

**Mikrodalga Frekanslarında Etkin Elektromanyetik Dalga  
Soğurucu Kompozitlerin Tasarımı ve Geliştirilmesi**

**Program Kodu: 1001**

**Proje No: 111M102**

Proje Yürütücüsü:  
**Doç. Dr. Arcan F. DERİCİOĞLU**

Araştırmacı:  
Prof. Dr. Özlem AYDIN ÇİVİ

Bursiyerler:  
Özgür HAMAT  
Aylin GÜNEŞ

ŞUBAT 2014  
ANKARA

## ÖNSÖZ

“Mikrodalga Frekanslarında Etkin Elektromanyetik Dalga Soğurucu Kompozitlerin Tasarımı ve Geliştirilmesi” konulu bu proje Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü bünyesinde Doç. Dr. Arcan Fehmi Dericioğlu tarafından yürütölmüştür.

Bu proje kapsamında 18-40 GHz frekans aralığında etkin elektromanyetik (EM) dalga soğurucu işleve sahip yapısal kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve bu malzemelerin karakterizasyonu konularında çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, normal şartlar altında dielektrik özellikleri sebebiyle EM dalgalara geçirgen olan cam ve aramid elyaf dokumalar yüzeylerine nanometre mertebesinde kalınlıklarda uygulanan metalik kaplamalarla EM dalgaları soğurucu hale getirilmiştir. Yüzeyleri modifiye edilen bu elyaf dokumalarla oluşturulan çok katmanlı yapılarla epoksi matris takviye edilmiş ve EM dalgaları ölçüm yapılan aralıkta %90 ve üzerinde soğuran EM dalga soğurucu prototip kompozitler üretilmiştir.

Bu proje Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu tarafından Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı ile 111M102 kodlu, 15.12.2011 başlama ve 15.12.2013 bitiş tarihli TÜBİTAK projesi ile desteklenmiştir.

## İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	iii
TABLO LİSTESİ .....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÖZ .....	xiv
ABSTRACT .....	xv
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ .....	2
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	7
3.1 Kaplama Üretimi.....	7
3.2 Kompozit Üretimi .....	8
3.2.1 Silan Uygulaması.....	8
3.2.2 Prototip Kompozit Üretimi.....	11
3.3 Kaplama Karakterizasyon Çalışmaları .....	14
3.3.1 Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) ile Yüzey Morfolojisi İnceleme Çalışmaları .....	14
3.3.2 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile Yüzey Morfolojisi İnceleme Çalışmaları .....	15
3.3.3 XRD ile Yüzey Modifikasyonu İnceleme Çalışmaları.....	15
3.4 Mekanik Karakterizasyon Yöntemi.....	16
3.5 Elektromanyetik (EM) Dalga Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Yöntem .....	18
3.6 EM Dalga ile Etkileşim Simülasyon Çalışmaları.....	20
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	22
4.1 Yüzey Modifikasyon – Metalik Kaplama Çalışmaları .....	22
4.2 Kaplama Karakterizasyon Çalışmaları .....	23
4.2.1 Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) ile Yüzey Morfolojisi İnceleme Çalışmaları .....	23
4.2.2 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile Yüzey Morfolojisi İnceleme Çalışmaları .....	29
4.2.3 XRD ile Yüzey Modifikasyonu İnceleme Çalışmaları.....	37
4.3 Elektromanyetik Ölçümler ve Sonuçları .....	40

4.3.1 Yüzeyi Metalik Kaplamalar ile Modifiye Edilmiş Cam Elyaf Dokumalarının Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları .....	40
4.3.1.1 Yüzeyi Gümüş Metali ile Modifiye Edilmiş Cam Elyaf Dokumalarının Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları .....	40
4.3.1.2 Yüzeyi Altın Metali ile Modifiye Edilmiş Cam Elyaf Dokumalarının Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları .....	50
- Silanlamanın Altın Kaplama ile Yüzey Modifikasyonu Uygulanan Cam Elyaf Dokumalarının EM Dalga ile Etkileşimine Etkisi .....	55
4.3.1.3 Yüzeyi Nikel Metali ile Modifiye Edilmiş Cam Elyaf Dokumalarının Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları .....	59
- Silanlamanın Nikel Kaplama ile Yüzey Modifikasyonu Uygulanan Cam Elyaf Dokumalarının EM Dalga ile Etkileşimine Etkisi .....	64
4.3.1.4 Yüzeyi Alüminyum Metali ile Modifiye Edilmiş Cam Elyaf Dokumalarının Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları .....	68
4.3.2 Yüzeyi Metalik Kaplamalar ile Modifiye Edilmiş Aramid Elyaf Dokumalarının Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları .....	72
4.3.2.1 Yüzeyi Altın Metali ile Modifiye Edilmiş Aramid Elyaf Dokumalarının Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları .....	73
- Silanlamanın Altın Kaplama ile Yüzey Modifikasyonu Uygulanan Aramid Elyaf Dokumalarının EM Dalga ile Etkileşimine Etkisi .....	78
4.3.2.2 Yüzeyi Nikel Metali ile Modifiye Edilmiş Aramid Elyaf Dokumalarının Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları .....	83
- Silanlamanın Nikel Kaplama ile Yüzey Modifikasyonu Uygulanan Aramid Elyaf Dokumalarının EM Dalga ile Etkileşimine Etkisi .....	87
4.3.3 Yüzeyi Metalik Kaplamalar ile Modifiye Edilmiş İnce PET Altlıkların Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları .....	91
4.3.4 Prototip Kompozit Yapıların Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları ...	96
4.3.4.1 Yüzeyi Altın Metali ile Modifiye Edilmiş Cam Elyaf Dokumalar Kullanılarak Elde Edilen Prototip Kompozitin Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları .....	96
4.3.4.2 Yüzeyi Nikel Metali ile Modifiye Edilmiş Cam Elyaf Dokumalar Kullanılarak Elde Edilen Prototip Kompozitin Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları .....	100
4.3.4.3 Yüzeyi Altın Metali ile Modifiye Edilmiş Aramid Elyaf Dokumalar Kullanılarak Elde Edilen Prototip Kompozitin Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları .....	103



4.3.4.4 Yüzeyi Nikel Metali ile Modifiye Edilmiş Aramid Elyaf Dokumalar Kullanılarak Elde Edilen Prototip Kompozitin Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları .....	107
4.4 Literatürde Bulunan Diğer Radar Absorblayıcı Malzemeler (RAM) ile Karşılaştırmalar .....	110
4.5 EM Dalga ile Etkileşim Simülasyon Çalışmaları.....	115
4.6 Mekanik Ölçümler ve Sonuçları .....	123
5. SONUÇ.....	129
REFERANSLAR .....	135
EKLER.....	138

## TABLO LİSTESİ

<b>Tablo 3.1.</b> 3 noktadan eğme testi yapılan numuneler ve uzunluk ölçüleri .....	17
<b>Tablo 4.1.</b> Gümüş, Altın ve Nikel metallerinin film kalınlığı ile değişen iletkenlik katsayıları .....	22
<b>Tablo 4.2.</b> AFM ile yüzey ölçümü yapılan silisyum altık üzerine 15nm ve 25nm kalınlığa sahip olduğu düşünülen ince altın filmlerinin yüzey bilgisi değerleri .....	37
<b>Tablo E.1.</b> 18 – 40 GHz frekans aralığında kullanılacak olan horn antenin özellikleri.....	140

## ŞEKİL LİSTESİ

<b>Şekil 2.1.</b> Elektromanyetik dalga ile malzeme etkileşiminin şematik gösterimi.....	3
<b>Şekil 2.2.</b> “Salisbury Screen” tip RAM’ın şematik modeli.....	4
<b>Şekil 2.3.</b> Jaumann Absorber tip malzemenin şematik modeli.....	5
<b>Şekil 3.1.</b> Aminopropiltrioksi silanın moleküler yapısının şematik gösterimi.....	8
<b>Şekil 3.2.</b> Silan uygulamasında gerçekleşen reaksiyonlar.....	9
<b>Şekil 3.4.</b> Kompozit yapısının şematik gösterimi ve kimyasal içeriği.....	13
<b>Şekil 5.</b> Kompozit üretimi için kullanılan sistem ve malzemeler.....	14
<b>Şekil 3.6.</b> 3 noktadan eğme testi geometrisinin şematik gösterimi.....	17
<b>Şekil 3.7.</b> Tek katmanlı (a) ve çok katmanlı (b) yapılarda yansıma (S11), geçirim (S21) ve soğurma (% Soğurma) değerlerinin belirlenmesinin şematik gösterimi.....	19
<b>Şekil 3.8.</b> Tek katmanlı ve çok katmanlı yapıların arka yüzeylerinde bir metal altlık bulunma durumlarındaki yansıma değerlerinin belirlenmesinin şematik gösterimi.....	20
<b>Şekil 4.1.</b> Cam lamel üzerine ince film olarak kaplanmış gümüş, altın ve nikel metallere elektrik iletkenliklerinin film kalınlığı ile değişimi.....	23
<b>Şekil 4.2.</b> Silikon altlık üzerinde 15 nm kalınlığı sahip Au metali ince filminin FESEM ile elde edilmiş 120000 büyütmede mikroyapı görüntüsü.....	24
<b>Şekil 4.3.</b> Silikon altlık üzerinde 20 nm kalınlığı sahip Au metali ince filminin FESEM ile elde edilmiş 120000 büyütmede mikroyapı görüntüsü.....	25
<b>Şekil 4.4.</b> Silikon altlık üzerinde 25 nm kalınlığı sahip Au metali ince filminin FESEM ile elde edilmiş 120000 büyütmede mikroyapı görüntüsü.....	25
<b>Şekil 4.5.</b> Silikon altlık üzerinde 15 nm kalınlığı sahip Au metali ince filminin FESEM ile elde edilmiş 240000 büyütmede mikroyapı görüntüsü.....	27
<b>Şekil 4.6.</b> Silikon altlık üzerinde 20 nm kalınlığı sahip Au metali ince filminin FESEM ile elde edilmiş 240000 büyütmede mikroyapı görüntüsü.....	27
<b>Şekil 4.7.</b> Silikon altlık üzerinde 25 nm kalınlığı sahip Au metali ince filminin FESEM ile elde edilmiş 250000 büyütmede mikroyapı görüntüsü.....	28
<b>Şekil 4.8.</b> Silisyum altlık üzerine kaplanmış 15 nm kalınlığa sahip altın metalinin AFM ile elde edilmiş, 500 nm x 500 nm’lik alan içinde 3-boyutlu görüntüsü.....	30
<b>Şekil 4.9.</b> Si altlık üzerine kaplanmış 15 nm kalınlığa sahip altının AFM ile elde edilmiş, 500 x 500 nm’lik alan içinde 2-boyutlu görüntüsü ve birbirinden ayrı bölgelerin boyut ölçümü.....	30
<b>Şekil 4.10.</b> Silisyum altlık üzerine kaplanmış 15 nm kalınlığa sahip altın ince filmin nihai kalınlığını tespit etmek üzere 60 µm x 60 µm’lik alan içinde AFM ile elde edilmiş 3-boyutlu görüntü.....	31
<b>Şekil 4.11.</b> Silisyum altlık üzerine kaplanmış 15 nm kalınlığa sahip altın ince filmin nihai kalınlığını tespit etmek üzere 60 µm x 60 µm’lik alan içinde AFM ile elde edilmiş 2-boyutlu görüntü ve film kalınlığı ölçümü.....	32
<b>Şekil 4.12.</b> Silisyum altlık üzerine kaplanmış 25 nm kalınlığa sahip altın metalinin AFM ile elde edilmiş, 500 nm x 500 nm’lik alan içinde 3-boyutlu görüntüsü.....	33
<b>Şekil 4.13.</b> Silisyum altlık üzerine kaplanmış 25 nm kalınlığa sahip altın metalinin AFM ile elde edilmiş, 500 nm x 500 nm’lik alan içinde 2-boyutlu görüntüsü ve tane boyutu ölçümü.....	34
<b>Şekil 4.14.</b> Silisyum altlık üzerine kaplanmış 25 nm kalınlığa sahip altın ince filmin nihai kalınlığını tespit etmek üzere 20 µm x 20 µm’lik alan içinde AFM ile elde edilmiş 3-boyutlu görüntü.....	35
<b>Şekil 4.15.</b> Silisyum altlık üzerine kaplanmış 25 nm kalınlığa sahip altın ince filmin nihai kalınlığını tespit etmek üzere 20 µm x 20 µm’lik alan içinde AFM ile elde edilmiş 2-boyutlu görüntü ve film kalınlığı ölçümü.....	36

<b>Şekil 4.16.</b> Silisyum altlık üzerine kaplanmış 15 nm kalınlığa sahip altın metalinin ince film XRD'si ile elde edilmiş spektrumu.....	39
<b>Şekil 4.17.</b> Silisyum altlık üzerine kaplanmış 25 nm kalınlığa sahip altın metalinin ince film XRD'si ile elde edilmiş spektrumu.....	39
<b>Şekil 4.18.</b> Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.....	41
<b>Şekil 4.19.</b> Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.....	42
<b>Şekil 4.20.</b> Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.....	43
<b>Şekil 4.21.</b> Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.....	44
<b>Şekil 4.22.</b> Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.....	44
<b>Şekil 4.23.</b> Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların arkasında metal ile birlikte EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.....	45
<b>Şekil 4.24.</b> Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş ve oksitlenmiş cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.....	47
<b>Şekil 4.25.</b> Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş ve oksitlenmiş cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.....	47
<b>Şekil 4.26.</b> Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş ve oksitlenmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.....	48
<b>Şekil 4.27.</b> Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş ve oksitlenmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.....	48
<b>Şekil 4.28.</b> Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş ve oksitlenmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.....	49
<b>Şekil 4.29.</b> Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş ve oksitlenmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların arkasında metal altlıkla birlikte EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.....	49
<b>Şekil 4.30.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.....	51
<b>Şekil 4.31.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.....	51
<b>Şekil 4.32.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.....	53
<b>Şekil 4.33.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.....	53
<b>Şekil 4.34.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.....	54
<b>Şekil 4.35.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapının arkasında metal altlık ile birlikte EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.....	55
<b>Şekil 4.36.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.....	56
<b>Şekil 4.37.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.....	56

<b>Şekil 4.38.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	57
<b>Şekil 4.39.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	57
<b>Şekil 4.40.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi. ....	58
<b>Şekil 4.41.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma çok katmanlı yapının arkasında metal altlık ile birlikte EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	58
<b>Şekil 4.42.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	60
<b>Şekil 4.43.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	60
<b>Şekil 4.44.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	62
<b>Şekil 4.45.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	62
<b>Şekil 4.46.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi. ....	63
<b>Şekil 4.47.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapının arkasında metal altlık ile birlikte EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	64
<b>Şekil 4.48.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	65
<b>Şekil 4.49.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	65
<b>Şekil 4.50.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	66
<b>Şekil 4.51.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	66
<b>Şekil 4.52.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi. ....	67
<b>Şekil 4.53.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma çok katmanlı yapının arkasında metal altlık ile birlikte EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	67
<b>Şekil 4.54.</b> Yüzeyi alüminyum metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	69
<b>Şekil 4.55.</b> Yüzeyi alüminyum metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	70
<b>Şekil 4.56.</b> Yüzeyi alüminyum metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	71
<b>Şekil 4.57.</b> Yüzeyi alüminyum metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	72
<b>Şekil 4.58.</b> Yüzeyi alüminyum metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi. ....	72
<b>Şekil 4.59.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	74
<b>Şekil 4.60.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	74

<b>Şekil 4.61.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi. ....	76
<b>Şekil 4.62.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	76
<b>Şekil 4.63.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi. ....	77
<b>Şekil 4.64.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapının arkasında metal altlık ile birlikte EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi. ....	78
<b>Şekil 4.65.</b> Yüzeyi altın ile modifiye edilmiş tek katmanlı aramid elyaf dokumanın silanlama öncesi (solda) ve sonrası (sağda) yapısı. ....	79
<b>Şekil 4.66.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi. ....	80
<b>Şekil 4.67.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	80
<b>Şekil 4.68.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi. ....	81
<b>Şekil 4.69.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	81
<b>Şekil 4.70.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi. ....	82
<b>Şekil 4.71.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların arkasında yansıtıcı metal altlık ile EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi. ....	82
<b>Şekil 4.72.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi. ....	83
<b>Şekil 4.73.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	84
<b>Şekil 4.74.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi. ....	85
<b>Şekil 4.75.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	86
<b>Şekil 4.76.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi. ....	86
<b>Şekil 4.77.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların arkasında metal altlık ile birlikte EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi. ....	87
<b>Şekil 4.78.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi. ....	88
<b>Şekil 4.79.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	89
<b>Şekil 4.80.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi. ....	89
<b>Şekil 4.81.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	90
<b>Şekil 4.82.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi. ....	90

<b>Şekil 4.83.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların arkasında metal altlık ile birlikte EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	91
<b>Şekil 4.84.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş PET altlık tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	92
<b>Şekil 4.85.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş PET altlık tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	93
<b>Şekil 4.86.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş PET altlık çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	94
<b>Şekil 4.87.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş PET altlık çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	95
<b>Şekil 4.88.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş PET altlık çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi. ....	95
<b>Şekil 4.89.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	97
<b>Şekil 4.91.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi. ....	98
<b>Şekil 4.92.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin arkasında metal ile birlikte EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	99
<b>Şekil 4.93.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	100
<b>Şekil 4.94.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	101
<b>Şekil 4.95.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi. ....	102
<b>Şekil 4.96.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin arkasında metal ile birlikte EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	103
<b>Şekil 4.97.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	104
<b>Şekil 4.98.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	104
<b>Şekil 4.99.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi. ....	105
<b>Şekil 4.100.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin arkasında metal ile birlikte EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	106
<b>Şekil 4.101.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	107
<b>Şekil 4.102.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	108

<b>Şekil 4.103.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi. ....	109
<b>Şekil 4.104.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin arkasında metal ile birlikte EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	110
<b>Şekil 4.105.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş 5 cam elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	116
<b>Şekil 4.106.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş 5 cam elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	116
<b>Şekil 4.107.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş 5 cam elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi. ....	117
<b>Şekil 4.108.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş 5 cam elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	118
<b>Şekil 4.109.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş 5 cam elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	118
<b>Şekil 4.110.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş 5 cam elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi. ....	119
<b>Şekil 4.111.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş 5 aramid elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	120
<b>Şekil 4.112.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş 5 aramid elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	120
<b>Şekil 4.113.</b> Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş 5 aramid elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi. ....	121
<b>Şekil 4.114.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş 5 aramid elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi. ....	122
<b>Şekil 4.115.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş 5 aramid elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi. ....	122
<b>Şekil 4.116.</b> Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş 5 aramid elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi. ....	123
<b>Şekil 4.117.</b> Silanlanmış ve silanlanmamış ham cam elyaf dokumalar kullanılarak elde edilen kompozit yapıların 3 nokta eğme testi sonuçları. ....	124
<b>Şekil 4.118.</b> Silanlanmış ve silanlanmamış, yüzeyleri altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar kullanılarak elde edilen kompozit yapıların 3 noktadan eğme testi sonuçları. ....	125
<b>Şekil 4.119.</b> Silanlanmış ve silanlanmamış, yüzeyleri nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar kullanılarak elde edilen kompozit yapıların 3 noktadan eğme testi sonuçları. ....	125
<b>Şekil 4.120.</b> Silanlanmış ve silanlanmamış ham aramid elyaf dokumalar kullanılarak elde edilen kompozit yapıların 3 nokta eğme testi sonuçları. ....	126



<b>Şekil 4.121.</b> Silanlanmış ve silanlanmamış, yüzeyleri altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalar kullanılarak elde edilen kompozit yapıların 3 noktadan eğme testi sonuçları. ....	127
<b>Şekil E.1.</b> 18 – 40 GHz frekans aralığında elektromanyetik ölçümler için kullanılacak olan horn antenlerin ölçülendirilmiş şematik görüntüsü (birimler mm cinsindedir). ....	139
<b>Şekil E.2.</b> 18 – 40 GHz frekans aralığında kullanılacak olan horn anten. ....	139
<b>Şekil E.3.</b> Serbest uzay ölçüm düzeneği içindeki horn anten, lens ve numune yerleşimi ve ölçülendirmesinin şematik gösterimi. ....	141
<b>Şekil E.4.</b> Polimerik lensin tasarlanmasında kullanılan değişkenlerin detaylı gösterimi. ....	141
<b>Şekil E.5.</b> Hesaplamaları yapılarak modellenen ve CNC tarafından işlenen polimerik lenslerin yukarıdan ve karşıdan görünümü. ....	142
<b>Şekil E.6.</b> Tasarlanan serbest uzay ölçüm düzeneği izometrik görünümü. ....	143
<b>Şekil E.7.</b> Tasarlanan serbest uzay ölçüm düzeneğinin önden görünümü. ....	143
<b>Şekil E.8.</b> Tasarlanan serbest uzay ölçüm düzeneğinin yukarıdan görünümü. ....	144
<b>Şekil E.9.</b> Tasarlanan serbest uzay ölçüm düzeneğinin yandan görünümü. ....	144
<b>Şekil E.10.</b> Proje kapsamında EM ölçüm yapmak üzere kullanılmış vektörel ağ analizörü. ....	146
<b>Şekil E.11.</b> Farklı yükler ve açık devre parçalarından oluşan kalibrasyon kiti. .	147
<b>Şekil E.12.</b> Serbest uzay ölçüm düzeneği. ....	148
<b>Şekil E.13.</b> Serbest uzay ölçüm düzeneğinin yukarıdan görünümü. ....	149
<b>Şekil E.14.</b> Serbest uzay ölçüm düzeneğinin yandan görünümü. ....	149
<b>Şekil E.15.</b> Serbest uzay ölçüm düzeneğinin diğer yandan görünümü. ....	150
<b>Şekil E16.</b> Serbest uzay ölçüm düzeneği ve vektörel ağ analizörü. ....	150

## ÖZ

Elektromanyetik (EM) dalgalar günümüz teknolojisinde radarlar, telekomünikasyon, telsiz (wireless) bilgi transferi yanında tıbbi tanı koyma ve araştırma sistemlerini de içeren askeri ve sivil uygulamalarda geniş kullanım alanları bulmaktadır. Teknolojideki gelişmelerin bir sonucu olarak santimetre ve milimetre seviyesinde dalga boyuna sahip elektromanyetik dalgaların kullanımı her geçen gün yaygınlaşmakta ve farklı kaynaklardan yayılan dalgaların birbirleriyle ya da çevreyle etkileşimleri giderek büyüyen bir sorun haline gelmektedir. Yüksek frekanslarda ve geniş frekans bantlarında çalışan bu uygulamalar, gerek yüksek performans gereksinimleri gerekse çalışma güvenliği ve kararlılığı açısından elektromanyetik dalga soğurucu malzemelerin gelişimini zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda, son yıllarda EM dalga soğurucu ve parazit önleyici malzemeler üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Günümüze kadar bu amaç için üretilmeye çalışılmış olan malzemelerin uygulanmasında birçok sorun ve kısıtlamayla karşılaştığı görülmüştür. Bunlar, geliştirilen malzemenin yeterli genişlikte bir frekans aralığında etkin olmaması ve ağırlık ya da çevresel koşullara dayanım gibi yapısal özellikler bakımından istenilen davranışı göstermemesidir.

Proje kapsamında 18-40 GHz frekans aralığında etkin elektromanyetik (EM) dalga soğurucu işleve sahip yapısal kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve bu malzemelerin karakterizasyonu konularında çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, normal şartlar altında dielektrik özellikleri sebebiyle EM dalgalara geçirgen olan cam ve aramid elyaf dokumalar yüzeylerine nanometre mertebesinde kalınlıklarda uygulanan metalik kaplamalarla EM dalgaları soğurucu hale getirilmiştir. Yüzeyleri modifiye edilen bu elyaf dokumalarla oluşturulan çok katmanlı yapılarla epoksi matris takviye edilmiş ve EM dalgaları ölçüm yapılan aralıkta %90 ve üzerinde soğuran EM dalga soğurucu prototip kompozitler üretilmiştir. Ayrıca, üretilen prototip kompozitlerde silanlama uygulaması yapılmış ve takviye malzemesi olarak kullanılan elyaf dokuma yüzeylerine uygulanan metalik modifikasyon sebebiyle bozulmuş olabilecek elyaf-matris etkileşimi iyileştirilerek mekanik özelliklerde düşüş olmamasına çalışılmıştır. Her ne kadar bu çalışma kapsamında optimizasyonu hedeflenmemiş olsa da silanlamanın ara yüzey etkileşimini geliştirerek EM dalga soğurucu kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmede kullanılabileceği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Yüzey kaplama, Fiber dokuma, Polimer matrisli kompozit, Mikrodalga, EM dalga soğurucu malzeme, Serbest uzay ölçüm yöntemi, silanlama.

## ABSTRACT

In today's technology, electromagnetic (EM) waves are being used in various military and civil applications such as radars, telecommunication systems and wireless data transfer as well as medical diagnosis and imaging. In the wake of technological developments, the usage of electromagnetic waves with millimeter to centimeter wavelengths becomes more widespread everyday; as a result of which interaction of EM waves emanating from various sources with the environment and with each other has become an important issue. High performance requirements along with operational security and stability needs of the above-mentioned applications operating at high frequencies in wide bands, renders the development of EM wave absorbing materials crucial. In this context, in the last decades research studies have focused on EM wave absorbing and interference shielding materials. As per date, there have been many problems and limitations regarding the engineering application of such these materials. These basic problems could be summarized as the limited operational frequency bands as well as the insufficient structural characteristics including heavy weight and poor environmental resistance of the materials developed so far.

In the scope of this project, studies have been conducted to develop structural composite materials absorbing EM waves in 18-40 GHz frequency range and to characterize such materials. In this regard, glass and aramid fiber woven fabrics transparent to EM waves due to their dielectric properties under normal conditions were surface-modified by nanometer thick metallic coatings providing them EM wave absorbing character. Multilayered structures formed by these surface-modified fiber woven fabrics were used to reinforce epoxy matrix, as a result of which EM wave absorbing prototype composites capable of absorbing more than 90% of the incident radiation within the studied frequency range have been developed. Furthermore, silanization has been applied on the fabricated prototype composites in order not to have a reduction in the mechanical properties by improving the fiber-matrix interaction, which might have been weakened by the metallic surface modification applied on the fiber woven fabrics. Although its optimization has not been aimed within the scope of this study, it has been shown that silanization can be used to improve the interfacial interaction to enhance the mechanical properties of EM wave absorbing composites.

**Keywords:** Surface coating, Fiber woven fabric, Polymer matrix composite, Microwave, EM wave absorbing material, Free-space measurement method, silanization.

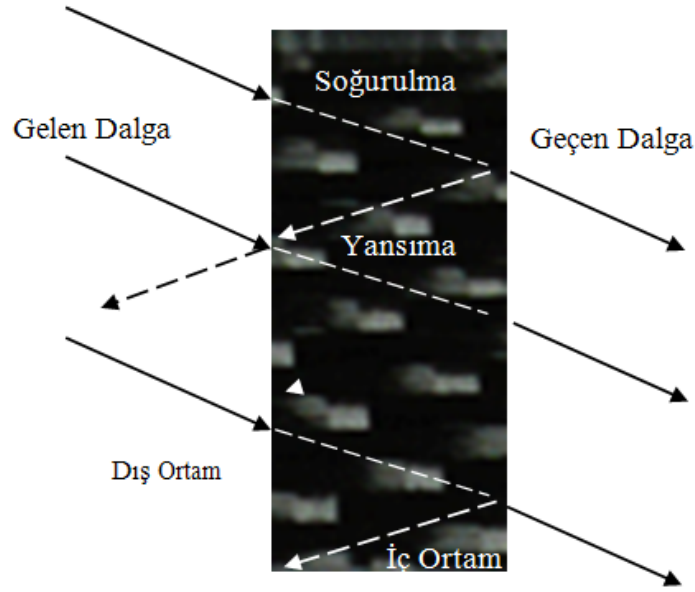
## 1. GİRİŞ

Önerilen projenin temel amacı, 18-40 GHz frekans bandında elektromanyetik dalga soğurucu özelliğe sahip yapısal kompozit malzeme geliştirmek ve tasarım prensipleri ortaya koymaktır. Genel olarak, askeri ve sivil kapsamlı çok çeşitli amaçlar için kullanılan radarlar 2-18 GHz frekans aralığında çalışmaktadır. Fakat günümüzde gerek gelişmekte olan yeni radar sistemleri gerek de yüksek veri hızları istenilen telsiz iletişim uygulamalarında 18 GHz üzeri frekans bantlarının kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu sebeple, tamamlanan proje kapsamında 18-40 GHz frekans aralığında etkin olarak elektromanyetik (EM) dalga soğurucu işleve sahip yapısal malzemelerin geliştirilmesi ve bu malzemelerin karakterizasyonuna çalışılmıştır. Proje sonucunda elde edilen çıktıların EM dalga soğurucu polimerik matrisli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Geliştirilen bu ilave elektromanyetik işleve sahip kompozitlerin, elektromanyetik parazit ya da etkileşimden korunması gereken taşıtların ya da ortamların elektromanyetik yalıtımı gibi yapısal uygulamalarda kullanılabileceği öngörülmektedir. Ana hatlarıyla belirtilen amaç doğrultusunda yapılmış olan tüm araştırma ve geliştirme çalışmaları literatürde tarafımızca rastlanmayan bir yaklaşım doğrultusunda sistematik olarak yürütülmüştür. Proje neticesince, yüksek frekans bantlarında etkin EM dalga soğurucu malzemeleri, özellikle ulusal kaynakları öncelikli olarak kullanmak suretiyle, üretmeyi mümkün kılacak detaylı bilgi birikimine (know-how) ulaşılmış olduğu kıymetlendirilmektedir.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

Uzayda kendiliğinden ya da yapay kaynaklardan yayılarak ilerleyen elektromanyetik dalgalar, radarlar, telekomünikasyon, telsiz (wireless) bilgi transferinin yanı sıra tıbbi tanı koyma ve araştırma sistemlerini de içeren askeri ve sivil birçok uygulama alanına sahiptir. Teknolojideki gelişmelerin bir sonucu olarak santimetre ve milimetre seviyesinde dalga boyuna sahip elektromanyetik dalgaların kullanımı her geçen gün yaygınlaşmakta ve farklı kaynaklardan yayılan dalgaların birbirleriyle ya da çevreyle etkileşimleri giderek büyüyen bir sorun haline gelmektedir. Yüksek frekanslarda ve geniş frekans bantlarında çalışan bu uygulamalar, gerek yüksek performans gereksinimleri gerekse çalışma güvenliği ve kararlılığı açısından elektromanyetik dalga soğurucu malzemelerin gelişimini zorunlu kılmaktadır.

Elektromanyetik dalga soğurucu malzemelerin temel görevi elektromanyetik enerjiyi belli bir alanda ve belli değerde sınırlamak ya da yayılmasını engellemektir [Neelkanta, 1995]. Şekil 2.1'de bir malzeme ile elektromanyetik dalganın karşılaşması durumunda ortaya çıkabilecek yansıma, soğurulma ve geçirim olguları şematik olarak gösterilmektedir. Bir malzemenin elektromanyetik dalga soğurucu olarak kullanılabilmesi için elektromanyetik enerjiyi sönmümesi ya da dağıtması gerekir. Bu da yüklü parçacıkların transferiyle oluşan ohmik kayıp, moleküler polarizasyon kaybı veya manyetik kutuplaşma kaybı olarak adlandırılan mekanizmalar ile olur [Neelkanta, 1995]. Bu özellikleri taşıyan malzemeler elektromanyetik dalga soğurucu malzeme olarak adlandırılırlar. Elektromanyetik dalga soğurucu malzemelerin elektromanyetik radyasyonla etkileşimini tanımlayan temel özellikler bu malzemelerin manyetik ve elektrik geçirgenlik parametreleri ile buna bağlı empedansları ( $Z_m$ ) ile ilişkilidir [Marshall et al., 1990]. Kullanım alanları dikkate alındığında elektromanyetik dalga soğurucu malzemeler; radar absorblayıcı (soğurucu) malzemeler (RAM), elektromanyetik eko kalkanları (electromagnetic interference shielding, EMI), parazit giderici malzemeler ve yüksek frekanslı iletişim hatlarında kullanılan malzemeler olarak sınıflandırılabilirler.



**Şekil 2.1.** Elektromanyetik dalga ile malzeme etkileşiminin şematik gösterimi.

Günümüz teknolojisinde radarın çalışma prensibi, bir vericinin darbe (pulse) halinde yaydığı radyo dalgalarının hedefe çarpıp geri dönmesi ve bir alıcı tarafından yakalanması şeklindedir [Knott et al., 1993]. Alıcı geri dönen dalgadan hedefin yönünü, mesafesini ve hızını bulabilir. Hedeften gelen radar yankısını düşürmenin iki temel yolu vardır: Hedefin şeklini değiştirerek dalgaları değişik yönlere saçmak veya hedefe düşen dalgaların elektromanyetik enerjisini emerek hedeften geri yansıyan enerjiyi azaltmaktır [Chin et al., 2005]. Yapılan çalışmalar şekil değişikliğinin hedefin aerodinamik yapısını bozduğunu ve etkinliğini azalttığını göstermiştir. Bu nedenle elektromanyetik dalga soğurucu malzemelerle ilgili çalışmalar; bu tip monolitik malzemelerin yüksek ağırlıkları, düşük çevresel dirençleri ve düşük mekanik özellikleri nedeniyle elektromanyetik dalga soğurucu kompozitlere yoğunlaşmaktadır [Chin et al., 2007; Park et al., 2006; Vinoy, 1996].

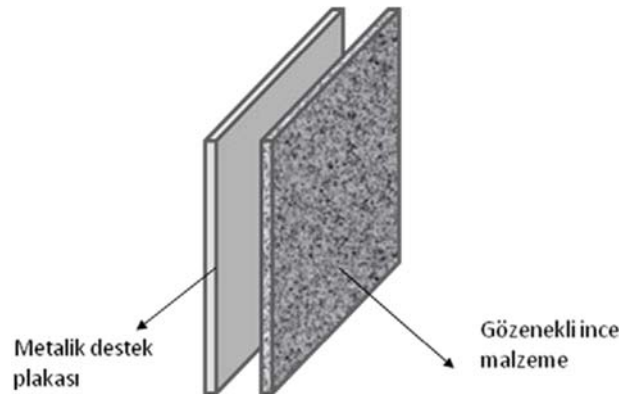
RAM'lar bir savunma ya da saldırı sisteminin radar kesit alanı (RKA – radar cross section: RCS) diye adlandırılan radar görüntüsünü azaltıp yapıyı radara karşı daha az görünür (Stealthy) hale getirmek üzere tasarlanırlar [Knott et al., 1993]. Kompozit yalıtkan malzemeler, iletken parçacık yüklü polimer ve seramik malzemeler ile ferritler RAM olarak kullanılmaktadır [Chin et al., 2005; Seo et al., 2004; Wang et al., 1998; Luo et al., 1999; Lee et al., 1999; Ghasemi et al., 2005]. Toz ya da fiber yapıları dielektrik, metalik, karbon ya da ferrit malzemelerin polimer matrisler içine dağıtılmasıyla elde edilen kompozit malzemeler boya tarzında ya da karolar halinde yüzeylere uygulanabilir. Bunun yanında ferrit tipi malzemeler pişirilmiş karolar

halinde de RAM olarak kullanılabilir [Wang et al., 2002; Rezende et al., 2001; Amin et al.,1981; Weir, 1974; Biscaro et al.,2003].

Tüm bu malzemelerde radarı soğurma gücü malzemenin kalınlığı, geometrisi ve yüzey topografisi ile kompozit RAM'larda katkı fazının miktarı, boyutu ve birbiri arasındaki etkileşimine bağlıdır. Üstün radar soğurma özelliği gösterecek malzeme yapısı ve kombinasyonlarına sahip RAM'ların sıcaklık, nem ve yabancı parçacık erozyonu gibi operasyon ortamı koşullarına dayanıklı olmasının yanında hafif, kolay uygulanabilir ve düşük maliyetli olması gerekmektedir.

İletken özelliklere sahip olan metalik ve ametalik parçacıklar (gümüş, karbon vb.) reçine kıvamında polimer matrislerde dağıtılarak oluşturulan parçacık dolgu kompozitler [Chin et al., 2007; Luo et al., 1999; Pinho et al.,2002; Wen et al.,2007] ile paslanmaz çelik ve karbon fiber takviyeli kompozitler [Huang et al., 2004; Shui et al., 2000; Tzeng et al., 2001; Wu et al., 2002; Zhao et al., 2006] farklı frekans bantlarında elektromanyetik dalga soğurucu malzemeler olarak kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak ferrit ve nikel gibi manyetik kayıp sağlayan parçacıklar da elektromanyetik dalga soğurucu takviye malzemeleri olarak kullanılmaktadır [Chin et al., 2007; Park et al., 2006; Oh et al., 2004].

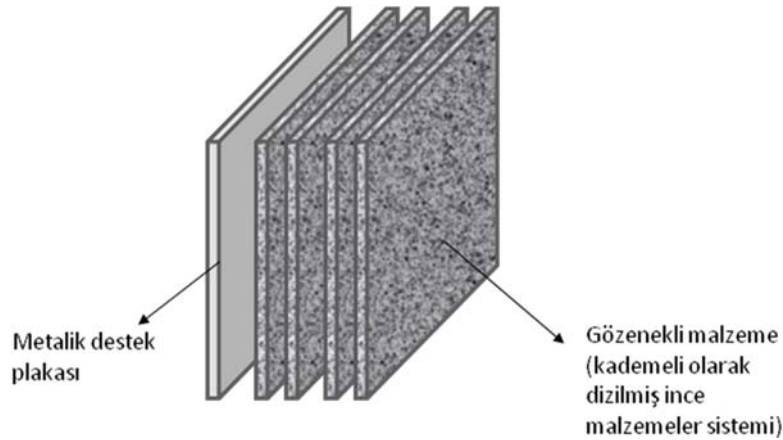
RAM'ların ilk geliştirilmiş hali "Salisbury Screen" adıyla bilinmektedir. Burada grafit katkıli gözenekli ince malzeme, sönümlenmesi istenen dalganın dalga boyunun dörtte biri kadar uzaklıkta ( $\lambda/4$ ) metalik destek plakasının üzerine yerleştirilir. İletim hattı (Transmission Line) teorisinde de açıklandığı üzere, kayıplı (lossy) bir malzemenin herhangi bir dalga boyunun dörtte biri kadar uzağına yerleştirilen metalik plaka (kısa devre) kayıplı malzeme üzerinde bahse konu dalga boyu bakımından etkili bir açık devre (open circuit) yaratmış olur. Bu durumda, gelen dalga boş uzayı görmüş gibi davranacağından yansıma gerçekleşmez böylece EM dalganın enerjisi de ince plaka ile soğurulmuş olur.



**Şekil 2.2.** "Salisbury Screen" tip RAM'ın şematik modeli.

Eğer aradaki mesafe dalga boyunun dörtte biri kadar değilse, gelen dalga destek plakasının direncine paralel olarak belli bir empedans ile karşılaşır. Bu da boş uzayın empedansından farklıdır. Bu yüzden, gelen dalganın bir kısmı yansır.  $\lambda/4$  mesafeli ideal konumdan farklı yerleşimlerde ortaya çıkan bu durumda, sapma arttıkça istenmeyen yansıma da artar. Dolayısıyla Salisbury Screen çok dar bir frekans aralığında çalışan ve pek de kullanışlı olmayan bir yöntemdir.

Etkin frekans bandı genişliğinin artırılması, artarda kademeli olarak dizilecek olan ve aralarında ayırıcı parçalar bulunan birden fazla ince malzemelerin oluşturduğu bir sistem ile mümkündür. Direnç, sırayla her bir malzemede giderek azalır. Burada kademeli yerleştirmeden kasıt, sistem içindeki direncin metalik destek plakasına yaklaştıkça giderek azalmasıdır. Bu sistemin adı ise literatürde “Jaumann Absorber “ olarak geçmektedir. Eklenen her bir ince tabaka ile etkin olunan bant aralığı daha da genişlese de, her eklenen ince tabaka, ek ayırıcılara ihtiyaç duyduğundan toplam kalınlık da artar [Knott et al., 1993]. Bu da sistemin kalınlığını ve maliyetini arttıracığından Jaumann Absorber tip malzemeler pratikte tercih edilmemektedir.



**Şekil 2.3.** Jaumann Absorber tip malzemenin şematik modeli.

Dirençli ince malzemelerden oluşan sistemler haricinde, karbon dolgululu hacimli polimerik malzemeler de EM dalga soğurucu olarak kullanılmaktadır. Karbonun iletkenliği alüminyum, çelik gibi metallerinkine kıyasla daha azdır ama monolitik halde kullanım için hala çok yüksektir. Bu sebeple hacimsel iletkenlik, fiber malzemelerin üstüne yapılacak olan ince kaplamalar ile azaltılabilir. Daha az kalınlığa sahip soğurucu malzeme, manyetik kayıplı malzemeleri kullanılarak üretilebilir. Manyetik kayba sahip dolgu malzemeleri, dielektriklere kıyasla daha



inedir ancak bu tip EM dalga soğurucular, daha düşük frekans bantlarında etkin olup içerdikleri yüksek demir konsantrasyonu sebebiyle daha yüksek yoğunluğa sahiptirler.

“Kademeli absorblayıcı malzemeler” (graded absorbers), gittikçe azalan bir geçirim kaybı elde etmek için kullanılmaktadır. Dielektrik ve/veya manyetik dipol yoğunluğu malzeme içinde yapıya bağlı olarak değişir. Hava ve metal yüzeyi arasındaki kademeli yapısal empedans farkı, malzeme yüzeyinden oluşan kuvvetli yansımaları engelleyecek şekilde ayarlanır. Gelen dalganın hızı, sistematik olarak azaltılır ve böylelikle kuvvetli kırınım da engellenmiş olur. Piramit şeklindeki geometriler, kayıplı dielektrik [Knott et al., 1993] malzemeler ve gittikçe incelen absorblayıcı malzemeler [Neelkanta, 1995] ile doldurulmuş olup, “kademeli absorblayıcı malzemeler” in tasarım ve üretiminde önemli rol oynar. Kademeli dielektrik yapı aynı zamanda çok katmanlı Jaumann Absorber’larda da kullanım alanı bulmaktadır.

### 3. GEREÇ VE YÖNTEM

#### 3.1 Kaplama Üretimi

Projenin yüzey modifikasyon çalışmalarına, cam lamel ve silikon yonga yüzeylerine Isıl Buharlaştırma yöntemi (direkt saf metalden termal buharlaştırma) ile modifikasyon uygulanması ile başlanmıştır. Çalışmanın bu safhası, planlanan deneylerde yer alan E-cam ve Aramid elyaf dokumaların yüzeylerine nanometre mertebesindeki kalınlıklarda (15-35 nm) metalik kaplamaların uygulanmasından önce, kullanılan kaplama cihazının hassasiyeti ve kaplama parametreleriyle ortaya çıkan metalik kaplamaların yüzey morfolojileri, mikroyapıları ve homojenitelerinin belirlenmesi için gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada cam lamellerin üzerine 15-25 nm kalınlıklarda uygulanan gümüş kaplamaların yüzey özellikleri ve bunların kaplama parametreleri (değiştirgeleri) ile olan değişimi incelenmiştir. Cam lameller üzerine uygulanan metalik kaplamalar elektriksel iletkenlik ölçümlerinde, silikon yonga üzerine uygulanan metalik kaplamalar ise temel yapısal karakterizasyon çalışmalarında kullanılmıştır.

Proje kapsamında yüzey modifikasyonunda kullanılacak metaller altın (Au), alüminyum (Al), gümüş (Ag) ve nikel (Ni) olarak belirtilmiştir. Genel olarak, altın, gümüş ve nikel metallerinin ısı buharlaştırma ile yüzeylere uygulanmasında herhangi bir sorun ile karşılaşılmamıştır. Ancak, alüminyumun ısı buharlaştırma yöntemi ile yüzeylere kaplanması sırasında karşılaşılan teknik sebepler (raporun daha sonraki bölümlerinde detaylandırılacaktır) dolayısıyla, bu çalışma kapsamında alüminyum kaplamaların karakterizasyon sonuçlarına yer verilmemiştir.

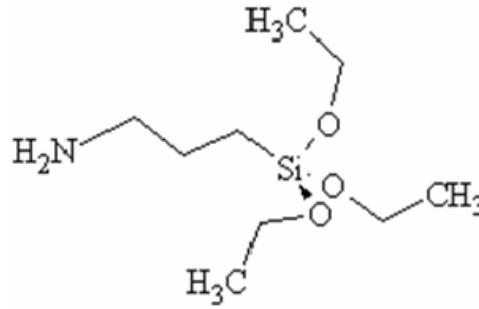
Söz konusu numuneler ısı buharlaştırma yöntemi ile elde edilirken aşağıda belirtilen parametreler kullanılmıştır. Gümüş kaplanması sırasında ortam basıncı  $4 \times 10^{-6}$  torr mertebesinde tutulmuş, 44,2 A buharlaştırma akımı ile 1,36 Å/s'lik bir kaplama hızı elde edilmiştir. Altın kaplanması sırasında ise ortam basıncı  $1,5 \times 10^{-6}$  torr mertebesinde tutulmuş, 74,0 A buharlaştırma akımı ile 0,15 Å/s'lik bir kaplama hızı ile işlem gerçekleştirilmiştir. Nikel kaplanması sırasında ise ortam basıncı  $2,5 \times 10^{-6}$  torr mertebesinde tutulmuş, 80,4 A buharlaştırma akımı ile 1,10 Å/s'lik bir kaplama hızı ile işlem gerçekleştirilmiştir. Alüminyumun kaplanması sırasında ise ortam basıncı  $4,0 \times 10^{-7}$  torr mertebesinde tutulmuş, 58,5 A buharlaştırma akımı ile 6,30 Å/s'lik bir kaplama hızı ile işlem gerçekleştirilmiştir. Silikon altlık üzerine 15, 20 ve 25 nm kalınlıklarda gümüş, altın ve nikel kaplamalar uygulanmıştır. Gümüş ve altın kaplama işlemi sırasında tungsten bot, nikel ve alüminyum kaplama işleminde ise tungsten sepet kullanılmıştır. Gümüş kaplamak üzere tungsten bot içine toplam ağırlığı 1,1 gram olan gümüş peletler yerleştirilmiştir. Altın kaplamak için ise tungsten bot içine toplam

ağırlığı 1,5 gram olan altın peletler konulmuştur. Nikel kaplamak üzere tungsten sepet üzerine toplam 0,7 gram ağırlığında nikel peletler yerleştirilmiştir. Alüminyum kaplamak üzere tungsten sepet üzerine toplam 0,5 gram ağırlığında alüminyum peletler konulmuştur. Bu metallerin buharlaştırılması sırasında plazma oluşumu gözlemlenmemiştir.

### 3.2 Kompozit Üretimi

#### 3.2.1 Silan Uygulaması

Silan uygulaması kompozit malzemelerde inorganik fazın organik fazla etkileşimini artırmak amacıyla gerçekleştirilen kimyasal bir işlemdir. Bu kimyasal uygulama neticesinde fazlar arasında köprü yapısına benzer bir bağ kurulmakta ve bu oluşum malzemenin mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde etkili rol oynamaktadır. Bu proje çerçevesinde oluşturulmuş olan kompozitlerin mekanik özelliklerinin artırılması amacıyla aminopropiltrietoksi silan kullanılarak (APS) silan uygulaması gerçekleştirilmiştir. Aminopropiltrietoksi silanın moleküler yapısı Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Üretilen prototip kompozitlerde özellikle aminopropiltrietoksi silan kullanımının uygun görülmesi, kompozit yapısında matrisi termoset bir polimer olan epoksinin oluşturması ve epoksi ile aminopropiltrietoksi silanın etkin bir yüzey etkileşimi sağlamasından kaynaklanmaktadır.



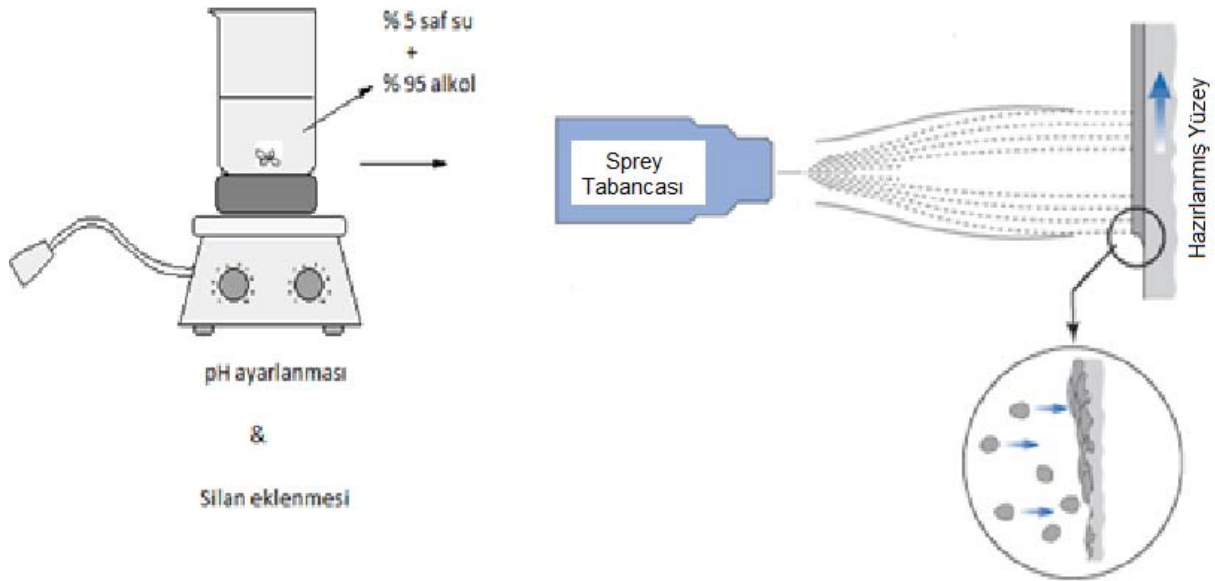
**Şekil 3.1.** Aminopropiltrietoksi silanın moleküler yapısının şematik gösterimi.

Silanlama uygulaması iki temel reaksiyon sonucunda gerçekleşmektedir. Hidroliz ve kondenzasyon olarak adlandırılan bu iki temel reaksiyon Şekil 3.2'de sunulmaktadır. İlk reaksiyon silan ve inorganik kısımda bağ oluşumunu sağlamak amacıyla belirli bir pH ortamında ortamdaki alkolün uzaklaştırılması ile silan yapısında -OH bağlarının oluşması ile gerçekleşir. Kondenzasyon reaksiyonunda ise oluşmuş olan -OH bağlarının inorganik kısımda bulunan oksijen ile etkileşime girip silan ve inorganik yüzeyin tam olarak yüzey etkileşiminin oluşmasını içermektedir.



kompozitlerin mekanik özelliklerinde yaratabileceği negatif etkinin ortadan kaldırılması hedeflenmiştir.

Proje kapsamında silanlama uygulaması, belirli bir pH aralığında tutulan su-alkol solüsyonuna silan eklenmesi sonucunda oluşan sıvının metalik ince film kaplanmış cam veya aramid elyaf dokuma yüzeylerine spreyle püskürtülmesi ile tamamlanmıştır. Silan uygulaması için solüsyon hazırlanması kapsamında 100 ml distile edilmiş su ve alkol içerisine asetik asit eklenerek pH'ın 4.5-5.5 aralığına getirilmesinin ardından, solüsyon 17µl aminopropiltrioksil silan eklenerek 90 dakika manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Bu aşamayla hidroliz reaksiyonu gerçekleşmiş olan solüsyonun metal kaplı cam ya da aramid elyaf dokuma yüzeylerine spreyle sıkılmasının ardından, kondenzasyon reaksiyonunun sağlanması için elyaf dokumalar 120 °C'lik etüvde yaklaşık olarak 60 dakika bekletilmiştir. Son reaksiyonun da etkili bir şekilde tamamlanmasının ardından vakum torbalama uygulaması ile kompozit üretimine geçilmiştir. Silan uygulaması ile ilgili uygulanan prosedür Şekil 3.3'te şematik olarak sunulmaktadır.



**Şekil 3.3.** Silan uygulanmasında gerçekleştirilen prosedürün şematik gösterimi.

### 3.2.2 Prototip Kompozit Üretimi

Proje kapsamında, prototip kompozitlerin matrisi olarak epoksi reçine seçilmiş ve takviye malzeme olarak yüzeyi modifiye edilmiş cam elyaf ve aramid elyaf dokumalar epoksi matrisle yerleştirilmiştir. Prototip kompozitlerin üretimi için vakum torbalama yöntemi kullanılmıştır. Takviye malzemesi olarak kullanılan yüzeyi modifiye edilmiş cam ve aramid elyaf dokumalar daha önce bahsedildiği gibi silanlama uygulamasından geçirilmemiş ve geçirilmiş olarak iki grup halinde prototip kompozit yapımında kullanılmak üzere hazırlanmıştır. Vakum torbalama tekniği kullanılarak polimer (rezin) matris ve takviye malzemeleri bir araya getirilmiştir. Elde edilen prototip kompozit yapı içerisinde oluşan kimyasal bağ, yapısal görünümü ve kimyasal detayları Şekil 3.4'te şematik olarak gösterilmiştir.

Vakum torbalama yöntemi, polimer matrisli yapısal kompozit üretimi için kolay ve hızlı bir üretim yöntemidir. Bu yöntem, atmosferik basıncı kullanarak resin uygulanmış yüzeyleri kürlenme tamamlanana kadar bir arada tutmaya dayanan bir yöntemdir. Vakum torbalama resin-takviye malzeme oranını optimize etmek için kompozit üretimi yöntemleri arasında basit ve ideal bir yöntem olarak ileri çıkmaktadır. Bu yöntemin avantajları arasında, takviye ve resin malzemelerini sıkıştırmak için kullanılacak vakumun kolay uygulanabilir olması, resin-takviye malzeme oranının kontrolü, her türlü kompozit geometrisine kolay uygulanabilir olması ve etkili sıkıştırma yaratılması sayılabilir.

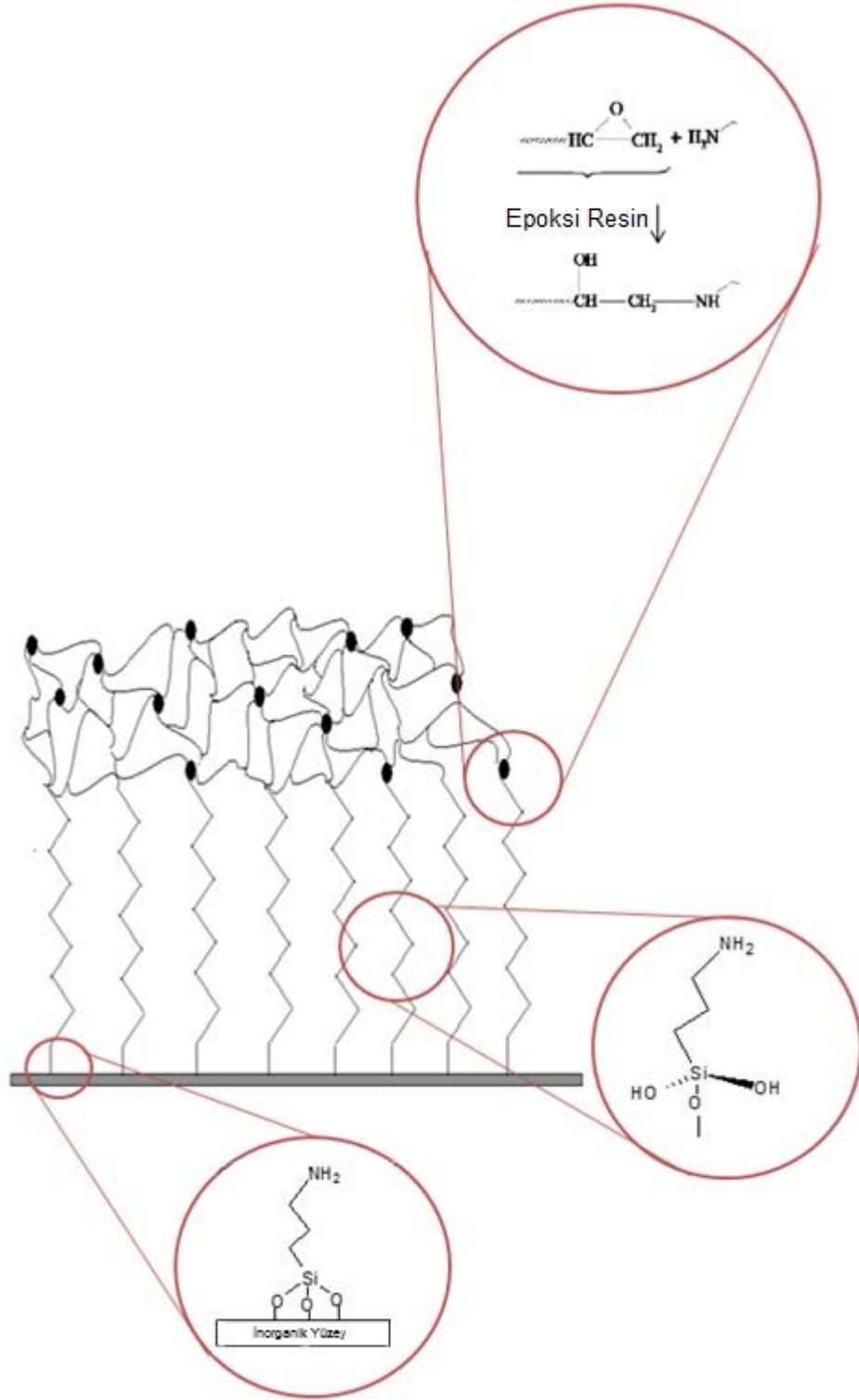
Bu üretim yönteminde öncelikle, kompozit yapımının üzerinde tamamlanabileceği temiz, kimyasal kirlilik yaratmayacak ve resin malzemesine yapışmayacak bir proses yüzeyi seçilmelidir. Bu yüzey üzerine, takviye malzemeleri sırayla konularak ve aralarına resin sürülerek sandviç yapı oluşturulur. Bu sandviç yapı hazırlanırken resin malzeme miktarı çok önemli olmamakla birlikte takviye malzemesinin her katmanını ayrı ayrı tamamen ıslattığından emin olunmalıdır. Takviye malzemeleri üzerinde kalan fazla resin, vakum poşetleme yönteminin avantajlarından faydalanılarak sistemden dışarı atılabilmektedir.

Resin malzemesinin takviye malzemesini tamamen ıslattığından emin olunduktan sonra sıkıştırma işleminin uygulanabilmesi için vakum ortamı yaratılması; dolayısıyla, sandviç yapının atmosfer ortamından izole edilmesi gerekmektedir. Bunun için, sandviç yapı altında bulunan proses yüzeyine sızdırmazlık bandı yapıştırılarak bir çerçeve oluşturulur. Bu çerçeve üzerine sandviç yapının üstünü kapatacak biçimde; sırasıyla, soyma kumaşı, havalandırma kumaşı ve vakum poşeti yerleştirilir. Poşetleme işlemi sırasında, vakum poşeti yerleştirilmeden önce, havalandırma kumaşı üzerine vakum portu yerleştirilmeli ve vakum poşeti, bu portun üzerinde kalacak şekilde sistem kapatılmalıdır. Bu işlemlerin tamamlanması ile takviye ve resin malzemelerini içeren sandviç yapı atmosferik ortamdan izole edilmiş ve vakum portunun

sistemin içerisinde olması ile vakum edilmeye ve sıkıştırılma basıncı uygulanmasına hazır duruma getirilmiş olur. Prosedürün devamında, rezin malzemesinin kürlenmesi tamamlanana kadar vakum uygulanarak sistemden fazla rezin uzaklaştırılır ve optimum rezin-takviye malzeme oranına ulaşılır. Resin tamamen külendikten sonra sistem açılarak kompozit üretimi tamamlanır.

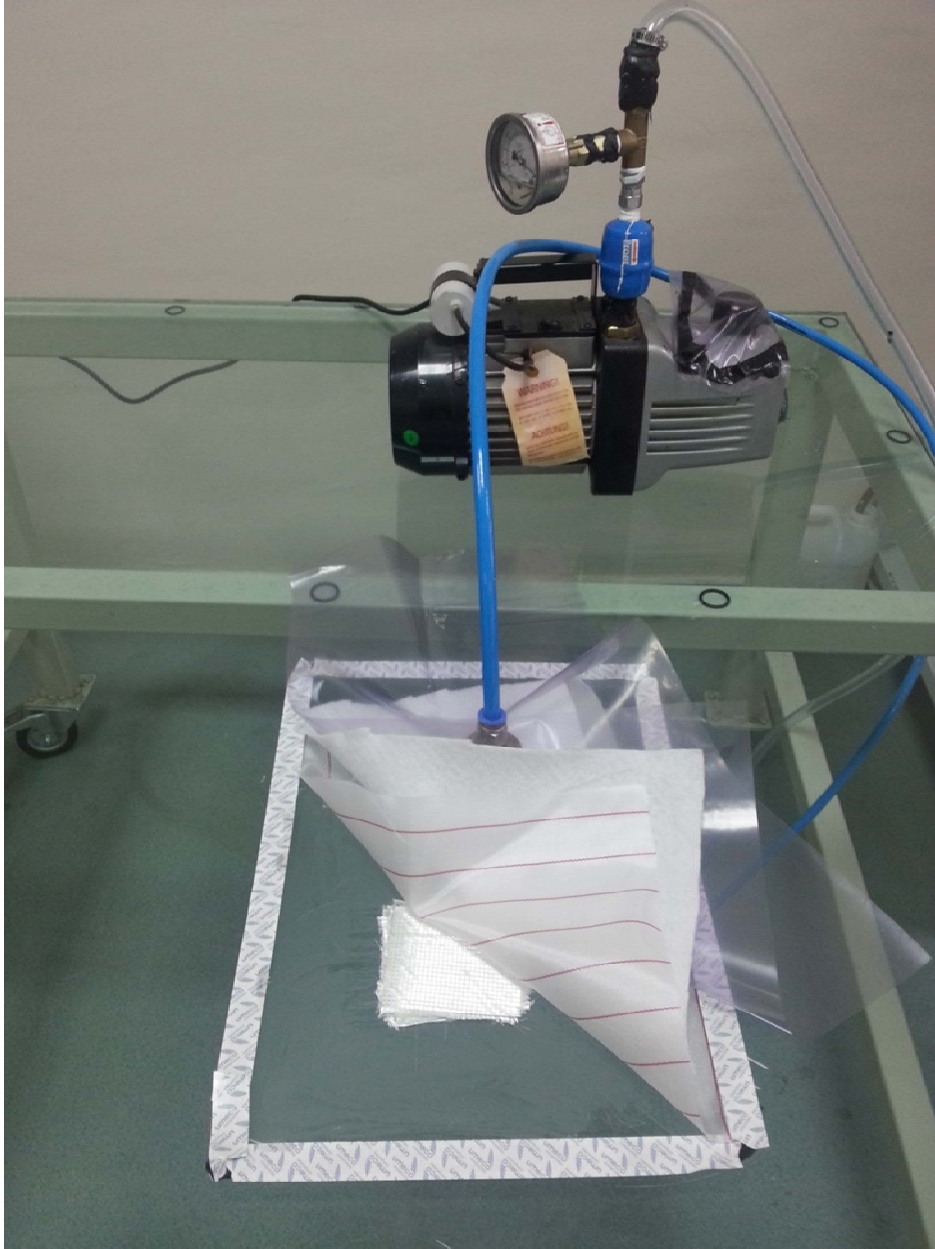
Yürütölen proje kapsamında vakum poşetleme yöntemi yukarıda bahsedildiği gibi uygulanmış olup bu prosedürün ayrıntılarına aşağıda yer verilmiştir. Kompozit yapımında kullanılan yüzeyleri modifiye edilmiş aramid ve cam elyaf kumaşlar METYX®, Telateks Tekstil Ürünleri Ltd. Şti'den temin edilmiştir. Resin malzemesi olarak Duratek A1151 seri epoksi seçilmiştir. Kompozit yapının üzerinde oluşturulacağı proses yüzeyi olarak 1,5 m x 1,5 m ebadında cam tezgâh kullanılmıştır. Prototip kompozit üretimi prosedürü içerisinde ilk olarak resin malzemesi hazırlanmıştır. Duratek A1151 serisi, epoksi reçineyi ve sertleştiricisini birlikte içermektedir. Uygun resin hazırlamak üzere; epoksi ile sertleştirici oranları üretici tarafından önerildiği şekilde ağırlıkça 74-26 olacak şekilde karıştırılmıştır.

