



**FARKLI KONFIGÜRASYONLARDA TEKSTİL  
ESASLI METAMALZEME SOĞURUCU  
TASARIMI VE X-BANT UYGULAMALARI**

**Ediz DELİHASANLAR**

**2020  
DOKTORA TEZİ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Hayrettin YÜZER**

**FARKLI KONFIGÜRASYONLARDA TEKSTİL ESASLI METAMALZEME  
SOĞURUCU TASARIMI VE X-BANT UYGULAMALARI**

**Ediz DELİHASANLAR**

**T.C  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında  
Doktora Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Ekim 2020**

Ediz DELİHASANLAR tarafından hazırlanan “FARKLI KONFIGÜRASYONLARDA TEKSTİL ESASLI METAMALZEME SOĞURUCU TASARIMI VE X-BANT UYGULAMALARI” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Hayrettin YÜZER .....  
Tez Danışmanı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 13/10/2020

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Prof. Dr. Necmi Serkan TEZEL (KBÜ)	.....
Üye : Prof. Dr. Selçuk HELHEL (AKD)	.....
Üye : Prof. Dr. Ceyhun KARPUZ (PAU)	.....
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Hayrettin YÜZER (KBÜ)	.....
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ali Serkan SOYDAN (PAU)	.....

...../...../2020

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ .....  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Ediz DELİHASANLAR

## **ÖZET**

**Doktora Tezi**

### **FARKLI KONFIGÜRASYONLARDA TEKSTİL ESASLI METAMALZEME SOĞURUCU TASARIMI VE X-BANT UYGULAMALARI**

**Ediz DELİHASANLAR**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Hayrettin YÜZER**

**Ekim 2020, 112 sayfa**

Metamalzemeler doğada bulunmayan, olağanüstü elektromanyetik özelliklere sahip ve yapay olarak elde edilen malzemelerdir. Kendine has özellikleri sayesinde birçok uygulama alanında kullanılabilmesinden dolayı popülerliği gün ve gün artmaktadır.

Bu doktora çalışmasında, tekstil esaslı metamalzeme soğurucu (MMA) tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan ve üretilen MMA, periyodik rezonatör katmanı, dielektrik katmanı ve iletken katmanı olmak üzere 3 farklı katmanın birleştirilmesi ile elde edilmektedir. İletken katman olarak ilmek aralığı küçük olan Bezayağı dokuma kumaş tekstil ürünü kullanılmıştır. Dielektrik katman için esnek, yapışkan yapısı ve yüksek dielektrik sabitine sahip olmasından dolayı silikon esaslı çift taraflı bant malzemesi tercih edilmiştir. Periyodik rezonatör katman için ise daha büyük ve 3-boyutlu ilmek yapısına sahip olmasından dolayı Süprem atkı örme kumaş tekstil ürünü kullanılmıştır. Bilgisayar destekli yazılım ile kumaş yapıların çizimi

yapılmış ve sonrasında simülasyon programına aktarılarak tasarımlar tamamlanmıştır. X-bant frekans aralığında birçok parametrenin soğurmaya etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçların analizi neticesinde üretim aşamasına geçilmiştir. Üretimin ardından ölçümler tamamlanmıştır. Üretilen ve tasarlanan MMA sonuçları karşılaştırılmış ve detaylıca irdelenmiştir. X-bant frekans aralığında geniş bantlı, esnek, giyilebilir, yıkanabilir, düşük maliyetli, kolay üretilebilir, polarizasyon bağımsız ve geliş açısı bağımsız tekstil esaslı MMA yapısı elde edilmiştir. Bu tez kapsamında tasarlanan ve üretilen tekstil esaslı MMA, birçok alanda kullanılabileceği öngörülmektedir.

**Anahtar Sözcükler :** 3-boyutlu metamateryal, giyilebilir soğurucu, radardan gizle(n)me, dokuma kumaş, örme kumaş.

**Bilim Kodu :** 90516

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **TEXTILE-BASED METAMATERIAL ABSORBER DESIGN IN DIFFERENT CONFIGURATIONS X-BAND APPLICATIONS**

**Ediz DELIHASANLAR**

**Karabuk University  
Institute of Graduate Programs  
Department of Electrical-Electronics Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Asst. Prof. Dr. Ahmet Hayrettin YUZER**

**October 2020, 112 pages**

Metamaterials are materials that are not found in nature, have extraordinary electromagnetic properties, and are obtained artificially. Due to its unique features, it can be used in many application areas, and its popularity is increasing day by day.

In this thesis, the design and production of textile-based metamaterial absorber (MMA) were performed. The proposed and then produced MMA is obtained by combining 3 different layers; the periodic resonator layer, the dielectric layer, and the conductive layer. Plain Weave fabric textile product in which has a small loop space was used as the conductive layer. Silicone-based double-sided tape material was preferred as the dielectric layer due to its flexible, adhesive structure and high dielectric constant. Weft-Knitted fabric textile product was used as the periodic resonator layer as it has a larger and 3D loop structure. Drawing of fabric structures was performed by using computer-aided design software and the designs were completed by importing them to

the simulation program. In the X-band frequency range, the effect of many parameters on absorption was investigated. As a result of the analysis of the results, the production phase was started with the best results. Measurements are completed after production. The produced and designed MMA results are compared and discussed. Textile based MMA structure with a wide band, flexible, wearable, washable, low cost, easy to produce, polarization-independent, and incidents angle independent was obtained in the X-band frequency range. The textile-based MMA, designed and produced under this thesis, is foreseen to be used in many fields.

**Key Word** : 3D metamaterial, cloaking from radar, plain weave fabric, weft-knitted fabric, wearable absorber.

**Science Code** : 90516



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Hayrettin YÜZER'e, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmama katkı sağlayan değerli tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Selçuk HELHEL'e ve Prof. Dr. Necmi Serkan TEZEL hocalarıma teşekkür ederim. Ayrıca yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Ceyhun Karpuz, Dr. Öğr. Üyesi Ali Serkan SOYDAN, Dr. Öğr. Üyesi Abdullah Oğuz KIZILÇAY, Arş. Gör. Mehmet ÇAKIR, Arş. Gör. Anday DURU'ya ayrı ayrı teşekkür ederim.

Deneysel ölçümler için Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü SEM Laboratuvarı, Akdeniz Üniversitesi Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Mikrodalga Uygulama ve Araştırma Merkezi (EMUMAM) Laboratuvarları ve Pamukkale Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Mikrodalga Laboratuvarı kullanımları için ayrıca teşekkür ederim.

Sevgili eşime, kıymetli anne-babama, değerli oğluma yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

Bu tez çalışması TÜBİTAK 2211-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
1.1. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
1.2. ÇALIŞMANIN AMACI.....	15
1.3. TEZİN ANA HATLARI .....	17
BÖLÜM 2 .....	18
MATERYAL VE YÖNTEM.....	18
2.1. METAMALZEMELER .....	18
2.1.1. Metamalzemelerin İletim Özellikleri.....	18
2.1.2. Negatif Kırılma İndisi ve Ters Snell Yasası.....	22
2.2. SAÇILMA PARAMETRELERİ (S-PARAMETRELERİ).....	24
2.3. SOĞURMA TEORİSİ.....	26
2.4. ELEKTRONİK DEVRE BENZETİMİ.....	28
2.5. TEKSTİL ESASLI METAMALZEME SOĞURUCU BİLEŞENLERİ.....	32
2.5.1. Süprem Atkı Örme Kumaş .....	33
2.5.2. Silikon Esaslı Çift Taraflı Bant.....	34
2.5.3. Bezayağı Dokuma Kumaş .....	35
2.6. DALGA KILAVUZU ÖLÇÜM SİSTEMİ .....	36

	<u>Sayfa</u>
2.6.1. TRL (Through-Reflect-Line) Kalibrasyon .....	38
<b>BÖLÜM 3</b> .....	<b>42</b>
<b>ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA</b> .....	<b>42</b>
3.1. BEZAYAĞI DOKUMA KUMAŞ TASARIMLARI.....	42
3.2. SÜPREM ATKI ÖRME KUMAŞ TASARIMLARI .....	44
3.2.1. Tek Sıra Ohm ( $\Omega$ ) Tasarımı.....	45
3.2.2. Her Sıra Ohm ( $\Omega$ ) Tasarımı .....	47
3.2.3. S Şekilli Tasarım.....	48
3.2.4. Z Şekilli Tasarım .....	49
3.3. TASARIMIN SEÇİLMESİ .....	51
3.3.1. Tasarımın Polarizasyon ve Geliş Açısı Bağımsızlığın İncelenmesi .....	52
3.3.2. Ohm Tasarım Boyutların Değişimi Analizi.....	54
3.3.3. MMA Esneklik Analizi.....	56
3.4. ÜRETİM AŞAMALARI VE SONUÇLARI.....	58
3.4.1. Bezayağı Dokuma Kumaşın Elde Edilmesi.....	58
3.4.2. Silikon Malzemesinin Temini .....	58
3.4.3. Süprem Atkı Örme Kumaşın Elde Edilmesi.....	59
3.4.3.1. Bakır Boya .....	61
3.4.3.2. Karbon Boya .....	66
3.4.3.3. Grafit Boya.....	68
3.4.3.4. Gümüş Boya.....	71
3.4.4. Üretilen MMA'ya Göre Simülasyonların Güncellenmesi .....	73
3.4.5. Dalga Kılavuzu Ölçüm Sistemi Sonuçları .....	75
<b>BÖLÜM 4</b> .....	<b>85</b>
<b>SONUÇLAR</b> .....	<b>85</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>90</b>
<b>EK AÇIKLAMALAR</b> .....	<b>101</b>
<b>S-PARAMETRE SONUÇLARI</b> .....	<b>101</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>112</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Malzeme sınıflandırma diyagramı [117]. .....	19
Şekil 2.2. Poynting vektörü ( $\vec{S}$ ) gösterimi; doğal malzeme ortamı (a) ve metamalzeme ortamı (b). .....	21
Şekil 2.3. İki farklı ortam arasındaki elektromanyetik dalga geçişi.....	23
Şekil 2.4. Boş bardaktaki metal çubuk (a), bardak $n = 1.3$ su ile doldurulunca (b) ve bardak $n = -1.3$ su ile doldurulunca (c) [119]......	24
Şekil 2.5. Kara kutu.....	25
Şekil 2.6. 2 portlu devre şematiği. ....	25
Şekil 2.7. Çoklu yansıma teorisi [125]......	27
Şekil 2.8. Ohm şeklindeki indüktör modeli [130]......	29
Şekil 2.9. Mikroşerit hatların çift (a) ve tek (b) mod kapasitans analizi [130]. .....	31
Şekil 2.10. Tekstil esaslı MMA; önden görünüm (a), yandan görünüm (b) ve arkadan görünüm (c) [125]. .....	33
Şekil 2.11. Süprem atkı örme kumaş simülasyon çizimi (a) ve örme yapısı (b).....	34
Şekil 2.12. Süprem atkı örme kumaş ilmek boyutları (a), soldan görünüm (b), sağdan görünüm (c), üstten görünüm (d) ve alttan görünüm (e).....	34
Şekil 2.13. Bezayağı dokuma kumaş yapısı simülasyon çizimi (a) ve üretim örneği (b). .....	35
Şekil 2.14. Bezayağı dokuma kumaş ilmek boyutları (a) ve 3-boyutlu görünümü (b). .....	36
Şekil 2.15. Dalga kılavuzu ölçüm düzeneği şematik (a) ve deneysel (b) gösterim. ..	36
Şekil 2.16. Dalga kılavuzu [123]. .....	37
Şekil 2.17. Simülasyon ortamında dalga kılavuzu ölçüm sistemi; önden görünüm (a), yandan görünüm (b) ve arkadan görünüm (c).....	37
Şekil 2.18. TRL kalibrasyon [140]......	38
Şekil 2.19. Lazer kesim ile elde edilen kalibrasyon kiti. ....	39

## Sayfa

Şekil 2.20. TRL kalibrasyon, direkt ölçüm. ....	40
Şekil 2.21. TRL kalibrasyon, 1.port ve 2.port yansıma ölçümleri. ....	40
Şekil 2.22. TRL kalibrasyon, iletim hattı ölçümü. ....	41
Şekil 2.23. TRL kalibrasyon ölçüm sonucu. ....	41
Şekil 3.1. Bezayağı dokuma kumaş tasarımları; bütün iletken yapı (a), çözümlü boşluklu yapı (b), atkı boşluklu yapı (c), hem çözümlü hem de atkı boşluklu yapı (d) ve ilmek boyut bilgileri (e). ....	43
Şekil 3.2. Bezayağı dokuma kumaş tasarım şekillerinin sonuçları. ....	44
Şekil 3.3. Süprem atkı örme kumaş tasarımları; tek sıra Ohm tasarımı (a), her sıra Ohm tasarımı (b), S şekilli tasarım (c) ve Z şekilli tasarım (d). ....	45
Şekil 3.4. Dielektrik sabitine göre maksimum soğurma frekans değişimi. ....	46
Şekil 3.5. Ohm tasarım simülasyon sonuçları. ....	47
Şekil 3.6. S şekilli tasarım simülasyon sonuçları. ....	48
Şekil 3.7. Z şekilli tasarım simülasyon sonuçları. ....	50
Şekil 3.8. Seçilen tekstil esaslı MMA; Süprem atkı örme kumaş tasarımı (a), silikon malzemesi (b) ve Bezayağı dokuma kumaş tasarımı (c). ....	51
Şekil 3.9. Tasarımların 1.6 mm kalınlıkta simülasyon sonuçları. ....	52
Şekil 3.10. TM polarizasyon ve geliş açısı simülasyon sonuçları. ....	53
Şekil 3.11. TE polarizasyon ve geliş açısı simülasyon sonuçları. ....	54
Şekil 3.12. Ohm tasarım boyut değişimi. ....	55
Şekil 3.13. Ohm tasarım boyut değişimi simülasyon sonuçları. ....	55
Şekil 3.14. TE polarizasyon ve +20° geliş açısında simülasyon sonuçları. ....	57
Şekil 3.15. Bezayağı dokuma kumaş. ....	58
Şekil 3.16. 1.1 mm kalınlık ve 30x20 mm boyutunda silikon esaslı çift taraflı bant. ....	59
Şekil 3.17. Gütermann Skala 360 iplik. ....	60
Şekil 3.18. Gütermann Skala 360 SEM görüntüsü. ....	61
Şekil 3.19. Winkel bakır sprej boya. ....	61

Şekil 3.20. Winkel bakır sprej boya analizi; yüzey görüntüsü (a), element bileşenleri (b) ve element oranları (c).....	62
Şekil 3.21. Bakır tozu.....	63
Şekil 3.22. Bakır boyama düzeneği (a), aralık düzeneği (b) ve ip düzeneği (c).....	63
Şekil 3.23. Bakır boyama işlemi. ....	64
Şekil 3.24. Boyalı yüzey (a), yapışkanlı kâğıt söküm işlemi (b) ve son hali (c).....	64
Şekil 3.25. Üretilen tek kat boya (a), çift kat boya (b) ve tek kat boya sonrası bakır toz ilave bakır iplik numuneleri (c).....	65
Şekil 3.26. Bakır örme düzeneği. ....	66
Şekil 3.27. İletken karbon boya.....	66
Şekil 3.28. Karbon boyama düzeneği. ....	67
Şekil 3.29. Karbon boyama işlemi. ....	67
Şekil 3.30. Üretilen karbon iplik numunesi. ....	68
Şekil 3.31. Karbon örme düzeneği. ....	68
Şekil 3.32. İletken grafit sprej boya. ....	69
Şekil 3.33. Grafit boyama düzeneği.....	69
Şekil 3.34. Grafit boyama işlemi. ....	70
Şekil 3.35. Üretilen grafit iplik numunesi.....	70
Şekil 3.36. Grafit örme düzeneği. ....	71
Şekil 3.37. İletken gümüş boya. ....	71
Şekil 3.38. Gümüş boyama düzeneği. ....	72
Şekil 3.39. Gümüş boyama işlemi. ....	72
Şekil 3.40. Üretilen gümüş iplik numunesi.....	73
Şekil 3.41. Gümüş örme düzeneği. ....	73
Şekil 3.42. 3M VHB 4611 dielektrik sabiti. ....	74
Şekil 3.43. Güncellenen simülasyon sonuçları. ....	75

Şekil 3.44. Tekstil esaslı MMA önden görünüm (a) ve arkadan görünüm (b). .....	76
Şekil 3.45. Tek kat bakır boya MMA'nın önden görünüm, TE polarizasyon (a) ve TM polarizasyon (b). .....	76
Şekil 3.46. Çift kat bakır boya MMA'nın önden görünüm, TE polarizasyon (a) ve TM polarizasyon (b). .....	77
Şekil 3.47. Bakır boya üzerine bakır tozu ilaveli MMA'nın önden görünüm, TE polarizasyon (a) ve TM polarizasyon (b). .....	77
Şekil 3.48. TE polarizasyon, simülasyon ve bakır boyama türüne göre ölçüm sonuçları. ....	78
Şekil 3.49. TM polarizasyon, simülasyon ve bakır boyama türüne göre ölçüm sonuçları. ....	79
Şekil 3.50. Karbon boya MMA'nın önden görünüm, TE polarizasyon (a) ve TM polarizasyon (b). .....	80
Şekil 3.51. Grafit boya MMA'nın önden görünüm, TE polarizasyon (a) ve TM polarizasyon (b). .....	81
Şekil 3.52. Gümüş boya MMA'nın önden görünüm, TE polarizasyon (a) ve TM polarizasyon (b). .....	81
Şekil 3.53. TE polarizasyonda karbon, grafit, gümüş, bakır ve simülasyon ölçüm sonuçları. ....	82
Şekil 3.54. TM polarizasyonda karbon, grafit, gümüş, bakır ve simülasyon ölçüm sonuçları. ....	83
Şekil Ek 1. Bezayağı dokuma kumaş tasarım şekillerinin $S_{11}$ sonuçları.....	102
Şekil Ek 2. Bezayağı dokuma kumaş tasarım şekillerinin $S_{21}$ sonuçları.....	102
Şekil Ek 3. Tek sıra Ohm ( $\Omega$ ) tasarımı $S_{11}$ sonuçları. ....	102
Şekil Ek 4. Tek sıra Ohm ( $\Omega$ ) tasarımı $S_{21}$ sonuçları. ....	103
Şekil Ek 5. Her sıra Ohm ( $\Omega$ ) tasarımı $S_{11}$ sonuçları. ....	103
Şekil Ek 6. Her sıra Ohm ( $\Omega$ ) tasarımı $S_{21}$ sonuçları. ....	103
Şekil Ek 7. S şekilli tasarım $S_{11}$ sonuçları.....	104
Şekil Ek 8. S şekilli tasarım $S_{21}$ sonuçları.....	104
Şekil Ek 9. Z şekilli tasarım $S_{11}$ sonuçları.....	104

**Sayfa**

Şekil Ek 10. Z şekilli tasarım $S_{21}$ sonuçları.....	105
Şekil Ek 11. TM polarizasyon ve geliş açısı $S_{11}$ sonuçları. ....	105
Şekil Ek 12. TM polarizasyon ve geliş açısı $S_{21}$ sonuçları. ....	105
Şekil Ek 13. TE polarizasyon ve geliş açısı $S_{11}$ sonuçları. ....	106
Şekil Ek 14. TE polarizasyon ve geliş açısı $S_{21}$ sonuçları. ....	106
Şekil Ek 15. Ohm tasarım boyut değişimi $S_{11}$ sonuçları. ....	106
Şekil Ek 16. Ohm tasarım boyut değişimi $S_{21}$ sonuçları. ....	107
Şekil Ek 17. TE polarizasyon ve $+20^\circ$ geliş açısında $S_{11}$ sonuçları.....	107
Şekil Ek 18. TE polarizasyon ve $+20^\circ$ geliş açısında $S_{21}$ sonuçları.....	107
Şekil Ek 19. Güncellenen simülasyon $S_{11}$ sonuçları. ....	108
Şekil Ek 20. Güncellenen simülasyon $S_{21}$ sonuçları. ....	108
Şekil Ek 21. TE polarizasyon, simülasyon ve bakır boyama türüne göre ölçüm $S_{11}$ sonuçları.....	108
Şekil Ek 22. TE polarizasyon, simülasyon ve bakır boyama türüne göre ölçüm $S_{21}$ sonuçları.....	109
Şekil Ek 23. TM polarizasyon, simülasyon ve bakır boyama türüne göre ölçüm $S_{11}$ sonuçları.....	109
Şekil Ek 24. TM polarizasyon, simülasyon ve bakır boyama türüne göre ölçüm $S_{21}$ sonuçları.....	109
Şekil Ek 25. TE polarizasyonda karbon, grafit, gümüş, bakır ve simülasyon $S_{11}$ ölçüm sonuçları.....	110
Şekil Ek 26. TE polarizasyonda karbon, grafit, gümüş, bakır ve simülasyon $S_{21}$ ölçüm sonuçları.....	110
Şekil Ek 27. TM polarizasyonda karbon, grafit, gümüş, bakır ve simülasyon $S_{11}$ ölçüm sonuçları.....	110
Şekil Ek 28. TM polarizasyonda karbon, grafit, gümüş, bakır ve simülasyon $S_{21}$ ölçüm sonuçları.....	111



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Kırılma indisi işaret kuralları. ....	23
Çizelge 2.2. Silikon malzeme özellikleri [125]. ....	35
Çizelge 3.1. Boyut bilgileri. ....	45
Çizelge 3.2. Dielektrik sabitine göre soğurma bilgileri. ....	46
Çizelge 3.3. Ohm tasarımın kalınlıkla değişen soğurma bilgileri. ....	48
Çizelge 3.4. S şekilli tasarımın kalınlıkla değişen soğurma bilgileri. ....	49
Çizelge 3.5. Z şekilli tasarımın kalınlıkla değişen soğurma bilgileri. ....	50
Çizelge 3.6. TM polarizasyon ve geliş açısı simülasyon sonuçları bilgileri. ....	53
Çizelge 3.7. TE polarizasyon ve geliş açısı simülasyon sonuçları bilgileri. ....	54
Çizelge 3.8. Ohm tasarımın boyut değişimi simülasyon sonuçları bilgileri. ....	56
Çizelge 3.9. TE polarizasyon ve +20° geliş açısında ölçeklendirme sonuçları. ....	57
Çizelge 3.10. Üretilen MMA ile uyumlu boyutlara sahip simülasyon sonuçları. ....	75
Çizelge 3.11. TE polarizasyon bakır boyama türüne göre soğurma sonuçları. ....	78
Çizelge 3.12. TM polarizasyon bakır boyama türüne göre soğurma sonuçları. ....	79
Çizelge 3.13. İletkenlerin TE polarizasyondaki soğurma sonuçları. ....	82
Çizelge 3.14. İletkenlerin TM polarizasyondaki soğurma sonuçları. ....	83

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

dB	: desibel
$c_0$	: vakumda ışık hızı
f	: frekans
MHz	: megahertz
GHz	: gigahertz
THz	: terahertz
$\vec{D}$	: elektrik akı yoğunluğu
$\vec{E}$	: elektrik alan vektörü
$\vec{H}$	: manyetik alan vektörü
$\vec{k}$	: dalga vektörü
$\vec{S}$	: Poynting's vektörü
$\vec{B}$	: manyetik akı yoğunluğu
mm	: milimetre
mm <sup>2</sup>	: milimetre kare
cm	: santimetre
S <sub>ij</sub>	: i ve j sayılarına karşılık gelen kapılara ait S-parametresi
v	: dalganın hızı
$\omega$	: açısal frekans
$\pi$	: pi sayısı (3,14159...)
$\epsilon_r$	: dielektrik geçirgenlik
$\mu_r$	: manyetik geçirgenlik
$\lambda$	: dalga boyu
$\Gamma$	: yansıma katsayısı
T	: iletim katsayısı
A	: soğurma gücü

$R$  : toplam yansıma katsayısı  
 $\mu$  : mikro ( $10^{-6}$ )  
 $n$  : kırılma indisi

## KISALTMALAR

CST	: Computer Simulation Technology (Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi)
EMUMAM	: Akdeniz Üniversitesi Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Mikrodalga Uygulama ve Araştırma Merkezi
EM	: Elektromanyetik
TiO	: Titanyum Monoksit
FSS	: Frekans Seçici Yüzey
SRR	: Ayrık Halka Rezonatör
DNM	: Çift Negatif Malzeme
RFID	: Radyo Frekanslı Tanımlama
RSC	: Radar Kesit Alanı
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
MIT	: Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
HARP	: Halpern Anti - Radyasyon Boyası
FDTD	: Zaman Domaininde Sonlu Farklar Metodu
AFSR	: Soğurucu Frekans Seçici Yansıma Yapısı
AFST	: Soğurucu Frekans Seçici İletim Yapısı
PMA	: Mükemmel Metamalzeme Soğurucu
AutoCAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım Yazılımı Öğrenci Versiyonu
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
FR4	: Dokunmuş Camyünü ve Epoksi
TRL	: Direkt, Yansıma, İletim Hattı Kalibrasyonu
VNA	: Vektör Network Analizör
X-Bant	: Elektromanyetik Spektrumun Mikrodalga Radyo Bölgenin Segmenti (8- 12 GHz)

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Elektronik harp ve radar sistemleri, harp sırasında pek çok taktik ve stratejik bilgilere erişim sağlar. Bu bilgilerin, düşman harp ve radar sistemleri tarafından tespitinin engellenmesi, geciktirilmesi veya gizlenmesi çok önemlidir ve harbin kazanılmasında büyük bir üstünlük sağlamaktadır. Bu amaçla kullanılan yöntemlerden birisi de elektromanyetik dalga soğurucu yapılardır. Bu yapılar, radar sistemleri tarafından tespit edilememesi veya kullanıldığı sistemin tespit edilmesini zorlaştırma özelliği sayesinde kara, deniz ve hava savunma sanayisinin vazgeçilmez unsurlarından biri olmuştur.

1973 yılında Emerson, mikrodalga soğurucu malzemelerin ve yankısız odaların gelişiminin tarihsel bir özetini sunmuştur [1]. 19. yüzyılın ortalarında elektromanyetik dalga soğurucu yapıların teorik ve deneysel çalışmaları yapılmaya başlanmıştır. Bilinen ilk soğurucu, Hollanda'da 2 GHz frekansında,  $\lambda/4$  dalga boyunda rezonans sağlayan ve patenti alınan soğurucudur [2]. Günümüzden farklı olarak, saçılımı sağlamak için karbon karası ve kalınlığı azaltmak için yüksek dielektrik sabitli TiO (Titanyum monoksit) malzemesi kullanmıştır.

II. Dünya savaşı sırasında ve sonrasında elektromanyetik soğurucu yapılarının kullanımında artış görülmüştür. Özellikle savaş zamanında ABD ve Alman ordularının durumları büyük ölçüde savaş alanındaki radarlara bağlı olmuştur. Almanların denizaltı şnorkel ve periskoplarının kamufle edilmesinde “baca temizleyicisi” (soğurucular ve baca temizleyicilerinin ortak birleşmesiyle elde edilen karbon karası) anlamına gelen “Schornsteinfeger” kod adıyla projelerinin olduğu biliniyordu [3,4]. Onlardan biri, yaklaşık 3 GHz’de rezonans soğurması sağlayan karbonil demir tozu ile eklenen yaklaşık 0.3 inç (0.762 cm) kalınlığında yarı esnek bir kauçuk tabaka şeklindekiydi. Diğeri ise ‘Jauman soğurucu’ (Jauman absorber), alternatif sert plastik ve

dirençli tabaka katmanlarından oluşan yaklaşık 3 inç (7.62 cm) kalınlığında, sert ve geniş bant soğurucu malzemesiydi. Bu tabakalar, düşük kayıplı ortamdan yüksek kayıplı ortama kademeli geçiş sağlamak için kullanılmıştır. Yaklaşık 2-15 GHz frekans aralığında -20 dB'den daha iyi bir yansıma katsayısı sağlamaktadır.

ABD ordusu tarafında ise Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (Massachusetts Institute of Technology, MIT) Radyasyon Laboratuvarı tarafından geliştirilen Halpern Anti - Radyasyon Boyası (HARP) kullanılmıştır. Bu boya yakındaki nesnelere gelen radyasyon parazitini azaltarak radarın verimliliğini arttırmış ve 8-12 GHz (X-bant) frekans bölgesinde yaklaşık %31 (15 dB)'lik tepe noktası soğurma sağlamıştır [5,6].

HARP malzemelerine ek olarak, Radyasyon Laboratuvarı'nda "Salisbury ekran soğurucu" (Salisbury screen absorber) geliştirilmiştir. 1952 yılında, Salisbury tarafından 3 katmanlı yapı oluşturularak basit bir rezonans mikrodalga soğurucu patenti alınmıştır. Birinci katman dirençli yapı, ikinci katman gelen elektromanyetik dalganın dalga boyunun çeyreğine eşit bir hava boşluğu ve üçüncü katman ise mükemmel elektrik iletken zemin (PEC) katmanıdır. Bu soğurucuda, katmanların direncinin boş uzay empedansı 377 Ohm'a eşit olduğu ve yüzeyinden geri yansıma olmadığını kanıtlamıştır [7].

1960 başlangıcında ve sonrasında geniş bantlı bir soğurucunun elde edilmesi fikri hâkim olmuştur [8–11]. Ayrıca bu dönemde, soğurucu malzemenin ticari üretiminde önemli gelişmeler yaşanmıştır. Bu dönemde geniş bant soğurma ile ilgili en kapsamlı ve başarılı çalışmaların ABD Deniz Araştırma Laboratuvarı'nda Wright ve Emerson tarafından gerçekleştirildiği düşünülmektedir [12–14]. Üretim için seçilen malzeme "Hayvan kılından elde edilen" soğurucudur. Emerson, etkin bir geniş bant soğurucunun, yumuşak hayvan kılınının üzerine karbon siyahı ile boyayarak veya püskürtülerek yapılabileceğini göstermiştir [14]. Tasarlanan soğurucu yapıların başarısını göstermek için, araştırmacılar laboratuvarlarda bazı karmaşık ölçüm kurulumlarına ihtiyaç duymuştur. Böylece yankısız oda fikri ortaya çıkmış ve bu sayede istenmeyen çevresel yansımalar önlenmiştir. Bunu başarmak için karbon karası olan polimer köpükler bir odanın iç duvarını örtmek için kullanmışlardır [1].

1968 yılında Ohio'dan Benedikt A. Munk, Frekans Seçici Yüzeyler (FSS) olarak bilinen yeni bir yöntem analizi üzerine çalışmalar yapmıştır [15]. Analog Devre soğurucuları, Salisbury tarafından yapılan soğurucunun bir uzantısı olarak kabul edilebilen ve rezonansla elektromanyetik soğurma sağlayan soğurucu yapılarıdır [16]. Bu yapılar hem direnç hem de reaktif bileşenlerden (yani kayıplı frekans seçici yüzey, FSS) oluşan bir veya daha fazla tabakadan oluşmaktadır. İletken zemin düzlemi ile periyodik dizi düzlemi arkasındaki mesafe  $\lambda/4$  dalga boyu ile oluşmaktadır [15,17]. Modern Analog Devre soğurucuların tasarımları, yüksek geliş açılarında [18–20] ve geniş bantlarda soğurma sağlamıştır [21]. FSS yapılar, anten uygulamaları [22–24], filtre uygulamaları [25], lens uygulamaları [25], radar soğurucu malzeme [25] ve elektromanyetik kalkanlama [25] uygulamaları gibi birçok uygulamada kullanılmıştır [26].

## 1.1. LİTERATÜR TARAMASI

Metamalzeme, malzemenin ötesi anlamına gelmektedir. Metamalzemeler, doğada bulunmayan, belirli bir frekans aralığı için hem dielektrik geçirgenlik ( $\epsilon_r$ ) hem de manyetik geçirgenlik ( $\mu_r$ ) değerinin negatif olduğu ve yapay olarak elde edilebilen akıllı malzemelere verilen genel bir isimdir. Metamalzemeler alışılmamış malzemeler olduğundan, elektromanyetik malzeme araştırmalarının ve elektromanyetik çalışmaların en zorlu alanlarından biri olmuştur. Diğer malzemelerde bulunmayan özellikleri sayesinde sayısız potansiyel uygulamalarda kullanılabilir. Dolayısıyla metamalzemelerle ilgili yapılan çalışmalarda gün ve gün artış görülmektedir. Günümüzde metamalzemeler, plazmonik, fotonik kristaller, kompozit ortam, yapay olağanüstü elektromanyetik özelliklere sahip malzeme, yapay ortam, insan yapımı ortam, çift negatif metamalzemeler, tek negatif malzemeler ve kiral (chiral) ortam gibi çeşitli isimlerle tanımlanmaktadır [27–32].

Metamalzeme yapıların tarihçesine bakıldığında, 1898 yılında Hintli Bose tarafından “Burkulmuş yapı üzerinde elektromanyetik dalgaların polarizasyon durumu” yazısı yapay malzemeler üzerine yapılan ilk çalışma olarak görülecektir [33]. Karl 1912 yılında, bir kiral ortamın elektromanyetik dalga üzerindeki etkisini deneysel olarak

gösteren ilk kişidir [30]. Daha sonra 1957 yılında Tinoco tarafından kiral yapılarda düzlem polarize elektromanyetik dalgaların polarizasyon rotasyonu konusunda çalışma yapılmıştır [30]. 1959 yılında ise Harvey, “Mikrodalga frekanslarında optik teknikler” isimli çalışmasını yayınlamıştır. Bu çalışmayla birlikte yapay malzemeler kullanılarak düşük frekanslarda bazı cihazların üretilebileceği görülmüştür [32].

1967 yılında Rus fizikçi Veselago tarafından metamalzemeler hakkında ilk sistematik çalışma yapılmış ve metamalzemelerin elektromanyetik özellikleri incelenmiştir [34]. Malzemenin dielektrik geçirgenlik ( $\epsilon_r$ ) ve manyetik geçirgenlik ( $\mu_r$ ) değerlerinin negatif olması durumunda, ortamın da negatif kırılma indisli olabileceği teorisi Veselago tarafından ortaya konmuştur. Ayrıca, metamalzemelerin, elektrik alan vektörü  $\vec{E}$ , manyetik alan vektörü  $\vec{H}$  ve dalga vektörü  $\vec{k}$ ’nın sağ-el üçlü vektör formuna uymadığını ve sol-el üçlü vektör formuna uyduğunu ve ayrıca poynting vektörü  $\vec{S}$  ve dalga vektörü  $\vec{k}$ ’nin zıt yönlerde olduğunu göstermiştir. Bu malzemeler, terslenmiş Snell kırılma kanunu ve negatif kırılma indisi ortaya koymasına rağmen, böyle bir ortamın hâlihazırda fiziki olarak var olmadığından dolayı uzun yıllar ilgi görmemiştir. Ayrıca Veselago’nun bu çalışmasından uzun zaman önce, negatif kırılma indisi ve geri ilerleyen dalgalar üzerine bazı fikirler bilim adamları tarafından önerilmiştir [35–41]. Fakat belirtilen bu fikirler geri ilerleyen dalga ve onun negatif hızıyla ilgili olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla, Veselago’nun bu çalışması metamalzeme alanında ilk sistematik çalışma olarak kabul görmüştür [42–46]. Ayrıca 1967 yılında Rusça yayımlanan yayını 1968 yılında İngilizce’ye tercüme edilmiştir.

Yaklaşık 30 yıl boyunca literatürde teorik olarak kalmıştır. Ancak, 1996 yılında Pendry ve arkadaşları metal teller kullanarak negatif dielektrik geçirgenlik ( $\epsilon_r$ ) elde edilebileceğini deneysel olarak göstermişlerdir [47]. Daha sonra 1999 yılında, deneysel olarak ayırık halka rezonatörleri (Split-Ring Resonator, SRR) kullanarak negatif manyetik geçirgenlik ( $\mu_r$ ) değerinin elde edilebileceği de gösterilmiştir [48]. 2000 yılının başına kadar hem dielektrik geçirgenlik ( $\epsilon_r$ ) hem de manyetik geçirgenlik ( $\mu_r$ ) deneysel olarak Pendry ve arkadaşları tarafından ayrı ayrı doğrulanmıştır.



2000 yılında ise Smith ve arkadaşları ayırık halka rezonatörleri ve metal tel birleşimlerini kullanarak aynı anda negatif elektriksel geçirgenlik ( $\epsilon_r$ ) ve negatif manyetik geçirgenlik ( $\mu_r$ ) değerine sahip, çift negatif malzemeyi (Double Negative Materials, DNM) deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir [27].

2001 yılında ise Shelby ve arkadaşları, mikrodalga frekanslarda sol-el malzemeler (kırılma indisi negatif olan) üzerinde deneysel çalışmalar yaparak kırılma indisi negatif olan malzeme olduğunu göstermişlerdir. Yapılan malzeme, iki ayırık halka tipi rezonatör ve düz metal çubuk kullanılan periyodik bir yapıdan oluşmaktadır [49].

Önceki çalışmalarla birlikte 2006 yılında Engheta ve Ziolkowski, metamalzeme tasarımında kullanılan çeşitli geometrileri ve bunların mikrodalga, optik ve terahertz bölgelerindeki uygulamalarını ayrıntılı bir şekilde incelemişlerdir. Bu inceleme sayesinde metamalzemelerin potansiyel uygulama alanlarının ilerlemesine katkı sağlamışlardır [50].

2007 yılında Sabah ve arkadaşı, kayıplı sol-el malzeme (negatif kırılma indisine sahip malzeme) ortamı içerisinde elektromanyetik dalgaların yayılımı, (ortamdan yansımaları ve ortamda iletilmesi) üzerine çalışma yapmışlardır [51]. 2008 yılında ise Sabah, sol-el kiral malzemelerin karakterizasyonu ve analizi üzerine çalışma yapmıştır [52,53].

2008'de ise Li ve arkadaşları, kiral bir metamalzemede mikrodalgaların manyetik rezonans ve optik durumu hakkında çalışma yapmışlardır. Daha önceki teorik modelleri doğrultusunda iletim spektrumunda iki farklı rezonans tepesi elde etmişlerdir. Bu sayede, birleşik manyetik dimer sistemi ile birlikte ayarlanabilir aktif ortam ve optik cihazlar tasarlamak için pratik bir yöntem bulunmuştur [54].

Bir sonraki yıl 2009'da ise Wang ve arkadaşları, düzlemsel olmayan ortamda kiral metamalzemelerin optiksel davranışını araştırmak için deneysel ve sayısal olarak çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışma, üç boyutlu izotropik kiral metamalzemelerin tasarımı ve üretimi için önemli bir adımdır [55].

Aynı yıl Zhou ve arkadaşları, deneysel ve sayısal olarak, iki tabakalı çapraz tellere dayanan, düzlemsel olmayan ve negatif kırılma indisli metamalzeme üzerine tasarım yapmışlardır [56]. Sunulan kiral tasarım, herhangi bir frekansta negatif bir kırılma indisi gerçekleştirmek için çok daha basit bir geometri ve daha verimli bir çözüm sunmaktadır. Devamında yapılan çalışmada ise THz frekans bölgesinde negatif kırılma indisli ve düzlemsel olmayan metamalzemeleri deneysel olarak üretmişlerdir [57].

Metamalzeme kullanım alanlarında ilerleme sağlamak veya yeni işlevler elde etmek için araştırmacılar çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Bu alanlardan; anten, lens teknolojisi, sensör, radar sistemleri ve kablosuz haberleşme sistemleri alanlarında yapılan birkaç çalışma aşağıda sunulmuştur.

2007 yılında Majid ve arkadaşları, değiştirilmiş kare ve dikdörtgen ayrıntı halka tipi rezonatörleri kullanarak meydana gelen klasik metamalzeme yapısını mikroşerit anten yapısına uygulamışlardır. Bilgisayar ortamında tasarlanan malzeme simülasyon sonuçları ile üretilen metamalzeme ölçüm sonuçlarının tutarlı olduğu gösterilmiştir. Metamalzeme ile yama mikroşerit anten birleştirdikten sonra, mikroşerit antenin kazancının 4 dB'ye kadar arttırdığı ve bant genişliğinin %2.9'dan %4.98'e genişlediğini bulmuşlardır [58].

Yapılan başka bir metamalzeme esaslı anten uygulamasında ise Song ve arkadaşları, zaman domaininde sonlu farklar metodu (FDTD) kullanarak I-şekilli sol-el malzemelere dayanan bir yama anten üzerine çalışma yapmışlardır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, 6.7 GHz'de daha yüksek bir anten kazancı, daha düşük geri dönüş kaybı elde etmişlerdir [59].

2009 yılında Slyusar tarafından metamalzeme teorisini ve anten tasarımında kullanımını açıklayan çalışma yayınlanmıştır. Bu çalışmada, metamalzeme teorisi, gelişimi, temel tarihsel yönleri ve mühendislik uygulama alanları hakkında bilgi verilmiştir [60].

2009 yılında Melik ve arkadaşları, ayırık halka tipi rezonatör yapıyı kullanarak esnek kablolu gerinim sensörleri tasarımı, üretimi önermiş ve göstermişlerdir. Bu metamalzeme sensörleri için, esnek bir katmanın silikon katmanı ile karşılaştırıldığında daha fazla hassasiyet gösterdiğini ve daha doğrusal bir tepki verdiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca sensör uygulamaları çalışmalarında farklı rezonatör yapılarını kullanmışlar ve geliştirilen farklı rezonatör yapılarıyla da sensör uygulamalarının yapılabileceği göstermişlerdir [61,62].

2013 yılında ise Sabah ve arkadaşı, geniş kenara bağlı üçgen ayırık halka rezonatörleri kullanarak THz frekanslarında çalışan sensör tasarlamış ve simüle etmişlerdir. Nümerik olarak tasarlanan sensör sayesinde daha geniş frekans aralığında çalışma olanağı sağlamışlardır. Genel olarak, yapının polarizasyon bağımlılığı, çift taraflı algılama ve yüksek hassasiyeti sayesinde, bu yapıların THz sensörleri olarak kullanılmasına imkân vermiştir [63]. Aynı yıl Withayachumnankul ve arkadaşları, ayırık halka rezonatörden oluşan metamalzemelerin kullanılmasıyla mikro-akışkan sensör tasarımını elde etmişlerdir [64].

Aynı yıl Ekmekçi ve arkadaşı, mikrodalga ve terahertz uygulamalarında kimyasal, biyolojik ve basınç algılama için etkili bir şekilde kullanılabilen minyatür çok amaçlı bir metamalzeme sensörünün fizibilitesini göstermişlerdir. Sensör, iki özdeş ayırık halka rezonatörleri arasına sıkıştırılmış ek bir algılama ortamı ile oluşturulmuştur. Sensörün rezonans frekansı, sıcaklık, nem, yoğunluk, konsantrasyon veya basınç gibi çevresel parametrelerdeki değişikliklere yanıt olarak ara katman ortamının dielektrik geçirgenliği veya kalınlığı ile değişmektedir. X-bandında yaptıkları konsept metamalzeme sensör çalışmaları ile prototip sonuçları hem sayısal hem de deneysel olarak iyi uyduğunu göstermişlerdir [65].

2015 yılında Jalil, tekstil malzemesi kullanan kompakt çipsiz RFID metamalzeme yapı üzerine çalışma yapmıştır. Çipsiz RFID etiketinin tasarımı için düzlemsel iletim hattında dikdörtgen oluklu tamamlayıcı bölünmüş halka rezonatörü (CSRR) kullanan yeni çoklu rezonatör kullanmıştır. Tasarım, alt tabakanın arkasına kazınmış ve 50 Ohm düzlemsel iletim hattına bağlanan 4 halka rezonatörden oluşmaktadır. Her rezonatör, 200 MHz bant genişliği tahsisi ile dört farklı tahsis (00, 01, 10, 11) kodlamayı

sağlamaktadır. 25 mm × 20 mm esnek çipsiz RFID etiketi, düşük kayıplı, 8 bit ve 2.5 ila 6.5 GHz arasında çalışmaktadır [66].

