerin $\epsilon'$ , $\epsilon''$ , $\mu'$ ve $\mu''$ değerlerinin frekansla değişimi .....	140
<b>Şekil 4.65:</b> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 80 – CNF <sub>x</sub> serisi kompozitlerin $\epsilon'$ , $\epsilon''$ , $\mu'$ ve $\mu''$ değerlerinin frekansla değişimi .....	141
<b>Şekil 4.66:</b> CNF oranına göre Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> X-CNF <sub>x</sub> kompozitlerinin dielektrik parametrelerinin değişimi ( $f=10.03$ GHz).....	142
<b>Şekil 4.67:</b> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 10-CNF <sub>x</sub> serisi örneklerin dış hat grafikleri .....	144
<b>Şekil 4.68:</b> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 20-CNF <sub>x</sub> serisi örneklerin dış hat grafikleri .....	144
<b>Şekil 4.69:</b> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 40-CNF <sub>x</sub> serisi örneklerin dış hat grafikleri .....	145



<b>Şekil 4.70:</b> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -CNFX serisi örneklerin dış hat grafikleri .....	145
<b>Şekil 4.71:</b> Çok katmanlı Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -CNF serisi örneklerin RL-frekans grafiği .....	146
<b>Şekil 4.72:</b> (a-b-c) NiC2805-40 ve (d-e-f) NiC2805-80 örneklerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri.....	147
<b>Şekil 4.73:</b> Ni30-G10 örneğine ait SEM görüntüleri .....	148
<b>Şekil 4.74:</b> Farklı oranlarda NiC2701 içeren örneklerin (a) $\epsilon'$ , (b) $\epsilon''$ , (c) $\mu'$ ve (d) $\mu''$ değerleri.....	150
<b>Şekil 4.75:</b> Farklı oranlarda NiC2701 içeren örneklerin (a) $\epsilon'$ , (b) $\epsilon''$ , (c) $\mu'$ ve (d) $\mu''$ değerleri.....	150
<b>Şekil 4.76:</b> 40 phr oranında dolgu içeren hibrit ve fiziksel karışım dolgu fazı içeren örneklerin (a) $\epsilon'$ , (b) $\epsilon''$ , (c) $\mu'$ ve (d) $\mu''$ değerleri .....	151
<b>Şekil 4.77:</b> NiC2701 ve NiC2805 serisi örneklerin dış hat grafikleri .....	153
<b>Şekil 4.78:</b> G-40, Ni-40, Ni30-G10 ve NiC2805 örneklerinin dış hat grafikleri .....	154
<b>Şekil 5.1:</b> Yüksek performans elektromanyetik kalkan geliştirilmesi sırasında uygulanan iş akış şeması .....	155
<b>Şekil 5.2:</b> Elektromanyetik kalkan uygulaması için hedef performansı sağlayan ürünlerin karşılaştırmalı analizi .....	160
<b>Şekil 5.3:</b> Polimer kompozit esaslı RAM geliştirilmesi sırasında uygulanan iş akış şeması.....	161
<b>Şekil 5.4:</b> RAM uygulaması için hedef performansı sağlayan tasarımların şematik gösterimi.....	165
<b>Şekil 5.5:</b> RAM uygulaması için hedef performansı sağlayan tasarımların karşılaştırmalı analizi .....	165

## TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
<b>Tablo 2.1:</b> Farklı malzemelerin dielektrik katsayıları.....	13
<b>Tablo 2.2:</b> $\epsilon''/\epsilon'$ oranına göre malzemelerin sınıflandırılması .....	14
<b>Tablo 2.3:</b> Bazı metallerin bağıl elektriksel iletkenlik ve manyetik geçirgenlik değerleri.....	28
<b>Tablo 2.4:</b> Literatürdeki farklı karbon dolgularla hazırlanmış polimer kompozitlerin kalkanlama etkinlik değerleri .....	36
<b>Tablo 2.5:</b> Manyetik özellikli dolgularla hazırlanmış bazı polimer kompozitlerin performans özellikleri .....	48
<b>Tablo 2.6:</b> BaTiO <sub>3</sub> dolgulu bazı kompozitlerin elektromanyetik dalga soğurma özellikleri.....	48
<b>Tablo 2.7:</b> Literatürde bulunan bazı karbon dolgulu polimer kompozitlerin elektromanyetik dalga soğurma özellikleri .....	51
<b>Tablo 2.8:</b> Hibrit ve karışım dolgularla hazırlanan bazı polimer kompozitlerin elektromanyetik dalga absorplama performansları .....	53
<b>Tablo 3.1:</b> Desmopan 3380 kod numaralı TPU'nun bazı özellikleri.....	58
<b>Tablo 3.2:</b> Kullanılan karbon dolguların bazı fiziksel özellikleri.....	58
<b>Tablo 3.3:</b> Deneylerde kullanılan manyetik özellikli dolguların bazı fiziksel özellikleri .....	59
<b>Tablo 3.4:</b> Deneylerde kullanılan hibrit dolguların bazı fiziksel özellikleri.....	59
<b>Tablo 4.1:</b> Üretim yönteminin belirlenmesi için hazırlanan örneklerin bileşimleri.....	66
<b>Tablo 4.2:</b> Farklı tip karbon dolgularla hazırlanan örneklerin bileşim ve kodları.....	79
<b>Tablo 4.3:</b> GA optimizasyonunda kullanılan parametreler.....	116
<b>Tablo 4.4:</b> Manyetik dolgularla hazırlanan örneklerin bileşimleri .....	123
<b>Tablo 4.5:</b> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ve CNF içeren örnek serilerinin bileşimleri ve isimlendirilmesi.....	134
<b>Tablo 4.6:</b> Nikel/karbon hibrit dolgulu kompozitlerin ve karşılaştırma örneklerinin bileşimleri ve isimlendirmesi .....	134

## SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$A_f$	: Dağılım oranı (Aspect ratio)
$D$	: Elektrik akı yoğunluğu
$E'$	: Saklanan modül
$E''$	: Kayıp modül
$S$	: Saçılma parametresi
$T$	: Geçirgenlik katsayısı
$Z, \eta$	: Empedans
$\sigma_{dc}$	: dc-iletkenlik
$\phi$	: Dolgu hacim fraksiyonu
$\phi_c$	: Elektriksel perkolasyon eşiği
$\rho_v$	: Elektrik yük yoğunluğu
$\epsilon$	: Elektriksel geçirgenlik katsayısı, permitivite
$\beta$	: Faz sabiti
$\gamma$	: İlerleme sabiti
$\mu$	: Manyetik geçirgenlik katsayısı, permeabilite
$\alpha$	: Sönümleme Katsayısı
$\rho$	: Yansıma katsayısı
$\sigma_{ac}$	: ac-iletkenlik

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>CB</b>	: Karbon siyahı
<b>CNF</b>	: Karbon nanofiber
<b>CNT</b>	: Karbon nanotüp
<b>DMA</b>	: Dinamik mekanik analiz
<b>DPAA</b>	: Düşük performans soğurma aralığı
<b>dB</b>	: Desibel
<b>EK</b>	: Elektromanyetik kalkan
<b>EMI</b>	: Elektromanyetik parazitlenme
<b>EAA</b>	: Etkin soğurma aralığı

<b>EG</b>	: Genleştirilmiş grafit
<b>GA</b>	: Genetik algoritma
<b>G</b>	: Grafit
<b>HPAA</b>	: Yüksek performans soğurma aralığı
<b>İPK</b>	: İletken polimer kompozit
<b>RL<sub>min</sub></b>	: En düşük yansımaya kaybı
<b>RAM</b>	: RADAR soğurucu malzeme
<b>RADAR</b>	: <i><b>R</b>adio <b>D</b>etection <b>A</b>nd <b>R</b>anging, Radyo Dalgaları ile Tespit ve Menzil Tayini</i>
<b>RL</b>	: Yansımaya kaybı, Reflection loss
<b>SE<sub>A</sub></b>	: Absorplama esaslı kalkanlama etkinliği
<b>SE<sub>MR</sub></b>	: Çoklu yansımaya esaslı kalkanlama etkinliği
<b>SE<sub>R</sub></b>	: Yansımaya esaslı kalkanlama etkinliği
<b>SE</b>	: Kalkanlama etkinliği
<b>SE<sub>T</sub></b>	: Toplam kalkanlama etkinliği
<b>SEM</b>	: Taramalı elektron mikroskobu
<b>VNA</b>	: Vektör network analizörü

## ÖZET

### DOKTORA TEZİ

#### ELEKTROMANYETİK DALGA KALKANLAMA ÖZELLİĞİNE SAHİP POLİMER KOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ VE YAPI-PERFORMANS İLİŞKİLERİNİN İNCELENMESİ

Alper KAŞGÖZ

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Ali DURMUŞ

Bu tez çalışmasında elektromanyetik dalga kalkanlama ve RADAR sistemlerinden gizlenme uygulamalarına yönelik yüksek performansa ve özgün bir içeriğe sahip polimer kompozitlerin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Tez kapsamındaki deneysel çalışmalarda, kompozit yapıyı oluşturan taşıyıcı polimer bileşen olarak termoplastik poliüretan (TPU), dolgu bileşeni olarak ise; (i) farklı fiziksel özelliklere sahip karbon malzemeler, (ii) manyetik özellikli inorganik bileşikler ve (iii) özel olarak tasarlanan karbon-inorganik yapıları hibrit malzemeler kullanılmıştır.

Eriyik harmanlama ve çözeltide karıştırma gibi farklı proses yöntemleri ile hazırlanan tek katmanlı kompozitlerin mikro-yapısal ve mekanik özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve dinamik-mekanik analiz (DMA) cihazında gerçekleştirilen test/analiz çalışmaları ile belirlenmiştir. Örneklerin doğrusal akım altında elektriksel iletkenlik değerlerinin de incelendiği çalışmada kompozitlerin elektromanyetik özelliklerine ilişkin parametreler ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ,  $\mu'$ ,  $\mu''$ ,  $S_{11}$ ,  $S_{12}$  vs.) koaksiyel hat yöntemine göre vektör network analiz cihazında (VNA) ölçülmüş ve 2-14 GHz arasındaki elektromanyetik kalkanlama etkinlikleri (*Shielding Effectiveness*,  $SE_T$ ) ve yansıma kaybı (*Reflection Loss*,  $RL$ ) değerleri hesaplanmıştır.

Yüksek etkinlikte soğurma sağlayan kompozitlerin geliştirilmesi amacıyla, tek katmanlı kompozitlerle elde edilen değerler kullanılarak genetik algoritma optimizasyon yöntemiyle hedef performans kriterlerini sağlayabilen çok katmanlı kompozitler tasarlanmış ve “yapı-performans optimizasyonu” gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise hedef kriterleri sağlayabilen kompozitler, “üretim kolaylığı”, “maliyet” ve “uygulanabilirlik” gibi parametreler açısından da sorgulanarak, seri üretim için en uygun formülasyon, tasarım ve proses yöntemi belirlenmiştir.

Eylül 2017, 203 sayfa.

**Anahtar kelimeler:** Elektromanyetik kalkan, RADAR soğurucu malzeme, polimer kompozit



## **SUMMARY**

### **Ph.D. THESIS**

#### **DEVELOPMENT OF POLYMER COMPOSITES HAVING THE PROPERTY OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE SHIELDING AND INVESTIGATION OF THEIR STRUCTURE-PROPERTY RELATIONSHIPS**

**Alper KAŞGÖZ**

**İstanbul University**

**Institute of Graduate Studies in Science and Engineering**

**Department of Chemical Engineering**

**Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Ali DURMUŞ**

In this thesis, it was aimed to develop high performance polymer composites consisting of unique compositions for applications of shielding to electromagnetic waves and RADAR stealth technology.

Thermoplastic polyurethane (TPU) as polymer matrix and (i) carbon materials having various physical properties, (ii) magnetic inorganic compounds, and (iii) carbon-inorganic hybrid materials as fillers were used in experimental works.

Microstructural and mechanical properties of single layer composites prepared with different processing methods such as melt blending and solution mixing were investigated by tests and analysis studies performed in scanning electron microscope (SEM) and dynamic-mechanic analyzer (DMA) instruments, respectively. Electrical conductivity values of samples were also investigated under direct current and the parameters of electromagnetic properties ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ,  $\mu'$ ,  $\mu''$ ,  $S_{11}$ ,  $S_{12}$  etc.) of samples were measured via co-axial line method in a vector network analyzer (VNA) and shielding effectiveness ( $SE_T$ ) and reflection loss ( $RL$ ) values of samples were determined in a range of 2-14 GHz.

Multi-layer composites that provide performance goals were designed by using the database obtained from the measurements of single-layer composites via genetic algorithm optimization method and structure-property optimization was carried out for developing composites exhibiting high performance absorption. Then, such composites were evaluated by regarding “processing versatility”, “cost”, and “applicability” parameters and the best formulation, design, and processing method were specified for mass-production.

September 2017, 203 pages.

**Keywords:** Electromagnetic shield, RADAR absorbent materials, polymer composite





## 1. GİRİŞ

Bu tez çalışması kapsamında son yıllarda kompozit malzeme teknolojileri alanındaki önemli araştırma ve uygulama alanlarından biri olan polimer esaslı kompozit yapıda “*elektromanyetik kalkan (EK)*” ve “*RADAR soğurucu malzeme (RAM)*” geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır.

Literatürde “elektromanyetik kalkan” terimi belirli bir frekans aralığındaki elektromanyetik dalgaların geçişini yüksek oranda engelleyebilen malzemeler için kullanılmaktadır. Bu malzemelerin pratik uygulaması ise kalkanlanmak (ya da izole edilmek) istenen alanın bu malzemelerle tamamen çevrelenerek kapatılması şeklinde gerçekleştirilmekte böylelikle iç ve dış ortamın elektromanyetik dalga açısından iletişimi tamamen kesilmektedir. Bu uygulamalar daha çok “*böcek*” diye tabir edilen küçük vericilerle ya da uzaktan anten sistemleriyle yapılan gizli ve kanunsuz dinlenmelerin engellenmesi amacıyla toplantı salonu ve makam/sorgu odaları gibi stratejik öneme sahip kapalı alanlarda, veri güvenliğinin sağlanması ve uzaktan müdahalelerin engellenmesi amacıyla önemli ve büyük verilerin saklandığı bilgi işlem odalarında, hamilelerin, yeni doğan bebeklerin ve elektromanyetik dalgalara karşı hassasiyet taşıyabilecek hastaların korunması amacıyla hastane odalarında ve elektronik cihazların birbirlerine karşı oluşturdukları parazit sinyallerin etkilerinin azaltılmasında ve cihaz ya da ekipmanların kasalarında kullanılmaktadır.

Konuyla ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde başta karbon malzemeler olmak üzere metaller, iletken polimerler ve iletken polimer kompozitlerin (İPK) bu alanda yaygın bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Ancak İPK’ların düşük yoğunlukları ve üretim maliyetleri, yüksek kimyasal ve fiziksel kararlılıkları ile seri üretime uygunlukları diğer alternatiflerine göre öne çıkmasına neden olmuştur. Özellikle son yıllarda elektromanyetik kalkan geliştirmeye yönelik çalışmaların çok büyük bir oranı polimer kompozit esaslı malzemeler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu amaçla kullanılabilir polimer kompozitler ile yüksek kalkanlama etkinliklerinin elde edilebilmesi için yüksek elektriksel iletkenliklerinin sağlanması, yani yüksek elektriksel iletkenliğe sahip polimer kompozitlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Genel olarak; yüksek iletkenliğe sahip bir polimer kompozitin hazırlanması için polimer faza katılan iletken dolgunun mümkün olduğunca yüksek oranda olması gerekmektedir ancak dolgu oranının artmasına bağlı olarak kompozitin darbe dayanımı, işlenebilirlik, kırılma gibi

özelliklerinin kötüleşmesi de dolgu oranı için kısıtlayıcı faktörlerdir. Bu yüzden konu ile ilgili literatür çalışmalarının birçoğunda maksimum iletkenliğin mümkün olan en düşük dolgu oranında sağlanması temel hedefi oluşturmaktadır. Ayrıca ürün geliştirilmesinde düşük üretim maliyetlerinin yanı sıra düşük kalınlıkta geniş frekans aralığında yüksek performansın elde edilmesi, ürünün kolay işlenebilir ve şekillendirilebilir olması ve kullanım koşullarındaki şartlara karşı uzun süre fiziksel ve kimyasal kararlılığını koruyabilmesi gibi ekstra özellikleri barındırması ürünün endüstriyel olarak da tercih edilmesinde etkili olmaktadır.

Tüm bu faktörler göz önünde bulundurularak tez çalışmasının ilk kısmında 2-8.2 GHz frekans aralığında en az 20 dB, 8.2-12.4 GHz aralığında en az 40 dB toplam kalkanlama etkinliğine sahip, toplam kalınlığı 5 milimetreyi geçmeyen, düşük yoğunluklu, çevresel kullanım şartlarında uzun yıllar kullanıma uygun mekanik ve fiziksel özelliklere sahip karbon esaslı polimer kompozit levhaların geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Çalışmalar sırasında sadece dolgu oranı ve tipiyle kalkanlama etkinlikleri arasındaki ilişkiler incelenmemiş çeşitli analiz ve modellemeler sonucunda kompozitin mikro-yapısı hakkında da öngörülerde bulunarak, mikro-yapı ile kalkanlama etkinliği performansı arasında bir ilişki kurulmaya çalışılmış böylece en yüksek kalkanlama performansının elde edilmesi için gerekli bileşim ve üretim yöntemi optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasının diğer bir araştırma konusu ise birçok askeri ve sivil hava araçların RADAR (*Radio Detection And Ranging*, Radyo Dalgaları ile Tespit ve Menzil Tayini) sistemlerinde kullanılan frekans aralığı 8.2-12.4 GHz'in (X-band) tamamında -20 dB ya da daha düşük yansımaya kaybı (*Reflection Loss*, RL) değerine sahip uçak, füze ve helikopter gibi ağırlığın da önemli olduğu araç ve ekipmanlarda kullanılacak, düşük yoğunluklu, geniş sıcaklık aralığında uzun süre fiziksel ve kimyasal mukavemetini koruyabilecek ince polimer kompozit esaslı RADAR soğurucu malzemelerin (RAM) geliştirilmesidir.

RAM'lar bir radar vericisi tarafından gönderilen belirli frekanstaki elektromanyetik dalgayı çok yüksek oranda soğurarak (ya da absorbe ederek) sinyalin geri dönmesini engelleyen böylelikle RADAR sisteminin yer tespitini zorlaştıran ya da imkânsız hale getiren malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Özellikle son yıllarda daha çok ilgi çeken ve araştırılan RADAR'a yakalanmayan uçak, füze, helikopter ve diğer taşıtların geliştirilmesinde de bu malzemeler kullanılmaktadır.

RAM geliştirilmesine yönelik yapılan bilimsel çalışmalar incelendiğinde başta manyetik ve karbon dolgulu polimer kompozitlerin yaygınca kullanıldığı görülmekle beraber manyetik dolguların yüksek yoğunlukları, karbon dolgularında çok dar frekans aralıklarında soğurma gerçekleştirebilmeleri temel kısıtlayıcı faktör olarak dikkat çekmektedir. Bu yüzden gerek bilimsel çalışmalarda gerekse endüstriyel uygulamalarda düşük yoğunluklu ve geniş frekans aralığında yüksek performans gösteren RAM geliştirilmesi her zaman önemli bir mühendislik problemi olmuştur.

Bu tez çalışması kapsamında da bu amacın sağlanabilmesi amacıyla öncelikle kullanılan dolgu tipine ve oranına göre polimer kompozitlerdeki mikro-yapısal özelliklerin ve soğurma performanslarının değişimi incelenerek mikro-yapı ile soğurma performansı arasındaki ilişki ortaya konmuştur. Daha sonra çeşitli karbon türevleri ve manyetik özellik taşıyan dolgularla polimer kompozitler farklı yaklaşımlarla hazırlanarak yüksek performans gösteren düşük yoğunluklu kompozit malzemelerin üretim formülasyonlarının belirlenmesine çalışılmıştır.

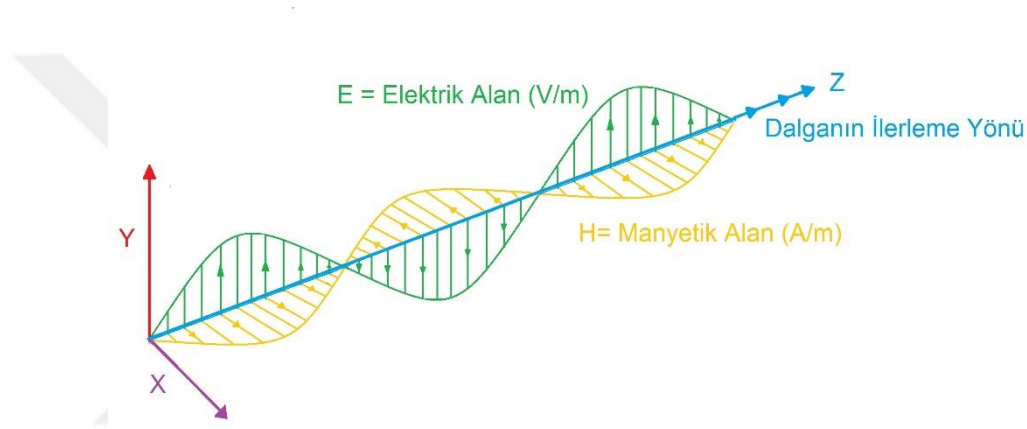
Çalışmalar sonucunda içerik ve tasarım açısından özgün, literatürdeki çalışmaların çok büyük bir çoğunluğundan daha yüksek performans gösteren, daha hafif kompozitlerin üretim formülasyonlarının belirlenmesi gerçekleştirilmiştir.

## 2. GENEL KISIMLAR

### 2.1. ELEKTROMANYETİK DALGALAR

#### 2.1.1. Temel Özellikleri ve Sınıflandırılması

Günümüz teknolojisinin görünmeyen ancak en çok kullanılan aracı olan elektromanyetik dalgalar yüklü bir parçacığın ivmeli hareketi sonucu oluşan, birbirine dik doğrultuda elektrik ve manyetik alan barındıran ve bu iki alanın oluşturduğu düzleme dik doğrultuda ışık hızı ile yayılan dalga çeşidi olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.1).

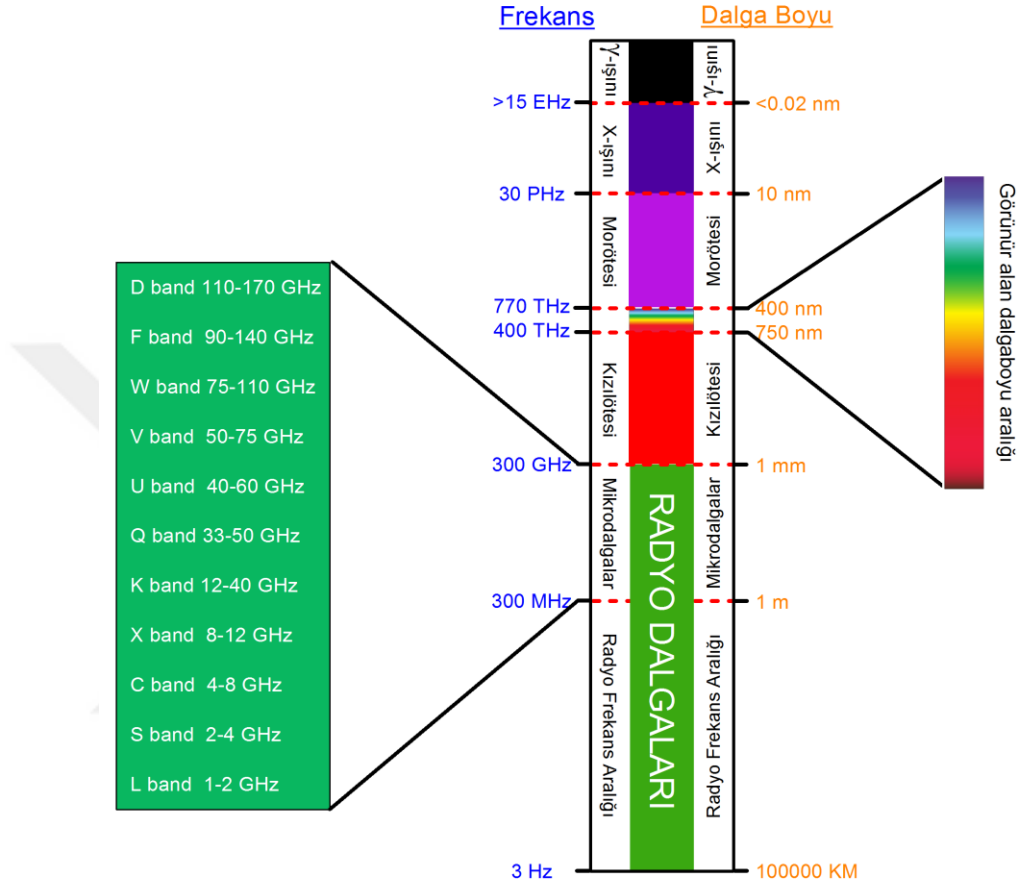


Şekil 2.1: Elektromanyetik dalganın bileşenleri ve ilerleme yönünün şematik gösterimi.

Elektromanyetik dalgalar taşıdıkları enerji, dalga boyu ve frekans değerlerine göre radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi dalgalar, görünür alan dalgaları, mor ötesi ve X-ışını dalgaları olmak üzere başlıca altı başlık altında incelenmektedir [1]. Farklı özelliklere sahip bu dalgaların frekans ve dalga boyu bilgileri Şekil 2.2’de verilen “*elektromanyetik spektrum*” da özetlenmiştir.

Spektrumun ilk kısmında yer alan ve 1800’lü yıllarda Heinrich Hertz tarafından indüksiyon bobininde üretilen dalgaların uzaktaki bir anten tarafından tespit edilmesi sonucu bulunan “*radyo dalgaları*”, kaynaklara göre değişiklik gösterse de genel olarak 1 metreden daha büyük dalga boyuna ve/veya 300 MHz’den daha küçük frekansa sahip olan elektromanyetik dalgalar olarak tanımlanmaktadır. Günümüzde FM (VHF2, 88-108 MHz) ve VHF3 (174-230 MHz) bandında yayın yapan radyo ve televizyonların karasal yayınlarında kullanılan bu dalgalar tuğla, duvar, tahta gibi iletken olmayan malzemelerin içerisinde kolayca geçebilmeleri ve

parazitlere karşı görece düşük hassasiyetleri sayesinde uzun yıllar boyunca radyo/televizyon sektöründe yaygınca kullanılmıştır. Günümüzde ise daha çok karasal radyo yayıncılığında kullanılmaya devam etmektedir.



Şekil 2.2: Elektromanyetik dalga spektrumu.

Bazı kaynaklara göre radyo dalgalarının alt başlığı olarak gösterilen bazı kaynaklarda ise ayrı bir kategori olarak verilen “mikrodalgalar” ise 1 metre ile 1 mm arasında değişen dalga boyuna ve/veya 300 MHz ile 300 GHz arasında değişen frekansa sahip olan elektromanyetik dalgalar olarak tanımlanmaktadır. Bu denli geniş bir frekans aralığını kapsamaması ve frekans aralığına göre çok farklı alanlarda kullanılması nedeniyle mikrodalgalar Şekil 2.2’ de verildiği gibi çeşitli alt başlıklar altında kategorize edilmektedir.

Kar, yağmur gibi meteorolojik olaylardan etkilenmemeleri, metallere üzerinden yansımaları ve hava ortamında kayıpsız bir şekilde ilerlemeleri sayesinde mikrodalgalar genel olarak televizyonların karasal yayınlarında da sıklıkla kullanılan UHF bandından (470-854 MHz)

başlayarak, cep telefonları, mikrodalga fırınlar, kablosuz modemler, GPS sistemleri ve birçok kablosuz iletişim aracının çalıştığı L ve S band frekans aralıklarını (1-4 GHz), birçok askeri ve sivil radar sistemlerinin çalıştığı X ve K band aralıklarını (8.2-40 GHz) ve son olarak uydu, uzaktan kontrol ve analiz cihazları gibi farklı teknik araçlarda kullanılan F ve D band aralıklarını kapsayarak günümüz elektromanyetik dalga uygulamalarının temelini oluşturmaktadır.

750 nm-1 mm arası dalga boyuna ve/veya 300 GHz-400THz arası frekansa sahip olan elektromanyetik dalgalar ise literatürde “kızılötesi (*infrared, IR*)” olarak adlandırılmaktadırlar. Kızılötesi dalgalar derecesine göre değişiklik göstermekle beraber sıcak cisimler tarafından üretilirler. Cismin sıcaklığına göre farklı frekanslarda salınan bu dalgalar termal kameralarla görünür dalga boyuna çevrilerek cisimlerin sıcaklıklarının uzaktan belirlenmesinde kullanılmaktadır. IR dalgalar ayrıca gece görüş kameralarında, proses kontrol ekipmanlarında, hızlı kurutma cihazlarında ve spektroskopi cihazlarında da yaygın şekilde kullanılmaktadır.

400-700 nm dalga boyu ve 430-770 THz frekans aralığına karşılık gelen ve insan gözü tarafından algılanabilen elektromanyetik dalgalar ise “Görünür alan dalgaları” olarak adlandırılırlar. Bu aralıkta değişen dalga boyuna göre insan gözü cisimleri farklı renklerde algılayabilmektedir. Örneğin 400 nm dalga boyuna sahip elektromanyetik dalga yayabilen nesnelere insan gözü tarafından mor renkte görülürken 700 nm dalga boyuna sahip elektromanyetik dalga yayan nesnelere ise kırmızı renkte görülmekte diğer renklerin ise bu iki dalga boyunun arasında değişmektedir.

10-400 nm dalga boyuna ya da 30-750 PHz frekansa sahip elektromanyetik dalgalar ise “Morötesi ya da ultraviyole” (UV) ışınları olarak adlandırılmaktadır. Güneşten gelen ışınların yaklaşık %10’unu oluşturan ve temel kaynağı güneş olan bu ışınlar belirli oranda maruz kalındığında insan sağlığına faydalı olmasına rağmen uzun süreli ve yüksek şiddette maruz kalmalarda önemli tehlikeler içermektedir. Elektromanyetik dalgaların iyonlaştırma özelliğinde de sınır oluşturan morötesi ışınların özellikle 121 nm’nin altındaki dalga boylarında havayı iyonlaştırabildiği ancak iyonlaştırma sırasında enerjisinin sönmülenerek yeryüzüne ulaşmasının engellendiği kaynaklarda bildirilmektedir. Yeryüzüne ulaşan görece daha yüksek enerjili morötesi ışınların ise vücutta istenmeyen çeşitli reaksiyonları tetikleyerek kanser gibi hastalıklara neden olabileceği bildirilmektedir.

Son olarak 0.02-10 nm arası dalga boyu aralığına sahip X-ışınları ve 10 pm'den daha düşük dalga boylarına sahip Gama ışınları ise yüksek enerjili ve insan sağlığı açısından risk oluşturan elektromanyetik dalgalar sınıfına girmektedir. X-ışınları güvenlik ve medikal uygulamalarında görüntüleme amaçlı kullanılırken, gama ışınları ise radyoaktif reaktörlerde ve nükleer bombalarda kullanılmaktadır.

### 2.1.2. Elektromanyetik Dalga Teorisi

Elektromanyetik dalgaların oluşumu ve farklı ortamlardaki yayılması ile ilgili birçok özellik 19.yy'da yaşamış İskoçyalı bilim insanı James Clark Maxwell tarafından geliştirilen ve günümüzde Maxwell denklemleri olarak bilinen dört temel denklemle incelenmektedir [1-3]. Elektromanyetik dalga teorisinin temelini oluşturan bu dört denklem Faraday, Gauss (elektriksel ve manyetik yükler için) ve Amper denklemlerinin beraber değerlendirilmesi ile elde edilmiştir.

Maxwell denklemlerinden ilki bir ortamdaki elektrik akı yoğunluğunun ( $D$ ) değişiminin yine ortamdaki elektrik yük yoğunluğunun ( $\rho_v$ ) değişimi ile ilişkisini ortaya koyan Maxwell-Gauss-1 (elektrik alanla ilgili) eşitliğidir (Denklem 2.1). Denklemde  $\rho_v$  kapalı bir alandaki yük yoğunluğunu,  $D$  ise bu kapalı alanı çevreleyen hacimdeki elektrik akı yoğunluğunu (Coulomb/m<sup>2</sup>) göstermektedir. Bu denklem noktasal olup belirli bir noktadaki elektrik akı yoğunluğunun o noktadaki elektrik yükü ile lineer bir değişim gösterdiğini belirtmektedir. Elektrik akı yoğunluğunun da " $D = E \cdot \epsilon$ " denklemi ile elektrik alanla ( $E$ ) olan ilişkisi göz önünde bulundurulursa bir ortamdaki elektrik alan değişmelerin o bölgedeki yük miktarıyla ilişkili olduğu sonucu çıkaracaktır.

$$\nabla D = \rho_v \quad (2.1)$$

Noktasal olan denklemin pratik uygulamasının anlaşılması adına denklem 2.1,  $V$  hacmine ve  $S$  sınır şartlarına sahip bir bölgeye uygulanırsa denklem 2.2 elde edilir. Bu denklem de teorik olarak sınırları belirlenmiş bir kontrol hacmindeki toplam yük miktarının ( $Q_{enc}$ ), bu hacmin yüzeyindeki elektrik akı yoğunluğuna eşit olduğu ortaya konulmaktadır. Ayrıca bu denklemden belirli bir hacimdeki toplam yükün pozitif olması durumunda hacimden dışarı doğru bir akı oluşacağı, negatif olması durumunda ise alana doğru bir akı meydana geleceği sonucu çıkmaktadır (Şekil 2.3(a,b)). Bu çıkarımlar ise elektrik alan çizgilerinin + yükten başlayarak –

yüke doğru hareket etmesini, aynı yüklerin birbirlerini itmesini ve zıt yüklerin birbirlerini çekmesini açıklamaktadır.

$$\int_V (\nabla \cdot D) dV = \int_V \rho_V dV \Rightarrow \int_S D \cdot dS = Q_{enc} \quad (2.2)$$

İkinci Maxwell denklemi ise Gauss yasasının manyetizma ile ilgili kısmından türetilmiştir ve kapalı bir alandaki toplam manyetik akı yoğunluğunun değişiminin ( $B$ , Wb/m<sup>2</sup>) her zaman sıfıra eşit olacağını belirtir (denklem 2.3) [1-3]. Bunun nedeni olarak ise bu değişime neden olacak elektriksel yüklere benzeyen tek kutuplu bir manyetik yükün var olmayışı gösterilir. Yasaya göre manyetik malzemeler kendiliğinden çift kutuplu olarak bulunurlar ve manyetik akı bu iki uç arasında gerçekleşir dolayısıyla toplam hacimdeki manyetik alan değişimi her zaman sıfır olur. Şekil 2.3' de ortamda farklı yükler bulunması durumundaki elektrik akımının ve manyetik akının değişimleri gösterilmiştir.

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.3)$$

**Şekil 2.3:** Sınırları belirlenmiş bir  $V$  kontrol hacmindeki toplam yükün pozitif ve negatif olması durumundaki elektrik alan akışı ile manyetik akının şematik gösterimi.

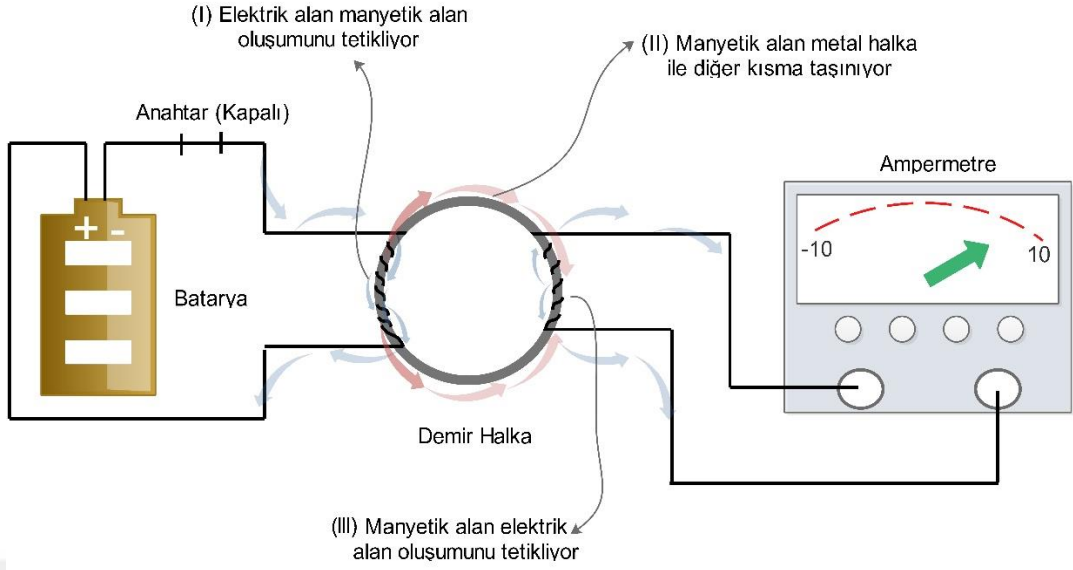
Üçüncü Maxwell denklemi ise manyetik akı yoğunluğunun (dolayısıyla manyetik alanın) zamanla değişiminin elektrik alan üzerindeki etkilerini ortaya koyan Maxwell-Faraday eşitliğidir ve denklem 2.4'deki gibi ifade edilmektedir [1-3]. Denklem Faraday'ın 1830'lu yıllarda gerçekleştirdiği ve Şekil 2.4'de şematik olarak gösterilen bir deney düzeneğinden yola



çıkılarak ortaya konmuş, yaklaşık 40 yıl sonra ise Maxwell tarafından diğer yasalarla birleştirilerek elektromanyetik dalgaların davranışların açıklanmasında kullanılan 4 temel denklemden biri haline gelmiştir.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.4)$$

Şekil 2.4’de verilene benzer bir deneysel düzenek kuran Faraday, anahtarı kapatarak elektrik akımının geçişine izin verdiğinde akımın şeklin sol kısmında kalan mavi yolu izleyerek bataryaya geri dönmeye rağmen ampermetrenin çok kısa süre içinde artarak bir maksimum noktayı gördüğü ve tekrar sıfır noktasına geri döndüğünü gözlemiştir. Sadece elektrik akımı üzerinden düşünüldüğünde akımın en kısa yoldan tekrar bataryaya dönmesi ve ampermetrede herhangi bir akım oluşmaması gerektiği halde Faraday gözlediği hareketlenmeyi, manyetik halkanın etrafına sarılı iletken kablolardaki akımın bir manyetik alan oluşturmasına, daha sonra bu alanın metal halka tarafından diğer tarafta sarılı kabloları taşıyarak burada tekrar elektrik alanına dönüşmesi ve bu elektrik alanının ampermetreyi hareketlendirmesi ile açıklamıştır. Anahtarın açılarak akımın kesilmesi durumunda ise ampermetre üzerindeki aynı kısa süreli hareket bu sefer tam ters yönde gerçekleşmiştir. Bu sonuçlardan Faraday günümüz temel elektromanyetik dalga kuramlarından biri olan elektrik alan değişiminin manyetik alan değişimine, manyetik alan değişiminin de elektrik alan değişimine neden olacağı kuramını ortaya atmıştır.



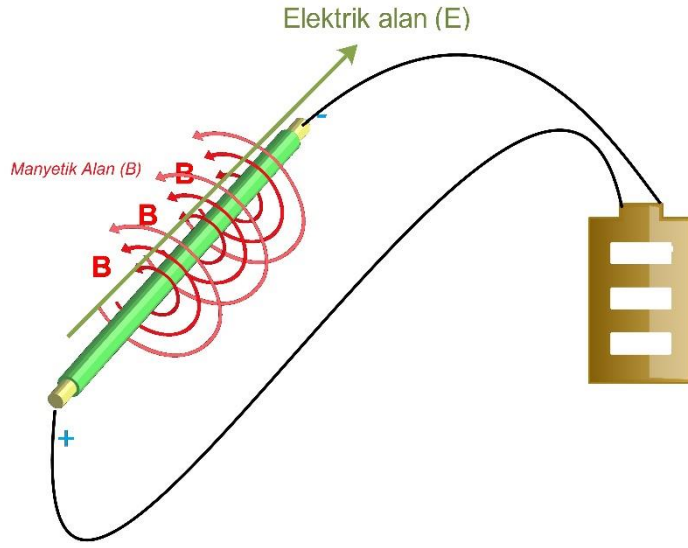
**Şekil 2.4:** Faraday deneyi düzeneği.

Dördüncü ve son Maxwell denklemi ise 1826'da André-Marie Ampere tarafından geliştirilen Ampere Yasası ile ilgilidir [1-3]. Matematiksel ifadesi denklem 2.5' de verilen yasaya göre iletken bir kablo üzerinde akım taşınması sırasında Şekil 2.5'deki gibi kabloyu saran bir manyetik alan oluşur. Diğer denklemler gibi noktasal olan bu denklemin fiziksel olarak daha anlaşılabilir formu olan integral hali ise denklem 2.6'de verilmiştir. Denkleme göre bütün kablo etrafında oluşan manyetik alan kabloda bulunan toplam yük ile orantılı olarak değişmektedir. Kablo etrafında dairesel şekilde oluşan manyetik alanın büyüklüğü ise denklem 2.7' ye göre hesaplanmakta ve kablodan uzaklaştıkça lineer şekilde azaldığı görülmektedir.

$$\nabla \times H = -\frac{\partial D}{\partial t} + J \quad (2.5)$$

$$\oint H \cdot dL = 2\pi r H = I_{enc} \quad (2.6)$$

$$H = \frac{I_{enc}}{2\pi r} \quad (2.7)$$



Şekil 2.5: Elektrik akımı taşıyan bir kabloda manyetik alan oluşumu.

### 2.1.3. Elektriksel ve Manyetik Özellikler Açısından Bir Ortamın Karakterize Edilmesi

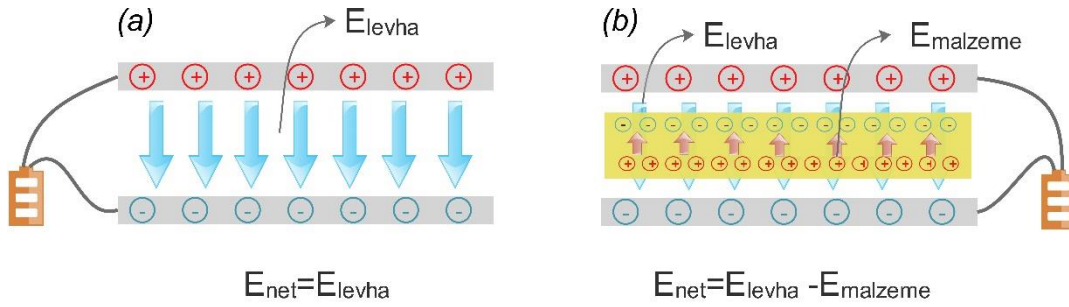
Elektromanyetik dalgalar boşlukta ışık hızında, geri yansımaksızın ve neredeyse kayıpsız bir şekilde ilerleme özelliğine sahiptir. Ancak bütün bu özellikler ilerlediği ortama ve ilerleme sırasında karşılaştığı ortamlara göre farklılık göstermekte, belirli şartlar altında dalganın geri yansımaya ya da sönmülenererek gücünü kaybetmesi gibi olaylar etkin hale gelebilmektedir. İyi bir EK ya da RAM geliştirilebilmesi için elektromanyetik dalgaların hangi ortamlarda nasıl tepkiler vereceği, bu tepkilerin ortam özelliklerinin değişimi ile hangi oranda değiştirilebileceği gibi parametreler detaylı bir şekilde ortaya konulmalıdır.

Genel bilgilerin bu bölümünde, belirli bir ortamda ilerleyen elektromanyetik dalganın bir malzemeye (ya da engele) çarpması durumundaki davranışları denklemleriyle ortaya konmuş ve iyi bir kalkan ya da RAM geliştirilmesi için gerekli malzeme özellikleri tartışılmıştır. Ancak bu matematiksel ifadelerin fiziksel karşılıklarının anlaşılabilmesi için elektromanyetikte bir ortamın ya da malzemenin karakterize edilmesindeki temel parametreler olan “*elektriksel geçirgenlik sabiti (permütivite,  $\epsilon$ )*” ve “*manyetik geçirgenlik sabiti (permeabilite,  $\mu$ )*” terimlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu yüzden öncelikle bu iki terim ayrıntılı bir şekilde açıklanmış daha sonra elektromanyetik dalganın farklı ortamlardaki yayılma özellikleri incelenmiştir.

*Permittivite ( $\epsilon$ )*; (+) ve (-) iki Coulomb yükü arasında oluşan bir elektrik alanına karşı, yükler arasında bulunan ortamın ya da malzemenin gösterdiği direnci belirten bir sayıdır [4].

Dielektrik katsayısı, elektriksel geçirgenlik katsayısı ve permitivite gibi farklı terimlerle isimlendirilen bu kavramın daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 2.6’da bir tarafı artı diğer tarafı eksi yüklerle yüklenmiş bir kapasitör şematik olarak gösterilmiştir.

Şekil 2.6(a)’da iki levhanın arasının vakum olduğu kabul edilirse artı yükten eksi yüke doğru akan bir elektrik alanı oluşur (mavi oklarla gösterilmiştir). Aynı düzende iki plaka arasında Şekil 2.6(b)’deki gibi bir (dielektrik) malzeme konulursa malzeme içerisindeki moleküller artı ve eksi kutuplar doğrultusunda polarize olur ve malzeme içerisinde levhalar tarafından oluşturulan elektrik alanının tersi yönde bir elektrik alan oluşur (kırmızı oklarla gösterilmiştir). Birbirine ters iki elektrik alanın sonucu olarak ise net elektrik alanda bir azalma görülür. Permitivite de tanım olarak malzemenin kendi içerisinde oluşturduğu bu ters elektrik alanın şiddetinin bir göstergesi olup sayısal olarak artması malzeme içerisindeki polarizasyonun ve buna bağlı olarak oluşan ters elektrik alan şiddetinin artması, levhalar arasındaki net elektrik alanının ise azalması anlamına gelmektedir.



Şekil 2.6: Kapasitör içerisinde oluşan elektrik alan şematik gösterimi.

Literatürde malzemelerin (ya da ortamların) mutlak permitivite değerlerinin ( $\epsilon$ ) daha karşılaştırılabilir olması ve pratik bir şekilde belirtilebilmesi için birimsiz bir büyüklük olan bağıl (relatif) permitivite ( $\epsilon_r$ ) değerleri kullanılır. Herhangi bir malzeme için bağıl permitivite değeri ( $\epsilon_r$ );  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m olan vakumun permitivite değeri ( $\epsilon_0$ ) referans alınarak denklem 2.8’e göre hesaplanır [1]. Tablo 2.1’de farklı malzemelerin bağıl permitivite değerleri özetlenmiştir.

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 \quad (2.8)$$

**Tablo 2.1:** Farklı malzemelerin dielektrik katsayıları.

Malzeme	$\epsilon_r$
Vakum	1
Hava	1.0006
PTFE(Teflon)	2.1
Polipropilen	2.2-2.36
Polistiren	2.4-2.7
Kâğıt	3.85
TiO <sub>2</sub>	86-173
BaTiO <sub>3</sub>	310

Öte yandan permitivite değerlerinin belirlenmesi sırasında uygulanan elektrik alan ile malzemenin polarize olması arasında bir zaman farkı (faz farkı) oluşur. Bu fark da permitivite değerinin reel ve sanal kısımlardan oluşan bir kompleks sayı olmasını gerektirir ve kaynaklarda kompleks permitivite değeri ( $\epsilon^*$ ) şeklinde gösterilir (Denklem 2.9) [1].

$$\epsilon^* = \epsilon' + j\epsilon'' \quad (2.9)$$

Kompleks permitivitenin reel kısmı ( $\epsilon'$ ) ortamda depolanabilen enerjiyi simgelerken, sanal kısmı ( $\epsilon''$ ) kaybolan enerjiyi belirtir ve malzemelerin belirli bir frekanstaki iletkenlik ( $\sigma_{ac}$ ) değerlerinin hesaplanmasında kullanılır (Denklem 2.10). Denklemde  $f$ , Hz cinsinden uygulanan frekansı gösterirken  $\epsilon_0$  boşluğun permitivite değerini göstermektedir.

$$\sigma = 2\pi f \epsilon_0 |\epsilon''| \quad (2.10)$$

Permitivitenin sanal kısmının reel kısmına oranı ise faz farkı ( $\tan\delta$ ) olarak tanımlanır ve elektromanyetikte malzemelerin sınıflandırılmasında temel gösterge olarak alınır. Tablo 2.2'de verilen bu sınıflandırmaya göre iletkenliği ve ( $\epsilon''/\epsilon'$ ) değeri sıfır olan mükemmel yalıtkan malzemelerde elektrik alanın kayıpsız şekilde ilerlediği kabul edilirken, ( $\epsilon''/\epsilon'$ ) değeri birden büyük malzemelerin içinde enerjisini kaybederek ilerlediği, sonsuz iletkenlikte olduğu kabul edilen mükemmel iletken malzemelerin içine ise giremediği ve tamamıyla geri yansıdığı kabul edilmektedir.

**Tablo 2.2:**  $\epsilon''/\epsilon'$  oranına göre malzemelerin sınıflandırılması.

$\epsilon''/\epsilon'$	Özelliği	İsmlendirmesi
0	Kayıpsız Ortam	Mükemmel Yalıtkan Malzeme
$\ll 1$	Düşük kayıplı ortam	Dielektrik Malzeme
$\approx 1$	Kayıplı ilerleme ortamı	-
$\gg 1$	Yüksek kayıp ortamı	İletken Malzeme
$\infty$	Yansıtıcı	Mükemmel iletken Malzeme

*Permeabilite* ya da diğer adıyla *manyetik geçirgenlik katsayısı* ( $\mu$ ) ise bir malzemenin (ya da ortamın) manyetik alana maruz kalması durumunda kendi içinde manyetik alan oluşturabilme kapasitesinin bir göstergesidir [1, 4]. Permittiviteye benzer şekilde bir malzemenin ya da ortamın permeabilite değeri belirtilirken de bağıl permeabilite ( $\mu_r$ ) değerleri kullanılmaktadır. Bağıl permeabilite değeri ( $\mu_r$ ) malzemenin ya da ortamında mutlak permeabilite değerinin ( $\mu$ ),  $4\pi \times 10^{-7}$  (Henry/m) olan boşluğun (ya da vakumun) permeabilite değerine ( $\mu_0$ ) oranlanmasıyla elde edilir (Denklem 2.11).

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \quad (2.11)$$

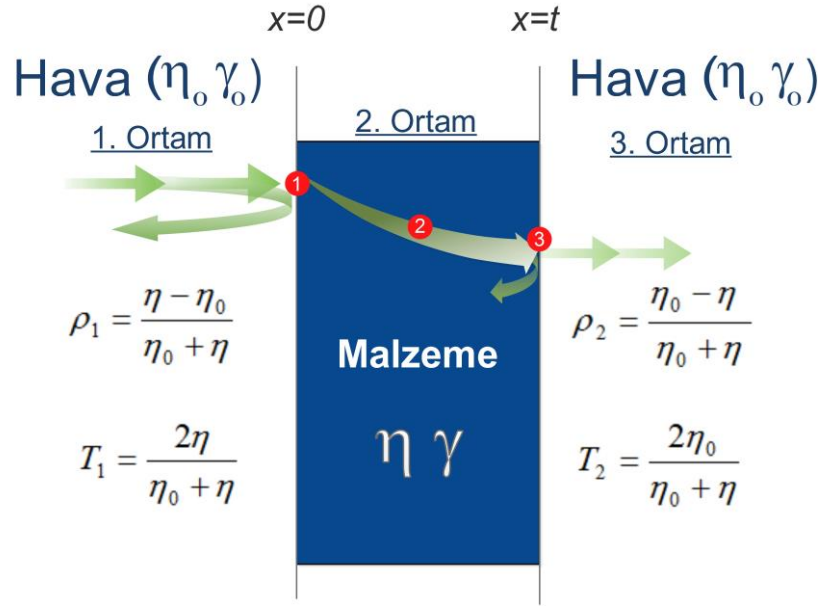
Bağıl permeabilite değeri ( $\mu_r$ ) birden küçük malzemeler “*diyamanyetik*” olarak isimlendirilir. Bu malzemeler manyetik alana maruz bırakılması durumunda manyetik alana ters yönde bir manyetik alan oluşturarak birçok cismin aksine manyetik alan kaynağı tarafından itilirler. Kendiliğinden manyetik özellik barındırmayan ancak bir manyetik alana maruz bırakıldığında geçici bir karşı manyetik alan oluşturarak itme kuvveti oluşturan bu malzemelere antimon ve bizmut örnek olarak gösterilebilir. Bağıl permeabilite değeri birden büyük ondan küçük malzemeler ise “*paramanyetikler*” olarak isimlendirilir [4]. Bu malzemelerde de kendiliğinden bir manyetik güç ya da alan oluşturma özelliği yoktur ancak dışardan bir manyetik alan uygulanması durumunda uygulanan manyetik alana doğru bir çekme kuvveti oluştururlar. Oluşan bu çekme kuvveti uygulanan manyetik alanın kalkmasıyla tamamen ortadan kalkar diğer bir deyişle bu malzemeler kalıcı manyetik özellik göstermezler.

Bağıl permeabilite değeri ondan büyük ( $\mu_r > 10$ ) malzemeler ise “ferromanyetik” olarak adlandırılırlar [4]. Demir, nikel ve kobaltın örnek olarak verilebileceği ferromanyetik malzemeler, manyetik alana maruz kalması durumunda manyetik alana doğru güçlü bir manyetik alan oluştururlar bu yüzden de manyetik özellik gösteren malzemeler tarafından güçlü bir şekilde çekilirler. Ancak ferromanyetiklerde oluşan bu çekme kuvveti paramanyetiklerin aksine uygulanan manyetik alanın kalkması durumunda dahi belirli bir süre devam eder.

#### **2.1.4. Elektromanyetik Dalganın Farklı Ortamlarda İlerlemesinin Matematiksel Analizi**

Elektromanyetik dalga daha önce de bahsedildiği gibi boşlukta ışık hızında, geri yansımaz ve neredeyse kayıpsız ilerleme özelliğine sahiptir. Ancak ortamın değişmesi yukarıda ayrıntıları ile açıklanan permitivite ve permeabilite değerleriyle bu değerlerden hesaplanan bazı parametrelere bağlı olarak ortamda ilerleyen elektromanyetik dalganın sönümlenmesine ya da geri yansımaya neden olabilmektedir.

Şekil 2.7’ de hava ortamından ilerlemekte olan bir elektromanyetik dalganın farklı bir ortama (ya da malzeme içine) geçişi ve daha sonra yine hava ortamına geçerek yoluna devam etmesi şematik olarak verilmiş, devam eden kısmında ise elektromanyetik dalganın malzeme içindeki (2 yolu boyunca) ve (sırasıyla 1 ve 3 noktasına karşılık gelen) hava-malzeme/malzeme-hava ara yüzelerindeki davranışlarının matematiksel analizi gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 2.7:** Elektromanyetik dalganın farklı ortamlarda ilerlemesi ile ilgili matematiksel ifadeler.

Elektromanyetik dalganın hava ortamından gelerek örneğe çarptığı “1” noktası için değerlendirme yapıldığında dalganın geri yansması ve malzeme içerisine girerek yoluna devam etmesi olmak üzere iki ihtimal bulunduğu görülmektedir. Bu ihtimallerden hangisinin hangi oranda gerçekleştiği ise sırasıyla denklem 2.12 ve 2.13’ de verilen yansımaya katsayısı ( $\rho_1$ ) ve geçirgenlik katsayısı ( $T_1$ ) olmak üzere iki parametre ile hesaplanır [5]. Denklemlerdeki  $\eta$ , malzemenin empedansını,  $\eta_0$  ise havanın empedansını göstermektedir.

Alternatif akım altındaki direnç ve reaktansın toplamı olarak tanımlanan empedans ( $\eta$  ya da  $Z$ ) denklem 2.14’ e göre permitivite ve permeabilite değerleri üzerinden hesaplanmaktadır ancak ortam ya da malzeme özellikleri dikkate alınarak hesaplamada bazı basitleştirmeler yapılmaktadır. Örneğin tamamıyla yalıtkan malzemeler için, denklemdeki iletkenlik ( $\sigma$ ) terimi ihmal edilerek denklem 2.15’ e indirgenmekte iken yüksek iletkenlikteki malzemeler için yüksek  $\sigma$  sayısının yanındaki “ $j\omega\epsilon$ ” ihmal edilerek denklem 2.16’ya indirgenmektedir [5]. Bu basitleştirmelerle iyi bir yalıtkan olan hava için empedans değeri 377 ohm olarak hesaplanır ve literatürde  $\eta_0$  ile gösterilir [5-7]. Bu bilgiler ışığında denklem 2.12 ve denklem 2.13 beraber değerlendirildiğinde bir malzemenin empedansı ( $\eta$ ) artarak havanın empedansına ( $\eta_0$ ) yaklaştıkça  $\rho_1$  azalacak,  $T_1$  ise artacaktır. Bu durumda da dalga yüzey üzerinden geri yansımaya yerine malzeme içine doğru gitmeyi tercih edecektir. Tam tersi durumda  $\eta$  değeri azaldıkça ve



$\eta_0$  değeri ile arasındaki fark arttıkça  $\rho_1$  artacak ve  $T_1$  azalacaktır. Bu durumda da dalga yüzey üzerinden geri yansımaya oranı, malzeme içine girmeye göre daha fazla olacaktır.

$$\rho_1 = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0 + \eta} \quad (2.12)$$

$$T_1 = \frac{2\eta}{\eta_0 + \eta} \quad (2.13)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (2.14)$$

$$\eta \approx \sqrt{j\omega\mu/\sigma} \quad (\text{iletkenler için}) \quad (2.15)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (\text{yalıtkanlar için}) \quad (2.16)$$

$t$  kalınlığındaki örnek ya da ortam içine girerek şekilde kırmızı renkle gösterilen 2 numaralı yolu izleyen elektromanyetik dalga ise  $t$  kalınlığı boyunca  $e^{-\gamma t}$  fonksiyonuna göre sönümlenerek ilerler [5]. Fonksiyondaki  $\gamma$ , denklem 2.17’de formülü verilen ve kompleks bir büyüklük olan ilerleme sabitini (*propagation constant*,  $\gamma$ ) gösterir. İlerleme sabitinin reel kısmını dalganın büyüklük değerindeki azalmaları gösteren “sönümlenme katsayısı ( $\alpha$ )” (denklem 2.18) oluştururken sanal kısmını dalganın faz değerindeki değişimleri gösteren “faz sabiti ( $\beta$ )” oluşturmaktadır (denklem 2.19). Denklem 2.17 ve 2.18’deki  $\omega$ , açılal frekans değerini göstermekte olup  $\omega=2\pi f$  bağıntısına göre Hertz (Hz) birimindeki frekans değerinden hesaplanır.

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} \quad (2.17)$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1 \right]} \quad (2.18)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right]} \quad (2.19)$$

Dalğanın malzeme içinde karşılaştığı son yüzey ise tekrar hava ortamına çıkacağı 3 numaralı noktanın bulunduğu ara yüzeydir. Burada davranışı ortaya koyan denklemler dalğanın 1 numaralı noktada gerçekleşen yansıma ve geçirgenlik katsayısı ile ilgili verilen denklemlerin simetriğidir (Denklem 2.20-2.21).

$$\rho_2 = \frac{\eta_0 - \eta}{\eta_0 + \eta} \quad (2.20)$$

$$T_2 = \frac{2\eta_0}{\eta_0 + \eta} \quad (2.21)$$

Bu denklemlerden yola çıkarak Şekil 2.7’de verilen örneği geçmeyi başarabilen elektrik alan yoğunluğu ( $E_T$ ) denklem 2.22’de verilmiştir. Denklemde  $E_1$ , örneğe gelen elektrik alan büyüklüğünü,  $T_1$  ve  $T_2$  birinci ve ikinci yüzeylerdeki geçirgenlik katsayılarını,  $e^{-\gamma t}$  ise dalğanın örnek tarafından soğurulması (absorplanması) nedeniyle gerçekleşen kayıp oranını göstermektedir. Bu denklemde 1 ve 2 numaralı yüzeylerde gerçekleşen ve birçok çalışmada, etkisinin çok düşük olması sebebiyle, ihmal edilen çoklu yansıma etkisi verilmemiştir. Çoklu yansıma kayıpları dalğanın ortam değiştirdiği yüzeylerde görülen bir olaydır ve dalğanın zayıflamasına neden olacağı gibi bazı durumlarda negatif etkileri de söz konudur. Bu parametrenin de dâhil edildiği toplam elektrik alan yoğunluğu ise, denklem 2.23’de verilmiştir.

$$E_T = E_1 T_1 e^{-\gamma t} T_2 \quad (2.22)$$

$$E_T = E_1 T_1 e^{-\gamma t} \sum (-\rho_1 \rho_2 e^{-2\gamma t})^m T_2 \quad (2.23)$$

Denklem 2.24 - 2.26’ da, denklem 2.23’ den çıkarak bir malzemede elde edilen toplam geçirgenlik ( $\hat{P}_T$ , *transmittance*), yansıtma ( $\hat{P}_R$ , *reflectance*) ve absorbans ( $\hat{P}_A$ ) katsayılarının formülleri verilmiştir. Günümüzde de literatürde kabul edilen ve bir malzemenin

elektromanyetik kalkanlamadaki etkinliğinin göstergesi olan kalkanlama etkinliği (*shielding effectiveness*, SE) sayıları da bu denklemler üzerinden hesaplanmaktadır.

$$\hat{P}_T = \frac{P_T}{P_I} = \left| \frac{T_1 T_2 e^{-\gamma}}{1 - \rho_1^2 e^{-2\gamma}} \right|^2 \quad (2.24)$$

$$\hat{P}_R = |\Gamma^2| = \left| \frac{\rho_1 (1 - e^{-2\gamma})}{1 - \rho_1^2 e^{-2\gamma}} \right|^2 \quad (2.25)$$

$$\hat{P}_A = 1 - \hat{P}_T - \hat{P}_R \quad (2.26)$$

## 2.2. ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA

Elektromanyetik kalkanlama için evrensel olarak kabul edilmiş bir tanımlama bulunmamakla beraber elektromanyetik dalgaların belirli bir alana girmemesi veya belirli bir alandan çıkmaması için uygulanan izolasyon işlemi olarak tanımlanabilir. Bu izolasyon işleminin sağlanmasında kullanılan fonksiyonel malzemeler ise “*elektromanyetik kalkan*” olarak isimlendirilmektedir.

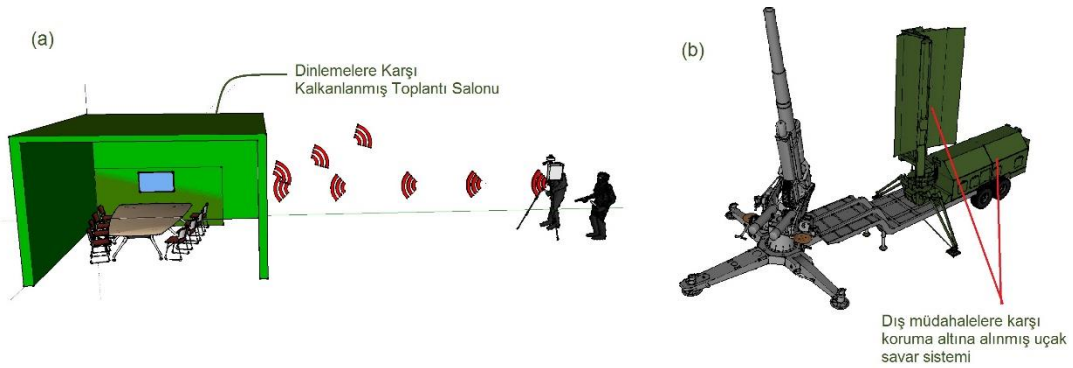
Elektromanyetik kalkanlamanın kullanıldığı birçok uygulama bulunmaktadır. Bunlardan biri hassas elektronik cihazların çevrelerindeki diğer elektrikli cihazların neden olduğu parazitlenmelerden korunmasıdır (*electromagnetic interference, EMI, shielding*) [8-11]. Elektronik cihazlar ve akım taşıyan kablolar etrafa belirli oranda elektromanyetik dalga yayılımı yaparlar. Bu dalgalar ise hassas cihazlar üzerine parazitlenmelere neden olur. Cep telefonlarının özellikle radyo ve hoparlörlerde oluşturduğu ses bozuklukları bu parazitlenmelere örnek olarak gösterilebilir. Bu parazitlenmelerin engellenmesi için ise salınım yapan ekipmanların ya da parazit oluşan cihazların kasalarında bu dalgaların geçişini engelleyebilen malzemelerin kullanılması gerekmektedir.

Öte yandan özellikle analiz laboratuvarlarında yüksek frekans ile çalışan cihazların bulunduğu odaların ya da bu odalarda çalışan teknikerlerin bulunduğu kabinlerin izolasyonu ile elektromanyetik dalgalara karşı hassasiyet gösterebilecek hamile ve yeni doğan bebeklerin bulunduğu ünitelerin izolasyonu elektromanyetik kalkanlamanın sağlık sektöründeki uygulamalarına örnek olarak verilebilir.

Cep telefonu ve telsiz gibi cihazların rahatsızlık vermemesinin istendiği tiyatro ve sinema salonu ile bebeklerin daha huzurlu bir ortamda kalmaları amacıyla bebek odalarında kullanımı ise sivil kullanımlara örnek olarak gösterilmektedir.

Son olarak elektromanyetik kalkanlama uygulamalarının önemli şekilde kullanıldığı bir diğer sektör ise savunma/güvenlik sektörüdür. Stratejik toplantıların yapıldığı salonlar ile makam odalarının gizlice yapılan dinlemelere karşı, önemli bilgilerin saklandığı ana bilgisayar odalarının veri hırsızlığına karşı, stratejik önem arz eden askeri cihazların kontrol ünitelerinin uzaktan kontrole karşı koruma altına alınması uygulamaları elektromanyetik kalkan özelliğine sahip malzemelerin bu sektördeki önemli kullanım alanlarıdır.

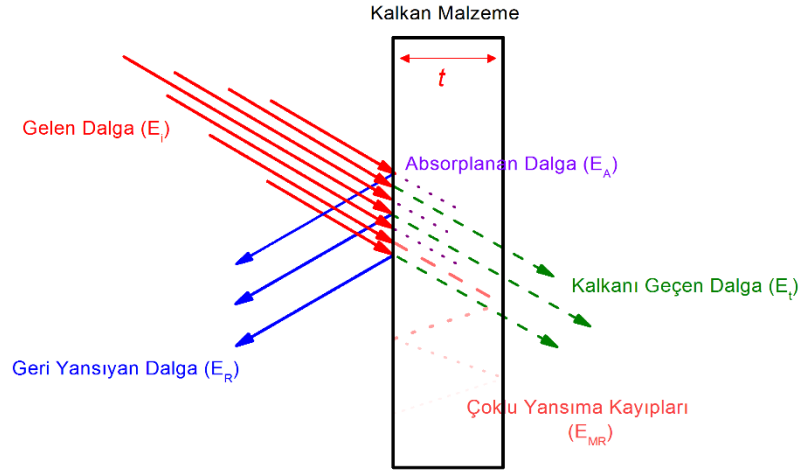
Şekil 2.8(a)'da elektromanyetik kalkan malzemelerle kaplanarak "böcek" diye tabir edilen dinleme cihazlarıyla dışarıdan yapılan dinlemelere karşı koruma altına alınmış bir oda, Şekil 2.8(b)'de ise yine elektromanyetik kalkan özellikli malzemeler ile kontrol ünitesi dış müdahalelere karşı koruma altına alınmış bir uçak savar sistemi şematik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 2.8:** (a)Toplantı salonunu ve (b)uçak savar kontrol ünitesinin elektromanyetik dalgalara karşı izolasyon uygulamaları.

### 2.2.1. Elektromanyetik Kalkanlamanın Mekanizması

Elektromanyetik kalkanlama temel olarak, elektromanyetik dalganın kalkan olarak kullanılan malzemenin yüzeyinden geri yansıtılması, malzeme içinde soğurulması ve yine malzeme içinde çoklu yansıtılması olmak üzere üç mekanizma ile gerçekleşmektedir (Şekil 2.9) [12-14]. Bu mekanizmaların etkinliği ise kalkan malzemenin elektriksel/manyetik özelliklerine, kalınlığına ve dalganın frekansına bağlı olarak değişiklik göstermektedir.



**Şekil 2.9:** Elektromanyetik dalga kalkanlamada etkili üç mekanizmanın şematik gösterimi.

Bir malzemenin toplam kalkanlama etkinliği ( $SE_T$ ), kalkanı geçen elektromanyetik dalganın gücünün kalkana gelen elektromanyetik dalganın gücüne oranının logaritmasının 10 katına ya da elektrik/manyetik alan kuvvetinin logaritmasının 20 katına karşılık gelmektedir (denklem 2.27) ve malzeme yüzeyinden gerçekleşen yansıma dolayısıyla meydana gelen kalkanlamanın ( $SE_R$ ), malzeme içinde gerçekleşen absorplama kaynaklı kalkanlamanın ( $SE_A$ ) ve çoklu yansılardan kaynaklı kayıpların ( $SE_{MR}$ ) toplamıdır (denklem 2.28) [4, 12, 13]. Kalkanlama etkinliğini gösteren bütün SE değerleri ( $SE_T$ ,  $SE_A$ ,  $SE_R$  ve  $SE_{MR}$ ) için desibel (dB) birimi kullanılmaktadır. Matematiksel olarak 10 dB bir dalganın %90'ının, 20 dB ise %99'ünün kalkanlanabildiği anlamına gelmekte olup birçok ticari uygulamada 20 dB kalkanlama etkinliği yeterli görülmekte iken yüksek performans istenen uygulamalarda ise 40 dB ve daha üzeri kalkanlama etkinlikleri istenmektedir [12, 15, 16].

$$SE_T(dB) = 10 \log \left( \frac{P_T}{P_I} \right) = 20 \log \left( \frac{H_T}{H_I} \right) = 20 \log \left( \frac{E_T}{E_I} \right) \quad (dB) \quad (2.27)$$

$$SE_T = SE_A + SE_R + SE_{MR} \quad (dB) \quad (2.28)$$

Denklem 2.27’de ki  $P_T/P_I$  oranı ise daha önce verilen denklem 2.24’e göre hesaplanarak  $SE_T$ ’nin son hali olan denklem 2.29 elde edilmektedir.

$$SE_T = -10\log_{10}(\hat{P}_T) = -20\log\left|\frac{T_1T_2e^{-\gamma}}{1-\rho_1^2e^{-2\gamma}}\right| \quad (\text{dB}) \quad (2.29)$$

Diğer kalkanlama etkinlikleri  $SE_R$ ,  $SE_A$  ve  $SE_{MR}$  ise denklem 2.29’ un ilgili kısımlarının parçalanması şeklinde bulunur ve bu parçalama işlemi literatürde “*Schelkunoff Decomposition*” olarak bilinir [5, 17, 18]. *Schelkunoff Decomposition*’a göre elde edilen  $SE_R$ ,  $SE_A$  ve  $SE_{MR}$  değerleri sırasıyla denklem 2.30 - 2.32’de verilmiştir.

$$SE_R = -20\log_{10}|T_1T_2| = -20\log|1-\rho_1^2| \quad (\text{dB}) \quad (2.30)$$

$$SE_A = -20\log_{10}|e^{-\gamma}| \quad (\text{dB}) \quad (2.31)$$

$$SE_{MR} = 20\log_{10}|1-\rho_1^2e^{-2\gamma}| \quad (\text{dB}) \quad (2.32)$$

Bu denklemler kalkanlama etkinliklerinin doğrudan permitivite ve permeabilite değerleri üzerinden hesaplanabilmesi için daha önce denklem 2.17 - 2.21’de verilen bağıntılardan faydalanılarak yeniden düzenlenmiş ve denklem 2.33 – 2.35’de verilen denklemler elde edilmiştir [4, 5, 19].  $SE_{MR}$  değerinin GHz seviyesindeki ölçümlerde ve milimetre seviyelerindeki örneklerde 1 dB değerinden çok daha düşük değerlere sahip olması nedeni ile pratik değerlendirmelerde ihmal edilmektedir.

$$SE_R(\text{dB}) = -20\log\left(\frac{\eta_0}{\eta_s}\right) = 39.5 + \frac{10\log\sigma}{2\pi f\mu} \quad (2.33)$$

$$SE_A = -8.68t\sqrt{\sigma \times f \times \mu} \quad (2.34)$$

$$SE_{MR} = 20\log_{10}|1-\rho_1^2e^{-2\gamma}| \quad (2.35)$$

Bir malzemenin pratikte etkili olan absorplama ve yansıtma mekanizmaları üzerinden gerçekleşen kalkanlamalarının hangi parametrelere bağlı olarak nasıl değiştiğini

değerlendirmek amacıyla denklem 2.33 – 2.34’de verilen bağıntılar matematiksel olarak incelendiğinde elektromanyetik dalgayı yansıtma performansının ( $SE_R$ ) artan iletkenlikle arttığı, frekans ve permeabilite değeriyle ise azaldığı görülürken, kalınlıktan bağımsız hareket ettiği görülmektedir. Soğurma esaslı gerçekleşen kayıpların ( $SE_A$ ) ise, kalınlığa ( $t$ ), elektriksel iletkenliğe, elektromanyetik dalganın frekans değerine ve permeabilite değerlerine bağlı olarak artacağı görülmektedir.

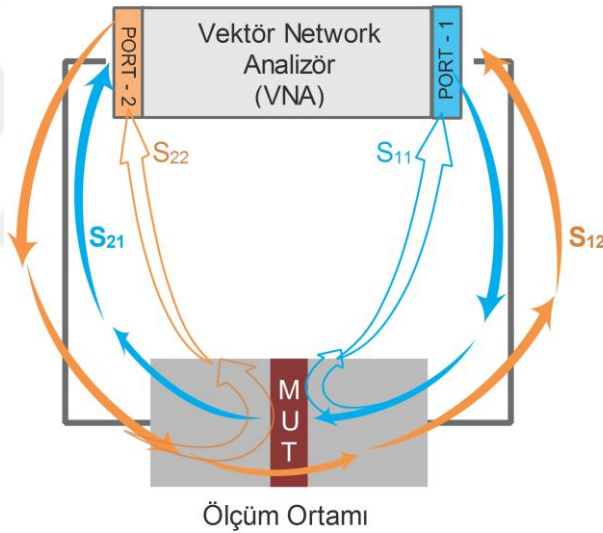
### 2.2.2. Elektromanyetik Kalkanlama Etkinliklerinin Belirlenmesi

Literatürde yaygın kullanılan yöntemlere göre elektromanyetik kalkanlama etkinliklerinin ( $SE_T$ ,  $SE_A$  ve  $SE_R$ ) hesaplanmasında öncelikle, hedef frekans aralığında permitivite ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ) ve permeabilite ( $\mu'$ ,  $\mu''$ ) değerleri belirlenir. Elde edilen permitivite ve permeabilite değerleri denklem 2.33 – 2.35’de yerine konularak  $SE_A$ ,  $SE_R$  ve  $SE_{MR}$ , bu değerlerin toplanmasıyla da  $SE_T$  hesaplanır.

Permitivite ve permeabilite değerlerinin özellikle elektromanyetik dalga kalkanlama uygulamaları için önemli olan GHz seviyelerindeki değerleri ise saçılma (S) parametreleri olarak adlandırılan kompleks sayılar üzerinden çeşitli algoritmalar kullanılarak hesaplanmaktadır [20-23]. Saçılma parametreleri dış etkilerden yalıtılmış bir ölçüm ortamında örnek üzerine gönderilen bir elektromanyetik dalganın test örneğini geçmesi ya da geri yansımaları durumundaki büyüklük ve faz açısı değerlerindeki değişimleri gösteren bir sayıdır. Saçılma parametrelerinin deneysel olarak belirlenmesi ise malzemenin (*material under test*, *MUT*) katı toz, levha, film ya da sıvı olmasına göre farklı yöntemlerle gerçekleştirilmektedir [24]. Tez kapsamında geliştirilen ürünlere benzer şekilde katı film ya da levha formundaki örneklerin GHz seviyelerindeki frekanslardaki saçılma parametrelerinin belirlenmesinde yalıtılmış oda, dalga kılavuzu ve koaksiyel hat iletim tekniği olmak üzere üç yöntemin daha çok tercih edildiği görülmektedir. Teorik olarak aynı olan ancak örnek özelliklerine göre farklılıklar gösteren bu üç yöntemde de test düzeneği istenilen frekans aralığına uygun bir “vektör network analizör” (VNA) ve testi gerçekleştirilecek örneğin yerleştirildiği, dış ortamdaki elektromanyetik dalgaların ölçümü etkilemesine karşı bir kalkan görevi görebilecek ölçüm ortamından oluşmaktadır (Şekil 2.10).