Resin karıştırılması devam ederken, cam tezgâh yüzeyi üzerinde kompozit yapısına karışması muhtemel kimyasallar kalmaması için temizlenmiş ve yüzeyine kalıp ayırıcı bileşen sürölerek kullanılmaya hazır hale getirilmiştir. Kalıp ayırıcı sürölen cam tezgâh yüzey üzerinde sızdırmazlık bandı ile bir çerçeve oluşturulmuş ve takviye ile resin malzemelerinin yerleştirilmesi için uygun hale getirilmiştir. Kalıp ayırıcı uygulanan cam tezgâh üzerine, karıştırılarak hazırlanan resin fırça yardımı ile sürölmüş ve üzerine takviye malzemeleri kat kat yerleştirilmiştir. Her takviye malzemesi katmanına resin fırça ile uygulanmış, bu işlemde resin takviye malzemesini tamamen ıslatacak biçimde sürölmüştür. Vakum poşetleme tekniğinin anlatımında olduğu gibi, her takviye katmanı resin ile tamamen ıslatılarak sandviç yapı elde edilmiş ve poşetleme işlemi soyma kumaşı, havalandırma kumaşı, vakum portu ve vakum torbası yerleştirilerek tamamlanmıştır. Prosedürün devamında vakum portu, vakum pompasına bağlanarak sistem tamamlanmıştır. Sistem vakuma alınıp resin malzemesinin kürlenme süresi olan 3 saat kadar vakum altında bırakılmıştır. Daha sonra, sistem açılarak prototip kompozit elde edilmiştir. Elde edilen prototip kompozit yapı içerisinde bulunan kimyasal bağ etkileşimleri Şekil 3.4'te bulunan şematikte görölebilir. Kompozit üretimi çalışmalarında kullandığımız sistem ve kullanılan sarf malzemeler Şekil 3.5'te sunulmaktadır.



**Şekil 3.4.** Kompozit yapısının şematik gösterimi ve kimyasal içeriği.





**Şekil 5.** Kompozit üretimi için kullanılan sistem ve malzemeler.

### **3.3 Kaplama Karakterizasyon Çalışmaları**

#### **3.3.1 Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) ile Yüzey Morfolojisi İnceleme Çalışmaları**

Cam lamel üzerine uygulanan metalik kaplamalar üzerinde metalik film kaplama kalınlığı ile elektrik iletkenlik katsayısı değişimi incelenmiştir. Bu çalışmanın devamında, silikon yonga üzerine uygulanan metalik kaplamaların yüzey morfolojisini, yapısal özelliklerini ve nihai kaplama kalınlığını incelemek üzere sırasıyla FESEM (Field Emission-Scanning Electron

Microscope), AFM ve İnce Film XRD'si analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu rapor kapsamında, elde edilen bu karakterizasyon çalışmalarının sonuçlarından sadece altın metali ile ilgili olanlara yer verilmiştir.

Silikon yonga üzerine kaplanan 15 nm, 20 nm ve 25 nm kalınlıklara sahip altın metalinin FESEM görüntüleri elde edilmiştir. Elektromanyetik ölçümlerde elde edilecek ve geliştirilebilecek özellikler, kaplamaların sürekli film yapısında olup olmaması ve dolayısı ile tanecik boyutu ve yapısı ile ilgilidir. Bu sebeple, silikon altlık üzerine kaplanmış olan ince filmlerin sürekliliği ve filmi oluşturan taneciklerin boyutları sorgulanmış ve incelenmiştir. Elde edilen görüntüler, ince metalik filmlerin orta bölgeleri ve kenar bölgelerinden alınmıştır. İnce filmlerin orta kısımlarından elde edilmiş görüntüler ile filmin sürekli yapısı ve kenar kısımlarından elde edilen görüntüler ile tanecik boyutları incelenmiştir.

### **3.3.2 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile Yüzey Morfolojisi İnceleme Çalışmaları**

Proje kapsamında yapılan karakterizasyon çalışmalarına, FESEM altında yapılan incelemeler sonrasında yüzey morfolojisinin daha da detaylı incelenebilmesi için Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile devam edilmiştir. AFM altında inceleme yapmak ve yüzey morfolojisi hakkında en geniş bilgiyi edinebilmek için, imkânların kısıtlılığı dolayısıyla, farklı metallere ve kalınlıklara sahip ince metalik filmler içinden silisyum altlık üzerine kaplanmış 15 nm ve 25 nm kalınlığında altın ince filmleri seçilmiştir. ODTÜ Merkez Laboratuvarı imkânları dahilinde bulunan AFM kullanılarak yüzey morfolojisi hakkında edinilecek bilgilerin, FESEM kullanılarak elde edilen ince filmi oluşturan tanecik boyutu ve film sürekliliği bilgilerine ek olması beklenmiştir. Bununla birlikte, AFM ile ince film kalınlığının kesin olarak belirlenmesi ve ince film yüzeyinin pürüzlülüğünün hem sayısal hem de görsel olarak belirlenmesi amaçlanmıştır.

### **3.3.3 XRD ile Yüzey Modifikasyonu İnceleme Çalışmaları**

Yüzey modifikasyonu için kullanılan ince film karakterizasyonu için ODTÜ Merkez Laboratuvarı bünyesinde bulunan İnce Film XRD'si kullanılarak yüzeye uygulanan ince filmlerin kristal yapısı incelenmiştir. ODTÜ Merkez Laboratuvarı ince Film XRD'si kısıtlamaları sebebi ile ancak iki adet numune incelenebilmiş ve bu kapsamda yüzeyleri 15 nm ve 25 nm kalınlığında altın metali ile kaplanan silisyum altlıklar ince film XRD'si ile analiz edilebilmiştir. İnce film XRD'si yapılırken numune üzerine gönderilen X-ışını "grazing"dir. Kullanılan grazing açısı 1o'dir ve X-ışınları 30o ve 90o (2 theta) arasında 1 derece/dakika hız ile taranarak toplanmıştır. XRD analizinde Cu K $\alpha$  radyasyonu kullanılmıştır.

### 3.4 Mekanik Karakterizasyon Yöntemi

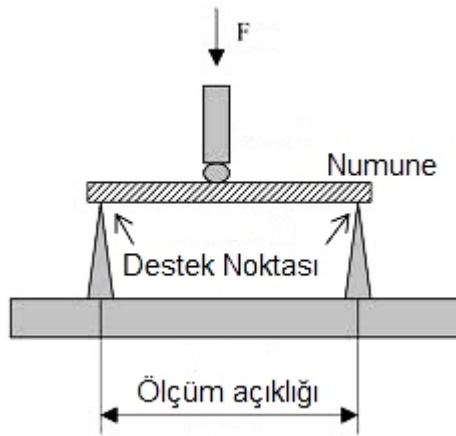
Proje kapsamında cam ve aramid elyaf dokumalar metalik kaplamalar ile modifiye edilmiş ve en yüksek elektromanyetik soğurma değerlerini sağlayan 4 adet çok katmanlı takviye konfigürasyonu prototip kompozit yapımında kullanılmıştır. Bu prototip kompozit yapıların elektromanyetik (EM) dalga yansıma, geçirim ve bunlara bağlı olarak soğurma özellikleri incelenmiştir. Yüzeyi altın ile modifiye edilmiş cam ve aramid elyaf dokumalarla yüzeyi nikel ile modifiye edilmiş cam ve aramid elyaf dokumalarla silanlı ve silansız olarak üretilen prototip kompozitlerin EM ölçümleri yapılmıştır.

Bunun yanında, proje önerisinde belirtildiği üzere yüzeyleri metalik kaplamalarla modifiye edilen ve ayrıca yüzeyleri silan ile fonksiyonelleştirilen çok katmanlı dokuma yapılarıyla oluşturulan prototip kompozitlerin mekanik davranışları da incelenmiştir. Üretilen prototip kompozitlerin mekanik davranışlarını incelemek üzere üç noktadan eğme testleri yapılmıştır. Bunun ilk amacı, silanlama uygulamasının dokuma yapıları ile uyumunu incelemektir. Ayrıca, silanlama uygulamasının metalik kaplamalarla modifiye edilen dokuma yüzeyleri ile polimer matris arasındaki uyumunu sağlayıp sağlayamadığı da incelenmiştir. Üç noktadan eğme testlerinde EM ölçümleri yapılan toplam 12 farklı kompozit malzeme incelenmiştir. 12 kompozitin her birinden su jeti kullanılarak 3 adet mekanik test numunesi kesilmiştir. Oluşturulan 36 adet numunenin en, kalınlık ve 3 noktadan eğme testinde kullanılmış olan ölçüm açıklığı değerleri birlikte Tablo 1'de verilmiştir.

Şekil 3.6'da şematik olarak gösterilen 3 noktadan eğme testinde ölçüm açıklığı olarak gösterilen uzunluk Tablo 3.1'de her numune için belirtilmiştir. Metalik ince film kaplamalar cam ve aramid elyaf dokumalara uygulanırken proje kapsamında hizmet alımı olarak kullanılan ısı buharlaştırma sistemi gereği azami 70x70 mm boyutunda numunelerle çalışılabilmektedir. Dolayısı ile bu numunelerden elde edilen kompozit yapılar da aynı ölçülere sahiptir. Bu sebeple, bazı numuneler için ölçüm açıklığı olarak kullanılan uzunluk, test sırasında destek noktaları dışında yeterli mesafe bırakmak üzere 60 mm olarak belirtilmiştir. ASTM D-790 standardına göre lamine plaka kompozitler için numune kalınlığı: ölçüm açıklığı oranının 1:16 ve 1:40 arasında olması gerekmektedir. Belirtilen sebepler dolayısıyla, ölçüm aralığı olarak bazı numunelerde 1:16 oranı elde edilememiştir. Ancak; 3 noktadan eğme testleri metalik yüzey modifikasyonunun ve silan uygulamasının kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini bu uygulamaların yapılmadığı kompozitlere kıyasla incelemek amacıyla yapıldığı için, standart dışı olan bazı durumların karşılaştırma sonuçlarını etkilemediği değerlendirilmektedir.

**Tablo 3.1.** 3 noktadan eğme testi yapılan numuneler ve uzunluk ölçüleri

Numune #	En (mm)	Kalınlık (mm)	Ölçüm Açıklığı (mm)	Numune #	En (mm)	Kalınlık (mm)	Ölçüm Açıklığı (mm)
1	13.50	3.50	56.00	7	12.75	3.70	59.20
	13.42	3.61	57.76		13.15	3.90	60.00
	13.70	3.77	60.00		12.20	3.80	60.00
2	13.30	4.78	60.00	8	12.70	3.00	48.00
	13.45	4.80	60.00		13.60	3.00	48.00
	12.82	4.79	60.00		13.50	3.00	48.00
3	13.56	4.20	60.00	9	13.05	3.40	54.40
	13.48	4.12	60.00		12.95	3.40	54.40
	13.34	4.19	60.00		12.50	3.40	54.40
4	13.40	4.25	60.00	10	12.70	3.10	49.60
	13.10	3.80	60.00		12.90	3.15	50.40
	13.60	4.35	60.00		12.90	3.15	50.40
5	13.25	4.15	60.00	11	11.70	3.10	49.60
	13.50	4.10	60.00		12.90	3.10	49.60
	13.10	4.10	60.00		12.40	3.10	49.60
6	13.30	4.40	60.00	12	14.30	2.90	46.40
	13.50	3.90	60.00		13.30	2.80	44.80
	13.25	4.10	60.00		13.00	2.80	44.80

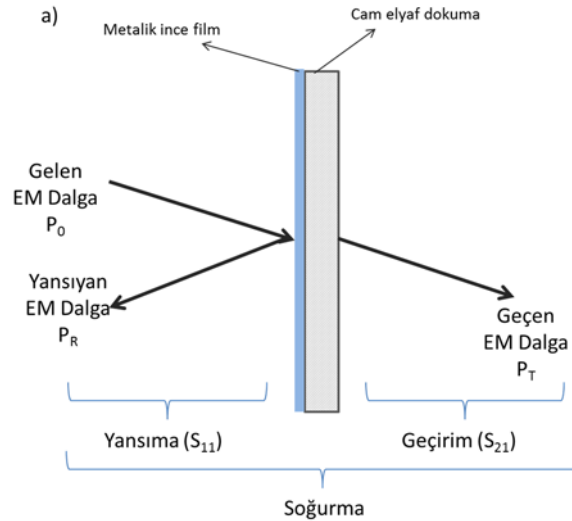


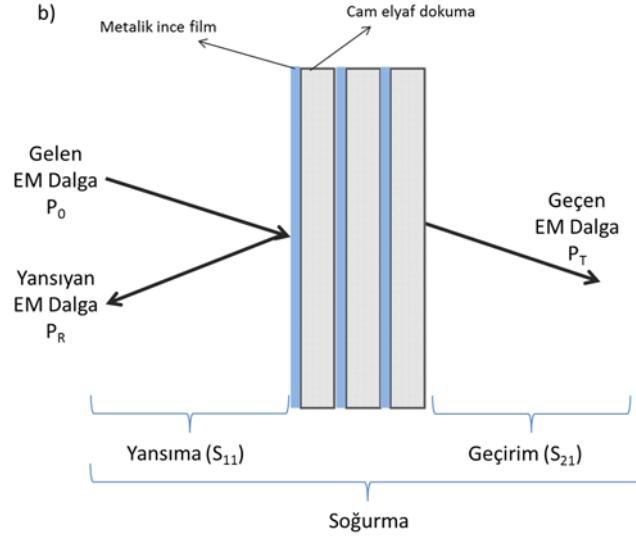
**Şekil 3.6.** 3 noktadan eğme testi geometrisinin şematik gösterimi.

3 noktadan eğme testleri Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan üniversal çekme-basma cihazı (Instron 5582, Instron Co. LTD., Norwood, USA) kullanılarak yapılmıştır. Bu ölçümlerde; 12 adet farklı kompozit yapı için üçer adet numune üzerinde mekanik test yapılmış ve ortalama değerler alınmıştır. Bu mekanik testler sırasında numuneler, metalik kaplama ile modifiye edilmiş dokuma yüzeyleri ve silanlama uygulanmış dokuma yüzeyleri kuvvet uygulanan noktanın tersinde; yani, ham haline göre farklılaşmış dokuma yüzeyleri çekme gerilimine maruz kalacak şekilde yerleştirilmiştir.

### 3.5 Elektromanyetik (EM) Dalga Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Yöntem

Yüzeyi metal ile modifiye edilmiş cam ve aramid fiber dokumaların elektromanyetik dalga geçirim ve yansıtma karakteristiklerini belirlemek üzere tasarlanan serbest uzay ölçüm düzeneği kullanılarak farklı numunelerle ölçümler yapılmıştır. Film kalınlıkları değiştirilerek, gönderilen elektromanyetik dalgaların ( $P_0$ ) yansıma ( $S_{11}$ ), geçirim ( $S_{21}$ ) ve soğurma (% Soğurma) değerlerindeki değişimler incelenmiştir. Projede kullanılmak üzere kurulan serbest uzay ölçüm düzeneği ile yapılan elektromanyetik ölçümler ve ölçülen değerler tek katmanlı numuneler için Şekil 3.7a'da ve çok katmanlı yapılar için de Şekil 3.7b'de şematik olarak verilmektedir. Buna göre, birinci kanalda bulunan antenden gelen dalganın tekrar birinci anten tarafından toplanmasıyla yansıma ( $S_{11}$ ) ve numuneden geçerek ikinci anten tarafından toplanmasıyla da geçirim ( $S_{21}$ ) parametreleri tespit edilmektedir.





**Şekil 3.7.** Tek katmanlı (a) ve çok katmanlı (b) yapılarda yansıma ( $S_{11}$ ), geçirim ( $S_{21}$ ) ve soğurma (% Soğurma) değerlerinin belirlenmesinin şematik gösterimi.

Ağ analizörü yansıma kaybı ( $S_{11}$ ) ve geçirim kaybı ( $S_{21}$ ) miktarlarını dB (desibel) cinsinden belirlemektedir.  $S_{11}$  ve  $S_{21}$  değerlerinin dB cinsinden elde edilmesinde aşağıdaki bağıntılardan faydalanılmaktadır:

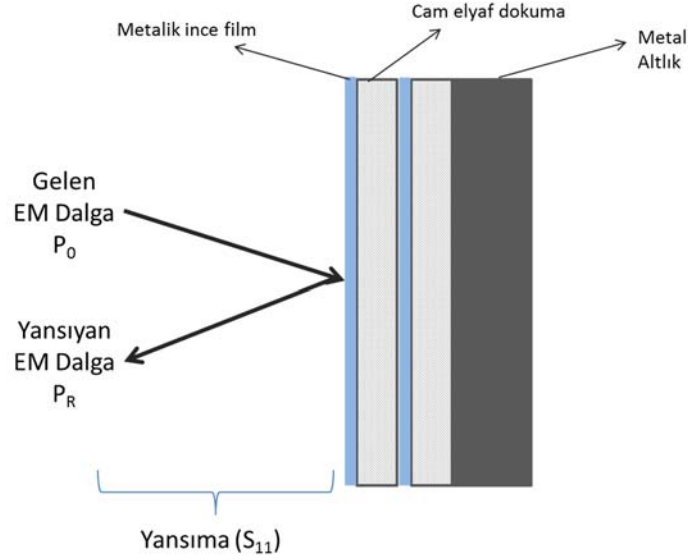
$$S_{11} = 10 * \log \frac{P_R}{P_0} \quad (\text{Denklem 3.1})$$

$$S_{21} = 10 * \log \frac{P_T}{P_0} \quad (\text{Denklem 3.2})$$

$S_{11}$  (dB) değeri hesaplanırken yansıyan elektromanyetik dalgaların gücünün ( $P_R$ ) sisteme uygulanan toplam güce ( $P_0$ ) olan oranı ( $P_R/P_0$ ) “yansıtma oranı” olarak ifade edilmektedir. Benzer şekilde,  $S_{21}$  (dB) değeri hesaplanırken karşı tarafa iletilen elektromanyetik dalgaların gücünün ( $P_T$ ) sisteme uygulanan toplam güce ( $P_0$ ) olan oranı ( $P_T/P_0$ ) “geçirim oranı” olarak ifade edilmektedir. Yukarıdaki bağıntılar ile elde edilen yansıtma ve geçirim değerleri kullanılarak soğurmanın miktarı (%Abs) enerjinin korunumu prensibinden hareketle şu şekilde hesaplanabilir:

$$\%Abs = \left( 1 - \frac{P_T}{P_0} - \frac{P_R}{P_0} \right) \times 100 \quad (\text{Denklem 3.3})$$

Benzer şekilde, oluşturulan yüzey modifikasyonlu elyaf dokumaların arka yüzeylerinde bir metal altlık bulunma, yani tam yansıtıcı bir satıh üzerinde bulunma, durumlarındaki yansıtma karakteristikleri de Şekil 3.8'de şematik olarak görülen şekilde incelenmiştir.



**Şekil 3.8.** Tek katmanlı ve çok katmanlı yapıların arka yüzeylerinde bir metal altlık bulunma durumlarındaki yansıtma değerlerinin belirlenmesinin şematik gösterimi.

İncelenen yapıların EM özellikleri aşağıda sunulan grafikler yardımı ile irdelenmiştir. Grafiklerde sol taraftaki düşey ekseninde EM dalga yansıtma (dB), geçirim (dB) ve soğurma (%) değerleri yatay eksenindeki frekansa bağlı olarak sunulmaktadır. Grafiklerin sağ düşey ekseninde ise sol düşey ekseninde dB birimi ile gösterilen EM dalga yansıtma ve geçirim değerlerinin karşılık geldiği uygulanan toplam güce oranları ( $P_R/P_0$  ve  $P_T/P_0$ ) % cinsinden gösterilmektedir. Sol düşey ekseninde dB birimiyle verilen yansıtma ve geçirim değerleri azaldıkça, yani negatif skalada aşağıya indikçe, yansıtma ya da geçirimin azaldığı anlaşılmaktadır. Buna karşılık 0 dB yansıtma ya da geçirim malzemenin EM dalgaları tamamen yansıttığını ya da geçirdiğini göstermektedir.

### 3.6 EM Dalga ile Etkileşim Simülasyon Çalışmaları

Yüzeyi farklı metaller ile modifiye edilen cam elyaf ve aramid elyaf dokumaların tek katmanlı ve çok katmanlı yapılar halinde elektromanyetik dalgalar ile etkileşimi serbest uzay ölçümleri kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında EM dalga soğurucu kompozitlerde kullanılması uygun olabilecek yapılara ilişkin bilgi birikimi oluşturulmuştur. Bu

Çalışmaların yanında, yapıların EM dalga ile etkileşim özelliklerini kestirmek etmek üzere simülasyon çalışmaları da yapılmıştır. Bu simülasyon çalışmalarının amacı, yapıları deneysel olarak oluşturmak için harcanan zaman ve sarf ihtiyaçlarını en düşük seviyeye indirmektir. EM dalga ile etkileşim özelliklerini belirlemek üzere yapılan simülasyon alışmaları, AWR Microwave Office yazılımı kullanılarak tamamlanmıştır. Çalışmanın temeli, EM dalga ölçümleri tamamlanan tek katmanlı yapıları, sanal ortamda bir araya getirerek çok katmanlı yapılar elde edip, oluşturulan bu yeni yapıların EM dalga karşısında gösterebileceği davranışları daha önceden tahmin edebilmektir.

Simülasyon alışmaları ile proje kapsamında belirtilen prototip EM dalga soğurucu kompozitleri en verimli şekilde üretmenin yanında, benzer başka çalışmalarda da simülasyon desteğinin kullanılmasının doğruluğu araştırılmıştır. Proje alışmaları sırasında, simülasyon denemeleri sıklıkla yapılmış ve bu denemeler sonucunda özellikle EM dalga geçirim özellikleri bakımından simülasyon ile deneysel sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür. EM dalga yansıma özellikleri bakımından elde edilen simülasyon ve deneysel sonuçlar arasında belirgin farklar görülmüş ve simülasyonun deneysel sonuçlara tam olarak yakın sonuçlar vermediği anlaşılmıştır. Ancak, simülasyonlarla elde edilen EM dalga yansıma ve geçirim sonuçlarından üretilen EM dalga soğurma sonuçları deneysel sonuçlara yakın olup tatmin edici seviyededir. alışmalar sırasında daha önce de belirtildiği üzere çok sayıda simülasyon denemesi yapılmış; ancak, bu çalışmaların sadece bir kısmına bu proje raporunda yer verilebilmiştir.



## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1 Yüzey Modifikasyon – Metalik Kaplama Çalışmaları

Cam lamel üzerine ince film olarak kaplanmış gümüş, altın ve nikel metallerinin elektrik iletkenlikleri iki prob ölçüm tekniği ile ölçülmüş ve Tablo 4.1 ve Şekil 4.1’de verilen iletkenlik katsayısı değerlerine ulaşılmıştır. Tablo 4.1’de görüldüğü üzere literatürde verilen kütle iletkenlik katsayısı değerlerine film kalınlığı arttıkça yaklaşılmıştır. Ölçülen iletkenlik katsayısı değerleri; literatürde gösterilen kütle iletkenlik katsayısı değerlerine göre düşüktür. Buna ölçülen metallerin hacimli kütle formunda olmamasının (ince film yapısında oluşu) ve imkânlar dâhilinde kullanılan iki prob tekniğinin barındırdığı ölçüm hatalarının sebep olduğu değerlendirilmektedir. Elektrik iletkenlik katsayı değerleri, dört prob ölçüm tekniği ile daha doğru ve hassas olarak ölçülebilmektedir. Bunun sebebi ise; iki prob ölçüm tekniğinde ölçüm sırasında ölçümü yapan uçlar ve film arasında bağlantı dirençlerinin oluşmasıdır. Dört prob ölçüm tekniğinde ise bağlantı dirençleri ile ilişki kesilerek iletkenlik katsayı değerleri daha hassas olarak ölçülebilmektedir. Denildiği üzere yürütülen çalışma kapsamında imkanlar dahilinde bulunan iki prob ölçüm tekniği ile ölçüm yapılmış ve literatürde verilen değerlerin altında değerler elde edilmiştir. Yukarıda bahsedilen sebepler göz önünde bulundurulduğunda; ölçülen değerlerin literatürde verilen değerler ile farklı olması normal karşılanmıştır.

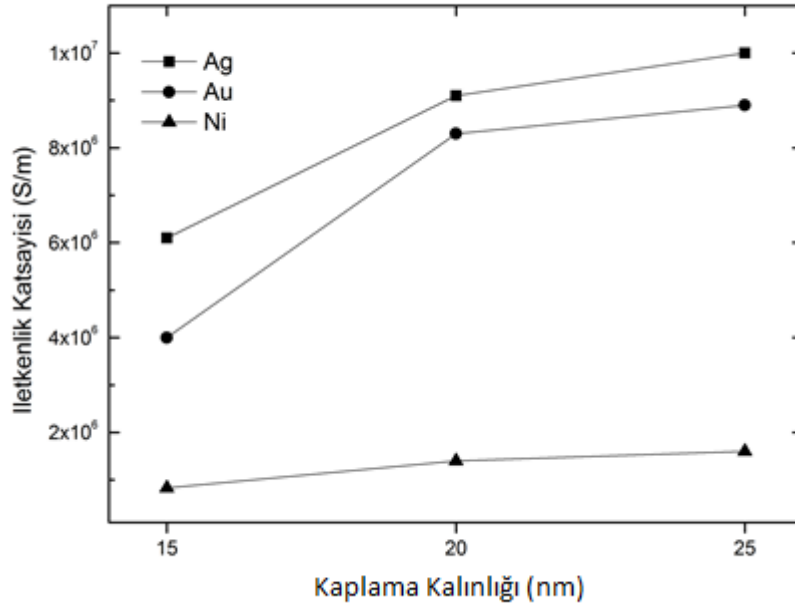
**Tablo 4.1.** Gümüş, Altın ve Nikel metallerinin film kalınlığı ile değişen iletkenlik katsayıları

(S/m)	Ag	Au	Ni
15 nm	$6,1 \times 10^6$ S/m	$4,0 \times 10^6$ S/m	$8,3 \times 10^5$ S/m
20 nm	$9,1 \times 10^6$ S/m	$8,3 \times 10^6$ S/m	$1,4 \times 10^6$ S/m
25 nm	$1,0 \times 10^7$ S/m	$8,9 \times 10^6$ S/m	$1,6 \times 10^6$ S/m
Literatür Kütle(*)	$6,3 \times 10^7$ S/m	$4,1 \times 10^7$ S/m	$1,4 \times 10^7$ S/m

(\*)Raymond A. Serway. Principles of Physics (2nd ed.). Fort Worth, Texas; London: Saunders College Pub. p. 602, (1998).

İletkenlik katsayısı değerleri belirlenmeden önce artan film kalınlığı ile elektrik iletkenliğinin artacağı öngörülmüştür. Neticede, gümüş, altın ve nikel ince filmlerin iletkenlik katsayısı değerleri film kalınlığı arttıkça artmış ve literatürde belirtilen kütle iletkenlik değerlerine yaklaşılmıştır. Ayrıca literatürde belirtilen gümüş, altın ve nikel metallerinin iletkenlik katsayıları arasındaki oran ile yapılan ölçümlerde elde edilen iletkenlik katsayısı değerleri oranları benzerlik göstermiştir. Ölçülen değerler karşılaştırıldığında (Şekil 4.1); her üç metal için de 25 nm ve 20 nm kalınlığa sahip filmlerin gösterdiği iletkenlik katsayıları değerleri birbirlerine yakın

iken; 15 nm kalınlığa sahip filmlerin gösterdiği değerlerde belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Bu sebeple, iletkenlik katsayısı değerleri ile elektromanyetik özellikler karşılaştırılmış ve elektromanyetik özelliklerin iletkenlik ile ilişkisinin öngörüldüğü şekilde olduğu ortaya konmuştur. Bu sonuçların, proje kapsamında yapılması beklenen çok katmanlı elektromanyetik dalga soğurucu malzeme içinde kullanılacak ince metalik film kalınlıkları ve diziliş kombinasyonları hakkında önemli bir bilgi ve veri tabanı oluşturulmasına yardım edeceği değerlendirilmektedir.



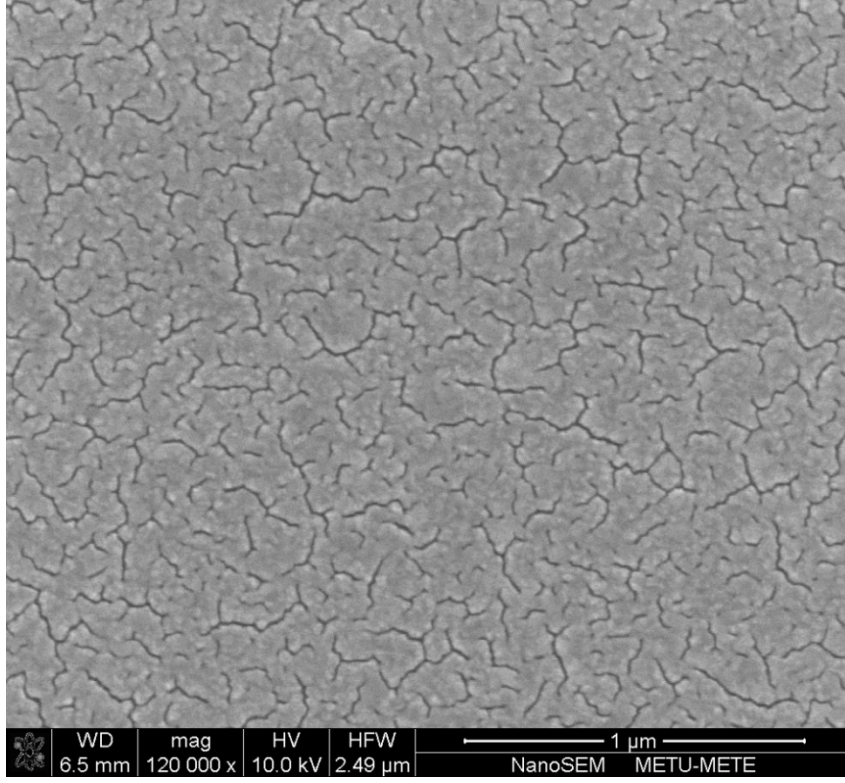
**şekil 4.1.** Cam lamel üzerine ince film olarak kaplanmış gümüş, altın ve nikel metallerinin elektrik iletkenliklerinin film kalınlığı ile değerini.

## 4.2 Kaplama Karakterizasyon alışmaları

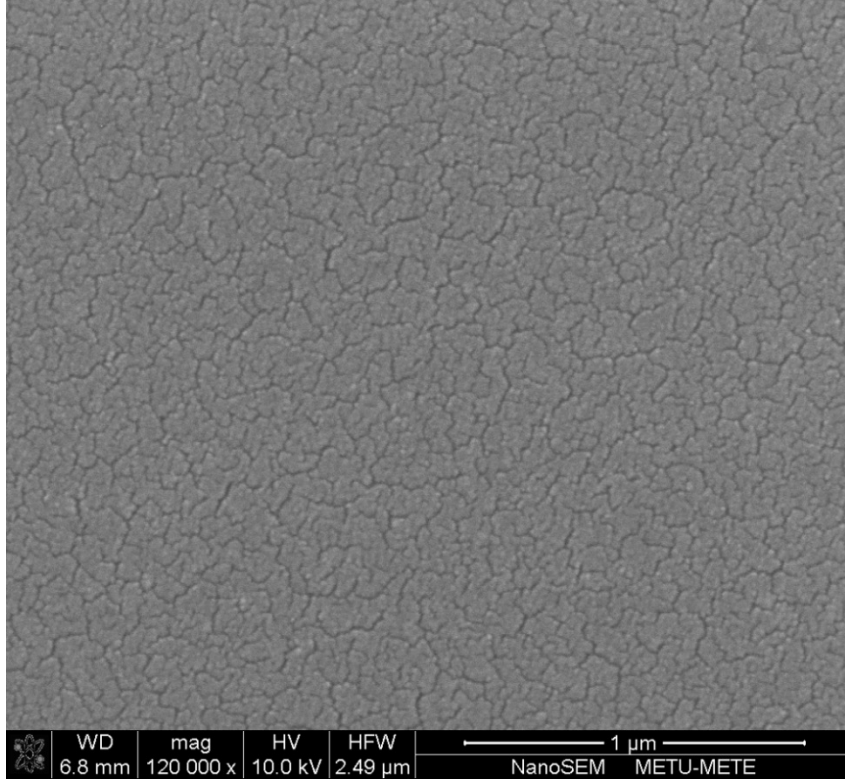
### 4.2.1 Taramalı Elektron Mikroskobu (FESEM) ile Yüzey Morfolojisi İnceleme alışmaları

Silikon yonga üzerine kaplanan 15 nm, 20 nm ve 25 nm kalınlıklara sahip altın metalinin FESEM görüntüleri elde edilmiştir. Elektromanyetik ölçümlerde elde edilecek ve geliştirilebilecek özellikler, kaplamaların sürekli film yapısında olup olmaması ve dolayısı ile tanecik boyutu ve yapısı ile ilgilidir. Bu sebeple, silikon altlık üzerine kaplanmış olan ince filmlerin srekliiliği ve filmi oluşturan taneciklerin boyutları sorgulanmış ve incelenmiştir. Elde edilen görüntüler, ince metalik filmlerin orta bölgeleri ve kenar bölgelerinden alınmıştır. İnce

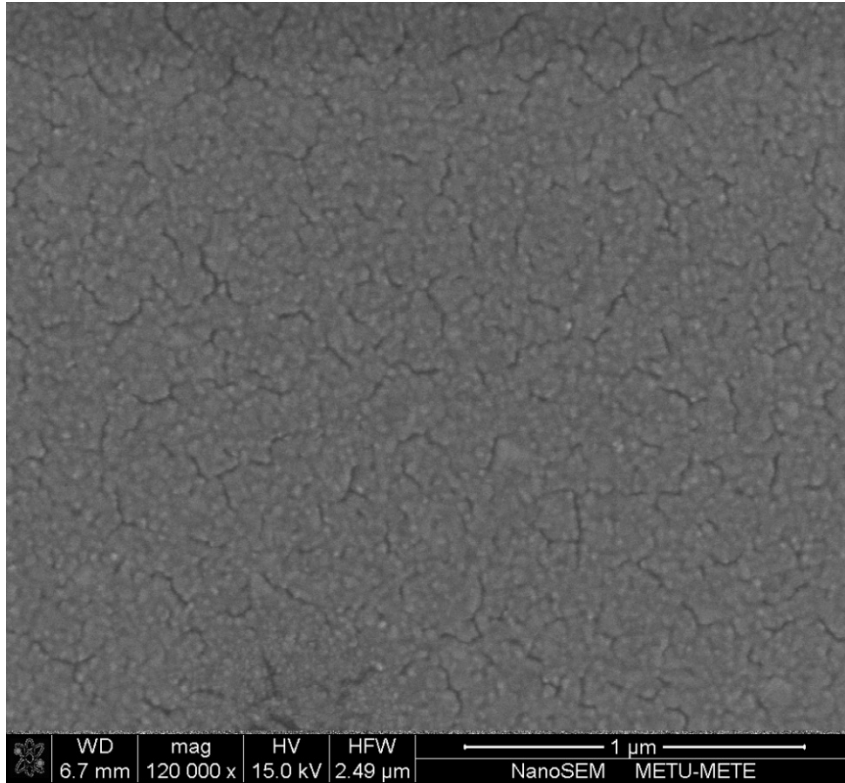
filmlerin orta kısımlarından elde edilmiş görüntüler ile filmin sürekli yapısı ve kenar kısımlarından elde edilen görüntüler ile tanecik boyutları incelenmiştir.



**Şekil 4.2.** Silikon altlık üzerinde 15 nm kalınlığı sahip Au metali ince filminin FESEM ile elde edilmiş 120000 büyütmede mikroyapı görüntüsü.

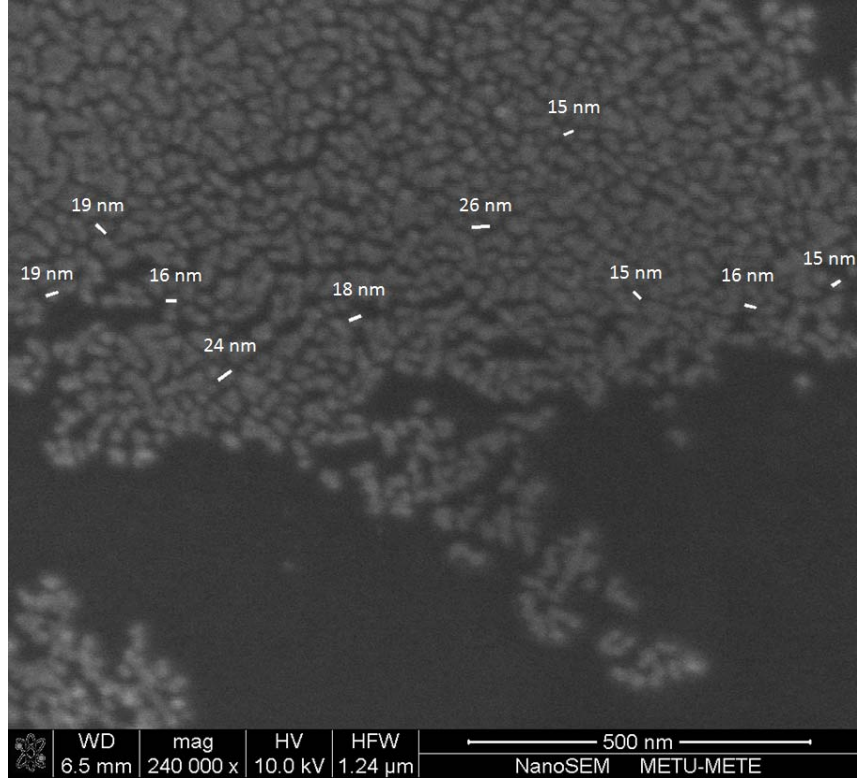


**Şekil 4.3.** Silikon altlık üzerinde 20 nm kalınlığı sahip Au metali ince filminin FESEM ile elde edilmiş 120000 büyütmede mikroyapı görüntüsü.

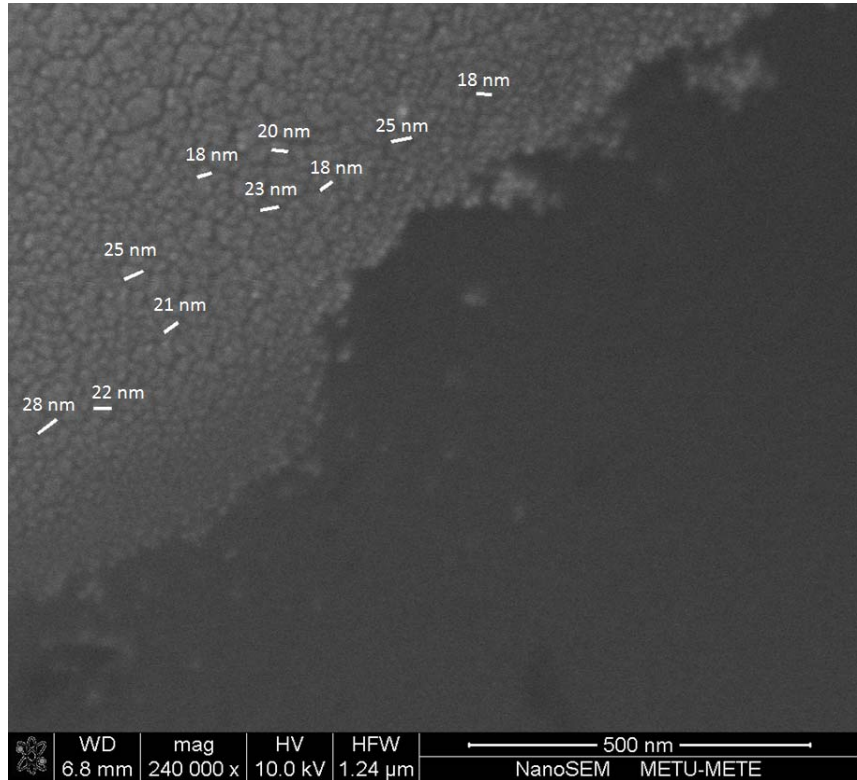


**Şekil 4.4.** Silikon altlık üzerinde 25 nm kalınlığı sahip Au metali ince filminin FESEM ile elde edilmiş 120000 büyütmede mikroyapı görüntüsü.

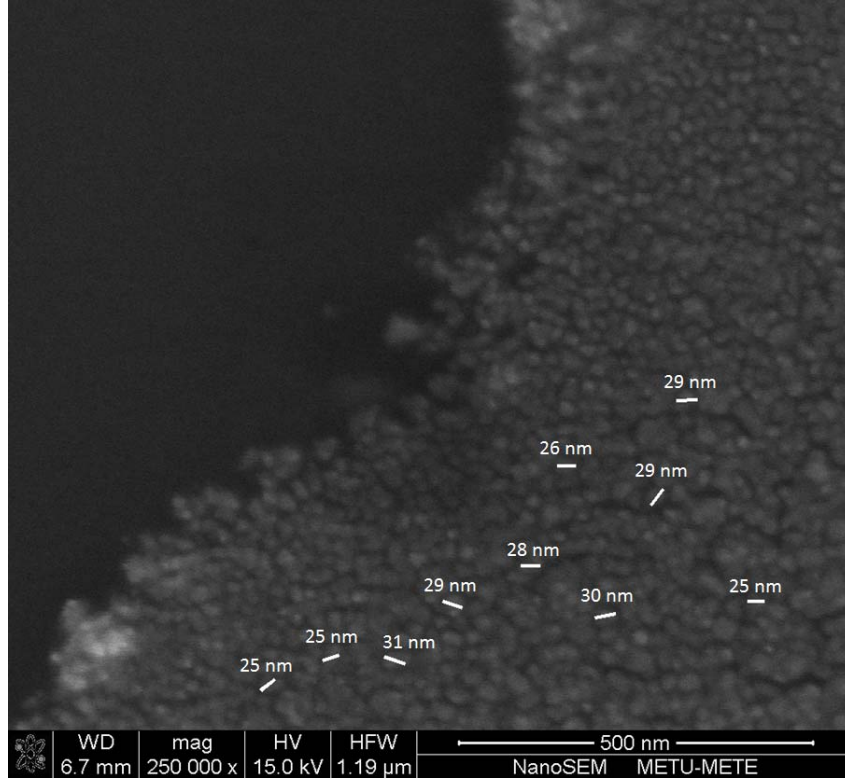
Şekil 4.2-4'te gösterilen FESEM görüntüleri 120000 büyütmede olup yukarıda belirtildiği gibi filmin sürekliliğini incelemek üzere elde edilmiş ve mikro çatlak benzeri oluşumlarla birbirlerinden ayrılan ince film bölgelerinin artan film kalınlığı ile azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te gösterilen FESEM görüntülerinde ince film kalınlıkları sırasıyla 15, 20 ve 25 nm'dir. Bu şekillerden de anlaşılacağı üzere film kalınlığı arttıkça film yüzeylerindeki süreklilik artmakta ve film yapısını oluşturan, koyu renkli görülen sınırlar/mikro çatlaklar ile birbirlerinden ayrılan ince film bölgeleri arasındaki bu oluşumlar azalmaktadır. Şekil 4.2'de 15 nm kalınlığına sahip ince film üzerindeki bu ince film bölgelerinin birbiri arasındaki sınırların/mikro çatlakların sayısal olarak görece fazlalığı dikkat çekmektedir. Şekil 4.3'te 20 nm kalınlığa sahip ince filmde bahsedilen sınırların/mikro çatlakların belirginliğini kaybetmeye başladığı ve Şekil 4.4'te 25 nm kalınlığa sahip ince film üzerindeki bu oluşumların sayıca azaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.2-4'te görülen yapı, bölgeler arası sınır/mikro çatlak oluşumunu göstermekle birlikte, bu oluşumlar film kalınlığındaki artış ile azalmaktadır. Bu şekillerde açıkça görülen bu değişim sonucunda tam manasıyla sürekli bir film yapısı ortaya çıkmıyor gibi gözükmesine de, ince film kalınlığı ile artan elektrik iletkenliği (Şekil 4.1) yüzeyde bir sürekliliğin sağlandığını ve bunun da kaplama kalınlığı ile arttığını göstermektedir. Bu kalınlıklara sahip ince metalik filmlerin arzulanan elektrik iletkenliğine sahip ve elektromanyetik özellikleri sağlayabilecek yapıda olduğu değerlendirilmektedir.



**Şekil 4.5.** Silikon altlık üzerinde 15 nm kalınlığı sahip Au metali ince filminin FESEM ile elde edilmiş 240000 büyütmede mikroyapı görüntüsü.



**Şekil 4.6.** Silikon altlık üzerinde 20 nm kalınlığı sahip Au metali ince filminin FESEM ile elde edilmiş 240000 büyütmede mikroyapı görüntüsü.



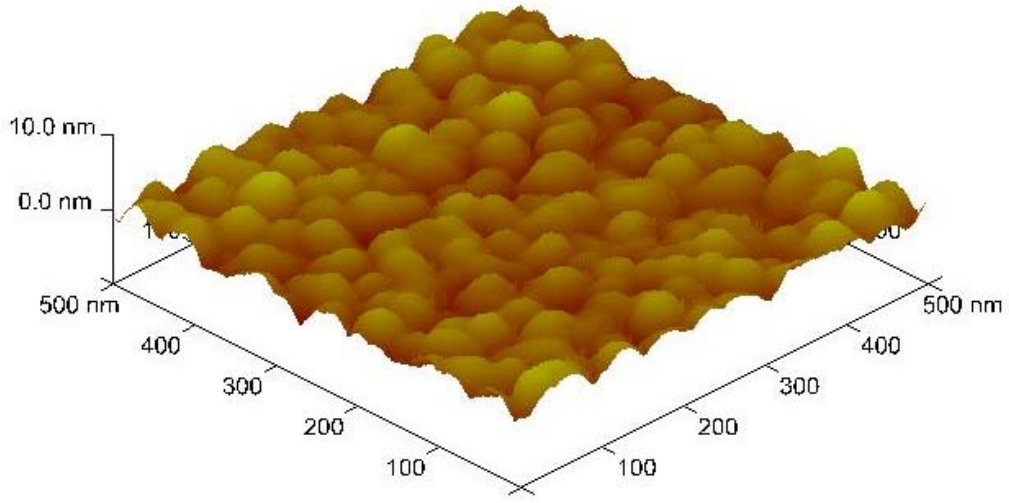
**Şekil 4.7.** Silikon altlık üzerinde 25 nm kalınlığı sahip Au metali ince filminin FESEM ile elde edilmiş 250000 büyütmede mikroyapı görüntüsü.

Şekil 4.5-7'de gösterilen FESEM görüntülerinde silikon altlık üzerinde sırasıyla 15 nm, 20 nm ve 25 nm kalınlığa sahip Au ince filmlerin yapıları detaylı olarak incelenmiştir. Şekil 4.5-7'deki görüntüler kullanılarak kaplamayı oluşturan taneciklerin boyutlarını incelemek üzere ince filmlerin kenarında 10 farklı tanecik boyu ölçülmüş ve şekiller üzerinde gösterilmiştir. Farklı 10 adet tanecik boyutundan hesaplanan ortalama tanecik boyutu 15 nm kalınlığa sahip ince film için 18 nm, 20 nm kalınlığa sahip ince film için 22 nm ve 25 nm kalınlığa sahip ince film için 28 nm'dir. Şekil 4.5-7'den elde edilen sonuçlara göre beklendiği üzere film kalınlığı arttıkça ortalama tanecik boyutunun arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, Şekil 4.5-7'den elde edilen bir başka bilgi ise ince metalik film yapısının kenar kısımlarından orta kısımlara gidildikçe taneciklerin birbirleri ile birleşip sürekli film yapısı oluşturduğudur. Şekil 4.2-4'te görülen sürekli film yapısının oluşumu Şekil 4.5-7'de gözlemlenebilmiştir. FESEM yardımı ile elde edilmiş görüntülerin tümünde 15 nm, 20 nm ve 25 nm kalınlığa sahip ince metalik filmlerin sürekli yapıya sahip olduğu gözlemlenmiş, dolayısıyla elde edilen kaplamaların arzulan elektrik iletkenliğine sahip ve elektromanyetik özellikleri sağlayabilecek yapıda olduğu değerlendirilmiştir.

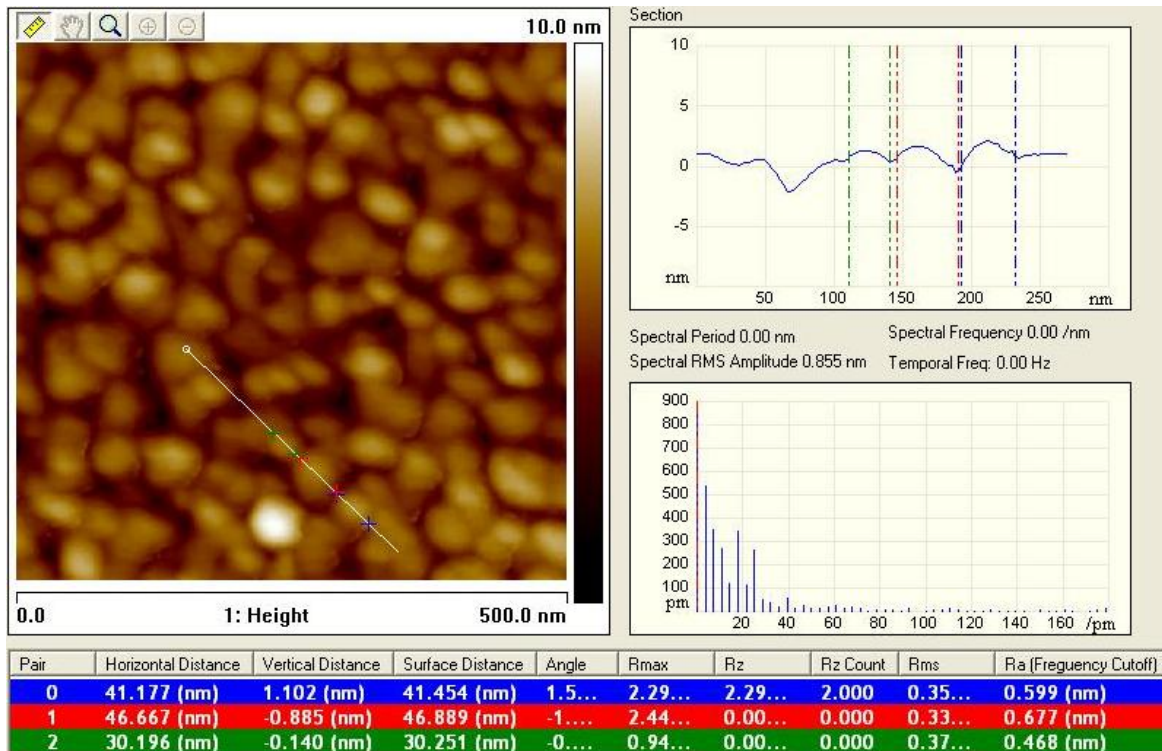
#### 4.2.2 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile Yüzey Morfolojisi İnceleme Çalışmaları

FESEM altında yapılan incelemeler sonrasında yüzey morfolojisinin daha da detaylı incelenebilmesi için Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile devam edilmiştir. AFM ile ince film kalınlığının kesin olarak belirlenmesi ve ince film yüzeyinin pürüzlülüğünü hem sayısal hem de görsel olarak belirlemek üzere ODTÜ Merkez Laboratuvarı imkanları dâhilinde bulunan AFM cihazı ile elde edilmiş 15 nm film kalınlığına sahip altın kaplamanın görüntüleri Şekil 4.8-11'de, 25 nm film kalınlığına sahip altın kaplamanın görüntüleri ise Şekil 4.12-15'de verilmiştir. Şekil 8'de verilen 15 nm film kalınlığına sahip altın metalinin 3-boyutlu görüntüsünde film yapısında bulunan birbirinden ayrı bölgelerin arasında silisyum altlığı uzanan boşluklar olmadığı görülmektedir. Şekil 9'da verilen 15 nm film kalınlığına sahip altın metalinin 2-boyutlu görüntüsünde filmi oluşturan bu bölgelerin boyutları incelenmiştir. Şekil 9 içerisinde sol kısımda 2-boyutlu görüntünün üzerinde bulunan çizgi, bölgeler üzerinde incelenen yönü temsil etmektedir. Bu çizgi üzerinde bulunan iki adet yeşil, iki adet mavi ve iki adet kırmızı nokta bölgelerin başladığı ve bittiği noktaları temsil etmektedir. Şekil 9'un sağ üst kısmında bulunan yükseklik (nm) – uzaklık (nm) grafiği ise 2-boyutlu görüntü üzerinde bulunan beyaz çizginin iz düşümünü göstermektedir. Bu grafik üzerinde bulunan ikişer adet yeşil, mavi ve kırmızı çizgi, 2-boyutlu görüntünün üzerinde bulunan ikişer adet yeşil, mavi ve kırmızı noktanın iz düşümlerini simgelemektedir. Bu grafik yardımı ile birbirinden ayrı gözükken bölgelerin boyutları bulunmuş ve sırasıyla yeşil ile sınırları belirlenmiş bölgenin yaklaşık 30.196 nm, mavi ile sınırları belirlenmiş bölgenin 41.177 nm ve kırmızı ile sınırları belirlenmiş bölgenin 46.667 nm olduğu belirlenmiştir. Bu bölgelerin boyut ölçümleri bu yöntem ile yapılmış olup, numunenin ortasında olmak kaydıyla yüzeyin farklı yerlerinden toplanmış bilgilerle ortalama bölge boyutunun yaklaşık 40 nm olduğu görülmüştür.



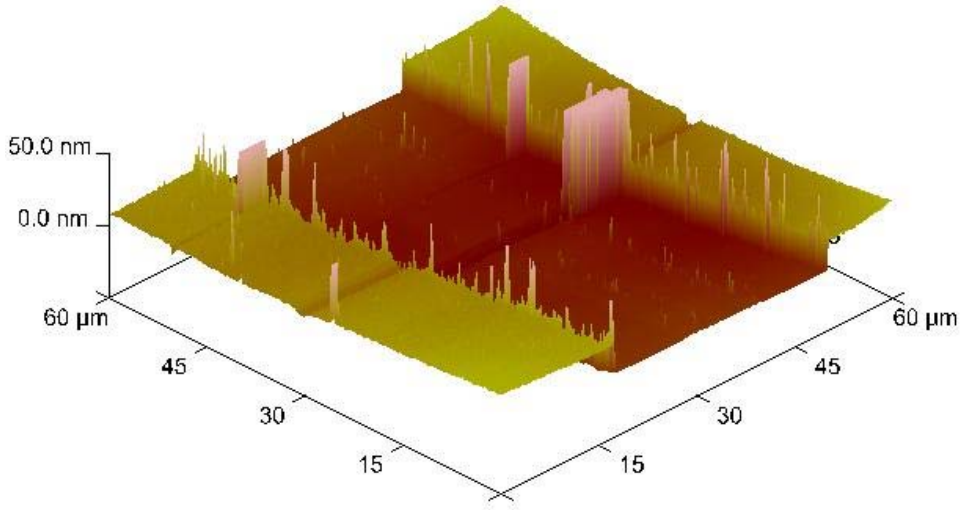


**Şekil 4.8.** Silisyum altlık üzerine kaplanmış 15 nm kalınlığa sahip altın metalinin AFM ile elde edilmiş, 500 nm x 500 nm'lik alan içinde 3-boyutlu görüntüsü.

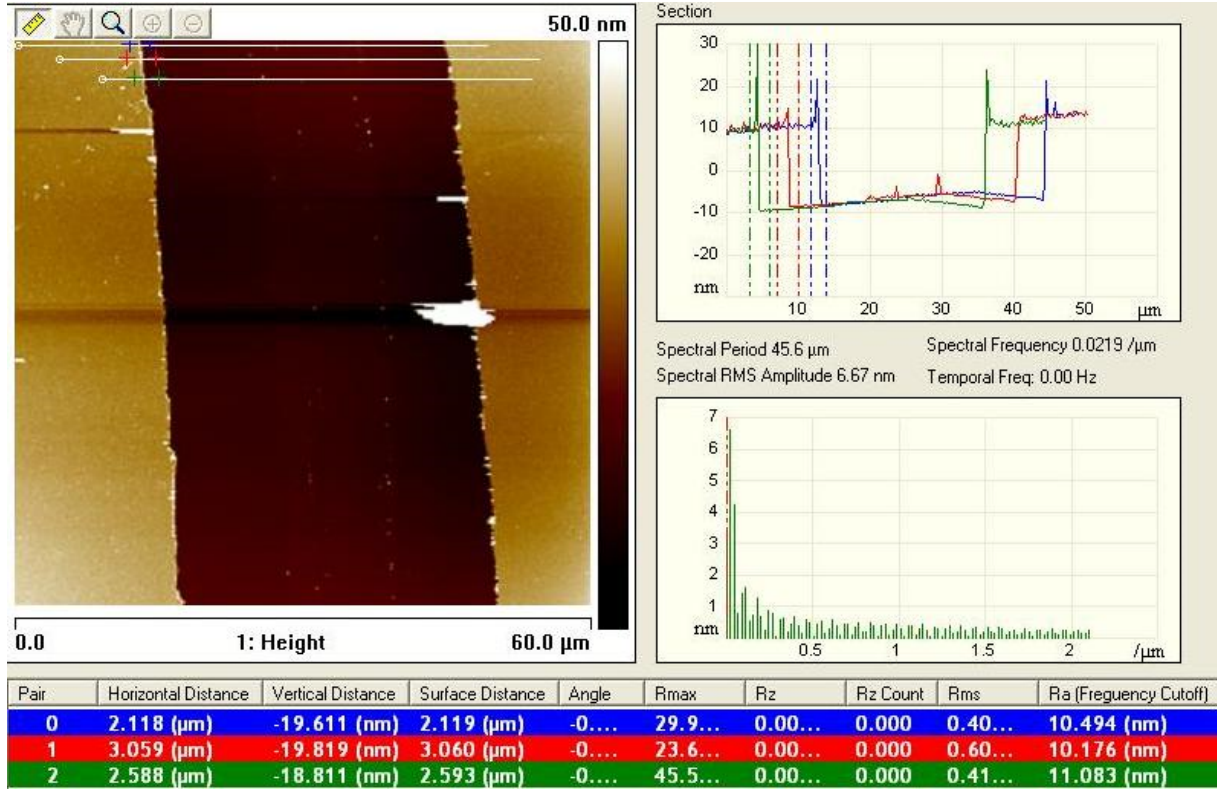


**Şekil 4.9.** Si altlık üzerine kaplanmış 15 nm kalınlığa sahip altının AFM ile elde edilmiş, 500 x 500 nm'lik alan içinde 2-boyutlu görüntüsü ve birbirinden ayrı bölgelerin boyut ölçümü.

Silikon altlık üzerine 15 nm kalınlığında kaplanmış altın metalinin nihai film kalınlığını incelemek üzere, kaplama yüzeyinde maket bıçağı yardımı ile çok küçük bir baskı uygulayarak sadece altın metalini kaldıracak; ancak, silisyum altlığın yüzeyini deforme etmeyecek şekilde ile çizik açılmıştır (Şekil 4.10-11). Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de görüleceği üzere AFM probu ile  $60\ \mu\text{m} \times 60\ \mu\text{m}$ ’lik alan taranmıştır. Şekil 4.10’da elde edilen 3-boyutlu görüntü yardımı ile çizik oluşturulurken sadece altının yüzeyden kaldırıldığı; ancak, silisyum altlığın yüzeyine hasar verilmediği anlaşılmaktadır. Ayrıca, altın ince film silisyum altlığın yüzeyinden kaldırılırken çizik kenarlarında oluşan belirli hatalar 3-boyutlu görüntüde fark edilmektedir. Şekil 4.11’de kalınlık ölçümünün yapıış şekli görülmekte ve bu kalınlık ölçümünün doğru yapılabilmesi için Şekil 4.10’dan elde edilen 3-boyutlu görüntü önem arz etmektedir. Şekil 4.11’de, Şekil 4.9’da olduğu gibi belirtilen iz düşüm çizgileri yardımıyla yükseklik farkı bulunmuştur. Şekil 4.11’de numunenin 3 farklı bölgesinden elde edilen yükseklik farkı bilgileri sırasıyla mavi iz düşüm için 19.611 nm, kırmızı iz düşüm için 19.819 nm, yeşil iz düşüm için ise 18.811 nm olarak görülebilir. Numunenin birçok yerinde yapılan ölçümler ile silisyum altlık üzerine 15 nm olarak kaplanmış olan altın ince filmin gerçek kalınlığının yaklaşık olarak 18.3 nm olduğu saptanmıştır.



**Şekil 4.10.** Silisyum altlık üzerine kaplanmış 15 nm kalınlığa sahip altın ince filmin nihai kalınlığını tespit etmek üzere  $60\ \mu\text{m} \times 60\ \mu\text{m}$ ’lik alan içinde AFM ile elde edilmiş 3-boyutlu görüntü.

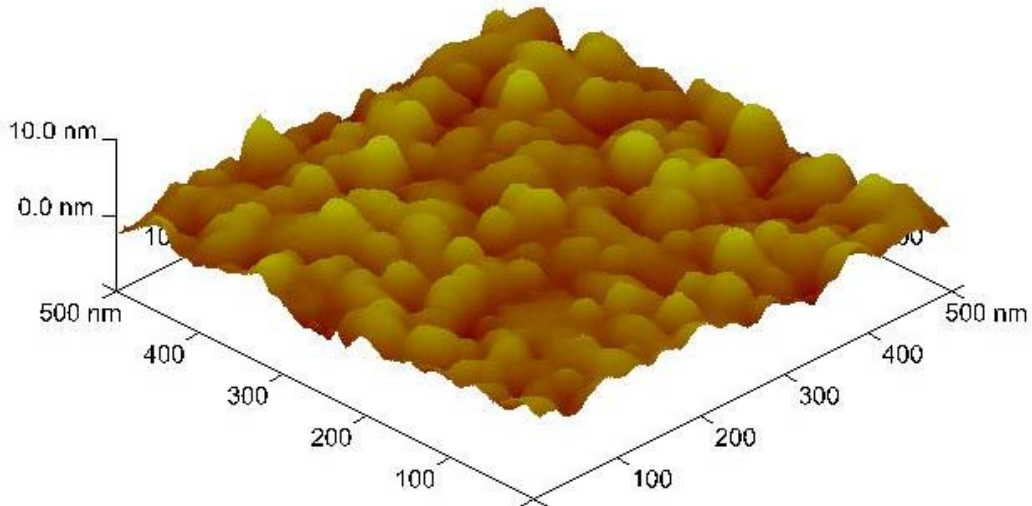


**Şekil 4.11.** Silisyum altlık üzerine kaplanmış 15 nm kalınlığa sahip altın ince filmin nihai kalınlığını tespit etmek üzere 60 μm x 60 μm'lik alan içinde AFM ile elde edilmiş 2-boyutlu görüntü ve film kalınlığı ölçümü.