2016 yılında Can ve arkadaşı, tekstil esaslı metamalzeme yapı ile radar kesitinin azaltılması üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarında, tekstil esaslı bir metal yüzeyi, mükemmel iletken plakanın radar kesitini azaltmak için frekans bandında negatif dielektrik geçirgenlik değerine sahip olacak şekilde tasarlamışlardır. CST (Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi) yazılım programı kullanarak simüle etmişlerdir. Hava iç empedansı ile eşleşen yaklaşık 377 Ω empedans elde edilmiştir ve toplam radar kesit alanının (RCS), %29 azalmaya karşılık gelen 430 mm<sup>2</sup>'den 304 mm<sup>2</sup>'ye düştüğünü göstermişlerdir [67].

2018 yılında Binion ve arkadaşları tarafından gelişmiş metamalzeme anten sistemleri üzerine detaylı derleme makalesi yapılmıştır. Metamalzeme yüzeylerinin veya merceklelerinin eklenmesinin, geleneksel antenlere göre anten performansını önemli ölçüde artırdığını göstermişlerdir [68].

2018 yılında Kazak ve arkadaşları, optik metamalzeme oluşturmada yeni metal-dielektrik nano yapı türlerinin oluşumu ve özellikleri üzerine araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada, metal-dielektrik (metal-polimer) katmanları ile oluşturulan metamalzeme yapılar tasarlamışlardır. Sentezlenen yapıların dielektrik ve rezonans özelliklerini hem teorik hem de deneysel olarak incelemişlerdir. Geliştirilen ve üretilen metamalzemelere dayanarak, özellikle ultraviyole alandan kızılötesi alana kadar spektral aralıktaki yakın ve uzak alanlarda kullanılan yeni tip düz lenslerin (süper lenslerin) üretiminde kullanılabileceğini göstermişlerdir [69].

Bu kısma kadar metamalzemelerin ilk kullanımından başlayarak kullanılan tüm alanlara ait çalışmaların özetlenmesinin ardından, devam eden kısımda tez konusuna yönelik olarak metamalzemelerin **soğurucu** alanında yapılan çalışmaları detaylı olarak incelenmiş ve özetleri verilmiştir.

İlk olarak soğurucu olarak kullanılabileceği Landy ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmayla gösterilmiştir. Bu çalışmalarında nümerik ve deneysel olarak

metamalzemeyi sinyal soğurucu olarak kullanılabileceğini kanıtlamışlardır. Tasarlanan metamalzeme iki rezonatör yapıdan oluşmuş, dielektrik ve manyetik rezonans sağlayarak soğurma görevi yapmaktadır ve literatürde temel alınan çalışma olarak geçmektedir [70].

2009 yılında Tao ve arkadaşları, Terahertz frekanslarında kuvvetli rezonans soğurucu görevi gören bir metamalzeme sunmuşlardır. Tasarımları, elektriksel geçirgenliğin ve manyetik geçirgenliğin bağımsız olarak ayarlanması yoluyla soğurmanın en üst düzeye çıkarılmasına izin veren iki katmanlı bir birim hücreden oluşmaktadır. 1.3 THz'de %70'lik bir deneysel soğurma göstermiştir [71]. 2009 yılında Wang ve arkadaşları, THz frekans bölgesinde, geniş açılı ve polarizasyon bağımsız kiral metamalzeme soğurucu üzerine çalışma yapmışlardır. Hem simülasyon hem de deneysel ölçümlerle, soğurucunun farklı polarizasyonlar ve farklı geliş açılı için iyi çalıştığını göstermişlerdir [72].

Üretim çalışmaları artıkça çeşitli farklı geometrilerde metamalzeme tasarımlar ortaya çıkmıştır. Ayrık halka rezonatörleri (Split-Ring Resonators, SRR) metamalzemeleri üretmek için kullanılan en yaygın yapılardan biridir [73]. Ayrık halka rezonatörler manyetik olmayan malzemelerdir. Genellikle metamalzemeleri oluşturmak için devre kartı (FR4) malzemesinden imal edilmişlerdir. İlk ayrık halka rezonatör tasarımı bir biri içeresine geçmiş kare "C" şekillerinden oluşmaktadır [49]. Bundan sonraki çalışmalarda çeşitli farklı formlarda üretilebilen geometrik tasarımlar bulunmaktadır. Bunlardan bazıları  $\pi$  şekli [74], U şekli [75], çapraz şekilli [76],  $\Omega$  şekilli [77], S şekilli [78], hilal biçimli [79], V şekilli [80], sekizgen şekilli [81], gamalı haç eşleniği [82], file tipi [83] vb. birçok çalışma da yapılmıştır ve günümüzde yapılmaya devam etmektedir.

2010 yılında ise Cheng ve Yang, mikrodalga frekans aralığında yüksek soğurma sağlayan metamalzeme soğurucu tasarımı yapmışlardır. Üretilen tasarımları, iki rezonatör ve sadece 0.9 mm kalınlığında tek bir düzlemsel katman içindeki tüm elektrik ve manyetik alanları soğurmak için ayrı ayrı birleştirilen bir metal telden oluşmaktadır. Soğurmanın, deneylerde 10.4 GHz civarında %98'den ve simülasyonlarda %99.9'dan fazla olduğunu göstermişlerdir [84]. Devamında Zhu ve

arkadaşları, metamalzeme temelli polarizasyon bağımsız bir mikrodalga soğurucu tasarımı, üretimi ve ölçümü üzerine çalışma yapmışlardır. Deneysel ve simülasyon üzerindeki ölçüm sonuçları ile %97'ye kadar soğurma elde etmiş ve polarizasyon bağımsız olduğunu göstermişlerdir [85]. Sonrasında ise ayarlanabilir elektromanyetik metamalzeme reflektör/soğurucu üzerine çalışma yapmışlardır. Diyotlar da dâhil edilerek elde edilen metamalzeme soğurucu yapının geliş açısı bağımsız ve polarizasyon kontrollü yapılabileceğini göstermişlerdir. Mikrodalga bandındaki sayısal simülasyonlar ve deneysel ölçümlerle doğrulanmıştır [86].

2011'de Lee ve arkadaşı, bir çift rezonans metamalzeme kullanılarak bant genişliği arttırılmış bir mikrodalga sinyal soğurucu tasarlamışlardır. Tasarlanan soğurucunun performansı farklı polarizasyonlar için aynı kalmaktadır. Deneysel sonuçlar sayısal tasarım sonuçlarını desteklemektedir [87]. Devamında Sun ve arkadaşları, 0 ila 70 GHz aralığında yaklaşık 60 GHz'lik geniş bantlı bir metamalzeme sinyal soğurucu gerçekleştirmişlerdir. Bu tasarımda çok katmanlı SRR yapısı kullanmışlardır [88].

2013 yılında Park ve arkadaşları, mikrodalga frekanslarda çok bantlı metamalzeme soğurucular üzerine çalışma yapmışlardır. Birden fazla bantta çalışan soğurucuların tasarımı, analizi, üretimi ve ölçümü üzerine çalışmalar sunmuşlardır. Mikrodalga yankısız odada deneyler yapmışlardır. Metamalzeme soğurucular, farklı boyutlarda çörek şekilli rezonatörlerin hassas bir şekilde düzenlenmesinden ve bir dielektrik ile ayrılmış metalik bir arka plan düzleminden oluşmaktadır. İkili, üçlü ve dörtlü tepelerin neredeyse mükemmel soğurması polarizasyonu ve geliş açısı bağımsızlığını göstermişlerdir. Sonuçların pratik uygulamalar için umut verici olduğunu söylemişlerdir [89].

Lee 2014 yılında çift rezonansa dayalı geniş bantlı esnek metamalzeme soğurucu üzerine çalışma yapmıştır. Metamalzemenin birim hücresi, elektrik-endüktif-kapasitif rezonatör yapısıyla birlikte esnek poliimid katmanıyla oluşturulmuştur. Ortak metamalzeme soğurucunun aksine, önerilen yapının metalik desen tabakası, hedeflenen frekans bantları dışındaki frekanslarda radar kesitini (RCS) azaltmak için gelen dalganın yayılma yönüne paralel olarak yerleştirilmiştir. Deneyleri sonucunda,

önerilen soğurucunun 8.6 GHz ve 13.4 GHz’de geniş bantlı %93’lük bir maksimum soğurma oranına sahip olduğunu göstermiştir [90].

2015 yılında He ve arkadaşları, 180  $\mu\text{m}$  kalınlığa sahip dikdörtgen bir çubuk dizisi şeklinde hibrit yapıya dayanan optik kontrollü bir metalmalzeme soğurucu yapmışlardır. Hibrit soğurucu yapı, yüksek mukavemetli silikon/polimer gofret yüzeyine 25  $\mu\text{m}$  kalınlığında bir poliimid esnek yüzey üzerine imal etmişlerdir. Metalmalzeme yapıyı değiştirerek ve dikdörtgen ünitenin uzunluğunun, deneylerle doğrulanan rezonans frekansını modüle edebileceğini göstermişlerdir. Bu sonuçlar doğrultusunda, optik olarak kontrol edilen bir hibrid metalmalzeme yapı kullanılarak THz frekans bandında alternatif soğurucu oluşturulabileceğini göstermişlerdir [91].

2017 yılında Xin ve arkadaşları, esnek çift-bant metalmalzeme soğurucu tasarımı, üretimi ve karakterizasyonu üzerinde çalışma yapmışlardır. Mikrodalga frekanslarında esnek bir çift bantlı metalmalzeme soğurucunun sandviç yapısı T şeklindeki periyodik diziden oluşmaktadır. Önerilen metalmalzeme soğurucunun 16.77 ve 30.92 GHz’de iki ayrı soğurucu zirvesine sahip olduğu sırasıyla %98.7 ve %99.3’lük soğurma oranı elde etmişler ve elektromanyetik dalganın polarizasyona etkisini araştırmışlardır. Ölçülen dalganın sonuçları ile simüle edilmiş sonuçların uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Üretilen esnek metalmalzeme soğurucunun kolayca şekil değiştirerek diğer uygulamalarda kullanılabileceğini söylemişlerdir [92].

2017 yılında Omar ve arkadaşları, frekans esaslı soğurucu 3-boyutlu yapılar üzerine çalışma yapmışlardır. 3-boyutlu frekans seçici yapının birim hücresinde çoklu rezonanslara sahip geniş bant soğurucu tasarımları için tekstil malzemesi kullanmışlardır. İki tip tasarım önermişlerdir. İlki, soğurucu frekans seçici yansıma yapısıdır (AFSR). Diğeri ise soğurucu frekans seçici iletim yapısıdır (AFST). Bu iki tasarımın prototipini üretmiş ve ölçümünü yapmışlardır. Bunlardan ilki, en düşük soğurma frekansında yapının kalınlığı 0.12  $\lambda$  ile 14.4 GHz olan %55.7’lik soğurma bant genişliğine sahip bir soğurucudur. İkincisi, iletim penceresinin her iki tarafında geniş soğurma bantlarına sahip bir AFST yapısıdır. Bu yapıda soğurma bantları %54 ile %76 olmuştur. Simülasyon ve ölçülen sonuçlar arasında iyi uyum olduğunu göstermişlerdir [93].

2017 yılında Lai ve arkadaşları, 23.4 GHz’de optik şeffaf ultra geniş bantlı mikrodalga soğurucu tasarımı üzerine çalışma yapmışlar ve 15.6 ila 39.0 GHz arasında geniş bantlı soğurucu elde etmişlerdir. Kullanılan malzeme, ölçüm yapılan frekans aralığında saydamdır. Soğurucu kalınlığı merkez dalga boyunun yaklaşık 1/10’u olacak şekilde seçilmiştir. Analiz sonuçlarına göre soğurucunun polarizasyon açısına duyarsız olduğunu ve geliş açısının 30°’den küçük olan durumlar için çok az düştüğünü göstermişlerdir. Genel olarak, bu soğurucu ile hem görünür ışık hem de mikrodalga frekanslarında geniş bantlı düşük yansıma sağlayarak, gizli sistemlerin tasarımı için yeni bir çözüm olabileceğini savunmuşlardır [94].

Metamalzeme esaslı soğurucu yapıların uygulama alanlarını arttırmak için esnek yapıya sahip metamalzeme çalışmaları hız kazanmıştır. 2016 yılında Wakatsuchi ve arkadaşları, esnek ve çok yönlü metamalzeme soğurucuların tasarlanması üzerine kapsamlı bir araştırma yapmışlardır. Bu çalışmalarında, periyodik yapılara dayanan yeni tip metamalzeme esaslı soğurucular ile malzemenin kalınlığını azaltarak yüksek performanslı soğurucu tasarlamak için yol göstermişlerdir. Özellikle, iki tip metamalzeme soğurucu sınıfı tanımlamaktadırlar: Bunlardan ilki, soğurma ve saçılma parametrelerini istenilen frekanslara özelleştirmeye imkân sunmaktadır. Diğeri ise kablosuz iletişimi sürdürmek için yalnızca yüksek güçlü mikrodalgaları soğurmakta ve aynı frekansta olan zayıf sinyalleri iletilmesini sağlamaktadır. Bu iki tip metamalzeme soğurucunun karmaşık EM parazit sorunlarını çözmesini kolaylaştırmasını öngörmektedirler [95].

Esnek metamalzeme soğurucu tasarımı yapmak için literatürde dielektrik katmanda birçok malzeme kullanılmıştır. Bunlardan en çok tercih edilenleri polydimethylsiloxane [96], polimer [97,98], polymide [90,99–102], silikon [91], polypropylene [103], komposit yapı [104], tekstil [105–112] malzemeleridir. Esnek malzeme esaslı metamalzeme oluştururken ise de çeşitli yapışma teknikleri kullanılmıştır. Bu teknikler ise, serigrafı [110], mürekkep püskürtmeli baskı [96,113], litografik süreçler [97] ve damgalama [98] şeklinde sıralanabilir. Bu teknikler kullanılarak periyodik şekiller, malzemenin yüzeyine yapıştırılarak soğurucu metamalzeme elde edilmektedir.



Tekstil esaslı yapılan metamalzeme soğurucu çalışmalarının diğer esnek malzemelere göre çeşitli avantajları bulunmaktadır. Bunlardan bazıları şunlardır; giyilebilir olması, nefes alabilir yapıda olması, üretim kolaylığı, çeşitli uygulamalara uyarlanabilmesi, düşük ağırlığa sahip olması ve maliyeti düşük olması şeklinde sıralanabilmektedir. Tekstil esaslı metamalzeme soğurucu çalışmaları aşağıda sunulmuştur.

2014 yılında Cavalcante ve arkadaşları tarafından tekstil yüzeylerde bant durduran frekans seçici yüzeyler (FSS) tasarlamak için çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, yüksek esneklik, düşük ağırlık, FSS yapılarında kullanılan tipik dielektrik katmanlara göre bazı avantajlar sergileyen tekstil katmanlar üzerine basılmış artı şekilli, kare döngü ve üçgen yama elemanları ile frekans seçici yüzeylerin araştırmasını yapmışlardır. Simüle edilmiş sonuçları doğrulamak için tekstil FSS örnekleri üretmiş ve ölçmüşlerdir. Simülasyon ve ölçüm sonuçları arasında iyi bir uyum olduğunu göstermişlerdir [105].

2015 yılında Burgnies ve arkadaşları tarafından negatif kırılma indisine sahip tekstilden esinlenilmiş esnek metamalzeme üzerine çalışma yapılmıştır. Bu çalışma daha önce elektromanyetik kalkanlama uygulamalarında olduğu gibi [114] ince bir dielektrik filmle kaplanmış metalik teller kullanılarak dokuma kumaş içerisine dâhil edilerek metamalzeme elde edilmiştir. Sayısal simülasyonlarla, düzenlenmiş bir çift kıvrımlı metalik telin, eşzamanlı olarak dielektrik ve manyetik geçirgenliğinin negatif değere sahip olduğunu ve kırılma indisinin de negatif olduğunu göstermişlerdir. Son olarak, dokuma metamalzemenin geliş açısının  $60^\circ$ 'ye kadar geliş açısı bağımsız olduğunu göstermişlerdir [106].

2015 yılında Esen ve arkadaşları tekstil malzemesinin mikrodalga frekans bölgesinde elektromanyetik soğurma özellikleri üzerine deneysel araştırma yapmışlardır. Titanyum nano parçacıkları, insan sağlığına uygun olması ve diğer metallere göre çok yüksek sıcaklıklarda tepkimeye girmesi gibi özelliklere sahip olduğundan tercih edilmiş ve tekstil yüzeye püskürtülerek kaplama yapılmıştır. Rezonansta % 98'e kadar soğurma elde etmiş ve numunenin soğurma özelliklerinin geliş açısının bağımsız olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, önerilen tekstil soğurucu, malzeme özelliklerini

ayarlamak ve yapısını diğer frekanslara uyacak şekilde kolayca ayarlamak için esneklik sağlayan basit bir yapılandırma çalışması yapmışlardır. Bu sayede önerilen tekstil soğurucu ve varyasyonları, radar teknolojisi, uzun mesafeli radyo uygulamalarının yanı sıra görünmezlik pelerini ve diğer bilim kurgu cihazlarının tasarımına öncülük edeceğini düşünmüşlerdir [107].

2016 yılında Lee ve arkadaşı, tekstil üzerine moda markası olan Chanel logosunu kullanarak baskılı giyilebilir metamateryale soğurucu üzerine çalışma yapmışlardır. Önerilen soğurucunun bir birim hücresi, giyilebilir cihaz için Chanel logosudur. Serigrafi yöntemiyle tekstil üzerine basımını gerçekleştirmiştir. Tasarlanan soğurucunun performansını göstermek için dalga kılavuz ölçüm sistemi kullanmışlardır. Deney sonuçları, önerilen soğurmanın 11 GHz'de %93 olduğunu göstermiştir [108].

2017 yılında Can ve arkadaşları, tekstil üzerine frekans seçici yüzey tasarımı, üretimi ve ölçümü konusunda çalışma yapmışlardır. Birim hücre tasarımı için yaygın olarak bilinen bir ayırık halka rezonatörü (SRR) kullanarak 4×6 elemanlı bir dizi kullanmışlardır. Tasarlanan dizi, yarıçapı 22.45 cm olan bir küre üzerine yerleştirilerek bükülme işlemi yapılmıştır. Düzlemsel yapıya uygulanan bükülme işleminin soğurma performansına etkisi araştırılmış ve değerlendirilmiştir. Böylece düzlemsel yapı ile bükülme işlemi uygulanmış yapı için tatmin edici bir sonuç değeri elde edilmiştir [109].

2017 yılında Ghebrebrhan ve arkadaşları tekstil yüzeyi üzerine frekans seçici yüzey çalışması yapmışlardır. Bu çalışmalarında naylon tekstil kumaş üzerine püskürtme yöntemini kullanarak 2 boyutlu gümüş mürekkep kare yüzeyler oluşturarak bir frekans seçici yüzey geliştirmişlerdir. Esneklik ve nefes alabilirlik gibi arzu edilen tekstil özelliklerini korurken, dar bantta milimetre dalga iletimini engelleyen bir tekstil üretmeyi başarmışlardır. Rezonatörler ve rezonans dalga boyu, örgü boyutu mertebesinde. Ayrıca tekstil yapının %8 ila %16 esneme yapıldığında soğurmaya etkisini incelemişlerdir. Esnemeye bağlı olarak iletim tepe noktasında hafif bir kayma ve değerinde artış, yansıma tepe noktasında ise hafif bir kayma elde etmişlerdir [110].

2017 yılında Tak ve arkadaşı mikrodalga frekanslarında giyilebilir metamalzeme soğurucu tasarımı üzerine çalışma yapmışlardır. Önerilen tasarım, farklı boyutlarda iki kare halka rezonatör, bir destek zemin düzlemi ve 1 mm kalınlığında bir keçe katmandan oluşmaktadır. İletken katman, iletken tellerle oluşturulan tekstil malzemesi kullanarak elde etmişlerdir. Farklı kare halka rezonatörlerin ızgara dizisi, iki komşu rezonans tepe noktası nedeniyle geniş bir soğurma bandı sağlamıştır. Ölçülen sonuçlar doğrultusunda, %90'dan daha büyük iki soğurma tepe noktası elde edilmiştir. Ayrıca, önerilen tasarım, elektromanyetik dalgaların polarizasyon açısına, 60°'ye dereceye kadar geniş açısına ve bükülme etkisinden bağımsız yüksek bir soğurucu özelliğine sahiptir. İç mekân radarı uygulamaları için kullanılabileceğini önermektedirler [111].

2018 yılında Burgnies ve arkadaşları, dokuma tekstil metamalzemeleri ile yüksek geçiren filtre üzerine çalışma yapmışlardır. Metal ipliklerle ve dielektrik ipliklerin dokunmasıyla üretilen tekstil materyalleri, milimetre altı banttaki filtreleme işlemleri için düşünmüşlerdir. Dokuma bir metamalzeme ile 500 GHz civarında kesme frekansına sahip yüksek frekans geçiren bir filtre tasarlamışlardır. Dokuma metamalzemeyi yansıma ve iletkenlik özelliklerinden sorumlu olan iki rezonans empedansının oluşturduğu eşdeğer bir devre vasıtasıyla analiz etmişlerdir. Yarı endüstriyel bir ortamda otomatik dokuma tezgâhı ile bir tekstil metamalzeme üretmişler ve boş alan ölçüm yöntemi kullanarak deneysel ölçüm yapmışlardır. Deney sonuçları ile simülasyon sonuçları kıyaslandığında iyi bir uyum içinde olduğunu göstermişlerdir [112].

## **1.2. ÇALIŞMANIN AMACI**

Haberleşme teknolojilerinin hızlı gelişimi savunma sanayinde ve birçok uygulama alanında, araştırma geliştirme çalışmalarının hız kazanmasına, yeni ihtiyaçların ortaya çıkmasına ve yeni elektromanyetik malzemelerin üretimi üzerindeki çalışmaların artmasına yol açmıştır. Doğada bulunmaması, yapay olarak elde edilmesi ve olağanüstü elektromanyetik özelliklere sahip olmasından dolayı metamalzeme çalışmaları bu alanda popülerliğini gün ve gün arttırmaktadır.

Bu tez çalışmasında, iletken ve yalıtkan katmanların bir araya getirilmesi ile meydana gelen metamalzemelerin elektromanyetik dalgalara olan etkileşimleri sayesinde soğurma özelliği gösteren “Farklı Konfigürasyonlarda Tekstil Esaslı Metamalzeme Soğurucu Tasarımı ve X-Bant Uygulamaları” konusunda çalışmalar yapılmıştır.

Önceki yapılan metamalzeme soğurucu çalışmalarında yalıtkan katman olarak genellikle FR4 malzemesi kullanılmıştır. Bu malzeme sert ve şekil vermesi zor bir malzemedir. Zamanla, metamalzemelerin uygulama alanını artırmak için yeni malzemelere ihtiyaç duyulmuş; esnek, şekillenebilen ve şeffaf malzemeler tercih edilmeye başlanmıştır. Bu malzemelerin içinde giyilebilir yapısı olmasından dolayı tekstil ürünleri üzerinde de birçok çalışma yapılmıştır. Literatür taraması bölümünde tekstil esaslı metamalzeme soğurucu çalışmaları hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Fakat bu çalışmalarda periyodik rezonatör yapılar, tekstil yüzeyine basit yapıştırma yöntemleri ile elde edilerek üretilmişlerdir.

Yapılan bu çalışmada, tekstil yapıları araştırılmış, incelenmiş ve X-bant frekans aralığına en uygun tekstil ürünleri seçilerek tekstil esaslı MMA tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Böylece, tekstil geometri kullanılarak 3-boyutlu periyodik rezonatör yapılar elde edilmiştir. Bu sayede yüksek soğurma oranı, polarizasyon ve geliş açısı bağımsız yapı, esnek yapı, yıkanabilir, giyilebilir, imalat kolaylığı, uygulanabilirlik, düşük ağırlık, uygun maliyet ve geniş bantlı soğurma oranına sahip tekstil esaslı MMA yapılması amaçlanmıştır. Ayrıca, metamalzeme soğurucu tasarımına ilişkin araştırma-geliştirme çalışmaları yapmak, tasarım sonucunda elde edilen bilgilerin literatüre kazandırılması ve bu kapsamda kullanılabilirliğini arttırmak hedeflenmiştir.

Bu tez kapsamında üretilen tekstil esaslı MMA, savunma sanayi, askeri uygulamalar, telekomünikasyon, radar sistemleri, sinyal soğurucu ve vb. birçok alanda kullanılabileceği öngörülmüştür.

### 1.3. TEZİN ANA HATLARI

Bu tez çalışması toplam dört ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde soğurucu yapılar hakkında özet, metamalzeme yapılar hakkında detaylı bilgiler verilerek literatür taraması yapılmış ve çalışmanın amacı hakkında bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde, metamalzemelerin tanımı ve kendine has özellikleri (iletim özellikleri, negatif kırılma indisi ve ters snell yasası) hakkında bilgiler verilmiştir. Metamalzeme soğurucu yapıların analizi için gerekli S-parametreleri ve soğurma teorisi hakkında özet bilgi verilmiştir. Ayrıca, tekstil esaslı metamalzeme soğurucu bileşenleri tanımlanmış, dalga kılavuzu ölçüm sistemi ve kalibrasyon işlemleri hakkında detaylı açıklama yapılmıştır.

Sonraki bölümde, tekstil esaslı metamalzeme yapı için birçok tasarım yapılmış ve bu tasarımların soğurma oranına etkileri hakkında bilgiler verilmiştir. CST programında elde edilen sonuçlar analiz edilerek verilmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda metamalzeme yapının üretim alt yapısı araştırılmış ve en uygun yöntem belirlenerek üretim aşaması hakkında detaylı açıklamalar yapılmıştır. Üretilen ve simüle edilen metamalzeme yapının sonuçları karşılaştırılmış ve birçok alanda kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Son bölümde, ölçüm sistemi ve simülasyon ortamında birbirini destekleyen başarılı sonuçlar yorumlanarak bir arada verilmiştir. Sonraki çalışmalara ilham vermesi açısından bazı önerilerde bulunulmuştur.

## BÖLÜM 2

### MATERYAL VE YÖNTEM

#### 2.1. METAMALZEMELER

Metamalzemeler; iletken katman, yalıtkan katman ve periyodik iletken şekillerin bulunduğu katmanların birleşiminden oluşmaktadır. Periyodik yapının boyutları ve dizilimleri elektromanyetik dalgayla olan etkileşimlerini değiştirmektedir. Malzemelerde sağ-el üçlü vektör formunda olan elektrik alan vektörü ( $\vec{E}$ ), manyetik alan vektörü ( $\vec{H}$ ) ve dalga vektörü ( $\vec{k}$ ) metamalzemelerde sol-el üçlü vektör formuna uymaktadır. Poynting vektörü ( $\vec{S}$ ) ile dalga vektörü ( $\vec{k}$ ) zıt yönlerdedir [34].

##### 2.1.1. Metamalzemelerin İletim Özellikleri

Malzemenin iletim özellikleri veya elektromanyetik dalganın yayılımını belirleyen temel parametreler, malzemenin dielektrik geçirgenlik ( $\epsilon_r$ ) ve manyetik geçirgenlik ( $\mu_r$ ) parametreleridir [115]. Malzeme parametreleriyle ilişkisi olan dalga vektörü ( $\vec{k}$ ) ve kırılma indisi ( $n$ ) genel tanımını Eş. 2.1'de verilmiştir.

$$k = \sqrt{\epsilon \mu} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \omega c_0^{-1} = n \omega c_0^{-1} \quad (2.1)$$
$$c_0 = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

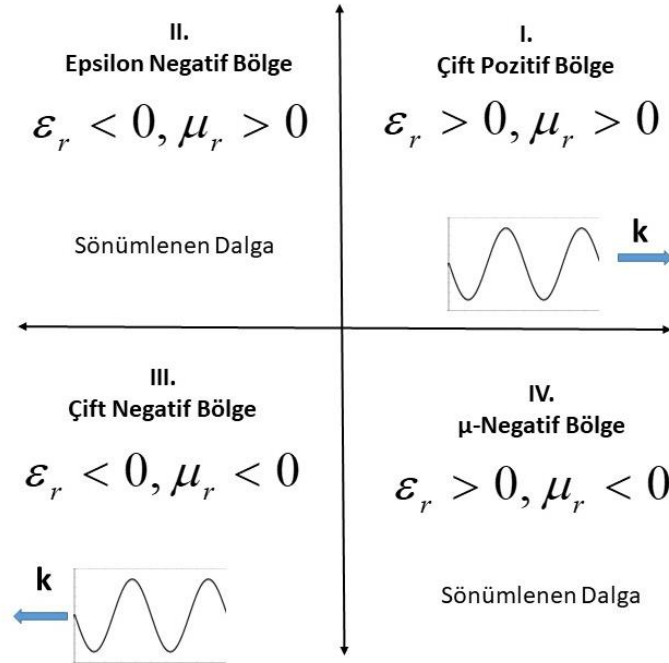
Burada,  $\omega = 2\pi f$  açısal frekans ve  $c_0$  ışık hızını ifade eder. Normal malzemelerde veya sağ-el üçlü vektör formuna sahip malzemeler için dielektrik geçirgenlik ( $\epsilon_r$ ) ve manyetik geçirgenlik ( $\mu_r$ ) değerleri pozitiftir. Metamalzemeler aynı anda negatif işaretli ( $\epsilon_r$ ) ve ( $\mu_r$ ) değerlerine sahip olmaktadır. Veselago tarafından yapılan çalışmada negatif dielektrik geçirgenlik ve negatif manyetik geçirgenlik değerine

sahip metamateryale ile negatif kırılma indisi ( $n$ ) teorik olarak elde edilebileceği Eş. 2.2’de ortaya konulmuştur [34].

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (2.2)$$

$\epsilon_r < 0$  ve  $\mu_r < 0$

Malzemelerin dielektrik geçirgenlik ( $\epsilon_r$ ) ve manyetik geçirgenlik ( $\mu_r$ ) değerlerinin dört olasılıklı işaretleri bulunmaktadır ve dört bölgede Şekil 2.1’deki gibi sınıflandırılmaktadır. İlk bölgeye çift pozitif ortam denir ve doğada bulunan malzemeler veya sağ-el üç vektör formuna sahip malzemelerdir. İkinci bölgeye dielektrik geçirgenlik ( $\epsilon_r$ ) değerinin negatif olmasından dolayı epsilon negatif ortam denir ve sadece sönümlü dalgalar mevcuttur. Üçüncü ortam ise hem dielektrik geçirgenlik ( $\epsilon_r$ ) hem de manyetik geçirgenlik ( $\mu_r$ ) değerlerinin negatif olmasından dolayı çift negatif ortam denir ve sol-el üç vektör formuna sahip metamateryalelere karşılık gelmektedir. Diğer bölgede ise manyetik geçirgenlik ( $\mu_r$ ) değerlerinin negatif olduğundan “ $\mu$ -negatif ortam” ortam denir ve sadece sönümlü dalgalar mevcuttur [116].



Şekil 2.1. Malzeme sınıflandırma diyagramı [117].

Negatif dielektrik geçirgenlik ( $\epsilon_r$ ) ve negatif manyetik geçirgenlik ( $\mu_r$ ) değerlerine sahip metamateryale ortamın karakteristik özelliklerinin anlamak için Maxwell denklemleri uyarlanmıştır. İlk olarak zaman bölgesinde Maxwell denklemleri aşağıda gibi verilmiştir.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (2.4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.5)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.6)$$

Aşağıdaki eşitliklerde, manyetik akı yoğunluğu ( $\vec{B}$ ) ve elektrik akı yoğunluğu ( $\vec{D}$ ) verilmiştir.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.7)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.8)$$

Dalga vektörü  $\vec{k}$  ile gösterilen bir yönde ilerleyen düzgün düzlem dalga için  $\vec{E}$  elektrik ve  $\vec{H}$  manyetik alan ifadeleri sağ-el kuralı ile ifade edilir. Sağ elin dört parmağı  $\vec{E}$  elektrik alan yönünden  $\vec{H}$  manyetik alan yönüne doğru döndürdüğümüzde, başparmak dalga vektörü  $\vec{k}$  yönünü gösterir ve aşağıdaki dalga eşitlikleri elde edilir.

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega \mu \vec{H} \quad (2.9)$$

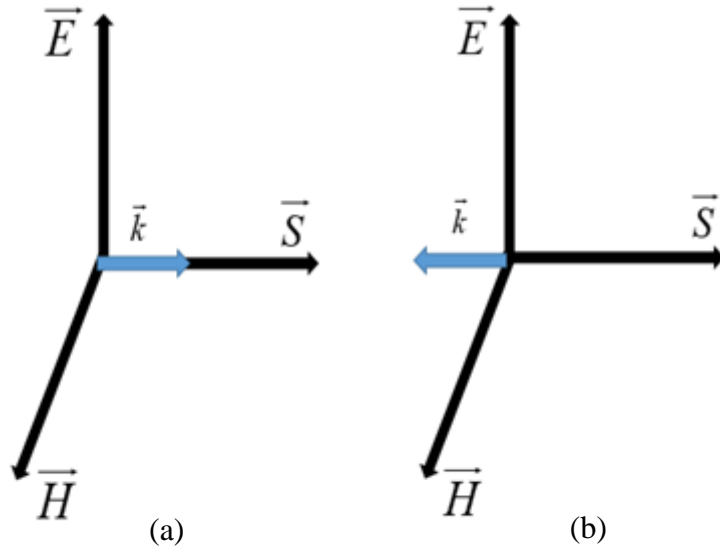
$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega \epsilon \vec{E} \quad (2.10)$$



Bulunan eşitlikler, sağ-el üç vektör formuna sahip doğada bulunan malzemeler ile sol-el üç vektör formuna sahip metamatzemelerin özelliklerini gösteren eşitliklerdir. Bu eşitliklerle birlikte gösterilen Poynting vektörü ( $\vec{S}$ ) Eş. 2.11'de verilmiştir.

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (2.11)$$

Poynting vektörü ( $\vec{S}$ ), hem dielektrik geçirgenlik ( $\epsilon_r$ ) hem de manyetik geçirgenlik ( $\mu_r$ ) değerinin negatif olmasından dolayı yönü değişmemektedir ve dalga vektörü ( $\vec{k}$ ) sağ-el üç vektör formuna sahip malzemeler için aynı yöndedir. Sol-el üç vektör formuna sahip metamatzemeler için ise zıt yöndedir ve gösterimleri Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Poynting vektörü ( $\vec{S}$ ) gösterimi; doğal malzeme ortamı (a) ve metamatzeme ortamı (b).

Poynting vektörü, kaynaktan başlayıp yayıldığı yöne doğru ilerlemektedir. Dalga vektörü ( $\vec{k}$ ), sağ-el üç vektör formuna sahip malzemeler Poynting vektörü ile aynı yönde metamatzemelerde ters yöndedir. Bu da sağ-el ve sol-el üç vektör formuna sahip malzemeler arasındaki en temel farktır.

### 2.1.2. Negatif Kırılma İndisi ve Ters Snell Yasası

Bir ortamın kırılma indisi, o ortamda ilerleyen ışığın ya da elektromanyetik dalgaların boşluktaki hızının ortamdaki hızına oranını gösteren bir katsayıdır. Ortamın frekansa bağlı kırılma indisi Eş. 2.12’de verilmiştir.

$$n(\omega) = \sqrt{\varepsilon_r(\omega)\mu_r(\omega)} \quad (2.12)$$

Burada, frekansla değişen dielektrik geçirgenlik  $\varepsilon_r(\omega)$  ve manyetik geçirgenlik  $\mu_r(\omega)$  değerleri verilmiştir. Metamalzemelerde  $\varepsilon_r(\omega)$  ve  $\mu_r(\omega)$  belirli bir frekans bandında negatiftir ve kutupsal gösterimi aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\varepsilon_r(\omega) = |\varepsilon_r(\omega)|e^{j\pi} \quad (2.13)$$

$$\mu_r(\omega) = |\mu_r(\omega)|e^{j\pi} \quad (2.14)$$

Eş. 2.12 de yerine konduğunda Eş. 2.15 elde edilir.

$$\begin{aligned} n(\omega) &= \sqrt{\varepsilon_r(\omega)\mu_r(\omega)e^{j2\pi}} \\ &= \sqrt{\varepsilon_r(\omega)\mu_r(\omega)}e^{j\pi} \\ &= -\sqrt{\varepsilon_r(\omega)\mu_r(\omega)} \end{aligned} \quad (2.15)$$

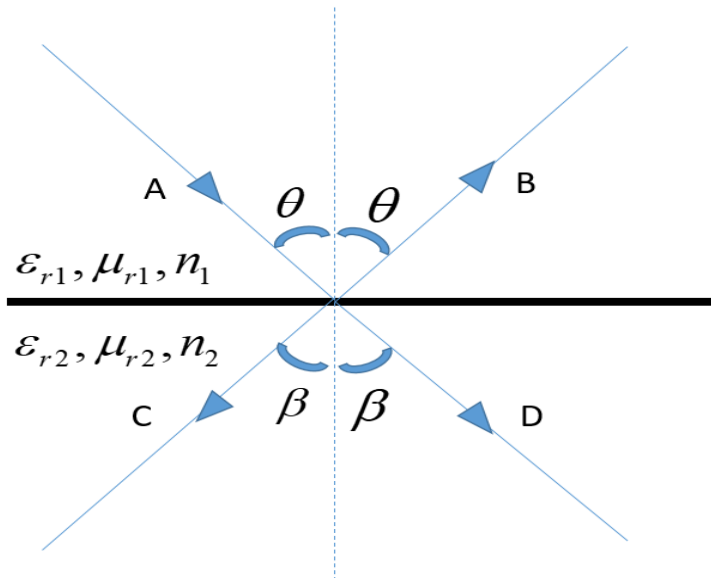
Kırılma indisinin işareti elektromanyetik dalga yayılım yönüne etki eden önemli bir parametredir. Kırılma indisinin işareti pozitif olduğu durumlar, dielektrik ve manyetik geçirgenliğin aynı anda pozitif olduğu doğada bulunan malzemelerde görülmektedir. Bu durumda elektromanyetik dalga kaynaktan uzaklaşan yöndedir. Fakat metamalzemelerde dielektrik ve manyetik geçirgenliğin aynı anda negatif olduğu durumda, kırılma indisinin değeri negatif değere sahip olmaktadır ve kaynağa doğru elektromanyetik dalga yayılımı gerçekleşmektedir. Ortamın dielektrik ve manyetik geçirgenlik değerlerinin biri pozitif diğeri negatif olduğu durumda, kırılma indisinin

değeri sanal olur ve elektromanyetik dalga yayılımı oluşmaz sönümlenme gerçekleşir. Kırılma indisi işaret kuralları Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Kırılma indisi işaret kuralları.

	$\varepsilon_r(\omega) > 0$	$\varepsilon_r(\omega) < 0$
$\mu_r(\omega) > 0$	+	j
$\mu_r(\omega) < 0$	j	-

Kırılma indisi etkisi ile iki farklı ortam arasındaki sınır boyunca elektromanyetik dalganın geçişi Şekil 2.3’te verilmiştir. Şekle bakıldığında 1. ortamdan A yönünden gelen elektromanyetik dalga, 2. Ortama bir kısmı D yönünde iletilmekte ve diğer kısmı ise B yönünde yansıma yapmaktadır. 2. ortam metamalzeme ise ters Snell yasası gerçekleştiğinden dolayı A yönünden gelen elektromanyetik dalga C yönünde iletilmektedir.



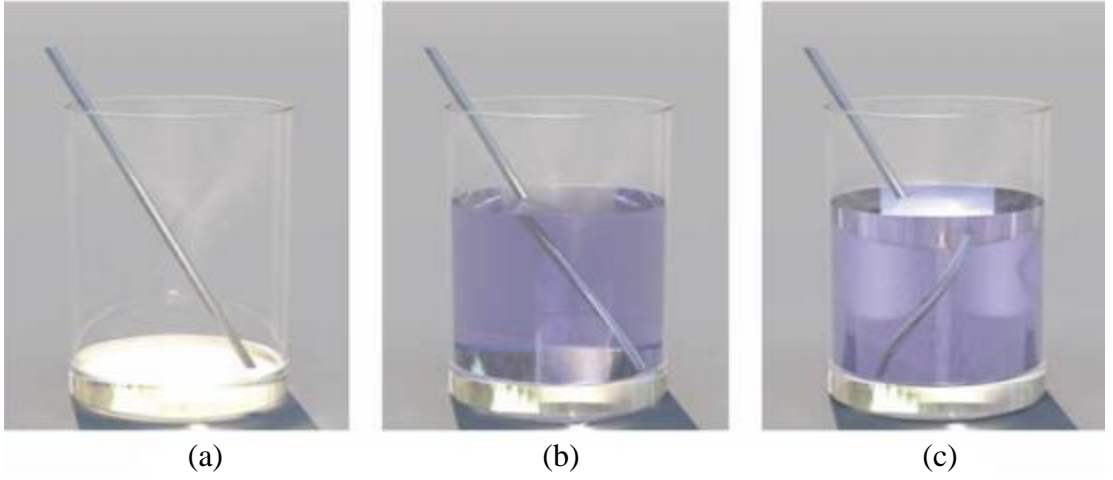
Şekil 2.3. İki farklı ortam arasındaki elektromanyetik dalga geçişi.

Snell yasası aşağıdaki gibi verilmiştir [118].

$$\frac{\sin \theta}{\sin \beta} = \sqrt{\frac{\varepsilon_{r2}\mu_{r2}}{\varepsilon_{r1}\mu_{r1}}} \quad (2.16)$$

Burada  $\epsilon_{r1}$ ,  $\mu_{r1}$  ve  $\epsilon_{r2}$ ,  $\mu_{r2}$  sırasıyla birinci ortam ve ikinci ortam dielektrik ve manyetik geçirgenlik değerleridir.

Canlandırma tekniği kullanılarak yapılan yansımayla ilgili bir örnek, boş cam bardağa metal çubuk, normal su ile doldurulduğunda ve negatif kırılma indisli su ile doldurulduğundaki görünümü Şekil 2.4'te verilmiştir [119].



Şekil 2.4. Boş bardaktaki metal çubuk (a), bardak  $n = 1.3$  su ile doldurulunca (b) ve bardak  $n = -1.3$  su ile doldurulunca (c) [119].

## 2.2. SAÇILMA PARAMETRELERİ (S-PARAMETRELERİ)

Malzemelerin dielektrik ve manyetik geçirgenlik parametreleri, malzemeye doğru gelen elektromanyetik dalgalara nasıl tepki göstereceği hakkında bilgi sahibi olmamıza imkân tanır. Malzemenin bu parametrelerinin elde edilmesi için saçılma parametrelerini kullanmak iyi bir tekniktir. Araştırmacılar, saçılma parametreleri sayesinde simülasyon programı ortamında tasarladığı yapılar ile üretilen yapıların nümerik ve deneysel sonuçları karşılaştırabilmektedir.