Ölçüm ortamında ve VNA’da bulunan giriş/çıkış (port) sayısına bağlı olarak değişmekle beraber klasik olarak 2 adet port barındıran bir ölçüm ortamı ve VNA için dört adet saçılma parametresi ( $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$ ) mevcuttur. Saçılma parametrelerindeki alt indisler dalganın çıkış

ve varış noktaları hakkında bilgi vermektedir. Örneğin  $S_{11}$ , cihazın 1 numaralı portundan çıkıp tekrar 1 numaralı portuna geri dönen elektromanyetik dalgaları simgelerken,  $S_{12}$ , 2 numaralı porttan çıkıp örneği geçerek 1 numaralı porta varabilen elektromanyetik dalgaları temsil etmektedir. Dolayısıyla  $S_{11}$  ve  $S_{22}$  örneğin elektromanyetik dalgayı geri yansıtma kapasitesi ile ilişkilirken,  $S_{12}$  ve  $S_{21}$  ise toplam kalkanlama etkinliği ile ilgilidir. Şekil 2.10'da saçılma parametreleri çıkış ve varış noktalarına göre şematik olarak açıklanmıştır. Matematiksel olarak ise,  $S_{11}$  ve  $S_{22}$  örnek üzerinden geri yansıyan elektromanyetik dalganın gücünün örnek üzerine gelen elektromanyetik dalganın gücüne oranını gösterirken,  $S_{12}$  ve  $S_{21}$  ise örneği geçmeyi başarabilen elektromanyetik dalganın gücünün örnek üzerine gelen dalganın gücünü gösterir. Malzemelerin homojen ya da izotropik olduğu varsayıldığında  $S_{11}=S_{22}$  ve  $S_{12}=S_{21}$  varsayımı yapılmaktadır ve hesaplama işlemlerinde hangisinin kullanıldığına bir önemi bulunmamaktadır.



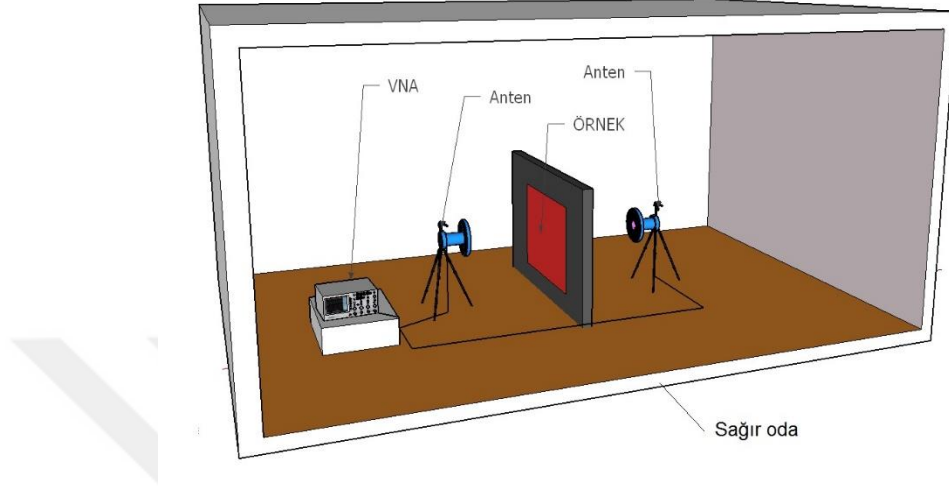
Şekil 2.10: Saçılma parametreleri şematik gösterimi.

### 2.2.2.1. Yalıtılmış Oda Test Yöntemi ile Saçılma Parametrelerinin Belirlenmesi

Yalıtılmış oda yöntemi ölçüm ortamının dış ortamdaki tamamen izolasyonunu sağlayan bir sağır oda, ölçüm alınması istenen frekans aralığına göre tasarlanmış antenler ve bir vektör network analizör (VNA)'den oluşmaktadır (Şekil 2.11). Yalıtılmış oda yöntemi geniş frekans aralığındaki ölçümlerin alınabilmesi ve gerçek uygulamalar ile daha tutarlı sonuçların elde edilmesi gibi avantajlarına rağmen ölçüm ortamının dış ortamdaki elektromanyetik dalga yoğunluğundan etkilenmemesi için sağır oda (*anechoic chamber*) şeklinde izole edilme



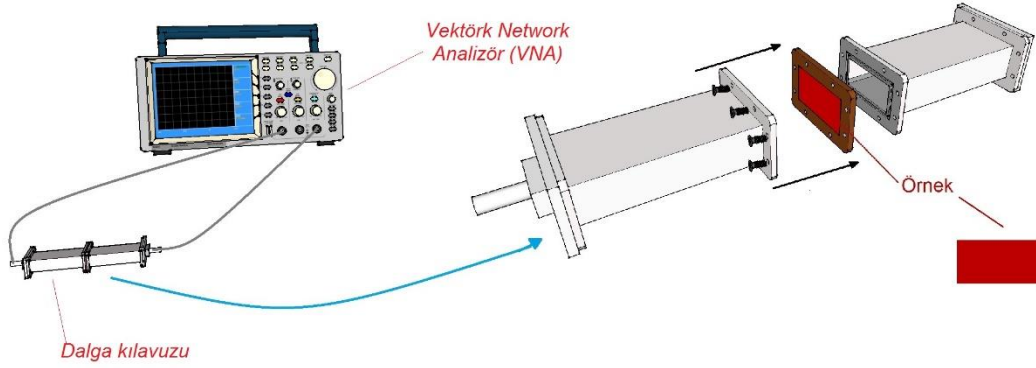
zorunluluğu ve frekans aralıklarına göre değişen anten ve aksesuarlar nedeniyle yüksek kurulum maliyetleri ve ölçüm yapılan frekans aralığına bağlı olarak değişen büyük örnek boyutları gerekliliği bu yöntemin başlıca dezavantajlarını oluşturmaktadır [13, 24].



Şekil 2.11: Yalıtılmış oda yöntemi şematik gösterimi.

#### 2.2.2.2. Dalga Kılavuzu Yöntemiyle Saçılma Parametrelerinin Belirlenmesi

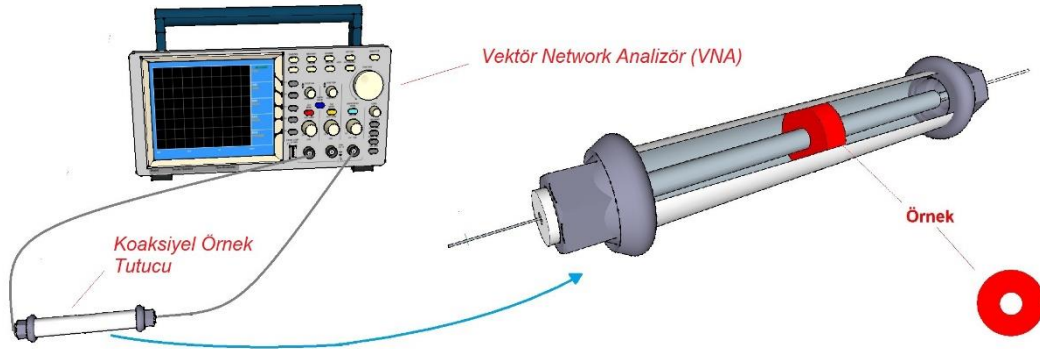
Yaygınca kullanılan bir diğer yöntem olan dalga kılavuzu yöntemi ise VNA ve ölçüm alınmak istenen frekans aralığına göre özel olarak tasarlanmış bir dalga kılavuzundan oluşmaktadır (Şekil 2.12). Örnek hazırlamasının/yerleştirmesinin kolay olması ve film ya da levha formundaki küçük boyutlu örnekler ile ölçüm yapılabilmesi gibi avantajları olan dalga kılavuzu ölçüm tekniğinin tek dalga kılavuzu ile çok dar frekans aralığında ölçüm yapılabilmesi, geniş frekans aralığında ölçüm alınabilmesi için birçok dalga kılavuzunun gerekmesine bağlı olarak artan kurulum maliyetleri ve her dalga kılavuzu için ayrı bir test örneği hazırlama zorunluluğu bu yöntemin dezavantajlarını oluşturmaktadır [13, 24].



Şekil 2.12: Dalga kılavuzu yönteminin şematik olarak gösterimi.

### 2.2.2.3. Koaksiyel Hat İletim Tekniğiyle Saçılma Parametrelerinin Belirlenmesi

Dalga kılavuzuna benzer bir diğer yöntem olan koaksiyel hat yöntemi ise Şekil 2.13’de şematik olarak verildiği gibi bir VNA ve buna bağlı bir koaksiyel örnek tutucu dan oluşmaktadır. Tek bir örnek ve ölçüm ortamı (koaksiyel örnek tutucu) ile geniş frekans aralığında (1-18 GHz arası gibi) ölçüm alınabilmesi ve buna bağlı olarak daha düşük kurulum maliyeti avantajına karşın test örneğinin boyutlarının küçük olması ve örnek hazırlama aşamasındaki hata paylarının sonuçları önemli şekilde etkilemesi yöntemin dezavantajını oluşturmaktadır [13, 24].



Şekil 2.13: Koaksiyel hat yönteminin şematik olarak gösterimi.

### 2.2.3. Elektromanyetik Kalkanlamada Kullanılan Malzemeler

Elektromanyetik kalkanlama etkinliklerinin permitivite ve permeabilite değerlerine bağlı olarak hesaplanmasının verildiği denklem 2.33 - 2.35 incelendiğinde yüksek iletkenlikteki metaller, karbon türevleri [25-28], iletken polimerler [29-33] ve polimer kompozitlerle [9, 11, 34-37] yüksek permeabilite değerine sahip manyetik malzemelerin [38-40] elektromanyetik kalkan olarak kullanılabilmesi değerlendirilebilir. Bu malzemeler arasında ise yüksek performansları nedeniyle metaller ve karbon türevleriyle; düşük maliyetleri, seri üretime uygunlukları ve fiziksel avantajları nedeniyle de iletken polimer kompozitler diğer alternatiflere göre öne çıkmakta ve daha yaygın olarak tercih edilmektedirler.

Tablo 2.3’de yaygın olarak kullanılan bazı metal ve alaşımlar için kalkanlama performansının hesaplanmasında kullanılan bağıl iletkenlik değerleri ( $\sigma_r$ , referans olarak bakır alınmıştır), bağıl permeabilite değerleri ( $\mu$ ),  $SE_R$  üzerinde etkili ( $\sigma \cdot \mu$ ) ve  $SE_A$  üzerinde etkili ( $\sigma/\mu$ ) değerleri özetlenmiştir [38, 41].

Bu değerlerden yola çıkarak 2 mm kalınlığındaki bir bakır levha (iletkenliği  $5.7 \times 10^7$  S/m) için 100 MHz frekans değerindeki  $SE_A$  66 dB,  $SE_R$  88 dB ve  $SE_T$  değeri için 154 dB değerinin elde edileceği görülmektedir. Benzer şekilde diğer metaller için de yapılan hesaplama sonuçları da özellikle MHz ve GHz seviyelerindeki kalkanlamalarda birçok bilimsel ve endüstriyel uygulamanın gereksinimlerinin (>20 dB) çok üzerinde performansların elde edilebileceğini göstermektedir. Farklı metal tipleri için elektriksel iletkenlik ve permeabilite değerlerinden yola çıkarak etkili olan kalkanlama mekanizması değerlendirildiğinde ise yüksek iletkenliğe sahip gümüş ve bakır için yansıtma mekanizmasının etkin olduğu, yüksek permeabilite değerine sahip nikel için ise absorplama mekanizmasının daha etkili olduğu görülmektedir.

**Tablo 2.3:** Bazı metallerin bağıl elektriksel iletkenlik ve manyetik geçirgenlik değerleri.

Malzeme	$\sigma_r$	$\mu$	$\sigma \cdot \mu$	$\sigma/\mu$
Gümüş	1.05	1	1.05	1.05
Bakır	1.00	1	1.00	1.00
Altın	0.70	1	0.70	0.70
Alüminyum	0.61	1	0.61	0.61
Pirinç	0.26	1	0.26	0.26
Bronz	0.18	1	0.18	0.18
Kalay	0.15	1	0.15	0.15
Kurşun	0.08	1	0.08	0.08
Nikel	0.20	100	20.00	$2 \times 10^{-3}$
Paslanmaz çelik (430)	0.02	500	10.00	$4 \times 10^{-5}$

Yüksek kalkanlama etkinliklerine sahip olan metaller, fiziksel özellikleri ve uygulanabilirlikleri açısından değerlendirildiklerinde ise yüksek maliyetleri ve yoğunlukları, uygulama/üretim zorlukları ve oksidasyona bağlı olarak kalkanlama özelliklerinin zamanla azalması gibi önemli dezavantajlara sahiptir ve bu yüzden hem endüstriyel uygulamalarda hem de bilimsel çalışmalarda tercih edilmemektedir [13].

Bahsedilen dezavantajlarının azaltılması amacıyla görece düşük yoğunluğa ve maliyete sahip, kolay işlenebilen, korozyon riski bulunmayan karbon türevleri bir alternatif olarak görülmüş ancak karbon siyahı, karbon elyaf, grafit ve grafen gibi farklı formları bulunan karbon türevlerinden, grafit ve bazı grafit türevlerinin haricindekilerin herhangi bir taşıyıcı faz ya da bağlayıcı kullanılmaksızın çevresel şartlara dayanıklı bir ürün haline getirilememesi nedeniyle bu ürünlere ait bilimsel ya da ticari uygulamalar da geliştirilememiştir.

Grafit levhaların kalkanlama etkinliklerinin incelenmesi amacıyla Luo ve Chung tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada esnek grafit levhanın 1-2 GHz aralığındaki kalkanlama etkinliği aynı kalınlıktaki nikel ve bakır metallerinin kalkanlama etkinlikleri ile karşılaştırılmıştır [26]. Sadece 1-2 GHz aralığında elde edilen maksimum toplam kalkanlama etkinliği ( $SE_T$ ) değerlerinin verildiği çalışmada aynı kalınlıktaki (3.1 mm) örneklerde grafit için 129.4 dB, bakır için 100.6 dB ve nikel için 85.8 dB değerlerinin elde edildiği bildirilmiştir. Aynı çalışmada ayrıca farklı formlardaki grafitlerin kalkanlama özellikleri karşılaştırılmış ve en yüksek performansın 129.4 dB  $SE_T$  değeriyle esnek grafitte ait olduğu belirtilmiştir.

Zhai ve Zheng tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise grafen oksit (GO) süspansiyonun buharlaştırılmasıyla GO film hazırlanmış, hazırlanan GO filme grafitleştirme işlemi uygulanmış ve ince film yapısında “grafit benzeri, birkaç katmandan oluşan grafen” hazırlanarak termal iletkenlik ile elektromanyetik dalga kalkanlama performansları incelenmiştir [28]. Ölçümler sonucunda sadece 8.1 µm kalınlığındaki ince film ile birçok uygulama için asgari şartları sağlayan 20 dB SE<sub>T</sub> değerinin sağlanabildiği bildirilmiştir. Çalışmada ayrıca kalkanlamanın büyük oranda absorplama mekanizması üzerinden gerçekleştiği de bildirilmiştir. Absorplama mekanizmasının etkin olması, örnek kalınlığının artırılması ile çok daha yüksek SE<sub>T</sub> değerlerinin elde edilebileceğini göstermesi açısından önem taşımaktadır.

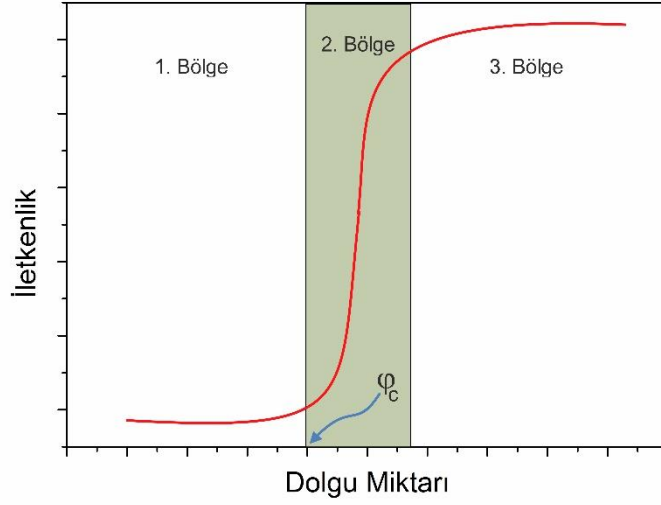
Bilimsel açıdan önemli bu çalışma ile ortaya konulan sonuçlar ticari performans kriterlerini sağlama açısından da ümit verici olarak görülse de yüksek maliyet, düşük üretim verimi ve uzun hazırlama süreçlerinin yanında muhtemel düşük mekanik dayanım gibi önemli dezavantajlara sahip olacağı öngörülebilir. Benzer şekilde sadece karbon esaslı olarak hazırlanan ürünlerin düşük mekanik dayanımları, seri üretime uygun olmamaları ve yine birçok pratik uygulama için yüksek ağırlıkları karbonların elektromanyetik kalkan olarak kullanılması için kısıtlayıcı faktör olmuştur.

Bu kısıtlamaların aşılması için iletken karbon taneciklerinin yalıtkan polimer faz içerisinde dağıtılarak iletken polimer kompozitlerin hazırlanması, alternatif, pratik ve uygulanabilir bir çözüm yolu olmuştur. Elektromanyetik kalkan üretimi ile ilgili literatür araştırmalarının çok büyük bir kısmını oluşturan karbon dolgulu polimer kompozitler sadece bilimsel çalışmalarda kalmamış başarılı ticari ürünlere de dönüşmüştür. Polimer kompozitlerin kullanım performanslarının metal ve karbon malzemelerin aksine hazırlama yöntemi, kullanılan dolgu tipi, işleme koşulları ve mikro-yapısal özellikler gibi birçok parametreye bağlı olarak değişmesi de, bu alanda yapılan araştırmaların çeşitliliğine ve hızla artmasına sebep olmuştur. Tez çalışmasının ana konularından birini oluşturan polimer ve polimer kompozitlerin elektromanyetik kalkan uygulamalarındaki kullanımı, takip eden bölümde, ayrı bir başlık altında değerlendirilmiştir.

### 2.3. ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA UYGULAMALARINDA POLİMERLER VE POLİMER KOMPOZİTLER

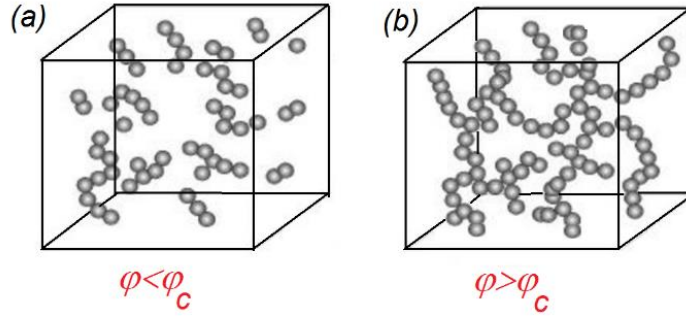
Polimerler son ürün formunda uzun ömürlü, seri üretime uygun, düşük maliyetli, hafif ve istenilen çevresel şartları sağlayacak şekilde modifiye edilebilen malzemelerdir. Öte yandan, birçok polimerin elektriksel iletkenliği  $10^{-12}$  S/m seviyelerinde olduğundan yalıtkan malzeme olarak sınıflandırılırlar ve elektromanyetik dalga ile herhangi bir etkileşimleri söz konusu değildir. Ancak yukarıda bahsedilen avantajları nedeniyle polimerlerin iletken hale getirilerek kalkanlama uygulamalarında kullanılması, yoğun olarak çalışılan önemli malzeme araştırma konularından biridir. Bu bağlamda literatürdeki birçok çalışmada termoset, termoplastik ve elastomer esaslı polimere farklı yapıda iletken (karbon ve metal) dolgular ilave edilerek iletken kompozitler hazırlanmış ve elektromanyetik dalga kalkanlama özellikleri incelenmiştir. İPK üretiminde, düşük yoğunluğu, düşük miktarlarda dolgu ilavesi ile yüksek iletkenliklerin elde edilebilmesi, oksidasyon ya da korozyon gibi dezavantajlar barındırmaması nedeniyle karbon esaslı dolgular metallere göre çok daha fazla tercih edilmektedir.

Karbon esaslı İPK'ların geliştirilmesiyle ilgili olan çalışmalar incelendiğinde karbon siyahı, grafit, karbon elyaf, karbon nanotüp ve grafen gibi farklı karbon türevlerinin, farklı kompozit hazırlama teknikleriyle bir polimer faz içerisinde dağıtıldığı ve beklendiği şekilde kompozitin elektriksel iletkenliğinin dolgu miktarının artışıyla birlikte arttığı birçok çalışma ile ortaya konmuştur [42-45]. Ancak bu artışın Şekil 2.14'de verildiği gibi belirli bir kritik dolgu oranına ( $\phi_c$ ) kadar çok yavaş bir şekilde gerçekleştiği, bu kritik orandan sonra çok hızlı bir artış olduğu ve daha sonra artışın tekrar yavaşladığı görülmektedir.



**Şekil 2.14:** Polimer kompozitlerde iletken dolgu miktarı ile iletkenlik arasındaki değişimi.

Dolgu oranına bağlı olarak kompozitin elektriksel iletkenlik değerinin daha doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için yalıtkan bir polimer faz ve iletken bir dolgudan oluşan polimer kompozit sistemindeki elektrik iletim mekanizmasının değerlendirilmesi gerekmektedir. Böyle bir kompozit yapıda, polimer fazın yalıtkan olması sebebiyle elektrik iletimi sadece iletken dolgular üzerinden gerçekleşir. Bu yüzden bütün kompozit yapının iletken özellik gösterebilmesi için dolgunun tüm kompozit genelinde akımın taşınabileceği kesintisiz hatlar oluşturması gerekmektedir. Ancak düşük dolgu oranlarında bu kesintisiz hatlar kurulamaz ve dolgu artışına bağlı olarak beklenen iletkenlik artışı gerçekleşmez (Şekil 2.15(a)). Bu davranış Şekil 2.14’de birinci bölgeye karşılık gelmektedir. Kesintisiz hatların kurulmasına yetecek minimum dolgu miktarı ise “elektriksel perkolasyon eşiği ( $\phi_c$ )” olarak adlandırılır [46-48] ve bu dolgu oranından itibaren elektriksel iletkenlik, dolgu oranının artmasıyla (Şekil 2.14’de ikinci bölgede) üstel bir artış gösterir. İletken hatların kurulduğu kompozit morfolojisi Şekil 2.15(b)’de verilmiştir. Bahsedilen üstel artışın tamamlanmasından sonra artış hızının azaldığı üçüncü bölgede ise kurulan iletken yollar üzerinden iletimin devam etmesi sebebiyle iletkenlikte önemli bir artış görülmemektedir. Kompozitlerde elektriksel iletkenliğin açıklandığı bu mekanizma literatürde “perkolasyon teorisi” olarak tanımlanmaktadır [49-52].



**Şekil 2.15:** Perkolasyon eşiğinin altında ve üstündeki dolgu miktarları için kompozitin mikro yapısının şematik gösterimi.

Konu ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, genellikle perkolasyon eşiğinin düşürülmesi ile daha az miktarda iletken dolgu kullanılarak daha yüksek iletkenliklerin buna bağlı olarak da daha yüksek elektromanyetik kalkanlama etkinliklerinin elde edilmesinin amaçlandığı görülmektedir. Bu yüzden çalışmalarda dolgu tipi ve oranının yanı sıra, kompozit morfolojisi, dolaylı olarak da elektriksel iletkenlik ve kalkanlama etkinliği için önemli parametreler olan; dolgu dağılımı, dolgu/polimer etkileşimleri, dolgu geometrisi ve tanecik boyutları gibi mikro-yapı özelliklerinin de detaylı olarak incelendiği görülmektedir [15, 53].

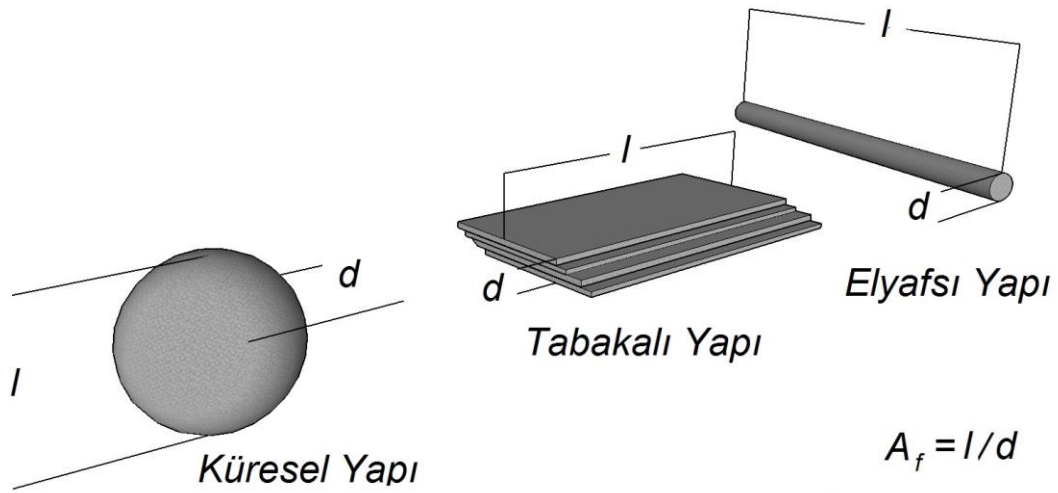
Bu çalışmaların birinde, Al-Saleh ve arkadaşları, farklı fiziksel özelliklere sahip karbon dolguların elektromanyetik kalkanlamaya etkisini karşılaştırmak amacıyla, yüksek yüzey alanlı ve nano boyutlu karbon siyahı (HS-CB), çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ve karbon nanofiber (CNF) içeren akrilonitril-butadien-stiren (ABS) kompozitleri hazırlayarak kompozitlerin alternatif ve doğrusal akım altındaki elektriksel iletkenlikleri ile X-band aralığındaki elektromanyetik dalga kalkanlama performanslarını detaylı olarak incelemiştir [54]. Çalışmada, ağırlıkça aynı oranda dolgu içeren kompozit örneklerinin sonuçları karşılaştırılarak, MWCNT'ün elektriksel iletkenlik ve elektromanyetik dalga kalkanlamada diğer dolgulara göre daha etkili olduğu belirtilmiştir.

Elektriksel iletkenlik değerinin, ağırlıkça %15 MWCNT ve CNF içeren örneklerde ~100 S/m, %15 HS-CB içeren örnekte ise 30 S/m olarak ölçüldüğü çalışmada, ayrıca *dc*-iletkenlik değerleri üzerinden yapılan analizlerle, elektriksel iletkenlik perkolasyon eşik değerlerinin MWCNT için ağırlıkça %0.5'in altında, CNF için ağırlıkça %1.25-1.50 aralığında ve CB içinse %4-5 aralığında olduğu bildirilmiştir. Hazırlanan kompozitlerin elektromanyetik kalkanlama performansları karşılaştırıldığında, 1.1 mm kalınlığında ve %15 HS-CB içeren örnek yaklaşık



20 dB, CNF içeren örnek 35 dB  $SE_T$  değerine sahipken aynı oranda MWCNT katkılı örnek için bu değer 50 dB seviyelerinde olduğu ve bütün dolgu tiplerinde absorplama mekanizmasının yansıtma mekanizmasına göre daha etkili olduğu bildirilmiştir.

Çalışmada aynı kimyasal yapıya ve yakın boyutlara sahip karbon taneciklerinin bu derece etkinlik farklılığı göstermesinin, dolgu geometrisine bağlı olan dağılım oranlarındaki ( $A_f$ , *Aspect Ratio*) farklılık ile açıklanmıştır. Dağılım oranı,  $A_f$ , dolguların yatay boyutlarının ( $l$ ) dikey boyuta (ya da kalınlığa) ( $d$ ) oranı ( $l/d$ ) olarak tanımlanır. Farklı geometrik özelliklere sahip dolgular için  $A_f$  değerlerinin hesaplanması Şekil 2.16'da verilmiştir. Karbon siyahı gibi küresel tanecikler için  $A_f$  değeri 1 olarak alınmakta iken, tabakalı dolgular için  $A_f$  değeri tabaka boyunun toplam kalınlığa oranı olarak belirlenmektedir. Karbon elyaf ya da nanotüp gibi dolgular için ise elyaf boyunun çapına oranı olarak tanımlanmaktadır. Kompozit yaklaşımı ile düşünüldüğünde ise yüksek  $A_f$  değerine sahip dolguların kompozit içinde daha geniş bir alana daha etkin bir şekilde dağılabileceği, enlerine göre uzun boyları sayesinde daha düşük kullanım oranlarında birbirleri ile daha kolay temas sağlayabilecekleri böylece görece düşük dolgu oranlarında elektriksel iletkenlik sağlanabileceği düşünülebilir. Ayrıca bu tip dolguların elyafı yapıları sayesinde mekanik mukavemetin artırılmasında diğer dolgulara göre daha etkili olabilecekleri öngörülebilir.



Şekil 2.16: Farklı geometrideki yapılar için  $A_f$  tanımlamaları.

İlgili kaynakların karşılaştırılabilir bir şekilde değerlendirilebilmesi amacıyla, Tablo 2.4'de önceki çalışmalarda elde edilen elektriksel iletkenlik ve kalkanlama etkinlik değerleri özetlenmiştir. Karşılaştırmanın daha doğru bir şekilde yapılabilmesi amacıyla bu değerlere etki edebilecek olan polimer tipi, kompozit hazırlama yöntemi, ölçüm alınan frekans aralığı ve numune kalınlığı gibi parametreler de tabloda verilmiştir. Ayrıca tabloda yine karşılaştırmanın daha kolay ve sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi amacıyla aynı karbon türevinin kullanıldığı çalışmalar bir arada verilmiştir.

Tabloda 1-3 numaralı referanslarda görece düşük yüzey alanı ve yüksek tanecik boyutuna sahip karbon siyahı (CB) ile yapılan çalışmalar verilirken 4-8 numaralı referanslarda yüksek yüzey alanı ve düşük tanecik boyutuna sahip gelişmiş yapılı karbon siyahı (HS-CB) ile yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

1-3 numaralı kaynaklar değerlendirildiğinde etkin kalkanlama değerlerinin elde edilebilmesi için 60 phr gibi yüksek dolgu oranı ve 5-13 mm arasında değişen kalınlık değerlerinin gerektiği görülmektedir. HS-CB ile yapılan çalışmaların verildiği kaynaklarda ise 50 phr dolgu oranı ve 5 mm kalınlık ile 50-60 dB, 40 phr dolgu oranı ve yaklaşık 2 mm kalınlığındaki örnekle 40 dB gibi yüksek kalkanlama etkinliklerinin elde edilebileceği görülmektedir. Bu verilerden hareketle, karbon siyahı tanecikleri için tanecik boyutu ve yüzey alanının kompozitin kalkanlama etkinlikleri üzerinde etkili olduğu düşünülebilir.

CNF katkılı polimer kompozitlerin özelliklerinin verildiği 9-12 numaralı kaynaklar incelendiğinde ise CNF ile karbon siyahına göre çok daha düşük kullanım oranlarında ve ince örneklerle daha yüksek kalkanlama etkinliğine sahip kompozitlerin hazırlanabileceği görülmektedir. Özellikle 9 numarada verilen çözeltiden dökme yönteminin kullanıldığı ağırlıkça %15 oranında CNF içeren, 1.10 mm kalınlığındaki örnekle elde edilen 35 dB kalkanlama etkinliğinin CNF kullanılan diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında yüksek performansı dikkat çekmektedir.

Görece daha yüksek  $A_f$  değerine ve düşük tanecik boyutuna sahip dolgular ile hazırlanan örneklerin sonuçlarının verildiği 13-20 ve 23-25 numaralı kaynaklarda ise dolgu olarak MWCNT, SWCNT ve GNP kullanılması ile yüksek  $A_f$  değerine bağlı olarak daha düşük dolgu oranında daha yüksek SE değerlerinin elde edilebildiği görülmektedir. Ayrıca  $A_f$  ve dolgu boyutlarının etkisinin ortaya konulması amacıyla 21-22 numaralı çalışmalarda farklı boyutlardaki karbon nanotüplerin kullanıldığı çalışmalar özetlenmiş ve daha uzun karbon

nanotüplerin kullanılması ile daha yüksek kalkanlama etkinliklerinin elde edilebileceği görülmüştür.

Son olarak, farklı polimerler kullanılarak grafit (G) ve genişletilmiş grafit (EG, *expanded graphite*) dolgulu kompozitlerin kalkanlama etkinliklerinin verildiği 26-30 numaralı kaynaklarda G ve EG dolgulu kompozitlerin karbon siyahı dolgulu kompozitlere göre daha yüksek SE değerlerine sahip olduğu, ancak elde edilen değerlerin kalınlık ve dolgu oranı parametreleri de göz önünde bulundurulduğunda nano boyutlu MWCNT, SWCNT, CNF ve GNP'nin oldukça altında kaldığı görülmektedir. Literatür özeti tablosundan çıkarılabilecek bir diğer sonuç ise, beklendiği şekilde, karbon dolgulu kompozitlerle elde edilen kalkanlama etkinliklerinde etkin olan mekanizmanın absorplama mekanizma olmasıdır. Bu da, karbon dolgulu kompozitlerin bu malzemelerin özellikle yüksek frekans değerlerinde daha etkin kalkanlama yapabileceği ve kalınlığının artırılması ile kalkanlama performansının önemli şekilde artırılabilceği anlamına gelmektedir.

Tablo 2.4: Literatürdeki farklı karbon dolgularla hazırlanmış polimer kompozitlerin kalkanlama etkinlik değerleri

Çalışma No	Polimer Faz	Dolgu Tipi	Dolgu Oranı	Hazırlama Yöntemi	Frekans Aralığı (GHz)	Örnek Kalınlık (mm)	Maks. PE <sub>T</sub> (dB)	SE <sub>R</sub> (dB)	SE <sub>A</sub> (dB)	Ref. No
1	Vul. EPDM	CB	60 (phr)	Kalenderleme	8-12	5.5	19 (12)	-	-	[55]
2	EPDM	CB	60 (phr)	Kalenderleme	8-12	5.5	~10 (8)	-	-	[55]
3	SBR	CB	60 (phr)	Kalenderleme	8-12	13	~28 (9)	-	-	[56]
4	Etilen Akr. Elast.	HS-CB	40 (phr)	Kalenderleme	8-12	1.5-2	~40 (8)	-	-	[57]
5	EVA	HS-CB	50 (phr)	Eriyik Harmanlama	8-12	5	~62 (10)	-	-	[58]
6	NBR	HS-CB	50 (phr)	Eriyik Harmanlama	8-12	5	~55 (10)	-	-	[58]
7	EVA/NBR (1:1)	HS-CB	50 (phr)	Eriyik Harmanlama	8-12	5	~58 (10)	-	-	[58]
8	ABS	HS-CB	15 (%ağ.)	Çözeltiden Döküm	8-12	1.10	20 (9)	-	-	[54]
9	ABS	CNF	15 (%ağ.)	Çözeltiden Döküm	8-12	1.10	35 (10)	-	-	[54]
10	LCP	CNF	15 (%ağ.)	Eriyik Harmanlama	0.015-1.5	1.45	14 (1.5)	10	4	[59]
11	HDPE	CNF	7.5 (%hc.)	Eriyik Harmanlama	8-12	2	28 (1)	-	-	[60]
12	HDPE	CNF	15 (%hc.)	Eriyik Harmanlama	8-12	2	44 (1.5)	-	-	[61]
13	PC	MWCNT	10 (%ağ.)	Eriyik Harmanlama	8-12	1.85	25 (8-12)	5	20	[62]
14	PTF	MWCNT	10 (%ağ.)	Ekstrüzyon	8-12	2	42.5 (18)	-	-	[63]
15	PMMA	MWCNT	10 (%hc.)	Çözeltiden Döküm	8-12	0.3	17 (12)	-	-	[64]
16	PS	MWCNT	10 (%hc.)	Çözeltiden Döküm	8-12	0.3	~16 (12)	-	-	[64]
18	Selüloz	MWCNT	9.1 (%ağ.)	Kağıt Üretim Tek.	15-40	0.2	20	-	-	[65]
19	PS	MWCNT	5 (%ağ.)	Dispersiyon spreyleme	8-12	1	25	-	-	[66]
20	PAN	MWCNT	2 (%ağ.)	Elektroçirgirme	0.3-3	0.15	20	-	-	[67]

Tablo 2.4(devamı):

21	Epoksi	MWCNT 1.5micron boy	0.5 (%ağ.)	Mekanik Karıştırma	12.4-18	2.5	11.5 (18)	2,5	9	[68]
22	Epoksi	MWCNT 350micron boy	0.5 (%ağ.)	Mekanik Karıştırma	12.4-18	2.5	16 (18)	4	12	[68]
23	PANi	SWCNT	1 (%ağ.)	Eş-anlı poli.	0.45-1.5	10	19.4 (0.45-1.5)	2,5	16,9	[69]
24	PANi	GNP	1 (%ağ.)	Eş-anlı poli.	0.45-1.5	10	24.3 (0.45-1.5)	2,8	21.5	[69]
25	TPU	GNP	0.5 (%ağ.)	Çözeltiden Döküm	8-12	3	21 (8-12)	-	-	[69]
26	HDPE	G	30 (%ağ.)	Baskı kalıplama	8-12	3	32 (8.5)	-	-	[70]
27	PANi	G	30 (%ağ.)	Eş-anlı poli.	8-12	2	33 (10)	-	-	[71]
28	ABS	G	15 (%ağ.)	Tamburlu karıştırıcı	8-12	3	60 (10)	-	-	[72]
29	TPU	EG	20 (%ağ.)	Ekstrüzyon	8-12	4	22 (8.2)	-	-	[73]
30	SEBS	EG	20 (%ağ.)	Eriyik harmanlama	8-12	5	15 (8)	-	-	[74]

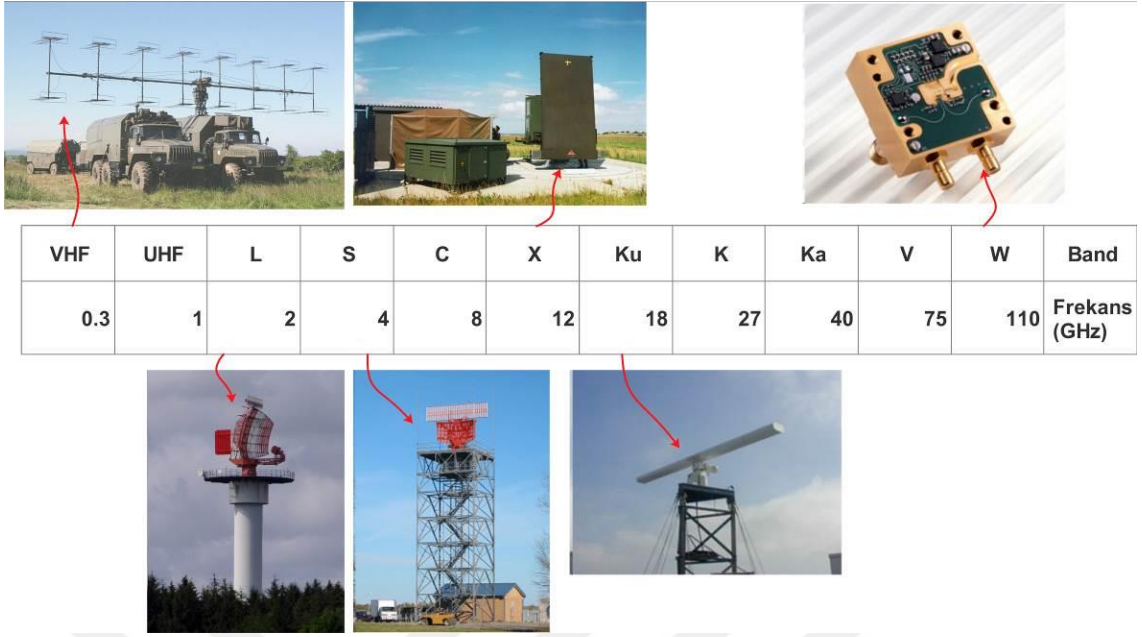
## 2.4. RADAR SİSTEMLERİ VE RADAR'DA GÖRÜNMEZLİK TEKNOLOJİLERİ

### 2.4.1. RADAR Sistemleri

RADAR (**RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging, radyo hedef algılama ve menzül tayini) elektromanyetik dalgaların bir engelle karşılaştığında (belirli oranda) geri yansımından yola çıkarak uzaktaki nesnelerin yer, hız ve büyüklük gibi özelliklerini belirleyebilen sistemlere verilen genel bir isimdir [75].

Temel olarak bir RADAR sistemi sinyal gönderici, sinyal alıcı ve bu ikisi arasındaki sinyal alışverişini ve düzenlemesini sağlayan “*dupleks*” cihazından oluşmaktadır. RADAR sistemlerinin çalışmasında öncelikle gönderici tarafından oluşturulan güçlü sinyal dupleks cihazı ile yönlendirilmiş ve çalışma frekans aralığına göre özel olarak dizayn edilmiş antene buradan da belirli bir alana gönderilir. Gönderildiği alanda özellikle iletken bir nesneye çarpması durumunda nesne üzerinden büyük oranda geri yansıyan dalga RADAR sistemine geri döner. Yine anten tarafından alınan zayıf sinyal dupleks cihazı tarafından bu kez sinyal alıcılara yönlendirilir. Sistem bu sırada otomatik olarak sinyalin gönderiliş ve geri dönüş süresi arasındaki zamanı belirleyerek nesnenin bulunduğu uzaklığı, açı değerlerini dikkate alarak yükseklik ve boyut gibi parametrelerini belirler. Şayet sinyalin gönderildiği alanda yansıma gerçekleştirecek herhangi bir nesne bulunmuyorsa gönderilen dalga geri alınamaz ve taranan alanın boş olduğu anlaşılır.

Teorik olarak temel çalışma mekanizması oldukça basit olan RADAR sistemleri ikinci dünya savaşı zamanlarında sadece askeri amaçla kullanılmasına rağmen daha sonraki dönemlerde meteorolojik olayların takibi, sivil hava ve deniz araçlarının takibi, trafikte hız denetimleri, toprak altı maden aramaları gibi amaçlarla da kullanılmaya başlanmıştır. Çeşitli kaynaklarda farklı başlıklar altında sınıflandırılan RADAR sistemleri daha çok kullanım alanına, çalışma mekanizmasına ve çalışma frekans aralığına göre olmak üzere üç ayrı başlıkta sınıflandırılmaktadır. Şekil 2.17’de çalışma frekans değerlerine göre yapılan sınıflandırmaya göre 0.1-110 GHz arasındaki elektromanyetik dalgaları kullanan radar sistemlerinin fotoğrafları ve bu sistemlerin frekans değerlerine göre isimlendirmesi verilmiştir.



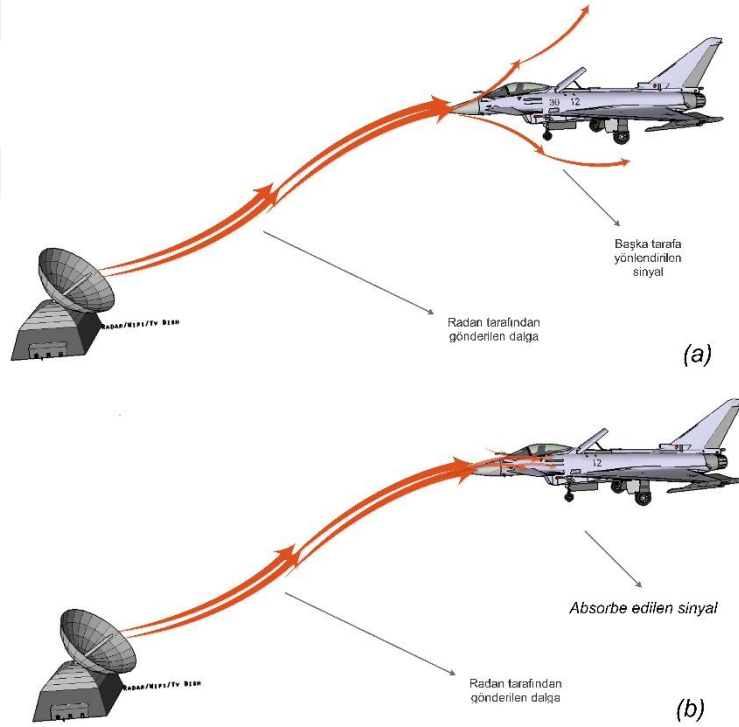
Şekil 2.17: 0.1-110 GHz aralığında kullanılan bazı RADAR sistemleri.

RADAR sistemlerinde düşük frekanslı elektromanyetik dalgaların kullanılmasının yüksek menzil ve toprak, taş gibi yapı malzemelerinden yüksek geçme kapasitesi gibi avantajlarına karşın hassasiyet ve çözünürlük değerlerinin düşük olması ve sistemde kullanılacak anten boyutlarının büyük olması gibi dezavantajları bulunmaktadır. Yüksek frekanslı elektromanyetik dalga kullanılmasının ise düşük menzil dezavantajına karşın düşük anten boyutlarıyla araç ve ekipmanlara yerleştirilebilecek boyutlardaki küçük alıcı/vericileri, yüksek hassasiyet ve çözünürlük kabiliyetleri gibi avantajları bulunmaktadır.

Anten boyutları, menzil kapasitesi, çözünürlük, yüksek mobilite ve maliyet gibi faktörlerin etkisiyle 8-12 GHz frekans aralığındaki X-band ve 12-18 GHz frekans aralığındaki Ku-band RADAR sistemleri askeri/sivil uçaklarda, deniz araçlarında ve mobil özellikteki füze istasyonlarında en çok tercih edilen RADAR sistemleri olmuştur. Bu yüzden RADAR'dan gizlenebilen malzemelerin geliştirilmesine yönelik yapılan çalışmalarda hedef frekans aralığı olarak genellikle 8.2-12.4 GHz arası X-band ve 12-18 GHz arası Ku-bandları çalışılmaktadır [19, 30, 76-82].

#### 2.4.2. RADAR Sistemlerinden Gizlenmenin Temel Teorisi

RADAR sistemlerinin cisimlerin yer, hız ve koordinat gibi özellikleri belirlemesinin cisim üzerinden geri yansıyan “*yankı*” dalgaları üzerinden gerçekleştirdiği daha önceki kısımlarda belirtilmişti. Bahsedilen bu yankı dalgalarının bir şekilde RADAR sistemine geri dönmesinin engellenmesi durumunda ise sistem nesneyi tespit edemeyecek ve o bölgeyi boşluk olarak görecektir. Yankı sinyallerinin RADAR sistemine geri dönmesinin engellenmesi için ise RADAR sistemi tarafından gönderilen elektromanyetik dalganın RADAR tarafından algılanamayacak taraflara yönlendirilmesi (Şekil 2.18a) ya da çarptığı nesne üzerinde yüksek oranda soğurularak enerjisinin RADAR sisteminin tespit edemeyeceği seviyelere düşürülmesi (Şekil 2.18b) olmak üzere iki yöntem mevcuttur [83].



**Şekil 2.18:** (a) Radar sinyallerinin başka tarafa yönlendirilmesi ve (b) uçak yüzeyi tarafından soğurulmasının şematik gösterimi.

Günümüzde RADAR sistemlerinin çok düşük enerjili sinyalleri dahi tespit edebilecek hassasiyette olması ve bi-statik radarlar gibi farklı noktadaki alıcı/verici sistemleriyle koordine şekilde çalışması nedeniyle özellikle uçak ve benzeri hava araçlarının bu sistemlerden



gizlenebilmesi için her iki yöntem beraber kullanılması gerekliliği doğmuştur. Şekil 2.19’da bahsedilen her iki yöntemin de kullanıldığı, RADAR’dan gizlenme özelliği bulunan ve “hayalet uçak” olarak da bilinen F-22 Raptor savaş uçağı ve B-2 Spirit bombardıman uçaklarının fotoğrafları verilmiştir.

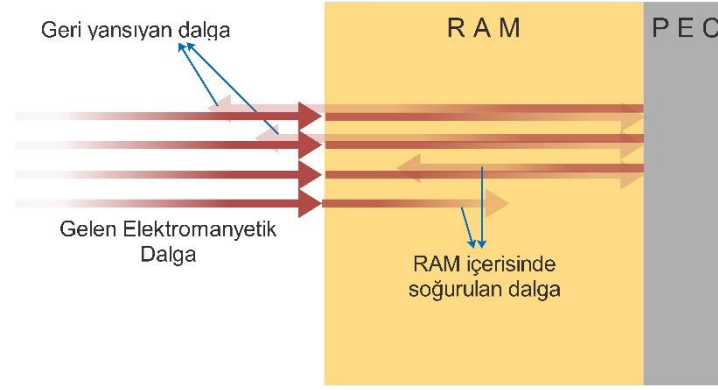


**Şekil 2.19:** RADAR sistemlerinden gizlenme özelliğine sahip F-22 Raptor savaş uçağı ve B-2 Spirit bombardıman uçağının fotoğrafları.

Her iki yöntem üzerine de çok fazla sayıda çalışma ve teori bulunmakta olup tez kapsamında RADAR sinyalinin soğurabilecek kompozitlerin geliştirilmesi üzerine çalışılması sebebiyle, bundan sonraki bölümlerde bu konu ile ilgili genel bilgi ve kaynak araştırmaları verilmiştir.

### 2.4.3. RAM’ların Performanslarının Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi

RADAR sinyali daha önce de belirtildiği gibi belirli bir frekans, enerji ve dalga boyuna sahip bir elektromanyetik dalga demetidir. Elektromanyetik dalganın soğurulması ise dalganın enerjisinin bir ortam ya da malzeme içinde ısı enerjisine dönüştürülerek zayıflatılmasıdır [84, 85]. RAM’lar deneylerde ve hesaplamalarda Şekil 2.20’de gösterildiği gibi arka yüzeyine elektromanyetik dalgaların geçişini engelleyen yüksek iletkenlikte bir metal katman kaplanarak uygulanmaktadır. Bu işlem ile RAM’ı geçmeyi başarabilen elektromanyetik dalga tekrar RAM içerisine yönlendirilerek hem dalganın malzeme içerisinde kat ettiği mesafe artırılmakta hem de gelen dalga ile zayıflatıcı girişimi sağlanarak daha kuvvetli bir şekilde sönümlenmesi sağlanmaktadır. Arka kısma kaplanan metal, soğurma performansı hesaplamalarında teorik olarak öz empedansı sıfır olan mükemmel iletken plaka (*PEC*) olarak kabul edilir [80].



**Şekil 2.20:** Arka kısmı PEC ile kaplanmış bir RAM’de elektromanyetik dalganın sönümlenmesi.

RAM’ların elektromanyetik dalga soğurma performansının belirtilmesinde RAM tarafından geri yansıtılan dalganın, RAM üzerine gelen dalganın enerjisine oranı anlamına gelen  $S_{11}$  saçılma parametresinin logaritmasının 20 katının alınmasıyla elde edilen desibel birimindeki “yansıma kaybı ( $RL$ , *Reflection loss*)” terimi kullanılmaktadır. Yansıma kaybının sayısal değeri, örneğe ait  $S_{11}$  değeri üzerinden denklem 2.36’ya göre doğrudan hesaplanabileceği gibi [86] denklem 2.37’ye göre empedans değerleri üzerinden de hesaplanabilmektedir [83, 87, 88]. Denklemden  $Z_0$  boşluğun karakteristik empedansını (377 ohm),  $Z_i$  ise RAM’ın empedansını göstermektedir. RAM’a ait  $Z$  değerinin hesaplanması ise denklem 2.38’e göre yapılmakta olup denklemdeki  $t$  malzeme kalınlığını,  $\beta$  denklem 2.39’a göre hesaplanan bir sabiti,  $\eta_k$  denklem 2.40’a göre hesaplanan dalganın karakteristik empedansını ve  $Z_L$  teorik olarak mükemmel iletken malzemenin empedans değerini (0 ohm) göstermektedir.

$$RL = 20 \log_{10} |S_{11}|^2 \quad (2.36)$$

$$RL = 20 \log_{10} \left| \frac{Z_i - Z_0}{Z_i + Z_0} \right| \quad (2.37)$$

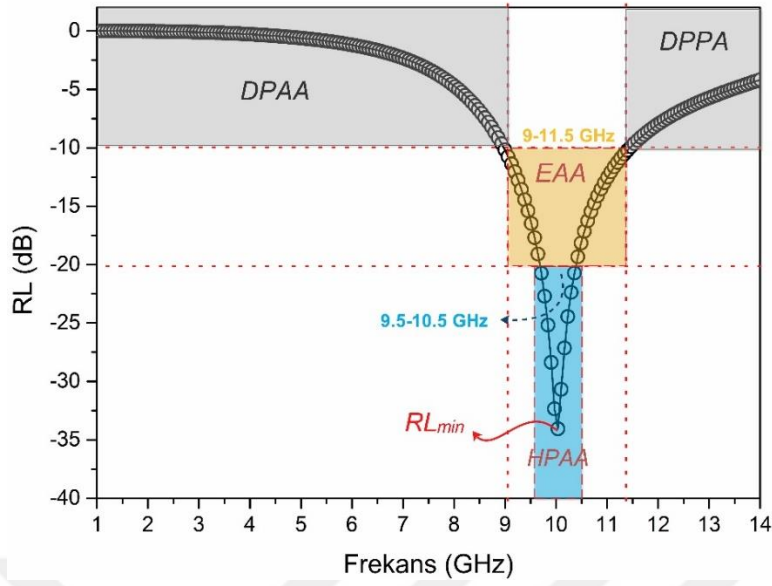
$$Z_i = \eta_k \frac{Z_L \cos(\beta t) + j \eta_k \sin(\beta t)}{\eta_k \cos(\beta t) + j Z_L \sin(\beta t)} \quad (2.38)$$

$$\beta = 2\pi f \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} = 2\pi f \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \sqrt{(\mu' - j\mu'')(\varepsilon' - j\varepsilon'')} \quad (2.39)$$

$$\eta_k = \sqrt{\frac{\mu_k}{\varepsilon_k}} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_r}} \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon' - j\varepsilon''}} \quad (2.40)$$

Pratik olarak  $RL$  değerinin -10 dB olması gönderilen elektromanyetik dalganın %10'unun, -20 dB olması %1'inin, -30 dB olması ise sadece %0.1'inin geri yansıtıldığı anlamında olup malzemenin arka tarafındaki PEC' den dolayı RAM'ı geçen dalga oranının sıfır olduğu düşünüldüğünde geri kalan %99.9'unun (30 dB için) RAM tarafından soğurulduğu anlaşılmaktadır. Denklem 2.36 – 2.39 incelendiğinde bir malzemenin  $RL$  değerlerinin hesaplanması, modellenmesi ve simülasyonu için uygulanan frekans değeri, bu frekanstaki permitivite ve permeabilite (reel ve sanal kısımları) değerleri ve malzeme kalınlığının bilinmesinin gerektiği görülmektedir. Dielektrik parametrelerin belirlenmesinde ise daha önce anlatılan dalga kılavuzu, koaksiyel hat ve serbest alan tekniği yöntemleri kullanılmakta olup bu yöntemlerin dışında doğrudan  $S_{11}$  parametresi üzerinden  $RL$  değerlerinin hesaplanabildiği “ark yöntemi” de çeşitli çalışmalarda kullanılmaktadır [24, 89].

Şekil 2.21'de tek katmanlı bir RAM için  $-y$  yönündeki bir pik fonksiyonu şeklinde olan tipik  $RL$ -frekans değişimi verilmiştir. Konu ile ilgili olarak gerçekleştirilen çalışmalarda genellikle “ $RL < -10$  dB” “etkin absorplama aralığı (EAA)” olarak adlandırılrsa da gelişen RADAR sistemleri ile -10 dB seviyelerindeki soğurmanın yetersiz olacağı, pratik olarak kullanılabilir bir RAM için hedef frekans aralığının tamamında -20 dB'den daha düşük  $RL$  değerlerine sahip olması gerektiği bildirilmektedir. Bu yüzden tez boyunca yapılacak olan değerlendirmelerde, daha detaylı incelemelerin yapılabilmesi amacıyla  $RL$ -frekans grafikleri; -10 ile 0 arası  $RL$  değerlerinin elde edildiği frekans aralıkları “düşük performans soğurma aralığı (DPAA)”, -20 ile -10 arası  $RL$  değerlerinin elde edildiği frekans aralıkları “etkin soğurma aralığı (EAA)” ve -20 dB'den daha düşük  $RL$  değerlerinin elde edildiği frekans aralıkları ise “yüksek performans soğurma aralığı (HPAA)” olarak isimlendirilmiştir.  $RL$ -frekans grafiklerinin değerlendirilmesinde bahsedilen kritik parametreler yine Şekil 2.21'de görsel olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.21: Tek katmanlı bir RAM için tipik  $RL$ -frekans grafiği.

RAM olarak geliştirilen bir malzemenin teknik açıdan etkin bir RAM olarak kabul edilebilmesi için EAA'nın, yüksek performans gereksinimleri karşılayabilmesi için ise HPAA'nın hedef olarak belirlenen frekans aralığının tamamını kapsamaması gerekmektedir. Hedef frekans aralığının sadece bir kısmının etkin bir şekilde soğurulabilmesi durumunda ise frekans taraması gerçekleştiren RADAR sistemi malzemenin düşük performans gösterdiği DPAA bölgesinde yansıyan sinyalleri kolayca tespit edebilecek ve yer tespitini gerçekleştirebilecektir. Örneğin birçok askeri ve sivil uygulamada kullanılan X-band radarları 8.2-12.4 GHz frekans aralığındaki elektromanyetik dalgaları kullanmaktadır ve Şekil 2.21'de RL-frekans grafiği verilen malzemenin bu RADAR sistemlerine karşı kullanımı EAA ve HPAA'nın sırasıyla 9-11.5 GHz ve 9.5-10.5 GHz olması nedeniyle uygun olmayacağı değerlendirilebilir.

RL-frekans grafiklerinde değerlendirilmesi gereken bir diğer önemli nokta ise grafikte pikin dip noktası olan ve malzemenin en etkili olduğu frekanstaki soğurma kabiliyetini gösteren ( $RL_{min}$ ) değeridir. Gerek bilimsel ve akademik yayınlarda gerekse endüstriyel ürün geliştirmeye yönelik Ar-Ge çalışmalarında  $RL_{min}$  değerlerinin daha da düşürülmesi temel hedeflerden birini oluştursa da, EAA ve HPAA'nın genişletilmesi uygulanabilirliğin sağlanması amacıyla daha fazla önemsenmekte ve bu konuya yönelik çalışmalar daha geniş yer tutmaktadır.

#### 2.4.4. RAM Olarak Kullanılan Malzemeler

RAM'lar özelliklerine göre manyetik, dielektrik ve düşük elektriksel özelliğine sahip olanlar olmak üzere üç başlık altında toplanabilir. RAM olarak kullanılan manyetik malzemeler yüksek permeabilite değerleri sayesinde elektromanyetik dalgayı soğurabilen malzemelerdir. En yaygın kullanılan manyetik malzemeler çeşitli ferrit bileşikleri ( $Fe_3O_4$ ,  $BaFe_{12}O_{19}$ ,  $SrFe_{12}O_{19}$ , M-hekza ferrit gibi) ve nikel, kobalt gibi kalıcı manyetik özellik gösterebilen bazı metal türleridir. RAM hazırlamada bir diğer alternatif olan dielektrik malzemeler ise elektriksel olarak yalıtkan olmalarına rağmen elektrik alan altında polarize olabilen ve uygulanan elektrik alana karşı bir iç elektrik alan oluşturarak net elektrik alanının kuvvetini azaltabilen (dolayısıyla yüksek permitivite değerlerine sahip) malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Bu gruptaki malzemelere  $BaTiO_3$  ve  $TiO_2$  örnek gösterilebilir. Düşük elektriksel iletkenliğe sahip malzemeler ise elektromanyetik dalganın serbest elektronlar aracılığıyla taşınması sırasında ortamda bulunan yüksek direnç noktalarından ötürü dalga enerjisinin ısı enerjisine çevrildiği böylelikle dalga enerjisinin belirli oranda sönmüldüğü malzemelerdir. Bu sönmülemenin gerçekleşebilmesi için malzemenin elektromanyetik dalgayı iletebilecek kadar iletkenliğe sahip olması gerekirken dalganın yüzeyden geri yansımamasına ve ilerlerken belirli ısı kayıplarına neden olacak kadar yüksek dirence sahip olması gerekmektedir. Bazı düşük iletkenlikteki karbon türevleri ve karbon ya da metal gibi dolgularla iletken hale getirilen polimer kompozitler bu malzemelere örnek olarak gösterilebilir.

Bahsedilen manyetik, dielektrik ve düşük elektriksel iletkenlik özelliğine sahip RAM'lar sahip oldukları avantajlar ve dezavantajlar açısından değerlendirildiğinde manyetik ve dielektrik malzemelerin yüksek yoğunluk ve maliyetleriyle çevresel şartlara dayanıklı levha ya da film haline getirilme zorlukları nedeniyle birçok pratik uygulama için gerekli mekanik mukavemete sahip olmaması bu malzemelerin temel dezavantajını oluşturduğu görülmektedir. Kendiliğinden iletken polimerlerde ise yüksek maliyet, düşük performans ve seri üretimdeki zorluklar önemli dezavantajlar olarak öngörülmektedir. Son olarak karbon türevlerinde ise yüksek iletkenliğe bağlı olarak düşük soğurma performansı ve yüksek yoğunluk bu malzemelerin kullanımını kısıtlamaktadır.

Bahsedilen bu dezavantajların azaltılması ya da giderilmesi fonksiyonel özellik gösteren bu malzemelerin polimer bir taşıyıcı faz içerisinde belirli oranlarda dağıtılarak kompozitlerinin hazırlanması ile mümkündür. Örneğin yoğunlukları yaklaşık  $5 \text{ g/cm}^3$  seviyelerinde olan manyetik malzemelerin %40-%60 oranında, ortalama yoğunlukları  $1.1 \text{ g/cm}^3$  olan bir polimer

faz içerisinde dağıtılmasıyla elde edilen polimer kompozitlerin birçok elektromanyetik dalga soğurulması gerektiren uygulamanın gereksinimini karşıladığı gibi yoğunluk değerlerinin de  $2.5-3 \text{ g/cm}^3$  seviyelerine düşmesini sağladığı görülmektedir. Benzer şekilde yüksek iletkenlikleri sayesinde düşük performans gösteren karbon türevlerinin de bir polimer faz içerisinde dağıtılmasıyla elektriksel iletkenlik istenildiği şekilde düşürülebildiği böylece çok daha düşük yansıma kayıplarının elde edilebildiği bilinmektedir. Bu özellikleri sayesinde günümüzde RAM olarak ticarileşmeyi başarmış ürünlerin çok büyük bir kısmının polimer kompozitlerden oluşmakta ve her yıl daha yüksek performansların elde edilebilmesi amacıyla yüzlerce yeni çalışma literatüre kazandırılmaktadır.

Ancak RAM olarak kullanılacak bir polimer kompozitin performansında, sadece soğurma özelliği taşıyan karbon ya da ferrit gibi fonksiyonel bileşenin performansı ve polimer içerisindeki miktarı değil toz formundaki bu malzemelerin polimer faz içerisindeki dağılımı, polimer faz ile gösterdikleri fiziksel/kimyasal etkileşimleri ve tanecik boyutları gibi birçok mikro-yapısal özellikte de etkili olmaktadır. Tüm bu parametrelerin daha detaylı olarak incelenebilmesi amacıyla polimer kompozit esaslı RAM'ların özellikleri ve literatür çalışmaları ayrı bir başlık altında incelenmiştir.

## **2.5. RADAR SİNYALİNİ SOĞURABİLEN POLİMER KOMPOZİTLER**

### **2.5.1. Manyetik Tanecik Dolgulu Polimer Kompozitler**

Polimerler manyetik alana karşı bir tepki göstermemekle beraber manyetik özelliğe sahip bir inorganik bileşiğin fiziksel olarak ilavesi ile manyetik alana karşı belirli derecede duyarlı kompozitleri hazırlanabilen malzemelerdir. Kompozitlerin özellikleri ise dolgu olarak ilave edilen manyetik bileşenin özelliklerine ve bileşimdeki oranına göre değişiklik göstermektedir. Literatürde manyetik özellikli polimer kompozitlerin geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, daha çok  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  [90-94],  $\text{Ba}_{12}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$  [95-98],  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  [99-101], hekza ferritler [102-104] ve Ni-Zn [99, 105] bileşiklerinin kullanıldığı görülmektedir. Tablo 2.5' de yaygın kullanılan dolguların çeşitli polimerler içinde dağıtılması ile hazırlanan kompozitlerin  $EAA$ ,  $HPAA$  ve  $RL_{\min}$  değerleri ve bu performansın eldesinde etkili olan parametreler özetlenmiştir.

Tabloda verilen  $RL_{\min}$  değerleri incelendiğinde birçok çalışmada yaklaşık -20 dB ya da daha düşük değerlerin elde edilebildiği görülmektedir.  $EAA$  ve  $HPAA$  değerleri incelendiğinde ise bazı kompozitlerde  $EAA$ 'nın X-band'ın tamamını ya da büyük bir bölümünü kapsadığı

görülmekte, fakat HPAA'nın en fazla 1.5 GHz genişliğe (11.0-12.5 GHz) ulaşabildiği görülmektedir. Bu sonuçlardan, manyetik dolgularla hazırlanmış kompozitlerle geniş frekans aralığında EAA'nın sağlanmasının mümkün olabileceği görülmektedir. Hazırlanan kompozitler fiziksel özellikler açısından değerlendirildiğinde ise belirtilen soğurma özelliklerinin elde edilebilmesi için gerekli kompozit kalınlıklarının ortalama olarak 2-3 mm seviyelerinde, dolgu oranlarının ise ağırlıkça yaklaşık %50-80 arasında olduğu görülmektedir. Manyetik dolguların yoğunluklarının yaklaşık 5 g/cm<sup>3</sup> seviyelerinde olduğu düşünüldüğünde bu denli yüksek dolgu oranı ile hazırlanmış kompozitlerin yüksek yoğunlukları ve yine yüksek dolgu oranına bağlı olarak zayıflayan darbe dayanımları nedeni ile bu kompozitlerin yüksek yüzey alanına uygulama gerektiren, aynı zamanda hafiflik ve mekanik dayanımların da önemli olduğu RADAR'dan gizlenebilen uçak gibi araçlarda kullanımı kısıtlanacaktır.

**Tablo 2.5:** Manyetik özellikli dolgularla hazırlanmış bazı polimer kompozitlerin performans özellikleri.

Polimer	Dolgu	Dolgu Oranı	Örnek		Hazırlama Yöntemi	RL <sub>min</sub> (dB)	EAA (GHz)	HPAA (GHz)	Ref.
			Kalınlık (mm)	Kalınlık (mm)					
PANi	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Mikroküre	%50 (ağ.)	2.5	Eş-anlı	21(11)	9.5-12.5	-	[106]
Silikon	MnZn-Ferrit		%20 (hc.)	3	Mekanik Karıştırma	27.5(11)	8.2-(>12)	10.2-11.8	[107]
PU	M-Hekza Ferrit		%80(ağ.)	1.6	Mekanik Karıştırma	24.5(12)	9.5-(>12.5)	11-(>12.5)	[108]
PANi	Ba <sub>12</sub> Fe <sub>12</sub> O <sub>19</sub>		%50 (ağ.)	2	Eş-anlı pol.	12(7.9)	-	-	[109]
PS	NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>		%65 (ağ.)	2	Baskı kalıplama	13(11.5)	10.3-13	-	[110]
PANi	NiZn-Ferrit	1:1 (molce)	%80 (ağ.)	3	Eş-anlı pol.	17(11.5)	5-13.5	-	[111]
Wax	NiZn		%80 (ağ.)	4.5	Fiziksel Kar.	-19(8.6)	<8-10	-	[112]
Wax	NiZnCu		%80 (ağ.)	4.5	Fiziksel Kar.	-35(8.6)	<8-10.4	8-9.2	[112]
Wax	NiZnMn		%80 (ağ.)	4.5	Fiziksel Kar.	-30(8.6)	<8-10.4	8-9.2	[112]
Wax	NiZnMg		%80 (ağ.)	4.5	Fiziksel Kar.	-12(8.4)	8-9.2	-	[112]

**Tablo 2.6:** BaTiO<sub>3</sub> dolgulu bazı kompozitlerin elektromanyetik dalga söğurma özellikleri.

Polimer	Dolgu	Dolgu Oranı	Örnek		Hazırlama Yöntemi	RL <sub>min</sub> (dB)	EAA (GHz)	HPAA *(GHz)	Ref.
			Kalınlık (mm)	Kalınlık (mm)					
Epoksi	BaTiO <sub>3</sub>	%30(ağ.)	2.5	2.5	Fiziksel Karış.	-28(10.2)	8-12	8.5-10.75	[113]
Epoksi	BaTiO <sub>3</sub>	%30(ağ.)	2	2	Fiziksel Karış.	-21(19.5)	18.8-20.5	-	[109]
Epoksi	BaTiO <sub>3</sub>	%8 (hc.)	4	4	Fiziksel Karış.	-18(13)	10-18	-	[114]
Parafin	BaTiO <sub>3</sub> -nanotüp	%70 (ağ.)	2	2	Fiziksel Karış.	-22.5(15)	13.1-15	-	[115]



### 2.5.2. Dielektrik Dolgularla Hazırlanmış Polimer Kompozitler

Dielektrik malzemeler, daha önce de belirtildiği gibi, elektriksel olarak yalıtkan olup yüksek permitivite değerlerine sahiptir. Bu tanımlamaya göre kompleks permitivitenin ( $\epsilon^*$ ) reel kısmının ( $\epsilon'$ ) yüksek, iletkenlikle ilişkili olan sanal kısmının ( $\epsilon''$ ) ise düşük olması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla dielektrik dolguların kompozit yapı içerisine katılmasıyla özellikle  $\epsilon'$  değerleri dolgu oranına bağlı olarak geliştirilebilmektedir.

Konuyla ilgili çalışmalar incelendiğinde, dielektrik özellik gösteren kompozitlerin hazırlanmasında en yaygın kullanılan dolgunun  $\text{BaTiO}_3$  olduğu görülmektedir. Tablo 2.6'de  $\text{BaTiO}_3$  ile gerçekleştirilen farklı çalışmalar özetlenmiştir. Çalışmaların bulgularına göre, optimum performans için gerekli olan dolgu miktarının ağırlıkça %30 ila %70 gibi geniş bir aralıkta değiştiği ve kompozit kalınlığının 2-4 mm arasında değişiklik gösterdiği görülmektedir. Bu özelliklerde hazırlanan kompozitlerle elde edilen  $RL_{\min}$  değerlerinin 18-28 dB arasında değiştiği görülmektedir. EAA ve HPAA değerleri incelendiğinde ise özellikle EAA aralıklarının da 8 GHz gibi (10-18 GHz aralığı) geniş bir aralık elde edilebilmesine rağmen HPAA'nın 2.25 GHz (8.50-10.75 GHz) seviyelerinde kaldığı görülmektedir. Bu sonuçlar, dielektrik dolgulu kompozitlerin özellikle X- ve Ku- band aralıklarında çok yüksek performansın istenmediği uygulamalarda kullanılabileceğini göstermektedir. Ancak  $\text{BaTiO}_3$ 'ünde yoğunluğunun yaklaşık  $6 \text{ g/cm}^3$  olduğu, etkin soğurmanın sağlanması için polimere ilave edilmesi gereken dolgu oranının %30-%70 arasında değiştiği düşünülürse manyetik inorganik katkılı polimer kompozitler için bahsedilen yüksek yoğunluk ve zayıf mekanik dayanımlardan kaynaklı dezavantajların dielektrik özellikteki dolgularla hazırlanan kompozitler için de geçerli olacağı açıktır.

### 2.5.3. Karbon Dolgulu Polimer Kompozitler

Karbon türevleri bilindiği gibi elektriksel olarak iletken dolayısıyla da elektromanyetik dalgaları yansıtma özelliğine sahip bir malzeme olup RAM olarak tek başına kullanımında kabul edilebilir sınırlarda soğurma gerçekleştirilememektedir. Ancak karbon malzemelerin bir polimer matris içerisinde düşük oranlarda dağıtılması ile hazırlanan düşük elektriksel iletkenliğe sahip polimer kompozitlerin daha önce belirtilen sebeplere bağlı olarak belirli frekans aralıklarında etkin soğurma yapabilmektedir.

Tablo 2.7’de farklı polimerler ve karbon dolgular kullanılarak gerçekleştirilen çalışmaların sonuçları derlenmiştir. Çalışmalarda elde edilen performans parametreleri incelendiğinde, çalışmaların büyük bir çoğunluğunda yeterli  $RL_{\min}$  değerlerinin elde edilebildiği görülürken EAA aralıklarının birçok çalışmada tanımlı band genişliklerini (X-band, Ku-band gibi) kapsamaktan oldukça uzak olduğu görülmektedir. HPAA değerinin ise iki çalışma haricinde dikkate alınacak bir genişliğe erişemediği görülmektedir. Fiziksel özellikler açısından kıyaslandığında ise kompozit kalınlıklarının daha önce verilen değerlere yakın olmasına rağmen dolgu oranlarının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Öte yandan karbon dolguların yoğunluklarının yaklaşık  $2 \text{ g/cm}^3$  olduğu düşünüldüğünde hazırlanan kompozitlerin hafiflik açısından önemli bir avantaja sahip olduğu öngörülebilir. Ayrıca karbon dolguların yüksek yüzey alanı ve geometrik özellikleri sayesinde karbon/polimer kompozitlerinin manyetik dolgulu kompozitlere göre çok daha yüksek elastik modül ve darbe dayanımı gibi özelliklere de sahip olacağı öngörülebilir.

Bu avantajlarıyla hem bilimsel çalışmalarda hem de ticari uygulamalarda karbon dolgulu kompozitlerin soğurma performanslarının geliştirilmesi çok daha ilgi çeken bir konu olmaktadır. Bu amaçla yapılan değişik çalışmalarda farklı karbon tiplerinin kullanımının yanı sıra üretim yöntemlerinin, malzeme tasarımlarının (birden fazla katman gibi) ve kompozit morfolojisinin etkileri incelenerek yüksek soğurma performansına sahip karbon içerikli polimer kompozitlerin geliştirilmesi ile ilgili çeşitli yaklaşımlarda bulunulmuş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

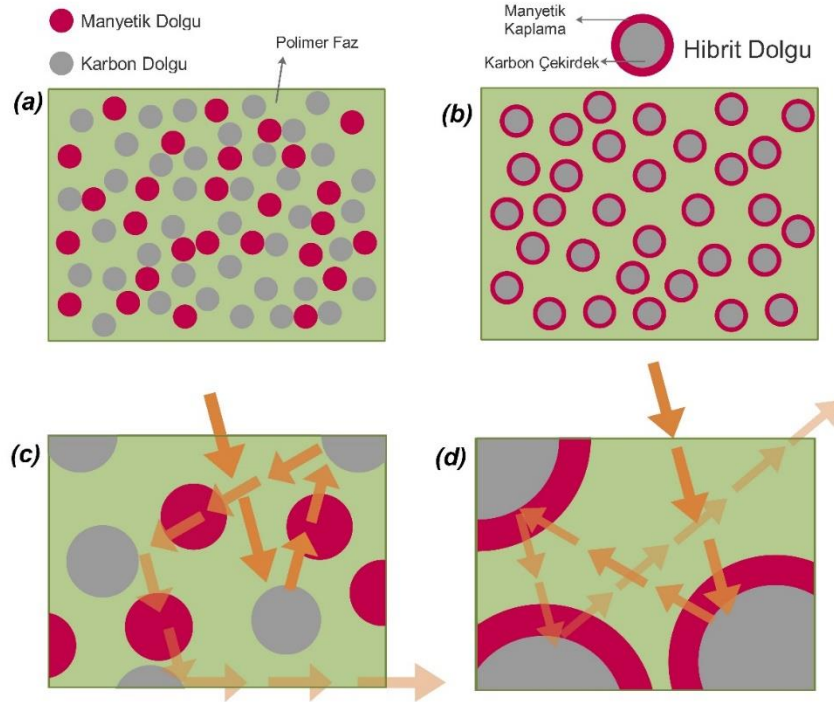
**Tablo 2.7:** Literatürde bulunan bazı karbon dolgulu polimer kompozitlerin elektromanyetik dalga söğürme özellikleri.