Silisyum altlık üzerine kaplanmış 15 nm kalınlığa sahip altın ince film üzerinde AFM ile çalışılmış ve proje önerisinde belirtildiği üzere çalışmada farklı kalınlığa sahip ince filmlerin kullanılacak olması sebebi ile 25 nm kalınlığa sahip altın ince filmin de AFM ile incelenmesine karar verilmiştir. Bu iki farklı numunenin AFM sonuçları birlikte göz önünde bulundurularak, farklı kalınlıklara sahip ince filmlerin kalınlık ve pürüzlülük bilgileri öngörülme çalışılmıştır. Silisyum altlık üzerine 25 nm kalınlığında kaplanmış altın ince filmin AFM ile elde edilen görüntüleri Şekil 4.12-15 arasında verilmiştir. Şekil 4.12'de belirtilen numunenin 500 x 500 nm'lik alan içerisinde 3-boyutlu görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.13'te ise Şekil 4.9'da olduğu gibi 2-boyutlu görüntü üzerinden yapıyı oluşturan birbirinden ayrı bölgelerin boyutları ölçülmüştür. Numunenin orta bölgesinde olmak kaydıyla farklı bölgeleri AFM probu ile taranmış olup silisyum altlık üzerine kaplanmış 25 nm kalınlığa sahip ince filmin yüzeyindeki farklı bölgelerin boyutlarını ölçmek için yapılan çalışmaların tümünü temsilen Şekil 4.13 verilmiştir. Şekil 4.13'ten görülebileceği üzere 3 adet bölgenin boyutu hesaplanmıştır. Bunlar sırasıyla 31.562, 53.340 ve 32.179 nm olarak belirlenmiştir. Yapılan diğer ölçümlerde de yaklaşık olarak benzer sonuçlar elde edilmiş ve ortalama birbirinden ayrı bölgelerin boyutunun 38,7 nm olduğu

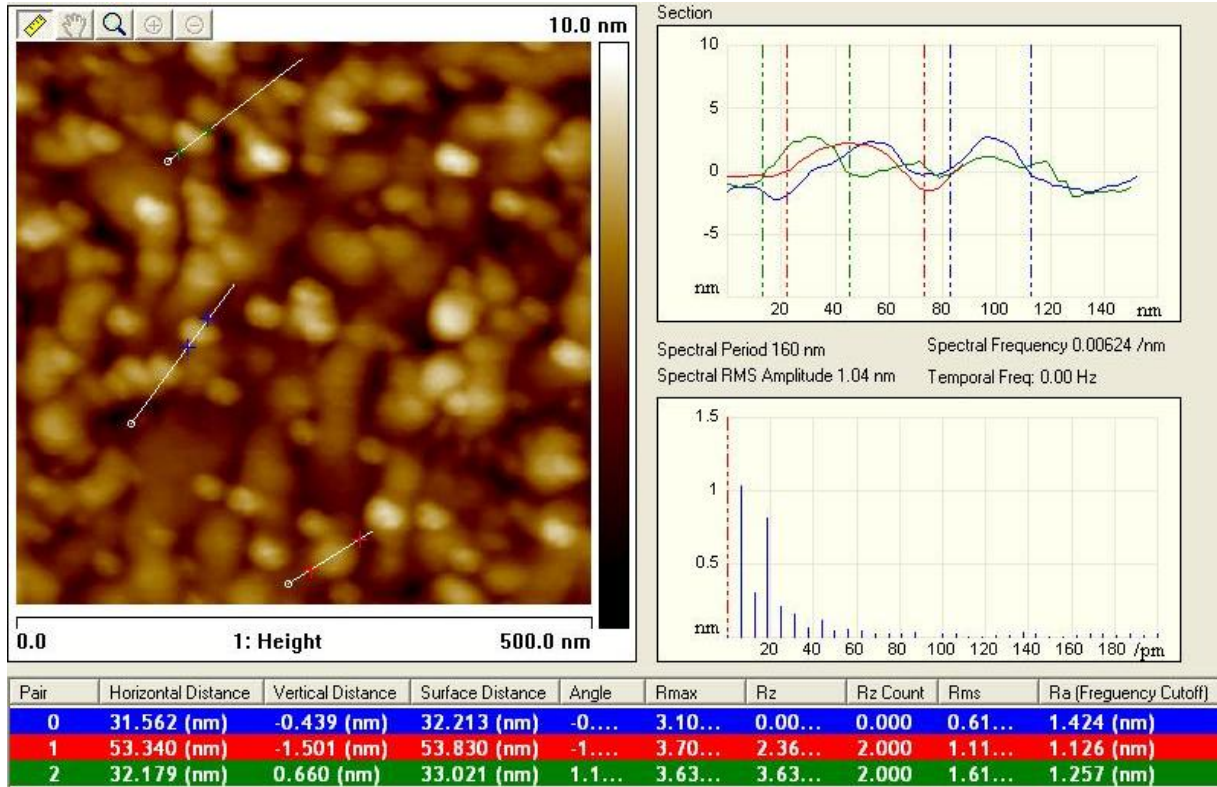
görülmüştür. Şekil 4.9'dan elde edilen sonuç ile Şekil 4.13'ten elde edilen sonuç karşılaştırıldığında 15 nm film kalınlığına sahip numunenin birbirinden ayrı bölgelerinin boyutlarının daha büyük olduğu görülmektedir. Bunun Şekil 4.13'te görülen bölgelerin aslında filmi oluşturan ilk katman taneciklerin üzerinde yeni tanecikler olarak büyümeye başlayan ikincil taneciklerden oluşmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Şekil 4.8 ve Şekil 4.12 ile Şekil 4.9 ve Şekil 4.13 ortak olarak karşılaştırıldığında bu sonuç daha net görülebilmektedir. Proje kapsamında yapılan FESEM çalışmalarında saptanmasında güçlüklerle karşılaşılan bu yüzey bilgisi AFM yardımı ile ortaya çıkartılmıştır.

Burada tekrar vurgulanması gereken husus, FESEM çalışmaları sırasında tanecik boyutu, Si altlık üzerinde oluşan ince filmin kenar kısımlarında belirlenmiştir. Dolayısıyla, sürekli film yapısını oluşturması beklenen çekirdeklenme aşamasında bulunan tanecikler üzerinde tanecik hesabı yapılmıştır. Ancak, AFM ile yapılan birbirinden ayrı bölgelerin boyut ölçümü çalışmaları Si altlık üzerinde bulunan ince filmin orta kısmında yapılmıştır. İnce filmin kenar bölgelerinde FESEM ile büyüme aşamasında olan tanecikler tek tek görülebilirken, filmin orta bölgesinde etkileşime geçmiş tanecikler ve hatta ikincil tane büyümelerinin oluşumu söz konusu olmaktadır. Bu sebeple, çözünürlüğü de yetersiz görünen AFM ile tek bir tanecikten ziyade mikro çatlak benzeri oluşumlarla çevrili birbirinden ayrı gözükken bölgelerin boyutlarının ölçülmüş olduğu değerlendirilmektedir.



**Şekil 4.12.** Silisyum altlık üzerine kaplanmış 25 nm kalınlığa sahip altın metalinin AFM ile elde edilmiş, 500 nm x 500 nm'lik alan içinde 3-boyutlu görüntüsü.





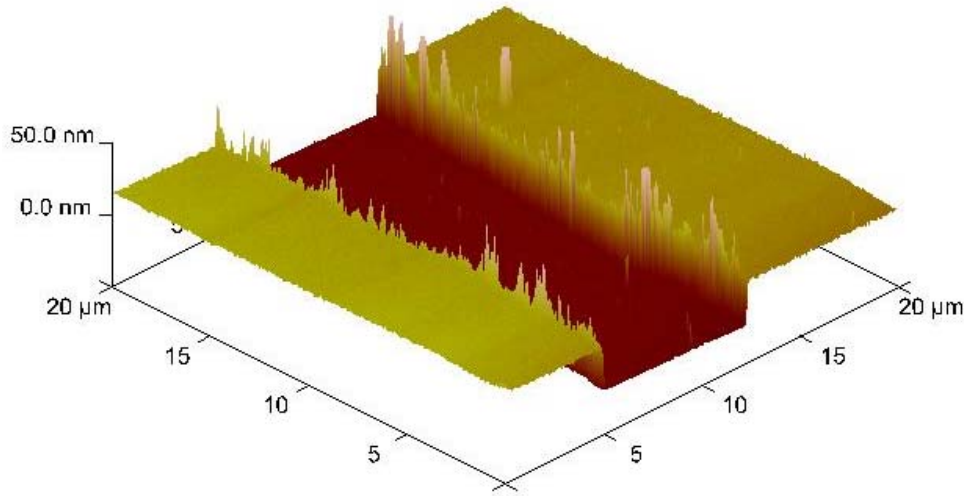
**Şekil 4.13.** Silisyum altlık üzerine kaplanmış 25 nm kalınlığa sahip altın metalinin AFM ile elde edilmiş, 500 nm x 500 nm'lik alan içinde 2-boyutlu görüntüsü ve tane boyutu ölçümü.

Şekil 4.14'te elde edilen görüntünün oluşturulması için yapılan çalışma Şekil 4.10'un elde edilmesi için yapılan çalışma ile aynıdır. İnce metalik bir uç yardımı ile silikon altlık üzerine kaplanmış 25 nm altın ince filmin yüzeyinde sadece altın metalini kaldıracak; ancak, silisyum altlığın yüzeyini deforme etmeyecek şekilde çizik açılmış ve elde edilen profiller Şekil 4.14-15'te film kalınlığını incelenmek üzere gösterilmiştir. Şekil 4.14 ve Şekil 4.16'da görüleceği üzere AFM probu 20 µm x 20 µm'lik alan taramıştır. Şekil 4.14'te elde edilen 3-boyutlu görüntü yardımı ile çizik oluşturulurken sadece altının yüzeyden kaldırıldığı; ancak, silisyum altlığın yüzeyine hasar verilmediği Şekil 4.10'da da olduğu gibi görülebilir. Ayrıca, altın ince film silisyum altlığın yüzeyinden kaldırılırken çizik kenarlarında oluşan belirli hatalar 3-boyutlu görüntü yardımıyla fark edilmektedir. Şekil 4.15'te kalınlık ölçümünün yapıış şekli görülmekte ve bu kalınlık ölçümünün doğru yapılabilmesi için Şekil 4.14'ten elde edilen 3-boyutlu görüntü önem arz etmektedir. Şekil 4.15'te tekrar iz düşüm çizgileri yardımıyla yükseklik farkı bulunmuştur. Şekil 4.15'te numunenin 3 farklı bölgesinden elde edilen yükseklik farkı bilgileri sırasıyla mavi iz düşüm için 30.726 nm, kırmızı iz düşüm için 28.796 nm, yeşil iz düşüm için ise 30.063 nm olarak görülebilir. Numunenin birçok yerinde yapılan ölçümler ile silisyum altlık üzerine 25 nm olarak kaplanmış olan altın ince filmin gerçek kalınlığının yaklaşık olarak 29,6

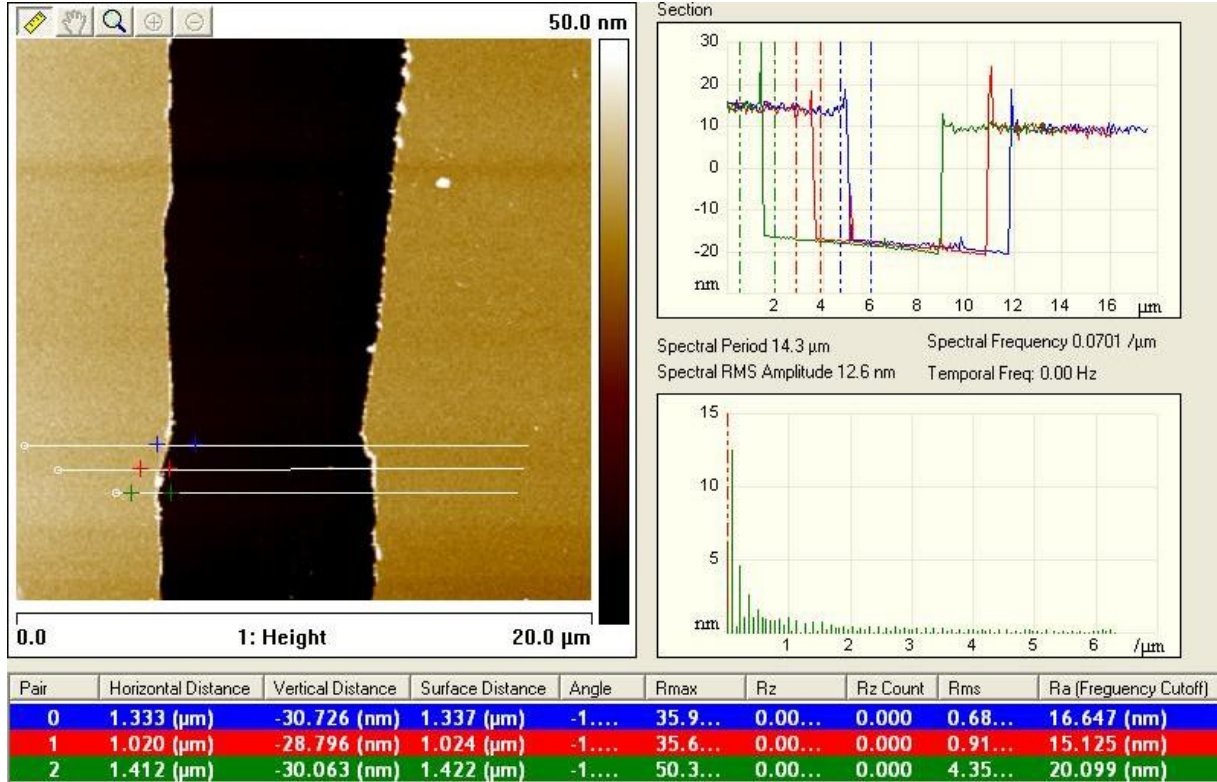
nm olduğu saptanmıştır. Şekil 4.11 ve Şekil 4.15 ile elde edilen gerçek film kalınlıklarının 15 nm film kalınlığına sahip numune için 18,3 nm ve 25 nm film kalınlığına sahip numune için 29,6 nm olduğu görülmüştür. Kaplanmaya çalışılan kalınlık ile nihai olarak elde edilen kalınlık arasındaki yüzde sapma aşağıdaki denklem yardımı ile hesaplanabilir.

$$\% \text{ Sapma} = \frac{(\text{Ölçülen Değer} - \text{Gerçek Değer})}{(\text{Gerçek Değer})} \times 100 \quad (\text{Denklem 4.1})$$

Denklem 4 yardımı ile 15 nm film kalınlığına sahip ince filmde Yüzde Sapma değeri %22, 25 nm film kalınlığına sahip ince filmde ise %18,4 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre yüzey modifikasyon işlemi yapılan ısı buharlaştırma cihazının kalınlık ölçme aparatının yaklaşık olarak %20 hatalı değerler verdiği görülmektedir. Gerçek film kalınlığı belirli bir sapma içerisinde bilinen ve cam elyaf dokumaların üzerine uygulanan ince metalik film yüzey modifikasyonları bu doğrultuda değerlendirilecektir.



**Şekil 4.14.** Silisyum altlık üzerine kaplanmış 25 nm kalınlığa sahip altın ince filmin nihai kalınlığını tespit etmek üzere 20 µm x 20 µm'lik alan içinde AFM ile elde edilmiş 3-boyutlu görüntü.



**Şekil 4.15.** Silisyum altlık üzerine kaplanmış 25 nm kalınlığa sahip altın ince filmin nihai kalınlığını tespit etmek üzere 20 μm x 20 μm'lik alan içinde AFM ile elde edilmiş 2-boyutlu görüntü ve film kalınlığı ölçümü.

Şekil 4.9 ve Şekil 4.13'te 2-boyutlu olarak verilen görüntülerin yüzey bilgileri incelenmiş ve yürütülen proje için önemli olabilecek yüzey parametreleri Tablo 3'te özetlenmiştir. Yüzey bilgileri içerisinde en önemli kriter ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) ve maksimum yüzey pürüzlülüğüdür ( $R_z$ ). Silisyum altlık üzerine kaplanan ince filmin pürüzlülüğü, filmin bütün yüzeye yayılabilirliğini kontrol etmek açısından önemlidir. Maksimum yüzey pürüzlülüğü, belirtilen alan içerisinde AFM tarama işlemine devam edilirken probun dokunduğu en yüksek nokta ile en alçak nokta arasındaki farkı göstermektedir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü ise belirtilen alan içerisinde AFM probunun taramaya devam ederken dokunduğu noktaların ortalama olarak birbirinden uzaklığını temsil etmekte; aynı zamanda, ortalama yükseklik değerlerinin sapmasını göstermektedir. Tablo 4.2'de 15 nm kalınlığa sahip olduğu düşünülen silisyum altlık üzerine kaplanmış altın ince filmi "Numune 1", 25 nm kalınlığa sahip olduğu düşünülen silisyum altlık üzerine kaplanmış altın ince filmi ise "Numune 2" olarak verilmiştir.

**Tablo 4.2.** AFM ile yüzey ölçümü yapılan silisyum altık üzerine 15nm ve 25nm kalınlığa sahip olduğu düşünülen ince altın filmlerinin yüzey bilgisi değerleri

	$R_a$	$R_z$	Gerçek Film Kalınlıkları
Numune 1	0,83 nm	9,56 nm	18,30 nm
Numune 2	0,99 nm	11,90 nm	29,60 nm

Tablo 4.2’de verilen maksimum yüzey pürüzlülüğü değerinin kaplama kalınlığı arttıkça yükselmesi beklenen bir sonuçtur. Bu sonuç, film kalınlığı arttıkça filmi oluşturan tanecikler arasında bulunan uzaklıkların da artmasından kaynaklanmaktadır. Numune 1-2 için ölçülen gerçek film kalınlıkları ortalama film kalınlığını göstermektedir. Gerçek film kalınlıkları ve  $R_z$  değerleri karşılaştırıldığında, ince film üzerinde en yüksek nokta ile an alçak nokta arasındaki yükseklik farkı, gerçek film kalınlığı değerinden çok daha düşük olması sebebi ile ince film yapısının Si altığı sürekli olacak şekilde kapladığı anlaşılmıştır. Film yüzeyi üzerinde yükseklik farkları olmasına rağmen, elde edilen değerler kaplamanın bütün yüzeye ulaşmış olduğunu ve silisyum altık yüzeyinin tamamını kapatabildiğini göstermektedir. Tablo 3’te verilen  $R_a$  değerleri yüzey pürüzlülüğünde bulunan sapma değerlerini göstermekte ve belirtilen sapmaların düşük seviyelerde olması sebebi ile kaplamanın bütün yüzeye olabildiğince homojen dağıldığı, yükseklik farklarının ise film yapısını oluşturan taneciklerden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

#### 4.2.3 XRD ile Yüzey Modifikasyonu İnceleme Çalışmaları

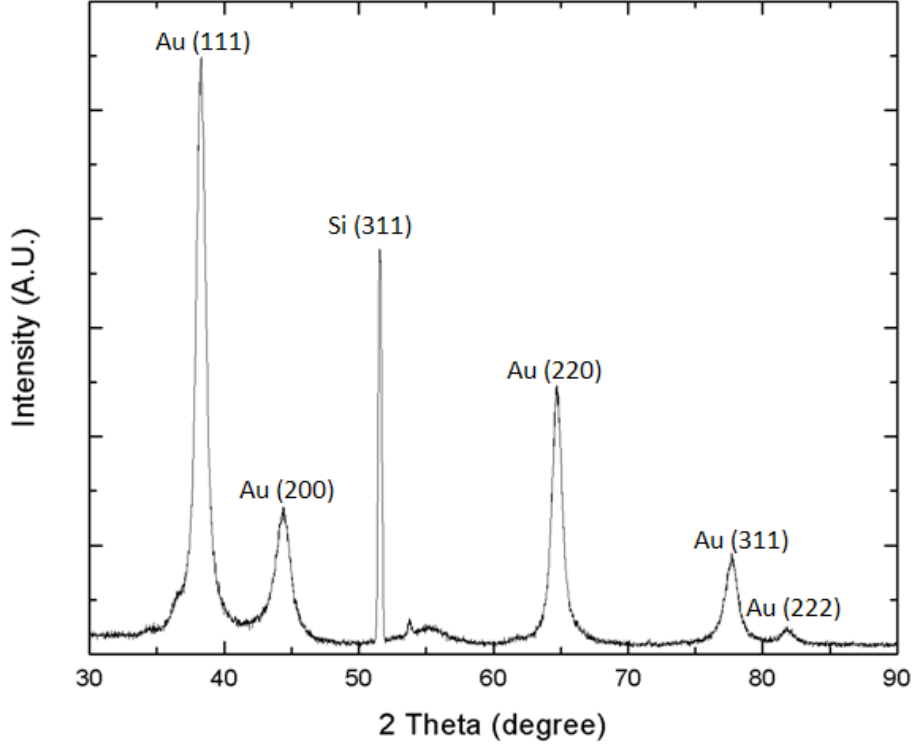
Yüzey modifikasyonu için kullanılan ince film karakterizasyonu için ODTÜ Merkez Laboratuvarı bünyesinde bulunan İnce Film XRD’si kullanılarak yüzeye uygulanan ince filmlerin kristal yapısı incelenmiştir. ODTÜ Merkez Laboratuvarı ince Film XRD’si kullanılarak elde edilen, 15 nm kalınlığında ince filme sahip olan silisyum altık ve 25 nm kalınlığında ince filme sahip olan silisyum altığın Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de sırasıyla XRD spektrumları görülebilir. İki numune için gösterilen XRD spektrumlarında altın metale ait (111), (200), (220), (311), (222) düzlemlerinin pikler görülebilir. Grafiklerde piklerin şiddetlerdeki farklılıklar göze çarpmakta ve film kalınlığı değişimi ile birlikte piklerin şiddetlerindeki değişimin incelenmesine devam edilmektedir. Şekil 4.16-17’de altın piklerinin yanında silisyumun tek piki göze çarpmakta ve elde edilen Si pikinin (311) düzlemine ait olduğu anlaşılmaktadır. Ancak, iki grafik karşılaştırıldığında Si (311) pikinin görüldüğü açının kaydığı görülmüştür. Si (311) düzlemine ait XRD pikinin olması gereken açı aslında  $56^\circ$ ’dir; ancak, pik pozisyonundaki kayma ince film



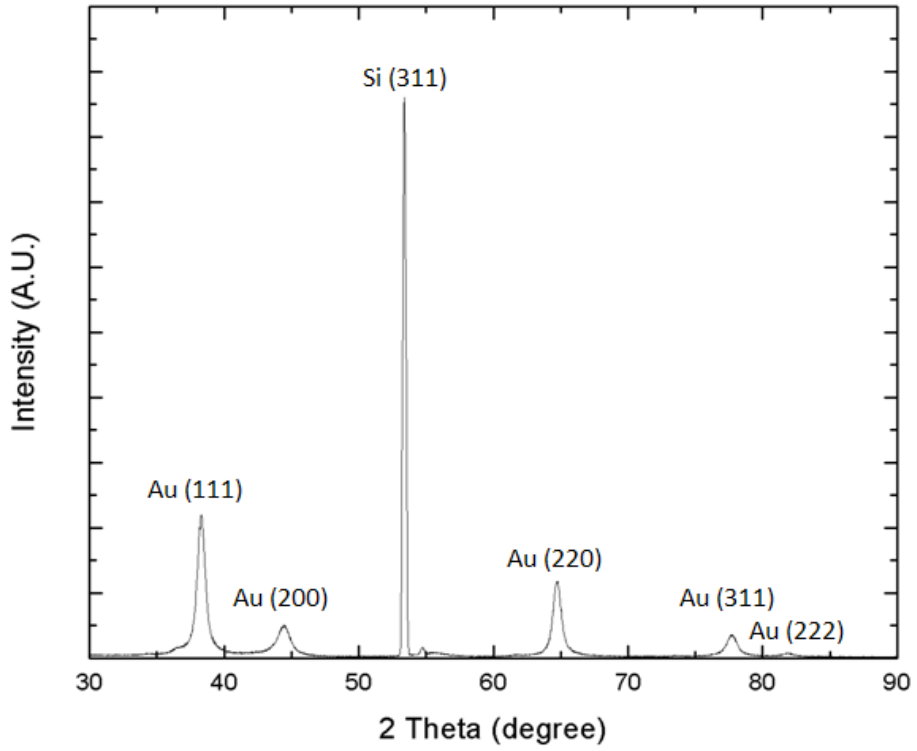
XRD'si yapılan numunelerdeki silisyum altlığın özellikle yüzeyine yakın bölgelerindeki kristal yapının değişikliği veya bozulmasından kaynaklanmaktadır.

İnce film XRD'si yapılan numunelerde, X-Ray ve hedef etkileşimi tamamen film kalınlığına ve film yüzeyine gelen XRD açısına bağlıdır. Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'deki XRD grafiklerinde bulunan şiddet değişimleri tamamı ile bununla ilgilidir. İnce Film XRD'si yapılması için kullanılan ODTÜ Merkez Laboratuvar bünyesinde bulunan XRD cihazı numunelerin film kalınlıklarına bağlı olarak açı ve yükseklik değerlerinin kalibre edilmesine ihtiyaç duymaktadır. Yapılan ince film XRD'sinde 15 nm film kalınlığına sahip numune için yükseklik bilgisi saptanmış olup 25 nm film kalınlığına sahip numune için de aynı yükseklik değeri kullanılmıştır. İki numune için de X-Ray aynı açı ve aynı yükseklik değerleri kullanılarak hedef üzerine gönderilmiş ve bunun sonucunda X-Ray – hedef etkileşim bölgesi iki numune için de aynı şekilde ortaya çıkmıştır. Bu sebeple, 25 nm film kalınlığına sahip numune için X-Ray daha çok Si altlık içine nüfuz edebilmiş ve Si (311) düzlemine ait pikin şiddetinin çok daha yüksek gözükmesine yol açmıştır. XRD grafiğinde elde edilen altın pikleri ise şiddet olarak iki numune için yapılan analiz sonucunda benzer şekilde ortaya çıkmıştır. Bunun sonucunda, ince filmleri oluşturan taneciklerin homojen biçimde her kalınlık için yüzeye dağıldığı anlaşılmaktadır.

FESEM ile mikroyapı karakterizasyonu yapılan ince filmlerin, AFM ve ince film XRD'si kullanılarak ortalama tane boyutları, gerçek film kalınlığı ve film kalınlığına bağlı tane boyutu ile kristal değişimleri incelenmiştir. Bu karakterizasyon çalışmalarının tamamı sonucunda film yüzeyinin sürekli bir yapıya sahip olduğu ve gerçek film kalınlığının kaplama esnasında ölçülen kalınlık değerlerinden %20 sapma gösterdiği ortaya çıkarılmıştır. Bu sonuçlar, ısıtma buharlaştırma ile elde edilen yüzey modifikasyonlarının proje hedefleri doğrultusunda bir problem barındırmadığını ortaya koymaktadır.



**Şekil 4.16.** Silisyum altlık üzerine kaplanmış 15 nm kalınlığa sahip altın metalinin ince film XRD'si ile elde edilmiş spektrumu.



**Şekil 4.17.** Silisyum altlık üzerine kaplanmış 25 nm kalınlığa sahip altın metalinin ince film XRD'si ile elde edilmiş spektrumu.

### **4.3 Elektromanyetik Ölçümler ve Sonuçları**

#### **4.3.1 Yüzeyi Metalik Kaplamalar ile Modifiye Edilmiş Cam Elyaf Dokumalarının Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları**

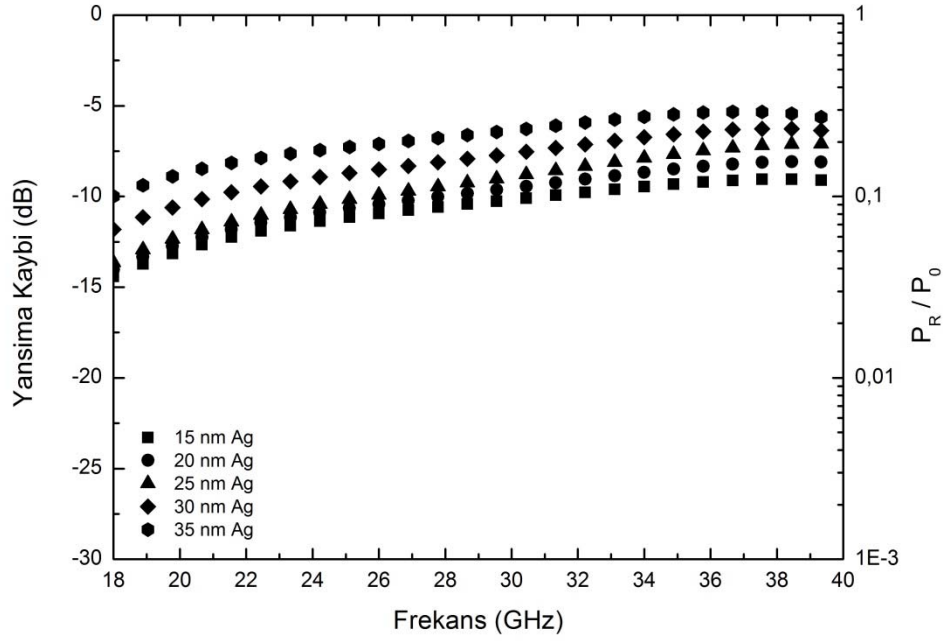
Proje kapsamında belirtildiği üzere cam elyaf dokumalar metalik kaplamalar ile modifiye edilmiş ve oluşturulan yapıların elektromanyetik dalga yansıma, geçirim ve bunlara bağlı olarak soğurma özellikleri incelenmiştir. Yüzeyi sırasıyla ayrı ayrı gümüş, altın, nikel ve alüminyum metalleri ile modifiye edilen cam elyaf dokumalarının elektromanyetik ölçüm özellikleri aşağıdaki başlıklar altında incelenmiştir. Farklı metaller ile modifiye edilen yapıların tek katmanlı ve çok katmanlı halleri metalik kaplama sonrası silan uygulaması yapılmış ve yapılmamış olarak gruplandırılarak EM dalga yansıma, geçirim ve soğurma özellikleri şekiller yardımıyla özetlenmiştir. Tek katmanlı yapılarda sadece EM dalga yansıma ve geçirim özellikleri karşılaştırılmış; ancak, soğurma özellikleri karşılaştırılmamıştır. Bunun sebebi, tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma veya geçirim özelliklerinden sadece bir tanesinin baskın olarak gözlemlenmesidir. EM dalga soğurma özellikleri, yansıma ve geçirim özelliklerinin ortak sonucu olduğundan, sadece bir özelliğin baskın olması EM dalga soğurma özelliklerinin karşılaştırılmasını anlamsız kılmaktadır. Tek katmanları artarda ekleyerek elde edilen çok katmanlı yapılarda ise EM dalga yansıma ve geçirim özellikleri aynı anda gelişmeye ve baskın olmaya başlar ve dolayısıyla bu EM dalga soğurma özelliklerini karşılaştırmayı çok katmanlı yapılar için anlamlı hale getirir.

##### **4.3.1.1 Yüzeyi Gümüş Metali ile Modifiye Edilmiş Cam Elyaf Dokumalarının Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları**

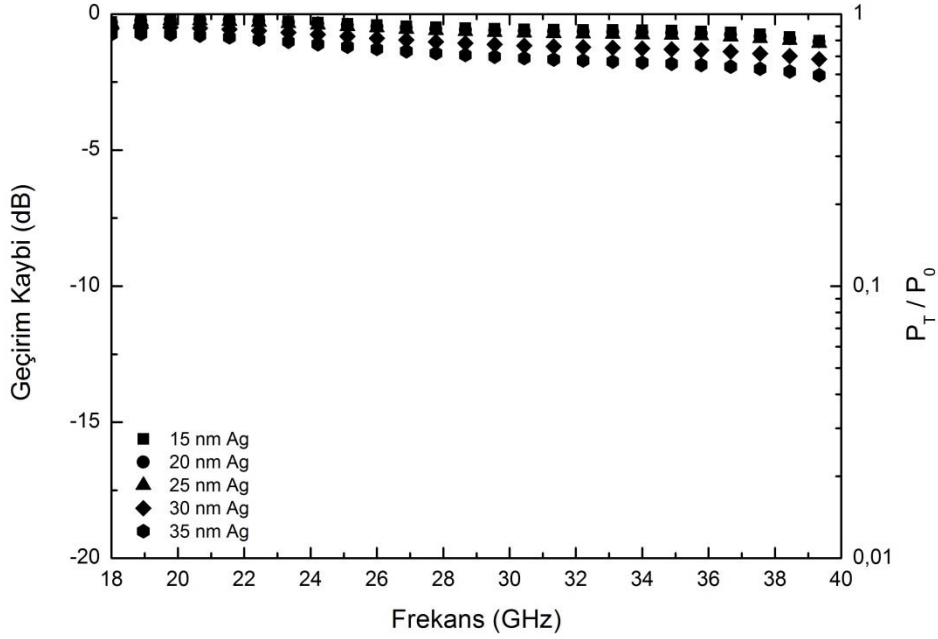
Proje kapsamında ilk olarak yüzeyi gümüş ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar ile elektromanyetik ölçümler yapılmıştır. İlk olarak gümüş metalinin seçilmiş olmasının sebepleri; gümüş metalinin elektriksel iletkenlik katsayısının belirtilen metaller arasında en yüksek olması, diamanyetik olması ve ısı buharlaştırma tekniğinde kullanılan parametrelerinin belirtilen diğer metallere göre daha pratik olmasıdır. İlk olarak cam elyaf dokumaların yüzeyleri 15, 20 ve 25 nm gümüş metali ile modifiye edilmiş ve elektromanyetik ölçümleri yapılmıştır.

Yüzeyleri gümüş metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalarının EM özellikleri, tek katmanlı yapılar için Yansıma Kaybı ve Geçirim Kaybı cinsinden, çok katmanlı yapılar için ise bunlara ek olarak Soğurma Yüzdesinin frekansa bağlı değişimi ile incelenmiştir. Şekil 4.18'de EM dalga yansıma kaybının, Şekil 4.19'da ise EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi grafikler yardımı ile görülebilir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere tek katmanlı yapıların özellikleri modifiye edilen film kalınlığı ile belirli bir düzen içerisinde değişmektedir. Kaplama kalınlığı

artıkça EM dalga yansımaya kaybının arttığı ve EM dalga geçirim kaybının azaldığı açık bir şekilde görülmektedir. Bunun sebebi, artan kaplama kalınlığı ile malzeme yüzeyinin elektrik iletkenliğinin artması ve böylece EM dalgaları daha fazla yansıtıcı ve daha az geçirici bir karakteristiğe yaklaşmasıdır. Farklı kalınlıklarda gümüş metali ile yüzeyleri modifiye edilen cam elyaf dokumaların yansımaya kayıplarının -6 dB ve -15 dB, geçirim kayıplarının ise -1 dB ve -3 dB arasında değiştiği gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.18.** Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi.

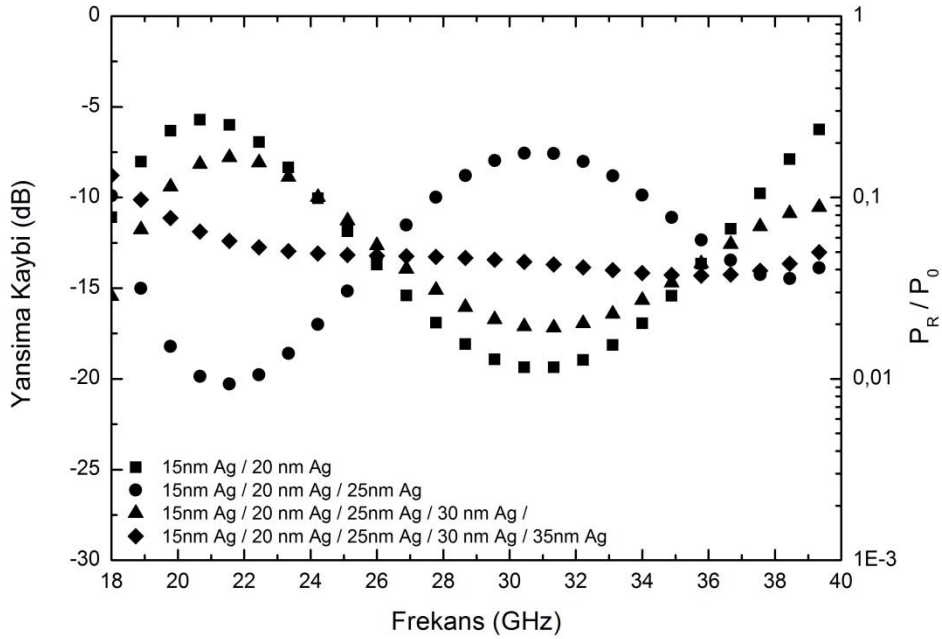


**Şekil 4.19.** Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.

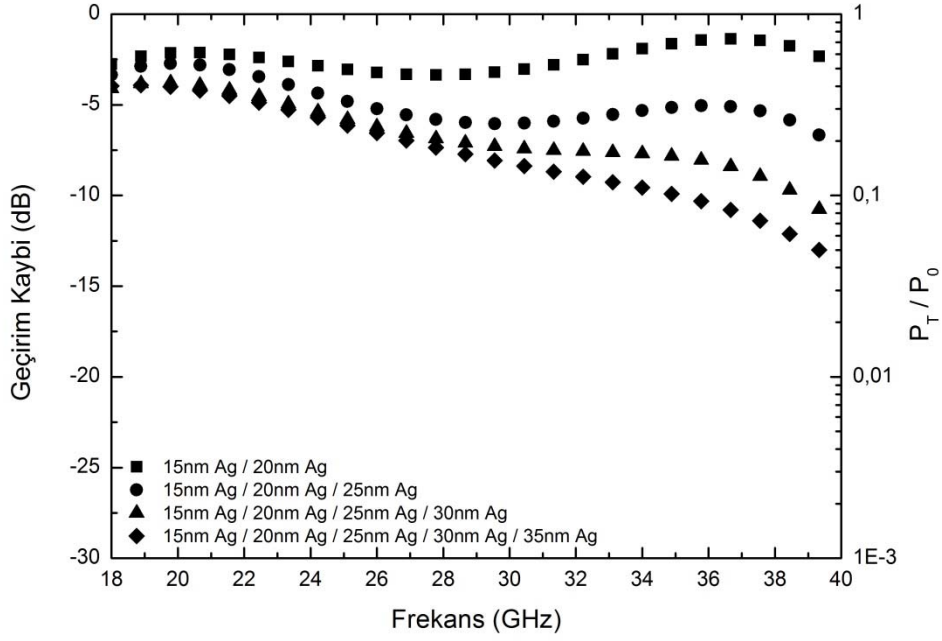
Tek katmanlı cam elyaflara gümüş metalinin modifiye etkisi incelenmiş ve bu bilgiler ışığında çok katmanlı yapıların benzer özellikleri aşağıdaki şekiller yardımıyla irdelenmiştir. Katmanlar birbirleri ardına artan metalik kaplama kalınlık sırasına göre dizilmiş ve 4 adet çok katmanlı yapı konfigürasyonu oluşturulmuştur. Şekil 4.20-22'de çok katmanlı yapıların sırasıyla EM dalga yansımaya kaybı, geçirim kaybı ve soğurma yüzdesi değerleri görülebilir. Şekil 4.20'de görüleceği üzere frekansa bağlı EM dalga yansımaya değerleri belirli bir düzen içermemektedir. Katman sayısı arttıkça EM dalga yansımaya değerleri belirtilen frekanslar arasında dalgalanmaktadır. Bu, yapıların EM dalga ile girdiği etkileşimden kaynaklanmaktadır.

Serbest uzay ölçüm tekniği ile ölçümleri yapılan yapılarda, EM dalga ilk olarak 1 numaralı kanaldan çıkar ve numunenin ilk olarak en öndeki metalik kaplamalı yüzeyi ile etkileşime girerek bir kısmı yansır, geri kalan kısmı ise ilk karşılaşılan yüzeyin arkasına geçer. İkinci katmanın yüzeyi ile karşılaşan bu EM dalga tekrar yansımaya ve geçirim olarak ikiye ayrılır ve bu benzer şekilde devam ederek son yüzeye kadar ilerler. Bu sırada, yapı içinde her katmanda yeni yansımaya yüzeyleri oluşur ve bu ise çok katmanlı yapı içinde EM dalga girişimlerine sebep olur. Bu girişimler sonucu tahmin edilmesi oldukça güç olan yansımaya değerleri oluşmaktadır. Bu sebeple, katman sayısı arttıkça belirli bir düzen içerisinde azalan veya artan EM dalga

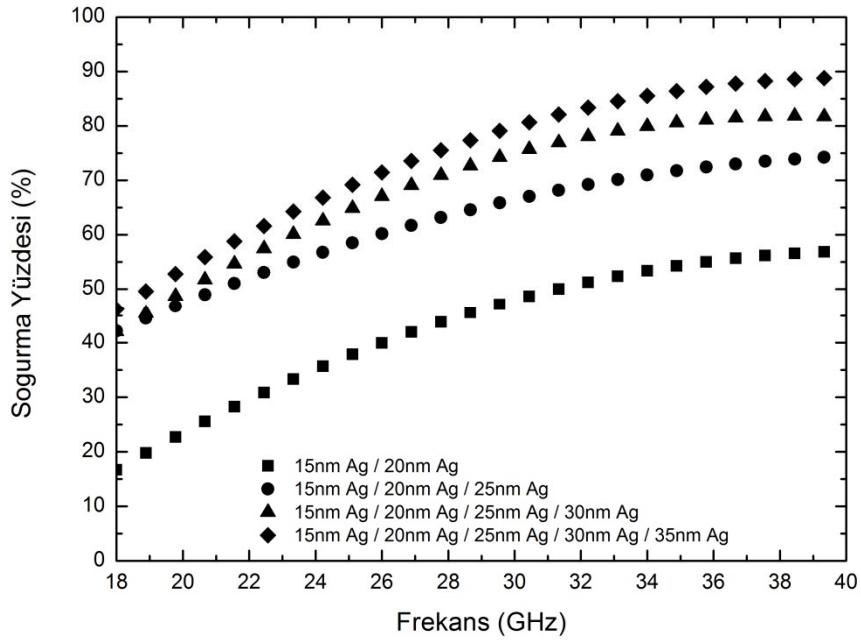
yansımaya değerleri gözükmemektedir. Ancak, çok katmanlı yapıların, tek katmanlı yapılara oranla daha az yansımaya yaptıkları belirlenmiştir. Çok katmanlı yapıların, EM dalga yansımaya özelliklerinin -5 dB ve -20 dB arasında değiştiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.20). Benzer şekilde, çok katmanlı yapıların daha az EM dalga geçirimi yaptığı da yapılan çalışmalarla tespit edilmiştir. Şekil 4.21’de görüleceği üzere çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim özellikleri -2 dB ve -13 dB arasında değişmektedir. Ayrıca, katman sayısı arttıkça EM dalga geçiriminin belirli bir düzen içerisinde azaldığı görülebilir. Şekil 4.20 ve 4.21’de görülen EM dalga yansımaya ve geçirim özelliklerine bağlı olarak elde edilen EM dalga soğurma değerleri ise Şekil 4.22’de verilmiştir. Bu şekilden de anlaşılacağı üzere katman sayısı arttıkça EM dalga soğurma özellikleri artış göstermektedir. Çok katmanlı yapılar arasında beş katmanlı yapı ile %90 gibi yüksek EM dalga soğurma değerlerine çıkabildiği gözlemlenmiştir. Bununla beraber, proje hedefleri arasında gösterilen %90 EM dalga soğurma seviyelerine belirli frekanslarda ulaşılmıştır.



**Şekil 4.20.** Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi.



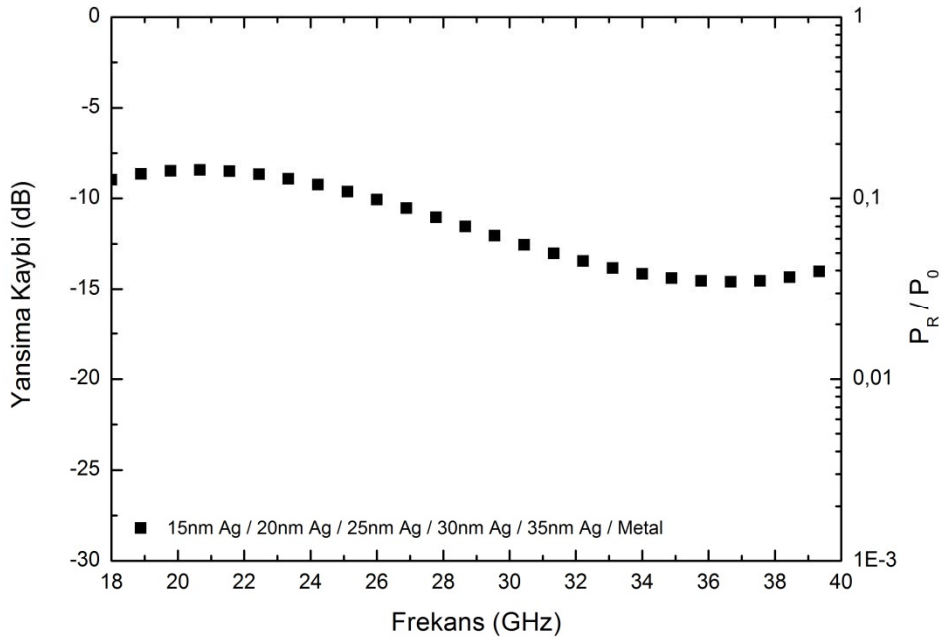
**Şekil 4.21.** Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.



**Şekil 4.22.** Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.

Gümüş metali ile yüzeyi modifiye edilen cam elyaf dokuma çok katmanlı yapılar ile başka bir çalışma daha yapılmıştır. Oluşturulan azami katman sayısına sahip beş katmanlı yapının arkasına tamamen yansıtıcı metal plaka yerleştirilmiştir. Bununla amaçlanan, tamamen yansıma yapması beklenen metal plakadan önce EM dalga ile etkileşime giren çok katmanlı yapının tam yansımaya ne kadar değiştireceği sorusuna cevap aramaktır. Şekil 4.23'ten görüleceği üzere EM dalga yansıma değerleri -10 dB ve -20 dB arasında değişmektedir. Bu, ölçümü yapılan yapının üzerine gelen EM dalgasının belirli frekans değerleri arasında yaklaşık %1 ile %10 gibi düşük değerler ile yansıma yaptığını göstermektedir.

Oluşturulan çok katmanlı yapının arkasında metal plaka olduğundan EM dalganın malzemedan geçişi söz konusu değildir. Dolayısıyla %1 ile 10 arası yansıma bu durumda, EM dalgaların %99 ile 90 arasında soğrulmasına karşı gelmektedir. Zira ölçümü yapılan metal altlıklı konfigurasyonda malzeme yüzeyine gönderilen EM dalga yansıyamıyorsa malzeme tarafından soğruluyor demektir. Sonuç olarak, geliştirilen yüzey modifiyeli cam elyaf dokuma çok katmanlı takviye yapısı, kompozit formunda metalik yüzeylerin üzerinde kullanılması durumunda metalik yapılara EM dalga yansıtımama özelliği katma potansiyeli taşımaktadır.

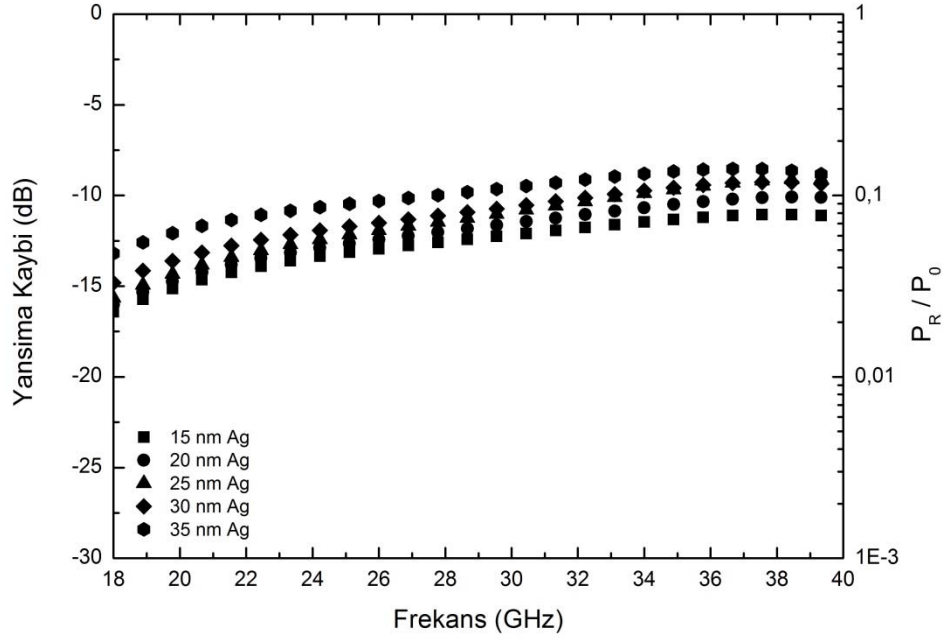


**Şekil 4.23.** Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların arkasında metal ile birlikte EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.

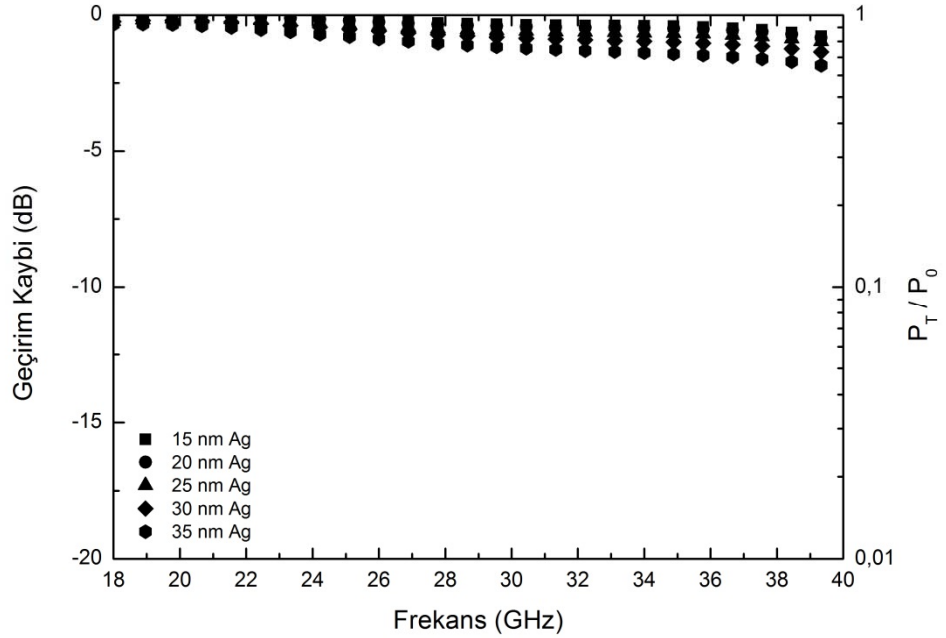


Proje hedefleri için belirtilen EM dalga soğurma yüzdesi değerlerine gümüş kaplama ve cam elyaf dokumalar kullanılarak ulaşılmış. Ancak, bu sistemin bir dezavantajı olarak yüzey modifikasyonu için kullanılan gümüş metalinin cam elyaf dokumalar üzerinde kısa bir süre içerisinde oksitlendiği görülmüştür. Metalik ince filmlerin kısa süre içerisinde oksitlenmesinin, yapıların yüzey iletkenliklerini ve dolayısıyla elektromanyetik özelliklerini değiştirmiş olabileceği düşünülerek çalışmalara farklı bir boyut kazandırılmıştır. Bu tespit yapıldıktan sonra, yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilen cam elyaf dokumalar iki hafta boyunca normal şartlar altında oksitlenmek üzere tutulmuş ve belirtilen süre sonunda serbest uzay ölçüm tekniği ve aynı parametreler kullanılarak EM ölçümler tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.24-29 arasında sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, tek katmanlı yapılar oksitlendikleri ve yüzey iletkenlikleri azaldığı için beklenildiği gibi önceki değerlere göre daha az EM dalga yansıması ve daha çok EM dalga geçirimi göstermiştir. Oksitlenmemiş ve oksitlenmiş tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma ve geçirim özellikleri karşılaştırıldığında elde edilen sonuçların birbirlerine kaplama kalınlığı bakımından çok benzer oldukları ve oksitlenme ile yansıma kaybı(dB) ve geçirim kaybı(dB) değerlerinin belirgin oranda sırasıyla azalmış ya da artmış olduğu görülmüştür.

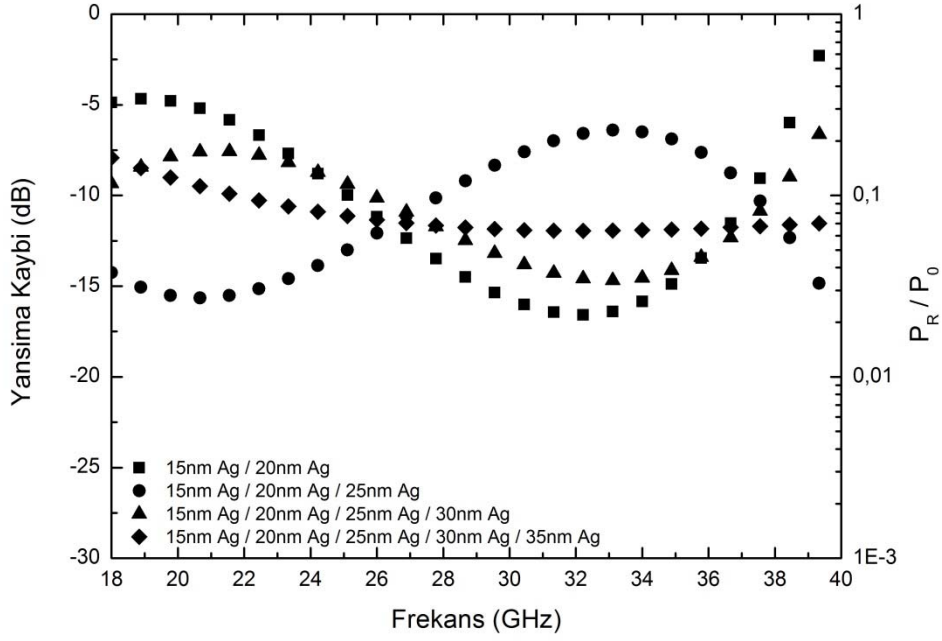
Elde edilen bu sonuçlar, oksitlenmenin EM dalga soğurucu kompozit yapılar üzerindeki etkisi kapsamında başka çalışmalar ile incelenebilecek farklı bir boyutunun daha olduğunu göstermiştir. Tek katmanlı yapılara benzer biçimde, oksitlenme sonrası çok katmanlı yapılarda da EM dalga yansıması belirgin olarak azalmış ve EM dalga geçirimi artmıştır. Bunun sonucunda ise EM dalga soğurma yüzdesi değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Beş katmanlı yapılar için elde edilen %90 gibi yüksek EM dalga soğurma yüzdesi değeri %70 değerine kadar gerilemiştir. Bunların yanında, oksitlenen yüzeyi gümüş ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumaların arkalarına tam yansıtıcı metal plaka konulduğunda, malzemenin daha önceki sonuçlara göre daha çok EM dalga yansıması yaptığı görülmüştür. Elde edilen tüm bu sonuçlar, EM dalga soğurucu kompozit yapılarda, kısa süre içinde oksitlenme sonucu EM özelliklerinin değişmesi sebebi ile yüzey modifikasyonu için gümüş metali kullanımının doğru olmayacağını göstermiştir. Bunun sonucunda, gümüş metali ile yapılan çalışmalara son verilmiştir.



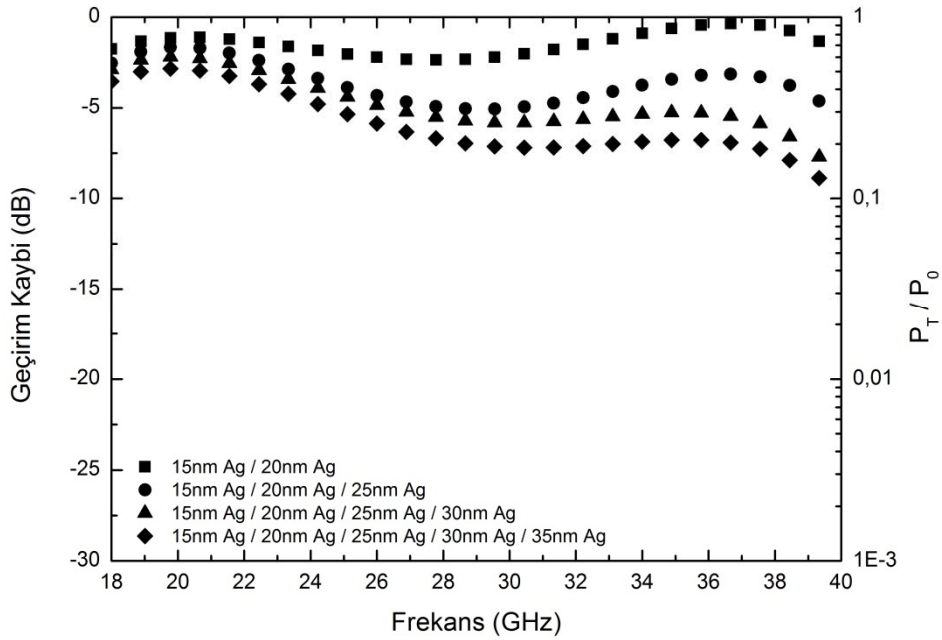
**Şekil 4.24.** Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş ve oksitlenmiş cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.



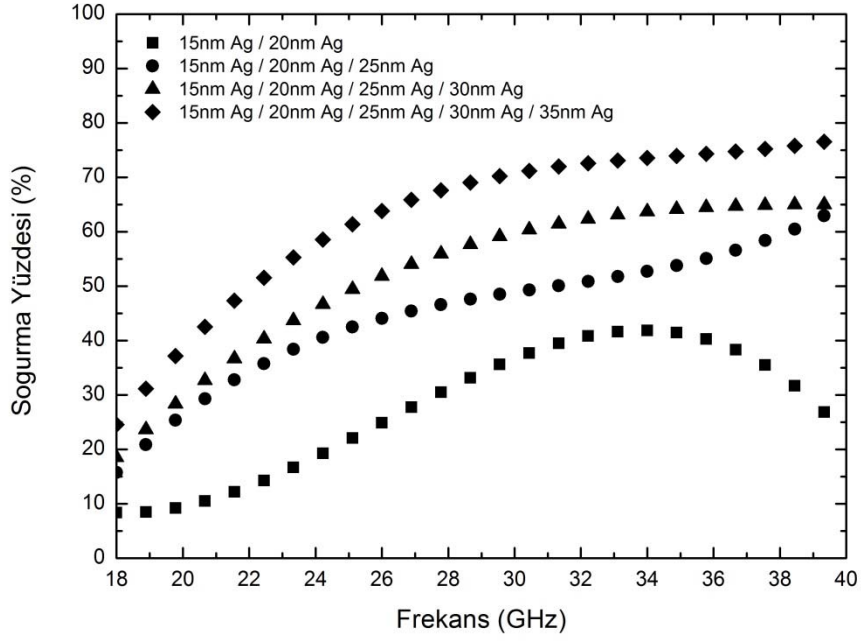
**Şekil 4.25.** Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş ve oksitlenmiş cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.



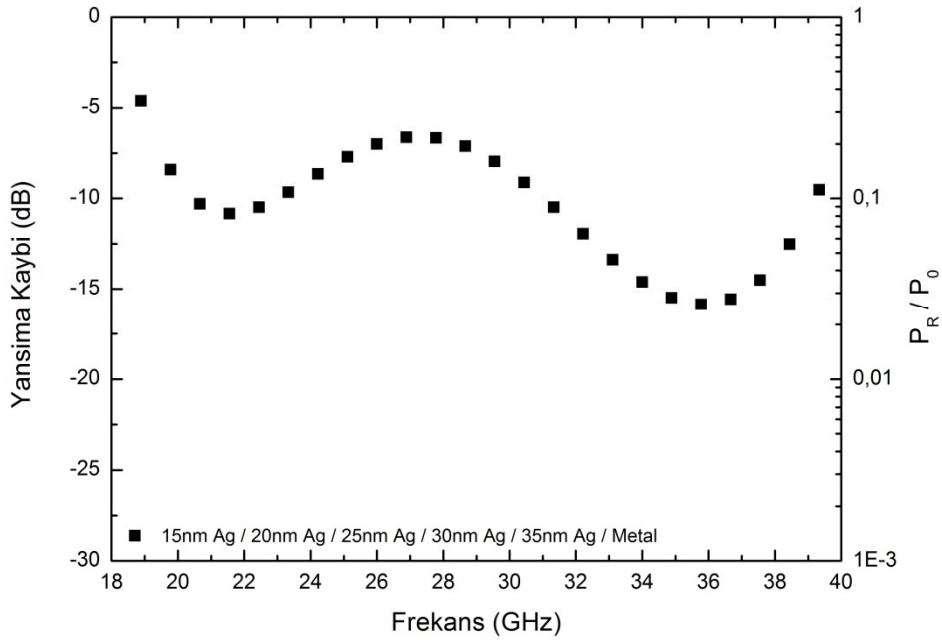
**Şekil 4.26.** Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş ve oksitlenmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.



**Şekil 4.27.** Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş ve oksitlenmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.



**Şekil 4.28.** Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş ve oksitlenmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.

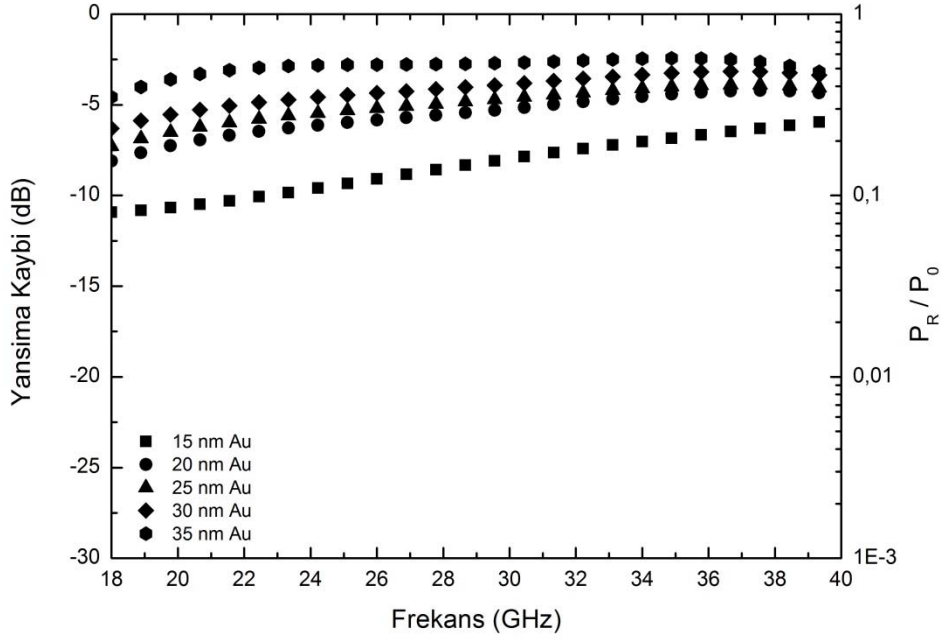


**Şekil 4.29.** Yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilmiş ve oksitlenmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların arkasında metal altlıkla birlikte EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi.

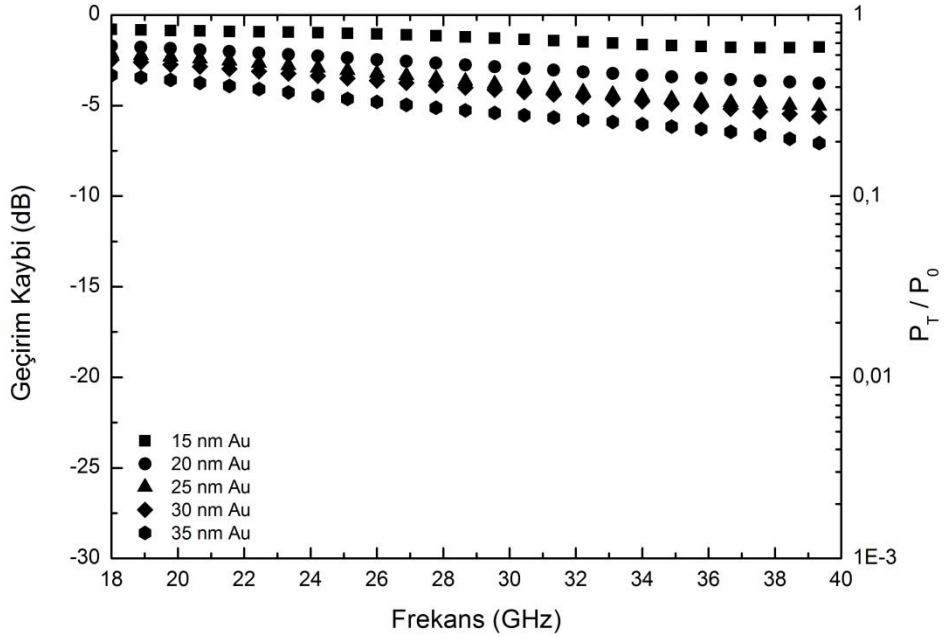
#### **4.3.1.2 Yüzeyi Altın Metali ile Modifiye Edilmiş Cam Elyaf Dokumalarının Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları**

Yüzeyleri altın metali ile 15, 20, 25, 30 ve 35 nm kalınlıklarda modifiye edilen cam elyaf dokumalarının serbest uzay ölçüm tekniği ile EM özellikleri incelenmiştir. İlk olarak beş farklı kaplama kalınlığına sahip yapılar tek katmanlı olarak incelenmiş, daha sonra tek katmanlı yapılar film kalınlıkları sırasına göre birbirleri ardına sıralanarak oluşturulan çok katmanlı yapıların EM ölçümlerine devam edilmiştir. Bir sonraki adımda, bu metalik ince film ile modifiye edilmiş katmanların yüzeylerine silanlama uygulanmış ve EM özellikleri yüzeylerinde silan varlığında incelenmiştir.

Yüzeyleri altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalarının EM özellikleri, tek katmanlı yapılar için Yansıma Kaybı ve Geçirim Kaybı olarak, çok katmanlı yapılar için bunlara ek olarak Soğurma Yüzdesinin frekansa bağlı değişimi altında incelenmiştir. Şekil 4.30'da EM dalga yansıma kaybının, Şekil 4.31'de ise EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi grafikler yardımı ile görülebilir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere tek katmanlı yapılar için yansıma ve geçirim kayıpları uygulanan metalik film kalınlığı ile belirli bir düzen içerisinde değişmektedir. Kaplama kalınlığı arttıkça EM dalga yansıma kaybının arttığı ve EM dalga geçirim kaybının azaldığı açık bir şekilde görülmektedir. Altın metali ile yüzeyleri modifiye edilen cam elyaf dokumalarının yansıma kayıplarınının -3 dB ve -10 dB, geçirim kayıplarınının ise -2 dB ve -8 dB arasında değiştiği gözlemlenmiştir.