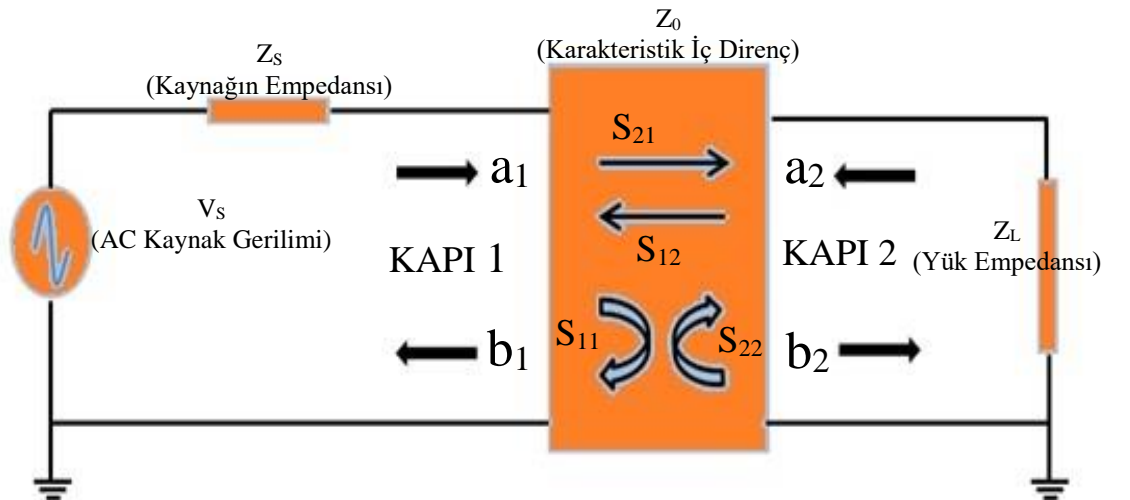
Saçılma parametreleri, literatürde ilk olarak 1945 yılında Vitold'un çalışmasıyla duyuldu. 1947 yılında savaş döneminde ise Henry tarafından radarlar üzerine çalışmalar yapılırken, kendinden önceki çalışmalardan bağımsız olarak gün ışığına çıkmıştır [120,121].

Saçılma veya S-parametreleri, malzeme bilimi, elektronik, haberleşme sistemleri, mikrodalga ve radar alanlarında sıklıkla kullanılır. S-parametreleri Şekil 2.5'te gösterilen kara kutu olarak devre, sistem veya malzeme tanımlamak ve kara kutu içindeki sistem hakkında bilgi elde etmek için kullanılan bir yöntemdir. [122].



Şekil 2.5. Kara kutu.

Frekans yükseldikçe devrede gerilim ve akımları tanımlamak zorlaşmaktadır. Yüksek frekanslarda gerilim ve akımları bulmak çok önemlidir ve direkt ölçüm ile bir seviyeye kadar yapılabilir. Bundan dolayı elektriksel devrenin giriş ve çıkış portları arasındaki durum, S-parametreleri ile bulunabilir ve S-parametreleri frekansla değişmektedir. S-parametreleri kompleks sayı formunda olup hem büyüklük hem de faz bilgisi içermektedir. Kapalı kutunun N tane portu varsa bu kutunun  $N^2$  tane S-parametresi tanımlanması gerekmektedir. S-parametreleri çıkartılırken genellikle 2 portlu devre üzerinden gidilir. Devredeki kapı parametresi ise elektriksel işaretlerin devreye girdiği veya çıktığı noktaları göstermektedir. Örnek olarak iki portlu bir devreye ait S-parametrelerini gösteren şematik resim Şekil 2.6'da verilmiştir [123].



Şekil 2.6. 2 portlu devre şematiği.

2 portlu devrenin S-parametreleri Eş.2.21'deki gibi bulunabilir.

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad (2.21)$$

Denklem olarak ifade edildiğinde S-parametreleri, Eş. 2.22 gibi verilir.

$$\begin{aligned} b_1 &= S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 &= S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{aligned} \quad (2.22)$$

Matris formunda ise S-parametreleri Eş. 2.23'teki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Burada 2-kapılı devre için S-parametreleri; şunları ifade eder:

$S_{11}$ , giriş kapısı gerilim yansıma katsayısı,

$S_{12}$ , geri yönde gerilim kazancı,

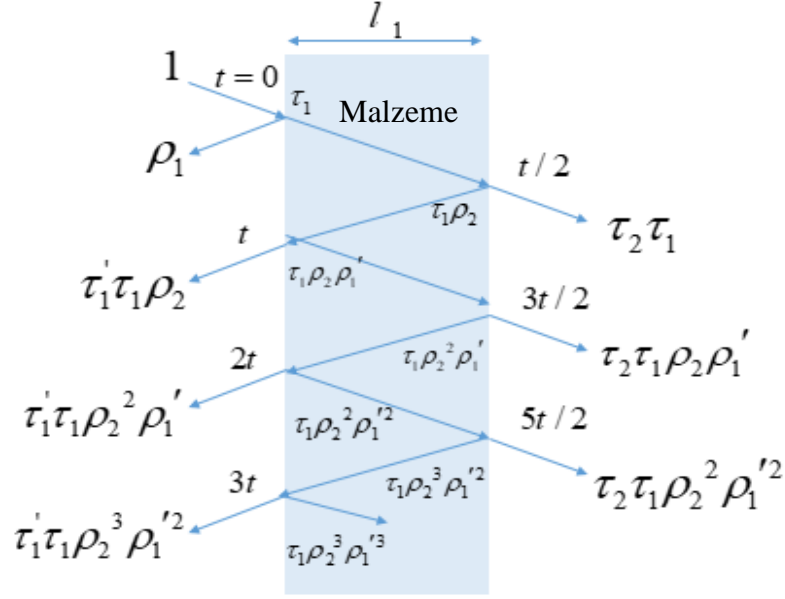
$S_{21}$ , ileri yönde gerilim kazancı,

$S_{22}$ , çıkış kapısı gerilim yansıma katsayısı ifade etmektedir.

### 2.3. SOĞURMA TEORİSİ

Malzemelerin soğurma gücü, malzemeye doğru gelen elektromanyetik dalga düşünüldüğünde, malzeme üzerinden yansıyan elektromanyetik dalga miktarını gösteren yansıma katsayısı ve malzeme ortamını terk eden elektromanyetik dalga miktarını gösteren iletim katsayıları ile hesaplanır. Toplam yansıma katsayıları ve iletim katsayıları çoklu yansıma teorisi ile açıklanmaktadır. İlk ara yüz ortamı, gelen elektromanyetik dalganın bir kısmını yansıtır. Geriye kalan kısmı ortama nüfus eder. Ortam içerisindeki elektromanyetik dalganın bir kısmı son ara-yüz den tekrar yansır ve diğer kısmı ortamı terk eder. Bu olay, kayıplı ortam içinde dalga kaybolana kadar

devam eder, bu olayı gösterir şematik gösterim Şekil 2.7’de verilmiştir. Birinci ara yüzün sağından yansıma katsayısı  $\rho'_1 = -\rho_1$ , iletim katsayıları  $\tau_1 = 1 + \rho_1$  ve  $\tau'_1 = 1 + \rho'_1 = 1 - \rho_1$  olarak verilmiştir. Toplam yansıma katsayısı frekansın bir fonksiyonu olarak yazılır ve Eş.2.24’te verildiği gibi S-parametreleriyle bulunabilir [124].



Şekil 2.7. Çoklu yansıma teorisi [125].

$$\Gamma_1(\omega) = \rho_1 + \sum_{n=1}^{\infty} \tau_1 \tau'_1 (\rho_1')^{n-1} \rho_2^n e^{-j\omega n t} \quad (2.24)$$

$$R(\omega) = \Gamma_1(\omega) = |S_{11}|^2$$

Toplam iletim katsayıları frekansın bir fonksiyonu olarak yazılır ve Eş.2.25’te verildiği gibi S-parametreleriyle bulunabilir.

$$T(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} \tau_1 \tau_2 (\rho_1')^n \rho_2^n e^{-j\omega n t} e^{-j\omega t/2} \quad (2.25)$$

$$T(\omega) = |S_{21}|^2$$

Malzemelerin frekansa bağı soğurma gücü (A) Eş.2.26’da verilen denklem kullanılmak suretiyle hesaplanabilir.

$$A(\omega) = 1 - T(\omega) - R(\omega) = 1 - |S_{21}|^2 - |S_{11}|^2 \quad (2.26)$$

Metamalzeme soğurucu yapılarda boş uzay ve hava ortamının empedans değeri ile metamalzemenin empedans değerinin eşitlenmesinden dolayı gelen EM dalgada yansıma görülmemektedir. Metamalzeme periyodik rezonatör şekilleri, gelen elektromanyetik dalgaların dalga boyuyla orantılıdır. EM dalga metamalzeme yapısına ulaştığında, periyodik rezonatörler elektriksel rezonansa neden olan bir yüzey akımı oluşturmaktadır. Periyodik rezonatör katmanı ve iletken katman, yüzey akımına ters akım üretmekte ve manyetik rezonansa neden olmaktadır. Aynı bant genişliğinde elektriksel ve manyetik rezonans elde edildiğinde mükemmel soğurucu elde edilmektedir. Soğurulan enerji Ohmik ısıya dönüşmektedir [70,94,110].

#### 2.4. ELEKTRONİK DEVRE BENZETİMİ

Metamalzeme tabanlı rezonatör yapıların çalışma mekanizmasının anlaşılması ve analiz edilebilmesi için teorik olarak çıkartılan elektronik devre modeli kullanılmaktadır [126–129]. Bu tez çalışmasında kullanılan Süprem atkı örme kumaş yapısı ile Ohm-benzeri yapı elde edilebilmekteydi. Bu sebeple literatürde var olan yay-şekilli (Ohm-benzeri) rezonatör yapıların modelleme denklemleri [130–132], bu çalışmada temel alınmıştır.

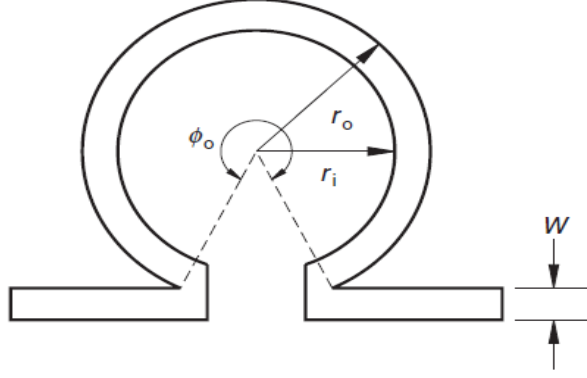
Ohm-benzeri yapının elektronik eşdeğer devre modelinde manyetik rezonans frekansı ( $f_m$ ), rezonatör yapısının eşdeğer endüktans ve eşdeğer kapasitans değerleri kullanılarak Eş.2.27'deki gibi hesaplanabilir [133].

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.27)$$

Burada,  $L$  rezonatör yapının endüktans değerini ve  $C$  ise kapasitans değerini göstermektedir. Rezonatör yapının eşdeğer endüktans ve eşdeğer kapasitans değerleri frekansa ve malzemenin dielektrik ve manyetik geçirgenlik parametrelerine göre değişmektedir. Pettenpaul ve arkadaşlarının analitik Ohm şeklindeki indüktör modeli



Şekil 2.8’de verilmiştir [132]. Ohm şeklindeki indüktör modelin iç yarıçap  $r_i$ , dış yarıçap  $r_o$ , açı  $\phi_0$  ve genişliği  $w$  olarak verilmiştir.



Şekil 2.8. Ohm şeklindeki indüktör modeli [130].

İlk olarak tek bir yapının endüktans hesaplaması yapılacaktır, periyodik yapının ortak endüktans hesabı çok karmaşık bir yapıdadır. Sıfır iletken kalınlığına sahip indüktör durumunda, endüktans integrali dört katlı integrale indirgenbilir [132].

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi w^2} \int_{r_i}^{r_o} \int_{r_i}^{r_o} \int_0^{\phi_0} \int_0^{\phi_0} H dr_1 dr_2 d\phi_1 d\phi_2 \quad (2.28)$$

Eş. 2.28’de verilen H’nin matematiksel ifadesi Eş.2.29’da verilmiştir.

$$H = \frac{r_1 r_2 \cos(\phi_2 - \phi_1)}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(\phi_1 - \phi_2)}} \quad (2.29)$$

Hentschel, Eş.2.28’deki 4 katlı integrali Eş.2.30’da gösterildiği gibi tek katlı bir integrale indirgenmiş ve nümerik olarak çözmüştür [131].

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi w^2} \int_0^{\phi_0/2} (\phi_0 \sqrt{2} - 2\phi) \cos(\sqrt{2}\phi) F(\phi) d\phi \quad (2.30)$$

Eş. 2.30’da verilen  $F(\phi)$ ’in matematiksel ifadesi Eş.2.31’de verilmiştir.

$$F(\phi) = G(r_0, r_0) - G(r_i, r_0) - G(r_0, r_i) + G(r_i, r_i) \quad (2.31)$$

$$G(r_1, r_2) = \frac{1}{3}R^3 + \frac{2}{3}r_1r_2R \cos(\sqrt{2}\phi) + \frac{2}{3}r_1^3 \cos(\sqrt{2}\phi) \operatorname{ar sinh} \frac{r_2 - r_1 \cos(\sqrt{2}\phi)}{r_1 |\sin(\sqrt{2}\phi)|} \quad (2.32)$$

$$R = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos(\sqrt{2}\phi)} \quad (2.33)$$

Dairesel bir spiralin  $n$  dönüşlü endüktans,  $n$  tane statik indüktanstan oluşur ve hesaplama adımları Eş.2.34 – Eş.2.37’de verilmiştir. Bu denklemlerde  $L_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  olarak her bir turun endükansını,  $i$  ve  $j$  ise endüktans terimleri arasındaki karşılıklı parametreleri ifade etmektedir. Ortak endüktans Eş.2.34’te verilmiştir.

$$M_{ij} = \mu\sqrt{ab} \left[ \left( \frac{2}{k_{ij}} - k_{ij} \right) K(k_{ij}) - \frac{2}{k_{ij}} E(k_{ij}) \right] \quad (2.34)$$

$$k_{ij} = \frac{4ab}{4h^2 + (a+b)^2} \quad (2.35)$$

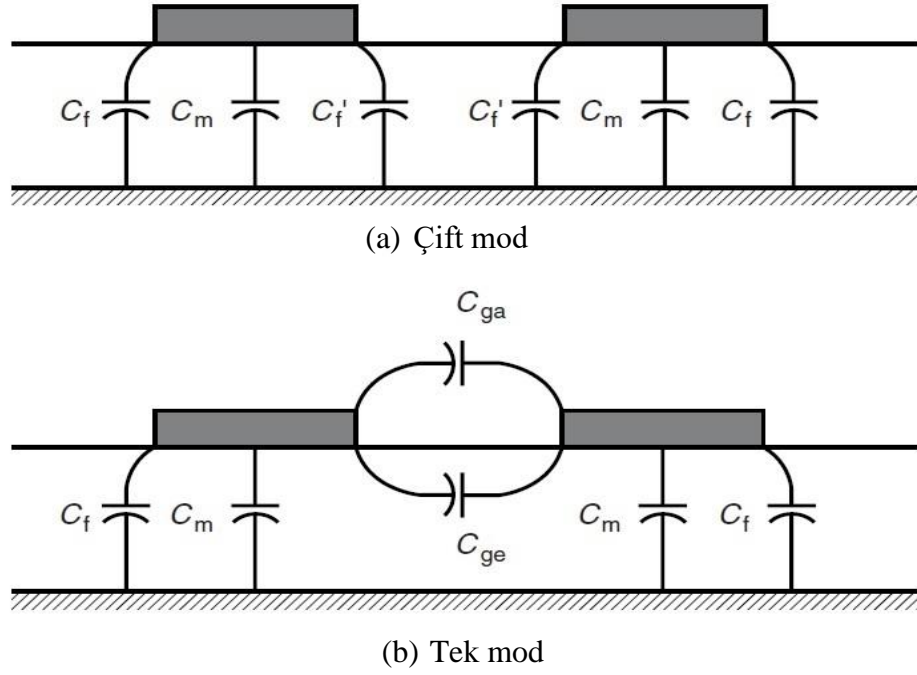
$$a = r_i + (i-0.5)(w+s) \quad (2.36)$$

$$b = r_j + (j-0.5)(w+s) \quad (2.37)$$

Ortak endüktans ifadesindeki  $r_i$  dairesel spiralin iç yarıçapı,  $w$  iletken genişliği ve  $s$  ise dönüşler arasındaki uzaklıktır. En dıştaki yarıçapı, dönüş sayısı,  $n$  ile birlikte bu parametreler tarafından belirlenir.  $K(k_{ij})$  ve  $E(k_{ij})$ , sırasıyla birinci ve ikinci eliptik integralleridir. Çok turlu dairesel spiralin ortak endüktansı Eş.2.38’de verilmiştir.

$$L = \sum_{i=1}^n L_i + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n M_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n M_{ij}^m \quad (2.38)$$

Ohm şeklindeki rezonatör yapının frekans davranışını doğru bir şekilde modellemek için, rezonatör şekilleri ve rezonatör şekilleri ile zemin düzlemi arasındaki kapasitif etkiler dikkate alınmalıdır. Ohm şeklindeki rezonatör yapının kapasitans değerleri tek ve çift mod analizi yapılarak hesaplanmaktadır. Çizgiler ile yer düzlemi arasındaki saçaklanma kapasiteleri klasik mikroşerit teorisinden bulunabilir ve Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.9. Mikroşerit hatların çift (a) ve tek (b) mod kapasitans analizi [130].

Garg ve Bahl, Şekil 2.9’da modellenmiş kapasitif etkilerin kapasitans değerlerinin Eş.2.39 – Eş.2.46 kullanılarak bulunabileceğini göstermişlerdir [134,135]. Bu denklemlerde  $C_{ga}$  iletim hatları arası kuplaj kapasitansını,  $C_{ge}$  dielektrik kuplaj kapasitansını,  $C_f$  ise saçaklanma kapasitansını ifade etmektedir.

$$C_{ga} = \frac{\epsilon_0 K(k')}{2K(k)} \quad (2.39)$$

$$k = \frac{s}{h} \left( \frac{s}{h} + \frac{2w}{h} \right) \quad \text{ve} \quad k' = \sqrt{1-k^2} \quad (2.40)$$

$$C_{ge} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\pi} \left[ \coth \left( \frac{\pi s}{4h} \right) \right] + 0.65 C_f \left[ \frac{0.02}{s/h} \sqrt{\epsilon_r} + 1 - \frac{1}{\epsilon_r^2} \right] \quad (2.41)$$

$$C_f = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{c Z_0} - \frac{\epsilon_0 \epsilon_r w}{h} \right] \quad (2.42)$$

$$C'_f = \frac{C_f}{1 + A(h/s) \tanh(8s/h)} \quad (2.43)$$

$$A = \exp \left[ -0.1 \exp \left( 2.23 - 2.53 \frac{w}{h} \right) \right] \quad (2.44)$$

Karakteristik empedans  $Z_0$  ve bir boşlukta ışık hızı  $c$  etkin dielektrik sabiti  $\epsilon_{eff}$  ile verilmiştir. Böylece toplam çift mod kapasitansı

$$C_e = C_m + C_f + C'_f \quad (2.45)$$

ve toplam tek mod kapasitansı bulunur.

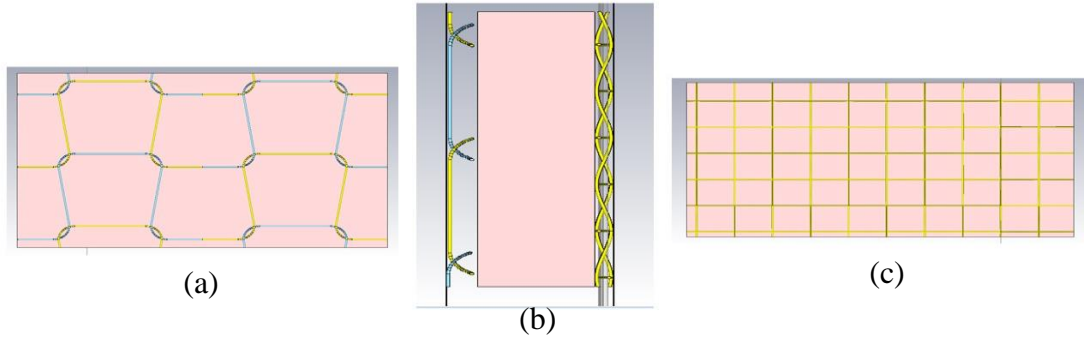
$$C_o = C_m + C_f + C_{ga} + C_{ge} \quad (2.46)$$

## 2.5. TEKSTİL ESASLI METAMALZEME SOĞURUCU BİLEŞENLERİ

Tekstil esaslı metamalzeme soğurucu tasarımı 3 katmandan oluşmaktadır. Bu soğurucu, periyodik iletken şekillerin bulunduğu katman, dielektrik katman ve iletken katmandan oluşmaktadır. Periyodik iletken şekillerin bulunduğu katman ve iletken katman, örme ve dokuma tekstil kumaşlarının yapısı kullanılarak elde edilmiştir. Dielektrik katman olarak ise esnek yapısı, yüksek dielektrik sabitine sahip olması ve tüm katmanları bir arada tutabilecek olmasından dolayı silikon esaslı çift taraflı bant malzemesi kullanılmıştır. Bu sayede esnek, yıkanabilir, giyilebilir, nefes alabilir, kolay imal edilebilir, uygulanabilir, hafif, uygun maliyetli ve geniş bantlı soğurucu yapılması planlanmıştır.

Örme kumaş ilmek yapıları, yan yana ve üst üste bağlantı kurarak oluşturulan tekstil yapılardır. İpliğe çeşitli örme elemanlarıyla ilmek şekli verilip bu ilmek şekli sıra yönünde ve çubuk yönünde diğer ilmeklere bağlandığı zaman örme kumaş yüzeyi oluşur [136]. Dokuma ise birbirine 90 derece açı ile yerleştirilen iki grup ipliğin (çözüğü ve atkı) birbiri ile kesişerek tekstil yüzeyi oluşturmasına denir [137]. Bu kumaşları yapılarına göre kıyaslandığında örme kumaşlar, dokuma kumaşlara göre; daha esnek, daha büyük gözenekli ilmek yapısı, daha yumuşak, buruşmaya daha az yatkın, daha iyi su emme, daha iyi yalıtım ve daha kolay imal edilme gibi özelliklere sahiptir. Bu kumaşların kendilerine has özellikleri sayesinde farklı kullanım alanları vardır [138].

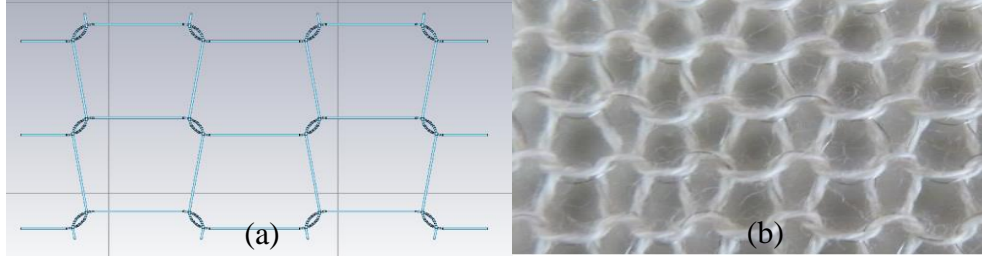
Bu tez çerçevesinde yapılan çalışmada, periyodik iletken şekillerin bulunduğu katman için “Süprem” atkı örme kumaş, iletken katman için “Bezayağı” dokuma kumaş kullanılmıştır. 3 katman birleştirilerek elde edilen tekstil esaslı MMA Şekil 2.10’da verilmiştir. Tasarlanan tekstil esaslı MMA, simülasyon ve deneysel ölçüm yapılarak karşılaştırmalar yapılmıştır.



Şekil 2.10. Tekstil esaslı MMA; önden görünüm (a), yandan görünüm (b) ve arkadan görünüm (c) [125].

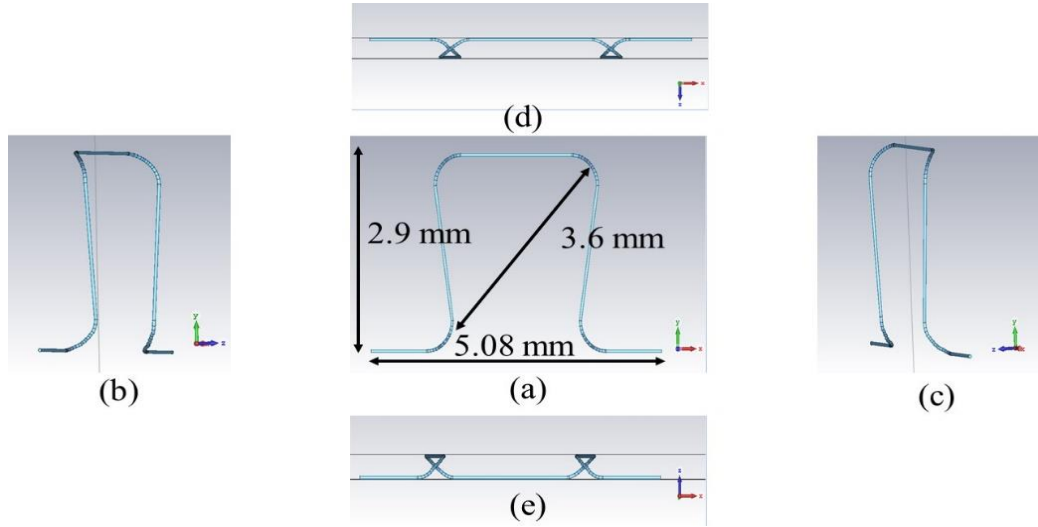
### 2.5.1. Süprem Atkı Örme Kumaş

Süprem atkı kumaş örmeciliğinde; V yataklı düz örme makinelerinde, tek plakada (ön veya arka iğne yatağında), yuvarlak örme makinelerinde ise sadece silindirde elde edilen bir örgü türüdür. Süprem atkı örme kumaş dokuma kumaşa kıyasla daha esnek bir yapıya sahiptir. Bilgisayar destekli tasarım yazılımı (AutoCAD 2018 öğrenci versiyonu) kullanılarak çizimi yapılmıştır. Simülasyon ortamında çizilen ve örme makinasıyla elde edilen Süprem atkı örme kumaş Şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2.11. Süprem atkı örme kumaş simülasyon çizimi (a) ve örme yapısı (b).

Bu kumaş yapısının 10 cm uzunluğunda, sıra sıklığı 20 ve çubuk sıklığı 35 değerlerine sahip ve ilmek iplik uzunluğu 14 mm'dir. Süprem atkı örme kumaş yapısı kullanılarak periyodik iletken şekiller elde edilmiştir. Oluşturulan şekillerin soğurmaya etkisi araştırılmıştır. Simülasyon ortamında tasarlanan Süprem atkı örme kumaş ilmek boyut bilgileri ve 3-boyutlu görünümü Şekil 2.12'de verilmiştir. Simülasyon çalışmalarında iletkenin kalınlığı 50  $\mu\text{m}$  olarak alınmış ve tekstil filamentinin dielektrik sabiti ihmal edilmiştir.



Şekil 2.12. Süprem atkı örme kumaş ilmek boyutları (a), soldan görünüm (b), sağdan görünüm (c), üstten görünüm (d) ve alttan görünüm (e).

### 2.5.2. Silikon Esaslı Çift Taraflı Bant

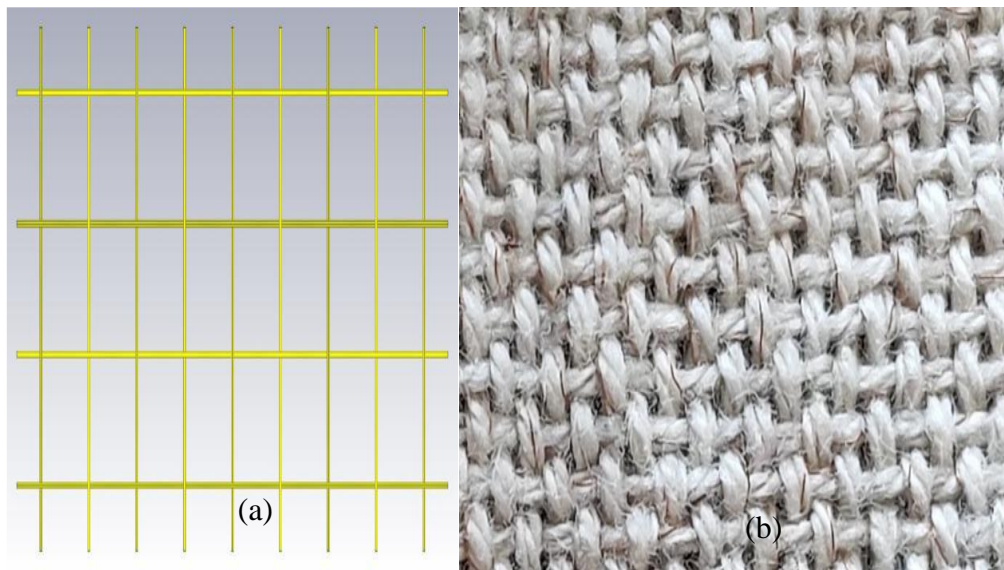
Dielektrik katman için esnek yapısı, yüksek dielektrik sabitine sahip olması ve tüm katmanları bir arada tutabilecek silikon esaslı çift taraflı bant malzemesi kullanılmıştır. Simülasyon ortamında silikon esaslı çift taraflı bant özelliklerini kullanabilmek için Çizelge 2.2'de verilen silikon malzemesinin özellikleri kullanılmıştır.

Çizelge 2.2. Silikon malzeme özellikleri [125].

Epsilon ( $\epsilon$ )	11.9
Mü ( $\mu$ )	1
Elektriksel İletkenlik	0.00025 S/m
Malzeme Yoğunluğu (Rho)	2330 Kg/m <sup>3</sup>
Termal iletkenlik	148 W/K/m
Isı kapasitesi	0.7 kJ/K/kg

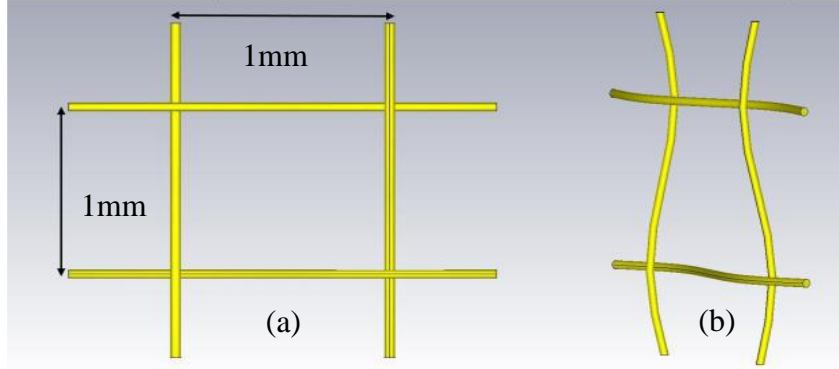
### 2.5.3. Bezayağı Dokuma Kumaş

Dokuma örgüleri içerisinde en temel olan Bezayağı dokuma kumaştır. Bezayağı, atkı ipliğinin kumaş eni boyunca, çözgü ipliklerinin bir altından, bir üstünden geçerek diğer atkı ipliğine ters hareket yaparak oluşturulur. İletken katman için sık olmasından dolayı “Bezayağı” örgüsü kullanılmıştır. Yapının sık olmasından dolayı bu kumaş, metamalzemede iletken katman olarak kullanılmıştır. Bilgisayar destekli tasarım yazılımı (AutoCAD 2018 öğrenci versiyonu) kullanılarak Bezayağı dokuma kumaş yapısı çizimi yapılmıştır. Simülasyon ortamında tasarlanan ve dokuma makinasıyla elde edilen Bezayağı dokuma kumaş Şekil 2.13’te verilmiştir. Şekil üzerinde sarıyla gösterilen iletken olarak tanımlanmış ve kalınlığı 50  $\mu\text{m}$ ’dir. Simülasyon çalışmalarında tekstil filamentinin dielektrik sabiti ihmal edilmiştir.



Şekil 2.13. Bezayağı dokuma kumaş yapısı simülasyon çizimi (a) ve üretim örneği (b).

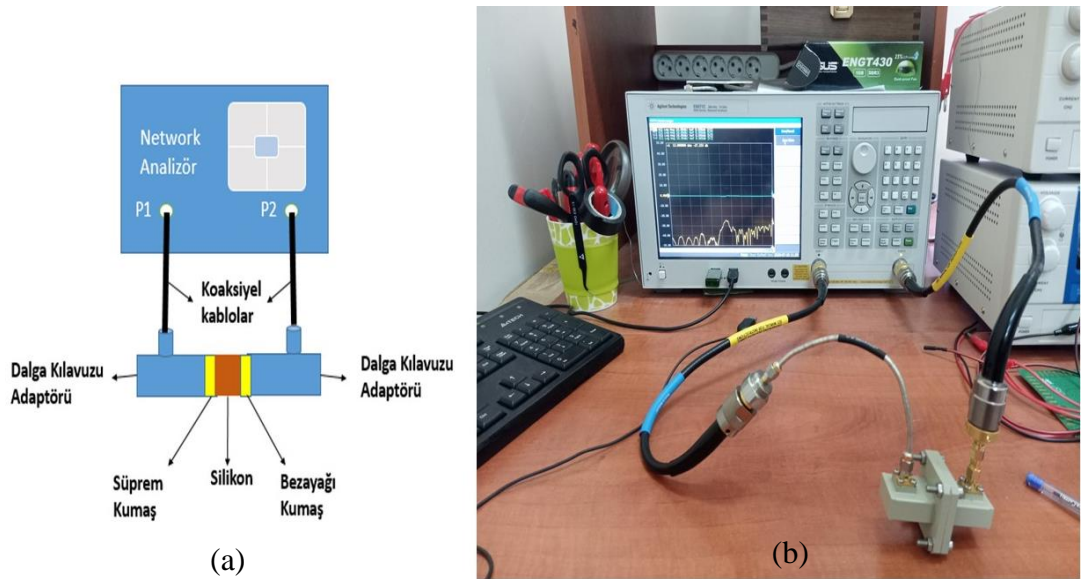
Bu dokuma yapılırken iplik ile 50  $\mu\text{m}$  kalınlığında bakır tel birlikte dokunmuştur ve 1 cm uzunluğunda 10 tane atkı ve 10 tane çözgü ipliği bulunmaktadır. Simülasyon ortamında tasarlanan Bezayağı dokuma kumaş ilmek boyutları ve 3-boyutlu görünümü Şekil 2.14’te verilmiştir.



Şekil 2.14. Bezayağı dokuma kumaş ilmek boyutları (a) ve 3-boyutlu görünümü (b).

## 2.6. DALGA KILAVUZU ÖLÇÜM SİSTEMİ

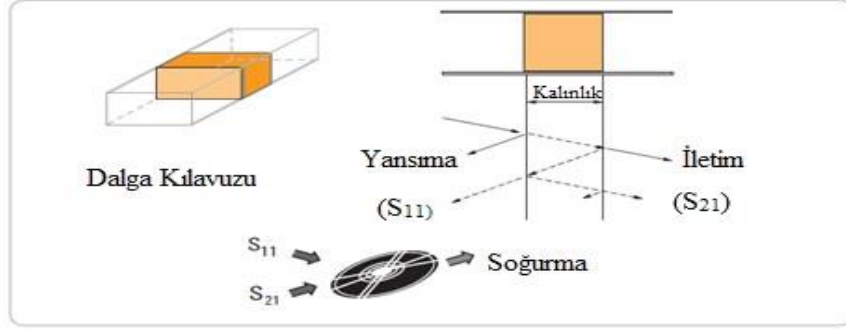
Dalga kılavuzu ölçüm sistemi, kapatılmış iletim hattının içerisine malzemenin boşluk kalmayacak şekilde yerleştirilmesiyle oluşturulan ölçüm tekniğidir. Vektör Network Analizör (VNA), koaksiyel kablolar, dalga kılavuzu adaptörleri ve numune tutucu yapıdan oluşmakta olan ölçüm sistemi Şekil 2.15’te verilmiştir.



Şekil 2.15. Dalga kılavuzu ölçüm düzeneği şematik (a) ve deneysel (b) gösterim.

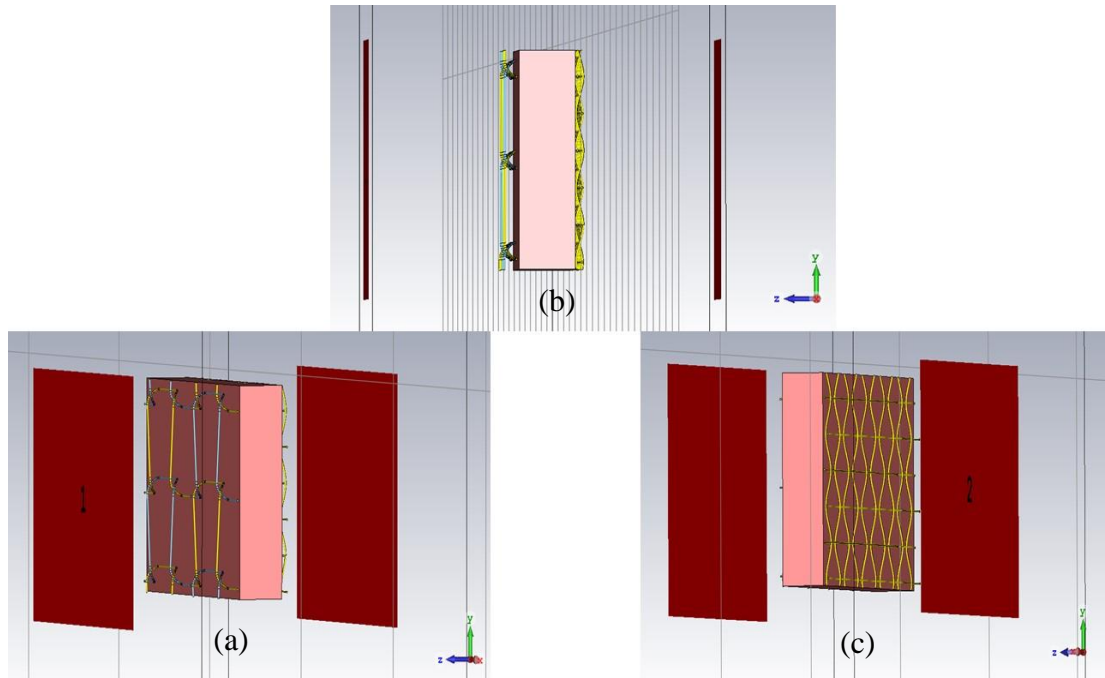


Süprem atkı örme kumaş, silikon esaslı çift taraflı bant ve Bezayağı dokuma kumaşın birleştirilmesi ile oluşan tekstil esaslı MMA, numune tutucu yapı içeresine yerleştirilerek ölçüm yapılır. VNA ile MMA yapısının yansıma katsayısı ( $S_{11}$ ) ve iletim katsayısı ( $S_{21}$ ) ölçülür. Ölçülen katsayılarından malzemenin soğurma gücü bulunur ve Şekil 2.16’da görsel olarak verilmiştir [139].



Şekil 2.16. Dalga kılavuzu [123].

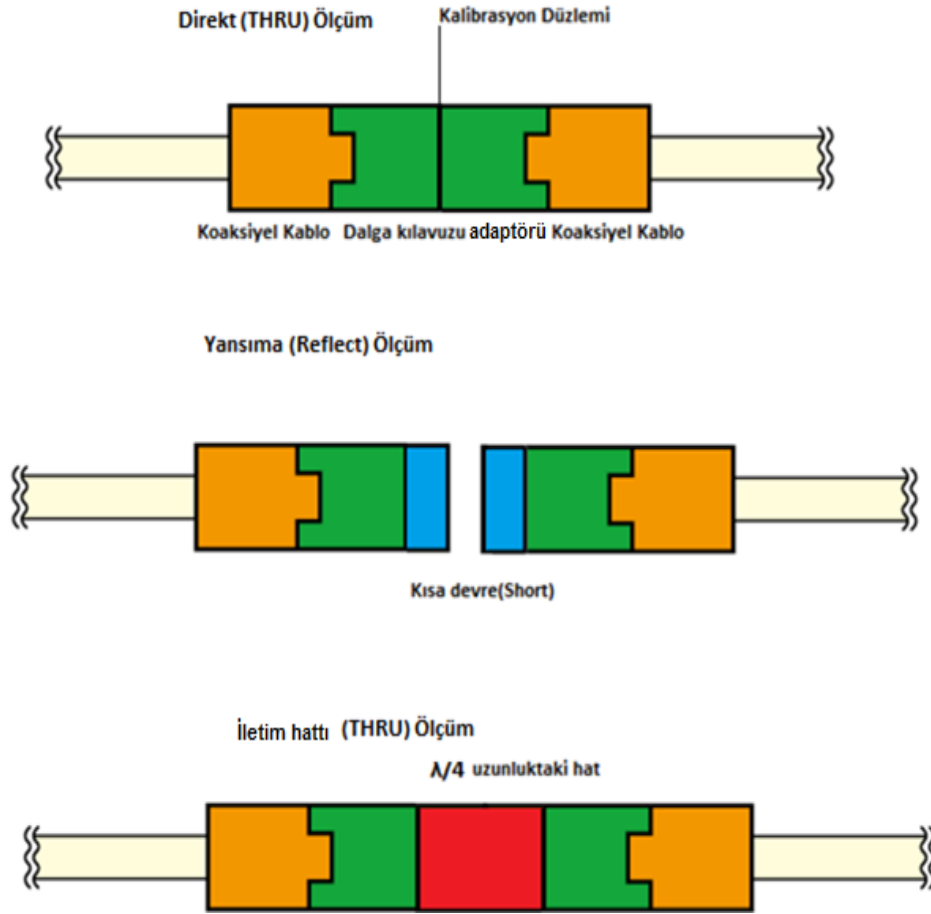
CST programı kullanılarak simülasyon ortamında dalga kılavuzu ölçüm sistemi Şekil 2.17’deki gibi hazırlanmıştır. Tasarlanan tekstil esaslı MMA yapısına 2 adet port tanımlamaları yapılarak X-bandında ölçümler yapılmıştır.



Şekil 2.17. Simülasyon ortamında dalga kılavuzu ölçüm sistemi; önden görünüm (a), yandan görünüm (b) ve arkadan görünüm (c).