Polimer	Dolgu	Dolgu Oranı	Örnek Kalınlık (mm)	Hazırlama Yön.	RL <sub>min</sub> (dB)	EAA (GHz)	HPAA *(GHz)	Ref.
Silikon	CB	%10(ağ.)	1.9	Belirtilmemiş	-22(11.6)	9.6-13.5	-	[116]
PANi	CB	%30(ağ.)	2	Eş-anlı pol.	-42.5(11.2)	10-13	-	[117]
Epoksi	CB	%2(ağ.)	2.77	Mekanik kar.	-25(10)	8.9-11.8	-	[118]
Epoksi	G	%3(ağ.)	9.7	Mekanik kar.	-3(12.4)	-	-	[80]
Fenol form.	G	%25(ağ.)	2	Ultrasonik kar.	-12.7(14.5)	13.6-18	-	[119]
Epoksi	EG	%40(ağ.)	1	Santrifüj kar.	-17(11)	7.2-15.8	-	[120]
TPU	EG	%20(ağ.)	1	Eriyik harm.	-26(12.1)	11.3-12.4	-	[73]
Epoksi	CNF	%4(ağ.)	4	Mekanik Kar.	-26(18.4)	18-19.8	-	[84]
Epoksi	CNF	%1.5(ağ.)	2.02	Mekanik Kar.	-18(10)	9.2-11.5	-	[118]
Epoksi	CNF	%6(ağ.)	3	Mekanik Kar.	-12.2(10.7)	10.2-11.25	-	[121]
Epoksi	Poröz CF	%6(ağ.)	2.3	Mekanik Kar.	-31(9.7)	8.8-12	-	[121]
Epoksi	MWCNT	%2(ağ.)	2.2	Mekanik Kar.	-26(10)	9-12.5	-	[118]
PET	MWCNT	%4(ağ.)	2	Eriyik harm.	-17(7.6)	6.5-9.2	-	[122]
Epoksi	MWCNT	%5(ağ.)	1	Ultrasonik kar.	-22.9(11.4)	10.1-13.1	-	[123]
Epoksi	SWCNT	%4(ağ.)	9.7	Mekanik Kar.	-18(10)	9-10.8	-	[80]
TPU	SWCNT	%5(ağ.)	2	Eş-anlı pol.	-22 (8.8)	7.6-10.4	-	[87]
NBR	RGO	%10(ağ.)	3	Çözeltilen Dök.	-58(9.8)	8-12	9.2-10.2	[124]
NBR	RGO	%10(ağ.)	4	Çözeltilen Dök.	-39(7)	6.3-8.4	-	[124]
NBR	RGO	%4(ağ.)	4	Çözeltilen Dök.	-23(8.8)	7.1-10.2	-	[124]
Epoksi	GNP	%15(ağ.)	3	Mekanik Kar.	-14(19)	17-20	-	[125]
PEO	GNP	%2.6(hc.)	2	Çözeltilen Dök.	-32.5(14.2)	12.2-18	13.8-15.8	[125]

\*Aralığın &lt;1 GHz olması durumunda ihmal edilmiştir.

### 2.5.4. Hibrit ve Farklı Tipte Dolgularla Hazırlanmış Polimer Kompozitler

Karbon dolgulu polimer kompozitlerin görece düşük soğurma performanslarının geliştirilmesi amacıyla gerçekleştirilen özgün formülasyon yaklaşımlardan biri manyetik ve karbon dolguların tek bir kompozit katmanı içerisinde beraber kullanımudur [19, 126]. Bu yaklaşım Şekil 2.22(a)'da verildiği gibi karbon ve manyetik özellikli dolguların fiziksel olarak polimer bir yapı içine katılmasıyla uygulanabileceği gibi Şekil 2.22(b)'de verilen yüzeyi manyetik, iç kısmı ise iletken karbon olan çekirdek-kabuk morfolojisine sahip hibrit dolguların sentezlenmesi ve bu dolguların bir polimer yapı içinde dağıtılmasıyla uygulanabilmektedir [127-131]. Şekil 2.22(c) ve Şekil 2.22(d)'de hem karışım hem de hibrit dolgu ile hazırlanmış bir kompozitteki elektromanyetik dalganın davranışı şematik olarak gösterilmiştir. Her iki şekilde de karbon tanecikler üzerinden yansıyan dalga tekrar tekrar manyetik dolgular üzerine yönlendirilmekte böylelikle hem çarpışmalardan hem de manyetik dolgudan kaynaklı sönümlenme arttırılmaktadır.



**Şekil 2.22:** (a-c) Karbon manyetik karışık dolgu içeren kompozitin şematik gösterimi, (b-d) Manyetik özellikli bileşen ile yüzeyi kaplanmış karbon dolgu (hibrit dolgu) içeren kompozitin şematik gösterimi.

Hibrit ya da “karbon/manyetik karışık” dolguların bir arada kullanılmasının daha yüksek soğurma etkinliklerinin yanında, sağladığı bir diğer avantaj ise sadece manyetik dolguların kullanıldığı kompozitlere göre çok daha düşük manyetik bileşen içermesine bağlı olarak düşük yoğunluk değerleridir. Bahsedilen avantajlarının da etkisiyle özellikle son on yılda RAM geliştirilmesi amaçlı hibrit ya da “karbon/manyetik karışım” dolgu içeren polimer kompozitlerin geliştirilmesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları Tablo 2.8’ de özetlenmiştir. Tabloda verilen performans göstergeleri ( $RL_{\min}$ , EAA ve HPAA) karbon dolgulu kompozitlerin performans göstergeleri ile karşılaştırmalı olarak incelendiğinde karışım ve hibrit dolguların kullanılması ile özellikle EAA ve HPAA’nın önemli şekilde geliştirilebildiği görülmektedir. Elde edilen ürünlerin EAA değerleri dikkate alındığında, bu tip kompozitlerin X- ve Ku- band aralıklarında çalışan RADAR sistemlerine karşı rahatlıkla kullanılabilceği görülmektedir.

**Tablo 2.8:** Hibrit ve karışım dolgularla hazırlanan bazı polimer kompozitlerin elektromanyetik dalga absorplama performansları.

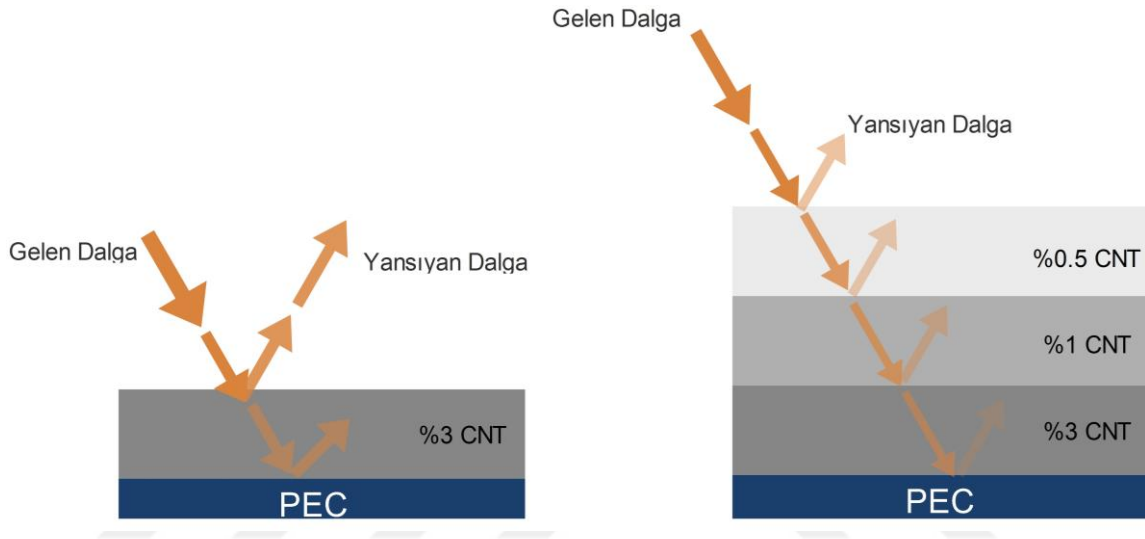
Polimer	Dolgu	Dolgu Oranı	Örn. Kal. (mm)	$RL_{\min}$ (dB)	EAA (GHz)	HPAA (GHz)	Ref.
Parafin	Ni <sub>0.5</sub> Zn <sub>0.5</sub> Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Karbonil Demir	%10 (ağ.) %10 (ağ.)	2.5	-44(7.8)	6.2-10	~7-8	[132]
Epoksi	PANi Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	%20 (ağ.) %0 (ağ.)	1	-11 (18)	17.5-18	-	[133]
Epoksi	PANi Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	%15 (ağ.) %10 (ağ.)	1	-42 (16.3)	13- (>18)	15.5- 17.2	[133]
Epoksi	PANi Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	%15 (ağ.) %25 (ağ.)	1	-7.4 (14.85)	13.4-16	14.4- 15.2	[133]
Parafin	Grafen/ Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SiO <sub>2</sub> /SnO <sub>2</sub>	%25 (ağ.)	2	-37 (15.1)	12-18	14.2- 15.4	[134]
Parafin	Grafen/ Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	%25 (ağ.)	2	-11 (16)	-	-	[134]
Epoksi	NiFe kaplı CNF	%40 (ağ.)	2.4	-20 (10)	8.3-12	-	[128]
Parafin	Karbon kaplı demir tozu	%50 (ağ.)	3.1	-43 (9.6)	8.2-11.2	9.1-10.1	[131]

\* Bütün örnekler fiziksel karıştırma yöntemiyle hazırlanmıştır.

### 2.5.5. Çok Katmanlı Polimer Kompozitler

Karbon içerikli polimer kompozitlerde özellikle EAA ve HPAA’nın geliştirilmesinde uygulanan bir diğer yaklaşım ise farklı bileşimlere sahip çok katmanlı kompozitlerin hazırlanmasıdır [80, 135-137].

Çok katmanlı kompozitlerin kalkanlama etkinlikleri elektromanyetik dalganın bir engelle karşılaştığında nasıl davranacağı ile ilgili önceki bölümlerde verilen bilgiler ile doğrudan ilişkilidir. Örneğin Şekil 2.23(a)'da arka kısmı mükemmel iletkenle kaplanmış %3 oranında MWCNT içeren bir kompozit örnek üzerindeki elektromanyetik dalgaların soğurulma ve geri yansımaları şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 2.23(b)'de ise arka kısmı yine mükemmel iletkenle kaplanmış 0.5, %1 ve %3 oranında MWCNT içeren polimer kompozitlerin üst üste birleştirilmesi ile oluşturulmuş çok katmanlı kompozit şematik olarak gösterilmiştir.

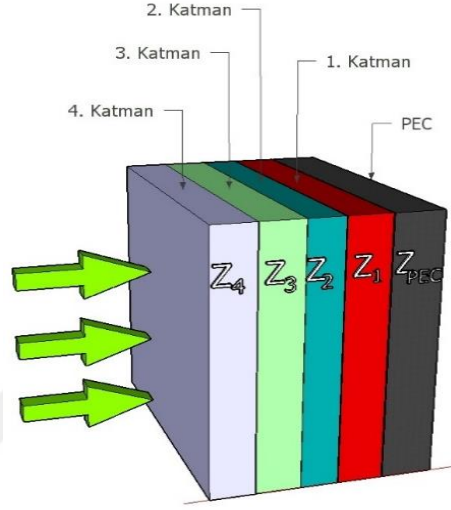


**Şekil 2.23:** (a) Tek katmanlı ve (b) çok katmanlı bir RAM'da elektromanyetik dalganın soğurulması.

Her iki örnek için de elektromanyetik dalganın karşılaştığı yüzeyler karşılaştırıldığında, %3 oranında MWCNT içeren örneğin düşük yüzey empedansı nedeni ile %0.5 oranında CNT içeren örneğe göre daha çok geri yansımaya neden olacağı açıktır. Çok katmanlı yapı içerisine ilerleyen elektromanyetik dalga daha sonra katmanlar ilerledikçe kademeli olarak yüzey empedansları azalacak ve en son %3 dolgu içeren örneğe çarpacaktır. Bu durumda da geri saçılma oranı ilerlediği ortamın (%2 oranında CNT içeren katman) havaya göre daha düşük empedansı olması sebebi ile geri yansımaya tek katmanlı örneğe göre oldukça düşük olacaktır. Böylelikle çok katmanlı örneklerde geri yansımaya oranı tek katmanlı örneklerle göre düşürülebilmekte, EAA ve HPAA genişletilebilmektedir.

Çok katmanlı kompozitlerin  $RL$  değerlerinin hesaplanmasında, öncelikle her katmana ait empedans ( $Z_i$ ) değeri, kendinden bir önceki katmanın empedans değerine ( $Z_{i-1}$ ) bağlı olarak hesaplanır daha sonra ilk ve son katmanların empedans değerleri üzerinden malzemenin toplam

RL değeri denklem 2.45'e göre hesaplanır [80]. Şekil 2.24'deki gibi dört katmanlı bir kompozitin RL değerinin hesaplanması için kullanılan bağıntılar denklem 2.41 - 2.44'de verilmiştir. Denklemlerde verilen alt indisler katman numarasını,  $t$  ise ilgili katmanın kalınlığını göstermektedir. Denklemdaki her bir katmana ait  $\beta$  ve  $\eta$  parametreleri daha önce verilen denklem 2.39 – 2.40'a göre hesaplanmaktadır.



Şekil 2.24: Çok katmanlı bir RAM örneği.

$$Z_{i_1} = \eta_1 \frac{Z_{PEC} \cos(\beta_1 t_1) + j \eta_1 \sin(\beta_1 t_1)}{\eta_1 \cos(\beta_1 t_1) + j Z_{PEC} \sin(\beta_1 t_1)} \quad (2.41)$$

$$Z_{i_2} = \eta_2 \frac{Z_{i_1} \cos(\beta_2 t_2) + j \eta_2 \sin(\beta_2 t_2)}{\eta_2 \cos(\beta_2 t_2) + j Z_{i_1} \sin(\beta_2 t_2)} \quad (2.42)$$

$$Z_{i_3} = \eta_3 \frac{Z_{i_2} \cos(\beta_3 t_3) + j \eta_3 \sin(\beta_3 t_3)}{\eta_3 \cos(\beta_3 t_3) + j Z_{i_2} \sin(\beta_3 t_3)} \quad (2.43)$$

$$Z_{i_4} = \eta_4 \frac{Z_{i_3} \cos(\beta_4 t_4) + j \eta_4 \sin(\beta_4 t_4)}{\eta_4 \cos(\beta_4 t_4) + j Z_{i_3} \sin(\beta_4 t_4)} \quad (2.44)$$

$$RL = 20 \log_{10} \left| \frac{(Z_{i_4} - Z_0)}{(Z_{i_4} + Z_0)} \right| \quad (2.45)$$

Çok katmanlı kompozitlerin tek katmanlı kompozitlere göre üstünlüğünün ortaya konması amacıyla Micheli ve arkadaşları ağırlıkça %1-5 arasında değişen oranlarda grafit, SWCNT, MWCNT, CNF ve fulleren içeren karbon/epoksi kompozitleri hazırlayarak, 8.2-12.4 GHz (X-

band) frekans aralığında dalga kılavuzu yöntemine göre dielektrik parametreleri belirleyerek 10 GHz frekans değeri için elde edilebilecek en düşük  $RL$  değerini ve bu  $RL$  değerinin elde edilebilmesi için gerekli örnek kalınlığını hesaplamışlardır [80]. Bu çalışmada, en yüksek performansın elde edildiği ağ. %3 oranında SWCNT içeren 9.7 mm kalınlığındaki örneklerle -19 dB  $RL_{min}$  ve 9.0-10.8 GHz (1.8 GHz) EAA değeri elde edilebileceği bildirilmiştir.

Daha sonra tek katman şeklinde hazırlanan kompozitlerin 10 GHz'daki permitivite ve permeabilite değerlerinden yola çıkarak genetik algoritma yardımıyla  $RL_{min}$  değerinin elde edilebileceği 4 katmanlı bir tasarım belirlenmiştir. Çok katmanlı tasarımda havadan mükemmel iletkenine doğru 1. katmanda 2 mm kalınlığında ağ. %1 grafit, ikinci katmanda yine 2 mm kalınlığa sahip ağ. %3 grafit, üçüncü ve dördüncü katmanda ise 3 mm kalınlığında sırasıyla ağ. %3 ve % 5 CNF (toplam yaklaşık 10 mm) içeren kompozitlerin kullanılması durumunda 8 ile 11.5 GHz frekans aralığının tamamının HPAA (<-20 dB) olacağı ve 8.5 GHz değerinde -55 dB'ye varan  $RL_{min}$  değerinin elde edilebileceği belirtilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar (toplam kalınlık görece yüksek olmasına rağmen) çok katmanlı tasarımlarla  $RL_{min}$ , EAA ve HPAA değerlerinin etkin bir şekilde geliştirebileceğini ortaya koymuştur.

### 2.5.6. RADAR Soğurucu Polimer Kompozitlerde Yapı-Performans İlişkisi

Daha önce literatür özetini oluşturan tablolardaki bulgular incelendiğinde aynı oranda aynı dolgu tipini ve polimer fazını içeren kompozitlerde dahi oldukça farklı soğurma performanslarının elde edildiği görülmektedir. Bu farklılıkların birçoğu üretim yönteminden, dolgunun morfolojik özelliklerinden, dolgu-polimer etkileşimlerinden ve dolgu dağılımındaki farklılıklar nedeniyle oluşan mikro-yapı değişikliklerinden kaynaklanmaktadır. Özellikle RAM geliştirmesi konusunda çalışan araştırmacıların büyük bir kısmının fizik ve elektrik/elektronik alanından olmaları nedeniyle kompozitin mikro-yapısal özellikleri ile soğurma performansı arasındaki ilişkinin mekanik ya da reolojik özelliklerin mikro-yapı ile olan ilişkisi kadar detaylı çalışılmamasına neden olmuştur.

Görece nadir bulunan bu tarz çalışmaların birinde farklı tanecik boyutunun manyetik özellikli kompozitlerin elektromanyetik dalga soğurma performanslarına etkisini incelemek amacıyla Kumar ve arkadaşları tanecik boyutları 37 nm ile 240 nm arasında değişen dört farklı  $BaFe_{12}O_{19}$  sentezleyerek %80 oranında epoksi reçine içinde dağıtmışlar ve tanecik boyutunun permitivite, permeabilite ve  $RL$  değerleri üzerine olan etkisini incelemiştirler [138]. Çalışmada, tanecik boyutunun artması ile hem permitivite hem de permeabilite değerinin düzenli bir şekilde arttığı



ortaya konmuştur. Ayrıca aynı oranda  $BaFe_{12}O_{19}$  içeren aynı kalınlığa sahip örneklerde tanecik boyunun artması ile  $RL_{min}$  değerinin azaldığı, EAA'nın ise genişlediği görülmüştür.

Benzer şekilde tanecik boyutunun karbon dolgular ile hazırlanmış kompozitlerin kalkanlama performanslarına etkisini araştıran bir başka çalışmada ise, Li ve arkadaşları çapları yaklaşık 0.1-0.3  $\mu m$  ve  $\sim 100$  nm olan mikron boyutlu karbon elyaf ve nano karbon elyaf hazırlayarak farklı oranlarda epoksi matris içinde dağıtmışlar ve elektromanyetik dalga soğurma performanslarını incelemişlerdir [121]. Çalışmada mikron boyutlu gözenekli karbon elyafın nano karbon elyafa göre hem  $RL_{min}$  hem de EAA değerleri açısından daha yüksek performans gösterdiği bildirilmiştir. Bu sonuçlardan genel olarak hem manyetik dolgular için hem de karbon dolgular için tanecik boyutundaki artışın kompozitin elektromanyetik kalkanlama performansına pozitif katkısı olduğu yorumu yapılabilir. Ancak özellikle bileşimdeki karbon elyaf oranının artışı ile yüksek boyutlu taneciklerin daha çabuk fiziksel ağlaşma oluşturarak elektriksel iletkenlik sağlaması ve buna bağlı olarak da soğurma performansı açısından etkisiz hale gelebilme ihtimali göz önünde bulundurulmalıdır.

Morfoloji üzerindeki bir diğer önemli parametre de dağılım oranı ( $A_f$ )'dir. Manyetik dolgular ile hazırlanmış polimer kompozitler için farklı dağılım oranının permitivite, permeabilite ve elektromanyetik soğurma performansı üzerine olan etkisinin incelenmesi amacıyla Ruey-Bin Yang, farklı oranlarda küresel ( $A_f = 1$ ) ve tabaka şeklinde ( $A_f = 20-100$ ) iki ayrı geometride karbonil demiri %40 ile %60 arasında değişen oranlarda epoksi matris içerisine katarak dielektrik analizi gerçekleştirmiştir [139]. Dielektrik parametreler üzerinden  $RL$  değerlerinin de karşılaştırıldığı çalışmada %50 karbonil demir içeren 3 mm kalınlığındaki örneklerden yüksek  $A_f$  değerine sahip örneğin ölçümünde yaklaşık 6 GHz'de -22.5 dB  $RL_{min}$  değeri elde edilirken düşük  $A_f$  ye sahip örnekte 10 GHz'de -12 dB  $RL_{min}$  değerinin elde edilebildiği bildirilmiştir. Çalışmada  $A_f$  değerinin artması ile permitivite, permeabilite ve soğurma performansının arttığı belirtilmiştir. Dağılım oranının etkisinin tartışıldığı bir diğer çalışmada ise Jin-Bong Kim ve arkadaşları karbon siyahı, karbon elyaf ve karbon nanotüpü epoksi reçine içinde dağıtarak dielektrik ölçümleri gerçekleştirmiş daha sonrada  $RL$  değerini belirlemişlerdir [118]. Bu çalışmada da  $A_f$  değerine bağlı olarak en yüksek performansın karbon nanotüp ile, daha sonra CNF ile sağlanabildiği görülürken en düşük performansın ise CB dolgulu örneklerde elde edildiği bildirilmiştir.

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1. MALZEMELER

Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda polimer matris olarak BAYER tarafından DESMOPAN®3380 kodlu polieter esaslı termoplastik poliüretan (TPU) kullanılmıştır. Polimere ait bazı fiziksel özellikler Tablo 3.1’de verilmiştir. Dolgu olarak ise iletken karbonlar, manyetik ve hibrit tanecikler olmak üzere üç ayrı tür malzeme kullanılmıştır.

**Tablo 3.1:** Desmopan 3380 kod numaralı TPU’nun bazı özellikleri.

Fiziksel özellik (Birim)	Değer
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1.6
Maksimum Çekme Dayanımı (MPa)	44
Kopma Uzaması (%)	590
Sertlik (Shore A)	80
T <sub>g</sub> (°C)	-40 °C
İşleme Sıcaklıkları. (°C)	185-200 (enj.) 175-190 (ekst.)

##### 3.1.1. Karbon Dolgular

Denemelerde karbon dolgu olarak karbon siyahı (CB), grafit (G), genişletilmiş grafit (EG), karbon nanoelyaf (CNF) ve karbon nanotüp (CNT) kullanılmıştır. Dolgulara ait üretici firmalar, kod numaraları ve fiziksel özellikleri Tablo 3.2’de özetlenmiştir.

**Tablo 3.2:** Kullanılan karbon dolguların bazı fiziksel özellikleri.

Dolgu Tipi	CB	G	EG	CNF	CNT
Üretici Firma	Cabot Botlek	TIMCAL TIMREX	TIMCAL TIMREX	PYROGRAF	SIGMA-ALDRICH
Ticari İsim (Kod numara)	Vulcan XC72	KS75	BNB90	Pyrograf-III PR-24 LHT	Aldrich-724769
Geometri	Küresel	Tabakalı	Tabakalı	Çubuksu	Çubuksu
Tanecik Boyutu	50 nm	56 µm	85 µm	Pyrograf-III PR-24 LHT	D:6-9 nm L:5 µm
Yüzey Alanı (g/m <sup>2</sup> )	218	6.5	28.4	50-60	-
OAN	174	84	150	-	-
Yoğunluk	0.264	2.24	2.24	1.95	2.1

### 3.1.2. Manyetik Dolgular

Manyetik dolgu olarak demir (II-III) oksit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), baryum ferrit ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ), stronsiyum ferrit ( $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) ve nikel (Ni) kullanılmıştır. Dolgulara ait üretici firmalar, kod numaraları, kimyasal yapılar ve fiziksel özellikleri Tablo 3.3’de özetlenmiştir.

**Tablo 3.3:** Deneylerde kullanılan manyetik özellikli dolguların bazı fiziksel özellikleri.

Dolgu	Üretici Firma	Kod Numarası	Tan. Boy.	Yoğunluk
$\text{Fe}_3\text{O}_4$	Sigma-Aldrich	637106	50-100 nm	4.8-5.1
$\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$	Sigma-Aldrich	637602	<100nm	-
$\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{FeO}_3$	Sigma-Aldrich	734640	<5 $\mu\text{m}$	-
Ni	Sigma-Aldrich	577995	<100nm	8.9

### 3.1.3. Hibrit Dolgular

Çalışmada hibrit dolgu olarak yüzeyi farklı oranlarda nikel ile kaplanmış iki farklı grafit kullanılmıştır. Dolgulara ait özellikler Tablo 3.4’de özetlenmiştir.

**Tablo 3.4:** Deneylerde kullanılan hibrit dolguların bazı fiziksel özellikleri.

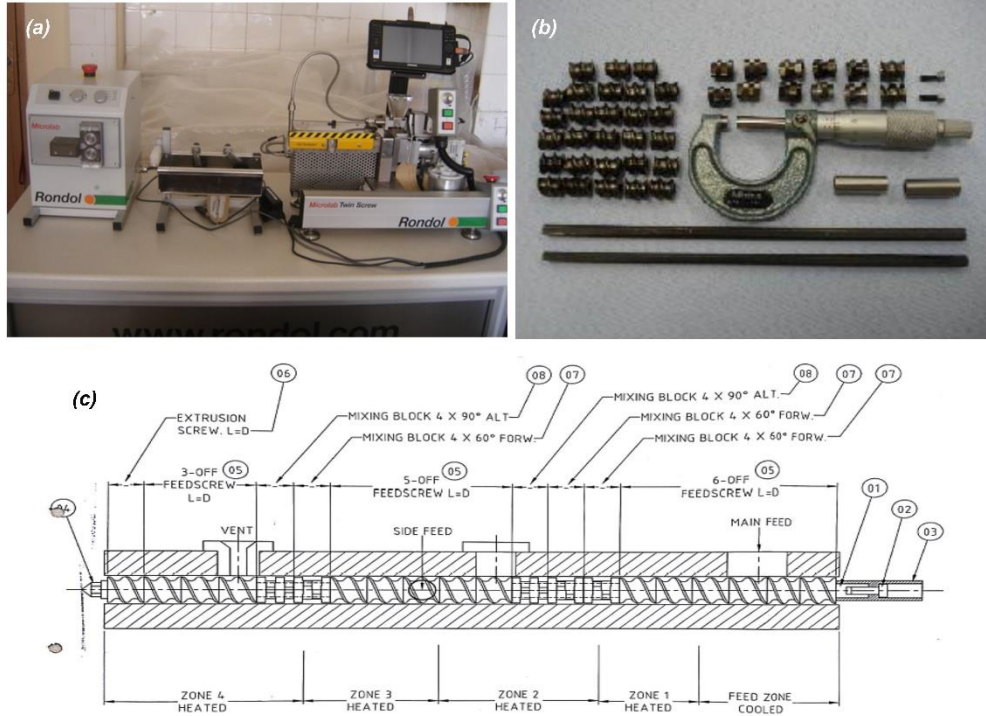
Dolgu	Üretici Firma	Kod Numarası	Tan. Boy.	Yoğunluk	Ni/C Oranı
Ni kap.karbon	Oerlikon	E-Fill 2701	165	4	60/40
Ni kap.karbon	Oerlikon	E-Fill 2805	90	5	75/25

## 3.2. ÖRNEKLERİN HAZIRLANMASI

Kompozit örneklerin hazırlanması amacıyla eriyik harmanlama yöntemi, manyetik karıştırıcının kullanıldığı çözeltiden döküm yöntemi ve ultrasonik karıştırıcıların kullanıldığı çözeltiden döküm yöntemi olmak üzere üç farklı teknik kullanılmıştır. Kompozit hazırlama işleminden önce hem kullanılacak olan polimere hem de dolgulara 80 °C’ de en az 6 saat süreyle vakum etüvünde kurutma işlemi uygulanmıştır.

Eriyik harmanlama yönteminde toz formundaki dolgu ve granül formundaki polimer beslemeden önce kuru karışım şeklinde hazırlanmış daha sonra RONDOL marka çift vidalı (eş yönlü, vida çapı:10 mm, L/D:20) ekstrudere beslenerek granül formunda kompozitler elde edilmiştir. Kullanılan ekstruder ve modüler vida parçalarının fotoğrafları Şekil 3.1(a) ve Şekil 3.1(b)’de, ekstruderde kullanılan vidalara ait teknik çizim ise Şekil 3.1(c)’ de verilmiştir. Elde edilen granüller daha sonra sıcak pres ile 40×40×2 mm boyutlarında levhalar olarak

şekillendirilmiştir. Ekstrüzyonda 185-195-205-210 °C sıcaklık profili, preslemede ise 220 °C sıcaklık ve 2 ton basınç uygulanmıştır.



**Şekil 3.1:** Kullanılan (a) ekstruder ve (b) modüler vida setinin fotoğraf ile (c) kompozit hazırlamada kullanılan vida tasarımına ait teknik çizim.

Farklı karıştırıcılar kullanılarak çözeltiden döküm yöntemine göre örneklerin hazırlanmasında ise kurutma işlemi uygulanan 3 gr. TPU granülü 30 ml tetrahidrofuran (THF) içinde manyetik karıştırıcı yardımıyla tamamen çözülmüş daha sonra formülasyona göre gereken miktarda dolgu ilave edilerek manyetik karıştırıcıyla hazırlanan örneklerde 24 saat, ultrasonik karıştırıcıyla hazırlanan örnekler de ise 2 saat karıştırma işlemi uygulanmıştır. Karıştırma işlemi sonunda dolgu/polimer karışımları petri kaplarına dökülerek 48 saat oda şartlarında, 48 saat 60 °C'de ve 48 saat 80 °C'de bekletilerek çözücü buharlaştırılmış ve yaklaşık 200-300 µm kalınlığında film örnekleri elde edilmiştir. Doğrusal akım altında gerçekleştirilen elektriksel iletkenlik ve dinamik mekanik analiz testleri hazırlanan filmlerin test boyutlarında kesilmesi ile gerçekleştirilmiştir. VNA ile gerçekleştirilen elektromanyetik dalga geçirgenliği testleri ise filmler arasında hava kalmayacak şekilde toplam kalınlığı 1-2 mm seviyelerinde olacak şekilde üst üste birleştirilerek hazırlanan numunelere uygulanmıştır. Filmlerin üst üste yapıştırılması 90 °C'de 200 bar basınç altında gerçekleştirilmiştir. Birleştirme sırasında örneklerin mikro yapılarının değişmemesi amacıyla sıcaklık düşük tutulmuştur.

### 3.3. TESTLER

#### 3.3.1. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Analizleri

SEM analizleri, kompozitlerin morfolojik özelliklerin son ürün performansı ile olan ilişkisinin ortaya konulması amacıyla film şeklinde hazırlanan örnekler üzerine uygulanmıştır. Film örnekleri sıvı azotta soğutulup kırılmış ve kırma kesitleri mikroskopta incelenmiştir. . Örnekler altın kaplanarak FEI marka Quanta FEG model FESEM taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir.

#### 3.3.2. DC İletkenlik Testleri

Örneklerin doğrusal akım (DC) iletkenlik testleri Keithley 2100/120 model dijital multimetre cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Test öncesinde bütün örnekler 24 saat süreyle 80 °C’de etüvde bekletilerek nemden arındırılmış daha sonra ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sırasında yüzey alanının artırılarak daha doğru sonuçların elde edilebilmesi amacıyla elektrotların örneğe temas noktaları gümüş pasta ile kaplanmıştır. Ölçüm sonuçlarında cihaz ekranından okunan direnç değerleri ve örnek boyutları denklem 2.1 ve denklem 2.2’de yerine konarak örneğe ait iletkenlik ( $\sigma$ ) değerleri hesaplanmıştır [140]. Denklemlerde  $R$  ohm cinsinden cihazda okunan direnç değerini,  $A$  örneğe ait kesit alanını ( $m^2$ ),  $L$  örneğin boyunu (m),  $\rho$  örneğin öz direncini (ohm.m) ve  $\sigma$  ise örneğin iletkenliğini ( $S=1/ohm.m$ ) göstermektedir.

$$\sigma = 1/\rho \quad (2.1)$$

$$\rho = R.A/L \quad (2.2)$$

#### 3.3.3. Dinamik Mekanik Analiz (DMA)

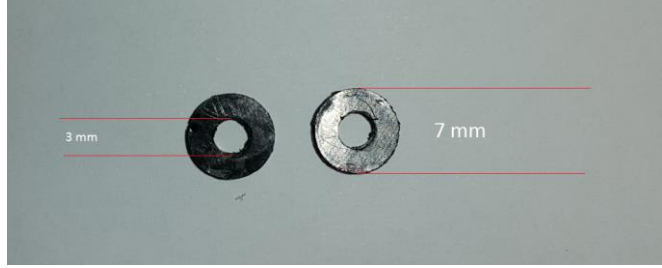
Hazırlanan kompozit örneklerinin katı-hal viskoelastik özellikleri SII Nanotechnology marka ExStar 6200 DMS model dinamik mekanik analiz cihazında gerçekleştirilen testlerle belirlenmiştir. Testler -60 / +130 °C arasında 3 °C/dak. ısıtma hızında ve 1 Hz frekansta gerçekleştirilmiştir. Testi yapılacak örnekler ölçüm öncesi en az 6 saat süreyle 80 °C’ de bekletilerek örnek üzerine tutunan nemin test sonuçlarına etkisi azaltılmaya çalışılmıştır.

### 3.3.4. Elektromanyetik Dalga Kalkanlama ve Soğurma Performanslarının Belirlenmesi

Örneklere ait saçılma parametreleri ( $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$ ) “Koaksiyel İletim Hattı” yöntemine göre Keysight marka 85055AR03 kod numaralı “koaksiyel airline” örnek tutucu ve yine Keysight marka N9926A kodlu Vektör network analizörü (VNA)’nden oluşan ölçüm sistemi kullanılarak belirlenmiştir. Ölçüm sisteminin fotoğrafı Şekil 3.2’de verilmiştir. Ölçümler için gerekli dış çapı 7 mm, iç çapı 3 mm olan halka şeklindeki test örnekleri, 1-3 mm arası kalınlıkta hazırlanan 40×40 mm’lik plakalardan örnek kesme cihazı kullanılarak hazırlanmıştır. Şekil 3.3’de hazırlanan örnekler ve cihaza yerleştirilmesini gösteren fotoğraflar verilmiştir.



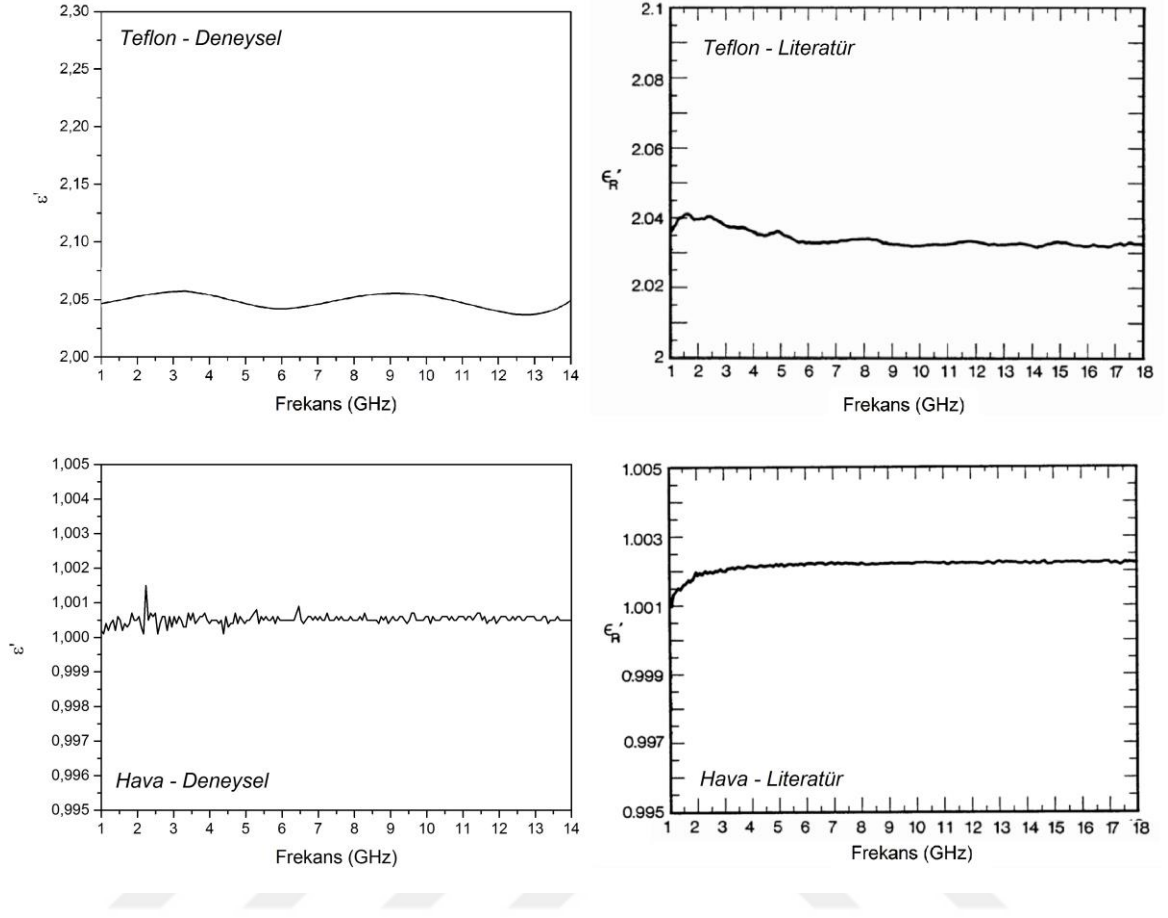
Şekil 3.2: Saçılma parametrelerinin ölçümünde kullanılan VNA ve ilgili test düzeneği.



**Şekil 3.3:** VNA analizleri için kullanılan örnek hazırlama cihazı ve hazırlanan örnekler.

Ölçümlerde deneysel olarak belirlenen saçılma parametreleri ( $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$ ) üzerinden permitivite ve permeabilite değerleri yine Keysight tarafından geliştirilen “N1500-001” kod numaralı “Keysight Material Measurement Suite 2015” yazılımı kullanılarak malzeme tipine göre seçilen modeller yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Ölçümler -10 dBm sinyal gücünde, 1000 Hz band aralığında (IFBW) ve 1-14 GHz frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sisteminin kalibrasyonu her toplu ölçüm öncesi Keysight mekanik kalibrasyon seti kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca her kalibrasyon sonrası özel olarak hazırlanan Teflon örnek ve hava için  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  değerleri belirlenmiş ve literatür değerleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3.4’de hava ve teflon için ölçülen  $\epsilon'$  değerleri literatür değerleriyle karşılaştırmalı olarak verilmiştir [141].



**Şekil 3.4:** Hava ve teflonu ait deneysel olarak belirlenen  $\epsilon'$  değerlerinin literatür değerleriyle karşılaştırılması.



## 4. BULGULAR

### 4.1. KOMPOZİT HAZIRLAMA TEKNİĞİNİN PERFORMANS ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Tez çalışmasının ilk bölümünde öncelikle aynı içeriğe sahip kompozit örnekler farklı hazırlama yöntemleriyle hazırlanarak, hazırlama yöntemine göre değişen mikro-yapı özelliklerinin elektriksel iletkenlik, permitivite, kalkanlama etkinlikleri ( $SE_A, SE_R, SE_T$ ) ve yansıma kaybı ( $RL$ ) değerleri üzerine olan etkisi incelenmiş daha sonra elde edilen sonuçlar ve hazırlama yöntemlerine ait avantaj ve dezavantajlar göz önünde bulundurularak tez çalışmanın diğer bölümlerinde kullanılacak üretim prosesi kararlaştırılmıştır.

Gerek endüstriyel uygulamalarda gerekse de bilimsel çalışmalarda ürün özellikleri ve kullanım koşulları dikkate alınarak birçok kompozit hazırlama yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasındaysa özellikle çözültiden döküm ve ekstrüzyon yöntemi diğerlerine göre daha yaygın bir şekilde kabul görmüş ve kullanılmıştır. Tez çalışmasının bu bölümünde, manyetik karıştırıcı ile basit mekanik karıştırmanın uygulandığı çözültiden döküm yöntemi (sc-ms), ultrasonik karıştırmanın uygulandığı çözültiden döküm yöntemi (sc-us) ve ekstrüzyonla kompozit hazırlamayı takiben baskı kalıplamanın kullanıldığı eriyik harmanlama (ext) olmak üzere üç farklı yöntem kullanılarak hazırlanan kompozitlerin özellikleri belirlenmiş ve tartışılmıştır.

Yöntemlerin kompozit morfolojisinde en önemli parametrelerden biri olan dolgu dağılımı üzerindeki etkilerinin daha açık bir şekilde ortaya konabilmesi amacıyla kompozitlerde dolgu olarak yumaksı yapısı nedeniyle dağıtılması birçok karbon türevine göre daha zor olan karbon nanoelyaf (CNF) kullanılmıştır. Tablo 4.1’de bu bölümde hazırlanan örneklere ait dolgu miktarı, hazırlama yöntemi ve örnek kodlaması özetlenmiştir.

Farklı üretim yöntemlerinin etkilerinin daha doğru bir şekilde yorumlanabilmesi amacıyla hazırlanan örneklere öncelikle SEM analizi uygulanarak üretim yönteminin kompozit mikro-yapısına olan etkisi incelenmiş daha sonra kompozitlerin doğrusal akım elektriksel iletkenlikleri ( $dc$ -iletkenlik), permitivite ( $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$ ) değerleri, kalkanlama etkinlikleri ( $SE_A, SE_R$  ve  $SE_T$ ) ve yansıma kayıpları ( $RL$ ) belirlenerek mikro-yapısal değişimler ışığında yorumlanmıştır. Tez çalışması süresince kullanılacak olan örnek hazırlama yönteminin belirlenmesi için bir ön çalışma şeklinde gerçekleştirilen bu kısımda sonuçlar sadece hedefe yönelik olarak mikro yapısal değişiklikler üzerinden yorumlanmış, dolgu ilavesinin neden

olduğu değişimler, bu değişimlerin mekanizması ve teorik temelleri gibi detaylı yorumlamalar yapılmamıştır. Daha detaylı yorumlar üretim yönteminin belirlenmesinden sonraki formülasyon çalışmalarına ait deneysel çalışmaların bulgularının tartışıldığı bölümlerde gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 4.1:** Üretim yönteminin belirlenmesi için hazırlanan örneklerin bileşimleri.

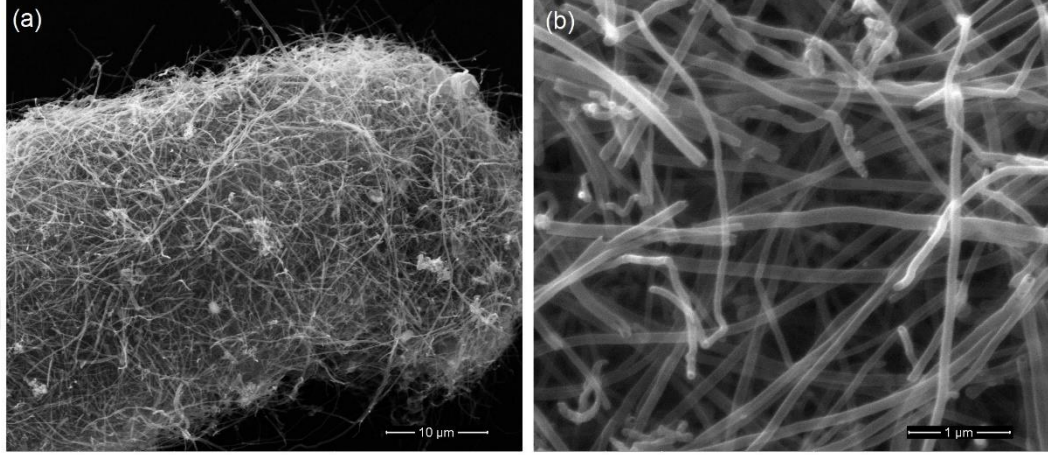
Örnek Kodu	Hazırlama Yönt.	Dolgu Miktarı (phr)
CNF1-sc-ms	Manyetik	1
CNF3-sc-ms	Karıştırıcının	3
CNF5-sc-ms	Kullanıldığı	5
CNF10-sc-ms	Çözeltiden	10
CNF20-sc-ms	Dökme	20
CNF1-sc-us	Ultrasonik	1
CNF3-sc-us	Karıştırıcının	3
CNF5-sc-us	Kullanıldığı	5
CNF10-sc-us	Çözeltiden	10
CNF20-sc-us	Dökme	20
CNF3-ext		3
CNF5-ext	Ekstrüzyon	5
CNF10-ext	Baskı kalıplama	10
CNF20-ext		20

#### 4.1.1. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Analizleri

Pyrograf-III PR-24-XT-LHT kod numaralı CNF'ye ait farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri Şekil 4.1(a-b)'de verilmiştir. Düşük büyütmenin uygulandığı ve birçok elyaftan oluşan büyük yığılmanın gözlenebildiği Şekil 4.1(a) incelendiğinde CNF demetlerinin yaklaşık 40 µm genişliğinde, 100 µm'den daha uzun dağıtılması zor yumak yapıya sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.1(b)'de ise bu yumağın yaklaşık olarak 100-200 nm arasında değişen çaplarda şeffaf nano elyaflardan oluştuğu görülmektedir.

20 phr oranında CNF içeren ve farklı yöntemlerle hazırlanan TPU/CNF kompozitlerin SEM görüntüleri Şekil 4.2(a-d)'de verilmiştir. Yüksek büyütmenin uygulandığı Şekil 4.2(b,d) incelendiğinde manyetik karıştırıcı yardımı ile çözeltiden döküm yöntemi ile hazırlanan CNF20-sc-ms örneğinde elyafların karmaşık yığınlar halinde bulunduğu görülürken ultrasonik karıştırmanın uygulandığı çözeltiden döküm yöntemi ile hazırlanan CNF20-sc-us örneğinde elyaf yığılımlarının ultrasonik karıştırıcının etkisiyle daha iyi dağıtılabildiği görülmektedir.

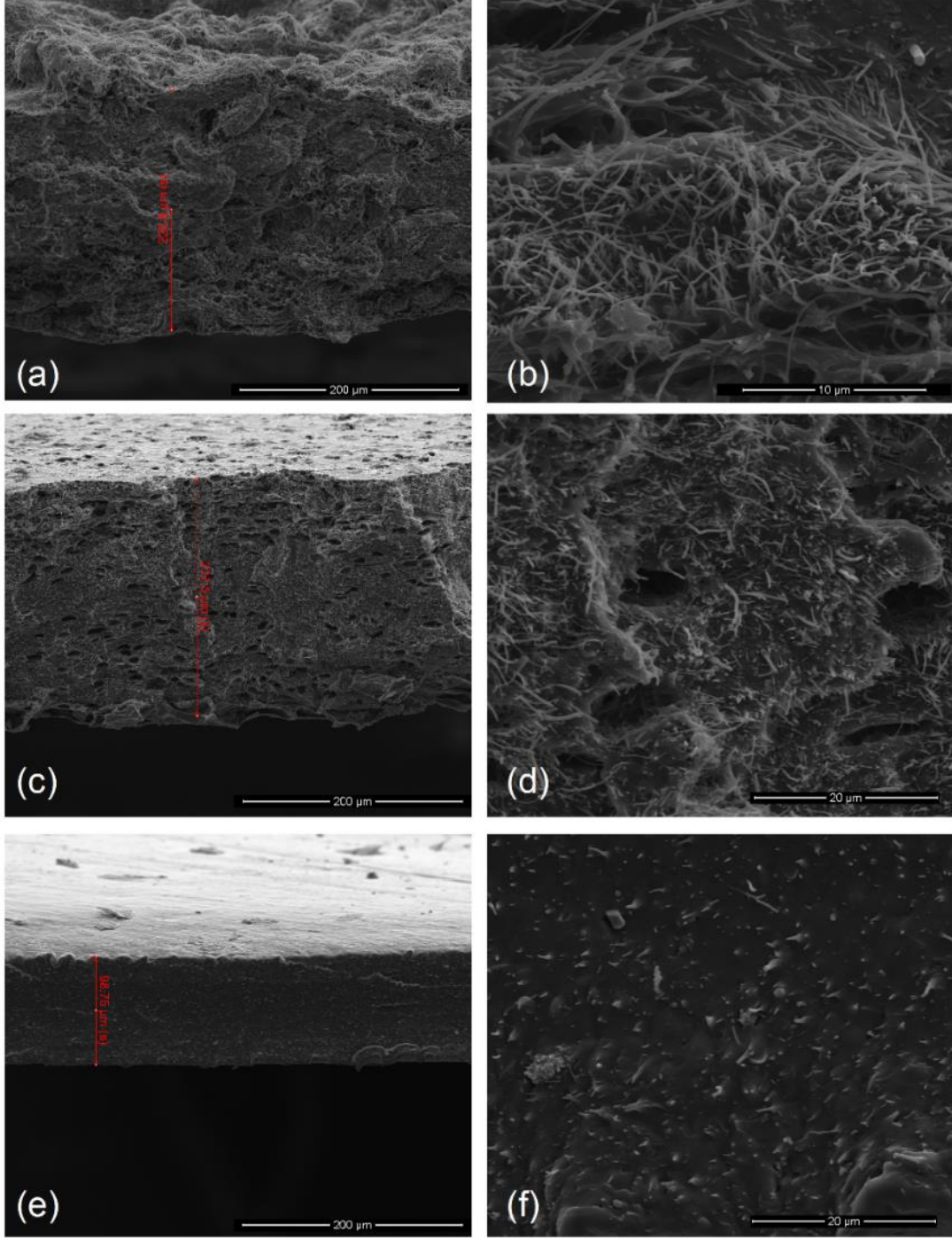
Şekil 4.2(f)'de ise ekstrüzyon yöntemiyle hazırlanan CNF20-ext örneğine ait SEM görüntüsünde ise elyaf taneciklerinin birçok noktadan parçalanarak çok daha kısaldığı, buna bağlı olarak da karmaşık elyaf demetlerinin etkin bir şekilde dağıtılabildiği görülmektedir.



Şekil 4.1: Pyrograf® PR-24-XT-LHT kod numaralı karbon nanoelyafın SEM görüntüsü.

Elde edilen görüntülerden yola çıkarak (elyaf çaplarının yaklaşık olarak bütün kompozitlerde aynı olduğu kabulüyle) kompozit morfolojisinde önemli bir parametre olan  $A_f$  değerlerinin üretim yöntemine göre “CNF-sc-ms > CNF-sc-us > CNF-ext” şeklinde sıralandığı söylenebilir.

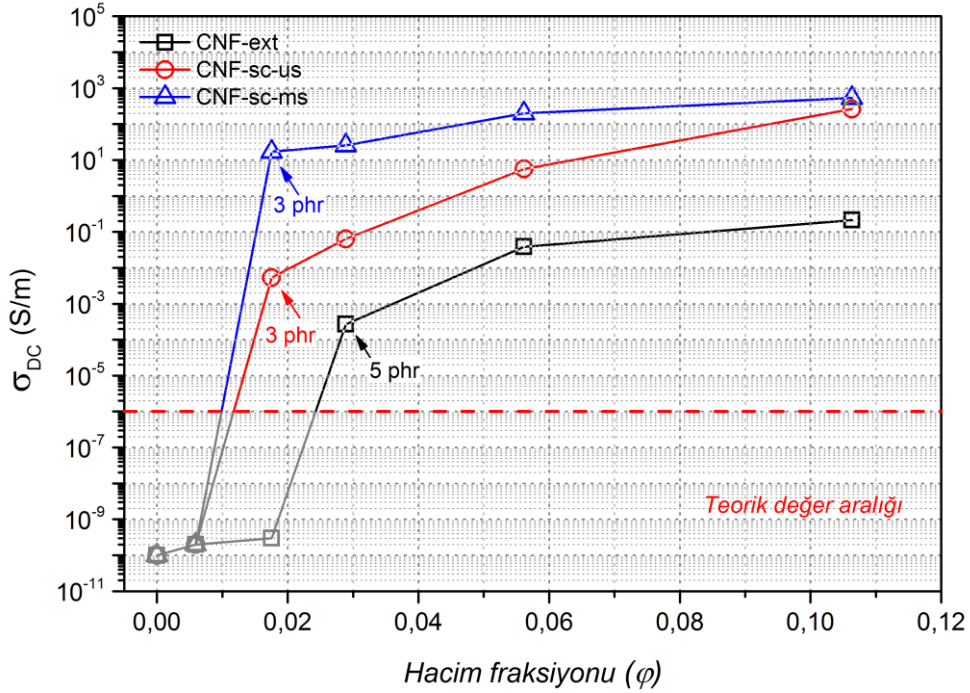
Düşük büyütmenin uygulandığı ve film örneklerin genel fiziksel durumlarını gösteren Şekil 4.2(a,c,d) incelendiğinde ise üretim yöntemine göre değişmekle beraber elyaf demetleri ya da tanecikleri şeklinde gerçekleşen dağılımın bütün polimer yapı içerisinde bir homojenlik gösterdiği görülmektedir. Fotoğraflarda ayrıca çözeltiden döküm yönteminin kullanıldığı örneklerin boşluklu bir yapıya ve pürüzlü bir yüzeye sahip olduğu görülürken ekstrüzyon ve baskı kalıplama yöntemleri kullanılan örnekte beklendiği şekilde boşluksuz bir yapı ve düzgün yüzey dikkat çekmektedir. Çözeltiden döküm yönteminin uygulandığı örneklerdeki boşlukların ve yüzey bozukluklarının film dökme sonrasındaki kuruma sürecinde film içerisinde kalan çözücünün (THF) buharlaşması sırasında olduğu düşünülürken ekstrüzyon yöntemiyle hazırlanan örneğin düzgün yüzey özellikleri ve boşluksuz yapısının baskı kalıplama işlemi sırasında uygulanan yüksek basınç sayesinde sağlandığı düşünülmektedir.



**Şekil 4.2:** (a-b) CNF20-sc-ms, (c-d) CNF20-sc-us ve (e-f) CNF20-ext örneklerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri.

#### 4.1.2. Doğrusal Akım (DC) Altındaki Elektriksel İletkenlik Analizleri

Şekil 4.3’de farklı üretim yöntemleriyle hazırlanan örneklerin  $dc$ -iletkenlik değerlerinin dolgu miktarına bağlı değişimi verilmiştir. Grafikte  $10^{-6}$  S/m’den daha düşük iletkenlik değerlerinin ölçüm alınan cihazın dinamik aralığının altında kalması nedeni ile deneysel olarak belirlenememiş ve teorik olarak verilmiştir.



Şekil 4.3: CNF-ext, CNF-sc-us ve CNF-sc-ms serisi örneklerin dolgu hacim fraksiyonuna göre iletkenlik değerlerinin değişimi.

İletkenlik değerlerinin değişimleri değerlendirildiğinde beklendiği gibi dolgu oranının artışına bağlı olarak her üç yöntemle hazırlanan kompozit serisinde de iletkenliğin arttığı görülmektedir. Ancak bu artışın CNF-sc-ms ve CNF-sc-us serisi için 3 phr, CNF-ext serisi için 5 phr değerinde daha etkili bir şekilde gerçekleşerek ölçülebilir değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu sonuçlardan iletken dolgunun kompozit yapı içinde kesintisiz bir ağ yapı oluşturduğu dolgu oranı olarak tanımlanan elektriksel perkolasyon eşik değerlerinin ( $\phi_c$ ) CNF-sc-ms ve CNF-sc-us serisi için 1-3 phr arasında iken CNF-ext serisi için 3-5 phr arasında olduğu belirlenmiştir. Aynı oranda CNF içermesine rağmen farklı üretim yöntemleri ile hazırlanan kompozitlerin iletkenlikleri karşılaştırıldığında ise  $A_f$  ile paralel şekilde CNF-sc-ms > CNF-sc-us > CNF-ext sıralamasının geçerli olduğu görülmektedir.

Literatürde perkolasyon eşik değerleri ile ilgili çalışmalar incelendiğinde dolgu dağılımının iyileşmesinin daha düşük perkolasyon eşik değerlerinin elde edilmesinde önemli bir etken olduğu bildirilmektedir. Öte yandan birçok çalışmada ise yüksek  $A_f$  değerine sahip iletken dolguların kompozit içerisinde daha düşük oranlarda birbirleri ile temas ederek kompozit yapı boyunca kesintisiz bir ağ yapısı oluşturabileceği buna bağlı olarak da artan  $A_f$  değerlerinin perkolasyon eşik değerlerini düşüreceği bildirilmektedir. Şekil 4.3’de daha düşük  $A_f$  değerlerine ve daha iyi bir dağılıma sahip olan CNF-ext serisi örneklerin daha yüksek perkolasyon eşğine ve daha düşük iletkenlik değerlerine sahip olması hazırlanan örneklerin elektriksel iletkenliği üzerinde  $A_f$  değerindeki azalmanın dolgu dağılımından daha etkili olduğu sonucunu göstermektedir.

Elde edilen iletkenlik değerleri sayısal olarak değerlendirildiğinde ise anti-statik, sensör ve elektromanyetik kalkan uygulamaları da dâhil birçok yarı iletken uygulamasında yeterli olan 10 S/m iletkenlik değerinin CNF-sc-ms serisi örneklerde 3 phr oranında CNF ile sağlanabildiği görülürken, bu değer CNF-sc-us serisinde 10 phr oranında sağlanabildiği, CNF-ext serisi örneklerde ise 20 phr dolgu oranında dahi elde edilemediği görülmektedir. Elde edilen maksimum iletkenlik değeri ise CNF20-sc-ms örneği ile yaklaşık  $10^3$  S/m olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlardan özellikle iletken polimer kompozit uygulamalarında manyetik karıştırıcı ile karıştırmanın uygulandığı çözültiden döküm yöntemi ile daha düşük dolgu oranlarında daha yüksek iletkenlik değerlerinin elde edilebileceği görülmüştür.

#### 4.1.3. Elektriksel Geçirgenlik (Permittivite) Değerlerinin Analizi

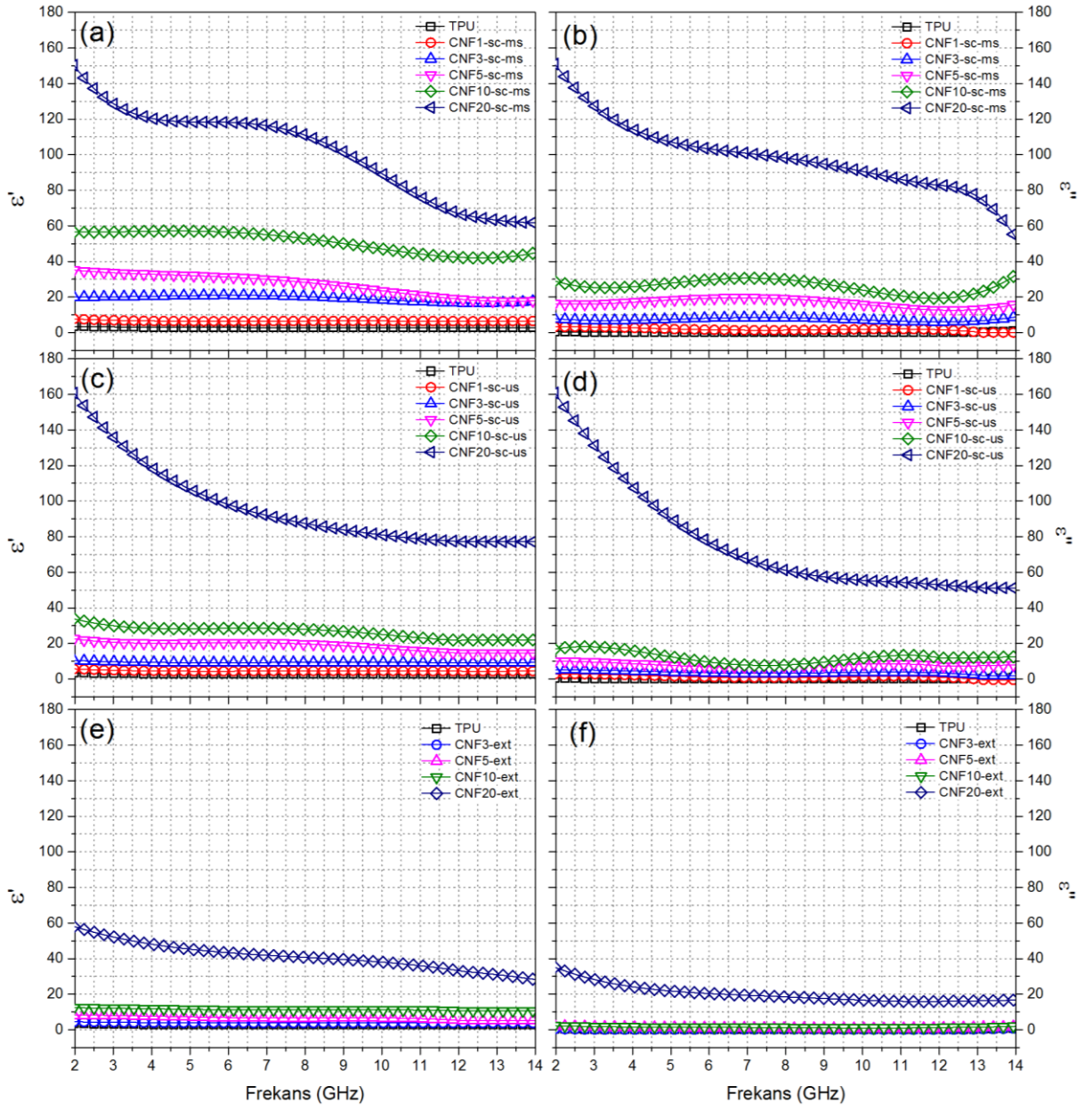
Permittivite ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ) bir malzemenin elektrik alana maruz kalması durumunda verdiği tepkilerin göstergesi olup elektromanyetik kalkanlama ve soğurma performanslarının belirlenmesindeki en temel parametrelerden biridir. Bu yüzden her iki uygulamaya yönelik malzeme geliştirilmesinde permittivite değerlerinin analizi oldukça önemlidir. Şekil 4.4(a-f)’de farklı üretim yöntemleri ile hazırlanmış TPU/CNF kompozitlerinin 2-14 GHz arasındaki  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  değişimi özetlenmiştir.

Elektromanyetik kalkanlama ve soğurma uygulamalarındaki bir diğer önemli parametre olan permeabilite ( $\mu'$ ,  $\mu''$ ) değerleri ise karbon ve benzeri malzemelerin manyetik özellik göstermemesi nedeniyle bütün ölçüm aralığında  $\mu'=1$ ,  $\mu''=0$  olarak kabul edilmiştir. Bu yüzden manyetik bileşen içermeyen kompozitlerin dielektrik analizlerinde permeabilite değerleri verilmemiş ve sadece permittivite değerlerinin değişimi yorumlanmıştır.

Permitivitenin reel kısmı ( $\epsilon'$ ) elektrik alan altında malzeme tarafından depolanan enerjiyi göstermektedir ve kompozit morfolojisindeki mikro-kapasitör benzeri yapıların oluşumu ile açıklanmaktadır [84, 142].  $\epsilon''$  ise elektrik akımının iletimi sırasında kaybolan enerjinin göstergesi olup denklem 2.10'a göre alternatif akım altındaki elektrik iletkenliğinin (*ac*-iletkenlik) hesaplanmasında kullanılmaktadır.

Şekil 4.4(a-f)'de her iki permitivite değerinin de CNF miktarının artışına bağlı olarak arttığı görülmektedir. Özellikle bu artışların 20 phr oranında her üç örnek serisinde de çok etkili biçimde gerçekleştiği dikkat çekmektedir. Öte yandan üretim yöntemlerinin etkisi karşılaştırıldığında, *dc*-iletkenlik değerlerine benzer şekilde CNF-sc-ms serisi örneklerde en yüksek permitivite ( $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$ ) değerleri görülmekte iken aynı oranda dolgu içeren CNF-ext serisi örneklerde en düşük permitivite değerleri elde edilmiştir. Aynı içeriğe sahip olmasına rağmen farklı üretim yöntemleri ile hazırlanan örneklerde bu derece farklı permitivite değerlerinin elde edilmesi, dolgu dağılımı-permitivite ilişkisinin önemini ortaya koymaktadır. Genel olarak elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde yüksek  $A_f$  ve kötü dağılımın daha yüksek iletkenlik ve permitivite değerlerinin istendiği uygulamalarda tercih edilebileceği görülmektedir.





**Şekil 4.4:** Farklı üretim yöntemleri ile hazırlanmış CNF içeren kompozitlerin dielektrik parametrelerin dolgu oranı ve frekansa bağlı değişimi.



#### 4.1.4. Yansıma Kaybı (RL) Analizleri

Hazırlanan örneklerin uygulanan frekans ve örnek kalınlığına göre değişen yansıma kaybı ( $RL$ ) değerleri Şekil 4.5-Şekil 4.7’de verilmiştir. Grafiklerde beyaz kısımlar 0-(-5) dB arası etkisiz soğurmanın gerçekleştiği alanları gösterirken sarı kısımlar -5-(-10) dB aralığını, yeşil tonları ise <-10 dB aralığını göstermektedir. Grafiklerde her seride en iyi sonuç veren dört örneğin sonuçları verilmiş ve tartışılmıştır.

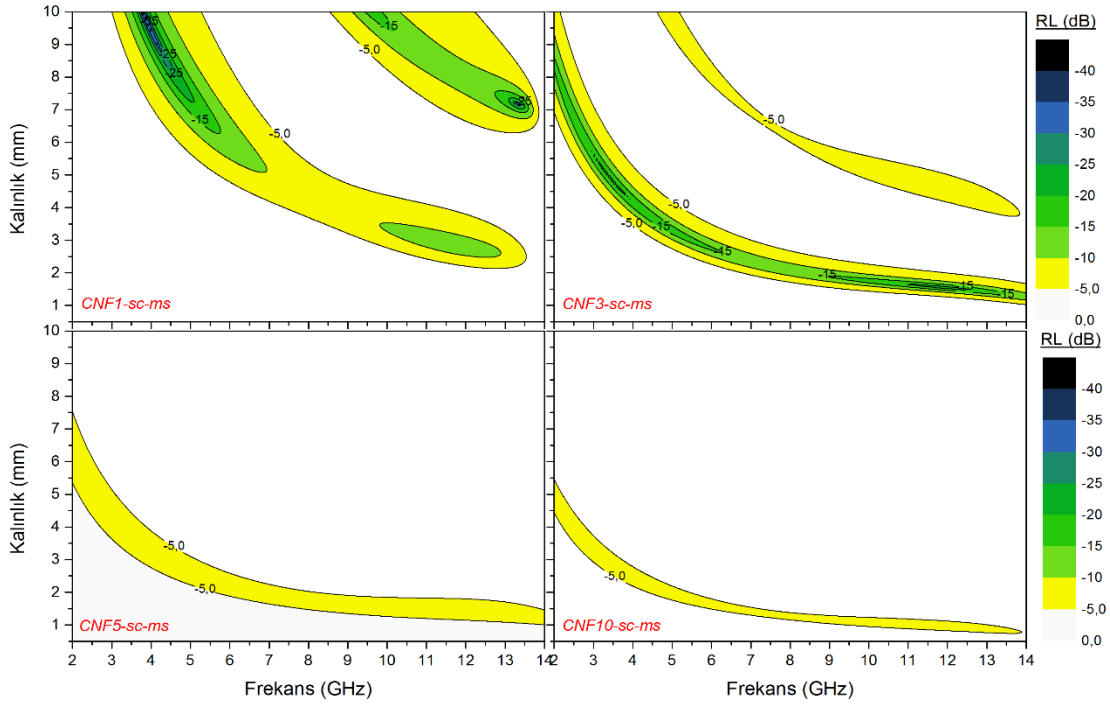
Her örneğin belirli kalınlık ve frekans aralıklarında etkili olabildiği görülürken hiçbir örnekle tek bir kalınlıkta X-bandın tamamında ya da kabul edilebilir geniş bir frekans aralığında yeşil bölgelerin sağlanamadığı görülmektedir. CNF-sc-ms serisi örneklerin  $RL$  değerlerinin özetlendiği Şekil 4.5 incelendiğinde 1 ve 3 phr oranında CNF içeren örnekler için kabul edilebilir  $RL$  değerlerinin elde edilebildiği görülürken dolgu oranının artmasıyla, iletkenliğin artmasına bağlı olarak  $RL$  değerlerinin sıfıra yakınlığı görülmektedir. En çok yeşil alanların görüldüğü CNF1-sc-ms ve CNF3-sc-ms örneklerine ait grafikler değerlendirildiğinde ise CNF1-sc-ms örneğinin 4 GHz seviyelerinde 7 mm’den daha yüksek kalınlıklarda kabul edilebilir bir soğurma gerçekleştirebileceği görülürken yaklaşık 2 mm kalınlığındaki CNF3-sc-ms örneği ile tez kapsamında hedef olarak belirlenen X-band aralığında etkin olarak kabul edilebilecek bir soğurmanın gerçekleştirilebileceği görülmektedir.

Şekil 4.6’da CNF-sc-us serisi örneklerin  $RL$  değerleri incelendiğinde de yine 3 phr oranında dolgu içeren CNF3-sc-us örneğinin hedef X-band aralığında en etkili soğurmayı gerçekleştirebildiği görülmektedir. Ayrıca CNF5-sc-us ve CNF10-sc-us örneklerinde manyetik karıştırıcı kullanılarak çözüldüden döküm yöntemine göre hazırlanan CNF5-sc-ms ve CNF10-sc-ms örneklerine göre daha fazla yeşil bölgenin elde edilebildiği diğer bir deyişle daha etkili soğurmanın gerçekleştiği görülmektedir. Bu performans artışının temel sebebinin, ultrasonik karıştırma ile hazırlanan örneklerin manyetik karıştırma ile hazırlanan örneklere göre sahip oldukları daha düşük elektriksel iletkenlik olduğu düşünülmektedir. Her iki seride de yaklaşık aynı iletkenlik seviyesine sahip olan ve 20 phr oranında dolgu içeren örneklere ait dış hat grafikleri dikkate değer bir soğurmanın elde edilmemiş olması nedeniyle verilmemiştir.

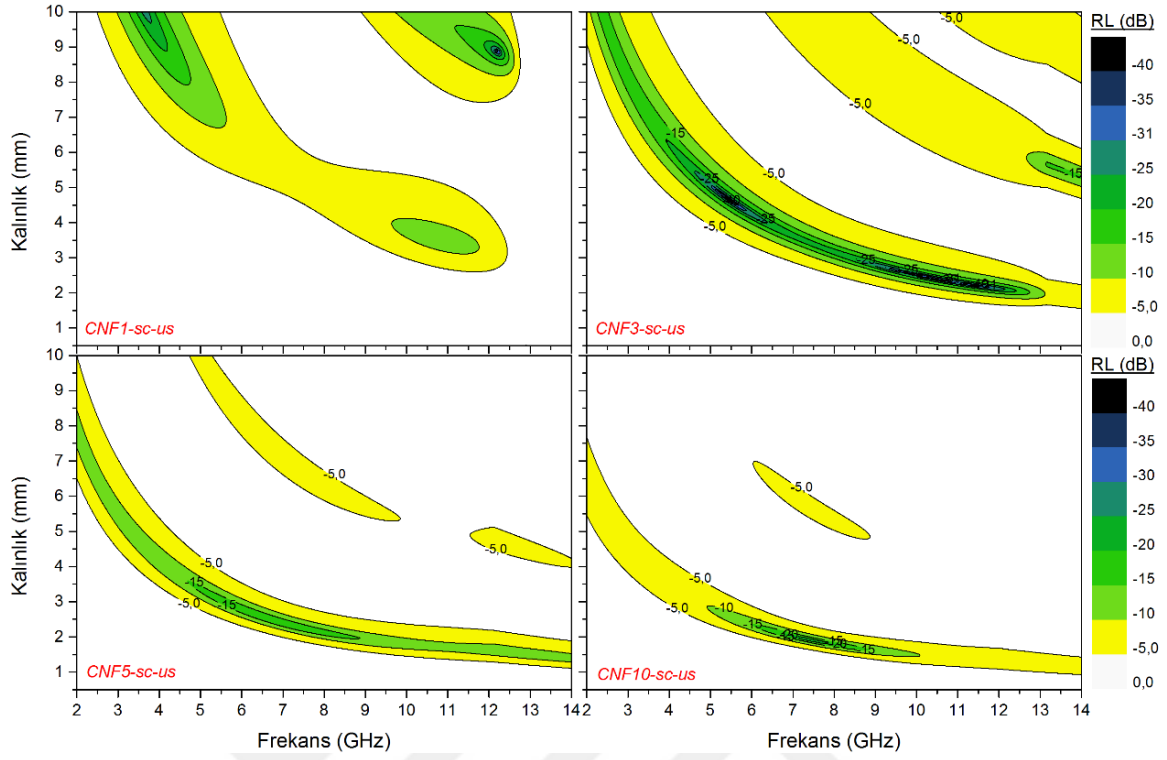
Son olarak ekstrüzyon yöntemiyle hazırlanan CNF-ext serisi örneklerin dış hat grafiklerinin verildiği Şekil 4.7 incelendiğinde ise, sadece 10 phr oranında dolgu içeren CNF10-ext örneğinde kabul edilebilir yeşil alanların bulunduğu görülmektedir. CNF-ext serisi örneklerde

diğer iki serinin aksine düşük iletkenlik nedeniyle 20 phr CNF içeren CNF20-ext örneğinin dış hat grafiklerinde sarı bölgelerin olduğu görülmektedir.

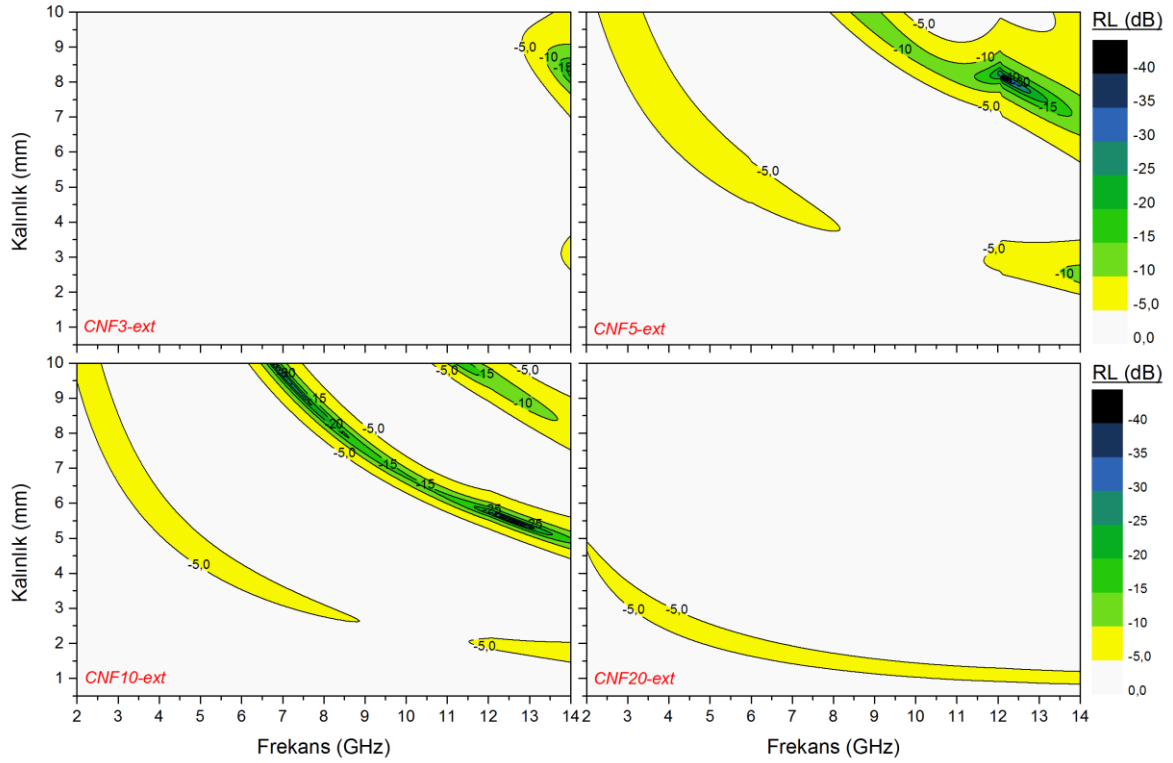
Her üç seride de özellikle X-band aralığında en iyi sonuçların elde edildiği CNF3-sc-ms, CNF3-sc-us ve CNF10-ext serisi örneklerin dış hat grafikleri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde CNF-ext serisinin yüksek dolgu oranı (10 phr) ve malzeme kalınlığı (>5mm) gerektirmesi nedeniyle en kötü performansı sergilediği görülmektedir. Daha iyi sonuçların elde edildiği CNF3-sc-ms ve CNF3-sc-us örnekleri karşılaştırıldığında ise yine X-band aralığında CNF3-sc-ms örneğinin daha düşük kalınlıklarda daha geniş bir EAA'ya sahip olduğu ve 14 GHz değerine kadar <-10 dB şartını sağlayabileceği görülmektedir. Bu gruptaki çalışmaların sonuçlarından, tez çalışmasının RADAR frekanslarında kalkanlama sağlayacak kompozitlerin geliştirilmesi için örnek hazırlama yöntemi olarak manyetik karıştırıcının kullanıldığı çözeltiden döküm yönteminin kullanılmasının daha uygun olacağı tespit edilmiştir.



Şekil 4.5: CNF-sc-ms serisi kompozitlerin farklı kalınlık ve frekans değerleri için *RL* değişimleri.



Şekil 4.6: CNF-sc-us serisi kompozitlerin farklı kalınlık ve frekans değerleri için RL değişimleri.

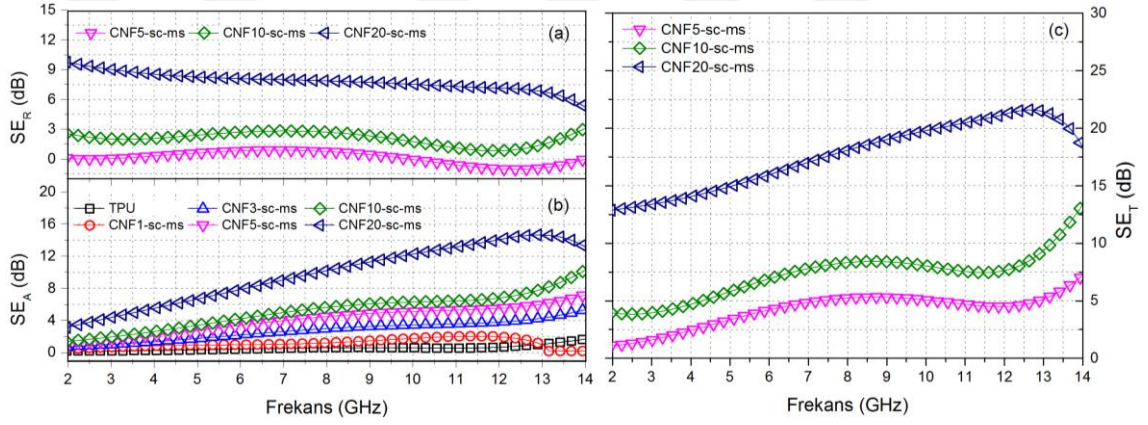


Şekil 4.7: CNF-ext serisi kompozitlerin farklı kalınlık ve frekans değerleri için RL değişimleri.

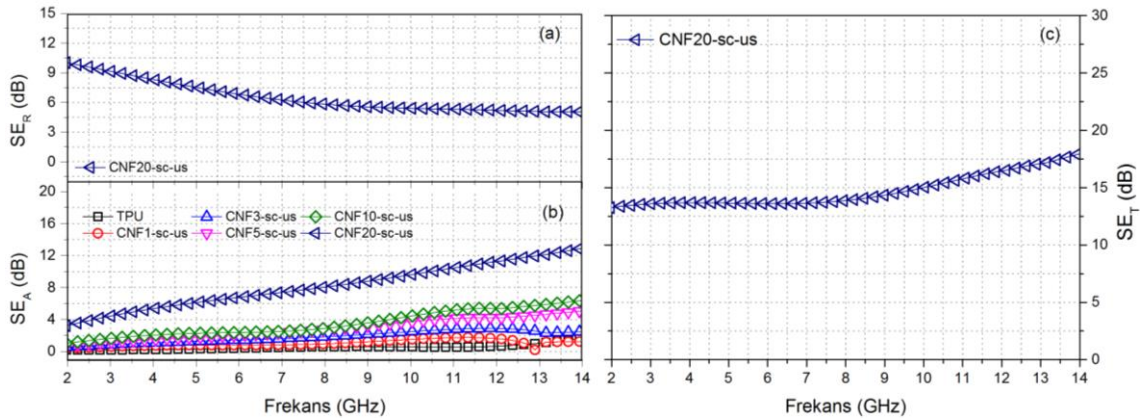
#### 4.1.5. Kalkanlama Etkinliklerinin Analizi

Farklı üretim yöntemleri ile hazırlanan 1 mm kalınlığındaki TPU/CNF kompozitleri için hesaplanan  $SE_A$ ,  $SE_R$  ve  $SE_T$  değerlerinin dolgu oranına ve frekansa bağlı değişimleri Şekil 4.8(a-c)-Şekil 4.10(a-c) arasında verilmiştir.

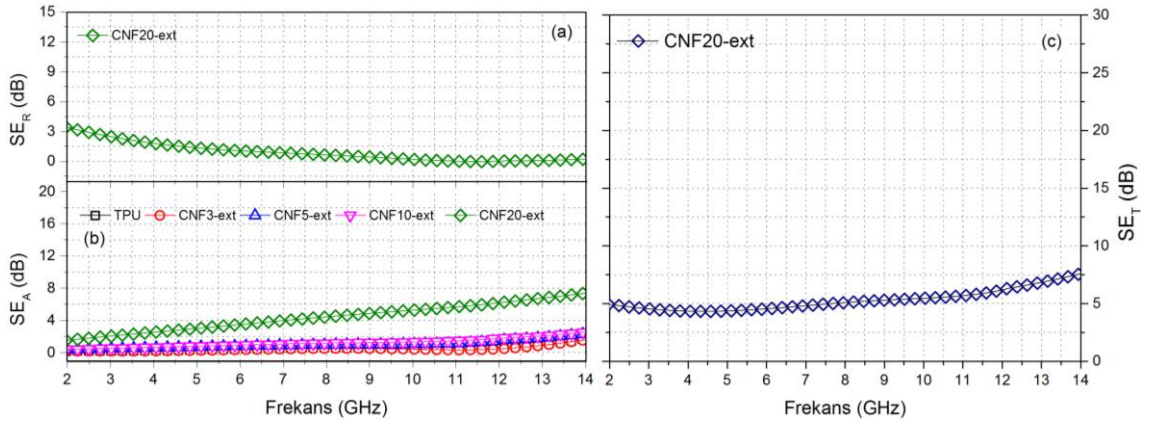
Sonuçlarda  $SE_A$  değerleri bütün örnekler için verilirken denklem 2.33'e göre  $SE_R$  değerlerinin hesaplanabilmesi için örneğin frekans değerine göre değişen belirli bir minimum  $ac$ -iletkenlik değerine sahip olması gerekliliği nedeniyle düşük iletkenlik gösteren örneklerde  $SE_R$  değerleri hesaplanamamıştır. Bu minimum iletkenlik değerlerinin altındaki örneklerde pratik olarak  $SE_R$  değerleri 1 dB'nin oldukça altında olduğundan önemli bir yansımanın gerçekleştirilemediği kabul edilmektedir.



Şekil 4.8: CNF-sc-ms serisi kompozitlerin (a)  $SE_R$ , (b)  $SE_A$  ve (c)  $SE_T$  değerlerinin frekansla değişimi ( $d=1$  mm).



Şekil 4.9: CNF-sc-us serisi kompozitlerin (a)  $SE_R$ , (b)  $SE_A$  ve (c)  $SE_T$  değerlerinin frekansla değişimi ( $d=1$  mm).



**Şekil 4.10:** CNF-ext serisi kompozitlerin (a)  $SE_R$ , (b)  $SE_A$  ve (c)  $SE_T$  değerlerinin frekansla değişimi ( $d=1$  mm).

Şekil 4.8(a) - Şekil 4.10(a)'da verilen  $SE_R$  değerlerinin değişimi incelendiğinde CNF-sc-us ve CNF-ext serisi örneklerde 20 phr oranından az CNF içeren örneklerin  $SE_R$  değerlerinin hesaplanamadığı görülürken, CNF-sc-us serisi örneklerde daha yüksek  $\epsilon''$  ye bağlı olarak gerçekleşen yüksek  $ac$ -iletkenliği dolayısıyla 5, 10 ve 20 phr dolgu içeren örneklerin  $SE_R$  değerlerinin hesaplanabildiği görülmektedir. Hesaplanan  $SE_R$  değerlerinin düşük ve orta frekans bölgesinde artan frekansla azaldığı görülürken 14 GHz'e yaklaştıkça  $\epsilon''$  değerlerinin değişimine bağlı olarak sabitlendiği görülmektedir.

Şekil 4.8(b) - Şekil 4.10(b)'de verilen soğurma esaslı gerçekleşen kalkanlama etkinliğinin göstergesi olan  $SE_A$  değerlerinin ise bütün örnek serilerinde CNF oranının ve frekansın artmasıyla artış gösterdiği görülmektedir. Üretim yöntemlerine göre elde edilen  $SE_A$  değerleri karşılaştırıldığında yine sc-ms yöntemiyle hazırlanan örneklerin aynı oranda CNF içeren diğer örneklerle göre daha etkili soğurma gerçekleştirdikleri görülmektedir.

Şekil 4.8(c) - Şekil 4.10(c)'de verilen  $SE_T$  değerleri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde CNF-sc-ms serisi örneklerin aynı oranda CNF içeren eşleniklerine göre yüksek iletkenliklerinden dolayı çok daha etkili bir kalkanlama yapabildikleri görülmektedir. Sonuçlardan, 1 mm kalınlığındaki örneklerle elde edilebilen maksimum  $SE_T$  değerlerinin CNF20-sc-ms için 12.5 GHz frekansta -22 dB, CNF20-sc-us için 14 GHz frekansta -18 dB ve CNF20-ext için 14 GHz frekansta -7.5 dB olduğu belirlenmiştir. Diğer yandan, frekansın artmasıyla  $SE_R$  değerlerinin azalmasının,  $SE_A$  değerlerinin ise artışının bir sonucu olarak özellikle yüksek miktarda dolgu içeren örneklerde düşük frekanslarda yansıtma esaslı bir kalkanlama etkili olurken yüksek frekanslarda ise soğurma mekanizmasının daha etkili hale geldiği görülmektedir.

Elektromanyetik kalkanlama uygulamalarına uygunluk açısından üretim yöntemleri değerlendirildiğinde ekstrüzyon yönteminin seri ve ucuz üretime yönelik önemli avantajları bulunmasına rağmen bu yöntemle hazırlanan örneklerin gösterdiği düşük performans önemli bir dezavantaj olarak görülmektedir. Ultrasonik karıştırmanın uygulandığı çözeltiden döküm yönteminde ise ekstrüzyon yöntemine göre çok daha etkili kalkanlamanın sağlanabildiği görülmekte ise de çözücü kullanımı ve seri üretime uygun olmaması bu yöntemin temel dezavantajlarını oluşturmaktadır. Son olarak en yüksek performansların elde edildiği manyetik karıştırıcının kullanıldığı çözeltiden döküm yönteminde ise yine çözücü kullanılması gibi önemli bir dezavantaj bulunmasına rağmen üretim prosesinin oldukça basit ve düşük maliyetli oluşu ve ürünlerin gösterdiği yüksek performans nedeniyle tez çalışmaları boyunca gerçekleştirilecek olan elektromanyetik kalkan geliştirmesi çalışmalarında bu yöntemin kullanılmasına karar verilmiştir.

#### **4.2. TEK KATMANLI KARBON DOLGULU KOMPOZİTLERİN HAZIRLANMASI VE PERFORMANS ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Çalışmanın bu bölümünde öncelikle tek katmanlı karbon dolgulu polimer kompozitler ile tez kapsamında belirlenen performans hedefleri sağlanmaya çalışılmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmalarda karbon dolgu olarak karbon siyahı (CB), grafit (G), genleştirilmiş grafit (EG), karbon nano elyaf (CNF) ve çok duvarlı karbon nanotüp (CNT) kullanılmıştır. Kompozit hazırlama yöntemi olarak; ilk bölümdeki denemelerin sonuçlarından hareketle manyetik karıştırıcı yardımıyla çözeltiden döküm yöntemi kullanılmıştır.

Tablo 4.2’de bu bölümde hazırlanan örneklerin içerikleri ve isimlendirilmesi özetlenmiştir. Hazırlanan örneklere SEM analizi, dinamik mekanik analiz (DMA), elektriksel iletkenlik ölçümü ve vektör network analiz (VNA) uygulanarak örneklerin RADAR sinyalini soğurma ve elektromanyetik dalga kalkanlama performansları mikro-yapısal parametreler ile birlikte değerlendirilmiştir.

**Tablo 4.2:** Farklı tip karbon dolgularla hazırlanan örneklerin bileşim ve kodları.

Örnek Kodu	Dolgu Tipi	Dolgu Oranı (phr)	Örnek Kodu	Dolgu Tipi	Dolgu Oranı (phr)
CB-1		1	EG-3		3
CB-3	Karbon	3	EG-5	Genleş.	5
CB-5	Siyahı	5	EG-10	Grafit	10
CB-10	(CB)	10	EG-20	(EG)	20
CB-20		20	EG-30		30
CB-30		30	EG-40		40
G-5		5	CNF-0.5		0.5
G-10		10	CNF-1	Karbon	1
G-20	Grafit	20	CNF-3	Nanoelyaf	3
G-40	(G)	40	CNF-5	(CNF)	5
G-80		80	CNF10		10
G-120		120	CNF-20		20
CNT-0.5		0.5			
CNT-1	Karbon	1			
CNT-3	Nanotüp	3			
CNT-5	(CNT)	5			
CNT-10		10			
CNT-20		20			

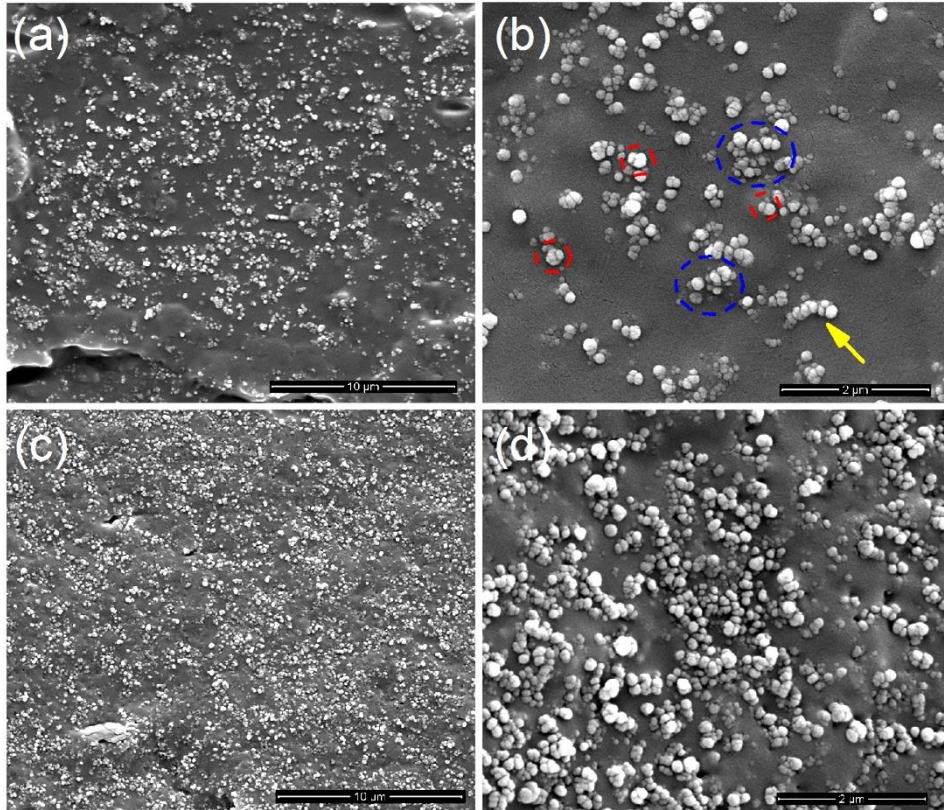
#### 4.2.1. Örneklerin Mikroyapısal Analizleri

SEM analizlerinde dolgu oranına bağlı olarak morfolojik değişimlerin de gözlemlenebilmesi amacıyla her örnek serisinde farklı oranda dolgu içeren iki örneğe görüntü çekimi uygulanmıştır.

Şekil 4.11(a-d)' de CB-10 ve CB-30 örneklerine ait farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. Düşük büyütmenin uygulandığı ve daha genel bir görüntü veren Şekil 4.11(a) ve Şekil 4.11(c) incelendiğinde karbon siyahının her iki örnekte de homojen bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Ayrıca CB-10 örneğinde karbon siyahı taneciklerinin birbiriyle temastan oldukça uzak olduğu görülürken CB-30 örneğinde belirli kümeler içerisinde dolguların birbiriyle temas halinde olduğu görülmekte ancak yine de bütün kompozit boyunca kesintisiz bir hat oluşturacak temas sürekliliğinin sağlanamadığı görülmektedir. Daha yüksek büyütmelerin uygulandığı Şekil 4.11(b) ve Şekil 4.11(c) incelendiğinde ise karbon siyahı taneciklerinin her iki örnekte de Şekil 4.11(b)'de kırmızı çizgilerle gösterildiği gibi yaklaşık 280-300 nm boyutunda tanecik yığılımları şeklinde bulunduğu görülürken dolgu ile polimer faz arasında uyumsuzluktan kaynaklanan bir faz ayrımı ya da boşluğun bulunmadığı görülmektedir. CB-10 örneğinde nano boyuttaki bu yığılımların birleşerek mavi çizgilerle



gösterildiği gibi yaklaşık  $1 \mu\text{m}$  büyüklüğünde mikro yığışmalar oluşturabildiği görülürken CB-30 örneğinde sınırları net olarak belirlenemeyen çok daha büyük yığışmalar oluşturduğu görülmektedir. Son olarak, CB-10 örneği için Şekil 4.11(b)'de sarı okla gösterilen bazı çizgisel yığışmaların haricinde küresel geometrinin korunduğu ve  $A_f$  nin 1 olarak kabul edilebileceği görülürken CB-30 örneğinde yığışmaların düzensiz büyümesi nedeniyle üç boyutlu düzlemde küresel geometrinin bozulduğu ve  $A_f$ 'nin birden daha büyük değerlere ulaşabileceği görülmektedir.

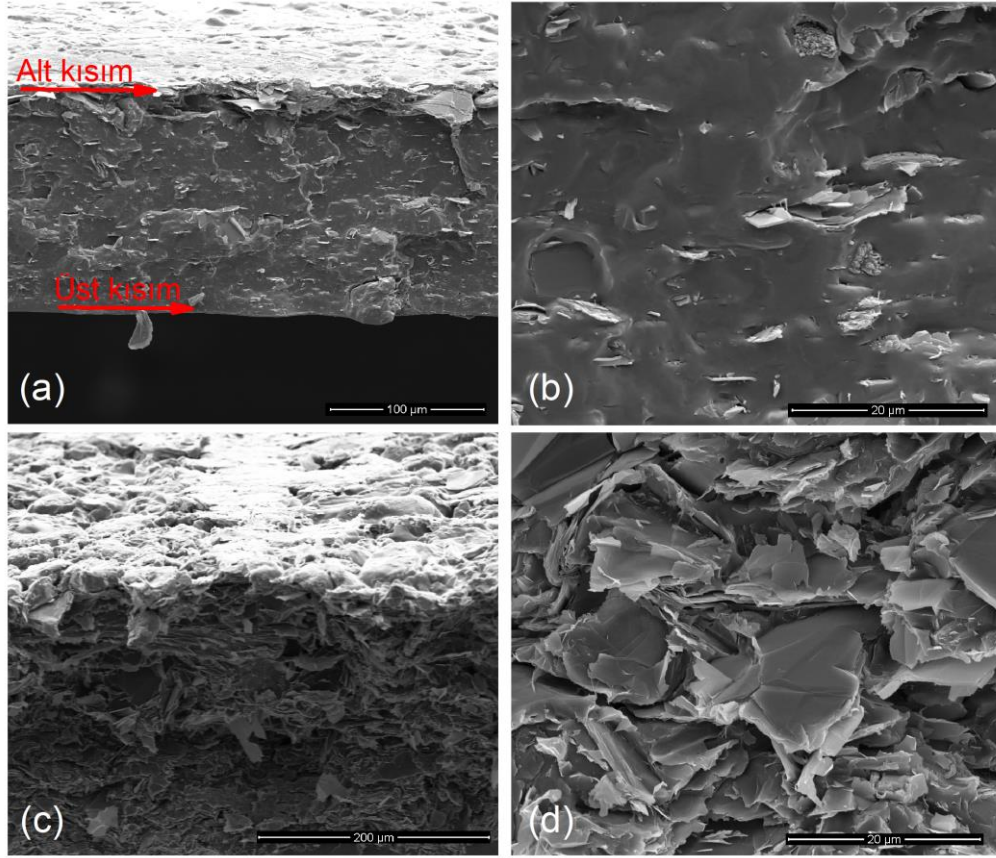


**Şekil 4.11:** (a-b) CB-10 ve (c-d) CB-30 örneklerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri.

Şekil 4.12(a-d)'de G-20 ve G-120 örneklerine ait farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.12(a) ve Şekil 4.12(c) incelendiğinde grafitin düşük oranda da olsa filmin alt kısmında yoğunlaştığı görülmekte iken filmin üst kısmındaki dağılımın oldukça homojen olduğu dikkat çekmektedir. Üst kısımda dolguların homojen bir dağılım göstermesine rağmen alt kısımda yoğunlaşması dolgu-polimer arası bir uyumsuzluğun bulunmadığını, bu yığışmanın TPU çözeltisi ile grafit tanecikleri arasındaki yoğunluk farkından kaynaklandığını göstermektedir. Elektriksel iletkenlik ve elektromanyetik dalga ile etkileşim açısından önemli



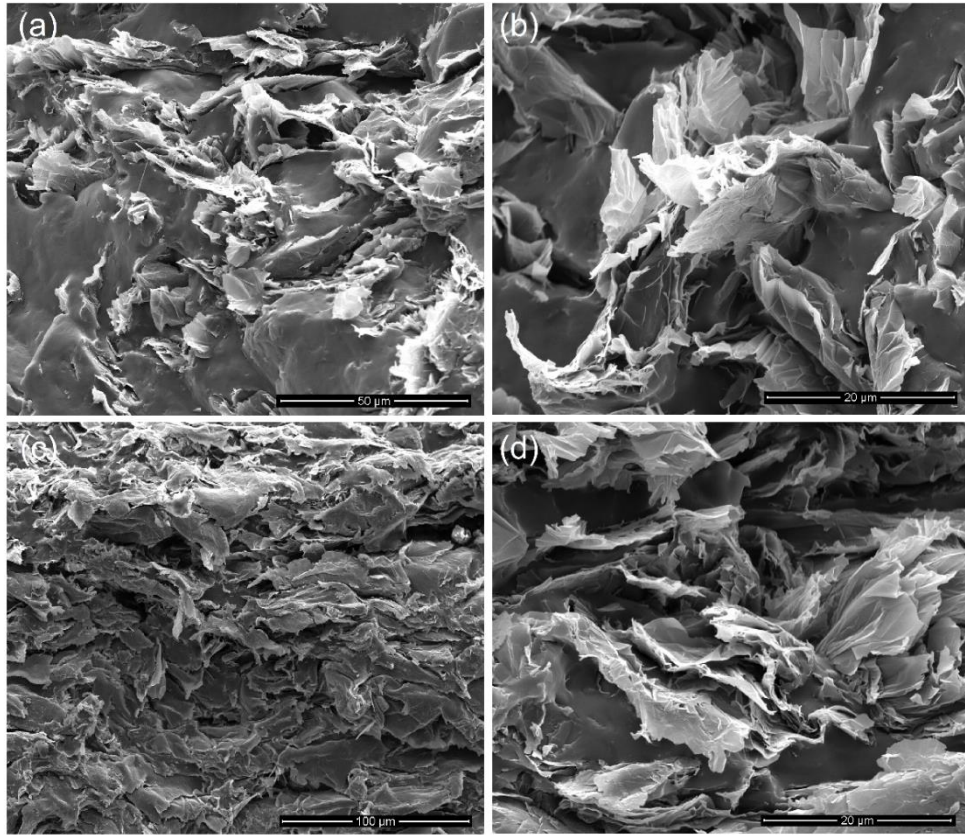
olan dolgu taneciklerin birbirleriyle yakınlıkları incelendiğinde ise G-20 örneğinde filmin alt kısmındaki dolguların birbirlerine çok daha yakın olduğu görülürken üst kısmında birbirlerine temastan oldukça uzak oldukları görülmektedir. Şekil 4.12(c)'de ise yüksek dolgu oranı nedeniyle dolgu ile polimer arasında bir faz ayrımı görülmemekte ve dolguların birçok noktadan birbiri ile temasta olduğu görülmektedir. Daha yüksek büyütmenin uygulandığı Şekil 4.12(b) incelendiğinde ise grafit taneciklerinin 15  $\mu\text{m}$  ye varan farklı boyutlardaki birkaç tabakadan oluşan yığılımlardan oluştuğu görülmektedir.



**Şekil 4.12:** (a-b) G-20 ve (c-d) G-120 örneklerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri.

Grafit tabakalarının çeşitli kimyasal işlemlerle aralanması sonucu elde edilen genişletilmiş grafit ile hazırlanmış EG-5 ve EG-40 örneklerine ait SEM görüntüleri Şekil 4.13(a-d)'de verilmiştir. Özellikle EG-10 örneğine ait SEM görüntülerinin verildiği Şekil 4.13(a-b) incelendiğinde genişletilmiş grafitin kendi fiziksel özelliklerinden dolayı daha ince ve geniş alana yayılan katmanlar şeklinde bulunduğu görülmektedir. Ancak bu ince genişletilmiş grafit katmanların polimer faza karbon siyahına benzer şekilde homojen dağıtılamadığı

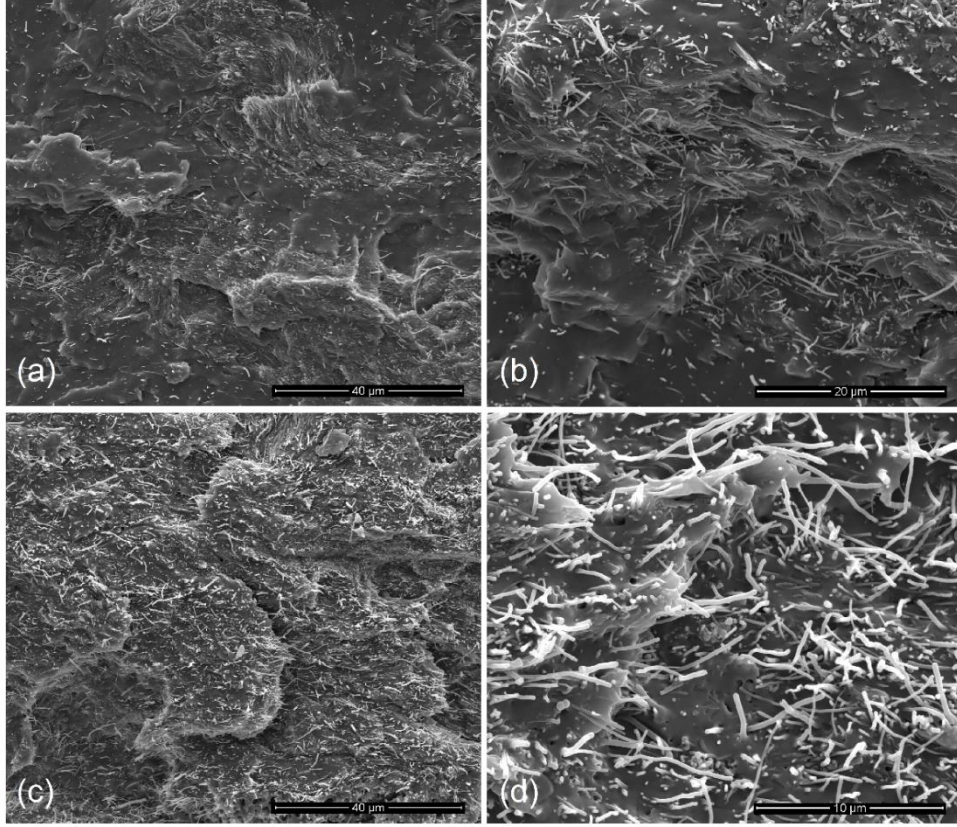
görülmektedir. Genleştirilmiş grafit taneciklerinin daha ince tabakalar halinde polimer faza dağıtılması için gerekli olan kayma gerilimi (*shear stress*)'in manyetik karıştırıcıyla sağlanamamasının bu kötü dağılıma sebep olduğu düşünülmektedir. EG-40 örneğine ait Şekil 4.13(c-d) incelendiğinde ise çok büyük bir hacimde genleştirilmiş grafit katmanlarının bulunduğu görülmektedir. Ancak bu denli yüksek EG oranına rağmen belirli bölgelerde polimer kümelerinin bulunduğu dikkat çekmektedir. Bu dolgu içermeyen polimer kümelerinin nedeninin de düşük kayma gerilimlerinin etkisi nedeniyle dolgu dağılımının yeteri kadar sağlanamaması olduğu düşünülmektedir.



**Şekil 4.13:** (a-b) EG-5 ve (c-d) EG-40 örneklerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri.

Şekil 4.14(a-d)'de CNF-3 ve CNF-20 örneklerine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.14(a) incelendiğinde CNF-3 örneğinde elyafların bazı bölgelerde yoğun elyaf demetleri şeklinde bazı bölgelerde ise daha seyrek ve tek elyaflar şeklinde bulunduğu görülmektedir. Buna karşın CNF-20 örneğine ait genel görüntünün verildiği Şekil 4.14(c) incelendiğinde kompozit yapı içinde birçok elyaf yığınının bulunduğu ve bu demetlerin homojen bir dağılım gösterdiği görülmektedir. Her iki örneğe ait yüksek büyütmedeki görüntüler (Şekil 4.14(b) ve Şekil 4.14(d)) incelendiğinde elyafların ortalama kalınlıklarının 320 nm civarında olduğu görülmektedir.

Daha önce ham CNF'ye ait SEM görüntülerinde 100-200 nm arasında belirlenen ortalama elyaf çapının polimer fazın CNF üzerine yapışmasına bağlı olarak 320 nm' ye çıkması CNF ve TPU arasında kimyasal bir uyumsuzluk bulunmadığını ve TPU'nun CNF üzerine kaplandığına işaret etmektedir.

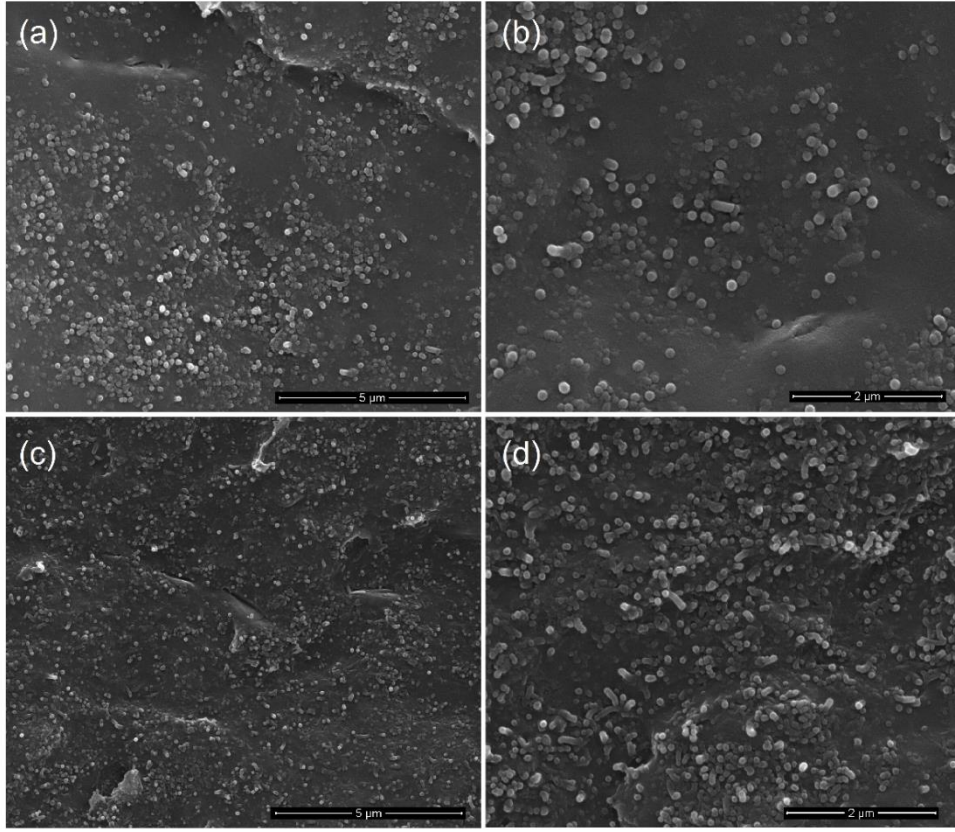


**Şekil 4.14:** (a-b) CNF-3 ve (c-d) CNF-20 örneklerinin farklı büyütme ölçeklerindeki SEM görüntüleri.

Son olarak, CNT-5 ve CNT-20 örneklerine ait SEM görüntüleri Şekil 4.15(a-d)'de verilmiştir. Şekil 4.15(a) ve Şekil 4.15(c)'de CNT'nin de CNF'ye benzer şekilde, özellikle CNT-5 örneğinde, belirli bölgelerde yoğun yumaklar şeklinde dağılım gösterirken belirli bölgelerde oldukça seyrek tek elyaf şeklinde bulunduğu görülmektedir. Ancak CNT-20 örneğinde yüksek CNT oranına bağlı olarak oluşan CNT demetlerinin oldukça homojen bir dağılım gösterdiği görülmektedir.

Yüksek büyütmenin uygulandığı Şekil 4.15(b) ve Şekil 4.15(d) ise CNT demetleri daha yakından incelenmiştir. CNT-5 örneğinde CNT taneciklerinin bölgesel olarak birbirleriyle kesintisiz bir ağ yapısı kurabildiği görülürken CNT-20 örneğinde bu kesintisizliğin hattın örneğin tamamında kurulabildiği dikkat çekmektedir.





Şekil 4.15: (a-b) CNT-5 ve (c-d) CNT-20 örneklerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri.

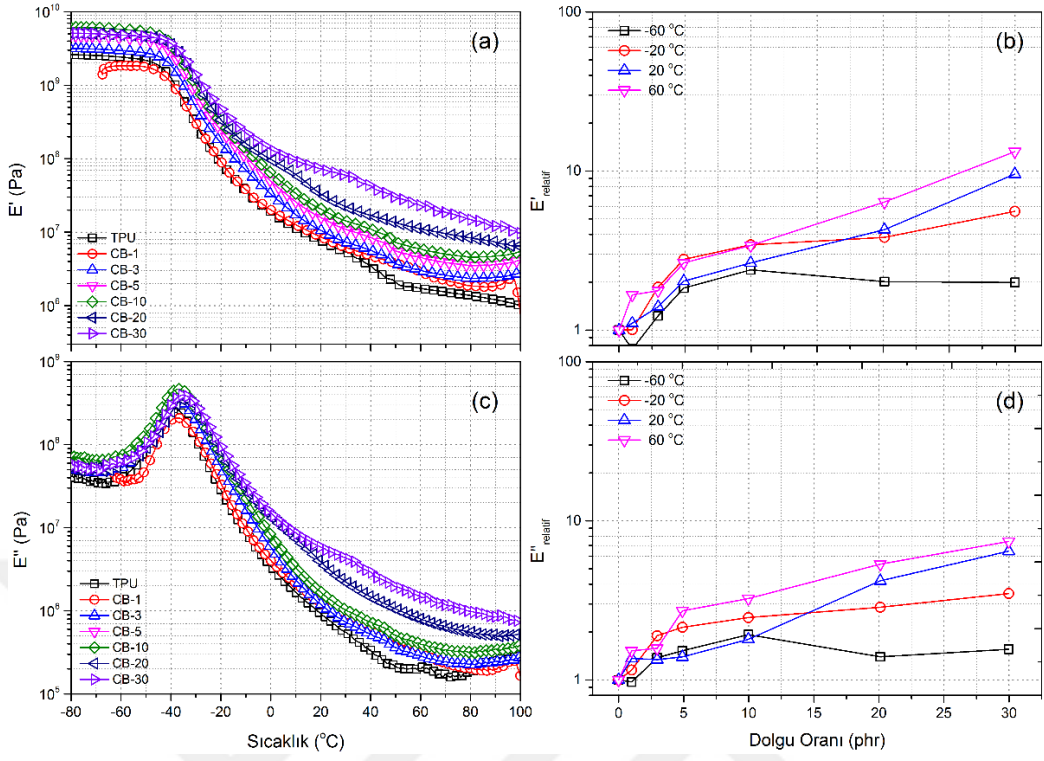
#### 4.2.2. Dinamik Mekanik Analiz

Malzemelerin katı-hal mekanik ve viskoelastik özelliklerinin belirlenmesinde en sık kullanılan yöntemlerden biri dinamik mekanik analiz (DMA) yöntemidir. Bu yöntemde örneğe belirli bir sıcaklık aralığında, salınımlı bir kuvvet uygulanarak örnekte meydana gelen kalıcı ve geçici deformasyon takip edilmektedir. Daha sonra ölçülen deformasyon oranlarından çeşitli matematiksel bağıntılarla saklanan modül ( $E'$ ) ve kayıp modül ( $E''$ ) değerleri hesaplanmaktadır. Aynı zamanda viskoelastik parametreler olarak da adlandırılan bu iki modül değerinden saklanan modül ( $E'$ ) deformasyon sırasında malzeme tarafından depolanan enerjiyi gösterirken, kayıp modül ( $E''$ ) deformasyon sırasındaki malzeme içindeki moleküler sürtünmeler gibi sebeplerle ısı olarak kaybolan enerjiyi göstermektedir [143]. Polimer ya da polimer esaslı kompozit malzemelerin mekanik ya da viskoelastik özelliklerinin incelenmesi ile ilgili çalışmaların birçoğunda bu iki parametrenin sıcaklık ve dolgu oranına bağlı olarak değişimleri incelenmektedir.

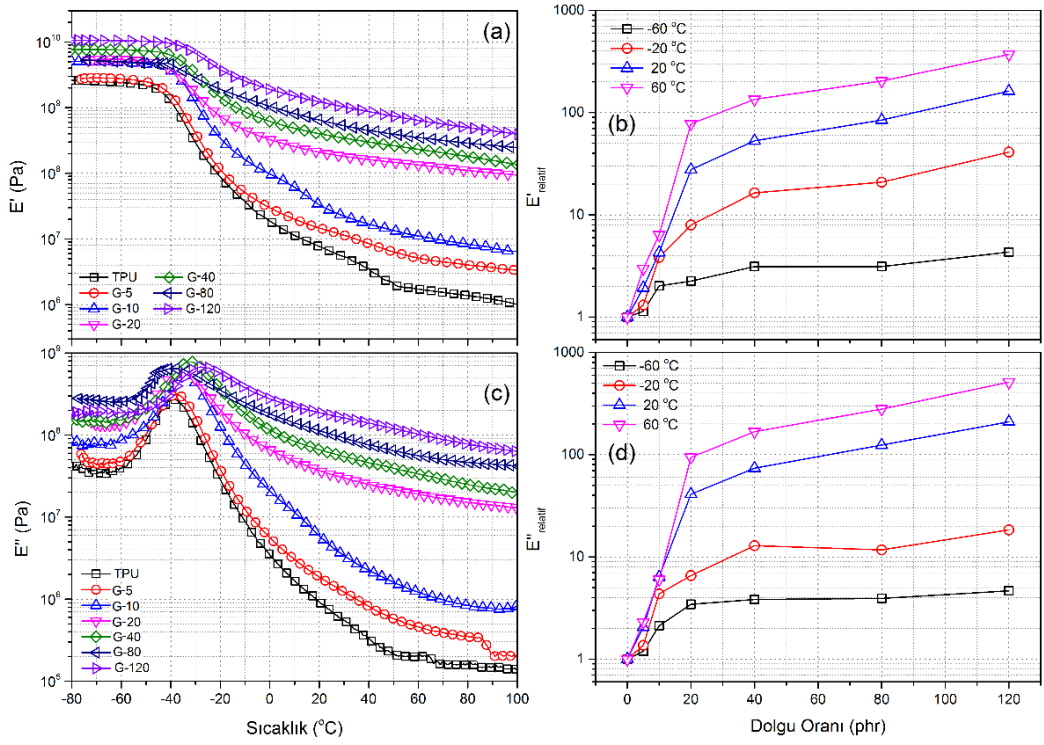
Hazırlanan örneklerin DMA testleri ile elde edilen  $E'$  ve  $E''$  değerlerinin sıcaklığa ve dolgu oranına bağlı değişimleri Şekil 4.16(a-d) – Şekil 4.20(a-d)'de verilmiştir. Sonuçların değerlendirilmesinde öncelikle bütün kompozit serileri için geçerli olan bulgular daha sonra farklı dolgu tiplerinin etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Şekil 4.16(a)-Şekil 4.20(a)'da bütün örnekler için  $E'$  değerlerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi verilmiştir.  $-80/+100$  °C arasındaki bu değişimler incelendiğinde bütün örnekler için  $E'$  değerlerinde artan sıcaklıkla yaklaşık  $-40$  °C' ye kadar önemli bir değişim olmazken bu sıcaklıktan sonra önemli bir düşüş gerçekleştiği görülmektedir. Literatürde  $E'$  değerlerinde azalmanın başladığı bu geçiş bölgesi sıcaklığı polimerlerde segmental hareketliliklerin başlama sıcaklığı olarak tanımlanan “camsı geçiş sıcaklığı ( $T_g$ )” olarak kabul edilmektedir. Camsı bölge olarak adlandırılan camsı geçiş sıcaklığından düşük sıcaklık aralığında ( $T < T_g$ ) polimer zincirlerinin öteleme hareketleri gerçekleştirememesi nedeniyle uygulanan deformasyon kuvvetine karşı gösterdiği yüksek direnç bu bölgedeki yüksek ve sıcaklıktan bağımsız (ya da düşük derecede bağımlı)  $E'$  değerlerinin nedenidir. Camsı geçiş sıcaklığı ve daha yüksek sıcaklık ( $T > T_g$ ) bölgesindeki  $E'$  değerlerinin hızla azalması ise hareketlilik kazanan polimer zincirlerinin artan sıcaklıkla daha rahat hareket edebilmesi ve buna bağlı olarak malzemede meydana gelen yumuşama ve görece düşük deformasyon direncine bağlı olarak gerçekleşmektedir. Örneklerin camsı geçiş sıcaklıkları incelendiğinde bütün örneklerde camsı geçiş sıcaklığının hem dolgu tipinden hem de dolgu oranında bağımsız olarak yaklaşık  $-40$  °C civarında olduğu görülmektedir. Grafiklerde dikkat çeken bir diğer nokta ise dolgu oranı değişiminin kompozitin  $E'$  değerine etkisinin de sıcaklığa bağlı olarak değişim göstermesidir. Grafikler incelendiğinde “camsı bölge” olarak tanımlanan camsı geçiş sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda dolgunun etkisinin yok denecek kadar az olduğu görülürken camsı geçiş sıcaklığının üzerindeki kauçuksu bölgede dolgu oranının modüle etkisinin giderek arttığı görülmektedir. Polimerlerde zincirlerin hareket kabiliyetleri  $E'$  değerini etkileyen en temel faktörü oluşturmaktadır. Polimer kompozitlerde dolguların  $E'$  değerlerini artırma etkisi, dolgu taneciklerinin zincirlerin hareketlerini kısıtlanması şeklinde açıklanmaktadır [144]. Bu mekanizmaya göre katı formdaki dolgu tanecikleri polimer zincirinin hareket etmesini zorlaştırmakta buna bağlı olarak polimer daha sert ve dayanıklı bir forma kavuşmaktadır. Ancak camsı geçiş sıcaklığının altında zincir hareketlerinin çok kısıtlı olması nedeniyle bahsedilen mekanizma etkili olamamakta buna bağlı olarak da dolgu etkisi bu bölgede gözlenmemektedir.

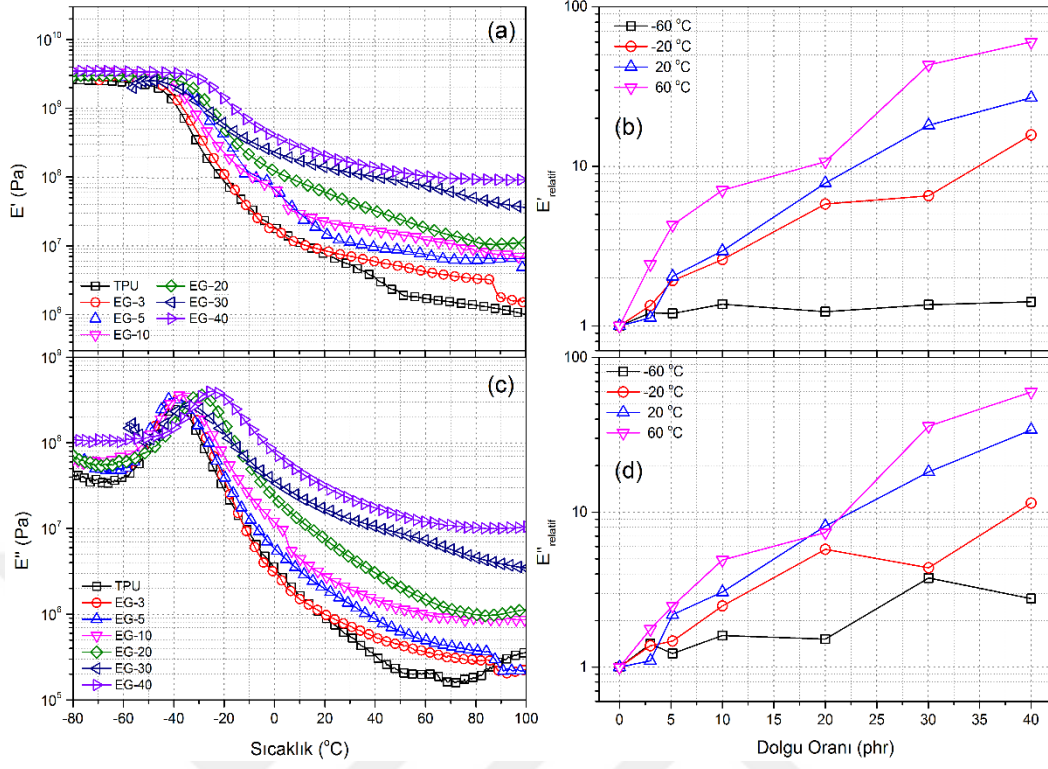
Farklı tip ve oranlardaki dolguların  $E'$  değerleri üzerindeki etkisinin daha net belirlenebilmesi amacıyla Şekil 4.16(b)-Şekil 4.20(b)'de kompozitin saklanan modül değerinin ( $E'_{\text{kompozit}}$ ), kompoziti oluşturan ancak dolgu içermeyen polimerin saklanan modül değerine ( $E'_{\text{polimer}}$ ) oranı olarak tanımlanan relatif modül ( $E'_{\text{relatif}}$ ) değerlerinin dolgu oranına bağlı olarak değişimi farklı sıcaklıklar için özetlenmiştir. Grafiklerde bütün kompozit serilerinde dolgu oranının artışına bağlı olarak  $E'_{\text{relatif}}$  değerlerinin artış gösterdiği görülmektedir. Ancak artışların özellikle zincir hareketlerinin çok rahat bir şekilde sağlanabildiği 20 ve 60 °C'de çok daha düzenli ve etkili bir şekilde gerçekleştiği açıkça görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde TPU'ya 120 phr oranında grafit ilavesi ile TPU'nun 60 °C'deki  $E'$  değerinin yaklaşık 400 kat artırılacağı görülürken bu artışın 40 phr oranında EG içeren kompozit için 60 kat, 20 phr oranında CNF ve CNT içeren kompozitler için sırasıyla 70 ve 105 kat olarak gerçekleştiği tespit edilmiştir. Ağırlıkça aynı oranda (20 phr) farklı tip karbon dolgu içeren örnekler üzerinden yapılan karşılaştırmada ise yine TPU'nun 60 °C'deki  $E'$  değerinin CB-20 örneğinde 6 kat, G-20 örneğinde 60 kat, EG-20 örneğinde 10 kat, CNF-20 ve CNT-20 örneklerinde ise sırasıyla 80 ve 105 kat arttığı görülmektedir. Bütün karbon dolguların kimyasal olarak aynı yapıya sahip olmasına rağmen takviye etkinliklerindeki farklılık dolgu geometrisi, tanecik boyutu ve yüzey alanı gibi farklı fiziksel parametrelere bağlı olarak açıklanmaktadır.



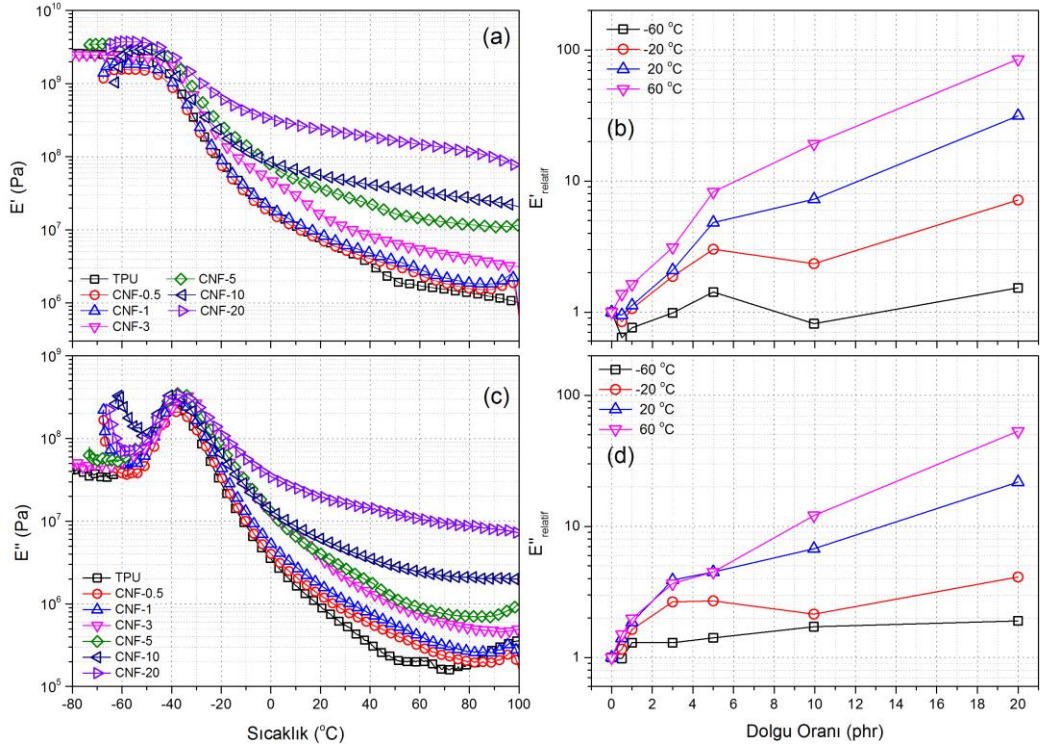
Şekil 4.16: CB serisi örneklerin dolgu oranı ve sıcaklığa bağlı olarak (a-b)  $E'$  ve (c-d)  $E''$  değerlerinin değişimi.



Şekil 4.17: G serisi örneklerin dolgu oranı ve sıcaklığa bağlı olarak (a-b)  $E'$  ve (c-d)  $E''$  değerlerinin değişimi.

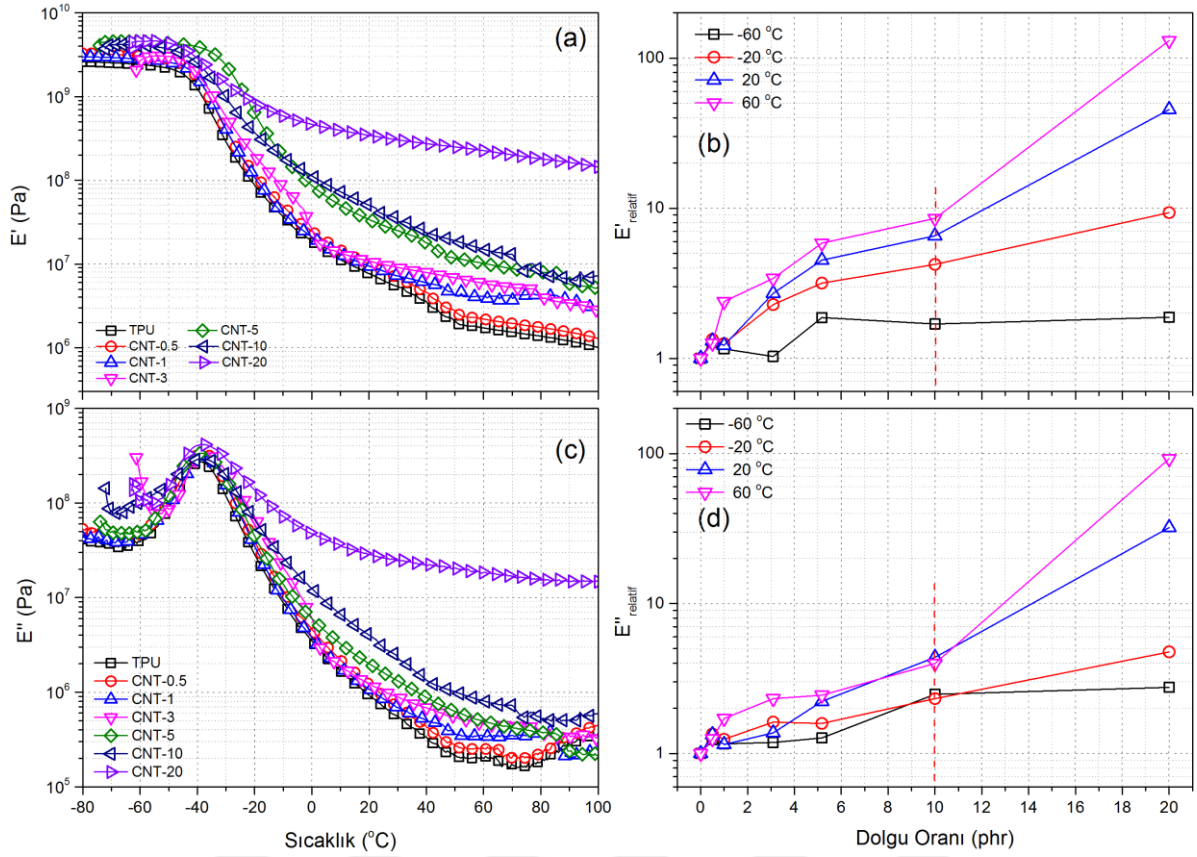


Şekil 4.18: EG serisi örneklerin dolgu oranı ve sıcaklığa bağlı olarak (a-b)  $E'$  ve (c-d)  $E''$  değerlerinin değişimi.



Şekil 4.19: CNF serisi örneklerin dolgu oranı ve sıcaklığa bağlı olarak (a-b)  $E'$  ve (c-d)  $E''$  değerlerinin değişimi.





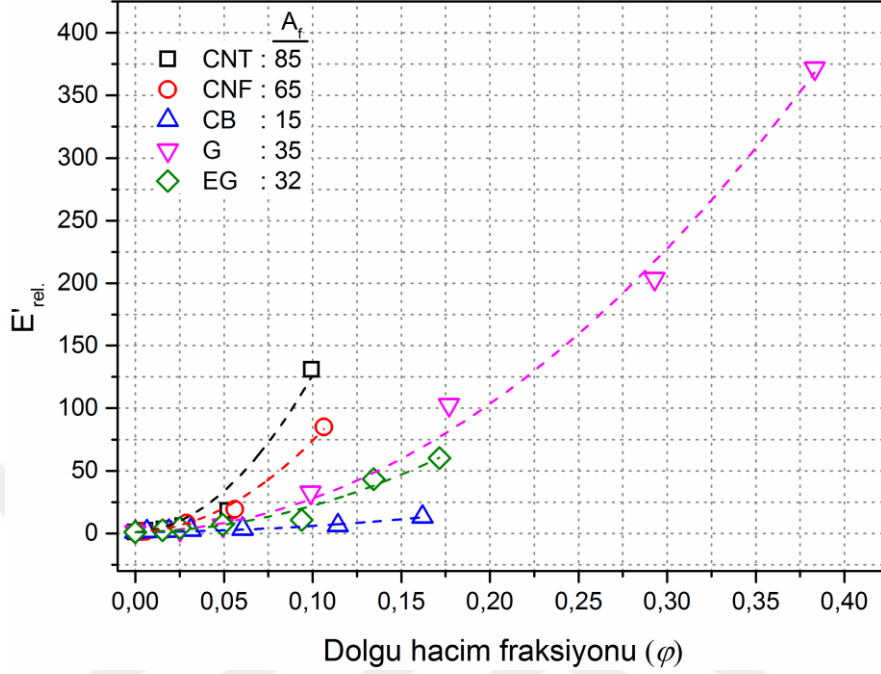
**Şekil 4.20:** CNT serisi örneklerin dolgu oranı ve sıcaklığa bağlı olarak (a-b)  $E'$  ve (c-d)  $E''$  değerlerinin değişimi.

Dolgu geometrisinin kantitatif olarak en temel göstergesi daha önce ayrıntılarıyla anlatılan dağılım oranı ( $A_f$ )'dir.  $A_f$  değeri kompozit morfolojisinin SEM ya da TEM gibi hassas görüntüleme analizleri sonucu elde edilen fotoğraflarda istatistiksel bir analiz sonucu elde edilebileceği gibi [145-148] çeşitli matematiksel denklemler yardımıyla da öngörülebilmektedir [146, 149-153]. Yaygın olarak kullanılan bu matematiksel denklemlerden bir tanesi de Modifiye-Guth denklemdir (Denklemler 4.1) [154]. Denklemlerde  $E_c$  ve  $E_p$  sırasıyla kompozitin ve polimer fazın saklanan modülünü gösterirken  $\phi$  dolgunun hacim fraksiyonunu göstermektedir. Hesaplamalarda dolgu etkisinin daha açık bir şekilde gözlenmesi amacıyla camsı geçiş sıcaklığı üzerindeki modül değerleri kullanılmaktadır.

$$E_{bağ.} = E_c / E_p = (1 + 0.67A_f\phi + 1.62A_f^2\phi^2) \quad (4.1)$$

Şekil 4.21' de 60 °C'deki  $E'$  değerleri referans alınarak oluşturulmuş  $E'_{relatif}$ -  $\phi$  değişimleri ve modifiye Guth denklemi çakıştırma sonuçları verilmiştir. Dolguların  $A_f$  değerleri ve hacim

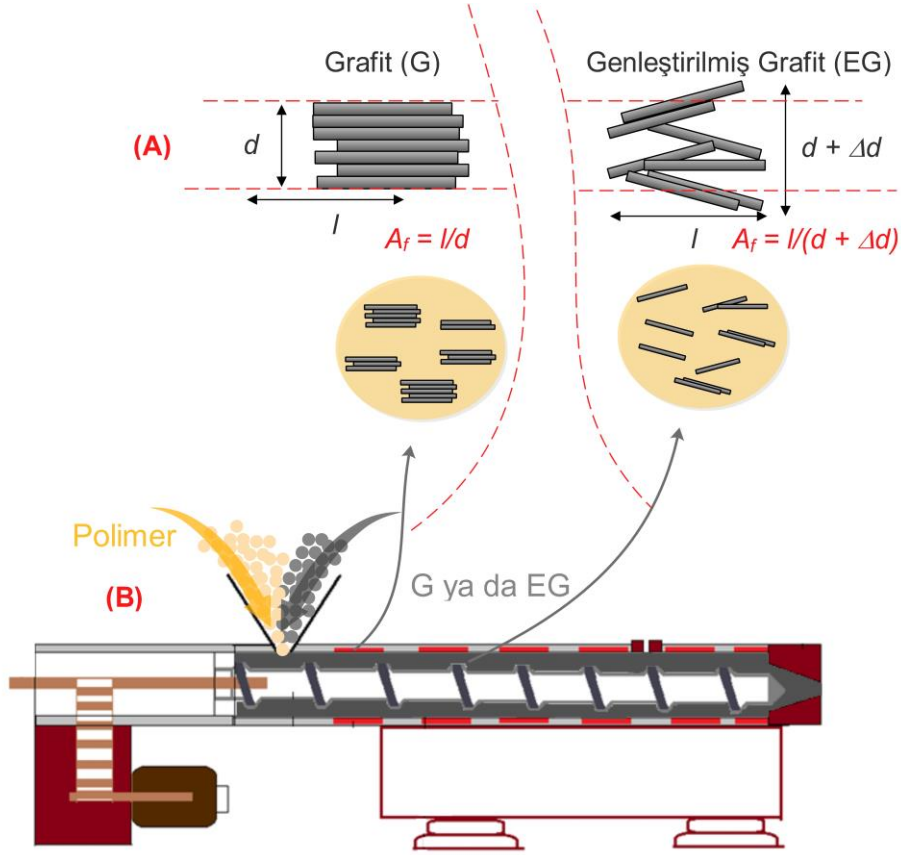
fraksiyonuna bağlı olarak takviye etkinlikleri karşılaştırıldığında  $CNT > CNF > G > EG > CB$  sıralamasının geçerli olduğu görülmektedir.



Şekil 4.21: Karbon dolgulu örneklerle modifiye-Guth modelinin uygulanması.

Genleştirilmiş grafit, tabakalı yapıya sahip olan grafitin çeşitli kimyasal modifikasyon ve termal işlemler sonucu tabakalar arası mesafesi artırılarak birbirlerinden ayrılması kolaylaştırılmış grafit türevi olarak tanımlanabilir. Tabakalar arası mesafenin artmasına bağlı olarak genleştirilmiş grafit tanecikleri Şekil 4.22(a)'da gösterildiği şekilde tabakalara dik yönde genişlemekte böylelikle hazırlandığı grafitte göre daha büyük tanecik boyutlarına ve daha düşük  $A_f$  değerlerine sahip olabilmektedir. Tabakalar arası mesafenin artması ve buna bağlı olarak etkileşimlerin azalması ise ince EG tabakalarının özellikle ekstrüzyon gibi kompozit hazırlama yöntemleriyle daha kolay biçimde birbirinden ayrılmasına ve grafitte göre daha ince tabakalar halinde kompozit içerisinde dağıtılabilesini sağlamaktadır. Bu yüzden birçok çalışmada EG katkılı kompozitlerde elde edilen  $A_f$  değerlerinin G katkılı kompozitlere oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 4.22(a-b)'de G ve EG için tanecik yapıları ve kompozit hazırlama esnasında taneciklerdeki fiziksel değişimler şematik olarak gösterilmiştir. Ancak deneysel çalışmalarda kullanılan manyetik karıştırıcının SEM gözlemlerinde de görüldüğü şekilde genleştirilmiş grafit taneciklerinin dağılması için yeterli kayma gerilmeleri oluşturamadığı

buna bağılı olarak da genişletilmiş grafitin daha düşük  $A_f$  değerine sahip olduğu ve mekanik özelliklerde beklenen takviye etkisini gösteremediği düşünülmektedir.



Şekil 4.22: G ve EG nin fiziksel yapıları ve işleme sırasındaki fiziksel değişimleri.

Literatür değerleriyle kıyaslandığında farklı olan bir diğer sonuç ise karbon siyahının küresel geometri sebebiyle 1 olması gereken  $A_f$  değerinin modül modellemesi ile 15 olarak öngörülmesidir. Bu farklılığın yüksek yüzey alanına ve topaklaşmaya uygun yapıya sahip karbon siyahının polimere yüksek oranda ilave edilmesi sonucu oluşan yığışimlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Yığışimler sonucu  $A_f$  değerinin birden yüksek değerlere doğru sapma gösterebileceği daha önce verilen SEM fotoğrafları ile de desteklenmektedir.

Viskoelastik özelliklerin yorumlanmasında kullanılan bir diğer parametre olan kayıp modül ( $E''$ ) değerlerinin sıcaklığa bağılı değişimleri Şekil 4.16(c) - Şekil 4.20(c)' de verilmiştir. Kayıp modül daha önce belirtildiği gibi bir malzemede deformasyon için verilen enerjinin geri dönüşsüz şekilde kaybolan kısmının göstergesi olarak tanımlanmaktadır. Ancak burada enerjinin kaybolmasından kastedilen deformasyon için uygulanan enerjinin moleküler

düzeydeki segmental hareketlerin neden olduğu sürtünmeye bağlı olarak ısı enerjisine dönüşmesidir. Bu hareketlerin teorik olarak toplamda ne kadar bir enerjinin kaybedilmesine neden olacağı ise “malzeme içerisinde segmental olarak hareket eden ya da edebilecek birim sayısı” ve “birim segmental hareketin neden olduğu enerji kaybı”na bağlı olarak değişiklik gösterecektir. Bu yüzden gerek dolgunsuz polimerlerin gerekse de kompozitlerin  $E''$  grafikleri incelenirken bu iki parametrenin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. .

$E''$  değerlerinin değişimini gösteren sonuçlar incelendiğinde bütün örneklerin  $E''$  değerlerinde camsı bölgede önemli bir değişim görülmezken camsı geçiş sıcaklığında yükselerek pik verdiği, sıcaklığın artmaya devam etmesiyle de tekrar azaldığı görülmektedir. Camsı geçiş sıcaklığının altındaki camsı bölge polimerin harekete izin vermeyen sert yapısı nedeniyle birim hareket sırasında en fazla enerji kaybının yaşandığı kısımdır. Öte yandan bu bölgede sıcaklık değişimine rağmen moleküler hareketlerde önemli bir artış meydana gelmemesi nedeniyle  $E''$  değerlerinde de önemli bir değişim görülmemiştir. Sıcaklığın camsı geçiş sıcaklığına yaklaşması ile halen birim segmental hareket başına enerji kaybının en yüksek olduğu bölgede polimer yapıdaki moleküler hareketlerin artması ise kaybolan enerjinin de artmasına neden olmakta bu da camsı geçiş sıcaklığında  $E''$  değerinde görülen pikin yükselme kısmını açıklamaktadır. Sıcaklık artışının devam etmesiyle de moleküler hareketlilikteki artış bir doyum noktasına ulaşmakta ancak birim hareket başına kaybolan enerji miktarı azalmaya devam etmektedir. Bu da grafiğin ikinci kısmındaki azalmayı açıklamaktadır. Ayrıca bütün serilerde  $E''$  değerlerinin özellikle camsı geçiş sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda dolgu oranı ile artış gösterdiği görülmektedir. Kompozit yapıda dağıtılan dolgular polimer matrisle bir ara yüzey oluştururlar ve deformasyon sırasında bu ara yüzey üzerinde sürtünme hareketi oluşur. Oluşan bu sürtünme hareketi de enerji kayıplarını artırıcı etki gösterir. Dolgu oranının artışına bağlı olarak  $E''$  değerlerinin artması da sürtünmenin gerçekleştiği yüzeyin artmasına bağlı olarak kaybolan enerji miktarının artmasının bir göstergesidir.

$E''$  değerlerindeki değişimlerin dolgu tipi ve oranına bağlı olarak daha detaylı incelenebilmesi amacıyla Şekil 4.16(d) - Şekil 4.20(d)'de kompozitlerin farklı sıcaklıklardaki  $E''$  değerlerinin TPU'nun  $E''$  değerine oranlanmasıyla elde edilen  $E''_{\text{relatif}} - \varphi$  grafikleri verilmiştir. Grafiklerde artan sıcaklıkla dolgu etkisinin beklendiği şekilde daha net bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir. Bu yüzden farklı dolgu tiplerinin etkilerinin incelenmesinde 60 °C'deki değerlerin dikkate alınması daha uygun görülmüştür. Daha sağlıklı bir karşılaştırma için 20 phr oranında dolgu içeren örneklerin 60 °C'deki  $E''_{\text{relatif}}$  değerlerindeki artış oranları incelendiğinde

CB için 5, G için 100, EG için 8, CNF için 60 ve CNT için 100 değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde daha küçük tanecik boyutu ve yüksek  $A_f$ 'ye sahip dolguların polimer fazla oluşturacağı ara yüzeyin daha fazla olması nedeniyle bu dolgular için sürtünme nedeniyle kaybolacak enerji miktarının dolayısıyla da  $E''$  değerlerinin daha yüksek olması gerekmektedir.

Bu açıdan değerlendirildiğinde 20 phr oranında dolgu içeren örneklerin  $E''$  (ya da  $E''_{\text{relatif}}$ ) değerleri karşılaştırıldığında CNT-20>CNF-20>EG-20>CB-20 sıralaması beklenen bir sonuç olarak görülmektedir. Öte yandan  $A_f$  değerleri dikkate alındığında bu sıralamada CNF-20 ile EG-20 arasında olması beklenen G-20 örneğinin CNT-20 örneği ile yaklaşık aynı  $E''_{\text{relatif}}$  değerlerine sahip olması grafit katkılı örneklerde enerji kaybını tetikleyen ilave bir mekanizmanın olduğunu göstermektedir. İlave enerji kaybına neden olan bu mekanizmanın uygulanan deformasyon sırasında grafit tabakaları arasındaki kaymalara bağlı olarak gerçekleşen sürtünme kayıpları olduğu düşünülmektedir.

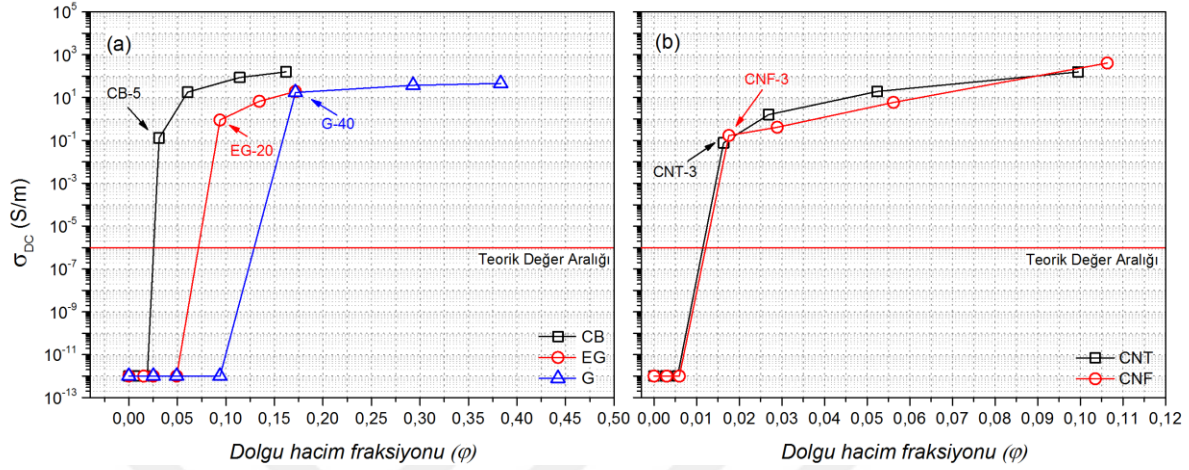
#### 4.2.3. Doğrusal Akım Elektriksel İletkenlik Analizleri

Çalışma kapsamında hazırlanan karbon dolgulu TPU kompozitlerin  $dc$ -iletkenlik değerlerinin ( $\sigma_{DC}$ ) dolgu hacim fraksiyonuna ( $\phi$ ) bağlı olarak değişimi Şekil 4.23(a-b)'de verilmiştir. Ölçümlerde kullanılan multimetrenin örnek boyutlarına bağlı olarak  $10^{-6}$  S/m'den daha düşük iletkenlikleri belirleyememesi nedeniyle bu değerden daha düşük iletkenlikler teorik olarak gösterilmiştir.

Grafikler incelendiğinde iletkenlik değerlerinin beklendiği şekilde bütün serilerde dolgu oranının artmasına bağlı olarak bir artış gösterdiği, bu artışın beklendiği şekilde özellikle perkolasyon konsantrasyonunda daha etkili biçimde gerçekleşerek ölçüm alt sınırının çok daha üzerindeki değerlere ulaştığı görülmektedir.

Hazırlanan örnek serileri için perkolasyon eşik değerlerinin ( $\phi_c$ ) Şekil üzerinde de gösterildiği gibi CB için 3-5 phr arası, EG ve G için 10-20 phr arası, CNF ve CNT için de 1-3 phr arası olarak belirlenmiştir. Dolguların hepsinin aynı kimyasal yapıya sahip olduğu ve kompozitlerin aynı yöntemle hazırlandığı düşünüldüğünde perkolasyon değerleri arasındaki bu farkın temel olarak tanecik büyüklüğü ve  $A_f$ 'ye bağlı olarak gerçekleştiği kabul edilebilir. Grafiklerdeki eğriler incelendiğinde perkolasyon değerlerinin temel olarak tanecik büyüklüğü ve  $A_f$  olmak üzere iki temel parametreye göre değişiklik gösterdiği görülmektedir. Tanecik boyutu açısından değerlendirildiğinde, nano boyutlu dolguların mikron ölçeğinde tanecik boyutuna

sahip G ve EG' ye göre daha düşük oranlarda perkole olabildikleri görülmektedir. Nano boyutlu dolgular kendi içerisinde karşılaştırıldığında ise beklendiği şekilde yüksek  $A_f$  'ye sahip dolguların daha düşük oranlarda perkole olabilecekleri görülmektedir.



Şekil 4.23: Kompozitlerin  $dc$ -iletkenlik değerleri (a) CB, EG, G serisi, (b) CNT, CNF serisi.

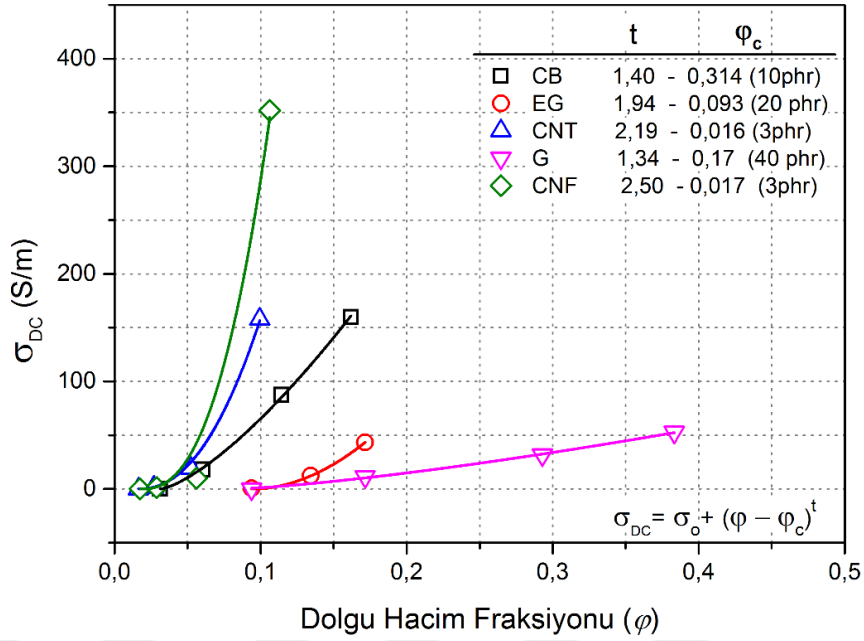
Perkolasyon teorisine göre, polimer kompozitin elektriksel iletkenliğinin kullanılan dolgunun hacim fraksiyonuna bağlı değişimi “üstel sabit (*power-law*)” olarak bilinen denkleme göre öngörülebilmektedir (Denklem 4.2) [155, 156].

$$\sigma_{DC} = \sigma_o (\phi - \phi_c)^t \quad (4.2)$$

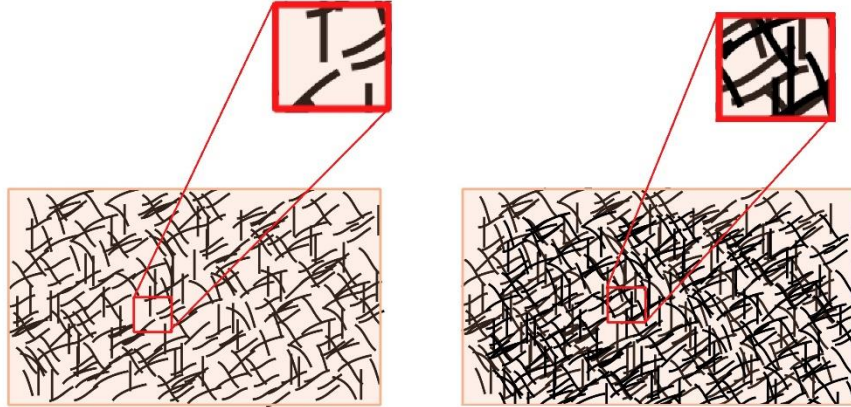
Denklemden  $\sigma_{dc}$ ,  $dc$ -iletkenlik değerini,  $\phi$  dolgu hacim fraksiyonunu,  $\phi_c$  perkolasyonun gerçekleştiği hacim fraksiyonu değerini,  $\sigma_o$  iletkenlikle ilgili bir sabiti,  $t$  ise iletimin gerçekleşme mekanizmasının göstergesi olan üstel sabiti göstermektedir. Teoriye göre dolgu dağılımına bağlı olarak kompozit yapıda iki boyutlu bir elektriksel iletimin gerçekleşmesi durumunda  $t$ 'nin 1.33, üç boyutlu bir iletim gerçekleşmesi durumunda ise 2 seviyelerinde olacağı belirtilmektedir. Bu parametrenin 2.5 ve 3 olması durumunda ise daha etkili iletim mekanizmaları olan süreklilik (Swiss cheese model) ve Bethe-Lattice modelinin geçerli olacağı bildirilmektedir [47, 157].

Perkolasyon eşiğinin üzerindeki dolgu oranlarında kullanılabilen bu denklemin hazırlanan örneklere uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar Şekil 4.24’de verilmiştir. Şekil üzerinde de belirtildiği gibi  $t$  parametresi CB için 1.40, G için 1.34 olarak belirlenirken EG, CNF ve CNT için sırasıyla 1.94, 2.19 ve 2.50 değerleri belirlenmiştir. Bu sonuçlardan CB ve G’nin iki boyutlu bir iletim sağladıkları görülürken EG’ nin örnek boyunca etkili 3 boyutlu bir iletim sağladığı, CNF ve CNT’nin ise kompozit içerisinde birden fazla noktadan temasın sağlandığı kesintisiz ve etkili bir ağısı yapı kurabildikleri değerlendirilmiştir. Öte yandan denklemde  $\varphi=1$  olarak alındığında teorik olarak karbon dolguların elektriksel iletkenliklerinin elde edilmesi gerekliliği açıktır. Ancak bu değerler hesaplandığında CB için 1049 (S/m), G için 233 (S/m), EG için 5207 (S/m), CNF için 143047 (S/m) ve CNT için 35143 (S/m) değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Geometrik özelliklerine göre oldukça değişmekle beraber genel olarak karbon siyahı dışındaki karbon türevleri için elektriksel iletkenliklerin  $10^5$ - $10^8$  (S/m) aralığında değiştiği kabul edildiğinde elde edilen değerlerin gerçek değerlerden daha düşük olduğu görülmektedir. Gerçek değerlerle aradaki bu fark ise Şekil 4.25(a)’da gösterildiği gibi iletken dolgular arasında elektron geçişine izin verecek ancak ilave direnç oluşturacak genişlikte polimer tabakalarının bulunması (elektron sıçrama mekanizması, *hopping mechanism*) ile açıklanmaktadır. Dolguların teorik olarak elde edilen iletkenlik değerleriyle literatürdeki ortalama iletkenlik değerleri ( $10^5$ - $10^8$  S/m) arasındaki fark değerlendirildiğinde ise Şekil 4.25(a)’da şematik olarak gösterilen ilave direnç oluşturan polimer tabakalarının genişlikleri hakkında fikir elde etmek mümkün olabilir. Bu açıdan değerlendirildiğinde iletken dolgular arasında kalan polimer faz genişlerinin  $G>EG>CNT>CNF$  şeklinde sıralandığı görülmektedir. CNF için elde edilen teorik değerlerin literatür değerlerine ( $\sim 10^5$ - $10^8$  S/m) en yakın olduğu buna bağlı olarak dolguların birbirleriyle Şekil 4.25(b)’dekine benzer şekilde temas halinde olduğu, ya da temas etmeye en yakın dolgu olduğu yorumu yapılabilir. Karbon siyahının yapısının diğer karbon türevlerinin aksine amorf olması buna bağlı olarak da iletkenliklerinin diğer karbon türevleri için belirtilen  $10^5$ - $10^8$  S/m aralığına göre daha düşük olması sebebiyle sıralamaya CB eklenmemiştir. Ancak CB içinde iletkenliklerin 1049 (S/m)’ seviyelerinin daha üzerinde olduğu buna bağlı olarak yine hopping mekanizmasının CB serisi örnekler için de geçerli olduğu açıktır.





Şekil 4.24: “Power-law” kuralının iletkenlik sonuçlarına uygulanması.

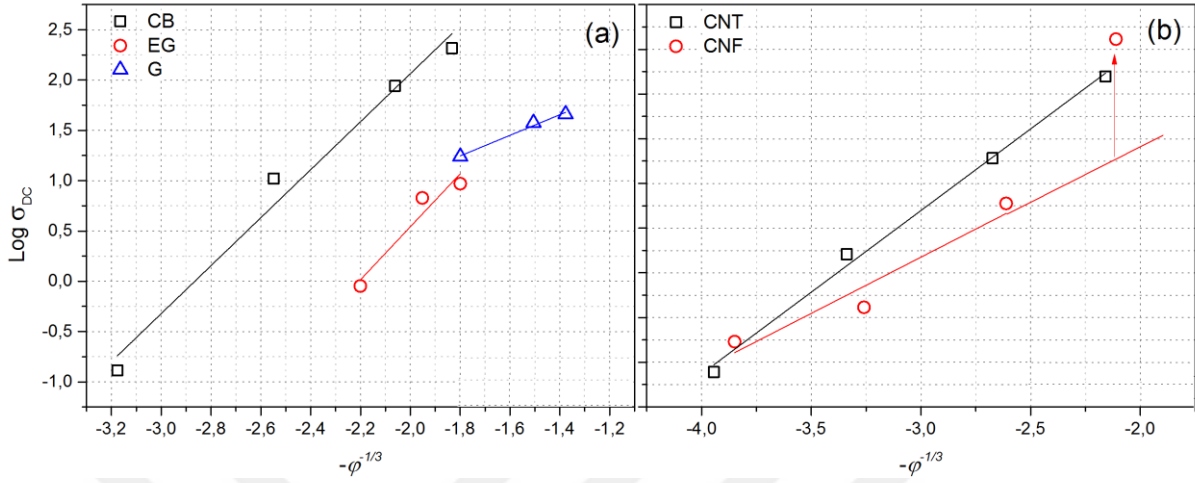


Şekil 4.25: Hopping ve perkolasyon teorisine göre iletim sağlayan kompozitlerde mikro-yapısal durum şematik gösterimi.

Kompozit yapı içerisinde elektrik iletim mekanizmasının değerlendirilmesi ile ilgili bir diğer görüş ise yine perkolasyon teorisine dayanan yaklaşımdır [155]. Bu yaklaşıma göre “ $\log \sigma_{dc} - (-\varphi^{-1/3})$ ” arasında lineer bir ilişkinin bulunması durumunda hopping mekanizmasının etkili olduğu bildirilmektedir. Şekil 4.26(a-b)’da verilen  $\log \sigma_{dc} - (-\varphi^{-1/3})$  grafikleri incelendiğinde CB, G, EG ve CNT serileri için lineer bir grafik oluşturulabilirken CNF-20 örneği dolayısıyla CNF serisinde lineerlikten önemli bir sapma görülmektedir. Bu sapmanın temel sebebinin CNF-20



örneği olması sebebiyle 20 phr CNF oranında dolguların Şekil 4.25(b)'dekine benzer şekilde birbirleriyle temas halinde kesintisiz 3 boyutlu bir ağ yapı oluşturması olarak yorumlanmıştır.

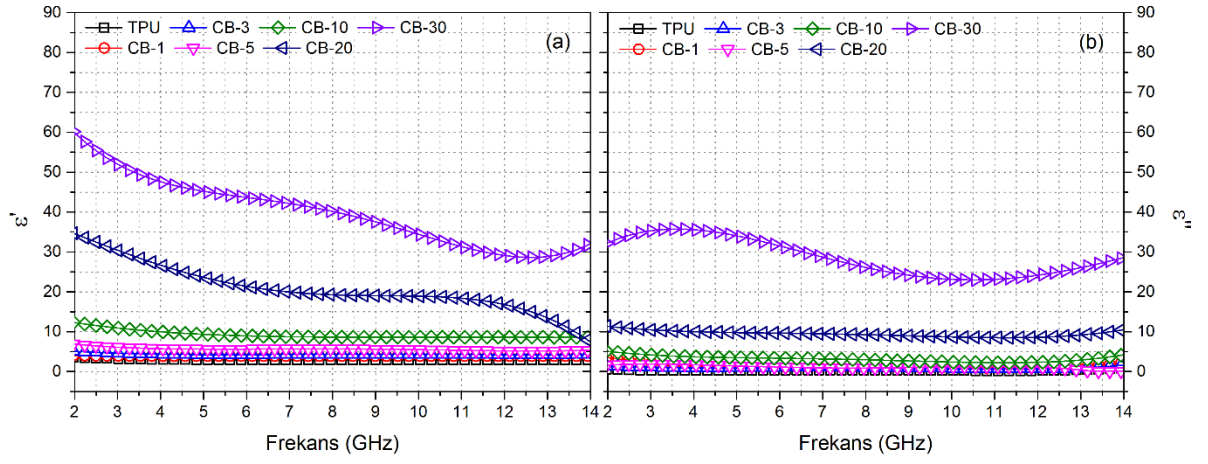


Şekil 4.26: Kompozit serileri için  $\log \sigma - (-\phi^{-1/3})$  grafikleri.

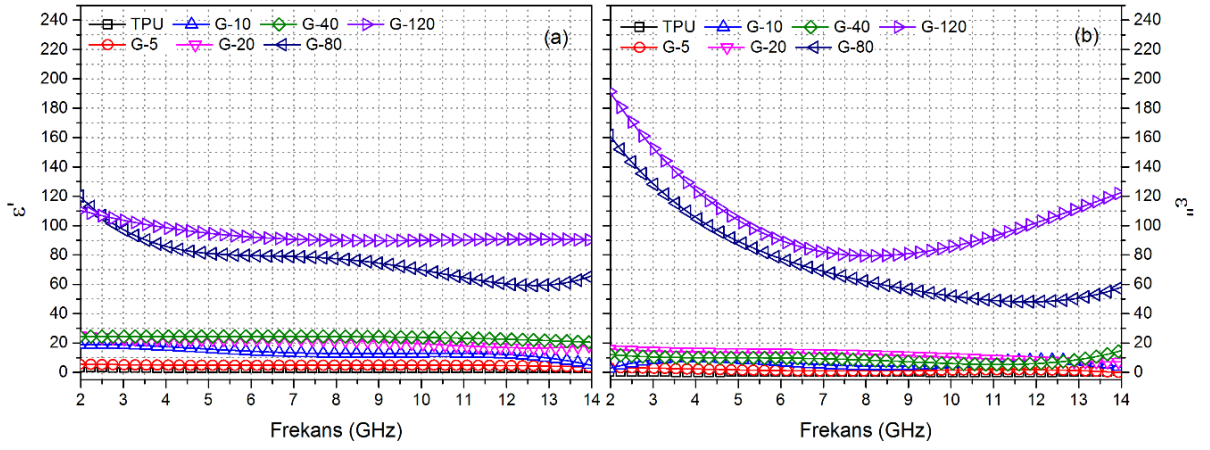
#### 4.2.4. Dielektrik Parametrelerin Analizi

Farklı tipte ve oranda karbon dolgularla hazırlanmış örneklerin  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  değerlerinin 2-14 GHz arasındaki değişimleri Şekil 4.27(a-b)-Şekil 4.31(a-b)'de verilmiştir.

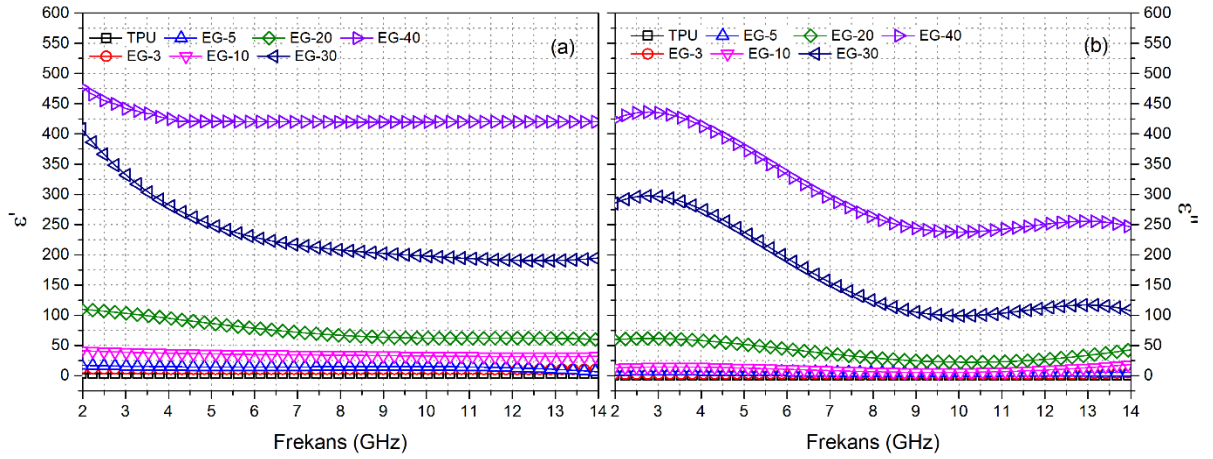
Şekil 4.27(a) - Şekil 4.31(a)'da verilen  $\epsilon'$  değerlerinin dolgu oranına bağlı olarak değişimi incelendiğinde bütün örnek serilerinde dolgu oranının artışı ile  $\epsilon'$  değerlerinin artış gösterdiği görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi  $\epsilon'$  örnek tarafından depolanan elektriksel yükün bir göstergesidir. İletken polimer kompozitlerde  $\epsilon'$  değerlerine neden olan yük depolaması ise kompozit içerisinde mikro boyutlu kapasitör benzeri yapıların oluşması ile açıklanmaktadır [84].



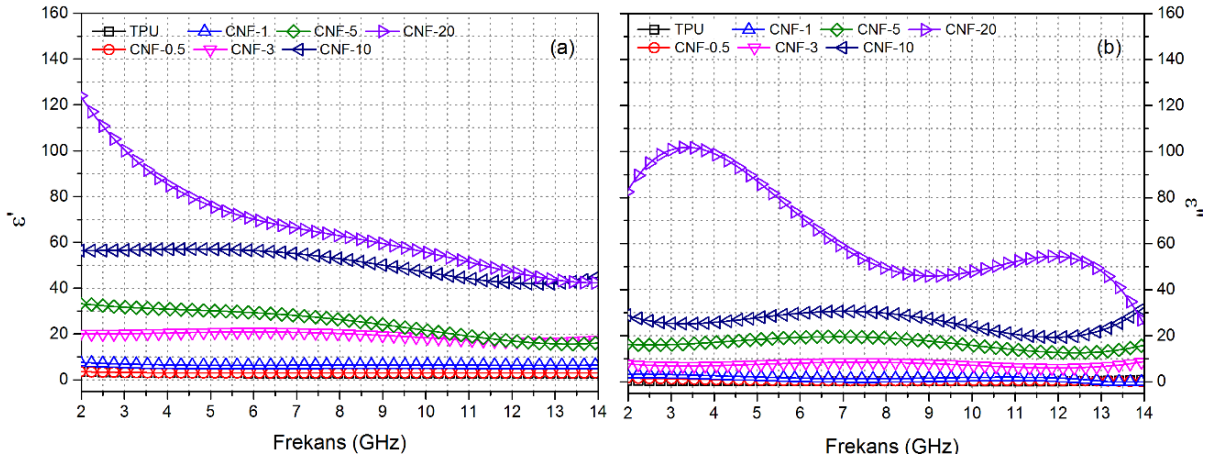
Şekil 4.27: CB serisi örneklerin (a)  $\epsilon'$  ve (b)  $\epsilon''$  değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimi.



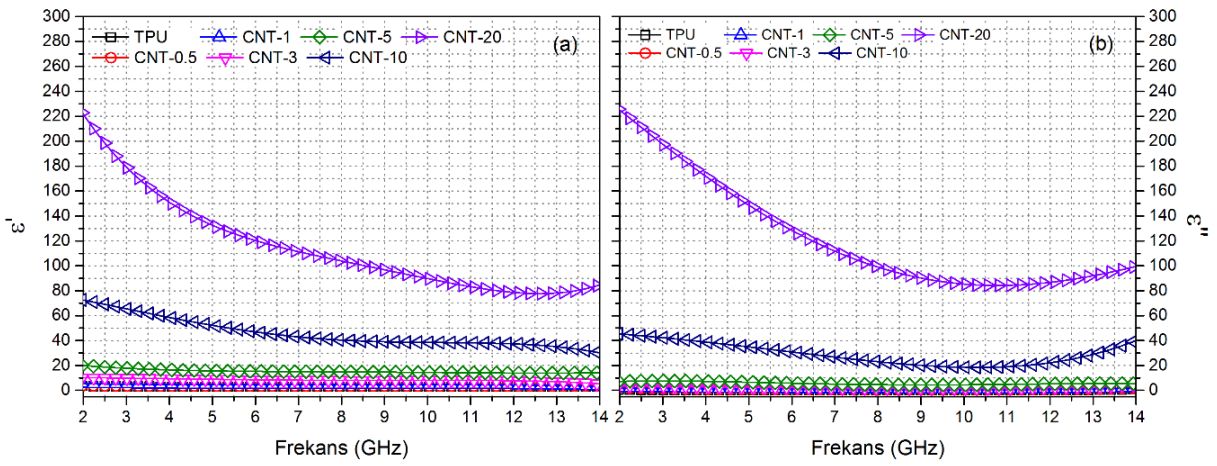
Şekil 4.28: G serisi örneklerin (a)  $\epsilon'$  ve (b)  $\epsilon''$  değerlerinin frekansa bağlı değişimi.



Şekil 4.29: EG serisi örneklerin (a)  $\epsilon'$  ve (b)  $\epsilon''$  değerlerinin frekansa bağlı değişimi.

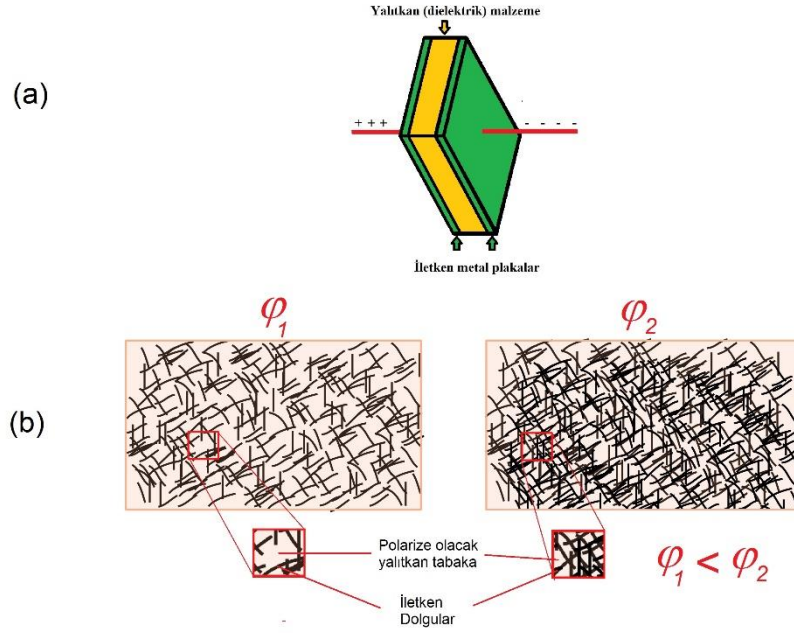


Şekil 4.30: CNF serisi örneklerin (a)  $\epsilon'$  ve (b)  $\epsilon''$  değerlerinin frekansa bağlı değişimi.



Şekil 4.31: CNT serisi örneklerin (a)  $\epsilon'$  ve (b)  $\epsilon''$  değerlerinin frekansa bağlı değişimi.

Şekil 4.32(a)'da genel bir kapasitör yapısı şematik olarak gösterilmiştir. İletken polimer kompozitlerdeki yük depolamasını sağlayacak mikro-kapasitör yapılar ise Şekil 4.32(b)'de gösterildiği gibi uygulanan akımı taşıyabilecek iletken dolgular ve bu dolguların arasında kalan yalıtkan polimer fazdan oluşmaktadır. İletken polimer kompozitlerdeki  $\epsilon'$  değerlerinin iletken dolgu oranına ya da hacim fraksiyonuna ( $\phi$ ) bağlı olarak artışı da bu mikro-kapasitör benzeri yapıların sayılarının artması ve yapıdaki yalıtkan ara tabakanın (polimer faz) kalınlığının dolgu oranının artışına bağlı olarak azalarak daha etkin bir polarizasyonun sağlanması ile açıklanmaktadır. Şekil 4.32(b)'de kompozit yapıdaki dolgu miktarının artmasına bağlı olarak kalınlığı azalan böylece de daha etkili bir şekilde polarize olarak daha fazla yük depolayabilen polimer faz şematik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 4.32:** (a) Bir devre elemanı olan kapasitörlerin genel şematik gösterimi, (b) İletken kompozit yapıda dolgu oranına göre farklı özelliklerde oluşan mikro-kapasitör benzeri yapılar.

$\epsilon'$  değerlerinin frekansa bağlı olarak değişimleri incelendiğinde ise bütün örneklerde geçerli düzenli bir değişim görülmemekle fakat özellikle yüksek dolgu içeren örneklerde artan frekansa bağlı olarak bir azalma görülmektedir. Literatürde bu azalmanın elektromanyetik dalganın malzeme yapısında neden olduğu titreşim hareketlerinin artan frekansa cevap verecek yeterli süreyi bulamamasından kaynaklandığı bildirilmektedir [158, 159].

Farklı dolgu tiplerinin  $\epsilon'$  üzerine olan etkisinin karşılaştırılması amacıyla 20 phr oranında dolgu içeren örneklerin 10.03 GHz frekans değerindeki  $\epsilon'$  değerleri karşılaştırıldığında CB-20 için 20, G için 18, EG-20 için 65, CNF-20 için 58, CNT-20 için ise 90 değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Farklı karbon türevlerinin kullanıldığı literatür çalışmaları incelendiğinde beklendiği şekilde nano boyutlu ve yüksek  $A_f$ 'ye sahip CNT ya da CNF gibi dolguların diğer dolgulara göre daha etkili olduğu görülmektedir. Bu açıdan EG hariç tutularak elde edilen CNT>CNF>CB≈G sıralamasının literatürle uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak hem  $dc$ -iletkenlik değerlerinin hem de mekanik modellemeler sonucunda elde edilen  $A_f$  değerlerinin aksine EG-20 örneğinde CNF-20 örneğine yakın  $\epsilon'$  değerlerinin elde edilebildiği görülmektedir. EG-20 örneğinde elde edilen bu beklenmeyen yüksek değerlerin çeşitli kimyasal işlemler sonucunda tabakalarının arası açılmış genleştirilmiş grafit tabakalarının arasına girmeyi başaran

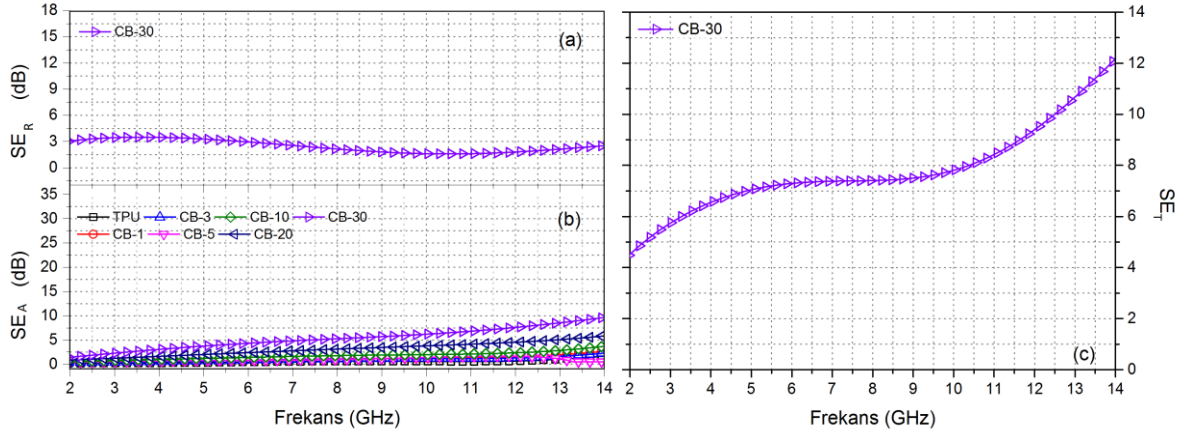
ince polimer katmanlarının yüksek derecede polarize olabilmesi nedeniyle gerçekleştiği düşünülmektedir.

Şekil 4.27(b) - Şekil 4.31(b)' de verilen  $\epsilon''$  değerlerinin frekansa ve dolgu oranına bağlı olarak değişimleri incelendiğinde de genel eğilimin  $\epsilon'$  değişimlerine benzer nitelikte olduğu görülmektedir. Örnek üzerinde ısı enerjisi olarak kaybolan enerjinin göstergesi olan  $\epsilon''$  değerinin değişimi temel olarak  $\sigma = 2\pi f \epsilon_0 |\epsilon''|$  denklemi ile *ac*-iletkenliğin de bir göstergesi olarak kabul edilir. Bu yüzden  $\epsilon''$  değerlerinin değişiminin yorumlanması elektrik akımını iletim performansı üzerinden gerçekleştirilmiş ve dolgu oranının artmasına bağlı olarak  $\epsilon''$  değerinin artması beklenen bir sonuç olmuştur. Dolgu tipine bağlı olarak  $\epsilon''$  değerlerinin değerlendirilmesi amacıyla 20 phr dolgu içeren örneklerin 10.03 GHz frekans değerindeki  $\epsilon''$  değerlerinin CNT-20 (100) > CNF-20 (50) > EG-20 (25) > G-20 (9)  $\approx$  CB-20 (9) şeklinde sıralandığı görülmüştür. Diğer yandan her iki permitivite değeri için elde edilen maksimum değerlerin düşük yüzey alanı ve kaydırıcı etkisi sayesinde yüksek oranda kompozit yapıya katılabilen ve daha önce bahsedilen mikro-yapısal özelliklere bağlı olarak 40 phr oranında geliştirilmiş grafit içeren EG-40 örneğiyle elde edilebildiği görülmüştür.

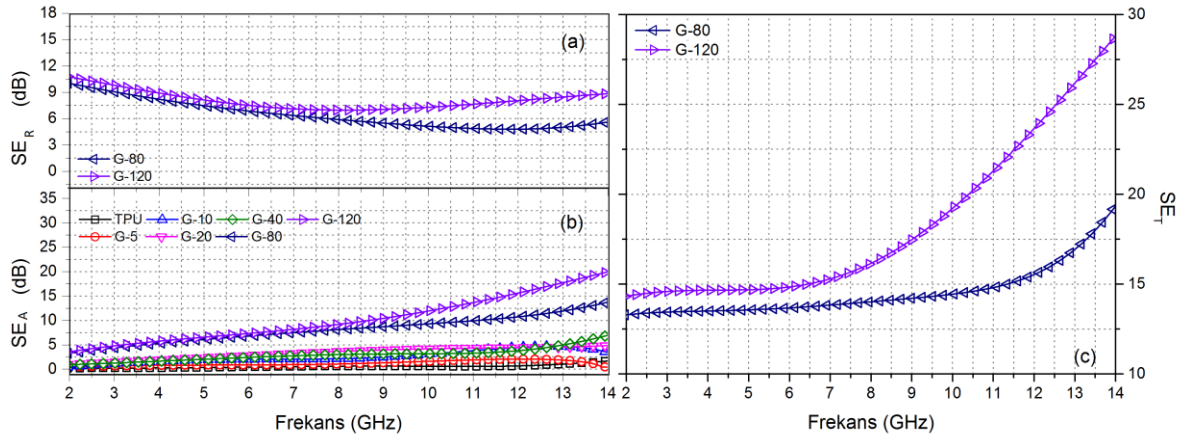
#### 4.2.5. Kalkanlama Etkinliklerinin Analizi

Şekil 4.33(a-c) - Şekil 4.37(a-c)' de 1 mm kalınlığındaki farklı tip ve oranda karbon dolgu içeren örneklerin denklem 2.33 – denklem 2.35 kullanılarak elde edilen  $SE_R$ ,  $SE_A$  ve  $SE_T$  değerleri özetlenmiştir.  $SE_R$  değerlerinin verildiği grafiklerde denklem 2.33'e göre hesaplama yapabilmek için gerekli minimum elektriksel iletkenliğe sahip olmayan örnekler verilmemiştir. Hesaplama yapılamayan örneklerin pratik olarak  $SE_R$  değerlerinin 1 dB' in oldukça altında olması sebebiyle  $SE_A=SE_T$  olarak kabul edilmiştir.

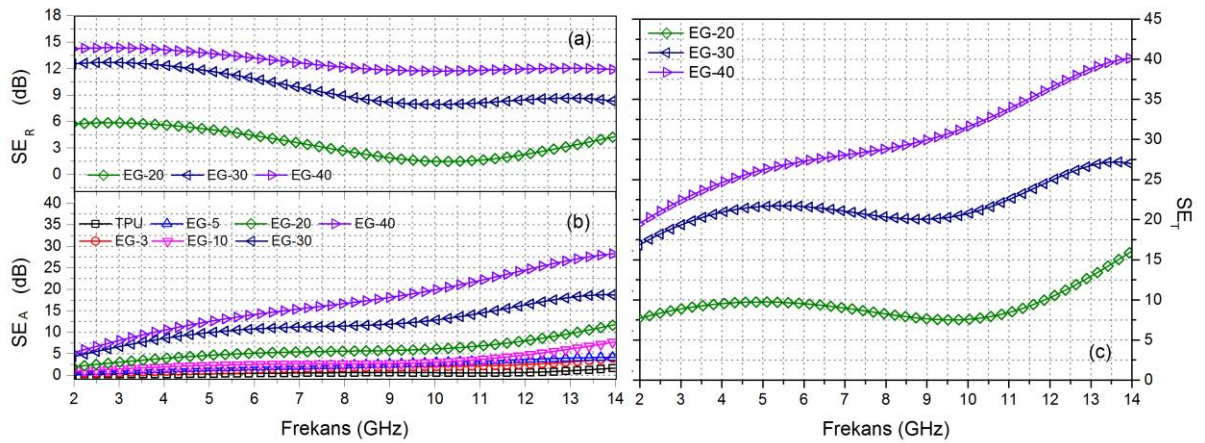




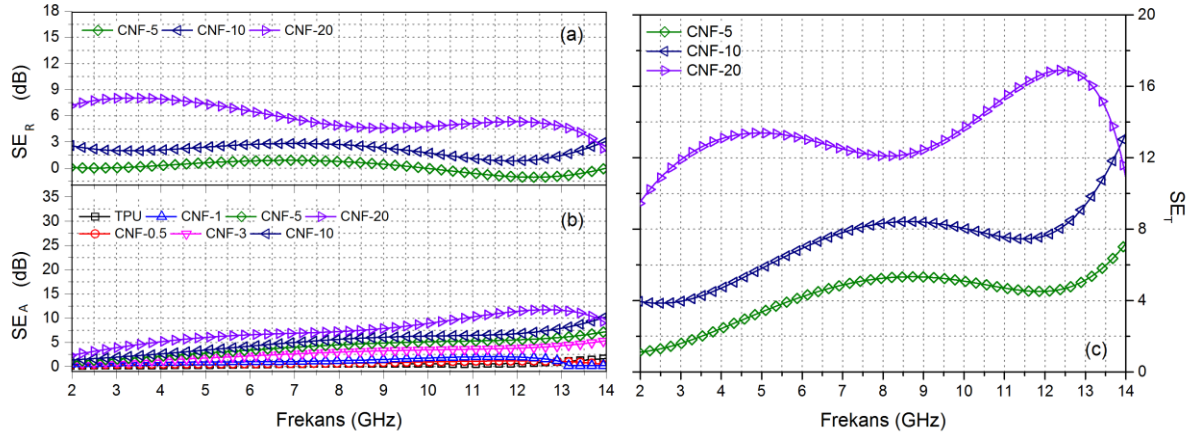
Şekil 4.33: CB serisi örnekler için (a)  $SE_R$ , (b)  $SE_A$  ve (c)  $SE_T$  değerlerinin değişimi (d=1 mm).



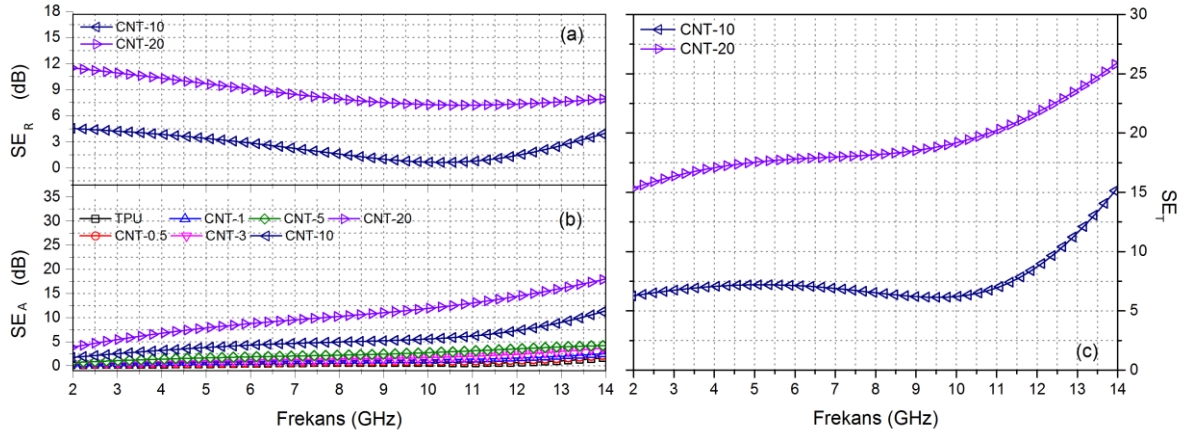
Şekil 4.34: G serisi örnekler için (a)  $SE_R$ , (b)  $SE_A$  ve (c)  $SE_T$  değerlerinin değişimi (d=1 mm).



Şekil 4.35: EG serisi örnekler için (a)  $SE_R$ , (b)  $SE_A$  ve (c)  $SE_T$  değerlerinin değişimi (d=1 mm).



Şekil 4.36: CNF serisi örnekler için (a)  $SE_R$ , (b)  $SE_A$  ve (c)  $SE_T$  değerlerinin değişimi ( $d=1$  mm).



Şekil 4.37: CNT serisi örnekler için (a)  $SE_R$ , (b)  $SE_A$  ve (c)  $SE_T$  değerlerinin değişimi ( $d=1$  mm).

Şekil 4.33(a)-Şekil 4.37(a)'da verilen  $SE_R$  değerleri incelendiğinde, beklendiği şekilde dolgu oranına bağlı olarak artan, frekansa bağlı olarak ise düşük oranda da olsa azalma gösteren bir değişim görülmektedir. Dolgu tiplerine göre kıyaslama yapıldığında en yüksek  $SE_T$  değerinin 12-15 dB arasında olduğu ve EG-40 örneğiyle elde edilebildiği görülmektedir. Ağırlıkça birim dolgu miktarı başına etkinliğin karşılaştırılması amacıyla 20 phr oranında dolgu içeren örneklerin karşılaştırmasında ise yaklaşık 9 dB  $SE_T$  değerine sahip CNT-20' nin en yüksek performansı sergilediği görülmektedir.

Şekil 4.33(b)-Şekil 4.37(b) incelendiğinde ise  $SE_A$  değerlerinin yine elektriksel iletkenliğe, dolgu oranına ve denklem 2.34'e göre frekansa bağlı olarak artış gösterdiği görülmektedir.  $SE_A$  değerlerinin 2 GHz'de hiçbir örnekte 5 dB değerine ulaşamadığı görülürken 14 GHz de 30 dB lere ulaşabildiği görülmektedir.  $SE_A$  içinde en yüksek değer yine EG-40 örneğiyle, birim

dolgu başına en yüksek etkinliğin ise CNT-20 ile sağlandığı tespit edilmiştir. Öte yandan  $SE_A$  ve  $SE_R$  değerleri beraber değerlendirildiğinde bütün örneklerde düşük frekans aralıklarında yansıma esaslı kalkanlamanın, yüksek frekans değerlerinde ise soğurma esaslı bir kalkanlamanın etkili olduğu görülmektedir.

Şekil 4.33(c)-Şekil 4.37(c)'de  $SE_A$  ve  $SE_R$  değerlerinin toplanmasıyla elde edilen ve kalkanlama uygulamalarındaki en önemli gösterge olan  $SE_T$  değerlerinin frekansa bağlı değişimleri verilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde beklendiği şekilde EG-40 örneği ile en yüksek değerlerin elde edilebildiği görülmektedir. EG-40 örneğinin  $SE_T$  eğrisi incelendiğinde en düşük 2 GHz frekansında 20 dB, en yüksek 14 GHz frekansında 40 dB kalkanlama etkinliklerinin elde edilebileceği görülmektedir. Elde edilen bu değerlerin daha önce mikro-yapısal değişimler göz önünde bulundurularak detaylı bir şekilde incelenen  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  değerlerine bağlı olarak hesaplanması sebebiyle bu kısımda mikro-yapısal değişimlere bağlı olarak yorumlar tekrarlanmamıştır.

En yüksek performansın elde edildiği EG-40 örneğiyle elde edilen  $SE_T$  değerlerinin birçok teknik ve endüstriyel gereksinimleri karşılayacak nitelikte olduğu görülmektedir. Ancak, EG-40 örneğinin içerdiği yüksek dolgu oranına bağlı olarak yırtılma ve kırılma gibi mekanik özellikler açısından zayıflığı, hazırlama sırasında yüksek viskozitenin neden olduğu hazırlama zorlukları ve yüksek performans gerektiren uygulamalar ( $SE_T > 40$  dB) için  $SE_T$  değerlerinin yetersizliği, bu örneğin çevresel şartlara dayanıklı yüksek performans bir elektromanyetik kalkan olarak kullanılmasının önünde engel olarak görülmektedir.

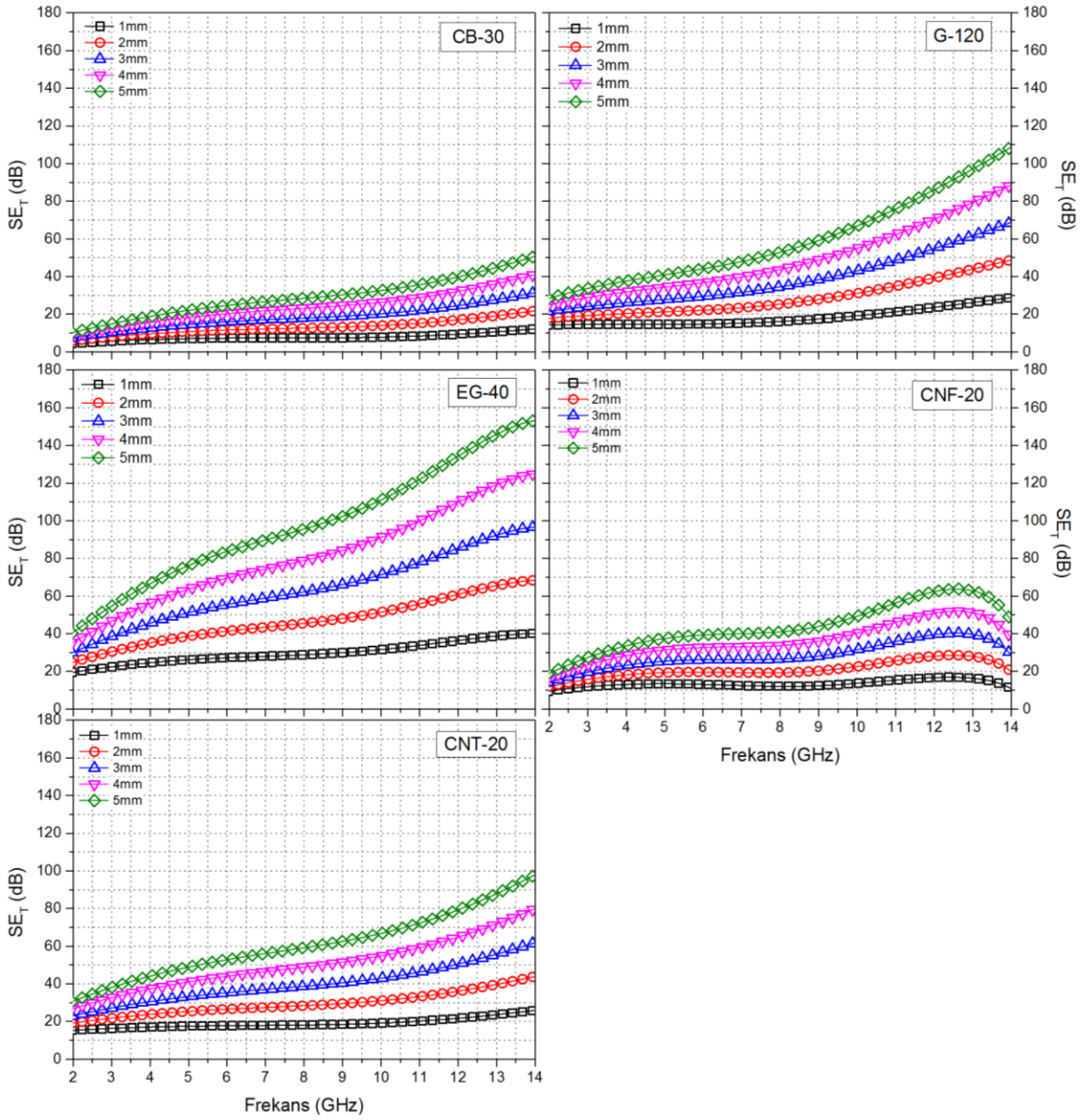
Bu sonuçlara göre, hedef özellikleri sağlayabilen daha yüksek kalkanlama etkinliklerine sahip polimer kompozitlerin geliştirilmesi için; kullanılan iletken dolgu miktarlarının artırılması yoluyla daha yüksek  $SE_A$  ve  $SE_R$  değerlerine sahip kompozitlerin geliştirilmesi ya da örnek kalınlıklarının artırılarak daha yüksek  $SE_A$  değerlerine sahip kompozitlerin eldesi üzere iki farklı metodun uygulanması planlanmıştır. Ancak, bütün dolgu tiplerinde kullanılan dolgu oranlarının üzerine çıkılması durumunda film morfolojisinin bozulması, dolgu dağılımının önemli şekilde kötüleşmesi ve hazırlama sırasında dolguların dibe çökmesi gibi sorunlar nedeniyle örnek kalınlıklarının artırılmasının daha uygun olacağı düşünülmüştür.

Daha önce verildiği gibi denklem 2.33 ve denklem 2.34'e göre kalınlık artışlarında yansıma esaslı kalkanlamada herhangi bir değişim olmazken soğurma esaslı kalkanlama doğrusal bir şekilde artış gösterecektir. Bu kapsamda Şekil 4.38'de her seride, en yüksek kalkanlama



etkinliği elde edilen örneklerin 1-5 mm arasındaki farklı kalınlıkları için  $SE_T$  değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, tezde hedef olarak belirlenen 2-8 GHz frekans aralığında en az 20 dB, 8-12 GHz aralığında ise en az 40 dB  $SE_T$  değerlerinin elde edilmesi açısından değerlendirildiğinde, CB-30 ve CNF-20 örneklerinin 5 mm'ye kadar hiçbir kalınlıkta istenilen performansı sağlayamadığı görülürken, EG-40 örneğinin 3 mm'den daha yüksek kalınlıklarda, CNT-20 ve G-120 rneğlerinin ise en az 5 mm kalınlıkta hedef özellikleri sağlayabildiği görülmüştür. G ve EG serisi rneğlerle daha yüksek kalkanlama etkinliklerinin elde edilmesinde, bu dolguların sahip olduğu düşük yüzey alanı ve mikron tanecik boyutu sayesinde kompozit yapıya daha fazla miktarda katılmasının da etkili olduğu dşnlmektedir.





Şekil 4.38: En yüksek performansın elde edildiği örneklerin farklı kalınlıklardaki  $SE_T$  eğrileri.

#### 4.2.6. Yansıma Kaybı (RL) Analizleri

Şekil 4.39(a-e)'de tek katmanlı karbon dolgulu TPU kompozitlerinin permittivite ve permeabilite değerleri kullanılarak denklem 2.36'ya göre hesaplanan yansıma kaybı ( $RL$ ) değerleri verilmiştir.  $RL$  değerlerinin örnek kalınlığına göre düzenli bir değişim göstermemesi ve her frekans için optimum bir kalınlıkta en düşük  $RL$  değerlerinin elde edilebilmesi nedeniyle Şekil 4.39 oluşturulurken öncelikle her bir örnekle 2-14 GHz arasında elde edilebilecek en

düşük  $RL$  değerini veren kalınlık değeri hesaplanmış daha sonra bu kalınlık değeri için 2-14 GHz aralığında  $RL$ -frekans grafikleri oluşturulmuştur. Her örnek için hesaplanan optimum kalınlık değeri grafik üzerinde gösterilmiştir. Sonuçların daha anlaşılabilir olması adına çok yüksek dolgu oranı sebebiyle ölçüm frekans aralığının hiçbir noktasında -5 dB  $RL$  değerini dahi göstermeyen CB-30, EG-30, EG-40, G-120, CNT-20 ve CNF-20 örneklerinin sonuçları grafiklerde gösterilmemiştir. Grafiklerde özellikle hedef frekans aralığındaki en etkili olarak kabul edilen örnekler yeşil renkle gösterilmiştir. Çalışmanın devam eden kısmında her seride en etkili soğurmayı gerçekleştiren örneğin soğurma performansları daha detaylı olarak dış hat (*contour*) grafiklerinde incelenmiş ve X-band RAM olarak kullanımları tartışılmıştır.

Şekil 4.39(a-e)'de örneklerin  $RL$  değerlerinin dolgu oranına bağlı değişimi incelendiğinde, beklendiği şekilde düşük dolgu oranlarında dolgu fazının etki göstereceği hacim fraksiyonuna erişilememesine, yüksek dolgu oranlarında ise kompozit mikro-yapısında iletken yolların kurulmasıyla elektromanyetik dalganın geri yansıtılmasına neden olan yüksek elektriksel iletkenliğin sağlanmasına bağlı olarak, elde edilen  $RL$  değerlerinin istenilen değerlerin çok uzağında kaldığı görülmektedir. Bu yüzden en düşük  $RL$  değerlerinin elde edildiği örneklerin, genellikle ortalama dolgu oranlarına sahip örnekler olduğu görülmektedir.

Şekil 4.39(a)'da CB serisi örneklerin  $RL$  değerleri incelendiğinde X-band aralığında -10 dB' den daha düşük değerlerinin elde edilemediği görülmektedir. Buna bağlı olarak da CB serisi örneklerin bu frekans aralığı için tek başlarına kullanımının yeterli olmayacağı düşünülebilir. Buna rağmen, 1.925 mm kalınlığındaki CB-10 örneğiyle 12.5 GHz den itibaren -10 dB'den daha düşük  $RL$  değerleri elde edilebilmiştir. Bu yüzden CB serisi örnekler içerisinde CB-10 örneği en etkili örnek olarak belirlenmiştir.

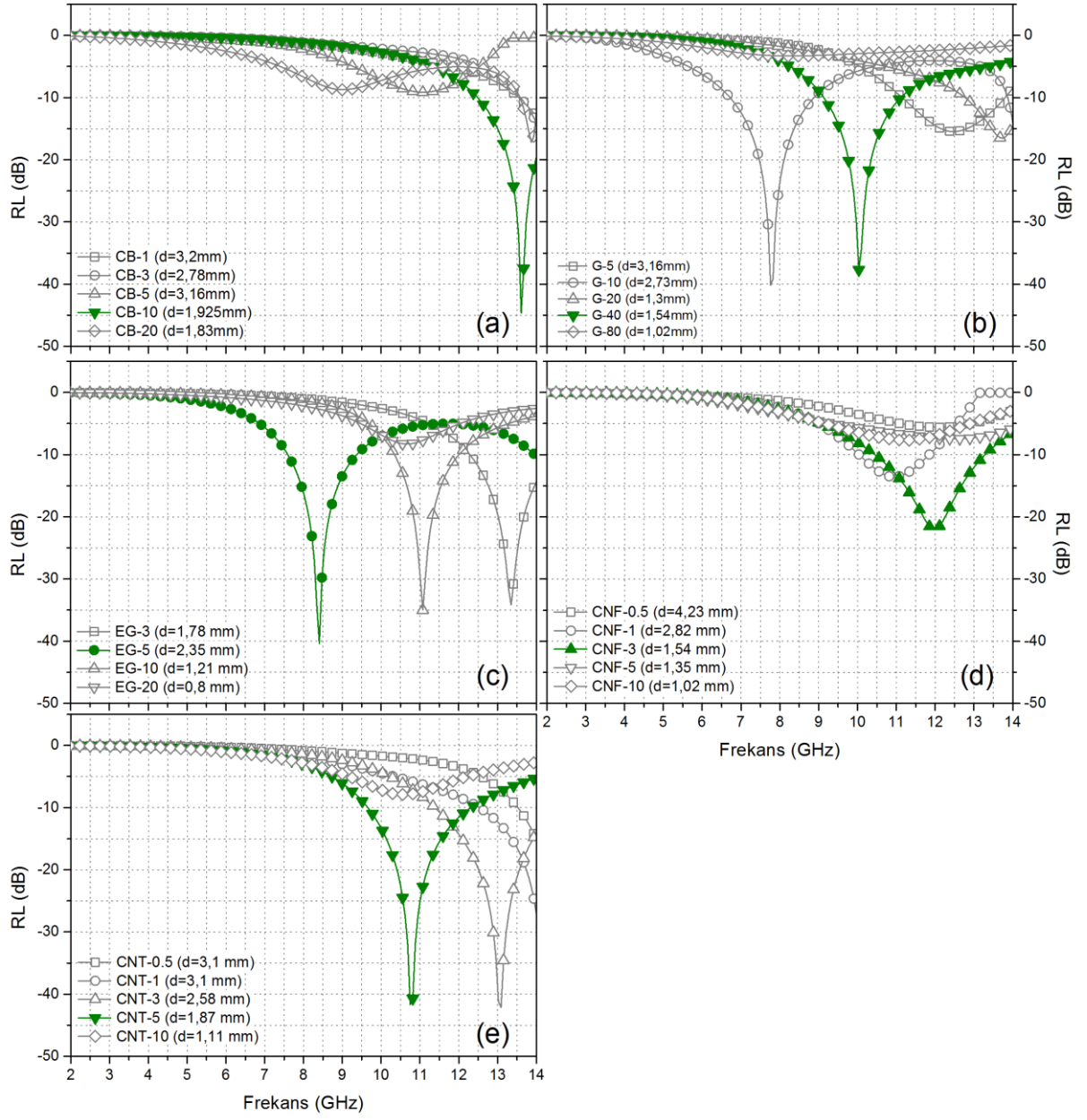
Grafit katkılı örneklerin sonuçları incelendiğinde (Şekil 4.39(b)) ise sadece G-10 ve G-40 örnekleriyle dikkate değer soğurmanın gerçekleştirilebildiği görülmektedir. Her iki örneğe ait performanslar incelendiğinde -40 dB'ye varan  $RL_{min}$  değerlerinin ve yaklaşık 2 GHz EAA' nın elde edilebildiği bulunmuştur. G-10 örneği etkin soğurmayı 7-9 GHz aralığında gerçekleştirirken G-40 örneğinin ise etkin soğurmayı X-bandın içinde olacak şekilde 9.2-11.0 GHz arasında gerçekleştirdiği görülmektedir. Etkin soğurma gerçekleştirebildiği frekans aralığının X-band içerisinde kalması nedeniyle G serisi örneklerde G-40 örneği en etkili soğurma gerçekleştirebilen örnek olarak belirlenmiştir.

EG serisi örneklerde ise EG-3, EG-5 ve EG-10 örnekleriyle farklı frekans aralıklarında tipik  $RL$ -frekans grafiklerinin elde edilebildiği görülmektedir. EG serisi örneklerin sonuçların verildiği 4.39(c) incelendiğinde EG-5 için  $-40$  dB  $RL_{\min}$  ve 7.5-9.5 (2) GHz EAA, EG-10 için  $-35$  dB  $RL_{\min}$  ve 10.5-11.8 (1.3) GHz EAA, EG-3 içinse  $-34$  dB  $RL_{\min}$  ve 12-14 (2) GHz EAA değerleri belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre EG-5 örneği düşük dolgu oranı, daha geniş EAA ve daha düşük  $RL_{\min}$  değerleri nedeniyle EG- serisi içerisindeki en etkili soğurma yapabilen örnek olarak seçilmiştir.

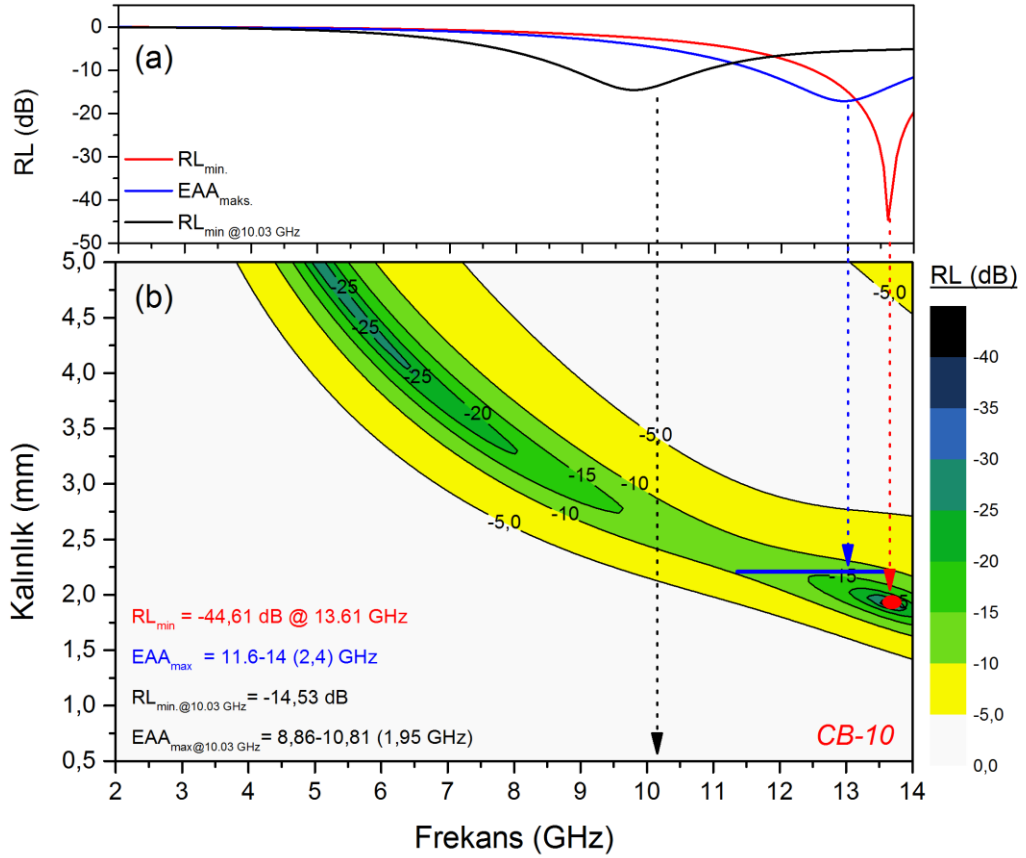
CNF serilerde ise sadece CNF-1 ce CNF-3 ile  $-10$  dB'den daha düşük  $RL$  değerlerinin elde edilebildiği görülürken CNF-3 örneği 10.5-13.5 (3 GHz) EAA değeriyle CNF serisi örnekler arasındaki en etkili soğurma gerçekleştiren örnek olarak belirlenmiştir.

Son olarak CNT serisi örneklerin grafiklerinde CNT-3 ve CNT-5 örnekleriyle yaklaşık  $-40$  dB  $RL_{\min}$  değerleri elde edilebildiği görülmekteyken CNT-3 örneği, 9.7-12.3 (2.6) GHz EAA değeriyle CNT serisi içerisindeki en etkili soğurma gerçekleştirebilen örnek olarak görülmektedir. Her örnek serisindeki en etkili soğurma gerçekleştiren örneklerin (CB-10, G-40, EG-5, CNF-3 ve CNT-5) soğurma performanslarının daha detaylı olarak incelenebilmesi amacıyla oluşturulan ve “frekans-kalınlık- $RL$ ” ilişkisini gösteren dış hat (*contour*) grafikleri Şekil 4.40(a-b) – Şekil 4.44(a-b)'de verilmiştir.

Dış hat grafiklerinin (a) kısmında bütün dış hat grafiği içerisinde en düşük yansıma kaybı ( $RL_{\min}$ ) değerinin elde edildiği kalınlık değeri için 2-14 GHz aralığındaki  $RL$ -frekans grafiği kırmızı renkle, X-band içerisinde en geniş EAA'nın ( $EAA_{\max}$ ) sağlandığı kalınlık değeri için elde edilen  $RL$ -frekans grafiği mavi renkle ve hedef frekans aralığı olan 8.2-12.4 GHz aralığının yaklaşık merkez frekans değeri olan 10.03 GHz değeri için elde edilebilen en düşük  $RL$  değeri ( $RL_{\min@10.03}$  GHz) siyah renkle gösterilmiştir. Dış hat grafiklerinin verildiği (b) kısımlarında ise EAA'nın daha net gözlemlenebilmesi amacıyla  $<-10$  dB aralığı yeşil ve tonları renklerle belirtilirken pratik olarak soğurmanın gözlenmediği ( $>-5$  dB) alanlar beyaz renkle gösterilmiştir.  $-5$  ile  $-10$  dB arasında soğurmanın gerçekleştirildiği alanlar ise sarı renkle gösterilmiştir. Tez kapsamında ortaya konan hedefler açısından değerlendirildiğinde tek bir kalınlık değerinde X-band aralığının tamamında EAA için açık yeşil, HPAA için ise koyu yeşil rengin görülmesi gerekmektedir.

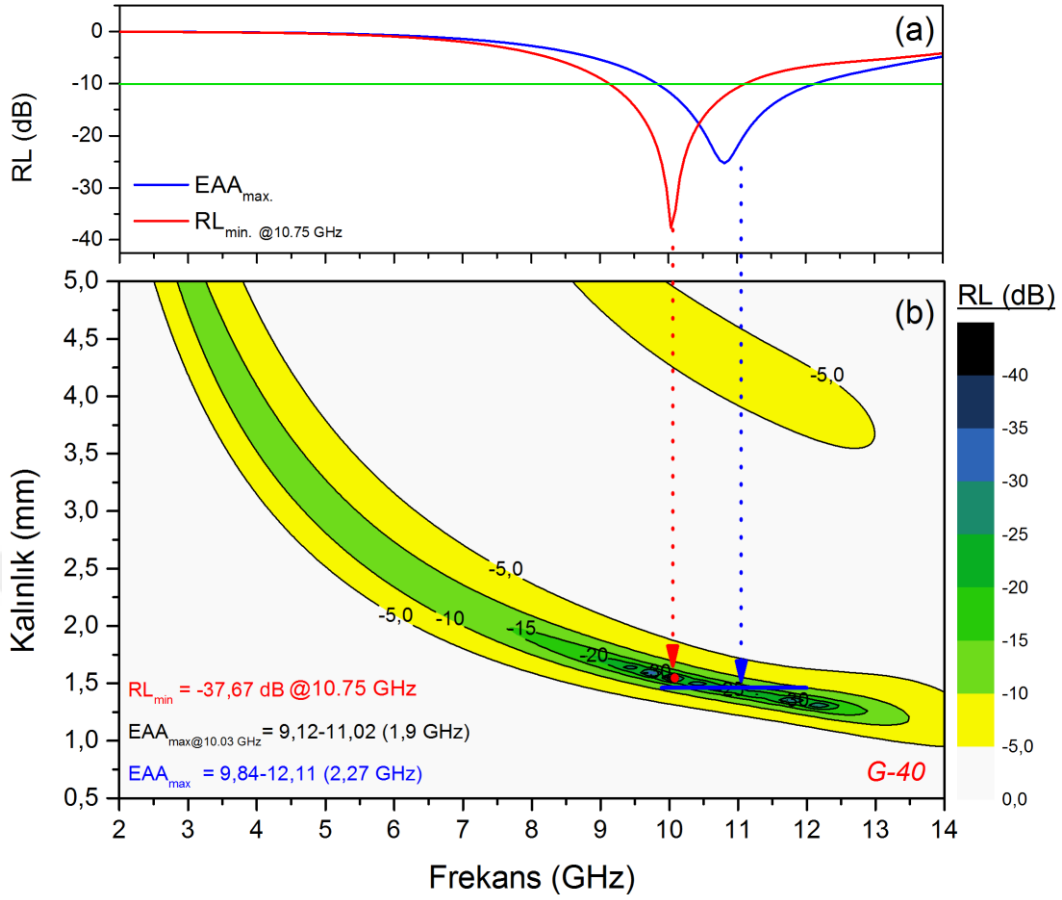


Şekil 4.39: Karbon dolgulu örneklerin optimum kalınlık değerlerinde elde edilen RL-frekans grafikleri.



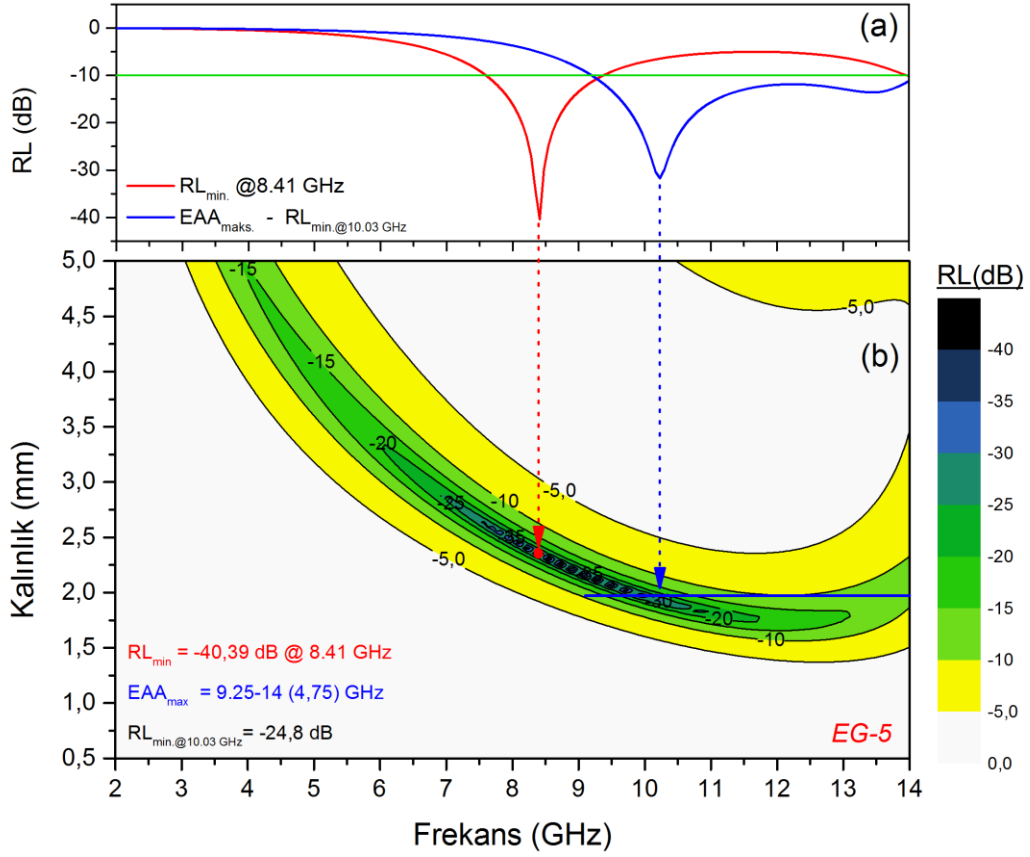
Şekil 4.40: CB-10 örneği için kalınlık-frekans-RL sonuçlarını içeren dış hat grafiği.

CB-10 örneğine ait  $RL$  değerlerinin verildiği Şekil 4.40(b) incelendiğinde yaklaşık 4.5-14.0 GHz arasında farklı kalınlıklarda hazırlanacak örneklerle -10 dB den daha küçük  $RL$  değerlerinin elde edilebileceği görülmektedir. Tek bir örnekle elde edilen en geniş EAA'nın ise Şekil 4.40(b)'de mavi çizgiyle gösterildiği gibi 2.20 mm kalınlıktaki örnekle 11.6-14.0 GHz arasında sağlanabildiği görülürken bu kalınlıkta elde edilen  $RL_{min}$  değeri yaklaşık -18 dB olarak belirlenmiştir. 2-14 GHz aralığının tamamındaki  $RL_{min}$  değeri ise şekilde kırmızı noktayla gösterilmiş olup 13.61 GHz frekansında yaklaşık olarak 1.80 mm kalınlığındaki örnekle -44.61 dB olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.40(a)'da siyah eğriyle gösterilen X-band merkez frekansı olarak kabul edilen 10.03 GHz'daki performans incelendiğinde CB-10 örneği için -14.53 dB  $RL_{min}$  ve 8.86 – 10.81 (1.95) GHz EAA'nın elde edilebileceği görülmektedir.



Şekil 4.41: G-40 örneği için kalınlık-frekans-RL sonuçlarını içeren dış hat grafiği.

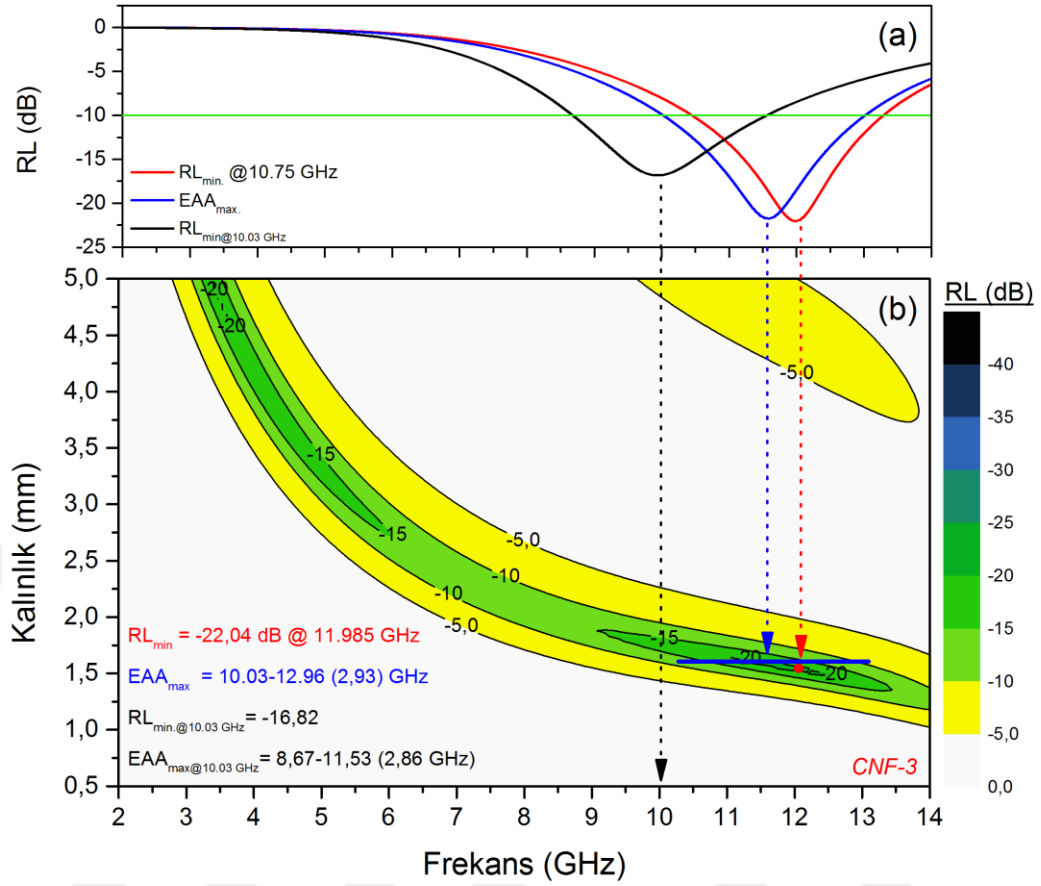
G-40 örneğine ait dış hat grafiği (Şekil 4.41(b)) incelendiğinde ise 2-14 GHz frekans aralığının tamamına yakınında yeşil renkler görülmesine rağmen tek bir örnekle elde edilebilecek EAA'nın hedeflerin çok gerisinde yetersiz olduğu görülmektedir. Öte yandan grafikte CB-10 örneğine göre daha düşük kalınlıklardaki koyu yeşil renkler dikkat çekmektedir. Grafikte G-40 örneğine ait 2-14 GHz aralığındaki  $RL_{min}$  değeri 10.75 GHz frekansta -37.67 dB olup bu frekans değeri için EAA 9.12-11.02 GHz arası olarak belirlenmiştir. Ayrıca Şekil 4.41(a)'da mavi çizgi ile gösterilen  $EAA_{max}$ 'ın 1.4 mm kalınlıktaki örnek ile 9.84 – 12.11 GHz aralığında sağlanabileceği görülmektedir. Bütün ölçüm aralığında elde edilen  $RL_{min}$  değerinin hedef frekans aralığının merkez frekansı olan 10.03 GHz'e çok yakın olması (10.75 GHz) nedeniyle ayrıca  $RL_{min@10.03\text{GHz}}$  grafiği verilmemiştir.



Şekil 4.42: EG-5 örneği için kalınlık-frekans-RL sonuçlarını içeren dış hat grafiği.

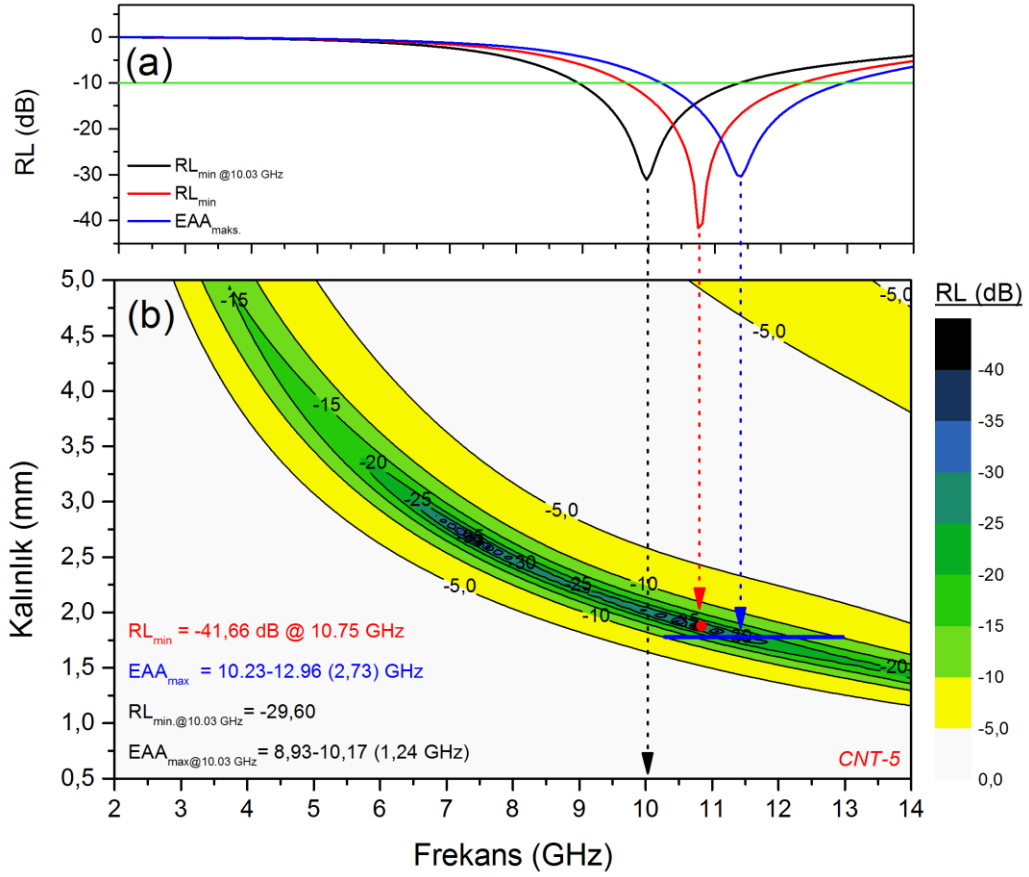
EG-5 örneğine ait dış hat grafiğinin verildiği Şekil 4.42(b) incelendiğinde diğer tüm örneklere göre çok daha geniş olan  $EAA_{maks}$  aralığı dikkat çekmektedir.  $EAA_{maks}$  9.25-14.0 GHz olarak belirlenen grafikte 2-14 GHz arasındaki  $RL_{min}$  değeri -40.39 dB ile 8.41 GHz değerinde gerçekleşmiştir. X-band merkez frekansı olan 10.03 GHz değerindeki  $RL_{min}$  değeri ise -24.8 dB olarak belirlenmiştir. Şekil 4.42(a)'da verilen mavi renkli grafik hem  $EAA_{maks}$  hem de  $RL_{maks@10.03}$  için geçerlidir.





Şekil 4.43: CNF-3 örneği için kalınlık-frekans-RL sonuçlarını içeren dış hat grafiği.

Şekil 4.43(a-b)'de CNF-3 örneğinin dış hat grafiği incelendiğinde ise elde edilen  $RL$  değerlerinin çok düşük değerlere ulaşmadığı ancak buna rağmen  $EAA_{max}$ 'ın diğer nano boyutlu örneklere göre daha geniş olduğu dikkat çekmektedir. 2-14 GHz aralığında  $EAA_{max}$  değeri 10.03-12.96 GHz olup 1.55 mm kalınlığındaki örnekle bu aralık sağlanabilmektedir. 2-14 GHz aralığının tamamında CNF-3 örneğiyle elde edilen  $RL_{min}$  değeri ise 1.5 mm kalınlığındaki örnekle 11.985 GHz'de -22.04 dB olmuştur. X-band merkez frekansı olan 10.03 GHz değerindeki  $RL_{min} @ 10.03$  ise -16.82 dB olup aynı kalınlık için elde edilen  $EAA @ 10.03$  aralığı 8.67-11.53 (2.86 GHz) olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.44: CNT-5 örneği için kalınlık-frekans-RL sonuçlarını içeren dış hat grafiği.

Son olarak CNT-5 örneğine ait dış hat grafiklerinin verildiği Şekil 4.44(a-b) incelendiğinde 2-14 GHz aralığındaki  $RL_{\min}$  değerinin 10.75 GHz frekansında -41.66 dB olduğu, yine aynı aralıkta  $EAA_{\max}$ 'ın 10.23-12.96 GHz (2.73 GHz) olduğu görülmektedir. Sonuçlar diğer örneklerle karşılaştırıldığında gerek  $EAA_{\max}$  gerekse  $RL_{\min}$  değerleri açısından en iyi sonuçların CNT-5 örneği ile elde edilebildiği görülmüştür.

### 4.3. ÇOK KATMANLI KARBON POLİMER KOMPOZİT TASARIMININ BELİRLENMESİ

Bu bölümde, farklı tip ve oranlarda karbon dolgular içeren tek katmanlı kompozitlerle X-bandı aralığında istenilen kalkanlama performansının elde edilememesi üzerine daha geniş frekans aralığında soğurmanın sağlanması için kullanılan yöntemlerden biri olan çok katmanlı kompozitlerin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çok katmanlı RAM'ların geliştirilmesinde düşük yoğunluk kriteri göz önünde bulundurularak dolgu olarak sadece yine karbon türevleri kullanılmıştır.

Çok katmanlı RAM tasarımlarının belirlenmesinde, ilgili kaynaklarda da uygulanmakta olan yöntemlere göre, öncelikle her bir katmanda bulunabilecek örneklerin permitivite ve permeabilite değerleri belirlenerek bir veri havuzu oluşturulur. Daha sonra RAM'ın kaç katmandan oluşacağı, her bir katmanda hangi kompozitin kullanılacağı ve bu katmanların kalınlıkları belirlenir. En sonunda ise denklem 2.41 – denklem 2.45 kullanılarak çok katmanlı RAM'ın toplam *RL* değeri hesaplanır. Ancak buradaki en önemli ve hassas nokta tasarımda kullanılacak olan malzemelerin ve her bir katmanın kalınlıklarının en yüksek soğurma performansını sağlayacak şekilde belirlenmesidir.

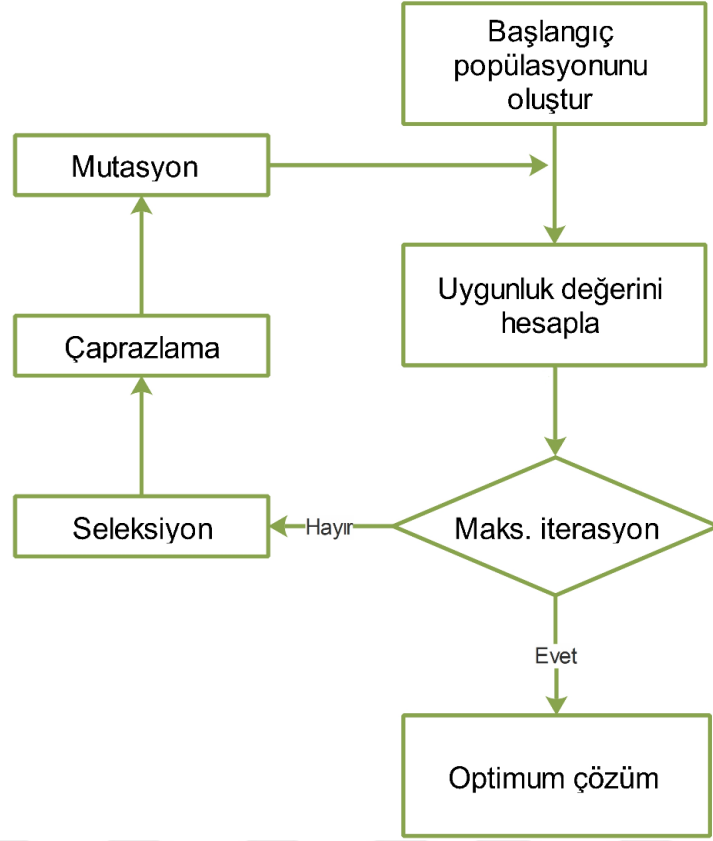
Örnek olarak, tez kapsamında önceki bölümlerde sonuçları incelenen ve çok katmanlı RAM tasarımında yer alabilecek yaklaşık 30 adet tek katmanlı karbon dolgulu TPU kompozit örneği bulunmaktadır. Bu 30 örnekten en yüksek performansın elde edileceği 4 katmanlı bir RAM geliştirilmek istenildiğinde sadece sıralamada 810.000 farklı olasılık bulunmakta olup kalınlık parametresi de dâhil edildiğinde olasılık sayısının hesaplanması dahi pratik olarak imkânsız hale gelmektedir. Konu ile ilgili kaynaklar incelendiğinde birçok çalışmada genel tecrübeye ve temel matematiksel ifadelerle bağlı olarak deneme yanılma yöntemiyle birkaç farklı tasarım belirlendiği görülürken çok daha az çalışmada ise “genetik algoritma (GA)” ya da “kuş sürüsü” gibi optimizasyon teknikleri kullanılarak yüksek performansın elde edileceği çok katmanlı RAM tasarımlarının belirlendiği görülmektedir [160-162]. Beklendiği şekilde bilgisayar

temelli optimizasyon tekniklerinin kullanıldığı çalışmalarda çok daha başarılı sonuçlar elde edilmektedir.

Bu çalışma kapsamında da daha önce hazırlanarak sonuçları yorumlanan ve bileşimleri Tablo 4.2’de verilen 30 farklı tek katmanlı TPU/karbon kompozitinin deneysel olarak belirlenen permitivite sonuçlarından yola çıkarak MATLAB programı ve genetik algoritma (GA) optimizasyon (en iyileme) yöntemi kullanılarak iki, üç ve dört katmanlı kompozit tasarımları belirlenmiş ve bu çok katmanlı RAM’ların *RL*-frekans grafikleri oluşturulmuştur. Çok katmanlı tasarımlar belirlenirken öncelik tek tip karbon dolgu içeren RAM tasarımları belirlenerek en iyi sonuçlar elde edilmeye çalışılmış daha sonra bütün karbon dolgular algoritmaya dâhil edilerek karbon dolgulu ve en yüksek performansın elde edildiği kompozit tasarımı belirlenmeye çalışılmıştır. GA ile ilgili kodların oluşturulmasında denklem 2.41 - denklem 2.45 referans alınarak 2, 3 ve 4 katmanlı RAM’lar için *RL* değerlerini veren amaç fonksiyonları oluşturulmuştur. Daha sonra tez kapsamında hedef olarak belirlenen X-band frekans aralığının (yaklaşık) merkez frekansı olan 10.03 GHz için amaç fonksiyonu minimize edilmeye çalışılmıştır. Optimizasyon amacıyla kullanılan GA için oluşturulan algoritma Şekil 4.45’de, algoritmanın kullanılması sırasında uygulanan parametreler ise Tablo 4.3’de verilmiştir.

**Tablo 4.3:** GA optimizasyonunda kullanılan parametreler.

<b>Parametreler</b>	<b>Değerler</b>
Popülasyon boyutu	1000
Çaprazlanma olasılığı	0.7
Mutasyon olasılığı	0.1
Yakınsama limiti	50
Ortalama değer hatası	%0.01
Turnuva boyutu	10



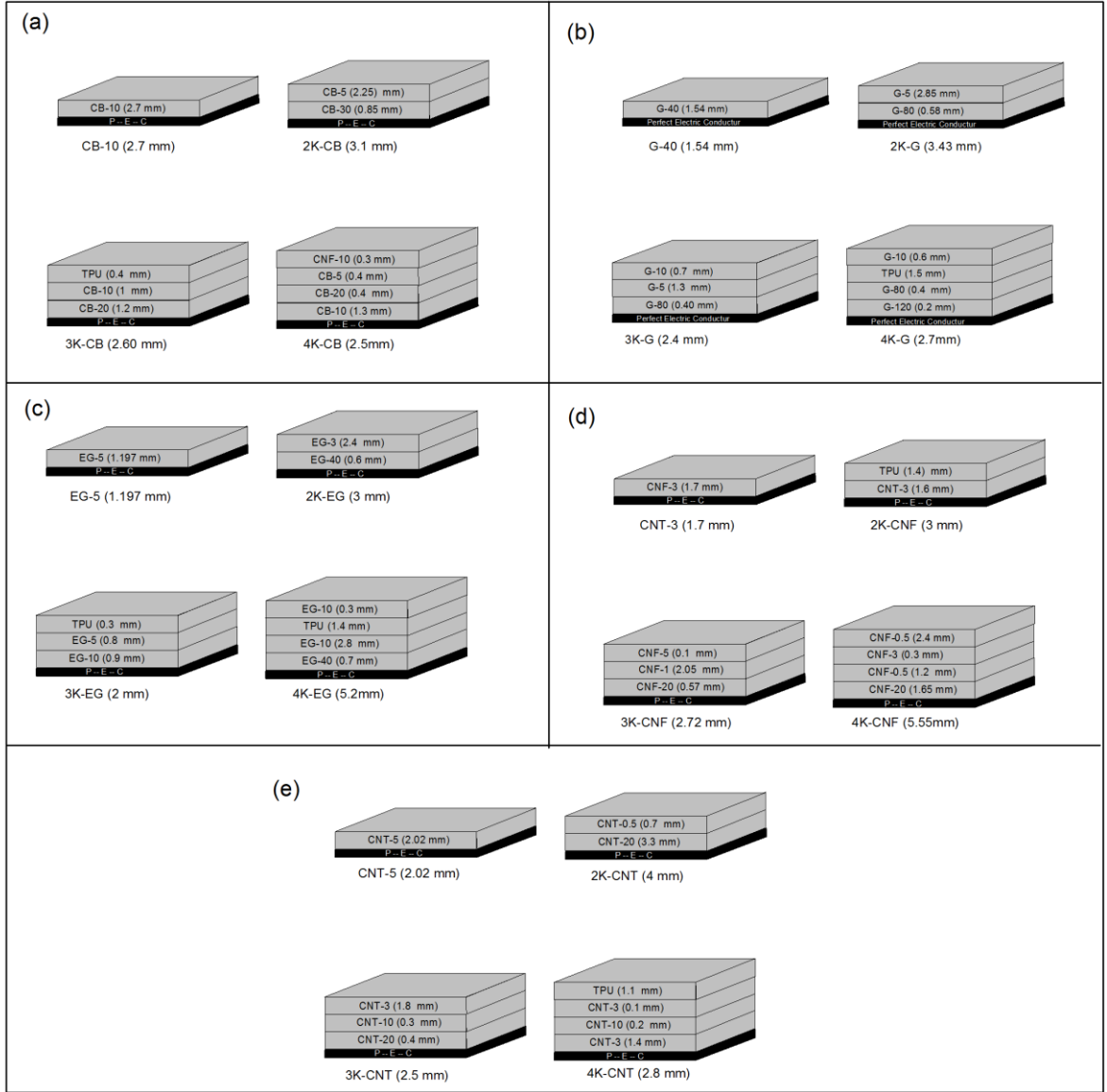
Şekil 4.45: Genetik algoritma (GA) akış şeması.

#### 4.3.1. Tek Tip Karbon İçeren Çok Katmanlı RAM Tasarımlarının Belirlenmesi

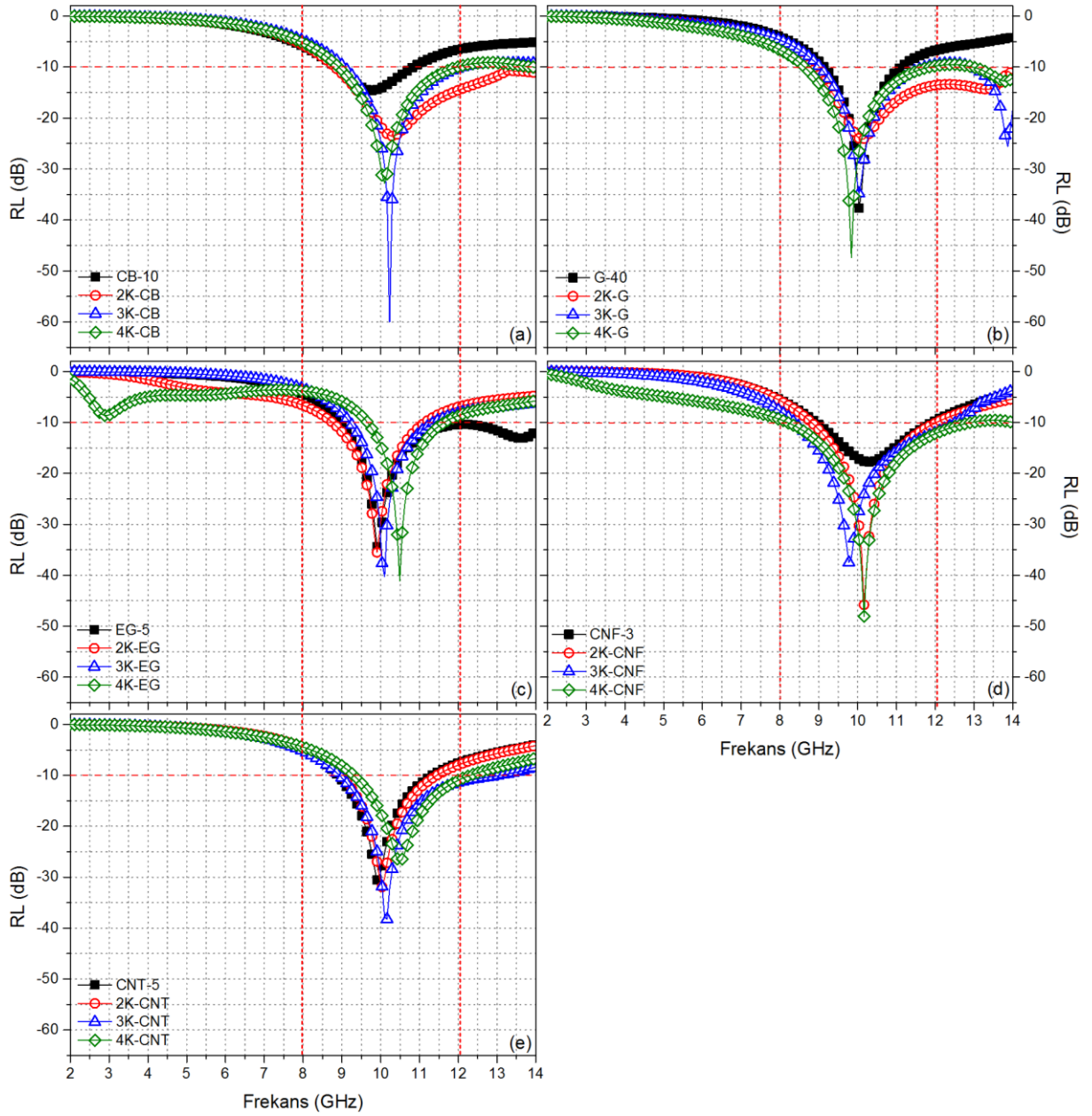
GA kullanılarak belirlenen 10.03 GHz frekansı için hedef soğurma performanslarını karşılayabilecek tek tip karbon içeren çok katmanlı RAM tasarımlarının içerik ve isimlendirmeye ilgili ayrıntılar Şekil 4.46(a-e)'de verilmiştir. Çok katmanlı tasarımların tek katmanlı tasarımlarla performanslarının karşılaştırılabilmesi amacıyla Şekil 4.46'da her serideki en yüksek performansın elde edildiği örneklerin tasarımları da verilmiştir. Tasarımın belirlenmesi sırasında PEC hariç toplam kalınlık için üst limit 6 mm olarak belirlenmiştir.

Belirlenen tasarımların  $RL$ -frekans grafikleri Şekil 4.47(a-e)'de verilmiştir. Grafiklerde X-bandındaki EAA'nın daha net bir şekilde değerlendirilebilmesi amacıyla bu frekans aralığı ve  $<-10$  dB  $RL$  değerleri kırmızı kesikli çizgilerle belirtilmiştir. Şekil üzerinde aynı serideki tek katmanlı ve çok katmanlı örneklerin performansları karşılaştırıldığında, çok katmanlı örneklerin tek katmanlı örneklere göre daha düşük  $RL_{\min}$  ve daha geniş EAA'ya sahip olduğu görülebilir. Ancak katman sayısının artmasına bağlı olarak bu değerlerdeki iyileşmelerin

düzenli olarak değişmediği görölmektedir. Örneğin CNT serisi örneklerde 3 katmanlı tasarımın, 4 katmanlı tasarıma göre hem  $RL_{\min}$  hem de EAA açısından daha üstün olduğu görölmektedir. Bu düzensizliğin en iyi tasarımı belirlemeye değil daha hızlı bir şekilde istenilen şartları sağlamaya yönelik olarak alışan GA'nın çalışma mekanizmasından kaynaklandığı düşünölmektedir. Bu yüzden MATLAB'da tasarımların belirlenmesi kademesinde daha yüksek performans gösteren tasarımların belirlenmesi için kod defalarca çalıştırılarak üretilen özömlerden en iyi olanlarının sonuçları verilmiştir. Belirlenen tasarımların  $RL$  değerleri kantitatif olarak değerlendirildiğinde ise hiçbir tasarımın 8 GHz'den aşağı frekanslarda dikkate değer bir soğurma performansı göstermediği görölmektedir. X-band aralığındaki soğurma performansları incelendiğinde ise sadece 4 katmanlı CNF içeren 4K-CNF tasarımıyla X-band aralığının hemen hemen tamamının EAA olduğu görölmektedir. Ancak bu tasarımın 5.5 mm olan kalınlığı ve HPAA'nın oldukça düşük olması (9.5-10.8 GHz) nedeniyle pratik kullanım için çok da avantajlı olmadığı düşünölmektedir.



Şekil 4.46: GA ile belirlenen tek tip karbon dolgu içeren çok katmanlı RAM tasarımları.



Şekil 4.47: Tek tip karbon dolgu içeren örneklerin RL (dB) -frekans grafikleri.

#### 4.3.2. Farklı Tipte Karbon İçeren Çok Katmanlı RAM Tasarımlarının Belirlenmesi

Tek tip karbon dolgu içeren çok katmanlı tasarımlarla da X-band aralığının tamamında öncelikle  $RL < -10$  dB şartını daha sonra ise  $RL < -20$  dB sağlayan bir tasarımının bulunamaması üzerine yine GA ile kullanılan tüm karbon türevlerini içerebilecek çok katmanlı RAM tasarımları belirlenmiştir. İki, üç ve dört katmanlı olmak üzere belirlenen 3 farklı tasarım ve bu tasarımlara ait  $RL$ -frekans grafikleri Şekil 4.48’de verilmiştir.

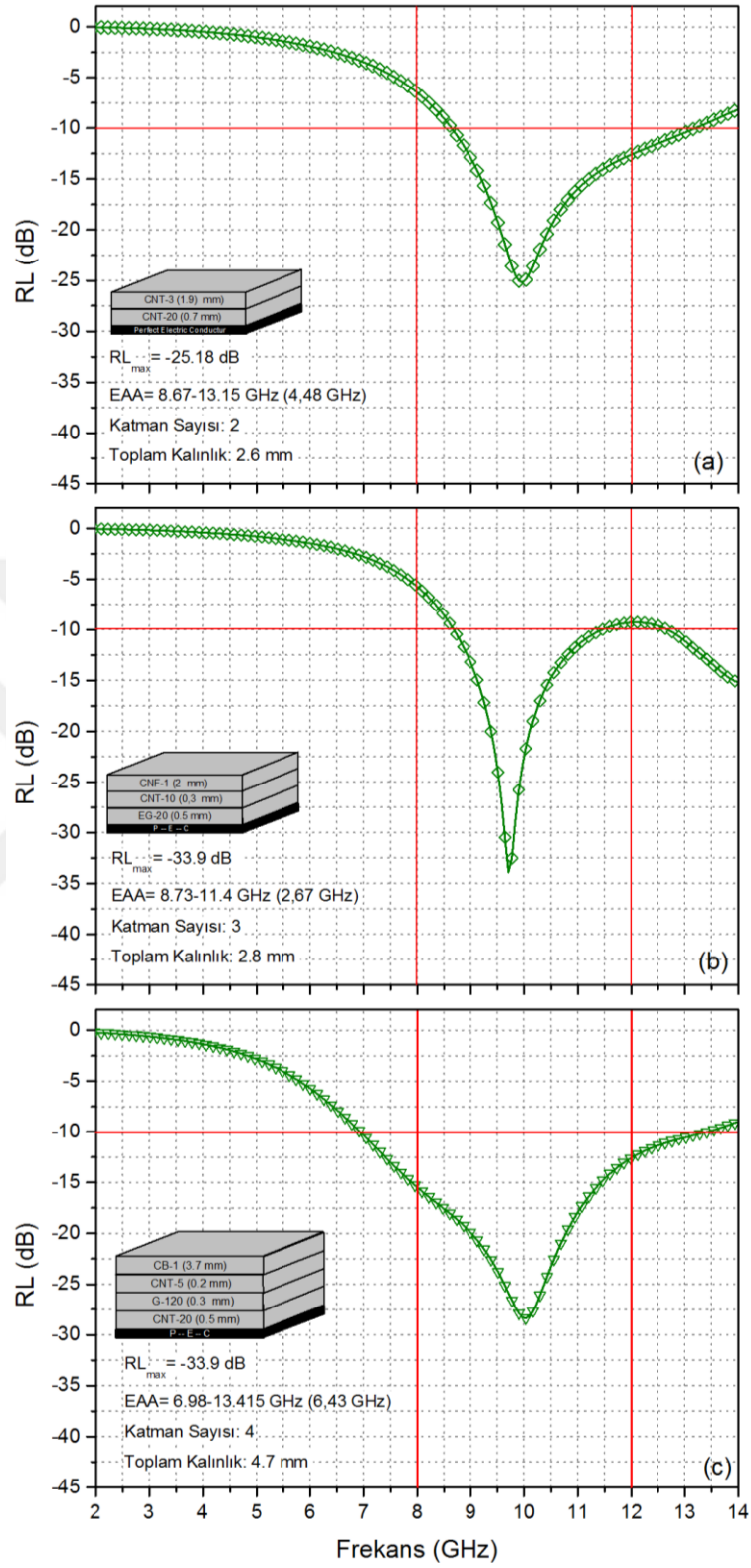


Şekil 4.48(a)'da iki katmanlı tasarımın sonuçlarının verildiği grafik incelendiğinde 1.9 mm kalınlığındaki CNT-3 ve 0.7 mm kalınlığındaki CNT-20 örneğiyle hazırlanan toplam 2.6 mm kalınlığındaki örnekle  $-25.18$  dB  $RL_{\min}$ , 8.67-13.15 GHz (4.48 GHz) EAA değeri elde edildiği görülmektedir. 2 katmanlı tasarım optimizasyonu sırasında farklı tipteki dolgu içeren örneklerin bulunduğu havuzdan sürekli olarak CNT serisi örneklerin seçilmesi durumunda en yüksek performansın elde edildiği görülmüş, bu yüzden 2 katmanlı tasarımda dolgu olarak sadece CNT'ye yer verilmiştir.

Şekil 4.48(b)'de CNF, CNT ve EG dolgularını içeren örneklerin yer aldığı ve toplam kalınlığın 2.8 mm olan 3 katmanlı tasarımın performansı incelendiğinde,  $RL_{\min}$  değerinin  $-33.9$  dB, EAA değerinin ise 8.73-11.40 GHz aralığında (2.67 GHz) olduğu görülmektedir.

Karbon dolgu içeren örneklerle en yüksek performansın elde edildiği, CB, CNT ve EG içeren ve toplam kalınlığı 4.7 mm olan 4 katmanlı tasarımın Şekil 4.48(c)'de verilen  $RL$  değerleri incelendiğinde ise, yaklaşık olarak 7.0-13.4 GHz aralığıyla X-band aralığının tamamında  $<-10$ dB şartının (EAA) sağlanabileceği ve  $-28.5$  dB gibi önemli bir  $RL_{\min}$  değerinin elde edilebileceği görülmektedir. Ayrıca 4 katmanlı tasarımla literatürdeki birçok çalışmada da gözlenmeyen 9.0-10.8 GHz aralığında  $-20$  dB'den daha düşük  $RL$  değerlerinin (HPAA) de elde edilebileceği bulunmuştur. Karbon dolguların düşük yoğunluğu nedeniyle 4.7 mm gibi bir kalınlığın tolere edilebileceği bu tasarımın savunma sektörüne yönelik birçok uygulamada kullanılabileceği ya da kullanımda olan birçok ürüne alternatif oluşturabileceği düşünülmektedir.

Öte yandan belirlenen tasarımların mevcut performanslarıyla özellikle yüksek hassasiyetli bi-statik RADAR sistemlerinden gizlenebilen yüzey kaplamalarının geliştirilmesi uygulamaları için gereken hedef frekans aralığının (X-band) tamamının HPAA olması ( $RL < -20$  dB) hedefinin sadece karbon içerikli kompozitlerle sağlanamadığı görülmektedir. Bu yüzden tez kapsamında ortaya konan hedeflerin sağlanabilmesi için farklı malzemelerin de tasarımlara dâhil edilmesi gerekliliği açıktır. Genel bilgiler bölümünde verildiği gibi polimer kompozit esaslı RAM geliştirilmesinde karbon haricindeki en yaygın kullanılan dolgulardan biri de manyetik özellikli dolgulardır. Bu yüzden çalışmanın sonraki bölümlerinde manyetik dolgularla hazırlanmış polimer kompozitler hazırlanmış, mikroyapı ve performans özellikleri belirlenmiştir.



Şekil 4.48: Farklı tipte karbon dolgu içeren çok katmanlı RAM tasarımları ve  $RL$ -frekans grafikleri.

#### 4.4. MANYETİK TANECİK KATKILI POLİMER KOMPOZİTLERİN HAZIRLANMASI VE PERFORMANS ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Literatürde polimer matrisli kompozitlere manyetik özellik kazandırmak amacıyla yapılan çalışmalar incelendiğinde demir (II-III) oksit, çeşitli ferrit bileşikleri ve metalik nikelin yaygın bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Genel olarak bu sınıftaki malzemeleri temsil edebilmesi amacıyla tez kapsamındaki denemelerde de manyetik dolgu olarak demir (II-III) oksit (magnetit ,  $Fe_3O_4$ ), baryum ferrit ( $BaFe_2O_4$ ), lantanyum stronsiyum ferrit ( $La_{0.6} Sr_{0.4} FeO_3$ ) ve metalik nikel kullanılmıştır. Tablo 4.4’de bu kademedeki hazırlanan kompozitlere ait detaylar özetlenmiştir. Dolguların yoğunluklarının yüksek olması ve yüzey alanlarının karbonlara oranla çok daha düşük olması nedeniyle özellikle nano boyutlu karbon türevlerine göre çok daha fazla miktarlarda polimer yapı içerisine katılabilmişlerdir. Kompozisyonlar belirlenirken dolgu miktarı için üst limit elde edilen filmlerin kırılma ve mekanik dayanım gibi fiziksel özellikleri dikkate alınmış ve 120 phr oranından sonra dolgu dağılımının etkin bir şekilde sağlanamadığı, kompozitin kolayca kırılabildiği gözlenmiş bu yüzden 120 phr üst limit olarak belirlenmiştir. Örneklerin hazırlanması ile ilgili detaylar “Malzeme-Yöntem” kısmında verilen “mekanik karıştırıcı yardımıyla çözeltiden döküm” yöntemine göre gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 4.4:** Manyetik dolgularla hazırlanan örneklerin bileşimleri.

Örnek Kod	Dolgu Tipi	Dolgu oranı (phr)	Örnek Kod	Dolgu Tipi	Dolgu oranı (phr)
$Fe_3O_4$ -10	$Fe_3O_4$	10	LaStFe-10	$La_{0.6}Sr_{0.4}FeO_3$	10
$Fe_3O_4$ -20		20	LaStFe -20		20
$Fe_3O_4$ -40		40	LaStFe -40		40
$Fe_3O_4$ -80		80	LaStFe -80		80
$Fe_3O_4$ -120		120	LaStFe-120		120
BaFe-10	$BaFe_2O_4$	10	Ni-10	Nikel	10
BaFe -20		20	Ni-20		20
BaFe -40		40	Ni-40		40
BaFe -80		80	Ni-80		80
BaFe -120		120	Ni-120		120

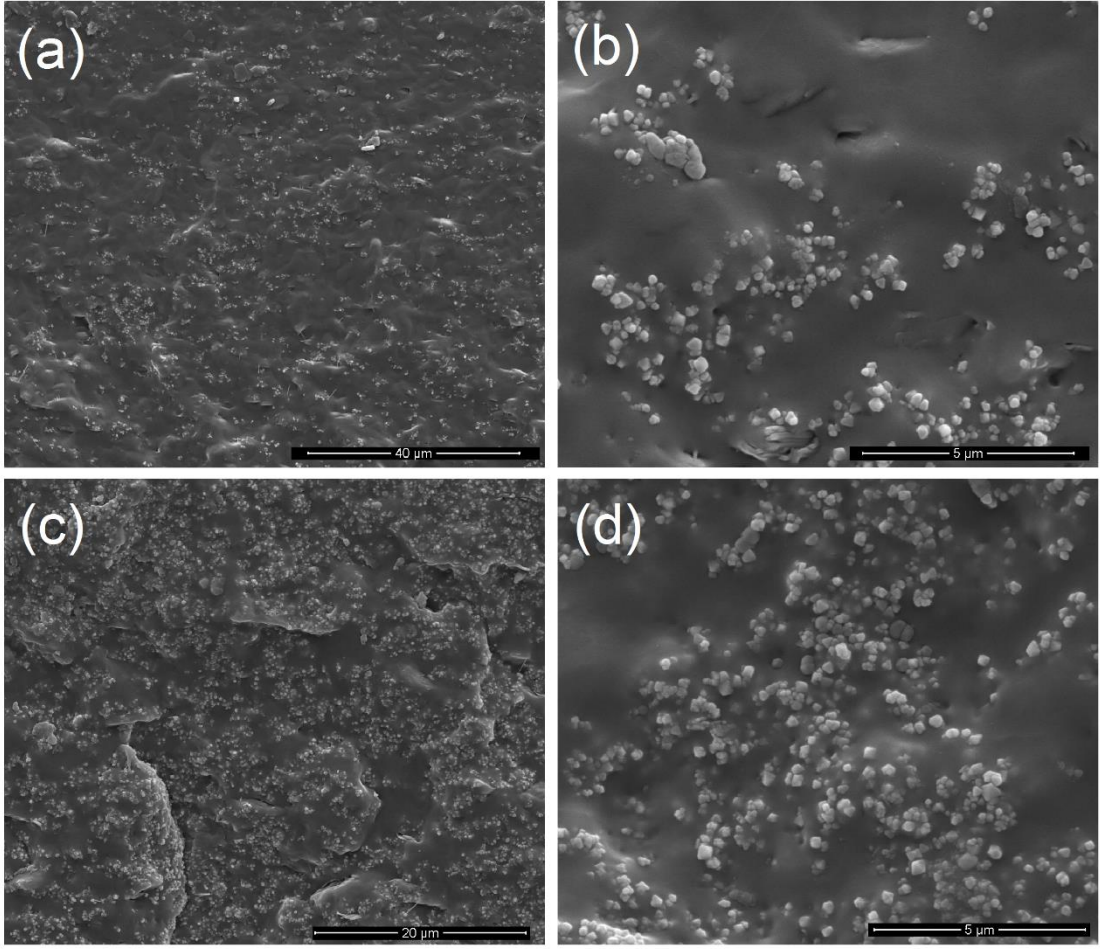
Hazırlanan kompozitlerin performans özelliklerinin incelenmesinden önce dolgu dağılımı, polimer/dolgu uyumu gibi mikro-yapısal özelliklerin incelenmesi amacıyla SEM analizleri gerçekleştirilmiş daha sonra permitivite ve permeabilite değerleri belirlenerek yorumlanmıştır. Daha sonra da örneklerin *RL*-frekans-kalınlık değerlerini veren dış hat grafikleri oluşturulmuş ve yorumlanmıştır.

#### 4.4.1. SEM Analizleri

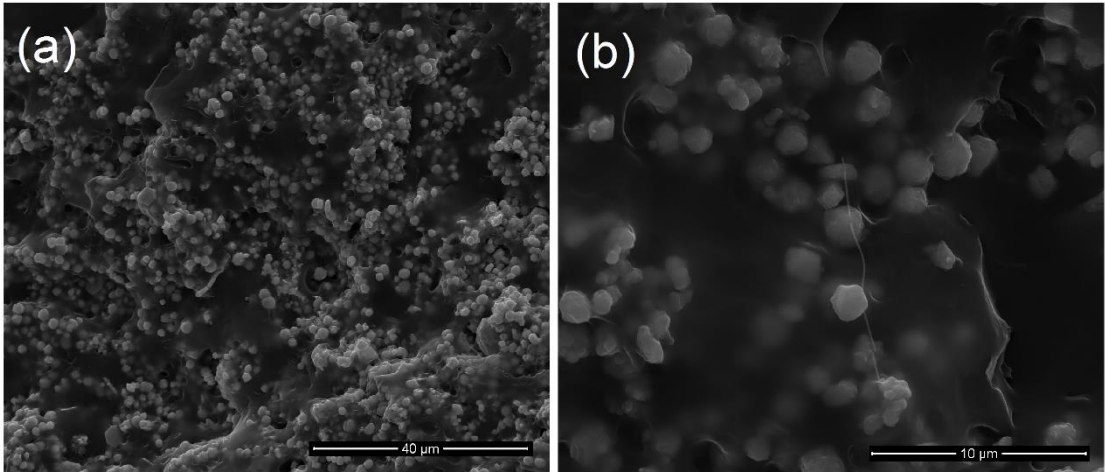
Bu kısımda kullanılan manyetik dolguların yaklaşık olarak benzer boyutlarda ve geometrik özelliklerde olmaları sebebiyle SEM analizleri sadece en yüksek soğurma performansının elde edildiği  $Fe_3O_4$  katkılı kompozitlere uygulanmıştır. Ancak nikelin diğer manyetik dolgulardan farklı olarak metalik özellikte olması ve yoğunluk gibi bazı fiziksel özellikler açısından farklılıklar taşıması nedeniyle Ni-80 örneğinin de SEM analizleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.49(a-d)'de düşük ve yüksek dolgu oranlarındaki dağılımların ayrı ayrı incelenmesi amacıyla  $Fe_3O_4$ -20 ve  $Fe_3O_4$ -120 örneklerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekildeki farklı oranda dolgu içeren her iki örneğin de farklı büyütmelelerdeki fotoğrafları incelendiğinde  $Fe_3O_4$  boyutlarının ortalama olarak 200-450 nm arasında değiştiği, polimer-dolgu ara yüzeyinde uyumsuzluğun göstergesi olan boşlukların bulunmadığı ve taneciklerin polimer içindeki dağılımlarının oldukça homojen bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir.

Şekil 4.50(a-b)'de ise Ni-80 örneğine ait SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntülerden ortalama tanecik boyutlarının 600-800 nm olduğu, nikel taneciklerinin polimer faz içerisine gömülü bir şekilde bulunduğu ve bütün polimer içerisinde homojen bir dağılım gösterdiği dikkat çekmektedir.



**Şekil 4.49:** (a-b)  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-20}$  ve  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-120}$  örneklerinin farklı büyütmelerdeki SEM fotoğrafları.



**Şekil 4.50:** Ni-80 örneğine ait farklı büyütmelerdeki SEM fotoğrafları.

#### 4.4.2. Permittivite ve Permeabilite Değerlerinin Analizi

Şekil 4.51(a-d) - Şekil 4.54(a-d)'da manyetik dolgularla hazırlanan kompozitlerinin permittivite ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ) ve permeabilite ( $\mu'$ ,  $\mu''$ ) değerlerinin dolgu oranına ve frekansa bağlı değişimleri verilmiştir.

Şekil 4.51(a) - Şekil 4.54(a) arasında manyetik dolguların  $\epsilon'$  değerlerinin değişimi incelendiğinde düzenli bir değişime neden olmadığı görülmektedir. Dolgu oranının artmasıyla  $\epsilon'$  değerlerinin TPU'nun da  $\epsilon'$  değerinin altına düşmesi ve değişimin dolgu oranına bağlı olarak düzenli bir şekilde gerçekleşmemesi literatürde elektriksel alan altında polimer fazda gerçekleşen polarizasyonların manyetik dolguların oluşturduğu anizotropi tarafından etkilenmesine bağlı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir.

Şekil 4.54(a)'da verilen  $\epsilon'$  değerlerinin değişimi incelendiğinde ise manyetik dolguların aksine Ni oranının artmasına bağlı olarak düzenli bir artış görülmektedir. Nikel'in diğer manyetik dolgulara göre bu farklı etkisi elektriksel iletkenliğinin yüksek olması sayesinde polimer fazın polarizasyon etkisini artırmasına bağlı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir.

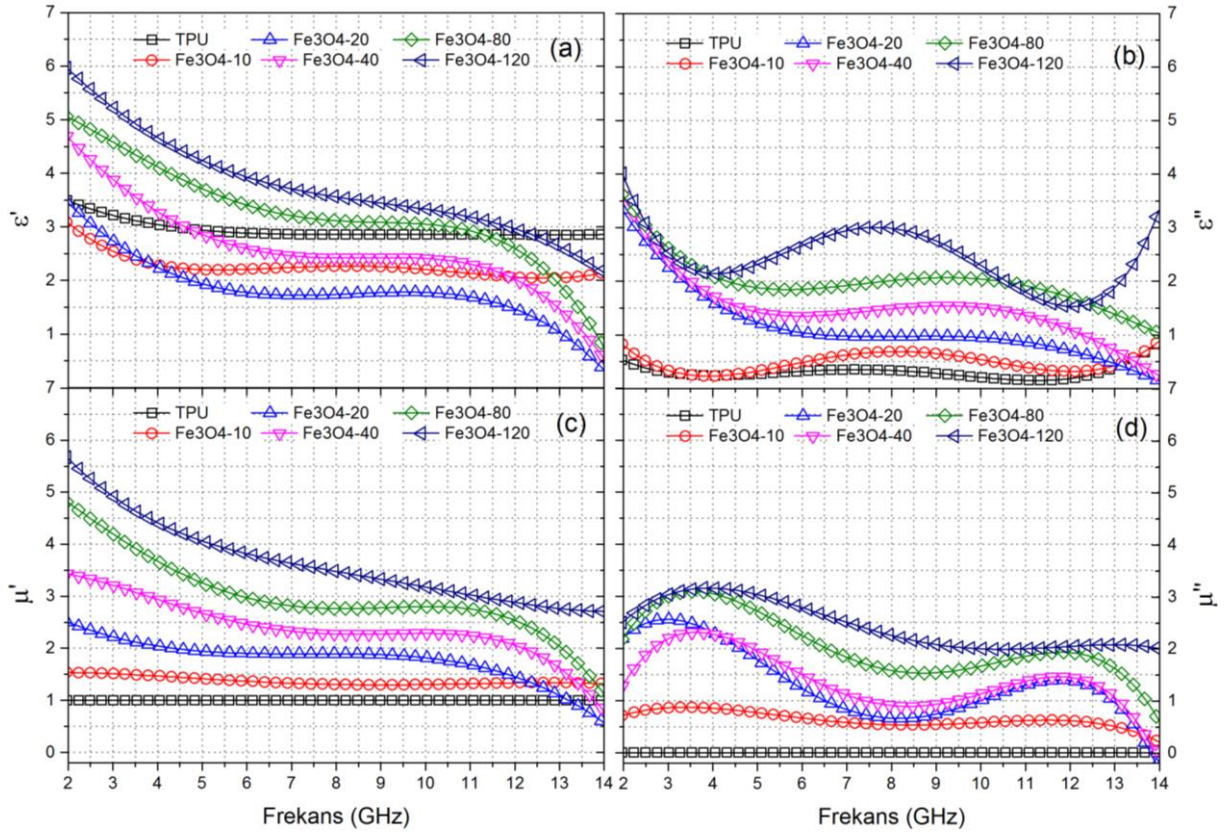
Şekil 4.51(b) - Şekil 4.54(b) arasında verilen  $\epsilon''$  değerlerinin değişimi incelendiğinde ise  $\epsilon''$  değerlerinin aksine  $\epsilon''$  değerlerinin dolgu oranına bağlı olarak daha düzenli bir artış gösterdiği görülmektedir. Bu değişimin özellikle nikel katkılı polimerlerde daha etkili ve düzenli bir biçimde gerçekleşerek daha yüksek  $\epsilon''$  değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi  $\epsilon''$  değerlerinin değişimi  $\sigma = 2\pi f \epsilon_0 |\epsilon''|$  denklemi gereği ac-iletkenlikle bağlantılı olarak yorumlanmaktadır.

Bu kapsamda değerlendirildiğinde, elektriksel iletkenliği  $10^4$  S/m seviyelerinde olan manyetik taneciklerin ve  $10^7$  S/m seviyelerinde olan metalik nikelin, iletkenliği  $10^{-12}$  olan polimer faza ilavesinin iletkenlik üzerine pozitif etki yapması ve bu pozitif etkinin Ni için daha etkili olması beklenen bir sonuçtur. Diğer yandan, elde edilen  $\epsilon''$  değerlerinin, karbon dolgulu kompozitlerle karşılaştırıldığında, çok daha düşük olduğu görülmektedir. Ni ve manyetik dolguların karbon dolgulara göre ağırlıkça çok daha yüksek oranlarında kullanılmasına rağmen karbon dolgulara göre  $\epsilon''$  değerleri üzerindeki düşük etkisi yüksek yoğunluklarına bağlı olarak düşük hacim fraksiyonları ve düşük  $A_f$  değerleriyle açıklanmaktadır.

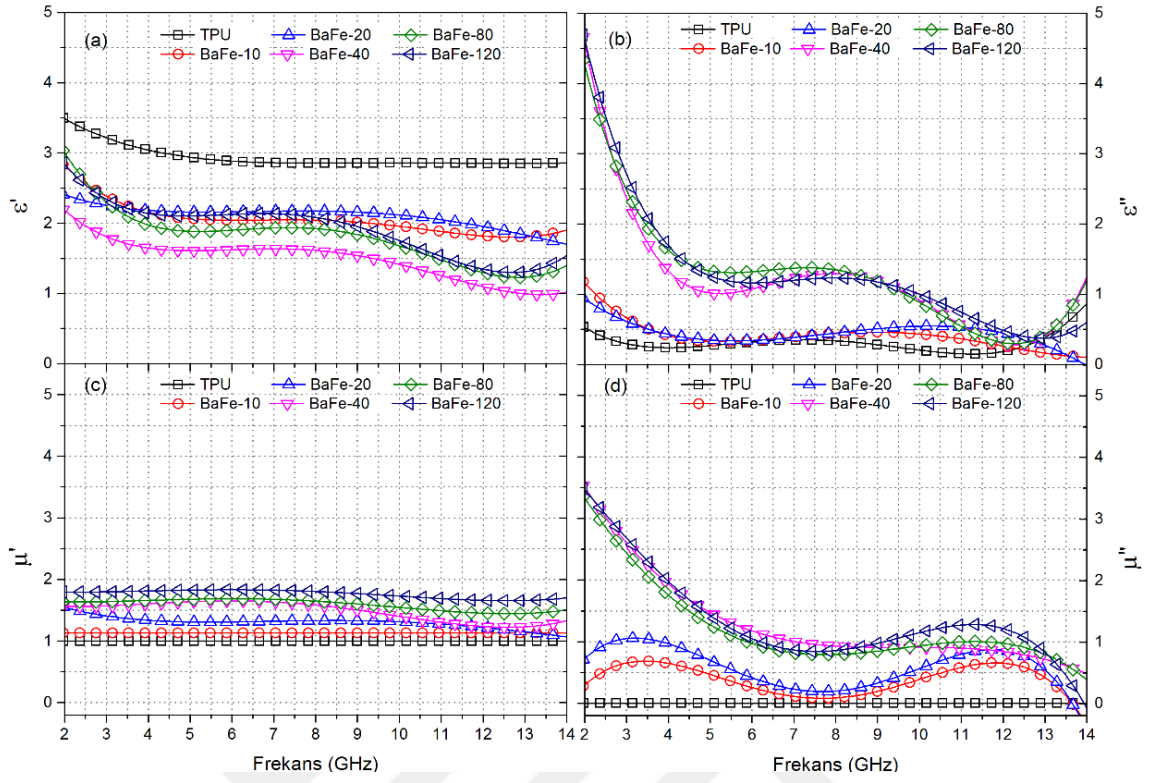
Şekil 4.51(c) - Şekil 4.54(c)'de verilen, manyetik enerjinin depolanmasının göstergesi olan  $\mu'$  ve manyetik enerjinin sürtünme hareketleri nedeniyle ısı enerjisine dönüşmesinin göstergesi



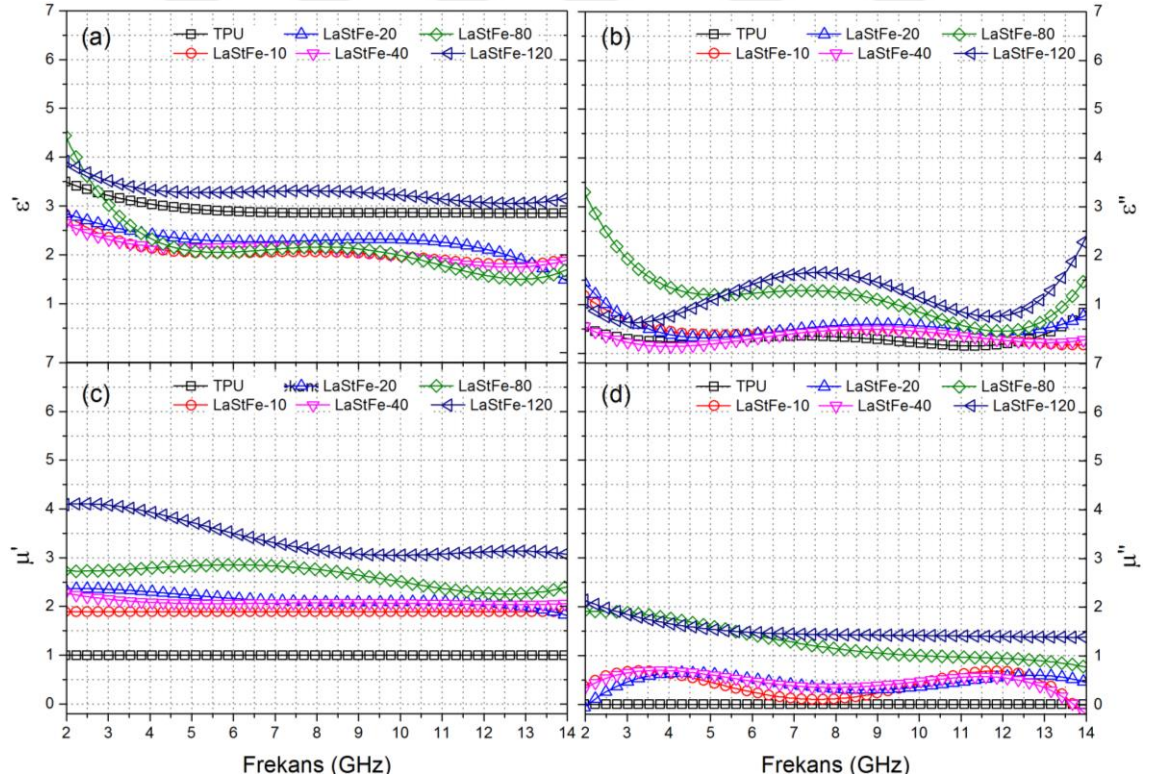
olan  $\mu''$  değerlerinin dolgu tipi ve oranına bağlı değişimi incelendiğinde, beklendiği şekilde dolgu oranına bağlı olarak bütün serilerde bir artış görülmektedir. Dolgu tipine göre bu artışlar karşılaştırıldığında ise  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ve Ni'in diğer dolgulara göre çok daha etkili olduğu dikkat çekmektedir.  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ve Ni'in  $\mu'$  ve  $\mu''$  değerleri üzerinde daha etkili olması kimyasal yapıları sayesinde sahip oldukları yüksek permeabilite değerleriyle açıklanmaktadır.



Şekil 4.51: Farklı oranlarda  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  içeren örneklerin (a)  $\epsilon'$ , (b)  $\epsilon''$ , (c)  $\mu'$  ve (d)  $\mu''$  değerleri.

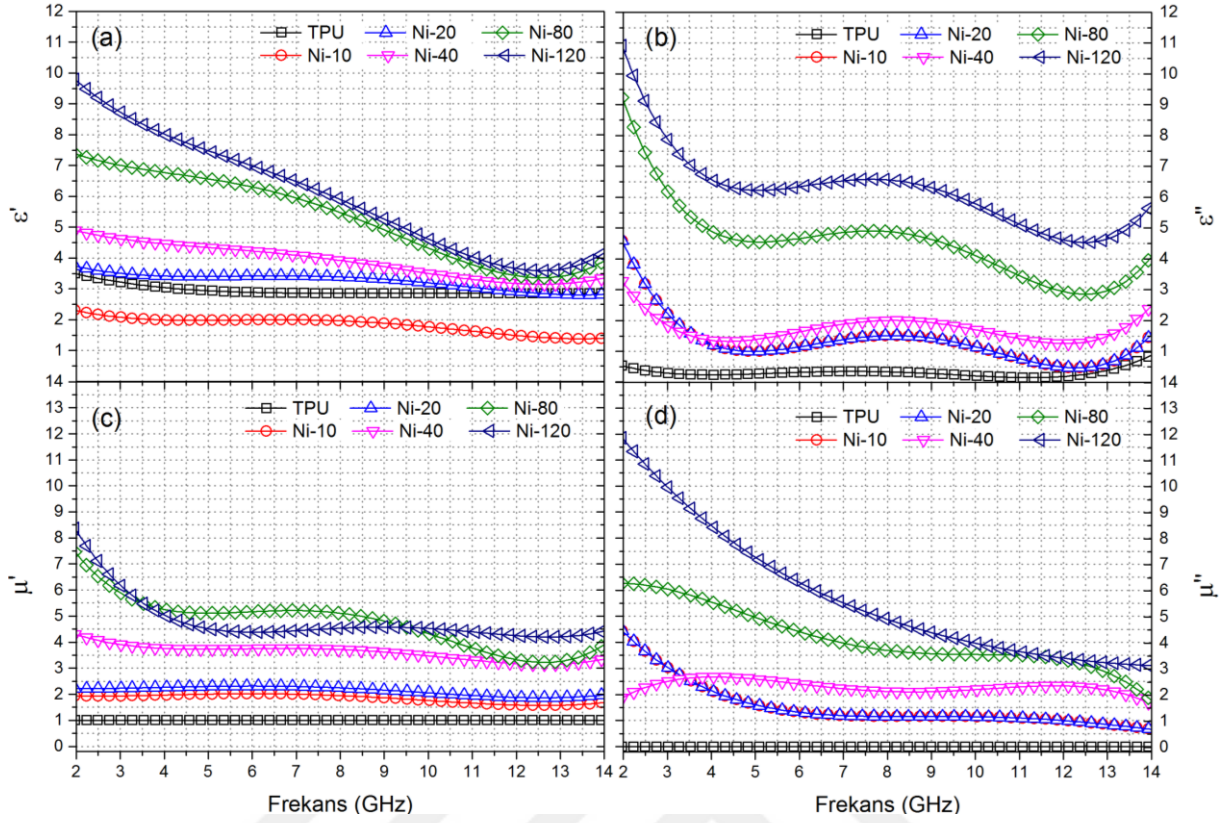


Şekil 4.52: Farklı oranlarda baryum ferrit içeren örneklerin (a)  $\epsilon'$ , (b)  $\epsilon''$ , (c)  $\mu'$  ve (d)  $\mu''$  değerleri.



Şekil 4.53: Farklı oranlarda lantanum stronsiyum ferrit içeren örneklerin (a)  $\epsilon'$ , (b)  $\epsilon''$ , (c)  $\mu'$  ve (d)  $\mu''$  değerleri.





Şekil 4.54: Farklı oranlarda nikel içeren örneklerin (a)  $\epsilon'$ , (b)  $\epsilon''$ , (c)  $\mu'$  ve (d)  $\mu''$  değerleri.

#### 4.4.3. Yansıma Kaybı Analizleri

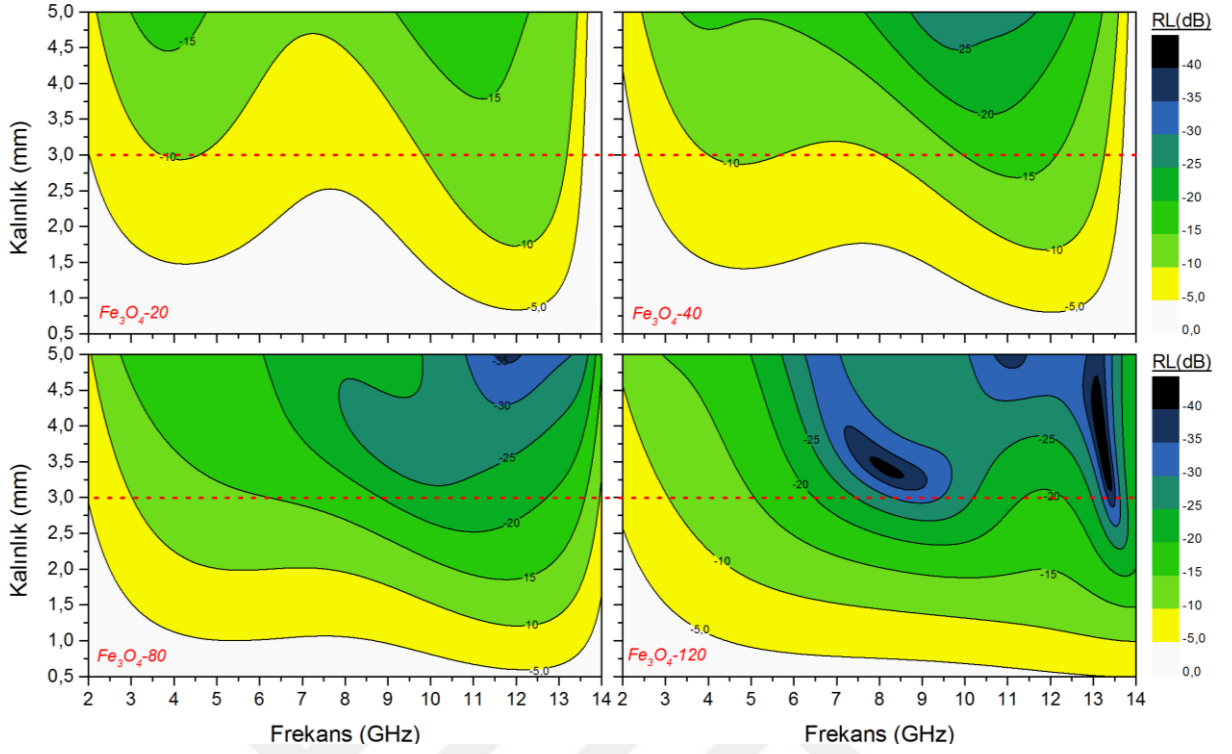
Hazırlanan örneklerin 0.5-5.0 mm kalınlık ve 2-14 GHz frekans aralığındaki  $RL$  değerlerini veren dış hat) grafikleri Şekil 4.55-Şekil 4.58 arasında verilmiştir. Hiç bir seride dikkate değer bir soğurmanın elde edilememesi nedeniyle 10 phr dolgu içeren örneklerin dış hat grafikleri verilmemiştir. Grafiklerde, her ne kadar kalınlık için üst limit 5 mm olarak belirlenmiş olsa da, manyetik dolguların yüksek yoğunlukları ve katkılanma oranları dikkate alındığında tez kapsamında ortaya konan düşük yoğunluk hedefinin tutturulabilmesi adına grafiklerde kırmızı çizgilerle gösterilen 3 mm limitinin geçilmemesi hedeflenmiştir.

Grafikler incelendiğinde, karbon dolgulu kompozitlere göre daha düşük  $RL$  değerlerinin daha geniş frekanslarda elde edildiği ve karbon dolgulu kompozitlerin aksine dolgu oranının artışına bağlı olarak daha yüksek soğurma performanslarının elde edilebileceği görülmektedir. Bu yüzden değerlendirmelerde EAA yerine tez kapsamında hedef olarak belirlenen HPAA'nın X-band aralığının tamamını kapsaması açısından değerlendirilmiştir.

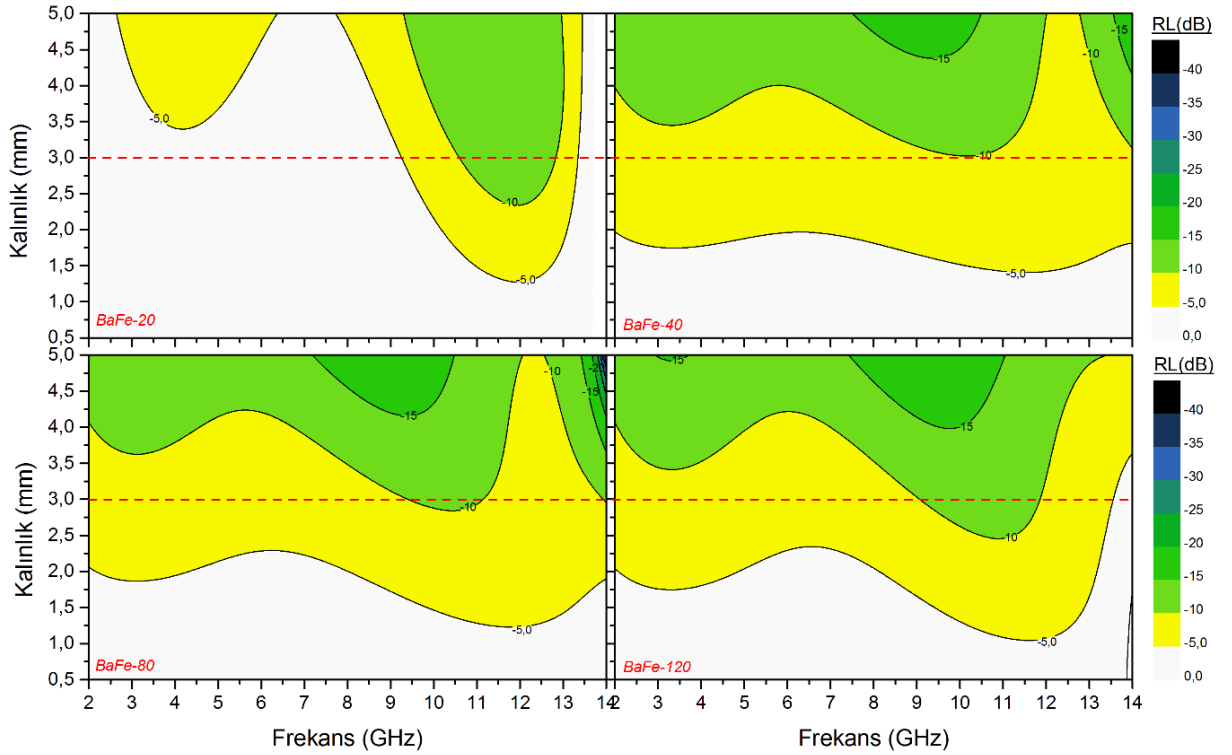
Grafiklerde bütün serilerde dolgu oranının ve örnek kalınlığının artışına bağlı olarak *RL* değerlerinin azaldığı görülmektedir. Buna rağmen BaFe ve LaStFe serisi örneklerle 120 phr dolgu oranı ve 5 mm kalınlığındaki örneklerle dahi istenilen hedeflerin sağlanamadığı görülmektedir. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> serisi örneklerde ise 3 mm kalınlığındaki Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-80 örneğiyle 9-12 GHz aralığında, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-120 örneğinde ise 8.0-11.5 GHz aralığında HPAA'nın sağlanabildiği görülmüştür. En yüksek performansın elde edildiği Ni serisi örneklerde ise 2 mm kalınlığındaki Ni-80 ve Ni-120 örnekleriyle HPAA'nın sağlanabildiği görülmekte ise de, Ni-80 örneği daha düşük oranda dolgu içermesi nedeniyle daha avantajlı olduğundan öne çıkmaktadır.

RAM geliştirilmesi sırasında *RL* değerlerinin haricinde diğer önemli parametreler olan düşük ağırlık (yoğunluk ve kalınlıkla ilişkili olarak) ve uzun yıllar boyunca performansın korunması açısından değerlendirildiğinde ise her iki seri örnek içinde bazı önemli dezavantajlar mevcuttur. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> serisi örnekler için Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ün atmosferik şartlarda oksijenle tepkimeye girerek çok daha zayıf manyetik özellikli Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bileşeninin ağırlık kazandığı ve buna bağlı olarak da soğurma etkisinin azaldığı bilinmektedir. Ayrıca yoğunluğunun 5 g/cm<sup>3</sup> olması ve en az 3 mm kalınlık gereksinimi nedeniyle Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-120 örneğinin ağırlık açısından bazı önemli dezavantajlar içereceği açıktır. Benzer şekilde Ni-80 örneği için de, Ni'in uzun süre atmosferik koşullardaki performansında meydana gelecek değişimler ve yaklaşık 7.8 g/cm<sup>3</sup> olan yüksek yoğunluğu da bu kompozitlerin kullanımını kısıtlayıcı faktörler olarak değerlendirilebilir.

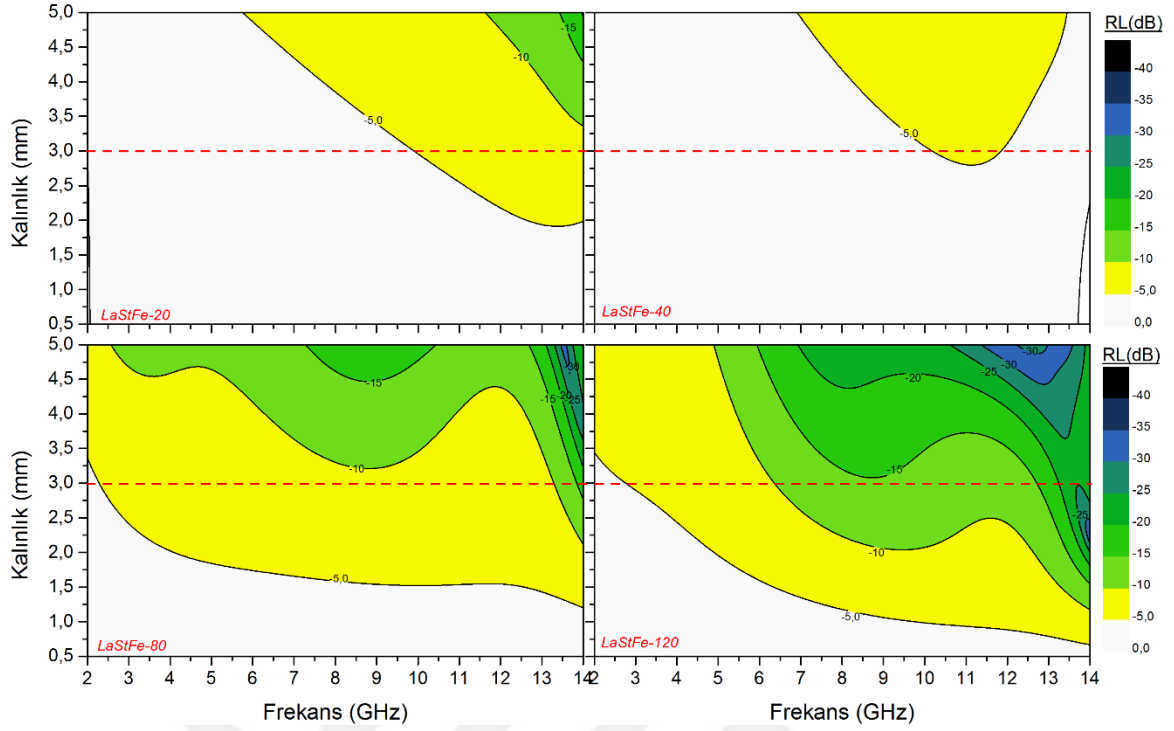
Tez çalışması kapsamında özellikle *RL* değerlerine yönelik hedeflerin bu örneklerle sağlanabildiği görülmektedir ancak diğer fiziksel özellikler açısından örneklerin önemli dezavantajlar içerdiği görülmektedir. Tezin bundan sonraki kısmında manyetik özelliğe sahip dolguların karbon dolgularla beraber kullanılarak hem fiziksel özellikler açısından hem de performans açısından istenilen özelliklere sahip kompozit malzemelerin geliştirilmesi hedeflenmiştir.



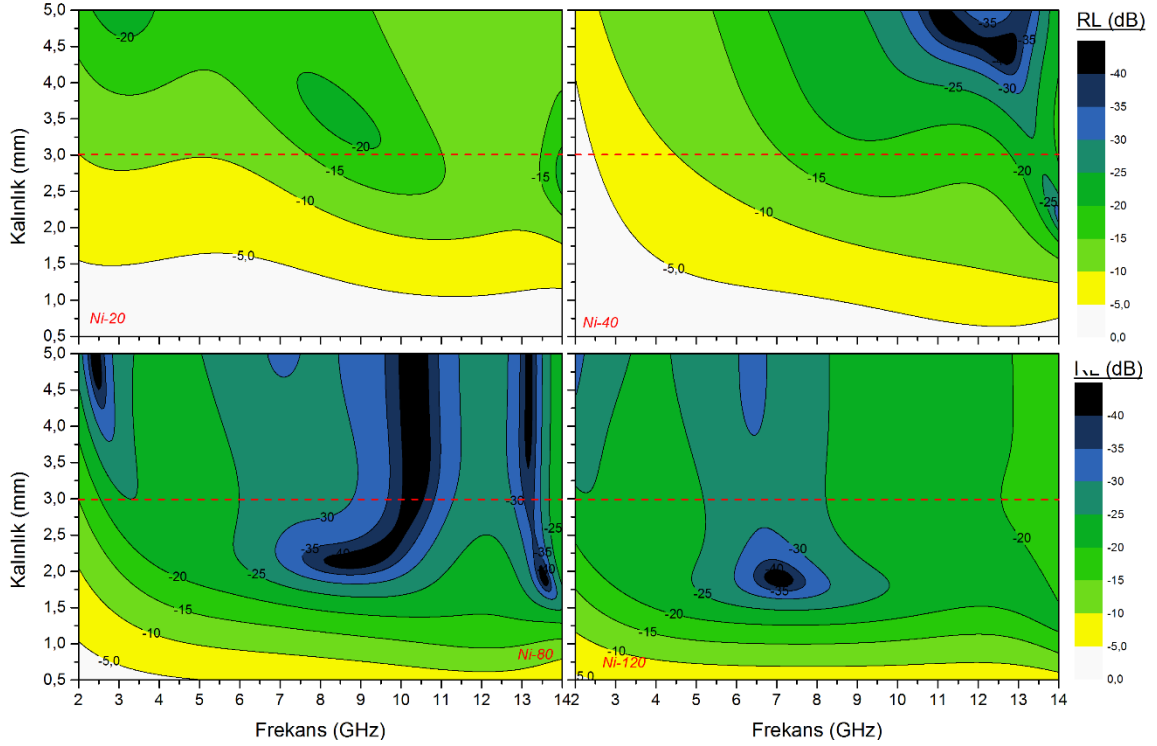
Şekil 4.55:  $Fe_3O_4$  serisi örneklerin farklı kalınlık ve frekans değerlerindeki RL değerleri.



Şekil 4.56: BaFe serisi örneklerin farklı kalınlık ve frekans değerlerindeki RL değerleri.



Şekil 4.57: LaStFe serisi örneklerin farklı kalınlık ve frekans değerlerindeki RL değerleri.



Şekil 4.58: Ni serisi kompozitlerin farklı kalınlık ve frekanslardaki RL değerleri.

#### 4.5. KARBON VE MANYETİK DOLGULARIN KARIŞIM VE HİBRİTLERİ İLE KOMPOZİT HAZIRLANMASI VE RL PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Bu bölümde gerçekleştirilen çalışmalarda belirlenen hedefleri daha düşük ağırlıkta sağlayabilen kompozitlerin geliştirilmesine yönelik olarak farklı özelliklerdeki dolguların karışımından oluşan karışık dolgu ve karbon/manyetik hibrit dolgu içeren kompozitler hazırlanarak performans özellikleri belirlenmiştir.

Bu amaçla iki farklı sınıfta hazırlanan örnek serilerinin ilkinde manyetik dolgular arasında en yüksek performansın elde edildiği  $Fe_3O_4$  ile karbon dolgular arasında özellikle EAA açısından görece yüksek performansın elde edildiği CNF'nin farklı oranlarda karışımlarından oluşan dolgu karışımı kullanılmıştır. Bu dolguların seçilmesinde sadece soğurma performansları değil fiziksel özellikler açısından uyum da göz önünde bulundurulmuştur. Buna göre  $Fe_3O_4$ /CNF dolgu karışımının seçilmesiyle nano tanecik boylarıyla  $Fe_3O_4$ 'ün yumaksı CNF demetleri içerisine girerek CNF tanecikleri üzerinden yansıyan ve iletilen EM dalgaların soğurulma oranını iyileştirilmesi böylece artışımlı (sinerjik) bir etkinin oluşturulması hedeflenmiştir.

Karbon/manyetik karışık dolgu içeren ikinci seri örneklerde ise öncelikle kompozisyonları değişiklik gösteren 2 farklı nikel kaplı grafitik karbon (NiC) hibrit dolgusu kullanılmıştır. Hibrit dolguların etkinliğinin karışım dolgularla karşılaştırılabilmesi amacıyla hibrit dolgulu kompozitlerle aynı içeriğe sahip olacak şekilde nikel ve grafit dolgu karışımından oluşan karşılaştırma örnekleri de hazırlanarak elektromanyetik dalga soğurma performansları incelenmiştir. Çalışmanın bu kademesinde hazırlanan  $Fe_3O_4$ /CNF karışık dolgu içeren TPU kompozitlerinin bileşim ve isimlendirmesi Tablo 4.5'de, NiC ve Ni/G karışım örneklerin bileşim ve isimlendirmesi ise Tablo 4.6'de verilmiştir.

**Tablo 4.5:** Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ve CNF içeren örnek serilerinin bileşimleri ve isimlendirilmesi.

Örnek Kod	Dolgu-1	Dolgu miktarı (phr)	Dolgu-2	Dolgu miktarı (phr)
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -10	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	10	CNF	0
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 10 – CNF3	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	10	CNF	3
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 10 – CNF5	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	10	CNF	5
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 10 – CNF10	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	10	CNF	10
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -20	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	20	CNF	0
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 20 – CNF3	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	20	CNF	3
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 20 – CNF5	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	20	CNF	5
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 20 – CNF10	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	20	CNF	10
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -40	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	40	CNF	0
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 40 – CNF3	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	40	CNF	3
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 40 – CNF5	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	40	CNF	5
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 40 – CNF10	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	40	CNF	10
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -80	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	80	CNF	0
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 80 – CNF3	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	80	CNF	3
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 80 – CNF5	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	80	CNF	5
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 80 – CNF10	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	80	CNF	10

**Tablo 4.6:** Nikel/karbon hibrit dolgulu kompozitlerin ve karşılaştırma örneklerinin bileşimleri ve isimlendirmesi.

Örnek Kod	Dolgu-1	Dolgu miktarı (phr)	Dolgu-2	Dolgu miktarı (phr)
NiC2701-10	Nikel kap.	10	-	-
NiC2701-20	Karbon	20	-	-
NiC2701-40	(Ni/C	40	-	-
NiC2701-80	60/40)	80	-	-
NiC2805-10	Nikel kap.	10	-	-
NiC2805-20	Karbon	20	-	-
NiC2805-40	(Ni/C	40	-	-
NiC2805-80	75/25)	80	-	-
Ni-40	Ni	40	-	0
G-40	G	40	-	3
Ni30-G10	Ni	30	G	10

#### 4.5.1. CNF/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Karışık Kompozitlerinin Hazırlanması ve Performans Testleri

##### 4.5.1.1. SEM Analizleri

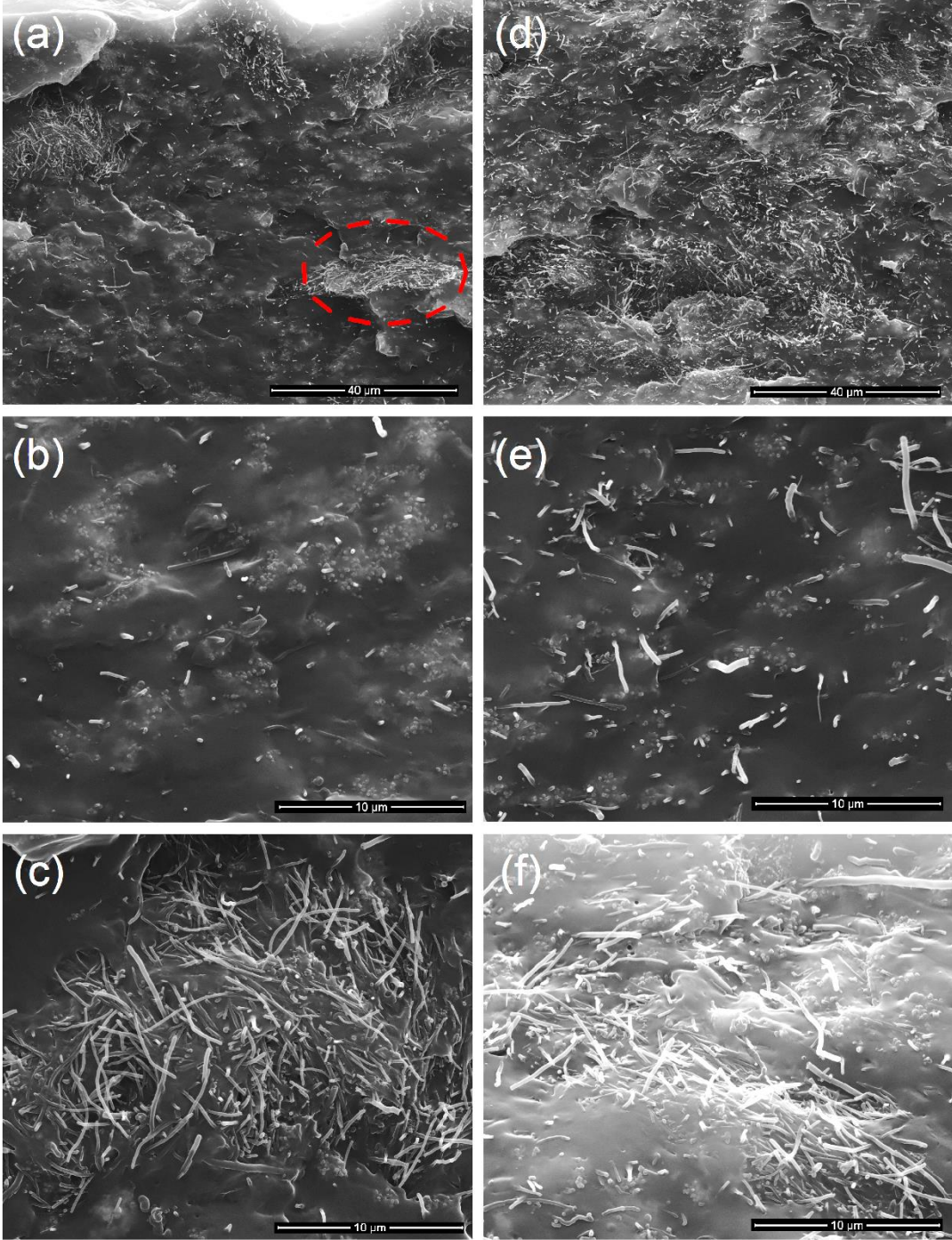
Kompozitlerde dolgu fazını oluşturan her iki bileşenin (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ve CNF) değişimine göre dolgu dağılımı ve yerleşimi gibi morfolojik özelliklerin belirlenmesi amacıyla farklı örnekler SEM analizleri uygulanmış, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>20-CNF3 ve Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>20-CNF10 örneklerine ait görüntüler Şekil 4.59(a-f)'de, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>80-CNF3 ve Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>80-CNF10 örneklerine ait görüntüler ise Şekil 4.60(a-f)'de verilmiştir.

Şekil 4.59(a,d) ve Şekil 4.60(a,d)'de düşük büyütme genel görüntüler verilirken Şekil 4.59 (b,e) ve Şekil 4.60 (b,e)'de CNF'nin görece seyrek olduğu, Şekil 4.59(c,f) ve Şekil 4.60 (c,f)'de ise yoğun CNF demetlerinin bulunduğu kısımlar verilmiştir.

Şekil 4.59(a,d)'de kompozitlere ait genel görüntü incelendiğinde, düşük CNF oranlarında büyük CNF demetleri dikkat çekmekte iken CNF oranının artmasıyla (Şekil 1(d)) CNF demetlerinin daha ince hale geldiği ve daha homojen bir dağılımın sağlandığı görülmektedir. Görece düşük kullanım oranlarında tekli CNF elyaflarının bulunduğu kısımların incelendiği Şekil 4.59(b,e)'de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> taneciklerinin karbon elyaf tanecikleri arasına gelişigüzel yayıldığı görülmekle beraber belirli bölgelerde daha yoğun bulunduğu, ancak karbon elyaf tanecikleri arasında iletimi kurmaktan uzak olduğu görülmektedir. Şekil 4.59(c,f)'de yoğun CNF demetlerinin içerisindeki Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dağılımları incelendiğinde ise Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> taneciklerinin CNF demetleri içerisine etkili bir biçimde giremediği gözlenmiştir.

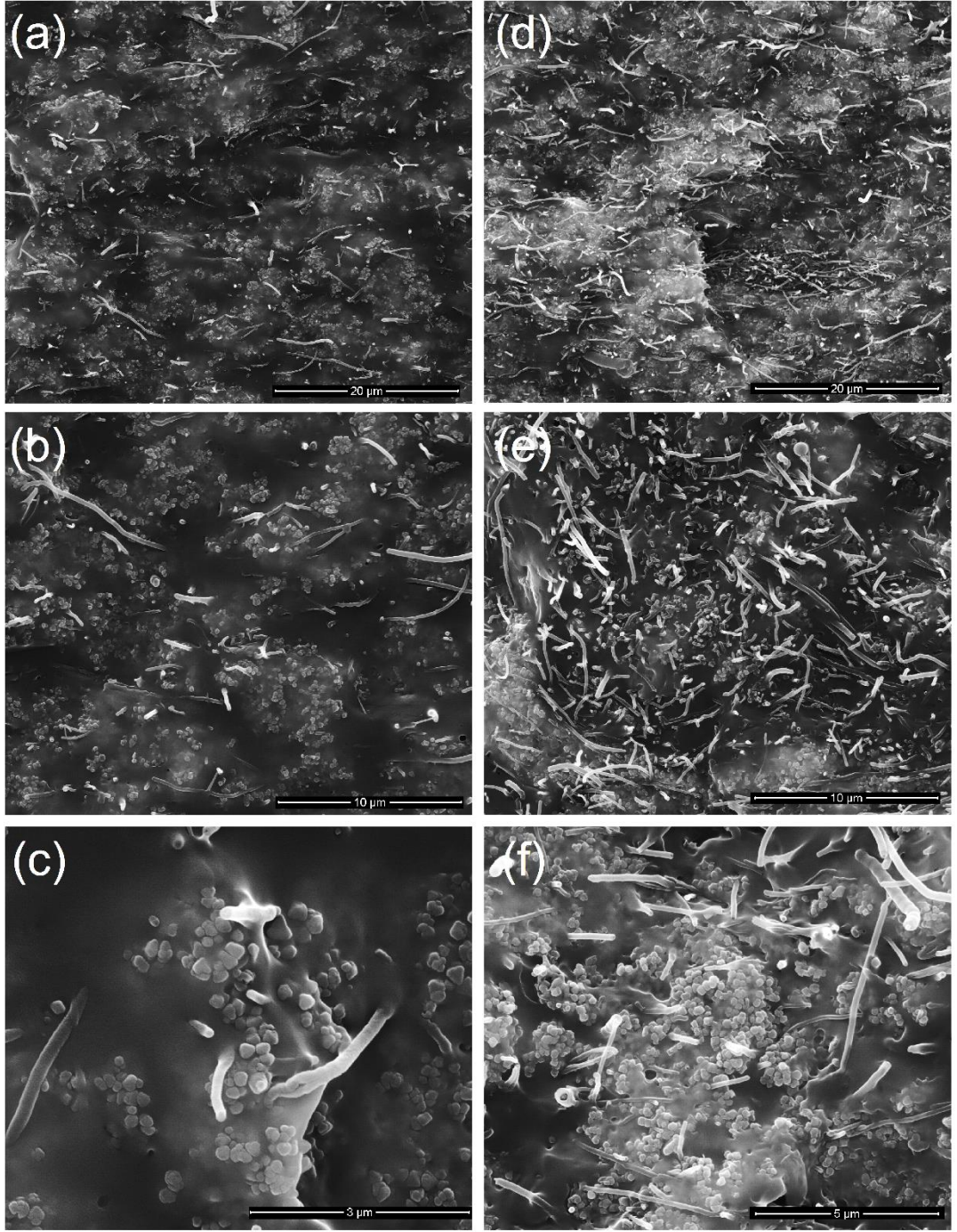
Şekil 4.60 (a,d)'de verilen Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>80-CNF3 ve Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>80-CNF10 örneklerine ait genel görüntüler Şekil 4.59(a,d)'de verilen görüntülerle karşılaştırmalı olarak incelendiğinde artan Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> oranının karmaşık CNF demetlerinin dağılımını iyileştirdiği ve karmaşık yumakların küçüldüğü/azaldığı görülmektedir. Daha yüksek büyütme uygulandığı Şekil 4.60(b-f) incelendiğinde ise yüksek dolgu oranlarında nano boyutlu Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> taneciklerinin yoğun CNF demetleri içerisine girerek Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>80-CNF3 için elyaf tanecikleri arasında kısmi bağlantılar kurduğu Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>80-CNF10 örneği içinse kesintisiz bir faz oluşturduğu görülmüştür.





**Şekil 4.59:** (a-b-c) Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CNF3 ve (d-e-f) Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CNF10 örneklerinin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri.

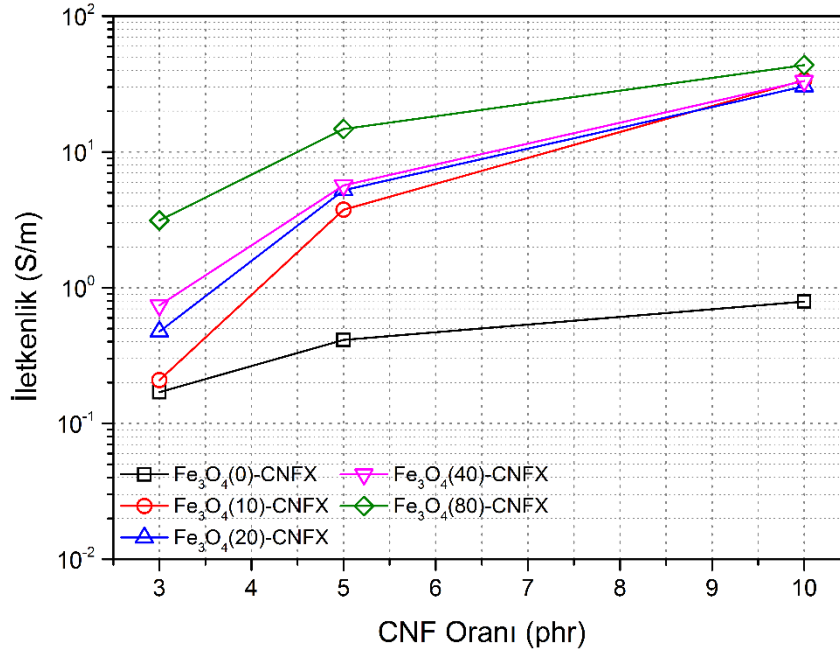




**Şekil 4.60:** (a-b-c) Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/80-CNF3 ve (d-e-f) Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/80-CNF10 örneklerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri.

#### 4.5.1.2. DC Elektriksel İletkenlik Analizleri

$Fe_3O_4$  ve CNF karışık dolgu içeren kompozitlerin CNF serisi örneklerle karşılaştırmalı olarak *dc*-iletkenlik değerlerinin CNF oranına bağlı olarak değişimi Şekil 4.61’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde ilk olarak  $Fe_3O_4$  katkısının TPU/CNF kompozitlerinin elektriksel iletkenliklerini  $10^1$ - $10^2$  oranında arttırdığı görülmektedir. Bu iyileşmenin  $Fe_3O_4$ ’ün daha önce de bahsedildiği gibi  $10^5$  S/m seviyelerindeki elektriksel iletkenliğine bağlı olarak gerçekleştiği değerlendirilmiştir. Kompozit yapıdaki CNF oranına göre  $Fe_3O_4$  etkisi incelendiğinde ise CNF oranının artmasına bağlı olarak  $Fe_3O_4$  etkisinin daha etkin bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir.  $Fe_3O_4$  ilavesinin yüksek CNF içeren örneklerde daha etkili olması yüksek dolgu hacim fraksiyonuna bağlı olarak  $Fe_3O_4$  taneciklerinin birbiriyle yakınlaşan CNF tanecikleri arasında daha kolay bir şekilde iletim kurmasına bağlı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir. Yüksek  $Fe_3O_4$  oranında CNF tanecikleri arasında kurulan  $Fe_3O_4$  hatları, Şekil 4.60’da verilen SEM görüntüleriyle de daha önce doğrulanmıştır.

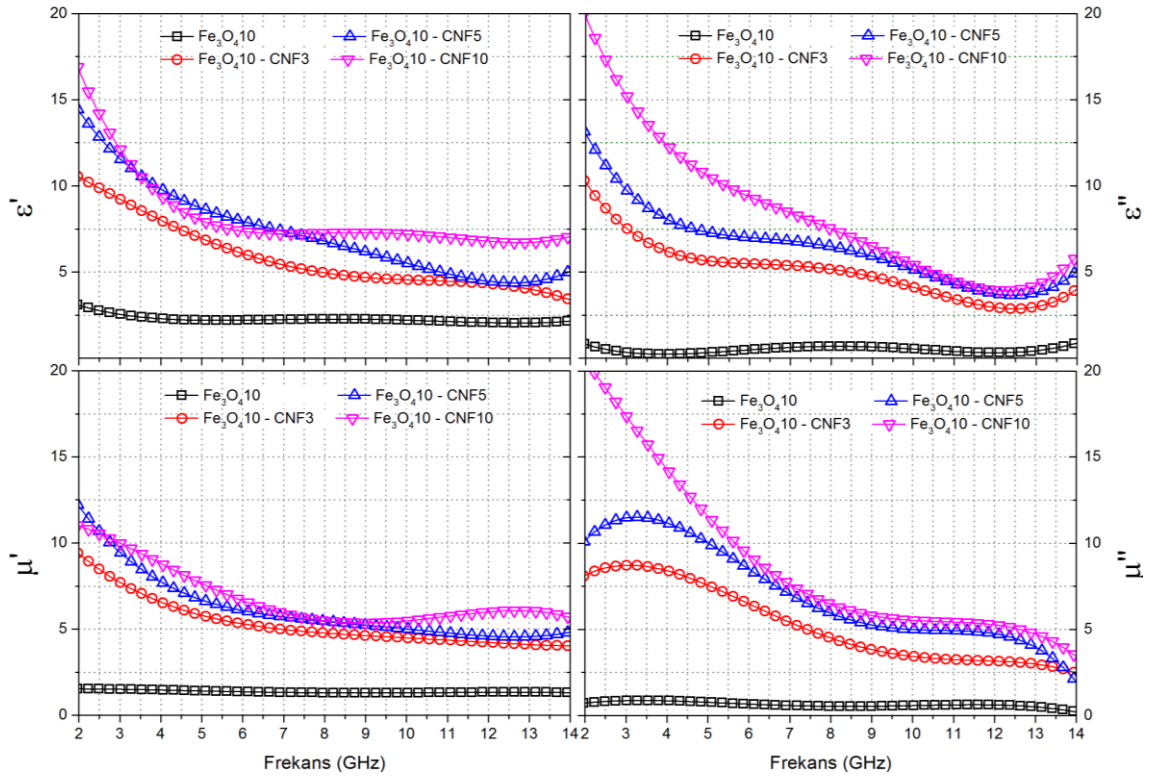


Şekil 4.61:  $Fe_3O_4$ -CNF serisi örneklerin DC iletkenliklerinin değişimi.

#### 4.5.1.3. Permittivite ve Permeabilite Değerlerinin Analizleri

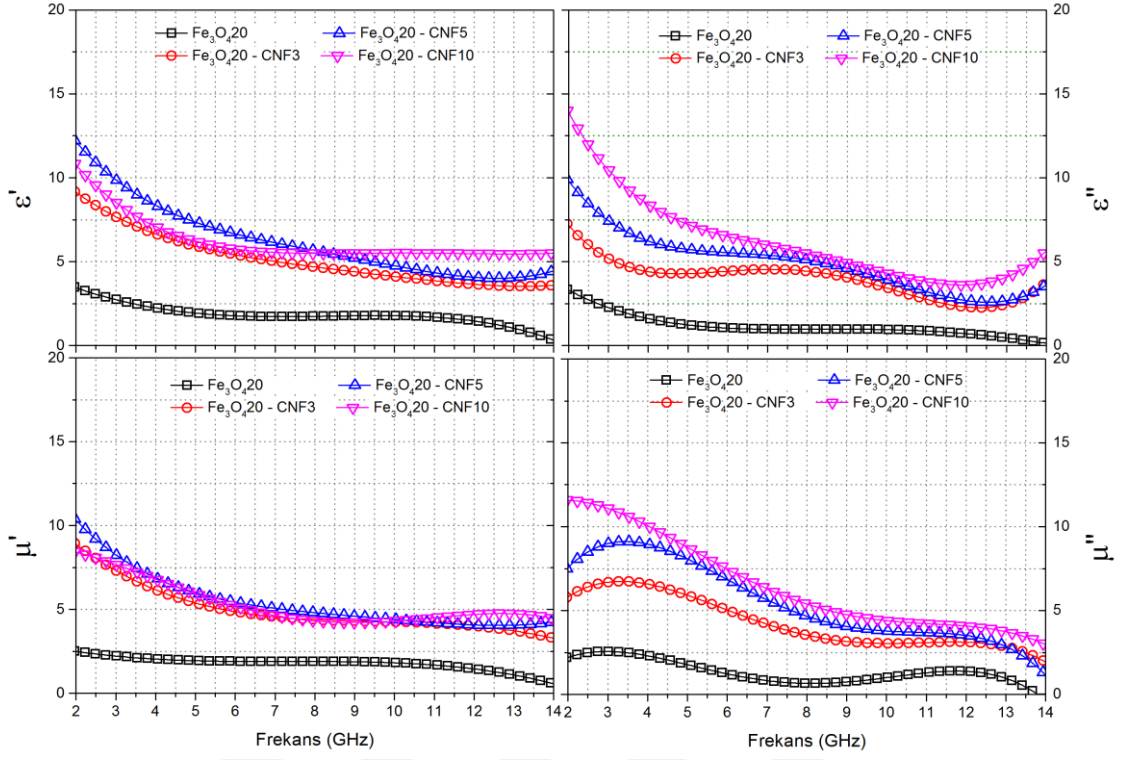
TPU/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CNF kompozitlerine ait permittivite ve permeabilite değerlerinin frekansa bağlı değişimi Şekil 4.62-Şekil 4.65’de verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi bütün Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> konsantrasyonlarında CNF miktarının artması hem  $\epsilon'$  hem de  $\epsilon''$  değerlerinde (daha önce anlatılan mikro-kapasitör benzeri yapıların artmasına bağlı olarak) bir artışa neden olmuştur. Ayrıca frekansın artmasıyla her iki permittivite değerinin de azaldığı ve birbirlerine yaklaştığı görülmektedir. Değişen frekansın etkisiyle özellikle X-bandı seviyelerinde CNF ilavesiyle meydana gelen değişimlerin oldukça küçük olduğu dikkat çekmektedir.

Şekillerde verilen permeabilite sonuçları incelendiğinde, CNF ilavesinin yine her iki permeabilite değeri üzerinde de bir artırıcı etki yaptığı görülmüş ve bu artışların CNF oranına bağlı olarak düzenli bir değişim göstermediği bulunmuştur.

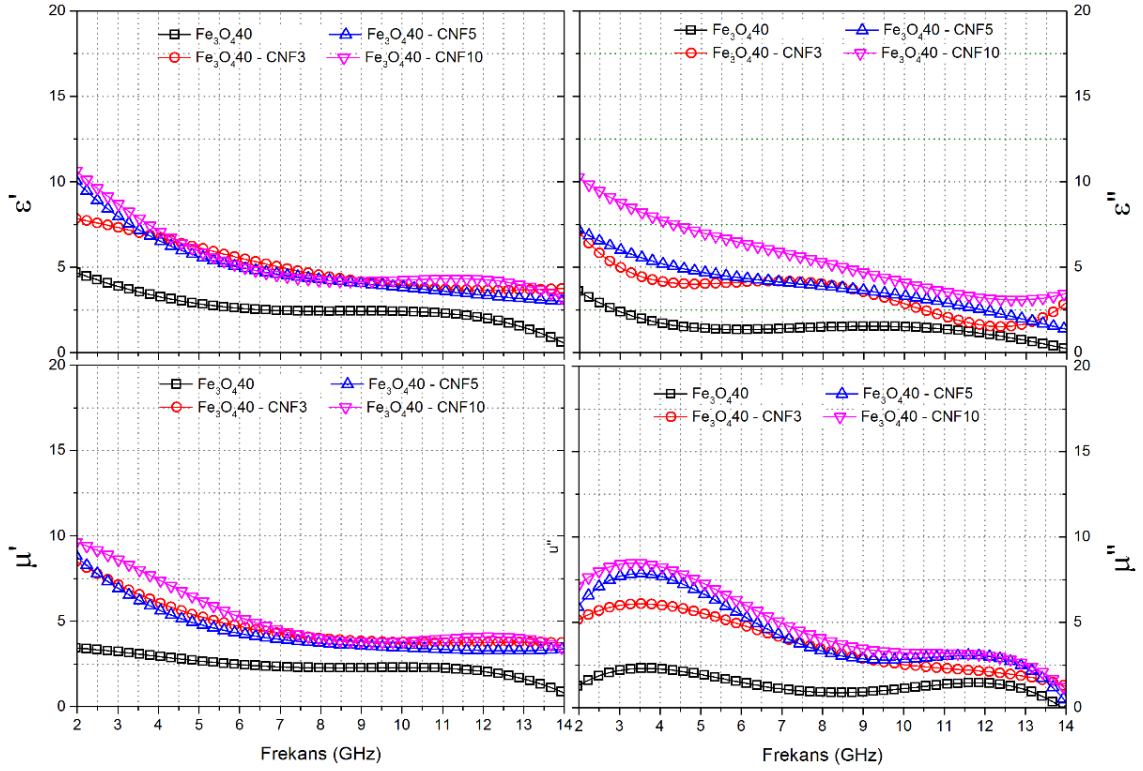


Şekil 4.62: Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>10 – CNFx serisi kompozitlerin  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ,  $\mu'$  ve  $\mu''$  değerlerinin frekansla değişimi.

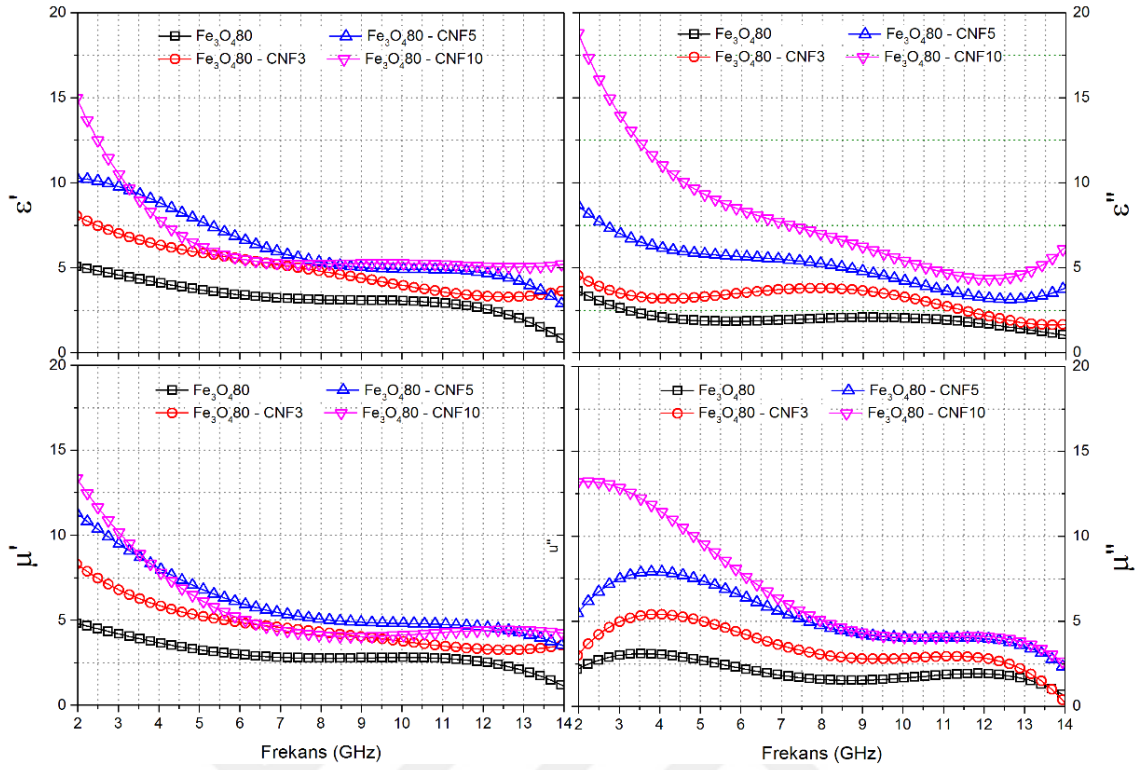




Şekil 4.63:  $\text{Fe}_3\text{O}_4/20$  – CNF $x$  serisi kompozitlerin  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ,  $\mu'$  ve  $\mu''$  değerlerinin frekansla değişimi.

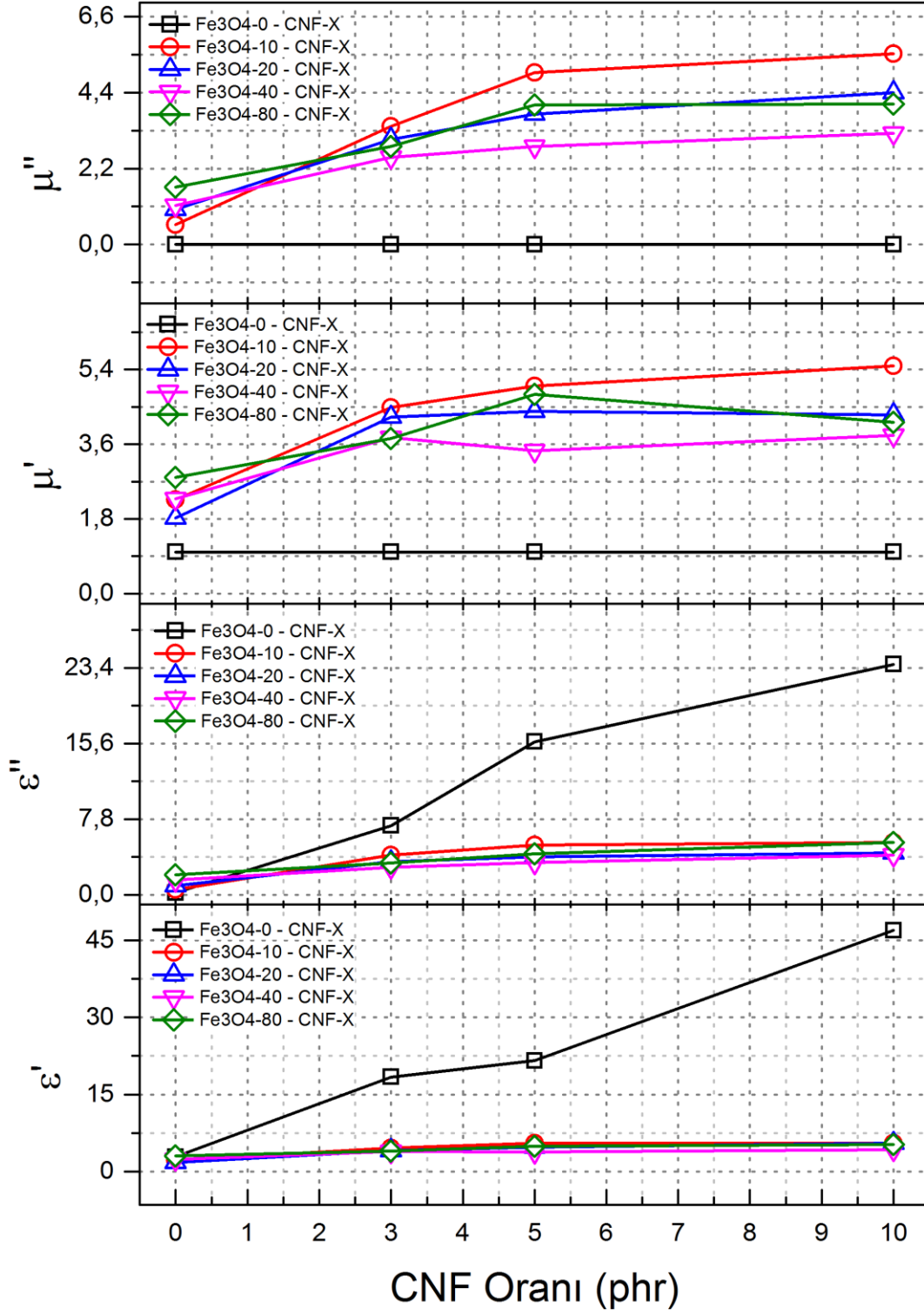


Şekil 4.64:  $\text{Fe}_3\text{O}_4/40$  – CNF $x$  serisi kompozitlerin  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ,  $\mu'$  ve  $\mu''$  değerlerinin frekansla değişimi.



Şekil 4.65:  $\text{Fe}_3\text{O}_4/80 - \text{CNF}_x$  serisi kompozitlerin  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ,  $\mu'$  ve  $\mu''$  değerlerinin frekansla değişimi.

Şekil 4.66'da ise kompozit içerisindeki CNF oranının permitivite ve permeabilite değerleri üzerine etkisinin daha net görülebilmesi amacıyla bu değerlerin değişimi CNF oranının değişimine göre verilmiştir. Grafikteki permitivite değerleri incelendiğinde CNF serisi örneklerde  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ilavesinin her iki permitivite değerinde de önemli oranda azalmaya neden olduğu görülmektedir. Bu sonuçların karbon elyaf tanecikleri arasına giren  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  taneciklerinin TPU faza göre daha zor polarize olması ve polimer fazında polarizasyonunu engellemesine bağlı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir. Sonuçlarda ayrıca  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ilavesiyle  $\epsilon''$  değerlerindeki azalmadan hareketle  $dc$ -iletkenliğin aksine kompozitlerin  $ac$ -iletkenliklerinin azalacağı da görülmektedir. Permeabilite değerleri incelendiğinde ise CNF bulunmayan  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  serisi kompozitlerde artan dolgu oranıyla her iki permeabilite değeri artış gösterirken CNF ilavesiyle  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  oranına göre düzenli değişim trendinin bozulduğu ve en düşük  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  oranına sahip  $\text{Fe}_3\text{O}_4/10\text{-CNF}_x$  serisi örneklerin en yüksek permeabilite değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

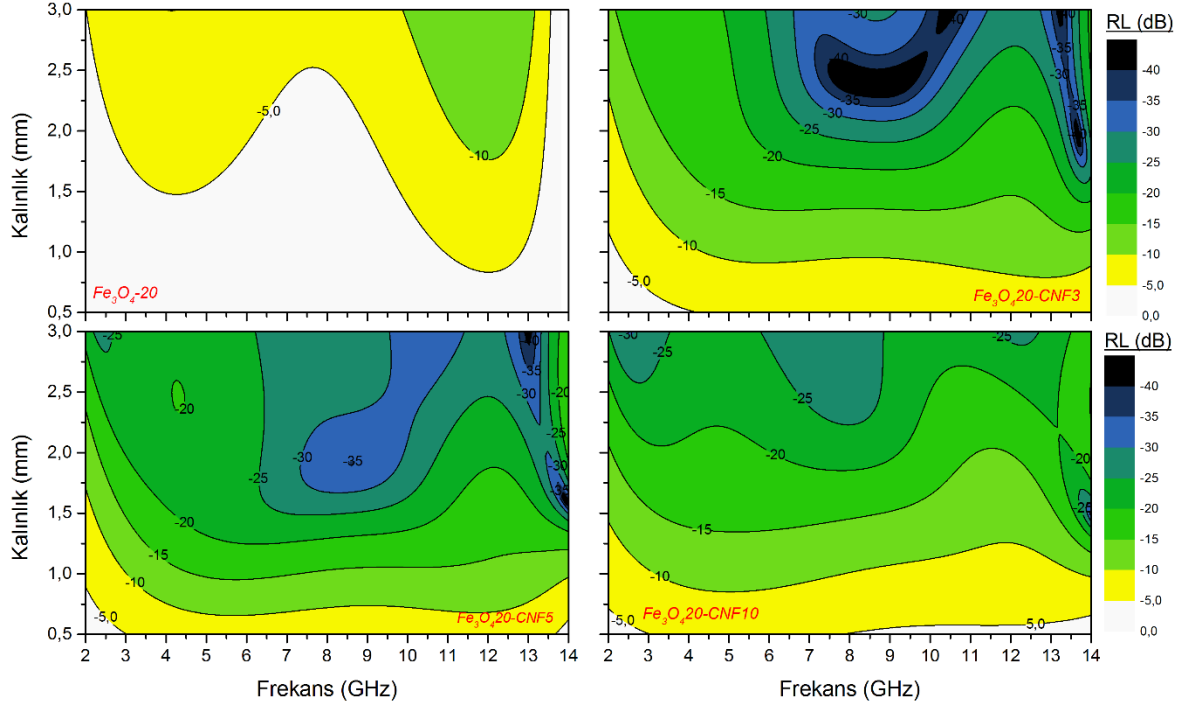
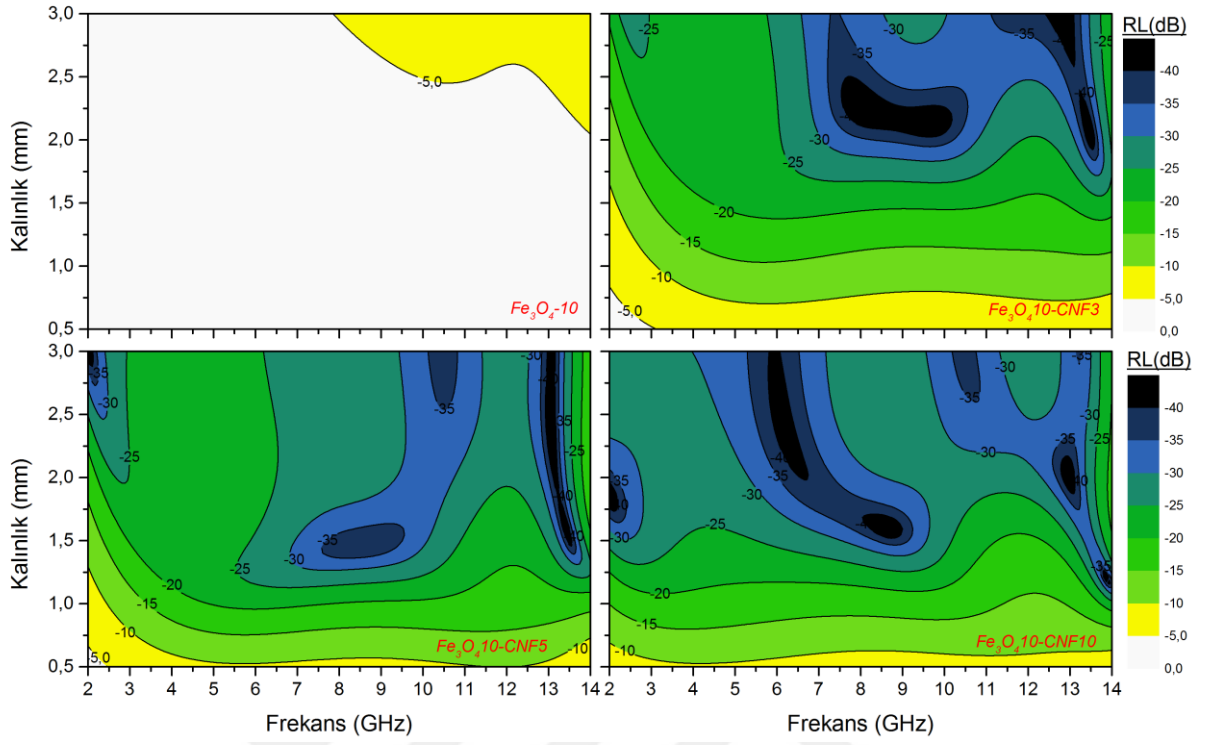


Şekil 4.66: CNF oranına göre Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>X-CNF-X kompozitlerinin dielektrik parametrelerinin değişimi ( $f=10.03$  GHz).

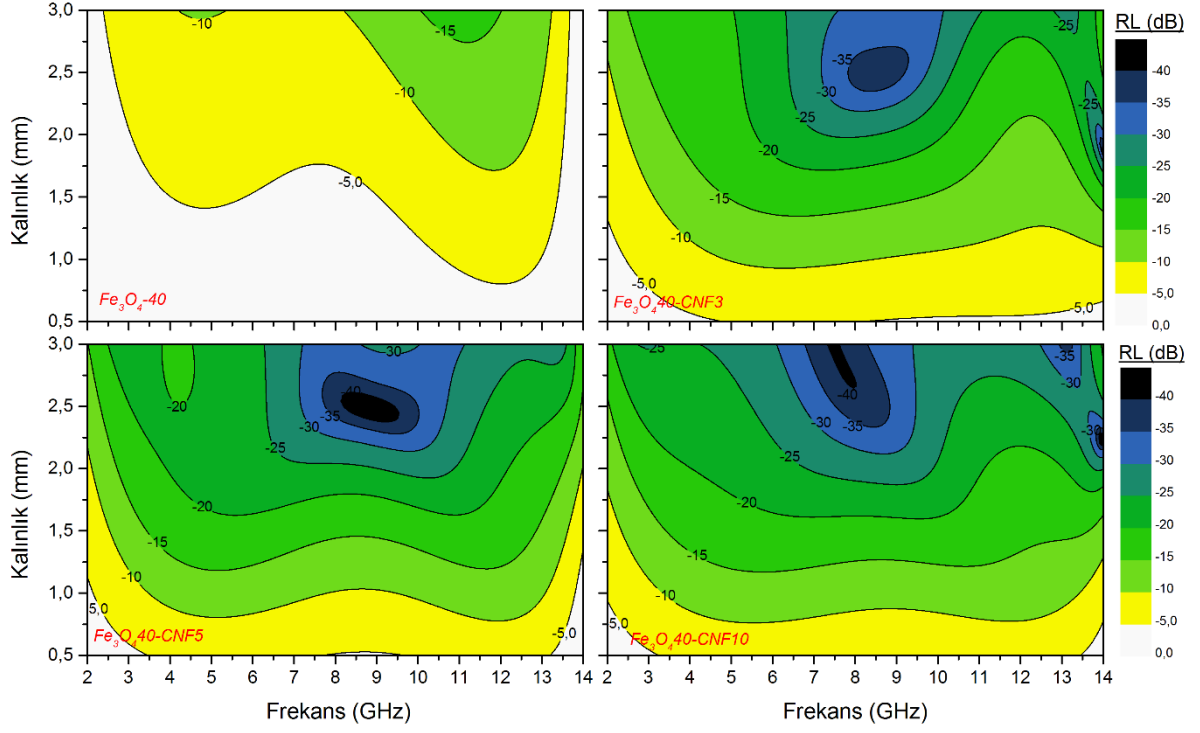
#### 4.5.1.4. Yansıma Kaybı Analizleri

TPU/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CNF kompozitlerinin kalınlık, frekans ve *RL* değerlerinin ilişkisini gösteren dış hat grafikleri Şekil 4.67-Şekil 4.70 arasında verilmiştir. Grafiklerde karışık dolgu içeren örneklerin istenilen hedefleri sağlaması nedeniyle maksimum kalınlık değeri tez kapsamında belirlenen maksimum kalınlık olan 3 mm olarak sınırlandırılmıştır. Grafikler incelendiğinde, karışık dolgu içeren bütün örneklerin aynı oranda Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ya da CNF içeren eşleniklerine göre çok daha düşük *RL* değerleri sağladığı tespit edilmiş fakat *RL* değerlerindeki değişiminin, daha önce Şekil 4.66'da verilen permeabilite değerlerindeki düzensizliklere bağlı olarak, düzenli bir trend göstermediği bulunmuştur. Örnek bazında incelendiğinde bütün örneklerde özellikle X-band aralığının tamamının HPAA'nın sağlanabildiği görülürken Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>10-CNF10 ve Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>80-CNF10 örneğinin en yüksek performansı sergilediği ve bu örneklerle en fazla 1,5 mm kalınlığındaki bir örnekle hedeflenen *RL* değerlerinin hemen hemen 2-14 GHz aralığının tamamında sağlanabileceği görülmektedir.

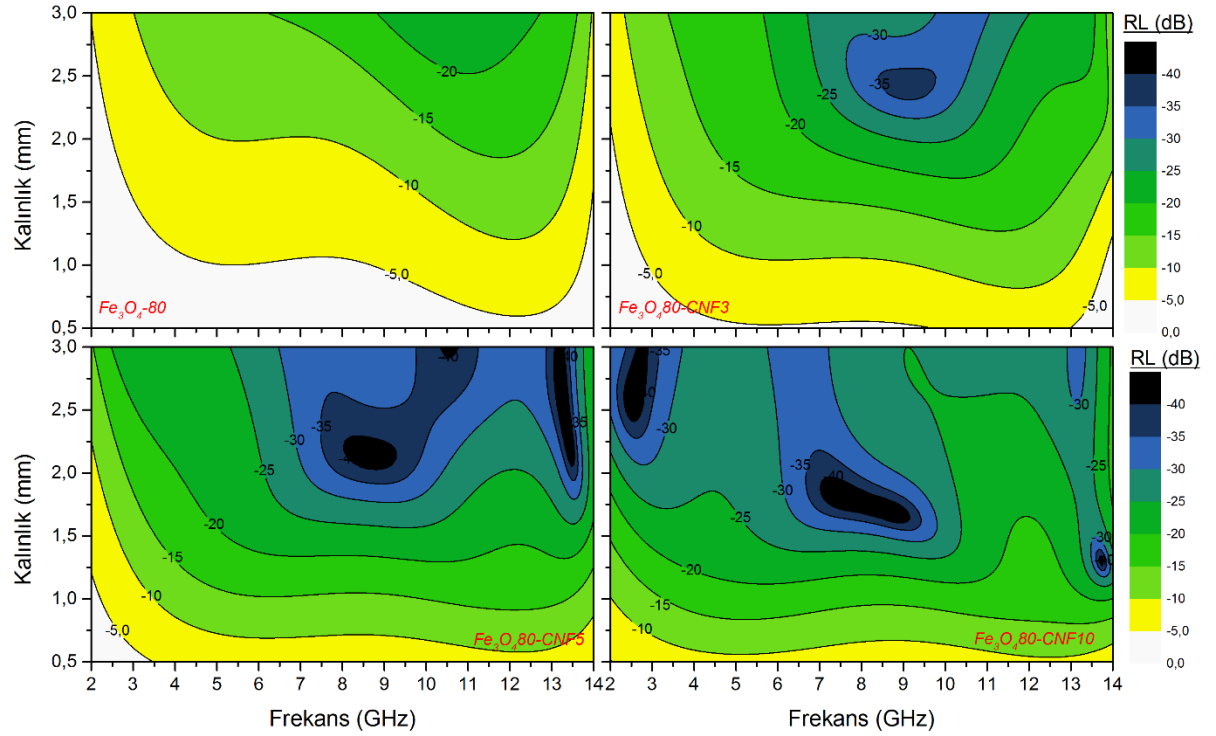
Elde edilen *RL* değerlerinin daha da ince örneklerle sağlanabilmesi ya da daha da geliştirilebilmesi amacıyla Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-CNF serisi örneklerden yine GA kullanılarak çeşitli çok katmanlı tasarım denemeleri gerçekleştirilmiş ve en yüksek performansın elde edilebileceği bazı tasarımlara ait *RL*-frekans grafikleri ise Şekil 4.71'de verilmiştir. Sonuçlarda çok katmanlı tasarımlarla özellikle X-bandında daha düşük *RL* değerlerinin elde edilebileceği görülmekle beraber özellikle 3K-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-CNF tasarımıyla sadece 1.94 mm kalınlıkta X-bandın çok büyük bir kısmında -40 dB ve daha düşük *RL* değerleri elde edilebileceği ortaya konmaktadır.



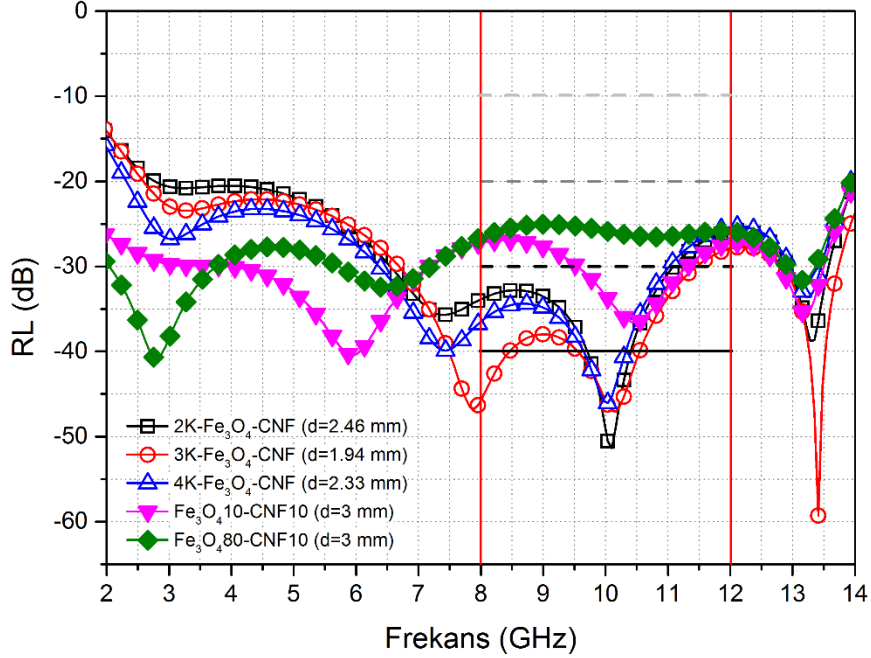




Şekil 4.69:  $Fe_3O_440$ -CNFX serisi örneklerin dış hat grafikleri.



Şekil 4.70:  $Fe_3O_480$ -CNFX serisi örneklerin dış hat grafikleri.



Şekil 4.71: Çok katmanlı Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-CNF serisi örneklerin RL-frekans grafiği.

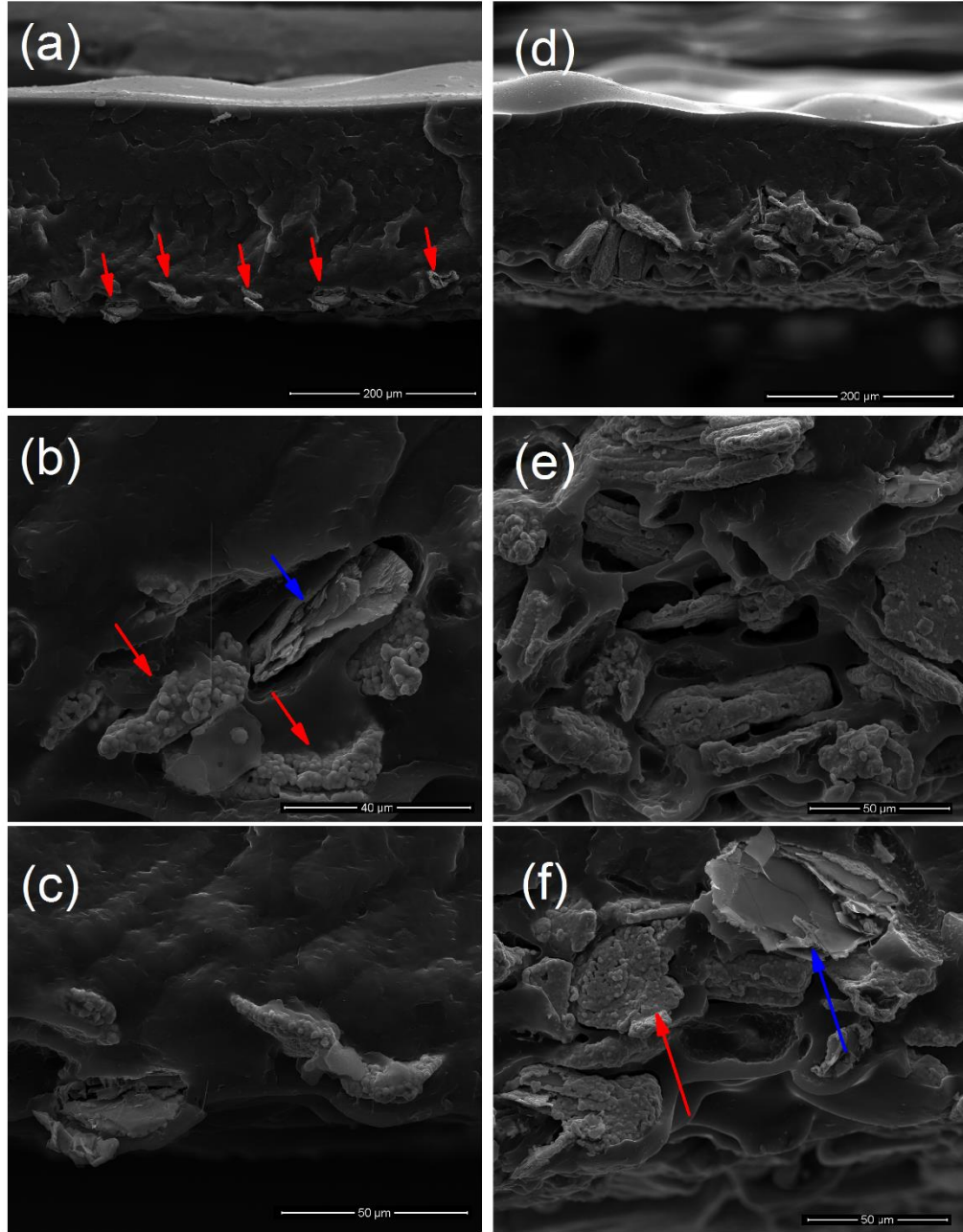
#### 4.5.2. Ni/G Hibrit ve Karışık Dolgu İçeren Kompozitlerinin Hazırlanması ve RL Analizleri

##### 4.5.2.1. SEM analizleri

NiC2805-40 ve NiC2805-80 örneklerine ait farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri Şekil 4.72(a-f)'de verilmiştir. Hibrit dolgudaki Ni/G oranının değişimine bağlı olarak tanecik büyüklüğü ya da geometrik özellikler açısından bir değişiklik oluşmaması nedeniyle SEM analizleri sadece NiC2805 içeren örneklere uygulanmıştır.

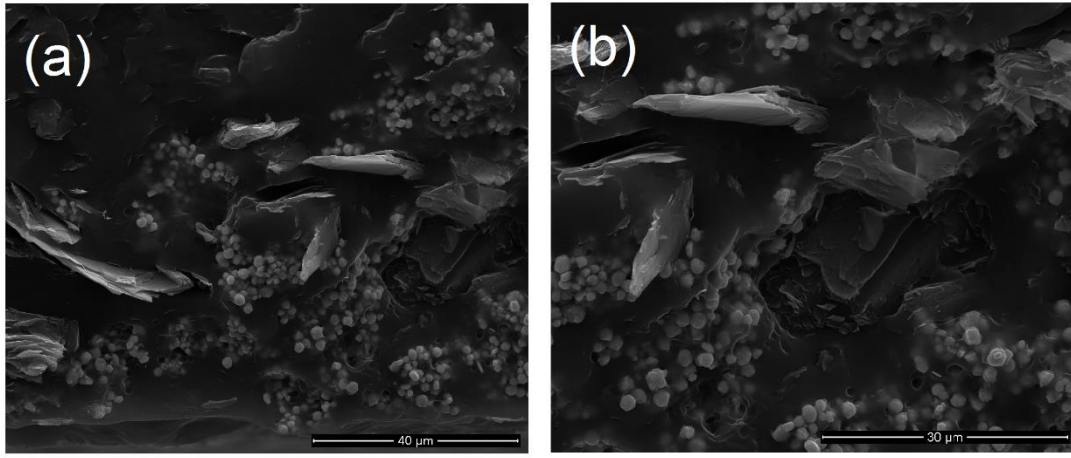
Fotoğraflar incelendiğinde her iki dolgu konsantrasyonunda da hazırlama esnasında dolguların yüksek yoğunluğa bağlı olarak filmin alt yüzeyine çöktüğü görülmektedir. Filmin alt yüzeyinde biriken dolgu tanecikleri Şekil 4.72(a)'da kırmızı oklarla gösterilmiştir. Öte yandan hibrit dolgunun yüzeyindeki Ni kaplamasının bazı taneciklerde yüzeye tutunmadığı ve sadece grafitten oluşan dolguların kompozit yapıda bulunduğu görülmektedir. Tabakalı grafitten

oluşan yapılar şekilde mavi oklarla gösterilmiştir. Dolgu-polimer arası etkileşimlerin daha net gözlemlenebilmesi amacıyla Şekil 4.72(b,e) incelendiğinde, dolgularla polimer ara yüzeyinde uyumsuzluktan kaynaklı boşlukların bulunduğu görülmektedir.



Şekil 4.72: (a-b-c) NiC2805-40 ve (d-e-f) NiC2805-80 örneklerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri.

Şekil 4.73(a-b)'de ise NiC2805-40 örneğine karşılık gelen ve aynı oranda nikel ve grafitin fiziksel karışımından oluşan dolgu içeren Ni30-G10 örneğine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Nikel ve grafit dolguların TPU fazı içinde NiC2805 hibrit dolgusunun aksine oldukça homojen bir şekilde dağıldığı görüldüğü ve polimer-dolgu ara yüzeyinde uyumsuzluk göstergesi olan boşlukların olmadığı gözlenmiştir. Ancak fotoğraflarda nikel taneciklerinin grafit katman ya da yığılımlarının aralarına girmekten çok bu yığılımların etrafında yoğunlaştığı görülmektedir.



Şekil 4.73: Ni30-G10 örneğine ait SEM görüntüleri.

#### 4.5.2.2. Dielektrik Analizler

Farklı oranlarda NiC2701 ve NiC2805 içeren örneklerin permitivite ve permeabilite değerlerinin 2-14 GHz arasındaki değişimleri Şekil 4.74(a-d)-Şekil 4.75(a-d)'de verilmiştir. Hibrit dolguların hem manyetik hem de elektriksel iletken özellik göstermesi nedeniyle her iki örnek serisinde de dolgu oranının artışına bağlı olarak permitivite ve permeabilite değerlerinin hem reel hem de sanal kısımlarının düzenli bir artış gösterdiği görülmektedir. Hibrit dolgu tipine göre elde edilen permitivite ve permeabilite değerleri karşılaştırıldığında ise her iki dolgu tipinde de 80 phr oranında elde edilen değerlerin birbirlerine oldukça yakın oldukları görülürken daha düşük dolgu oranlarında NiC2805 kullanılan örneklerde daha yüksek permitivite ve permeabilite değerlerinin elde edilebildiği görülmektedir.

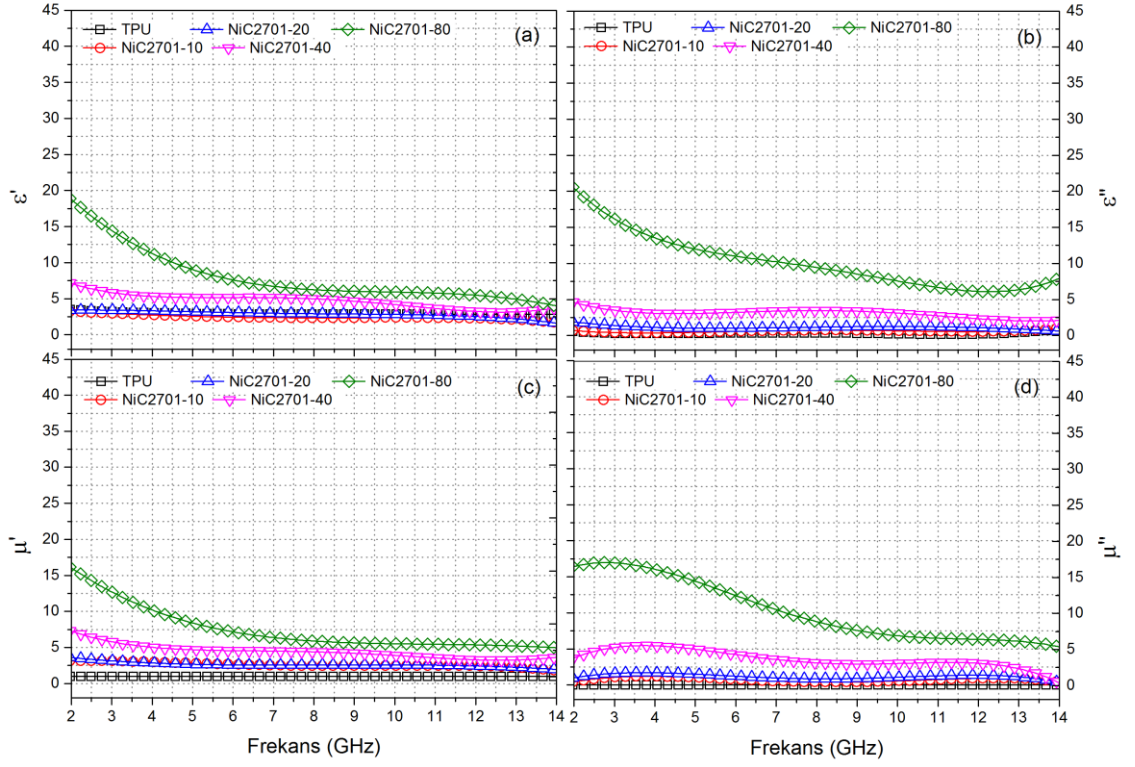
Şekil 4.76(a-d)'da ise 40 phr oranında hibrit ve karışık dolgu içeren örneklerin permitivite ve permeabilite değerleri aynı oranda tek tip dolgu içeren örneklerin permitivite ve permeabilite

değerleriyle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Farklı dolgu tiplerinin  $\epsilon'$  değerleri üzerindeki etkisi karşılaştırıldığında, yüksek iletkenlikleri ve tabakalı yapısı sayesinde grafitin kapasitör benzeri yapıları daha yüksek oranda oluşturabildiği ve buna bağlı olarak daha yüksek  $\epsilon'$  değerlerinin elde edilmesini sağladığı görülmektedir. Örneklerin *ac*-iletkenliklerinin ve enerji kayıplarının göstergesi olan  $\epsilon''$  değerleri karşılaştırıldığında ise NiC2805-40 ve G-40 örneklerinin diğerlerinden daha yüksek  $\epsilon''$  değerlerine sahip olduğu görülmektedir. SEM görüntüleriyle de doğrulanabileceği gibi grafit diğer dolguların aksine daha ince tabaklar halinde ve yüksek  $A_f$ 'ye sahip olacak şekilde kompozit yapı içinde dağıtılabilmektedir. Bu özelliğiyle diğerlerinden daha yüksek *ac*-iletkenliğe ve  $\epsilon''$  değerlerine sahip olması, beklenen bir sonuçtur. Ancak NiC2805'in yüksek yoğunluğuna bağlı olarak düşük hacim fraksiyonu nedeniyle grafitte yakın bir iletkenlik ve  $\epsilon''$  değerine sahip olması, özellikle de iletkenliğin yüzeyde bulunan nikel tanecikleri üzerinden sağlandığı düşüncesinden hareketle Ni-40 örneğinden daha yüksek değerlere sahip olması beklenen bir sonuç olarak görülmemektedir. Bu örneğin iletkenlikteki yüksek performansında daha önce SEM fotoğraflarıyla doğrulandığı şekilde yüksek yoğunluğu nedeniyle filmin alt kısmında yoğunlaşarak kesintisiz bir hat oluşturmasının etkili olduğu düşünülmektedir.

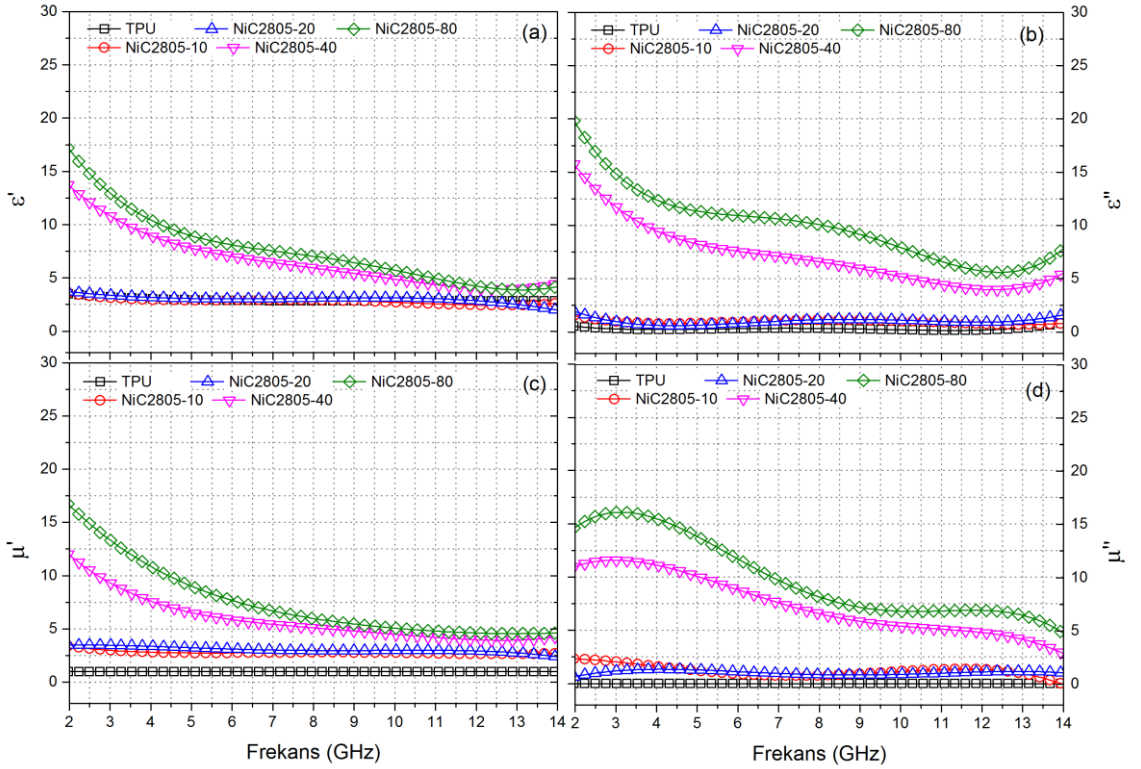
Örneklerin permeabilite ( $\mu'$  ve  $\mu''$ ) değerleri karşılaştırıldığında ise G-40 örneği en düşük permeabilite değerlerine sahip iken, NiC2805-40 örneğinin diğerlerine göre daha yüksek permeabilite değerine sahip olduğu görülmektedir. Örneklerdeki manyetik özelliğin nikel'den kaynaklandığı düşünüldüğünde Ni-40 örneğinin en yüksek permeabilite değerlerine sahip olması beklenirken karbon içeren NiC2805-40 ve G30-Ni10 örneklerinin Ni-40 örneğine göre daha yüksek permeabilite değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

Karbon ve nikel içerikli örneklerin, aynı oranda, sadece nikel içeren örneklere göre daha yüksek permeabilite değerleri daha önce TPU/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/CNF kompozitlerinin sonuçlarının değerlendirildiği kısımda verilen Şekil 4.66'da elde edilen sonuçları doğrular şekilde nikel ve karbonun beraber kullanımlarının permeabilite değerleri üzerindeki artışım etkisiyle açıklanmıştır.

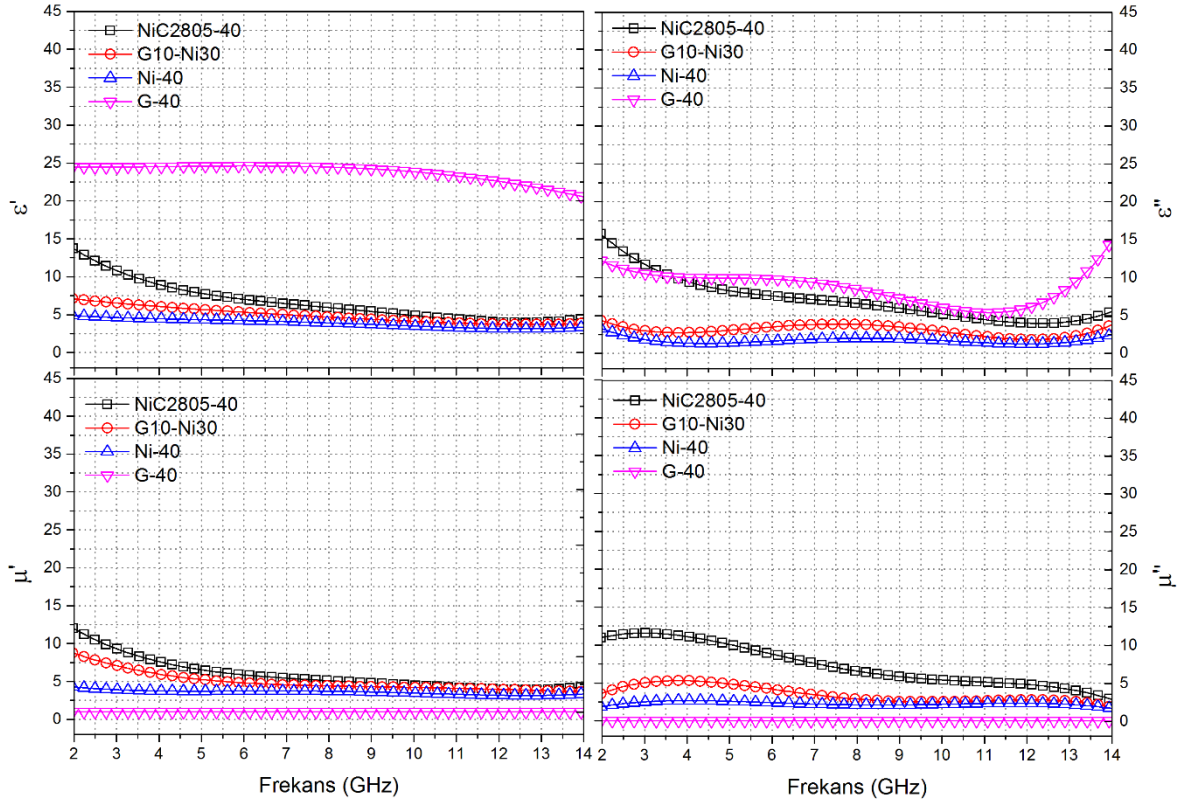




Şekil 4.74: Farklı oranlarda NiC2701 içeren örneklerin (a)  $\epsilon'$ , (b)  $\epsilon''$ , (c)  $\mu'$  ve (d)  $\mu''$  değerleri.



Şekil 4.75: Farklı oranlarda NiC2805 içeren örneklerin (a)  $\epsilon'$ , (b)  $\epsilon''$ , (c)  $\mu'$  ve (d)  $\mu''$  değerleri.



Şekil 4.76: 40 phr oranında dolgu içeren hibrit ve fiziksel karışım dolgu fazı içeren örneklerin (a)  $\epsilon'$ , (b)  $\epsilon''$ , (c)  $\mu'$  ve (d)  $\mu''$  değerleri.

#### 4.5.2.3. Yansımaya Kaybı Analizleri

Şekil 4.77'de 20, 40 ve 80 phr oranında NiC2701 ve NiC2805 içeren örneklerin dış hat grafikleri verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, her iki dolgu tipinde de dolgu oranının artışına bağlı olarak elde edilen  $RL$  değerlerinin iyileştiği ve NiC2805 serisi örneklerde daha düşük  $RL$  değerlerinin elde edilebildiği görülmektedir.

Elde edilen değerler açısından örneklerin performansları değerlendirildiğinde ise, 20 phr oranında dolgu içeren örneklerin performanslarının tez kapsamında belirlenen performans hedeflerini karşılamak için yetersiz olduğu fakat 40 ve 80 phr oranında dolgu içeren örneklerin farklı kalınlıklarda istenilen performansları sergileyebildikleri görülmektedir. Özellikle NiC2805-40 örneğine ait dış hat grafiği incelendiğinde, yaklaşık 1.25 mm'den daha yüksek kalınlıklarda X-band frekans aralığının tamamı HPAA olarak görülmektedir. Bu özellikleriyle NiC2805-40 örneği daha düşük oranda dolgu içermesine rağmen yaklaşık aynı kalınlıklarda

hedefleri sağlması açısından 80 phr oranında dolgu içeren NiC2701-80 ve NiC2805-80 örneklerine göre daha avantajlı görülmektedir.

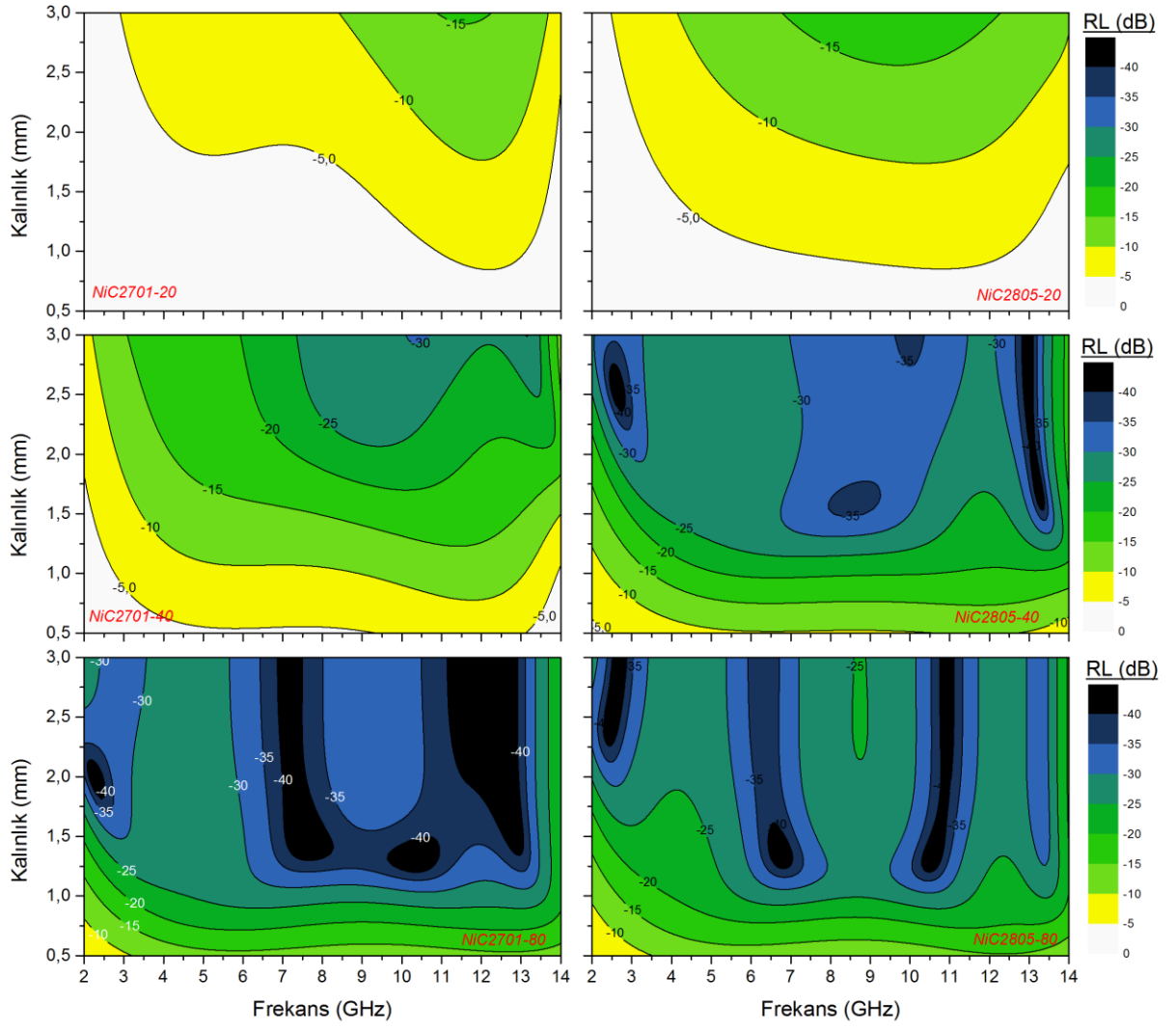
Şekil 4.78'de ise Şekil 4.77'de dolgu oranı ve kalkanlama etkinliği en yüksek performans gösteren NiC2701-40 örneğinin sadece nikel ya da grafit içeren örneklerle ve aynı oranda nikel ve grafit içeren örneklerle *RL* değerlerinin kıyaslaması gerçekleştirilmiştir. Şekil incelendiğinde G-40 örneğinin sadece belirli kalınlıklarda belirli frekanslar için etkin soğurma gerçekleştirebildiği ve EAA ve HPAA'nın oldukça dar ve yetersiz olduğu görülmektedir. Ni-40 örneğine ait *RL* değerleri incelendiğinde ise 3 mm kalınlığa kadar özellikle X-band aralığında HPAA'nın elde edilemediği görülmektedir.

Toplamda aynı oranda (40 phr) dolgu içeren Ni30-G10 örneğine ait *RL* eğrisi incelendiğinde ise, bu dolgu ile hazırlanan kompozitle, G-40 ve Ni-40 örneklerinden çok daha düşük *RL* değerlerinin elde edilebildiği görülmektedir. Ni30-G10 örneğiyle yaklaşık 2.5 mm kalınlığındaki örnekle yaklaşık 5.5-14.0 GHz frekans aralığının tamamının HPAA olduğu görülmektedir.

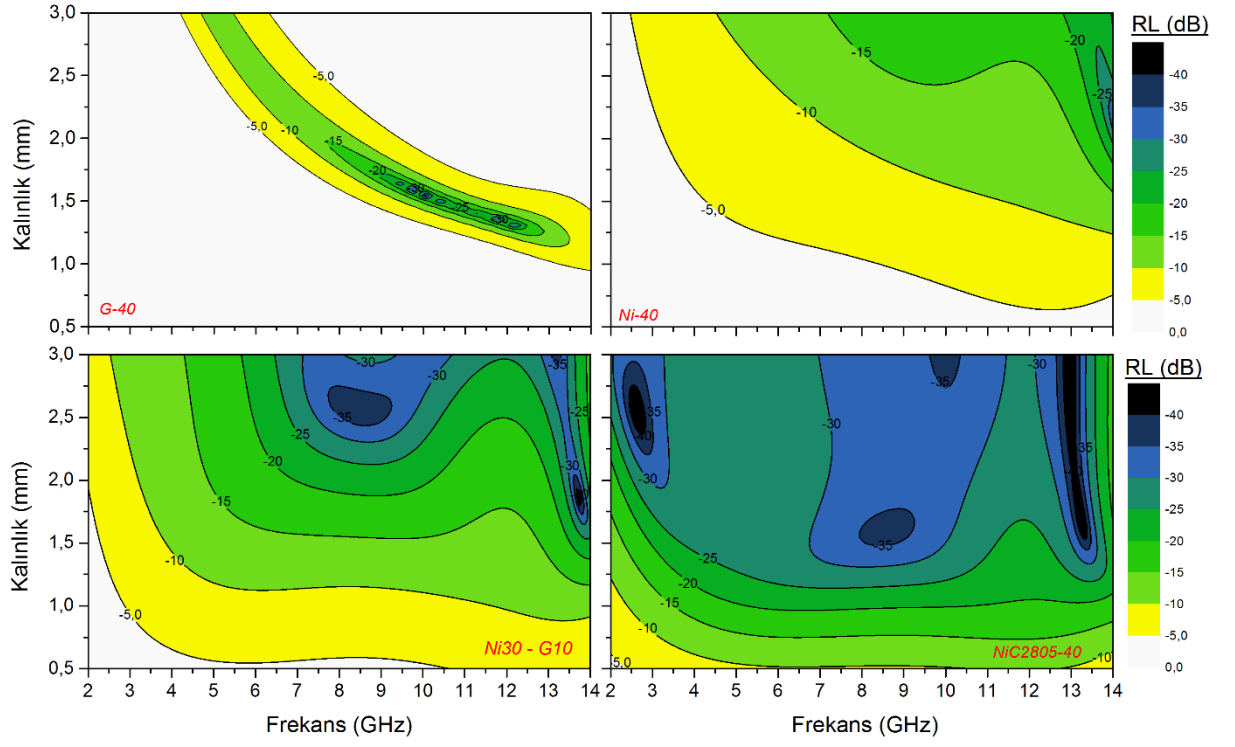
Nikel kaplı karbon hibrit dolgusu şeklinde hazırlanan ancak içerik açısından Ni30-G10 örneğiyle aynı içeriğe sahip NiC2805-40 örneğinin *RL* değerleri incelendiğinde ise bu dört örnek arasındaki en yüksek soğurma performansının bu örneklerle elde edilebildiği görülmektedir. Yapılan hesaplamalara göre yaklaşık olarak 1.75 mm kalınlığındaki örnekle 4-14 GHz aralığının tamamının HPAA olarak elde edilebildiği grafikte görülmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre, karbon/manyetik karışık dolgu içeren örneklerin tek tip dolgu içeren örneklere göre daha yüksek soğurma performanslarına sahip oldukları görülmektedir. Karbon ve manyetik bileşenlerin (kaplama şeklinde) hibrit dolgu olarak hazırlanması ve kullanılması durumunda ise fiziksel karışım dolgu fazına göre daha etkin soğurma performansının elde edilebileceği görülmüştür.





Şekil 4.77: NiC2701 ve NiC2805 serisi örneklerin dış hat grafikleri.

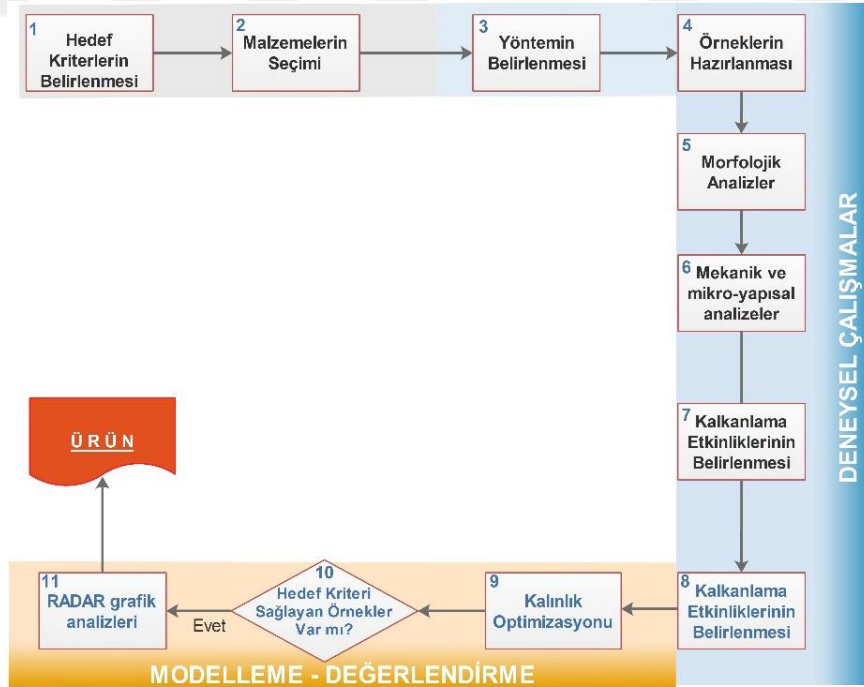


Şekil 4.78: G-40, Ni-40, Ni30-G10 ve NiC2805 örneklerinin dış hat grafikleri.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında son yıllarda malzeme ve savunma sektörlerinin önemli konularından biri olan polimer kompozit esaslı elektromanyetik kalkan ve RADAR sinyalinin soğurucu malzemelerin geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır.

Her iki amaca yönelik malzemeler için de gerek endüstriyel ürün geliştirmeye yönelik çalışmalar gerekse literatürdeki yenilikçi çalışmalar incelendiğinde düşük yoğunluk/kalınlık, düşük maliyet, uzun süreli kullanıma elverişli çevresel/kimyasal dayanım ve hazırlama kolaylığı parametrelerinin, en az ürün performansı kadar önemli değişkenler olduğu görülmektedir. Buradan hareketle tez kapsamında yapılan çalışmalarda yoğunluk/kalınlık, maliyet, fiziksel özellikler ve hazırlama prosesi açısından birçok çalışmaya ve endüstriyel ürüne göre çok daha önemli avantajlar sunan ve en önemlisi yüksek performans kriterlerini sağlayan malzemelerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda polimer kompozit esaslı yüksek performansa sahip elektromanyetik kalkanlama özelliğine sahip malzemelerin geliştirilmesine yönelik yapılan çalışmalarda uygulanan iş akış şeması Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1: Yüksek performans elektromanyetik kalkan geliştirilmesi sırasında uygulanan iş akış şeması.

İş akış şemasının birinci başlığında da belirtildiği gibi; öncelikle tez çalışması sonucu ortaya çıkacak ürün ya da ürünlerin hedef performans özellikleri belirlenmiştir. Bu değerler belirlenirken hem literatür çalışmalarında elde edilen sonuçlar hem de ticari ürünlerin performans değerleri incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda en fazla 5 mm kalınlığa sahip 2-14 GHz aralığının tamamında en az 20 dB, 8-12 GHz aralığında ise 40 dB ve daha üzeri toplam kalkanlama etkinliğine ( $SE_T$ ) sahip levha ya da yüzey kaplaması şeklinde uygulanabilecek düşük yoğunluklu, dış etkilere dayanıklı, düşük maliyetli karbon dolgu polimer kompozitlerin geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Hedef kriterlerin belirlenmesinden sonra polimer kompozit esaslı elektromanyetik kalkan geliştirmesine yönelik çalışmalarda polimer faz olarak termoplastik poliüretan (TPU), dolgu olarak ise farklı karbon türevlerinin kullanılması kararlaştırılmıştır. Esnek yapısı, diğer polimerlere göre yüksek dielektrik sabit değerleri, yüksek yırtılma, kopma ve darbe dayanımı gibi özellikleri nedeniyle film ya da levha formunda kullanılabilirliğinin yanında yüzey kaplaması şeklinde de kullanılabilme imkânı sunan, ayrıca hem eriyik işleme yöntemleriyle hem de çözeltiden döküm gibi farklı yöntemlerle kompozit hazırlamaya uygun olması nedeniyle polimer matris olarak TPU seçilmiştir.. Kompozitlerde dolgu fazı olarak ise karbon dolgular düşük yoğunlukları, korozyona sebep olmamaları, düşük miktarlarda katılmaları halinde dahi gösterdikleri yüksek performans gibi nedenlerle alternatifleri olan metal tozlarına göre tercih edilmiştir.

Genel hatlarıyla kullanılacak malzemelerin belirlenmesinden sonra üretim yönteminin belirlenmesi kademesinde, farklı oranlarda karbon nano elyaf (CNF) üç farklı yöntemle TPU içinde dağıtılmış ve mikro-yapısal özelliklerdeki değişimlerle bu değişimlerin neden olduğu elektromanyetik kalkanlama performansındaki farklılıklar incelenmiştir. Kompozit hazırlama yöntemi olarak manyetik karıştırıcı ile karıştırma uygulanan çözeltiden döküm yöntemi (sc-ms), ultrasonik karıştırmanın uygulandığı çözeltiden döküm yöntemi (sc-us) ve çift vidalı ekstruderde eriyik harmanlama (ext) yöntemi kullanılmıştır. Yapılan SEM analizlerinden elde edilen sonuçlara göre elyafların ekstrüzyon yöntemiyle birçok noktadan kırılarak etkili bir şekilde dağıtılabildiği görülürken, çözeltiden döküm yöntemleri ile hazırlanan örneklerde ise karbon elyafların yoğun ve karmaşık elyaf demetleri şeklinde bulunduğu gözlemlenmiştir. Çözeltiden döküm yöntemi ile hazırlanan örneklerde ultrasonik karıştırıcının etkisiyle sc-us serisi örneklerde elyafların belirli noktalardan kırılarak sc-ms serisi örneklere göre daha homojen bir dağılımın sağlandığı görülmüştür. SEM gözlemlerinde ayrıca elyaf taneciklerinin

boylarındaki kırılmalardan yola çıkılarak farklı yöntemlerle hazırlanan kompozit serileri için dağılım oranı ( $A_f$ ) değerlerinin  $A_{f-ext} < A_{f-sc-us} < A_{f-sc-ms}$  şeklinde değiştiği görülmüştür. Farklı üretim yöntemleriyle hazırlanan kompozitlerin  $dc$ -iletkenlik değerleri kıyaslandığında, dağılımın daha kötü ancak  $A_f$  değerlerinin daha yüksek olduğu sc-ms serisi kompozitlerinin aynı oranda dolgu içeren diğer serideki örneklere nazaran daha yüksek iletkenliğe sahip oldukları gözlenmiştir. Örneklerin permitivite ( $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$ ) değerleri üzerinden hesaplanan  $SE_A$ ,  $SE_R$  ve  $SE_T$  performansları incelendiğinde ise beklendiği şekilde daha yüksek elektriksel iletkenliğe,  $A_f$  değerlerine ve daha kötü dolgu dağılımına sahip olan sc-ms serisi örneklerin daha yüksek kalkanlama etkinliği gösterdikleri tespit edilmiştir. Elde edilen değerler açısından karşılaştırma yapıldığında sc-ms yöntemine göre hazırlanan ve 20 phr oranında CNF içeren (CNF20-sc-ms) 1 mm kalınlığındaki örneğin 2-14 GHz frekans aralığı için  $SE_T$  değerlerinin 12.5-22.0 dB arası değiştiği görülürken, aynı CNF oranında ve örnek kalınlığında sc-us yöntemiyle hazırlanan örneğin  $SE_T$  değerlerinin yine aynı frekans aralığında 13.0-17.5 dB arasında, ext yöntemiyle hazırlanan örneğin ise 5.0-7.5 dB arasında değiştiği belirlenmiştir. Elde edilen değerlendirmelerden yola çıkarak elektromanyetik kalkan geliştirmesine yönelik deneysel çalışmalarda manyetik karıştırıcının kullanıldığı çözültiden döküm (sc-ms) yönteminin kullanılması daha uygun olarak görülmüştür.

Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan yöntemin belirlenmesinden sonraki örnek hazırlama süreçlerinde uygun karbon tipi ve oranının bulunması amacıyla karbon siyahı (CB), grafit (G), genişletilmiş grafit (EG), karbon nano elyaf (CNF) ve çok duvarlı karbon nanotüp (CNT) içeren TPU/karbon polimer kompozitleri hazırlanmıştır. Hazırlanan örneklere yine ilk kademedekine benzer şekilde SEM analizleri,  $dc$ -iletkenlik testleri, dinamik mekanik analiz ve mikrodalga geçirgenlik testleri uygulanmıştır.

SEM analizlerinde küresel geometriye sahip nano boyutlu karbon siyahı taneciklerinin polimer yapı içerisinde homojen bir dağılım gösterdiği, nano boyutlu olan karbon siyahının birkaç mikrondan oluşan küçük yığılımlar şeklinde bulunduğu tespit edilmiştir. Tabakalı yapıya sahip grafit ve genişletilmiş grafitin SEM görüntülerinde de karbon siyahına benzer şekilde önemli bir dağılım sorunu görülmemekle birlikte özellikle patlatma işlemiyle tabakalar arası açılan genişletilmiş grafitin dağıtılması için gerekli kayma geriliminin örnek hazırlama esnasında oluşturulamaması nedeniyle EG tabakalarının tam olarak dağıtılamadığı görülmüştür. Her iki dolgunun da SEM görüntülerinde, özellikle yüksek dolgu oranlarında tabakaların birbirleriyle

temas ettikleri gözlenmiştir. CNF ve CNT serisi örneklerin SEM görüntülerinde ise tam olarak dağıtılamamış elyaf demetlerinin görüntüsü dikkat çekmektedir.

Örneklere mekanik dayanım parametrelerinden olan saklanan modül ( $E'$ ) değerlerinin belirlenmesi ve önemli bir mikroyapı parametresi olan dağılım oranı ( $A_f$ ) değerlerinin belirlenmesi amacıyla dinamik mekanik analiz (DMA) cihazında testler uygulanmıştır. DMA sonuçlarına göre TPU'nun camsı geçiş sıcaklığının yaklaşık olarak  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  olduğu ve bu sıcaklığın dolgu tipi ya da oranından etkilenmediği gözlenmiştir. Dolguların takviyeleme etkinliklerini karşılaştırmak amacıyla aynı oranda (20 phr) dolgu içeren örneklerin  $60\text{ }^\circ\text{C}$ 'deki  $E'$  değerindeki iyileşmeler karşılaştırılmış ve  $\text{CNT} > \text{CNF} > \text{G} > \text{EG} > \text{CB}$  sıralamasının olduğu görülmüştür. Genleştirilmiş grafitin özellikle grafitte oranla daha yüksek olması beklenen takviye etme kabiliyetinin gözlenememesi daha önce SEM görüntülerinde yorumlandığı şekilde tabakaları dağıtmak için gerekli kayma geriliminin oluşturulamaması ile ilişkilendirilmiştir. DMA çalışmalarının diğer önemli bir kısmını oluşturan  $A_f$  değerlerinin belirlenmesi ise deneysel olarak belirlenen  $E'$  değerlerinin modifiye-Guth denklemiyle modellenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Modelleme sonuçlarına göre dolguların kompozit yapı içerisindeki  $A_f$  değerlerinin " $A_{f-\text{CNT}} > A_{f-\text{CNF}} > A_{f-\text{G}} > A_{f-\text{EG}} > A_{f-\text{CB}}$ " şeklinde sıralandığı belirlenmiştir.

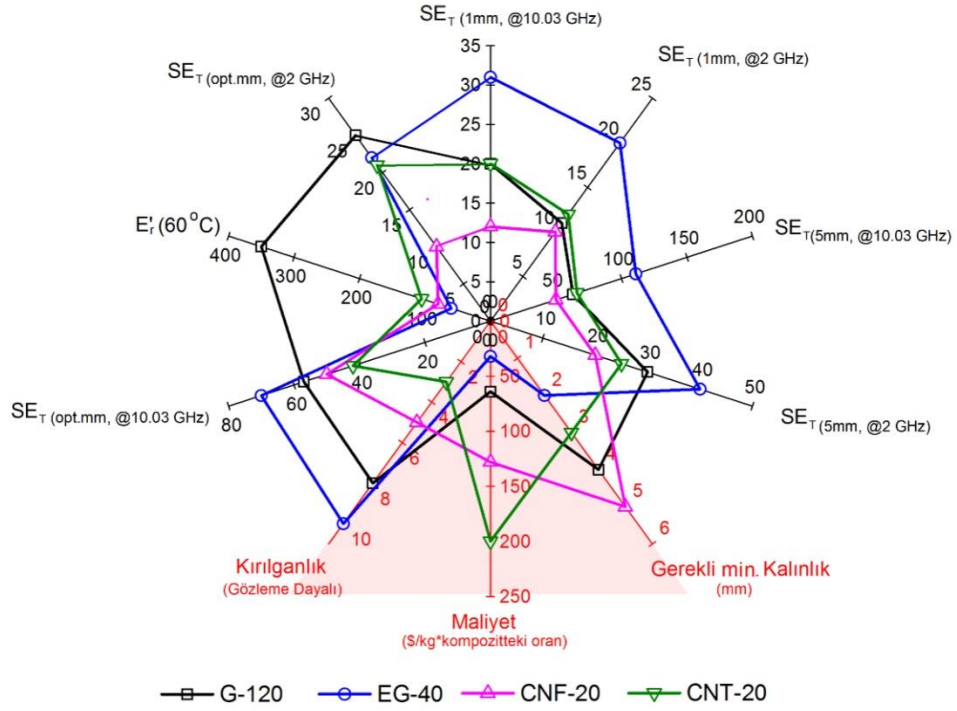
Örneklerin morfolojik ve mikro-yapısal parametreleriyle ilgili olarak yapılan değerlendirmelerden sonra doğrusal akım altındaki elektriksel iletkenlikleri ( $dc$ -iletkenlik) dolgu tipi ve oranının değişimine göre değerlendirilmiştir. İletkenlik değerlerinin değişiminin verildiği grafiklerde dolgu oranının artışına bağlı olarak elektriksel iletkenlik değerindeki önemli artışın gerçekleştiği dolgu oranı olarak tanımlanan elektriksel perkolasyon değerlerinin CB için 3-5 phr arası, EG ve G için 10-20 phr arası, CNF ve CNT için ise 1-3 phr arasında olduğubelirlenmiştir. Elde edilen iletkenlik değerlerine göre, kompozitlerin elektriksel iletkenliklerinin iyileştirilmesinde nano boyutlu ve yüksek  $A_f$ 'ye sahip CNT ve CNF'nin diğer dolgulara göre daha etkili olduğu görülmüştür. Diğer yandan, mikron boyutlu G ve EG' nin kompozit yapı içine (ağırlıkça) daha yüksek oranda katılabilmeleri nedeniyle (120 phr oranına kadar) bu dolgularla hazırlanan kompozitlerde daha yüksek iletkenlik değerleri elde edilebilmiştir.

Hazırlanan örneklerin kalkanlama etkinliklerinin belirlenmesi ise koaksiyel iletim hattı tekniğine göre 2-14 GHz arasındaki ölçümlerle gerçekleştirilmiştir. Kompozitlerin kalkanlama etkinliklerinin belirlenmesinde öncelikle permitivite katsayıları belirlenmiş daha sonra çeşitli

matematiksel formüller aracılığıyla kalkanlama etkinlik değerleri ( $SE_A$ ,  $SE_R$  ve  $SE_T$ ) hesaplanmıştır. Kalkanlama etkinlikleri öncelikle 1 mm kompozit kalınlığı için hesaplanmış daha sonra tez kapsamında ortaya konan hedeflerin sağlanabilmesi amacıyla farklı kalınlıklar için hesaplanmıştır. 1 mm kalınlığındaki örnekler için hesaplanan kalkanlama etkinlikleri değerlendirildiğinde ağırlıkça birim dolgu başına en yüksek etkinliğin CNT serisi örneklerde olduğu görülmüştür. Elde edilen en yüksek kalkanlama etkinliği açısından değerlendirildiğinde ise EG-40 örneğinin diğer örneklere göre çok daha etkili bir kalkanlama gerçekleştirdiği bulunmuştur. EG-40 örneğinin bu yüksek etkinliğinde genişletilmiş grafit tabakalarının arasına giren ince polimer tabakalarının çok daha yüksek oranda polarize olarak elektromanyetik dalganın enerjisini absorplamasının etkili olduğu düşünülmektedir. Sonuçlar başta mekanik özellikler olmak üzere birçok fiziksel özellik üzerinde etkili olan  $A_f$  parametresinin kalkanlama etkinliklerinin açıklanmasında yetersiz kaldığını daha doğru bir sebep sonuç ilişkisinin kurulması için diğer mikro-yapısal ve fiziksel parametrelerin de hesaba katılması gerekliliğini göstermektedir.

Elde edilen kalkanlama etkinlik değerleri hedefler doğrultusunda incelendiğinde 1 mm kalınlığın birçok uygulama ve tez kapsamında belirlenen hedeflerin sağlanmasında yetersiz kaldığı görülmüş ve farklı kalınlıklar için kalkanlama etkinlikleri hesaplanarak hedef değerler sağlanmaya çalışılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, tez kapsamında performans hedefi olarak belirlenen 2-14 GHz frekans aralığının tamamında en az 20 dB, 8-12 GHz aralığında ise en az 50 dB  $SE_T$  değerlerinin elde edilmesi açısından değerlendirildiğinde, CB-30 ve CNF-20 örneklerinin 5 mm'ye kadarki hiçbir kalınlıkta istenilen performansı sağlayamadığı, EG-40 örneğinin 3 mm'den daha yüksek kalınlıklarda, CNT-20 ve G-120 örneklerinin ise en az 5 mm kalınlıkta hedef özellikleri sağlayabildiği görülmüştür. Şekil 5.2'de verilen RADAR grafiklerinde istenilen performansı sağlayan örnekler diğer fiziksel özellikleri açısından da değerlendirilmiştir.



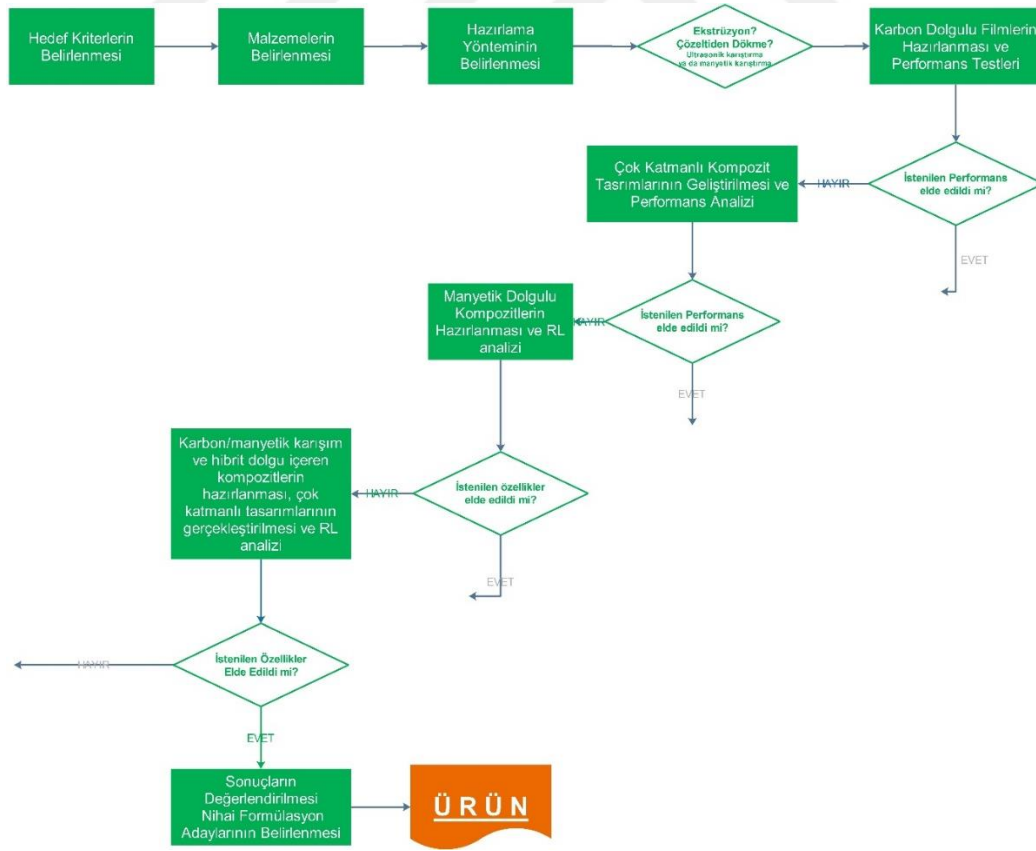
Şekil 5.2: Elektromanyetik kalkan uygulaması için hedef performansı sağlayan ürünlerin karşılaştırmalı analizi.

Şekilde tez kapsamında ortaya konan hedefleri sağlayabilen örneklerin elektromanyetik dalga kalkanlama etkinlikleriyle ilgili olarak 10.03 ve 2 GHz frekansı için 1 mm ve 5 mm kalınlığındaki  $SE_T$  değerleriyle gerekli şartları sağlayan en düşük kalınlık için 2 ve 10.03 GHz frekansındaki  $SE_T$  değerleri özetlenmiştir. Grafikte kalkanlama etkinliğinin yanı sıra pratik uygulamalar için gerekli yaklaşık maliyetleri, gözlme dayalı olarak kırılgenlikleri ve dolgunsuz TPU'nun depolanan modülünün dolgu ilavesiyle ne oranda geliştiğinin göstergesi olan bağlı saklanan modül ( $E_r$ ) değerleri de özetlenmiştir. Grafikte yüksek değerlerin hedeflendiği parametreler siyah renkle gösterilirken maliyet gibi düşük değerlerin hedeflendiği parametreler kırmızı renkle gösterilmiştir. Kalkanlama etkinliğiyle ilgili parametreler incelendiğinde en yüksek performansın EG-40 örneğiyle elde edilebildiği görülürken G-120 ve CNT-20 örneklerinin özellikle 1 ve 5 mm kalınlık için 2 ve 10.03 GHz' de birbirlerine yakın performans sergiledikleri görülmektedir. En uygun kalınlık için elde edilen  $SE_T$  değerleri incelendiğinde ise G-120 örneğinin CNT-20 örneğine göre sahip olduğu yüksek performans ile daha öne çıktığı görülmektedir. Hedef şartları sağlayabilen en düşük kalınlık değerleri kıyaslandığında ise en



yüksek performansın elde edildiği EG-40 örneğiyle 2 mm kalınlığında hedeflerin sağlanabildiği görülürken aynı hedeflerin CNT-20 örneğiyle 3 mm'de, G-120 örneğiyle 4 mm, CNF-20 örneğiyle de 5 mm'de sağlanabildiği görülmektedir. Örneklerin kırılma ve bağlanma modül değerleri karşılaştırıldığında ise  $E_r$  değerlerindeki en yüksek iyileşmenin G-120 örneğinde olduğu görülürken diğer örneklerin birbirlerine yakın  $E_r$  değerlerine sahip oldukları görülmektedir. Kırılma açısından ise özellikle EG-40 olmak üzere E-40 ve G-120 örneklerinin diğer örneklere göre çok daha kırılma oldukları değerlendirilmiştir. Son olarak G-120 ve EG-40 örneklerinin diğer örneklere göre maliyet açısından da önemli avantaj sunduğu değerlendirilmiştir. Yapılan analiz ve karşılaştırmaların sonucu olarak EG-40 örneğinin gerek performans gerekse maliyet açısından sağladığı avantajlarla karbon dolgu yüksek performansa sahip bir elektromanyetik kalkan geliştirilmesinde kullanılmasının diğer örneklere göre daha uygun olacağı kararlaştırılmıştır.

RADAR sinyalini soğurabilen (RAM) polimer esaslı kompozitlerin geliştirilmesine yönelik yapılan deneysel ve teorik çalışmalara ait iş akış planı ise Şekil 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.3: Polimer kompozit esaslı RAM geliştirilmesi sırasında uygulanan iş akış şeması.

Tez çalışmasının bu bölümünde ağırlık etkisinin önemli olduğu uçak, füze ve rüzgâr türbini gibi araç ve ekipmanların RADAR sistemleri tarafından tespitini zorlaştıran ya da engelleyen esnek, ince yüzey kaplamalarının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Konuyla ilgili olarak yapılan ticari ürün bilgileri ve literatür çalışmaları yüzey kaplaması olarak kullanılacak bir RAM'ın geniş frekans aralığında etkin soğurma yapabilmesi, düşük kalınlık ve yoğunluğa sahip olması, kullanım koşullarında kimyasal, fiziksel ve performans özelliklerini uzun süre boyunca koruyabilmesi, üretim ve uygulama kolaylığı ve düşük maliyet özelliklerine sahip olması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu kapsamda tez çalışmasında geliştirilmek istenen RAM için kantitatif hedefler; 8.2-12.4 GHz (X-band) frekans aralığında -20 dB ya da daha düşük yansıma kaybı ( $RL$ ) değeri, kalınlığının 3 mm'yi geçmemesi, yüksek irtifalardaki düşük sıcaklıklardan (yaklaşık -40 °C) normal ortam koşullarından daha yüksek sıcaklıklara (~40-50 °C) kadar geniş bir sıcaklık aralığında fiziksel özelliklerini koruyabilmesi olarak belirlenmiştir.

Bir elektromanyetik dalga olan RADAR sinyallerini soğurabilen malzemelerle ilgili yapılan literatür araştırmaları, karbon ve manyetik esaslı dolgularla hazırlanmış polimer kompozitlerin bu alanda en yaygın kullanılan malzemeler olduğunu göstermektedir. Ancak özellikle son yıllarda yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde düşük yoğunlukları, işleme kolaylıkları, düşük oranda katılmalarının yeterli gelmesi ve oksidasyon ya da korozyona neden olmamaları nedeniyle uzun yıllar boyunca performanslarını koyabilmeleri gibi avantajları nedeniyle karbon dolgular polimer kompozit esaslı RAM geliştirilmesinde daha çok tercih edildiği görülmüştür. Buradan hareketle öncelikle dolgu olarak CB, G, EG, CNF ve CNT olmak üzere beş farklı karbon türevleri kullanılmıştır. Polimer faz olarak ise camsı geçiş sıcaklıkları -50 – (-40), erime sıcaklıkları ise 200 °C' lere ulaşan, esnek yapısı sayesinde yüksek dolgu oranlarında dahi yüzey kaplaması olarak kullanılacak mekanik ve fiziksel özelliklere sahip TPU kullanılmıştır.

Hazırlama yönteminin belirlenmesinden sonra bileşimleri Tablo 4.2'de verilen farklı oranlarda CB, G, EG, CNF ve CNT içeren TPU/karbon kompozitleri hazırlanarak vektör network analizörü kullanılarak öncelikle permitivite değerleri daha sonra da  $RL$  değerleri hesaplanmıştır. En yüksek performans gösteren karbon dolgulu kompozitin ve kalınlık değerinin belirlenmesi için öncelikle her örnek serisindeki en yüksek performans gösteren örnek belirlenmiş daha sonra bu örneğin farklı kalınlıklardaki  $RL$  değerleri de incelenerek en yüksek performans için gerekli kalınlık değerleri ve bu kalınlık için elde edilecek performans parametreleri incelenmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda tek katmanlı karbon dolgulu TPU kompozitleriyle elde edilen değerlerin hedeflerin çok gerisinde kaldığı gözlenmiştir.

Oluşturulan dış hat grafiklerinde incelenen  $RL$  değerlerinde hedef frekans aralığı olan 8.2-12.4 GHz'in tamamında  $<-10$  dB (EAA) kriterinin bile sağlanamadığı gözlemlenmiştir.

Tek katmanlı karbon dolgulu kompozitlerin performanslarının yetersiz görülmesi üzerine literatürde EAA ve  $RL_{min}$  değerlerinin geliştirilmesi için yaygın kullanılan yöntemlerden biri olan çok katmanlı tasarımların belirlenmesi işlemi uygulanmıştır. Bir önceki kademedeki hazırlanarak permitivite değerleri belirlenen TPU/karbon kompozitlerinin verilerinden yola çıkarak genetik algoritma yardımıyla hedef kriterleri sağlayabilecek kompozit tasarımlarının belirlenmesi çalışmalarında da istenilen performans değerleri elde edilememiş ancak literatürdeki birçok çalışma için başarı kriteri olarak kabul edilen X-band aralığının tamamı EAA olacak şekilde performans gösteren 1.92 mm kalınlığında 4 katmanlı bir tasarım modeli belirlenebilmiştir.

Tez kapsamında belirlenen hedef kriterlerin karbon içerikli kompozitlerle sağlanamaması üzerine RAM uygulamaları için diğer bir alternatif dolgu olan manyetik özellikli dolgular kompozit yapıya katılarak farklı kalınlık ve frekans değerleri için  $RL$  değerleri belirlenmiştir. Bu kısımda manyetik dolgu olarak  $Fe_3O_4$ ,  $BaFe_2O_4$ ,  $La_{0.6}Sr_{0.4}FeO_3$  ve Ni kullanılmıştır. Yapılan değerlendirmelerde sadece 3 mm kalınlığındaki 120 phr oranında  $Fe_3O_4$  içeren  $Fe_3O_4$ -120 örneği ve 2.2 mm kalınlığındaki 80 phr oranında Ni içeren Ni-80 örneklerinin  $RL$  değerleriyle ilgili performans parametrelerini sağlayabildikleri görülmüştür. Ancak bu örneklerin kalınlık ve yüksek yoğunluk gibi fiziksel özellikler açısından hedef kriterlerin üzerinde olduğu görülerek daha yüksek performansla daha düşük kalınlığa ve yoğunluğa sahip kompozitlerin geliştirilmesi için manyetik ve karbon dolguların bir arada kullanılması değerlendirilmiştir.

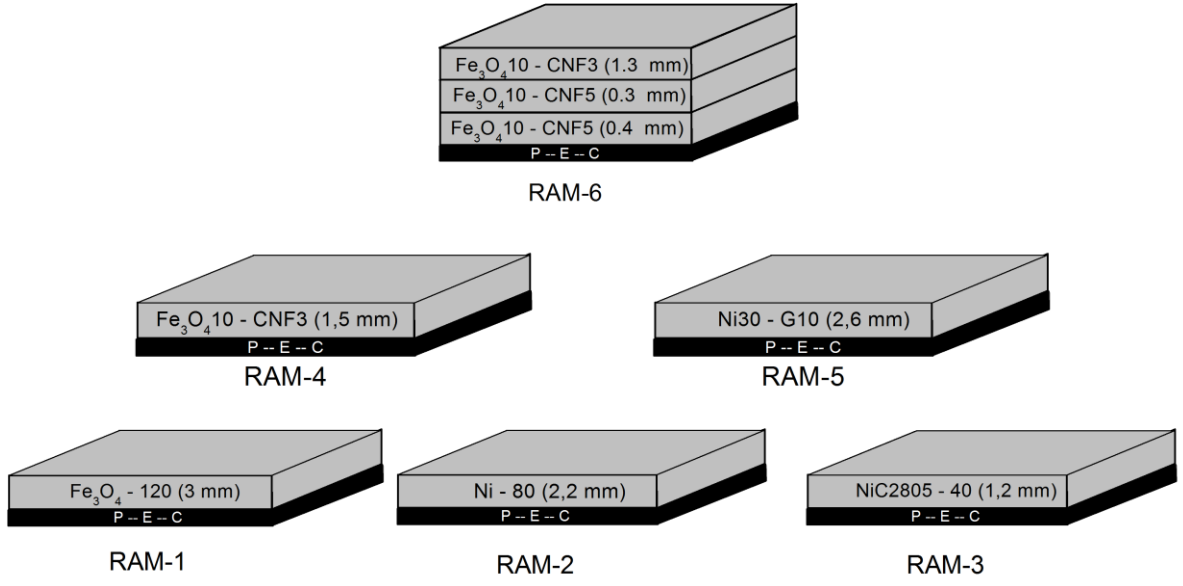
Son olarak belirlenen hedefleri daha düşük ağırlıkta sağlayabilen kompozitlerin geliştirilmesine yönelik olarak farklı özelliklerdeki dolguların karışımından oluşan karışık dolgu ve karbon/manyetik hibrit dolgu içeren kompozitler hazırlanarak performans özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla iki farklı sınıfta hazırlanan örnek serilerinin ilkinde manyetik dolgular arasında en yüksek performansın elde edildiği  $Fe_3O_4$  ile karbon dolgular arasında özellikle EAA açısından görece yüksek performansın elde edildiği CNF'nin farklı oranlarda karışımlarından oluşan dolgu fazı kullanılmıştır. Karbon/manyetik dolgu fazı içeren ikinci seri örneklerde ise öncelikle kompozisyonları değişiklik gösteren 2 farklı nikel kaplı grafitik karbon (NiC) hibrit dolgusu kullanılmıştır. Hibrit dolguların etkinliğinin karışım dolgularla karşılaştırılabilmesi amacıyla hibrit dolgulu kompozitlerle aynı içeriğe sahip olacak şekilde nikel ve grafit dolgu

karışımından oluşan karşılaştırma örnekleri de hazırlanarak elektromanyetik dalga soğurma performansları incelenmiştir.

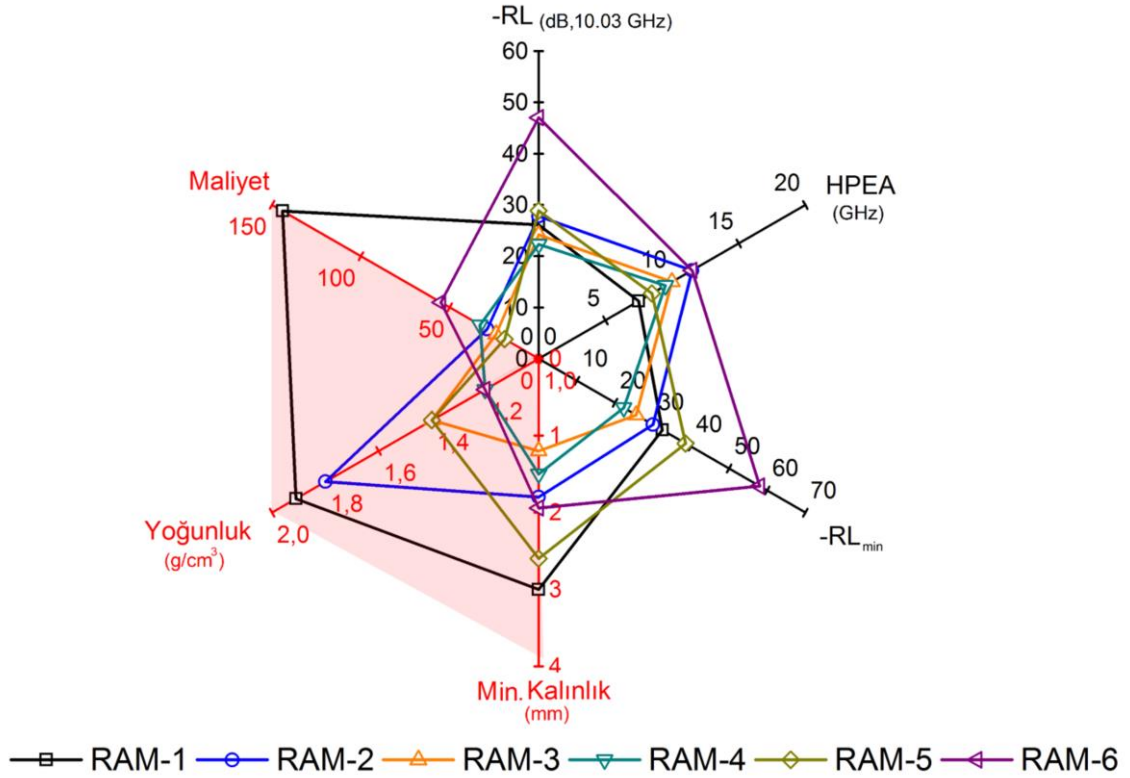
$Fe_3O_4/CNF/TPU$  kompozit örneklerinin  $RL$  değerleri, tek tip dolgu içeren  $Fe_3O_4$ - ve CNF-serisi örneklerle karşılaştırmalı olarak incelendiğinde  $Fe_3O_4$  ve CNF dolgularının bir arada kullanımlarında sinerjik etki gösterdikleri ve tekli bileşimlere göre çok daha düşük dolgu oranlarında çok daha düşük  $RL$  değerlerinin elde edilebildiği görülmüştür. Tez kapsamında belirlenen en fazla 3 mm kalınlığında X-band aralığının tamamının HPAA olması hedefinin  $Fe_3O_4/CNF$  içeren birçok örnekle sağlanabileceği görülmesine rağmen dolgu oranı diğerlerine göre daha düşük olan  $Fe_3O_4/CNF$  örneği,  $TPU/Fe_3O_4/CNF$  örnekleri arasındaki en yüksek performans gösteren ürün olarak belirlenmiştir. Denemelerde ayrıca daha yüksek performansın elde edilebilmesi amacıyla  $TPU/Fe_3O_4/CNF$  kompozitleri arasında daha yüksek performansa sahip çok katmanlı RAM geliştirilebilmesi amacıyla GA temelli tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiş ve hedef değerlerin dahi oldukça üzerinde performansa sahip tasarımı Şekil 5.4'de verilen 3 katmanlı ürün tasarımı belirlenmiştir.

Nikel kaplanmış grafit yapısına sahip hibrit dolgularla yapılan denemelerde ise %75 nikel %25 karbon içeriğine sahip dolgudan 40 phr oranında içeren kompozit örneğinin (NiC2805-40)'de 1.2 mm kalınlığında hedef performans kriterlerini sağlayabildiği görülmüştür. Bu kısımda ayrıca NiC2805-40 örneğine karşılık gelen oranlarda nikel ve grafit karışık dolgu fazı içeren bir örnekte (Ni30-G10) hazırlanmış ve  $RL$  değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında bu örneğin hedef performans değerlerini sağlayabildiği görülmüş fakat hibrit dolguların performanslarının çok daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Şekil 5.4'de tez boyunca RAM geliştirilmesi amacıyla gerçekleştirilen çalışmalarda belirlenen hedefler doğrultusunda ortaya konan performans kriterlerini sağlayan seçilmiş ürünlerin tasarımları, Şekil 5.5'de ise bu örneklerin hedef kriterler açısından birbirleriyle olan karşılaştırması verilmiştir. Şekil 5.5 değerlendirildiğinde RAM-6 tasarımının bütün performans parametrelerinde çok daha önde olduğu ve yoğunluk, maliyet ve kalınlık açısından diğer alternatiflerinin aksine düşük değerlere sahip olması da, bütün örnekler içerisinde ticarileştirilebilme potansiyeli en yüksek ürün olduğunu göstermektedir. Ayrıca görece tek katmanlı yapısı sayesinde üretim kolaylığı bulunan RAM-3 kodlu örneğin de bütün hedef kriterlerini sağlamakla birlikte kalınlık, maliyet ve yoğunluk gibi parametreler açısından düşük değerlere sahip olması bu ürünün de birçok uygulamada kullanılmaya elverişli olabileceğini göstermiştir.



Şekil 5.4: RAM uygulaması için hedef performansı sağlayan tasarımların şematik gösterimi.



Şekil 5.5: RAM uygulaması için hedef performansı sağlayan tasarımların karşılaştırmalı analizi.

Tez çalışmasının devamında formülasyonları ve deneysel örnekleri hazırlanan örneklerin öncelikle prototip ölçekte hazırlanması ve akredite kurumlar tarafından performans testlerinin gerçekleştirilerek ürüne ait kalite sertifikalarının temin edilmesi planlanmaktadır. Daha sonra ise patent başvurularının yapılarak başta kamu tarafından sağlanan desteklerin katkısıyla ürünün ticari olarak üretiminin gerçekleştirilerek ülkemizdeki bu alandaki yerli üretim eksikliğinin giderilmesi hedeflenmektedir.



## KAYNAKLAR

- [1]. Köksal, A., 2012, *Mühendislik elektromanyetiğinin temelleri*, Palme Yayıncılık, Ankara.
- [2]. Celozzi, S., Lovat, G., Araneo, R., 2008, *Electromagnetic shielding*, Wiley Online Library.
- [3]. Someda, CG., 2006, *Electromagnetic waves*, CRC Press, Great Britain.
- [4]. Tong XC., 2016, *Advanced materials and design for electromagnetic interference shielding*, CRC press.
- [5]. McDowell, A.J., Hubbing, T., 2016, Decomposition of shielding effectiveness into absorption and reflection components, *Clemson University technical report*, CVEL-14-0581.
- [6]. Panwar, R., Agarwala, V., Singh, D., 2015, A cost effective solution for development of broadband radar absorbing material using electronic waste, *Ceramics International*, 41 (2), 2923-2930.
- [7]. Wang, J., Wang, J., Xu, R., Sun, Y., Zhang, B., Chen, W., 2015, Enhanced microwave absorption properties of epoxy composites reinforced with Fe 50 Ni 50-functionalized graphene. *Journal of Alloys and Compounds*, 653, 14-21.
- [8]. Liang, J., Wang, Y., Huang, Y., Ma, Y., Liu, Z., Cai, J., 2009, Electromagnetic interference shielding of graphene/epoxy composites, *Carbon*, 47 (3), 922-925.
- [9]. Thomassin, J-M., Jerome, C., Pardoën, T., Bailly, C., Huynen, I., Detrembleur, C., 2013, Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 74 (7), 211-232.
- [10]. Yan, DX., Pang, H., Li, B., Vajtai, R., Xu, L., Ren, PG., 2015, Structured Reduced Graphene Oxide/Polymer Composites for Ultra-Efficient Electromagnetic Interference Shielding. *Advanced Functional Materials*. 25 (4), 559-566.
- [11]. Yang, Y., Gupta, MC., Dudley, KL., Lawrence, RW., 2005, Novel carbon nanotube-polystyrene foam composites for electromagnetic interference shielding, *Nano letters*, 5 (11), 2131-2134.
- [12]. Al-Saleh, MH., Sundararaj, U., 2009, Electromagnetic interference shielding mechanisms of CNT/polymer composites, *Carbon*, 47 (7), 1738-1746.
- [13]. Geetha, S., Satheesh, K., Rao, CR., Vijayan, M., Trivedi, D., 2009, EMI shielding: Methods and materials—A review, *Journal of applied polymer science*, 112 (4), 2073-2086.
- [14]. Huang, JC.. 1995, EMI shielding plastics: a review. *Advances in polymer technology*, 14 (2), 137-150.

- [15]. Huang, Y-L., Yuen, S-M., Ma, C-CM., Chuang, C-Y., Yu, K-C., Teng, C-C., 2009, Morphological, electrical, electromagnetic interference (EMI) shielding, and tribological properties of functionalized multi-walled carbon nanotube/polymethyl methacrylate (PMMA) composites, *Composites Science and Technology*, 69 (11), 1991-1996.
- [16]. Li, Y., Chen, C., Zhang, S., Ni, Y., Huang, J., 2008, Electrical conductivity and electromagnetic interference shielding characteristics of multiwalled carbon nanotube filled polyacrylate composite films, *Applied Surface Science*, 254 (18), 5766-5771.
- [17]. Schelkunoff, S., 1938, The impedance concept and its application to problems of reflection, refraction, shielding and power absorption. *Bell Labs Technical Journal*, 17 (1), 17-48.
- [18]. Schelkunoff, SA., The electromagnetic theory of coaxial transmission lines and cylindrical shields, 1934, *Bell Labs Technical Journal*, 13 (4), 532-579.
- [19]. Sambyal, P., Singh, AP., Verma, M., Farukh, M., Singh, BP., Dhawan, S., 2014, Tailored polyaniline/barium strontium titanate/expanded graphite multiphase composite for efficient radar absorption. *RSC Advances*, 4 (24), 12614-12624.
- [20]. Baker, J., Vanzura, EJ., Kissick, WA., 1990, Improved technique for determining complex permittivity with the transmission/reflection method, *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 38 (8), 1096-1103.
- [21]. Bartley, PG., Begley, SB., 2010, A new technique for the determination of the complex permittivity and permeability of materials, *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 54-57.
- [22]. Nicolson, A., Ross, G., 1970, Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 19 (4), 377-382.
- [23]. Hippel, A,R., Morgan, S., 1955, Dielectric materials and applications, *Journal of The Electrochemical Society*, 102 (3), 68C-68C.
- [24]. KeysightTechnologies, 2015, Keysight Technologies Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials.
- [25]. Chung, D., 2001, Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials. *Carbon*, 39 (2), 279-285.
- [26]. Luo, DCX., 1996, Electromagnetic interference shielding reaching 130 dB using flexible graphite, *MRS Online Proceedings Library Archive*, 445.
- [27]. Park, J,G., Louis, J., Cheng, Q., Bao, J., Smithyman, J., Liang, R., 2009, Electromagnetic interference shielding properties of carbon nanotube buckypaper composites, *Nanotechnology*, 20 (41), 415702.



- [28]. Shen, B., Zhai, W., Zheng, W., 2014, Ultrathin flexible graphene film: an excellent thermal conducting material with efficient EMI shielding, *Advanced Functional Materials*, 24 (28), 4542-4548.
- [29]. Dhawan, S., Singh, N., Rodrigues, D., 2003, Electromagnetic shielding behaviour of conducting polyaniline composites, *Science and Technology of Advanced Materials*, 4 (2), 105-113.
- [30]. Lakshmi, K., John, H., Mathew, K., Joseph, R., George, K., 2009, Microwave absorption, reflection and EMI shielding of PU–PANI composite, *Acta Materialia*, 57 (2), 371-375.
- [31]. Lee, C., Song, H., Jang, K., Oh E., Epstein, A., 1999, Electromagnetic interference shielding efficiency of polyaniline mixtures and multilayer films. *Synthetic Metals*, 102 (1-3), 1346-1349.
- [32]. Mäkelä, T., Pienimaa, S., Taka, T., Jussila, S., Isotalo, H., 1997, Thin polyaniline films in EMI shielding. *Synthetic Metals*, 85 (1-3), 1335-1336.
- [33]. Wang, Y., Jing, X., 2005, Intrinsically conducting polymers for electromagnetic interference shielding. *Polymers for advanced Technologies*, 16 (4) , 344-351.
- [34]. Joseph, N., Varghese, J., Sebastian, MT., 2017, Graphite reinforced polyvinylidene fluoride composites an efficient and sustainable solution for electromagnetic pollution. *Composites Part B: Engineering*, 123, 271-278.
- [35]. Kausar, A., Rafique, I., Muhammad, B., 2017, Electromagnetic Interference Shielding of Polymer/Nanodiamond, Polymer/Carbon Nanotube, and Polymer/Nanodiamond–Carbon Nanotube Nanobifiller Composite: A Review, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 56 (4), 347-363.
- [36]. Kim, K-W., Han, W., Kim, B-S., Kim, B-J., An K-H., 2017, A study on EMI shielding enhancement behaviors of Ni-plated CFs-reinforced polymer matrix composites by post heat treatment, *Applied Surface Science*, 415, 55-60.
- [37]. Liu, Z., Bai, G., Huang, Y., Ma, Y., Du, F., Li, F., 2007, Reflection and absorption contributions to the electromagnetic interference shielding of single-walled carbon nanotube/polyurethane composites. *Carbon*, 45 (4), 821-827.
- [38]. Chung, D., 2000, Materials for electromagnetic interference shielding. *Journal of Materials Engineering and performance*, 9 (3), 350-354.
- [39]. Dar, MA., Majid, K., Najar, MH., Kotnala, R., Shah J, Dhawan S, 2017, Surfactant-assisted synthesis of polythiophene/Ni<sub>0.5</sub> Zn<sub>0.5</sub> Fe<sub>2-x</sub> Ce<sub>x</sub> O<sub>4</sub> ferrite composites: study of structural, dielectric and magnetic properties for EMI-shielding applications. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 19 (16), 10629-10643.
- [40]. Verma, M., Singh, AP., Sambyal, P., Singh, BP., Dhawan, S., Choudhary, V., 2015, Barium ferrite decorated reduced graphene oxide nanocomposite for effective electromagnetic interference shielding, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17 (3), 1610-1618.

- [41]. Paul, CR., 2006, Introduction to electromagnetic compatibility, John Wiley & Sons.
- [42]. Balberg, I., 2002, A comprehensive picture of the electrical phenomena in carbon black–polymer composites, *Carbon*, 40 (2), 139-143.
- [43]. Gubbels, F., Blacher, S., Vanlathem, E., Jérôme, R., Deltour, R., Brouers, F., 1995, Design of electrical composites: determining the role of the morphology on the electrical properties of carbon black filled polymer blends, *Macromolecules*, 28 (5), 1559-1566.
- [44]. Sumita, M., Sakata, K., Asai, S., Miyasaka, K., Nakagawa, H., 1991, Dispersion of fillers and the electrical conductivity of polymer blends filled with carbon black, *Polymer bulletin*, 25 (2), 265-271.
- [45]. Wu, G., Asai, S., Zhang, C., Miura, T., Sumita, M., 2000, A delay of percolation time in carbon-black-filled conductive polymer composites, *Journal of applied physics*, 88 (3), 1480-1487.
- [46]. Akın, D., Kasgoz, A., Durmus, A., 2014, Quantifying microstructure, electrical and mechanical properties of carbon fiber and expanded graphite filled cyclic olefin copolymer composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 60, 44-51.
- [47]. Bauhofer, W., Kovacs, JZ., 2009, A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites, *Composites Science and Technology*, 69 (10), 1486-1498.
- [48]. Kasgoz, A., Akın, D., Durmus, A., 2014, Rheological and electrical properties of carbon black and carbon fiber filled cyclic olefin copolymer composites, *Composites Part B: Engineering*, 62, 113-120.
- [49]. Celzard, A., McRae, E., Deleuze, C., Dufort, M., Furdin, G., Marêché, J., 1996, Critical concentration in percolating systems containing a high-aspect-ratio filler. *Physical Review B*, 53 (10), 6209.
- [50]. Gojny, FH., Wichmann, MH., Fiedler, B., Kinloch, IA., Bauhofer, W., Windle, A.H., 2006, Evaluation and identification of electrical and thermal conduction mechanisms in carbon nanotube/epoxy composites, *Polymer*, 47 (6), 2036-2045.
- [51]. Kirkpatrick, S., Percolation and conduction., 1973, *Reviews of modern physics*, 45 (4), 574.
- [52]. Munson-McGee, SH., 1991, Estimation of the critical concentration in an anisotropic percolation network, *Physical Review B*, 43 (4), 3331.
- [53]. Li, N., Huang, Y., Du, F., He, X., Lin, X., Gao, H., 2006, Electromagnetic interference (EMI) shielding of single-walled carbon nanotube epoxy composites, *Nano letters*, 6 (6), 1141-1145.
- [54]. Al-Saleh, MH., Saadeh, WH., Sundararaj, U., 2013, EMI shielding effectiveness of carbon based nanostructured polymeric materials: a comparative study, *Carbon*, 60, 146-156.

- [55]. Ghosh, P., Chakrabarti, A., 2000, Conducting carbon black filled EPDM vulcanizates: assessment of dependence of physical and mechanical properties and conducting character on variation of filler loading, *European Polymer Journal*, 36 (5), 1043-1054.
- [56]. Mohanraj, G., Chaki, T., Chakraborty, A., Khastgir, D., 2006, AC impedance analysis and EMI shielding effectiveness of conductive SBR composites. *Polymer Engineering & Science*, 46 (10), 1342-1349.
- [57]. Sahoo, BP., Naskar, K., Tripathy, DK., 2012, Conductive carbon black-filled ethylene acrylic elastomer vulcanizates: physico-mechanical, thermal, and electrical properties. *Journal of Materials Science*, 47 (5), 2421-2433.
- [58]. Rahaman, M., Chaki, T., Khastgir, D., 2011, Development of high performance EMI shielding material from EVA, NBR, and their blends: effect of carbon black structure, *Journal of materials science*, 46 (11), 3989-3999.
- [59]. Yang, S., Lozano, K., Lomeli, A., Foltz, HD., Jones, R., 2005, Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon nanofiber/LCP composites, *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 36 (5), 691-697.
- [60]. Al-Saleh, MH., Sundararaj, U., 2011, Electrically conductive carbon nanofiber/polyethylene composite: effect of melt mixing conditions, *Polymers for Advanced Technologies*, 22 (2), 246-253.
- [61]. Al-Saleh, MH., Gelves, GA., Sundararaj, U., 2013, Carbon nanofiber/polyethylene nanocomposite: Processing behavior, microstructure and electrical properties, *Materials & Design*, 52, 128-133.
- [62]. Arjmand, M., Mahmoodi, M., Gelves, GA., Park, S, Sundararaj, U., 2011, Electrical and electromagnetic interference shielding properties of flow-induced oriented carbon nanotubes in polycarbonate, *Carbon*, 49 (11), 3430-3440.
- [63]. Gupta, A., Choudhary, V., 2011, Electromagnetic interference shielding behavior of poly (trimethylene terephthalate)/multi-walled carbon nanotube composites, *Composites Science and Technology*, 71 (13), 1563-1568.
- [64]. Mathur, R., Pande, S., Singh, B., Dhani, T., 2008, Electrical and mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes reinforced PMMA and PS composites. *Polymer Composites*, 29 (7), 717-727.
- [65]. Fugetsu, B., Sano, E., Sunada, M., Sambongi, Y., Shibuya, T., Wang, X., 2008, Electrical conductivity and electromagnetic interference shielding efficiency of carbon nanotube/cellulose composite paper, *Carbon*, 46 (9) , 1256-1258.
- [66]. Yang, Y., Gupta, MC., Dudley, KL., Lawrence, RW., 2005, A comparative study of EMI shielding properties of carbon nanofiber and multi-walled carbon nanotube filled polymer composites, *Journal of nanoscience and Nanotechnology*, 5 (6), 927-931.
- [67]. Chen, I-H., Wang, C-C., Chen, C-Y., 2010, Fabrication and structural characterization of polyacrylonitrile and carbon nanofibers containing plasma-modified carbon nanotubes by electrospinning, *The Journal of Physical Chemistry C.*, 114 (32), 13532-13539.

- [68]. Singh, B., Saini, K., Choudhary, V., Teotia, S., Pande, S., Saini, P., 2014, Effect of length of carbon nanotubes on electromagnetic interference shielding and mechanical properties of their reinforced epoxy composites, *Journal of nanoparticle research*, 16 (1), 2161.
- [69]. Chen, Y-J., Dung, ND., Li, Y-A., Yip, M-C., Hsu, W-K., Tai, N-H., 2011, Investigation of the electric conductivity and the electromagnetic interference shielding efficiency of SWCNTs/GNS/PAni nanocomposites, *Diamond and Related Materials*, 20 (8), 1183-1187.
- [70]. Panwar, V., Mehra, R., 2008, Analysis of electrical, dielectric, and electromagnetic interference shielding behavior of graphite filled high density polyethylene composites, *Polymer Engineering & Science*, 48 (11), 2178-2187.
- [71]. Saini, P., Choudhary, V., Sood, K., Dhawan, S., 2009, Electromagnetic interference shielding behavior of polyaniline/graphite composites prepared by in situ emulsion pathway, *Journal of applied polymer science*, 113 (5), 3146-3155.
- [72]. Sachdev, V., Patel, K., Bhattacharya, S., Tandon, R., 2011, Electromagnetic interference shielding of graphite/acrylonitrile butadiene styrene composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 120 (2), 1100-1105.
- [73]. Valentini, M., Piana, F., Pionteck, J., Lamastra, F., Nanni, F., 2015, Electromagnetic properties and performance of exfoliated graphite (EG)–thermoplastic polyurethane (TPU) nanocomposites at microwaves, *Composites Science and Technology*, 114, 26-33.
- [74]. Kuester, S., Merlini, C., Barra, GM., Ferreira, JC., Lucas, A., de Souza, AC., 2016, Processing and characterization of conductive composites based on poly (styrene-b-ethylene-ran-butylene-b-styrene)(SEBS) and carbon additives: A comparative study of expanded graphite and carbon black, *Composites Part B: Engineering*, 84, 236-247.
- [75]. Barton, DK., Leonov, SA., 1998, *Radar technology encyclopedia: Artech house*.
- [76]. Bri, S., Foshi, J., 2017, Electromagnetic Properties of Polymer Composites  $\text{Co}_{52}\text{Cr}_{22}\text{Ni}_{10}\text{W}_7$ ,  $5\text{Fe}1, 5$  and  $\text{Fe}59\text{Cr}21, 5\text{Ni}7\text{Si}1\text{Mn}10$  at Ku Band. *FME Transactions*, 45(4),679.
- [77]. Chin, WS., 2007, Development of the composite RAS (radar absorbing structure) for the X-band frequency range, *Composite Structures*, 77(4),457-465.
- [78]. D'Aloia, A., Marra, F., Tamburrano, A., De Bellis, G., Sarto, M., 2014, Electromagnetic absorbing properties of graphene–polymer composite shields, *Carbon*, 73, 175-184.
- [79]. de Souza Pinto, S, Rezende, MC., 2017, Morphological, Electromagnetic, and Absorbing Properties of POMA and PAni/Carbon Black Composites, *Journal of Electronic Materials*, 1-9.
- [80]. Micheli, D., Apollo, C., Pastore, R., 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.
- [81]. Oh, J-H., Oh, K-S., Kim, C-G., Hong, C-S., 2004, Design of radar absorbing structures using glass/epoxy composite containing carbon black in X-band frequency ranges, *Composites Part B: Engineering*, 35 (1), 49-56.
- [82]. Rao, BB., Chengappa, M., Kale, S., 2017, Lightweight, flexible and thin Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-loaded, functionalized multi walled carbon nanotube buckypapers for enhanced X-band electromagnetic interference shielding, *Materials Research Express*, 4 (4), 045012.
- [83]. Saville, P., 2005, Review of Radar Absorbing Materials, *Defence R&D Canada – Atlantic*, 2015-3.
- [84]. Nanni, F., Travaglia, P., Valentini, M., 2009, Effect of carbon nanofibres dispersion on the microwave absorbing properties of CNF/epoxy composites, *Composites science and technology*, 69 (3), 485-490.
- [85]. De Rosa, IM., Dinescu, A., Sarasini, F., Sarto, MS., Tamburrano, A., 2010, Effect of short carbon fibers and MWCNTs on microwave absorbing properties of polyester composites containing nickel-coated carbon fibers, *Composites Science and Technology*, 70 (1), 102-109.
- [86]. Yusoff, AN., Abdullah, M., Ahmad, S., Jusoh, S., Mansor, A., Hamid, S., 2002, Electromagnetic and absorption properties of some microwave absorbers, *Journal of Applied Physics*, 92 (2), 876-882.
- [87]. Liu, Z., Bai, G., Huang, Y., Li, F., Ma, Y., Guo, T., 2007, Microwave absorption of single-walled carbon nanotubes/soluble cross-linked polyurethane composites, *The Journal of Physical Chemistry C*, 111 (37), 13696-13700.
- [88]. Zhang, Z., Wang, C., Zhang, Y., Xie, J., 2010, Microwave absorbing properties of composites filled with glass-coated Fe 69 Co 10 Si 8 B 13 amorphous microwire, *Materials Science and Engineering: B*, 175 (3), 233-237.
- [89]. Hai-Tao, L., Yang, L., Bin-Song, W., Chen-Sha, L., 2015, Microwave absorption properties of polyester composites incorporated with heterostructure nanofillers with carbon nanotubes as carriers, *Chinese Physics Letters*, 32 (4), 044102.
- [90]. Ahmad, SH., Abdullah, MH., Hui, D., Yusoff, AN., Puryanti, D., 2010, Magnetic and microwave absorbing properties of magnetite–thermoplastic natural rubber nanocomposites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 322 (21), 3401-3409.
- [91]. Ni, S., Lin, S., Pan, Q., Yang, F., Huang, K., He, D., 2009, Hydrothermal synthesis and microwave absorption properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocrystals, *Journal of Physics D: Applied Physics*. 42 (5), 055004.
- [92]. Sun, G., Dong, B., Cao, M., Wei, B., Hu, C., 2011, Hierarchical dendrite-like magnetic materials of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>,  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and Fe with high performance of microwave absorption, *Chemistry of Materials*, 23 (6), 1587-1593.

- [93]. Wei, J., Liu, J., Li, S., 2007, Electromagnetic and microwave absorption properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic films plated on hollow glass spheres, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 312 (2), 414-417.
- [94]. Zhou, W., Hu, X., Bai, X., Zhou, S., Sun, C., Yan, J., 2011, Synthesis and electromagnetic, microwave absorbing properties of core-shell Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) microspheres, *ACS applied materials & interfaces*, 3 (10), 3839-3845.
- [95]. Feng, Y., Qiu, T., Shen, C., 2007, Absorbing properties and structural design of microwave absorbers based on carbonyl iron and barium ferrite, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 318 (1), 8-13.
- [96]. Gairola, S., Verma, V., Singh A., Purohit, L., Kotnala, R., 2010, Modified composition of barium ferrite to act as a microwave absorber in X-band frequencies, *Solid State Communications*, 150(3),147-151.
- [97]. Ohlan, A., Singh, K., Chandra, A., Dhawan, S., 2008, Microwave absorption properties of conducting polymer composite with barium ferrite nanoparticles in 12.4–18 GHz, *Applied Physics Letters*, 93 (5), 053114.
- [98]. Sharma, R., Agarwala, R., Agarwala, V., 2008, Development of radar absorbing nanocrystals by microwave irradiation, *Materials Letters*, 62 (15), 2233-2236.
- [99]. Lima, U., Nasar, M., Nasar, R., Rezende, M., Araújo J., 2008, Ni-Zn nanoferrite for radar-absorbing material, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320 (10), 1666-1670.
- [100]. Petrov, V., Gagulin, V., 2001, Microwave absorbing materials, *Inorganic Materials*, 37 (2), 93-98.
- [101]. Zhu, W., Wang, L., Zhao, R., Ren, J., Lu, G., Wang, Y., 2011, Electromagnetic and microwave-absorbing properties of magnetic nickel ferrite nanocrystals, *Nanoscale*, 3 (7), 2862-2864.
- [102]. Meshram, M., Agrawal, NK., Sinha, B., Misra, P., 2004, Characterization of M-type barium hexagonal ferrite-based wide band microwave absorber, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 271 (2), 207-214.
- [103]. Ruan, S., Xu, B., Su, H., Wu, F., Xiang, S., Zhao, M., 2000, Microwave absorptive behavior of ZnCo-substituted W-type Ba hexaferrite nanocrystalline composite material, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 212 (1), 175-177.
- [104]. Yang, Y., Zhang, B., Xu, W., Shi, Y., Zhou, N., Lu, H., 2003, Microwave absorption studies of W-hexaferrite prepared by co-precipitation/mechanical milling, *Journal of magnetism and magnetic materials*, 265 (2), 119-122.
- [105]. Apesteguy, JC., Damiani, A., DiGiovanni, D., Jacobo, S., 2009, Microwave-absorbing characteristics of epoxy resin composites containing nanoparticles of NiZn- and NiCuZn-ferrites, *Physica B: Condensed Matter*, 404 (18), 2713-2716.

- [106]. Cui, C., Du, Y., Li, T., Zheng, X., Wang, X., Han, X., 2012, Synthesis of electromagnetic functionalized Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> microspheres/polyaniline composites by two-step oxidative polymerization, *The Journal of Physical Chemistry B*, 116 (31), 9523-9531.
- [107]. Gama, AM., Rezende, MC., Dantas, CC., 2011, Dependence of microwave absorption properties on ferrite volume fraction in MnZn ferrite/rubber radar absorbing materials, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 323 (22), 2782-2785.
- [108]. Abbas, S., Dixit, A., Chatterjee, R., Goel, T., 2007, Complex permittivity, complex permeability and microwave absorption properties of ferrite-polymer composites, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 309 (1), 20-24.
- [109]. Yang, C., Gung, Y., Hung, W., Ting, T., Wu, K., 2010, Infrared and microwave absorbing properties of BaTiO<sub>3</sub>/polyaniline and BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub>/polyaniline composites, *Composites Science and Technology*, 70 (3), 466-471.
- [110]. Zhao, H., Sun, X., Mao, C., Du, J., 2009, Preparation and microwave-absorbing properties of NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-polystyrene composites, *Physica B: Condensed Matter*, 404 (1), 69-72.
- [111]. Pakhale, S., Puthucheri, S., Singh, D., Yadav, K., 2015, Electromagnetic wave absorption properties of conducting polymer-spinel ferrite composites, *Recent Advances in Electronics & Computer Engineering (RAECE), 2015 National Conference on, IEEE*, 134-137.
- [112]. Bueno, A.R., Gregori, M.L., Nóbrega, M.C., 2008, Microwave-absorbing properties of Ni<sub>0.50-x</sub>Zn<sub>0.50-x</sub>Me<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (Me= Cu, Mn, Mg) ferrite-wax composite in X-band frequencies, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320 (6), 864-870.
- [113]. Mandal, A., Das, CK., 2014, Effect of BaTiO<sub>3</sub> on the microwave absorbing properties of Co-doped Ni-Zn ferrite nanocomposites, *Journal of Applied Polymer Science*, 131 (4).
- [114]. Chen, X., Wang, G., Duan, Y., Liu, S., 2007, Microwave absorption properties of barium titanate/epoxide resin composites, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40 (6), 1827.
- [115]. Zhu, Y-F., Zhang, L., Natsuki, T., Fu, Y-Q., Ni, Q-Q., 2012, Facile synthesis of BaTiO<sub>3</sub> nanotubes and their microwave absorption properties, *ACS applied materials & interfaces*, 4 (4), 2101-2106.
- [116]. Kwon, SK., Ahn, JM., Kim, GH., Chun, CH., Hwang, JS., Lee, JH., 2002, Microwave absorbing properties of carbon black/silicone rubber blend, *Polymer Engineering & Science*, 42 (11), 2165-2171.
- [117]. Wu, K., Ting, T., Wang, G., Ho, W., Shih, C., 2008, Effect of carbon black content on electrical and microwave absorbing properties of polyaniline/carbon black nanocomposites, *Polymer Degradation and Stability*, 93 (2), 483-488.
- [118]. Kim, J-B., Lee, S-K., Kim, C-G., 2008, Comparison study on the effect of carbon nano materials for single-layer microwave absorbers in X-band, *Composites Science and Technology*, 68 (14), 2909-2916.

- [119]. Fan, Y., Yang, H., Li, M., Zou, G., 2009, Evaluation of the microwave absorption property of flake graphite, *Materials Chemistry and Physics*, 115 (2), 696-698.
- [120]. Al-Ghamdi, A., Al-Hartomy, OA., Al-Solamy, F., Al-Ghamdi, AA., El-Tantawy, F., 2013, Electromagnetic wave shielding and microwave absorbing properties of hybrid epoxy resin/foiliated graphite nanocomposites, *Journal of Applied Polymer Science*, 127 (3), 2227-2234.
- [121]. Li, G., Xie, T., Yang, S., Jin, J., Jiang, J., 2012, Microwave absorption enhancement of porous carbon fibers compared with carbon nanofibers, *The Journal of Physical Chemistry C*, 116 (16), 9196-9201.
- [122]. Fan, Z., Luo, G., Zhang, Z., Zhou, L., Wei, F., 2006, Electromagnetic and microwave absorbing properties of multi-walled carbon nanotubes/polymer composites, *Materials Science and Engineering: B*, 132 (1), 85-89.
- [123]. Zhao, D-L, Li, X., Shen, Z-M., 2008, Electromagnetic and microwave absorbing properties of multi-walled carbon nanotubes filled with Ag nanowires, *Materials Science and Engineering: B*, 150 (2), 105-110.
- [124]. Singh, VK., Shukla, A., Patra, MK., Saini, L., Jani, RK., Vadera, SR., 2012, Microwave absorbing properties of a thermally reduced graphene oxide/nitrile butadiene rubber composite, *Carbon*, 50 (6), 2202-2208.
- [125]. Bai, X., Zhai, Y., Zhang, Y., 2011, Green approach to prepare graphene-based composites with high microwave absorption capacity, *The Journal of Physical Chemistry C*, 115 (23), 11673-11677.
- [126]. Li, Y., Huang, Y., Qi, S., Niu, L., Zhang, Y., Wu, Y., 2012, Preparation, magnetic and electromagnetic properties of polyaniline/strontium ferrite/multiwalled carbon nanotubes composite, *Applied Surface Science*, 258 (8), 3659-3666.
- [127]. Liu, Y., Zhang, Z., Xiao, S., Qiang, C., Tian, L., Xu, J., 2011, Preparation and properties of cobalt oxides coated carbon fibers as microwave-absorbing materials, *Applied Surface Science*, 257 (17), 7678-7683.
- [128]. Park, K-Y., Han, J-H., Lee, S-B., Yi, J-W., 2011, Microwave absorbing hybrid composites containing Ni-Fe coated carbon nanofibers prepared by electroless plating, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (5), 573-578.
- [129]. Qiang, C., Xu, J., Zhang, Z., Tian, L., Xiao, S., Liu, Y., 2010, Magnetic properties and microwave absorption properties of carbon fibers coated by Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles, *Journal of Alloys and Compounds*, 506 (1), 93-97.
- [130]. Zhang, X., Dong, X., Huang, H., Liu, Y., Wang, W., Zhu, X., 2006, Microwave absorption properties of the carbon-coated nickel nanocapsules, *Applied Physics Letters*, 89 (5), 053115.
- [131]. Zhang, X., Dong, X., Huang, H., Lv, B., Lei, J., Choi, C., 2007, Microstructure and microwave absorption properties of carbon-coated iron nanocapsules, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40 (17), 5383.



- [132]. Yan, L., Wang, J., Ye, Y., Hao, Z., Liu, Q., Li, F., 2009, Broadband and thin microwave absorber of nickel–zinc ferrite/carbonyl iron composite, *Journal of Alloys and Compounds*, 487 (1), 708-711.
- [133]. Belaabed, B., Wojkiewicz, J.L., Lamouri, S., El Kamchi, N., Lasri, T., 2012, Synthesis and characterization of hybrid conducting composites based on polyaniline/magnetite fillers with improved microwave absorption properties, *Journal of Alloys and Compounds*, 527, 137-144.
- [134]. Wang, L., Huang, Y., Ding, X., Liu, P., Zong, M., Sun, X., 2013, Supraparamagnetic quaternary nanocomposites of graphene@ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ SiO<sub>2</sub>@ SnO<sub>2</sub>, Synthesis and enhanced electromagnetic absorption properties, *Materials Letters*, 109, 146-150.
- [135]. Hou, C., Li, T., Zhao, T., Zhang, W., Cheng, Y., 2012, Electromagnetic wave absorbing properties of carbon nanotubes doped rare metal/pure carbon nanotubes double-layer polymer composites, *Materials & Design*, 33, 413-418.
- [136]. Lee, S-E., Kang, J-H., Kim, C-G., 2006, Fabrication and design of multi-layered radar absorbing structures of MWNT-filled glass/epoxy plain-weave composites, *Composite structures*, 76 (4), 397-405.
- [137]. Micheli, D., Pastore, R., Gradoni, G., Primiani, V.M., Moglie, F., Marchetti, M., 2013, Reduction of satellite electromagnetic scattering by carbon nanostructured multilayers, *Acta Astronautica*, 88, 61-73.
- [138]. Kumar, A., Agarwala, V., Singh, D., 2013, Effect of particle size of BaFe<sub>12</sub>O<sub>19</sub> on the microwave absorption characteristics in X-band, *Progress in Electromagnetics Research M*, 29, 223-236.
- [139]. Yang, R-B., Liang, W-F., 2011, Microwave properties of high-aspect-ratio carbonyl iron/epoxy absorbers, *Journal of Applied Physics*, 109 (7), 07A311.
- [140]. Che, B.D., Nguyen, B.Q., Nguyen, L-TT., Nguyen, H.T., Nguyen, V.Q., Van Le, T., 2015, The impact of different multi-walled carbon nanotubes on the X-band microwave absorption of their epoxy nanocomposites, *Chemistry Central Journal*, 9 (1), 10.
- [141]. Baker-Jarvis, J., 1990, Transmission/reflection and short-circuit line permittivity measurements: *National Institute of Standards and Technology Colorado*.
- [142]. Esfahani, A.S., Katbab, A., Dehkhoda, P., Karami, H., Barikani, M., Sadeghi, S., 2012, Preparation and characterization of foamed polyurethane/silicone rubber/graphite nanocomposite as radio frequency wave absorbing material: the role of interfacial compatibilization, *Composites Science and Technology*, 72 (3), 382-389.
- [143]. Menard, K.P., 2008 *Dynamic mechanical analysis: a practical introduction*, CRC press.
- [144]. Iqbal, A., Frommann, L., Saleem, A., Ishaq, M., 2007, The effect of filler concentration on the electrical, thermal, and mechanical properties of carbon particle and carbon fiber-reinforced poly (styrene-co-acrylonitrile) composites, *Polymer Composites*, 28 (2), 186-197.

- [145]. Eustis, S., El-Sayed, MA., 2006, Determination of the aspect ratio statistical distribution of gold nanorods in solution from a theoretical fit of the observed inhomogeneously broadened longitudinal plasmon resonance absorption spectrum, *Journal of Applied Physics*, 100 (4), 044324.
- [146]. Wu, Y-P., Jia, Q-X., Yu, D-S., Zhang, L-Q., 2004, Modeling Young's modulus of rubber-clay nanocomposites using composite theories, *Polymer Testing*, 23(8), 903-909.
- [147]. Fornes, T., Paul, D., 2003, Modeling properties of nylon 6/clay nanocomposites using composite theories, *Polymer*, 44(17),4993-5013.
- [148]. Jeon, H., Rameshwaram, J., Kim, G., 2004, Structure-property relationships in exfoliated polyisoprene/clay nanocomposites, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 42 (6), 1000-1009.
- [149]. Afdl, J., Kardos, J., 1976, The Halpin-Tsai equations: a review, *Polymer Engineering & Science*, 16 (5), 344-352.
- [150]. Guth, E., 1945, Theory of filler reinforcement, *Journal of applied physics*, 16 (1), 20-25.
- [151]. Guth, E., Gold, O., 1938, On the hydrodynamical theory of the viscosity of suspensions, *Phys Rev.* 53 (322), 2-15.
- [152]. Lewis, T., Nielsen, L., 1970, Dynamic mechanical properties of particulate-filled composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 14 (6), 1449-1471.
- [153]. Nielsen, LE., 1970, Generalized equation for the elastic moduli of composite materials, *Journal of Applied Physics*, 41 (11),4626-4627.
- [154]. Kasgoz, A., Akın, D., Aytan, AI., Durmus, A., 2014, Effect of different types of carbon fillers on mechanical and rheological properties of cyclic olefin copolymer (COC) composites, *Composites Part B: Engineering*, 66, 126-135.
- [155]. Kilbride, Be., Coleman, J., Fraysse, J., Fournet, P., Cadek, M., Drury A., 2002, Experimental observation of scaling laws for alternating current and direct current conductivity in polymer-carbon nanotube composite thin films, *Journal of Applied Physics*, 92 (7), 4024-4030.
- [156]. Sahimi, M., Applications of percolation theory, 1994, *CRC Press*.
- [157]. Stauffer, D., Aharony, A., Redner, S., 1993, Introduction to Percolation theory, *Physics Today*, 46, 64.
- [158]. Qing, Y., Wang, X., Zhou, Y., Huang, Z., Luo, F., Zhou, W., 2014, Enhanced microwave absorption of multi-walled carbon nanotubes/epoxy composites incorporated with ceramic particles, *Composites Science and Technology*, 102, 161-168.
- [159]. Vinoy, KJ., Jha, RM., 1996, Radar absorbing materials- From theory to design and characterization, Boston, MA, *Kluwer Academic Publishers*.

- [160]. Chambers, B., Tennant, A., Optimised design of Jaumann radar absorbing materials using a genetic algorithm, *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 1996, 143 (1), 23-30.
- [161]. Micheli, D., Apollo, C., Pastore, R., Barbera, D., Morles, RB., Marchetti, M., 2012, Optimization of multilayer shields made of composite nanostructured materials, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 54 (1), 60-69.
- [162]. Michielssen, E., Sajer, J-M., Ranjithan, S., Mittra, R., 1993, Design of lightweight, broad-band microwave absorbers using genetic algorithms, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 41 (6), 1024-1031.



## ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Alper KAŞGÖZ
Doğum Yeri	Konya
Doğum Tarihi	28.12.1986
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	0212 4400000
E-Posta Adresi	akasgoz@yalova.edu.tr
Web Adresi	-



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Kimya Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2010

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Ens.
Anabilim Dalı	Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Kimyasal Teknolojiler Programı
Mezuniyet Tarihi	2012

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Kimyasal Teknolojiler Programı
Mezuniyet Tarihi	2017

Makale ve Bildiriler	
<b><u>SCI ve Expanded SCI Kapsamında Yayımlanan Yayınlar</u></b>	
[1]. Kaşgöz, A., Akın, D., Durmus, A., Ercan, N., Öksüzömer, F., Kaşgöz, A., 2013, Effects of various polyolefin copolymers on the interfacial interaction, microstructure and physical properties of cyclic olefin copolymer (COC)/graphite composites. <i>Journal of Polymer Research</i> , 20 (7),1-12.	

- [2]. Kasgoz, A., Akin, D., Durmus, A., 2016, Quantifying Structural and Solid-State Viscoelastic Properties of Poly (propylene)(PP)/Poly (oxymethylene)(POM) Blend Films. *Macromolecular Materials and Engineering*, 301 (11), 1402-1414.
- [3]. Kasgoz, A., Akin, D., Durmus, A., 2015, Effects of size and shape originated synergism of carbon nano fillers on the electrical and mechanical properties of conductive polymer composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 132 (30).
- [4]. Kasgoz, A., Akin, D., Durmus, A., 2014, Rheological and electrical properties of carbon black and carbon fiber filled cyclic olefin copolymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 62, 113-120.
- [5]. Kasgoz, A., Akin, D., Durmus, A., 2012, Rheological and mechanical properties of cycloolefin copolymer/organoclay nanocomposites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31 (20), 1329-1341.
- [6]. Kasgoz, A., Akin, D., Durmus, A., 2012, Rheological behavior of cycloolefin copolymer/graphite composites., *Polymer Engineering & Science*.;52(12):2645-2653.
- [7]. Kasgoz, A., Akin, D., Ayten, Aİ., Durmus, A., 2014, Effect of different types of carbon fillers on mechanical and rheological properties of cyclic olefin copolymer (COC) composites, *Composites Part B: Engineering*, 66, 126-135.
- [8]. Durmus, A., Kasgoz, A., Ercan, N., Akin, D., Şanlı, S., 2012, Effect of polyhedral oligomeric silsesquioxane (POSS) reinforced polypropylene (PP) nanocomposite on the microstructure and isothermal crystallization kinetics of polyoxymethylene (POM), *Polymer*, 53 (23), 5347-5357.
- [9]. Kasgoz, A., Korkmaz, M., Alanalp, MB., Durmuş, A., 2017, Effect of processing method on microstructure, electrical conductivity and electromagnetic wave interference (EMI) shielding performance of carbon nanofiber filled thermoplastic polyurethane composites, *J Polym Res*, 24:148, DOI 10.1007/s10965-017-1312-6.

#### **Kongre ve Sempozyumlarda Yapılan Bildiri ve Sunumlar**

- [1]. Erefe, E., Başoğlu, H., Kaşgöz, A., Emik, S., 2014, Seramikleştirici Katkı Maddelerinin Yangına Dayanıklı Silikon Kablo Üretiminde Kullanımı, 2. *Uluslararası Katılımlı Kauçuk Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 28-29 Kasım 2014, 26-27.
- [2]. Tamer, M., Kaşgöz, A., Akin, D., Durmuş, A., 2014, "Polipropilen (PP)/Polioksümetilen (Pom) Harmanların İzotermal Kristallenme Kinetiği ", *11. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi* , Eskişehir, Türkiye, 2-5 Eylül 2014, 5-5.
- [3]. Kaşgöz A., Tamer M., Koçyiğit Ç., Durmuş A., 2014, "Effect Of Different Types Of Carbon Nano Fillers On The Uniaxial Tensile Creep Behavior Of Polypropylene Films ", *1st Joint Turkish - German Workshop on Polymeric Nanocomposites*, İstanbul, Türkiye, 29-31 Ağustos 2014, 1-1.

- [4]. Yılmaz, E., Kaşgöz, A., Emik, S., Durmuş, A., 2014, Akrilonitril Oranının Nitril Kauçukların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, 2. *Uluslararası Katılımlı Kauçuk Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 28-29 Kasım 2014, 31-32.
- [5]. Yılmaz, E., Kaşgöz, A., Emik, S., Durmuş, A., 2014, Farklı Tip Plastifiyanların Akrilonitril-Bütadien Kauçuk (Nbr) Karışımların Fiziko-Mekanik Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi", 2. *Uluslararası Katılımlı Kauçuk Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 28-29 Kasım 2014, 33-34.
- [6]. Kaşgöz, A., Akın, D., Durmuş, A., 2013, Effect of methylated polyhedral oligomeric silsesquioxanes (m-poss) reinforced polypropylene (PP) nanocomposites on the tensile creep behavior of polyoxymethylene (POM), *1st International Symposium on Plastic and Rubber Technologies and Exhibition*, Ankara, Türkiye, 29-31 Mayıs 2013, 22-22.
- [7]. Akın, D., Kaşgöz, A., Durmuş, A., 2013, Investigation of electrical conductivity and mechanical properties of cyclic-olefin copolymer (COC) composites reinforced with graphite and expanded graphite, *1st International Symposium on Plastic and Rubber Technologies and Exhibition*, Ankara, Türkiye, 29-31 Mayıs 2013, 35-35.
- [8]. Akın, D., Kaşgöz, A., Durmuş, A., Ercan, N., 2012, Melt rheology tests for quantifying filler dispersion in cycloolefin copolymer (COC)/carbon composites", *Polychar 20 - World Forum on Advanced Materials*, Hırvatistan, 26-30 Mart 2012, 5-5.
- [9]. Kaşgöz, A., Akın, D., Ercan, N., Durmuş, A., Kaşgöz, A., 2012, Polikarbonat (PC)-sikloolefin kopolimer (COC) harmanlarının hazırlanması ve bazı özelliklerinin incelenmesi", *UKMK-10, 10. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 3-6 Eylül 2012, 5-5.
- [10]. Akın, D., Kaşgöz, A., Ercan, N., Durmuş, A., 2012, Kaşgöz, A., farklı tip uyumlaştırıcıların sikloolefin kopolimer (COC)/grafit kompozitlerin fiziksel özelliklerine etkisinin incelenmesi, *PBT 2012- 4.Ulusal Polimer Bilim ve Teknoloji Kongresi*, Çanakkale, Türkiye, 5-8 Eylül 2012, 5-5.
- [11]. Akın, D., Kaşgöz, A., Durmuş, A., Öksüzömer, M.A., 2012, Deligöz H., Polimer elektrolit membran (PEM) yakıt hücrelerinde bipolar plaka olarak kullanım amaçlı iletken kompozitlerin hazırlanması, *UKMK-10, 10. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 3-6 Eylül 2012, 5-5.
- [12]. Kaşgöz, A., Akın, D., Ercan, N., Durmuş, A., Kaşgöz, A., 2012, Polikarbonat-sikloolefin kopolimer harmanlarının hazırlanması ve bazı özelliklerinin incelenmesi, *10. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi (UKMK-10)*, İstanbul, Türkiye, 3-6 Eylül 2012.

- [13]. Öksüz, M., Esen, H., Yıldırım, H., Yücesoy, J.H., Mudur, M., Kaşgöz, A., Ayten, A.İ., 2012, Development of polymer composite having enhanced impact resistance intended for automotive industry, *APME 2011*, Türkiye, 5-8 Eylül 2012.
- [14]. Akin, D., Kaşgöz, A., Durmuş, A., Öksüzömer, M.A., Deligöz, H., 2012, 2.Polimer elektrolit membran (pem) yakıt hücrelerinde bipolar plaka olarak kullanım amaçlı iletken kompozitlerin hazırlanması, *10. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi (UKMK-10)*, İstanbul, Türkiye, 3-6 Eylül 2012.
- [15]. Kaşgöz, A., Yurdakul, K., Çetin, G., Kaşgöz, A., Talaş/Plastik Kompozitlerinin Hazırlanmasında Yeni Bir Yöntem: Ekstraksiyon-Çöktürme Yöntemi, *10. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi (UKMK-10)*, İstanbul, Türkiye, 3-6 Eylül 2012.
- [16]. Akin, D., Kaşgöz, A., Ercan, N., Durmuş, A., Kaşgöz, A., 2012, Farklı tip uyumlaştırıcıların sikloolefin kopolimer (COC)/grafit kompozitlerin fiziksel özelliklerine etkisinin incelenmesi, *4. Ulusal Polimer Bilim ve Teknoloji Kongresi*, Çanakkale, Türkiye, 5-8 Eylül 2012, 5.
- [17]. Durmuş, A., Kaşgöz, A., Akin, D., Ercan, N., Deligöz, H., 2012, Öksüzömer M.A., Cycloolefin copolymer (COC)/carbon conductive composites as bipolar plate material for polymer electrolyte membrane (pem) fuel cells", *POLYCHAR 20 World Forum on Advanced Materials*, Dubrovnik, Hırvatistan, 26-30 Mart 2012.
- [18]. Bener, M., Kaşgöz, A., Alim, Ç., Apak, M.R., 2017, Natural polymer film-based optical sensor for food antioxidant", *19th International Conference on Oxidative Stress Reduction Redox Homeostasis and Antioxidants*, Paris, Fransa, 26-27 Haziran 2017.
- [19]. Bener, M., Kaşgöz, A., Alim, Ç., Apak, M.R., Low-cost natural polymer film-based optical sensor for food antioxidant" *6th EuCheMS Chemistry Congress*, Sevilla, İspanya, 11-15 Eylül 2016.