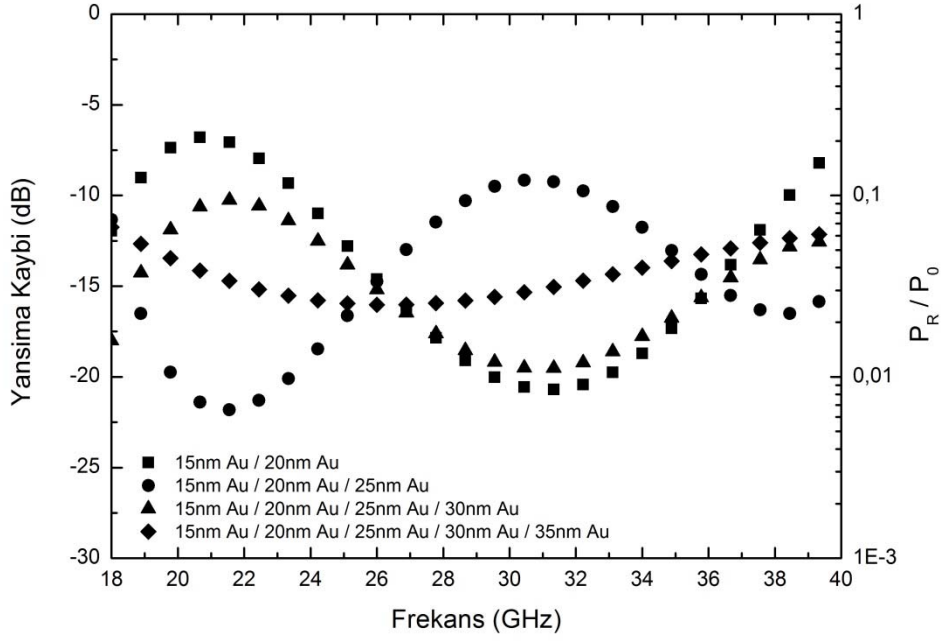
**Şekil 4.30.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.



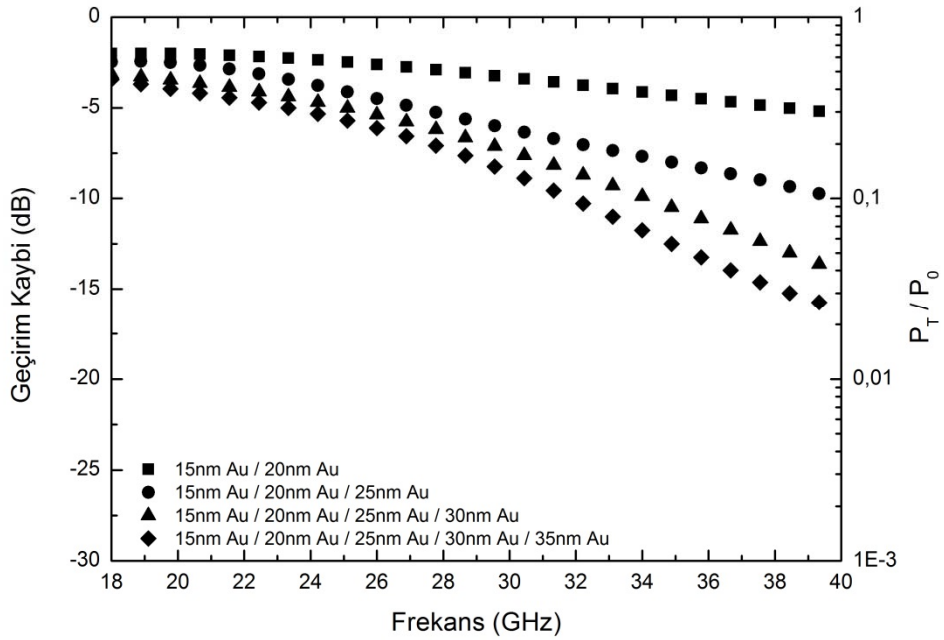
**Şekil 4.31.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.

Tek katmanlı cam elyaflara altın metalinin modifiye etkisi gümüş metali için olduğu gibi incelenmiş ve bu bilgiler ışığında çok katmanlı yapıların benzer özellikleri aşağıda açıklanmıştır. Yüzeyleri modifiye edilmiş katmanlar birbirleri ardına metalik kaplama kalınlık sırasına göre dizilmiş ve 4 adet, katman sayısı birbirinden farklı yapılar oluşturulmuştur. Şekil 4.32-34'te sırasıyla çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybı, geçirim kaybı ve soğurma yüzdesi değerleri görülebilir.

Şekil 4.32'de görüleceği üzere frekansa bağlı EM dalga yansıma değerleri belirli bir düzen içermemektedir. Katman sayısı arttıkça EM dalga yansıma değerleri belirtilen frekanslar arasında dalgalanmaktadır. Bu, daha önce gümüş metali ile modifiye edilen cam elyaf dokuma çok katmanlı yapılarda incelenmiş ve sebepleri belirtilen başlık altında açıklanmıştır. Çok katmanlı yapıların, EM dalga yansıma özelliklerinin -6 dB ve -20 dB arasında değiştiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.32). Benzer şekilde, çok katmanlı yapıların daha az EM dalga geçirimi yaptığı da yapılan çalışmalarla gösterilmiştir. Şekil 4.33'te görüleceği üzere çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim özellikleri -2 dB ve -15 dB arasında değişmektedir. Ayrıca, katman sayısı arttıkça EM dalga geçiriminin belirli bir düzen içerisinde azaldığı görülebilir. EM dalga yansıma ve geçirim özelliklerine bağlı olarak elde edilen EM dalga soğurma değerleri ise Şekil 4.34'te verilmiştir. Bu şekilden de anlaşılacağı üzere katman sayısı arttıkça EM dalga soğurma özellikleri artış göstermektedir. Çok katmanlı yapılar arasında beş katmanlı yapı 34 GHz üzerinde %90 gibi yüksek EM dalga soğurma göstermiştir. Bununla beraber, proje hedefleri arasında gösterilen %90 EM dalga soğurma değerlerine belli frekans aralığında altın metali ile yüzey modifikasyonu yapılarak da ulaşılmıştır.

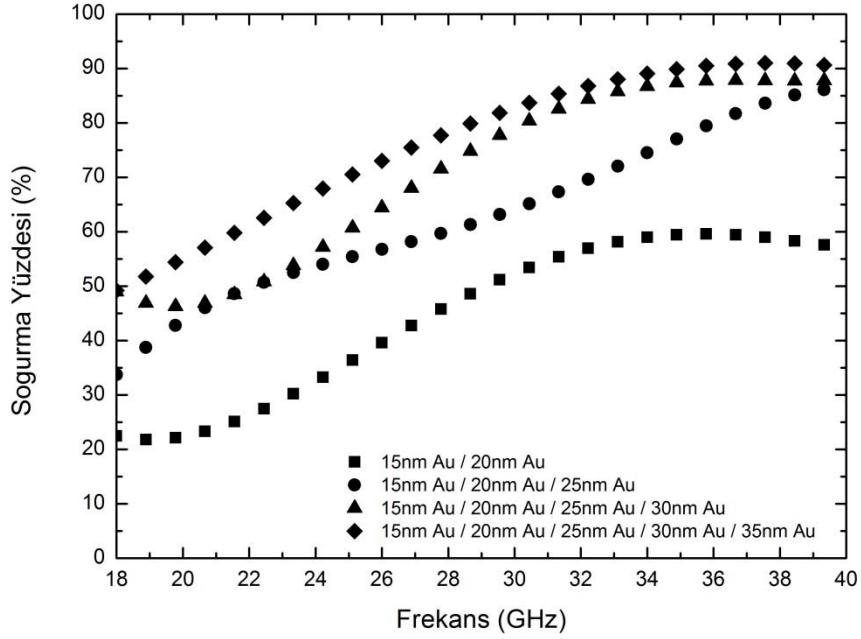


**Şekil 4.32.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.



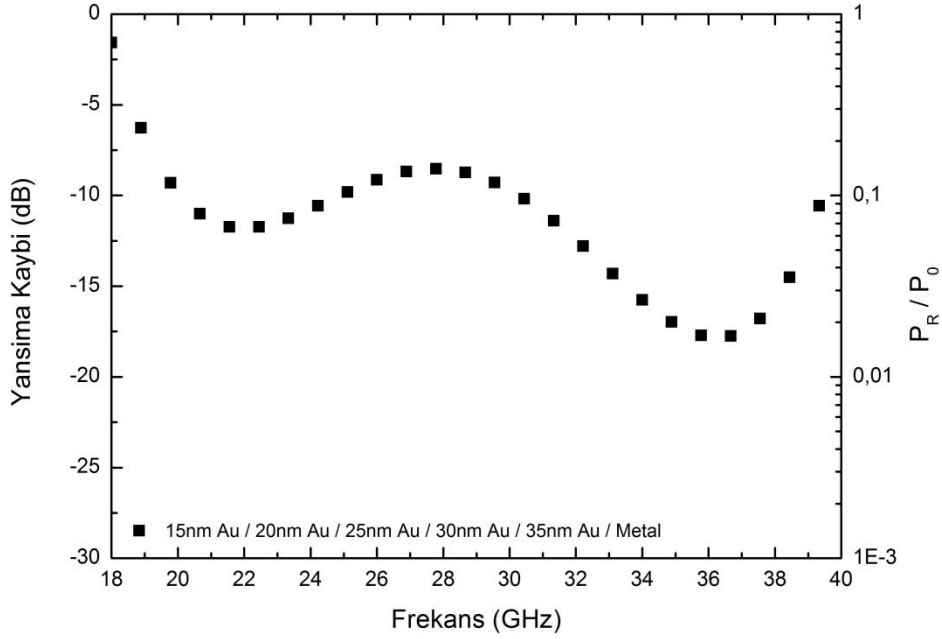
**Şekil 4.33.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.





**Şekil 4.34.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.

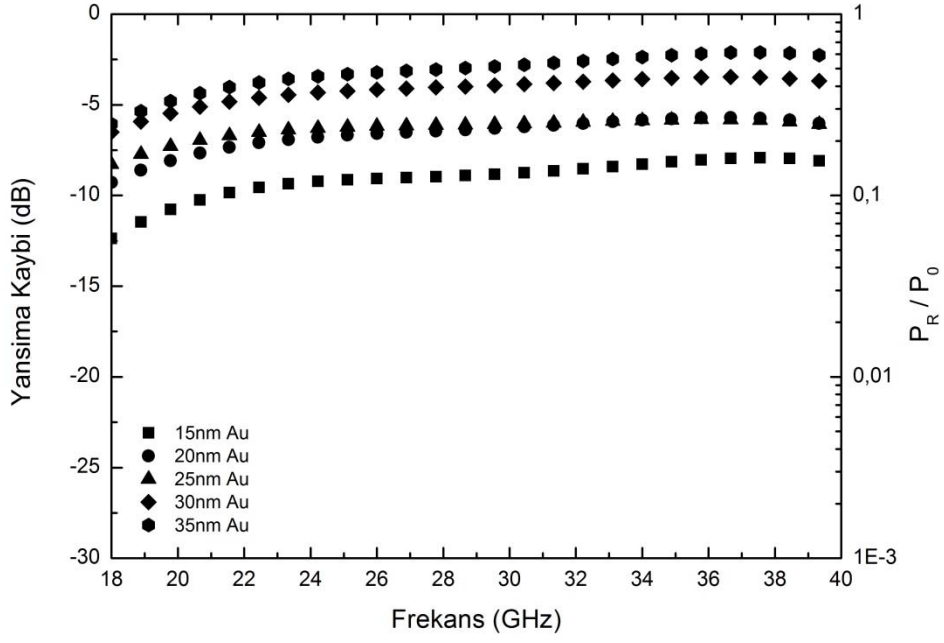
Altın metali ile yüzeyi modifiye edilen yapılar ile ilave bir çalışma daha yapılmıştır. En çok katman sayısına sahip beş katmanlı yapının arkasına tamamen yansıtıcı olarak metal plaka yerleştirilmiştir. Bununla amaçlanan, tamamen yansıma yapması beklenen metal plakadan önce EM dalga ile etkileşime giren çok katmanlı yapının tam yansımaya ne kadar değiştireceği sorusuna cevap aramaktır. Şekil 4.35'ten görüleceği üzere EM dalga yansıma değerleri -10 dB ve -20 dB arasında değişmektedir. Bu, ölçümü yapılan yapının üzerine gelen EM dalganın belirli frekans değerleri arasında yaklaşık %1 ile %10 gibi düşük değerler ile yansıma yaptığını göstermektedir.



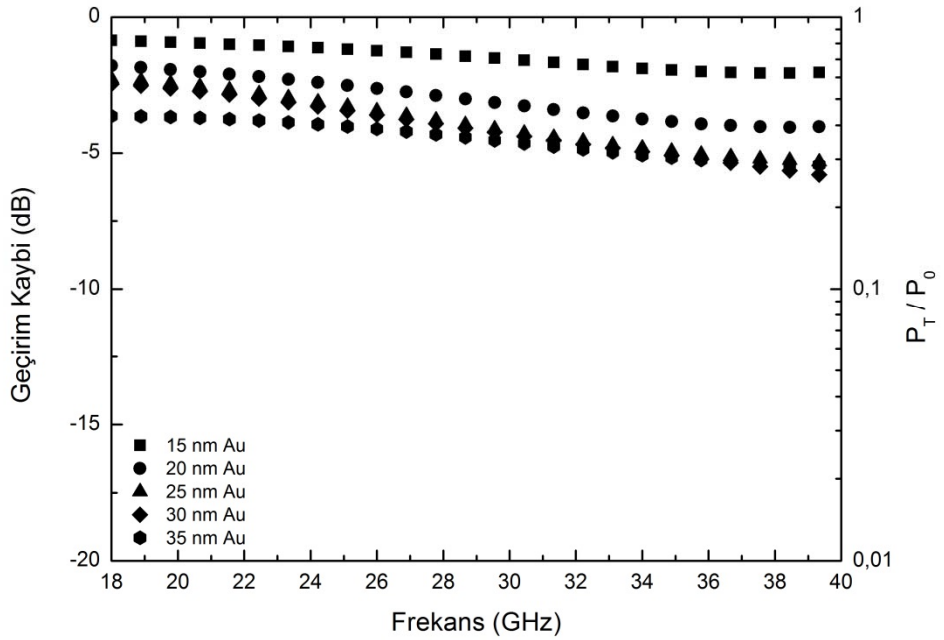
**Şekil 4.35.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapının arkasında metal altlık ile birlikte EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi.

*- Silanlamanın Altın Kaplama ile Yüzey Modifikasyonu Uygulanan Cam Elyaf Dokumalarının EM Dalga ile Etkileşimine Etkisi*

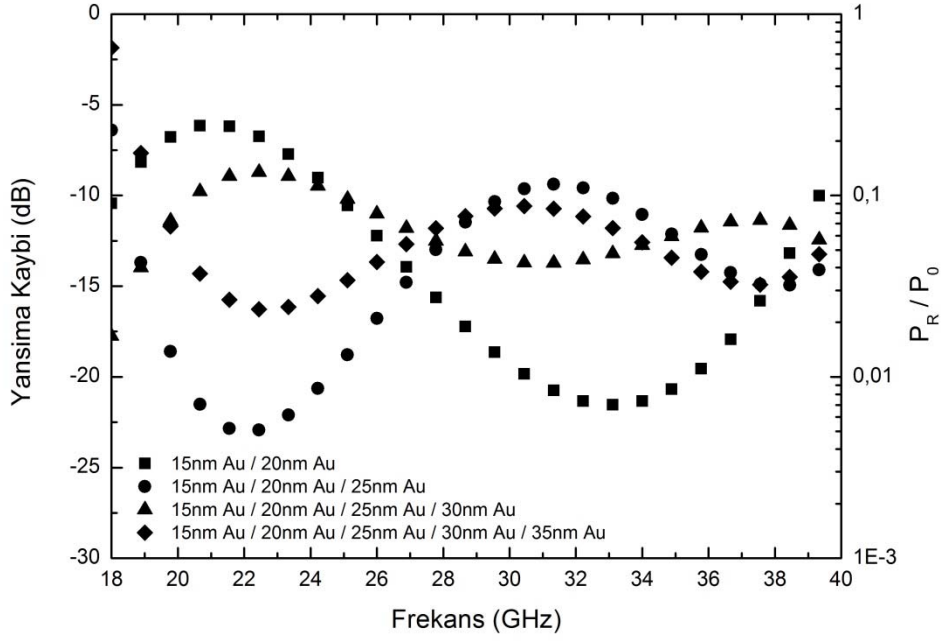
Yüzeyleri altın metali ile modifiye edilen cam elyaf dokumalara, kompozit yapımında mekanik özellikleri arttırmak için kullanılmak üzere silan uygulaması yapılmıştır. Silan daha önce bahsedildiği gibi yapıların en üst yüzeyi ile sadece kimyasal bağ kurmak için kullanılmıştır. Bu sebeple, silanlama uygulamasının EM dalga sonuçlarına direkt olarak etki etmesi beklenmemektedir. Ancak, yapıların yüzeylerine silanlama uygulandıktan sonra cam elyaf dokumalarda bazı geometrik değişimler gözlemlenmiştir. Silan uygulama metoduna bağlı olarak oluşan bu geometrik değişimlerin EM dalga ölçüm sonuçlarına etkileri aşağıda Şekil 4.36-41’de sunulan sonuçlarla incelenmiştir. Yüzeyleri altın metali ile modifiye edilen cam elyaf dokumaların silanlama uygulaması sonrası gösterdiği değişimler, Şekil 4.30-35 ve Şekil 4.36-41 sırasıyla karşılaştırılarak gözlemlenebilir. Daha önce tahmin edildiği üzere silanlama sonrası EM dalga özelliklerinde çok önemli değişiklikler gözlemlenmemiştir.



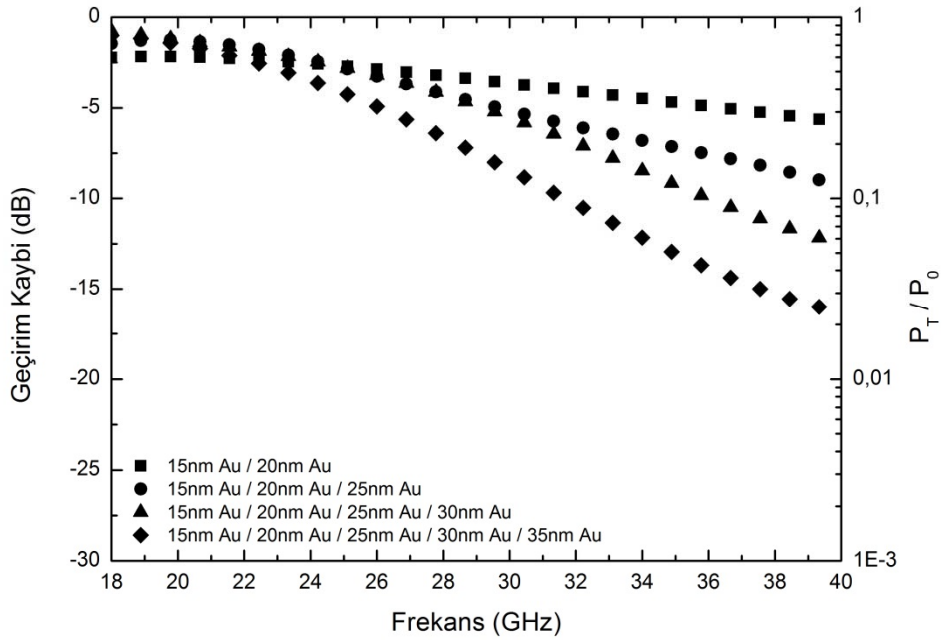
**Şekil 4.36.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.



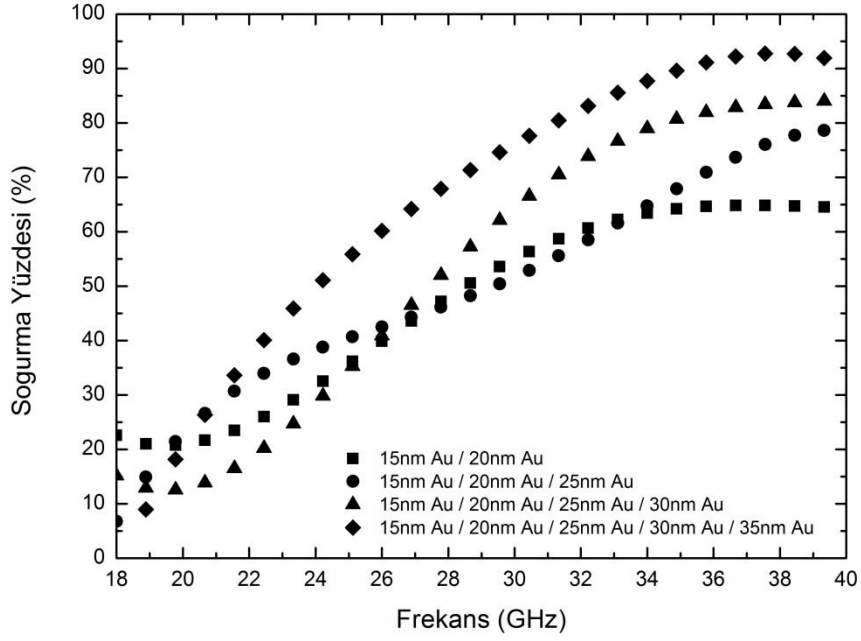
**Şekil 4.37.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.



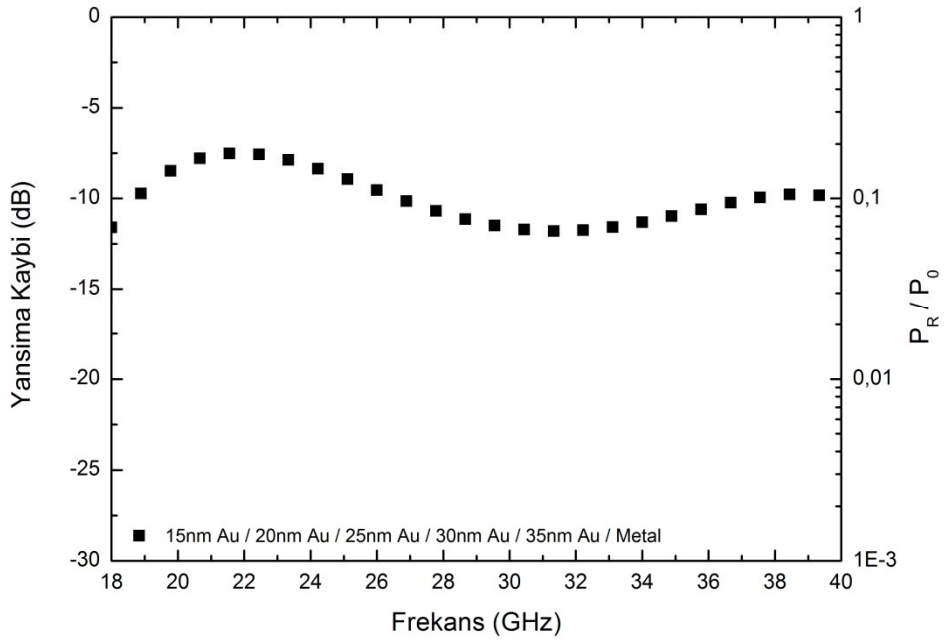
**Şekil 4.38.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.



**Şekil 4.39.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.



**Şekil 4.40.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.

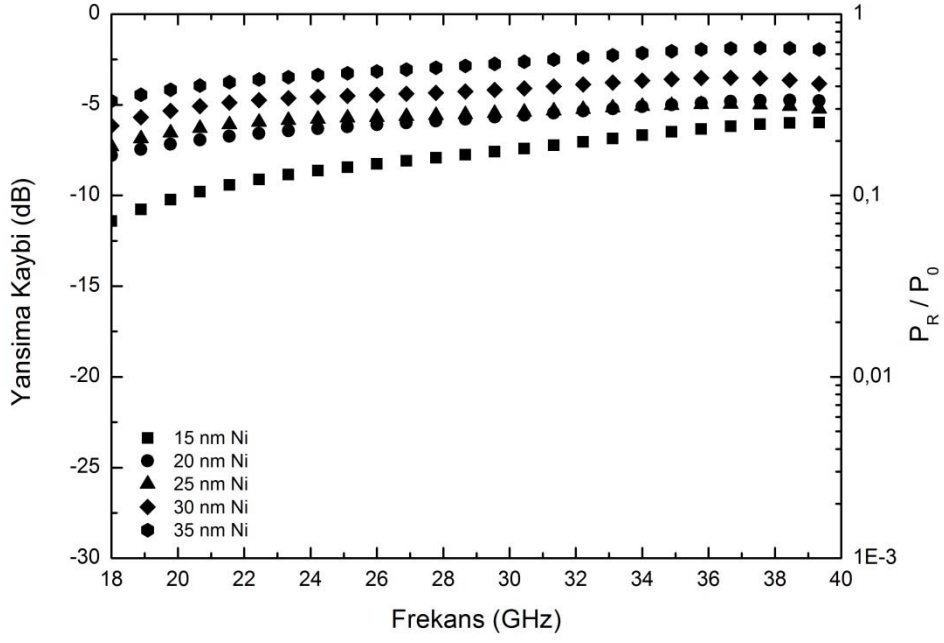


**Şekil 4.41.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma çok katmanlı yapının arkasında metal altlık ile birlikte EM dalga yansıtma kaybının frekans ile değişimi.

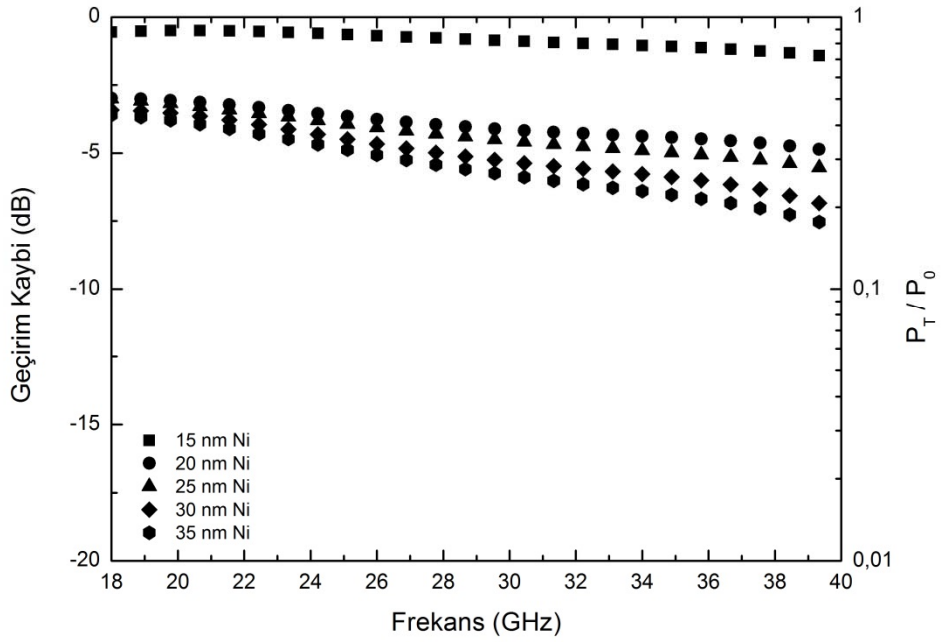
#### **4.3.1.3 Yüzeyi Nikel Metali ile Modifiye Edilmiş Cam Elyaf Dokumalarının Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları**

Yüzeyleri nikel metali ile 15, 20, 25, 30 ve 35nm kalınlıklarda modifiye edilen cam elyaf dokumalarının serbest uzay ölçüm tekniği ile EM özellikleri incelenmiştir. İlk olarak beş farklı kaplama kalınlığına sahip yapılar tek katmanlı olarak incelenmiş, daha sonra tek katmanlı yapılar film kalınlıkları sırasına göre birbirleri ardına sıralanarak çok katmanlı yapıların EM ölçümlerine devam edilmiştir. Bir sonraki adımda, metalik kaplama ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma katmanların yüzeylerine silanlama uygulanmış ve EM özellikleri yüzeylerinde silan varlığında incelenmiştir.

Yüzeyleri nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalarının EM özellikleri, tek katmanlı yapılar için Yansıma Kaybı ve Geçirim Kaybı olarak, çok katmanlı yapılar için ise bunlara ek olarak Soğurma Yüzdesinin frekansa bağlı değişimi altında incelenmiştir. Şekil 4.42'de EM dalga yansıma kaybının, Şekil 4.43'te ise EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi grafikler yardımı ile görülebilir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere tek katmanlı yapılar modifikasyon için uygulanan film kalınlığı ile belirli bir düzen içerisinde değişmektedir. Kaplama kalınlığı arttıkça EM dalga yansıma kaybının arttığı ve EM dalga geçirim kaybının azaldığı açık bir şekilde görülmektedir. Nikel metali ile yüzeyleri modifiye edilen cam elyaf dokumalarının yansıma kayıplarının -3 dB ve -12 dB, geçirim kayıplarının ise -1 dB ve -8 dB arasında değiştiği gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.42.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.

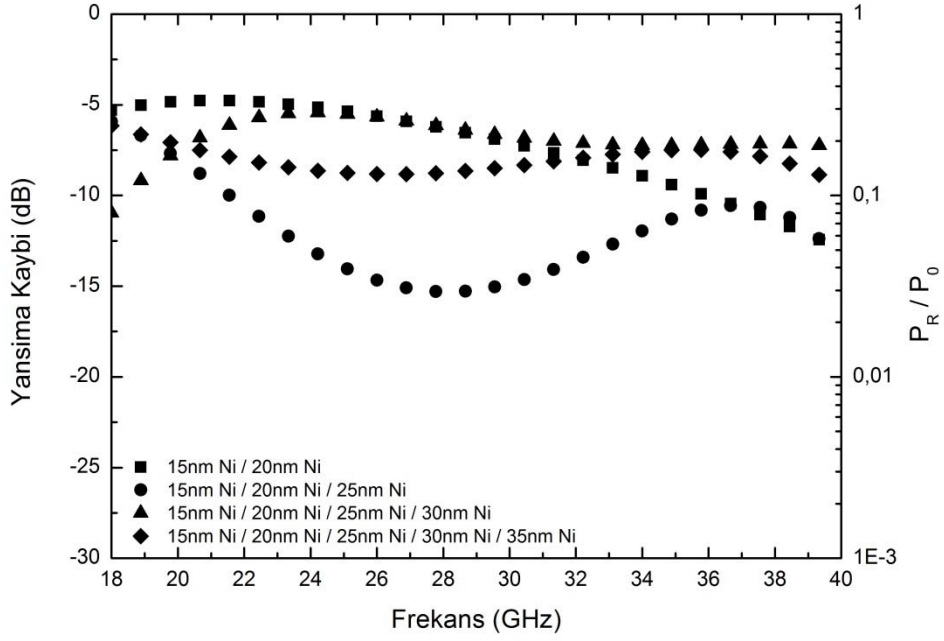


**Şekil 4.43.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.

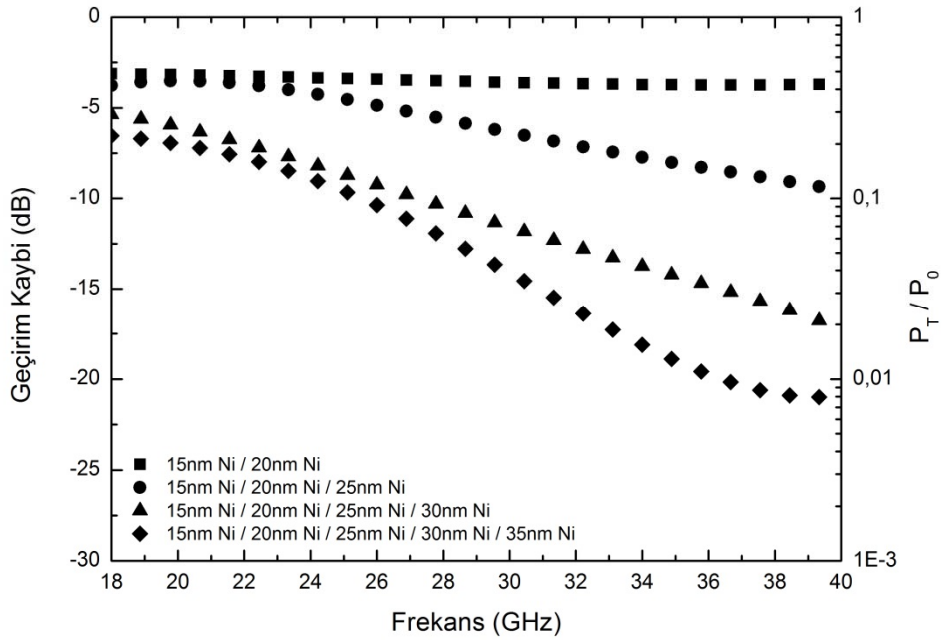
Tek katmanlı cam elyaflara nikel metalinin modifikasyon etkisi incelenmiş ve bu bilgiler ışığında çok katmanlı yapıların benzer özellikleri aşağıdaki şekiller yardımıyla irdelenmiştir. Nikel ile yüzey modifikasyonu uygulanan katmanlar birbirleri ardına nikel kaplama kalınlık sırasına göre dizilmiş ve 4 adet, katman sayısı birbirinden farklı çok katmanlı yapı oluşturulmuştur. Bu yapıların, Şekil 4.44-46'da sırasıyla EM dalga yansıma kaybı, geçirim kaybı ve soğurma yüzdesi değerleri görülebilir. Şekil 4.44'te görüleceği üzere frekansa bağlı EM dalga yansıma değerleri katman sayısına göre belirli bir düzen içermemektedir. Katman sayısı arttıkça EM dalga yansıma değerleri belirtilen frekanslar arasında dalgalanmaktadır. Benzer davranış daha önce gümüş metali ile modifiye edilen cam elyaf dokuma çok katmanlı yapılarda incelenmiş ve sebepleri belirtilen başlık altında açıklanmıştır.

Gümüş metali ile yüzeyleri modifiye edilen cam elyaf dokuma yapıların sonuçlarına benzeyen nikel metali modifiye etkileri sonucunda çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma özelliklerinin -4 dB ve -15 dB arasında değiştiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.44). Benzer şekilde, çok katmanlı yapıların tek katmanlı yapılara göre daha az EM dalga geçirimi yaptığı da yapılan çalışmalarla gösterilmiştir. Şekil 4.45'te görüleceği üzere çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim özellikleri -3 dB ve -20 dB arasında değişmektedir. Ayrıca, katman sayısı arttıkça EM dalga geçiriminin belirli bir düzen içerisinde azaldığı görülebilir. Bu, EM dalga yansıma ve geçirim özelliklerine bağlı olarak elde edilen EM dalga soğurma değerleri ise Şekil 4.46'da verilmiştir. Bu şekilden de anlaşılacağı üzere katman sayısı arttıkça EM dalga soğurma özellikleri artış göstermektedir. Çok katmanlı yapılar arasında beş katmanlı yapı %80 mertebesinde EM dalga soğurma göstermiştir.

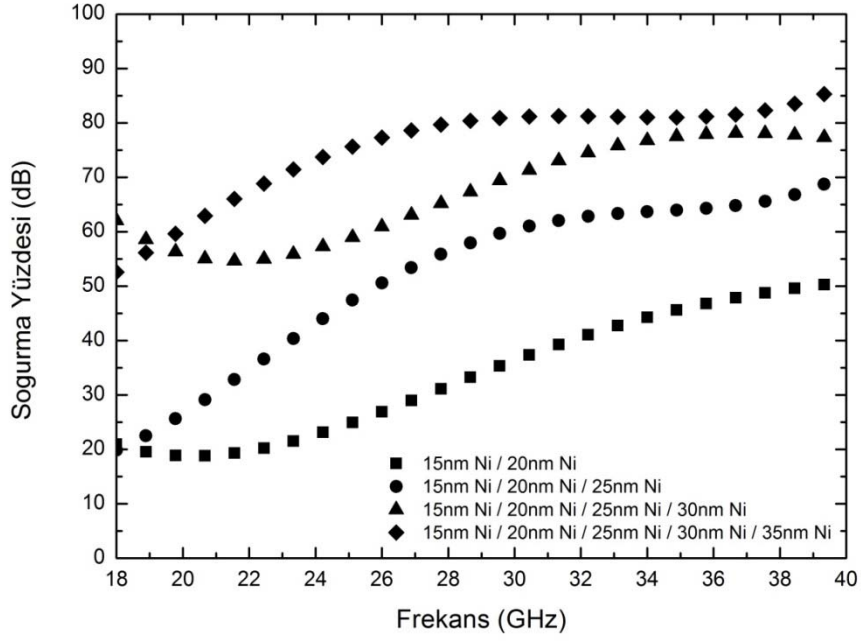




**Şekil 4.44.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.

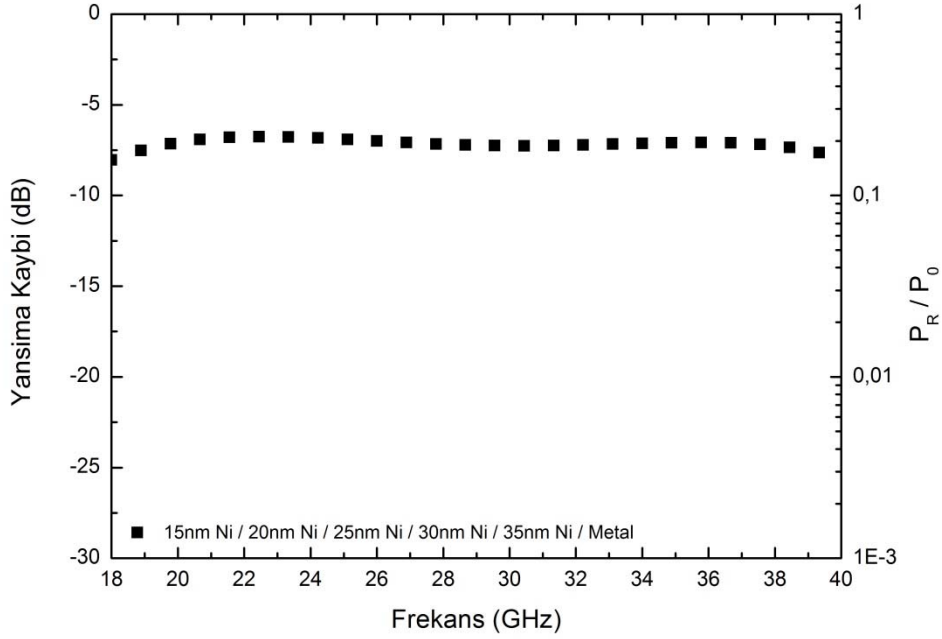


**Şekil 4.45.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.



**Şekil 4.46.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.

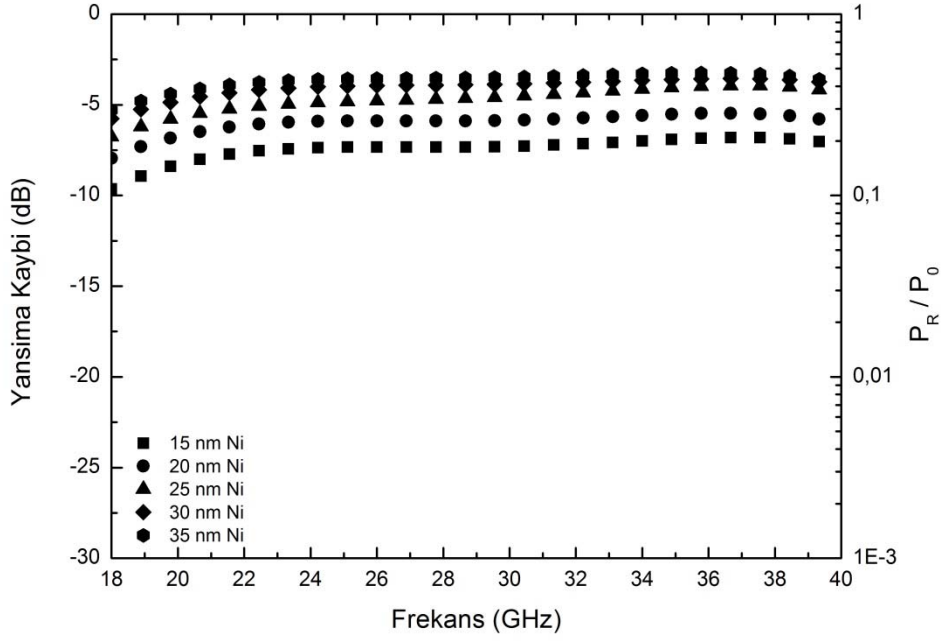
Nikel metali ile yüzeyi modifiye edilen çok katmanlı yapılar kullanılarak ilave bir çalışma daha yapılmıştır. En çok katman sayısına sahip beş katmanlı yapının arkasına tamamen yansıtıcı olarak metal plaka yerleştirilmiştir. Bununla amaçlanan, daha önce de değinildiği üzere tamamen yansıma yapması beklenen metal plakadan önce EM dalga ile etkileşime giren çok katmanlı yapının tam yansımayı ne kadar değiştireceği sorusuna cevap aramaktır. Şekil 4.47'den görüleceği üzere EM dalga yansıma değerleri yaklaşık -7 dB civarında değişmektedir. Bu, ölçümü yapılan yapının üzerine gelen EM dalgayı belirli frekans değerleri arasında yaklaşık %20 gibi düşük değerler ile yansıttığını göstermektedir.



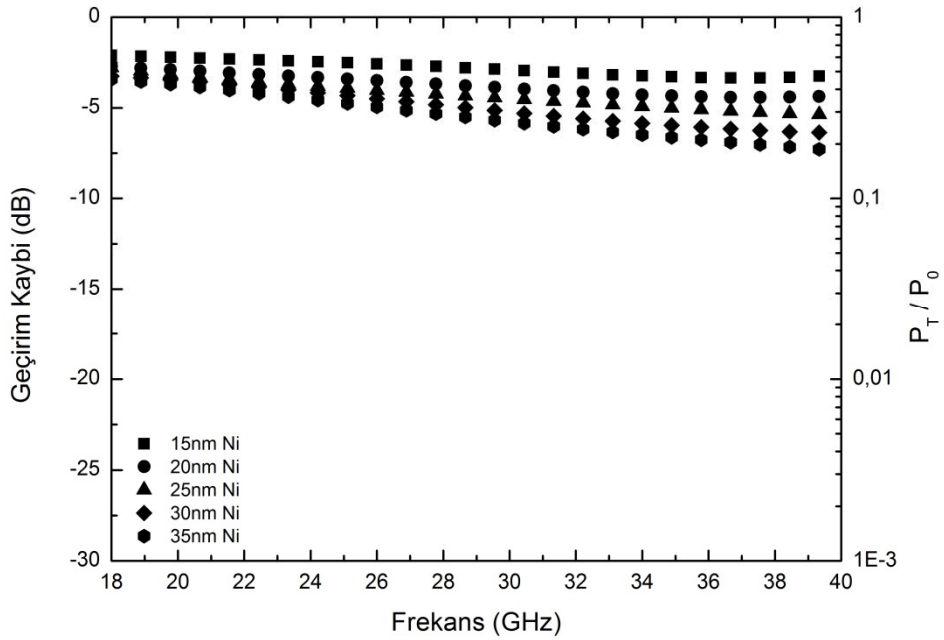
**Şekil 4.47.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapının arkasında metal altlık ile birlikte EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi.

*- Silanlamanın Nikel Kaplama ile Yüzey Modifikasyonu Uygulanan Cam Elyaf Dokumaların EM Dalga ile Etkileşimine Etkisi*

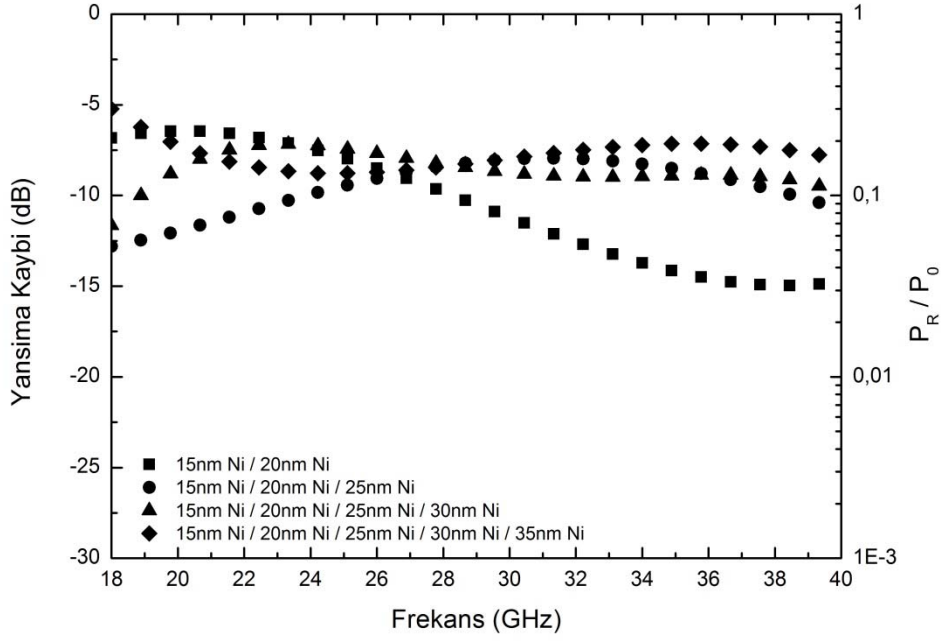
Yüzeyleri nikel metali ile modifiye edilen cam elyaf dokumalara, kompozit yapımında mekanik özellikleri arttırmak için kullanılmak üzere silan uygulaması yapılmıştır. Daha öne altın metali ile yapılan çalışmalarda görülen ve benzer değişiklikler gözlenen nikel metali modifiyeli cam elyaf dokumalar için de EM ile etkileşim belirleme çalışmaları yapılmıştır. Silanlama uygulaması ile elyaf dokuma yapısında ortaya çıkan benzer geometrik değişimlerin EM dalga ölçüm sonuçlarına etkileri aşağıda Şekil 4.48-53 arasında sunulmaktadır. Yüzeyleri nikel metali ile modifiye edilen cam elyaf dokumaların silanlama uygulaması ile birlikte gösterdiği değişimler, Şekil 4.42-47 ve Şekil 4.48-53'te verilen grafiklerin sırayla karşılaştırılmasıyla gözlemlenebilir. Daha önce tahmin edildiği üzere silanlama ile EM dalga özellikleri açısından çok önemli değişiklikler gözlemlenmemiştir.



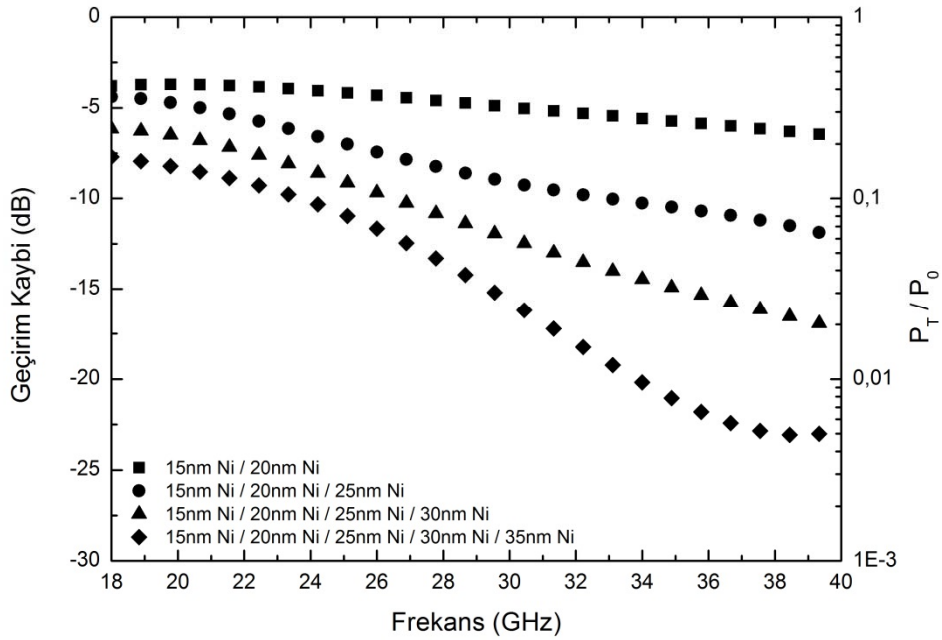
**Şekil 4.48.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.



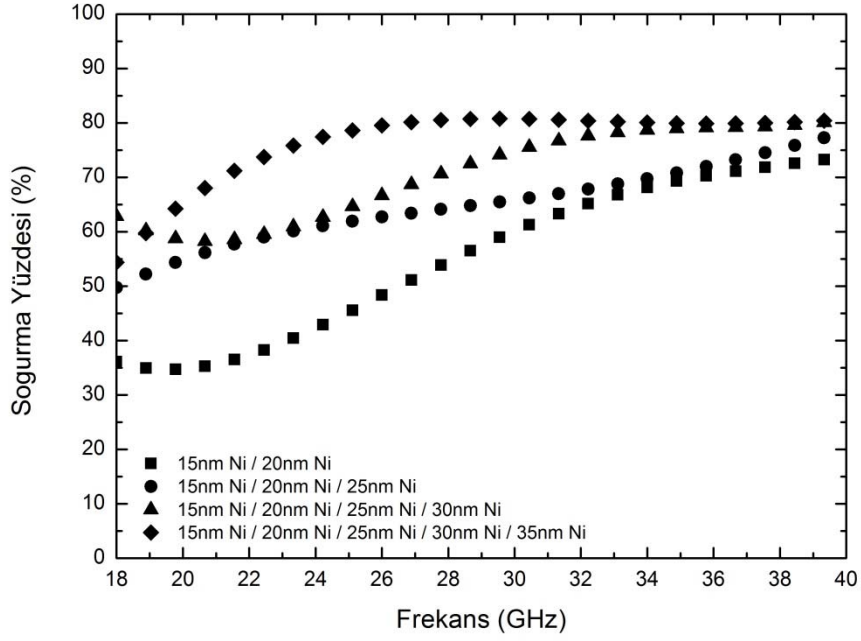
**Şekil 4.49.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.



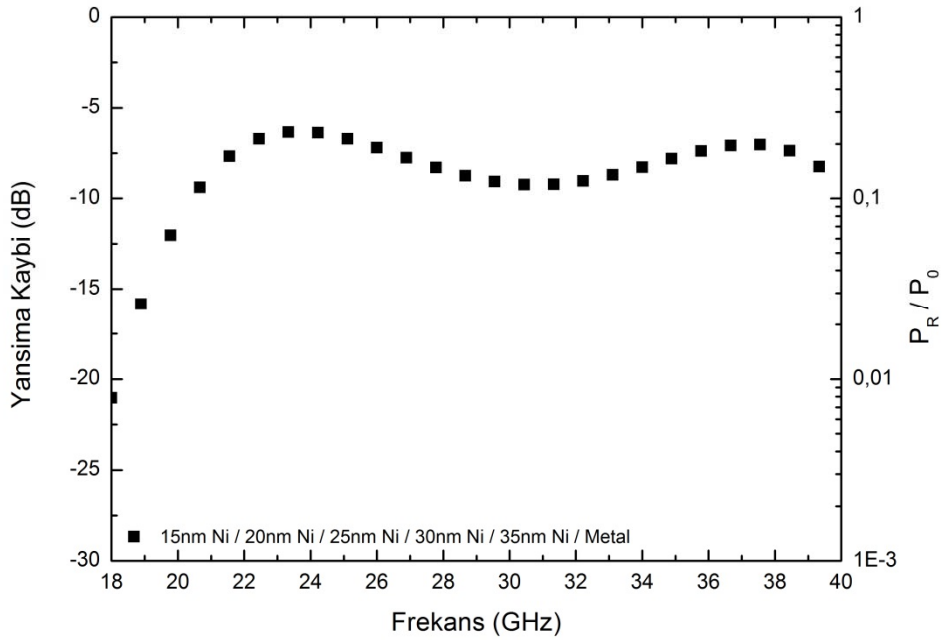
**Şekil 4.50.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.



**Şekil 4.51.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.



**Şekil 4.52.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.



**Şekil 4.53.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış cam elyaf dokuma çok katmanlı yapının arkasında metal altlık ile birlikte EM dalga yansıtma kaybının frekans ile değişimi.

#### **4.3.1.4 Yüzeyi Alüminyum Metali ile Modifiye Edilmiş Cam Elyaf Dokumaların Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları**

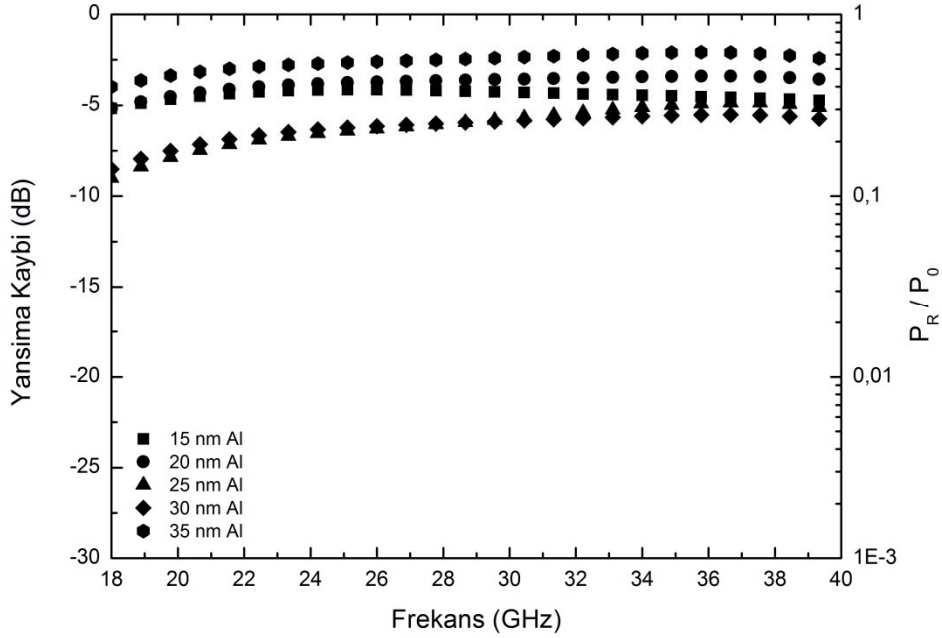
Yüzeyleri alüminyum metali ile 15, 20, 25, 30 ve 35nm kalınlıklarda modifiye edilen cam elyaf dokumaların serbest uzay ölçüm tekniği ile EM özellikleri incelenmiştir. İlk olarak beş farklı kaplama kalınlığına sahip yapılar tek katmanlı olarak incelenmiş, daha sonra tek katmanlı yapılar film kalınlıkları sırasına göre birbirleri ardına sıralanarak çok katmanlı yapılar oluşturularak EM ölçümlerine devam edilmiştir. Alüminyum metali ile elde edilen sonuçlar ışığında alüminyum metalinin proje hedefleri doğrultusunda uygun olmadığına karar verilmiş ve altın ile nikel metalleriyle modifiye edilen cam elyaflara uygulanan silanlama işlemi yüzeyleri alüminyum ile modifiye edilen cam elyaf dokumalara yapılmamıştır.

Yüzeyleri alüminyum metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumaların EM özellikleri, tek katmanlı yapılar için Yansıma Kaybı ve Geçirim Kaybı olarak, çok katmanlı yapılar için bunlara ek olarak Soğurma Yüzdesinin frekansa bağlı değişimi altında incelenmiştir. Şekil 4.54'te EM dalga yansıma kaybının, Şekil 4.55'te ise EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi görülebilir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma ve geçirim davranışı modifiye için uygulanan film kalınlığı ile belirli bir düzen içerisinde değişmemektedir. Bu alüminyum metalinin cam elyaf yüzeylere istenilen kalınlıklarda kaplanamadığını göstermektedir. Bunun sebebi, alüminyum metalinin Isıl Buharlaştırma tekniği ile kaplanmasında yaşanan zorluklardır.

Alüminyum normal şartlar altında özellikle diğer metallere göre çok çabuk oksitlenen bir metaldir. Alüminyum metalinin oksitlenme yaşanmadan cam elyaf yüzeylere kaplanabilmesi, ısı buharlaştırma tekniği için kullanılan vakum haznesi içinde çok düşük basınç değerlerine inilmesi ile mümkündür. Isıl Buharlaştırma tekniği ile kaplama yapılırken yüksek sıcaklıklara ulaşılmakta ve bu oksitlenmenin oluşmasını hızlandırmaktadır. Bu sebeple, sadece düşük basınç değerlerine inilmesi yeterli olmamakta ve kaplamanın hızlı bir biçimde yapılması da gerekmektedir. Proje kapsamında hizmet alımı şeklinde yapılan metalik kaplamaların uygulandığı cihaz aynı anda bu standartları oluşturmakta güçlük çekmektedir. Alüminyum metalik kaplaması uygulanırken kullanılan vakum odası basıncı  $4 \times 10^{-7}$  torr ve kaplama hızı 6.30 Å/s olarak tutulmuştur. Oksitlenme yaşanmaması için oluşturulan bu parametreler ile kaplama kalınlığının istenilen değerlere ulaşamadığı yapılan EM ölçümler sonucu ortaya çıkmıştır. EM ölçümlerde beklenen metalik film kalınlığı arttıkça yansıma kaybının artması ve geçirim kaybının azalması yönündedir.

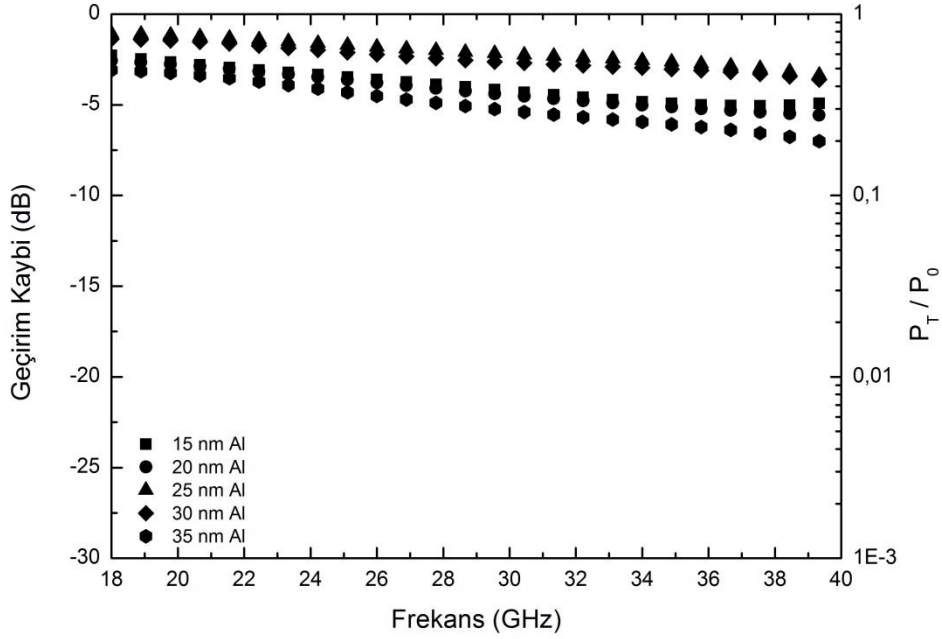
Şekil 4.54 ve Şekil 4.55'te sırasıyla yüzeyleri alüminyum metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumaların EM dalga yansıma ve geçirim kayıplarının frekans ile değişimi görülebilir. En ince

metalik film kalınlığına sahip yapının en çok geçirim ve an az yansıma yapması beklenirken, şekillerden de anlaşılacağı üzere bu durum yapılan çalışmada gözlemlenememiştir. Benzer şekilde, diğer farklı metalik film kalınlıklarına sahip yapılar beklenen sıralama içerisinde EM etkileşim sonuçları vermemiştir. Bu, metalik film kaplamaların istenilen kalınlıklarda olmadığını kanıtlamaktadır. Proje kapsamında oluşturulabilecek en uygun koşullara rağmen istenilen film kalınlıklarına ulaşılamaması ve normal şartlar altında çabuk oksitlenen bir metal olması, alüminyum metalinin proje için belirtilen hedefler bakımından uygun olmadığını göstermiştir. Buna rağmen, alüminyum metali ile modifiye edilen cam elyaf dokumalar için EM ölçümleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar tek katmanlı yapılar için Şekil 4.54-55'te, çok katmanlı yapılar için ise Şekil 4.56-58'de sunulmuştur.



**Şekil 4.54.** Yüzeyi alüminyum metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.



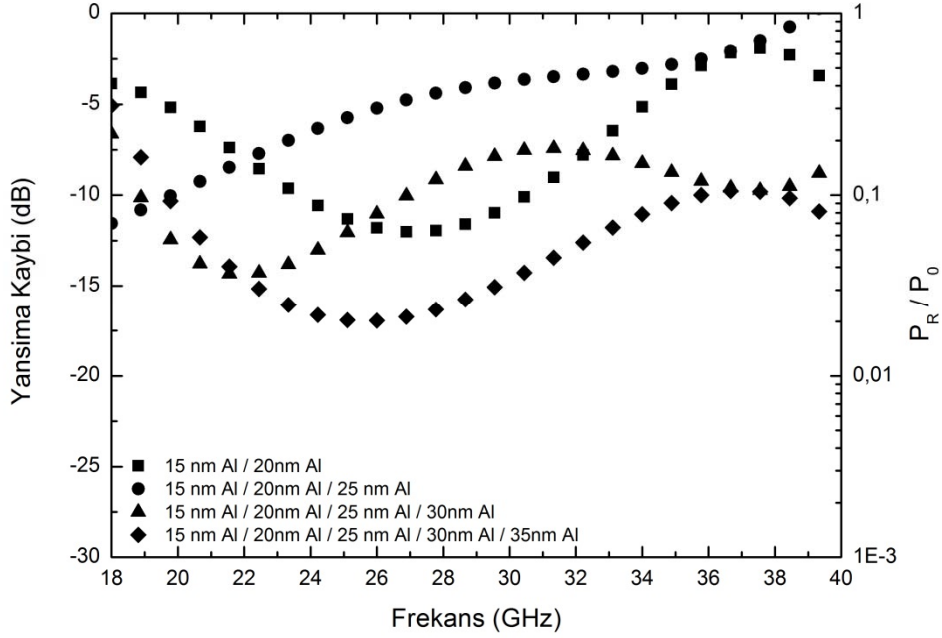


**Şekil 4.55.** Yüzeyi alüminyum metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.

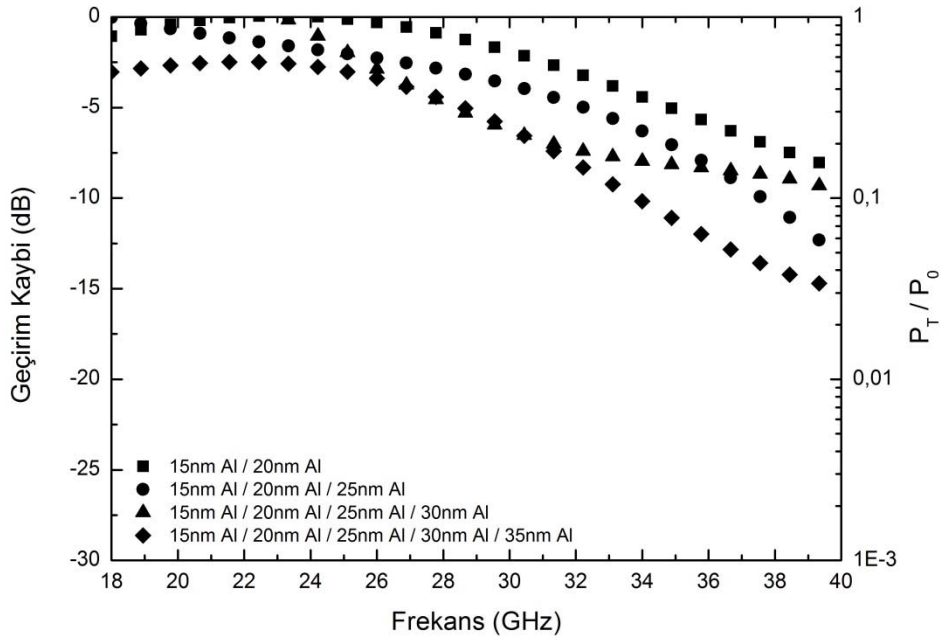
Alüminyum metali ile yüzeyleri modifiye edilen cam elyaf dokuma çok katmanlı yapılar, metalik film kaplamaların olması düşünülen film kalınlıklarına göre sıraya dizilerek oluşturulmuştur. Bu çalışma, beklenen EM dalga ile etkileşim sonuçlarının (katman sayısı arttıkça EM dalga geçirimi azalması) elde edilemeyeceği önceden tahmin edilerek yapılmıştır. Bu çalışma ile amaçlanan, projede belirtilen pratik uygulamalar ile elde edilecek kompozitlerin EM dalga soğurma bakımından başarıya ulaşip ulaşamayacağını göstermektir.