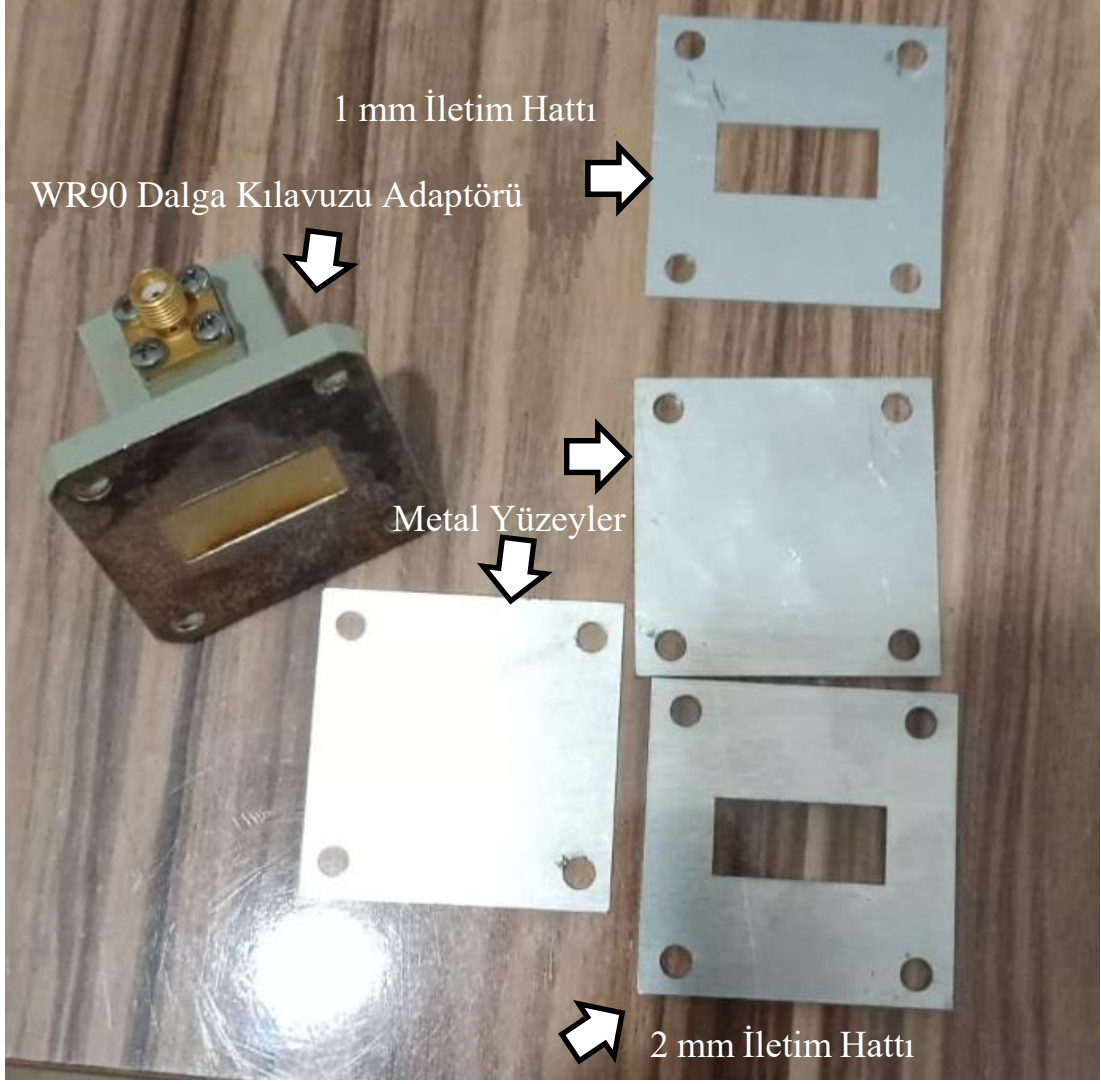
### 2.6.1. TRL (Through-Reflect-Line) Kalibrasyon

Dalga kılavuzu ölçüm düzeneğinin doğru sonuçlar verebilmesi için kalibrasyon yapılması şarttır. Dalga kılavuzları için en çok tercih edilen ve 3 aşamadan oluşan TRL kalibrasyon tekniğidir. TRL kalibrasyon, direkt (Through), yansıma (Reflect) ve iletim hattı (Line) aşamaları tamamlanarak yapılır [140] ve şematik gösterim Şekil 2.18’de verilmiştir.



Şekil 2.18. TRL kalibrasyon [140].

Akdeniz Üniversitesi, Endüstriyel ve Medikal Uygulamalar Mikrodalga Uygulama ve Araştırma Merkezi (EMUMAM) Laboratuvarında bulunan, X-bant frekans aralığında çalışan WR90 dalga kılavuzu adaptörleri temin edilmiştir. WR90 dalga kılavuzlarını kalibre edebilmek için dalga kılavuzları boyutunda alüminyum malzemesinden 1 mm ve 2 mm kalınlığında iletim hattı ve yansıma ölçümü yapabilmek için 2 adet metal yüzey lazer kesim yöntemi ile yaptırılmış ve Şekil 2.19’da gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Lazer kesim ile elde edilen kalibrasyon kiti.

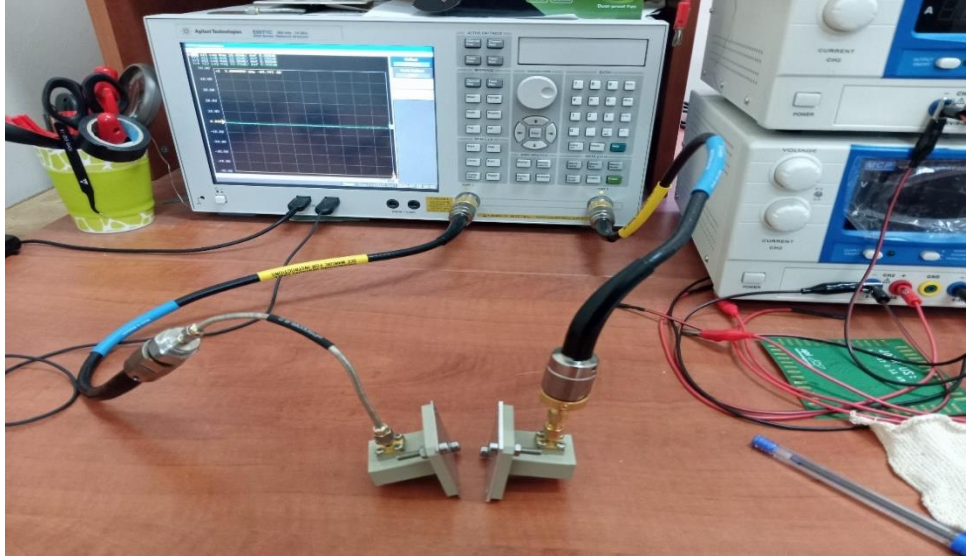
Pamukkale Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Mikrodalga laboratuvarında bulunan, 14 GHz frekansına kadar çalışabilen Agilent E50771C VNA kullanılarak kalibrasyon ve ölçüm işlemleri yapılmıştır.

TRL kalibrasyon işlemine başlamadan önce network analizöre gerekli bilgiler girildi. Bu bilgiler, dalga kılavuzun kesim frekansı, iletim hattında gecikme süresi, yansıma ölçümün kısa devre mi açık devre mi yapılacağına seçimi, adım sayısı ve frekans aralık değerleridir. Bilgiler girildikten sonra dalga kılavuzları birleştirildi, direkt ölçümü yapıldı ve Şekil 2.20’de gösterilmektedir.



Şekil 2.20. TRL kalibrasyon, direkt ölçüm.

Direkt ölçümü tamamlandıktan sonra 2 port için yansımaya ölçümüne geçildi. İlk olarak, 1. port ve 2. port metal yüzeylerle kapatıldı ve portların yansımaya ölçümleri yapıldı. Yapılan işlemler Şekil 2.21’de gösterilmiştir.



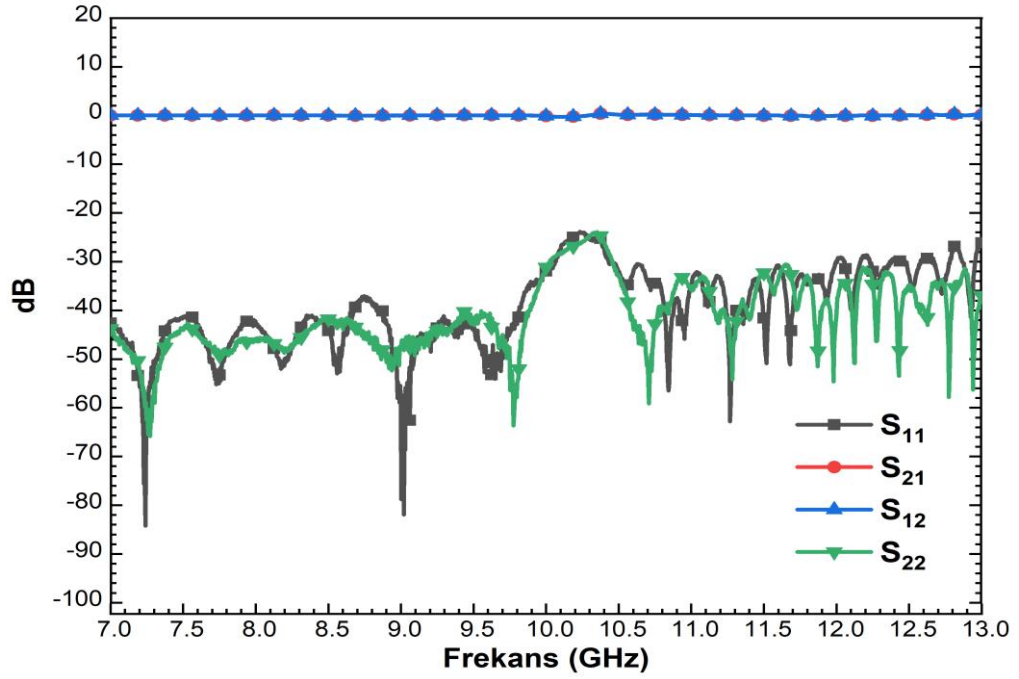
Şekil 2.21. TRL kalibrasyon, 1.port ve 2.port yansımaya ölçümleri.

Son aşama olarak, iletim hattı ölçümü yapıldı. İletim hattın ölçümü için 2 mm kalınlığında alüminyum iletim hattıyla birlikte dalga kılavuzları birleştirildi. Yapılan işlemler Şekil 2.22’de gösterilmiştir.



Şekil 2.22. TRL kalibrasyon, iletim hattı ölçümü.

TRL kalibrasyon işlemleri tamamlandıktan sonra, dalga kılavuzu adaptörleri birbirine bağlanarak yapılan kalibrasyon işlemleri kontrol edilmiştir.  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  değerlerinin -30 dB ve altı değerlerde ve  $S_{21}$ ,  $S_{12}$  değerleri 0 dB olduğu görülmüştür ve sonuç grafikleri Şekil 2.23'te verilmiştir.



Şekil 2.23. TRL kalibrasyon ölçüm sonucu.

## BÖLÜM 3

### ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

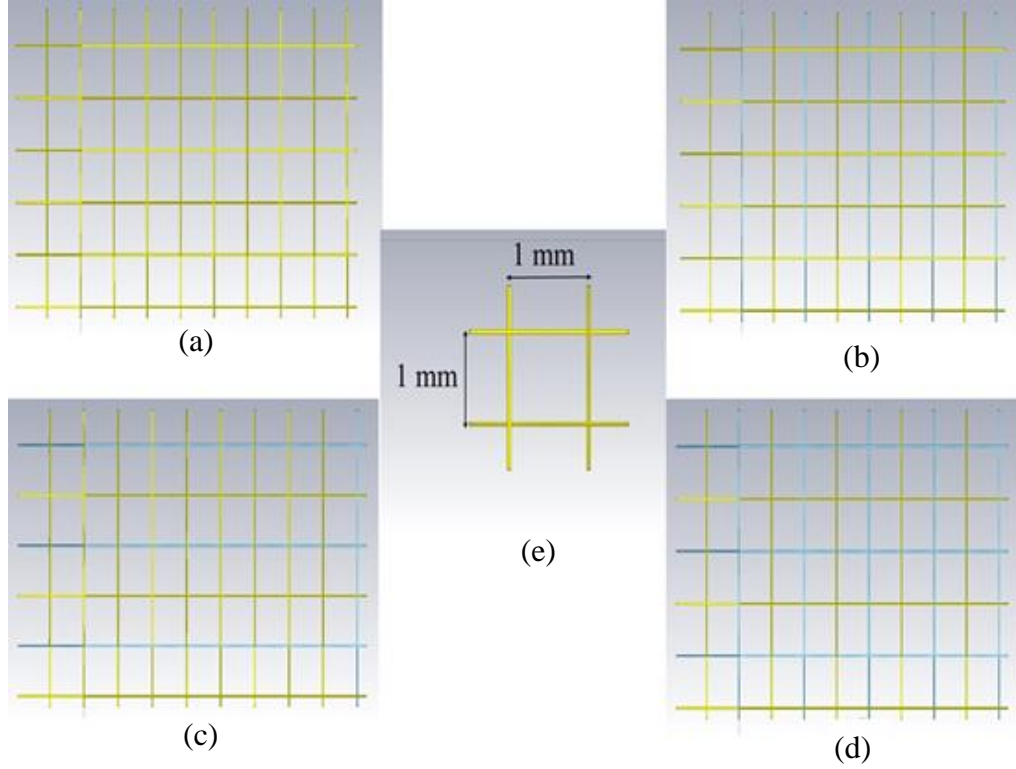
Kumaş geometrilerine bağlı kalarak bilgisayar destekli yazılım (AutoCAD 2018 öğrenci versiyonu) ile Süprem atkı örme ve Bezayağı dokuma kumaş çizimleri yapılmıştır. Bu çizimler X-bant frekans aralığında (8-12 GHz) simülasyon için CST programına aktarılmıştır. CST programında tanımlı malzemeler kısmından silikon malzemesi seçilerek dielektrik katman oluşturulup 3 katman birleştirilmiştir. Dalga kılavuzu ölçüm sistemi için 2 port tanımlaması ve gerekli bilgiler girilmiştir.

Üretim kolaylığı, maliyet, maksimum soğurma, geniş bant soğurma, esneklik, kalınlık, geliş açışı ve polarizasyon bağımsız yapı elde edebilmek için çok fazla tasarım üzerinde çalışma yapılmıştır ve bu tasarımlar CST simülasyon programı kullanılarak simüle edilmiştir. Yapılan tasarımların soğurmaya etkileri incelenerek en uygun tasarımın seçilmiş ve üretim aşamasına geçilmiştir. Tasarlanan ve üretilen MMA sonuçları karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Bu tez çalışmasında daha çok soğurma özellikleri ön plana alındığı için yansıma ( $S_{11}$ ) ve iletim ( $S_{21}$ ) katsayıları “Ek Açıklamalar” kısmında verilmiştir.

#### 3.1. BEZAYAĞI DOKUMA KUMAŞ TASARIMLARI

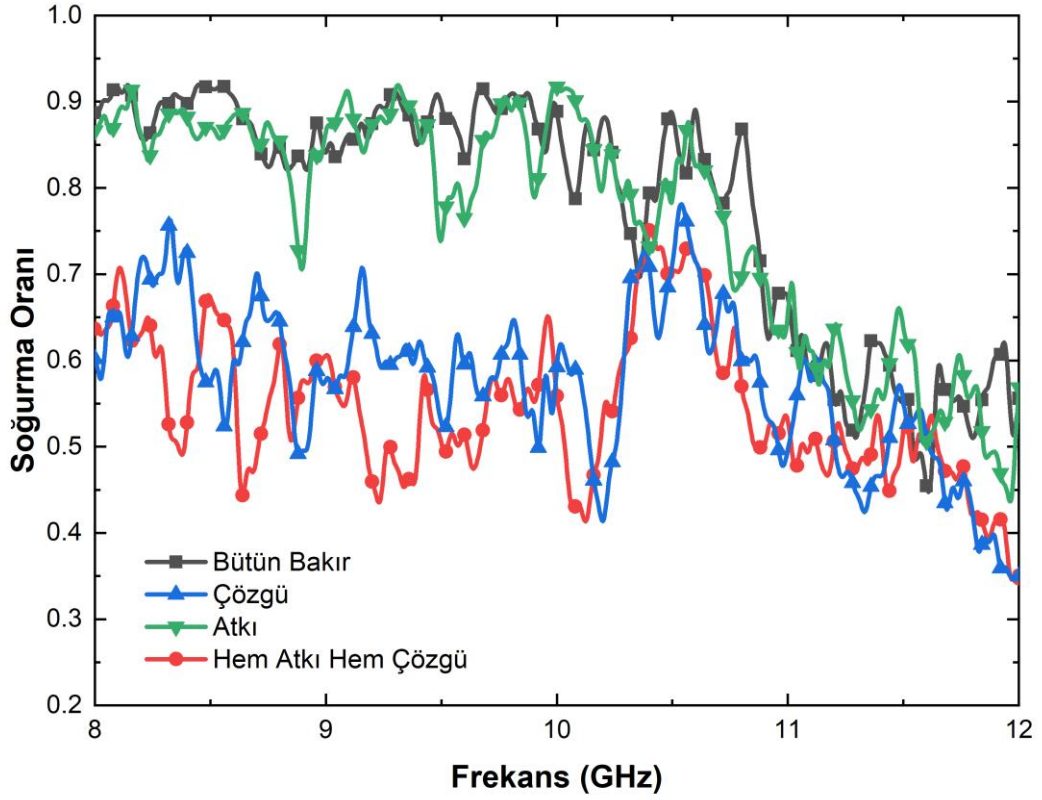
İletken katmanı oluşturan Bezayağı dokuma kumaş yapısının soğurmaya etkisi araştırılmıştır. Bezayağı dokuma kumaş yapısını oluşturan atkı ve çözgü yapılarına göre 4 adet tasarım elde edilmiştir. Periyodik rezonatör yapı için Süprem atkı örme kumaş tasarımlarından Şekil 3.3.(a)'da verilen tasarım ve 2 mm kalınlığında silikon malzemesi kullanılmıştır. MMA oluşturan katmanlar birleştirilerek 8-12 GHz frekans aralığında simülasyonlar yapılmıştır. Bezayağı dokuma kumaş yapısının soğurmaya etkisini araştırmak için, ilk olarak, bütün yapı bakır olarak tanımlanmıştır ve Şekil 3.1.(a)'da gösterilmiştir. İkinci olarak, bir çözgü bakır bir çözgü vakum olacak şekilde

tasarım yapılmıştır ve Şekil 3.1.(b)'de gösterilmiştir. Sonrasında atkı yönünde aynı işlem tekrarlanmış ve Şekil 3.1.(c)'de gösterilmiştir. En son olarak, hem atkı hem de çözgü yönünde işlem tekrar edilmiş ve Şekil 3.1.(d)'de gösterilmiştir. İplik rengi sarı olanlar iletken, mavi olanlar vakum, kalınlıkları 50  $\mu\text{m}$  ve birbirleri arası uzaklıkları 1mm'dir ve birim hücre boyut bilgileri Şekil 3.1.(e)'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Bezayağı dokuma kumaş tasarımları; bütün iletken yapı (a), çözgü boşluklu yapı (b), atkı boşluklu yapı (c), hem çözgü hem de atkı boşluklu yapı (d) ve ilmek boyut bilgileri (e).

Bezayağı dokuma kumaş tasarımlarının 8-12 GHz frekans aralığında soğurma oranları hesaplanmış ve Şekil 3.2'de verilmiştir. Bezayağı dokuma kumaş yapısının değişim sonuçları incelendiğinde, çözgü yönünde vakum tanımlamaların atkı yönüne göre daha fazla soğurma oranını düşürdüğü gözlemlenmiştir. En kötü soğurma oranı, hem atkı hem de çözgü yönünde yapılan değişikliklerde görülmüştür. En iyi soğurma oranı bütün yapının bakır olarak tanımlanması ile elde edilmiştir ve bundan sonraki yapılan simülasyon çalışmalarında Bezayağı dokuma kumaş yapısı bu şekilde kullanılmıştır.

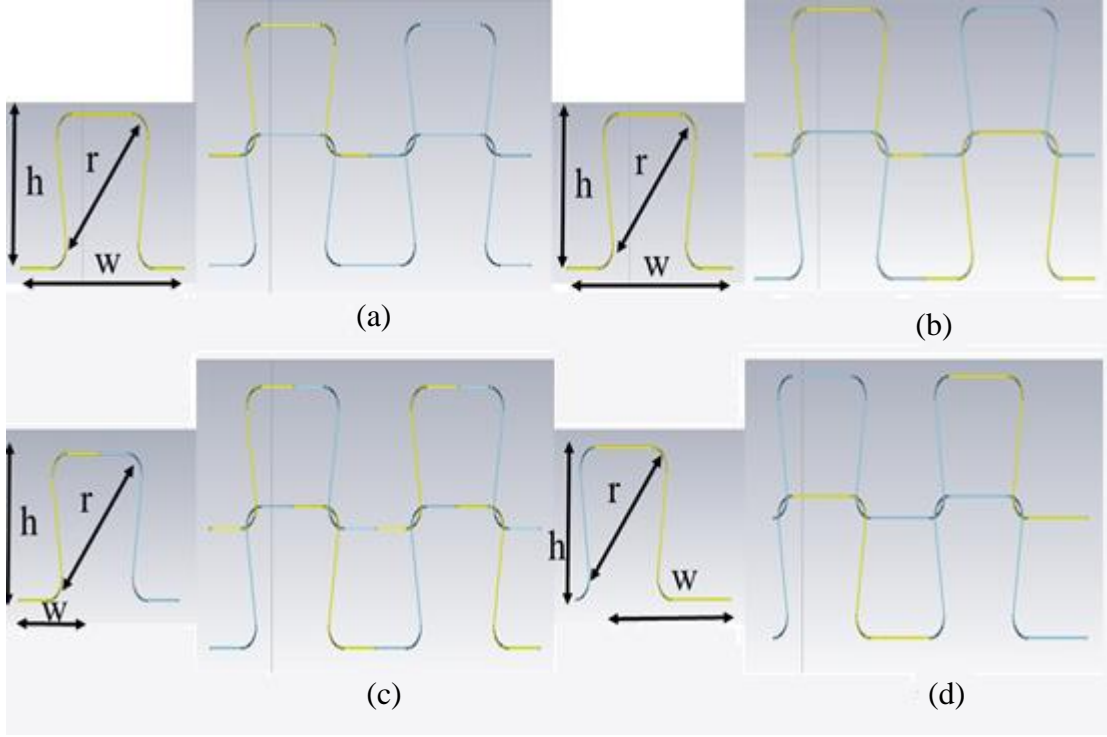


Şekil 3.2. Bezayağı dokuma kumaş tasarım şekillerinin sonuçları.

### 3.2. SÜPREM ATKI ÖRME KUMAŞ TASARIMLARI

Periyodik rezonatör yapıyı oluşturan Süprem atkı örme kumaş geometrisi kullanılarak 4 farklı tasarım oluşturulmuştur. Süprem atkı örme kumaş yapısı, örme işlemi gerçekleşirken iplikteki kayma hareketlerinden dolayı oluşabilecek şekillere göre tasarım yapılmaya çalışılmıştır. Tasarımda iletken malzeme sarı renkli ve vakum için mavi renkli olacak şekilde tanımlama yapılmıştır. İletken kalınlıkları 50  $\mu\text{m}$  ve tekstil filamentinin dielektrik sabiti ihmal edilmiştir. Oluşturulan tasarımlar Süprem atkı örme kumaşın 3-boyutlu yapısı kullanılarak elde edilmiştir. İlk olarak Süprem atkı örme kumaş yapısından Ohm ( $\Omega$ ) periyodik yapıları elde edilmiş, tek sıra Ohm periyodik yapı elde edip diğer sıra vakum olacak şekilde yapılmış ve Şekil 3.3.(a)'da gösterilmiştir. Sonrasında her sıra Ohm yapısı uygulanmış ve Şekil 3.3.(b)'de gösterilmiştir. Üçüncü tasarımda ise Ohm yapısını küçülterek periyodik S yapıları elde edilmiş ve Şekil 3.3.(c)'de gösterilmiştir. Son olarak Ohm yapısını büyülterek periyodik Z yapıları elde edilmiş ve Şekil 3.3.(d)'de verilmiştir.





Şekil 3.3. Süprem atkı örme kumaş tasarımları; tek sıra Ohm tasarımı (a), her sıra Ohm tasarımı (b), S şekilli tasarım (c) ve Z şekilli tasarım (d).

Tasarımların; yükseklik (h), çap (r) ve uzunluk (w) bilgileri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

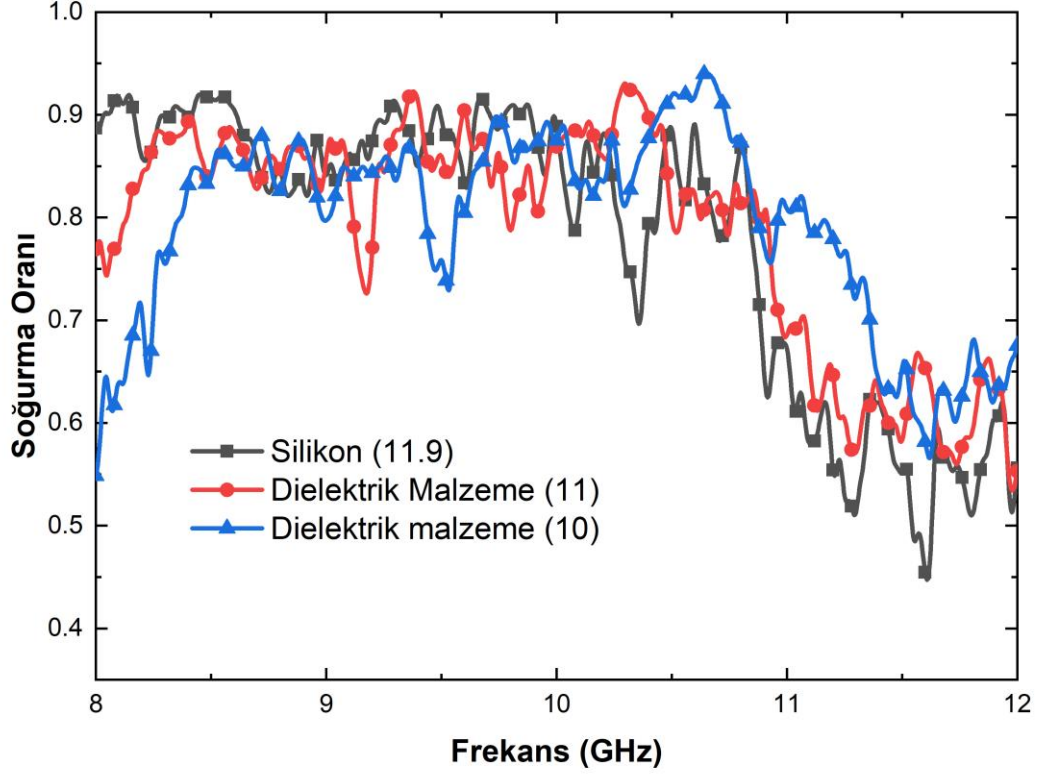
Çizelge 3.1. Boyut bilgileri.

	(a) Şekli	(b) Şekli	(c) Şekli	(d) Şekli
h (mm)	2.9	2.9	2.9	2.9
r (mm)	3.6	3.6	3.6	3.6
w (mm)	5.08	5.08	2.54	4.48

### 3.2.1. Tek Sıra Ohm ( $\Omega$ ) Tasarımı

Tek sıra Ohm ( $\Omega$ ) tasarımı, Süprem atkı örme kumaş yapısının bir sırası Ohm ( $\Omega$ ) periyodik yapıları, diğer sırası vakum olacak şekilde bırakılarak oluşturulmuştur ve Şekil 3.3.(a)’da verilmiştir. Tekstil esaslı MMA; tek sıra Ohm ( $\Omega$ ) tasarımı, 2 mm kalınlıkta silikon malzemesi ve bütün bakır yapıdan oluşan Bezayağı dokuma kumaş ile oluşturulmuştur. Oluşturulan MMA’da silikon malzemesin dielektrik sabitine yakın 2 malzeme tanımlaması da yapılmıştır. Bu malzemelerin dielektrik sabit değerleri; 11

ve 10 olarak tanımlanmıştır. Simülasyon çalışmalarında dielektrik sabiti değişiminin, maksimum soğurma frekansına etkisi araştırılmıştır. X-bandında yapılan simülasyon sonuçları Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Dielektrik sabitine göre maksimum soğurma frekans değişimi.

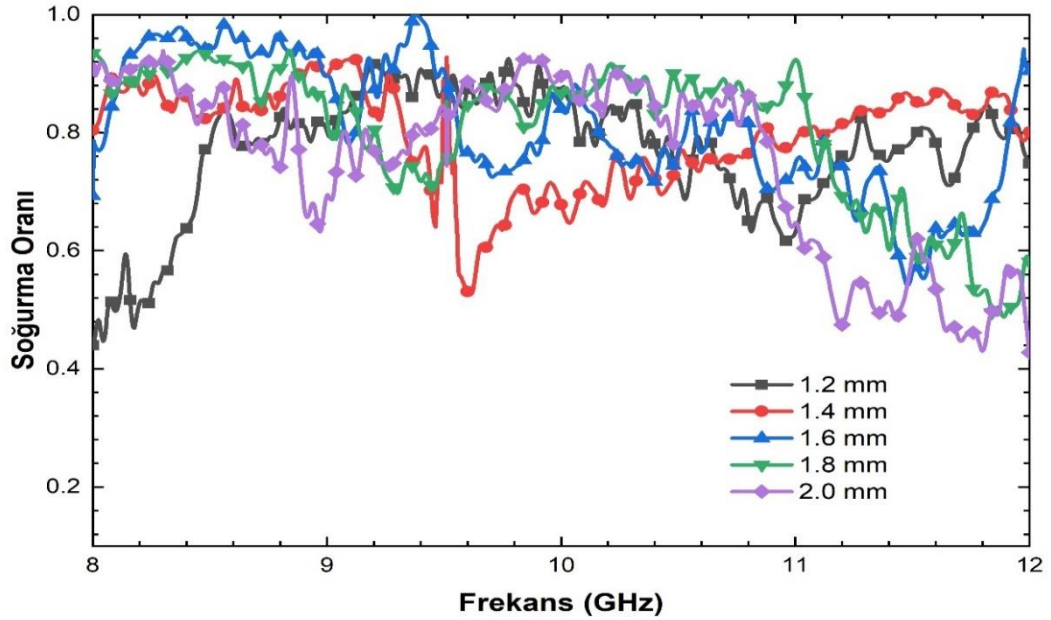
Simülasyon sonuçları incelendiğinde, dielektrik sabitinin artmasıyla birlikte maksimum soğurma elde edilen rezonans frekansının daha düşük frekanslarda veya dielektrik sabitinin azalmasıyla birlikte maksimum soğurma elde edilen rezonans frekansının daha yüksek frekanslarda elde edildiği görülmüştür. Dielektrik sabitine göre soğurma bilgileri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Dielektrik sabitine göre soğurma bilgileri.

Dielektrik Sabiti	Maksimum Soğurma Frekansı	Maksimum Soğurma Oranı	X-bant Ortalama Soğurma Oranı
11.9	8.45 GHz	%91.96	%78.10
11	10.29 GHz	%93.04	%78.86
10	10.64 GHz	%94.07	%79.42

### 3.2.2. Her Sıra Ohm ( $\Omega$ ) Tasarımı

Tek sıra Ohm tasarımdan sonra her sıraya Ohm yapısı uygulanmış ve Şekil 3.3.(b)'de gösterilmiştir. Bu tasarımda tekstil esaslı MMA; her sıra Ohm ( $\Omega$ ), silikon malzemesi ve bütün bakır yapıdan oluşan Şekil 3.1.(a)'da gösterilen Bezayağı dokuma kumaş ile oluşturulmuştur. Oluşturulduktan sonra silikon malzemesinin kalınlık değişimi araştırılmıştır. Silikon malzemesi kalınlığı 1.2 ila 2.00 mm arasında 0.2 mm değişimlerle değiştirilmiştir. X-bant frekans aralığında ve değişen simülasyon kalınlıklarında simülasyon işlemleri yapılmıştır ve sonuçları Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Ohm tasarım simülasyon sonuçları.

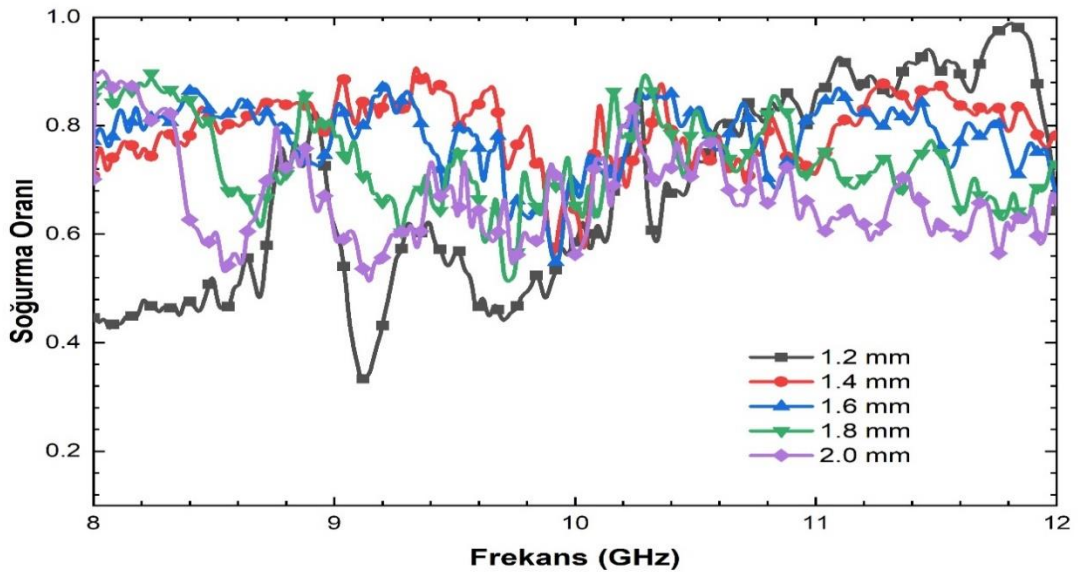
Simülasyon sonuçları incelendiğinde 8-12 GHz frekans aralığında maksimum soğurma frekansının kalınlık arttıkça daha düşük frekansta görüldüğü ve ortalama soğurma oranı değerinin arttığı görülmektedir. Kalınlık değeri değişimine bakıldığında, 1.6 mm kalınlıkta maksimum soğurma oranı %99.66 ve ortalama soğurma oranı %81.12 elde edilmiştir. Ohm tasarımının kalınlıkla değişen soğurma bilgileri Çizelge 3.3'te verilmiştir. Her sıra periyodik rezonatör yapının uygulanmasıyla maksimum soğurma oranının ve ortalama soğurma oranında artış görülmüştür. Bundan sonraki tasarım çalışmalarında her sıra periyodik rezonatör yapısı olacak şekilde yapılmıştır.

Çizelge 3.3. Ohm tasarımın kalınlıkla değişen soğurma bilgileri.

Kalınlık	Maksimum Soğurma Frekansı	Maksimum Soğurma Oranı	X-bant Ortalama Soğurma Oranı
1.2 mm	9.77 GHz	%92.50	%78.04
1.4 mm	9.51 GHz	%92.46	%79.59
1.6 mm	9.38 GHz	%99.66	%81.12
1.8 mm	8.45 GHz	%94.13	%80.44
2.0 mm	8.30 GHz	%93.64	%78.54

### 3.2.3. S Şekilli Tasarım

Tasarım konusunda her sıra periyodik rezonatör tasarımlarına devam edilerek Süprem atkı örme kumaş yapısından S şekilli periyodik rezonatör yapılar oluşturulmuş ve Şekil 3.3.(c)'de gösterilmiştir. Bu tasarımda Ohm periyodik rezonatör yapısından daha küçük boyutlu tasarım yapılarak soğurmaya etkisi araştırılmıştır. Tasarım sonucunda tekstil esaslı MMA; her sıra S şekilli tasarım, silikon malzemesi ve bütün bakır yapıdan oluşan, Şekil 3.1.(a)'da gösterilen Bezayağı dokuma kumaş ile oluşturulmuştur. Oluşturulduktan sonra silikon malzemesinin kalınlık değişimi araştırılmış ve silikon malzemesi kalınlığı 1.2 ila 2.00 mm arasında 0.2 mm değişimlerle değiştirilmiştir. X-bant frekans aralığında ve değişen silikon malzemesi kalınlıklarında simülasyon işlemleri yapılmıştır ve sonuçları Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. S şekilli tasarım simülasyon sonuçları.

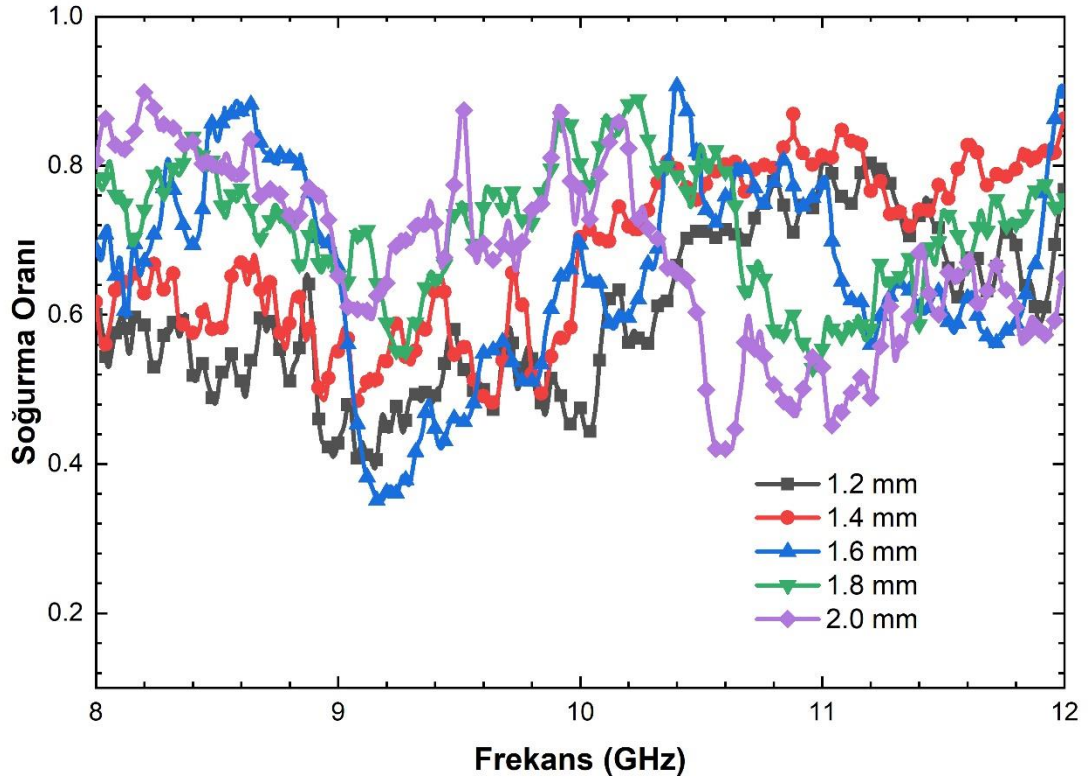
Simülasyon sonuçları incelendiğinde 8-12 GHz frekans aralığında maksimum soğurma frekansının kalınlık arttıkça daha düşük frekansta olduğu görülmektedir. Kalınlık değeri 1.2 mm olduğunda maksimum soğurma oranı %98.86 ve ortalama soğurma oranı %67.39 elde edilmiştir. Periyodik rezonatör yapısının daha küçük boyutlu olması maksimum soğurma oranının daha yüksek frekansta görülmesine neden olmuştur. S şekilli tasarımın kalınlıkla değişen soğurma bilgileri Çizelge 3.4.’te verilmiştir.

Çizelge 3.4. S şekilli tasarımın kalınlıkla değişen soğurma bilgileri.

Kalınlık	Maksimum Soğurma Frekansı	Maksimum Soğurma Oranı	X-bant Ortalama Soğurma Oranı
1.2 mm	11.81 GHz	%98.86	%67.39
1.4 mm	9.34 GHz	%90.63	%79.26
1.6 mm	9.21 GHz	%87.70	%78.00
1.8 mm	8.23 GHz	%89.63	%73.31
2.0 mm	8.03 GHz	%90.07	%66.89

### 3.2.4. Z Şekilli Tasarım

Önceki tasarımlardan farklı olarak periyodik rezonatör yapısını daha büyük boyutlu olacak şekilde tasarım yapılarak Z şekilli periyodik rezonatör yapılar oluşturulmuş ve Şekil 3.3.(d)’de gösterilmiştir. Bu tasarım sonucunda tekstil esaslı MMA; her sırada Z şekilli tasarım, silikon malzemesi ve bütün bakır yapıdan oluşan, Şekil 3.1.(a)’da gösterilen Bezayağı dokuma kumaş ile oluşturulmuştur. Oluşturulduktan sonra silikon malzemesinin kalınlık değişimi araştırılmış ve silikon malzemesi kalınlığı 1.2 ila 2.00 mm arasında 0.2 mm değişimlerle değiştirilmiştir. X-bant frekans aralığında ve değişen silikon malzemesi kalınlıklarında simülasyon işlemleri yapılmıştır ve sonuçları Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Z şekilli tasarım simülasyon sonuçları.

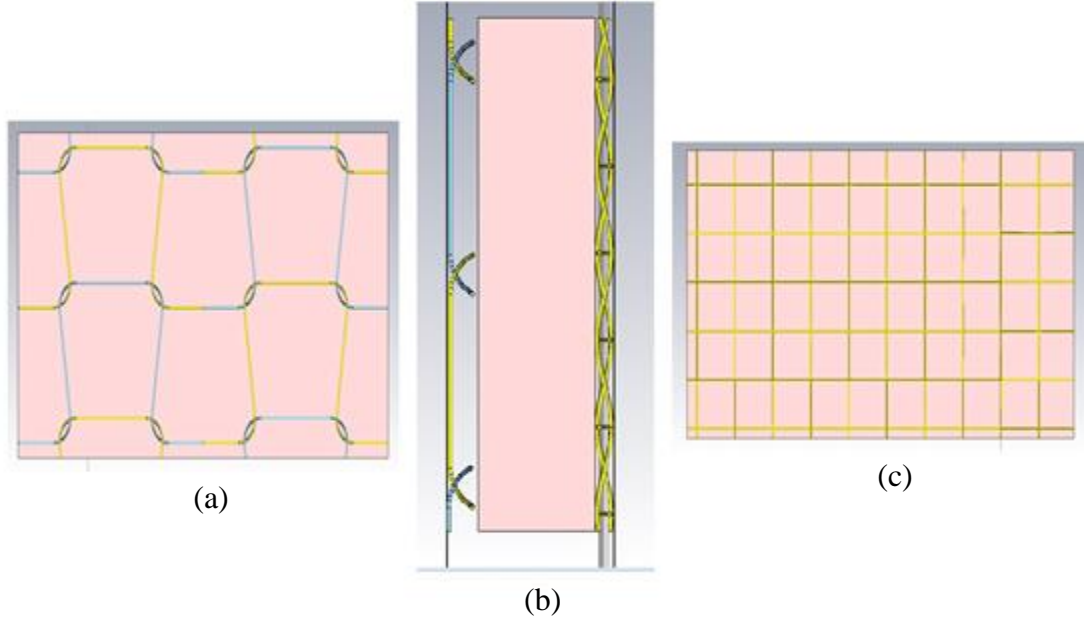
Simülasyon sonuçları incelendiğinde 8-12 GHz frekans aralığında maksimum soğurma frekansının kalınlık arttıkça daha düşük frekansta olduğu görülmektedir. Kalınlık değeri 1.6 mm olduğunda maksimum soğurma oranı ise %90.72 ve ortalama soğurma oranı %66.84 elde edilmiştir. Periyodik rezonatör yapısının daha büyük olması birim alana düşen iletken (bakır) oranının azalmasına ve ortalama soğurma oranının diğer ölçümlerden daha az olmasına neden olmuştur. Z şekilli tasarımın kalınlıkla değişen soğurma bilgileri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Z şekilli tasarımın kalınlıkla değişen soğurma bilgileri.

Kalınlık	Maksimum Soğurma Frekansı	Maksimum Soğurma Oranı	X-bant Ortalama Soğurma Oranı
1.2 mm	11.01 GHz	%81.92	%60.20
1.4 mm	10.88 GHz	%86.31	%68.14
1.6 mm	10.40 GHz	%90.72	%66.84
1.8 mm	10.23 GHz	%89.14	%71.68
2.0 mm	8.20 GHz	%89.93	%67.92

### 3.3. TASARIMIN SEÇİLMESİ

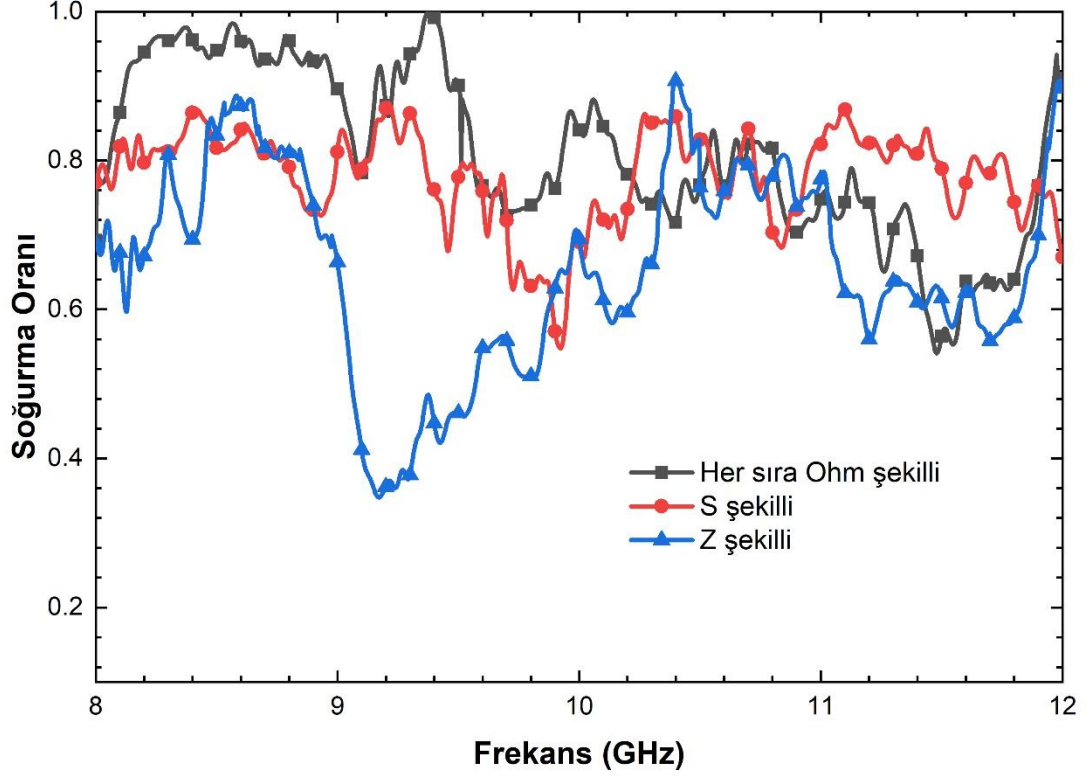
Tekstil esaslı MMA tasarımını oluşturan Süprem atkı örme ve Bezayağı dokuma kumaş tasarımlarının simülasyon sonuçları incelenmiştir. Bezayağı dokuma kumaş yapısında bütün atkı ve çözgülerin bakır olması durumunda soğurma oranının arttığı görüldüğü için Şekil 3.8.(c)'de gösterilen Bezayağı dokuma kumaş yapısı seçilmiştir. Süprem atkı örme kumaş yapısında 4 farklı tasarım yapılmış ve bu yapıların soğurma oranlarına etkileri incelenmiştir. Her sıra periyodik rezonatör yapısının soğurma oranını arttırdığı görülmüştür. Her sırada periyodik rezonatör yapısı bulunan Ohm şekilli, S şekilli ve Z şekilli yapılardan Ohm yapısı seçilmiş ve Şekil 3.8.(a)'da gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Seçilen tekstil esaslı MMA; Süprem atkı örme kumaş tasarımı (a), silikon malzemesi (b) ve Bezayağı dokuma kumaş tasarımı (c).

Tasarımların 1.6 mm silikon kalınlığındaki simülasyon sonuçları Şekil 3.9'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde her sıra Ohm ( $\Omega$ ) şekilli tasarımda 9.38 GHz frekansında %99.66 maksimum soğurma oranı ve %81.12 ortalama soğurma oranı elde edilmiştir. Maksimum soğurma oranının bu tasarımda elde edilmesi ve maksimum soğurma elde edilen frekansın yaklaşık olarak X-bandının ortalarına denk gelmesinden dolayı, üretim için bu tasarım yapısına karar verilmiştir. Silikon malzemesinin kalınlığının soğurma oranına etkisi araştırılmış ve maksimum soğurma

oranı 1.6 mm kalınlığında olmasından dolayı nihai metamateryale kalınlık değeri 1.6 mm olarak seçilmiştir.

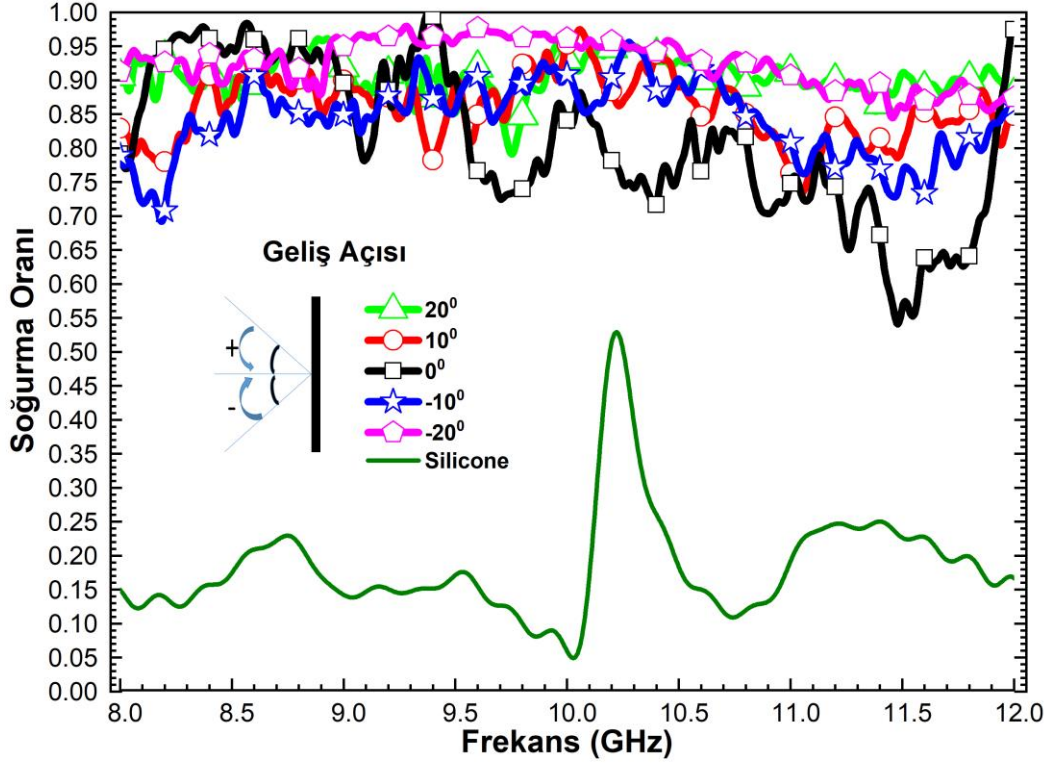


Şekil 3.9. Tasarımların 1.6 mm kalınlıkta simülasyon sonuçları.

### 3.3.1. Tasarımın Polarizasyon ve Geliş Açısı Bağımsızlığın İncelenmesi

Tasarlanan metamateryale, CST simülasyon programında tanımlanan dalga kılavuzu ölçüm düzeneğinde polarizasyon (TE, TM) ve geliş açısı ( $-20^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ) etkisi araştırılmıştır. Tanımlanan dalga kılavuzu ölçüm sisteminde sınır koşulları polarizasyon (TE, TM) çeşidine göre ayarlanmıştır. Ölçüm sonuçlarında geliş açısına göre maksimum soğurma değeri, maksimum soğurma elde edilen frekans bilgisi ve 8-12 GHz arasında ortalama soğurma değerleri verilmiştir. Ayrıca metamateryalin Süprem atkı örme ve Bezayağı dokuma kumaş yapısında, soğurma etkisinin kıyaslanabilmesi için iletken kullanılmadan sadece silikon malzemesinin ne kadar soğurma elde ettiği de grafiklerde verilmiştir. TM polarizasyonda elde edilen sonuçlar Şekil 3.10'da verilmiştir.





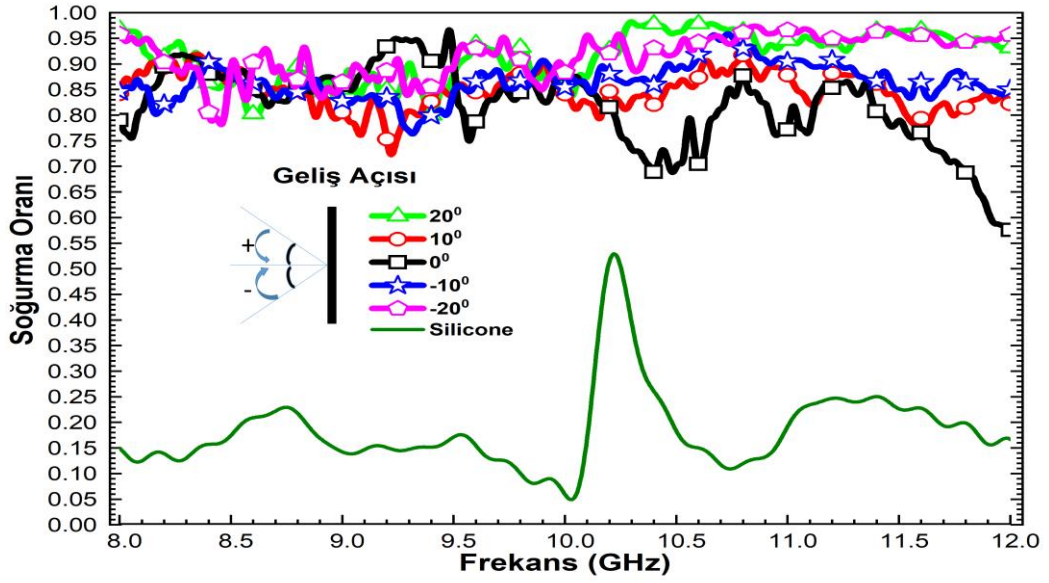
Şekil 3.10. TM polarizasyon ve geliş açısı simülasyon sonuçları.

TM polarizasyon ve geliş açısı simülasyon sonuçları bilgilerinden oluşturulan maksimum soğurma frekansı, maksimum soğurma oranı ve X-bant ortalama soğurma oranı bilgileri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. TM polarizasyon ve geliş açısı simülasyon sonuçları bilgileri.

TM Polarizasyon Geliş Açısı	Maksimum Soğurma Frekansı	Maksimum Soğurma Oranı	X-bant Ortalama Soğurma Oranı
20	10.24 GHz	%95.05	%90.48
10	10.06 GHz	%97.43	%85.99
0	9.38 GHz	%99.66	%81.12
-10	10.28 GHz	%95.56	%84.30
-20	10.45 GHz	%95.84	%92.57

Dalga kılavuzu ölçüm sisteminde sınır koşulları TE polarizasyon moduna göre ayarlanmış ve simülasyon işlemleri tekrarlanmıştır. TE modunda elde edilen sonuçlar Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.11. TE polarizasyon ve geliş açısı simülasyon sonuçları.

TE polarizasyon ve geliş açısı simülasyon sonuçları bilgilerinden oluşturulan maksimum soğurma frekansı, maksimum soğurma oranı ve X-bant ortalama soğurma oranı bilgileri Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. TE polarizasyon ve geliş açısı simülasyon sonuçları bilgileri.

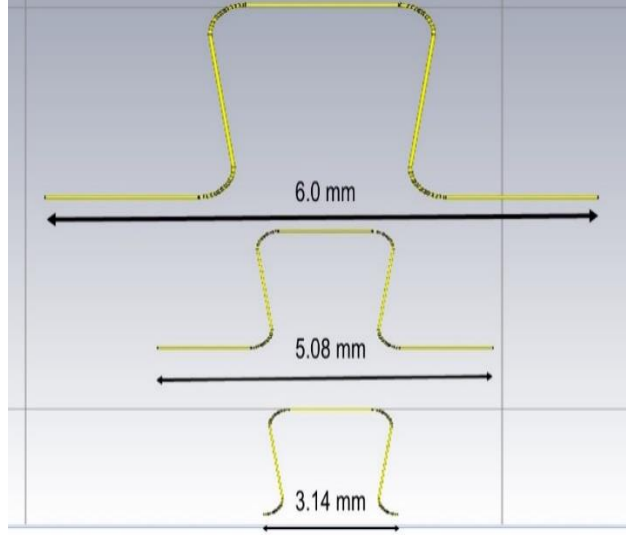
TE Polarizasyon Geliş Açısı	Maksimum Soğurma Frekansı	Maksimum Soğurma Oranı	X-bant Ortalama Soğurma Oranı
20	10.57 GHz	%98.33	%91.37
10	9.90 GHz	%90.32	%84.80
0	9.48 GHz	%96.65	%81.88
-10	10.72 GHz	%95.88	%86.61
-20	10.65 GHz	%97.35	%91.57

Elde edilen sonuçlar, polarizasyon ve geliş açısı bağımsız olarak kabul edilecek seviyede soğurma oranı değişimi olan bir tekstil esaslı metalmalzeme soğurucunun tasarlanabildiğini göstermektedir.

### 3.3.2. Ohm Tasarım Boyutların Değişimi Analizi

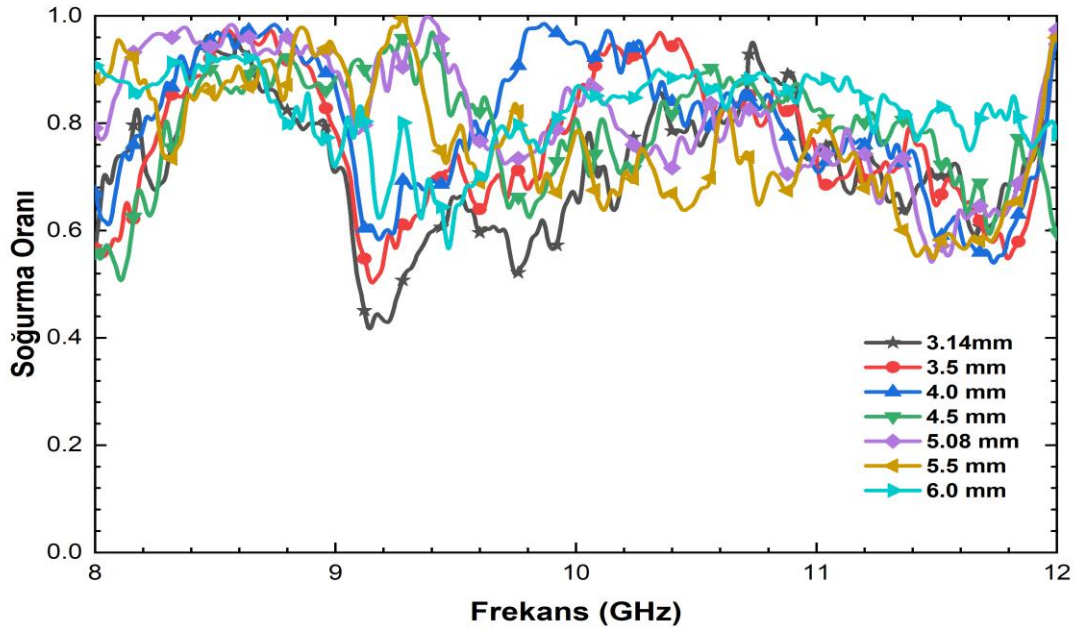
Seçilen MMA tasarımında, yatay düzlem Süprem atkı örme kumaş ilmek genişliği 5.08 mm’dir. Süprem atkı örme kumaş geometrisi ele alındığında yatay düzlem Ohm

boyutları minimum 3.14 ve maksimum 6.0 mm olabilmekte ve Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12. Ohm tasarım boyut değişimi.

Sıra yönünde Ohm boyutlarının soğurma oranlarına etkisini araştırmak için yatay düzlemde yaklaşık 0.5 mm farkla Ohm boyutları değiştirilerek elektriksel uzunluklar değiştirilmiş, simülasyon çalışmaları yapılmış ve sonuçlar Şekil 3.13’te verilmiştir.



Şekil 3.13. Ohm tasarım boyut değişimi simülasyon sonuçları.

Ohm tasarım boyut değişimi simülasyon sonuçları bilgilerinden oluşturulan maksimum soğurma frekansı, maksimum soğurma oranı ve X-bant ortalama soğurma oranları bilgileri Çizelge 3.8’de verilmiştir.

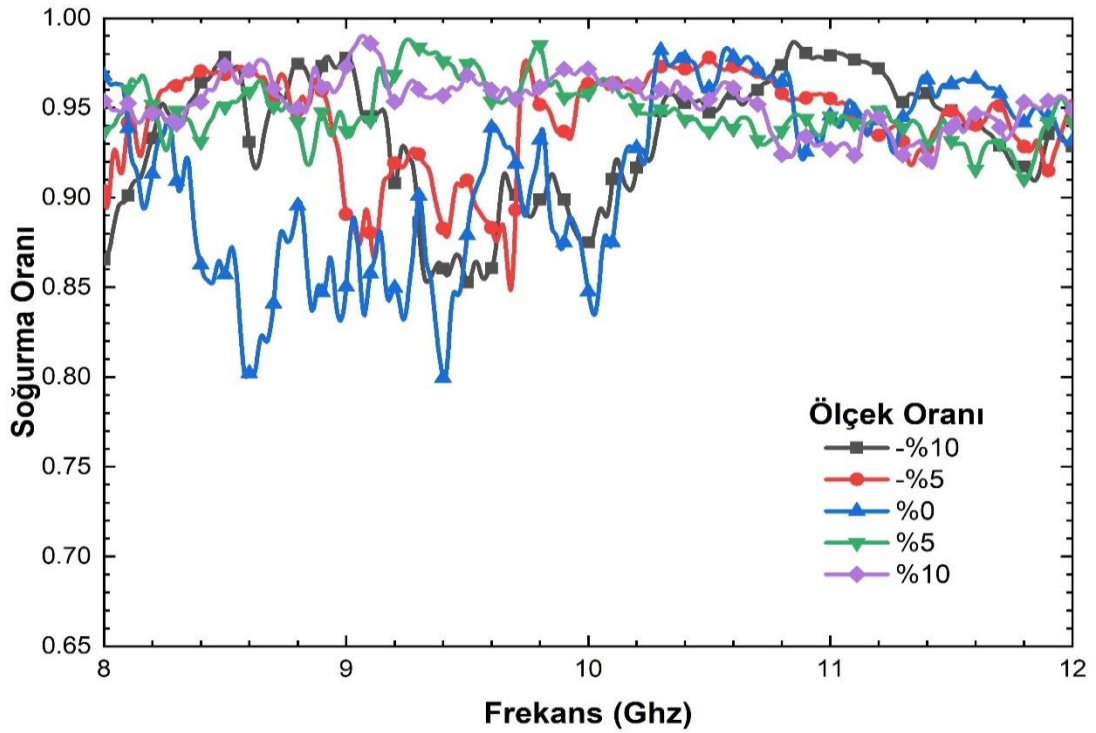
Çizelge 3.8. Ohm tasarım boyut değişimi simülasyon sonuçları bilgileri.

İlmeç Genişliği	Maksimum Soğurma Frekansı	Maksimum Soğurma Oranı	X-bant Ortalama Soğurma Oranı
3.14 mm	10.73 GHz	%96.48	%72.07
3.5 mm	10.35 GHz	%97.5	%76.75
4.0 mm	9.86 GHz	%98.52	%78.99
4.5 mm	9.41 GHz	%96.95	%79.41
5.08 mm	9.38 GHz	%99.66	%81.12
5.5 mm	9.28 GHz	%99.62	%81.88
6.0 mm	8.66 GHz	%92.55	%82.21

Elde edilen sonuçlara göre yaklaşık olarak maksimum soğurma oranları ve X-bant ortalama soğurma oranları sabit kalarak maksimum soğurma frekansının kaydırma yapılabilmektedir. Kullanılacak uygulamaya özgül olarak Ohm Şekil boyutlarının özölürce ayarlanabileceği gösterilmiştir.

### 3.3.3. MMA Esneklik Analizi

Tasarlanan MMA’nın tekstil esaslı olmasından dolayı giyilebilir uygulamalarda kullanılması, rezonatör yapılarının büyümesine veya küçölmesine sebep olacaktır. Tekstil esaslı metalmalzeme soğurucunun esnekliğin soğurmaya etkisi araştırmak için simülasyon programında ölçeklendirme yöntemi kullanılmıştır. Simülasyon programında ölçeklendirmeyi kullanarak MMA yapısını -%10, -%5, %0, %5, %10, oranlarında büyütme veya küçölme işlemleri yapılmıştır. Bu işlemler +20° geliş açısı, TE modülasyon, 8-12 GHz arasında simüle edilmiş ve simülasyon sonuçları Şekil 3.14’te verilmiştir.



Şekil 3.14. TE polarizasyon ve  $+20^\circ$  geliş açısında simülasyon sonuçları.

MMA esneklik analizi simülasyon sonuçları bilgilerinden oluşturulan maksimum soğurma frekansı, maksimum soğurma oranı ve X-bant ortalama soğurma oranları bilgileri Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.9. TE polarizasyon ve  $+20^\circ$  geliş açısında ölçeklendirme sonuçları.

Ölçek Oranı	Maksimum Soğurma Frekansı	Maksimum Soğurma Oranı	X-bant Ortalama Soğurma Oranı
-10%	10.84 GHz	%98.67	%93.46
-5%	10.67 GHz	%97.02	%94.24
0%	10.57 GHz	%98.33	%91.36
5%	9.25 GHz	%98.81	%94.82
10%	9.06 GHz	%99.01	%95.31

TE polarizasyon ve  $+20^\circ$  geliş açısındaki simülasyon sonuçları incelendiğinde, esnek yapının maksimum soğurma oranı ve X-bant ortalama soğurma oranlarında kayda değer bir değişiklik olmamıştır. MMA yapısı ölçeklendirildiğinde periyodik rezonatör yapının büyümesi veya küçülmesinin maksimum rezonans frekansın yerini değiştirdiği görülmüştür.

### 3.4. ÜRETİM AŞAMALARI VE SONUÇLARI

Tekstil esaslı MMA yapısının tasarımına karar verildikten sonra üretim aşamasına geçilmiştir. 3 katmandan oluşan yapının üretilme durumları araştırılmış ve en uygun üretim yöntemi belirlenmiştir. Bakır telin dokuma veya örme işlemi yapılırken esnek halde kalabilmesi ve kopmaması için simülasyon çalışmalarında iletken bakır telin kalınlığı 50 µm olarak belirlenmiştir.

#### 3.4.1. Bezayağı Dokuma Kumaşın Elde Edilmesi

İlk önce Bezayağı dokuma kumaşın atkı ve çözgü yapılarının bakır iletken yapılmasıyla başlanmıştır. Bezayağı kumaş dokuması yapılırken piyasada bu tarz uygulamalarda kullanılan 50 µm kalınlığında bakır tel ile iplik aynı anda dokuma yapılarak elde edilmiş ve ürüne ait görsel Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Bezayağı dokuma kumaş.

#### 3.4.2. Silikon Malzemesinin Temini

Belirlenen tasarımın dielektrik katmanını oluşturan silikon malzemesinin kalınlığı 1.6 mm'dir. Piyasada 1.6 mm kalınlıkta fabrikasyon üretilmiş silikon malzemesi

araştırılmıştır. İstenilen kalınlıkta silikon malzemesi kalınlığı bulunamamış ve özel üretim yapılması gerektiği söylenmiştir. Özel üretim yapıldığında 1.6 mm kalınlık değerinde elde edilebileceğinin garantisi verilmemiştir. Bundan dolayı farklı kalınlıklarda silikon malzemesi araştırması yapılmıştır. Piyasada 3M VHB 4611 modeli, 30 x 20 mm boyutlarında ve 1.1 mm kalınlığında silikon çift taraflı yüzlü bant bulunmuş ve Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Hem iki tekstil yapıyı tutması, hem üretim maliyetini düşürmesi ve hem de MMA yapısının kalınlığının azaltmasından dolayı silikon çift taraflı yüzlü bant tercih edilmiştir. Güncellenen silikon malzemesi kalınlığının soğurmaya etkisini araştırmak için simülasyon çalışmaları tekrarlanmış ve sonuçları “Üretilen MMA’ya Göre Simülasyonların Güncellenmesi” başlığı altında verilmiştir.



Şekil 3.16. 1.1 mm kalınlık ve 30 x 20 mm boyutunda silikon esaslı çift taraflı bant.

### 3.4.3. Süprem Atkı Örme Kumaşın Elde Edilmesi

Periyodik rezonatör yapısını oluşturacak olan Süprem atkı örme kumaş yapısının üretim çalışmaları yapılmıştır. Simülasyon çalışmalarında piyasada bu tarz uygulamalarda kullanılan 50 µm kalınlığında bakır tel kullanılarak tasarım yapılmıştır. Tasarlanan Ohm şekilli periyodik rezonatör yapısını oluşturmak için 50 µm kalınlığında Ohm boyutu uzunluğunda iletken ve Ohm boyutu uzunluğunda iplik olacak şekilde birbirini tekrar eden bir malzeme araştırılmış ve üretimi için uygun bir

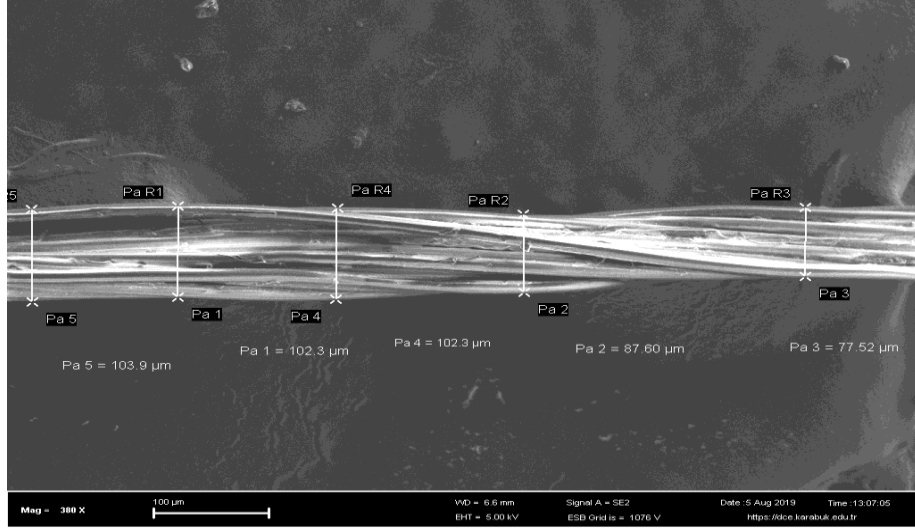
yöntem bulunamamıştır. Alternatif yöntemlere bakılmaya başlanmış ve piyasada bulunan 50  $\mu\text{m}$  kalınlığa en yakın ipliğin istenilen uzunluklarda iletken boya ile boyanarak elde edilmesi kararlaştırılmıştır. Örme işlemi yapılırken kopmaması ve piyasada bulunan 80 dtex özelliğine sahip olan Gütermann Skala 360 iplik tercih edilmiş ve Şekil 3.17’de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Gütermann Skala 360 iplik.

Gütermann Skala 360 iplik kalınlık değeri bulunması için teknik dokümanlarına bakılmış fakat kalınlık bilgisi bulunamamıştır. İplik kalınlık değerinin bulunup simülasyon çalışmalarına uyarlamak için Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsünde Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntülenmesi yapılmış ve Şekil 3.18’de gösterilmiştir. SEM görüntülemesi yapılarak kesit kalınlığı ölçülmüştür. İp yapısı liflerden oluştuğu için belirli noktalarında incelme ve kalınlaşmalar görülmektedir. Kesit kalınlığını belirlerken 5 ayrı noktadan ölçümler yapılmış ve ortalama 93  $\mu\text{m}$  bulunmuştur. Bu kalınlıkta yaklaşık insan saçı kesit kalınlığına denk gelmektedir. Boya kalınlığı da ekleneceği düşünülerek 95  $\mu\text{m}$  kesit kalınlığı kabul edilmiş ve simülasyonlar yeniden yapılmıştır.





Şekil 3.18. Gütermann Skala 360 SEM görüntüsü.

İplik belirlendikten sonra 3-boyutlu Ohm periyodik iletken rezonatör yapısını oluşturmak için bakır, karbon, grafit ve gümüş boyalar kullanarak iletken ip numuneleri yapılmıştır.

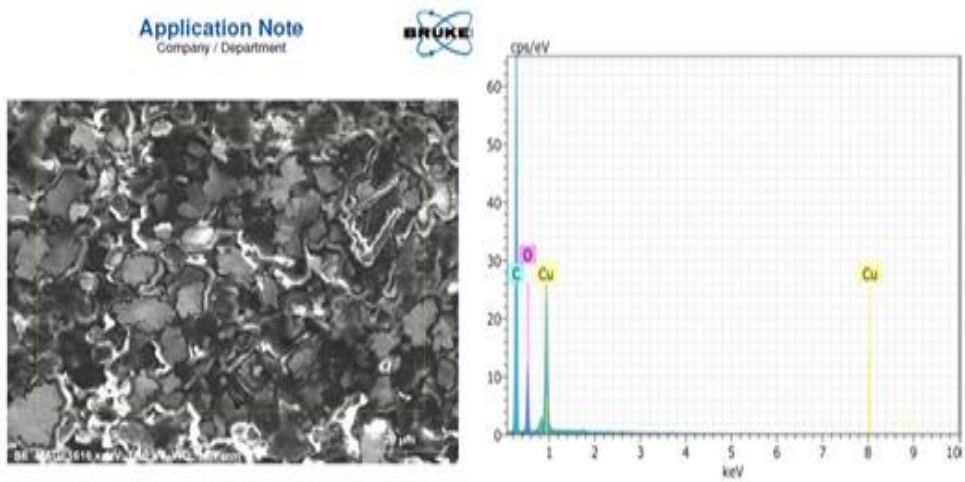
#### 3.4.3.1. Bakır Boya

Piyasadaki bakır boya araştırması yapılmış ve Winkel marka bakır sprej boya içerisinde bakır plaka parçacıkları bulunduğunu belirtmesinden dolayı tercih edilmiştir. Bakır sprej boyanın görüntüsü Şekil 3.19’da verilmiştir.



Şekil 3.19. Winkel bakır sprej boya.

Bakır spreyn açıklamasında iletken boya olduğuna dair bir açıklama bulunmamasından dolayı ve içerisindeki bakır oranının tespiti için kağıt parçası boyama yapılarak numune hazırlanmıştır. Hazırlanan numune Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsünde Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir. SEM analiz sonuçlarına göre yüzey alanında %30 bakır olduğu tespit edilmiştir. Yüzey görüntüsü ve analiz sonucu Şekil 3.20’de verilmiştir.



(a)

(b)

Spectrum: 1

El	AN	Series	unn.	C norm.	C Atom.	C Error (1 Sigma)
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
C	6	K-series	56.39	56.39	78.44	6.16
O	8	K-series	12.92	12.92	13.49	1.57
Cu	29	L-series	30.68	30.68	8.07	3.44
Total:			100.00	100.00	100.00	

(c)

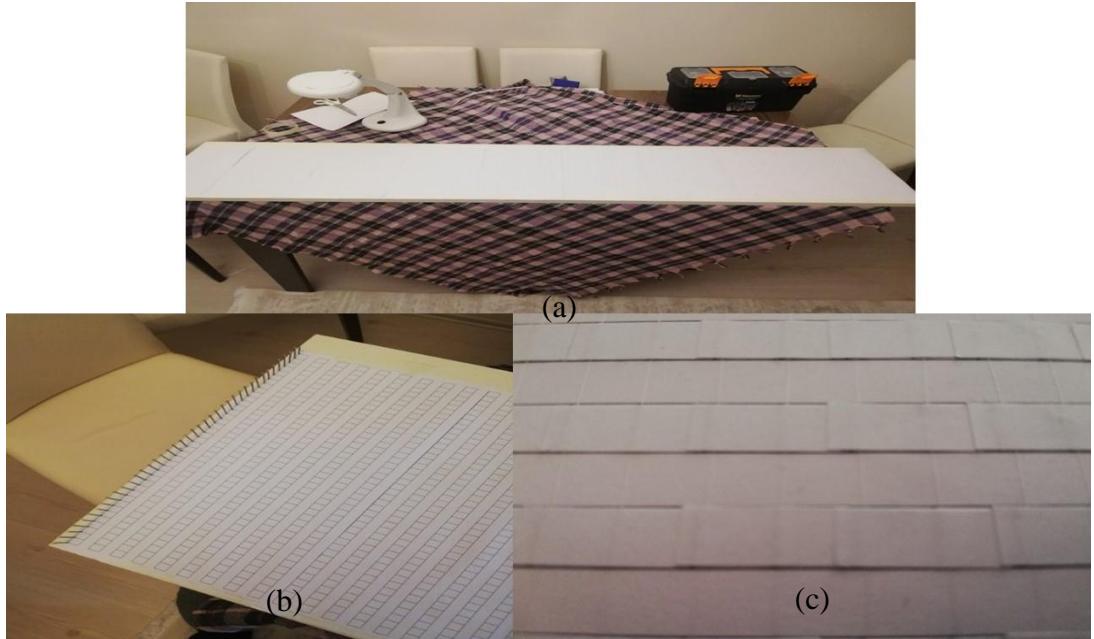
Şekil 3.20. Winkel bakır spreyn boyama analizi; yüzey görüntüsü (a), element bileşenleri (b) ve element oranları (c).

Analiz sonuçları doğrultusunda, boyama işlemleri yapıldığında bakır oranının etkili olabileceği düşünülmüştür. Bundan dolayı bakır boyama ile 3 adet numune yapılmasına karar verilmiştir. Birinci numune tek kat boyama, ikincisi iki kat boyama ve sonuncusu boyama üzerine bakır tozu eklenerek elde edilmesi planlanmıştır. Ekleme yapılacak olan 50 µm boyutunda bakır parçacıklara sahip bakır toz Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Bakır tozu.

Süprem atkı örme kumaş üretimi için bakır boya ve bakır tozu temin edildikten sonra boyama düzeneği hazırlanmaya başlanmıştır. Periyodik iletken şekli ip üzerinde yapabilmek için bir çok yöntem denenmiş olup en uygunu olarak 7 mm aralıklarla 165 cm uzunluğunda 48 satır şeklindeki yapıya karar verilmiştir ve Şekil 3.22’deki boyama düzeneği oluşturulmuştur.



Şekil 3.22. Bakır boyama düzeneği (a), aralık düzeneği (b) ve ip düzeneği (c).

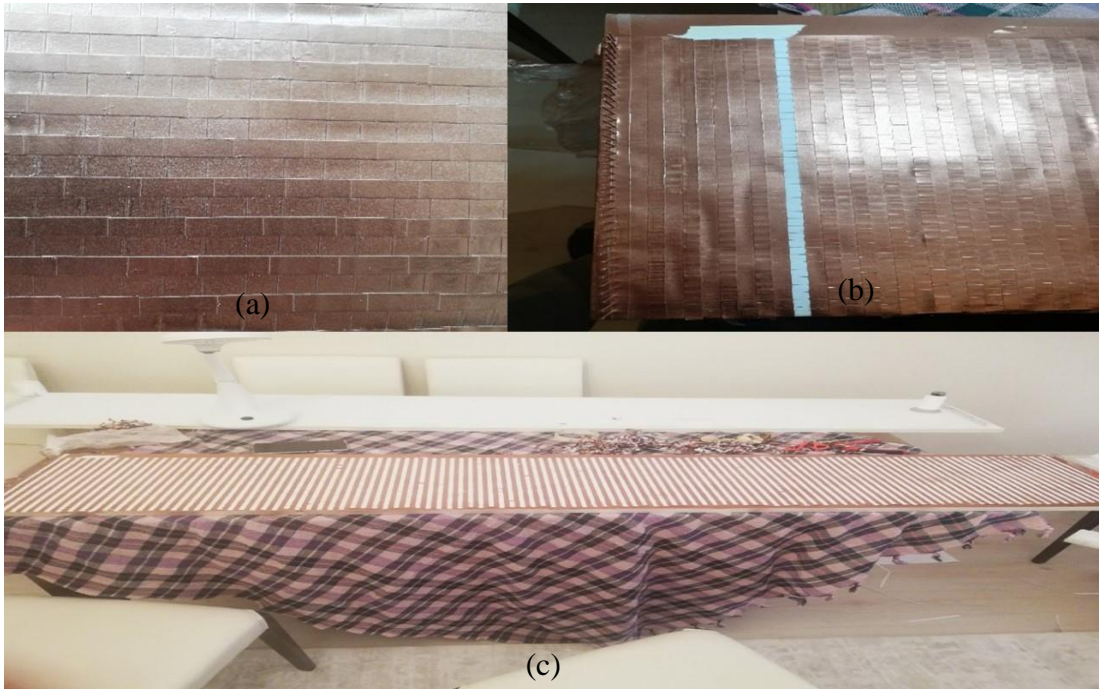
İp, boyama düzeneğinin iki baş ucunda bulunan çiviler arasından geçirilerek yerleştirildi. Ohm boyutunu oluşturabilmek için yapışkanlı kağıtlarla yapıştırma işlemi yapıldı. Kağıt yapıştırılan yüzey altında bulunan ip boyanmayacak ve yapıştırma

işlemi yapılmayan kısım boyanacak, böylece Ohm boyutunda iletken ve Ohm boyutunda iplik şeklinde tekrar eden ip numunesi elde edilecektir. Yapışkanlı kağıtlarla kapatma işlemi tamamlandıktan sonra boyama işlemine geçilmiştir. Boyama düzeneğinden yaklaşık 100 m uzunluğunda ip numunesi elde edilmiş ve boyama işlemi Şekil 3.23'te verilmiştir.



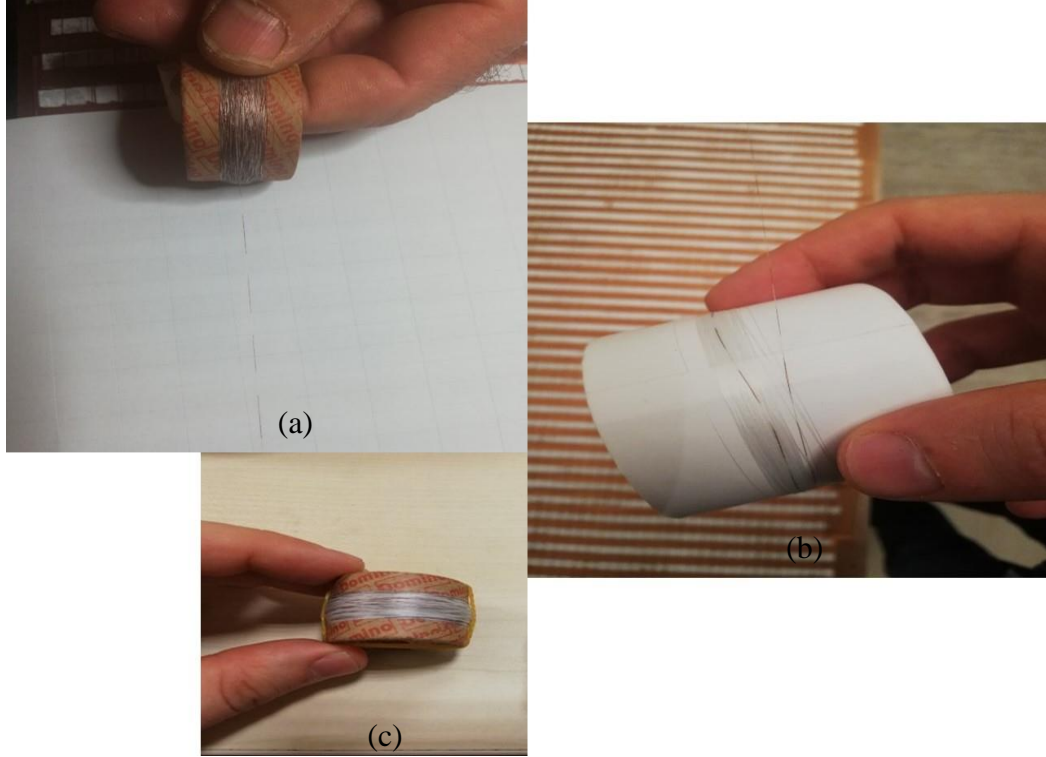
Şekil 3.23. Bakır boyama işlemi.

Boyama işleminden sonra yapıştırılan yapışkanlı kağıtlar dikkatlice teker teker sökülmüş ve yapılan işlem Şekil 3.24'te gösterilmiştir.



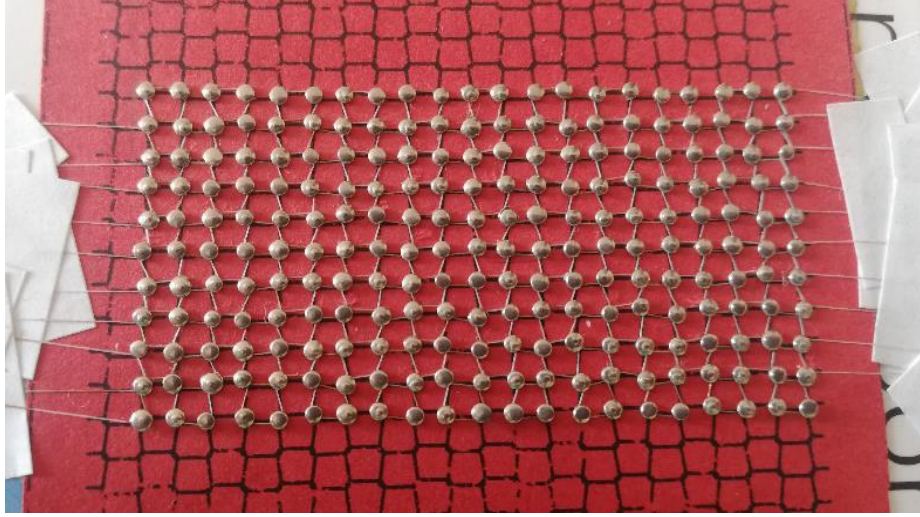
Şekil 3.24. Boyalı yüzey (a), yapışkanlı kâğıt söküm işlemi (b) ve son hali (c).

Yapışkanlı kağıtları sökme işlemi tamamlanınca boyanan ipler dikkatlice sarılmıştır. 3 adet bakır ip numusi oluşturulmuştur. Bunlardan ilki tek kat boymama, ikincisi iki kat boyama işlemi ve üçüncüsü ise tek kat boyama sonrası bakır toz ilave edilerek yapılmıştır. Elde edilen numuneler Şekil 3.25’te verilmiştir.



Şekil 3.25. Üretilen tek kat boya (a), çift kat boya (b) ve tek kat boya sonrası bakır toz ilave bakır iplik numuneleri (c).

Üretilen iplik numunelerinden sonra örme makinası ile örme işlemi yapılması için Pamukkale Üniversitesi Tekstil Mühendisliği bölümüne iplik numuneleri gönderilmiştir. Örme makinasında denemeler yapılmış ama istenilen şekilde üretim yapılamamıştır. Buna hassas ölçek girilememesi ve ipliğin çok ince olmasından dolayı ilmek boyutlarında kayma oluşması neden olmuştur. Üretilecek örme kumaş boyutlarının çok büyük olmaması, ilmek büyüklüklerinin el ile üretilmesinde zorluk yaratmaması ve istenilen periyodik yapının el ile daha iyi yerleştirilmesinden dolayı özel olarak el ile üretime geçilmiştir. Simülasyon ortamında çizilen Süprem atkı örme kumaş yapısı ölçekli olarak çıktısı alınarak Şekil 3.26’daki örme işlemleri tamamlanmıştır.



Şekil 3.26. Bakır örme düzeneği.

Süprem atkı örme kumaş üretiminde bakır boyadan farklı olarak karbon, grafit ve gümüş iletken boyalar da üretim yapılmak istenmiştir. İlerleyen zamanlarda kullanılacak uygulamaya göre maliyet analizi yapılabilmesi için karbon, grafit ve gümüş iletken boyalar kullanılarak Süprem atkı örme kumaş örnekleri üretilmiştir.