Şekil 4.56'da EM dalga yansımaya kaybı gösterilen alüminyum yüzey modifiyeli çok katmanlı yapılar, daha önce diğer metaller ile yapılan çalışmalarda olduğu gibi dalgalanan ve katman sayısı artışına göre belirli düzen içerisinde olmayan sonuçlar vermiştir. Benzer biçimde Şekil 4.57'de ise EM dalga geçirim kaybı incelenmiştir. Katman sayısı arttıkça azalması beklenen EM dalga geçiriminin, belirli bir düzen içinde azalmadığı görülmektedir. Bunun sebebi, daha önce bahsedildiği üzere tek katmanlı yapılarda metalik film kaplama kalınlığının istenildiği gibi oluşturulamamasıdır. Ancak, Şekil 4.58'da sunulan EM dalga soğurma yüzdesi incelendiğinde katman sayısı artışına uygun sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Alüminyum metali ile yüzeyleri modifiye edilen cam elyaf dokumalar, diğer EM ölçümlerinde istenmeyen sonuçlar vermesine rağmen, çok katmanlı yapılar için en çok %75 EM dalga soğurma yüzdesi elde edilmiştir. Her ne kadar bu, projede belirtilen EM dalga soğurucu kompozit yapıyı için uygulanan farklı

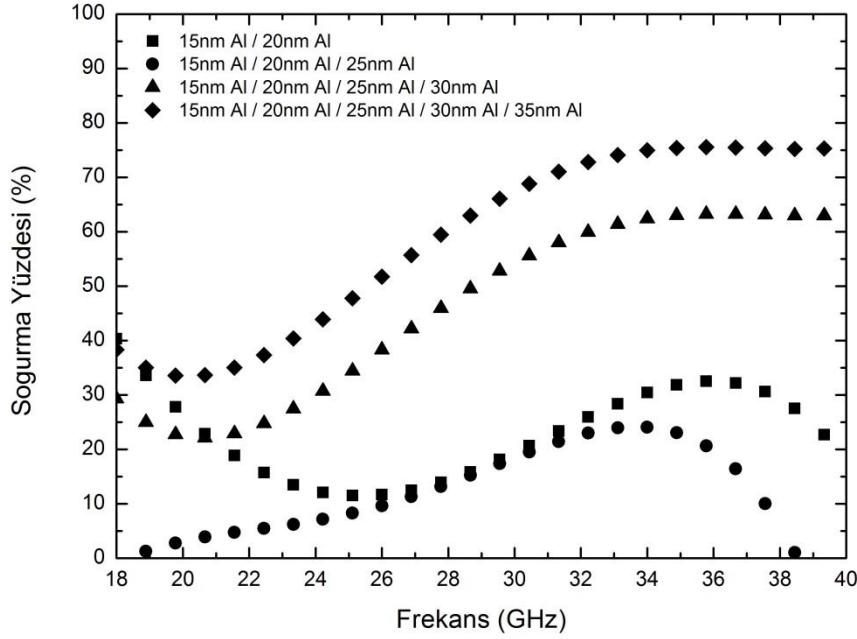
yaklaşımın EM dalga soğurma bakımından olumlu sonuçlar verdiğini gösterse de, elde edilen sonuçlar alüminyum metali ile yüzey modifikasyonunun proje kapsamında belirtilen EM dalga soğurucu kompozitler için pratik bir uygulamaya sahip olmadığını ortaya koymaktadır.



**Şekil 4.56.** Yüzeyi alüminyum metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.



**Şekil 4.57.** Yüzeyi alüminyum metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.



**Şekil 4.58.** Yüzeyi alüminyum metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.

#### 4.3.2 Yüzeyi Metalik Kaplamalar ile Modifiye Edilmiş Aramid Elyaf Dokumaların Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları

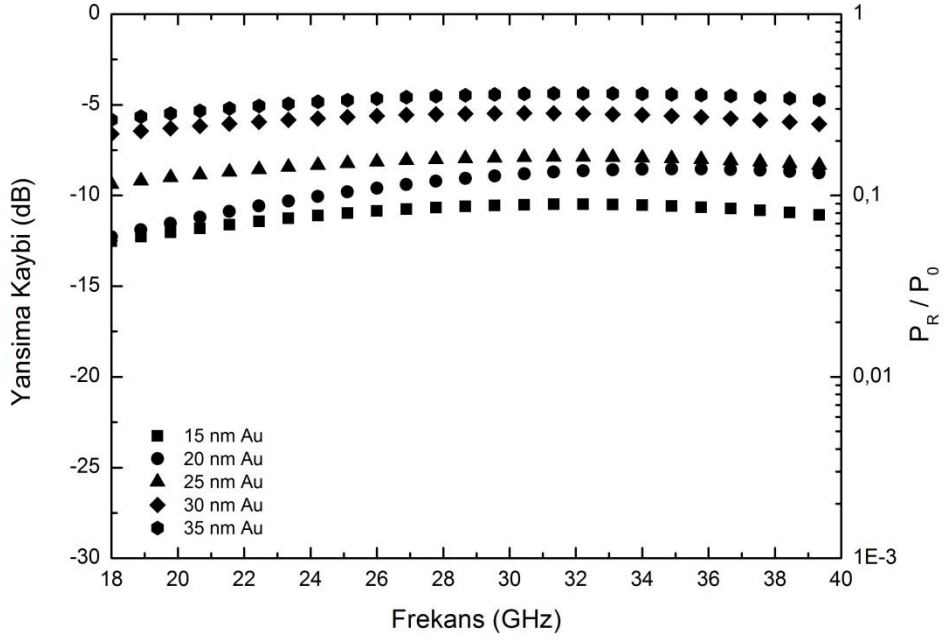
Proje kapsamında belirtildiği üzere cam elyaf dokumalarda olduğu gibi aramid elyaf dokumalar da metalik kaplamalar ile modifiye edilmiş ve oluşturulan yapıların elektromanyetik dalga yansıma, geçirim ve bunlara bağlı olarak soğurma özellikleri incelenmiştir. Yüzeyi sırasıyla altın ve nikel metalleri ile modifiye edilen aramid elyaf dokumaların elektromanyetik ölçüm özellikleri aşağıdaki başlıklar altında incelenmiştir. Yüzeyleri gümüş ve alüminyum metalleri ile modifiye edilen cam elyaf dokumaların istenilen EM özellikleri vermemesi dolayısı ile bu metaller aramid elyaf dokumalar üzerinde kullanılmamıştır. İki farklı metal ile modifiye edilen yapıların EM dalga yansıma, geçirim ve soğurma özellikleri, bu yapılar tek katmanlı, çok katmanlı, silan uygulaması yapılmış ve yapılmamış olarak gruplandırılarak incelenmiş ve aşağıdaki şekillerde sunulmuştur. Tek katmanlı yapılarda sadece EM dalga yansıma ve geçirim özellikleri karşılaştırılmış; ancak, soğurma özellikleri karşılaştırılmamıştır. Bunun sebebi daha öncede bahsedildiği üzere, tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma veya geçirim özelliklerinden sadece bir tanesinin baskın olarak gözlemlenmesinden kaynaklanmaktadır. EM

dalga soğurma, yansıma ve geçirim özelliklerinin ortak sonucu olması sebebi ile sadece bir özelliğin baskın olması EM dalga soğurma özelliklerinin karşılaştırılmasını anlamsız kılmaktadır. Metalik yüzey modifikasyonu uygulanan tek katmanlı aramid elyaf dokumalarının artarda eklenmesi ile elde edilen çok katmanlı yapılarda ise EM dalga yansıma ve geçirim özellikleri aynı anda gelişmekte ve baskın olmaya başlamakta ve dolayısıyla bu, EM dalga soğurma özelliklerini karşılaştırmayı çok katmanlı yapılar için anlamlı hale getirmektedir.

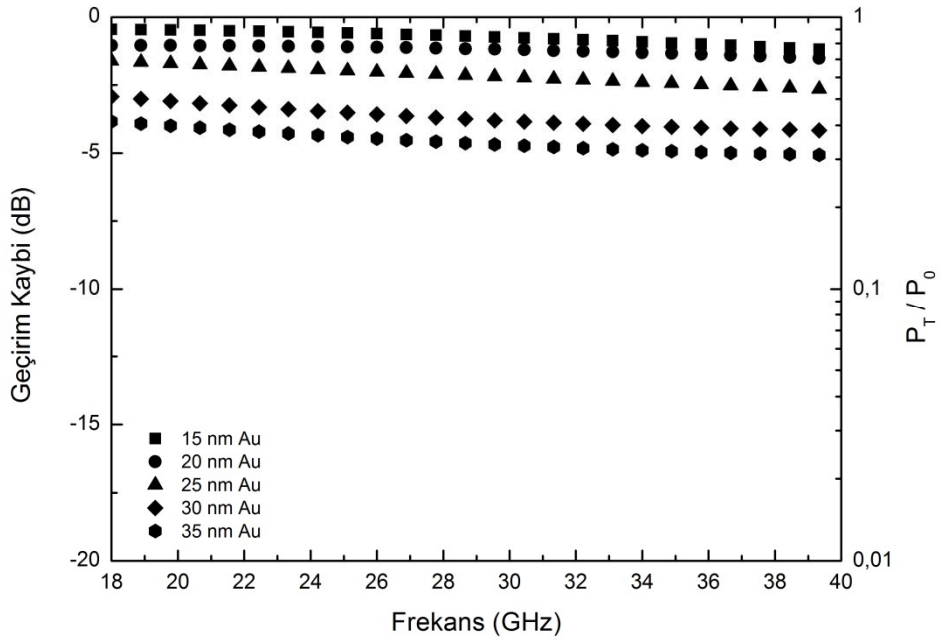
#### ***4.3.2.1 Yüzeyi Altın Metali ile Modifiye Edilmiş Aramid Elyaf Dokumalarının Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları***

Yüzeyleri altın metali ile 15, 20, 25, 30 ve 35nm kalınlıklarda modifiye edilen aramid elyaf dokumalarının serbest uzay ölçüm tekniği ile EM özellikleri incelenmiştir. İlk olarak beş farklı kaplama kalınlığına sahip yapılar tek katmanlı olarak incelenmiş, daha sonra yüzey modifikasyonlu tek katmanlı yapılar artan film kalınlığı sırasına göre birbirleri ardına sıralanarak çok katmanlı yapılar üzerinde EM ölçümlerine devam edilmiştir. Bir sonraki adımda, metalik yüzey modifikasyonlu bu dokumaların yüzeylerine silanlama uygulanmış ve EM özellikleri yüzeylerinde silan varlığında incelenmiştir.

Yüzeyleri altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalarının EM özellikleri, tek katmanlı yapılar için Yansıma Kaybı ve Geçirim Kaybı olarak, çok katmanlı yapılar için bunlara ek olarak Soğurma Yüzdesinin frekansa bağlı değişimi altında incelenmiştir. Şekil 4.59'da EM dalga yansıma kaybının, Şekil 4.60'da ise EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi grafikler yardımı ile görülebilir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma ve geçirim değerleri modifikasyon için uygulanan film kalınlığı ile belirli bir düzen içerisinde değişmektedir. Kaplama kalınlığı arttıkça EM dalga yansıma kaybının arttığı ve EM dalga geçirim kaybının azaldığı açık bir şekilde görülmektedir. Altın metali ile yüzeyleri modifiye edilen tek katmanlı aramid elyaf dokumalarının yansıma kaybı -5 dB ve -13 dB, geçirim kaybı ise -1 dB ve -5 dB arasında değişmektedir. Altın metali ve cam elyaflar ile yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında, yüzey modifikasyonu uygulanmış tek katmanlı aramid elyaf dokumalarının EM dalgaları daha az yansıttığı ancak daha çok geçirdiği tespit edilmiştir.



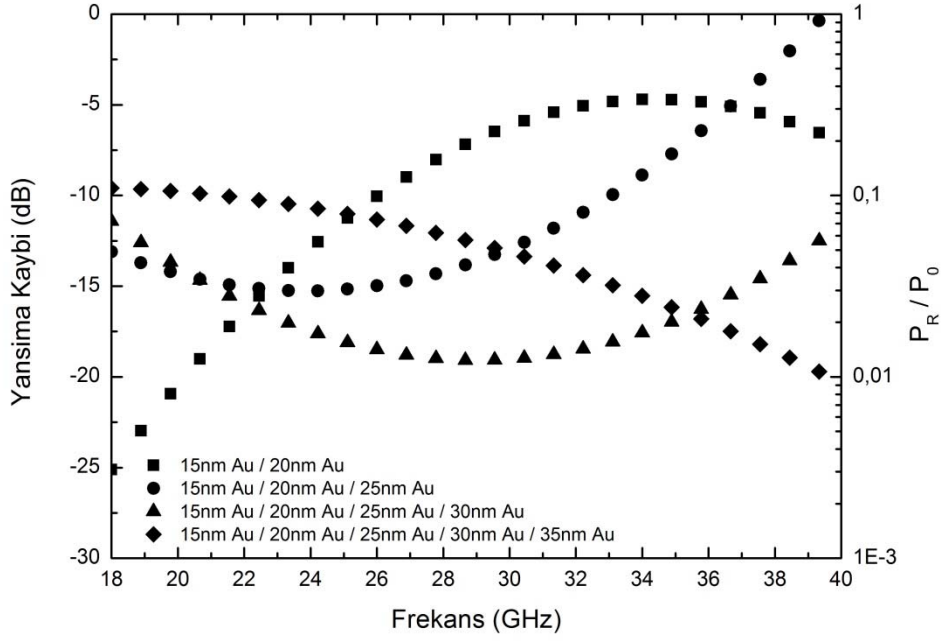
**Şekil 4.59.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.



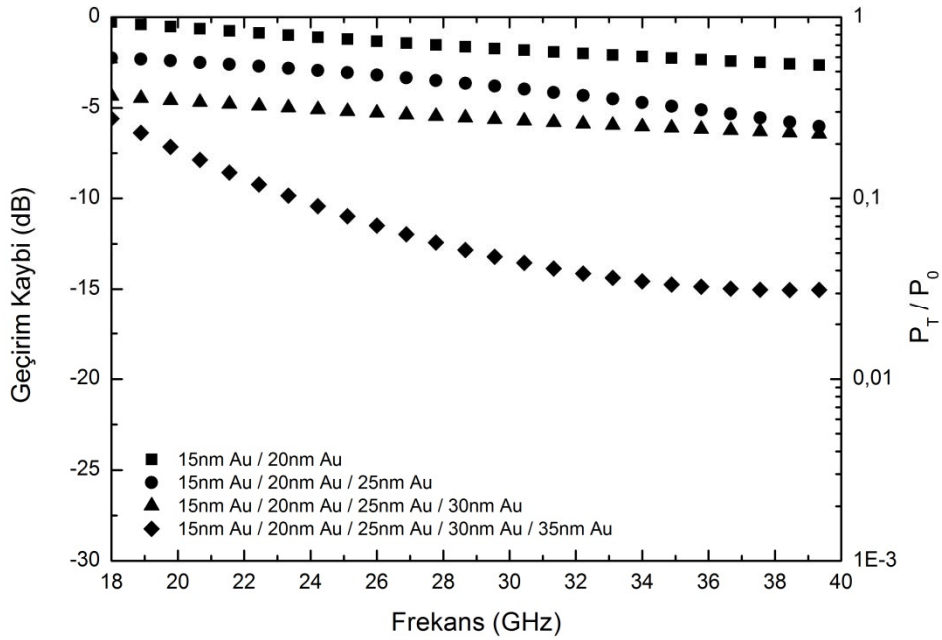
**Şekil 4.60.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.

Tek katmanlı aramid elyaflara altın kaplama ile uygulanan yüzey modifikasyonunun EM dalga ile olan etkileşime etkisi incelenmiş ve bu bilgiler ışığında çok katmanlı yapıların benzer özellikleri aşağıdaki grafiklerde irdelenmiştir. Katmanlar birbirleri ardına artan altın kaplama kalınlık sırasına göre dizilmiş ve 4 adet, katman sayısı birbirinden farklı yapı oluşturulmuştur. Bu çok katmanlı yapıların, Şekil 4.61-63'te sırasıyla EM dalga yansımaya kaybı, geçirim kaybı ve soğurma yüzdesi değerleri sunulmaktadır. Şekil 4.61'de görüleceği üzere frekansa bağlı EM dalga yansımaya değerleri belirli katman sayısı ile doğru bir orantı içermemektedir. Katman sayısı arttıkça EM dalga yansımaya değerleri belirtilen frekanslar arasında dalgalanmaktadır. Bu, daha önce gümüş metali ile modifiye edilen cam elyaf dokuma çok katmanlı yapılarda incelenmiş ve sebepleri belirtilen başlık altında anlatılmıştır. Altın metali ile yüzeyleri modifiye edilen cam elyaf dokuma yapıların sonuçlarına benzeyen aramid elyaf çok katmanlı yapıların özellikleri kapsamında, EM dalga yansımaya değerlerinin yaklaşık olarak -5 dB ve -20 dB arasında değiştiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.61).

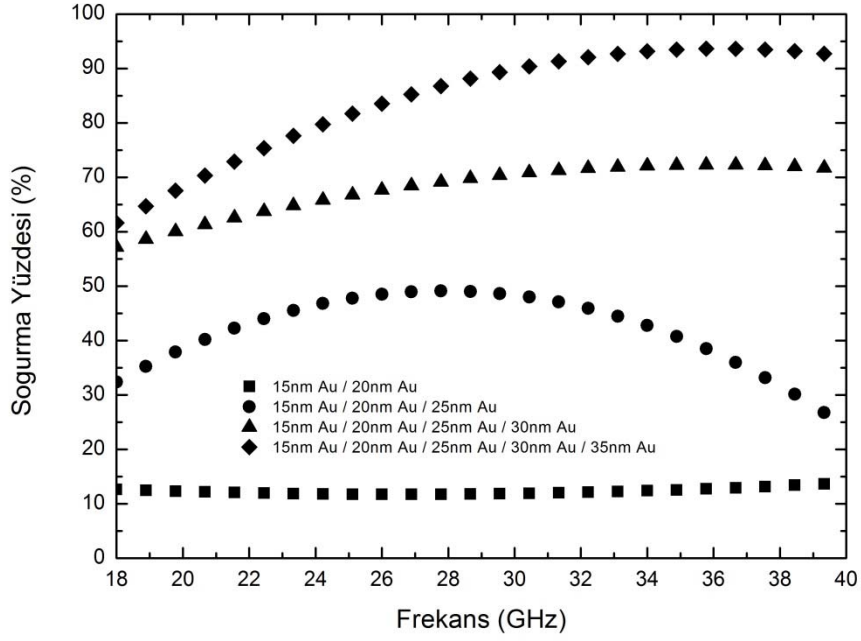
Benzer şekilde, çok katmanlı yapıların artan katman sayısı ile daha az EM dalga geçirimi yaptığı da gösterilmiştir. Şekil 4.62'de görüleceği üzere çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim özellikleri -1 dB ve -15 dB arasında değişmektedir. Ayrıca, katman sayısı arttıkça belirli bir düzen içerisinde EM dalga geçiriminin azaldığı görülmektedir. EM dalga yansımaya ve geçirim özelliklerine bağlı olarak elde edilen EM dalga soğurma değerleri ise Şekil 4.63'te verilmiştir. Bu şekilden de anlaşılacağı üzere katman sayısı arttıkça EM dalga soğurma özellikleri artış göstermiştir. Çok katmanlı yapılar arasında beş katmanlı yapı %95 gibi yüksek EM dalga soğurumu göstermiştir. Projede kapsamında hedef olarak belirtilen %90 EM dalga soğurumuna altın kaplama modifiyeli cam elyaf dokuma ile elde edilmiş, ancak aramid elyaf dokumanın altın kaplamayla uyumu ile bu hedefin üstüne çıkılmış ve daha geniş frekans aralığında hedefin üzerinde soğurma yüzdesi elde edilmiştir.



**Şekil 4.61.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.



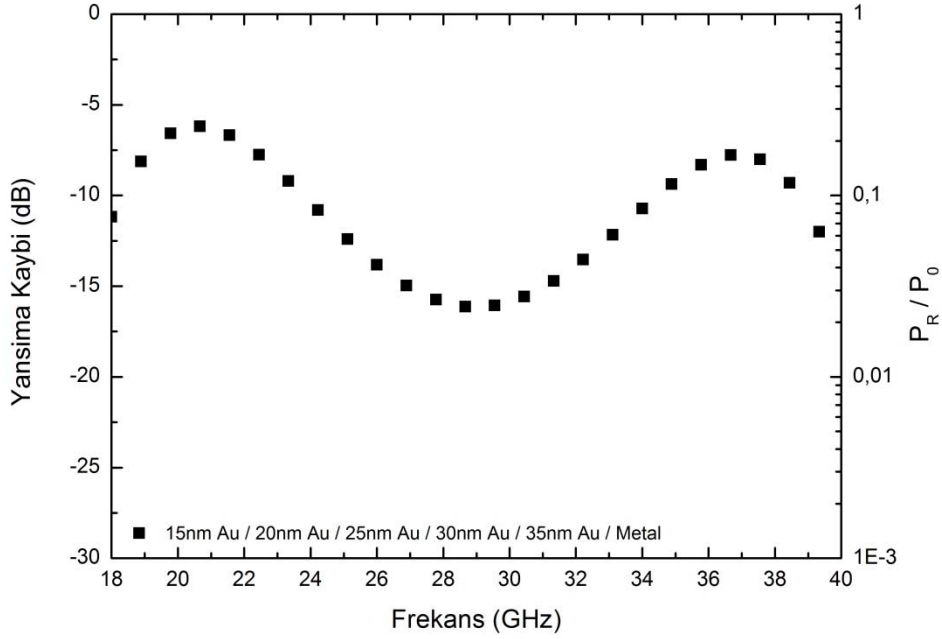
**Şekil 4.62.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.



**Şekil 4.63.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.

Altın metali ile yüzeyi modifiye edilen yapılar ile yapılan ilave çalışma kapsamında en çok katman sayısına sahip beş katmanlı yapının arkasına tamamen yansıtıcı olarak metal plaka yerleştirilmiştir. Bununla amaçlanan, tamamen yansıma yapması beklenen metal plakadan önce EM dalga ile etkileşime giren çok katmanlı aramid elyaf dokuma yapısının tam yansımayı ne kadar engelleyeceğini incelemektir. Şekil 4.64'ten görüleceği üzere EM dalga yansıma değerleri yaklaşık olarak -5 dB ve -15 dB arasında değişmektedir. Bu, ölçümü yapılan yapının üzerine gelen EM dalganın belirli frekans değerleri arasında yaklaşık olarak %2 ve %20 gibi düşük değerler arasında yansıma yaptığını göstermektedir.





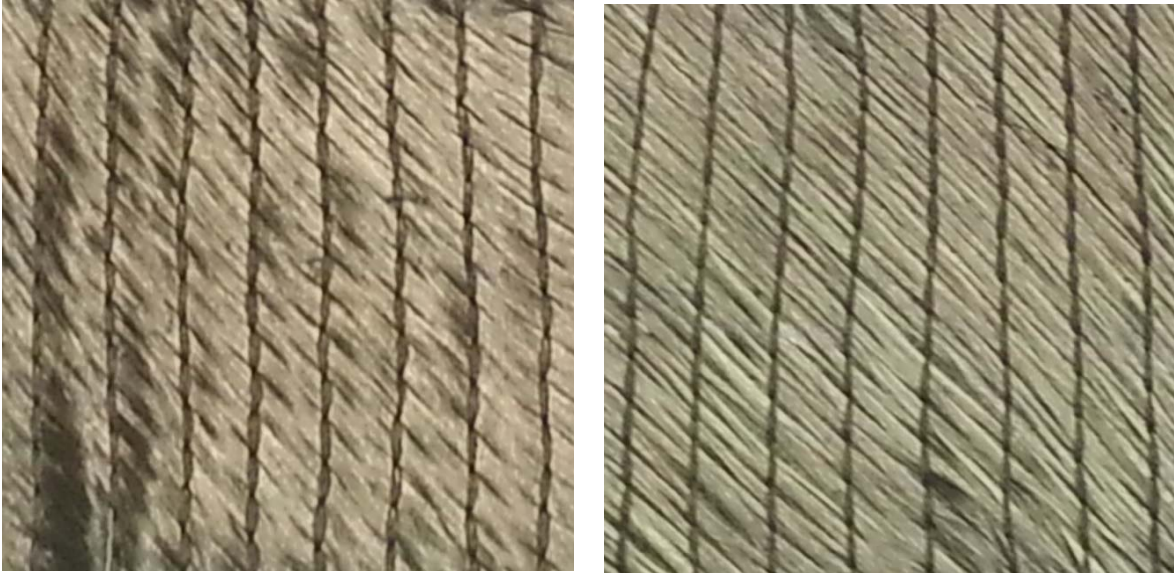
**Şekil 4.64.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapının arkasında metal altlık ile birlikte EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.

*- Silanlamanın Altın Kaplama ile Yüzey Modifikasyonu Uygulanan Aramid Elyaf Dokumalarının EM Dalga ile Etkileşimine Etkisi*

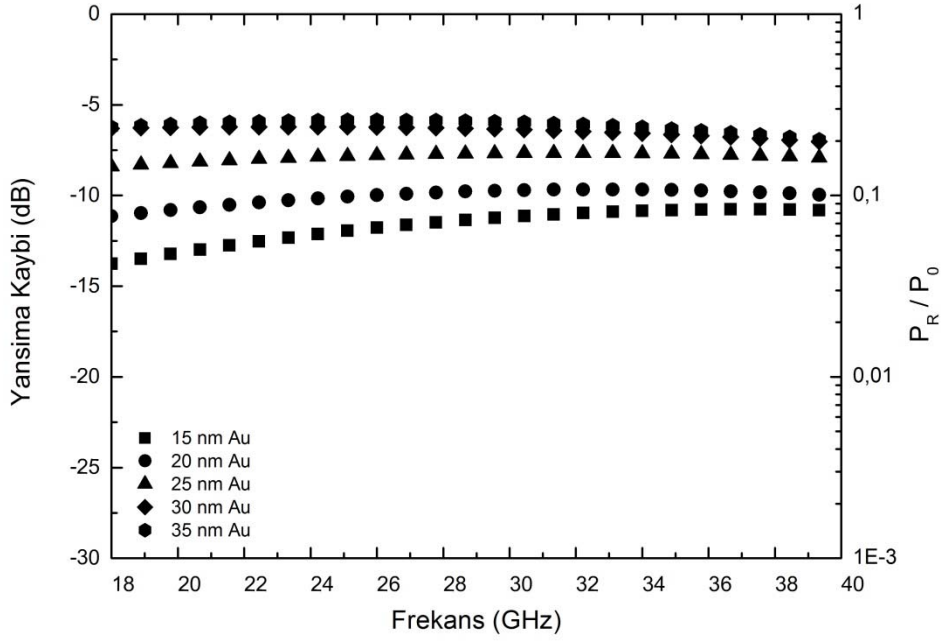
Yüzeyleri altın metali ile modifiye edilen aramid elyaf dokumalara, prototip kompozit yapımında mekanik özellikleri arttırmak için kullanılmak üzere silan uygulaması yapılmıştır. Daha önce altın metali ve cam elyaf dokumalar ile yapılan çalışmalarda görülen ve benzer değişimler gözlenen altın metali modifiyeli aramid elyaf dokumalar için de EM dalga ile etkileşim çalışmaları yapılmıştır. Yüzeyleri metalik kaplamalarla modifiye edilmiş cam elyaf dokumalarda silanlamanın etkisi çok daha az iken, metalik yüzey modifiyeli aramid elyaf dokumalara uygulanan silanlama işleminin EM özelliklere etkisi görece önemlidir.

Bu sebeple, silanlama işlemi sırasında elyaf dokuma yapısında ortaya çıkan geometrik değişimleri göstermek üzere Şekil 4.65'te yüzeyi altın ile modifiye edilmiş tek katmanlı aramid elyaf dokumanın silanlama işlemi öncesinde ve sonrasındaki yapısı gösterilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere, silanlama uygulamasıyla aramid elyaflardan oluşan lifler genişlemektedir. Bu geometrik değişimin EM dalga ile etkileşime olan etkileri aşağıda Şekil 4.66-71'de incelenmiştir.

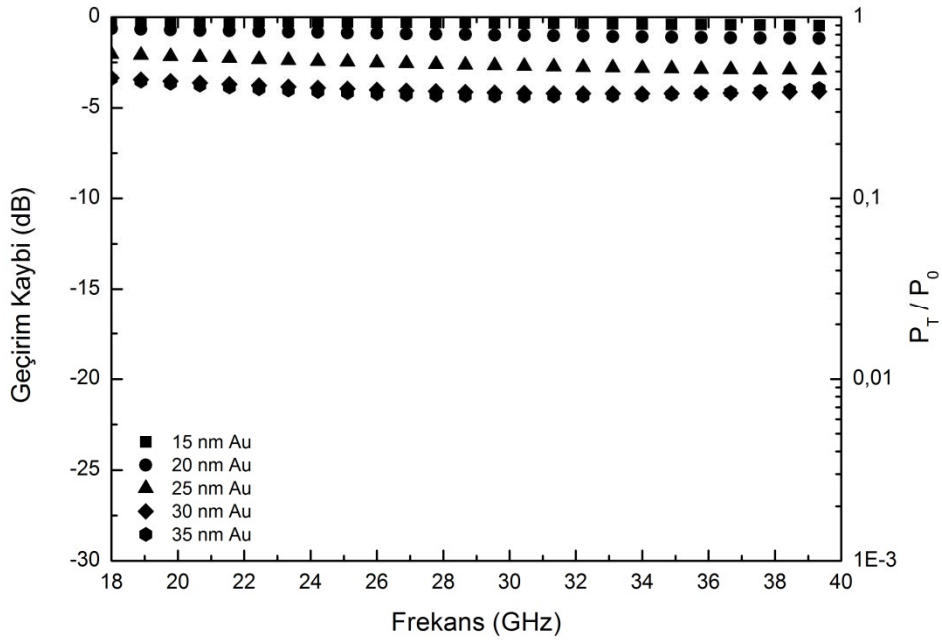
Yüzeyleri altın metali ile modifiye edilen aramid elyaf dokumaların EM özelliklerinde silanlama uygulaması ile ortaya çıkan değişimler, Şekil 4.59-64 ve Şekil 4.66-71'de verilen sonuçların sırasıyla karşılaştırılmasıyla irdelenebilir. Sonuç olarak, her ne kadar silanlamanın etkisi metalik yüzey modifikasyonu uygulanmış aramid elyaf dokumaların EM özellikleri üzerinde metalik yüzey modifikasyonu uygulanmış cam elyaflarinkine kıyasla daha fazla olsa da, aradaki fark çok yüksek olarak değerlendirilmemiştir. Şekil 4.64'te gösterilen yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapının arkasında metal altlık ile birlikte silanlama öncesi EM dalga yansıma kaybının frekansla değişimi ile Şekil 4.71'de silanlama sonrası için verilen aynı değişim karşılaştırıldığında her iki durumda da yaklaşık ortalama -10 dB mertebesinde yansıma kaybı olduğu görülmektedir.



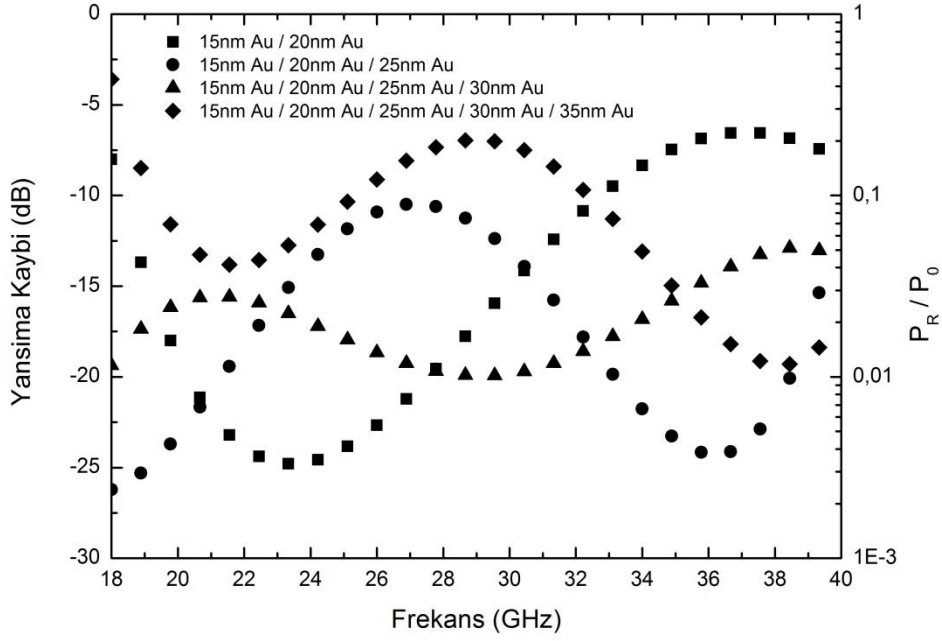
**Şekil 4.65.** Yüzeyi altın ile modifiye edilmiş tek katmanlı aramid elyaf dokumanın silanlama öncesi (solda) ve sonrası (sağda) yapısı.



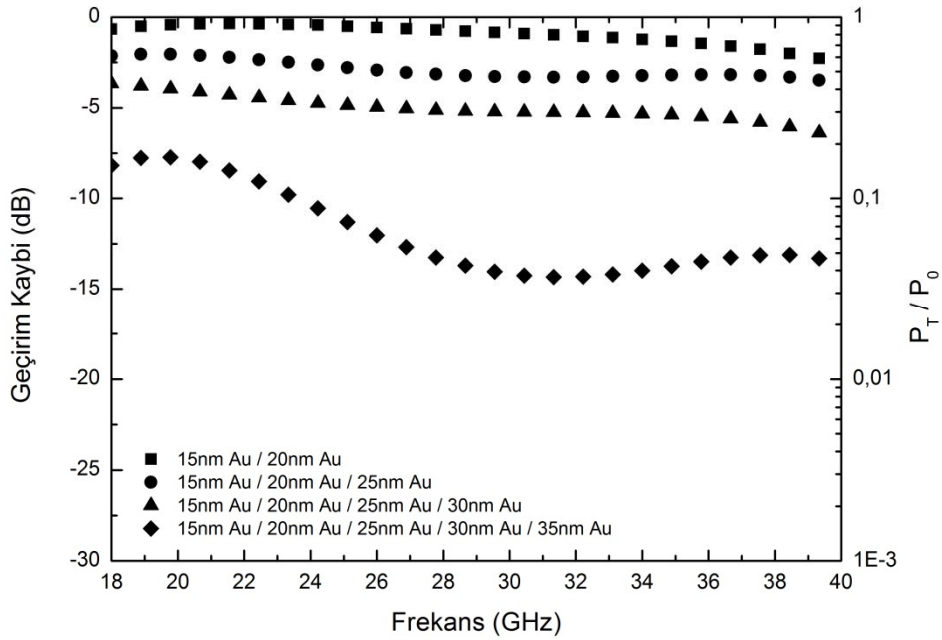
**Şekil 4.66.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.



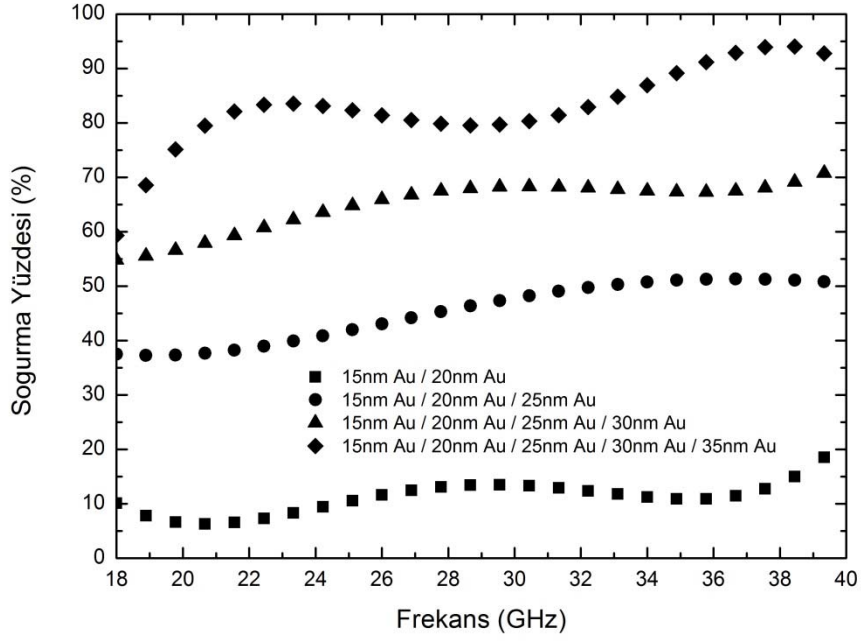
**Şekil 4.67.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.



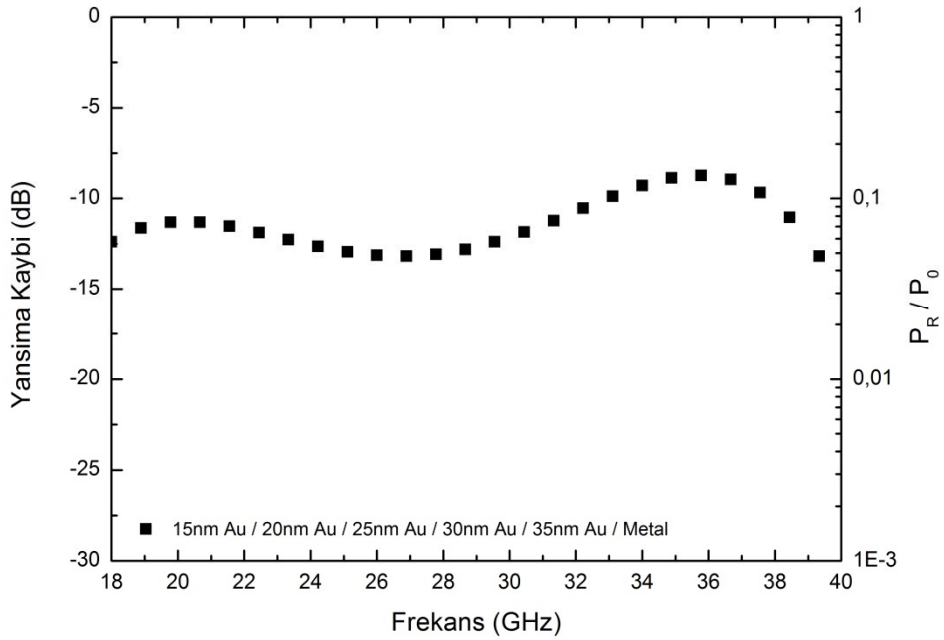
**Şekil 4.68.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.



**Şekil 4.69.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.



**Şekil 4.70.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.

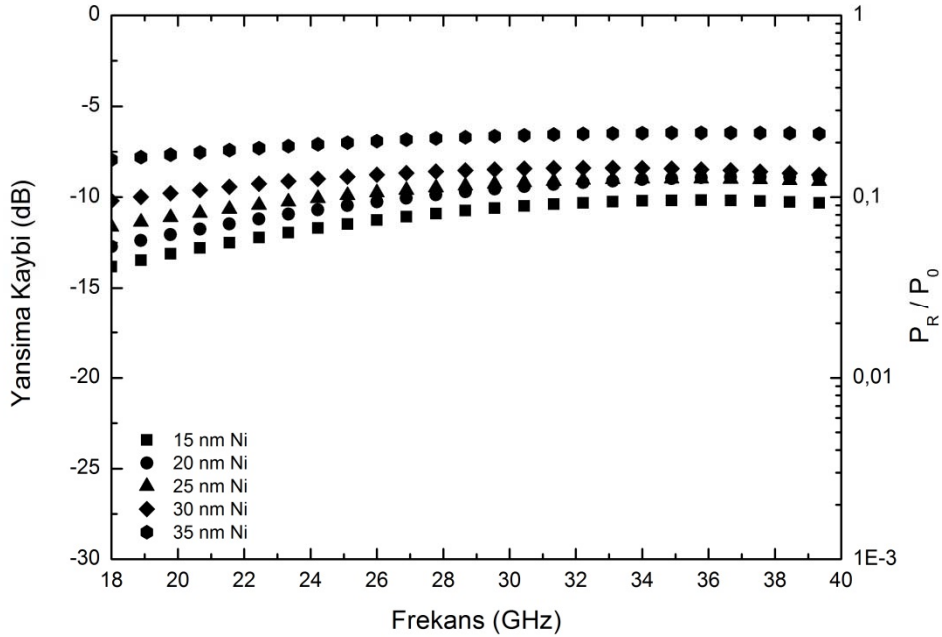


**Şekil 4.71.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların arkasında yansıtıcı metal altlık ile EM dalga yansıtma kaybının frekans ile değişimi.

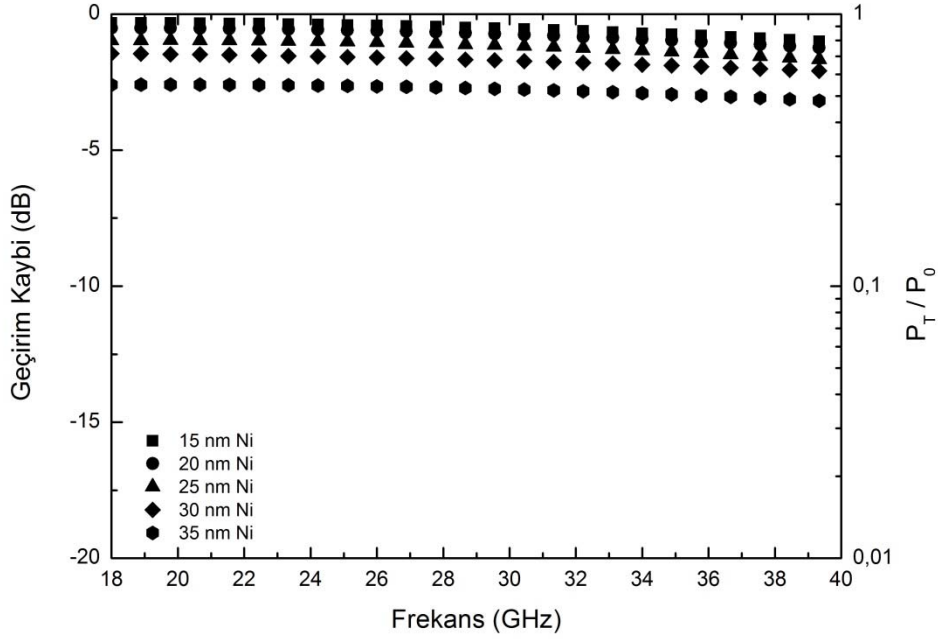
#### 4.3.2.2 Yüzeyi Nikel Metali ile Modifiye Edilmiş Aramid Elyaf Dokumalarının Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları

Yüzeyleri nikel metali ile 15, 20, 25, 30 ve 35 nm kalınlıklarda modifiye edilen aramid elyaf dokumalarının serbest uzay ölçüm tekniği ile EM özellikleri incelenmiştir. İlk olarak beş farklı kaplama kalınlığına sahip yapılar tek katmanlı olarak incelenmiş, daha sonra tek katmanlı yapılar artan nikel kaplama kalınlıkları sırasına göre birbirleri ardına sıralanarak çok katmanlı yapıların EM ölçümlerine devam edilmiştir. Bir sonraki adımda, bu katmanların yüzeylerine silanlama uygulanmış ve EM özellikleri yüzeylerinde silan varlığında incelenmiştir.

Yüzeyleri nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalarının EM özellikleri, tek katmanlı yapılar için Yansımaya Kaybı ve Geçirim Kaybı olarak, çok katmanlı yapılar için bunlara ek olarak Soğurma Yüzdesinin frekansa bağlı değişimi altında incelenmiştir. Şekil 4.72’te EM dalga yansımaya kaybının, Şekil 4.73’te ise EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi grafikler yardımı ile görülebilir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere tek katmanlı yapıların yansımaya ve geçirim kayıpları kaplama kalınlığı ile orantılı olarak değişmektedir. Kaplama kalınlığı arttıkça EM dalga yansımaya kaybının arttığı ve EM dalga geçirim kaybının azaldığı açık bir şekilde görülmektedir. Nikel metali ile yüzeyleri modifiye edilen aramid elyaf dokumalarının yansımaya kayıplarınının -7 dB ve -14 dB, geçirim kayıplarınının ise -1 dB ve -3 dB arasında değiştiği gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.72.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansımaya kaybınının frekans ile değişimi.

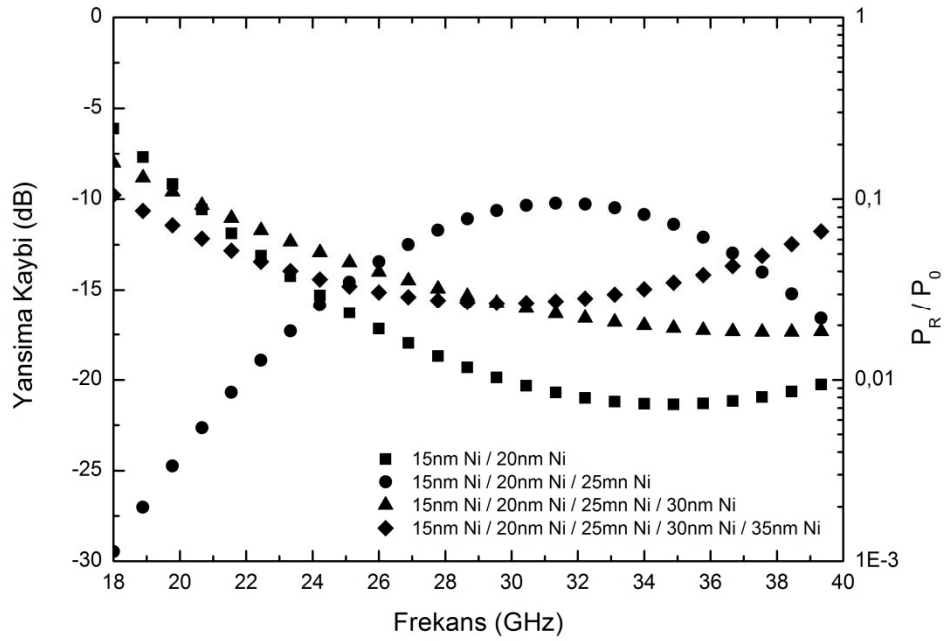


**Şekil 4.73.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.

Tek katmanlı aramid elyaflarda nikel metalinin modifiye etkisi incelenmiş ve bu bilgiler ışığında çok katmanlı yapıların benzer özellikleri aşağıda sunulan grafiklerde irdelenmiştir. Katmanlar birbirleri ardına artan kaplama kalınlığı sırasına göre dizilmiş ve 4 adet, katman sayısı birbirinden farklı yapı oluşturulmuştur. Şekil 4.74-76'da sırasıyla çok katmanlı yapıların EM dalga yansımaya kaybı, geçirim kaybı ve soğurma yüzdesi değerleri görülebilir. Şekil 4.74'te görüleceği üzere frekansa bağlı EM dalga yansımaya değerleri katman sayısına bağlı olarak belirli bir düzen içermemektedir. Katman sayısı arttıkça EM dalga yansımaya değerleri belirtilen frekanslar arasında dalgalanmaktadır. Bu, daha önce gümüş metali ile modifiye edilen cam elyaf dokuma çok katmanlı yapılarda incelenmiş ve sebepleri belirtilen başlık altında açıklanmıştır. Gümüş metali ile yüzeyleri modifiye edilen cam elyaf dokuma yapıların sonuçlarına benzeyen nikel metali modifiyeli aramid elyaf çok katmanlı yapıların EM dalga yansımaya değerlerinin yaklaşık olarak -5 dB ve -25 dB arasında değiştiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.74).

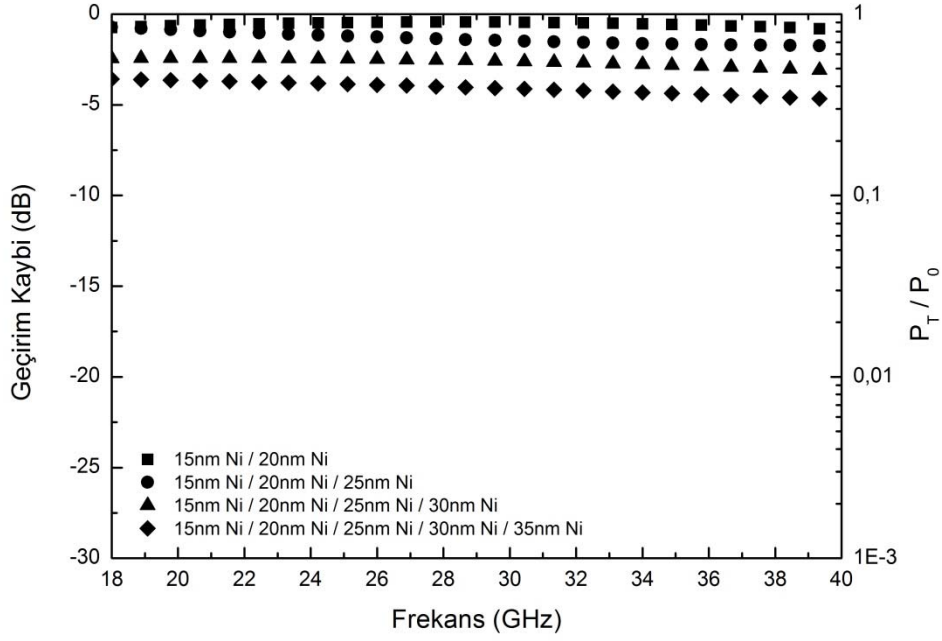
Benzer şekilde, çok katmanlı yapıların artan katman sayısı ile daha az EM dalga geçirimi yaptığı da yapılan çalışmalarla gösterilmiştir. Şekil 4.75'te görüleceği üzere çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim değerleri -1 dB ve -5 dB arasında değişmektedir. Ayrıca, EM dalga

geçiriminin katman sayısı arttıkça belirli bir düzen içerisinde azaldığı görülebilir. EM dalga yansıma ve geçirim özelliklerine bağlı olarak elde edilen EM dalga soğurma değerleri ise Şekil 4.76'da verilmiştir. Bu şekilden de anlaşılacağı üzere katman sayısı arttıkça EM dalga soğurma özellikleri artış göstermektedir. Çok katmanlı yapılar arasında beş katmanlı yapı %55 gibi çok yüksek olmayan EM dalga soğurumu göstermiştir. Bu değerler, yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalarda elde edilen EM dalga soğurma yüzdeleri ile karşılaştırılınca görece düşük olarak görülmektedir. Bu sonuç, nikel metali ile cam elyaf dokumaların EM dalga soğurumu bakımından daha uygun bir birliktelik yarattığını ve nikel metali ile aramid elyaf dokumaların EM dalga soğurumu açısından kullanımının çok faydalı olmayacağını göstermiştir.

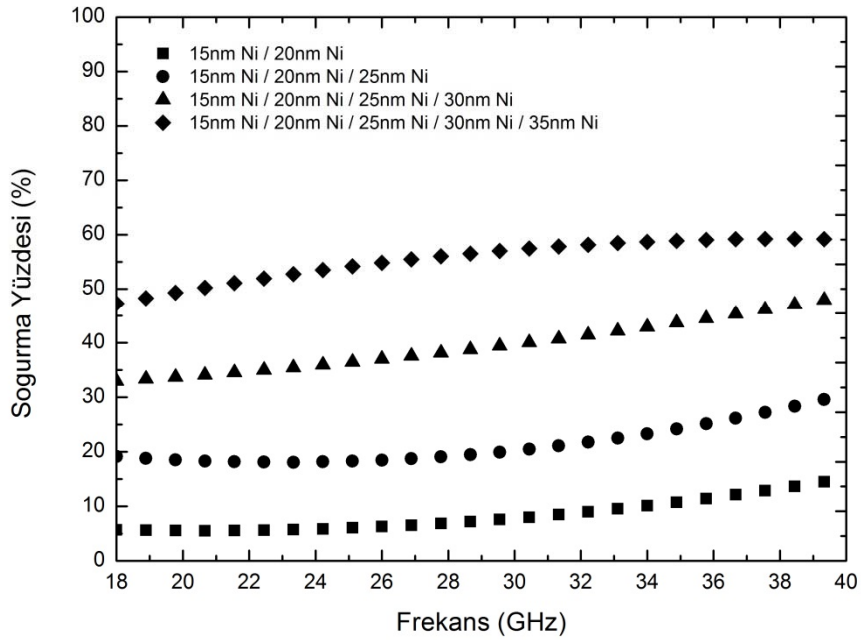


**Şekil 4.74.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.



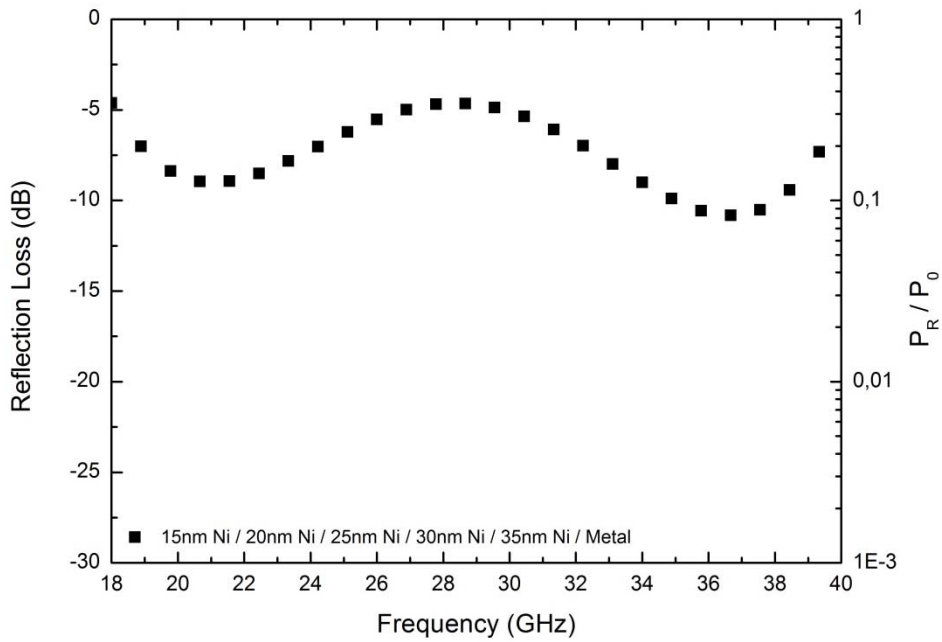


**Şekil 4.75.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.



**Şekil 4.76.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.

Nikel metali ile yüzeyi modifiye edilen aramid elyaf dokumalardan oluşan çok katmanlı yapılar için yapılan ek bir çalışma kapsamında, en çok katman sayısına sahip, beş katmanlı yapının arkasına tamamen yansıtıcı metal plaka yerleştirilmiştir. Tamamen yansımaya durumunun incelendiği bu konfigürasyonda, metal plakadan önce EM dalga ile etkileşime giren çok katmanlı yapının tam yansımaya ne kadar önleyeceği araştırılmıştır. Şekil 4.77’de görüleceği üzere EM dalga yansımaya değerlerinin yaklaşık olarak -5 dB ve -10 dB arasında değiştiği görülmektedir. Bu, ölçümü yapılan yapının üzerine gelen EM dalgasının belirli frekans değerleri arasında yaklaşık olarak %10 ve %20 gibi düşük değerler arasında yansımaya yaptığını göstermektedir.

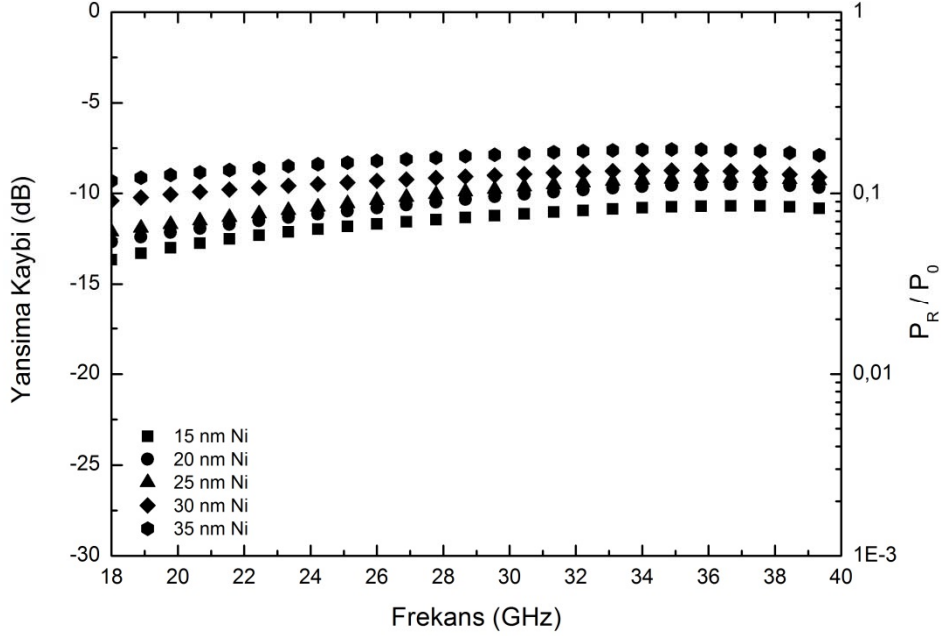


**Şekil 4.77.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların arkasında metal altlık ile birlikte EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi.

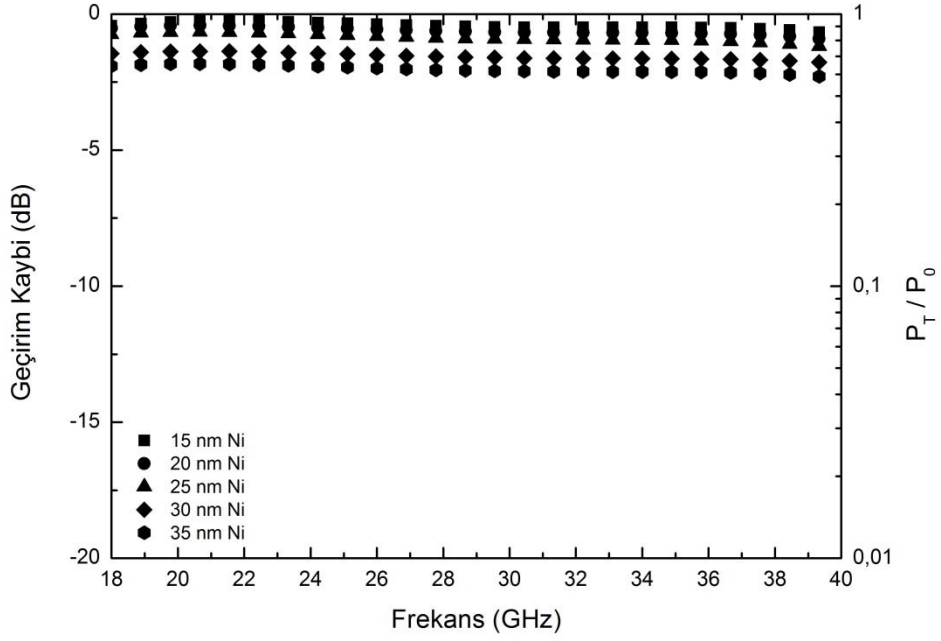
*- Silanlamanın Nikel Kaplama ile Yüzey Modifikasyonu Uygulanan Aramid Elyaf Dokumalarının EM Dalga ile Etkileşimine Etkisi*

Yüzeyleri nikel metali ile modifiye edilen aramid elyaf dokumalara, kompozit yapımında mekanik özellikleri arttırmak için kullanılmak üzere silan uygulaması yapılmıştır. Daha önce farklı metal modifikasyon ve farklı elyaf çeşitleri ile yapılan çalışmalar gerçekleştirilen EM ölçümleri silan uygulanmış nikel metali modifiyeli aramid elyaf dokumalar için de yapılmıştır. Benzer şekilde, silan uygulamasının sebep olduğu dokuma yapısındaki geometrik değişimlerin EM dalga ölçüm sonuçlarına etkileri aşağıda verilen Şekil 4.78-83'te incelenmiştir. Yüzeyleri

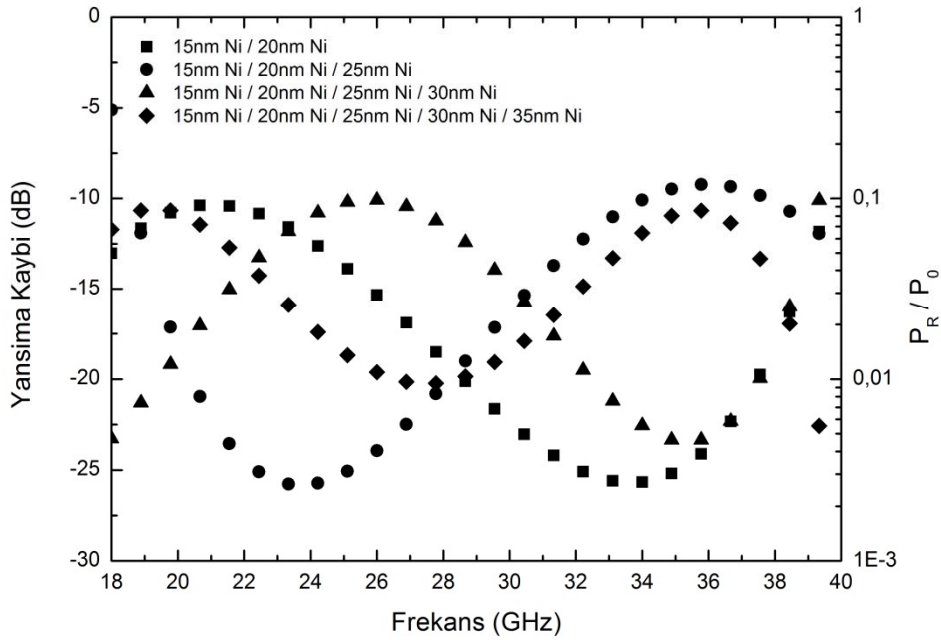
nikel metali ile modifiye edilen aramid elyaf dokumaların EM özelliklerinde silanlama uygulaması sonrası ortaya çıkan değişim, Şekil 4.72-77 ve Şekil 4.78-83'te sunulan sonuçların sırasıyla karşılaştırılmasıyla gözlemlenebilir. Daha önce sunulan sonuçlara paralel olarak silanlama uygulaması ile EM özelliklerde önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir.



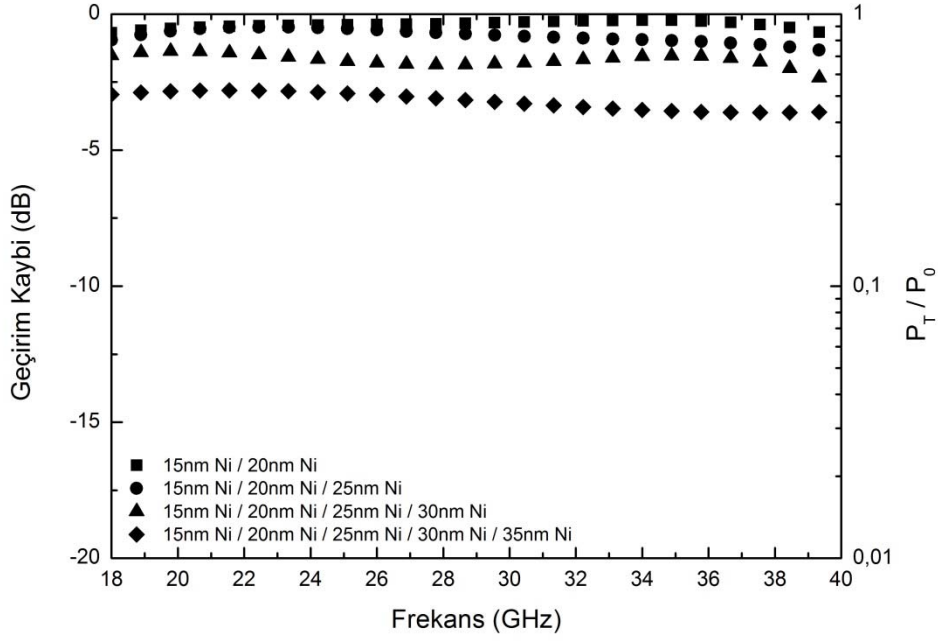
**Şekil 4.78.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.



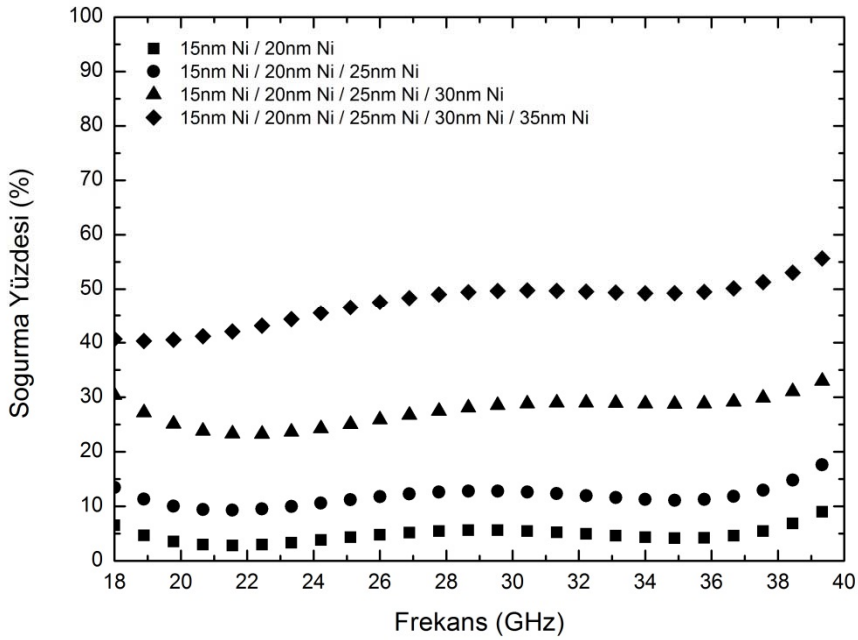
**Şekil 4.79.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.