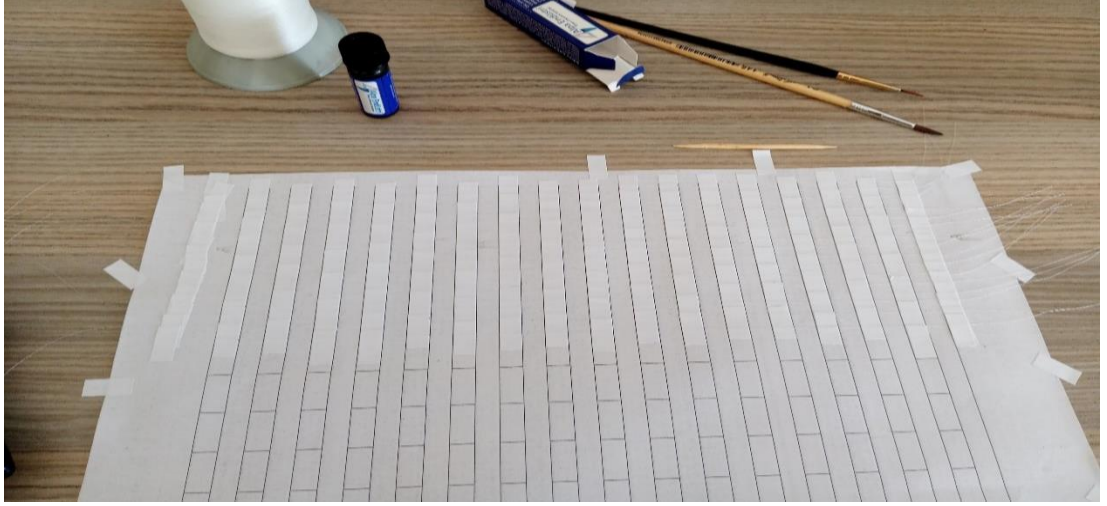
### 3.4.3.2. Karbon Boya

İletken karbon boyası olarak Alpa Endüstrinin ürettiği iletken karbon boyası kullanılmış ve boyanın görüntüsü Şekil 3.27’de verilmiştir.



Şekil 3.27. İletken karbon boya.

Elle üretim yapılacağı ve numunenin boyutların küçük olmasından dolayı A4 kâğıt boyutuna boyama düzeneği hazırlanmış ve Şekil 3.28’de verilmiştir.



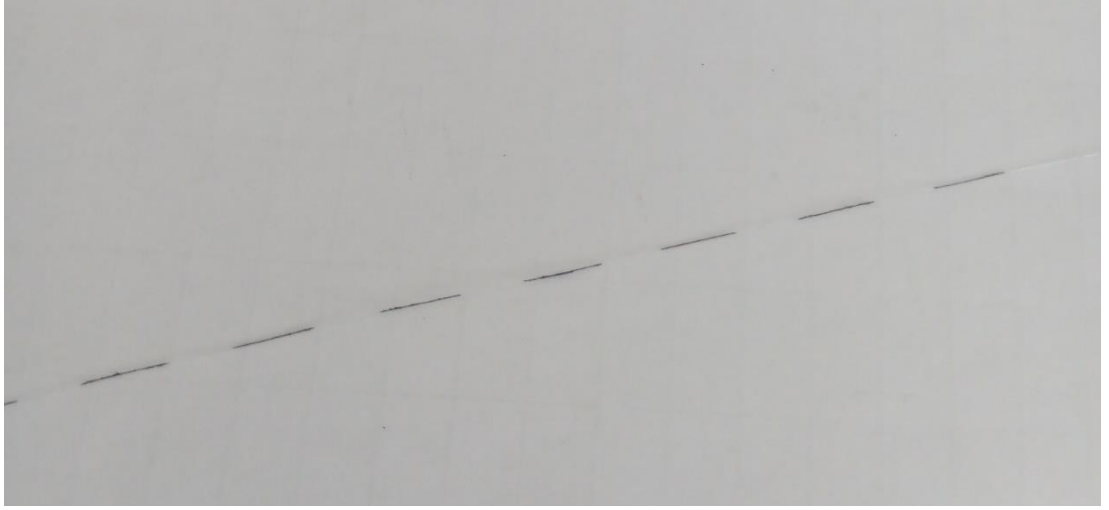
Şekil 3.28. Karbon boyama düzeneği.

Yapışkanlı kağıtların yapıştırma işleminin tamamlanması ile karbon boyama işlemine geçilmiştir. İnce fırça yardımı ile karbon boyama işlemi tamamlanmış ve Şekil 3.29'da gösterilmiştir.



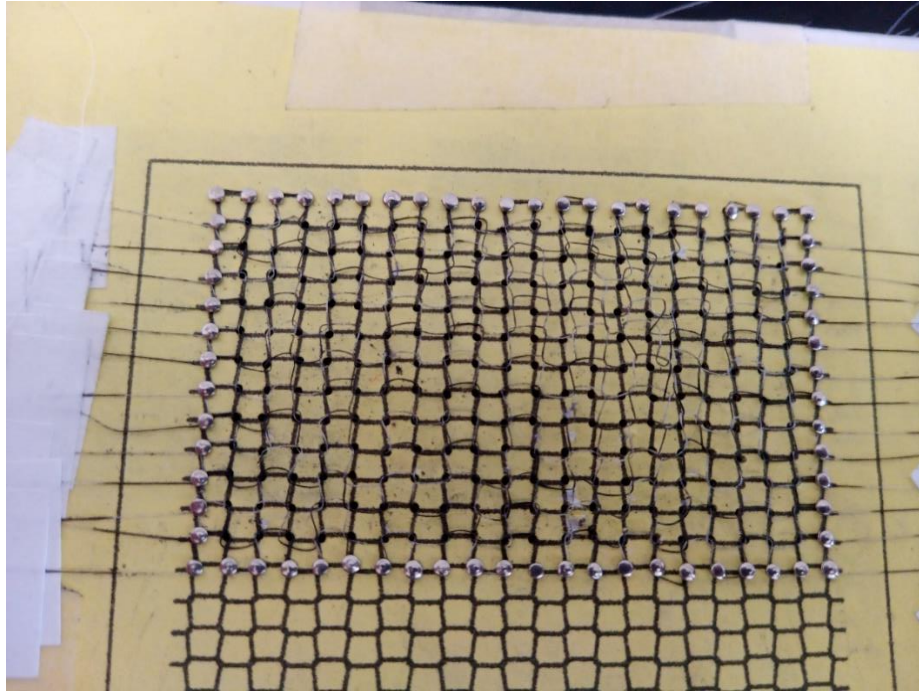
Şekil 3.29. Karbon boyama işlemi.

Boyama işlemi tamamlandıktan sonra yapışkanlı kağıtları sökme işlemi yapılmıştır. Üretilen karbon iplik numunesi Şekil 3.30'da gösterilmiştir.



Şekil 3.30. Üretilen karbon iplik numunesi.

Simülasyon ortamında çizilen Süprem atkı örme kumaş yapısı ölçekli olarak çıktısı alınarak elle örme işlemi tamamlanmış ve Şekil 3.31’de gösterilmiştir.



Şekil 3.31. Karbon örme düzeneği.

#### 3.4.3.3. Grafit Boya

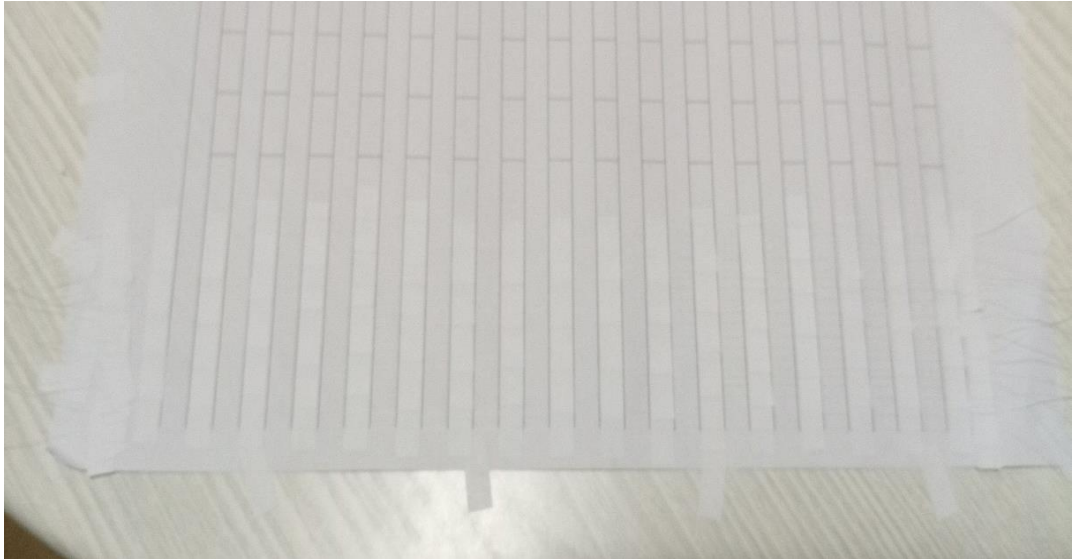
İletken grafit boyası olarak Kontakt Chemie’nin ürettiği spreyleniletken grafit boyası kullanılmış ve boyanın görüntüsü Şekil 3.32’de verilmiştir.





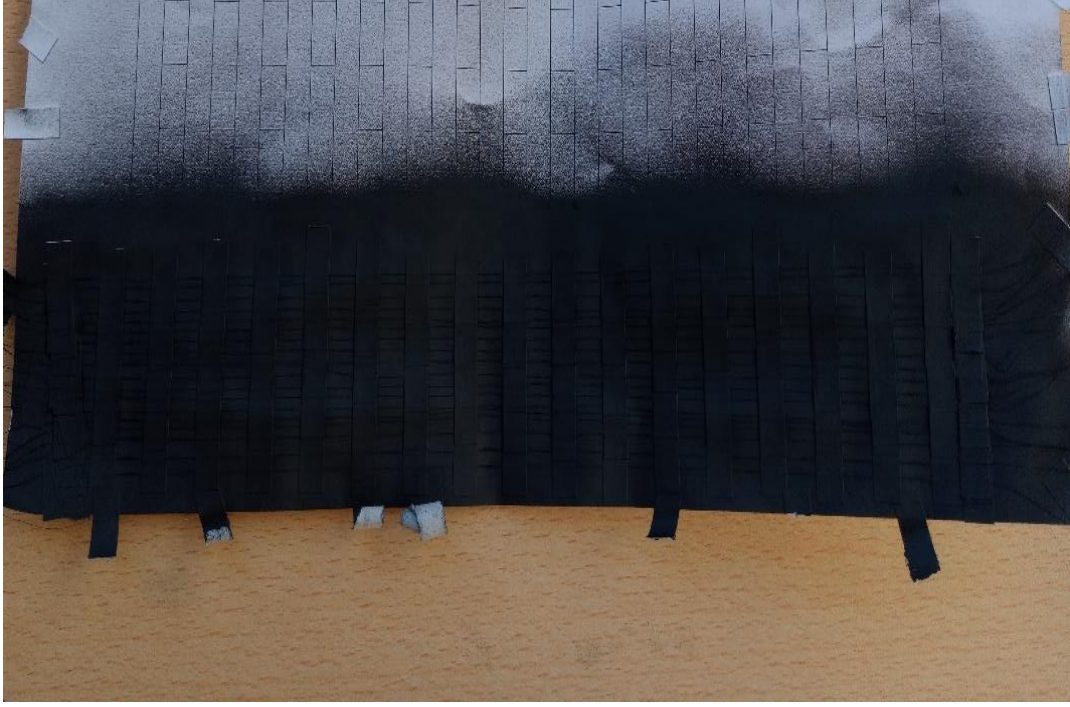
Şekil 3.32. İletken grafit sprej boya.

Numunenin boyutların küçük olmasından dolayı A4 kâğıt boyutuna boyama düzeneği hazırlanmış ve Şekil 3.33'te verilmiştir.



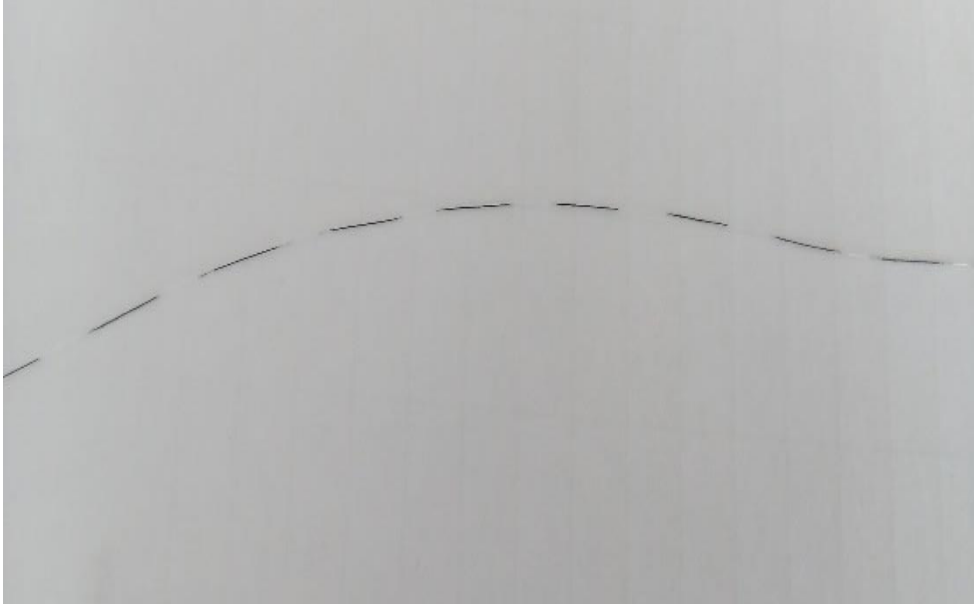
Şekil 3.33. Grafit boyama düzeneği.

Yapışkanlı kağıtların yapıştırma işleminin tamamlanması ile grafit boyama işlemine geçilmiştir. Sprey grafit boya ile boyama yapılmış ve Şekil 3.34'te gösterilmiştir.



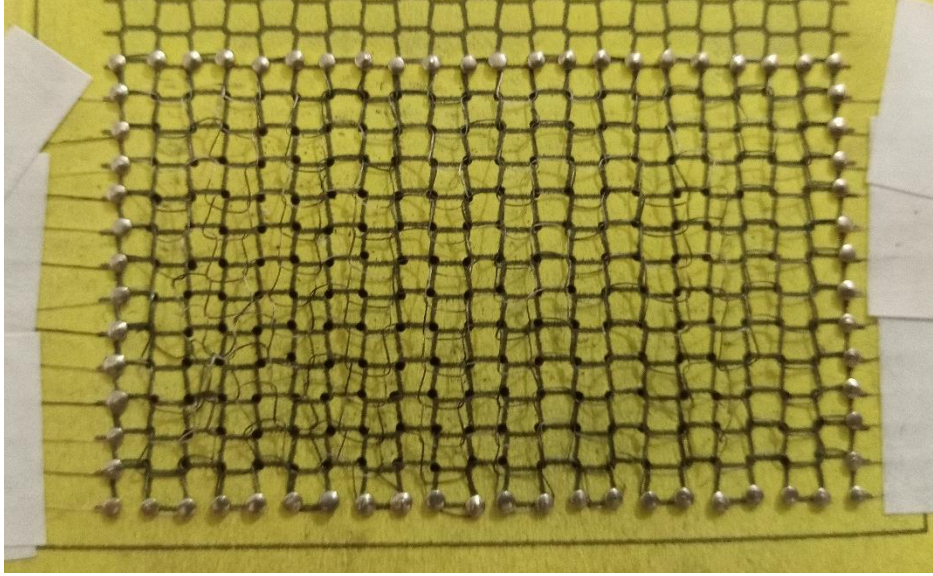
Şekil 3.34. Grafit boyama işlemi.

Boyama işlemi tamamlandıktan sonra yapışkanlı kağıtları sökme işlemi yapılmıştır. Üretilen grafit iplik numunesi Şekil 3.35’te gösterilmiştir.



Şekil 3.35. Üretilen grafit iplik numunesi.

Simülasyon ortamında çizilen Süprem atkı örme kumaş yapısı ölçekli olarak çıktısı alınarak elle örme işlemi tamamlanmış ve Şekil 3.36’da gösterilmiştir.



Şekil 3.36. Grafit örme düzeneği.

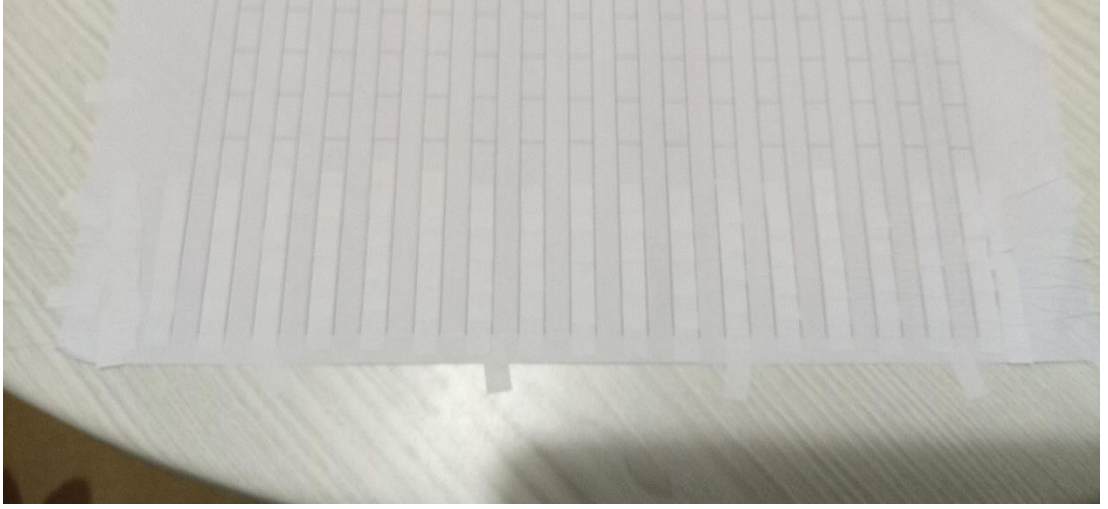
#### 3.4.3.4. Gümüş Boya

İletken gümüş boyası olarak “Baku BK-426” iletken gümüş boyası kullanılmış ve boyanın görüntüsü Şekil 3.37’de verilmiştir.



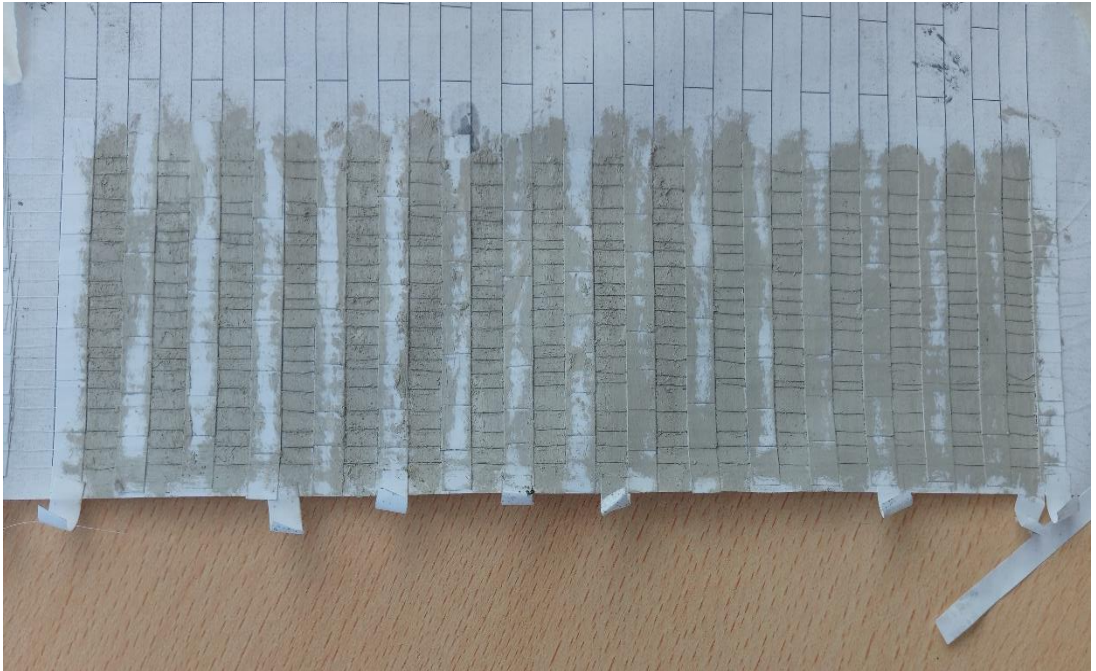
Şekil 3.37. İletken gümüş boya.

Boyama düzeneği hazırlanmış ve Şekil 3.38’de verilmiştir.



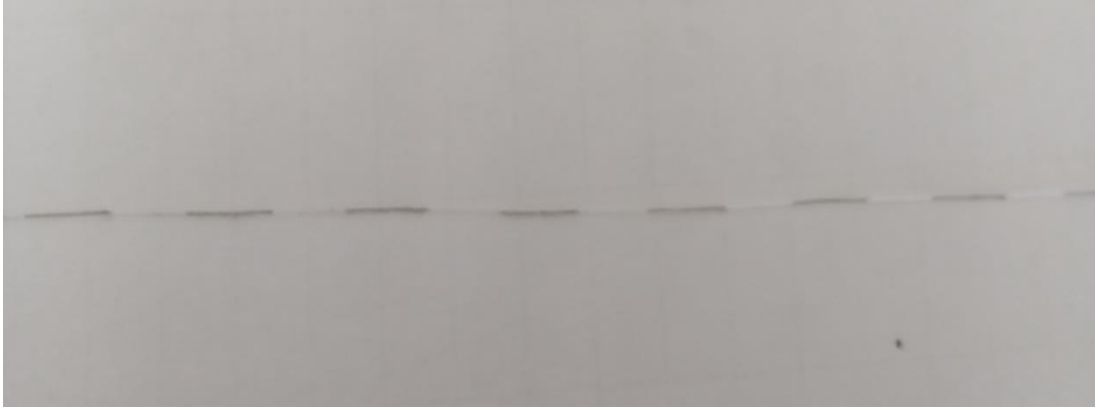
Şekil 3.38. Gümüş boyama düzeneği.

Yapışkanlı kağıtların yapıştırma işleminin tamamlanması ile gümüş boyama işlemine geçilmiştir. Gümüş boya ile boyama yapılmış ve Şekil 3.39’da gösterilmiştir.



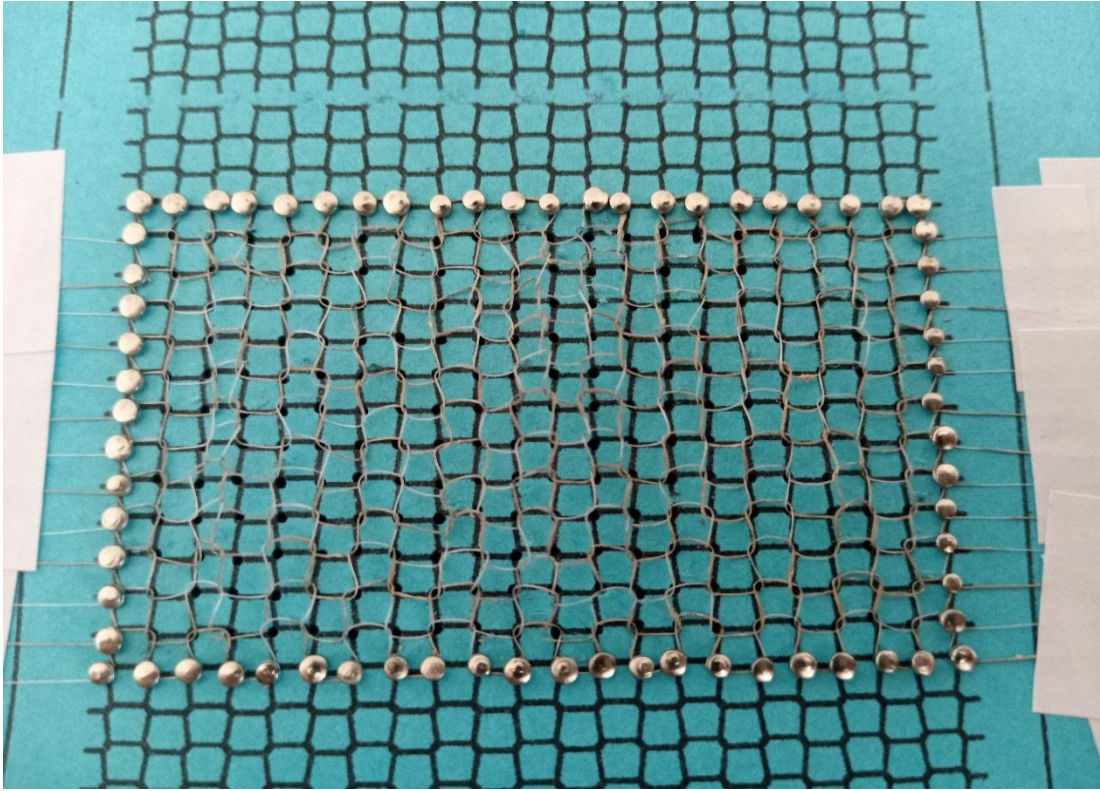
Şekil 3.39. Gümüş boyama işlemi.

Boyama işlemi tamamlandıktan sonra yapışkanlı kağıtları sökme işlemi yapılmıştır. Üretilen gümüş iplik numunesi Şekil 3.40’da gösterilmiştir.



Şekil 3.40. Üretilen gümüş iplik numunesi.

Simülasyon ortamında çizilen Süprem atkı örme kumaş yapısı ölçekli olarak çıktısı alınarak elle örme işlemi tamamlanmış ve Şekil 3.41’de gösterilmiştir.



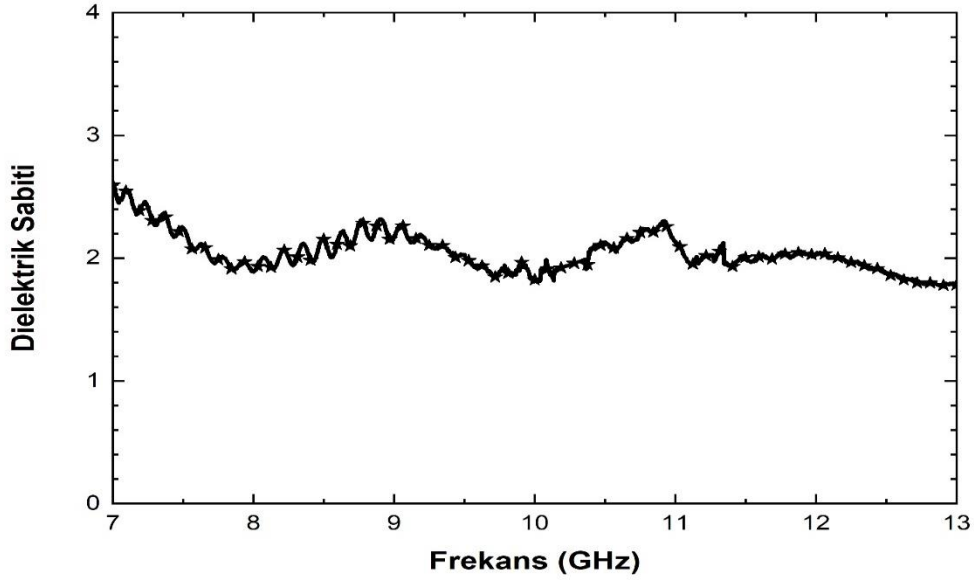
Şekil 3.41. Gümüş örme düzeneği.

#### **3.4.4. Üretilen MMA’ya Göre Simülasyonların Güncellenmesi**

Tasarlanan MMA ile üretilen MMA arasında farklılıklar meydana gelmiştir. Bu farklılıklar, silikon malzemesi kalınlığının 1.6 mm’den 1.1 mm düşürülmesi, çift

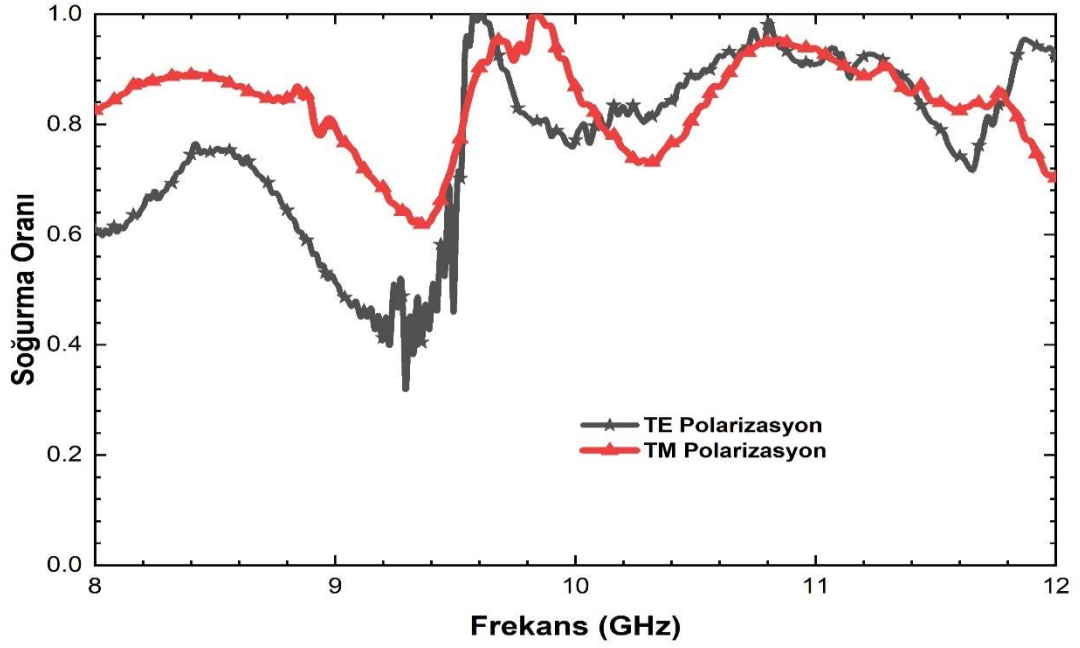
tarafly silikon bant olarak satılan 3M VHB 4611 bantın dielektrik sabitinin silikon malzemesinin dielektrik sabitinden farklı olması ve Süprem atkı örme kumaş tasarımında periyodik rezonatör yapının kalınlığının 50  $\mu\text{m}$ 'den 95  $\mu\text{m}$ 'ye çıkarılmasıdır.

3M VHB 4611 çift taraflı bantın dielektrik sabitini belirlemek amacıyla dalga kılavuzu ölçüm sisteminde S-parametreleri ölçülmüştür. Alınan S-parametre değerleri Yeni Tekrarsız Yöntem'i (New Non-Iterative) kullanarak dielektrik sabiti hesaplanmıştır [141]. 3M VHB 4611 çift taraflı bantın dielektrik sabitinin, frekansa bağılı olarak 2.4 ila 1.95 arasında dalgalandığı ve ortalamasının 2.045 olduğu bulunmuş ve Şekil 3.42'de verilmiştir.



Şekil 3.42. 3M VHB 4611 dielektrik sabiti.

Simülasyon programı üzerinden dielektrik katmanın kalınlığı 1.1 mm'ye düşürülmüş ve dielektrik sabiti 2.045 olarak tanımlanmıştır. Süprem atkı örme kumaş tasarımında periyodik rezonatör yapının kalınlığı 95  $\mu\text{m}$ 'ye çıkarılmıştır. Bu yapılan değişikliklerin soğurmaya etkisinin araştırılması için TE ve TM polarizasyon durumlarında simülasyonlar tekrar edilmiş ve sonuçları Şekil 3.43'te verilmiştir.



Şekil 3.43. Güncellenen simülasyon sonuçları.

Üretilen MMA simülasyon sonuçları bilgilerinden oluşturulan maksimum soğurma frekansı, maksimum soğurma oranı ve X-bant ortalama soğurma oranları bilgileri Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10. Üretilen MMA ile uyumlu boyutlara sahip simülasyon sonuçları.

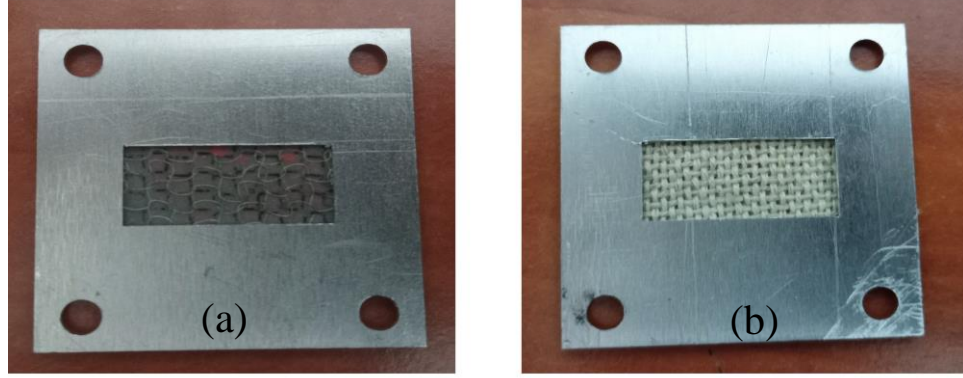
Simülasyon Sonuçları	Maksimum Soğurma Frekansı	Maksimum Soğurma Oranı	X-bant Ortalama Soğurma Oranı
TM Modülasyon	9.81 GHz	%99.53	%83.35
TE Modülasyon	9.61 GHz	%98.25	%76.95

Üretilen MMA tasarım simülasyon sonuçları analiz edildiğinde, silikon malzemenin kalınlığının azalması ve dielektrik sabitinin azalması maksimum soğurma oranının elde edildiği frekansın daha yüksek frekansta görülmesine neden olmuştur.

### 3.4.5. Dalga Kılavuzu Ölçüm Sistemi Sonuçları

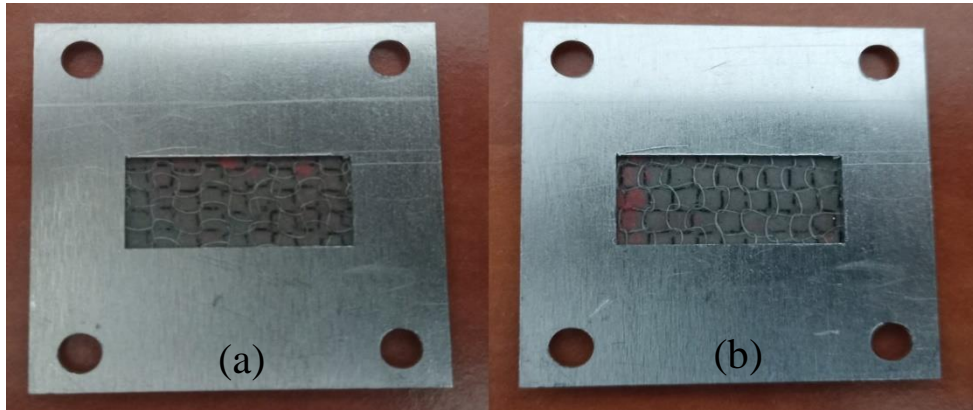
Süprem atkı örme kumaş, 3M VHB 4611 çift taraflı bant ve Bezayağı dokuma kumaşın birleştirilmesi ile üç katmandan oluşan tekstil esaslı MMA elde edilmiştir. MMA,

WR90 dalga kılavuzu boyutunda, lazer kesim ile yapılan örnek tutucu içerisine yerleştirilmiştir. MMA'nın üst katmanında Süprem atkı örme kumaş, orta katmanında 3M VHB 4611 çift taraflı bant, alt katmanında Bezayağı dokuma kumaş bulunmakta ve Şekil 3.44'te gösterilmiştir.



Şekil 3.44. Tekstil esaslı MMA önden görünüm (a) ve arkadan görünüm (b).

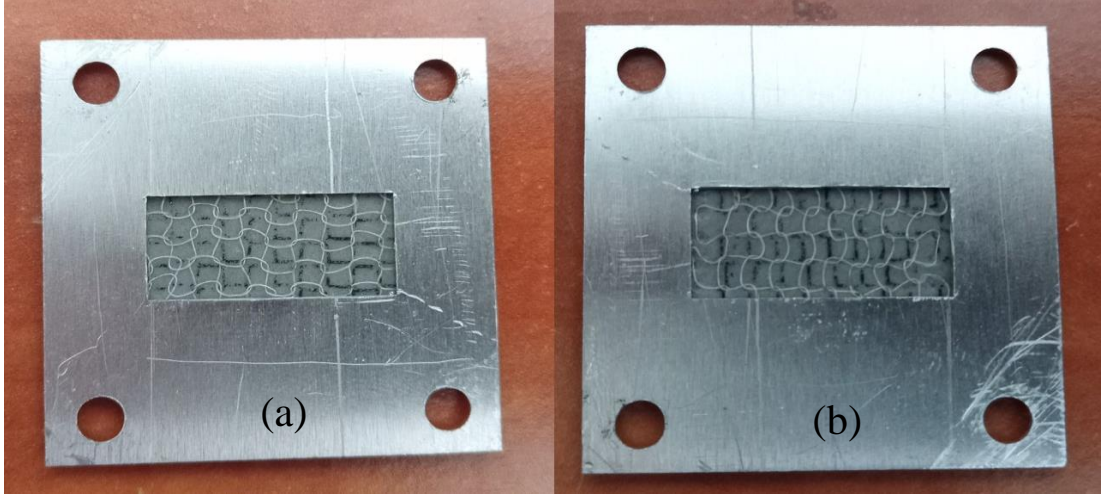
Bakır boyama ile 3 adet Süprem atkı örme kumaş numunesi yapılmıştır. Bunlar, tek kat boyama, iki kat boyama ve tek kat boyama üzerine bakır tozu eklenerek elde edilmiştir. Hazırlanan tekstil esaslı MMA'ların polarizasyon bağımsız yapıda olduğunu gösterebilmek için TE ve TM polarizasyonda ölçümler yapılmıştır. Tek kat boyama ile hazırlanan tekstil esaslı MMA'nın önden görünüm şekilleri Şekil 3.45'te gösterilmiştir. Tekstil esaslı MMA'nın arkadan görünümü simetrik yapıda olduğundan dolayı polarizasyon değişikliği yapıldığında görünümünde herhangi bir değişiklik olmamakta ve her zaman Şekil 3.44.(b)'deki görünmektedir.



Şekil 3.45. Tek kat bakır boya MMA'nın önden görünüm, TE polarizasyon (a) ve TM polarizasyon (b).



Çift kat boyama ile hazırlanan tekstil esaslı MMA Şekil 3.46'da gösterilmiştir.



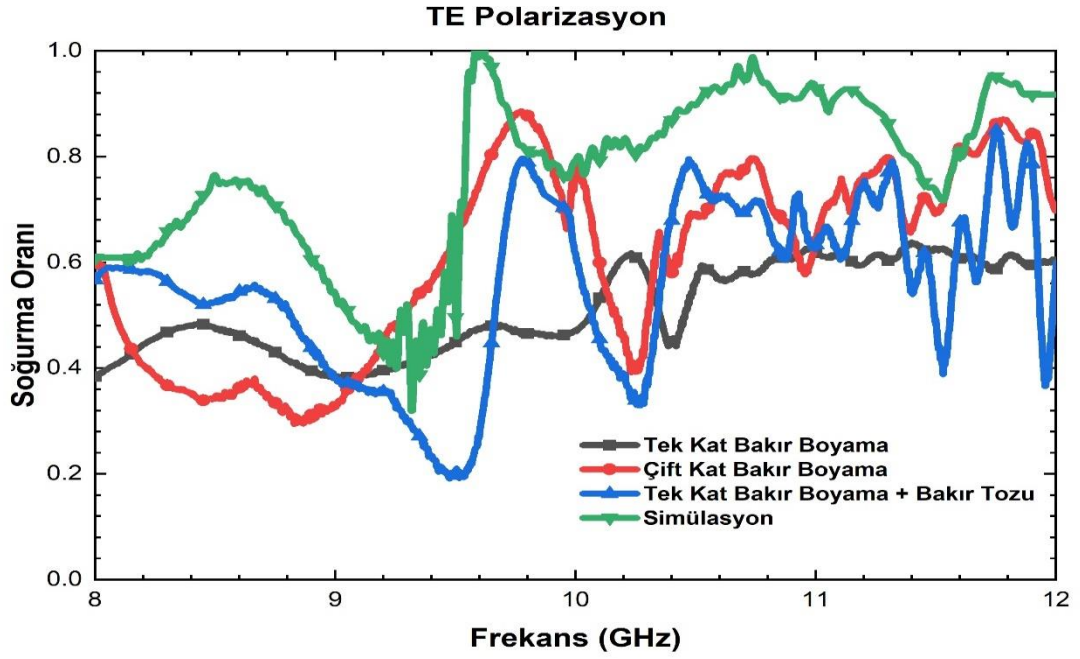
Şekil 3.46. Çift kat bakır boya MMA'nın önden görünüm, TE polarizasyon (a) ve TM polarizasyon (b).

Bakır boya üzerine bakır tozu eklenerek hazırlanan tekstil esaslı MMA Şekil 3.47'de gösterilmiştir.



Şekil 3.47. Bakır boya üzerine bakır tozu ilaveli MMA'nın önden görünüm, TE polarizasyon (a) ve TM polarizasyon (b).

TE polarizasyon dalga kılavuzu ölçüm sisteminde 8-12 GHz frekans aralığında ölçümler yapılmıştır. Simülasyon ve bakır boyama türüne göre ölçüm sonuçları Şekil 3.48'de verilmiştir.



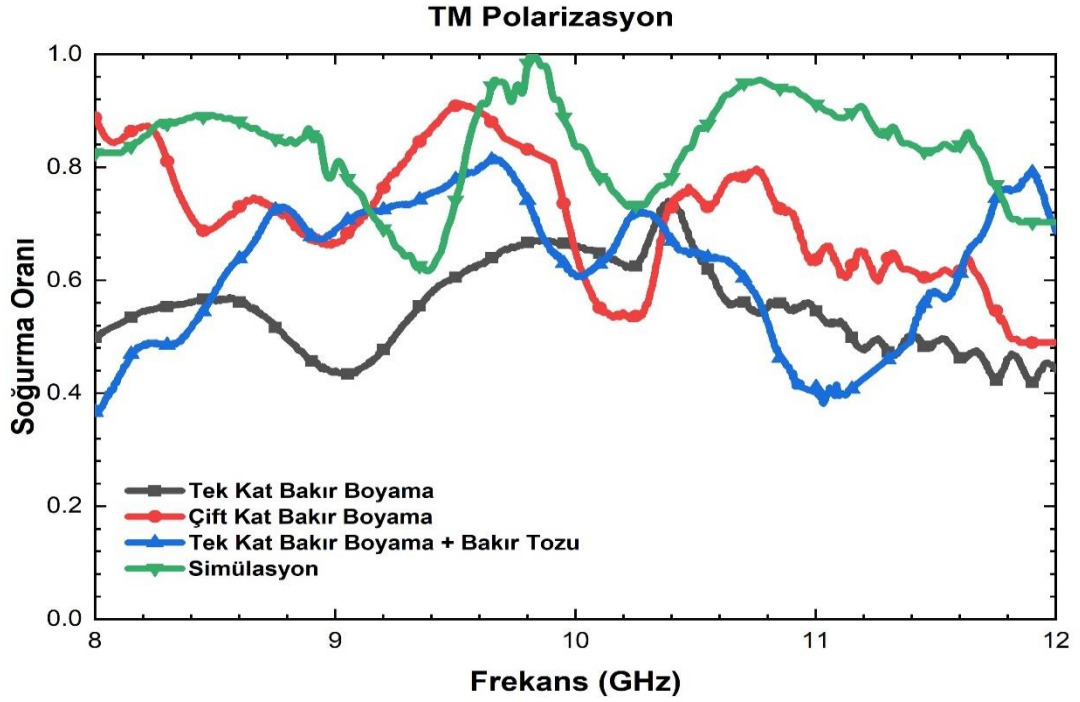
Şekil 3.48. TE polarizasyon, simülasyon ve bakır boyama türüne göre ölçüm sonuçları.