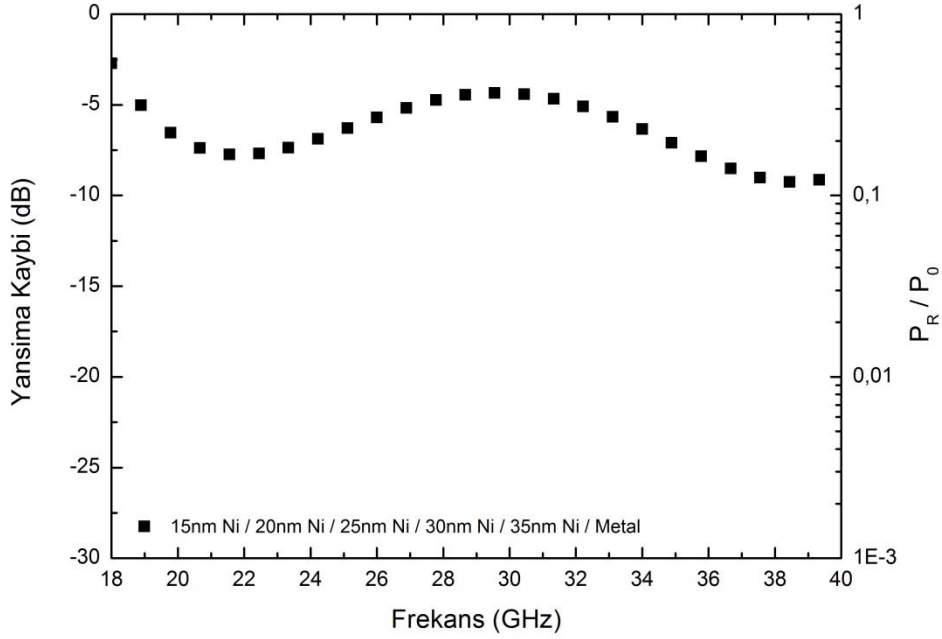
**Şekil 4.80.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga yansıtma kaybının frekans ile değişimi.



**Şekil 4.81.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.



**Şekil 4.82.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.



**Şekil 4.83.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş ve silan uygulanmış aramid elyaf dokuma çok katmanlı yapıların arkasında metal altlık ile birlikte EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.

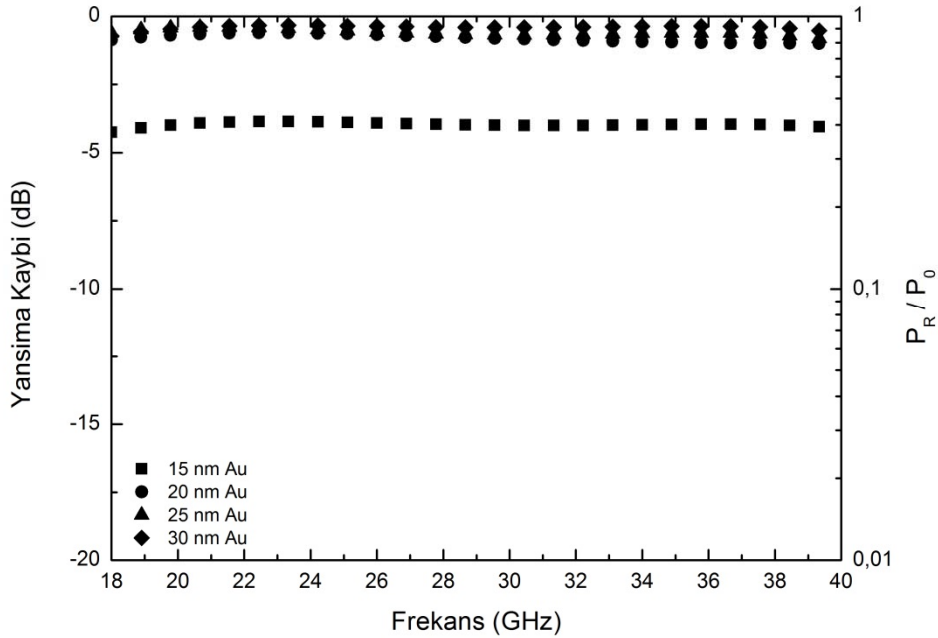
#### 4.3.3 Yüzeyi Metalik Kaplamalar ile Modifiye Edilmiş İnce PET Altlıkların Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları

Çalışmanın bu kısmında ise altlık olarak kullanılan malzemelerin değişiminin ve modifikasyon uygulanan altlığın yüzey topografisinin EM dalga ile etkileşim özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu sebeple, ilk çalışma olarak metalik kaplama uygulanmamış ince PET (Polietilen tereftalat) altlıkların EM dalga yansıma ve geçirim özellikleri serbest uzay ölçüm yöntemi ile belirlenmiştir. Bu çalışmada ilk amaçlanan, yüzey topografisi ve EM dalga yansıma ve geçirim özellikleri arasındaki ilişkiyi göstermektir.

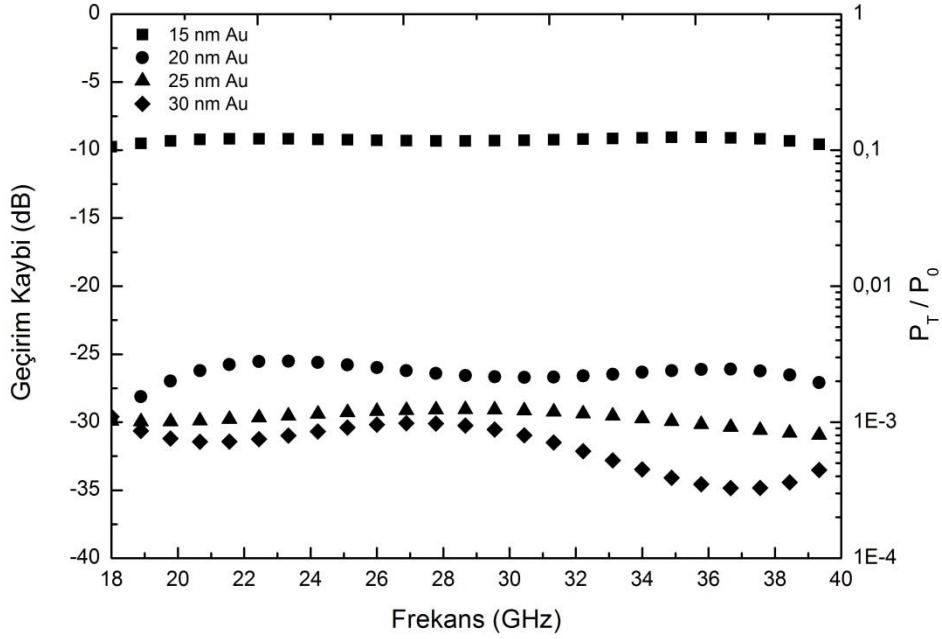
Yukarıda bahsedildiği gibi EM dalga ile etkileşim özelliklerinin yüzey topografisi ile değişimini incelemek üzere PET altlık üzerine 15, 20, 25 ve 30 nm film kalınlıklarına sahip altın metali ısı buharlaştırma yöntemi ile kaplanmıştır. Bu kaplama işlemleri yapılırken, cam veya aramid elyaf dokumaların yüzeyleri altın metali ile modifiye edilirken kullanılan kaplama parametrelerinin aynı tutulmasına dikkat edilmiştir. Elde edilen 4 adet numune, serbest uzay ölçüm yöntemi kullanılarak EM dalga yansıma ve geçirim özellikleri bakımından tek katman halinde incelenmiştir.

Şekil 4.84'te bahsedilen 4 adet numunenin EM dalga yansımaya özellikleri ve Şekil 4.85'te ise aynı numunelerin EM dalga geçirim özellikleri görülebilir. Şekil 4.84'ten anlaşılacağı üzere yüzeyi modifiye edilen PET numuneler yüksek yansımaya değerleri göstermektedir. PET üzerine kaplama yapılmış 20 nm, 25 nm ve 30 nm film kalınlığına sahip numunelerin üzerine gelen EM dalgaların neredeyse tamamını yansıtmakta olduğu; ancak, 15 nm film kalınlığına sahip ince film ile kaplanmış PET numunenin ise bahsedilen PET numunelerden daha az yansımaya izin verdiği görülmektedir. Bu şekilden anlaşılacağı üzere 20 nm ve daha yüksek film kalınlığına sahip yüzeyi altın ince film ile modifiye edilmiş PET altlıklar benzer yansımaya özellikleri göstermektedir.

Şekil 4.85'te ise yüzeyleri 15 nm, 20 nm, 25 nm ve 30 nm kalınlığa sahip altın ince film ile modifiye edilmiş PET altlıkların EM Dalga Geçirim Kaybı (dB) – Frekans (GHz) grafiği verilmiştir. Bu şekilde de görüleceği üzere yüzeyleri modifiye edilmiş PET altlıklar ve özellikle 20 nm, 25 nm ve 30 nm film kalınlıklarına sahip olan numuneler EM dalgaların geçirimine izin vermemektedir. 15 nm film kalınlığına sahip PET altlık ise üzerine gelen EM dalganın %10'u kadar bir kısmının geçirimine izin vermektedir. Bu sonuçlar, tek katmanlı yapılarda dahi yüzey geometrisinin EM dalga özellikleri için çok önemli olduğunu göstermektedir.



**Şekil 4.84.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş PET altlık tek katmanlı yapıların EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi.



**Şekil 4.85.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş PET altlık tek katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.

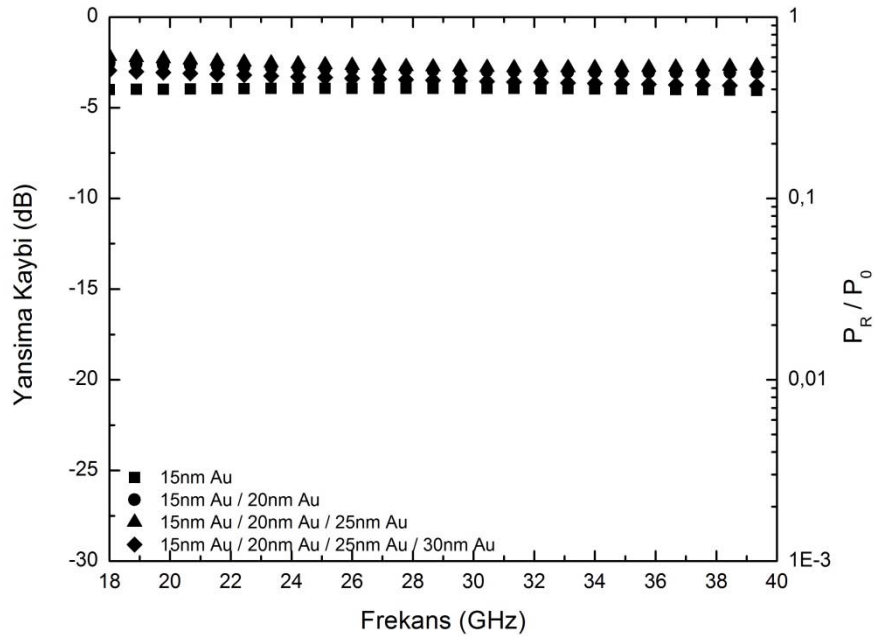
Tek katmanlı yapılarda altlığın yüzey topografisinin önemi Şekil 4.84 ve Şekil 4.85'te gösterilen grafikler yardımı ile anlaşılmış olup, çok katmanlı yapılarda da benzer etki sorgulanmıştır. Şekil 4.86 ve 4.87'de yüzeyi 15 nm, 20 nm, 25 nm ve 30 nm altın kaplama ile modifiye edilmiş PET altlıkların artan kaplama kalınlığına göre artarda dizilmesiyle oluşturulan çok katmanlı yapıların sırasıyla EM dalga yansıma ve geçirim özellikleri karşılaştırılmaktadır. Tek katmanlı yapılarda soğurma yüzdesi değerlerini araştırmak çok anlamlı sonuçlar vermediği için bu çalışmalar gösterilmemiş olup, çok katmanlı yapılar için soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi Şekil 4.88'de sunulmuştur.

Şekil 4.86-87'de görüleceği üzere yüzeyi modifiye edilmiş PET altlıklar çok katmanlı yapı haline getirildiğinde katman sayısına bağlı olmamakla birlikte yansıma kaybının 0 ile -5 dB aralığında yaklaşık benzer değerlerde değiştiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.86). Şekil 4.87'de bulunan çok katmanlı yapıların Geçirim kaybı (dB) – Frekans (GHz) grafiğinde tek katmanlı 15 nm kalınlığında altın ince film kaplı PET altlığın EM dalga geçirimine az miktarda yanıt verdiği görülmektedir. Aynı grafik içerisinde çok katmanlı yapılar incelendiğinde EM dalga geçiriminin -30 dB'nin altında çok düşük değerlere indiği görülmektedir. Bu şekilden anlaşılacağı üzere, yüzey modifikasyonlu elyaf dokumalarla oluşturulan çok katmanlı yapıların aksine, yüzey

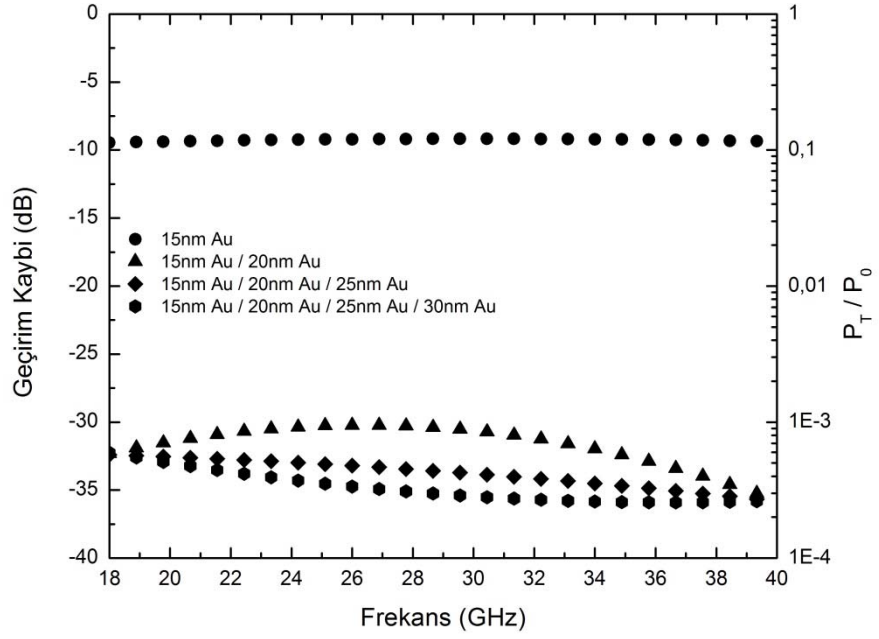


modifiyeli PET altlıklarla oluşturulan çok katmanlı yapılar EM dalgaları hacimli metal plaka gibi tamamen yansıtmakta ve geçirime hiç izin vermemektedir.

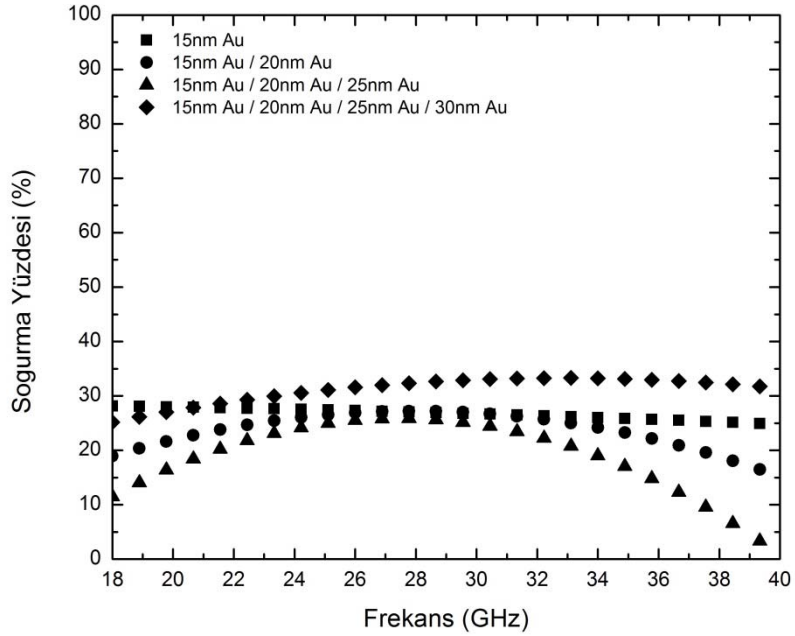
Şekil 4.86 ve Şekil 4.87 ile elde edilen bilgilerin ışığında Şekil 4.88'de görülen Soğurma Yüzdesi (%) – Frekans (GHz) grafiği oluşturulmuştur. Bu grafikten anlaşılacağı üzere çok katmanlı yapılar incelendiğinde ortaya çıkan sonuç, yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş PET altlıkların çok yansıtıcı yüzeylere sahip olmaları sebebiyle katmanlar arasında EM dalga girişimine izin vermeyerek EM dalga soğurma işlevi göstermedikleridir. Bu sonuçlar, belirtilen frekans aralığında EM dalga soğurma karakteristiği kazanacak yapılar için EM dalga girişimine izin veren yüzey topografisinin önemini bir kez daha kanıtlamıştır. Bu çalışma daha önce öngörüldüğü gibi yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş PET altlıkların tek katmanlı veya çok katmanlı olmalarına bağlı olmaksızın üzerlerine gelen EM dalgaların çok büyük bir kısmını yansıtarak yapı içine girmesine izin vermediğini göstermiştir. EM dalga girişimine izin vermeyen bu yapılar, daha önce düşünüldüğü gibi EM dalga soğurma işlevinin yüzey modifiyesi için kullanılan metal ince film kalınlığının yanında önemli ölçüde yüzey modifikasyonu uygulanan altlığın yüzey topografisine bağlı olduğunu göstermiştir.



**Şekil 4.86.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş PET altlık çok katmanlı yapıların EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.



**Şekil 4.87.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş PET altlık çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.



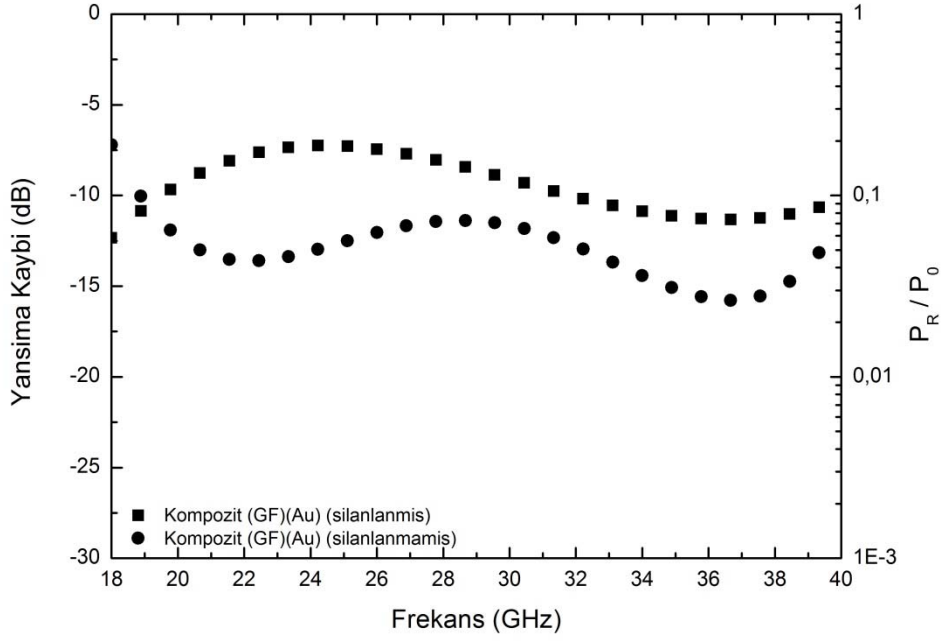
**Şekil 4.88.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş PET altlık çok katmanlı yapıların EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.

#### **4.3.4 Prototip Kompozit Yapıların Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları**

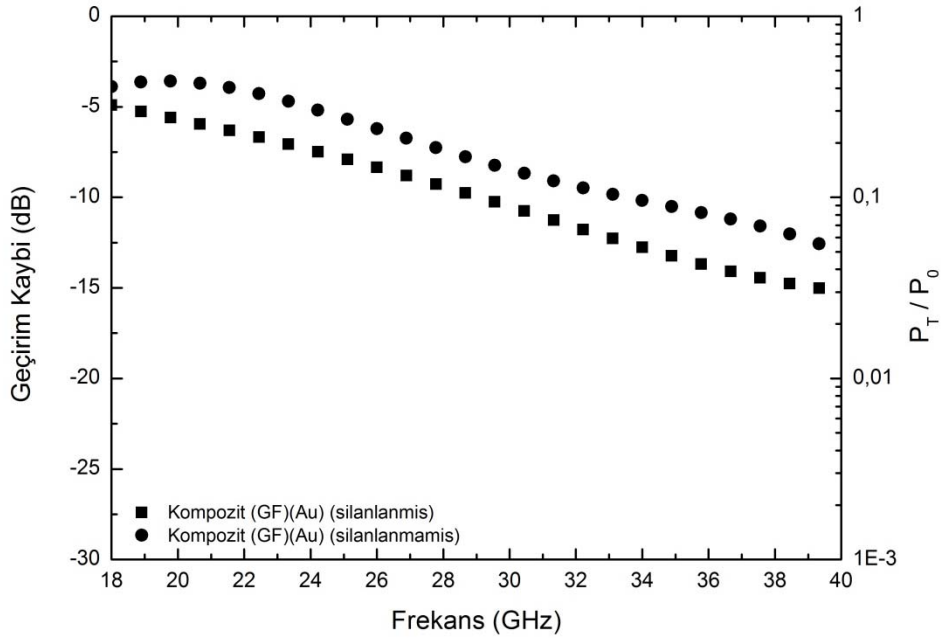
Proje kapsamında belirtildiği üzere cam elyaf ve aramid elyaf dokumalar metalik kaplamalar ile modifiye edilmiş ve oluşturulan takviye yapılarının elektromanyetik dalga yansıma, geçirim ve bunlara bağlı olarak soğurma özellikleri incelenmiştir. Yüzeyleri altın ve nikel metalleri ile modifiye edilen cam ve aramid elyaf dokumalardan oluşan çok katmanlı yapıların elektromanyetik özellikleri daha önce incelenmiştir. Elde edilen EM özellikleri doğrultusunda, birbirinden farklı bu 4 adet çok katmanlı yapının prototip kompozit haline getirilmesi uygun görülmüştür. Çok katmanlı yapılara sahip yüzeyi altın ve nikel metalleri ile kaplı cam elyaf ve aramid elyaf dokumalar vakum paketleme yöntemi ile epoksi matris içerisine yerleştirilerek prototip kompozitler oluşturulmuştur. Bu 4 farklı çeşit çok katmanlı takviye yapı, özellikle mekanik davranışlarını incelemek üzere silanlı ve silansız olarak iki kısma ayrılmış ve bu şekilde 8 ayrı EM dalga soğurucu prototip kompozit yapı elde edilmiştir. Elde edilen 8 adet farklı kompozitin silanlı ve silansız olan aynı çeşitleri birbirleri karşılaştırmalı olarak EM dalga yansıma kaybı, geçirim kaybı ve soğurma yüzdesi bakımından incelenmiştir. Prototip kompozitlerin EM özellikleri aşağıdaki başlıklar altında incelenmiştir.

##### ***4.3.4.1 Yüzeyi Altın Metali ile Modifiye Edilmiş Cam Elyaf Dokumalar Kullanılarak Elde Edilen Prototip Kompozitin Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları***

Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar kullanılarak elde edilen prototip kompozitlerin EM özellikleri serbest ulan ölçüm tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Yapılan ölçümler 4 ayrı sonuç ile gösterilmiştir. Bu sonuçlarda, silanlı ve silansız oluşturulan kompozit yapıların sırasıyla EM dalga yansıma kaybı, geçirim kaybı, soğurma yüzdesi ve arkalarında tamamen yansıtıcı metalik yüzey bulunarak ölçülen yansıma kaybı gösterilmiştir. Şekil 4.89 ve Şekil 4.90'da, bahsedilen kompozitlerin EM dalga yansıma ve geçirim kaybının frekans ile değişimi incelenebilir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere kompozitler arasında silanlanmış olan daha çok yansıma ve daha az geçirim yapmaktadır. Kompozitlerin ikisi de -10 dB çevresinde ve altında EM dalga yansıması göstermektedir. Bu, kompozitlerin üzerine gelen EM dalganın %10'undan azını yansıttığını göstermektedir. Aynı kompozitlerin gösterdiği EM dalga geçirim kaybı ise -3 dB ve -15 dB arasında değişmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere silan uygulanmış kompozit daha az geçirim yapmaktadır.

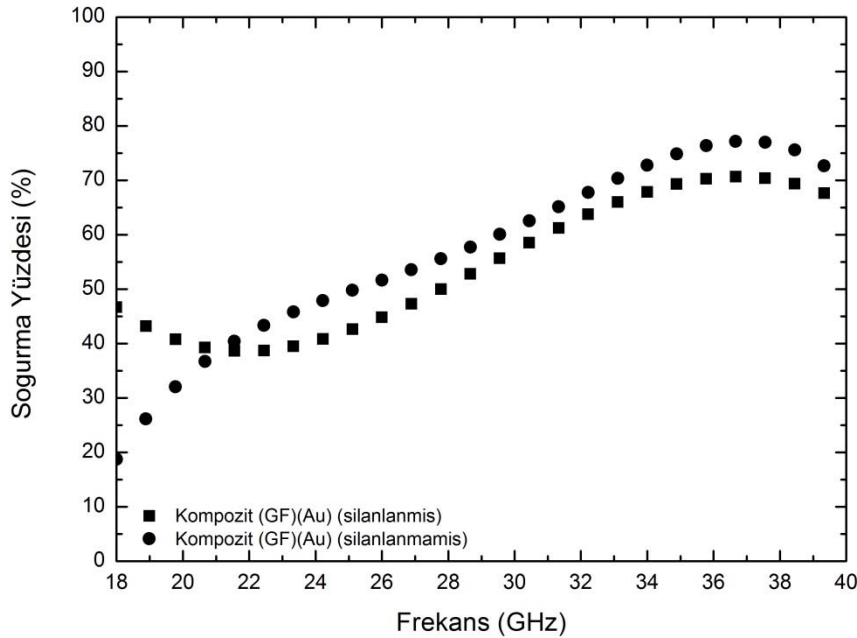


**Şekil 4.89.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi.



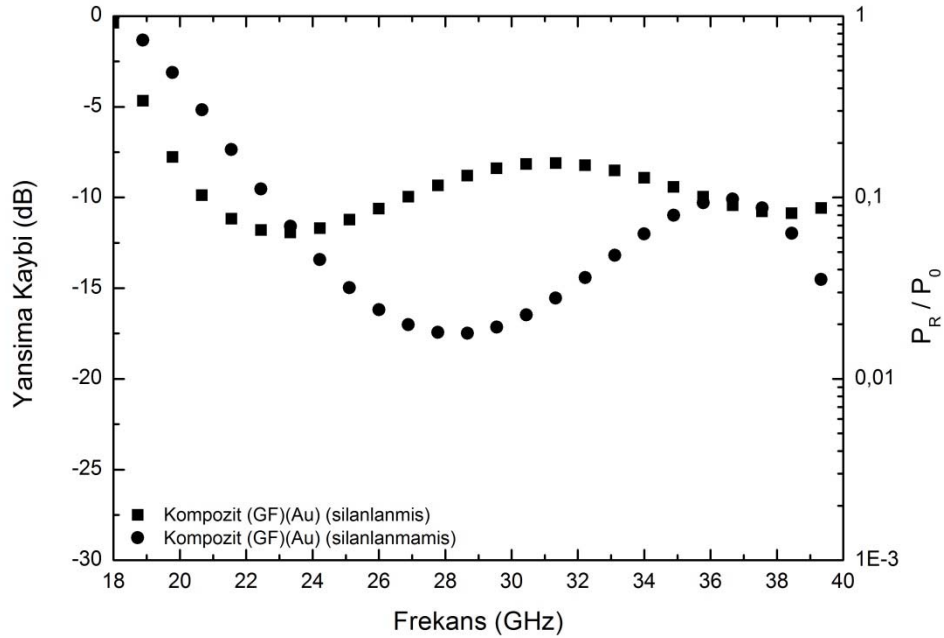
**Şekil 4.90.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.

Yüzey modifikasyonu uygulanmış cam elyaf dokuma takviyeli prototip kompozitlerin EM dalga yansıma ve geçirim sonuçları kullanılarak elde edilen EM dalga soğurma yüzdesi Şekil 4.91'de görülebilir. Silanlama uygulanmış kompozit, ölçüm yapılan 18-40 GHz frekans aralığının sadece 18-21 GHz bandında daha yüksek EM dalga soğurma yüzdesi göstermiştir. 18-40 GHz frekans aralığının geri kalan kısmında silan uygulaması yapılmamış kompozit daha fazla EM dalga soğurumu göstermiştir. Bu sonuç, silan uygulamasının EM dalga soğurucu kompozitlerin EM davranışlarını daha az etkili hale getirdiğini göstermektedir. Prototip kompozitlerin EM özellikleri içinde bulundurduğu yüzeyi altın ile modifiye edilmiş çok katmanlı cam elyaf dokumaların EM dalga sonuçları ile karşılaştırıldığında, kompozit oluşumunun takviye yapısının EM dalga soğurma yüzdesi bir miktar aşağı çektiği görülmüştür. Bu, kompozit yapımında matris olarak kullanılan epoksi polimerin, EM dalgayla kendisine duyarlı olarak tasarlanmış iç katmanlara ulaşmadan önce etkileşime geçmesi ile ilgili olarak gelişmiştir. Epoksi matrisin EM dalgaları karşılayan dış yüzeyinin geometrik olarak cam elyaf dokumalara göre daha düz ve yansıtıcı bir yapıya sahip olması bu davranışa sebep olarak görülmektedir. Ayrıca, epoksi matrisin elyaf dokuma katmanları arasında mekanik bağlayıcı olarak bulunması katmanlar arası uzaklığı artırmış ve bunun sonucunda EM dalga etkileşimi ve girişimlerini değiştirmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere prototip kompozit ile en çok %80 civarında EM dalga soğurumu elde edilmiştir.



**Şekil 4.91.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.

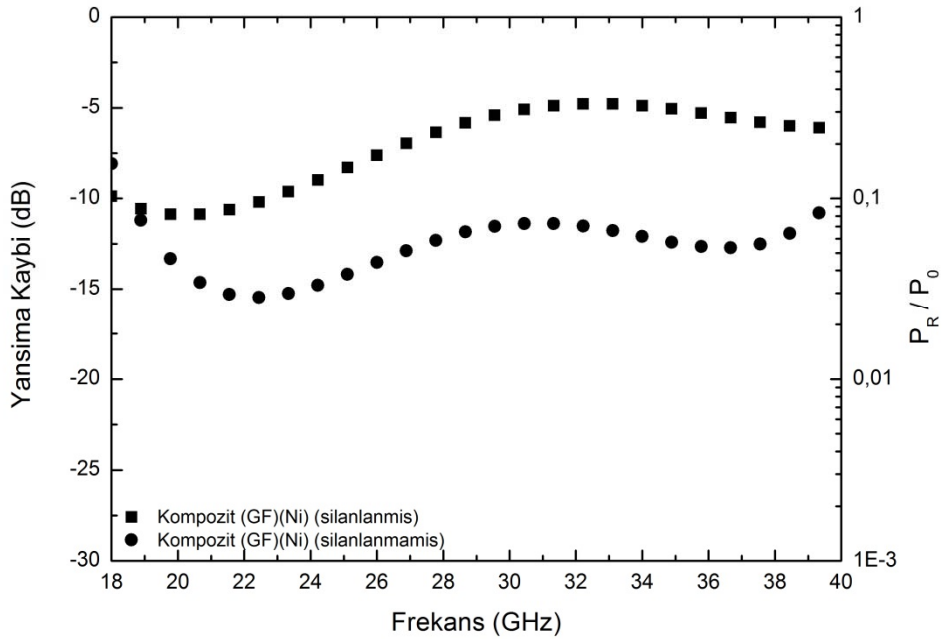
Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalardan oluşan çok katmanlı yapı ile takviye edilen prototip kompozit üzerinde ek bir çalışma daha yapılmıştır. Bu çalışmada ise; prototip kompozitlerin arkasına tamamen yansıtıcı olan metal plaka yerleştirilmiş ve EM dalga yansıtma özellikleri incelenmiştir. Şekil 4.92'de bu çalışmanın sonuçları görülebilir. Şekilden de anlaşılacağı üzere silan uygulanmış kompozit yapı belirtilen frekans aralığının neredeyse tamamında -10 dB ve çevresinde sonuçlar vermiş; ancak, silan uygulanmamış kompozit ise frekans ile birlikte değişen ve -1 dB ve -17dB arasında değişen sonuçlar vermiştir. Bu sonuç, silan uygulanan kompozitlerin arkalarında tamamen yansıtıcı metal yüzey bulundurulduklarında belirtilen tüm frekans aralığında %10 gibi düşük EM dalga yansıtması oluşturduğunu göstermiştir.



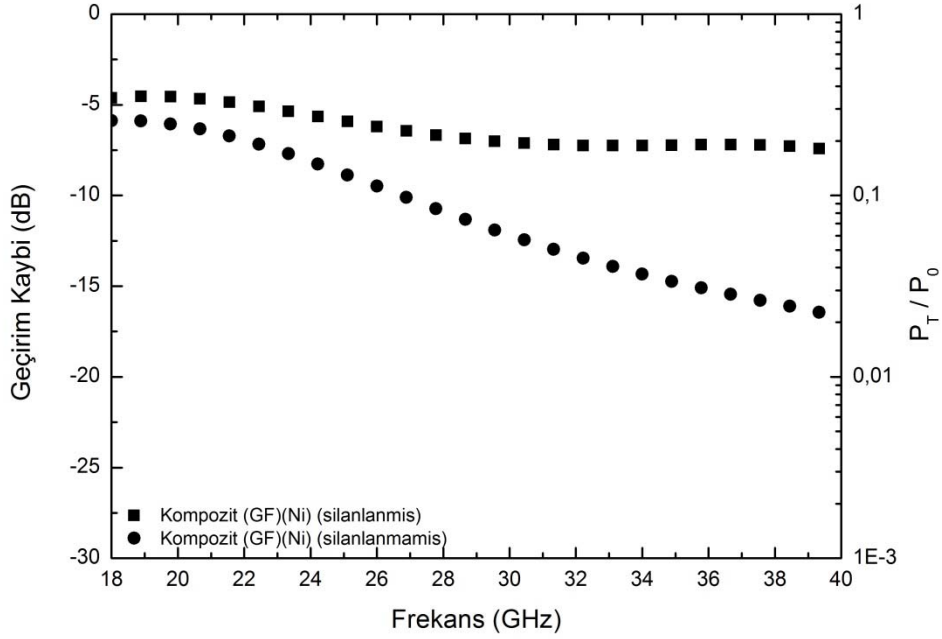
**Şekil 4.92.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin arkasında metal ile birlikte EM dalga yansıtma kaybının frekans ile değişimi.

#### 4.3.4.2 Yüzeyi Nikel Metali ile Modifiye Edilmiş Cam Elyaf Dokumalar Kullanılarak Elde Edilen Prototip Kompozitin Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları

Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalardan oluşan çok katmanlı takviye yapısı kullanılarak elde edilen prototip kompozitin EM özellikleri serbest uzay ölçüm tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Yapılan ölçümler 4 ayrı sonuç ile gösterilmiştir. Bu sonuçlarda, silanlı ve silansız oluşturulan prototip kompozitlerin sırasıyla EM dalga yansımaya kaybı, geçirim kaybı, soğurma yüzdesi ve arkalarında tamamen yansıtıcı metalik yüzey bulunarak ölçülen yansımaya kaybı gösterilmiştir. Şekil 4.93 ve Şekil 4.94'te, bahsedilen prototip kompozitlerin EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi incelenebilir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere prototip kompozitler arasında silanlanmış olan hem daha çok yansımaya hem de daha çok geçirim yapmaktadır. Kompozitlerden silanlı olan -5 dB ve -10 dB arasında, silanlanmamış olan ise -10 dB ve -15 dB arasında EM dalga yansımaya göstermektedir. Bu kompozitlerden silanlanmış olan -5 dB ve çevresinde, silanlanmamış olan ise -5 dB ve -15 dB arasında EM dalga geçirim kaybı göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere silan uygulanmış kompozit daha çok geçirim yapmaktadır.



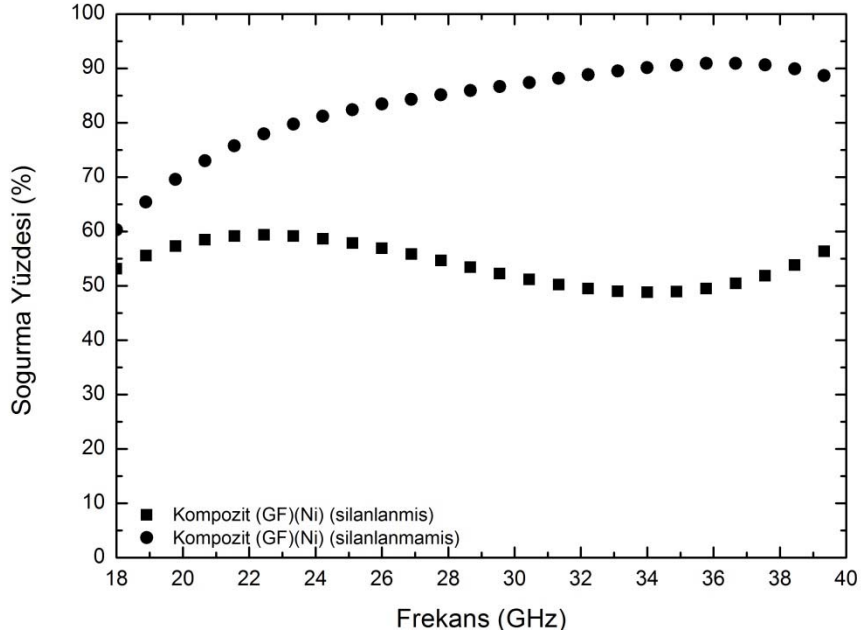
**Şekil 4.93.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi.



**Şekil 4.94.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.

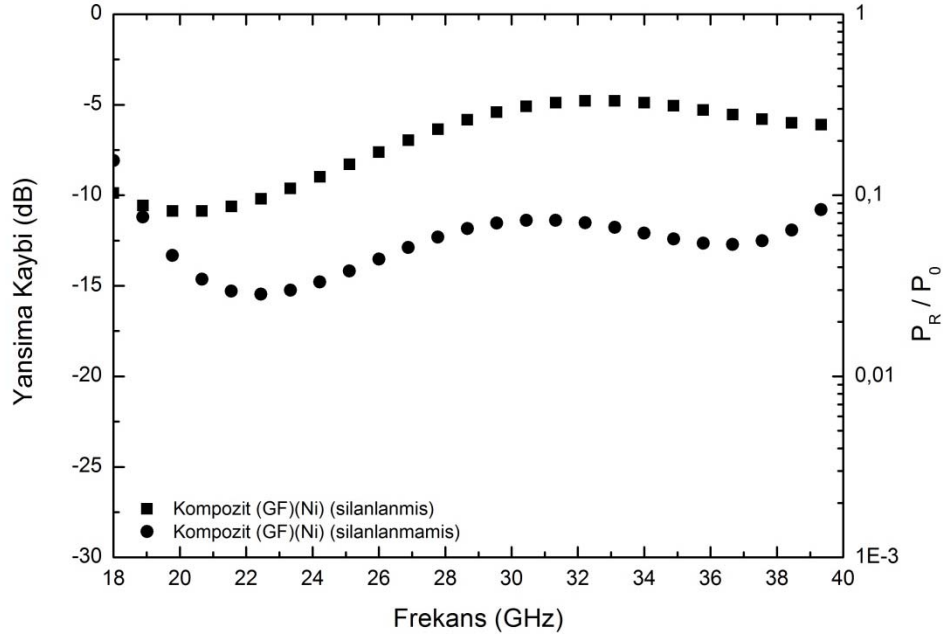
EM dalga yansıma ve geçirim sonuçları kullanılarak elde edilen EM dalga soğurma yüzdesi Şekil 4.95'te görülebilir. Silanlanlama uygulanmamış kompozit, 18-40 GHz frekans aralığının tamamında çok daha yüksek EM dalga soğurma yüzdesi göstermiştir. Bu sonuç, açık bir şekilde silan uygulamasının cam elyaf kullanılan EM dalga soğurucu kompozitlerin EM davranışlarını daha az etkili hale getirdiğini göstermektedir. Bir önceki başlık altında kompozit yapımında epoksi matris kullanımının EM ölçümlerini nasıl değiştirdiği açıklanmıştır. Benzer yapısal değişiklikler, yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş çok katmanlı yapıların kullanıldığı kompozitler için benzer sonuçlar oluşturmamış ve silanlanlama uygulanmamış olan kompozit, elyaf dokumalarla oluşturulan çok katmanlı takviye yapısının elektromanyetik özelliklerini belirtilen frekans aralığının neredeyse tamamında yukarı çekmiştir. Silanlama uygulanmış prototip kompozitin değerlerinin ise, çok katmanlı takviye yapısının kompozit oluşturulmadan önceki değerlerine göre daha az çıktığı görülmüştür. Nikel yüzey modifikasyonu ve cam elyaf kullanılarak elde edilen prototip kompozitler 33 GHz üzerinde %90 EM dalga soğurumu göstermiş ve ölçüm yapılan frekans aralığının çok büyük bir bölümünde %70-80'in üzerinde EM dalga soğurmaya ulaşmıştır.





**Şekil 4.95.** Yüzeysel nikel metal ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.

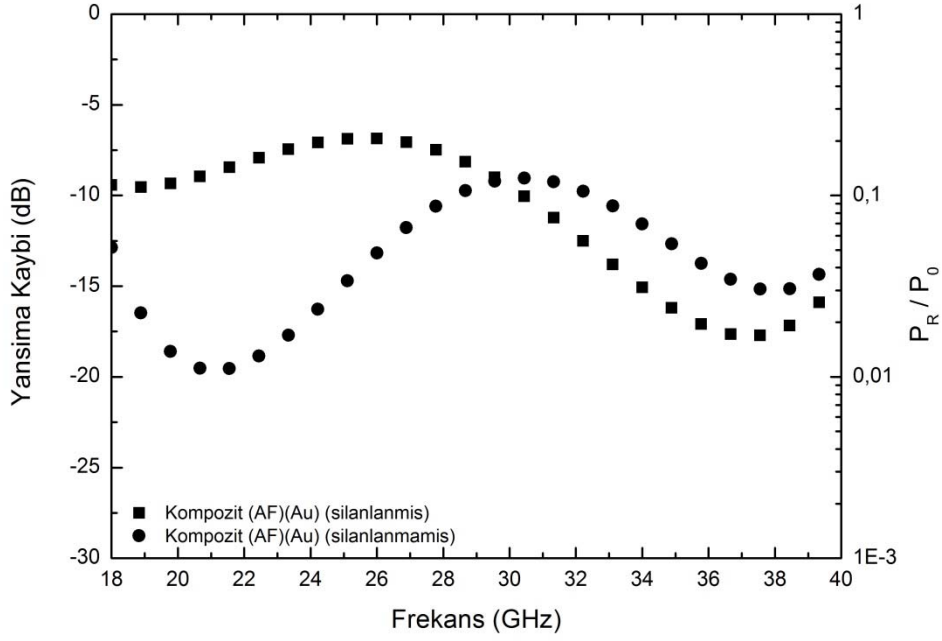
Yüzeysel nikel metal ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar ile takviye edilen prototip kompozitler üzerinde son bir çalışma daha yapılmıştır. Bu çalışmada ise; kompozitlerin arkasına tamamen yansıtıcı olan metal plaka yerleştirilmiş ve EM dalga yansıtma özellikleri incelenmiştir. Şekil 4.96'da bu çalışmanın sonuçları görülebilir. Şekilden de anlaşılacağı üzere silan uygulanmış kompozit yapı belirtilen frekans aralığında -5 dB ve -10 dB arasında sonuçlar vermiş; silan uygulanmamış kompozit ise -10 dB ve -15 dB arasında değişen sonuçlar vermiştir. Bu sonuç, silan uygulamasının, tam yansıma durumunda prototip kompozitin EM performansını olumsuz yönde etkilediğini göstermiştir. Silan uygulaması yapılmış kompozit 18-40 GHz aralığında %30'a kadar çıkan EM dalga yansıması gösterirken, silan uygulaması yapılmamış kompozit frekans aralığının tamamında %10 ve altında EM dalga yansıması göstermiştir.



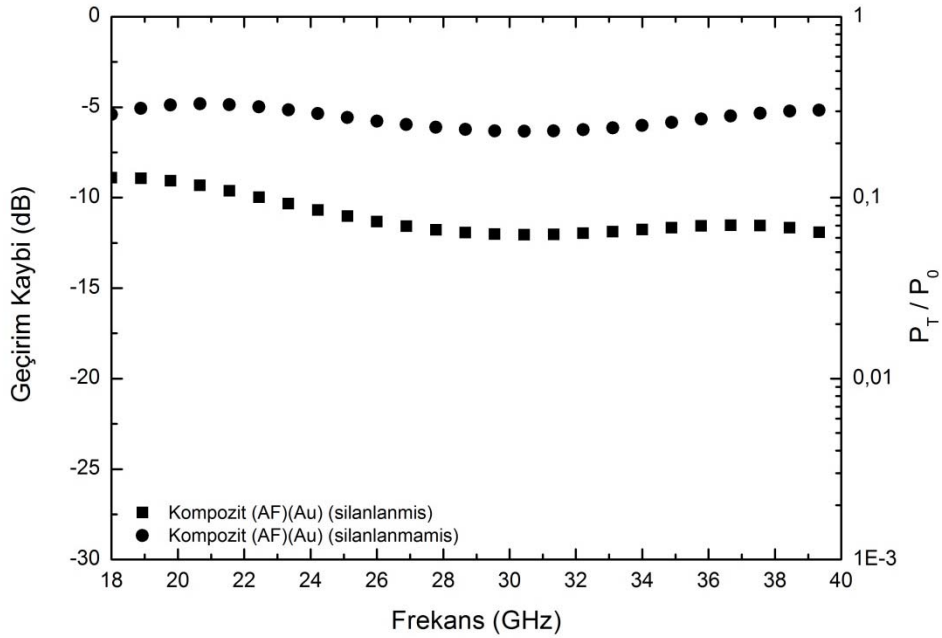
**Şekil 4.96.** Yüzeysel nikel metal ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin arkasında metal ile birlikte EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.

#### **4.3.4.3 Yüzeysel Altın Metal ile Modifiye Edilmiş Aramid Elyaf Dokumalar Kullanılarak Elde Edilen Prototip Kompozitin Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları**

Yüzeysel altın metal ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalarla oluşturulan çok katmanlı yapılarla takviye edilen prototip kompozitin EM performansı belirlenmiştir. Yapılan ölçümler 4 ayrı sonuç şeklinde gösterilmiştir. Bu sonuçlarda, silanlı ve silansız olarak oluşturulan kompozitlerin sırasıyla EM dalga yansıma kaybı, geçirim kaybı, soğurma yüzdesi ve arkalarında tamamen yansıtıcı yüzey bulunarak ölçülen yansıma kaybı değerleri gösterilmiştir. Şekil 4.97 ve Şekil 4.98'de, bahsedilen kompozitlerin EM dalga yansıma ve geçirim kaybının frekans ile değişimi incelenebilir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere kompozit yapıları arasında silanlanmış olan daha çok yansıma ve daha az geçirim yapmaktadır. Kompozitlerden silanlı olan -7 dB ve -18 dB arasında, silanlanmamış olan ise -10 dB ve -20 dB arasında EM dalga yansıması göstermektedir. Bu kompozitlerden silanlanmış olan -10 dB ve çevresinde, silanlanmamış olan ise -5 dB ve çevresinde EM dalga geçirim kaybı göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere silan uygulanmış kompozit daha çok geçirim yapmaktadır.

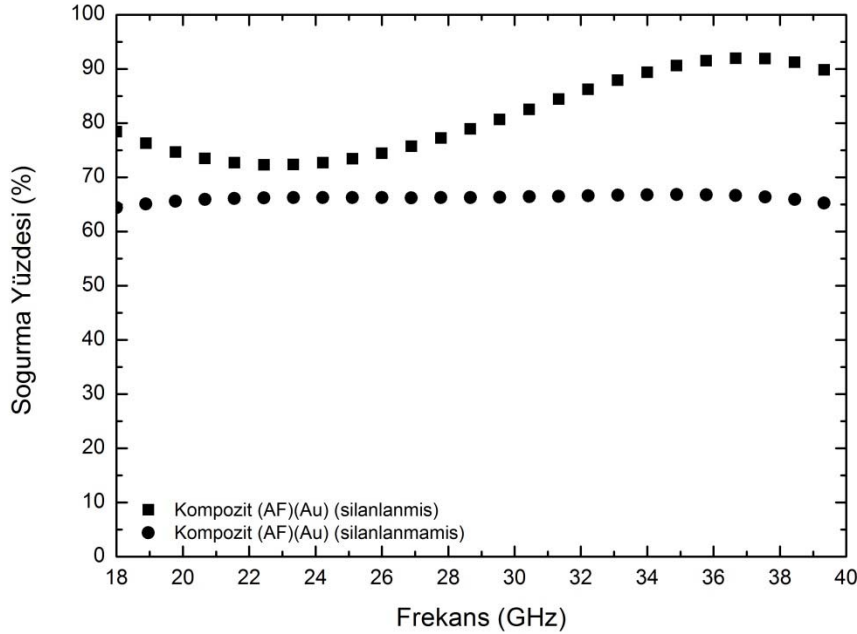


**Şekil 4.97.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.



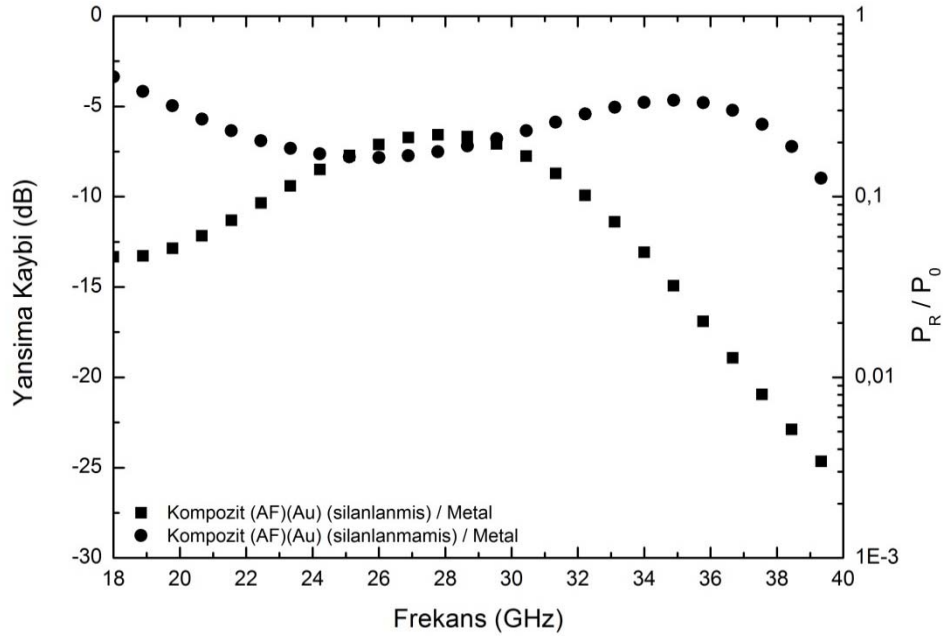
**Şekil 4.98.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.

EM dalga yansımaya ve geçirim sonuçları kullanılarak elde edilen EM dalga soğurma yüzdesi Şekil 4.99'da görülebilir. Silanlanlama uygulanmış kompozit, 18-40 GHz frekans aralığının tamamında daha yüksek EM dalga soğurma yüzdesi göstermiştir. Bu sonuç, silan uygulamasının aramid elyaf dokuma ve altın metali kullanılan EM dalga soğurucu kompozitlerin EM davranışlarını daha etkili hale getirdiğini göstermektedir. Daha önce, kompozit yapımında epoksi matris kullanımının ve silan uygulanmasının EM ölçümlerini nasıl değiştirdiği açıklanmıştır. Benzer yapısal değişiklikler, yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma kullanılan çok katmanlı yapılar ile benzer sonuçlar oluşturmuştur. Silanlama uygulanmamış kompozitin EM soğurma değerleri, takviye yapısının kompozit oluşturulmadan önceki değerlerine göre daha düşüktür. Bu silanlama uygulamasının, altın metali ve aramid elyaf dokuma kullanılarak elde edilen kompozitlerde olumlu sonuçlar verdiğini göstermektedir. Altın kaplama ile yüzey modifikasyonu ve aramid elyaf dokuma kullanılarak elde edilen prototip kompozitler 34 GHz üzerinde %90 EM dalga soğurumu göstermiş ve frekans aralığının neredeyse tamamında %75 EM dalga soğurma yüzdesinin üstünde sonuçlar vermiştir.



**Şekil 4.99.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.

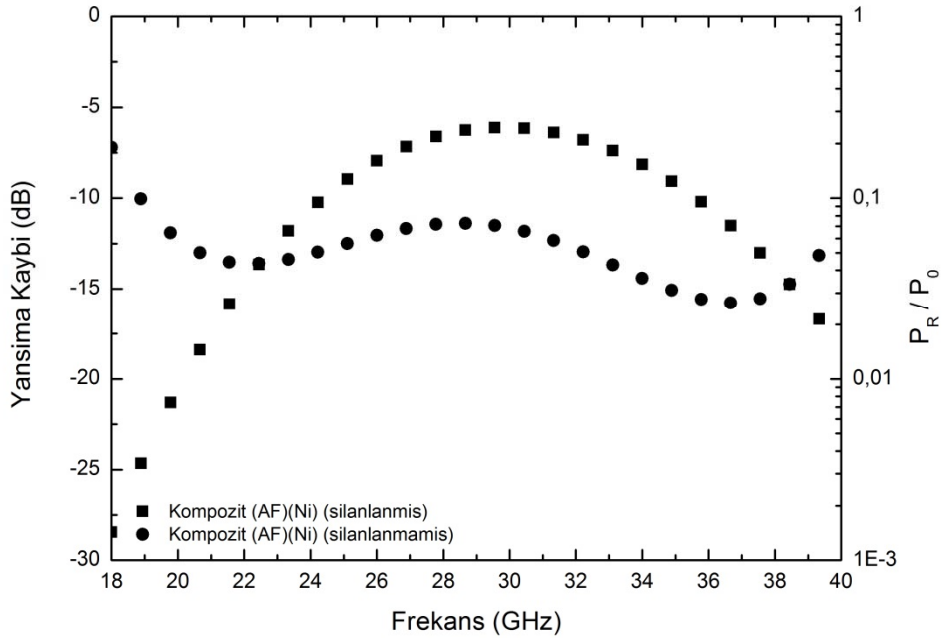
Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalarla takviye edilen prototip kompozitler üzerinde ek bir çalışma daha yapılmıştır. Bu çalışmada; kompozitlerin arkasına tamamen yansıtıcı olan metal plaka yerleştirilmiş ve EM dalga yansıtma özellikleri incelenmiştir. Şekil 4.100'de bu çalışmanın sonuçları görülebilir. Şekilden de anlaşılacağı üzere silan uygulanmış kompozit yapı belirtilen frekans aralığında -7 dB ve -25 dB arasında sonuçlar vermiş; silan uygulanmamış kompozit ise -5 dB ve -10 dB arasında değişen sonuçlar vermiştir. Bu sonuç, silan uygulamasının, altın yüzey modifikasyonlu aramid elyaf dokuma takviyeli kompozitlerde tam yansıtıcı durumda EM dalga yansıma yüzdesini azalttığını göstermektedir. Silan uygulaması yapılmamış kompozit frekans aralığının tamamında %10 ve üstünde EM dalga yansıması göstermiştir. Ancak, silan uygulaması yapılmış kompozit belirtilen frekans aralığının neredeyse tamamında %1 ve %10 arasında EM dalga yansıması göstermiştir.



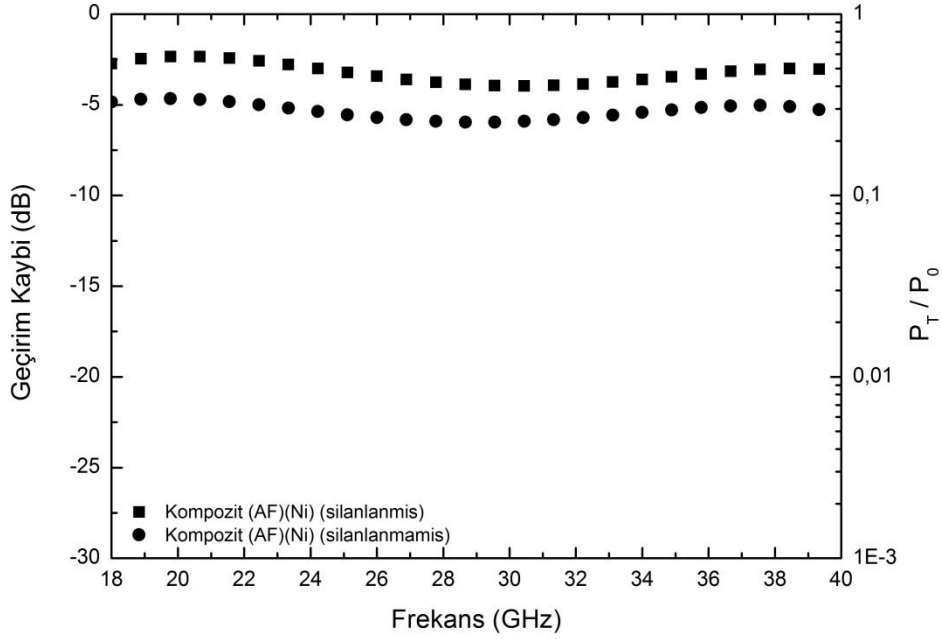
**Şekil 4.100.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin arkasında metal ile birlikte EM dalga yansıtma kaybının frekans ile değişimi.

#### 4.3.4.4 Yüzeyi Nikel Metali ile Modifiye Edilmiş Aramid Elyaf Dokumalar Kullanılarak Elde Edilen Prototip Kompozitin Elektromanyetik Ölçümleri ve Sonuçları

Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalarla oluşturulan çok katmanlı yapılarla takviye edilen kompozit yapıların EM özellikleri serbest uzay ölçüm tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Yapılan ölçümler 4 ayrı sonuç şeklinde sunulmuştur. Bu sonuçlarda, silanlı ve silansız olarak oluşturulan prototip kompozitlerin sırasıyla EM dalga yansımaya kaybı, geçirim kaybı, soğurma yüzdesi ve arkalarında tamamen yansıtıcı yüzey bulunarak ölçülen yansımaya kaybı değerleri gösterilmiştir. Şekil 4.101 ve Şekil 4.102'de, bahsedilen kompozitlerin EM dalga yansımaya ve geçirim kaybının frekans ile değişimi incelenebilir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere kompozitler arasında silanlanmış olan frekans aralığının büyük bir kısmında daha çok yansımaya ve daha çok geçirim yapmaktadır. Kompozitlerden silanlı olan -5 dB ve -25 dB arasında, silanlanmamış olan ise -7 dB ve -15 dB arasında EM dalga yansımaya göstermektedir. Bu kompozitlerin silanlanmış olanı -3 dB ve çevresinde, silanlanmamış olanı ise -5 dB ve çevresinde EM dalga geçirim kaybı göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere silan uygulanmış kompozit daha çok geçirim yapmaktadır.

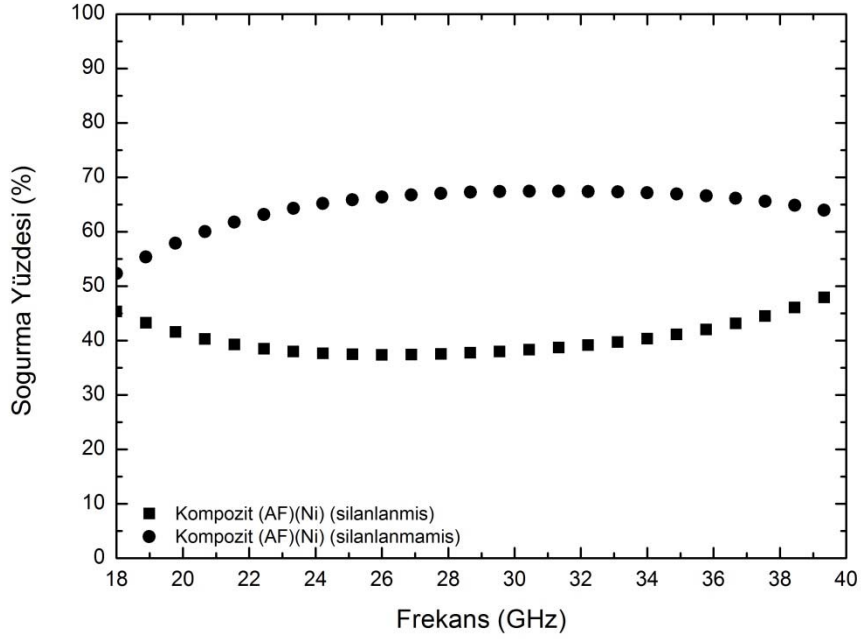


**Şekil 4.101.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi.



**Şekil 4.102.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.

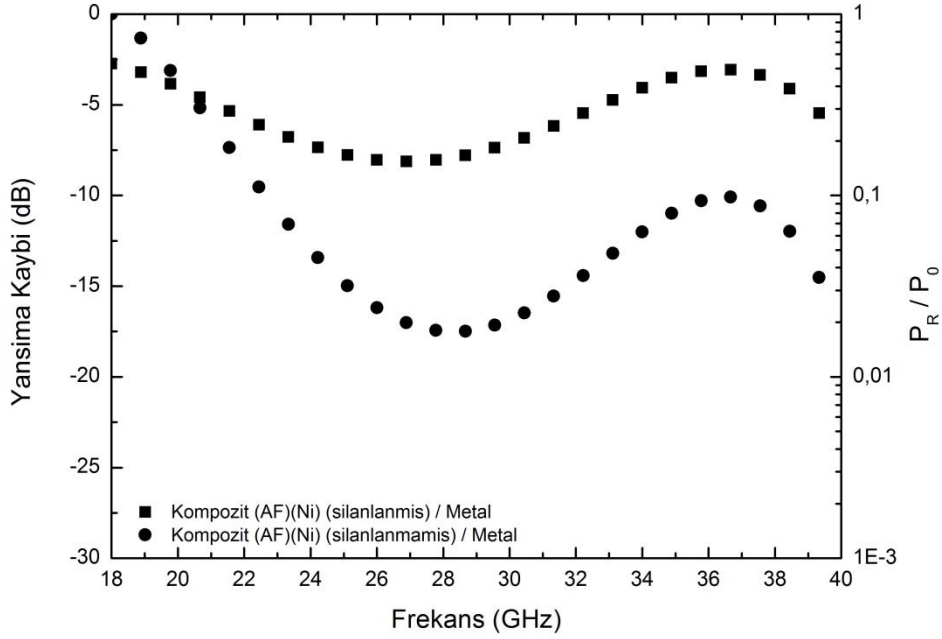
EM dalga yansıma ve geçirim sonuçları kullanılarak elde edilen EM dalga soğurma yüzdesi Şekil 4.103'te görülebilir. Silanlama uygulanmamış kompozit, 18-40 GHz frekans aralığının tamamında daha yüksek EM dalga soğurma yüzdesi göstermiştir. Bu sonuç, silan uygulamasının aramid elyaf dokuma ve nikel metali kullanılan EM dalga soğurucu kompozitlerin EM davranışlarını daha az etkili hale getirdiğini göstermektedir. Daha önce, kompozit yapımında epoksi matris kullanımının EM ölçümlerini nasıl değiştirdiği açıklanmıştır. Benzer yapısal değişiklikler, yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokuma kullanılan çok katmanlı yapıları ile benzer sonuçlar oluşturmuş; ancak, EM dalga soğurma yüzdesi açısından az da olsa gelişme görülmesini sağlamıştır. Silanlama uygulanmış kompozitin değerleri ise, çok katmanlı takviye yapısının kompozit oluşturulmadan önceki değerlerine göre EM dalga soğurumu bakımından düşüktür. Bu silanlama uygulamasının, nikel metali ve aramid elyaf dokuma kullanılarak elde edilen kompozitlerde olumlu sonuçlar vermediğini göstermektedir. Nikel metali ile yüzey modifikasyonu ve aramid elyaf kullanılarak elde edilen prototip kompozitler azami %65 EM dalga soğurumuna ulaşmış ve frekans aralığının tamamında %55'in üzerinde EM dalga soğurma göstermiştir.