TE polarizasyonda, bakır boya ile yapılan tekstil esaslı MMA'nın ölçüm sonuçlarından oluşturulan maksimum soğurma frekansı, maksimum soğurma oranı ve X-bant ortalama soğurma oranları bilgileri Çizelge 3.11'de verilmiştir.

Çizelge 3.11. TE polarizasyon bakır boyama türüne göre soğurma sonuçları.

Süprem Atkı Örne Kumaş	Maksimum Soğurma Frekansı	Maksimum Soğurma Oranı	X-bant Ortalama Soğurma Oranı
Tek Kat Bakır Boyama	11.39 GHz	%63.77	%51.18
Çift Kat Bakır Boyama	9.77 GHz	%88.56	%60.51
Tek Kat Bakır Boyama + Bakır Tozu	9.80 GHz	%84.89	%55.60
Simülasyon	9.61 GHz	%98.25	%76.95

TM polarizasyon dalga kılavuzu ölçüm sisteminde 8-12 GHz frekans aralığında ölçümler yapılmıştır. Simülasyon ve bakır boyama türüne göre ölçüm sonuçları Şekil 3.49'da verilmiştir.



Şekil 3.49. TM polarizasyon, simülasyon ve bakır boyama türüne göre ölçüm sonuçları.

TM polarizasyonda, bakır boya ile yapılan tekstil esaslı MMA'nın ölçüm sonuçlarından oluşturulan maksimum soğurma frekansı, maksimum soğurma oranı ve X-bant ortalama soğurma oranları bilgileri Çizelge 3.12'de verilmiştir.

Çizelge 3.12. TM polarizasyon bakır boyama türüne göre soğurma sonuçları.

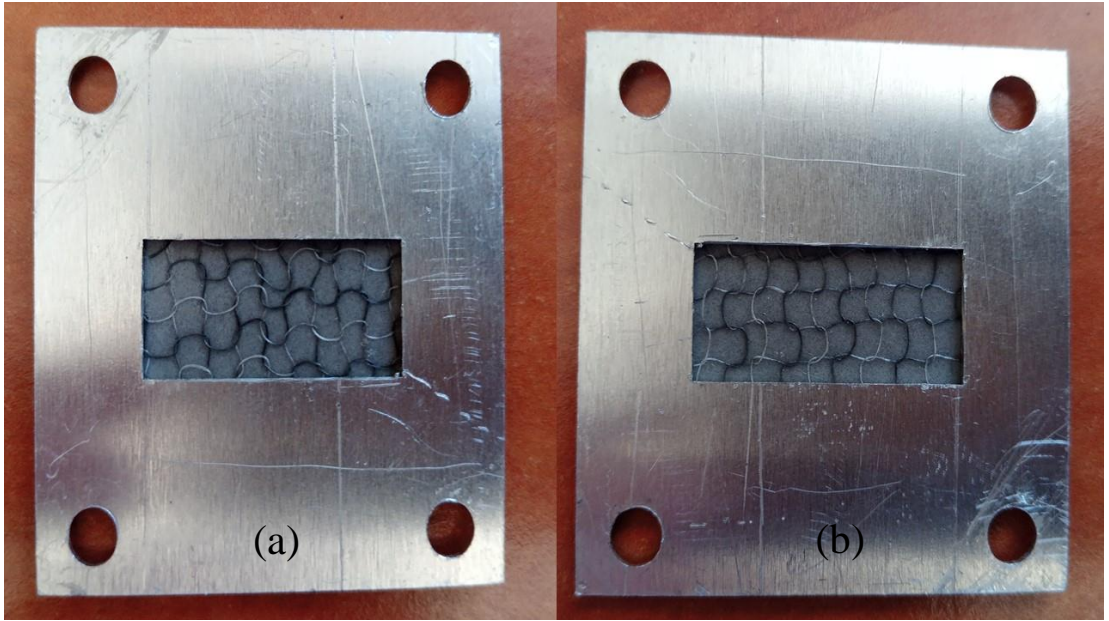
Süprem Atkı Örme Kumaş	Maksimum Soğurma Frekansı	Maksimum Soğurma Oranı	X-bant Ortalama Soğurma Oranı
Tek Kat Bakır Boyama	10.38 GHz	%74.04	%55.03
Çift Kat Bakır Boyama	9.52 GHz	%91.25	%70.87
Tek Kat Bakır Boyama + Bakır Tozu	9.66 GHz	%81.76	%62.37
Simülasyon	9.81 GHz	%99.53	%83.35

Bakır boya ile yapılan tekstil esaslı MMA'nın ölçüm sonuçları birbirleri arasında ve simülasyon sonucuna göre analiz edilmiştir. Tek kat bakır boya ile elde edilen Süprem atkı örme kumaş esaslı MMA'nın simülasyon sonuçlarına yakın olmamasının bakır oranının az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çift kat boyama ile yapılan

Süprem atkı örme kumaş esaslı MMA'nın simülasyon sonuçlarına çok yaklaştığı maksimum soğurma frekansında biraz kayma olduğu görülmüştür. Frekansta kayma olmasının nedeni olarak elle örme yapıldığında istenilen örgü boyutundan ister istemez büyük olmasından dolayı olduğu öngörülmektedir.

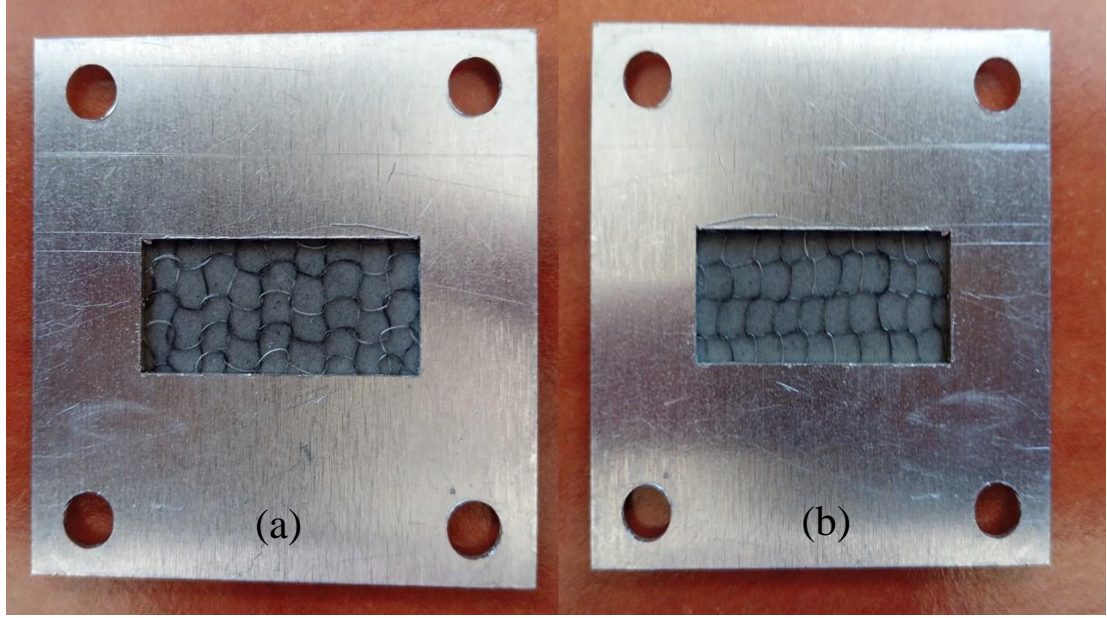
Boyama üzerine bakır tozu eklenerek elde edilen Süprem atkı örme kumaş esaslı MMA'nın daha iyi sonuç vereceği düşünülmekteydi fakat boya üzerine bakır tozların topaklanma oluşturması ve örme işlemi yapılırken iğne deliğinin topaklanmayı kaldırarak yapıda bozulma meydana getirmesinden dolayı istenilen seviyede soğurma miktarı elde edilememiştir. Diğer iletken boyalar ile hazırlanan Süprem atkı örme kumaş esaslı MMA yapılarıyla kıyaslama yaparken çift kat boyama ile hazırlanan MMA esas alınmıştır.

İletkenlik değerleri birbirine yakın, piyasada bulunan iletken karbon, grafit ve gümüş boya ile hazırlanan Süprem atkı örme kumaş esaslı MMA numuneleri hazırlanmıştır. İletken malzemenin değişmesinin soğurma oranına ve üretim maliyetine etkisi araştırılmıştır. Karbon boya ile hazırlanan Süprem atkı örme kumaş tekstil esaslı MMA Şekil 3.50'de gösterilmiştir.



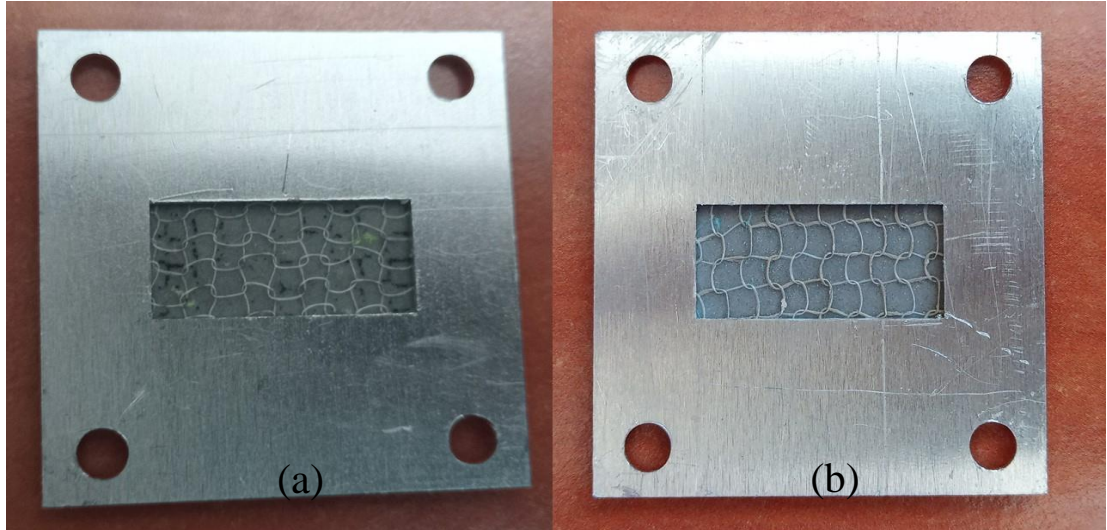
Şekil 3.50. Karbon boya MMA'nın önden görünüm, TE polarizasyon (a) ve TM polarizasyon (b).

Grafit boya ile hazırlanan Süprem atkı örme kumaş tekstil esaslı MMA Şekil 3.51’de gösterilmiştir.



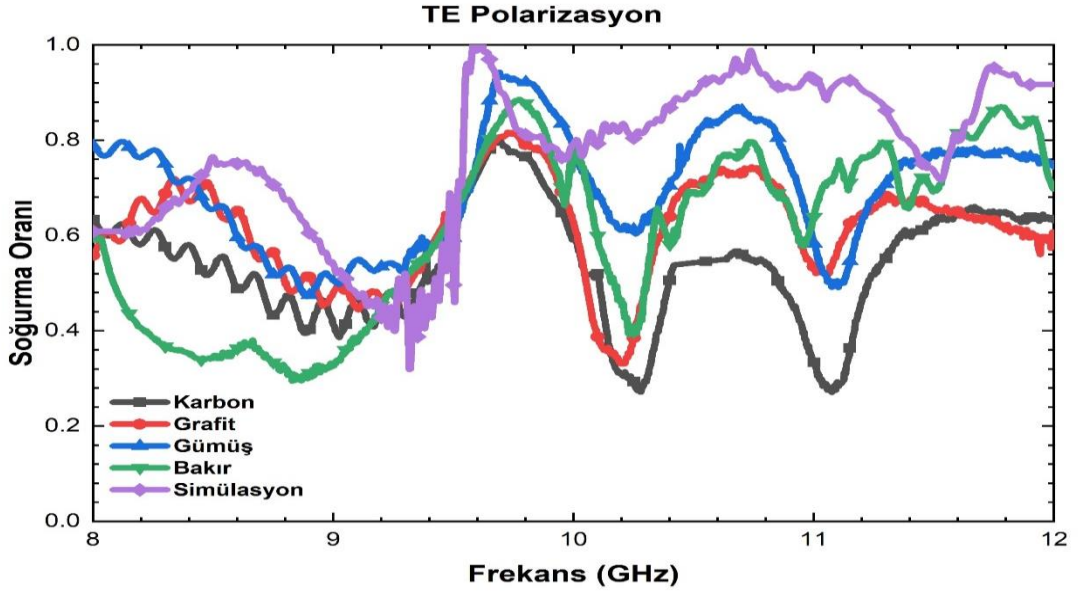
Şekil 3.51. Grafit boya MMA’nın önden görünüm, TE polarizasyon (a) ve TM polarizasyon (b).

Gümüş boya ile hazırlanan Süprem atkı örme kumaş tekstil esaslı MMA Şekil 3.52’de gösterilmiştir.



Şekil 3.52. Gümüş boya MMA’nın önden görünüm, TE polarizasyon (a) ve TM polarizasyon (b).

TE polarizasyon dalga kılavuzu ölçüm sisteminde 8-12 GHz frekans aralığında ölçümler yapılmıştır. Karbon, grafit, gümüş, bakır boya (çift kat boyama) ile hazırlanan Süprem atkı örme kumaş tekstil esaslı MMA ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçları Şekil 3.53'te verilmiştir.



Şekil 3.53. TE polarizasyonda karbon, grafit, gümüş, bakır ve simülasyon ölçüm sonuçları.

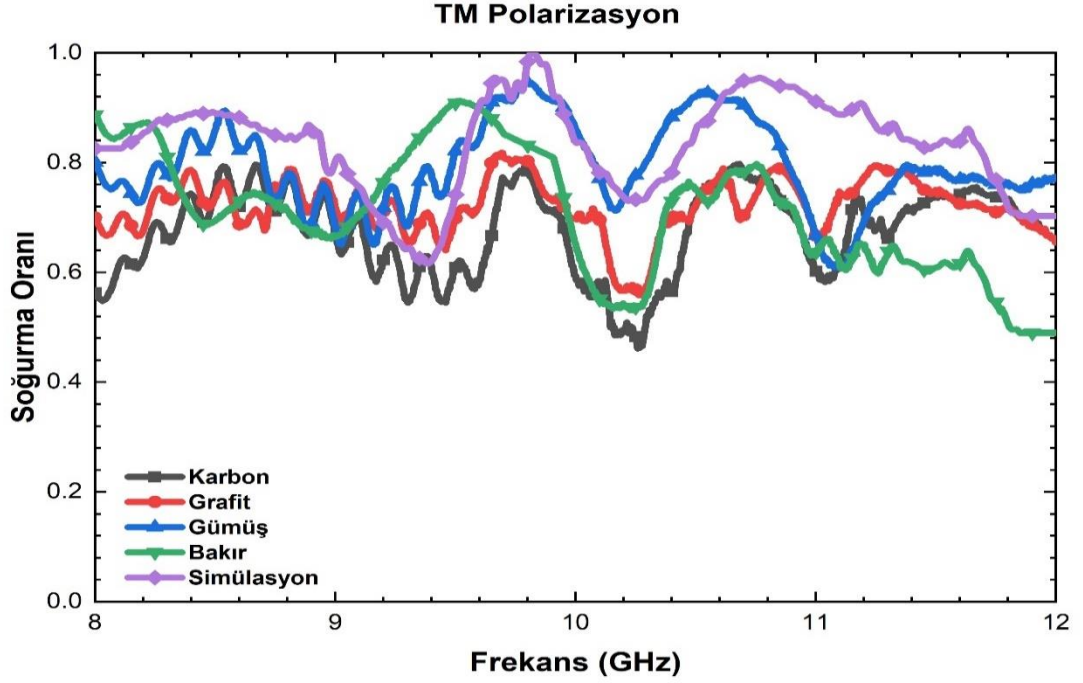
TE polarizasyonda, karbon, grafit, gümüş, bakır boya ile hazırlanan Süprem atkı örme kumaş tekstil esaslı MMA ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçlarından oluşturulan maksimum soğurma frekansı, maksimum soğurma oranı ve X-bant ortalama soğurma oranları bilgileri Çizelge 3.13'te verilmiştir.

Çizelge 3.13. İletkenlerin TE polarizasyondaki soğurma sonuçları.

Süprem Atkı Örme Kumaş	Maksimum Soğurma Frekansı	Maksimum Soğurma Oranı	X-bant Ortalama Soğurma Oranı
Karbon	9.67 GHz	%79.96	%53.78
Grafit	9.73 GHz	%81.65	%61.52
Gümüş	9.69 GHz	%94.25	%69.90
Bakır	9.78 GHz	%88.56	%60.51
Simülasyon	9.61 GHz	%98.25	%76.95

TM polarizasyon dalga kılavuzu ölçüm sisteminde 8-12 GHz frekans aralığında ölçümler yapılmıştır. Karbon, grafit, gümüş, bakır boya ile hazırlanan Süprem atkı

örme kumaş esaslı MMA ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçları Şekil 3.54'te verilmiştir.



Şekil 3.54. TM polarizasyonda karbon, grafit, gümüş, bakır ve simülasyon ölçüm sonuçları.

TM polarizasyonda, karbon, grafit, gümüş, bakır boya ile hazırlanan Süprem atkı örme kumaş esaslı MMA ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçlarından oluşturulan maksimum soğurma frekansı, maksimum soğurma oranı ve X-bant ortalama soğurma oranları bilgileri Çizelge 3.14'te verilmiştir.

Çizelge 3.14. İletkenlerin TM polarizasyondaki soğurma sonuçları.

Süprem Atkı Örme Kumaş	Maksimum Soğurma Frekansı	Maksimum Soğurma Oranı	X-bant Ortalama Soğurma Oranı
Karbon	10.68 GHz	%79.73	%67.42
Grafit	9.69 GHz	%81.83	%72.03
Gümüş	9.80 GHz	%94.55	%79.24
Bakır	9.52 GHz	%91.25	%70.87
Simülasyon	9.81 GHz	%99.53	%83.35

Karbon, grafit, gümüş, bakır boya ile hazırlanan Süprem atkı örme kumaş esaslı MMA'nın ölçüm sonuçları birbirleri arasında ve simülasyon sonucuna göre analiz

edilmiştir. Karbon ve grafit boya ile elde edilen Süprem atkı örme kumaş esaslı MMA'nın simülasyon sonuçlarına yakın olmamasının boya içerisindeki iletken miktarın az olduğu ve dolayısı ile soğurma miktarını düşürdüğü düşünülmektedir. Gümüş boya ile yapılan Süprem atkı örme kumaş esaslı MMA'nın simülasyon sonuçlarına en çok yaklaşan üretilmiş MMA olmuştur. Simülasyon ile elde edilen maksimum soğurma frekansında çok az kayma olduğu görülmüştür. Frekansta kayma olmasının nedeni olarak elle örme yapılmasından dolayı olduğu öngörülmektedir.

Maliyet hesabı olarak ise pahalıdan ucuza sıralandığında gümüş, karbon, grafit ve en son bakır boya gelmektedir. Uygulancak olan projeye göre tercih yapılabilir.



## BÖLÜM 4

### SONUÇLAR

Tamamlanan bu tez çalışmasında, dokuma ve örme kumaş yapıları kullanılarak tekstil esaslı, mikrodalga frekanslarında geniş bantlı soğurma sağlayan, esnek, giyilebilen, yıkanabilen, düşük maliyetli, üretilebilen, polarizasyon bağımsız ve geliş açısı bağımsız farklı konfigürasyonlarda tekstil esaslı metamateryal soğurucu tasarımı ve X-bant uygulamaları yapılmıştır. Tekstil esaslı MMA yapısı 3 katmandan oluşmaktadır ve periyodik rezonatör şekillerin bulunduğu katman için Süprem atkı örme kumaş, dielektrik katman için 3M VHB 4611 çift taraflı bant malzemesi ve iletken katman için de Bezayağı dokuma kumaş kullanılmıştır.

Kumaş yapıları AutoCAD 2018 öğrenci versiyonu programı kullanılarak çizimleri tamamlanmış ve MMA tasarımları yapılmak için CST programına aktarılmıştır. CST programında dalga kılavuzu ölçüm sistemi tanımlanması yapılmış ve X-bandında (8-12 GHz aralığında) simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Birçok parametre değiştirilerek simülasyonlar tekrarlanmış ve en uygun boyutlar belirlenerek tasarım belirlenmiştir.

En uygun tasarım belirlendikten sonra üretim aşamasına geçilmiş ve imalat kolaylığı, uygulanabilirlik, düşük ağırlık, uygun maliyet vb. durumlar için tasarlanan tekstil esaslı MMA'da gerekli değişiklikler yapılarak 6 adet tekstil esaslı MMA numunesi yapılmıştır. Dalga kılavuzu ölçüm sistemi kalibrasyon işlemi uygulanarak tekstil esaslı MMA numunelerin 8-12 GHz frekans aralığında ölçümleri yapılmış ve simülasyon ölçümleriyle sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur. Buna göre;

1. Simülasyon ortamında 4 farklı bezayağı dokuma kumaş yapısı tasarımı yapılmış olup atkı ve çözgü iptiklerinin iletken olarak tanımlanmasının soğurma oranını arttırdığı görülmüştür.
2. Dielektrik katmanda bulunan malzeme yerine farklı dielektrik sabitli malzeme kullanıldığında soğurmaya etkisi araştırmak için simülasyon çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada birbirine yakın üç dielektrik sabiti (11.9-silikon, 11.0 ve 10.0) malzeme tanımlaması yapılarak soğurma oranına etkileri incelenmiştir. Dielektrik sabitinin artmasıyla maksimum soğurma elde edilen rezonans frekansın daha düşük frekansta görüldüğü ve dielektrik sabitinin azalmasıyla da rezonans frekansın daha yüksek frekansta ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.
3. Simülasyon ortamında dielektrik malzeme kalınlığının maksimum soğurma elde edilen frekansa etkisi incelenmiştir. Kalınlığın artmasıyla maksimum soğurma elde edilen frekansın daha düşük frekansta görüldüğü ve kalınlığın azalmasıyla da rezonans frekansın daha yüksek frekansta görüldüğü gözlemlenmiştir.
4. Simülasyon ortamında Süprem atkı örme kumaş geometrisi kullanılarak periyodik rezonatör şekiller elde edilmiştir. Süprem atkı örme kumaş yapısında temel 4 farklı tasarım (tek sıra Ohm şekilli, her sıra Ohm şekilli, S şekilli, Z şekilli) yapılmış olup her sıraya periyodik rezonatör yapının eklenmesinin soğurma oranını arttırdığı görülmüştür. Sonraki tasarım çalışmalarında her sırada periyodik rezonatör yapısı kullanılmıştır.
5. Ohm şekilli tasarım simülasyon sonuçları incelendiğinde 8-12 GHz frekans aralığında maksimum soğurma frekansının dielektrik katman kalınlığı arttıkça daha düşük frekansta görüldüğü ve ortalama soğurma oranı değerinin arttığı görülmüştür. Maksimum soğurma oranı ise 1.6 mm kalınlıkta %99.66 olarak ve ortalama soğurma oranı %81.12 olarak elde edilmiştir.

6. S şekilli simülasyon sonuçları incelendiğinde 8-12 GHz frekans aralığında maksimum soğurma frekansının dielektrik katman kalınlığı arttıkça daha düşük frekansta olduğu görülmüştür. Maksimum soğurma oranı ise 1.2 mm kalınlıkta %98.86 ve ortalama soğurma oranı %67.39 olarak elde edilmiştir. Periyodik rezonatör yapısının daha küçük boyutlu olması maksimum soğurma oranının daha yüksek frekansta görülmesine neden olmuştur.
7. Z şekilli simülasyon sonuçları incelendiğinde 8-12 GHz frekans aralığında maksimum soğurma frekansının kalınlık arttıkça daha düşük frekansta olduğu görülmektedir. Maksimum soğurma oranı ise 1.6 mm kalınlıkta %90.72 ve %66.84 ortalama soğurma oranı elde edilmiştir. Periyodik rezonatör yapısının daha büyük olması birim alana düşen iletken oranının azalmasına ve ortalama soğurma oranının diğer ölçümlerden daha az olmasına neden olmuştur.
8. Yapılan tasarımlar arasında kıyaslama yapılmıştır. Buna göre: Ohm şekilli tasarım ve 1.6 mm silikon kalınlığındaki simülasyon sonuçları incelendiğinde 9.38 GHz frekansında %99.66 maksimum soğurma oranı ve %81.12 ortalama soğurma oranı elde edilmiştir. Maksimum soğurma oranını bu tasarımda elde edilmesi ve maksimum soğurma elde edilen frekansın yaklaşık olarak X-bandın ortalarına denk gelmesinden dolayı bu tasarım yapılmasına karar verilmiştir. Silikon malzemesinin kalınlığının soğurma oranları araştırılmış ve maksimum soğurma oranı 1.6 mm kalınlığında olmasından dolayı kalınlık değeri seçilmiştir.
9. Seçilen MMA tasarımının polarizasyon ve geliş açısı etkisini araştırmak için simülasyonlar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda polarizasyon ve geliş açısı bağımsız olarak kabul edilecek seviyede değişim gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca tasarlanan metamateryal soğurucuda hiç bakır kullanılmadan simülasyon yapılmış ve bakır ile elde edilen sonuçlara göre kıyaslaması yapılmıştır.
10. Periyodik iletken Ohm şeklin boyunun değişiminin rezonans frekansına etkisi incelenmiştir. Şeklin boyunun değişmesiyle elektriksel uzunluk değişmekte ve

maksimum soğurma elde edilen rezonans frekansında kayma olduğu gözlemlenmiştir. Bu sayede, maksimum soğurma oranları ve X-bant ortalama soğurma oranları sabit kalacak şekilde maksimum soğurma frekansında kaydırma yapılarak istenilen uygulamaya uyarlanabilecektir.

11. MMA yapının esnediği ve geliş açışı ile geldiği durumlarda soğurmaya etkisini araştırmak üzere TE polarizasyon ve +20° geliş açısındaki simülasyonlar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, esnek yapının maksimum soğurma oranında ve X-bant ortalama soğurma oranında kayda değer bir değişiklik oluşturmadığı gözlemlenmiştir. MMA yapısı ölçeklendirildiğinde periyodik rezonatör yapının büyümesi veya küçülmesinin maksimum rezonans frekans yerini değiştirdiği görülmüştür.
12. Üç katmandan oluşan MMA yapının üretim kolaylığı, uygulanabilirlik, ağırlık, maliyet ve vb. durumlar için üretim yöntemleri araştırılmıştır. Süprem atkı örme kumaş yapısı temel alınarak iletken periyodik rezonatör yapılarını oluşturmak için boyama yöntemi seçilmiştir. İletken boya olarak bakır, karbon, grafit ve gümüş boya kullanılmıştır.
13. Dielektrik katman için kullanılacak olan 3M VHB 4611 bandın kalınlığının 1.1 mm olmasından dolayı dielektrik katman kalınlığı 1.6 mm'den 1.1 mm'ye düşürülmüştür. Ayrıca 3M VHB 4611 bandın dielektrik sabitinin silikon malzemesinin dielektrik sabitinden farklı olmasından dolayı 3M VHB 4611 bandın dielektrik sabiti hesaplanmıştır.
14. Bezayağı dokuma kumaş ipliği ile 50 µm kalınlığındaki bakır tel ile birlikte örme işlemi yapılarak iletken katman tamamlanmıştır.
15. Tasarlanan tekstil esaslı MMA ile üretilen MMA arasında meydana gelen farklılıklar doğrultusunda yeni simülasyonlar yapılmıştır. Seçilen tekstil esaslı MMA tasarım simülasyon sonuçları ile yenilenen simülasyon sonuçları arasında farklılıklar meydana gelmiştir. Güncellenen MMA yapısının TM polarizasyon sonuçları incelendiğinde seçilen maksimum soğurma frekansının

9.38 GHz frekansından 9.81 GHz frekansına, %99.66 maksimum soğurma oranı %99.53 oranına ve %81 ortalama soğurma oranı da %83.35 şeklinde iyileşmiştir. TE polarizasyon sonuçları incelendiğinde seçilen maksimum soğurma frekansının 9.48 GHz frekansından 9.61 GHz frekansına, %96.65 maksimum soğurma oranı %99.25 oranına ve %81.88 ortalama soğurma oranı da %76.95 şeklinde değişmiştir.

16. Bakır sprej boya ile üç adet Süprem atkı örme kumaş tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımlar, tek kat boyama, çift kat boyama ve tek kat boyama üzerine bakır tozu eklemesi yapılarak elde edilmişlerdir. Elde edilen tekstil esaslı MMA'nın ölçüm sonuçları birbirleri arasında ve simülasyon sonuçlarına göre analiz edilmiştir. Bakır sprej boya ile yapılan Süprem atkı örme kumaş esaslı MMA'ların simülasyon sonuçlarına uyumlu grafik sergilediği ve çift kat boya ile yapılan Süprem atkı örme kumaş esaslı MMA'nın simülasyon sonuçlarına yaklaştığı görülmüştür.

17. İletkenlik değeri bakıra yakın olup piyasada bulunan iletken karbon, grafit ve gümüş boya ile hazırlanan Süprem atkı örme kumaş esaslı MMA numuneleri hazırlanmış ve deneysel ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları birbirleri arasında ve simülasyon sonucuna göre analiz edilmiştir. Karbon, grafit ve gümüş boya ile yapılan Süprem atkı örme kumaş esaslı MMA'ların simülasyon sonuçlarına uyumlu grafik sergilediği ve gümüş boya ile yapılan Süprem atkı örme kumaş esaslı MMA'nın, simülasyon sonuçlarına en çok yaklaştığı görülmüştür.

18. Üretilen tekstil esaslı MMA'ların birim üretim maliyet hesabı olarak pahalıdan ucuza sıralandığında gümüş, karbon, grafit ve en son bakır boya gelmektedir.

19. Tasarlanan ve üretilen tekstil esaslı MMA yapısındaki iletkenin türü, dielektrik malzeme ve kalınlık değeri, periyodik rezonatör şekli ve boyut değişimleri yapılarak istenilen projeye uygulanabileceğini düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Emerson, W., 'Electromagnetic wave absorbers and anechoic chambers through the years', *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 21 (4): 484–490 (1973).
2. Machinerieen, Naamlouze, V., *French Patent* 802 728/Feb. 19, (1936).
3. MacFarlane, G. G., 'Radar camouflage research and development by the Germans', *Unpublished Notes*, (1945).
4. Schade, H. A., 'Schornsteinfeger', *US Tech. Mission To Europe, Tech. Rep*, 90: 45 (1945).
5. Halpern, O., 'Method of reducing reflection of incident electromagnetic waves', *U.S. Patent* 3,007,160. 31 Oct., 5–7, (1961).
6. Montgomery, C. G., Dicke, R. H., and Purcell, E. M., 'Principles of Microwave Circuits', *Iet*, (1987).
7. Salisbury, W. W., 'Absorbent body for electromagnetic waves', *U.S. Patent and Trademark Office.*, Washington, DC: U.S., (1952).
8. Demotte, F. E., 'Electromagnetic radiation absorbing means', *US Patent, Application*, 769: 710, Aug. 20, (1947).
9. Tiley, J. W., 'Broadband microwave energy absorptive structure', *U.S. Patent*, 2,464,006. 8 Mar., (1949).
10. Mcmillan, E. B., 'Microwave radiation absorbers', *U.S. Patent*, 2,822,539. 4 Feb., (1958).
11. Tanner, H. A., 'Fibrous microwave absorber', *U.S. Patent*, 2,977,591. 28 Mar., (1961).
12. Simmons , Alan, J. and Emerson, William, H., 'An Anechoic Chamber Making Use of a New Broadband Absorbing Material (NRL Report 4193)', *1958 IRE International Convention Record. Vol. 1. IEEE*, (1966).
13. Otto, H., Johnson, J. M. H., and Wright, R. W., 'Isotropic absorbing layers', *U.S. Patent*, 2,951,247. 30 Aug., (1960).
14. Emerson, W. H., 'Development of Broadband Absorbing Materials for Frequencies as low as 500MC', *Naval Research Laboratory Memorandum Report, 1954*, (1954).
15. Munk, B. A., 'Frequency Selective Surfaces Theory and Design', *A Wiley-*

*Interscience Publication*, 237 (2003).

16. Watts, C. M., Liu, X., and Padilla, W. J., 'Metamaterial electromagnetic wave absorbers', *Advanced Materials*, 24 (23): (2012).
17. Knott, E. F., Schaeffer, J. F., and Tulley, M. T., 'Radar Cross Section', *SciTech Publishing*, (2004).
18. Nakhkash, Y. H. and M., 'Characterisation of layered dielectric medium using reflection coefficient', *Electronics Letters*, 34 (12): 1207–1208 (1998).
19. Tretyakov, S. A. and Maslovski, S. I., 'Thin absorbing structure for all incidence angles based on the use of a high-impedance surface', *Microwave And Optical Technology Letters*, 38 (3): 175–178 (2003).
20. Munk, B. A., Munk, P., and Pryor, J., 'On designing Jaumann and circuit analog absorbers (CA absorbers) for oblique angle of incidence', *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 55 (1): 186–193 (2007).
21. Tang, W. and Shen, Z., 'Simple design of thin and wideband circuit analogue absorber', *Electronics Letters*, 43 (12): 689–691 (2007).
22. Costa, F. and Monorchio, A., 'Absorbing Properties', *Ieee Transactions On Antennas And Propagation*, 60 (6): 2740–2747 (2012).
23. Costa, F., Luukkonen, O., Simovski, C. R., Monorchio, A., Tretyakov, S. A., and De Maagt, P. M., 'TE surface wave resonances on high-impedance surface based antennas: Analysis and modeling', *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 59 (10): 3588–3596 (2011).
24. Jackson, D. R., Burghignoli, P., Lovat, G., Capolino, F., Chen, J., Wilton, D. R., and Oliner, A. A., 'The fundamental physics of directive beaming at microwave and optical frequencies and the role of leaky waves', *Proceedings Of The IEEE*, 99 (10): 1780–1805 (2011).
25. Costa, F., Monorchio, A., Amabile, C., and Prati, E., 'Dielectric permittivity measurement technique based on waveguide FSS filters', *European Microwave Week 2011: 'Wave To The Future', EuMW 2011, Conference Proceedings - 41st European Microwave Conference, EuMC 2011*, 21 (5): 945–948 (2011).
26. Costa, F., Monorchio, A., and Manara, G., 'An overview of equivalent circuit modeling techniques of frequency selective surfaces and metasurfaces', *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 29 (12): 960–976 (2014).
27. Smith, D. R., Padilla, W. J., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S. C., and Schultz, S., 'Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity', *Physical Review Letters*, 84 (18): 4184 (2000).
28. Zheludev, N. I., 'Obtaining optical properties on demand', *Science*, 348 (6238): 973–974 (2015).

29. Zheludev, N. I., 'The road ahead for metamaterials', *Science*, 328 (5978): 582–583 (2010).
30. Lindell, I. V, Sihvola, A. H., and Kurkijarvi, J., 'Karl F. Lindman: The last Hertzian, and a harbinger of electromagnetic chirality', *IEEE Antennas And Propagation Magazine*, 34 (3): 24–30 (1992).
31. Tinoco Jr, I. and Freeman, M. P., 'The optical activity of oriented copper helices. I. Experimental', *The Journal Of Physical Chemistry*, 61 (9): 1196–1200 (1957).
32. Harvey, A. F., 'Optical techniques at microwave frequencies', *Proceedings Of The IEE-Part B: Radio And Electronic Engineering*, 106 (26): 141–157 (1959).
33. Bose, J. C., 'On the rotation of plane of polarisation of electric waves by a twisted structure', *Proceedings Of The Royal Society Of London*, 63 (389–400): 146–152 (1898).
34. Veselago, V. G., 'The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ', *Soviet Physics Uspekhi*, 10 (4): 509 (1968).
35. Schuster, A., 'An Introduction to the Theory of Optics', *E. Arnold*, (1904).
36. Pocklington, H. C., 'Growth of a wave-group when the group velocity is negative', *Nature*, 71 (1852): 607–608 (1905).
37. Mandel'shtam, L. I., 'Group velocity in a crystal lattice', *Zh. Eksp. Teor. Fiz*, 15 (475): 18 (1945).
38. Malyuzhinets, G. D., 'A note on the radiation principle', *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, 21: 940–942 (1951).
39. Sivukhin, D. V, 'The energy of electromagnetic waves in dispersive media', *Optika I Spektroskopiya*, 3: 308–312 (1957).
40. Pafomov, V. E., 'Transition radiation and Cerenkov radiation', *Soviet. Phys. JETP*, 9: 1321 (1959).
41. Silin, R. A., 'Waveguiding properties of two-dimensional periodical slow-wave systems', *Voprosy Radioelektroniki, Elektronika*, 4: 11–33 (1959).
42. Silin, R. A., 'Optical properties of artificial dielectrics', *Radiophysics And Quantum Electronics*, 15 (6): 615–624 (1972).
43. Hardy, W. N. and Whitehead, L. A., 'Split-ring resonator for use in magnetic resonance from 200–2000 MHz', *Review Of Scientific Instruments*, 52 (2): 213–216 (1981).
44. Zengerle, R., 'Light propagation in singly and doubly periodic planar waveguides', *Journal Of Modern Optics*, 34 (12): 1589–1617 (1987).



45. Kostin, M. V and Shevchenko, V. V, 'Artificial magnetics based on double circular elements', *Proc. Bianisotropics*, pp. 49-56. (1994).
46. Tretyakov, S. A., Mariotte, F., Simovski, C. R., Kharina, T. G., and Heliot, J.-P., 'Analytical antenna model for chiral scatterers: Comparison with numerical and experimental data', *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 44 (7): 1006–1014 (1996).
47. Pendry, J. B., Holden, A. J., Stewart, W. J., and Youngs, I., 'Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures', *Physical Review Letters*, 76 (25): 4773 (1996).
48. Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., and Stewart, W. J., 'Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena', *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, 47 (11): 2075–2084 (1999).
49. Shelby, R. A., Smith, D. R., and Schultz, S., 'Experimental verification of a negative index of refraction', *Science*, 292 (5514): 77–79 (2001).
50. Engheta, N. and Ziolkowski, R. W., 'Metamaterials: Physics and Engineering Explorations', *John Wiley & Sons*, (2006).
51. Sabah, C. and Uckun, S., 'Electromagnetic wave propagation through frequency-dispersive and lossy double-negative slab', *Opto-Electronics Review*, 15 (3): 133–143 (2007).
52. Sabah, C., 'Characterization and analysis of left-handed chiral materials' *2008 12th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. IEEE*, (2008).
53. Sabah, C., 'Left-handed chiral metamaterials', *Open Physics*, 6 (4): 872–878 (2008).
54. Li, T. Q., Liu, H., Li, T., Wang, S. M., Wang, F. M., Wu, R. X., Chen, P., Zhu, S. N., and Zhang, X., 'Magnetic resonance hybridization and optical activity of microwaves in a chiral metamaterial', *Applied Physics Letters*, 92 (13): 131111 (2008).
55. Wang, B., Zhou, J., Koschny, T., and Soukoulis, C. M., 'Nonplanar chiral metamaterials with negative index', *Applied Physics Letters*, 94 (15): 151112 (2009).
56. Zhou, J., Dong, J., Wang, B., Koschny, T., Kafesaki, M., and Soukoulis, C. M., 'Negative refractive index due to chirality', *Physical Review B*, 79 (12): 121104 (2009).
57. Zhang, S., Park, Y.-S., Li, J., Lu, X., Zhang, W., and Zhang, X., 'Negative refractive index in chiral metamaterials', *Physical Review Letters*, 102 (2): 23901 (2009).
58. Majid, H. A., Abd Rahim, M. K., and Masri, T., 'Microstrip antenna's gain

- enhancement using left-handed metamaterial structure’, *Progress In Electromagnetics Research*, 8: 235–247 (2009).
59. Song, X.-H., Wu, W.-Y., Shen, T.-G., and Zhou, Y.-Q., ‘Investigation of a patch antenna based on I-shaped left-handed material’, *Optik-International Journal For Light And Electron Optics*, 122 (16): 1426–1429 (2011).
  60. Slyusar, V. I., ‘Metamaterials on Antenna Solutions’, *International Conference On Antenna Theory And Techniques*, (August): 19–24 (2009).
  61. Melik, R., Unal, E., Kosku Perkgoz, N., Puttlitz, C., and Demir, H. V., ‘Flexible metamaterials for wireless strain sensing’, *Applied Physics Letters*, 95 (18): 181105 (2009).
  62. Melik, R., Unal, E., Perkgoz, N. K., Santoni, B., Kamstock, D., Puttlitz, C., and Demir, H. V., ‘Nested metamaterials for wireless strain sensing’, *IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics*, 16 (2): 450–458 (2010).
  63. Sabah, C. and Roskos, H. G., ‘Broadside-coupled triangular split-ring-resonators for terahertz sensing’, *The European Physical Journal-Applied Physics*, 61 (3): (2013).
  64. Withayachumnankul, W., Jaruwongrunsee, K., Tuantranont, A., Fumeaux, C., and Abbott, D., ‘Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization’, *Sensors And Actuators A: Physical*, 189: 233–237 (2013).
  65. Ekmekci, E. and Turhan-Sayan, G., ‘Multi-functional metamaterial sensor based on a broad-side coupled SRR topology with a multi-layer substrate’, *Applied Physics A*, 110 (1): 189–197 (2013).
  66. Jalil, M. E., Samsuri, N. A., Rahim, M. K. A., and Dewan, R., ‘Compact Chipless RFID Metamaterial Based Structure Using Textile Material’, *2015 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). IEEE*, 5–8 (2015).
  67. Can, S. and Yilmaz, A. E., ‘Radar cross section reduction of a plate with textile-based single negative metamaterial’, *2016 10th European Conference On Antennas And Propagation, EuCAP 2016*, 1–4 (2016).
  68. Binion, D., Werner, P. L., Werner, D. H., Lier, E., and Hand, T. H., ‘Metamaterial enhanced antenna systems: A review’, *2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium In Denver, ACES-Denver 2018*, 1–2 (2018).
  69. Kazak, N. S., Agabekov, V. E., Kurilkina, S. N., and Belyi, V. N., ‘Formation and Properties of New Types of Metal–Dielectric Nanostructures for Creating Optical Metamaterials’, *Semiconductors*, 52 (16): 2099–2102 (2018).
  70. Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R., and Padilla, W. J., ‘Perfect metamaterial absorber’, *Physical Review Letters*, 100 (20): 207402 (2008).

71. Tao, H., Landy, N. I., Bingham, C. M., Zhang, X., Averitt, R. D., and Padilla, W. J., 'A metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization', *Optics Express*, 16 (10): 7181–7188 (2008).
72. Wang, B., Koschny, T., and Soukoulis, C. M., 'Wide-angle and polarization-independent chiral metamaterial absorber', *Physical Review B*, 80 (3): 33108 (2009).
73. Lee, Y.-S., 'Principles of Terahertz Science and Technology', *Springer Science & Business Media*, (2009).
74. Dong, Z.-G., Lei, S.-Y., Li, Q., Xu, M.-X., Liu, H., Li, T., Wang, F.-M., and Zhu, S.-N., 'Non-left-handed transmission and bianisotropic effect in a  $\pi$ -shaped metallic metamaterial', *Physical Review B*, 75 (7): 75117 (2007).
75. Li, Z., Mutlu, M., and Ozbay, E., 'Chiral metamaterials: from optical activity and negative refractive index to asymmetric transmission', *Journal Of Optics*, 15 (2): 23001 (2013).
76. Zhao, R., Koschny, T., and Soukoulis, C. M., 'Chiral metamaterials: retrieval of the effective parameters with and without substrate', *Optics Express*, 18 (14): 14553–14567 (2010).
77. Tütüncü, B. and Torpi, H., 'Omega-shaped metamaterial lens design for microstrip patch antenna performance optimization at 12 GHz', *2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). IEEE*, (2017).
78. Chen, H., Ran, L., Huangfu, J., Zhang, X., Chen, K., Grzegorzcyk, T. M., and Kong, J. A., 'Negative refraction of a combined double S-shaped metamaterial', *Applied Physics Letters*, 86 (15): 151909 (2005).
79. Bute, M., Hasar, U. C., and Barroso, J. J., 'Retrieval parameters of chiral metamaterials with proposed crescent shaped split ring resonators', *2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC). IEEE*, (2017).
80. Naskar, M. A., Tamrakar, M., and Thiripurasundari, D., 'Compact 'V' shaped metamaterial based resonator for wide band rejection', *2017 International Conference on Nextgen Electronic Technologies: Silicon to Software (ICNETS2). IEEE*, (2017).
81. Sabah, C., Cakmak, A. O., Ozbay, E., and Uckun, S., 'Transmission measurements of a new metamaterial sample with negative refraction index', *Physica B: Condensed Matter*, 405 (14): 2955–2958 (2010).
82. Zhao, R., Zhang, L., Zhou, J., Koschny, T., and Soukoulis, C. M., 'Conjugated gammadion chiral metamaterial with uniaxial optical activity and negative refractive index', *Physical Review B*, 83 (3): 35105 (2011).
83. Sabah, C. and Roskos, H. G., 'Terahertz sensing application by using planar

- split-ring-resonator structures’, *Microsystem Technologies*, 18 (12): 2071–2076 (2012).
84. Cheng, Y. and Yang, H., ‘Design, simulation, and measurement of metamaterial absorber’, *Journal Of Applied Physics*, 108 (3): 34906 (2010).
  85. Zhu, B., Wang, Z., Huang, C., Feng, Y., Zhao, J., and Jiang, T., ‘Polarization insensitive metamaterial absorber with wide incident angle’, *Progress In Electromagnetics Research*, 101: 231–239 (2010).
  86. Zhu, B., Feng, Y., Zhao, J., Huang, C., Wang, Z., and Jiang, T., ‘Polarization modulation by tunable electromagnetic metamaterial reflector/absorber’, *Optics Express*, 18 (22): 23196–23203 (2010).
  87. Lee, J. and Lim, S., ‘Bandwidth-enhanced and polarisation-insensitive metamaterial absorber using double resonance’, *Electronics Letters*, 47 (1): 8–9 (2011).
  88. Sun, J., Liu, L., Dong, G., and Zhou, J., ‘An extremely broad band metamaterial absorber based on destructive interference’, *Optics Express*, 19 (22): 21155–21162 (2011).
  89. Park, J. W., Van Tuong, P., Rhee, J. Y., Kim, K. W., Jang, W. H., Choi, E. H., Chen, L. Y., and Lee, Y., ‘Multi-band metamaterial absorber based on the arrangement of donut-type resonators’, *Optics Express*, 21 (8): 9691–9702 (2013).
  90. Lee, H.-M., ‘A Broadband Flexible Metamaterial Absorber Based on Double Resonance’, *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 46 (March): 73–78 (2014).
  91. He, Y., Zhang, B., He, T., Chen, T., Wang, G., Hou, Y., Xiong, W., and Shen, J., ‘Optically-controlled metamaterial absorber based on hybrid structure’, *Optics Communications*, 356: 595–598 (2015).
  92. Xin, W., Binzhen, Z., Wanjun, W., Junlin, W., and Junping, D., ‘Design, Fabrication, and Characterization of a Flexible Dual-Band Metamaterial Absorber’, *IEEE Photonics Journal*, 9 (4): (2017).
  93. Omar, A. A., Shen, Z., and Huang, H., ‘Absorptive frequency-selective reflection and transmission structures’, *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, 65 (11): 6173–6178 (2017).
  94. Lai, S., Wu, Y., Zhu, X., Gu, W., and Wu, W., ‘An Optically Transparent Ultrabroadband Microwave Absorber’, *IEEE Photonics Journal*, 9 (6): 1–10 (2017).
  95. Wakatsuchi, H., Sievenpiper, D. F., and Christopoulos, C., ‘Designing flexible and versatile metamaterial absorbers’, *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 5 (2): 76–82 (2016).

96. Ling, K., Kim, K., and Lim, S., 'Flexible liquid metal-filled metamaterial absorber on polydimethylsiloxane (PDMS)', *Optics Express*, 23 (16): 21375 (2015).
97. Yahiaoui, R., Tan, S., Cong, L., Singh, R., Yan, F., and Zhang, W., 'Multispectral terahertz sensing with highly flexible ultrathin metamaterial absorber', *Journal Of Applied Physics*, 118 (8): (2015).
98. Kim, H. K., Ling, K., Kim, K., and Lim, S., 'Flexible inkjet-printed metamaterial absorber for coating a cylindrical object', *Optics Express*, 23 (5): 5898 (2015).
99. Nasr, M., Richard, J. T., Skirlo, S. A., Heimbeck, M. S., Joannopoulos, J. D., Soljacic, M., Everitt, H. O., and Domash, L., 'Narrowband Metamaterial Absorber for Terahertz Secure Labeling', *Journal Of Infrared, Millimeter, And Terahertz Waves*, 38 (9): 1120–1129 (2017).
100. Kong, X., Xu, J., Mo, J. jun, and Liu, S., 'Broadband and conformal metamaterial absorber', *Frontiers Of Optoelectronics*, 10 (2): 124–131 (2017).
101. Yan, X., Liang, L.-J., Ding, X., and Yao, J.-Q., 'Solid analyte and aqueous solutions sensing based on a flexible terahertz dual-band metamaterial absorber', *Optical Engineering*, 56 (2): 027104 (2017).
102. Kim, J. H., Hokmabadi, M. P., Balci, S., Rivera, E., Wilbert, D., Kung, P., and Kim, S. M., 'Investigation of robust flexible conformal THz perfect metamaterial absorber', *Applied Physics A: Materials Science And Processing*, 122 (4): 1–7 (2016).
103. Michalak, M., Brazis, R., Kazakevicius, V., Bilska, J., and Krucinska, I., 'Novel approach to textile design for barriers against electromagnetic radiation', *International Journal Of Materials And Product Technology*, 36 (1/2/3/4): 166 (2010).
104. Pa, P., Mirotznik, M. S., McCauley, R., Yarlagadda, S., and Duncan, K., 'Integrating metamaterials within a structural composite using additive manufacturing methods', *IEEE Antennas And Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*, 0–1 (2012).
105. Cavalcante, G. A., D'Assunção, A. G., and D'Assunção, A. G., 'An iterative full-wave method for designing bandstop frequency selective surfaces on textile substrates', *Microwave And Optical Technology Letters*, 56 (2): 383–388 (2014).
106. Burgnies, L., Lheurette, and Lippens, D., 'Textile inspired flexible metamaterial with negative refractive index', *Journal Of Applied Physics*, 117 (14): 1–7 (2015).
107. Esen, M., Ilhan, I., Karaaslan, M., Unal, E., Dincer, F., and Sabah, C., 'Electromagnetic absorbance properties of a textile material coated using filtered arc-physical vapor deposition method', *Journal Of Industrial Textiles*,

- 45 (2): 298–309 (2015).
108. Lee, D. and Lim, S., ‘Wearable Metamaterial Absorber using Screen Printed Chanel logo’, *International Symposium On Antennas And Propagation (ISAP)*, 928–929 (2016).
  109. Can, S., Yilmaz, A. E., and Karakaya, E., ‘Conformal dual-band frequency selective surface on Textile: Design, prototyping and experiment’, *2017 USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint With AP-S Symposium), USNC-URSI 2017*, 17–18 (2017).
  110. Ghebrebrhan, M., Aranda, F., Walsh, G., Ziegler, D., Giardini, S., Carlson, J., Kimball, B., Steeves, D., Xia, Z., Yu, S., Kingsley, E., Nagarajan, R., Torcedo, J., Williams, R., and Gatesman, A., ‘Textile Frequency Selective Surface’, *IEEE Microwave And Wireless Components Letters*, 27 (11): 989–991 (2017).
  111. Tak, J. and Choi, J., ‘A Wearable Metamaterial Microwave Absorber’, *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*, 16: 784–787 (2017).
  112. Burgnies, L., Huppe, C., Ducournau, G., Cochrane, C., Rault, F., Koncar, V., and Lheurette, É., ‘High-Pass Sub-mmWave Filtering by Woven Textile Metamaterials’, *IEEE Transactions On Terahertz Science And Technology*, 8 (4): 427–433 (2018).
  113. İbili, H., Karaosmanoğlu, B., and Ergül, Ö., ‘Demonstration of negative refractive index with low-cost inkjet-printed microwave metamaterials’, *Microwave And Optical Technology Letters*, 60 (1): 187–191 (2018).
  114. Abdulla, R., Delihasanlar, E., Kizilcay Abdulla, F. G., and Yuzer, A. H., ‘Electromagnetic shielding characterization of conductive knitted fabrics’, *Progress In Electromagnetics Research M*, 56 (January): 33–41 (2017).
  115. Ramakrishna, S. A., ‘Physics of negative refractive index materials’, *Reports On Progress In Physics*, 68 (2): 449 (2005).
  116. Metamaterials, E., ‘Transmission Line Theory and Microwave Applications/C. Caloz, T. Itoh’, *Wiley, New Jersey*, (2006).
  117. Caloz, C. and Itoh, T., ‘Metamaterials for High-Frequency Electronics’, *Proceedings Of The IEEE*, 93 (10): 1744–1752 (2005).
  118. Constantine, A. B., ‘Antenna theory: analysis and design’, *MICROSTRIP ANTENNAS, Third Edition, John Wiley & Sons*, (2005).
  119. Dolling, G., Wegener, M., Linden, S., and Hormann, C., ‘Photorealistic images of objects in effective negative-index materials’, *Optics Express*, 14 (5): 1842–1849 (2006).
  120. Belevitch, V. “Summary of the History of Circuit Theory”, *Comité d’Etude des Calculateurs Electroniques*, Brussels, B., "Section 7 Circuit Theory", 848–855 (2000).

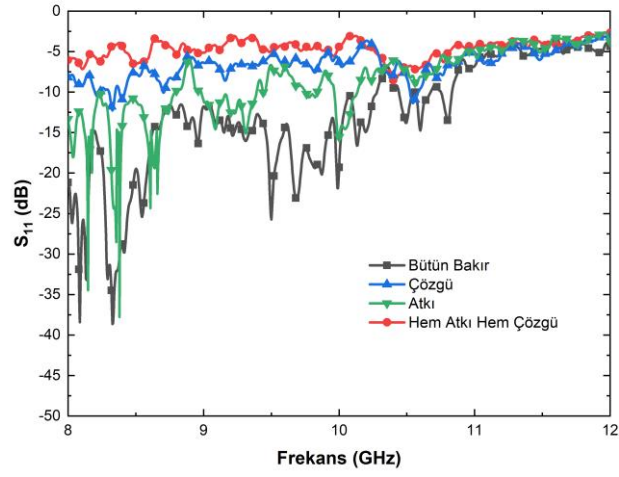
121. 'Van Valkenburg, Mac E., ed. Circuit theory: foundations and classical contributions . *Dowden, Hutchinson, and Ross*, 1974. APA (1974).
122. Pozar, D. M., 'Microwave Engineering. Hoboken, *NJ:Wiley* (2005).
123. Note, A., 'Agilent Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials *Application note*', (2014).
124. Orfanidis, S. J., 'Waves and Antennas Electromagnetic', *Rutgers University New Brunswick, NJ* (2002).
125. Delihanlar, E. and Yuzer, A. H., 'Wearable Textile Fabric Based 3D Metamaterials Absorber in X-Band', *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 35 (2): 230–236 (2020).
126. Cheng, Y., Nie, Y., and Gong, R., 'A polarization-insensitive and omnidirectional broadband terahertz metamaterial absorber based on coplanar multi-squares films', *Optics & Laser Technology*, 48: 415–421 (2013).
127. Kong, H., Li, G., Jin, Z., Ma, G., Zhang, Z., and Zhang, C., 'Polarization-independent metamaterial absorber for terahertz frequency', *Journal Of Infrared, Millimeter, And Terahertz Waves*, 33 (6): 649–656 (2012).
128. Hu, F., Wang, L., Quan, B., Xu, X., Li, Z., Wu, Z., and Pan, X., 'Design of a polarization insensitive multiband terahertz metamaterial absorber', *Journal Of Physics D: Applied Physics*, 46 (19): 195103 (2013).
129. Zhou, J., Zhang, L., Tuttle, G., Koschny, T., and Soukoulis, C. M., 'Negative index materials using simple short wire pairs', *Physical Review B*, 73 (4): 41101 (2006).
130. Davis, W. A. and Agarwal, K. K., 'Radio Frequency Circuit Design', *Wiley Online Library*, (2001).
131. Hentschel, C., 'Die Analyse von Schaltungen mit Dünnschichtspulen', *Arch Elek. Übertragung; G*, 26: 319–328 (1972).
132. Pettenpaul, E., Kapusta, H., Weisgerber, A., Mampe, H., Luginsland, J., and Wolff, I., 'CAD models of lumped elements on GaAs up to 18 GHz', *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, 36 (2): 294–304 (1988).
133. Rhee, J. Y., Yoo, Y. J., Kim, K. W., Kim, Y. J., and Lee, Y. P., 'Metamaterial-based perfect absorbers', *Journal Of Electromagnetic Waves And Applications*, 28 (13): 1541–1580 (2014).
134. Garg, R., Bahl, I., and Bozzi, M., 'Microstrip Lines and Slotlines', *Artech House*, (2013).
135. Garg, R. and Bahl, I. J., 'Characteristics of coupled microstriplines', *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, 27 (7): 700–705 (1979).
136. Çeken, F., 'Örmecilik Esasları', *DEÜ*, (2008).
137. Başer, G., 'Dokuma Tekniği ve Sanatı: Cilt 1: Temel Dokuma Tekniği ve

- Kumaş Yapıları', *Punto Yayıncılık*, (2004).
138. Peirce, F. T., 'Geometrical principles applicable to the design of functional fabrics', *Textile Research Journal*, 17 (3): 123–147 (1947).
  139. Yaw, K. C., 'Measurement of dielectric material properties Application Note, *Rohde & Schwarz*', *Measurement Techniques*, 1–35 (2006).
  140. Stumper, U., 'Uncertainty of VNA S-parameter measurement due to non-ideal TMSO or LMSO calibration standards', *Advances In Radio Science*, 1 (2): 1–8 (2003).
  141. Delihasanlar, E., 'Kaktüs Bitkisinin 2G, 3G, 4.5G ve WI-FI Frekanslarındaki Dielektrik Geçirgenliğinin Hesaplanması ve Modellenmesi', Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük (2016).

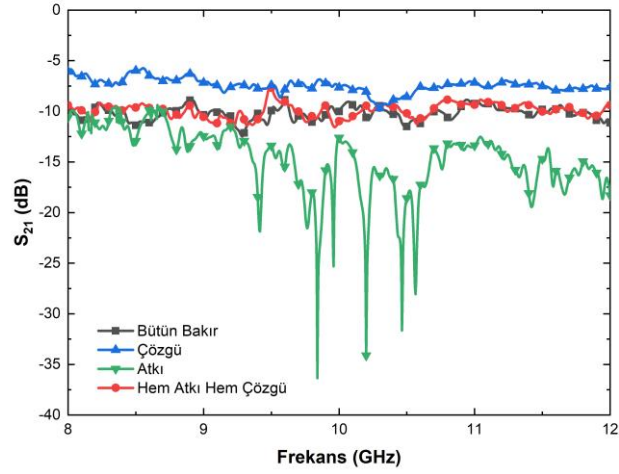


## **EK AÇIKLAMALAR**

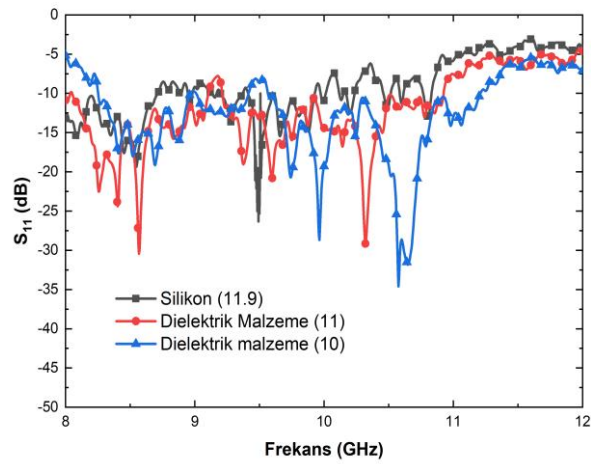
### **S-PARAMETRE SONUÇLARI**



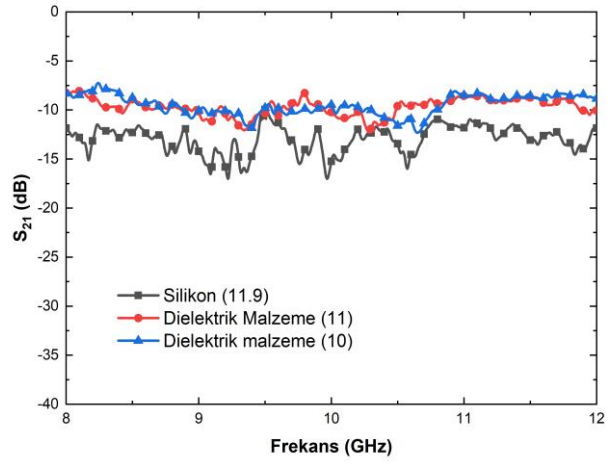
Şekil Ek 1. Bezayağı dokuma kumaş tasarım şekillerinin  $S_{11}$  sonuçları.



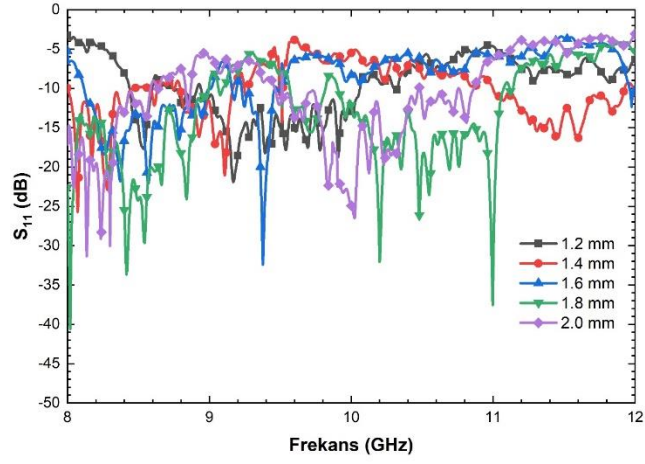
Şekil Ek 2. Bezayağı dokuma kumaş tasarım şekillerinin  $S_{21}$  sonuçları.



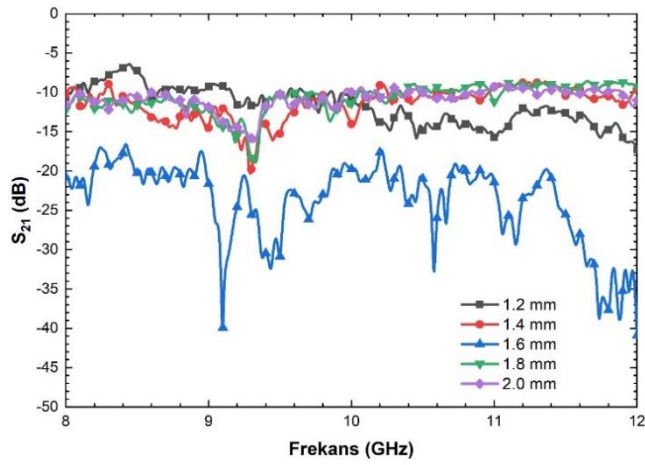
Şekil Ek 3. Tek sıra Ohm ( $\Omega$ ) tasarımı  $S_{11}$  sonuçları.



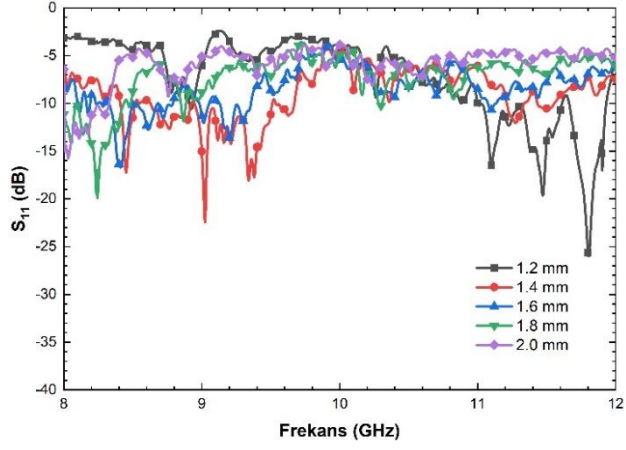
Şekil Ek 4. Tek sıra Ohm ( $\Omega$ ) tasarımı  $S_{21}$  sonuçları.



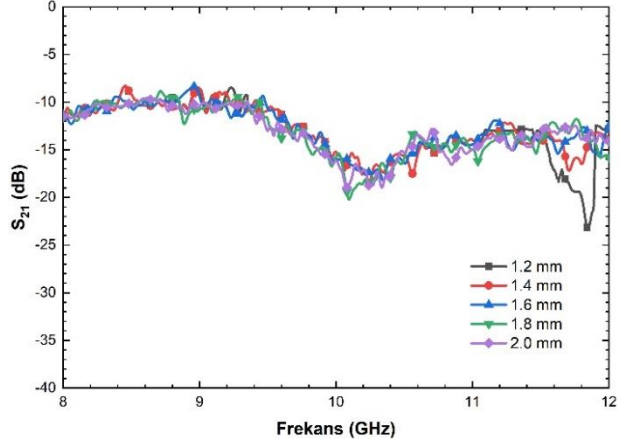
Şekil Ek 5. Her sıra Ohm ( $\Omega$ ) tasarımı  $S_{11}$  sonuçları.



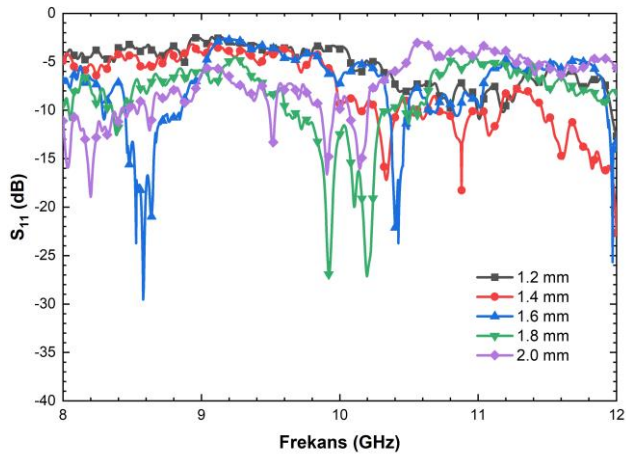
Şekil Ek 6. Her sıra Ohm ( $\Omega$ ) tasarımı  $S_{21}$  sonuçları.



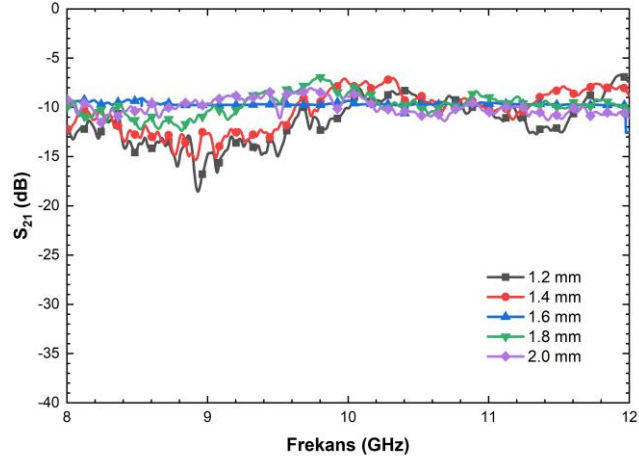
Şekil Ek 7. S şekilli tasarım  $S_{11}$  sonuçları.



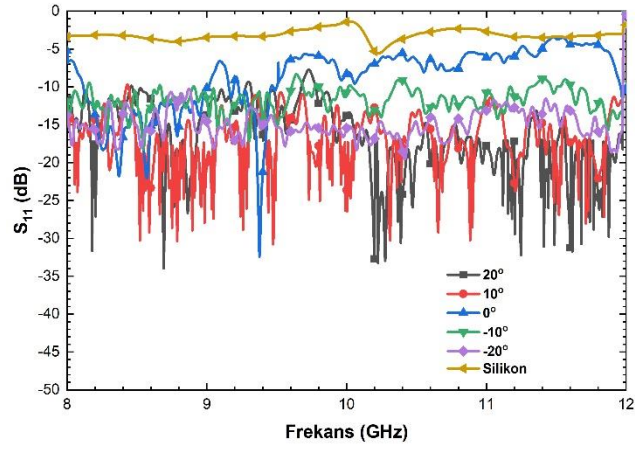
Şekil Ek 8. S şekilli tasarım  $S_{21}$  sonuçları.



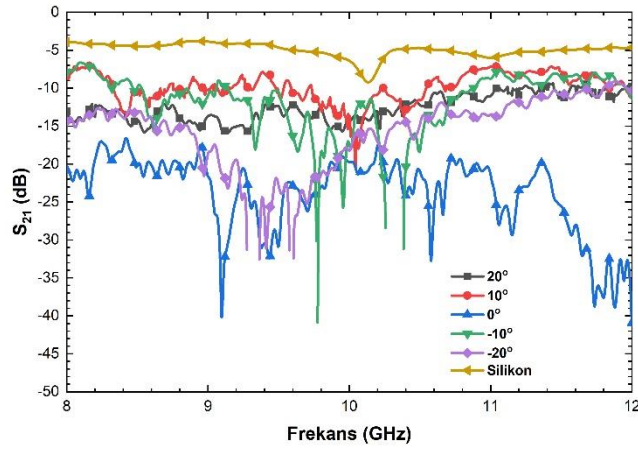
Şekil Ek 9. Z şekilli tasarım  $S_{11}$  sonuçları.



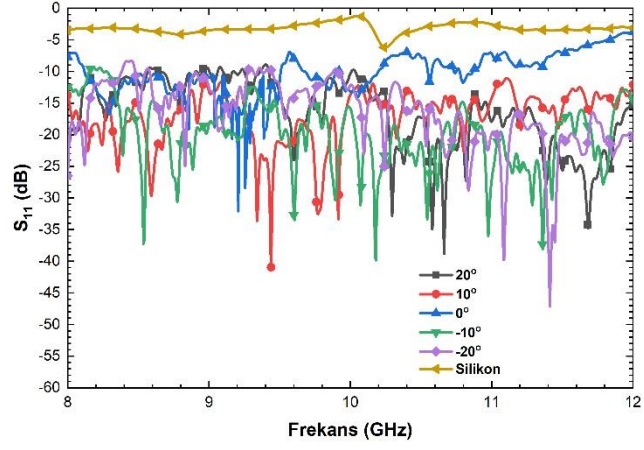
Şekil Ek 10. Z şekilli tasarım  $S_{21}$  sonuçları.



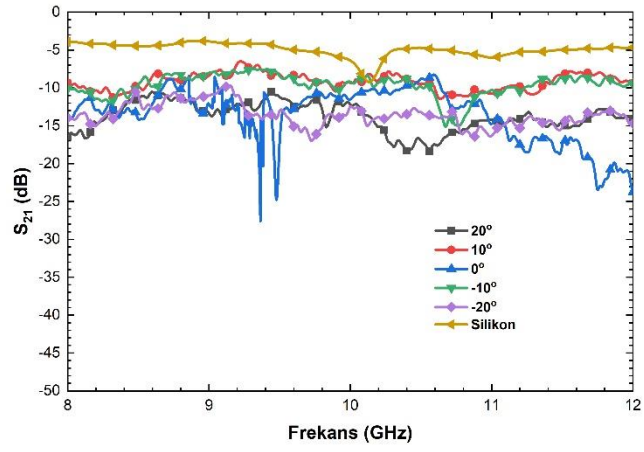
Şekil Ek 11. TM polarizasyon ve geliş açısı  $S_{11}$  sonuçları.



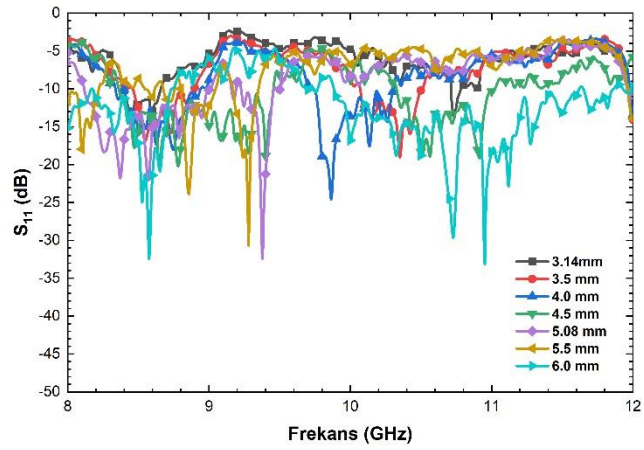
Şekil Ek 12. TM polarizasyon ve geliş açısı  $S_{21}$  sonuçları.



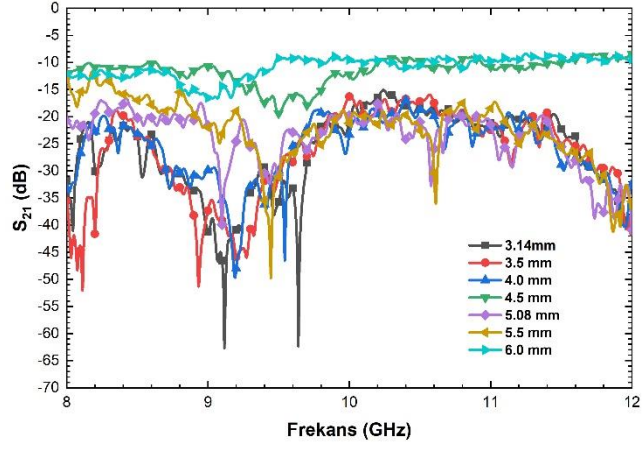
Şekil Ek 13. TE polarizasyon ve geliş açısı  $S_{11}$  sonuçları.



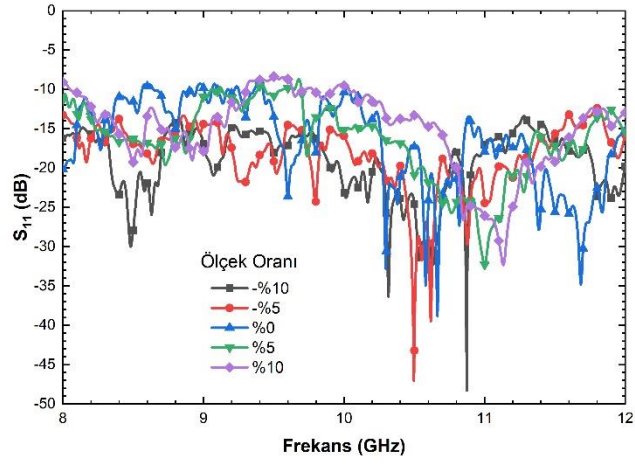
Şekil Ek 14. TE polarizasyon ve geliş açısı  $S_{21}$  sonuçları.



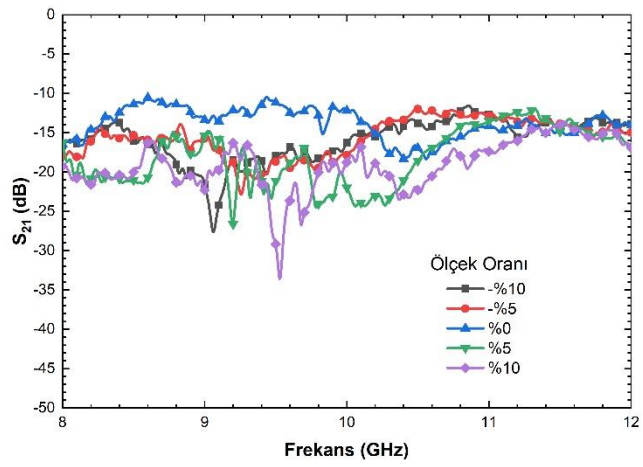
Şekil Ek 15. Ohm tasarım boyut değişimi  $S_{11}$  sonuçları.



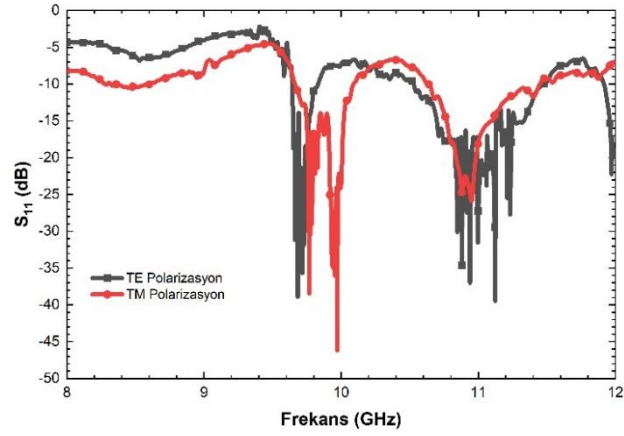
Şekil Ek 16. Ohm tasarın boyut değişimi  $S_{21}$  sonuçları.



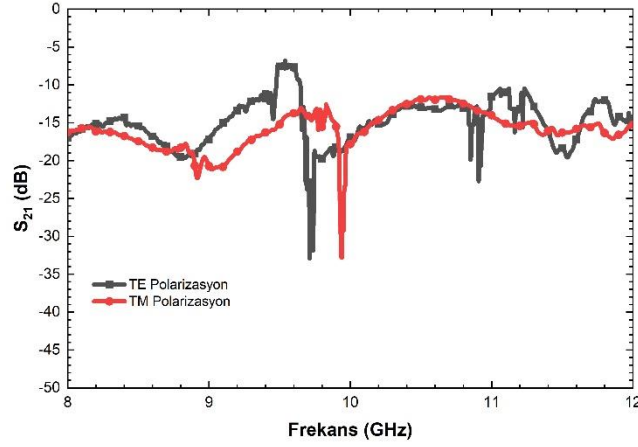
Şekil Ek 17. TE polarizasyon ve  $+20^\circ$  geliş açısında  $S_{11}$  sonuçları.



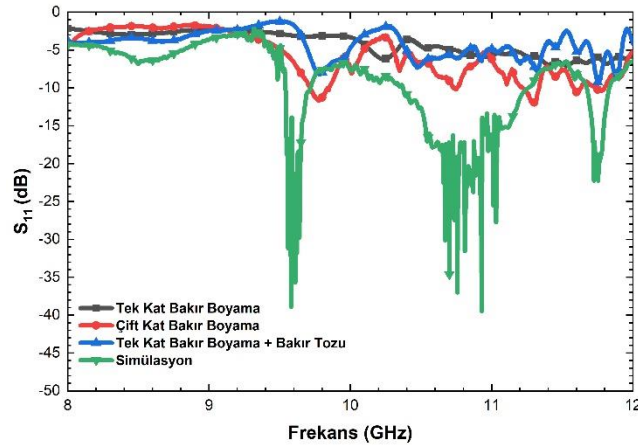
Şekil Ek 18. TE polarizasyon ve  $+20^\circ$  geliş açısında  $S_{21}$  sonuçları.



Şekil Ek 19. Güncellenen simülasyon  $S_{11}$  sonuçları.

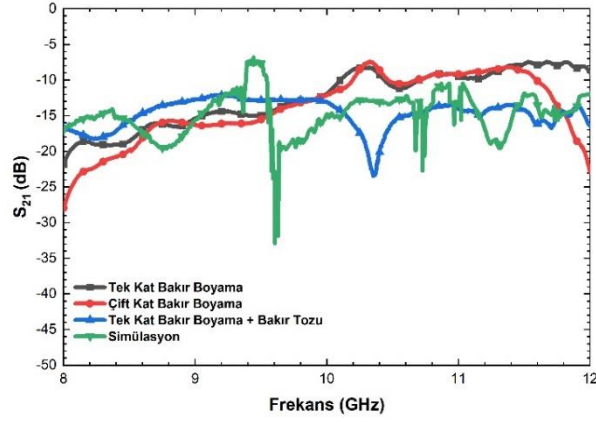


Şekil Ek 20. Güncellenen simülasyon  $S_{21}$  sonuçları.

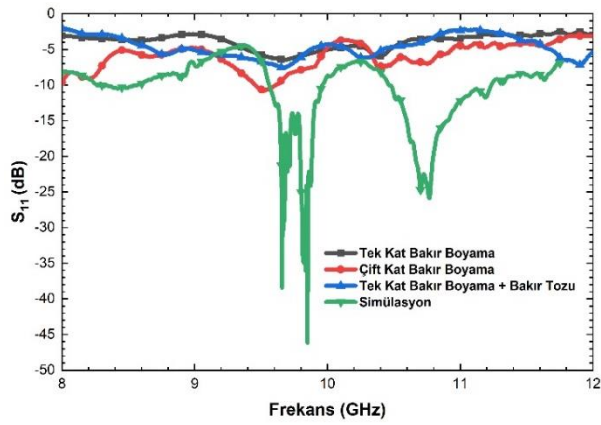


Şekil Ek 21. TE polarizasyon, simülasyon ve bakır boyama türüne göre ölçüm  $S_{11}$  sonuçları.

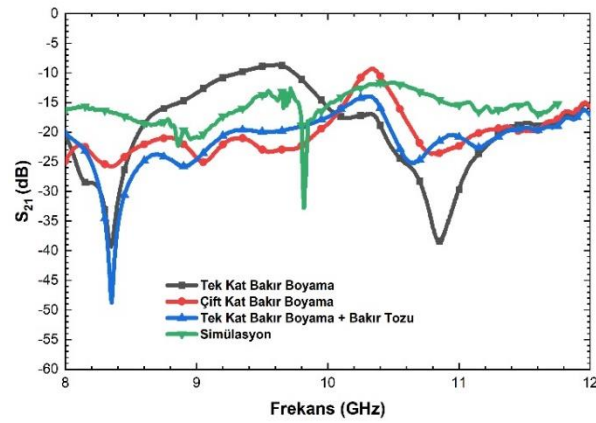




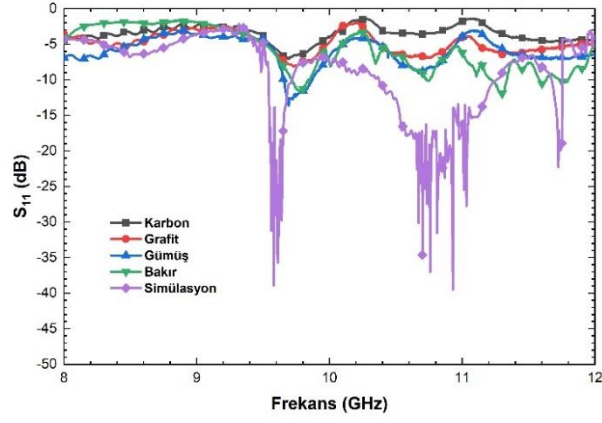
Şekil Ek 22. TE polarizasyon, simülasyon ve bakır boyama türüne göre ölçüm  $S_{21}$  sonuçları.



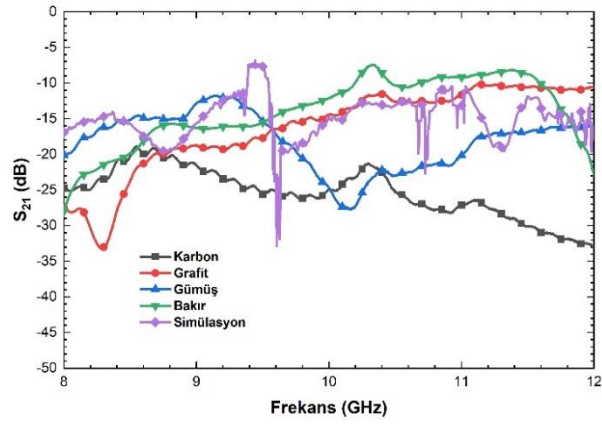
Şekil Ek 23. TM polarizasyon, simülasyon ve bakır boyama türüne göre ölçüm  $S_{11}$  sonuçları.



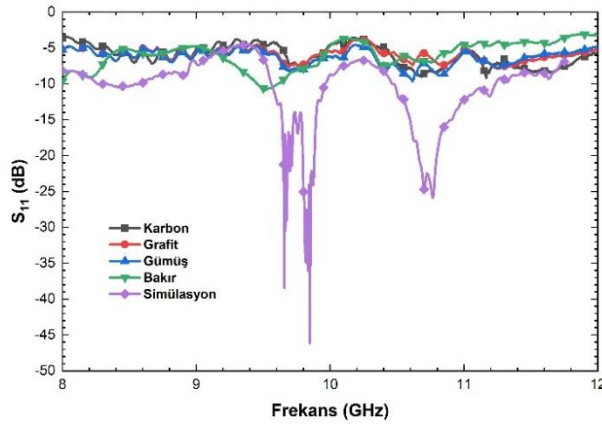
Şekil Ek 24. TM polarizasyon, simülasyon ve bakır boyama türüne göre ölçüm  $S_{21}$  sonuçları.



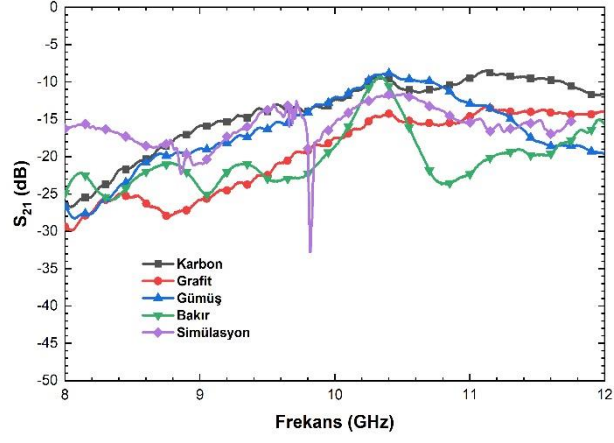
Şekil Ek 25. TE polarizasyonda karbon, grafit, gümüş, bakır ve simülasyon  $S_{11}$  ölçüm sonuçları.



Şekil Ek 26. TE polarizasyonda karbon, grafit, gümüş, bakır ve simülasyon  $S_{21}$  ölçüm sonuçları.



Şekil Ek 27. TM polarizasyonda karbon, grafit, gümüş, bakır ve simülasyon  $S_{11}$  ölçüm sonuçları.



Şekil Ek 28. TM polarizasyonda karbon, grafit, gümüş, bakır ve simülasyon  $S_{21}$  ölçüm sonuçları.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Ediz DELİHASANLAR 1989 yılında Denizli’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Antalya’da tamamladı. 2007 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü’nde öğrenim görmeye başladı ve 2012 yılında buradan mezun oldu. 2013 Temmuz ayında Yedek Subay olarak askerliğini tamamladı. 2013 Ağustos ayında Turkcell ve Ericsson firmalarının ortak projesinde Charging & Campaign Integration Specialist olarak çalıştı. 2014 Ocak ayında ise Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’ne ÖYP (Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı) kapsamında Araştırma Görevlisi olarak atandı ve halen burada çalışmaya devam etmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Karabük Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi  
Balıklar kayası Mevki / KARABÜK

Tel : (505) 671 56 51

E-posta : edizdelihasanlar@karabuk.edu.tr