**Şekil 4.103.** Yüzeyi nikel metal ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.

Yüzeyi nikel metal ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalar ile takviye edilen prototip kompozitler üzerinde ilave bir çalışma daha yapılmıştır. Bu çalışmada; kompozit yapıların arkasına tamamen yansıtıcı olan metal plaka yerleştirilmiş ve EM dalga yansıtma özellikleri incelenmiştir. Şekil 4.104'te bu çalışmanın sonuçları görülebilir. Şekilden de anlaşılacağı üzere silan uygulanmış kompozit yapı belirtilen frekans aralığında 0 dB ve -17 dB arasında sonuçlar vermiş; silan uygulanmamış kompozit ise -2 dB ve -7 dB arasında değişen sonuçlar göstermiştir. Bu sonuç, silan uygulamasının, nikel yüzey modifikasyonlu aramid elyaf dokuma takviyeli kompozitlerde tam yansıtıcı durumda EM dalga yansıtma performansını azalttığını göstermektedir. Silan uygulanmamış kompozit frekans aralığının önemli bir kısmında %10 ve altında EM dalga yansıtması göstermiştir. Silan uygulaması yapılmış kompozit ise belirtilen frekans aralığının neredeyse tamamında %20 ve üstünde EM dalga yansıtması göstermiştir.





**Şekil 4.104.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalar ile elde edilen silanlanmış ve silanlanmamış prototip kompozitlerin arkasında metal ile birlikte EM dalga yansıma kaybının frekans ile değişimi.

#### 4.4 Literatürde Bulunan Diğer Radar Absorblayıcı Malzemeler (RAM) ile Karşılaştırmalar

Proje kapsamında EM dalga soğurucu (radar absorblayıcı) malzemeler geliştirilmeye çalışılmış ve önemli derecede yüksek EM dalga soğurma kapasitesine sahip yapısal kapsamlı kompozitler tasarlanarak prototip olarak üretilmiştir. Bu bölümde, elde edilen yüksek EM dalga soğurma kapasitesini daha iyi ortaya koymak üzere literatürde bulunan diğer EM dalga soğurucu malzemeler ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Aşağıda son yıllarda literatüre girmeyi başarmış çalışmalar ile ilgili ayrıntılı bilgiler yer almaktadır.

Literatürde bulunan radar absorblayıcı malzeme (RAM) çalışmaları, çoğunlukla kompozit malzemeler üzerine yapılmıştır. Bu çalışmalar daha çok matris içerisinde nanometre mertebesinde küçük parçacıklar dağıtılması ile elde edilen nano-kompozit yapılar üzerinedir. Aynı zamanda, literatürde bulunan sonuçlanmış çalışmalar 2-18 GHz frekans aralığında yoğunlaşmakta, 18-40 GHz frekans aralığını kapsayan çalışmalara pek rastlanmamaktadır. Buna sebep olarak, projemizde belirtilen frekans aralığı (18-40 GHz) için yapılan çalışmaların genel olarak devam etmekte olması veya bu bant için elde edilen sonuçların ve bilgilerin savunma sanayi gibi kritik bir sektörde kullanılabilecek olması sebebi ile literatürde paylaşılmak

istenmemesi gösterilebilir. Aşağıda çalışma aralıkları tam olarak yürütülmekte olan proje ile örtüşmesine de EM dalga soğurucu kompozitler ile ilgili literatürde son dönemde yayınlanan çalışmaların başlıca sonuçları derlenmiştir.

Bu çalışmalardan en güncelinde, Bhattacharya, Sahoo ve Das, sol-jel tekniği ile hazırladığı TiO<sub>2</sub> ve MWCNT solüsyonu ile poliüretan matrisi birbirine karıştırarak nano-kompozit yapı elde etmiştir. Elde edilen nano-kompozit malzemenin EM dalga yansımaya kaybı X-band'ında (8-12 GHz) incelenmiş ve azami -42.53 dB EM dalga yansımaya kaybı 12.05 GHz frekansında elde etmiştir. Frekans aralığının geri kalanında ise -5 ile -10 dB arasında değişen EM dalga yansımaya kaybı elde edildiği görülmüştür.[Bhattacharya, 2013]

Bir diğer çalışmada, Z. Fang ve C. Fang, karbon köpükler kullanarak elde edilen kompozit yapıları, 4-15 GHz frekans aralığında EM yansımaya kaybı bakımından incelemiş ve 6.52 GHz üzerinde azami -21.57 dB olmak üzere, frekans aralığının tamamında -6 ve -8 dB arasında kalan EM dalga yansımaya kaybı elde etmiştir. Çalışmalarında kendileri de belirttiği üzere karbon köpüklerin geniş frekans aralıklarında radar absorblayıcı malzeme olarak kullanılmalılarının verimli olmadığı görülmüştür.[Fang, 2010]

Y.S. Liu et al. ise kolajen fiberler kullanılarak elde ettikleri Fe-Sa-CF radar absorblayıcı malzemelerin EM dalga yansımaya kaybını 1-18 GHz aralığında katman kalınlıklarını artırarak incelemiş ve 17 GHz üzerinde -20 dB, 11-18 GHz aralığında -15 dB altında ve geri kalan frekans aralığında -2 ve -10 dB arasında değişen EM dalga yansımaya kaybı elde etmiştir. Ayrıca katman kalınlığı arttıkça EM dalga yansımaya kaybında da artış gözlemlendiği raporlanmıştır.[Liu, 2011]

Yürütülmekte olan proje konusuyla kompozit içeriği bakımında benzerlik gösteren bir çalışmada, J.H. Oh et al., iletken karbon siyahı kullanarak elde edilen cam/epoksi kompozitin 8-12 GHz (X bandı) frekans aralığında EM dalga yansımaya kaybını incelemiştir. Bu frekans aralığı içinde 2,4 GHz frekansında -10 dB EM dalga yansımaya kaybı elde ettikleri kaydedilmiştir. Karbon siyahı kullanılarak elde edilen kompozit malzemenin, X bandı üzerinde RAM olarak kullanılabilmesi gösterilmiştir.[Oh, 2004].

Kompozit RAM alanındaki başka bir çalışmada, T.H. Ting, epoksi matris içerisine MnO<sub>2</sub> dağıtarak elde ettiği kompozit yapının elektromanyetik davranışını 2-18 GHz ve 18-40 GHz frekans aralıklarında farklı kalınlıklarda numuneler kullanarak incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre; bu kompozit yapının etkin olarak EM dalga absorblama yapabildiği frekansların değiştirebildiği görülmüştür. Ayrıca, bu çalışmada 2-18 GHz frekans aralığı içerisinde tek frekans değeri için -25 dB ve 18-40 GHz frekans aralığı içinde -18 dB EM dalga

yansımaya kaybı değeri elde edilmiştir. 2-40 GHz frekans aralığının tümünde ise elde edilen EM dalga yansımaya kaybının -2 ve -8 dB arasında seyrettiği kaydedilmiştir.[Ting, 2009]

T.H. Ting, R.P. Yu ve Y.N. Jau, epoksi matris içerisine dağıtılmış NiZn ferrit kaplanmış polianilin kompozit yapısı ile 2-18 GHz ve 18-40 GHz frekansları arasında EM dalga absorblama çalışmaları yapmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kompozit içerisinde polianilin miktarı değişiminin EM dalga absorblama frekansları değişimi üzerinde etkili olduğu açıklanmıştır. Ayrıca, bu çalışmada 2-18 GHz frekans aralığında 14 GHz frekansı üzerinde -20 dB, 18-40 GHz frekans aralığında ise 28 GHz üzerinde -8 dB olmak üzere en yüksek EM dalga yansımaya kayıpları elde edilmiştir. Belirtilen frekans aralıklarının tümünde EM dalga yansımaya kayıplarının genel olarak -2 dB ile -10 dB arasında değiştiği elde edilen diğer bilgiler arasındadır [Ting, 2011].

Bu alanda yapılan bir diğer çalışma kapsamında, I.M. De Rosa, A. Dinescu, et al., nikel kaplı kısa karbon fiber, MWCNT ve matris olarak poliyester kullanarak elde ettikleri kompozitlerde karbon fiber ve MWCNT miktarı değişiminin EM davranışlarını değiştirdiğini göstermiştir. 8-18 GHz frekans aralığında yapılan EM dalga yansımaya kaybı incelemelerine göre, belirtilen frekans aralığında çok yüksek (-80 dB' ye kadar çıkan) EM dalga yansımaya kaybı değerleri ölçülmüştür. Ancak bu aşırı yüksek değerlerin sadece tek frekans için geçerli olduğu görülmüştür. Geri kalan frekans bandının tamamında 0 ve -10 dB değerleri arasında değişen EM dalga yansımaya kaybı elde edildiği kaydedilmiştir [De Rosa, 2010].

Son olarak, J.B. Kim, S.K. Lee ve C.G. Kim, karbon siyahı, karbon nanofiber ve MWCNT kullandıkları e-cam/epoksi kompozitleri ile EM dalga absorblama çalışmaları yapmışlardır. Çalışmaları 0,5-18 GHz frekans aralığını kapsamakta olup çalışmalarının sonuçlarını, 2-3 mm kalınlığında kullanılan kompozit yapılarla -10 dB ve altı EM dalga yansımaya kaybı değerlerine 3 GHz genişliğe sahip frekans bandında ulaşıldığını belirterek özetlemiştir [Kim, 2008].

Literatür içerisinde taranmış ve projemizdeki sonuçlara kapsam bakımından benzerliği yüksek olan çalışmalara yukarıda yer verilmiştir. Bu çalışmaların tümünde elde edilen EM dalga yansımaya kaybı sonuçları, üretilen kompozit yapı arkasında tam yansıtıcı yüzey ile elde edilen EM dalga yansımaya sonuçları içermektedir. Literatür araştırmaları kapsamında incelenen çalışmalarının çok küçük bir kısmında 18-40 GHz frekans aralığında çalışmalar yapılmıştır. Bu frekans aralığında yapılan çalışmaların yetersizliği, belirtilen frekans aralığında kullanılan cihazların ilerleyen yıllarda güncel teknolojiye adapte olabileceğine ve özellikle bu frekanslarda savunma sanayine yönelik araştırmalar sürdüğünden elde edilen bilgilerin gizliliğine verilen öneme bağlanmıştır.

Yürütülen projede elde edilen sonuçların aksine; literatürde elde edilen EM dalga yansımaya sonuçları çalışılan tüm frekans aralığını kapsamamakta ve çoğunlukla sadece tek bir frekans değeri için elde edilen EM dalga yansımaya üzerine yoğunlaşmaktadır. Projemizde kullanılan kompozit yapı içerisinde yüzeyleri metalik kaplamalarla modifiye edilmiş beş farklı elyaf dokuma katmanı olması, geniş frekans bandı içinde EM dalga soğurumu sağlayarak, proje kapsamında elde edilen EM dalga soğurma değerlerini, literatürde bulunan diğer kompozit yapılar için sunulan sonuçların önüne geçirmektedir. Bu, üzerinde çalışılan projenin özgünlüğünü ortaya çıkaran bir sonuçtur. Çalışmalarımızın kullanımı her geçen gün artan 18-40 GHz frekans aralığında olması, çok farklı amaçlar doğrultusunda gelişen radar teknolojisi ile birlikte özellikle savunma sanayi alanı bakımından, yürütülen projenin önemini gözler önüne sermektedir.

Yukarıda sunulduğu gibi, literatürde bulunan benzer çalışmalar belirli frekans değerlerinde elde edilen minimum EM dalga yansımaya üzerine yoğunlaşmaktadır. Üzerinde çalışılan projede ise, çalışılan frekans aralığının tümünde EM dalga yansımaya ve soğurumunun belirli bir seviye üzerine çıkartılması hedeflenmiştir. Literatürde elde edilen sonuçlar ile proje çıktıları arasında karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla aşağıda sunulan Tablo 4.3 ve 4.4'ten faydalanılabilir. Bu tablolarda sırasıyla yüzeyleri modifiye edilmiş 5 dokuma katmanı (epoksi matrise gömülmemiş) ve bu 5 dokuma katmanı kullanılarak elde edilen kompozit yapıların, seçilen frekanslarda elde edilen EM dalga soğurum ve yansımaya değerleri görülebilir.

Tablolarda "5 Katman" ve "Kompozit" sütunları altında sırasıyla kullanılan metal ve takviye malzeme türleri belirtilmektedir. Ayrıca, kullanılan yapılarda silanlama çalışması uygulanan yapılar da belirtilmiştir. Tablolarda 20, 30, 40 GHz frekanslarında gösterilen EM dalga soğurum ve yansımaya değerleri, numunelerin çalışılan frekans aralığında EM dalga karşısında gösterdikleri davranışı belirtmek amacıyla seçilmiş olup, bunların yanında ulaşılabilen en yüksek soğurma ve en düşük yansımaya değerlerine de yer verilmiştir. Tablo 4.4'te görülebileceği üzere üretilen kompozit yapılar arasında en yüksek EM dalga soğurumunu Au metali ile yüzeyi modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalar kullanılan ve silanlama uygulanmış numune göstermiştir. Bunun yanında, aynı numune arkasında tam yansıtıcı olarak metal plaka kullanıldığında %0,3'e kadar inen EM dalga yansımaya değeri göstermiştir. Üretilen kompozit yapılar arasında en önemli sonucu bu numune göstermiş olup, projenin sonuç bakımından başarısının bu numune ile elde edilen değerlerin literatürde belirtilen diğer çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılarak ortaya konması anlamlı görülmektedir.

**Tablo 4.3.** Epoksi içine gömülmemiş yüzey modifikasyonlu 5 dokuma katmanlı yapıların arkalarında metal olmayan ve olan durumlarda seçilmiş frekanslarda gösterdikleri EM dalga soğurma ve yansıma değerleri.

5 Dokuma Katmanı	20 GHz	30 GHz	40 GHz	Max. %Abs. @ # GHz	5 Dokuma Katmanı	Arkalarında metal ile birlikte elde edilen değerler			
						20 GHz	30 GHz	40 GHz	Min. %Ref. @ # GHz
Ag / Cam	% 54	% 80	% 89	% 89 @ 40	Ag / Cam	% 11	% 5	% 4	% 3 @ 36
Ag / Cam (2)*	% 38	% 70	% 75	% 75 @ 40	Ag / Cam (2)*	% 10	% 10	% 10	% 3 @ 36
Au / Cam	% 55	% 81	% 91	% 92 @ 37	Au / Cam	% 8	% 10	% 10	% 2 @ 36
Au / Cam (si)	% 18	% 75	% 91	% 93 @ 38	Au / Cam (si)	% 13	% 8	% 10	% 7 @ 32
Ni / Cam	% 60	% 80	% 86	% 86 @ 40	Ni / Cam	% 20	% 20	% 18	% 18 @ 40
Ni / Cam (si)	% 65	% 80	% 80	% 81 @ 29	Ni / Cam (si)	% 7	% 12	% 12	% 1 @ 18
Au / Aramid	% 67	% 90	% 93	% 95 @ 35	Au / Aramid	% 28	% 3	% 5	% 3 @ 30
Au / Aramid (si)	% 74	% 80	% 90	% 95 @ 38	Au / Aramid (si)	% 8	% 8	% 4	% 4 @ 40
Ni / Aramid	% 50	% 55	% 55	% 55 @ 40	Ni / Aramid	% 20	% 30	% 25	% 9 @ 37
Ni / Aramid (si)	% 40	% 48	% 55	% 55 @ 40	Ni / Aramid (si)	% 20	% 40	% 12	% 11 @ 38
Al / Cam	% 23	% 67	% 75	% 75 @ 40	Al / Cam	-	-	-	-

\* Ag ile yüzeyi modifiye edilen ve kontrollü oksitlenmeye bırakılan numunelerin değerleri (si) Aynı isim ile gösterilen yapıların silanlanmış numunelerinin değerleri

**Tablo 4.4.** Tüm kompozit yapıların arkalarında metal olmayan ve olan durumlarda seçilmiş frekanslarda gösterdikleri EM dalga soğurma ve yansıma değerleri.

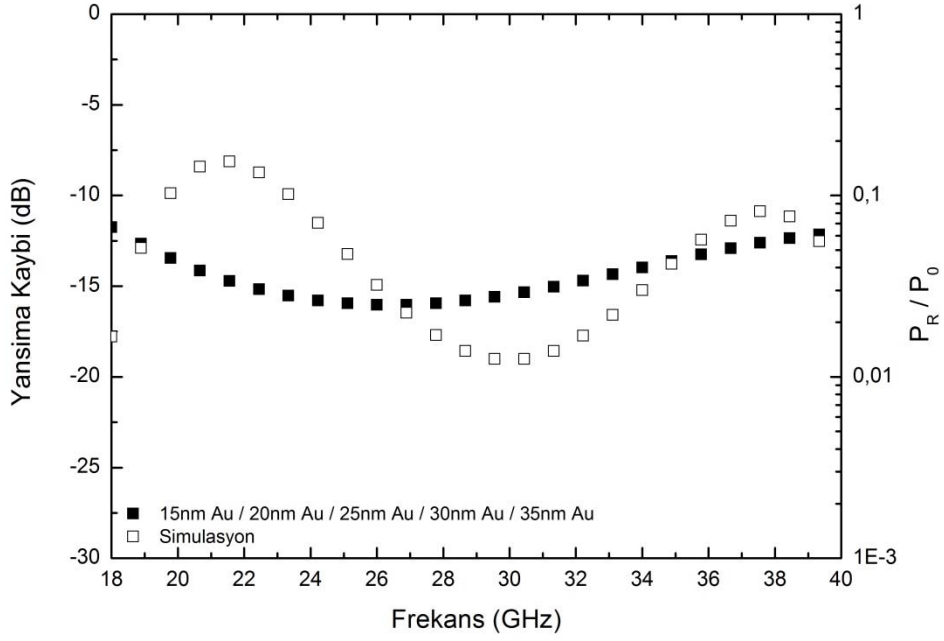
5 Dokuma Katmanlı Kompozit	20 GHz	30 GHz	40 GHz	Max. Abs. @ #GHz	5 Dokuma Katmanlı Kompozit	Arkalarında metal ile birlikte elde edilen değerler			
						20 GHz	30 GHz	40 GHz	Min. Ref. @ #GHz
Au / Cam	% 33	% 58	% 67	% 70 @ 37	Au / Cam	% 40	% 15	% 9	% 8 @ 23
Au / Cam (si)	% 40	% 60	% 70	% 78 @ 37	Au / Cam (si)	% 50	% 2	% 3	% 2 @ 28
Ni / Cam	% 56	% 52	% 60	% 60 @ 40	Ni / Cam	% 5	% 7	% 10	% 4 @ 22
Ni / Cam (si)	% 70	% 85	% 89	% 91 @ 36	Ni / Cam (si)	% 9	% 30	% 23	% 9 @ 20
Au / Aramid	% 66	% 65	% 65	% 66 @ 20	Au / Aramid	% 24	% 20	% 10	% 10 @ 40
Au / Aramid (si)	% 75	% 82	% 89	% 93 @ 37	Au / Aramid (si)	% 4	% 20	0.3%	% 0.3 @ 40
Ni / Aramid	% 57	% 65	% 64	% 65 @ 30	Ni / Aramid	% 50	% 2	% 3	% 2 @ 28
Ni / Aramid (si)	% 42	% 38	% 50	% 50 @ 30	Ni / Aramid (si)	% 50	% 20	% 22	% 18 @ 27

(si) Aynı isim ile gösterilen yapıların silanlanmış numuneleri ölçümleri

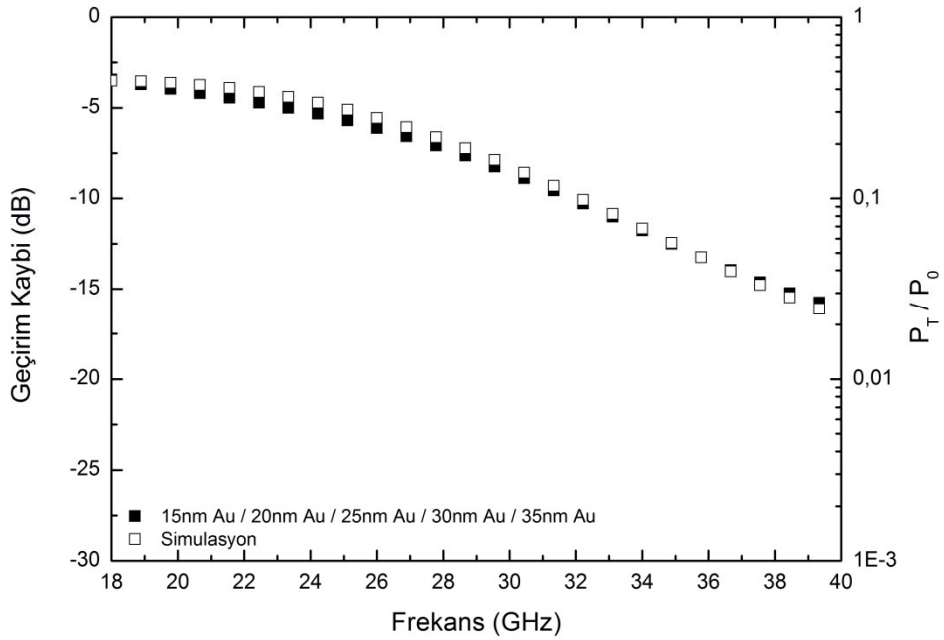
#### 4.5 EM Dalga ile Etkileşim Simülasyon Çalışmaları

Yüzeyi farklı metaller ile modifiye edilen cam elyaf ve aramid elyaf dokumaların tek katmanlı ve çok katmanlı yapılar halinde elektromanyetik dalgalar ile etkileşimi serbest uzay ölçümleri kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında EM dalga soğurucu kompozitlerde kullanılması uygun olabilecek yapılara ilişkin bilgi birikimi oluşturulmuştur. Bu çalışmaların yanında, yapıların EM dalga ile etkileşim özelliklerini kestirmek üzere simülasyon çalışmaları da yapılmıştır.

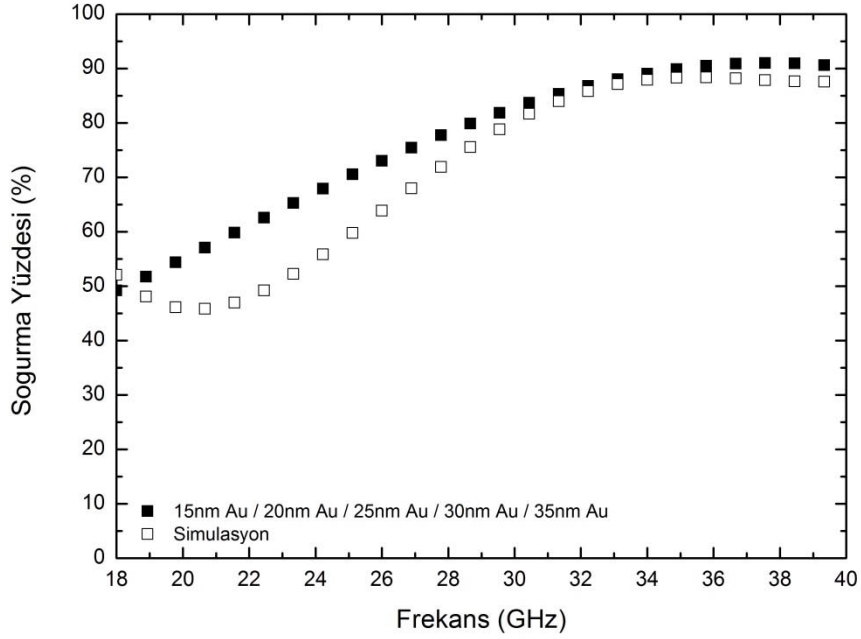
Simülasyon ile elde edilen bazı sonuçlar aşağıda verilen şekiller yardımı ile incelenmiştir. Şekil 4.105-107'de yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş çok katmanlı cam elyaf dokuma yapıların deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga yansıma, geçirim ve soğurma yüzdesi değerleri verilmiştir. Bu sonuçlara göre, EM dalga yansıma bakımından deneysel ve simülasyon değerleri birbiri ile örtüşmemektedir. Ancak, elde edilen yansıma kaybı değerleri dB cinsinden kıyaslanabilir bir aralıkta değişim göstermektedir. Öte yandan, EM dalga geçirim değerleri incelendiğinde deneysel sonuçlar ile simülasyon değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu sonuç, simülasyon ile çok katmanlı elyaf dokuma yapılarının EM dalga geçirim davranışlarının oldukça doğru bir biçimde kestirilebildiğini göstermektedir. Nihai olarak, EM dalga yansıma ve geçirim değerleri kullanılarak hesaplanan EM dalga soğurma değerleri, bu sonuçlara paralel olarak deneysel ve simülasyona dayalı verilerin bazı frekans aralıklarında birbirine çok yakın olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, simülasyon çalışmalarıyla çok katmanlı elyaf dokuma yapılarının EM dalga soğurma davranışının düşük bir hata seviyesiyle kestirilebileceğini göstermektedir. Dolayısıyla, EM dalga soğurma bakımından etkin birçok katmanlı takviye yapısı kombinasyonu belirlenmesi faaliyetlerinde, elyaf cinsi ve dokuma tipi ile uygulanan metalik kaplama malzemesi, kaplama kalınlığı ve katmanların sayısı-dizilimi gibi çok sayıda değişken barındıran deneysel çalışmaların öncesinde simülasyon çalışmalarının güvenli bir biçimde yapılabilmesi ortaya konmuştur.



**Şekil 4.105.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş 5 cam elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi.



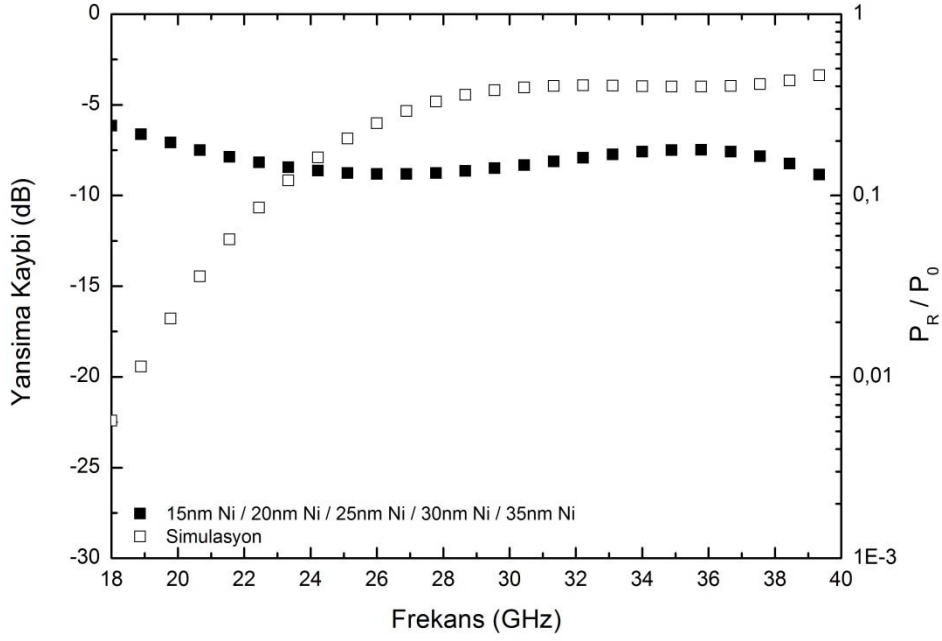
**Şekil 4.106.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş 5 cam elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.



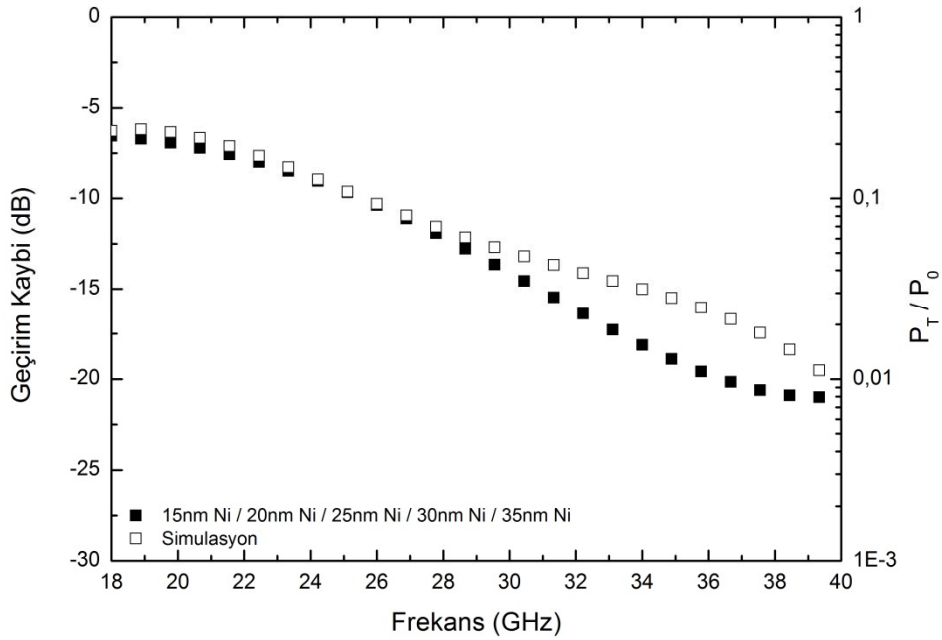
**Şekil 4.107.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş 5 cam elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.

Şekil 4.108-110'da yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş çok katmanlı cam elyaf dokuma yapısının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga yansımaya, geçirim ve soğurma yüzdesi değerleri verilmiştir. Bu sonuçlara göre, EM dalga yansımaya bakımından deneysel ve simülasyon değerleri arasında 18-23 GHz frekans aralığında 15 dB'ye varan, 23-40 GHz aralığında ise yaklaşık 5 dB civarında olan bir fark görülmektedir. Ancak, EM dalga geçirim değerleri incelendiğinde deneysel sonuçlar ile simülasyon verilerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. EM dalga yansımaya ve geçirim değerleri kullanılarak elde edilen EM dalga soğurma değerleri bakımından deneysel sonuçlar ve simülasyon değerleri farklı bir trend takip ediyor olsa da, her iki durumda da soğurma yüzdesinin %50 ile %80 aralığında olduğu görülmektedir. Soğurma değerlerinde ortaya çıkan bu fark temel olarak yansımaya kaybı değerlerinin deneysel sonuçlarla doğru bir şekilde örtüşmemesinden kaynaklanmaktadır.

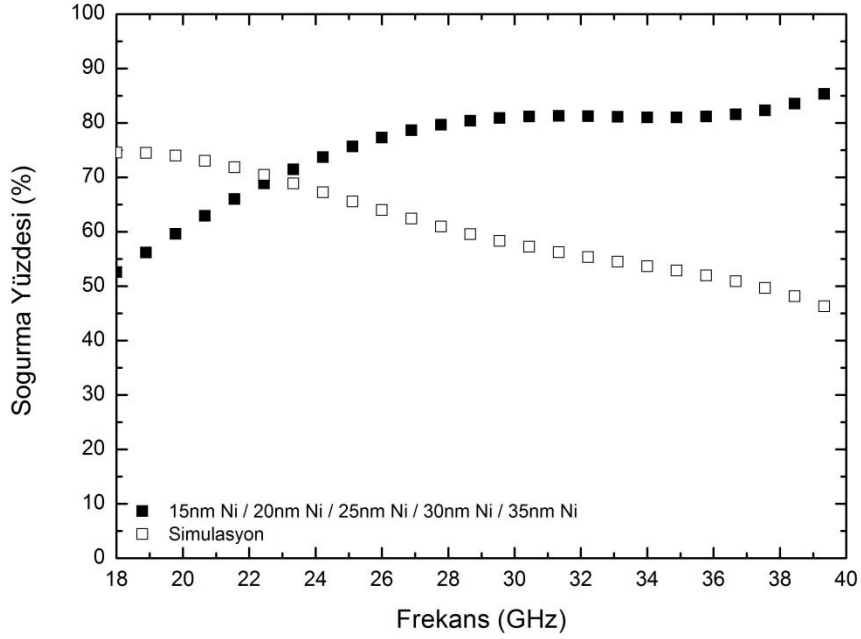




**Şekil 4.108.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş 5 cam elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi.

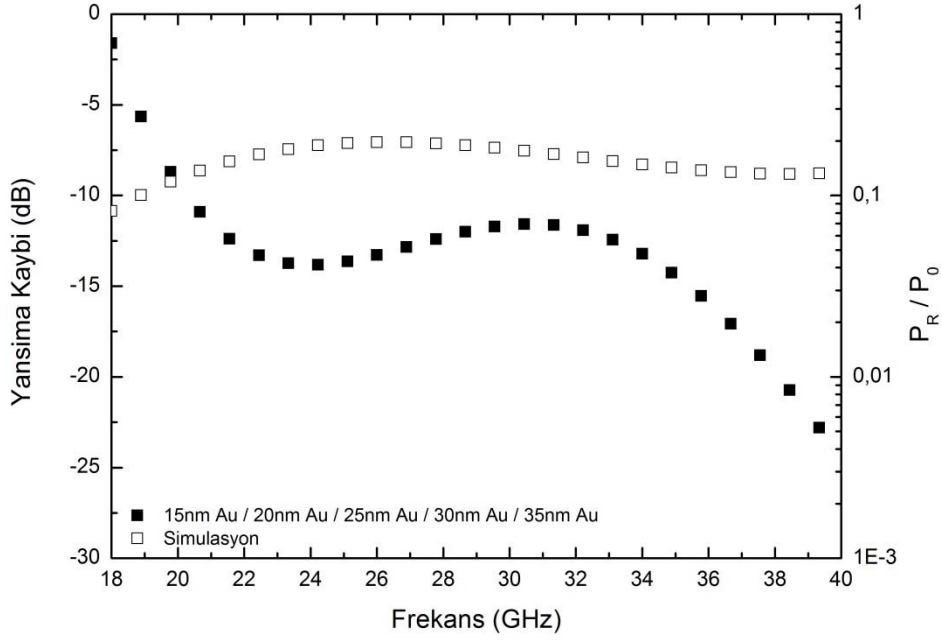


**Şekil 4.109.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş 5 cam elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.

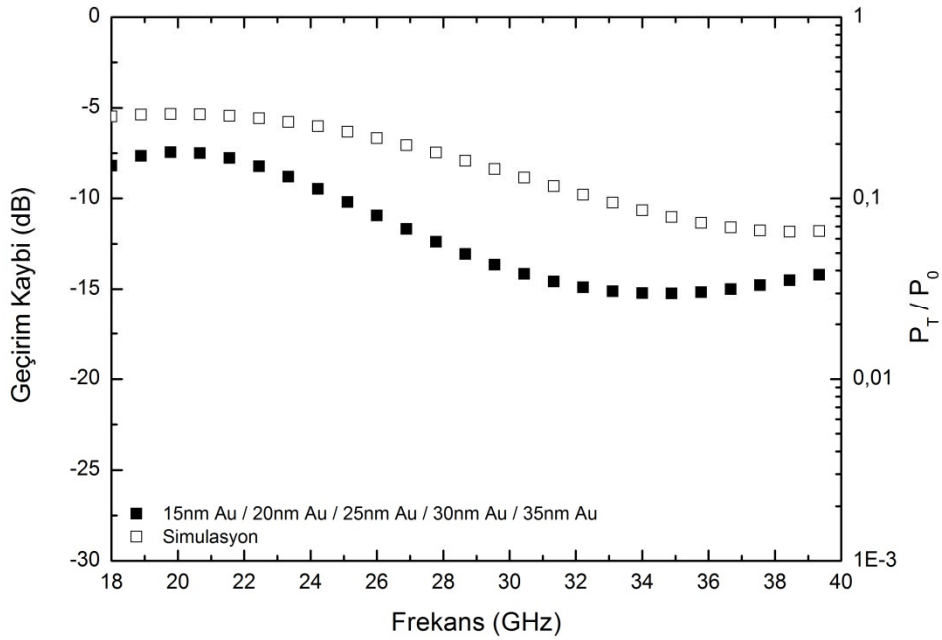


**Şekil 4.110.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş 5 cam elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.

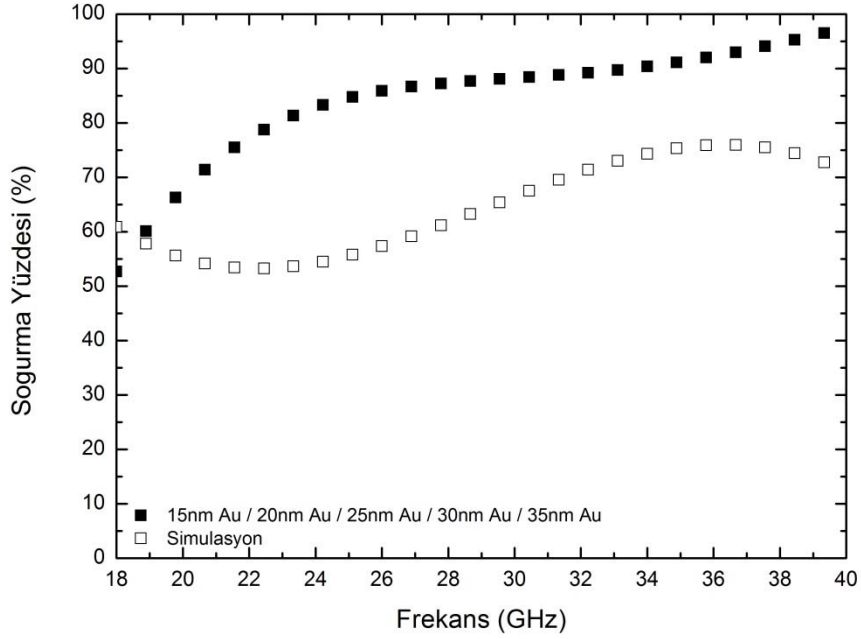
Şekil 4.111-113'te yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş çok katmanlı aramid elyaf dokuma yapısının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga yansımaya, geçirim ve soğurma yüzdesi değerleri verilmiştir. Bu sonuçlara göre, EM dalga yansımaya için deneysel ve simülasyon değerleri daha önce cam elyaf dokuma için sunulan sonuçlarda olduğu gibi birbirleriyle örtüşmemektedir. EM dalga geçirim incelendiğinde ise deneysel ölçümler ve simülasyon ile elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olmasa da aynı doğrultuda olduğu görülmektedir. Bu EM dalga yansımaya ve geçirim değerleri kullanılarak hesaplanan EM dalga soğurma değerleri bakımından deneysel sonuçlar ve simülasyon değerleri arasında ölçüm yapılan 18-40 GHz frekans bandında yaklaşık %20 fark bulunmaktadır. Simülasyon çalışmalarında hem EM dalga yansımaya hem de geçirim değerlerinin daha yüksek olması sebebi ile simülasyon soğurma değerlerin yaklaşık %20 seviyesinde düşük olmuştur.



**Şekil 4.111.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş 5 aramid elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga yansımaya kaybının frekans ile değişimi.

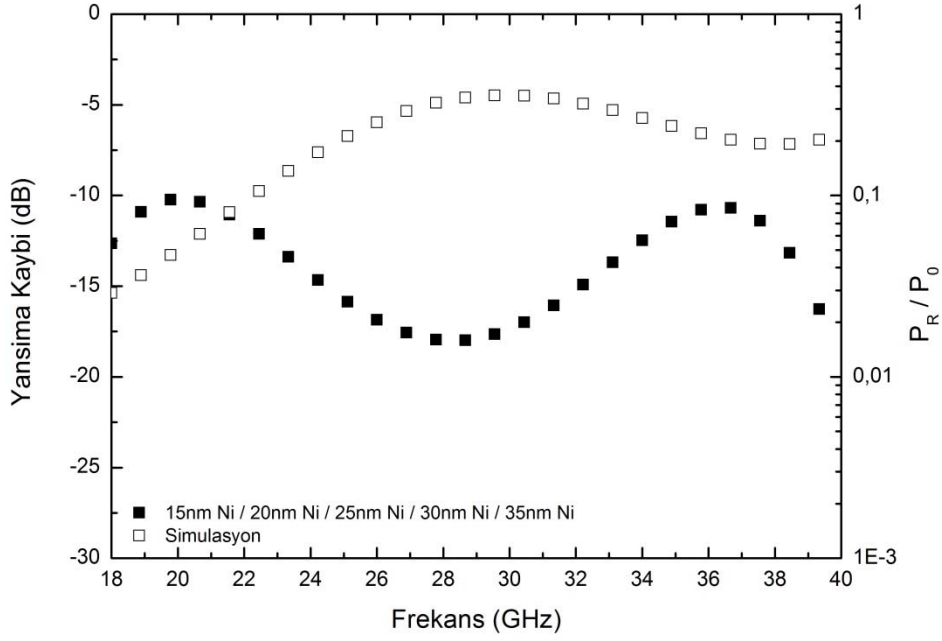


**Şekil 4.112.** Yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş 5 aramid elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.

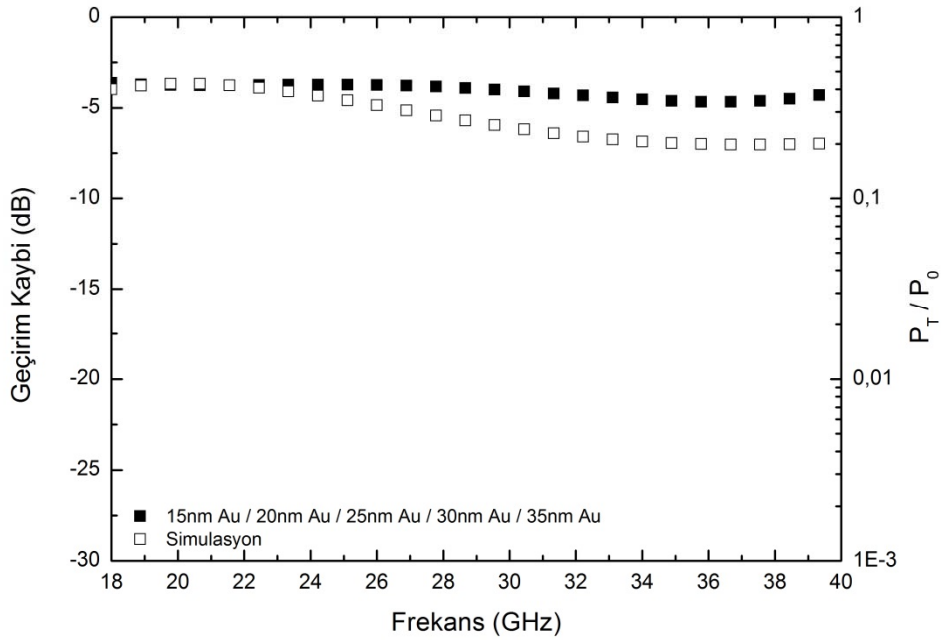


**Şekil 4.113.** Yüzeyi altın metal ile modifiye edilmiş 5 aramid elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalgası soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.

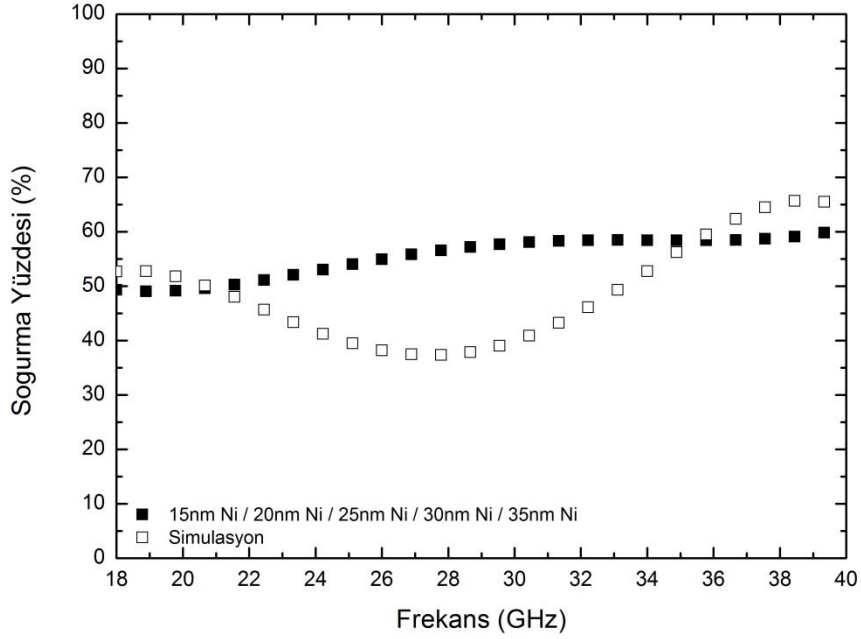
Şekil 4.114-115'te yüzeyi nikel metal ile modifiye edilmiş çok katmanlı aramid elyaf dokuma yapısının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalgası yansımaya, geçirime ve soğurma yüzdesi değerleri verilmiştir. Bu sonuçlara göre, EM dalgası yansımaya için deneysel sonuçlar ve simülasyon değerleri arasında tutarsızlık bulunmaktadır. Ancak, EM dalgası geçirim değerleri incelendiğinde deneysel ölçümler ile simülasyon ile elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu EM dalgası yansımaya ve geçirim değerleri kullanılarak hesaplanan EM dalgası soğurma değerleri bakımından deneysel sonuçlar ve simülasyon değerleri birbirine yakındır. Deneysel sonuçlar ile simülasyon verileri birbiriyle tam örtüşmese de, simülasyon çalışmalarında deneysel olarak elde edilebilecek soğurma yüzdesi aralığı yaklaşık olarak kestirilebilmekte ve ölçüm yapılan frekans bandında ortaya çıkacak soğurma trendi görülebilmektedir.



**Şekil 4.114.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş 5 aramid elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga yansima kaybının frekans ile değişimi.



**Şekil 4.115.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş 5 aramid elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga geçirim kaybının frekans ile değişimi.



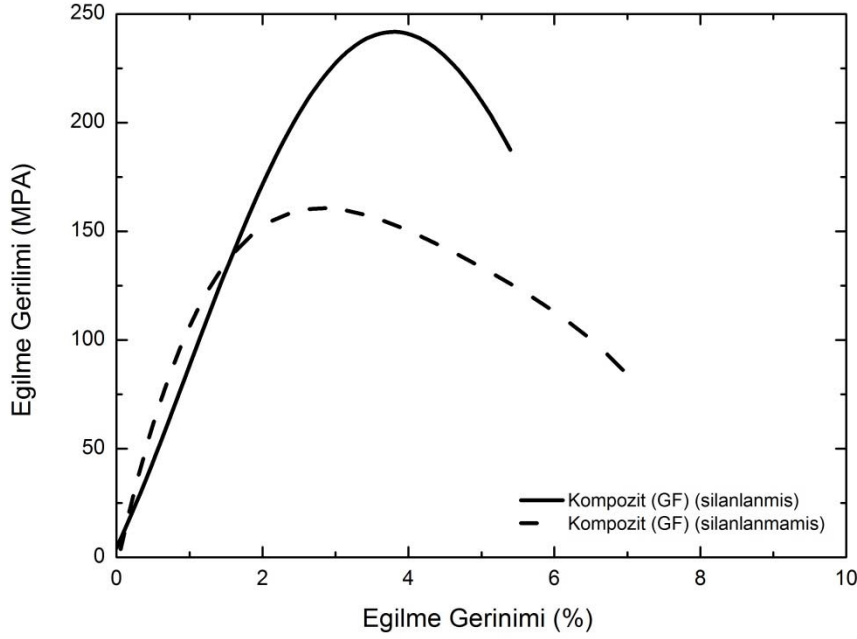
**Şekil 4.116.** Yüzeyi nikel metali ile modifiye edilmiş 5 aramid elyaf dokuma katmanlı yapının deneysel ve simülasyon ile elde edilmiş EM dalga soğurma yüzdesinin frekans ile değişimi.

#### 4.6 Mekanik Ölçümler ve Sonuçları

Proje kapsamında cam ve aramid elyaf dokumalar metalik kaplamalar ile modifiye edilmiş ve en yüksek elektromanyetik soğurma değerlerini sağlayan 4 adet çok katmanlı takviye konfigürasyonu prototip kompozit yapımında kullanılmıştır. Bu prototip kompozit yapıların elektromanyetik (EM) dalga yansıma, geçirim ve bunlara bağlı olarak soğurma özellikleri incelenmiştir. Yüzeyi altın ile modifiye edilmiş cam ve aramid elyaf dokumalarla yüzeyi nikel ile modifiye edilmiş cam ve aramid elyaf dokumalarla silanlı ve silansız olarak üretilen prototip kompozitlerin EM ölçümleri yapılmıştır. Bunun yanında, proje önerisinde belirtildiği üzere yüzeyleri metalik kaplamalarla modifiye edilen ve ayrıca yüzeyleri silan ile fonksiyonelleştirilen çok katmanlı dokuma yapılarıyla oluşturulan prototip kompozitlerin mekanik davranışları da incelenmiştir. Üretilen prototip kompozitlerin mekanik davranışlarını incelemek üzere üç noktadan eğme testleri yapılmıştır.

3 noktadan eğme testi sonuçları altı farklı karşılaştırma altında incelenmiştir. Bu karşılaştırmalar, Şekil 4.117-125'te verilen Eğme gerilimi (MPa) – Eğme gerinimi (%) grafikleri ile yapılmıştır. Yapılan mekanik ölçümler sonucunda, Şekil 4.117'de yüzeylerine silanlama uygulanmış ve uygulanmamış ham cam elyaf dokumalar ile üretilen prototip kompozitin 3

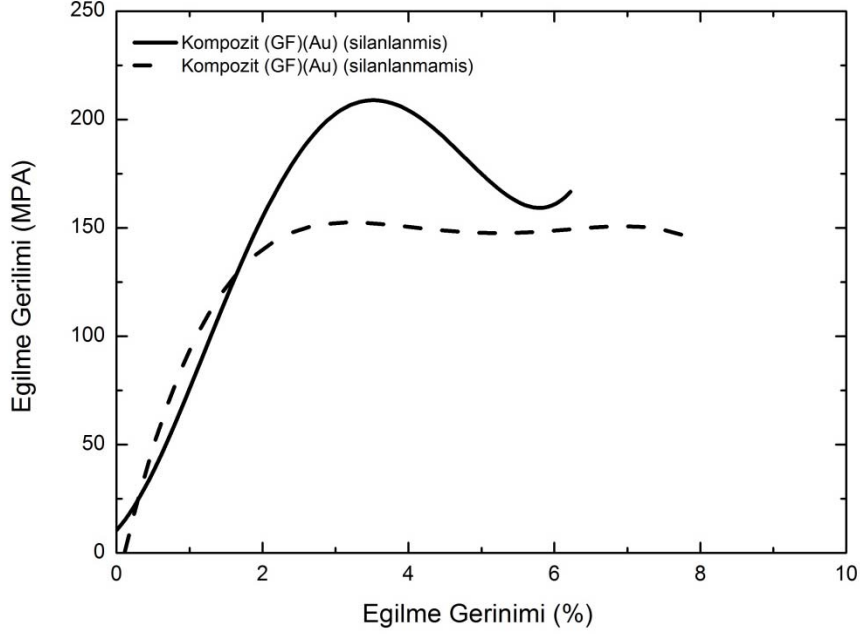
noktadan eğme testi sonucu verilmektedir. Buna göre silanlanmış kompozit yapı belirgin bir biçimde daha yüksek mekanik dayanım göstermiştir. Bu, silanlama uygulamasının, üzerinde metalik ince film olmayan ham cam elyaf dokumaların mekanik dayanımını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.



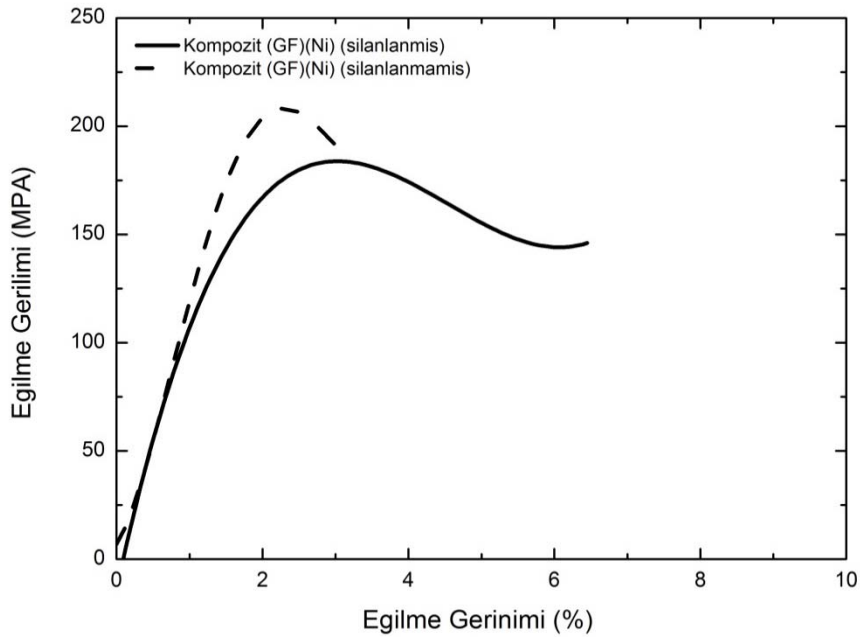
**Şekil 4.117.** Silanlanmış ve silanlanmamış ham cam elyaf dokumalar kullanılarak elde edilen kompozit yapıların 3 nokta eğme testi sonuçları.

Silanlama uygulanmamış ve uygulanmış yüzeyi altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar ile oluşturulan kompozitlerin mekanik davranışlarını gösteren grafik Şekil 4.118'de görülebilir. Sonuçlara göre silanlama bu yapılar için de olumlu yönde etki göstermiştir. Altın metalinin kompozit yapısına dâhil olmasıyla mekanik dayanımında düşüş gözlenen kompozitlerde, silanlama uygulamasının mekanik dayanımı artırdığı görülmektedir. Şekil 4.119'da ise, nikel ile yüzey modifikasyonu yapılan cam elyaf dokumaların silanlama öncesi ve silanlama sonrası mekanik davranışlarını gösteren Eğme gerilimi (MPa) – Eğme gerinimi (%) grafiği görülebilir. Şekilden de anlaşılacağı üzere nikel metali, altın metaline göre mekanik dayanım olarak benzer sonuçlar vermiştir. Ancak, silanlama uygulanan kompozit yapı mekanik dayanım açısından daha düşük değer göstermiştir. Bunun yanında, 3 noktadan eğme testi sırasında silanlanmamış kompozit taşıyabileceği maksimum yükü taşıdıktan hemen sonra kırılmış; ama silanlanmış kompozit taşıyabileceği maksimum yüke ulaştıktan sonra bir önceki numuneye göre neredeyse 2 kat fazla gerinime ulaşmıştır. Nikel metali ve cam elyaf kumaş

kullanılan kompozitler için bu sonuç, silanlamanın kompozit malzemeyi görece daha az mukavemetli olsa da daha tok bir yapıya kavuşturduğunu göstermiştir.



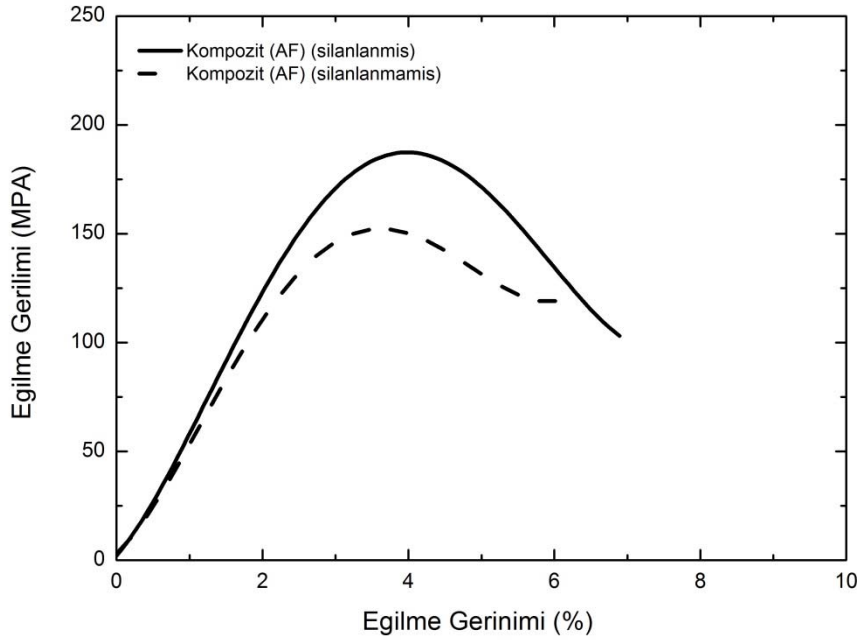
**Şekil 4.118.** Silanlanmış ve silanlanmamış, yüzeyleri altın metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar kullanılarak elde edilen kompozit yapıların 3 noktadan eğme testi sonuçları.



**Şekil 4.119.** Silanlanmış ve silanlanmamış, yüzeyleri nikel metali ile modifiye edilmiş cam elyaf dokumalar kullanılarak elde edilen kompozit yapıların 3 noktadan eğme testi sonuçları.



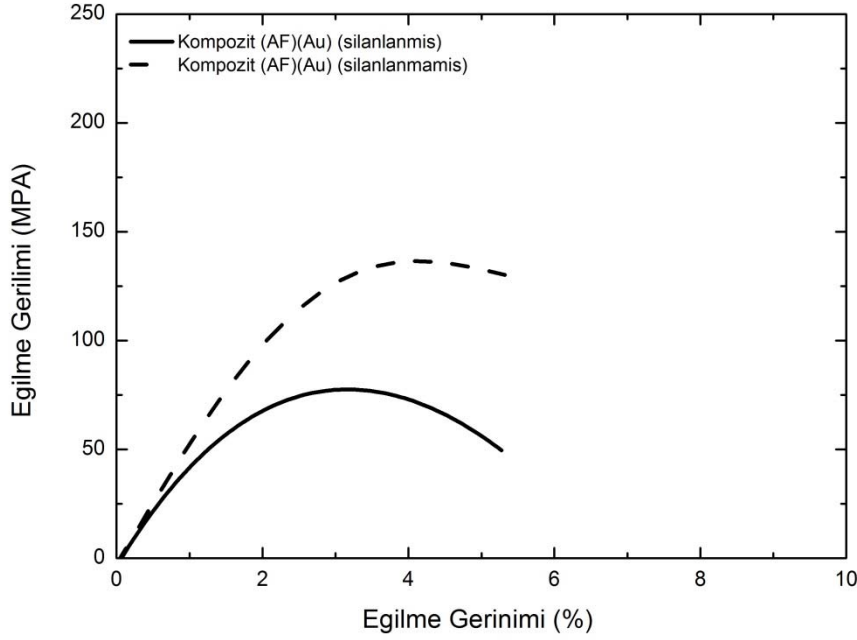
Cam elyaf dokumalar ile elde edilen kompozitlerin mekanik testlerinden sonra, aramid elyaf dokuma ile elde edilen kompozitlerin testlerine geçilmiştir. Şekil 4.120-122’de bu sonuçlar Eğme gerilimi (MPa) – Eğme gerinimi (%) grafikleri ile gösterilmiştir. Şekil 4.120’de görülen yüzeyi metalik filmler ile kaplanmamış, silanlanmış ve silanlanmamış ham aramid elyaf dokumalar ile oluşturulan kompozitlerin 3 noktadan eğme testi sonuçlarına göre, silanlanlama sonucunda kompozit malzemenin hem mukavemetinde hem de kırılma geriniminde artış sağlanmıştır. Ancak, sonuçlar ham cam elyaf dokuma kullanılan kompozitler ile karşılaştırıldığında aramid elyaf dokuma içeren kompozitlerin daha düşük mukavemet değerleri gösterdiği görülmektedir.



**Şekil 4.120.** Silanlanmış ve silanlanmamış ham aramid elyaf dokumalar kullanılarak elde edilen kompozit yapıların 3 nokta eğme testi sonuçları.

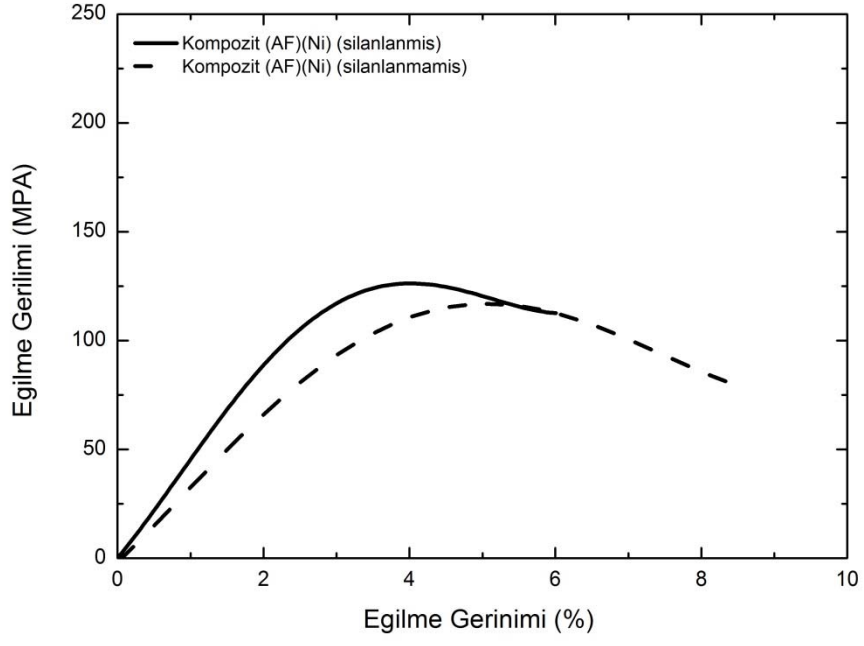
Silanlanmış ve silanlanmamış, yüzeyi altın metali ile modifiye edilen aramid elyaf dokumaların kullanıldığı kompozitlerin mekanik dayanım sonuçları ise Şekil 4.121’de görülebilir. Bu sonuçlara göre, aramid elyaf dokuma kullanılan kompozitlerin mekanik dayanımı yüzeyleri altın ile modifiye edilince belirgin bir şekilde düşüş göstermektedir. Özellikle, altın ile modifiye edilmiş ve silan uygulaması yapılmış dokumalar ile oluşturulan kompozitlerde çok düşük mekanik dayanım değerleri elde edilmiştir. Bunun yanında, silan uygulaması yapılmamış altın metal modifiyeli aramid elyaf dokumalı kompozit, Şekil 4.120’de görülen silanlanmamış ham

aramid dokuma ile oluşturulan kompozite yakın mekanik dayanım göstermiştir. Ancak, silanlanmış ham aramid elyaf dokuma içeren kompozite göre, silanlanmış altın modifiyeli aramid elyaf içeren kompozitin oldukça düşük mekanik dayanım gösterdiği görülmüştür. Bu, aramid elyaf dokuma, altın metali, silan ve epoksi matris şeklindeki bir sıralamanın mekanik dayanım için uyumsuz bir dizilim olduğunu göstermiştir.



**Şekil 4.121.** Silanlanmış ve silanlanmamış, yüzeyleri altın metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalar kullanılarak elde edilen kompozit yapıların 3 noktadan eğme testi sonuçları.

Benzer mekanik testler, silanlanmış ve silanlanmamış, yüzeyi nikel metali ile modifiye edilen aramid elyaf dokumalı kompozit yapılar için de yapılmıştır. Bu mekanik testlerden elde edilen sonuçlara göre (Şekil 4.122), kompozit yapıya nikel metali eklenmesi mekanik dayanımı ham ya da altın ile modifiye edilmiş dokumalar ile oluşturulan kompozitlere kıyasla azaltmıştır. Ancak, yapının içine altın metali eklendiğinde ortaya çıkan silanlı ve silansız numunelerdeki mekanik dayanım farkı, yapısına nikel metali eklenen kompozitlerde gözlemlenmemiştir. Nikel modifiyeli aramid dokumalı kompozitler arasında, silanlanmış olan kompozit yapı her ne kadar daha yüksek mekanik dayanım göstermiş olsa da, silansız olan kompozit yapının mekanik dayanımına yakın değerler vermiştir. Bu, aramid elyaf, nikel metali ve epoksi matris içeren kompozitlerin mekanik dayanımları için silanlama uygulamasının çok önemli rol oynamadığını göstermektedir.



**Şekil 4.122.** Silanlanmış ve silanlanmamış, yüzeyleri nikel metali ile modifiye edilmiş aramid elyaf dokumalar kullanılarak elde edilen kompozit yapıların 3 noktadan eğme testi sonuçları.

## 5. SONUÇ

“Mikrodalga Frekanslarında Etkin Elektromanyetik Dalga Soğurucu Kompozitlerin Tasarımı ve Geliştirilmesi” konulu proje kapsamında yürütülen çalışmalarda kaydedilen önemli aşamalar ve elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Proje çalışmalarında kullanılmak üzere Serbest Uzay Ölçüm düzeneği tasarlanmış, imal edilmiş, proje sürecinde alımı yapılan Ağ Analizörü ile birleştirilip istenilen EM ölçüm sistemi kurularak kullanıma sokulmuştur.
- Serbest uzay ölçüm düzeneği kurulumu tamamlandıktan sonra elektromanyetik ölçümler için kullanılacak kalibrasyon olarak LRL (Line-Reflect-Line) kalibrasyon yöntemi belirlenmiştir.
- Yüzey modifikasyonu için kullanılacak olan metallerin farklı kalınlıklardaki yüzey elektrik iletkenlikleri incelenmiş ve kalınlık arttıkça bu değerlerin kütle iletkenlik sayısı değerlerine yaklaştığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç, çalışılan film kalınlıkları aralığında kaplama iletkenliğinin kontrol edilebildiğini ve dolayısıyla EM dalga soğurucu kompozit yapılar için uygun olduğunu göstermiştir.
- Silikon altlık üzerinde kaplanan 15, 20 ve 25 nm altın metalinin mikro yapısı FESEM ve AFM kullanılarak incelenip film yapısını oluşturan tanecik boyutları belirlenmiş ve her kalınlık için sürekli film yapısına yaklaşıldığı tespit edilmiştir. İnce film kalınlığı ile artan elektrik iletkenliği de yüzeyde bir sürekliliğin sağlandığını ve bunun da kaplama kalınlığı ile arttığını desteklemektedir.
- AFM ile elde edilen sonuçlar uygulanan kaplama parametreleri ile ortaya çıkan kaplama kalınlıklarının ısı buharlaştırma sisteminde bulunan kuvars kristal ile belirlenenden %20 farklı olduğunu göstermiştir.
- Elyaf dokumaların yüzeyine uygulanan metalik ince film ODTÜ Merkez Laboratuvarı bünyesinde bulunan İnce Film XRD’si kullanılarak kristal yapısı bakımından incelenmiştir. Elde edilen altın ince filmlerin amorf olmadıkları ve kristal yapı gösterdiği belirlenmiştir.

- Tek katmanlı yüzeyi gümüş, altın ve nikel metalleri ile nanometre mertebesinde kaplanan cam elyaf ve aramid elyaf dokumaların elektromanyetik ölçümleri yapılmış ve film kalınlığı arttıkça yansımanın arttığı; aynı zamanda, geçirgenliğin azaldığı görülmüştür.
- Tek katmanlı yüzeyi gümüş, altın ve nikel metalleri ile nanometre mertebesinde kaplanan cam elyaf ve aramid elyaf dokumaların yansıma değerleri ile yüzey elektrik iletkenliği arasında doğru orantı, geçirim değerleri arasında ise ters orantı olduğu saptanmıştır.
- Çok katmanlı yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilen cam elyaf dokumaların elektromanyetik özellikleri incelenmiş ve beş dokuma katmanlı yapının yüksek frekans değerlerinde %90, 18-40 GHz frekans aralığının önemli bir kısmında ise %70'in üstünde EM dalga soğurumu yaptığı tespit edilmiştir.
- Çok katmanlı yüzeyi gümüş metali ile modifiye edilen cam elyaf dokumaların elektromanyetik özellikleri yapının arkasına tam yansıtıcı metal yüzey konularak incelenmiş ve belirtilen frekans aralığının çok önemli bir kısmında %10'un altında EM dalga yansıması göstermiştir.
- Tek katmanlı ve çok katmanlı yapılarda kullanılan gümüş metalinin kısa süre içerisinde açık hava şartlarında oksitlendiği ve dolayısıyla azalan yüzey iletkenliğine bağlı olarak yapıların EM özelliklerinin olumsuz yönde değiştiği gözlemlenmiştir.
- Çok katmanlı yüzeyi gümüş metali ile kaplanan (oksitlenmesine kontrollü olarak izin verilen) cam elyaf dokumaların elektromanyetik özellikleri incelenmiş ve oksitlenme öncesi %90 soğurum sağlayan beş dokuma katmanlı yapının %70 EM dalga soğurma değerlerine düştüğü ve aynı yapının arkasına tam yansıtıcı metal yüzey konularak EM özellikleri incelendiğinde ise belirtilen frekans aralığında %20'ye yükselen EM dalga yansıma yaptığı belirlenmiştir.
- Çok katmanlı yüzeyi altın metali ile modifiye edilen cam elyaf dokumaların elektromanyetik özellikleri incelenmiş ve beş katmanlı yapının belirli frekans aralığında %90, 18-40 GHz frekans aralığının önemli bir kısmında ise %80 EM dalga soğurumu sağladığı saptanmıştır.
- Çok katmanlı yüzeyi altın metali ile modifiye edilen cam elyaf dokumaların elektromanyetik özellikleri yapının arkasına tam yansıtıcı metal yüzey konularak incelenmiş ve belirtilen frekans aralığının çok önemli bir kısmında %10'un altında EM dalga yansıması göstermiştir.

- Çok katmanlı yüzeyi nikel metali ile modifiye edilen cam elyaf dokumalarının elektromanyetik özellikleri incelenmiş ve beş katmanlı yapının belirli frekans aralığında %85, 18-40 GHz frekans aralığının önemli bir kısmında ise %80 EM dalga soğurma sağladığı belirlenmiştir.
- Çok katmanlı yüzeyi nikel metali ile modifiye edilen cam elyaf dokumalarının elektromanyetik özellikleri yapının arkasına tam yansıtıcı metal yüzey konularak incelenmiş ve belirtilen frekans aralığının tamamında %20'nin altında EM dalga yansımaları göstermiştir.
- Tek katmanlı yüzeyi alüminyum metali ile nanometre mertebesinde modifiye edilen cam elyaf dokumalarının elektromanyetik ölçümleri yapılmış, kaplanan numunelerin istenilen film kalınlıkları ile elde edilemedikleri anlaşılmıştır.
- Çok katmanlı yüzeyi alüminyum metali ile kaplanan cam elyaf dokumalarının elektromanyetik özellikleri incelenmiş ve beş katmanlı yapının belirli frekans aralığında %75, 18-40 GHz frekans aralığının tamamında ise %35 gibi düşük EM dalga soğurma değerleri sağladığı görülmüştür.
- Çok katmanlı yüzeyi altın metali ile modifiye edilen aramid elyaf dokumalarının elektromanyetik özellikleri incelenmiş ve beş katmanlı yapının belirli frekans aralığında %95, ölçüm yapılan tüm frekans aralığının önemli bir kısmında ise %80 EM dalga soğurduğu tespit edilmiştir.
- Çok katmanlı yüzeyi altın metali ile kaplanan aramid elyaf dokumalarının elektromanyetik özellikleri yapının arkasına tam yansıtıcı metal yüzey konularak incelenmiş ve belirtilen frekans aralığının tamamında %20'nin altında EM dalga yansımaları göstermiştir.
- Çok katmanlı yüzeyi nikel metali ile kaplanan aramid elyaf dokumalarının elektromanyetik özellikleri incelenmiş ve beş katmanlı yapının en çok %60, 18-40 GHz frekans aralığının tamamında ise %50 ve üstünde EM dalga soğurduğu görülmüştür.
- Çok katmanlı yüzeyi nikel metali ile kaplanan aramid elyaf dokumalarının elektromanyetik özellikleri yapının arkasına tam yansıtıcı metal yüzey konularak incelenmiş ve belirtilen frekans aralığının tamamında %30'un altında EM dalga yansımaları göstermiştir.
- Tek katmanlı ve çok katmanlı yüzeyi altın ve nikel metali ile kaplanan cam ve aramid elyaf dokumalarının elektromanyetik özellikleri yapıya silan uygulanarak incelenmiş ve

yapılan silanlama çalışmalarının modifiye edilmiş dokumaların EM dalga özelliklerinde çok önemli bir değişiklik yaratmadığı gözlemlenmiştir.

- Tek katmanlı yüzeyi altın metali ile nanometre mertebesinde kaplanan PET altlıkların elektromanyetik ölçümleri yapılmış ve elde edilen sonuçlara göre 20 nm ve daha kalın metalik filmlere sahip PET altlıkların EM dalgaları neredeyse tamamen yansıttığı ve neredeyse hiç EM dalga geçirimi yapmadığı gözlemlenmiştir.
- Tek katmanlı ve çok katmanlı yüzeyi altın metali ile nanometre mertebesinde kaplanan PET altlıkların elektromanyetik ölçümleri sonuçları doğrultusunda, kaplama altılığı olarak kullanılan malzemelerin yüzey topografisinin EM özelliklerine etkisi olduğu görülmüştür.
- Çok katmanlı yüzeyi altın ve nikel metali ile nanometre mertebesinde modifiye edilen cam ve aramid elyaf dokumaların elektromanyetik özelliklerinin deneysel olarak yapılar oluşturulmadan, EM dalga simülasyon çalışmaları ile bilgisayar ortamında kestirilmesi için çalışmalar yapılmıştır.
- Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre, çok katmanlı yapıların EM dalga geçirim davranışının simülasyon yardımı ile deneysel sonuçlara çok yakın olarak kestirilebildiği, ancak EM dalga yansıma davranışının ise çok katmanlı yapılarda görülen EM dalga girişim fenomeni sebebiyle simülasyon yardımı ile kestirilmesinin güç olduğu görülmüştür.
- Simülasyon çalışmalarında, kestirilen EM dalga yansıma ve geçirim sonuçları kullanılarak elde edilen EM dalga soğurma yüzdesi değerlerinin deneysel sonuçlarla örtüştüğü; ancak, bazı frekans bantlarında yapılan bu simülasyon çalışmalarının yetersiz kaldığı saptanmıştır.
- Elektromanyetik özellikleri silanlama öncesi ve sonrası belirlenen çok katmanlı elyaf dokuma yapıları ve epoksi matris vakum torbalama yöntemi kullanılarak bir araya getirilmiş ve prototip kompozitler üretilmiştir.
- Altın kaplama ile yüzey modifikasyonu uygulanmış cam elyaf dokumalardan oluşan çok katmanlı yapı ile takviye edilen prototip kompozitin silan içeren ve içermeyen hallerinin elektromanyetik özellikleri belirlenmiş ve 18-40 GHz frekans aralığında en çok %80 EM dalga soğurumu elde edilmiştir. Silanlamanın EM dalga soğurumunu üzerinde ufak bir düşüş yarattığı gözlemlenmiştir.

- Altın kaplama ile yüzey modifikasyonu uygulanmış cam elyaf dokumalardan oluşan çok katmanlı yapı ile takviye edilen prototip kompozitin silanlı ve silansız olarak elektromanyetik ölçümleri yapının arkasına tam yansıtıcı metal plaka konularak tekrarlanmış ve belirtilen frekans aralığının önemli bir kısmında %10 ve altında EM dalga yansımaları elde edilmiştir. Silanlama sonucunda kompozitin EM dalga yansımalarının arttığı gözlemlenmiştir.
- Nikel kaplama ile yüzey modifikasyonu uygulanmış cam elyaf dokumalardan oluşan çok katmanlı yapı ile takviye edilen prototip kompozitin silan içeren ve içermeyen hallerinin elektromanyetik ölçümleri yapılmış ve azami %90 olmak üzere belirtilen frekans aralığının önemli bir kısmında %80 ve üzerinde EM dalga soğurumu elde edilmiştir. Silanlamanın EM dalga soğurumunu üzerinde önemli bir düşüş yarattığı gözlemlenmiştir.
- Nikel kaplama ile yüzey modifikasyonu uygulanmış cam elyaf dokumalardan oluşan çok katmanlı yapı ile takviye edilen prototip kompozitin silan içeren ve içermeyen hallerinin elektromanyetik ölçümleri yapının arkasına tam yansıtıcı metal yüzey konularak tekrarlanmış ve %10'un altında EM dalga yansımaları elde edilmiştir. Silanlamanın EM dalga yansımalarını arttırdığı gözlemlenmiştir.
- Altın kaplama ile yüzey modifikasyonu uygulanmış aramid elyaf dokumalardan oluşan çok katmanlı yapı ile takviye edilen prototip kompozitin silan içeren ve içermeyen versiyonlarının elektromanyetik ölçümleri yapılmış ve en çok %93 olmak üzere 18-40 GHz frekans aralığının önemli bir kısmında %80 ve üzerinde EM dalga soğurumu sağlanmıştır. Silanlamanın bu kompozit yapı için EM dalga soğurumunu arttırdığı görülmüştür.
- Altın kaplama ile yüzey modifikasyonu uygulanmış aramid elyaf dokumalardan oluşan çok katmanlı yapı ile takviye edilen prototip kompozitin silan içeren ve içermeyen hallerinin elektromanyetik özellikleri yapının arkasına tam yansıtıcı metal plaka konularak incelenmiş ve silanlanan kompozit yapı için %20 ve altında EM dalga yansımaları elde edilmiştir. Silanlamanın bu kompozit yapı için EM dalga yansımalarını azalttığı gözlemlenmiştir.
- Nikel kaplama ile yüzey modifikasyonu uygulanmış aramid elyaf dokumalardan oluşan çok katmanlı yapı ile takviye edilen prototip kompozitin silanlı ve silansız hallerinin elektromanyetik özellikleri belirlenmiş ve azami %65 olmak üzere belirtilen frekans aralığının tamamında %55 ve üzerinde EM dalga soğurumu sağlanmıştır. Silanlamanın kompozitin EM dalga soğurumunu üzerinde düşüş yarattığı tespit edilmiştir.



- Nikel kaplama ile yüzey modifikasyonu uygulanmış aramid elyaf dokumalardan oluşan çok katmanlı yapı ile takviye edilen prototip kompozitin silan içeren ve içermeyen hallerinin elektromanyetik ölçümleri yapının arkasına tam yansıtıcı metal yüzey konularak tekrarlanmış ve 18-40 GHz frekans aralığının önemli bir kısmında %10 ve altında EM dalga yansımaları elde edilmiş, silanlamanın EM dalga yansımalarını arttırdığı gözlemlenmiştir.
- Prototip kompozitler üzerinde yapılan üç noktadan eğme testi sonuçlarına göre en yüksek mekanik dayanımı çok katmanlı cam elyaf dokuma yapısı ile takviye edilen ve silanlanan prototip kompozit göstermiştir.
- Elde edilen üç noktadan eğme testi sonuçları; cam ya da aramid elyaf dokumalara altın ya da nikel kaplama ile yüzey modifikasyonu uygulanmasının EM dalga soğurucu kompozitin mekanik dayanımını düşürdüğünü, ancak her ne kadar bu çalışma kapsamında optimizasyonu hedeflenmemiş olsa da silanlamanın bu negatif etkiyi minimize etmek için kullanılabileceğini göstermiştir.

Sonuç olarak, proje kapsamında Jaumann tip soğurucuların çok katmanlı yapısı ile kademeli soğurucuların elektrik direnci dağılımı gösteren yapısının birleştirildiği, kalınlığı karşılayıcı yüzeyden itibaren artan metalik yüzey modifikasyonlu elyaf dokuma katmanlardan oluşan, dolayısıyla yüzey direncinin katmanlar arasında kademeli olarak düşürüldüğü hibrid bir sistem geliştirilmiştir. Tamamlanan proje sonucunda, dış kaynaklardan malzeme ve/veya bilgi tedarikinde güçlükler bulunan EM dalga soğurucu kompozitler ile ilgili, ulusal bilgi birikimine katkı yapıldığı değerlendirilmektedir. Bunun yanında, bu proje kapsamında ilk kez sunulmuş olan fiber takviyeli kompozitlerde matris malzemesi yerine takviye malzemesi yüzeylerini modifiye etmeye dayalı özgün bir teknoloji ortaya konmuş olduğu değerlendirilmektedir. Dolayısıyla, proje sonucunda, üzerinde araştırma yürütülen stratejik konu kapsamında hem ulusal bilgi birikimi ve “know-how”a hem de dış kaynaklardan bağımsız teknolojik kabiliyete sahip olduğu kıymetlendirilmektedir.

## REFERANSLAR

- Amin M. B. and James J. R., *The Radio and Electronic Engineer*, Part1 pp. 209-218, (1981).
- Bhattacharya P., Sahoo S., Das C.K., "Microwave absorption behaviour of MWCNT based nanocomposites in X-band region," *Express Polymer Letters* Vol. 7(3), p. 212-223, (2013).
- Biscaro R. S., Nohara E. L., Peixoto G. G., Faez R., and Rezende M. C., "Performance evaluation of conducting polymer paints as radar absorbing materials," *IEEE*, pp. 355-358, (2003).
- Chin W. S. and Lee D. G., *Composite Structures*, Article in Press (2005).
- Chin W. S. and Lee D. G., "Development of the composite RAS (radar absorbing structure) for the X-band frequency range," *Compos. Struct.* , vol. 77, pp. 457-465, (2007).
- De Rosa I.M., Dinescu A. et al, "Effect of short carbon fibers and MWCNTs on microwave absorbing properties of polyester composites containing nickel-coated carbon fibers," *Composites Science and Technology* Vol. 70, p. 102-109, (2010).
- Fang Z., Fang C., "Novel radar absorbing Materials with broad absorbing band: Carbon foams," *Applied Mechanics and Materials* Vol. 26-28, p. 246-249, (2010).
- Ghasemi A., Hossienpour A., Morisako A., Saatchi A. and Salehi M., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Article in Press (2005).
- Huang C.-Y., Mo W.-W., and Roan M.-L., "Studies on the influence of double-layer electroless metal deposition on the electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon fiber/ABS composites," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 184, pp. 163-169, (2004).
- Kim J.B., Lee S.K., Kim C.G., "Comparison study on the effect of carbon nano materials for single-layer microwave absorbers in X-band," *Composites Science and Technology* Vol.68, p. 2909-2916, (2008).
- Knott E. F., Shaeffer J. F and Tuley M. T., "Radar Cross Section," *Artech House, Inc.*, 2nd edition (1993). Pp: 9-10
- Lee C. Y., Song H. G., Jang K. S., Oh E. J., Epstein A. J. and Joo J., *Synthetic Metals*, 1-3, 1346-1349 (1999).

Liu Y.S, Huang X., Guo P.P. et al, "Skin collagen fiber-based radar absorbing materials," Chinese Sci Bull Vol. 56, p.202–208, (2011),

Luo X. and Chung D. D. L.; Composites Part B: Engineering, 30 [3] 227-231 (1999).

Marshall S. V. and Skitek G. G., "Electromagnetic Concepts and Applications," Prentice Hall, New Jersey, 3rd Ed., (1990).

Neelkanta P. S., "Handbook of Electromagnetic Materials: Monolithic and Composite Versions and Their Applications," CRC-Press, (1995). Pp: 491, Chapter 22.

Oh J.-H., Oh K.-S., Kim C.-G., and Hong C.-S., "Design of radar absorbing structures using glass/epoxy composite containing carbon black in X-band frequency ranges," Composites Part B vol. 35, pp. 49-56, (2004).

Park K.-Y. , Lee S.-E. , Kim C.-G., and Han J.-H., "Fabrication and electromagnetic characteristics of electromagnetic wave absorbing sandwich structures," Compos. Sci. Technol. vol. 66, pp. 576-584, (2006).

Pinho M. S., Gregori M. L., Nunes R. C. R., and Soares B. G., "Performance of radar absorbing materials by waveguide measurements for X- and Ku-band frequencies," Eur. Polym. J., vol. 38, pp. 2321-2327, (2002).

Raymond A. Serway. Principles of Physics (2nd ed.). Fort Worth, Texas; London: Saunders College Pub. p. 602, (1998).

Rezende M. C., Martin I. M., Miacci M. A. S., and Nohara E. L., "Radar cross section measurements (8-12 GHz) of flat plates painted with microwave absorbing materials," IEEE, vol. 1, pp. 263-267, (2001).

Seo I. S., Chin W. S. and Lee D. G., Composite Structures 665, 33-542 (2004).

Shui X. P. and Chung D. D. L., "Submicron diameter nickel filaments and their polymer-matrix composites," J. Mater. Sci., vol. 35, pp. 1773-1785, (2000).

Ting T.H., "Effect of Manganese Oxide dispersion on the absorbing properties of manganese dioxide-epoxy composites," Journal of Chinese Chemical Society Vol. 56, p. 1225-1230, (2009).

Ting T.H., Yu R.P., Jau Y.N., "Synthesis and microwave absorption characteristics of polyaniline / NiZn ferrite composites in 2–40GHz," Materials Chemistry and Physics Vol. 126, p. 364-368, (2011).

- Tzeng S.-S. and Chang F.-Y., "EMI shielding effectiveness of metal-coated carbon fiber-reinforced ABS composites," *Mater. Sci. Eng., A*, vol. 302, pp. 258-267, (2001).
- Vinoy K. J., "Radar absorbing materials from theory to design and characterization," Kluwer Academic Publisher, (1996).
- Wang C. M. B. and Li Q., *Materials and Design*, 19 [3] 113-120 (1998).
- Wang C., Li L., Zhou J., Qi X., Yue Z. and Wang X., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, pp. 100-106 (2002).
- Weir W. B., "Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies," *IEEE*, pp. 33-36, (1974).
- Wen S. and Chung D. D. L., "Partial replacement of carbon fiber by carbon black in multifunctional cement-matrix composites," *Carbon*, vol. 45, pp. 505-513, (2007).
- Wu J. and Chung D. D. L., "Increasing the electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon fiber polymer-matrix composite by using activated carbon fibers," *Carbon*, vol. 40, pp. 445-447, (2002).
- Zhao N., Zou T., Shi C., Li J., and Guo W., "Microwave absorbing properties of activated carbon-fiber felt screens (vertical- arranged carbon fibers)/epoxy resin composites," *Mater. Sci. Eng., B*, vol. 127, pp. 207-211, (2006).

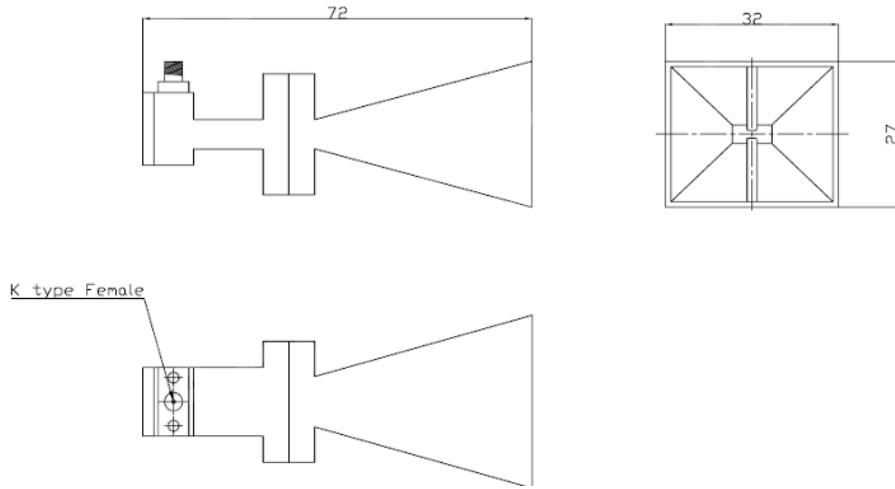
## EKLER

### A. Serbest Alan Ölçüm Düzenegi

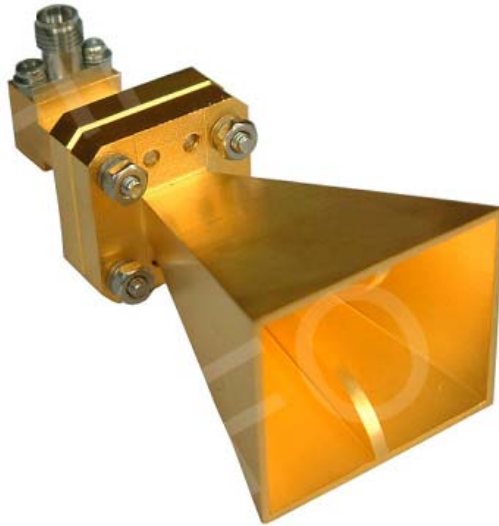
Dokumalar gibi yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip ya da kompozit malzemeler gibi yapısal inhomojeniteye sahip malzemelerin EM dalgalar ile etkileşimini, "Serbest Uzay" (Free- Space) ölçüm yöntemi ile daha hassas ve düşük hatalı şekilde ölçmek mümkündür. Buna sebep, bu yöntemde ölçüm yapılacak örneğin geometrisinin herhangi bir sınırlamaya tabi olmaması ve ölçüm yapılan yüzey alanının, malzemenin ortalama özelliklerinin ölçülmesine olanak sağlayabilecek kadar geniş olmasıdır. Bu sebeple, bu proje kapsamında yüzeyleri modifiye edilen tek katmanlı fiber dokumaların EM dalga geçirim ve yansıtma ve dolayısıyla soğurma özellikleri "Serbest Uzay" ölçüm yöntemiyle incelenecektir.

Serbest uzay ölçüm yönteminde ölçüm sisteminin sağlaması gerekli koşullar bakımından birkaç kritik husus bulunmaktadır. Bunlar; özellikleri ölçülen numunenin elektromanyetik dalganın geliş eksenine tamamen dik durması ve ölçüm sisteminde bulunan tüm komponentlerin çok hassas bir biçimde hizalanarak birbirlerine paralel olarak konumlanmasıdır. Bu koşullar serbest uzay sisteminde bulunan ikişer adet horn anten ve lens ile numune tutucunun hizalamasının, paralelliğinin ve mesafelerinin çok hassas olarak sağlanarak kontrol altında tutulacağı bir ölçüm düzenegi ihtiyacını doğurmaktadır.

Bu sebeple, proje başlangıç tarihinden itibaren, 18 – 40 GHz aralığındaki frekanslarda geliştirilecek malzemelerin elektromanyetik dalga geçirme, yansıtma ve dolayısıyla soğurma özelliklerini incelemek ve ölçmek amacıyla kullanılacak olan ve yukarıda belirtilen özellikleri sağlayacak bir serbest alan ölçüm sistemi tasarlanmıştır. Bu sistem içerisinde kullanılacak olan ve 18 – 40 GHz frekans aralığında elektromanyetik dalga yayan ve toplayan horn antenler araştırılmış ve iki adet horn anten sipariş edilmiştir. Antenlerin teslimatının 2012 yılı Haziran ayının ikinci yarısında olması beklenmektedir. Şekil E.1 ve Şekil E.2'de bu antenlerin sırasıyla şematik görüntüsü ve gerçek hali görülmektedir.



**Şekil E.1.** 18 – 40 GHz frekans aralığında elektromanyetik ölçümler için kullanılacak olan horn antenlerin ölçülendirilmiş şematik görüntüsü (birimler mm cinsindedir).



**Şekil E.2.** 18 – 40 GHz frekans aralığında kullanılacak olan horn anten.

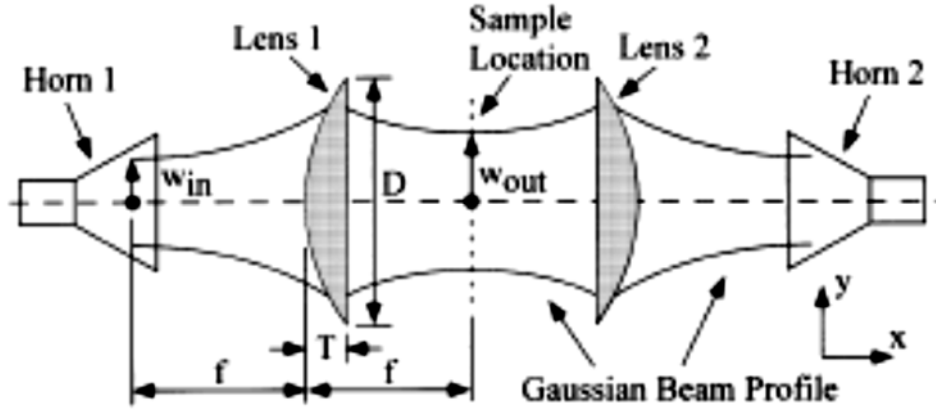
Serbest alan ölçüm düzeneğinde kullanılacak olan ve Şekil E.2’de görülen horn antenin genel özellikleri Tablo E.1’de verilmektedir.

**Tablo E.1.** 18 – 40 GHz frekans aralığında kullanılacak olan horn antenin özellikleri.

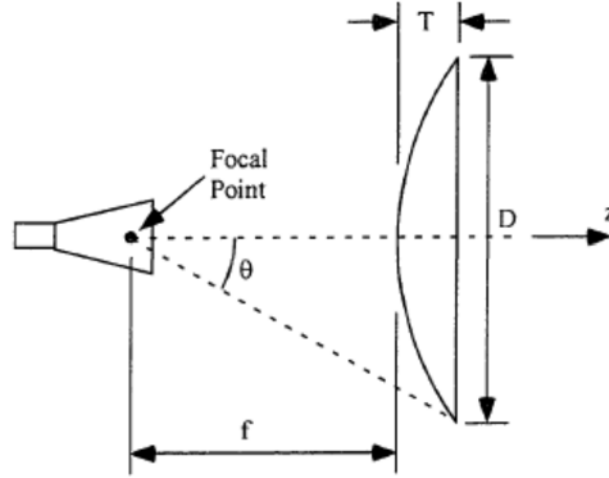
<b>Kutuplaşma</b>	Doğrusal
<b>Frekans Aralığı (GHz)</b>	18 – 40
<b>Kazanç (dB)</b>	14 - 18
<b>Güç Kullanım Kapasitesi (W)</b>	10
<b>VSWR (Voltaj için duran dalga oranı)</b>	2:1
<b>Bağlantı</b>	K- dışı
<b>Net Ağırlık (kg)</b>	0.075

Serbest alan ölçüm tekniğinde bu horn antenlerin yayacağı elektromanyetik dalgaların düzlemsel bir dalga önüne sahip olmaları ve yakın alan ölçümü yapabilmek amacıyla, horn antenlere uygun polimerik lenslerin tasarlanması ve işlenmesi gereklidir. Horn anten tarafından yayılan bu elektromanyetik dalgaların düz bir ön ile numune yüzeyine düşürülebilmesi, dielektrik katsayısı 18–40 GHz frekans aralığında çalışmak üzere ayarlanmış bir polimerik lens aracılığı ile mümkün olabilmektedir. Bu sebeplerle, serbest uzay ölçüm tekniğinde kullanılmak üzere polimerik bir lensin parametreleri hesaplanmış ve bu parametrelere göre 2 adet lens imal edilmiştir.

Bu tasarımda baz alınan horn anten, lens ve numune yerleşimi ve ölçülendirmesi Şekil E.3’te şematik olarak verilmektedir. Bu şekilde  $w_{out}$  üzerine ışımaya olacak numunenin etkin yarıçapını, D ve T sırasıyla polimerik lensin çapı ile en yüksek noktasındaki kalınlığını ve f de odaklama mesafesini göstermektedir. Ayrıca, Şekil E.4 polimerik lensin tasarlanmasında kullanılan değişkenleri detaylı olarak göstermektedir. Bu şekilde EM dalganın yarı yayılım açısı  $\theta$  ile matematiksel hesaplamalarda kullanılan z yönü görülmektedir.



**Şekil E.3.** Serbest uzay ölçüm düzeneği içindeki horn anten, lens ve numune yerleşimi ve ölçülendirmesinin şematik gösterimi. [N. Gagnon, Design and Study of a Free-Space Quasi-Optical Measurement System, Ph. D. Thesis in: School of Information Technology and Engineering University of Ottawa, 2002.]



**Şekil E.4.** Polimerik lensin tasarlanmasında kullanılan değişkenlerin detaylı gösterimi.

Aşağıda verilmekte olan hiperbolik denklem vasıtasıyla polimerik lensin ölçüleri ve geometrik şekli belirlenmiştir. Işıma yarıçapı  $w_{out}$ 'un 17,9 mm olarak kabul edilmesi ve temini öngörülen horn antenin geometrik özelliklerinin kullanılmasıyla sistemin odak mesafesi  $f$ 'nin 62,05 mm olması gerektiği tespit edilmiştir. Sistemde kullanılacak polimerik lens malzemesinin dielektrik sabiti,  $\epsilon_r$ , 2,6'dır. Bu verilerin aşağıdaki denkleme yerleştirilmesiyle polimerik lensin geometrisi oluşturulmuş ve bir katı model çizim programına aktarılmıştır. Oluşturulan polimerik lensin çapı,  $D$ , 62.05 mm ve kalınlığı,  $T$ , ise 10.39 mm olarak belirlenmiştir. Hesaplamaları yapılarak



modellenen polimerik lens CNC yardımıyla işlenmiştir. İşleme sonucunda ortaya çıkan polimerik lens Şekil E.5'te görülmektedir.

$$x^2 + y^2 = (\varepsilon_r - 1)z^2 + 2f(\sqrt{\varepsilon_r} - 1) \quad (\text{Denklem E.1})$$

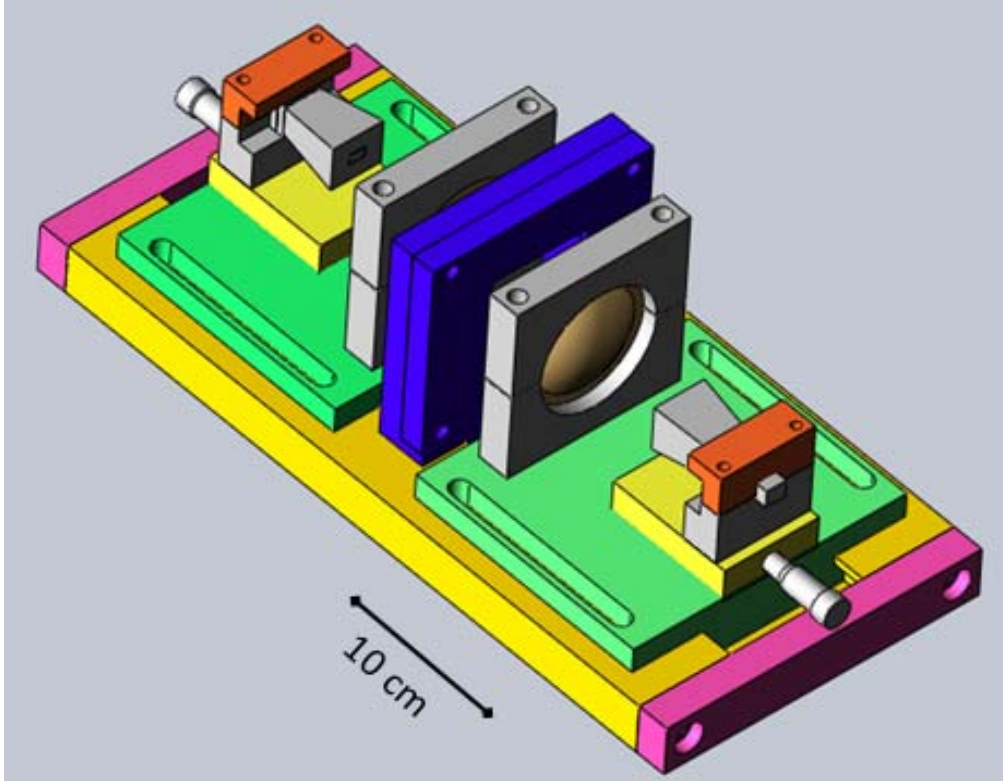


**Şekil E.5.** Hesaplamaları yapılarak modellenen ve CNC tarafından işlenen polimerik lenslerin yukarıdan ve karşıdan görünümü.

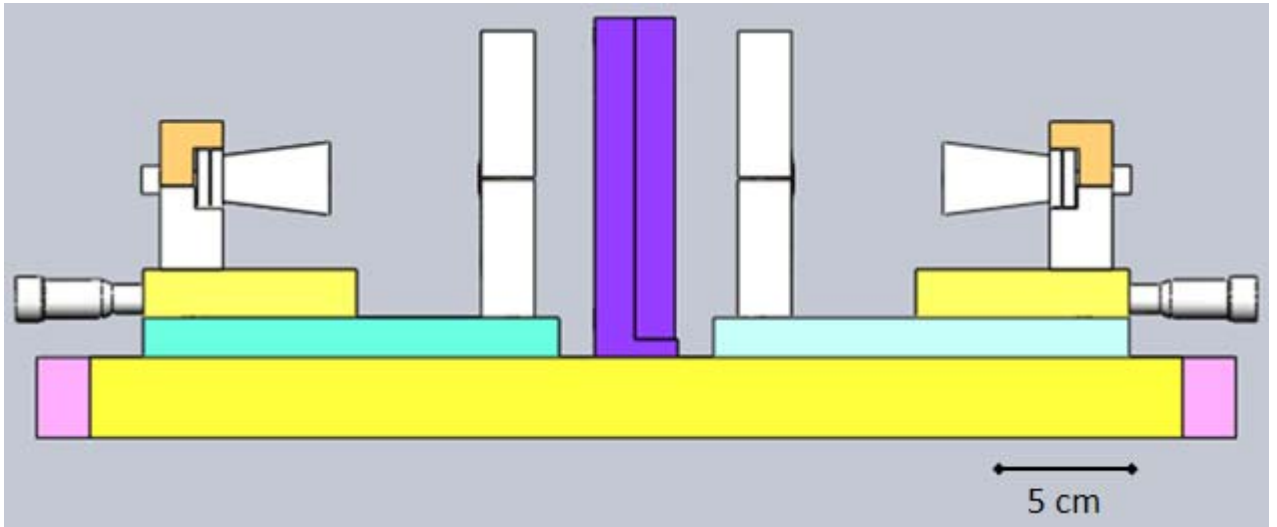
Daha önce de değinildiği üzere serbest uzay ölçüm yöntemiyle yüksek hassasiyete sahip ve tekrarlanabilir ölçümlerin yapılabilmesi için ölçüm sisteminin sağlaması gerekli birkaç kritik husus bulunmaktadır. Özellikleri ölçülen numunenin elektromanyetik dalganın geliş eksenine tamamen dik durması ve ölçüm sisteminde bulunan tüm komponentlerin çok hassas bir biçimde hizalanarak birbirlerine paralel olarak konumlanması gibi sistemin geometrik düzgünlüğünü ve hassas kontrol edilebilirliğini içeren bu koşulların sağlanabilmesi için bir sistem tasarlanmıştır. Bu sistem ikişer adet horn anten ile lensi ve numune tutucuyu aynı eksen üzerinde birbirlerine paralel olarak tutmak üzere oluşturulmuştur. Bu sistemde antenler ile lensler ve lensler ile numune yüzeyi arasında korunması gereken odak mesafeleri dijital bir gösterge yardımıyla hassas olarak kontrol edilebilecektir.

Bu sistem içerisinde, işlenmiş olan lensler (Şekil E.5) ile temin edilecek horn antenleri (Şekil E.2) sabit bir şekilde ve odak mesafesinde tutacak yuvalar tasarlanmıştır. Aynı şekilde numuneleri de elektromanyetik dalganın geliş eksenine dik olarak tutacak ve bu eksen numunenin orta noktasından geçecek şekilde numuneyi konumlandırarak bir numune tutucu tasarlanmıştır. Tasarlanan ölçüm düzeneği belirlenen boyutlarda çizim programları vasıtası ile sanal ortama aktarılmıştır. Tasarlanarak katı modeli çizilen serbest uzay ölçüm sistemi Şekil

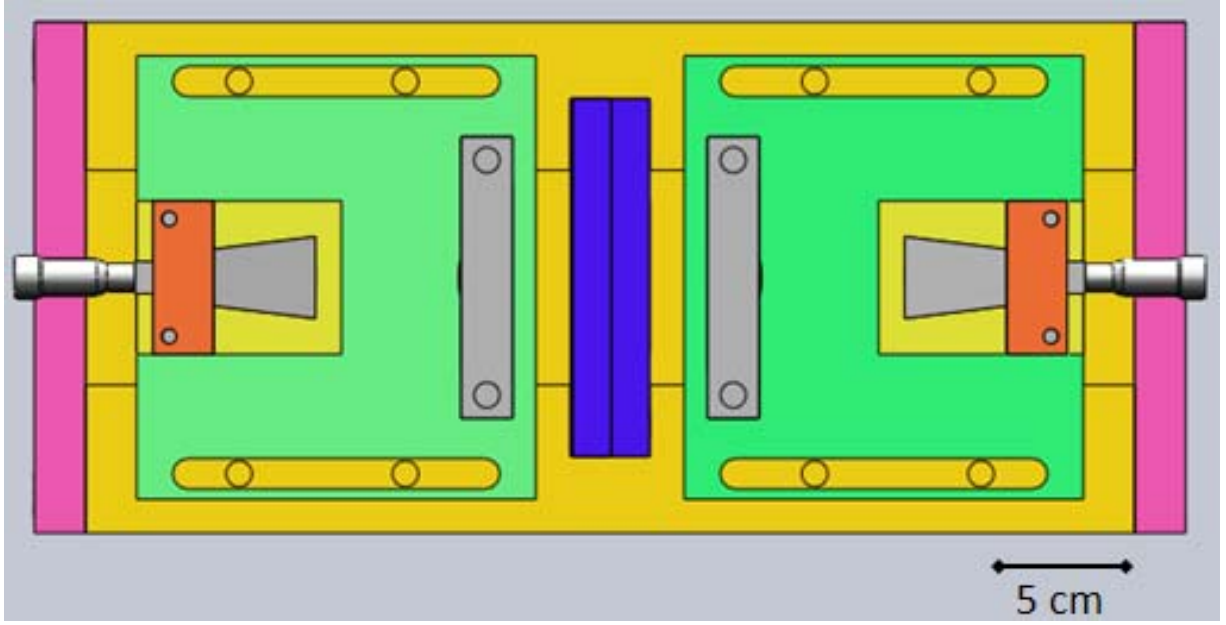
E.6-9'da görülmektedir. Ölçümler sırasında oluşabilecek ikincil elektromanyetik yansımaları ve dolayısıyla ölçüm kalitesini düşürebilecek fon gürültüsünü (background noise) önlemek amacıyla tüm bu sistem polimerik bir malzemedен (poliamid) imal edilmektedir. İmalatı devam etmekte olan bu sistem antenlerin tesliminde hazır olacaktır. Dolayısıyla, serbest alan ölçümlerine projenin ikinci döneminde başlanabilecektir.



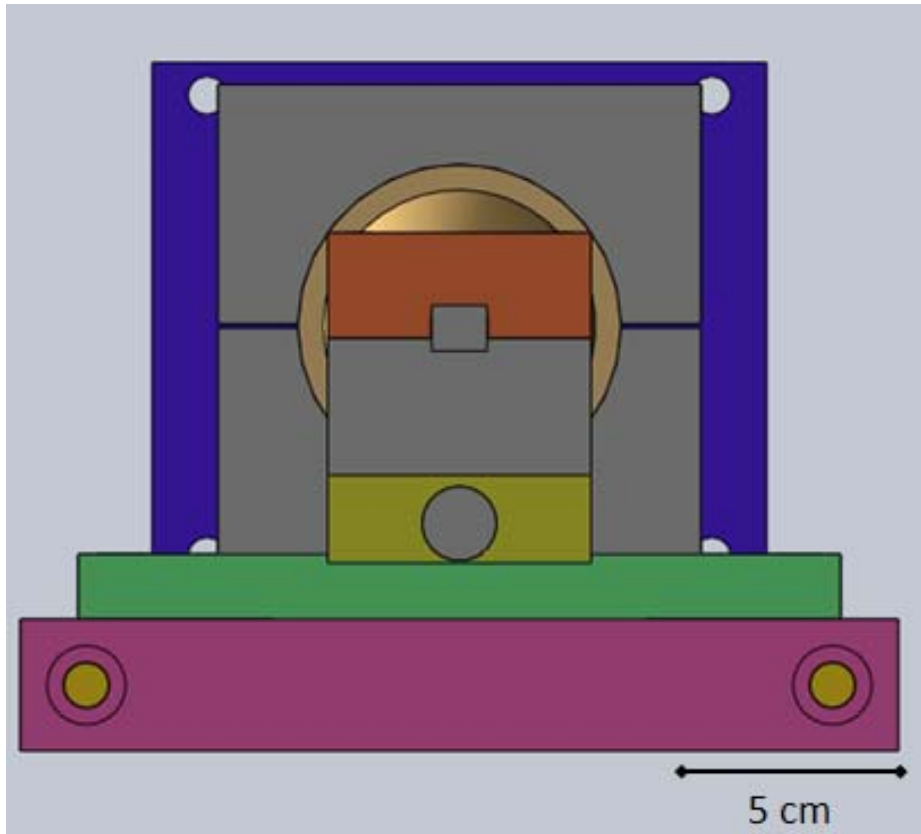
Şekil E.6. Tasarlanan serbest uzay ölçüm düzeneği izometrik görünümü.



Şekil E.7. Tasarlanan serbest uzay ölçüm düzeneğinin önden görünümü



**Şekil E.8.** Tasarlanan serbest uzay ölçüm düzeneğinin yukarıdan görünümü.



**Şekil E.9.** Tasarlanan serbest uzay ölçüm düzeneğinin yandan görünümü.

## B. Vektörel Ağ Analizörü

Ağ analizörleri, aktif ve pasif aygıtların elektromanyetik değerlerini ölçmeye yarayan cihazlardır. Ağ analizörleri aktif veya pasif olarak kullanılan aygıtların, kısaca devrelerin veya yüklerin, elektromanyetik değerlerinin Saçılma Parametresi (S-parametresi) cinsinden ölçülmesinde kullanılır. S-parametreleri herhangi bir elektrik devresinin uygulanan sürekli elektrik alanı altındaki davranışını ve bu davranıştaki değişiklikleri tanımlayan parametrelerdir. Sürekli uyarılan elektrik devreleri S-parametreleri dışında Y, Z, H, T ve ABCD parametreleri ile de tanımlanabilir. Bu bahsedilen parametreler arasında matematiksel bağlantı kurularak bilinen bir parametre üzerinden diğer parametre bulunabilir. Vektörel ağ analizörleri de S-parametrelerini kullanarak devrenin veya yükün tanımlanmasına olanak sağlamaktadır. Ağ analizörleri ve onlara bağlı çevre birimleri elektromanyetik dalga üretici, amfi, gerektiği zaman kullanılmak üzere filtreler, osilatör tarayıcısı ve hem elektromanyetik dalga çıkışı hem de toplaması yapabilen 2 port ve koaksiyel kablolar ile bu portlara bağlanan dış birimlerden oluşmaktadır.

Ağ analizörleri skalar ve vektörel olmak üzere iki farklı tipte olabilmektedir. Skalar ağ analizörü topladığı elektromanyetik enerjinin sadece şiddetini frekansa bağlı olarak analiz ederken, vektörel ağ analizörü bunun yanında toplanan elektromanyetik dalganın fazını da tespit edebilmektedir. Dolayısıyla, vektörel ağ analizörleri ile yapılan ölçümler ile malzemelerin dielektrik katsayılarının kompleks sayı halinde elde edilmesi mümkün olabilmektedir. Vektörel ağ analizörlerinin doğru sonuçlar verebilmesi için bazı kalibrasyonların yapılması gerekmektedir. Bu kalibrasyonlar ölçümü yapılacak devre veya yüklerin çeşidine, ölçüm yapılacak frekans aralığına ve kullanılacak ölçüm tekniğine bağlı olarak farklılık göstermektedir.



**Şekil E.10.** Proje kapsamında EM ölçüm yapmak üzere kullanılmış vektörel ağ analizörü.

### **C. Serbest Uzay Ölçüm Tekniği İçin Kalibrasyon**

Yürütülmekte olan proje kapsamında yüzeyleri modifiye edilmiş cam fiber dokumaların 18-40 GHz frekans aralığındaki elektromanyetik (EM) özelliklerinin incelenmesi için serbest uzay ölçüm tekniği seçilmiştir. Dokumalar gibi yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip ya da kompozit malzemeler gibi yapısal inhomojeniteye sahip malzemelerin EM dalgalar ile etkileşimini, serbest uzay ölçüm yöntemi ile daha hassas ve düşük hatalı şekilde ölçmek mümkündür. Buna sebep, bu yöntemde ölçüm yapılacak örneğin geometrisinin herhangi bir sınırlamaya tabi olmaması ve ölçüm yapılan yüzey alanının, malzemenin ortalama özelliklerinin ölçülmesine olanak sağlayabilecek kadar geniş olmasıdır. Kullanılması öngörülen bu teknik TRL (Thru-Reflect-Line) kalibrasyonlarının uygulanması planlanmıştır.



**Şekil E.11.** Farklı yükler ve açık devre parçalarından oluşan kalibrasyon kiti.

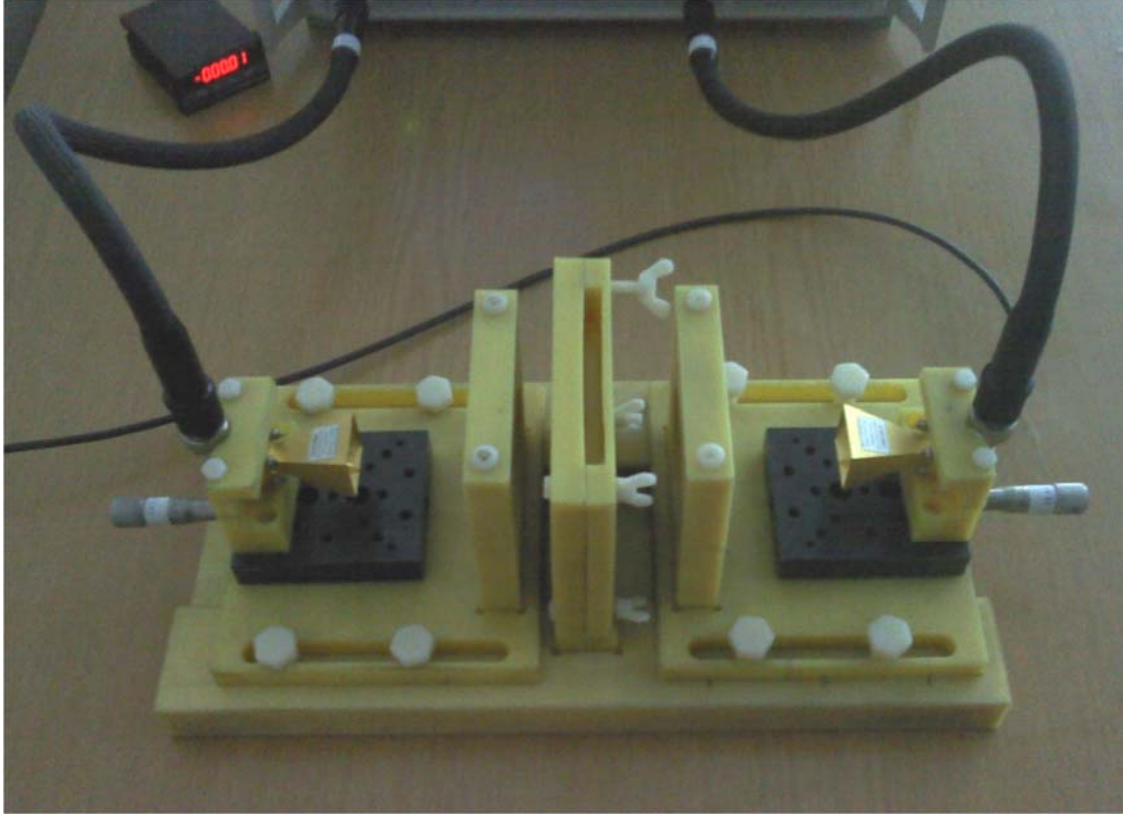
#### 1. TRL (Thru-Reflect-Line) Kalibrasyon Metodu

Bu kalibrasyon metodu iki adet geçirim (Thru ve Line) ve bir adet yansıma (Reflect) referansı içeren bir kalibrasyon ailesinin genel adıdır. Bu kalibrasyon ailesi içinde TRM (Thru-Reflect-Match), LRM (Line-Reflect-Match) ve LRL (Line-Reflect-Line) kalibrasyon çeşitleri vardır. TRM (Thru-Reflect-Match) kalibrasyonu, tam geçirme, tam yansıma ve belirtilen frekans aralığında geçirme ve yansıma değeri bilinen yük ile belirlenen standarttır. LRM (Line-Reflect-Match) kalibrasyonu, iki port arasındaki uzunluğun kesin olarak belirtildiği düzlemde tam geçirme, aynı uzunluk içinde tam yansıma ve tekrar aynı uzunluk içerisinde yansıma ve geçirme değeri bilinen yük ile belirlenen standarttır. LRL (Line-Reflect-Line) kalibrasyonu ise iki port arasındaki uzunluğun kesin olarak belirtildiği düzlemde tam geçirme, aynı uzunlukta tam yansıma ve bu uzunluğun elektromanyetik dalganın dalga boyuna bağlı olarak değiştirilmesi ile yaratılacak yeni düzlemdeki tam geçirme değeri ile belirlenen standarttır.

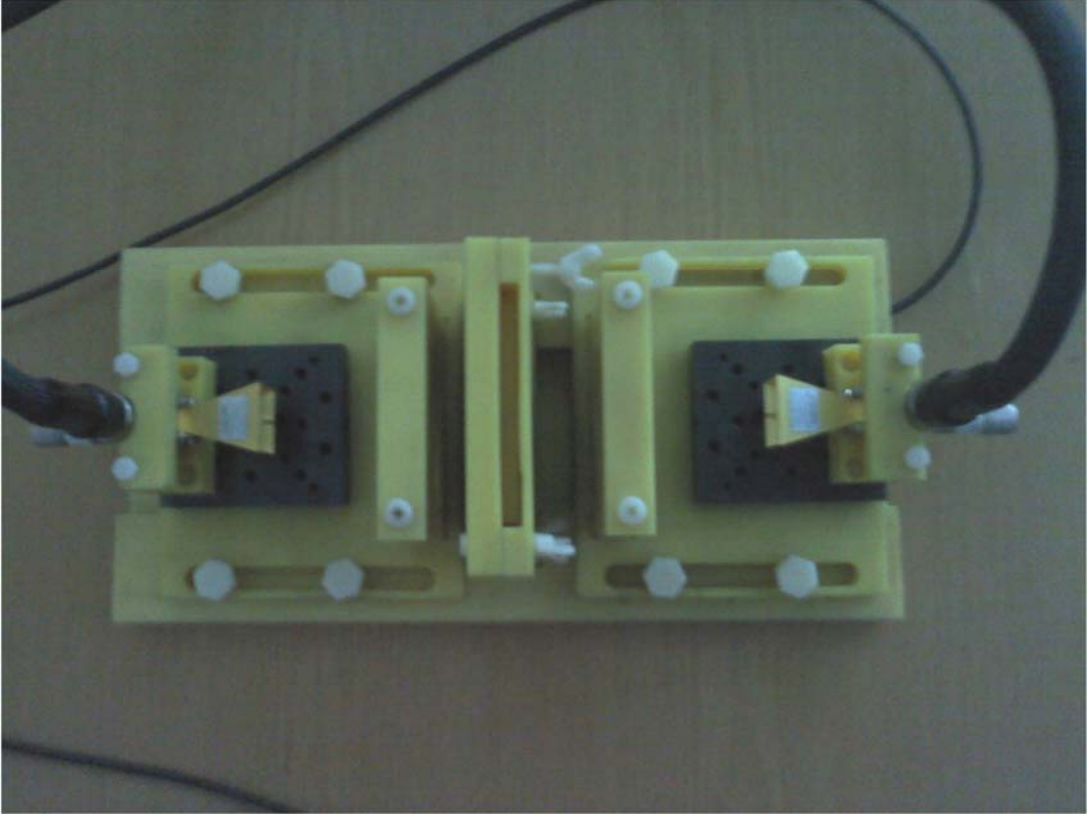
Proje kapsamında yüzeyi metalik kaplama ile modifiye edilmiş cam fiber dokumalardan oluşan çok katmanlı yapıların elektromanyetik davranışı incelenecektir. Bu nedenle referans noktalarını belirlemek üzere LRL (Line-Reflect-Line) kalibrasyon yöntemi seçilmiştir. LRL (Line-Reflect-Line) kalibrasyonunun seçilmesinin nedeni bu yöntem ile geçirim ve yansıma değerlerine ek olarak elektromanyetik dalgaların uzunluk değişiminden kaynaklanan faz farkının belirlenebilmesidir. Yüzeyi modifiye edilmiş cam fiber dokumaların üst üste dizilimi ile yaratılacak katmanlı kompozit yapının içerisindeki elektromanyetik dalga etkileşimlerinin ve numune kalınlığına bağlı olarak değişen bu etkileşimlerin ancak LRL (Line-Reflect-Line) kalibrasyonu ile tanımlanabileceği değerlendirilmiştir.



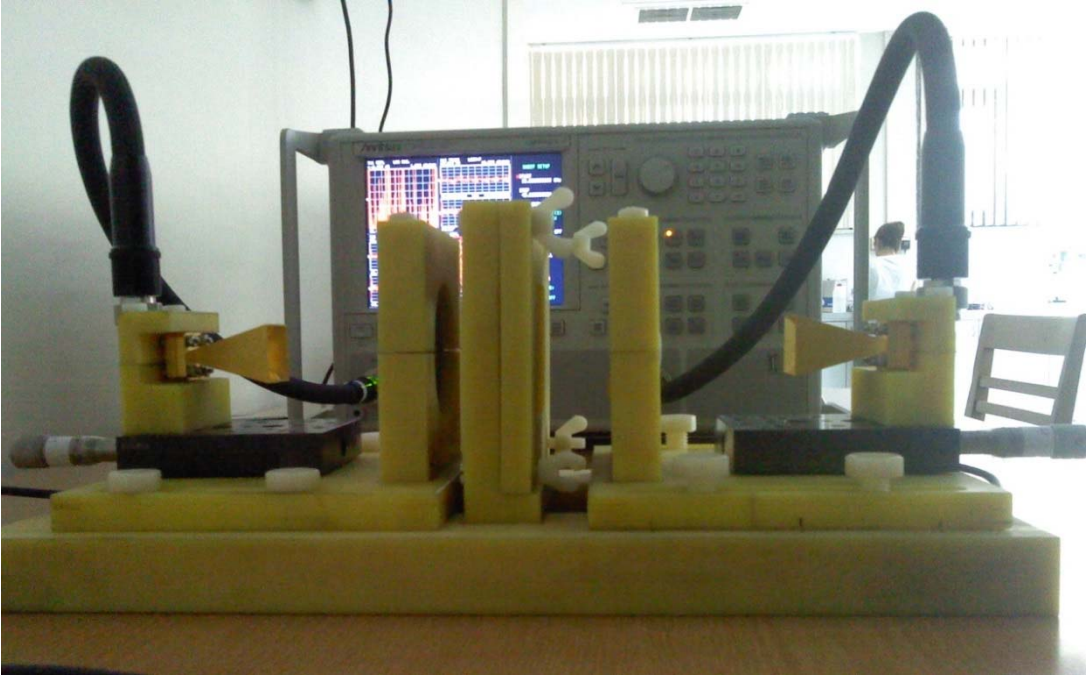
Projenin ilk altı aylık döneminde tasarımı gerçekleştirilen serbest uzay ölçüm düzeneği projenin ikinci altı aylık döneminde tamamlanmış, yukarıda bahsedildiği gibi ölçümlerin gerçekleştirilebilmesi için gerekli LRL kalibrasyonları yapılmış, vektörel ağ analizörü ile antenlerin (horn anten) iletişimi koaksiyel (coaxial) kablolar ile sağlanmış ve ölçüm düzeneği ölçüm yapmaya hazır hale getirilmiştir. Tamamlanmış serbest uzay ölçüm düzeneği ile vektörel ağ analizörü şekil E.12-E.16'da görülmektedir.



**Şekil E.12.** Serbest uzay ölçüm düzeneği.

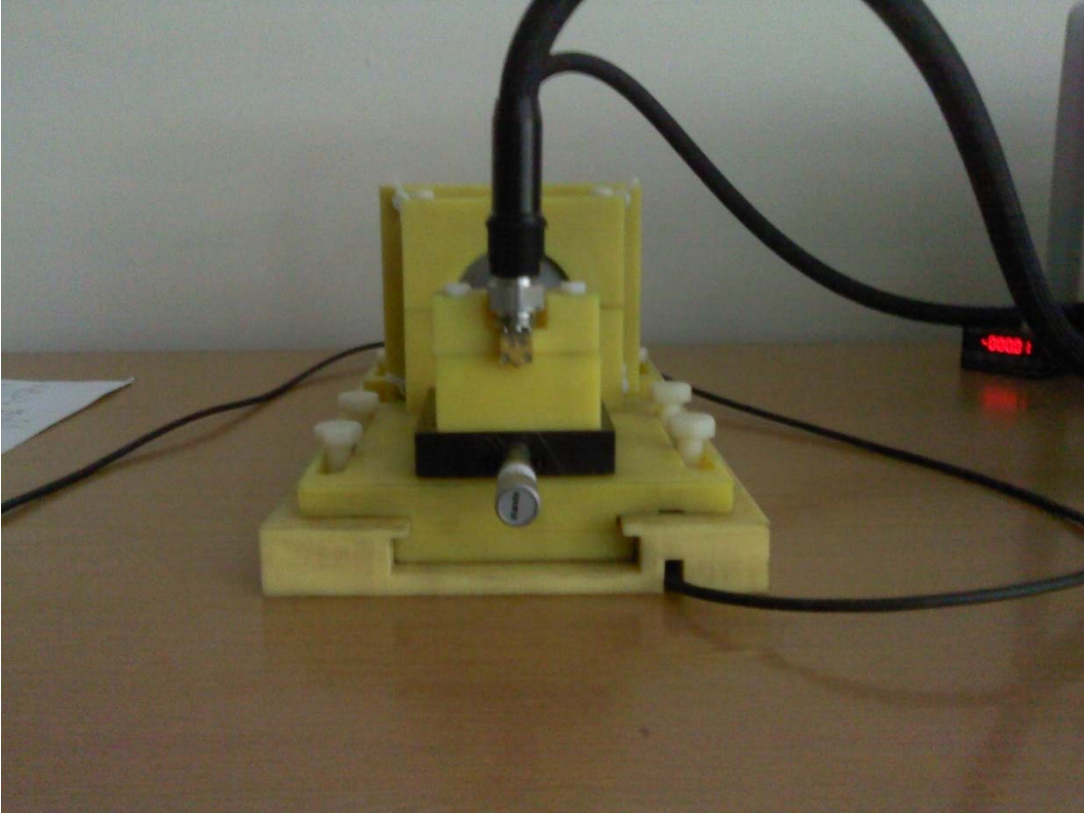


**Şekil E.13.** Serbest uzay ölçüm düzeneğinin yukarıdan görünümü.



**Şekil E.14.** Serbest uzay ölçüm düzeneğinin yandan görünümü.





**Şekil E.15.** Serbest uzay ölçüm düzeneğinin diğer yandan görünümü



**Şekil E16.** Serbest uzay ölçüm düzeneği ve vektörel ağ analizörü.

**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. ARCAN FEHMİ DERİCİOĞLU
Proje No:	111M102
Proje Başlığı:	Mikrodalga Frekanslarında Etkin Elektromanyetik Dalga Soğurucu Kompozitlerin Tasarımı Ve Geliştirilmesi
Proje Türü:	Araştırma
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	HATİCE ÖZLEM AYDIN ÇİVİ
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü. MÜHENDİSLİK F. METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/12/2011 - 15/12/2013
Onaylanan Bütçe:	189700.0
Harcanan Bütçe:	172749.94
Öz:	<p>Elektromanyetik (EM) dalgalar günümüz teknolojisinde radarlar, telekomünikasyon, telsiz (wireless) bilgi transferi yanında tıbbi tanı koyma ve araştırma sistemlerini de içeren askeri ve sivil uygulamalarda geniş kullanım alanları bulmaktadır. Teknolojideki gelişmelerin bir sonucu olarak santimetre ve milimetre seviyesinde dalga boyuna sahip elektromanyetik dalgaların kullanımı her geçen gün yaygınlaşmakta ve farklı kaynaklardan yayılan dalgaların birbirleriyle ya da çevreyle etkileşimleri giderek büyüyen bir sorun haline gelmektedir. Yüksek frekanslarda ve geniş frekans bantlarında çalışan bu uygulamalar, gerek yüksek performans gereksinimleri gerekse çalışma güvenliği ve kararlılığı açısından elektromanyetik dalga soğurucu malzemelerin gelişimini zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda, son yıllarda EM dalga soğurucu ve parazit önleyici malzemeler üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Günümüze kadar bu amaç için üretilmeye çalışılmış olan malzemelerin uygulanmasında birçok sorun ve kısıtlamayla karşılaştığı görülmüştür. Bunlar, geliştirilen malzemenin yeterli genişlikte bir frekans aralığında etkin olmaması ve ağırlık ya da çevresel koşullara dayanım gibi yapısal özellikler bakımından istenilen davranışı göstermemesidir.</p> <p>Proje kapsamında 18-40 GHz frekans aralığında etkin elektromanyetik (EM) dalga soğurucu işleve sahip yapısal kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve bu malzemelerin karakterizasyonu konularında çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, normal şartlar altında dielektrik özellikleri sebebiyle EM dalgalara geçirgen olan cam ve aramid elyaf dokumalar yüzeylerine nanometre mertebesinde kalınlıklarda uygulanan metalik kaplamalarla EM dalgaları soğurucu hale getirilmiştir. Yüzeyleri modifiye edilen bu elyaf dokumalarla oluşturulan çok katmanlı yapılarla epoksi matris takviye edilmiş ve EM dalgaları ölçüm yapılan aralıkta %90 ve üzerinde soğuran EM dalga soğurucu prototip kompozitler üretilmiştir. Ayrıca, üretilen prototip kompozitlerde silanlama uygulaması yapılmış ve takviye malzemesi olarak kullanılan elyaf dokuma yüzeylerine uygulanan metalik modifikasyon sebebiyle bozulmuş olabilecek elyaf-matris etkileşimi iyileştirilerek mekanik özelliklerde düşüş olmamasına çalışılmıştır. Her ne kadar bu çalışma kapsamında optimizasyonu hedeflenmemiş olsa da silanlamanın arayüz etkileşimini geliştirerek EM dalga soğurucu kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmede kullanılabileceği gösterilmiştir.</p>
Anahtar Kelimeler:	Yüzey kaplama, Fiber dokuma, Polimer matrisli kompozit, Mikrodalga, EM dalga soğurucu malzeme
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır