



**İSKENDERUN TEKNİK**

**ÜNİVERSİTESİ**

**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK  
LİSANS  
TEZİ**

**BAKIŞIMSIZ METAMALZEMELER İLE  
ÖZGÜN ÇOK FONKSİYONLU SENSÖR  
TASARIMLARI**

**Şekip DALGAÇ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**HAZİRAN 2019**



**BAKIŞIMSIZ METAMALZEMELER İLE ÖZGÜN ÇOK FONKSİYONLU  
SENSÖR TASARIMLARI**

**Şekip DALGAÇ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2019**

Şekip DALGAÇ tarafından hazırlanan “BAKIŞIMSIZ METAMALZEMELER İLE ÖZGÜN ÇOK FONKSİYONLU SENSÖR TASARIMLARI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

**Başkan:** Prof. Dr. Bekir ÖZÇELİK

Atom ve Molekül Fiziği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

**Üye:** Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan AKGÖL

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 10/06/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Olga DEPCI  
Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



## ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
  - Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
  - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
  - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
  - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
  - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirim, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Şekip DALGAÇ

10 / 06 / 2019

BAKIŞIMSIZ METAMALZEMELER İLE ÖZGÜN ÇOK FONKSİYONLU SENSÖR  
TASARIMLARI  
(Yüksek Lisans Tezi)

Şekip DALGAÇ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2019

ÖZET

Gelişen teknoloji ile birlikte bilim adamları doğada bulunan birçok malzeme yapısını kullanmaya başlamışlardır. Dünya üzerinde doğal olarak bulunan malzemelere ek olarak, insan eliyle üretilen suni yapılarda son yıllarda karşımıza çıkmaya başlamıştır. Bu yapıların başında metamalzeme yapıları gelmektedir. Metamalzeme yapılarının başlıca özelliği, dielektrik sabiti, manyetik geçirgenlik ve kırılma indisi değerlerinin reel kısmının aynı anda negatif olabilmesidir.

Bu tez çalışmasında bakışsız metamalzeme tabanlı sensör tasarımları gerçekleştirilmiştir. Çok fonksiyonlu olarak tasarlanan yapılar, inşaat malzeme yapılarında tahribatsız ölçüm yapabilmektedir. Buna ek olarak tehlikeli kimyasalları birbirinden ayırt edip, kimyasal maddelerde yoğunluk tespiti yapabilme olanağı sağlamaktadır. Ayrıca ülkemizde sık sık görülen benzin, mazot, zeytinyağı hilelerine çözüm önermektedir. Tasarım çalışmaları yapıldıktan sonra ilk olarak numunelerin dielektrik sabiti değerleri X band frekansında dielektrik probe kit yardımıyla ölçülmektedir. İkinci aşama olarak elde edilen dielektrik sabiti değerleri sonlu integrasyon yöntemi (Finite Integration Technique-FIT) kullanan mikrodalga yazılım programında simulasyon cihazına tanımlanarak S parametreleri olarak bilinen yayılım değerleri elde edilmektedir. Simulatör programında tasarlanan yapıları LPKF E33 PCB devre üretim cihazı kullanılarak üretilmiştir. Deneysel verileri laboratuvar koşullarında elde etmek için ise KEYSIGHT marka PNA-L N5234A network analiz cihazı kullanılmıştır.

AnahtarKelimeler : Metamalzeme, bakışsızlık, mikrodalga, sensör

SayfaAdedi : 98

Danışman : Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN

MULTIFUNCTIONAL UNIQUE SENSOR DESIGNS BY USING CHIRAL  
METAMATERIALS  
(M. Sc. Thesis)

Şekip DALGAÇ

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

June 2019

ABSTRACT

With the developing technology, scientists have started to use many material structures found in nature. In addition to the materials that found naturally in the world, man-made artificial structures have begun to appear in recent years. Metamaterials are the one of the most widely used among the these structures. The main feature of the metamaterial structures is that the real part of the dielectric constant, magnetic permeability and refractive index values can be negative at the same time.

In this thesis, chiral metamaterial based sensor designs have been realized. Structures designed as multi-functional, capable of making non-destructive measurement of construction material structures. In addition, it provides the possibility of distinguishing hazardous chemicals from each other and making density determination of chemical substances. Also, it proposes solutions to the adulteration of gasoline, diesel and olive oil that are frequently seen in our country. After the design strcutres, firstly the dielectric constant values of the samples are measured with the help of dielectric probe kit at X band frequency. The obtained dielectric constant values defined to the simulation device in the microwave software program using the Finite Integration Technique (FIT) method and the scattering parameters known as S parameters are obtained. The structures designed in the simulator program are manufactured by using LPKF E33 PCB circuit production device. KEYSIGHT PNA-L N5234A network analyzer was used to obtain experimental data under laboratory conditions.

KeyWords : Metamaterial, chirality, microwave, sensing,  
PageNumber : 98  
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Muharrem KARAASLAN

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan, kendisine ne zaman danışsam bana kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenin fazlasını sunan ve gelecekteki mesleki hayatımda da bana verdiği değerli bilgilerden faydalanacağımı düşündüğüm kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Muharrem Karaaslan'a teşekkürü bir borç biliyorum ve şükranlarımı sunuyorum. Yine çalışma süresi boyunca konu, kaynak ve yöntem açısından bana sürekli yardımda bulunarak yol gösteren, sahip oldukları yüksek bilgi birikimlerini benimle paylaşan ve yön göstericim olan değerli hocalarım Doç. Dr. Emin Ünal, Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Akgöl, Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Bakır'a teşekkür ederim. Simulasyon, üretim, ölçüm çalışmalarımnda desteklerini esirgemeyen Arş. Gör. Olcay Altıntaş, Arş. Gör. Fatih Özkan Alkurt'a, yüksek lisans arkadaşım Metin Sağık'a teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca, bu tez çalışması Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 117M855 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Sahip olduğu bilgileri benimle paylaşan proje sahibi Prof. Dr. Faruk Karadağ'a ve 117M855 nolu projeyi destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürlerimi arz ederim.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1.GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	7
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	16
3.1. Elektromanyetik Dalga Denklemleri.....	16
3.2. Metamalzemeler (MTM).....	18
3.3. Bakışsız Ortam Özelliklerinin İncelenmesi .....	18
3.4. Simulasyon Programı ve Sonlu İntegrasyon Tekniği.....	22
3.5. Nicolson Ross Weir (NRW) Metodu .....	23
3.6. Tasarlanan Sensör Yapıları, Üretim ve Ölçüm Cihazları.....	25
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	28
4.1 Yapı Malzemeleri İçin Bakışsız Metamalzeme Tabanlı Sensör	
Uygulamaları.....	28
4.1.1 Tasarım ve simülasyon düzeneği .....	28
4.1.2. Bakışsızlık değeri analizi .....	29
4.1.3. Bakışsız metamalzeme tabanlı sensör uygulaması .....	32
4.2. Metamalzeme Tabanlı Mikroakışkan Sensör Uygulaması.....	33



	<b>Sayfa</b>
4.2.1. Tasarım, simülasyon ve üretim düzeneği.....	33
4.2.2. Bakımsızlık değeri analizi.....	35
4.2.3. Mikroakışkan sensör uygulamaları.....	36
4.3. Metamalzeme Tabanlı Sensörle Zeytinyağı ve Petrolde Hile Tespiti.....	40
4.3.1. Tasarım, simülasyon ve üretim düzeneği.....	41
4.3.2. Bakımsızlık değeri analizi.....	41
4.3.3. Yüzey akım grafiğinin çıkarılması.....	42
4.3.4. Hile tespiti için sensör uygulamaları.....	43
4.4. Transformatör Yağı ve Mikroakışkanlar İçin Metamalzeme Sensör.....	50
4.4.1. Tasarım, simülasyon ve üretim düzeneği.....	50
4.4.2. Bakımsızlık değeri analizi.....	51
4.4.3. Sensör uygulamaları.....	52
4.5. Yüksek Hassaslık Değerine Sahip Bakımsız Metamalzemenin	
Karakterizasyon Çalışması.....	57
4.5.1. Tasarım, simülasyon ve üretim çalışması.....	57
4.5.2. Yüzey alan ve akım dağılımı.....	59
4.5.3. Bakımsızlık değeri analizi.....	59
4.5.4. Simulasyon çalışmaları.....	60
4.5.5. Deneysel çalışmalar.....	64
4.6. Karbon Çelik Fiberle Katkılı İnşaat Malzemesi İçin Metamalzeme Sensör	
Uygulaması.....	67
4.6.1. Tasarım ve simulasyon uygulaması.....	67
4.6.2. Bakımsızlık değeri analizi.....	70
4.6.3. Sensör uygulamaları.....	70

	<b>Sayfa</b>
4.7. Bakışimsız Metamalzeme Tabanlı Derişim Tespit Eden Sensör Tasarımı .....	76
4.7.1. Tasarım simulasyon ve üretim çalışmaları .....	76
4.7.2. Yüzey akım dağılımı.....	78
4.7.3. Sensör çalışmaları .....	79
5. SONUÇ .....	84
KAYNAKLAR .....	87
ÖZGEÇMİŞ .....	96
DİZİN.....	98

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4.1. Farklı tipteki sıvıların dielektrik sabiti değerleri .....	57
Çizelge 4.2. Arlon tipi dielektrik malzemenin dielektrik sabiti, kayıp tanjant ve rezonans frekansı.....	61
Çizelge 4.3. Farklı dielektrik malzemelerin dielektrik sabiti, kayıp tanjant değeri ve rezonans frekansı değerleri .....	64



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Periyodik olarak üretilen MTM yapısı [5].....	2
Şekil 1.2. S11 yansıma ve lineerlik grafiği [15] .....	2
Şekil 1.3. Çok bantta emilim yapan sinyal emici grafiği [16] .....	3
Şekil 1.4. Bakışsımsız metamalzeme yapısı [23] .....	4
Şekil 1.5. Horn anten içerisine yerleştirilen metamalzeme yapısı [27] .....	4
Şekil 1.6. Metamalzeme tabanlı görüntüleme sistemi [30].....	5
Şekil 1.7. Yapılan ilk görünmezlik çalışması [31].....	5
Şekil 3.1. Malzemelerin elektromanyetik özelliklere göre sınıflandırılması [99] .....	18
Şekil 3.2. FIT modelleme uygulaması için elektrik ve manyetik alanın gösterimi [110] .....	23
Şekil 3.3. Dielektrik ölçüm cihazı (a) ve vektör ağ analizörü (b).....	26
Şekil 3.4. Sıvı tutucu-dalga klavuzu adaptör bağlantısı (a) ve geliştirilen sıvı tutucu yapısı (b).....	27
Şekil 4.1. Önerilen bakışsımsız metamalzeme tabanlı sensör yapısı .....	28
Şekil 4.2. Önerilen bakışsımsız metamalzeme için uygulanan sınır koşulları .....	29
Şekil 4.3. Önerilen bakışsımsız metamalzeme yapısının sol el polarize dalgaya ve sağ el polarize dalgaya verdiği tepki .....	30
Şekil 4.4. Önerilen bakışsımsız metamalzeme yapısının Circular Dichroism değeri .....	31
Şekil 4.5. Önerilen sensör yapısının bakışsımsızlık değeri grafiği .....	31
Şekil 4.6. Birbirinden ayırt edilecek farklı inşaat malzemelerinin dielektrik sabiti değerler.....	32
Şekil 4.7. Birbirinden ayırt edilecek farklı inşaat malzemelerinin S11 yansıma katsayısı değerleri.....	33

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.8. Önerilen bakışimsız metamalzeme tabanlı sensör yapısı .....	34
Şekil 4.9. Önerilen bakışimsız metamalzeme tabanlı sensör yapısının ön (a) arka (b) görüntüsü, sıvı hazanesi-kapton bant (c), network analyzer-dalga klavuzu bağlantısı (d).....	35
Şekil 4.10. Önerilen yapının bakışimsızlık değeri grafiği .....	36
Şekil 4.11. %10, %50 ve %90 oranındaki asetonun dielektrik sabiti (a), simulasyon (b) ve deneysel (c) grafiği.....	37
Şekil 4.12. %10, %50 ve %90 derişime sahip izo propil alkolün dielektrik sabiti (a), simülasyon (b) ve deneysel sonuç (c) grafiği.....	39
Şekil 4.13. Saf su, amonyak, aseton, metanol ve ethanol'ün dielektrik sabiti (a), yansıma parametresinin simülasyon (b) ve deneysel (c) sonuçları.....	40
Şekil 4.14. Dizayn edilen sensör yapısının ön (a), arka (b) ve profil görüntüsü (c), üretimi yapılan sensör yapısı (d).....	41
Şekil 4.15. Önerilen sensör yapısının bakışimsızlık değeri grafiği .....	42
Şekil 4.16. Önerilen senör yapısının yüzey akım dağılımı grafiği .....	42
Şekil 4.17. Petrol-Gazyağı karışımlarının dielektrik sabiti grafiği .....	43
Şekil 4.18. Benzin-gazyağı karşımın yansıma parametresi simülasyon (a) ve deneysel (b) sonuçları .....	44
Şekil 4.19. Petrol-Etanol karışımlarının dielektrik sabiti grafiği.....	45
Şekil 4.20. Benzin-etanol karşımın yansıma parametresi için simülasyon (a) ve deneysel (b) sonuçları .....	46
Şekil 4.21. Dizel-Etanol karışımlarının dielektrik sabiti grafiği.....	47
Şekil 4.22. Dizel-etanol karşımın yansıma parametresi için simülasyon (a) ve deneysel (b) sonuçları .....	48

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.23. Zeytinyağı-pamukyağı karışımlarının dielektrik sabiti grafiği.....	49
Şekil 4.24. Zeytinyağ-pamukyağı karışımın yansımaya parametresi için simülasyon (a) ve deneysel (b) sonuçları.....	50
Şekil 4.25. Tasarlanan yapının ön (a) ve arka (b) görünümü ve boyutları(c), üretilen yapı (d).....	51
Şekil 4.26. Sensör yapısının bakışimsızlık değeri grafiği.....	52
Şekil 4.27. Temiz ve kirli trafo yağının dielektrik sabiti grafiği .....	53
Şekil 4.28. Temiz ve kirli trafo yağının yansımaya katsayısı sabiti grafiği .....	53
Şekil 4.29. %20, %60 ve %100 metanol-su karışımının dielektrik sabiti grafiği.....	54
Şekil 4.30. %20, %60 ve %100 metanol-su karışımının yansımaya katsayısı grafiği .....	55
Şekil 4.31. Mısırözü ve zeytinyağı'nın dielektrik sabiti grafiği .....	56
Şekil 4.32. Mısırözü ve zeytinyağı'nın yansımaya katsayısı grafiği .....	56
Şekil 4.33. Aseton, temiz trafo yağı, kirli trafo yağı ve methanol numunelerinin yansımaya katsayısı grafiği.....	57
Şekil 4.34. Dizayn edilen sensör yapısının ön (a) arka (b) ve üretilen sensör yapısının ön (c) arka (d) görüntüsü .....	58
Şekil 4.35. Sensör yapısının boyutları (a) ve uygulanan sınır koşulları(b).....	58
Şekil 4.36. Sensör yapısının 10,1 GHz frekansındaki yüzey akım (a) ve elektrik alan (b) görüntüleri.....	59
Şekil 4.37. Sensör yapısının bakışimsızlık değeri .....	60
Şekil 4.38. Parametrik kalınlık çalışması simülasyon sonuçları.....	60
Şekil 4.39. Dielektrik sabiti karakterizasyon çalışması .....	62
Şekil 4.40. Manyetik geçirgenliği karakterizasyon çalışması.....	63

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.41. Kayıp tanjant değeri karakterizasyon çalışması için iletim katsayı grafiği .....	64
Şekil 4.42. Deneysel çalışma için örnek dielektrik tabaklar (a) ve dalga klavuzunun içine yerleştirilmiş dielektrik tabakası (b).....	65
Şekil 4.43. Kalınlık karakterizasyon çalışması ölçüm ve simulasyon sonuçları .....	65
Şekil 4.44. Dielektrik sabiti karakterizasyon çalışması ölçüm sonuçları.....	66
Şekil 4.45. Dielektrik sabiti karakterizasyon çalışması ölçüm sonuçları.....	67
Şekil 4.46. Geliştirilen sensör yapısının ön (a), arka (b) ve profil (c) görüntüsü .....	68
Şekil 4.47. Önerilen sensör yapısının boyutları (a), sınır koşulları (b) ve inşaat malzemesinin boyutları (c).....	69
Şekil 4.48. Dielektrik ölçüm ortamı (a) ve hazırlanan inşaat malzemeleri (b) .....	69
Şekil 4.49. Önerilen yapının bakışsızlık değeri grafiği .....	70
Şekil 4.50. %0,5, %1 ve %1,5 karbon çelik içeren inşaat malzemelerinin dielektrik sabitleri.....	71
Şekil 4.51. 0,5, %1 ve %1,5 karbon çelik içeren numunelerin yansıma katsayısı grafiği.....	72
Şekil 4.52. Farklı nemlilik oranına sahip numunelerin dielektrik sabiti grafiği .....	73
Şekil 4.53. Farklı nemlilik oranına sahip numunelerin yansıma katsayısı grafiği.....	73
Şekil 4.54. Farklı sıcaklık değerlerine sahip numunelerin dielektrik sabiti grafiği.....	74
Şekil 4.55. Farklı sıcaklık değerlerine sahip numunelerin yansıma katsayısı grafiği.....	75
Şekil 4.56. Kontrol numunesinin farklı sıcaklıklardaki dielektrik sabiti grafiği (a) ve yansıma katsayısı grafiği (b).....	76
Şekil 4.57. Tasarlanan yapıların ön (a) ve arka (b) yüzü, üretimi yapılan yapının ön (c) ve arka (d) yüzü .....	77

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.58. Tasarlanan yapının boyutları (a) ve uygulanan sınır koşulları (b).....	77
Şekil 4.59. Boş hava ortamındaki yansıma katsayısı grafiği .....	78
Şekil 4.60. Tasarlanan yapının yüzey akım grafiği.....	79
Şekil 4.61. %10, %50 ve %90 yoğunluktaki numunelerin dielektrik sabiti grafiği .....	79
Şekil 4.62. %10, %50 ve %90 yoğunluktaki numunelerin yansıma katsayısı grafiği ....	80
Şekil 4.63. %10, %50 ve %90 yoğunluktaki numunelerin dielektrik sabiti grafiği .....	81
Şekil 4.64. %10, %50 ve %90 yoğunluktaki numunelerin yansıma katsayısı grafiği ....	81
Şekil 4.65. %10, %50 ve %90 yoğunluktaki numunelerin dielektrik sabiti grafiği .....	82
Şekil 4.66. %10, %50 ve %90 yoğunluktaki numunelerin yansıma katsayısı grafiği ....	83



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda verilmiştir.

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>EM</b>	Elektromanyetik
<b>MTM</b>	Metamalzeme
<b>CMS</b>	Bakışimsız Metamalzeme sensörü
<b>MS</b>	Metayüzey
<b>RF</b>	Radyo frekansı
<b>dB</b>	Desibel
<b>FSS</b>	Frekans Seçici Yüzey
<b>GHz</b>	Gigahertz
<b>MHz</b>	Megahertz
<b>AC</b>	Alternatif akım
<b>DC</b>	Doğru akım
<b>SRR</b>	Ayrık halka rezonatör
<b>CSRR</b>	Ayrık halkanın komplementi
<b>PEC</b>	Mükemmel elektrik iletken
<b>UWB</b>	Ultra geniş bant
<b>FIT</b>	Sonlu integrasyon yöntemi
<b>FEM</b>	Sonlu elemanlar yöntemi
<b>FDTD</b>	Zaman sölgesinde sonlu farklar yöntem
<b>CM</b>	Bakışimsız metamalzeme
<b>CD</b>	Dairesel Dönüşüm
<b>DNG</b>	Çift negatif ortam
<b>mm</b>	milimetre
<b>Wifi</b>	Kablosuz İnternet
<b>TL</b>	İletim hattı
<b>GSM</b>	Mobil İletişim İçin Küresel Sistem
<b>RCP</b>	Sağ El Polarize Dalga
<b>LCP</b>	Sol El Polarize Dalga
<b>VNA</b>	Vektör Network Analizörü

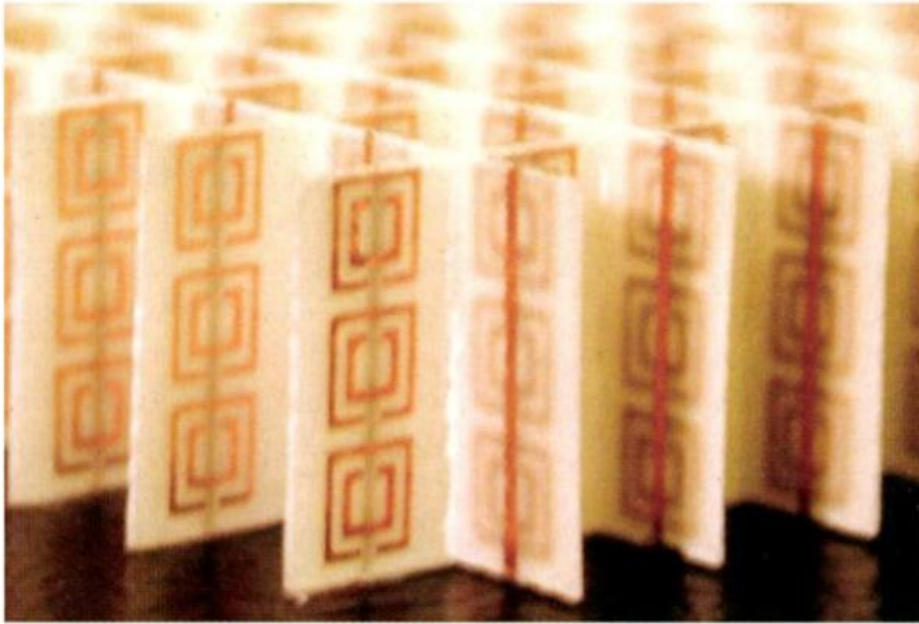
## 1.GİRİŞ

Malzeme bilimi uzun yıllar boyunca dünyamızda gelişen sektörlerden biri haline gelmiştir. Dünya üzerinde yayılan teknolojik ilerlemeler sayesinde günümüzde halen yeni tip malzemeler keşfedilmeye devam edilmektedir. Malzeme yapıları, doğada kendiliğinden var olan ya da insan eliyle yapay olarak üretilmiş (suni) şekilde bulunur. Suni malzeme bilimi ile ilgili çalışmalar ilk olarak 19.yy'da Jagadis Chinder Bose tarafında ilk mikro dalga deneyi yapılarak başlatılmıştır.

Doğada kendiliğinden yer alan malzemelerin elektriksel özellikleri incelendiğinde kırılma indisi, dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerlerinin eş zamanlı negatif olamadığı görülmüştür. Ancak 1967 yılında Veselago tarafından ortaya atılan bir hipotezde bu değerlerin negatif olabileceği teorik hesaplamalarla ortaya konulmuştur [1]. Veselago bu çalışmasında ayrıca ters kırılma kanunu, ters doppler etkisi gibi olaylardan bahsetmiştir. Ancak ortaya atılan bu hipotezin uygulanmasının mümkün olmadığı için bilim adamlarının dikkatini uzun süre çekmemiştir.

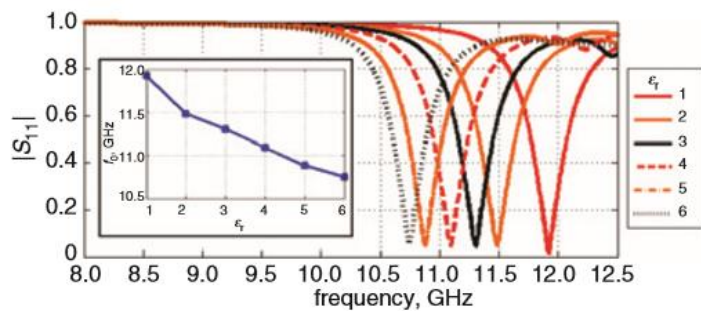
Veselago'nun ortaya attığı hipotezden 30 yıl sonra Pendry ve arkadaşları kırılma indisi, dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerlerinin eş zamanlı negatif olabileceği üzerinde çalışmalar başlatmıştır. İlk olarak 1996 yılında yapılan çalışmada dielektrik sabiti değerinin suni yapılarla negatif bulunabileceği ortaya konulmuştur [2]. 1999 yılında Pendry tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise manyetik geçirgenlik değerinde negatif olabileceği bir çalışmayla ortaya konulmuştur [3]. 2000 yılında ise Smith ve arkadaşları tarafından ince tel ve ayrık halka yapıları kullanılarak ilk metamalzeme yapısı üretilmiştir [4]. Bu çalışmalardan sonra, Şekil 1.1'de gösterildiği gibi 2001 yılında ilk Çift Negatif ( $\epsilon < 0$ ,  $\mu < 0$ ; ÇNG) ortam Shelby ve arkadaşları tarafından deneysel olarak kanıtlanmış ve incelenmiştir [5].

Metamalzeme yapıları günümüzde ilerleyen teknoloji ile birlikte birçok alanda kullanılmaya başlanılmıştır. Bu kullanılan alanların başında anten yapıları sensörler, polarizasyon dönüştürücüler, lensler, görünmezlik pelerini, sinyal emiciler yer alır [6-10]. Metamalzeme yapılarının diğer kullanılan malzemelere göre en büyük avantajlarından bazıları ise kolay üretiminin yapılması, ucuz olması, tam ve kesin sonuç vermesidir.



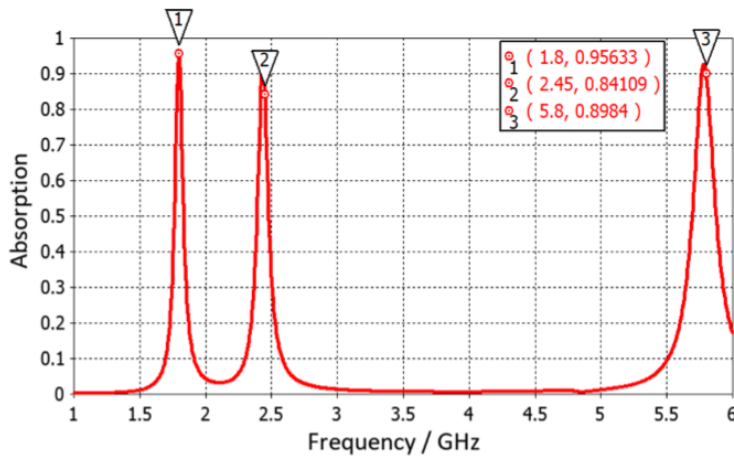
Şekil 1.1. Periyodik olarak üretilen MTM yapısı [5]

Metamalzeme yapılarının günümüzde sıklıkla uygulandığı alanların en başında sensör uygulamaları yer almaktadır. Sensör tasarımları birçok farklı alanda farklı amaçlarda kullanılabilen gibi, metamalzeme sensör tasarımlar derişim tespiti, tehlikeli maddeleri birbirinden ayırma, sinyal emici sensör, hastalıklı vücut hücrelerini tanıma, sanayi yağları, inşaat malzemelerinde hasarsız tespit çalışmaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır [11-15]. Sensör tasarımlarının çalışma mekanizmasını açıklamak gerekirse; dielektrik sabiti değerlerinin yapı üzerinde oluşturacağı farklı endüktif ve kapasitif etkiden dolayı her bir malzeme için farklı değerlerde rezonans değeri meydana gelecektir. Şekil 1.2’de gösterildiği gibi rezonans frekanslarında meydana gelen bu değışimlerin dielektrik sabiti değerine göre lineer olması bir diğere önemli husustur.



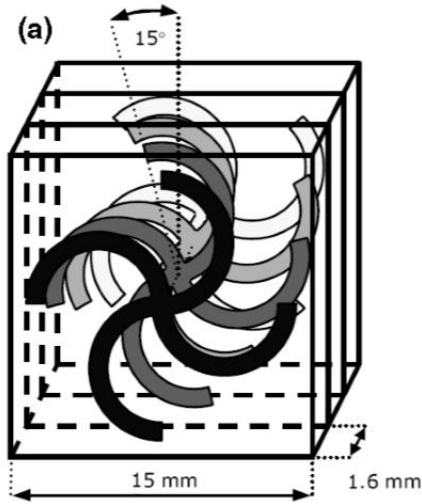
Şekil 1.2. S11 yansıma ve lineerlik grafiği [15]

Metamalzeme yapılarının uygulandığı bir diğer alan ise sinyal emici ve enerji hasadı yapılarıdır. Metamalzeme sinyal emici yapıları periyodik olarak dielektrik tabakanın üzerinde dizilmiş olan rezonatörlerden oluşur. DC gerilim sinyali, emilen enerjiden doğrultucu devre elemanları kullanılarak elde edilebilir. Birim hücrelerin bir araya gelmesiyle elde edilen periyodik metamalzeme tabanlı sinyal emici yapı, diyot elemanlarının kullanılmasıyla DC voltaj üretilmesine olanak sağlar. Bu yapıların en büyük avantajlarından biri istenilen frekans aralığında ve bandından emilim yapmaya olanak sağlamasıdır. Özellikle ülkemiz güneş enerjisi potansiyeli bakımından diğer ülkelere oranla yüksek potansiyele sahip olduğundan dolayı bu frekans aralığında emilim yapabilen MTM yapıları üretmek mümkündür. Ayrıca bunlara ek Şekil 1.3'te gösterildiği üzere GSM, WİFİ, WİMAX, WİLAN gibi frekanslarda emilim yapmakta mümkündür [16-18].



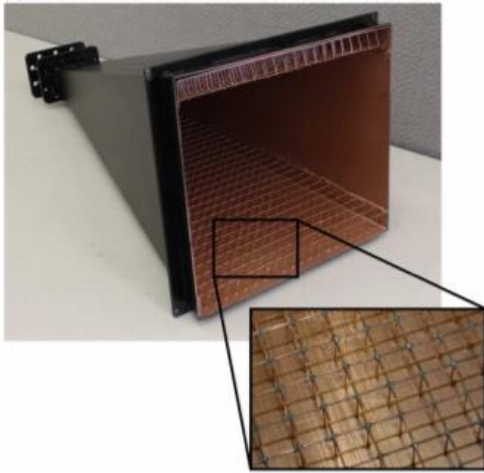
Şekil 1.3. Çok bantta emilim yapan sinyal emici grafiği [16]

Bakışimsız metamalzemeler normal metamalzeme yapılarının bir alt dalı olarak ortaya çıkmıştır. Maddelerin bakışimsız özellikleri ilk olarak 19.yy'da bilim adamları tarafından araştırılmaya başlanmıştır. Şekil 1.4'te gösterildiği üzere bu yapılar oluşturulurken ayna simetri ekseninde asimetrik olarak yerleştirirler ve gelen dalgalara asimetrik yapılar farklı tepkiler verirler. Bakışimsız metamalzeme çalışmaları ilk olarak Pendry ve Tretyakov tarafından ortaya konulmuştur. Günümüzde sensörler, antenler gibi birçok alanda uygulanmaktadır [19-22].



Şekil 1.4. Bakışimsız metamalzeme yapısı [23]

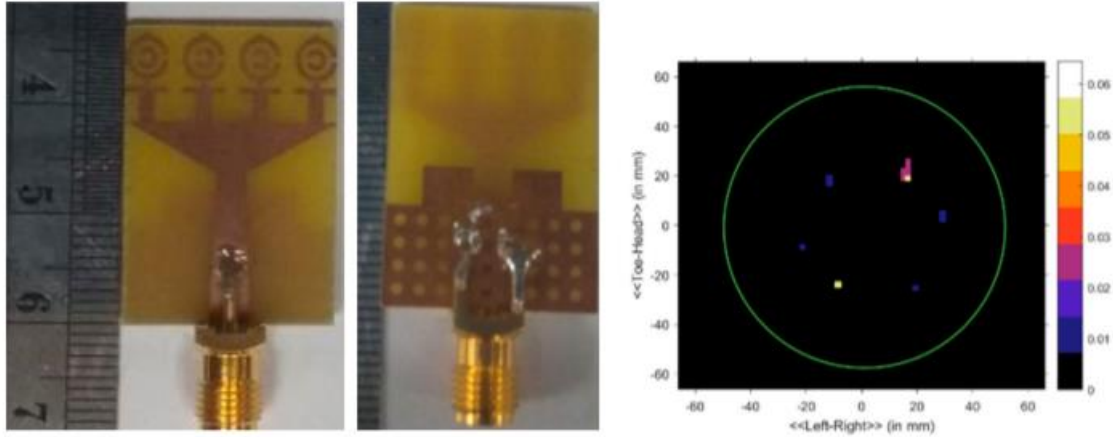
Metamalzeme yapıları günümüzde anten tasarımları üzerinde etkin şekilde rol oynamaktadır. Şekil 1.5'te gösterildiği gibi MTM uygulamalarını anten yapılarıyla birleştirerek antenin daha kazançlı hale gelmesi, yönlülük ve kazanç değerinin artması ve anten boyutlarında küçültme yapmaya olanak vermesi bakımından önemlidir [24-26].



Şekil 1.5. Horn anten içerisine yerleştirilen metamalzeme yapısı [27]

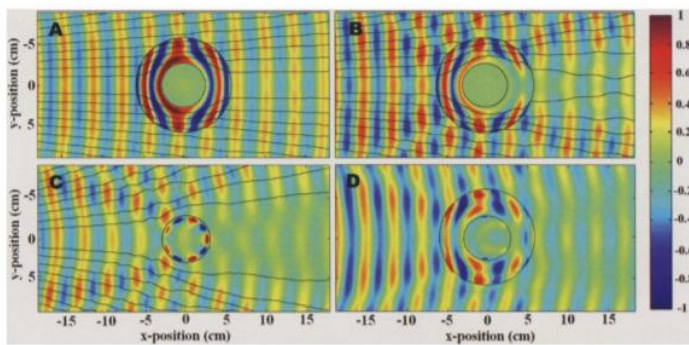
Günümüzde mikrodalga yöntemi kullanılarak yapılan görüntüleme işlemleri oldukça yaygındır. Anten uygulamaları mikrodalga görüntüleme yöntemlerinin kullanıldığı alanlardan bir tanesidir. Şekil 1.6'da gösterildiği gibi gerekli anten tasarımı yapıldıktan sonra çevresinde var olan cisimlere göre anten parametrelerinde meydana gelen değişikliklere uygun bir algoritma yazılımı yaparak görüntüleme yapmak mümkündür.

Buna ek olarak, özel olarak tasarlanan metamalzeme yapılarında görüntüleme yapmaya olanak sağlamaktadır. Periyodik olarak tasarlanan MTM yapıları, uygulama alanını bir verici olarak tarayarak görüntüleme işlemini yapabilmektedir [28-30].



Şekil 1.6. Metamalzeme tabanlı görüntüleme sistemi [30]

Metamalzeme yapılarının günümüz teknolojilerinden en önemli uygulama potansiyeli görünmezlik peleridir. Bu alanda çalışmalar ilk olarak Pendry ve arkadaşları tarafından şekil 1.7’de görüldüğü gibi ortaya konulmuştur. Bu çalışmalarda görünmemesi istenen malzemenin etrafı metamalzeme yapılarıyla tamamen kaplanarak görünmez olması sağlanmıştır. Bu süreç içerisinde metamalzeme yapısına çarptıktan sonra yansıyan dalgaların görünmemesi istenen yapıya ulaşmadan kırılması sağlanır. Bu alanda bir diğer çalışmada Enghata ve Alu tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, gelen dalganın hiç kırılmaması sağlanır ve yansıma ve iletim katsayıları metamalzeme yapıları tarafından engellenir. Böylelikle, yapılan her iki çalışmayla maddelerin görünmez olabileceği ortaya konulmuştur [31-32].



Şekil 1.7.Yapılan ilk görünmezlik çalışması [31]

Metamalzeme yapılarının bir diğer güncel uygulama alanlarından biride süper lenslerdir. Bu alanda yapılan ilk alışmalar, Pendry tarafından ortaya konulmuştur. Genel olarak bu çalışmaların amacı, lenslerde en iyi şekilde odaklanmayı sağlamak ve çözünürlük seviyesini artırmaktır [33].



## 2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Doğada birçok malzeme bulunmasına karşın insan eliyle üretilmiş numunelerde mevcuttur. Günümüzde yapay olarak üretilen malzemelerin başında ise metamalzeme yapıları gelmektedir. Bu yapıların bilinen en dikkat çekici özellikleri ise kırılma indisi, dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerlerinin eş zamanlı negatif olmasıdır. Metamalzeme yapıları ilk olarak 1968 yılında Veselago tarafından teorik olarak ortaya konulmuştur [1].

Veselago tarafında ortaya atılan bu hipotez, uzun yıllar boyunca önemsenmemiştir. Ancak 1996 ve 1999 yıllarında Pendry yaptığı çalışmalarda dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerlerini ayrı yapılar üzerinde negatif olarak elde etmeyi başarmıştır [2-3].

2000'li yıllara gelindiğinde ise Smith yaptığı deneyler sonucunda dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerini eş zamanlı negatif yapan yapay malzemeyi ortaya koyarak bu durumu kanıtlanmıştır [4].

Shelby ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise negatif kırılma indisi sabiti deneysel çalışmalar sonucunda elde edilmiştir. Oluşturulan bu yapı, iki boyutlu bir dizi ile tekrarlanmış periyodik yapılardan meydana gelen birim bakır şerit ve ayırık halka rezonatörlerinden oluşur [5].

2002 yılında Smith ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada yansıma ve iletim katsayıları değerlerinden yola çıkarak negatif kırılma indisi, dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerleri elde edilmiştir. Bu analiz, periyodik olarak sıralanmış split halka rezonatörler (SRR'lar) ve tel yapılar üzerinde gerçekleştirilmiştir [34].

2003 yılında Ziolkowski tarafında yapılan çalışmada metamalzeme yapıları oluşturularak negatif kırılma indisi değeri elde edilmiştir [35].

2005 yılında S parametre yöntemlerini kullanarak Smith ve arkadaşları tarafından homojen olmayan metamalzeme yapıları üzerinden bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada sonsuz kalınlıktaki numunelerin sahip olduğu dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerleri S parametrelerinden elde edilmiştir [36].



Bakışimsız metamalzeme yapıları normal metamalzeme yapılarının bir alt kümesi olarak bilinmektedir. Bakışimsız ortamın gelişim tarihine bakılınca ilk çalışmaların 19 yy'da ortaya çıktığı görülmektedir. 19 yy'da Biot tarafından yapılan çalışmada quartz kristallerinde, gazlarda ve sıvı numunelerinde optiksel olarak dönüşümün meydana gelebileceği keşfedilmiştir [37].

Bazı numunelerde optiksel aktifliğin ortaya çıkmasından sonra 1873 yılında Lord Kelvin kendi derslerinde bu duruma bakışimsızlık ismini vermiştir [38].

1910 yılında ise Lindeman heliks şeklindeki bobinleri kullanarak görünebilir güneş ışınları üzerinden optiksel aktiflik fenomenini ortaya çıkarmıştır [39].

2004 yılında Pendry tarafından yapılan çalışmada bakışimsız ortamlarda negatif kırılma indisi elde edilmiştir [19].

Tretyakov 2003 yılında yaptığı çalışmada bakışimsız ortamda 'hiçlik' prensibini açıklamıştır. Yapılan bu çalışmaya göre yeteri derecede büyük bir bakışimsızlık değeri elde edilirse negatif kırılma indisi değeri dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerlerine bakılmaksızın negatif olabileceği ortaya konulmuştur [20].

Faruk ve arkadaşları tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise geniş bant aralığında sabit bir bakışimsızlık değeri elde edilmiştir. Ayrıca sunulan yapının negatif kırılma indisi yüksek bakışimsızlık değeri nedeniyle negatif elde edilmiştir [40].

Sengül ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada bakışimsız metamalzeme tabanlı  $90^0$  polarizasyon dönüştürücü yapı tasarlanmıştır. Oluşturulan yapı üzerine TE ve TM polarize dalgalar gönderilerek bakışimsızlık değerleri analiz edilmiştir [41].

Hu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada yama anten tasarımının ön tarafına bakışimsız metamalzeme yapısı eklenerek lineer polarize dalgayı dairesel polarize dalgaya dönüştürülmüştür. Ayrıca yama antenin, kazancı ve yönlülük değerlerinde iyileşmenin ortaya çıktığını gözlemlemişlerdir [42].

Guo ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 3 boyutlu Z şekilli yapıların asimetric olarak yerleştirilmesiyle bir bakışimsız ortam oluşturmuştur. Bu yapının optiksel özellikleri üzerinde çalışmalar yapılmış ve yüksek değerde polarizasyon dönüştürücü, dairesel dicroism (CD) değerine sahip olduğu görülmüştür [43].

Zarifi ve arkadaşları tarafında yapılan bir diğer çalışmada ise bakışimsız metamalzeme yapısının kırılma indisini, dielektrik sabitini, manyetik geçirgenliğini, sağ ve sol el polarize dalganın iletim ve yansıma katsayısını numerik ve deneysel olarak ortaya koyan bir çalışma yapmışlardır [44].

Bakır ve arkadaşları tarafından yapılan bir diğer çalışmada basınç, yoğunluk, sıcaklık ve nem üzerine bakışimsız metamalzeme tabanlı bir sensör çalışması yapılmıştır. Tasarlanan yapının ayrıca belirli frekans aralıklarında dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerlerine bakılmaksızın, kırılma indisi değerinin negatif çıktığı görülmüştür [45].

Furkan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada yeni tip bir metamalzeme tasarlanmıştır. Tasarlanan bu yapının en önemli özelliği ise bakışimsızlık değerinin geniş bant aralığında sabit ve doğal bakışimsızlık özelliği göstermesidir [46].

Sun ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada gama şekilli bir yapı kullanılarak bakışimsız metamalzeme tasarımı yapılmıştır ve bu yapının dairesel dicroism değerinin bakışimsız yapı üzerinde etkileri araştırılmıştır [47].

Akgöl ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada inşaat numunelerinin içerisinde bulunan karbon fiber çelik miktarını hasarsız olarak belirlemek için metamalzeme tabanlı sensör tasarımı gerçekleştirilmiştir [48].

Sabah ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada bakışimsız metamalzeme tabanlı bio sensör uygulaması yapılmıştır. Kemik iliği sıcaklık değerleri lineer olarak artırılarak rezonans frekansında meydana gelen kaymalar gözlemlenmiştir. Ayrıca yapının sıcaklığa bağlı olarak bakışimsızlık değeri de gösterilmiştir [49].

Bakır ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada X bant frekansında çalışan bakışimsız metamalzeme sensör (CMS) yapısı ortaya konulmuştur. Geliştirilen bu sensör yapısı;

dielektrik sabiti, kalınlık ve sıcaklık değerlerinde meydana gelen değişiklikleri yüksek hassasiyetle ortaya koymaktadır. Ayrıca dokularda meydana gelen sıcaklık ve nem değişiminide kolaylıkla algılayabilmektedir [50].

Wu ve arkadaşları tarafında yapılan çalışmada farklı sıvıları birbirinden ayırt eden metamalzeme tabanlı bir sensör geliştirmiştir. Geliştirilen bu yapı mikro şerit tabanlı bir metamalzemededen oluşmaktadır. Dielektrik sabiti değeri, 1-78 değerleri arasında değişirken rezonans frekansı 810 MHz'den 895 MHz'ye kaymıştır [51].

Tümkaya ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ülkemizde bulunan kaçak mazot ve benzin numunelerini birbirinden ayırt eden X band frekanslarında çalışan metamalzeme tabanlı sensör çalışması yapılmıştır. Geliştirilen bu yapı X band frekansı aralığında hassas sonuçlar vermiştir. Dizel yakıt için 110 MHz'lik bant genişliği elde edilirken mazot için 28 MHz'lik bant genişliği mevcuttur [52].

Withhayachumankul ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ayrık halka rezonatör(SRR) şeklinde bir sensör çalışması yapılmıştır. Bu çalışmanın ana amacı, tehlikeli kimyasal olarak bilinen etanol ve metanol derişimini tespit etmektir [53].

Bakır ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada metanol, etanol, izo propil gibi alkol numuneleri için derişim tespitine dayalı bir bakışimsız metamalzeme tabanlı sensör uygulaması geliştirilmiştir. Ayrıca bu sensör benzin için yapılan hileleride tespit edebilmektedir [54].

Chuma ve arkadaşları tarafında yapılan diğer çalışmada ise ayrık halka yapısı topolojisinin tersini (CSRR) olarak bir sensör uygulaması ortaya konulmuştur. Bu çalışmada etanol derişimi tespit edilmiştir ve yüksek kalite faktörü gözlemlenmiştir [55].

Zhou ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise 6GHz -8,5GHz arasında çalışan iletim hattı (TL) tabanlı bir sensör uygulaması tasarlanmıştır. Bu çalışmada farklı kimyasal malzemelerin birbirinden ayırt edilmesi ve yoğunluk tespiti üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir [56].

Bakır ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise basınç, yoğunluk, sıcaklık ve nem’de meydana gelen değişiklikleri hassas bir şekilde algılayan bakışimsız metamalzeme tabanlı bir çalışma yapılmıştır [57].

Neu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada bakışimsızlık özelliği olan numuneleri birbirinden ayırt edebilecek THz frekanslarında çalışan bir yapı tasarlanmıştır [58].

Tamer ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada iletim hattı tabanlı metamalzeme sensör yapısı dizayn edilmiştir. Geliştirilen bu sensör yapısı benzin hilelerini kolaylıkla tespit etmektedir [59].

Keshavarz ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise kanserli hücreleri algıyabilecek THz frekanslarında çalışan sensör tasarlanmıştır [60].

Lee ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise 2,4 GHz wifi frekansında çalışan bir sensör çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada tolüen, metanol, etanol, aseton ve kloroform gibi tehlikeli kimyasallar birbirinden ayırt edilmiştir ayrıca Wi-Fi frekanslarında enerji hasadında yapılmıştır [61].

Lin ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 10,73 GHz ile 16,13 GHz frekanslarında lineer polarize dalgayı dairesel polarize dalgaya çeviren metayüzey tasarlanmıştır [62].

Akgöl ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 2,98 GHz ve 3,16 GHz frekanslarında lineer polarize dalgayı dairesel polarize dalgaya dönüştüren kare şekillerinden oluşan bir yapı tasarlanmıştır. Buna ek olarak 3 GHz frekanslarında yüksek polarizasyon sağlanmıştır [63].

Zou ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada THz frekansların iletim ve yansımada parametrelerinde polarizasyon dönüşümü sağlayacak bir yapı başarılı bir şekilde tasarlanmıştır [64].

Zhao ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 5,1GHz ve 12,1GHz frekanslarında lineer polarize dalgayı dairesel dalgaya polarize dalgaya dönüştürebilen bir yapı tasarlanmıştır [65].

Xu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 6,67 GHz ve 17,1 GHz frekanslarında yüksek verimlilikte polarize dönüştürücü tasarlanmıştır [66].

Duan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada THz frekanslarında mükemmel emilim sağlayan bir çalışma ortaya konulmuştur. Ayrıca yapının boyutlarını parametrik değiştirerek emilim için karakterizasyon çalışması yapılmıştır [67].

Ramya ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada X bant frekanslarında tepki veren metamalzeme tabanlı bir sinyal emici tasarlanmıştır. Tasarlanan bu yapı 2,3 GHz frekanslarda yüksek oranda emilim sağlarken 9,3 GHz-11,7 GHz aralığında %90 oranında emilim sağlamıştır [68].

Karaaslan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 3 GHz-5,9 GHz frekansların %80,73 6 GHz-8 GHz frekanslarında %90 emilim sağlayan bir yapı tasarlanmıştır. Ayrıca tasarlanan bu yapının diğer özelliği ise açı bağımsız olmasıdır [69].

Ji ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, kare ve dairesel halka rezonatörlerden oluşan ve 3,7 GHz, 6,57 GHz ve 17,62 GHz frekanslarında %99 gibi yüksek oranda emilim yapan polarizasyon bağımsız bir yapı tasarlanmıştır [70].

Kaur ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada iç içe geçmiş kare halkalardan oluşan bir metamalzeme sensör emici tasarlanmıştır. Bu yapı GSM ve ISM frekanslarında yüksek oranda sinyal emilimi yapmaktadır [71].

Yin ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada polimer kristal içeren metamalzeme yapılarıyla THz frekans bölgesinde çalışan bir sinyal emici çalışması ortaya konulmuştur. Bu yapının rezonans frekansı kullanılan sıvı kristaller sayesinde 416,5- 405 GHz aralığında ayarlanıp yüksek oranda emilim sağlamaktadır [72].

Bağmancı ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 4-16 GHz gibi geniş bant aralığında emilim yapabilen bir yapı tasarlanmıştır. Ayrıca tasarlanan yapı yön bağımsızdır [73].

Ünal ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada optik frekans bölgesinde yüksek oranda emilim yapabilen metamalzeme tabanlı bir yapı tasarlanmıştır. Bu yapı 579,26 THz 'de %99,42 oranında ve 545 THz, 628 THz'de %99 oranında emilim göstermektedir [74].

Liu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada L şeklinde olan yapılar karşılıklı olarak yerleştirilerek sinyal emici yapı oluşturulmuştur. Bu çalışmada vanadyum oksit yapısı kullanılarak 1,2 THz ve 3,3 THz aralığında yüksek oranda emilim sağlanmıştır [75].

Bağmancı ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada C ve X bantlarında süper emilim sağlayan metamalzeme tabanlı bir yapı tasarlanmıştır [76].

Shang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada sol ve sağ polarize olarak gönderilen elektromanyetik dalgaları yüksek değerlerde emebilen bir yapı tasarlanmıştır [77].

Karakaya ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada 0,90 GHz, 1,80 GHz, 2,60 GHz ve 5,80 GHz frekanslarında yüksek oranda emilim yapabilen bir metamalzeme yapısı tasarlanmıştır [78].

Karaaslan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada WİMAX ve WİLAN telekomunikasyon frekanslarında mükemmel emilim sağlayan bir metamalzeme yapısı oluşturulmuştur. Bu yapı 3 tane ayrı yapının üst üste getirilmesiyle elde edilmiştir [79].

Sabah ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada grafen tabanlı sinyal emici metamalzeme yapısı tasarlanmıştır. Tasarlanan bu yapı THz frekans bölgesinde yüksek oranda emilim sağlamaktadır [80].

Oudich ve arkadaşları tarafından tasarlanan yapıda akustik frekansta enerji emilimi yapabililen metamalzeme yapısı tasarlanmıştır. Tasarlanan bu yapı 100 dB'lik ses seviyesini ve 520 Hz frekanslarında başarılı bir şekilde emilim yapabilmektedir [81].

Smith ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada horn antenin ağız kısmına yerleştirilen bakışsımsız metamalzeme yapılarıyla lineer dalgayı dairesel polarize dalgaya dönüştürmüşlerdir [82].

Tütüncü ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Ku bant frekanslarında çalışan bir yama anten tasarımı yapılmış ve antenin yönlülük değerini artırmak için metamalzeme yapıları yerleştirilmiştir [83].

Dave ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada 2 bantta yayılım yapan yama anten tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Tasarlanan bu anten yapısının üzerinde metamalzeme yapısı yerleştirilerek, antenin S parametrelerinde, kazancında ve yönlülüğünde meydana gelen değişimleri gözlemlemişlerdir [84].

Duangtang ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada X band frekanslarında yayılım yapan horn antenin ön kısmına metamalzeme yerleştirerek antenin kazancını artırmışlardır [85].

Suthar ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada WİLAN frekanslarında çalışan yama anten üzerine kırılma indisi 0 olan metamalzeme yapısı eklemişlerdir. Ayrıca kullanılan metamalzeme yapısının anten boyutlarının küçültülmesinde kullanabileceği ortaya çıkmıştır [86].

Katıyar ve arkadaşları yaptığı çalışmada yama anten üzerine yerleştirilen metamalzeme yapılarının mesafesi parametrik olarak değiştirilerek anten parametreleri üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir [87].

Ashyap ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada giyilebilir bir metamalzeme tabanlı anten tasarımı yapmışlardır. Anten yapısını vücudun farklı bölgelerine yerleştirilerek S11 parametresinde meydana gelen değişimleri gözlemlemişlerdir [88].

Painam ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada yama antenin arka tarafındaki bakır kısımdan çıkarılan metamalzeme yapısıyla antenin boyutlarında %74 oranında küçülme olduğu gözlemlenmiştir [89].

Aroraa ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada Wİ-MAX frekanslarında yama anten üzerine metamalzeme yapısı konularak anten kazancında ve bant genişliğinde iyileşme olduğu gözlemlenmiştir [90].

Hu ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada yama antenin polarizasyonunu dönüştürmek için bakışsız metamalzeme yapısı tasarlanmıştır. Ayrıca antenin kazancında ve yönlülüğünde artış olduğu gözlemlenmiştir [91].

Ali ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada hibrit manyetik metamalzeme yapılarıyla beyin görüntüleme üzerine etkin bir çalışma yapılmıştır [92].

Islam ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada göğüs bölgesinde meydana gelen tümörleri mikro dalga frekanslarında görüntülemek için metamalzeme tabanlı bir çalışma ortaya konulmuştur [93].

Zubkov ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada manyetik rezonans görüntüleme tekniğiyle metamalzeme yapısı kullanarak küçük hayvanların tüm vücudunu görüntülemişlerdir [94].

Khan ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada X ve Ku bandında çalışan metamalzeme tabanlı frekans seçici yüzey tasarlanmıştır. Ayrıca tasarlanan yapının polarizasyon bağımsız olduğuda gösterilmiştir [95].

Li ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada yüksek dielektrik katsayısı değerine sahip seramikler kullanarak metamalzeme tabanlı frekans seçici yüzeyi (FSS) tasarımı yapılmıştır. FSS, 2 boyutlu dikdörtgen seramik rezonatör dizilerinden oluşur. Seramik rezonatörün geometrik parametrelerini ayarlayarak, ilk iki rezonans modu, band durdurma özelliği elde etmek için kullanılmıştır [96].

Bai ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada esnek metamalzeme yapısı kullanılarak dar bant geçiren filtre tasarımı hem sayısal simülasyonlar hem de deneysel ölçümler tarafından güvenilir olarak tasarlanmış ve kanıtlanmıştır. Tasarlanan yapının birim hücresi, metalik bir ağ ile desteklenen ince bir dielektrik tabakanın tepesinde bulunan halka rezonatörlerinden oluşur [97].

Dong ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada baryum stronsiyum titanat (BST) ince film kullanarak, THz frekans aralığında termal olarak ayarlanabilen frekans seçici yüzey (FSS) tasarımı gerçekleştirilmiştir [98].



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Elektromanyetik Dalga Denklemleri

Elektromanyetik dalgalar ilk kez 1864 yılında James Clerk Maxwell tarafından “Elektromanyetik Teorinin Temel Bağlantıları” olarak bilinen ve kendi adıyla anılan “Maxwell Denklemleri” adı altında ortaya konulmuştur. Elektromanyetik dalgaları düşük frekanstan yüksek frekansa doğru sıralanırsa radyo, televizyon, mikrodalga, kızılötesi, görünür ışık, morötesi, X ışınları ve gama ışınlarından oluşmaktadır. Ayrıca elektromanyetik dalgaların özelliklerinden bahsetmek gerekirse bu dalgalar enine dalgalardır, boşlukta ışık hızıyla hareket ederler ve zamanla değişen elektrik ve manyetik alan bileşenleri birbirini oluşturur. Maxwell denklemlerini şöyle sıralayabiliriz;

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_e \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \nabla \times \vec{H} - \vec{J}_e \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E} \quad (3.4)$$

Bu denklemlerde H manyetik alan şiddeti E elektrik alan şiddeti, B manyetik akı yoğunluğu, D elektrik akı yoğunluğu,  $J_e$  elektrik akım yoğunluğu,  $\rho_e$  elektrik yük yoğunluğu temsil etmektedir.

#### E için Gauss yasası

$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_e$  denklemi olarak bilinir. Kısaca kapalı bir yüzeyden geçen toplam elektrik akısı o yüzey içerisindeki toplam yükü doğru orantılı olduğunu açıklamaktadır. Diğer bir söylem ile, boş uzayda bir kapalı yüzey üzerinde oluşan E alanının toplam dışarı doğru akısının, yüzey tarafından kapsanan toplam yükün  $\epsilon$ 'a bölümüne eşit olduğunu söyler.

### B için Gauss Yasası

$\nabla \cdot \vec{B} = 0$  formülü olarak bilinir. Yukarıda verilen denklem elektrik alan için gauss yasasını temsil ederken bu denklem manyetik alan için gauss yasasını temsil eder. Kısaca açıklamak gerekirse, manyetik monopollerin (tek manyetik yükler) doğada tek başına var olamayacağından bahsetmektedir. Yani mıknatıs gibi manyetik malzemelerin kaç kere bölünürse bölünsün üzerinde N ve S kutuplarının oluşacağını vurgulamaktadır.

### Amper Yasası

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \nabla \times \vec{H}$  formülü olarak bilinir. Zamanla değişen bir elektrik alanın ve elektrik akının bir manyetik alan indüklediğini ortaya koyar. Eğer zamanla değişen bir elektrik akı mevcutsa gösterilen çizgi integrali sıfırdan farklı bir değer olacaktır ve bu da manyetik alan oluşmasında etkili olacaktır.

### Faraday Yasası

$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E} - \vec{J}_m$  formülü olarak bilinir. Zamanla değişen bir manyetik alanın ve manyetik akının bir elektrik alan indüklediğini ortaya koyar. Eğer zamanla değişen bir manyetik akı mevcutsa gösterilen çizgi integrali sıfırdan farklı bir değer olacaktır ve bu da elektrik alan oluşmasında etkili olacaktır. Yukarıda verilen Maxwell denklemlerine ek olarak ayrıca D ve B arasındaki bir ilişki mevcuttur;

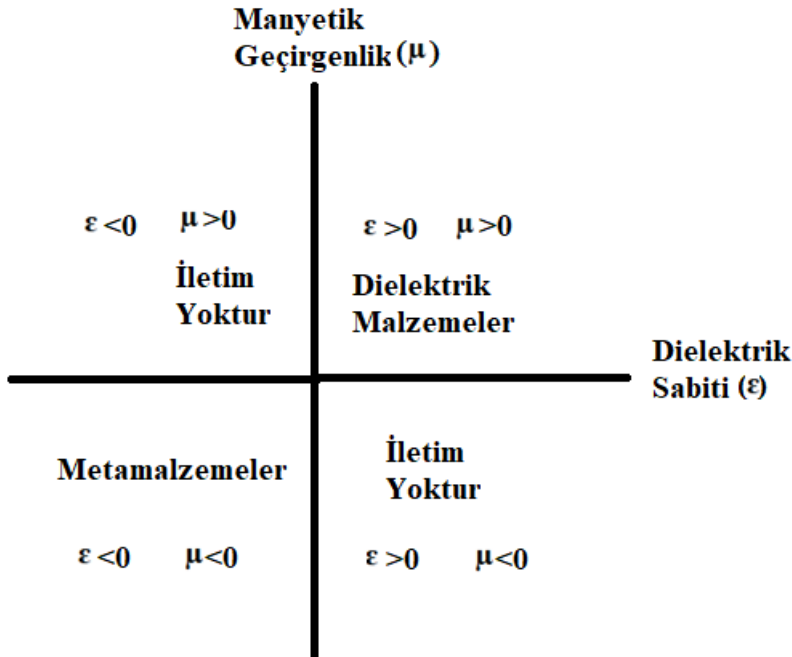
$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (3.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (3.6)$$

Yukarıdaki denklemlerde verilen dielektrik sabiti( $\epsilon$ ) değeri, bağıldielektrik katsayısı ( $\epsilon_r$ ) ve boş uzayın dielektrik katsayısının ( $\epsilon_0 = (1/36\pi) \cdot 10^{-9} = 8,854 \times 10^{-12} F / m$ ) çarpımı ile bulunur. Manyetik geçirgenlik katsayısına eşit olan  $\mu$  değeri ise bağıl manyetik geçirgenlik ( $\mu_r$ ) değeri ile boş uzayın manyetik geçirgenlik değerinin ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H / m$ ) ile çarpımıdır.

### 3.2. Metamalzemeler (MTM)

Malzeme bilimi geçmişten bu yana insanların hayatında büyük bir öneme sahiptir. Doğada birçok malzeme yapısı var olmasına karşın bazı malzeme yapıları da insan eliyle yapay olarak üretilir. Yapay olarak üretilen bu malzemelerin başında metamalzeme yapıları yer almaktadır. Malzeme yapılarının elektriksel özelliklerine bağlı olarak incelendiğinde doğal malzemelerin dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerleri aynı anda negatif olmamaktadır. Ancak 1968 yılında Veselago tarafında teorik olarak ortaya atılan bir fikre göre metamalzeme yapıları kullanılarak, dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerlerini aynı anda negatif yapmanın mümkün olduğu durumu incelenmiştir. Bu fikir uzun süre ilgi çekmesede deneysel olarak 2001 yılında Smith tarafından gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Enghata ve Zilkowski malzemeleri elektriksel özelliklerine göre Şekil 3.1'deki gibi sınıflandırılmıştır [99].



Şekil 3.1. Malzemelerin elektromanyetik özelliklere göre sınıflandırılması [99]

### 3.3. Bakışsız Ortam Özelliklerinin İncelenmesi

Bakışsız ortamın ortaya çıkması 19.yy'a kadar dayanmaktadır. Biot ve arkadaşları quartz kristallerinde, gazlarda ve sıvılar üzerinde yaptığı çalışmalarda optiksel dönüşümün

bu numuneler üzerinde etkili olduğunu kanıtlamışlardır. Biot ayrıca fenomen moleküllerinde bir kök olduğunda öne sürmüştür [37]. Moleküllerin optik olarak aktif malzemelerdeki el kullanım niteliği, 1840'larda Pasteur tarafından onaylanmıştır. 1873 yılında, Lord Kelvin, derslerde elde edilen el kullanım niteliğini ifade etmek için "bakışimsızlık" kelimesini kullanmıştır [100]. 1910'larda Lindeman, optik aktivite olayını görünür ışıktaki radyo dalgalarında gözlenebilir hale getirmeyi başarmıştır [39].

Bakışimsız metamalzeme yapılarının ortaya çıkması 2003 yılında Tretyakov tarafından yapılan çalışmalarla başlamıştır. Bakışimsız metamalzeme yapıları rezonatörlerin bir dielektrik tabakanın iki yüzüne asimetrik olarak yerleştirilmesiyle elde edilmiştir. Ayrıca yapının sağ el polarize dalgaya ve sol el polarize dalgaya verdiği tepki birbirinden farklıdır [101-104]. Elektrik alan ve manyetik alan arasında bir çapraz etkileşim bakışimsız ortam içerisinde mevcuttur ve bu ortam şu eşitlikle açıklanabilir [44].

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon E + (\chi + i\kappa) \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} H \quad (3.7)$$

$$B = \mu_0 \mu H + (\chi - i\kappa) \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} E \quad (3.8)$$

Bu formüller içerisinde bulunan simgelerden  $\varepsilon$  ortamın dielektrik sabiti değerini,  $\varepsilon_0$  vakumun dielektrik sabitini,  $\mu$  ortamın manyetik geçirgenliğini  $\mu_0$  ise vakumun manyetik geçirgenliğini ifade etmektedir.  $\kappa$  değeri ise ortamın bakışimsızlık değerini  $\chi$  simgesi ise yön bağımsız manyeto-elektrik parametredir ve malzemenin çift yönlülük özelliğini belirtmektedir.

Metamalzemelerin dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerlerinin elde edilmesi MTM'lerin tasarımında önemli bir kavramdır ve yaygın olan S-parametresi yönteminin kullanılması ile bu parametreler elde edilebilir. Bu yaklaşım, sağ ve sol dairesel olarak polarize edilmiş düzlem dalgaların d kalınlığına sahip bir yüzeye etkileşime girdiği bir ortam için geliştirilmiştir. Bakışimsız ortam için sağ ve sol dairesel polarize dalgaların yansıma katsayısı sabiti birbirine eşittir ( $R_+ = R_- = R$ ). Yüzey üzerine elektromanyetik sınır koşulları uygulandığında, sağ polarize ve sol polarize dalga için kırılma indisi ve bakışimsız değerleri;

$$z = \mp \sqrt{\frac{(1+R^2)-T_+T_-}{(1-R^2)-T_+T_-}} \quad (3.9)$$

$$\kappa = \frac{-J}{2k_0d} \ln \frac{T_+}{T_-} \quad (3.10)$$

$$n_{\mp} = \frac{-J}{2k_0d} \ln \left[ \frac{1}{T_{\pm}} \left( 1 - \frac{z-1}{z+1} R \right) \right] \quad (3.11)$$

$k_0 = w/c$  bakışimsız ortamda bulunan dalganın boş uzaydaki dalga vektörünü  $R_+, R_-$ , sağ el ve sol el polarize dalganın yansıma katsayısını göstermektedir.  $n_{\mp}$  sağ el ve sol el polarize dalganın kırılma indeksidir.  $T_+, T_-$  değerleri sırasıyla sağ ve sol polarize dalganın iletim katsayılarıdır.  $R$  ise yansıma katsayısına eşittir. Eş. 3.9'da belirtilen denklemin işareti enerji dönüşüm kurallarına göre seçilmelidir.

Kompleks logaritma fonksiyonu çok elemanlı olduğundan dolayı bakışimsızlık parametresi  $\kappa$ , sol polarize dalga ve sağ polarize dalganın kırılma indisi Eş. 3.10 ve Eş. 3.11'de verilen denklemlerle elde edilemez. Bu yüzden, bu denklemlerde çözüme ulaşmak için K-K (Kramers Kronig) denklemleri ortamın efektif parametrelerini elde etmek için geliştirilmiştir. K-K dağılım kuralları, elektromanyetik parametrelerin reel ve imajiner kısımlarını birbirine bağlar ve toplam kuralı diye adlandırılan integral ilişkilerine neden olur. Karmaşık logaritmik fonksiyonun çok dallı formu nedeniyle Eş. 3.10 ve Eş. 3.11'de verilen bakışimsızlık ve kırılma indisinin reel kısımları aşağıdaki gibi formüle edilir;

$$\text{Re} \{ \varepsilon \} = \frac{1}{2k_0d} \text{Im} \left\{ \ln \left( \frac{T_+}{T_-} \right) \right\} + \frac{m'\pi}{k_0d} \quad (3.12)$$

$$\text{Re} \{ n_{\mp} \} = \frac{-1}{k_0d} \text{Im} \left\{ \ln \left[ \frac{1}{T_{\pm}} \left( 1 - \frac{z-1}{z+1} R \right) \right] \right\} \frac{2m\pi}{k_0d} \quad (3.13)$$

$m$  ve  $m'$  iki rastgele tamsayıdır ve sırasıyla reel ve imajiner kısımlara karşılık gelir. Elde edilen belirsizlik, Eş. 3.12 ve Eş. 3.13 nolu denklemlerdeki  $m$  ve  $m'$  varlığından kaynaklanmaktadır. Denklemlerde verilen parametrelerden olan  $m$  ve  $m'$  bakışimsızlık parametresinin ve kırılma indisinin sadece imajiner kısmını etkiler. Bu yüzden Eş. 3.12 ve Eş. 3.13 nolu denklemdeki belirsizliği çözmek için K-K dağılım kuralları kullanılır.

Bakışimsızlık parametresi aynı dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik gibi frekansa bağlı olarak yazılan kompleks fonksiyondur. K-K eşitlikleri aşağıdaki gibidir [44];

$$\operatorname{Re}\{a(w)\} = \operatorname{Re}\{a(\infty)\} + \frac{2\pi}{m} \text{P.v} \int_0^{\infty} \frac{u \operatorname{Im}\{a(u)\}}{u^2 - w^2} du \quad (3.14)$$

$$\operatorname{Im}\{a(w)\} = -\frac{2w}{\pi} \text{P.v} \int_0^{\infty} \frac{\operatorname{Re}\{a(u)\} - \operatorname{Re}\{a(\infty)\}}{u^2 - w^2} du \quad (3.15)$$

Buradaki P.V, integralin temel değerini belirtir ve  $a(w)$ ,  $\varepsilon(w)$ ,  $n(w)$ ,  $j\kappa(w)$  değerlerinden biri olabilir. Burada bakışimsızlık parametresi  $j\kappa$  formundadır. Bu yüzden bu denklemlerde  $\kappa(w)$  yerine  $j\kappa(w)$  kullanılır. Kısaca  $\kappa$  değerinin  $\operatorname{Re}(\kappa) + \operatorname{Im}(\kappa)$  gibi reel ve imajiner kısımdan oluştuğu varsayılırsa [44];

$$\operatorname{Re}\{\kappa(w)\} = \frac{2w}{\pi} \text{P.v} \int_0^{\infty} \frac{\operatorname{Im}\{\kappa(u)\}}{u^2 - w^2} du \quad (3.16)$$

Ayrıca Eş. 3.16'daki formulasyonu kırılma indisine uygularsak ve kırılma indisi  $n_{\mp} = n \pm \kappa$  formunda olursa elde edilen denklem [44];

$$\operatorname{Re}\{n_{\mp}(w)\} = 1 + \frac{2}{\pi} \text{P.v} \int_0^{\infty} \frac{u \operatorname{Im}\{n_{\mp}(u)\} \mp \kappa(u)}{u^2 - w^2} du \mp \frac{2w}{\pi} \text{P.v} \int_0^{\infty} \frac{\operatorname{Im}\{\kappa(u)\}}{u^2 - w^2} du \quad (3.17)$$

$n_{\mp}(\infty)$  bilinmeyen bir değerdir ve bu değer 1 olarak kabul edilir. Böylelikle Eş. 3.17 K-K denklemleri için yaklaşık çözüm öneren bir denklem olabilir.

Doğrusal olarak polarize bir ışığın polarizasyon düzlemi, bir bakışimsız ortamdan geçtiğinde dönecektir. Bu durum optiksel aktivite olarak adlandırılır ve eliptik polarize ışığın polarizasyonu, azimut dönme açısı ile karakterize edilir [105-106]:

$$\theta = \frac{1}{2} \delta = \frac{1}{2} [\arg(T_{++}) - \arg(T_{--})] \quad (3.18)$$

Burada formülasyonda belirtilen  $T_{++}$  ve  $T_{--}$  değerleri sırasıyla sağ ve sol el polarize dalganın iletim katsayısı değerine karşılık gelmektedir.

Bakışimsız ortamın sahip olduğu özelliklerden dolayı sağ el polarize dalga ve sol el polarize dalga bu ortamın tanecikleriyle birbirinden farklı şekilde etkileşime girecektir. Bu durum dalgalar üzerinde farklı oranlarda emilim ve bozulmaya neden olacaktır. Bakışimsız ortamda meydana gelen bu fark dairesel dikroizme neden olur [105-106].

$$n = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left( \frac{[\tau_{++}]^2 - [\tau_{--}]^2}{[\tau_{++}]^2 + [\tau_{--}]^2} \right) \quad (3.19)$$

### 3.4. Simulasyon Programı ve Sonlu İntegrasyon Tekniği

Bu tez süresi boyunca simulasyon çalışmalarının gerçekleştirilmesinde Sonlu İntegrasyon Tabanlı Benzetim Yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşımda elektromanyetik parametrelerinin belirlenmesinde tam etkin olarak kullanılabilir ve tam sonuç veren bir yetkinliğe sahiptir. Elektromanyetik temelli yaklaşımlar programları kendine has parametre değerlerini hesaplarken, mevcutta yer alan ve geliştirilmiş belli başlı hesaplama tekniklerinden birini kullanır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan bu teknikleri sıralanırsa Zaman Domainde Sonlu Farklar (FDTD) Metodu, Sonlu Elemanlar Metodu (FEM), Sonlu İntegrasyon tekniği (FIT) bu metodlardan en önemlileridir. Sonlu integrasyon tekniği ilk defa 1977 yılında Thomas Weiland tarafından geliştirilmiş ve ilerleyen zamanlarda birçok bilim insanı tarafından çalışılmıştır [107-109]. Bu yöntem Maxwell denklemlerinin bilgisayarlar için uygun olan bütünlük formlarında yeniden formüle edilmesini sağlar ve gerçek dünyadaki elektromanyetik alan problemlerinin karmaşık geometrilerle çözülmesine olanak tanır. Bir diğer deyişle bu yaklaşım, çözümü yapılacak geometriyi ızgara parçalarına ayırarak, bu ızgara hücreleri boyunca kenarlarda oluşan gerilimleri ve ızgara yüzey akılarını (flux) kullanıp hesaplayarak, Maxwell denklemlerinin istenilen frekans veya zaman uzayında çözümünü yapar. Aşağıdaki denklemler FIT tekniğinde kullanılan Maxwell denklemlerini göstermektedir;

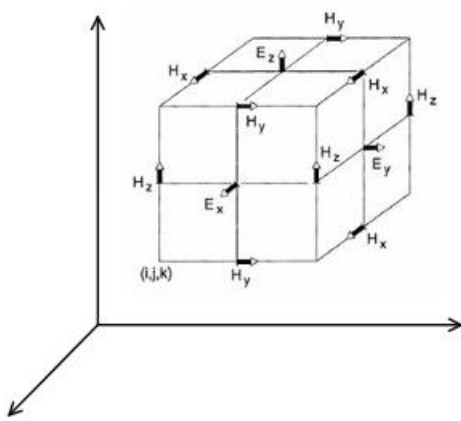
$$\oint_{\partial V} D \cdot dA = \iiint_V \rho \cdot dV \quad (3.20)$$

$$\oint_{\partial V} B \cdot dA = 0 \quad (3.21)$$

$$\oint_{\partial A} E \cdot dl = \frac{\partial}{\partial t} \iint_A B \cdot dA \quad (3.22)$$

$$\oint_{\partial A} H \cdot dl = \iint_A \left( \frac{\partial}{\partial t} D + J \right) \cdot dA \quad (3.23)$$

Bu yöntemle çözümlene yapılrken aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere belirtilen şekil öncelikle belirli ızgaralara bölünür. Bir diğer adımda ise ızgara üzerindeki elektrik alan ve manyetik akı değerlerinin bulunmasıdır. Bir diğer önemli nokta ise şekil üzerindeki ızgara sayısındaki artış, tam sonucun elde edilmesindeki bir diğer etkindir.



Şekil 3.2. FIT modelleme uygulaması için elektrik ve manyetik alanın gösterimi [110]

### 3.5. Nicolson Ross Weir (NRW) Metodu

Dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerleri doğada her malzemede olan kendine has özelliklerden biridir. Bununla birlikte, elektromanyetik özelliklerin belirlenmesinde sıkça kullanılan bu terimlerin değerlerinin bulunması için literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan biriside Nicolson Ross Weir (NRW) metodudur. Bu metodun temelinde saçılım parametreleri olan S11 ve S12'yi kullanarak Nicolson'un geliştirdiği nümerik yöntemle malzemelerin dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerlerinin bulunmasıdır [111-112].

Bu tez çalışmasında dielektrik sabiti değerleri ölçülürken Nicolson Ross Weir (NRW) Metodu kullanılarak değerler elde edilmiştir. Bu değerler elde edilirken aşağıdaki formülasyonlar kullanılmıştır [111].

$$S_{11} = \frac{\Gamma(1-T^2)}{1-\Gamma^2 T^2} \quad (3.24)$$



Yukarıda bulunan  $S_{11}$  değeri yüzey üzerinde etkili olan yansımaya parametresine  $\Gamma$  değeri yansımaya katsayısına  $T$  değeri ise iletim katsayısı değerine eşittir [111].

$$S_{21} = \frac{T(1-\Gamma^2)}{1-\Gamma^2T^2} \quad (3.25)$$

Yukarıda bulunan  $S_{12}$  değeri yüzey üzerinde etkili olan iletim parametresi değerine eşittir [111].

$$T = \frac{S_{11}+S_{21}-\Gamma}{1-(S_{11}+S_{21})\Gamma} \quad (3.26)$$

Bir diğer formülasyonda bulunan  $T$  değeri ise iletim katsayısı değerine eşittir.

$$\Gamma = X + \sqrt{X^2 - 1} \quad (3.27)$$

Bir diğer formülasyonda bulunan  $\Gamma$  değeri ise yansımaya katsayısı değerine eşittir.

$$X = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (3.28)$$

$$\epsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r} \left( \frac{1}{\lambda_c^2} - \left[ \frac{1}{2\pi L} \ln \left( \frac{1}{T} \right) \right]^2 \right) \quad (3.29)$$

Yukarıda verilen formülasyonda  $\lambda_0$  boş uzayın dalga boyunu  $\lambda_c$  ise kesim dalga boyunu vermektedir.

$$\mu_r = \frac{1+\Gamma_1}{\Lambda(1-\Gamma) \sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \quad (3.30)$$

$$\frac{1}{\Lambda^2} = \left( \frac{\epsilon_r \mu_r}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2} \right) = - \left( \frac{1}{2\pi L} \ln \left( \frac{1}{T} \right) \right)^2 \quad (3.31)$$

$$Z = \pm \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (3.32)$$

Yukarıda Z ile gösterilen değer numunenin empedans değerine eşittir.

$$e^{ink_0d} = \frac{S_{21}}{1 - S_{11} \frac{Z-1}{Z+1}} \quad (3.33)$$

$$n = \frac{1}{k_0d} \left\{ \left[ \ln(e^{ink_0d}) \right]'' + 2m\pi \right\} + i \left[ \ln(e^{ink_0d}) \right]' \quad (3.34)$$

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (3.35)$$

$$\epsilon = n / Z \quad (3.36)$$

$$\mu = nZ \quad (3.37)$$

Son olarakta yukarıda kırılma indisinin formülasyonu verilmiştir. Ayrıca dielektrik sabiti, manyetik geçirgenlik ve kırılma indisi değerlerinin birbirleriyle olan ilişkisinde formülasyonlarla açıklanmıştır. Bu ifadelerde Z devre empedansına,  $\epsilon_r$  dielektrik sabitine,  $\mu_r$  manyetik geçirgenliğe, n kırılma indisine, d kalınlığa,  $k_0$  dalga sayısına,  $S_{11}$  yansıma katsayısına,  $S_{12}$  iletim katsayısına eşittir.

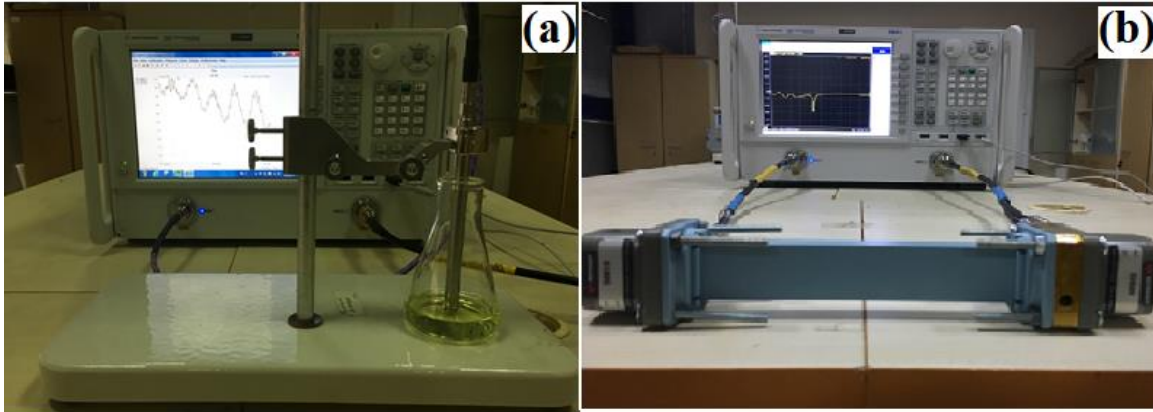
### 3.6. Tasarlanan Sensör Yapıları, Üretim ve Ölçüm Cihazları

Bu tez çalışmasını gerçekleştirmek için birbirinden farklı olacak şekilde yapılar dizayn edilmiştir ve her bir sensör yapısının kullanım amacı şu şekildedir;

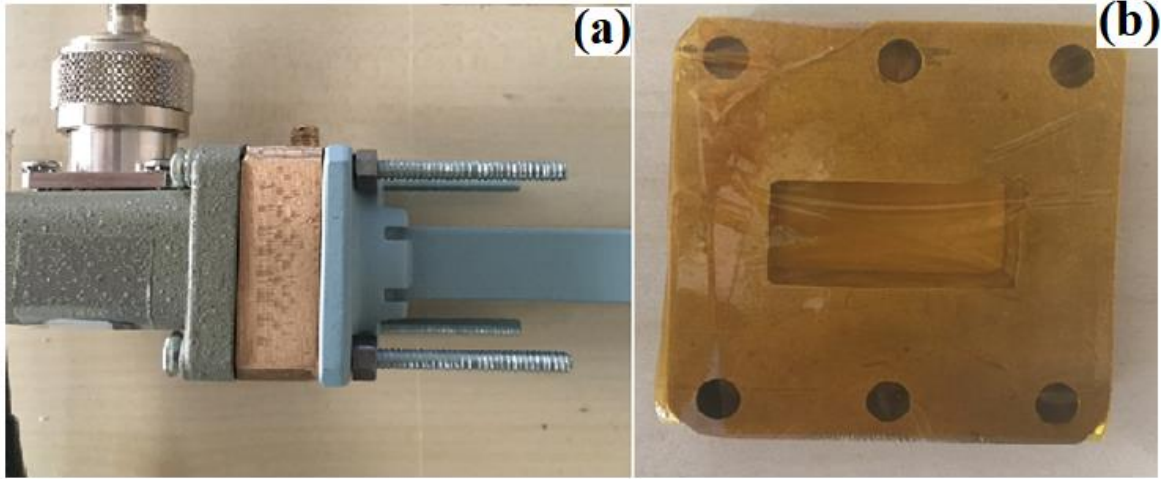
- 4 farklı dikdörtgen yarı halkadan oluşan yapı farklı inşaat malzemelerini birbirinden ayırmak için kullanılmıştır.
- S ve O şeklindeki rezonatörlerin oluşturduğu yapı tehlikeli maddelerin birbirinden ayırt edilmesi ve derişim tespit çalışması için kullanılmıştır.
- İç içe geçmiş kare ve dairesel rezonatörlerden oluşan yapı zeytinyağı, benzin ve mazotta meydana gelen hileleri tespit için kullanıştır.
- İç içe geçmiş kare halka ayırık şekillerden oluşan yapı endüstriyel trafo yağının tespitinde ve derişim oranı tespitinde kullanılmıştır

- İletim hattı şeklindeki yapı kalınlık, dielektrik sabiti, manyetik geçirgenlik ve kayıp tanjant karakterizasyonu çalışması için kullanılmıştır
- Ayrık halka şeklinde kullanılan yapı inşaat malzemelerinde hasarsız tespit çalışmaları için kullanılmıştır.
- 3 dikdörtgen yapısının yan yana dizilmesiyle oluşan yapı değişik kimyasal malzemelerin derişim tespitinde kullanılmıştır.

Simülâtör programında tasarlanan yapı tabanlı LPKF-E33 baskı devre cihazı kullanılarak üretilmiştir. Yayılım parametrelerini ölçmek için PNA-L ve Rohde-Schwartz ZVL vektör ağ analizörleri Şekil 3.3b’de gösterildiği gibi kullanılmıştır. Ayrıca sıvı tutucu olarak kullanılmak üzere sıvı haznesi tasarlanmıştır. Sıvı sızmasını önlemek için Şekil 3.4b’de gösterildiği gibi çevresi kapton bantla sarılmıştır. Sıvı numunelerin dielektrik sabiti değerlerini ölçmek için Şekil 3.3a’da görüldüğü üzere prob kit kullanılmıştır. Dalga klavuzu-numune tutucu bağlantısı 3.4a’da gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Dielektrik ölçüm cihazı (a) ve vektör ağ analizörü (b)



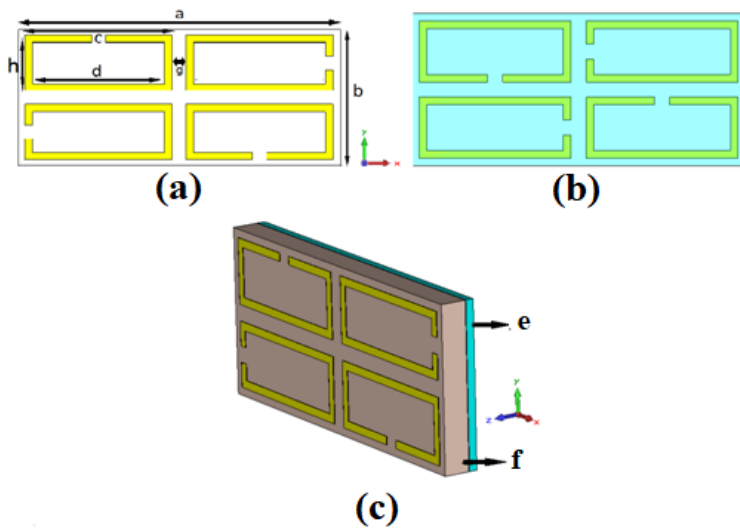
Şekil 3.4. Sıvı tutucu-dalga klavuzu adaptör bağlantısı (a) ve geliştirilen sıvı tutucu yapısı (b)

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1 Yapı Malzemeleri İçin Bakışsız Metamalzeme Tabanlı Sensör Uygulamaları

#### 4.1.1 Tasarım ve simülasyon düzeneği

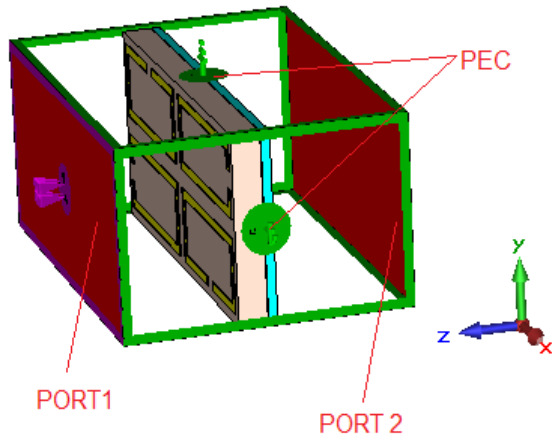
Bu çalışmada bakışsız metamalzeme tabanlı sensör tasarımı, Şekil 4.1'de gösterildiği gibi ayırık halka (SRR) yapılarından oluşmaktadır. Dikdörtgen şeklinde oluşturulan rezonatörler, X bant dalga kılavuzu ile uyumluluk göstermesi için  $a = 22$  mm ve  $b = 10$  mm boyutlarında FR-4 tip dielektrik malzemesinin üzerine basılmıştır. FR-4 dielektrik malzemesinin kalınlığı 1,6 mm ve dielektrik sabiti 4,3 ve kayıp tanjant değeri 0,025 değerine eşittir. Metalik rezonatörlerde, 0,035 mm kalınlığa ve  $5,8 \times 10^7$  S/m iletkenliğe sahip bakır malzeme kullanılmıştır. Sensör yapısı,  $h = 5$  mm yüksekliğe ve  $c = 10$  mm genişliğe sahip dikdörtgen şeklinde ayırık halka rezonatörlerden oluşur. Rezonatörlerin her biri arasında 1 mm'lik bir boşluk vardır. Önerilen yapının profil görünümü Şekil 4.1c'de verilmiştir ve boyutları,  $a = 22$  mm,  $b = 10$  mm,  $c = 1$  mm,  $d = 4$  mm,  $e = 0.4$  mm,  $f = 1,6$  mm,  $g = 1$  mm ve  $h = 4$  mm, olacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 4.1a ve Şekil 4.1b'de görüldüğü gibi, ön ve arka yan rezonatörleri asimetrik olarak yerleştirilmiştir. Bu asimetrik görünüm nedeniyle, sağ ve sol dairesel olarak kutuplanmış parçalardan oluşan bakışsızlık ve döndürülmüş elektromanyetik dalga oluşmuştur.



Şekil 4.1. Önerilen bakışsız metamalzeme tabanlı sensör yapısı

Önerilen yapının, rezonans frekansı topolojisi,  $1 / \sqrt{LC}$  denklemi ile açıklanabilir ve bu parametre sensör uygulamalarında en önemli parametrelerden biridir. Sensör tabakası rezonatörlerin arka kısmına yerleştirilir ve kalınlığı 0,53 mm'dir. Bu boyut özellikle en iyi hassasiyet için seçilmiştir.

Önerilen bakışsımsız metamalzeme sensör uygulamasının çalışma prensibi yansıma parametresinin büyüklüğü ile dielektrik sabiti arasında lineer bir ilişki ile açıklanabilir. Sayısal simülasyonlar işlemleri için FIT benzetim kullanılmıştır. Önerilen yapının sınır koşulları Şekil 4.2'de görüldüğü üzere Z-yönünde açık alan iken, X ve Y yönlerinde mükemmel elektrik iletken (PEC) olarak ayarlanmıştır. Ayrıca, bu yapı için X bant dalga kılavuzu boyutları 22,86 mm'ye 10,16 mm olacak şekilde ayarlanmıştır.

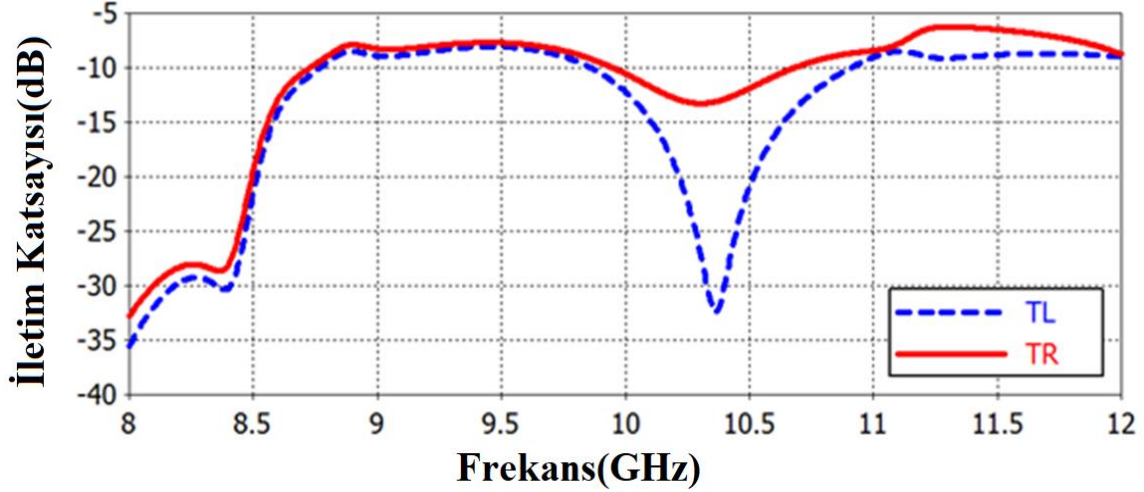


Şekil 4.2. Önerilen bakışsımsız metamalzeme için uygulanan sınır koşulları

#### 4.1.2. Bakışsımsızlık değeri analizi

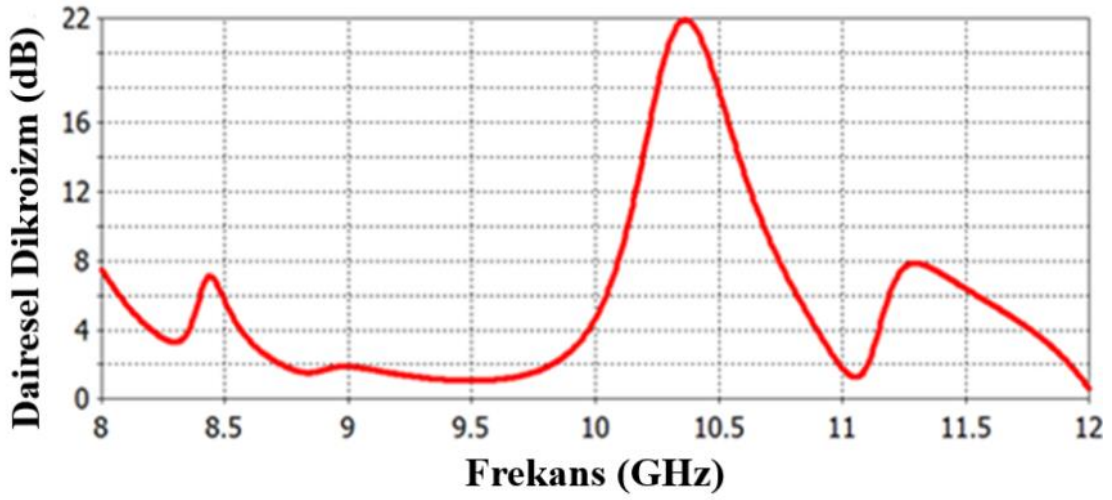
Bu bölümde, PEC-PEC sınır koşulları altında Sonlu İntegrasyon Tekniği kullanan mikrodalga yazılım programı yardımıyla önerilen malzemenin sağ el polarize dalgaya (RCP-Right Circular Polarization) ve sol el polarize dalgaya (Left Circular Polarization) verdiği tepkiler ölçülmüştür. Şekil 4.3'te, önerilen yapının RCP ve LCP dalgası kullanılarak iletim parametresi değerleri sunulmaktadır. Bakışsımsız metamalzeme yapılarının en önemli özellikleri, bakışsımsız ortamda meydana gelen çapraz bağlanma etkisinden dolayı RCP ve LCP için verilen tepkinin birbirinden farklı olmasıdır. Şekil 4.3'ten, 10,35 GHz'de aynı rezonans frekansına sahip olmasına rağmen, bakışsımsız ortam

özelliklerinden dolayı sağ ve sol polarize dalganın iletim parametresi değerinde ortalama 19 dB farklılık meydana geldiği görülmektedir.



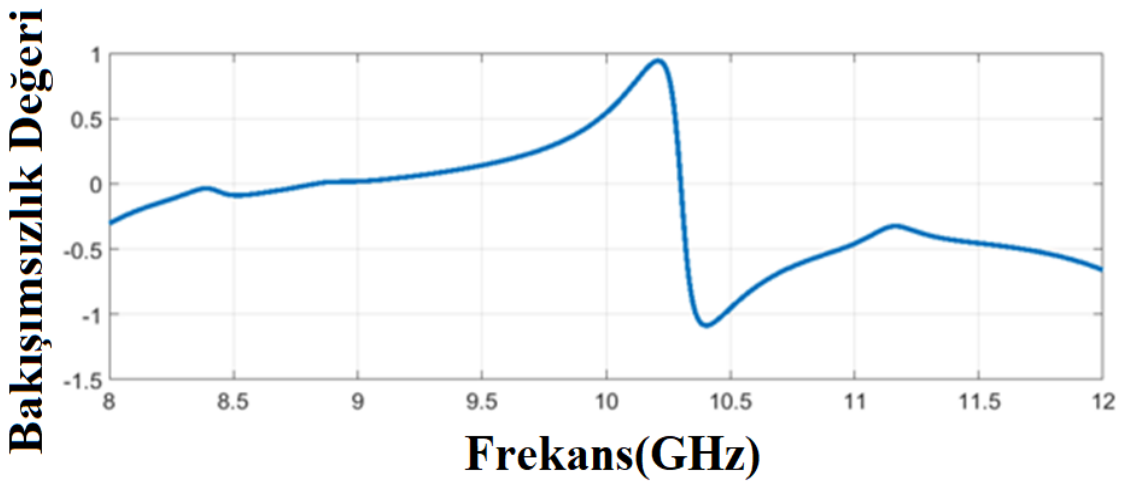
Şekil 4.3. Önerilen bakışsımsız metamalzeme yapısının sol el polarize dalgaya (TL) ve sağ el polarize dalgaya (TR) verdiği tepki

Ortamın bakışsımsız davranışı nedeniyle, LCP ve RCP değerleri birbirinden farklı olarak meydana gelecektir. Bu, bakışsımsız ortamda var olan iki polarizasyonun emiliminde ve bozulmasında farklılık yaratır. Bu durum dairesel dikroizm veya elliptiklik olarak adlandırılır ve  $\eta = \frac{1}{2} * \sin^{-1}((|T_L|^2 - |T_R|^2) / (|T_L|^2 + |T_R|^2))$  denklemi ile elde edilir. Bakışsımsız ortamın empedans değeri aynı olduğundan, iki dalganın yansımaya katsayısı değerleri birbirine eşit olacaktır. Şekil 4.3'te verilen grafikte, RCP ve LCP dalgaları için iletim parametresi değeri önemli ölçüde birbirinden farklıdır. İki iletimin büyüklükleri arasındaki bu fark, dairesel dikroizm olarak Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Dairesel dikroizm'in bir diğer özelliği ise lineer polarize olarak ilerleyen dalganın polarize yönünün dönmesidir ve bu döndürmeye optiksel etkinlik adı verilir.



Şekil 4.4. Önerilen bakışimsız metamalzeme yapısının Circular Dichroism değeri

Bakışimsızlık değeri, iletilen dalganın RCP ve LCP değerlerini kullanarak  $Re(\kappa) = (\Phi_L - \Phi_R + 2m\pi) / (2k_0d)$ ,  $Im(\kappa) = (\ln|T_L| - \ln|T_R|) / (2k_0d)$  denklemiyle elde edilir bu eşitlikte  $k_0$  dalga sayısı ve  $d$  malzemenin kalınlığını ifade etmektedir. Önerilen yapının bakışimsızlık değeri grafiği Şekil 4.5'te verilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi 8-12 GHz frekans aralığında sensör yapısının bakışimsızlık değeri gösterilmiştir. 10,34 GHz'de bakışimsızlık değerinin maksimum noktaya çıktığı görülmektedir.

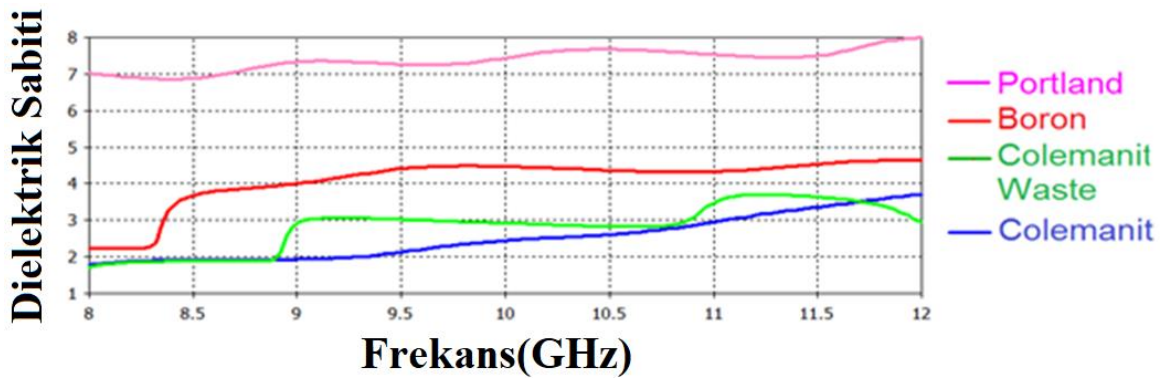


Şekil 4.5. Önerilen sensör yapısının bakışimsızlık değeri grafiği



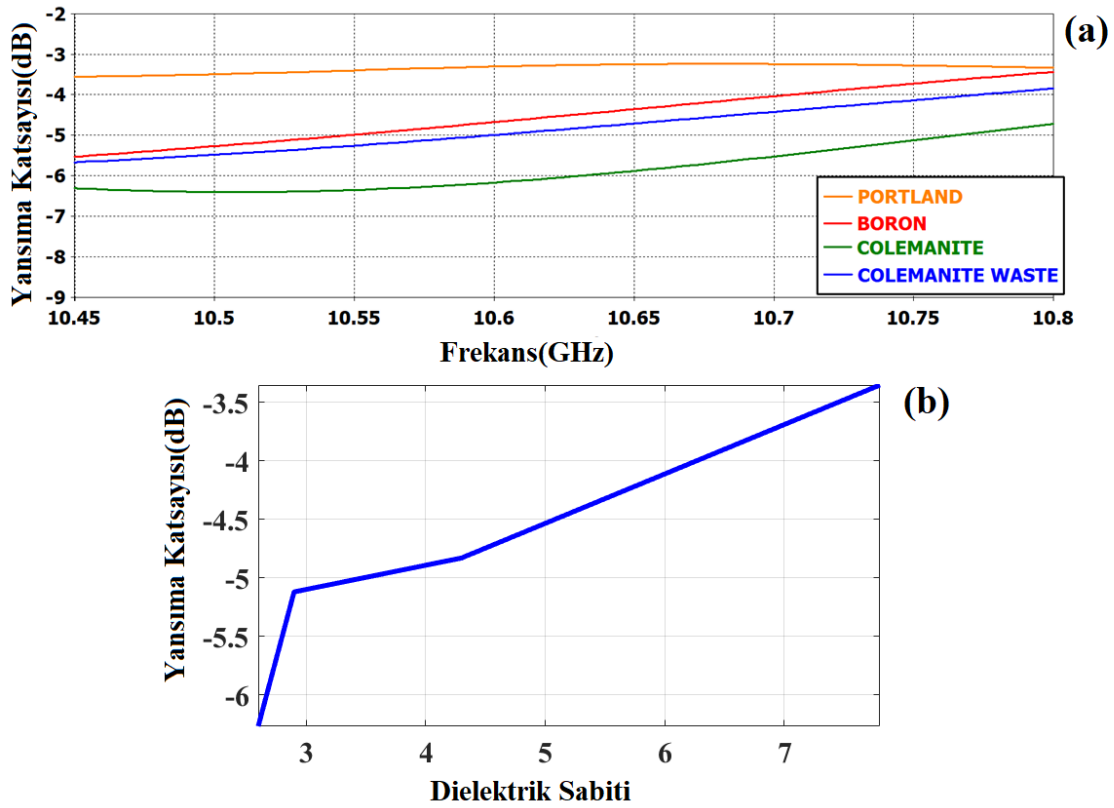
### 4.1.3. Bakımsız metamalzeme tabanlı sensör uygulaması

Şekil 4.6’da gösterilen grafikte birbirinden ayırt edilecek olan inşaat yapılarının dielektrik sabiti değerleri verilmiştir. Dielektrik ölçümleri network analyzer cihazına bağlı iki horn antenle boş uzay ortamında yapılmıştır. Yapılar oluşturulduktan sonra horn antenin önüne eşit mesafede yerleştirilmiştir ve tüm malzemelerin ölçümleri eşit koşullar altında yapılmıştır. Portland için 7-8, boron için 2-4, kolemanit posası için 2-3 ve kolemanit için ise 2-3,5 arasında dielektrik sabiti değerleri değişmektedir.



Şekil 4.6. Birbirinden ayırt edilecek farklı inşaat malzemelerinin dielektrik sabiti değerler

Şekil 4.7’de dielektrik sabiti değerleri ölçülen malzemelerin simulasyon ortamında S11 yansıma parametresi sonuçları verilmiştir. Elde edilen dielektrik sabiti değerleri benzetim programına aktarılarak en uygun hassaslıkta geliştirilen sensör yapısının arka kısmına yapılar yerleştirilerek aşağıdaki S11 yansıma grafiği elde edilmiştir. Her bir numune için S11 yansıma parametresi değeri birbirinden farklı çıkmıştır ve dielektrik sabiti büyüklüğüne göre lineer sonuçlar elde edilmiştir. Buda sensör yapısının sağlıklı bir şekilde bu numuneleri birbirinden ayırt edebileceğini göstermektedir.



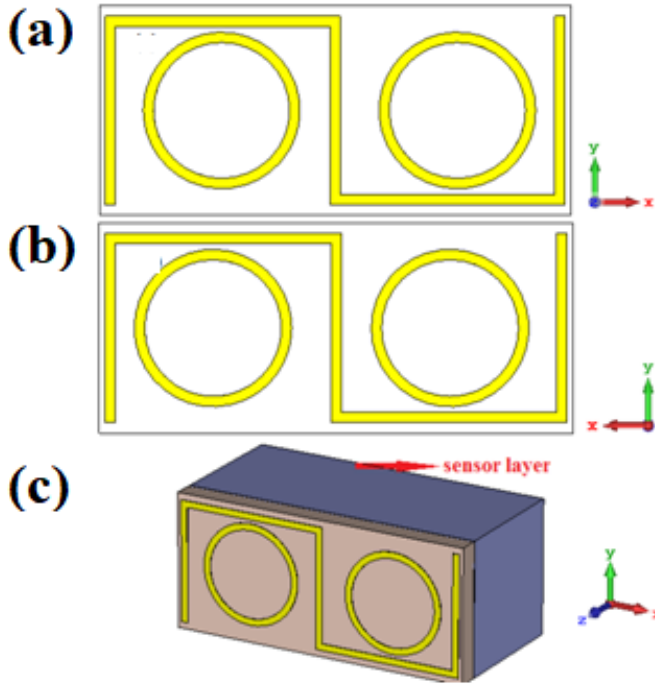
Şekil 4.7. Birbirinden ayırt edilecek farklı inşaat malzemelerinin S11 yansıtma katsayısı değerleri (a) ve dielektrik sabiti ve dB değeri arasındaki lineerlik ilişkisi (b)

## 4.2. Metamalzeme Tabanlı Mikroakışkan Sensör Uygulaması

### 4.2.1. Tasarım, simülasyon ve üretim düzeneği

Bu çalışmada, bakışimsız metamalzeme tabanlı sensör çalışması, saf suyla birleştirilen kimyasal maddelerin derişim oranını tespit etmek ve saf olan tehlikeli kimyasal maddelerin birbirinden ayırt edilmesi için tasarlanmıştır. Bu örnekler saf metanol, etanol, aseton, amonyak ve (%10, %50 ve %90) hacim oranına sahip izopropil alkol ve asetonur. Önerilen yapı tasarlandıktan sonra örneklerin dielektrik sabiti değerleri Agilent 85070E dielektrik prob kiti ile ölçülmüş ve simülasyon çalışmaları başlatılmıştır. Bu çalışmada uygulanan frekans bandı 8 GHz ve 12 GHz arasında X-Band iken, önerilen yapının hassasiyetini arttırmak için mükemmel elektrik iletkeni (PEC) sınırları uygulanmıştır. Kolay uygulama için, PEC sınırı altında ve X bandı dalga kılavuzu boyutları ile uyumlu, sıvıların içine doldurabileceği bir hazne geliştirilmiştir.

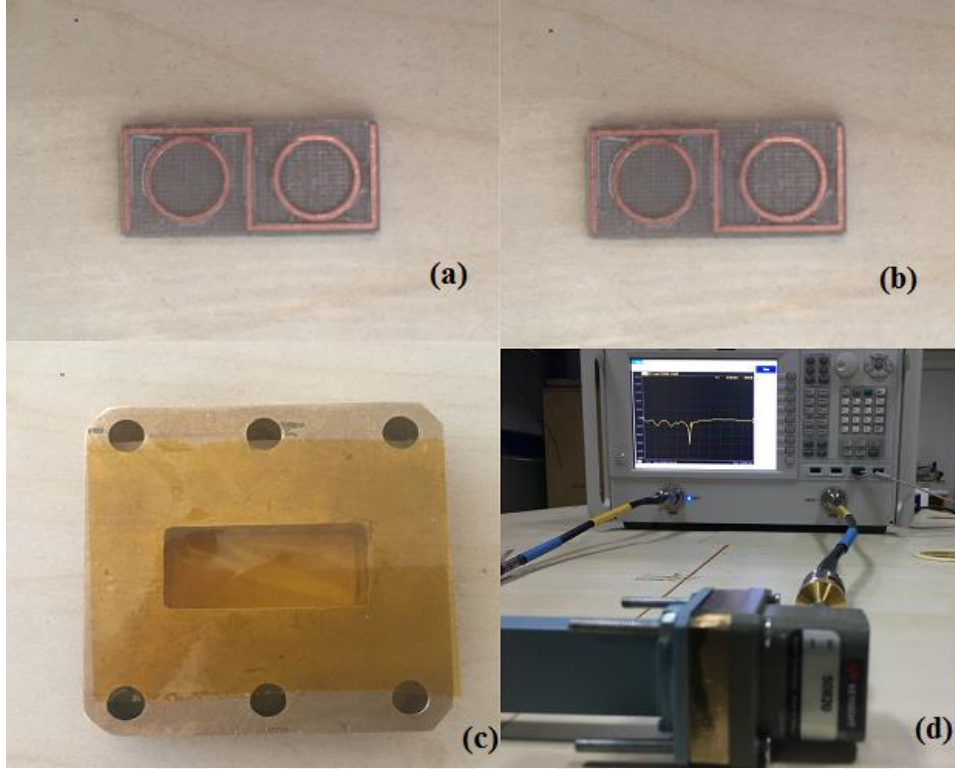
Alkollerde saflık oranlarını algılayan önerilen yapı şekil 4.8'de sunulmuştur. Şekilden, yapı ile birlikte yerleştirilen bir S şekilli rezonatörün ve bu S şekil rezonatörünün iki tarafına yerleştirilmiş iki özdeş dairenin olduğu görülebilir. Bu yapının oluşturulmasında parametrik çalışmalardan yararlanılmıştır. Ara malzeme olarak dielektrik sabiti 2,5 ve tanjant 0,0022 kaybına neden olan Arlon Diclac 527 kullanılmıştır. Bakışimsız ortam oluşturmak için Şekil 4.8a ve Şekil 4.8b'de görüldüğü üzere arka ve ön kısma yerleştirilen rezonatörler arasında  $180^\circ$  açı farkı vardır. Kullanılan rezonatörler, kalınlığı 0,035 mm ve iletkenliği  $5,8 \times 10^7$  S/m olan bakırdan meydana gelmektedir. Ayrıca Şekil 4.8c'de sensör kısmının arka tarafına sıvı numunelerini doldurmak üzere bir sıvı haznesi yerleştirilmiştir.



Şekil 4.8. Önerilen bakışimsız metamatizeme tabanlı sensör yapısı

Önerilen yapı LPKF Laser & Electronic AG, Promat E33 model Bilgisayarlı Sayısal Kontrol (CNC) ve baskılı devre kartı (PCB) makinası kullanılarak üretilmiştir. Üretilen yapının önden ve arkadan görünümü Şekil 4.9a ve Şekil 4.9b'de verilmiştir. Deneysel çalışmaları laboratuvar ortamında uygulamak için, Şekil 4.9c'de gösterilen sıvı haznesi tasarlanmıştır. Sıvıları doldurmak için sıvı haznesinin üst kısmında bulunan bir delik vardır ve bu delik daha sonra vida ile kapatılır. Ayrıca sızıntıları önlemek amacıyla haznenin etrafı  $25\mu\text{m}$  kapton film ile hava almayacak şekilde kapatılır. Üretilen numune tutucunun boyutları, X bandındaki dalga kılavuzu boyutlarına uygun olacak şekilde 22,86 mm ve

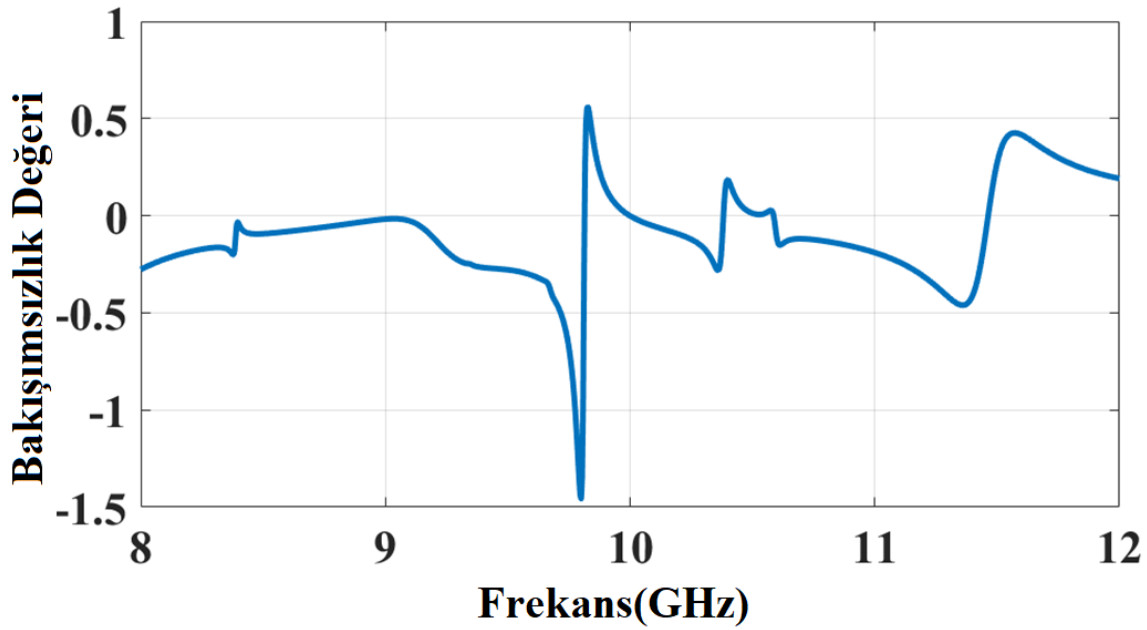
10,16 mm olarak tasarlanmıştır ve kalınlığı simülasyon kısmında olduğu gibi 10 mm'dir. Son olarak Şekil 4.9d'de network analyzer ve dalga klavuzu bağlantısı verilmiştir.



Şekil 4.9. Önerilen bakışimsız metamalzeme tabanlı sensör yapısının ön (a) arka (b) görüntüsü, sıvı hazanesi-kapton bant (c), network analyzer-dalga klavuzu bağlantısı (d)

#### 4.2.2. Bakışimsızlık değeri analizi

Önerilen yapının bakışimsızlık değeri grafiği Şekil 4.10'da gösterilmiştir. 8 GHz -9,90 GHz frekansında aralında 0 ile 0,25 gibi bakışimsızlık değeri elde edilirken 9,92 GHz frekanslarında 0,5 ve -1,5 gibi yüksek bakışimsızlık grafiği elde edilmiştir. Bunlara ek olarak yaklaşık olarak 11,5 GHz frekanslarında 0,5 gibi bir bakışimsızlık değeri elde edilmiştir.

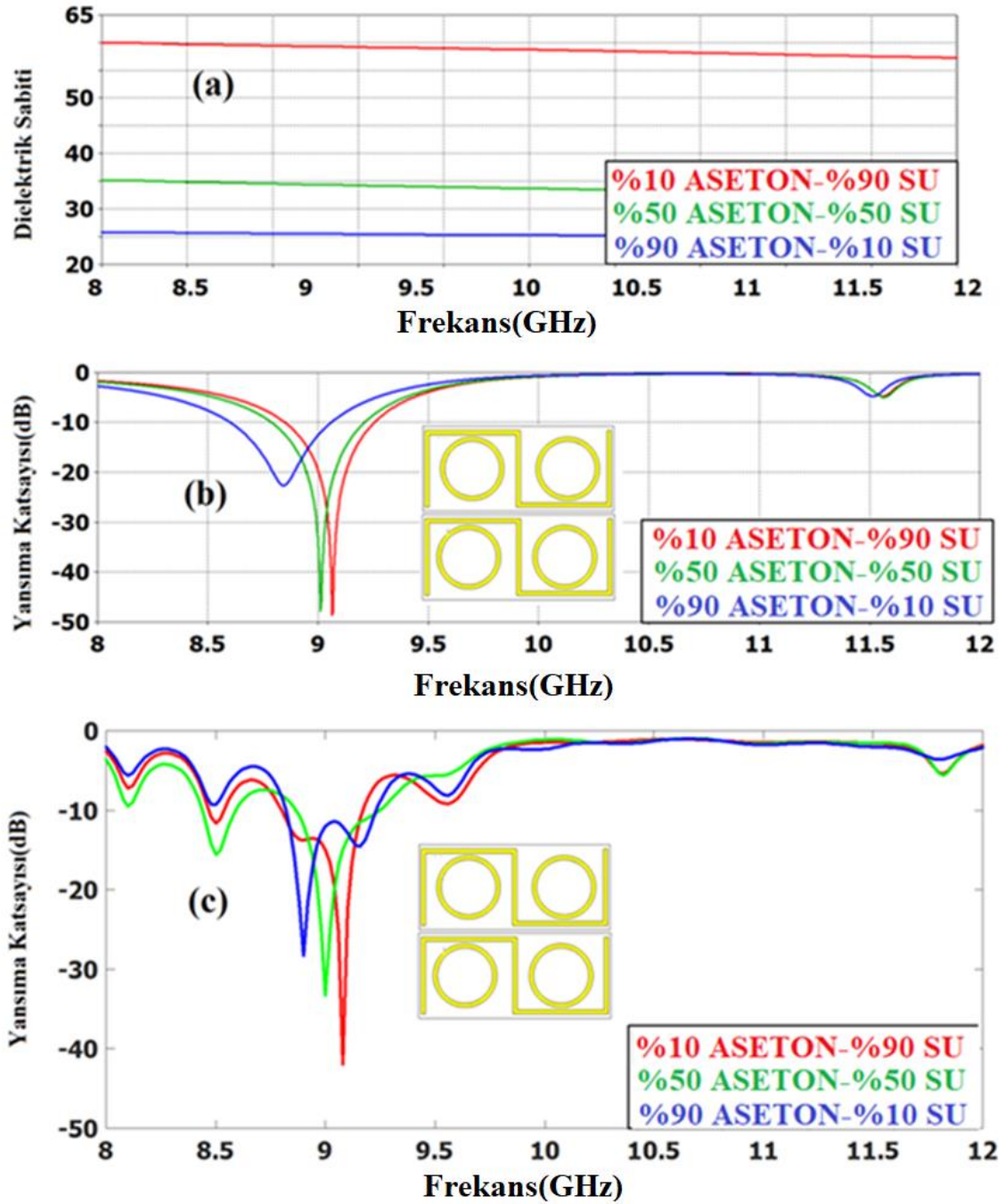


Şekil 4.10. Önerilen yapının bakışsızlık değeri grafiği

### 4.2.3. Mikroakışkan sensör uygulamaları

#### Aseton Derişim Tespiti

%10, %50 ve %90 derişime sahip aseton numuneleri laboratuar ortamında saf su kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numunelerin dielektrik sabiti değerleri Şekil 4.11a'da görüldüğü üzere elde edilmiştir. %10, %50 ve %90 aseton içeren örneklerin dielektrik sabitleri ölçülmüştür. %10, %50 ve %90 aseton için dielektrik sabiti değerleri sırasıyla 62-50, 37-25 ve 27-22 aralığında frekansa bağlı olarak değişmiştir. Simülasyon sonuçlarının elde edilmesi için prob kiti setinden alınan numunelerin tüm dielektrik özellikleri benzetim programında tanımlanmıştır. Asetonun farklı oranları için rezonans frekansında değişiminin meydana geldiğini gözlemlenmiştir. Asetonun saflığı arttıkça, rezonans frekansın değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. %10 %50 ve %90 için rezonans frekansları 8,85 GHz, 9,01 GHz, 9,07 GHz ve S11 değerleri -22 dB, -47dB, -48dB'dir. Toplam bant değişimi, %80 oranındaki aseton için 220 MHz'ye eşittir. Bu deneysel çalışma, farklı oran örnekleri kullanıldığında rezonans frekansı ile dielektrik sabiti arasında lineer bir ilişki olduğunu göstermektedir. Son olarak laboratuar ortamında hazırlanan numunelerin S11 yansıma parametresi ölçülmüştür ve Şekil 4.11c'de gösterilmiştir. Deneysel ölçüm ve simülasyon çalışmaları arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir.



Şekil 4.11. %10, %50 ve %90 oranındaki asetonun dielektrik sabiti (a), simülasyon (b) ve deneysel (c) grafiği

#### İzo propil alkol Derişim Tespiti

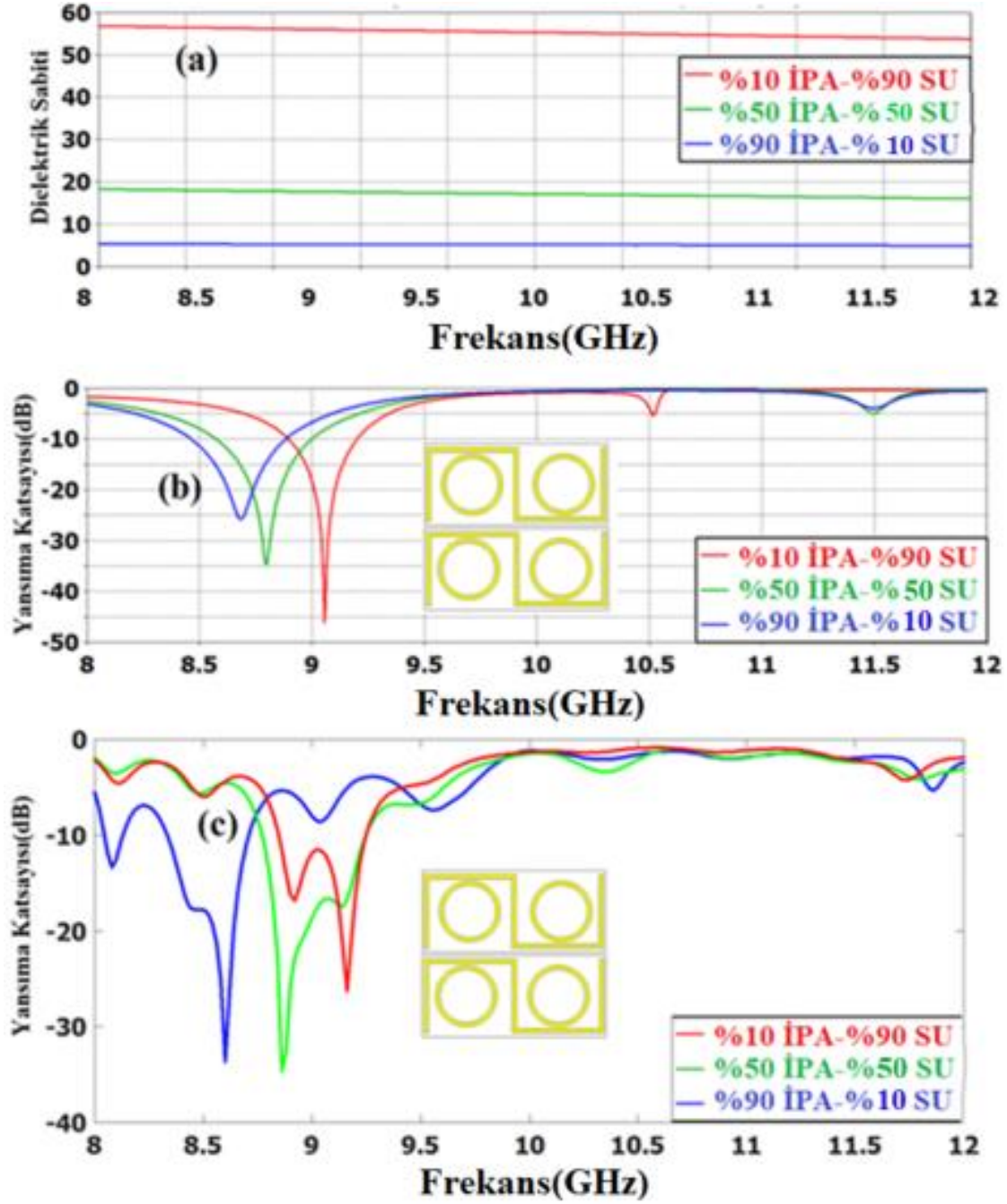
Şekil 4.12a’da dielektrik probe kit yardımıyla ölçülen dielektrik sabiti grafiği verilmiştir. %10, %50 ve %90 oranında derişime sahip izopropil alkol içeren örneklerin dielektrik sabitleri ölçülmüştür. %10, %50 ve %90 izopropil alkol için dielektrik sabiti değerleri

sırasıyla 58-47, 20-10 ve 6-4 aralığında frekansa bağılı olarak değişmiştir. İlk olarak, S11 yansıma parametrelerine sahip olmak için simülasyon programında numunelerin ölçülen dielektrik özellikleri tanımlanmış ve simülasyon sonuçları Şekil 4.12b'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi %10, %50 ve %90 saflık örnekleri için rezonans frekansları 8,68 GHz, 8,80 GHz ve 9,06 GHz'e eşittir ve S11 (dB) değerleri -25 dB, -35 dB, -47 dB'dir. Saflık oranı arttıkça rezonans frekansında geriye doğru kaymalar ortaya çıkmaktadır. Bu kaymanın nedeni olarak dielektrik sabiti değerlerinde meydana gelen değişikliğin sensör yapısında kapasitif etki yaratmasından dolayıdır. Ayrıca, toplam bant genişliği, saflık oranında %80 değişikliğe göre 380 MHz'ye eşittir. Son olarakta simülasyon sonuçları deneysel ortamda uygulanmış ve Şekil 4.12c'deki grafik elde edilmiştir. Simülasyon ve deneysel sonuçlar arasında çevresel ve üretimdeki hatalardan dolayı çok küçük farklılıklar vardır.

#### 5 Farklı tehlikeli maddelerin tespiti

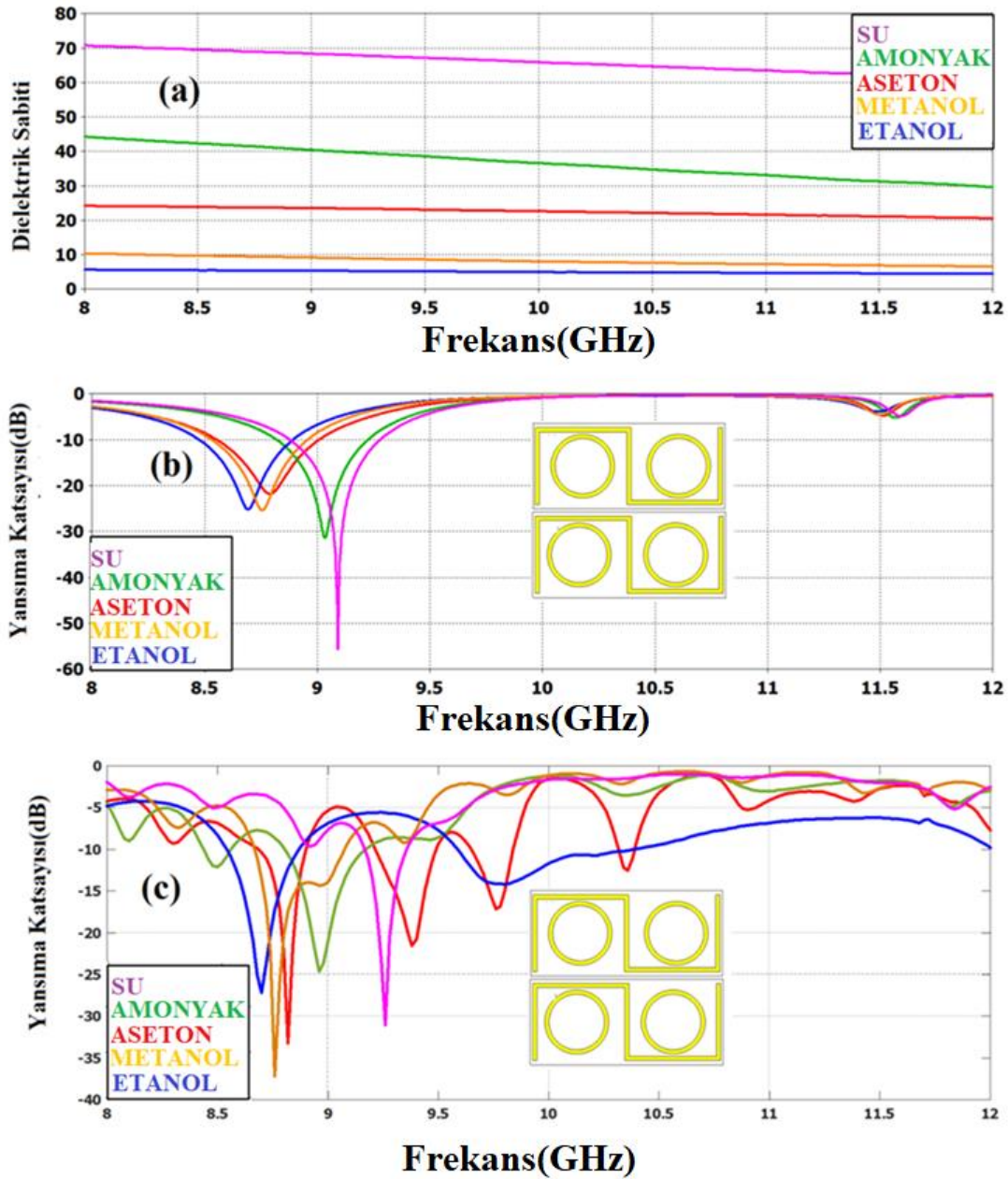
Bu bölümde birbirinden farklı tehlikeli maddelerin birbirinden ayırt edilebilmesi için bir çalışma yapılmıştır. Bunun için 5 farklı su, amonyak, aseton, etanol, metanol gibi sıvılar seçilmiştir ve öncelikle bunların dielektriksel özellikleri ölçülmüştür. Şekil 4.13a'da sıvıların dielektriksel özellikleri verilmiştir. Su, amonyak, aseton, etanol, metanol gibi saf kimyasal numunelerin dielektrik sabitleri 71-68, 45-39, 25-23, 10-9 ve 5-4 arasında değiştiği görülmektedir. Dielektrik özelliklerin ölçülmesinden sonra, deneysel ve simülasyon sonuçlarını elde etmek için ikinci adım başlatılmıştır. İlk olarak simülasyon çalışması gerçekleştirilmiş ve elde edilen S11 yansıma parametresi sonucu Şekil 4.13b'de gösterilmiştir. Her saf çözeltinin birbirinden farklı rezonans frekansı vardır. Su, amonyak, aseton, metanol ve etanol için bu değerler sırasıyla 9,1 GHz, 9,03 GHz, 8,8 GHz, 8,75 GHz, 8,69 GHz'dir. Ayrıca toplam bant genişliği 400 MHz'e eşittir. Son olarakta Şekil 4.13c'de de üretimi yapılan sensörle gerçekleştirilen ölçüm sonuçları vardır. Deneysel ve simülasyon sonuçları birbirine benzerdir ve üretim hatalarından dolayı farklılıklar mevcuttur.





Şekil 4.12. %10, %50 ve %90 derişime sahip izo propil alkolün dielektrik sabiti (a), simülasyon(b) ve deneysel sonuç (c) grafiği





Şekil 4.13. Saf su, amonyak, aseton, metanol ve ethanol'ün dielektrik sabiti (a), yansımaya parametresinin simülasyonu (b) ve deneysel (c) sonuçları

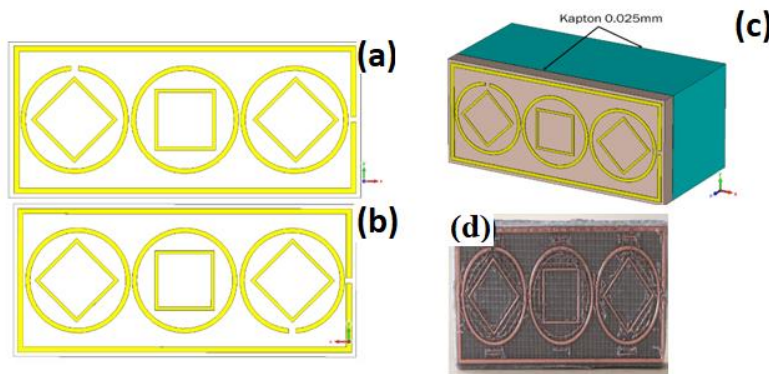
#### 4.3. Metamalzeme Tabanlı Sensörle Zeytinyağı ve Petrolde Hile Tespiti

Bu çalışmada, X bandında çalışacak şekilde tasarlanmış bir bakışsuz metamalzeme tabanlı sensör uygulaması önerilmiştir. Bu çalışmanın esas amacı, özellikle ülkemizde üretilen zeytinyağı, benzin ve mazot örneklerindeki hileleri bu sensör yardımıyla ortaya çıkarmaktır. Çalışmayı desteklemek için saf zeytinyağının içine %20 ve %40 oranında saf pamuk yağı katılmıştır. Ayrıca benzin ve mazotaki hileleri tespit edebilmek için %5 ve

%20 oranında saf etanol ve gaz yağı karışımına sahip benzin ve mazot elde edilmiştir. Örnekler hazırlandıktan sonra dielektrik sabitleri ölçülmüş ve en iyi hassaslıkta sensör yapısı tasarlanmıştır. Simülasyon sonuçlarını desteklemek içinde ayrıca laboratuarda ölçümler alınmıştır ve bu ölçümler ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

#### 4.3.1. Tasarım, simülasyon ve üretim düzeneği

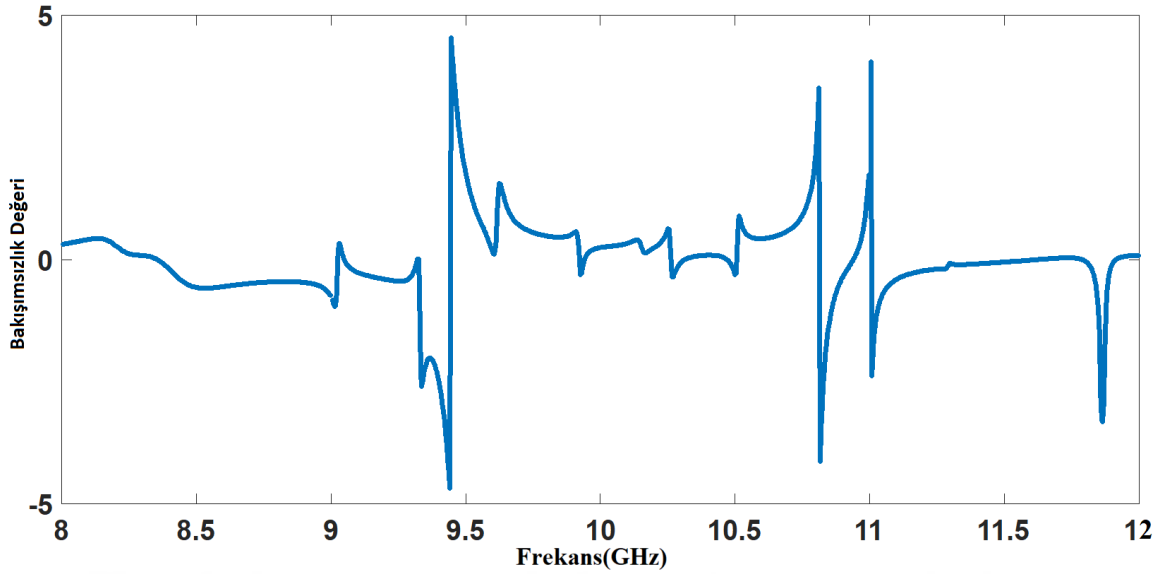
Şekil 4.14'te gösterildiği gibi yakıt ve zeytinyağı hile tespiti için önerilen metamalzeme tabanlı sensör yapısı sunulmuştur. Ara tabaka olarak Arlon DiClad 527 malzemesi kullanılmıştır. Önerilen yapının ön ve arka yüzleri Şekil 4.14a ve Şekil 4.14b'de gösterilmiştir. Ara malzeme olarak kullanılan Arlon DiClad 527 malzemesi 2,5'lik bir dielektrik sabitine ve 0,0022'lik tanjant kaybına sahiptir. Bu malzeme özellikle düşük kayıp değerinden dolayı seçilmiştir. Rezonatörler bakırdan oluşur ve 0,035 mm kalınlığa ve  $5,8 \times 10^7$  S/m iletkenliğe sahiptir. Ayrıca bunlara ek olarak üretimi yapılan sensör Şekil 4.14d'de gösterilmiştir. Oluşturulan bu yapı en yüksek hassaslığa sahip yapı olarak parametrik çalışmalarla belirlenmiştir.



Şekil 4.14. Dizayn edilen sensör yapısının ön (a), arka (b) ve profil görüntüsü (c), üretimi yapılan sensör yapısı (d)

#### 4.3.2. Bakışsızlık değeri analizi

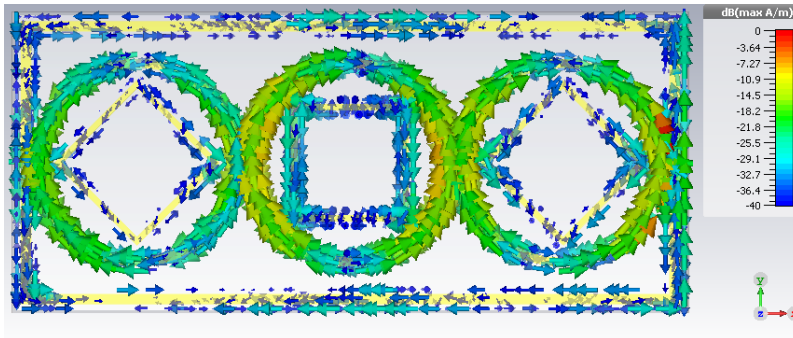
Üretimi yapılan malzemenin bakışsızlık değeri grafiği Şekil 4.15'te verilmiştir. Verilen şekilde görüldüğü üzere önerilen sensör yapısının 9,47 GHz, 10,68 GHz ve bazı diğer frekanslarda bakışsızlık değerinin yüksek çıktığı görülmektedir.



Şekil 4.15. Önerilen sensör yapısının bakışimsızlık değeri grafiği

### 4.3.3. Yüzey akım grafiğinin çıkarılması

Önerilen yapının fiziksel mekanizmasını daha iyi anlamak için yüzey akımı dağılım grafiği çıkarılmıştır. Şekil 4.16'de gösterildiği gibi, yüzey akımları manyetik alanın yönüne göre rezonatörün merkezinde yoğunlaşmıştır. Ayrıca, yüzey akımlarının yönüne baktığımızda rezonatörlerde paralel ve anti-paralel akımların olduğu görülür. Elektrik alanı nedeniyle paralel akımlar oluşurken, uygulanan elektromanyetik alanın manyetik alan bileşenine tepki nedeniyle anti-paralel akımlar meydana gelir.

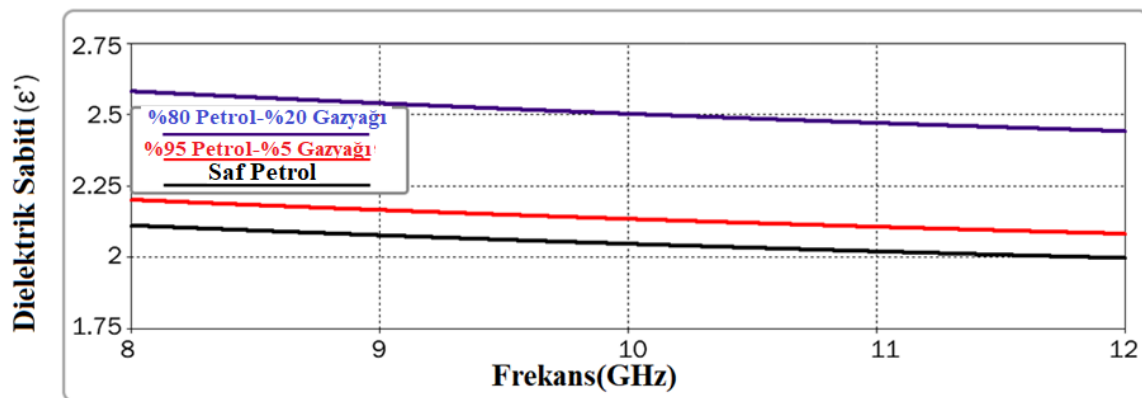


Şekil 4.16. Önerilen sensör yapısının yüzey akım dağılımı grafiği

#### 4.3.4. Hile tespiti için sensör uygulamaları

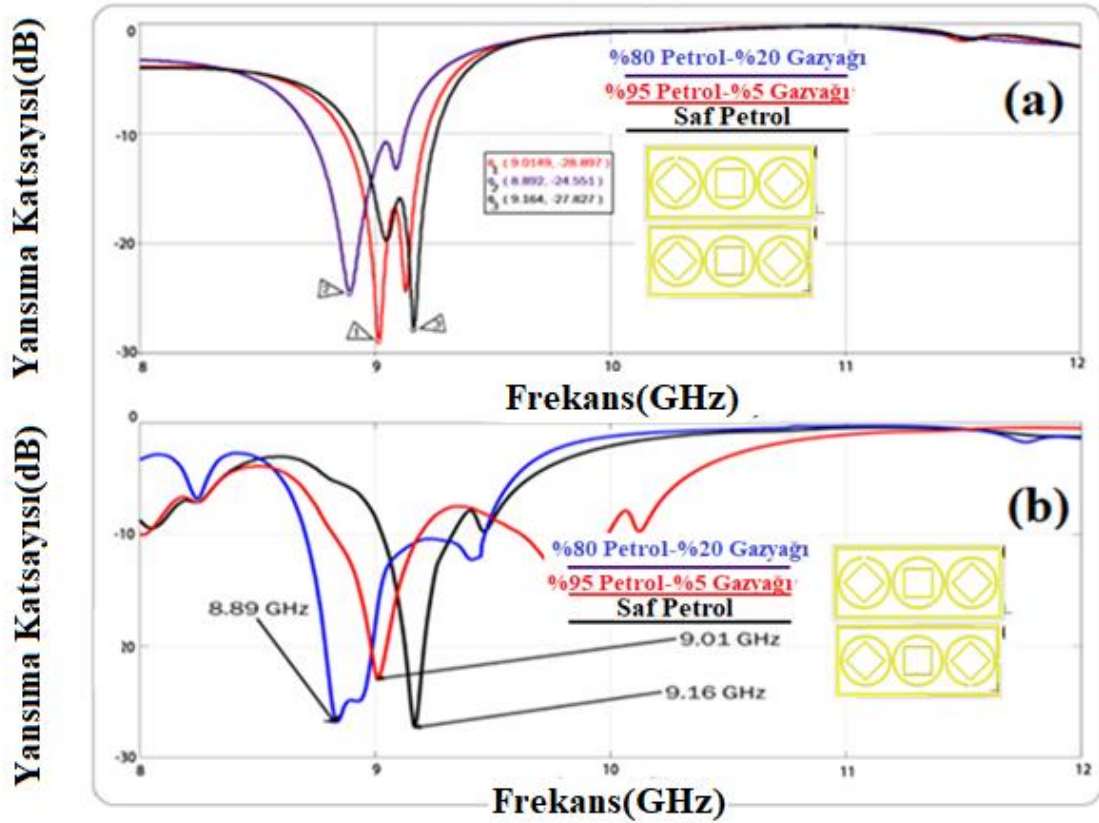
##### Petrol içine karıştırılan gazyağı oranının tespiti

Ülkemizde bulunan petrol gazyağına oranla çok daha pahalı olduğundan dolayı saf petrol maddi nedenlerden dolayı az miktarda gazyağı ile karıştırılır. Geliştirilen bu sensör yapısı benzin içine karıştırılan gazyağının tespitine olanak sağlamaktadır. İlk önce numuneler hazırlanmış ve kompleks dielektrik sabiti değerleri ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları, Şekil 4.17'de çizilmiştir. Saf benzinin dielektrik sabitinin reel kısmı 2,11'den, %95 ve %80'lik benzin-gazyağı karışımının ise sırasıyla 2,20 ve 2,57'den başlamıştır. Görüldüğü gibi, farklı oranlarda petrol ve gazyağı numunelerin dielektrik sabiti, karışım oranlarına göre değişmektedir.



Şekil 4.17. Petrol-Gazyağı karışımlarının dielektrik sabiti grafiği

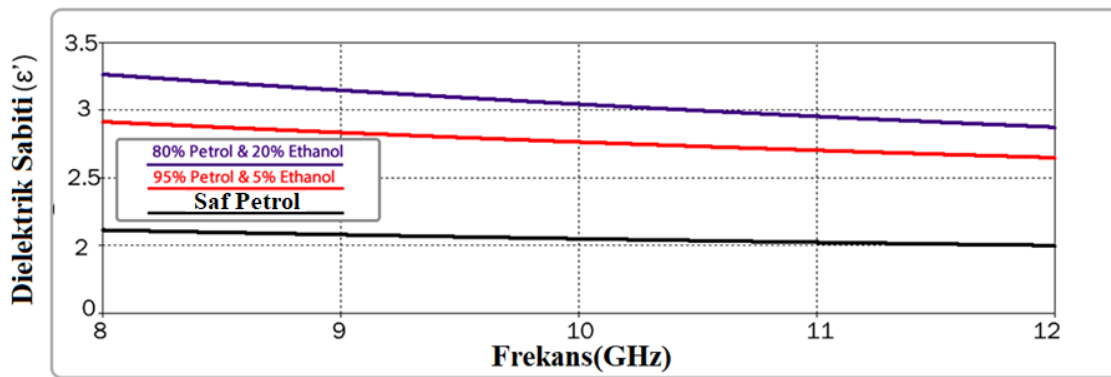
Önerilen yapı, benzetim programı kullanarak simüle edilmiştir. Simülasyon çalışması bize, Şekil 4.18'de gösterildiği gibi örneklerin yansıma katsayısı sonuçlarını ve rezonans frekans değişikliklerini göstermektedir. Şekil 4.18a'da gösterildiği gibi, rezonans frekansının 9,16 GHz'den 8,89 GHz'e kaydığı gözlemlenmiştir. Bu, benzin yakıtının içindeki kerosen miktarı oranı %20'ye çıkarıldığı zaman, 270 MHz'lik toplam bant genişliğinin olduğu anlamına gelir. Simüle edilen sonuçları doğrulamak için, Şekil 4.18b'de gösterildiği gibi bir dizi deneysel test gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları genellikle birbiriyle uyumludur, küçük farklar kalibrasyon ve test hatalarından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.18. Benzin-gazyağı karışımın yansima parametresi simülasyon (a) ve deneysel (b) sonuçları

#### Petrol içine karıştırılan etanol oranının tespiti

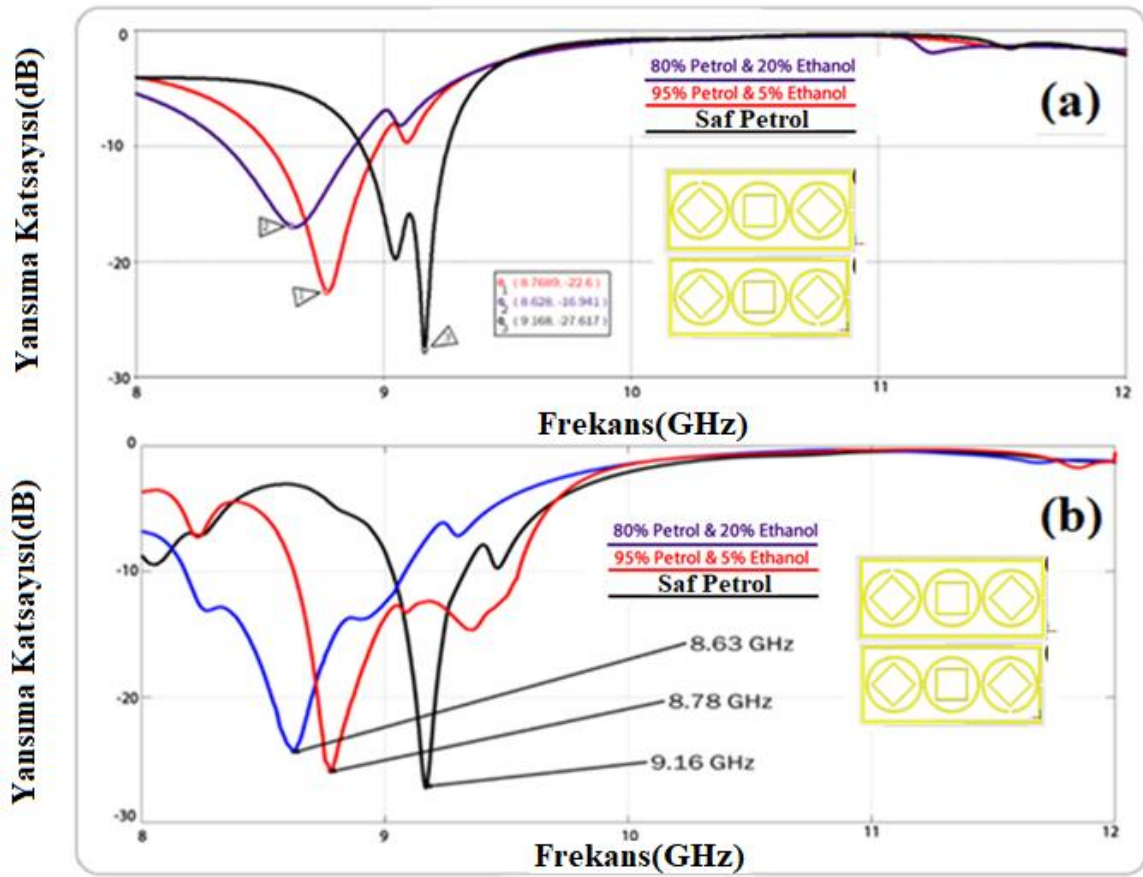
Etanol, sera etkilerini ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak için günümüzde sıkça kullanılan kimyasal ürünlerden biridir. Bu yüzden etanol birçok ülke tarafından yenilenebilir kaynaklardan üretilebildiği için alternatif bir yakıt olarak kullanılır. Etanolü yakıt olarak kullanan en popüler ülke Brezilyadır. Yenilenebilir yakıt birliği verilerine göre en son üretim oranı 30,23 milyar litredir [113]. Bu bölümde, önerilen sensör tasarımının, benzin etanol derişimi tespiti konusundaki çalışması açıklanacaktır. İlk olarak, Şekil 4.19'da belirtildiği gibi saf benzin, %5 etanol-%95 benzin ve %20 etanol-%80 benzin karışımlarının laboratuvar ortamında hazırlayarak numunelerin dielektrik sabitleri ölçülmüştür. Şekil 4.19'da gösterildiği gibi saf, %95 ve %80 yoğunluğa sahip benzin numunelerinin dielektrik sabitinin reel kısımları sırasıyla 2,10, 2,90 ve 3,25'ten başladığı görülmektedir.



Şekil 4.19. Petrol-Etanol karışımlarının dielektrik sabiti grafiği

Simülasyon ve deneysel çalışmalar için, elde edilen dielektrik sabiti verilerini benzetim programını kullanarak sisteme girilmiştir. En yüksek hassaslıkta sensör tasarımı oluşturulduktan sonra yansıma katsayısı parametresini elde etmek için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Geliştirilen sensörün yansıma katsayısı grafiği Şekil 4.20a'da sunulmuştur. Benzin ve %20'lik etanol derişimine sahip karışım için yansıma katsayısının rezonans frekansı, 8,97 GHz'den 8,62 GHz'e kaydığı gözlemlenmiştir. Bu kaymanın nedeni dielektrik sabiti değişimine bağlı olarak sensör yapısı üzerinde kapasitif etkinin değişmesiyle açıklanabilir. Elde edilen bant genişliği 350 MHz olarak tanımlanmıştır. Simüle edilen sonuçları deneysel olarak doğrulamak için, sıvı hazne tabakası %5 ve %20 derişime sahip benzin- etanol karışımı ile doldurulmuştur ve yansıma katsayısı Agilent VNA kullanılarak ölçülmüştür. Ölçülen yansıma katsayısı grafiği, Şekil 4.20b'de verilmiştir. Deneysel ve teorik sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir. Ancak aralarındaki küçük farklar üretim ve kalibrasyon hatalarından kaynaklanır.

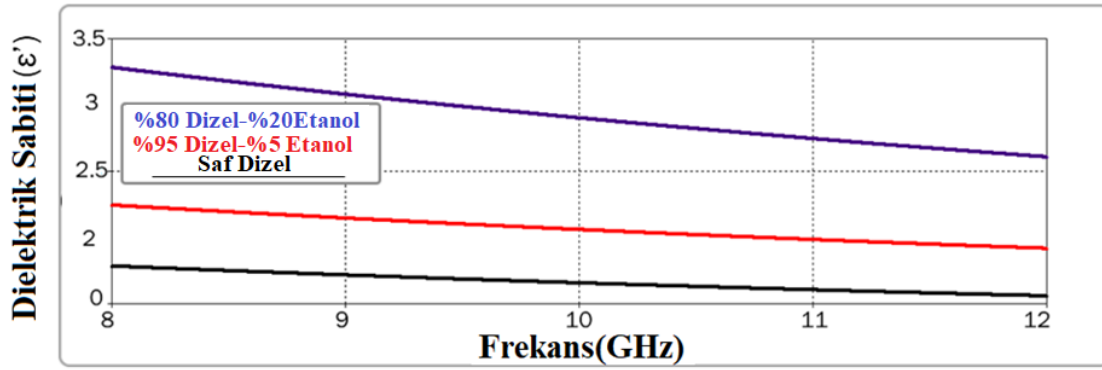




Şekil 4.20. Benzin-etanol karışımın yansımaya parametresi için simülasyon (a) ve deneysel (b) sonuçları

#### Dizel tipi yakıt içine karıştırılan etanol oranının tespiti

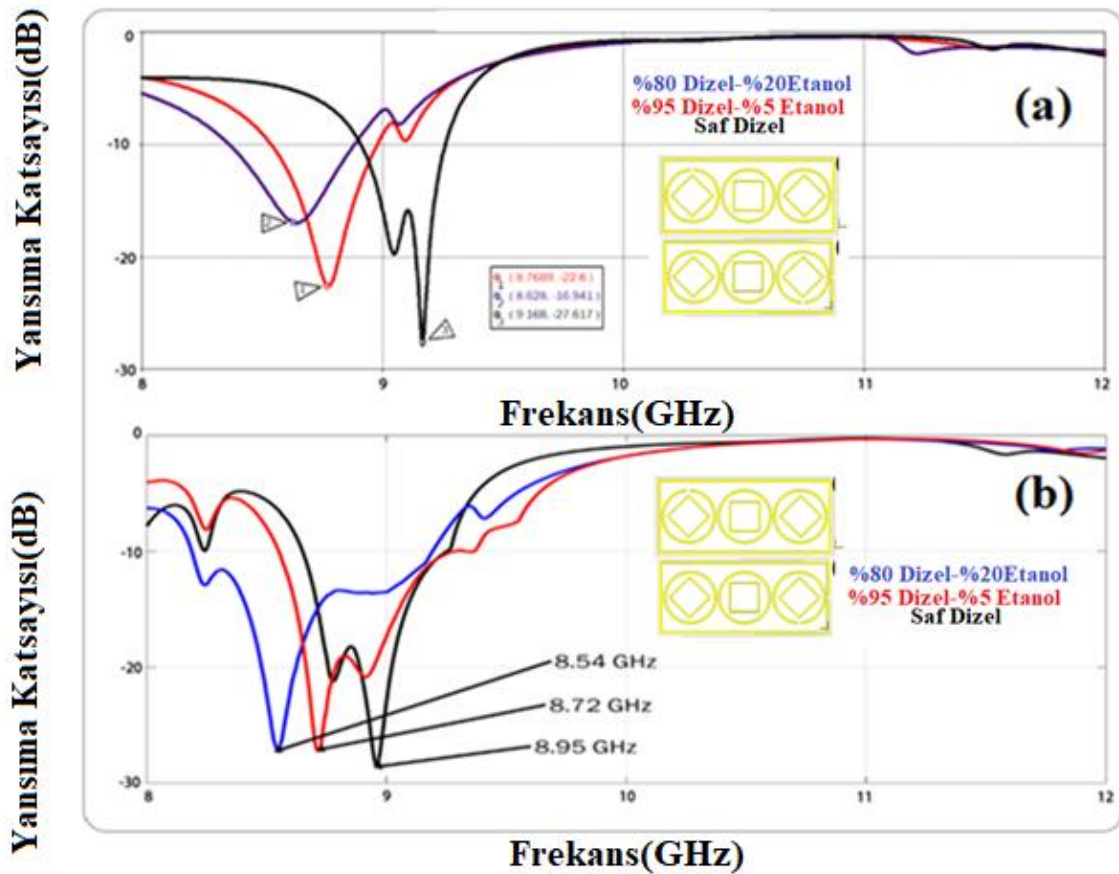
Çalışmanın bu bölümünde dizel içine farklı oranlarda karıştırılan etanol miktarını belirlemek için bir çalışma sunulacaktır. Öncelikle saf dizel ve %5, %20'lik etanol oranına sahip numuneler laboratuvar ortamında hazırlanmıştır ve dielektriksel özellikleri Şekil 4.21'de gösterildiği gibi ölçülmüştür. Saf dizelin dielektrik sabiti 2,63'ten başlarken %5 ve %20 oranında etanol içeren numunelerin dielektrik sabiti değerleri 2,86 ve 3,38'den başlamıştır.



Şekil 4.21. Dizel-Etanol karışımlarının dielektrik sabiti grafiği

Bu verilere sahip olduktan sonra yansıma katsayısı simülasyonu için elde edilen dielektrik sabiti değerleri simülasyon programına tanımlanır ve yansıma katsayısı değerini elde etmek için simülasyon çalışmaları yapılır. Bu sensör yapısının yansıma katsayısı grafiği Şekil 4.22a'da sunulmuştur. Yansıma katsayısı rezonans frekansı 8,94 GHz'den 8,56 GHz'e kaydırılmıştır. Bu kaymanın nedeni dielektrik sabiti değişimine bağlı olarak kapasitif etkinin değişimiyle açıklanabilir. Elde edilen bant genişliği 380 MHz'dir. Simüle edilen sonuçları deneysel olarak doğrulamak için, sıvı hazne tabakası %5 ve %20 derişime sahip dizel- etanol karışımı ile doldurulmuştur ve yansıma katsayısı Agilent VNA analizörü kullanılarak ölçülmüştür. Ölçülen yansıma katsayısı grafiği, Şekil 4.22b'de verilmiştir. Deneysel ve teorik sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir ancak aralarındaki küçük farklar üretim ve kalibrasyon hatalarından kaynaklanır.

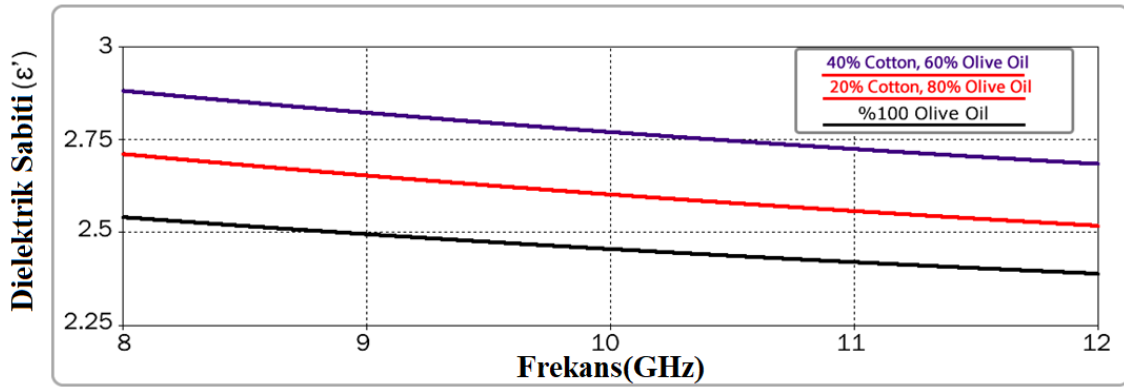




Şekil 4.22. Dizel-etanol karşının yansımaya parametresi için simülasyon (a) ve deneysel (b) sonuçları

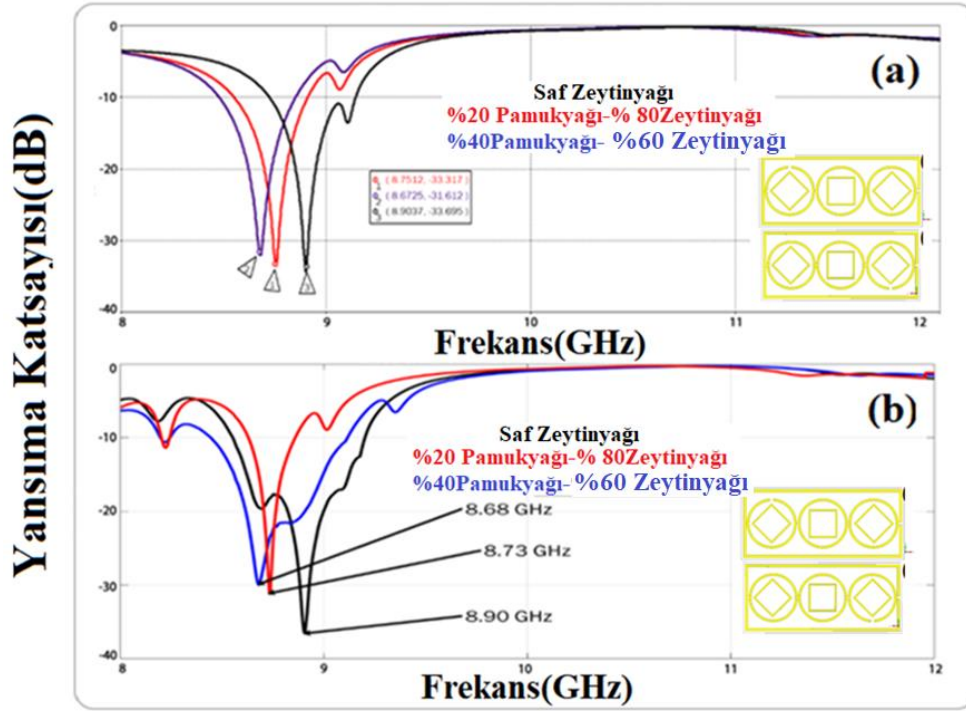
#### Zeytinyağı içerine karıştırılan pamuk yağı oranı tespiti

En son çalışmamızda saf zeytinyağını katkılı zeytinyağından ayırt edebilecek bir sensör uygulamasıdır. Bilindiği üzere zeytinyağı ülkemizde bolca kullanılan bitkisel yağdır. Üreticiler zaman zaman içine pamuk yağı katarak hilelere başvurmakta ve zeytinyağı kalitesini düşürmektedir. Bu çalışma için öncelikle saf zeytinyağı, %20 ve %40 orana sahip zeytinyağı-pamuk yağı karışımlarının dielektrik sabitleri ölçülmüştür. Şekil 4.23'te görüldüğü üzere dielektrik sabitleri saf zeytinyağı için 2,6'dan başlarken, %20 ve %40 zeytinyağı-pamukyağı karışımı için sırasıyla 2,70 ve 2,85'ten başlamaktadır. Yani artan pamuk yağı oranına karşılık, karışımın dielektrik sabiti de artmaktadır. Bu artmanın nedeni olarak pamukyağının dielektrik sabiti değerinin zeytinyağının dielektrik sabiti değerinden yüksek olmasıdır.



Şekil 4.23. Zeytinyağı-pamukyağı karışımlarının dielektrik sabiti grafiği

Dielektrik sabitleri ölçüldükten sonra elde edilen veriler simülasyon programına yüklenerek ve Şekil 4.24a'deki grafik elde edilmiştir. Şekil 4.24a'dan açıkça görüleceği üzere, %100 Zeytinyağının rezonans frekansı 8,90 GHz'dir, bu değer %80 Zeytinyağında 8,75 GHz'e ve %60 Zeytinyağında 8,67 GHz'e düşmektedir ve toplam bant genişliği 230 MHz olarak belirlenmiştir. Rezonans frekansında meydana gelen bu değişim dielektrik sabitine bağlı olarak değişen kapasitif etkiyle açıklanabilir. Simüle edilen sonuçları deneysel sonuçlarla doğrulamak için, kalibre edilmiş Network analizörü kullanılarak farklı derişimlerdeki zeytinyağı ve pamuk yağı karışımlarını deneysel olarak test edilmiştir. Deneysel çalışma sonuçları Şekil 4.24b'de verilmiştir. Bu sonuçlar simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırıldığında genellikle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.24. Zeytinyağ-pamukyağı karışımının yansımaya parametresi için simülasyon (a) ve deneysel (b) sonuçları

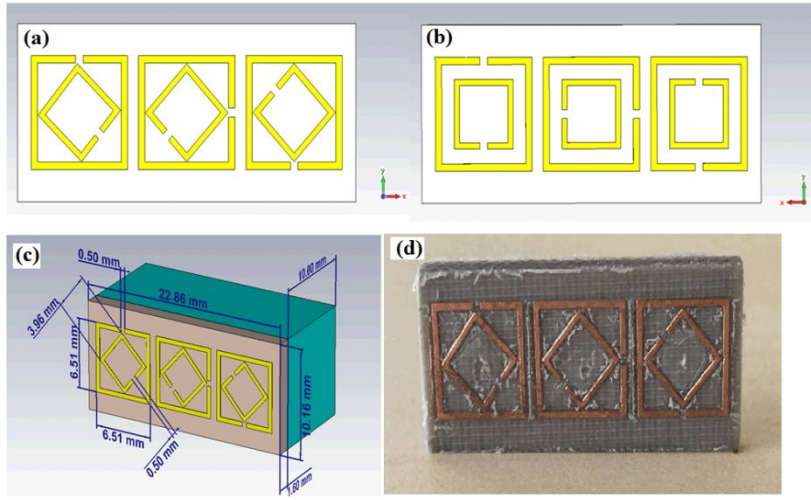
#### 4.4. Transformator Yağı ve Mikroakışkanlar İçin Metamalzeme Sensör

Bu çalışmada, sıvı ve mikroakışkanlar için X bandında çalışmak üzere ayrık kare halkalardan oluşan metamalzeme tabanlı bir sensör geliştirilmiştir. Akışkanların dielektrik özellikleri kullanım zamanına göre değişmektedir. Önerilen yapı, farklı kullanım zamanlarında örnek alınmış transformator yağının veya diğer mikroakışkan sıvıların dielektrik sabiti değerine göre farklı frekanslarda rezonans değerine sahip olacaktır. Ayrıca, bu yapı dielektrik sabiti 2 ile 24 arasında değişen sıvılar için etkili bir şekilde kullanılabilir.

##### 4.4.1. Tasarım, simülasyon ve üretim düzeneği

Bu çalışmada düşük kayıplı 2,5 dielektrik sabitine ve 0,0022 kayıp tanjant değerine sahip Arlon DiClad 527 malzemesi ara tabaka olarak kullanılmıştır. İç içe kare ayrık halkalar, karşılıklı kapasitans ve endüktans etkilerini artırmak için  $135^\circ$  açılı farklı olarak yerleştirilmiştir. Böylelikle bakışimsız ortam oluşturulmuştur. Şekil 4.25a ve Şekil 4.25b’de gösterildiği gibi, arka taraf rezonatörlerinin ön taraf rezonatörlerinden farklı açılıları vardır. Bu tasarım

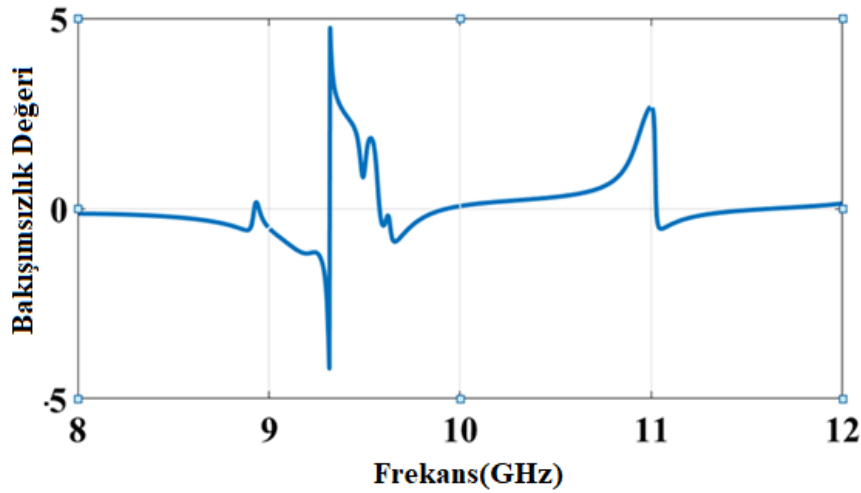
özellikle maksimum hassasiyetli simülasyon çalışmaları ile seçilmiştir. Yapı oluşturulurken parametrik çalışmalardan faydalanılmıştır. Arka ve ön taraftaki rezonatörler, 0,035 mm kalınlığa ve  $5,8 \times 10^7$  S / m iletkenliğe sahip bakırdan oluşur. Önerilen yapının boyutları Şekil 4.25c’de verilmiştir. Şekil 4.25c’de gösterildiği gibi, dalga kılavuzu numune tutucusunun ön ve arka tarafı, deney koşullarında olduğu gibi 25 um kapton filmi ile kapatılmıştır. Ayrıca, üretilen sensör yapısı Şekil 4.25d’de gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Tasarlanan yapının ön (a), arka (b) görünümü ve boyutları (c), üretilen yapı (d)

#### 4.4.2. Bakışsızlık değeri analizi

Elde edilen sensör tasarımının 8 GHz-12 GHz frekans aralığındaki bakışsızlık değeri grafiği aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Elde edilen yapı 9,3 GHz frekansında 5’e yakın bir bakışsızlık değeri göstermiştir. Ayrıca 11 GHz frekansında da 2,4 gibi bir bakışsızlık değerine sahiptir.

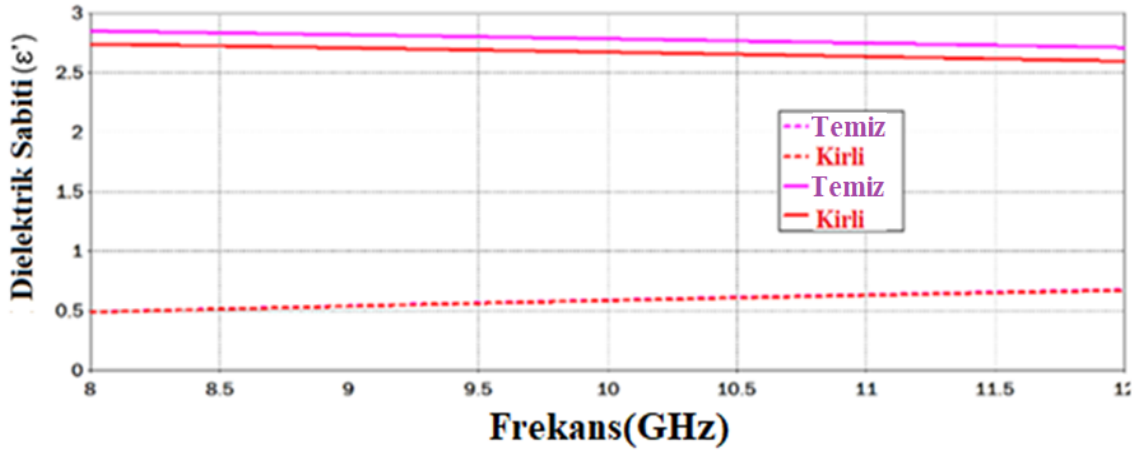


Şekil 4.26. Sensör yapısının bakışimsızlık değeri grafiği

#### 4.4.3. Sensör uygulamaları

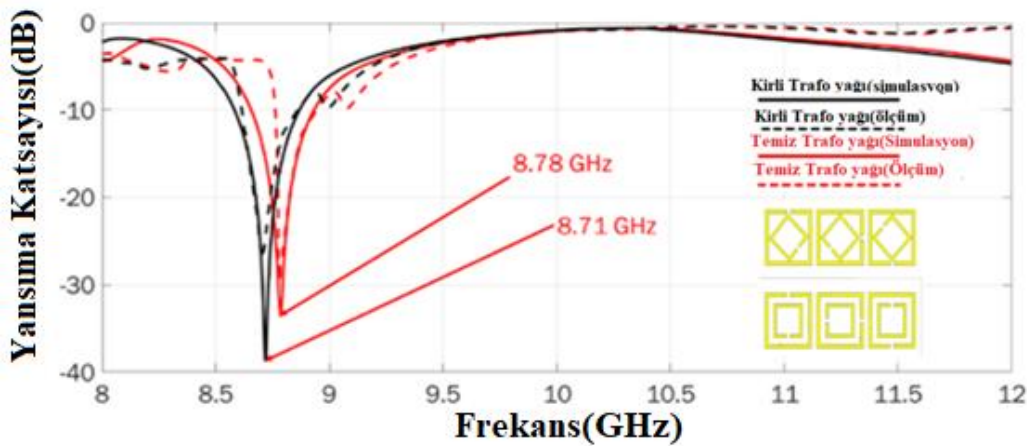
##### Trafo yağı için sensör uygulaması

Trafolar günümüzde çoğu iletim hattı kurulumlarında kullanılan bobin sargıları aracılığıyla voltaj akım ayarlaması yapabilen cihazlardır [114]. Bobin sargıları oluşturulurken bakır ve aliminyum teller kullanılır. Bu metal parçalarının aşırı ısınması transformatörün geriliminin düşmesine ve trafo yapısının bozulmasına neden olur. Bu gibi sebeplerden dolayı trafolarla soğutma işlemi yapılırken yağlar kullanılır ve bu yağların belli bir süre sonra yapısı bozularak işlevini yerine getiremez hale gelir bu sebepten dolayı trafo yağlarında oluşan durumu tespit etmek son derece önemlidir. Dizaynı yapılan sensör yapısı hiç kullanılmamış trafo yağını ve kirli trafo yağını birbirinden ayırt etmek için tasarlanmıştır. Öncelikle temiz ve kirli trafo yağlarının dielektrik sabitleri 8 GHz ve 12 GHz arasında deneysel olarak ölçülmüştür ve Şekil 4.27'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, kirli yağın dielektrik sabiti, bu yağın içerisinde bulunan nanopartiküllerin oranının artmasından dolayı temiz yağa göre daha düşüktür.



Şekil 4.27. Temiz ve kirli trafo yağının dielektrik sabiti grafiği

Trafo yağlarının dielektrik sabiti değerlerine sahip olduktan sonra, elde edilen değerlerle simülasyon çalışması yapılmış ve sonuçları Şekil 4.28'de sunulmuştur. Sıvı haznesine saf kullanılmamış trafo yağı yerleştirildiğinde, rezonans frekansı 8,78 GHz'de olduğu gözlenmiştir. Bir diğer çalışmada sıvı haznesine kirli trafo yağı eklendiğinde rezonans frekansı gözlenebilir bir şekilde 8,71 GHz'ye düşmüştür. Buradan hareketle, temiz ve kirli trafo yağları arasında 70 MHz'lik bir bant genişliği farkı gözlenmektedir. Bu kayma doğrudan sıvı haznesine yerleştirilen numunelerin karmaşık geçirgenlik değerleri ile doğrudan ilgilidir. Dielektrik sabitindeki artış nedeniyle kapasitans artar ve farklı rezonans frekansları ortaya çıkar. Bu iki yağın yansıma katsayısı sırasıyla Agilent PNA network analizörü kullanılarak test edilmiştir. Ölçülen ve simüle edilmiş yansıma katsayısı sonuçları birbiriyle uyumludur ve minimum hesaplanmış kalite faktörü 290'dan büyüktür.

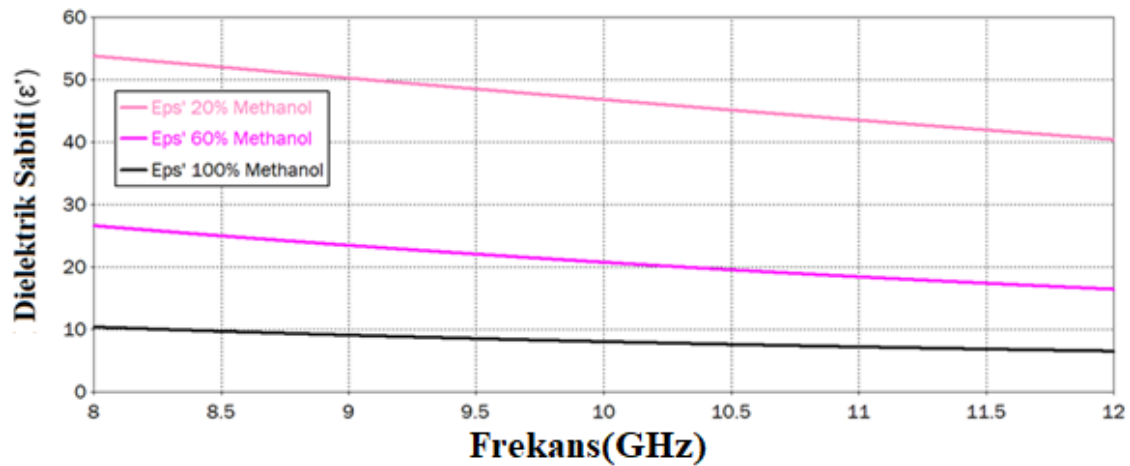


Şekil 4.28. Temiz ve kirli trafo yağının yansıma katsayısı sabiti grafiği



### Methanol için mikro akışkan sensör uygulaması

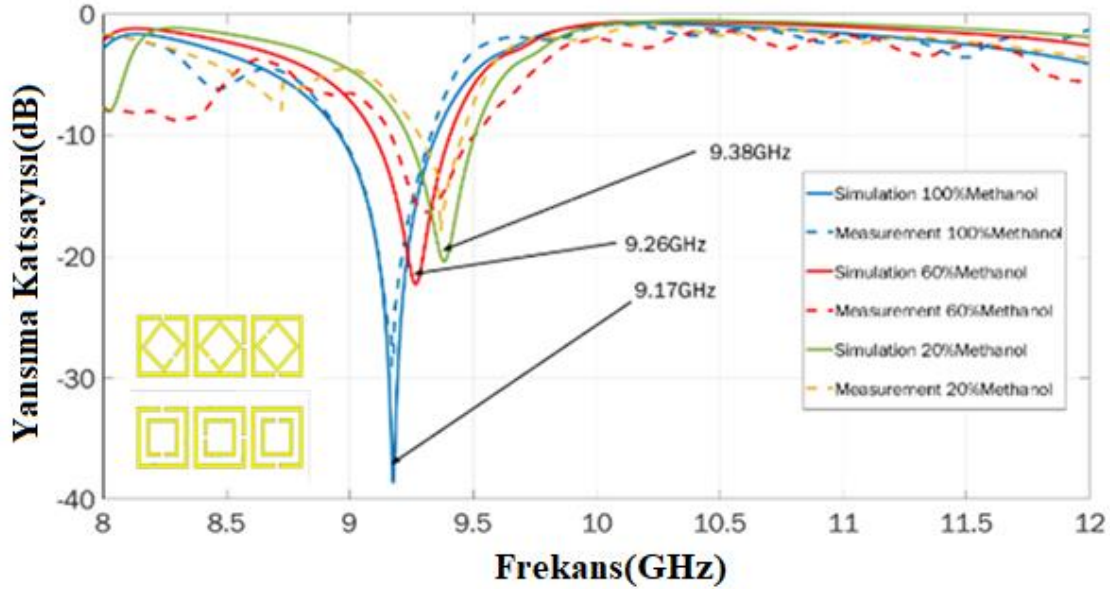
Burada gerçekleştirilen başka bir doğrulama türü alkollerle ilgilidir. Alkoller, özellikle kimya endüstrisinde yaygın olarak kullanıldığı ve günümüzde önemleri giderek arttığı için seçilmiştir. Bu amaçla, üç farklı hacimlerde metanol- distile su karışımı hazırlanmıştır. Bunlarsırasıyla saf metanol, %80 metanol ile %20 su ve %20 metanol ile %80 sudur. Daha önce yapıldığı gibi, bu örneklerin bağıl dielektrik katsayısı değerleri 85070E dielektrik ölçüm kiti kullanılarak ölçülmüştür. 8 GHz ve 12 GHz arasındaki ölçüm sonuçları, Şekil 4.29'da gösterilmektedir. Şekil 4.29'da görüldüğü gibi şekilde saf metanol, %60 metanol ve %20 metanol oranlarına sahip karışımlar için dielektrik sabiti değerleri 8 GHz'de sırasıyla 10,27 ve 53'ten başlayıp 8,18 ve 40 değerlerinde bitmiştir. Artan saf su oranına bağlı olarak dielektrik sabiti değeride lineer olarak artmaktadır.



Şekil 4.29. %20, %60 ve %100 metanol-su karışımının dielektrik sabiti grafiği

Dielektrik sabiti değerleri elde edildikten sonra simulasyon ortamında tanımlanarak sayısal analiz sonuçları Şekil 4.30'da olduğu gibi elde edilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, saf metanol ve %20 metanol arasında 210 MHz bant genişliği gözlenmiştir. %100 metanol için rezonans frekansı 9,17 GHz'de ortaya çıkarken, %60'lık metanol çözeltisi için bu değer 9,26 GHz'ye yükselmiştir. Suyun hacimsel oranı %80'e yükseldiğinde ise, rezonans frekansı 9,38 GHz'e yükselmiştir. Rezonans frekansında meydana gelen bu değişiklik sensör yapısında meydana gelen kapasitif etkiyle açıklanabilir. Simülasyon sonuçlarını doğrulamak için ayrıca laboratuvar ortamında numuneler hazırlanarak deneysel çalışmalar

yapılmıştır. Şekil 4.30'da görüldüğü üzere deneysel sonuçlarla teorik sonuçlar örtüşmektedir.



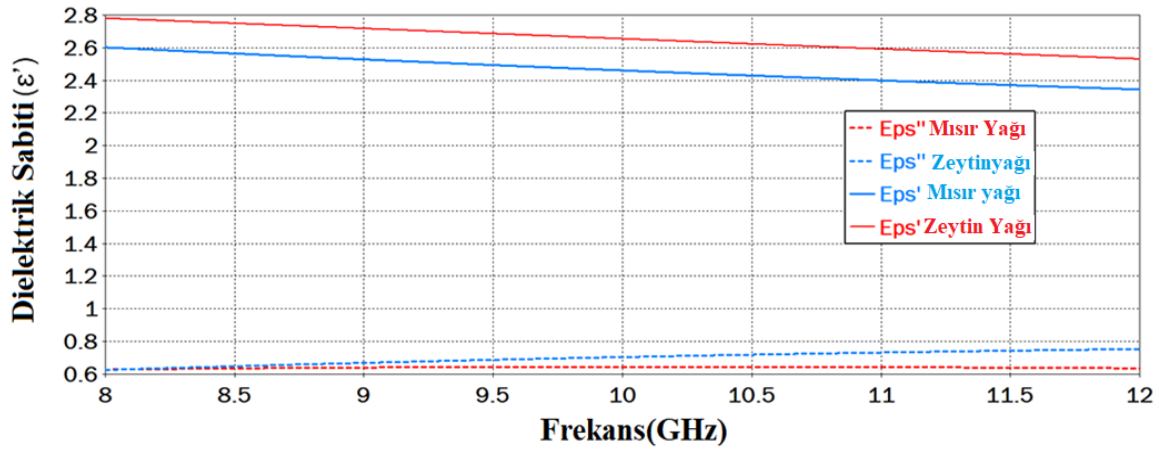
Şekil 4.30. %20, %60 ve %100 metanol-su karışımının yansımaya katsayısı grafiği

#### Zeytinyağı hilesi için sensör uygulaması

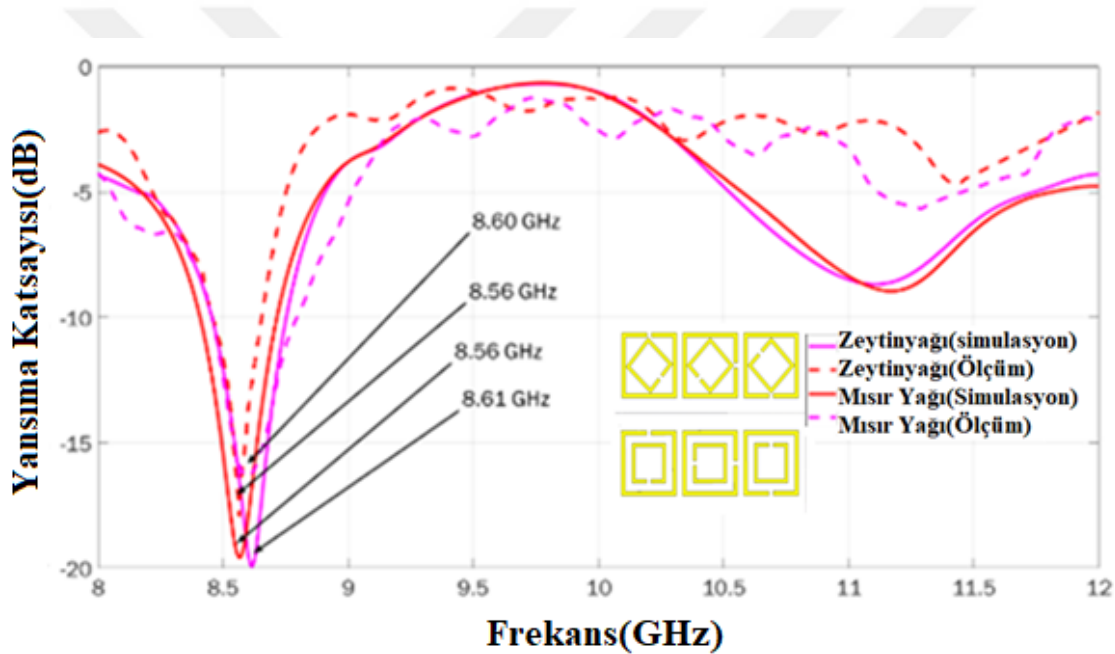
Önerilen metamalzeme sensörün kullanımına ilişkin bir başka örnek olarak ise zeytinyağında yapılan hilelerin tespitidir. Zeytinyağı üretimi azalıp ve buna bağlı olarak talep arttıkça, bazı üreticiler zeytinyağına mısır, hurma, ayçiçeği tohumu veya diğer yağlarla karıştırılmaktadır. Bu bölümde biri zeytinyağı diğeri mısır yağı iki örnek kullanılmıştır. Daha önce yapıldığı gibi ilk adım olarak, bu örneklerin dielektrik sabiti ölçümü yapılmıştır. Şekil 4.31'da görüldüğü üzere, zeytinyağı ve mısır yağının dielektrik sabiti değerleri, kalibre edilmiş 85070E dielektrik prob kiti ile tanımlanan 8 GHz ve 12 GHz arasında çok benzerdir. Şekil 4.31'den görüldüğü gibi, %100 zeytinyağının dielektrik sabitinin reel kısmı 2,78'den başlarken, mısır yağının ise 2,6'dan başladığı görülmektedir.

Dielektrik sabitinin deneysel ölçümünden sonra, sensör tepkisinin simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları Şekil 4.32'de verilmiştir. Zeytin ve mısır yağı için test edilen rezonans frekansları sırasıyla 8,56 GHz ve 8,51 GHz'dir. Toplam band genişliği 50 MHz'dir. Bunlara ek olarak deneysel sonuçlarda Şekil 4.32'de verilmiştir. Deneysel ve simülasyon sonuçları birbiri ile uyumludur.





Şekil 4.31. Mısırözü ve zeytinyağı'nın dielektrik sabiti grafiği



Şekil 4.32. Mısırözü ve zeytinyağı'nın yansımaya katsayısı grafiği

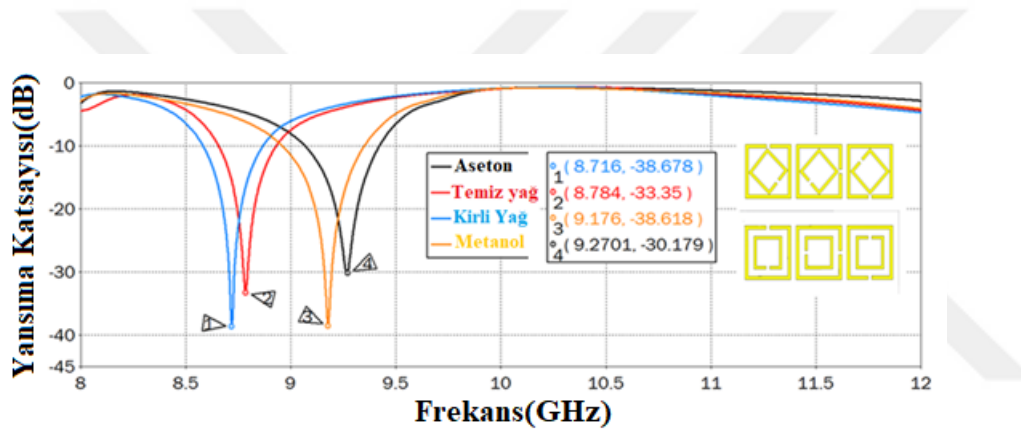
#### Çok amaçlı sensör uygulaması

Bu bölümde, farklı sıvı algılama uygulamaları için önerilen metalmalzeme tabanlı sensörün yansımaya katsayısı parametresi sonuçları elde edilmiştir. Önerilen yapının uygulama örneklerini göstermek için, aseton, berrak yağ (kullanılmayan trafo yağı), koyu yağ (kullanılmış trafo yağı) ve metanolün bağlı dielektrik katsayısı değerleri ölçülmüştür. Elde edilen değerler Çizelge 4.1'de verilmiştir. Önerilen yapının geniş kapsamlı sensör uygulamasının gösterilmesi için, sıvı haznesi bu malzemelerle doldurulduğunda yansımaya katsayısı simüle edilmiştir. Simüle yansımaya katsayısı grafiği, Şekil 4.33'te verilmiştir.

Dielektrik sabiti 2,73'ten 24'e yükseldiğinde, yansımaya katsayısı rezonans frekansları 8,71 GHz'den 9,27 GHz'e yükselmiştir. Bu sonuç, toplam bant genişliğinin dielektrik değişimlerine karşılık olarak 560 MHz olduğu anlamına gelir.

Çizelge 4.1. Farklı tipteki sıvıların dielektrik sabiti değerleri

Malzeme	Dielektrik sabiti
Aseton	24
Temiz trafo yağı	2,85
Kirli trafoyağı	2,73
Metanol	10,40

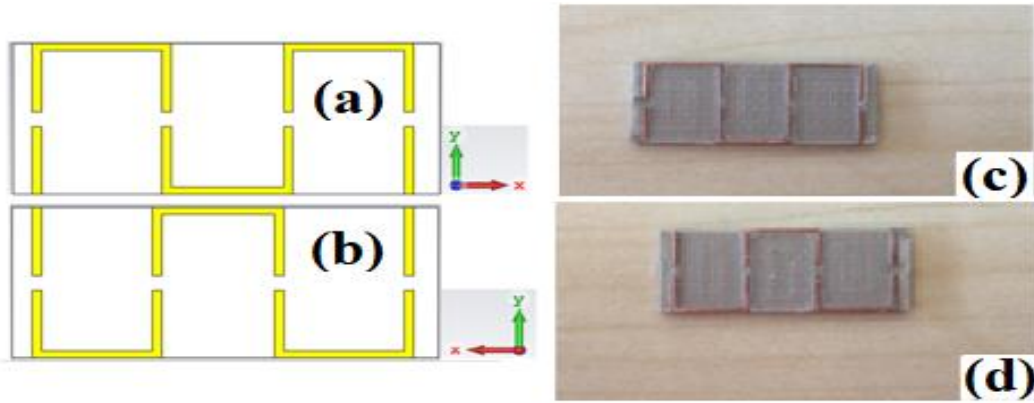


Şekil 4.33. Aseton, temiz trafo yağı, kirli trafo yağı ve metanol numunelerinin yansımaya katsayısı grafiği

#### 4.5. Yüksek Hassaslık Değerine Sahip Bakışsız Metamalzemenin Karakterizasyon Çalışması

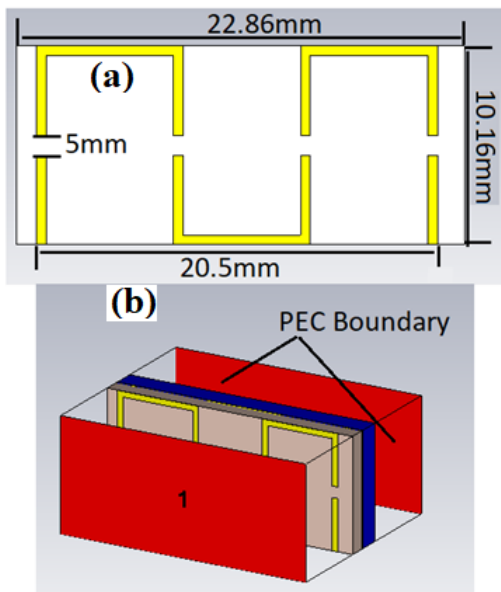
##### 4.5.1. Tasarım, simülasyon ve üretim çalışması

Bu çalışmada, Şekil 4.34'te görüldüğü gibi karakterizasyon modellemesi için semender çizgi tabanlı bakışsız bir metamalzeme geliştirilmiştir. Ara yüz olarak dielektrik sabiti 2,5 olan ve kayıp tanjant değeri 0,0022 olan Arlon DiClad kullanılmıştır. Bu malzemenin seçilmesinin temel nedeni olarak düşük kayıp değerine sahip olmasıdır. Bakışsız bir yapı elde etmek için rezonatör tabakaları, Şekil 4.34a ve Şekil 4.34b'de gösterildiği gibi 180 derecelik açı farklı olacak şekilde asimetrik olarak yerleştirilmiştir. Rezonatör tabakaları,  $5,8 \times 10^7$  iletkenlik ve 0,035 kalınlık değerine sahip bakırdan oluşmuştur.



Şekil 4.34. Dizayn edilen sensör yapısının ön (a) arka (b) ve üretilen sensör yapısının ön (c) arka (d) görüntüsü

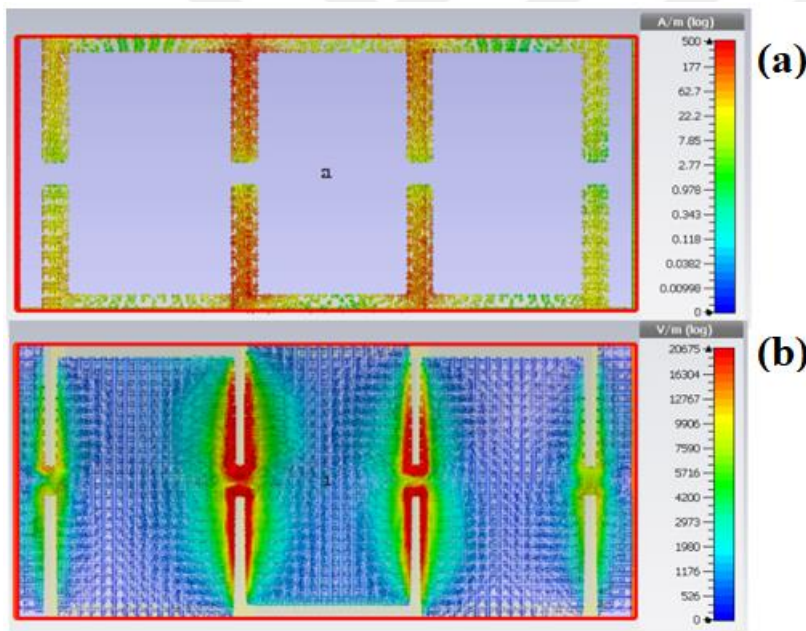
Bakışsızlık tabanlı sensör yapısı, 22,86 mm genişliğe ve 10,16 mm uzunluğa sahip X bandı frekans aralığında geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen sensör rezonatörünün boyutları Şekil 4.35a'da gösterilmektedir. Semender çizgisinin ve bölünmüş çizgi aralığının ortalama uzunluğu sırasıyla 9,5 mm ve 0,5 mm'ye eşittir ve bu ebatlar genetik algoritma tekniği ve parametrik yaklaşımlar kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca, mükemmel elektrik sınır koşulları x ve y yönünde kullanılırken, z yönü için açık sınır koşulu, Şekil 4.35b'de gösterildiği gibi kullanılmıştır. Simülasyon çalışmalarını sonucunu gerçekleştirmek için, kullanılan Sonlu integrasyon tekniği (FIT) tabanlı mikrodalga simülasyon programı kullanılmıştır.



Şekil 4.35. Sensör yapısının boyutları (a) ve uygulanan sınır koşulları (b)

#### 4.5.2. Yüzey alan ve akım dağılımı

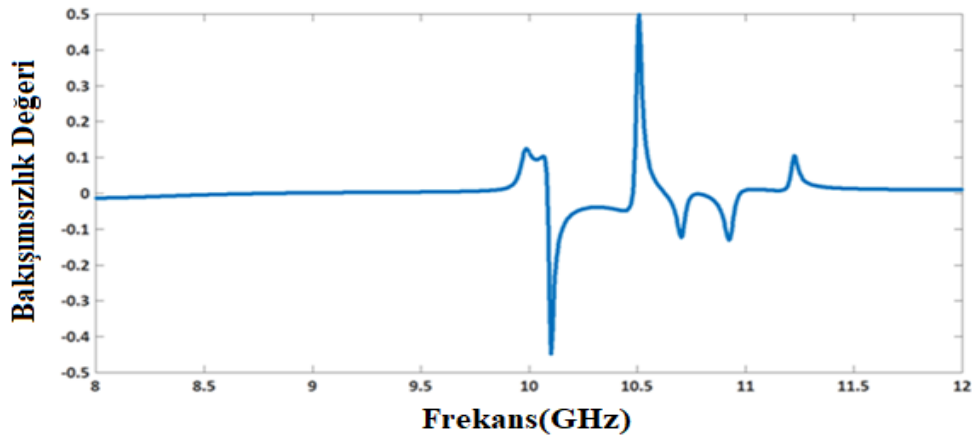
Gerçekleştirilen yapının yüzey akımı ve elektrik alan dağılımı Şekil 4.36’te simüle edilmiş ve sunulmuştur. Şekil 4.36a’dan açıkça görüldüğü üzere yüzey akımları genellikle güçlü manyetik alanlardan dolayı orta endüktif çizgiler üzerinde birikmiştir. Ek olarak, rezonatör katmanlarında paralel ve anti-paralel yüzey akımı dağılımının ortaya çıktığını gözlemlenmiştir. Paralel akım, elektrik alan nedeniyle gerçekleşirken, manyetik alanlar nedeniyle anti-paralel akım meydana gelir. Bu şekil, rezonatörlerin rezonans frekansındaki önemini ve davranışını da açıklar. Yüzey akım dağılımının yanı sıra, elektrik alanı dağılımı da rezonatörlerin davranışının anlaşılması için önemlidir. Şekil 4.36b’de görüldüğü gibi, kapasitif etki nedeniyle bölünmüş boşluklara ve orta hatlarda yoğunlaşan elektrik alanı görülmektedir.



Şekil 4.36. Sensör yapısının 10,1 GHz frekansındaki yüzey akım (a) ve elektrik alan (b) görüntüleri

#### 4.5.3. Bakışsızlık değeri analizi

Şekil 4.37’te geliştirilen yapının bakışsızlık değeri grafiği verilmiştir. 8 GHz ve 9,83 GHz arasında 0’a yakın küçük bakışsızlık değeri elde edilirken, 10,1 GHz ve 10,5 GHz’de 0,5 gibi büyük bakışsızlık değeri gözlenmiştir.

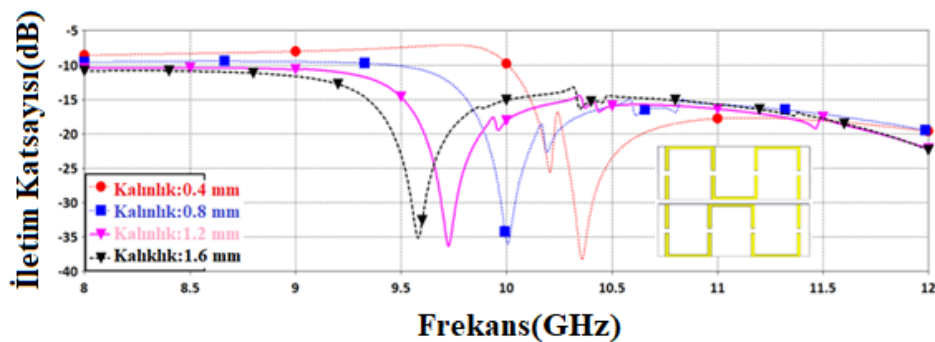


Şekil 4.37. Sensör yapısının bakışimsızlık değeri

#### 4.5.4. Simulasyon çalışmaları

##### Parametrik kalınlık çalışması

Karakterizasyon modelinin ilk gösteriminde, Arlon AD350 tipi materyal kullanılarak kalınlık tespiti çalışması yapılmıştır. Arlon AD350 malzemesinin kalınlığı, 0,4 mm'lik adım ile 0,4 mm'den 1,6 mm'ye kadar lineer olarak arttırılarak, 8 GHz ve 12 GHz arasındaki S12 iletim katsayısı değeri incelenmiştir. Sensör katmanında kalınlığın arttırılmasına bağlı olarak ortaya çıkan kapasitif etki, sensörün rezonans frekansını etkileyecektir. Ayrıca, kalınlığın arttırılmasıyla elde edilen toplam kapasitansın, rezonans frekansını ters orantılı olması, yani kalınlığın arttırılması sırasında, rezonans frekansının kayması anlamına gelir. Buradan hareketle, Şekil 4.38'de görüldüğü üzere kalınlık değeri arttıkça rezonans frekans değeri 10,35 GHz'den 9,6 GHz'ye düşmüştür. 750 MHz'lik bir bant genişliği elde edilmiştir.



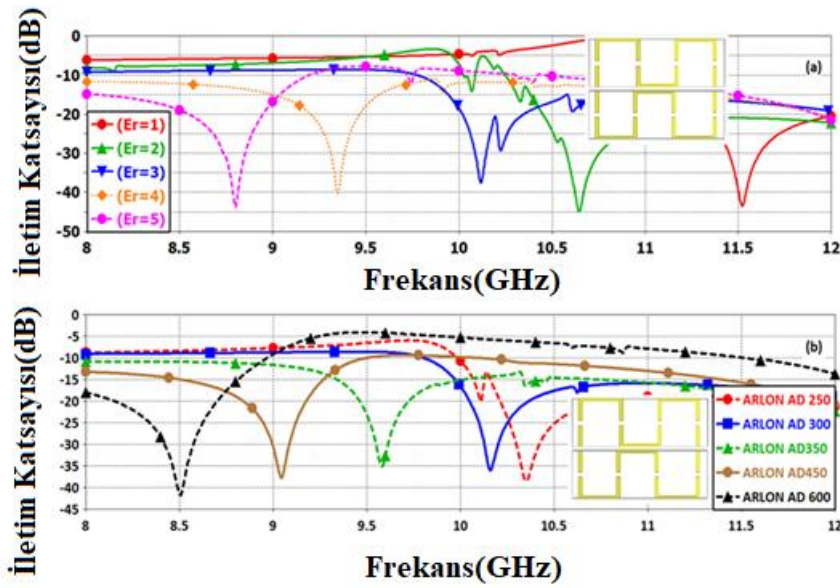
Şekil 4.38. Parametrik kalınlık çalışması simülasyon sonuçları

### Dielektrik sabiti karakterizasyon çalışması

Çalışmanın bu bölümünde, dielektrik sabiti karakterizasyonu modellemesi iki yöntemle simüle edilmiştir. Simülasyonun ilk bölümünde sensor katman kalınlığı 1 mm'ye sabitlenmiş ve dielektrik sabiti 1 ile 5 arasında değiştirilmiştir. Şekil 4.39a'da gösterilen simülasyon çalışmasında, dielektrik sabiti değerleri 1-5 arasında lineer artarak değişen numunelerin rezonans frekansları sırasıyla 11,55 GHz, 10,7 GHz, 10,15 GHz, 9,3 GHz ve 8,80 GHz'dir. Dielektrik sabitindeki her değişiklik ortalama olarak 350 MHz rezonans frekans kaymasına karşılık gelir. Ayrıca, önerilen yapının, toplam bant genişliği 700 MHz'den daha büyüktür. Bir diğer çalışmada ise ARLON tipinde dielektrik sabiti bilinen numunelerle karakterizasyon çalışması yapılmıştır. Sensör tabakası kalınlığı 1,6 mm olarak ayarlanarak, Şekil 4.39b'de gösterildiği gibi iletim katsayısını gösteren simülasyonun yapılmıştır. ARLON tipi malzemelerin dielektrik sabiti değerleri sırasıyla tablo da gösterildiği gibi 6 ve 2,5 arasında değişmektedir. Arlon AD250 için rezonans frekansı 10,35 GHz iken Arlon AD600 için ise 8,5 GHz'dir. Ortalama rezonans frekans kayması simülasyonun bu bölümünde 520 MHz'dir.

Çizelge 4.2. Arlon tipi dielektrik malzemenin dielektrik sabiti, kayıp tanjant ve rezonans frekansı

<b>Parametreler</b>	<b>AD250</b>	<b>AD300</b>	<b>AD350</b>	<b>AD450</b>	<b>AD600</b>
Dielektrik Sabiti	2,5	3	3,5	4,5	6
Kayıp tanjant değeri	0,0018	0,0030	0,0030	0,0035	0,0035
Rezonans frekansı	10,35	10,16	9,58	9,04	8,50

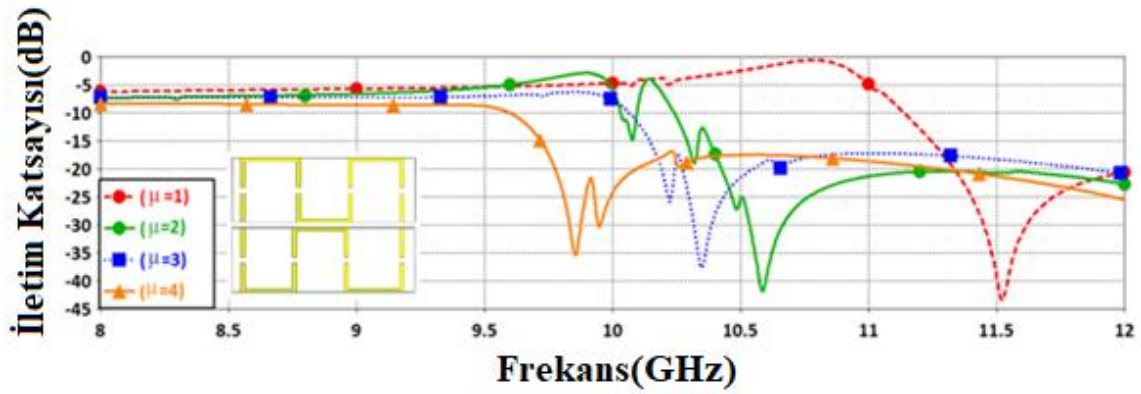


Şekil 4.39. Dielektrik sabiti karakterizasyon çalışması

#### Manyetik geçirgenlik karakterizasyon çalışması

Bu karakterizasyon modellemesinde, farklı geçirgenlik değerine sahip malzemeleri birbirinden ayırt etme hedeflemiştir. Yapının arka kısmına 1,6 mm kalınlığında ve dielektrik sabiti 2 olan bir malzeme tanımlanmıştır. Bu malzemenin kalınlık ve dielektrik sabiti değerleri sabit kalırken, malzemenin manyetik geçirgenliği 1 ile 4 arasında lineer artırılarak değiştirilmiştir. Bu parametrik çalışmalar simülasyon ortamında gerçekleştirilmiş ve Şekil 4.40'ta gösterilen sonuçlar verilmiştir. Dielektrik katsayısı değeri arttıkça, rezonans frekans kayması geriye doğru gerçekleşecektir. Buradan hareketle rezonans frekansıyla dielektrik katsayısı arasında lineer bir ilişki olduğu söylenebilir. Rezonans frekansının değişmesinin temel nedeni, endüktif etkinin sensör katmanında ortaya çıkmasıdır.





Şekil 4.40. Manyetik geçirgenliği karakterizasyon çalışması

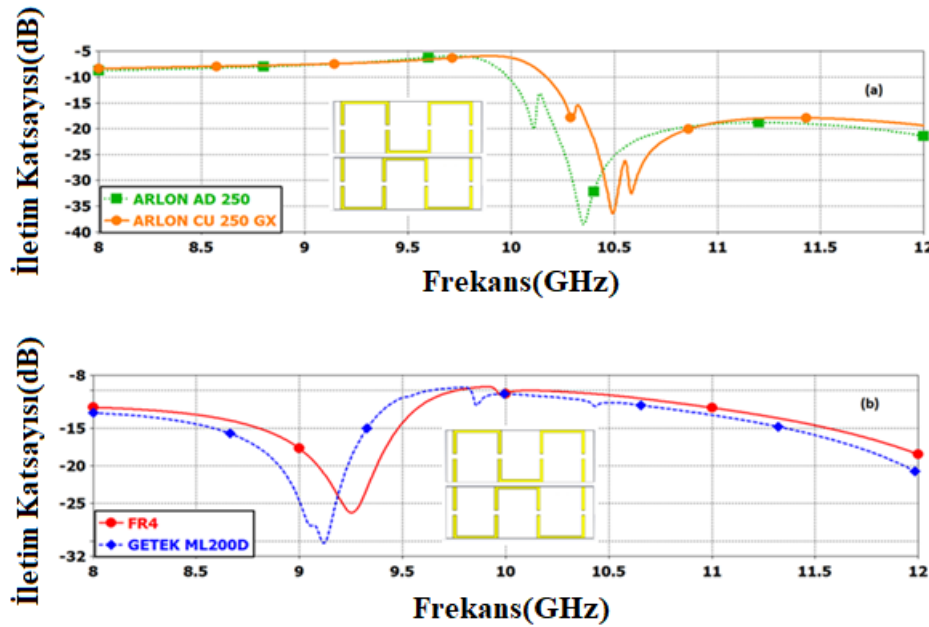
#### Kayıp tanjant değeri karakterizasyon çalışması

Bu bölümde kayıp tanjant değerini karakterize etmek için, dielektrik sabit değeri aynı fakat kayıp tanjant değerleri farklı olan malzemeler seçilerek ayrı bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Dielektrik sabiti değeri reel ve imajiner kısım olarak iki kısımdan oluşur. Reel kısmın imajiner kısma bölünmesiyle kayıp tanjant değeri elde edilir. Bu çalışmayı desteklemek için dielektrik sabiti değerleri aynı kayıp tanjant değerleri farklı malzemeler kullanılmıştır. Bunlar Arlon AD350, Arlon CU 250GX, FR4 ve Getek ML200D'dir. Tablo da gösterildiği gibi Arlon AD350 ve Arlon CU 250GX dielektrik tabakaların dielektrik sabiti 2,5 iken kayıp tanjant değerleri sırasıyla 0,0022 ve 0,0018'dir. Diğer dielektrik tabakalar için FR4 ve Getek ML200D dielektrik sabiti değeri 4,3 iken kayıp tanjant değerleri 0,025 ve 0,0107'dir. Simülasyon çalışmalarında sensör tabakasının arka kısmına bu numuneler yerleştirilerek simülasyon çalışmaları yapılmıştır ve Şekil 4.41'de sonuçlar verilmiştir. İlk olarak, Arlon AD250 ve Arlon CU 250GX dielektrik tabakaları kullanılarak simülasyon çalışmaları yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.41a'da verilmiştir. Rezonans frekansları sırasıyla 10,35 GHz ve 10,49 GHz olarak ortaya çıkmıştır. Buradan hareketle bant genişliği 140 MHz'dir. Bir diğer simülasyon çalışmasında aynı işlem FR4 ve GETEK MLD200 için tekrarlanmıştır. Bu iki tabaka için rezonans frekansları sırasıyla 9,25 GHz ve 9,12 GHz'dir ve toplam bant genişliği 130 MHz'dir. Bu simülasyon çalışmaları bize kayıp tanjant değerinde önerilen sensör çalışmaları kullanılarak rahatlıkla bulunabileceğini göstermektedir.



Çizelge 4.3. Farklı dielektrik malzemelerin dielektrik sabiti, kayıp tanjantdeğeri ve rezonans frekansı değerleri

Parametre	ARLON AD 250	ARLON CU 250GX	FR4	GETEK ML200D
Dielektrik Sabiti	2,5	2,5	4,3	4,3
Kayıp tanjant değeri	0,0018	0,0022	0,025	0,0107
Kalınlığı	1,6 mm	1,6 mm	1,6 mm	1,6 mm
Rezonans frekansı	10,35 GHz	10,49 GHz	9,25 GHz	9,12 GHz

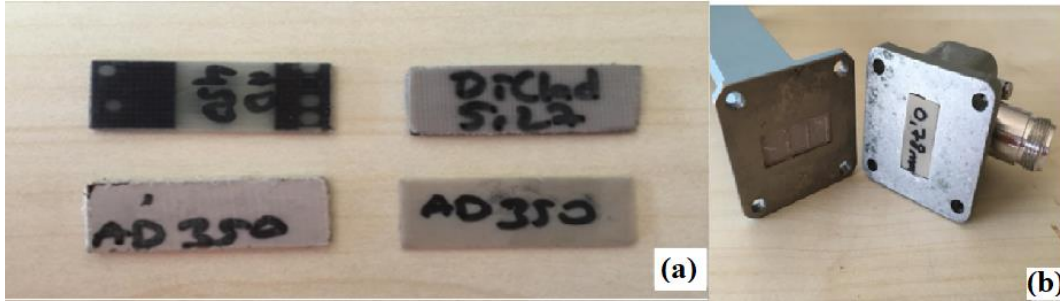


Şekil 4.41. Kayıp tanjant değeri karakterizasyon çalışması için iletim katsayısı grafiği

#### 4.5.5. Deneysel çalışmalar

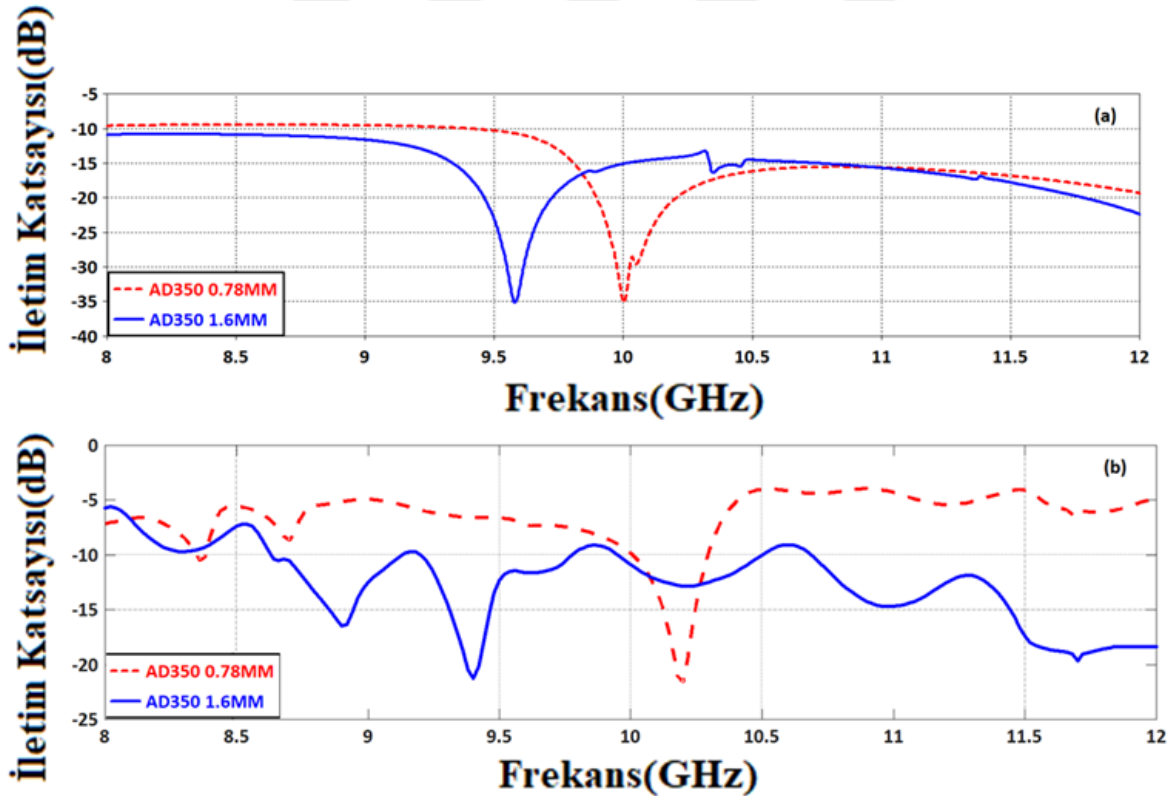
##### Kalınlık karakterizasyon çalışması

Bu kısımda parametrik kalınlık çalışması simülasyon ve deneysel olarak ispatlanmıştır. Bu çalışmayı gerçekleştirmek için Şekil 4.42a'da görülen AD350 (0,78 mm) AD350 (1,6 mm) ARLON DI CLAD 527 (1,6 mm) ve AD450 (1,6 mm) kullanılmıştır. Ayrıca bu dielektrik tabakaların ve numunelerin dalga klavuz adaptörüne yerleştirme biçimi Şekil 4.42b'de verilmiştir.



Şekil 4.42. Deneysel çalışma için örnek dielektrik tabaklar (a) ve dalga klavuzunun içine yerleştirilmiş dielektrik tabakası (b)

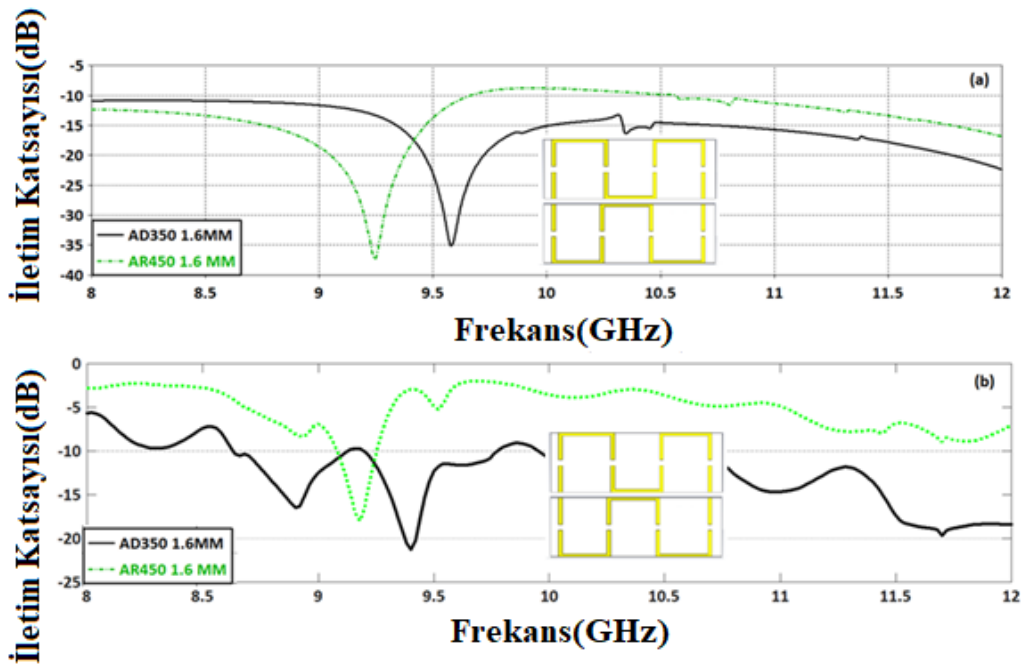
Bunun için öncelikle 0,78 mm ve 1,6 mm kalınlığa sahip olan ARLON AD350 tip dielektrik tabakası numuneleri kullanılarak simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar Şekil 4.43a'da verilmiştir. Bu numunelerin rezonans frekansları sırasıyla 9,58 GHz ve 10,01 GHz olarak bulunmuştur. Ayrıca elde olan numunelerle deneysel sonuçlarda laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar Şekil 4.43b'de verilmiştir.



Şekil 4.43. Kalınlık karakterizasyon çalışması ölçüm ve simülasyon sonuçları

### Dielektrik sabiti karakterizasyon çalışması

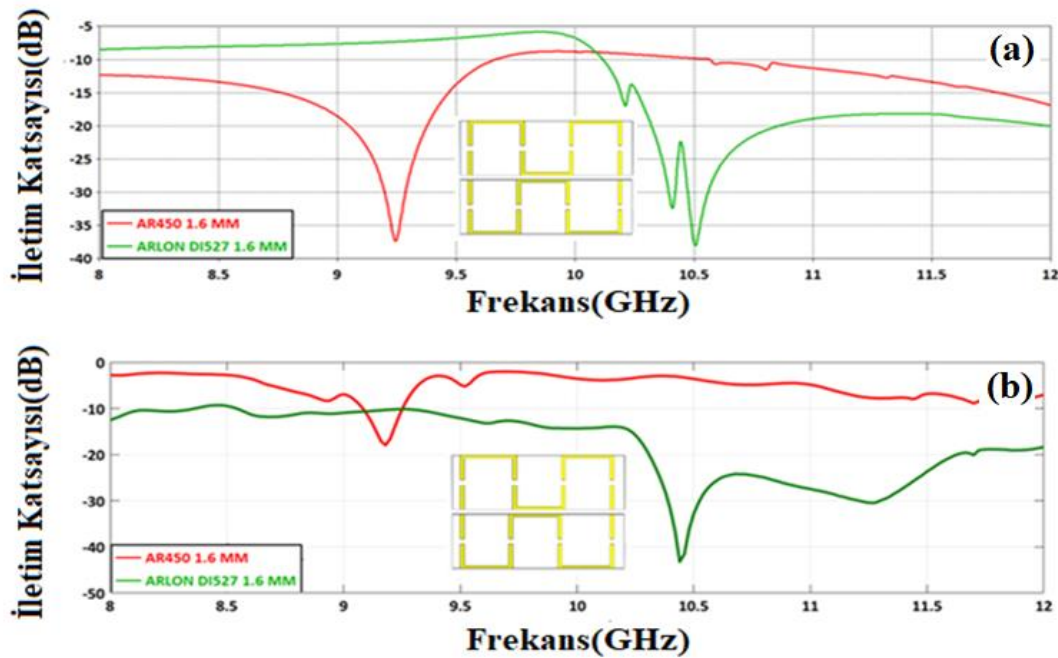
Diğer bir deneysel doğrulama, dielektrik sabiti karakterizasyon çalışmasıdır. Dielektrik sabitinin rezonans frekansı üzerinde etkilerini vurgulamak için sensör katmanına 1,6 mm Arlon tipi AD350 ve AD450 malzemeleri yerleştirilmiştir. Bu numunelerin dielektrik sabitleri sırasıyla 3,5 ve 4,5'tir. Her iki numune için yapılan simülasyon çalışmaları kapsamında malzemelerin iletim katsayısı grafiği Şekil 4.44a'da çizilirken, deneysel sonuçlar Şekil 4.44b'de verilmiştir. Numunelerin rezonans frekansları sırasıyla 9,6 GHz ve 9,25 GHz'dir. Toplam bant genişliği 350 MHz'dir. Buradan hareketle dizaynı yapılan sensör yapısı, numunelerin dielektrik sabiti değeri işlemi kolaylıkla hesaplayabilmektedir. Hem simülasyonda hem de deneysel olarak elde edilen bant genişliği, önerilen yapının malzeme değişimine duyarlı olduğunu ve sensör katmanındaki malzemelerin doğrudan rezonans frekansını etkilediğini göstermektedir.



Şekil 4.44. Dielektrik sabiti karakterizasyon çalışması ölçüm sonuçları

Dielektrik sabiti değişim karakterizasyonunu desteklemek için, başka bir çalışmada aynı kalınlığa ve farklı dielektrik sabiti değerlerine sahip Arlon AD450 ve Arlon DiClad 527 kullanılarak yapılmıştır. AD 450'nin dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı 4,5 ve 0,0035'iken, Arlon DiClad 527 için 2,5 ve 0,017'dir. Bu numuneler kullanılarak gerçekleştirilen

simulasyonlarda, Şekil 4.45a'da görüldüğü üzere rezonans frekansları 9,6 GHz'den 9,25 GHz'e, doğru gerilemiştir. Elde edilen sonuç dielektrik sabiti ile rezonans frekansı arasında lineer bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca laboratuvar koşullarında elde edilen numunelerle deneysel çalışmalarda yapılmıştır ve sonuçlar Şekil 4.45b'de verilmiştir. Son olarak, sonuçlardan görüldüğü üzere önerilen yapı, dielektrik sabiti değişimine karşı çok hassas olduğu kanıtlanmıştır. 350 MHz'lik elde edilen bant genişliği sensörün hassasiyetini gösteren bir başka parametredir. Son olarak, deney sonucu Şekil 4.45b'de gösterilmiştir ve her iki sonuç da birbiriyle uyumludur. Test sırasında yapılan kalibrasyon ve üretim hatalarından 50 MHz'lik farklılık ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.45. Dielektrik sabiti karakterizasyon çalışması ölçüm sonuçları

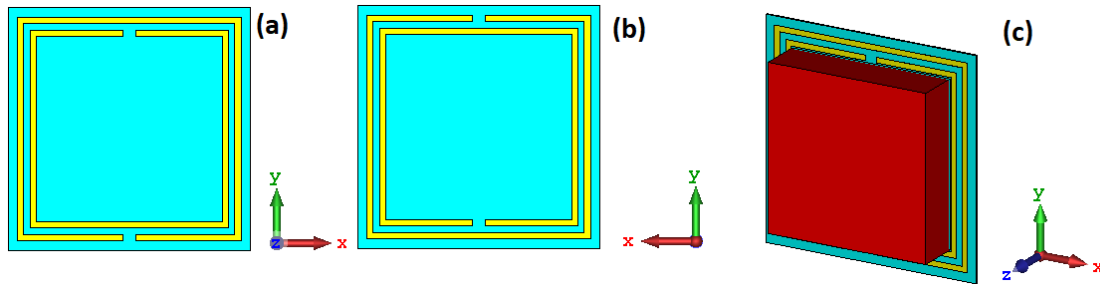
## 4.6. Karbon Çelik Fiberle Katkılı İnşaat Malzemesi İçin Metamalzeme Sensör Uygulaması

### 4.6.1. Tasarım ve simulasyon uygulaması

Bu çalışmada, karbonlu fiber çelik katkılı çimento esaslı malzemelerin incelenmesi amacıyla bakımsız bir metamalzeme sensör uygulaması gösterilmiştir. Bu çalışma için harç hacmine göre %0,5, %1 ve %1,5 oranında karbon fiber çelik içeren inşaat numuneleri hazırlanmıştır. İlk olarak, hazırlanan numuneler içinde karbon çelik fiber içeriğinin

numuneler içerisinde homojen bir şekilde yayılıp yayılmadığı sensör yardımıyla gözlemlenmiştir. Ayrıca, nemin ve sıcaklığın malzemelerin elektromanyetik ölçümü üzerindeki etkisini göstermek için bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Tüm doğrulama adımları, dielektrik özelliklerin ve yansımaya katsayısının VNA kullanılarak ölçülmesinden meydana gelir. Bu çalışmanın benzersiz yanı, beton malzeme için MTM sensör uygulamasına dayanan böyle bir çalışmanın gerçekleştirilmemesi ve bu çalışmanın nem ve sıcaklık gibi farklı koşullara maruz kalan beton malzemeler hakkında ayrıntılı bilgi vermesidir.

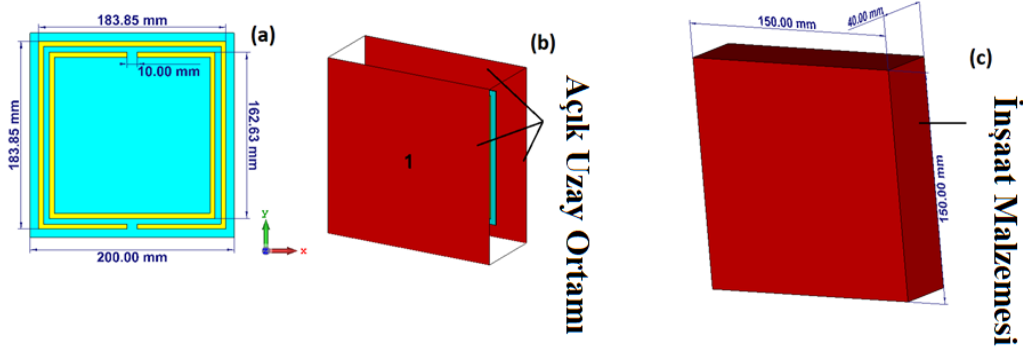
Bu çalışma için tasarlanan bakışimsız metamalzeme yapısının ön ve arka yüzleri Şekil 4.46a'da ve Şekil 4.46b'de gösterilmiştir. Ara tabaka olarak 3,2 dielektrik sabit değeri ve 1,6mm kalınlığa sahiptir ISOLA IS680 kullanılmıştır. Ara tabakanın arka ve ön tarafına yerleştirilmiş olan rezonatörler iki iç içe geçmiş ayrık halka topolojisine uygun yapılardan oluşmaktadır. Ek olarak, karşılıklı kapasitansı arttırmak için ve bakışimsız ortam oluşturmak amacıyla ön ve arka tarafa yerleştirilen rezonatörler arasında  $180^\circ$  açı farkı vardır. Son olarak, beton malzeme sensör yapısının ortasına, Şekil 4.46c'de görüldüğü gibi yerleştirilir.



Şekil 4.46. Geliştirilen sensör yapısının ön (a), arka (b) ve profil (c) görüntüsü

Önerilen sensörün yapı boyutları Şekil 4.47a'da görülebilir ve bu boyutlar en iyi hassasiyet değerine, bant genişliğine ve kalite faktörüne sahip olması için parametrik çalışmalarla elde edilir. Ayrıca, tüm simülasyon çalışmaları sonlu integrasyon tekniğine (FIT) dayanan benzetim programı kullanılarak desteklenmiştir. Rezonatör tabakasının genel boyutları Şekil 4.47a'da gösterilmektedir. Ek olarak, önerilen sensör yapısının sınır koşulları Şekil 4.47b'de görüldüğü üzere x, y ve z yönlerinde açık olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.47c'de inşaat malzemelerinin boyutları gösterilmektedir.





Şekil 4.47. Önerilen sensör yapısının boyutları (a), sınır koşulları (b) ve inşaat malzemesinin boyutları (c)

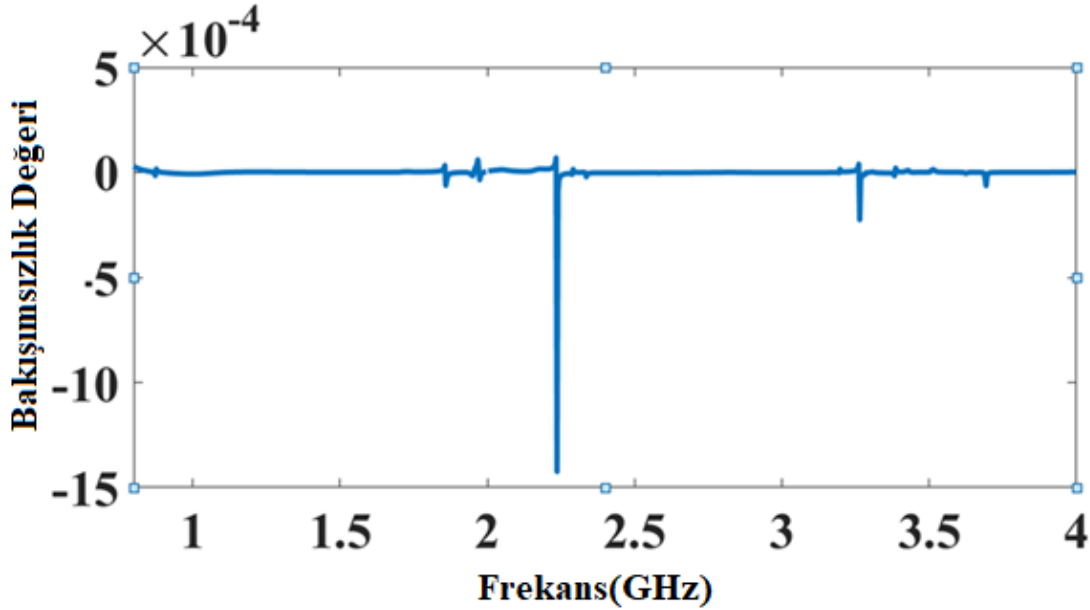
Malzemenin dielektrik sabiti benzersiz özelliklerdir ve bu değer her malzeme için değişebilir. Ayrıca, dielektrik sabit değeri, farklı malzemeleri algılamak ve ayırmak için birçok bilgi verir. Mikrodalga aralığında numunelerin dielektrik sabiti değerini ölçmenin birçok yolu vardır. Bu çalışmada, malzemelerin dielektrik özelliklerini belirlemek için serbest uzay yöntemini kullanılmıştır. Serbest uzay yönteminde, yalnızca TEM dalga modu uygulanır ve geniş bant aralığı için geçerlidir. Ayrıca, bu yöntemin temel avantajı, yüksek sıcaklık ve geniş bant frekansı gibi zorlu çevresel koşullar altında dielektrik sabiti değerlerinin ölçülmesine izin vermesidir. Ölçüm, Şekil 4.48a'da gösterildiği gibi Vector Network Analyzer'a (VNA) bağlı iki horn anten kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümden önce, VNA'nın kalibre edilmesi gerekir. Serbest uzay yöntemini kullanarak beton malzemenin dielektrik sabiti değerini 0,8-3 GHz frekans aralığında ölçülmüştür.



Şekil 4.48. Dielektrik ölçüm ortamı (a) ve hazırlanan inşaat malzemeleri (b)

#### 4.6.2. Bakışsızlık değeri analizi

Tasarlanan yapının bakışsızlık değeri Şekil 4.49'da gösterilmiştir. Görüldüğü üzere yapının bakışsızlık değeri 1-4 GHz aralığının çok küçüktür ve doğal bakışsızlık özelliği göstermektedir.



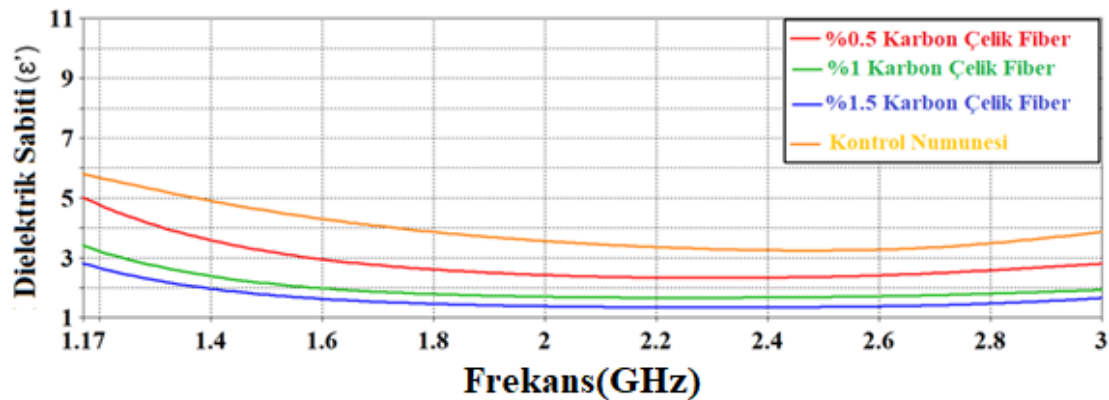
Şekil 4.49. Önerilen yapının bakışsızlık değeri grafiği

#### 4.6.3. Sensör uygulamaları

##### Beton malzemesinde farklı karbon çeliği yüzdesinin algılanması

Beton malzeme, binaların yapımında en yaygın kullanılan malzemelerden biridir. Temel olarak, su ve çimento karıştırılarak yapılan beton malzeme, türünün doğası gereği kırılmandır. Kırılmanlık, inşaat yapılarına büyük hasar verdiğiinden ve binaların çökmesine neden olduğundan dolayı istenmeyen bir özelliktir. Kırılmanlığı önlemek için araştırmacılar bazı yollar geliştirdiler. Beton malzemeye karbon çelik lif gibi bazı bileşenlerin eklenmesi, beton malzemenin mukavemetini arttırmanın en yaygın yoludur [115]. Beton malzemedeki bileşenlerin dağılımı ve yönlendirilmesi hayati bir öneme sahiptir ve performansı önemli ölçüde etkiler. Ayrıca, beton malzeme kurduktan sonra, malzemenin homojen bir şekilde malzemedeki yayılması, bir başka önemli taraftır.

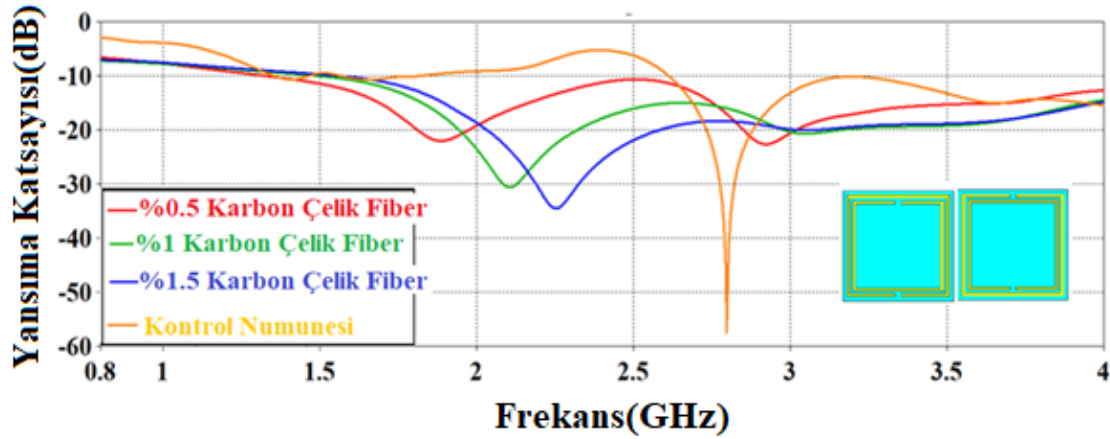
Çalışmanın bu bölümünde, karbon çelik lifi içeren beton malzemenin karakteristik özellikleri incelenmiştir. Temel amaç, karbon çelik lifinin beton malzemedeki oranını tespit etmek ve bileşenlerin homojen bir şekilde yayılıp yayılmadığını anlamaktır. Bu çalışmayı gerçekleştirmek için, %0,5, %1 ve %1,5 oranında karbon çelik fiber oranına sahip beton malzemeler Şekil 4.48b'de gösterildiği gibi hazırlanmıştır. Daha sonra, malzemelerin dielektrik sabiti iki horn anten ve VNA yardımıyla ölçülmüştür ve sonuçlar Şekil 4.50'de gösterilmiştir. Bu şekilden, malzemedeki karbon çelik lifinin oranı arttıkça dielektrik sabiti değerinin azaldığı anlaşılabilir. %0,5, %1 ve %1,5 bileşen oranı için dielektrik sabiti değeri sırasıyla 5,65, 3,5 ve 2,9'dan başlamıştır.



Şekil 4.50. %0,5, %1 ve %1,5 karbon çelik içeren inşaat malzemelerinin dielektrik sabitleri

Farklı oranlardaki beton malzemenin dielektrik özelliklerine sahip olduktan sonra, bu veriler simülasyon programına yüklenerek en hassas sensör uygulaması gerçekleştirildi. Yansıma katsayısı (S11) parametrelerinin sonucu Şekil 4.51'de gösterilmiştir. Bu rakamdan dielektrik sabiti değişirken doğrusal rezonans frekans kaymasının ortaya çıktığı açıktır. Rezonans frekansları sırasıyla %0,5, %1, ve %1,5 karbon çelik elyaf numuneleri ve saf kontrol numunesi için 1,88 GHz, 2,1 GHz, 2,25 GHz ve 2,79 GHz'dir. Toplam band genişliğinin 910 MHz'e eşittir.

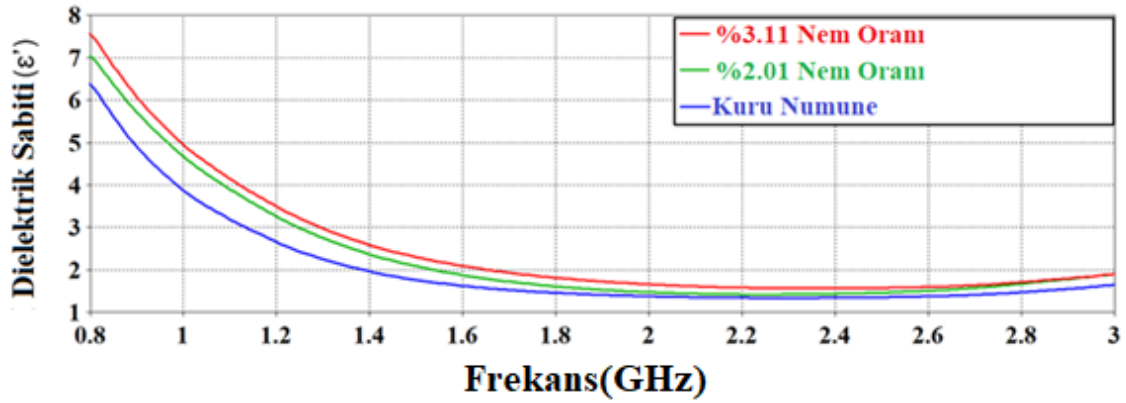




Şekil 4.51. 0,5, %1 ve %1,5 karbon çelik içeren numunelerin yansımaya katsayısı grafiği

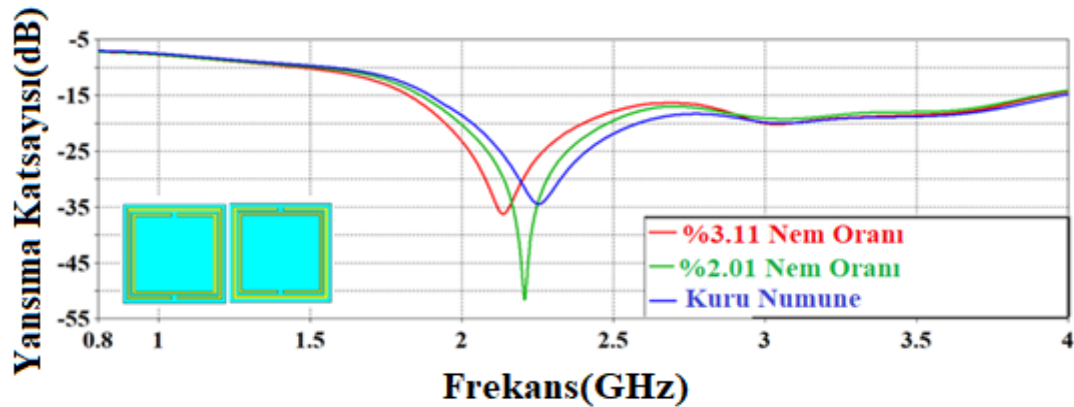
### İnşaat malzemelerinin elektromanyetik ölçüm uygulamasında nem etkisinin incelenmesi

Nem, numunelerde bulunan su oranı olarak ifade edilebilir. Suyun iletken davranışı nedeniyle elektromanyetik ölçümleri etkiler. Çalışmanın bu bölümünde, hazırlanan inşaat malzemeleri üzerinde nem etkisi incelenmiştir. Bu çalışma için, %1,5 karbonlu çelik lifli beton malzeme, damıtılmış su yardımıyla nemlendirilmiştir. Öncelikle numune 1 gün boyunca su havuzunda bekletilerek nemlenmesi sağlandı ve dielektrik özellikler VNA ile ölçüldü. Ölçümden sonra, 1 gün boyunca fırında bekletilen numunenin mevcut nem oranı %2,1'e eşit olduğu hesaplanmıştır. Son olarak beton malzemesi 2 gün boyunca fırında bekletilerek tamamen kurutuldu ve tüm işlemler sırasında dielektrik sabiti değerleri tekrar tekrar ölçüldü. Numunenin dielektrik özellikleri, Şekil 4.52'de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Numunenin dielektrik sabiti, numune içerisinde bulunan suyun varlığına bağlı olarak nem artış oranı arttıkça artar. 0,8 GHz'de ölçülen dielektrik sabiti değerleri sırasıyla %3,11, %2,01 ve tamamen kuru örnekler için 7,3, 7 ve 6,2'dir.



Şekil 4.52. Farklı nemlilik oranına sahip numunelerin dielektrik sabiti grafiği

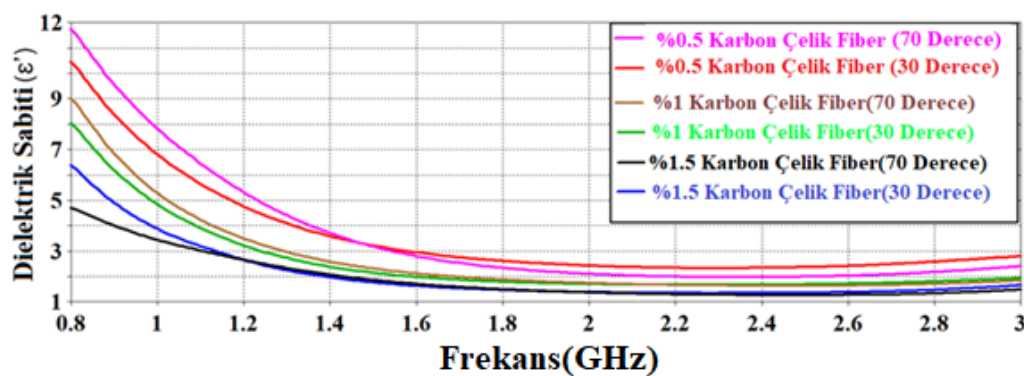
Simülasyon çalışmasını gerçekleştirmek için beton malzemenin farklı nem değerinde elde edilen dielektrik özellikleri benzetim programına tanımlanmıştır. Simülasyon çalışmaları, her bir numunenin yansımaya katsayılarını ve rezonans frekansını ortaya koymaktadır. Şekil 4.53'te gösterildiği gibi, önerilen sensör yapısının rezonans frekansı 2,13 GHz, 2,20 GHz, 2,25 GHz'e eşittir. 120 MHz toplam bant genişliği ve yansımaya katsayısı sensör yapısının hassaslığını ortaya koymaktadır. Bu sonuçtan, numunelerde var olan nem, beton malzemenin elektriksel özelliklerini etkilediğini ortaya koymaktadır. Diğer bir deyişle, mikrodalga frekans bölgesindeki dielektrik özelliklerin ölçüm sürecinde beton malzemenin nem oranı dikkate alınmalıdır.



Şekil 4.53. Farklı nemlilik oranına sahip numunelerin yansımaya katsayısı grafiği

## İnşaat malzemelerinin elektromanyetik ölçüm uygulamasında sıcaklık etkisinin incelenmesi

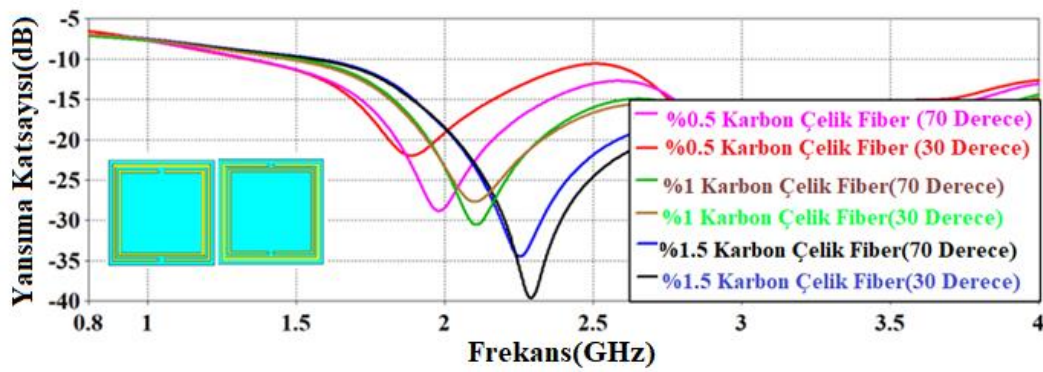
Bu bölümünde inşaat malzemelerinin üzerindeki sıcaklık etkisi, farklı sıcaklıklara sahip olan numunelerin dielektrik özelliklerinde ortaya çıkan değişikliklere dayanarak analiz edildi. Bu çalışma için, %0,5, %1 ve %1,5 karbon çelik elyaf içeren numuneler hazırlanmış ve bu numuneler tamamen kurummasını sağlamak için 2 gün boyunca 70 derecelik fırında bekletilmiştir. Bu işlemden sonra, tüm malzemeler fırın dışına alınır ve sıcaklıkları 30 dereceye sabit olana kadar ortam koşullarında bekletilir. Daha sonra, hazırlanan numunelerin 30 derecedeki dielektrik özellikleri, Şekil 4.54'te gösterilen serbest uzay modunda VNA yardımı ile ölçülmüştür. %0,5, %1 ve %1,5 karbon çelik fiberinin dielektrik özellikleri 0,8 GHz'de 10,47, 8 ve 6,38'den başlamaktadır. İkinci olarak, numune üzerindeki sıcaklık etkisini gözlemlemek için, tüm beton malzeme sıcaklığı, 1 gün boyunca fırında bırakılarak 70° kadar artırılmış ve beton malzemelerin dielektrik sabitleri ölçülmüştür. Sonuçlar Şekil 4.54'de verilmiştir. Bu şekilden açıkça anlaşılmaktadır ki, 8 GHz frekansında %0,5, %1 ve %1,5 karbonlu çelik fiber içeren numunelerin dielektrik özellikleri sırasıyla 4,7, 9,04 ve 11,75'ten başlamaktadır. Sıcaklık değeri yükseldikçe numunelerin dielektrik sabiti değerlerinde arttığı gözlemlenmiştir. Buradan hareketle sıcaklık değişiminin beton malzemenin dielektrik özelliklerini etkileyeceği ortaya konmuştur.



Şekil 4.54. Farklı sıcaklık değerlerine sahip numunelerin dielektrik sabiti grafiği

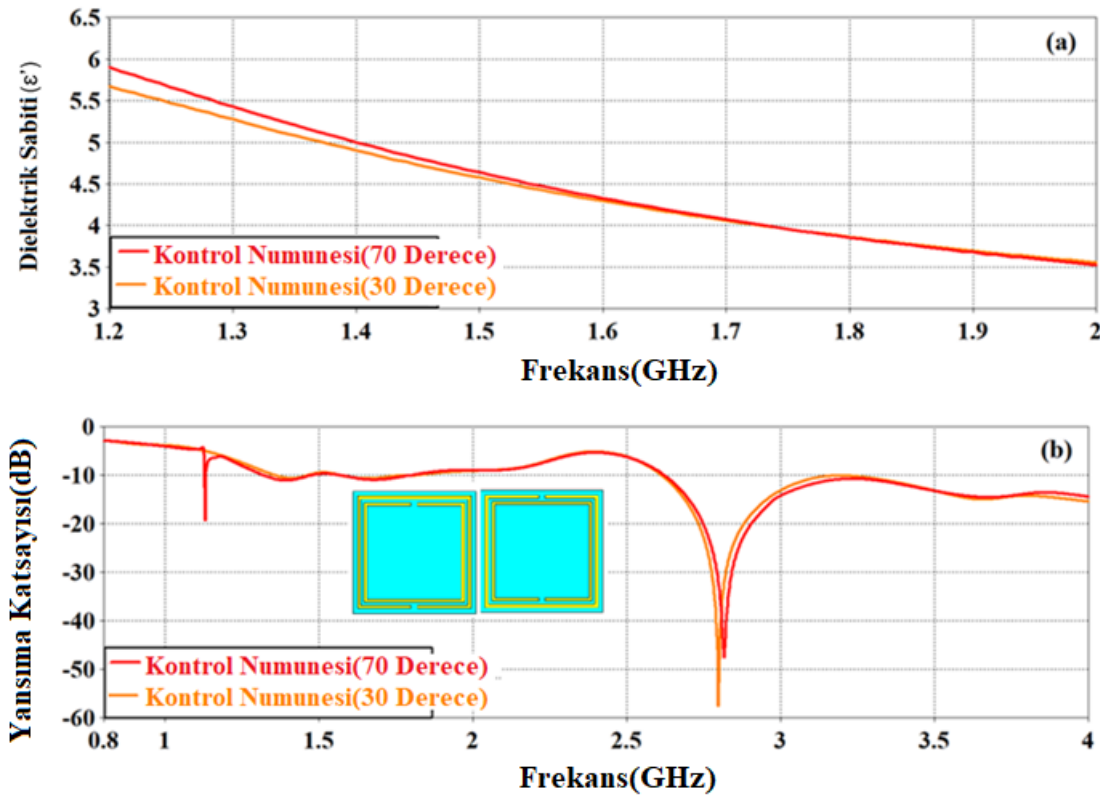
Malzemenin dielektrik özelliklerinin belirlenmesinden hemen sonra bu ölçülen değerler simülasyon programında tanımlanmış ve yansıma parametresi sonuçları Şekil 4.55'te gösterildiği gibi elde edilmiştir. Aynı oranda karbon çelik lif içeren farklı sıcaklıktaki

malzeme, dielektrik sabit değerlerine bağlı olarak tamamen farklı rezonans frekansı göstermiştir. %0,5 karbon çelik fiber oranına sahip olan malzemenin 30° ve 70°'deki rezonans frekansları sırasıyla 1,88 GHz ve 1,98 GHz'e eşittir. İki malzeme arasında 100 MHz rezonans frekans farkı vardır. Karbon çelik lif oranı %1 olan beton numunesi söz konusu olduğunda, numunelerin dielektrik özelliklerinden dolayı %0,5 karbon çeliği elyafına kıyasla daha küçük rezonans frekans kayması vardır. Son olarak, karbon çelik fiber numunesinin %1,5'i için önerilen sensör yapısının rezonans frekansı sırasıyla 2,25 GHz ve 2,288 GHz'dir ve toplam 38 MHz bant genişliği elde edilmiştir. Son olarak, beton numuneler üzerindeki sıcaklık etkisi incelenmiş ve bu etki beton malzemenin dielektrik özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Beton malzemenin dielektrik özelliklerini belirlerken sıcaklık etkisi göz ardı edilmemelidir.



Şekil 4.55. Farklı sıcaklık değerlerine sahip numunelerin yansımaya katsayısı grafiği

Bu çalışmanın son bölümü, içinde karbon çelik lif içermeyen tamamen katkısız olarak oluşturulan inşaat malzemelerinin üzerindeki sıcaklık etkisi çalışılmıştır. Çimento ve suyun karıştırılmasıyla yapılan kontrol numunesi ve karbon çelik lifi veya herhangi bir başka bileşen içermemektedir. 30 derecedeki örnekler hazırlanmış ve dielektrik özellikler iki anten yardımıyla ölçülmüştür. Şekil 4.56a'da gösterildiği gibi, kontrol numunesinin dielektrik sabiti 1,2 GHz frekansında 5,6'dır ve sıcaklık 70°'ye yükseltildiğinde bu değer 5,9'a kadar yükselmiştir. Dielektrik sabiti değerleri ölçüldükten sonra elde edilen datalar simülasyon programına yüklenerek Şekil 4.56b'de gösterilen yansımaya katsayısı parametresi elde edilmiştir. 30° ve 70° numuneler için sırasıyla 2,79 GHz ve 2,81 GHz rezonans frekansları elde edilmiştir. Numunenin toplam bant genişliği 20 MHz'e eşittir.

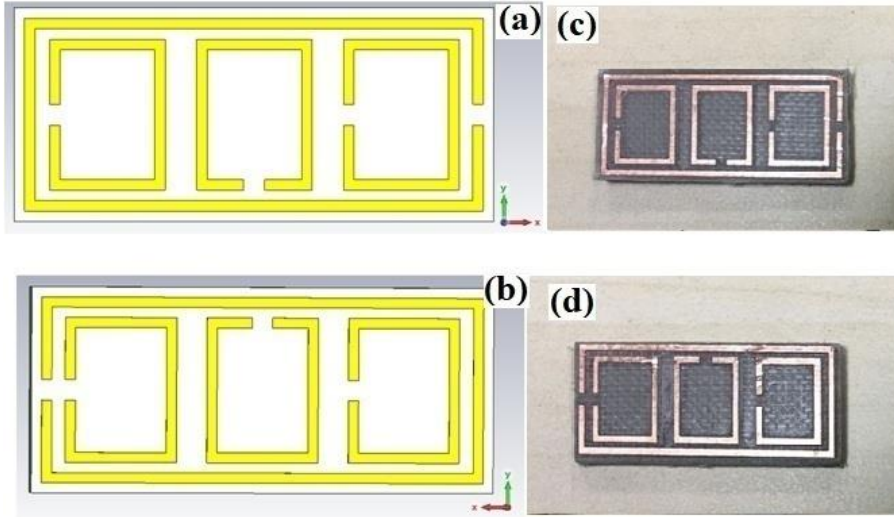


Şekil 4.56. Kontrol numunesinin farklı sıcaklıklardaki dielektrik sabiti grafiği (a) ve yansımaya katsayısı grafiği (b)

#### 4.7. Bakışsız Metamalzeme Tabanlı Derişim Tespit Eden Sensör Tasarımı

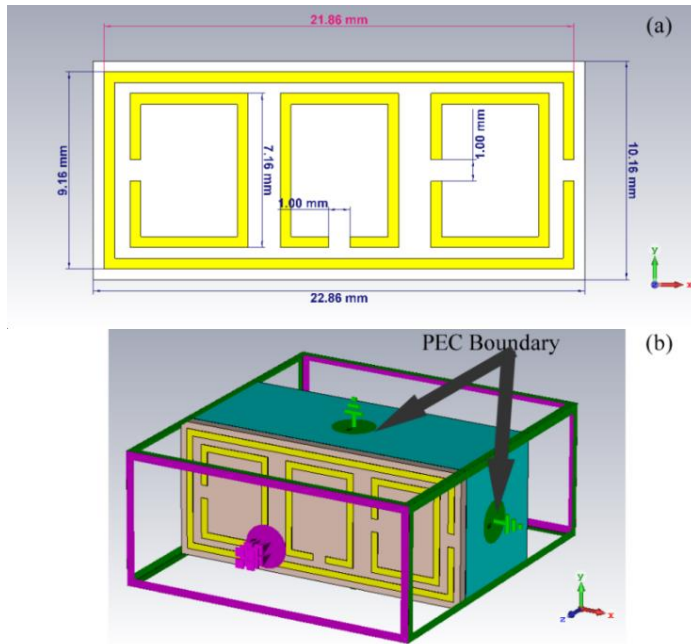
##### 4.7.1. Tasarım simülasyon ve üretim çalışmaları

Bu çalışmada, iki farklı sensör uygulamasını deneysel ve sayısal olarak ortaya çıkarmak için, ayırık halka (SRR) kullanılarak tasarlanan bakışsız metamalzeme tabanlı sensör geliştirilmiştir. Bu uygulamalar, metanol, etanol ve izopropil alkolün (İPA) saflık gösterimini ve benzin için hile tespiti uygulamalarını içerir. Madde saflığı algılaması ve diğer sensör uygulamaları için önerilen bakışsız metaalzeme sensör yapısı, Şekil 4.57a ve Şekil 4.57b'de sunulmuştur. Şekil 4.57'de verildiği gibi, tasarlanan yapı dört dikdörtgen şekilli ayırık halka rezonatörden oluşmuştur. Ara tabaka olarak 2,33 dielektrik sabiti ve 0,0012 kayıp tanjant değerine sahip olan Roger RT5870 kullanılmıştır. Rezonatörler, 0,035 mm kalınlığında bakırdan ve  $5,8 \times 10^7$  S / m iletkenliğinden oluşur. Üretimi yapılan sensör yapısının şekilleri Şekil 4.57c ve Şekil 4.57d'de gösterilmiştir.



Şekil 4.57. Tasarlanan yapıların ön (a) ve arka (b) yüzü, üretti yapıların ön (c) ve arka (d) yüzü

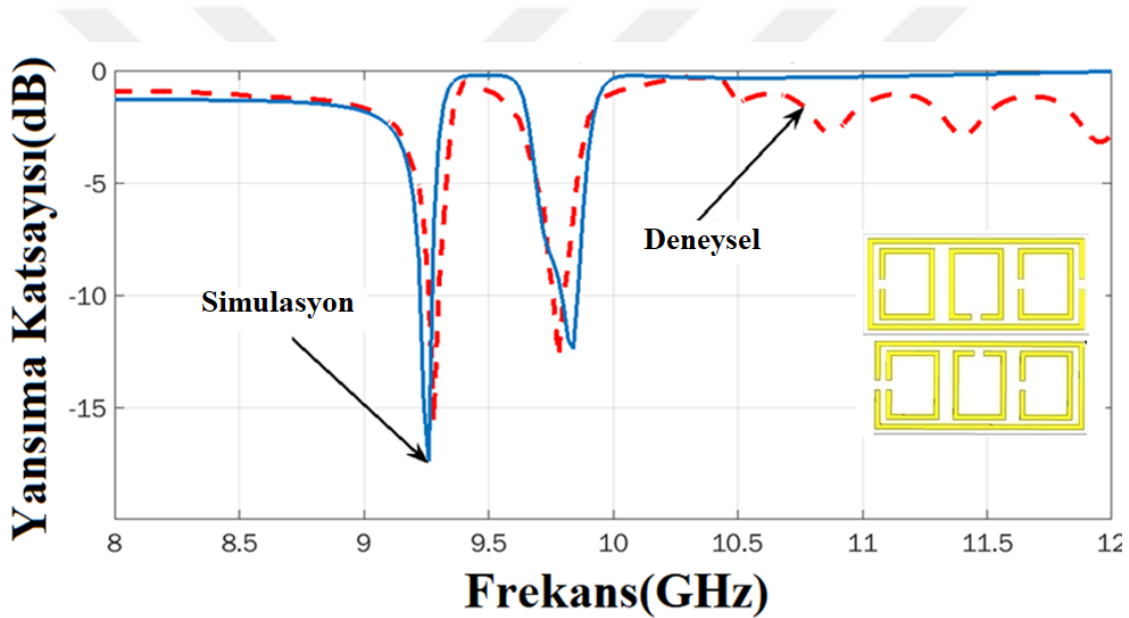
Şekil 4.58a'da verilen sensör boyutları, çalışma frekansı olan X bandı (8 GHz-12 GHz) dalga boyuna uygun olarak 22,86 mm-10,16 mm göre optimize edilmiştir. Dikdörtgen yapılarının boy uzunluğu 7,16 mm'dir ve her dikdörtgen yapısının ortasında 1 mm genişliğinde yarıklar bulunmaktadır. Şekil 4.58b'de gösterildiği üzere WR-90 dalga klavuzu ve uyumlu numune tutucu kullanarak S parametrelerini ölçmek için sınır koşulları x ve y yönlerinde mükemmel elektrik iletken ve z yönünde boşluk olarak ayarlanmıştır.



Şekil 4.58. Tasarlanan yapının boyutları (a) ve uygulanan sınır koşulları (b)



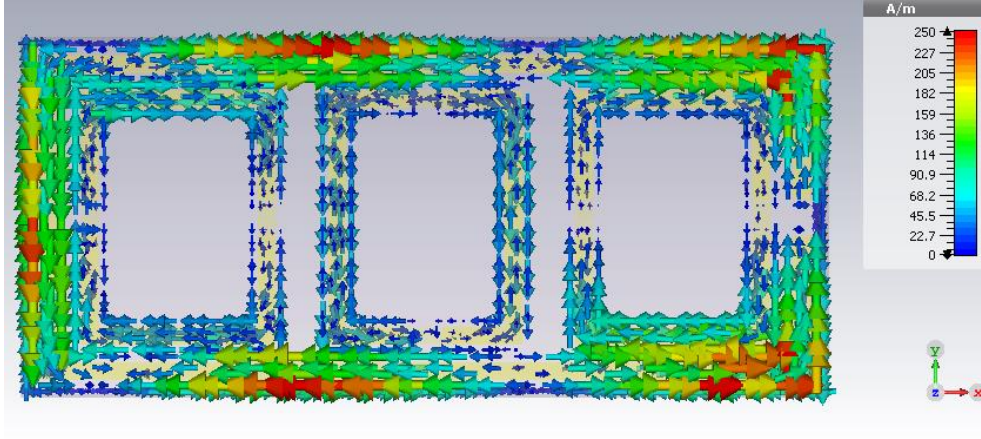
Giriş ve çıkış portları arasındaki ilişkiyi tanımlayan S-parametreleri, sensör uygulamalarında kullanılabilir. Bu çalışmada, zaman geçişli Vektör ağ analizörü (VNA) ile yansımaya katsayısı parametresi (port 1-port 1) anlamına gelen S11 kullanılmıştır. TE polarizasyon modu yayılımı kullanılarak farklı sıvı saflık ölçümlerinin doğrulanması için yapılmıştır. TE, elektrik alanının normal dalga yönüne normal (enine) olduğu bir yayılma şeklidir. Önerilen yapının çalışma prensibini açıklamak için sensör tabakası hava ile doldurulup simüle edilir. Şekil 4.59’da gösterildiği gibi, S11 rezonansı, -18 dB yansımaya seviyesi ile 9,26 GHz’de meydana gelir. Laboratuvar koşullarında yapılan deneysel çalışmalarında sayısal çalışmalarla uyum göstermiştir. Her iki rezonanstaki 20 MHz’lik fark kalibrasyon ve test ortamından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.59. Boş hava ortamındaki yansımaya katsayısı grafiği

#### 4.7.2. Yüzey akım dağılımı

Sensörün çalışma prensibini açıklamak için, 9,26 GHz’deki yüzey akımı dağılım grafiği, Şekil 4.60’ta sunulmuştur. Şekilde elektriksel ve manyetik tepkilere neden olan paralel ve anti-paralel akımlar görülebilir. Bu akımlar, rezonatör üzerinde etkili olan elektrik ve manyetik alan tarafından meydana gelir.

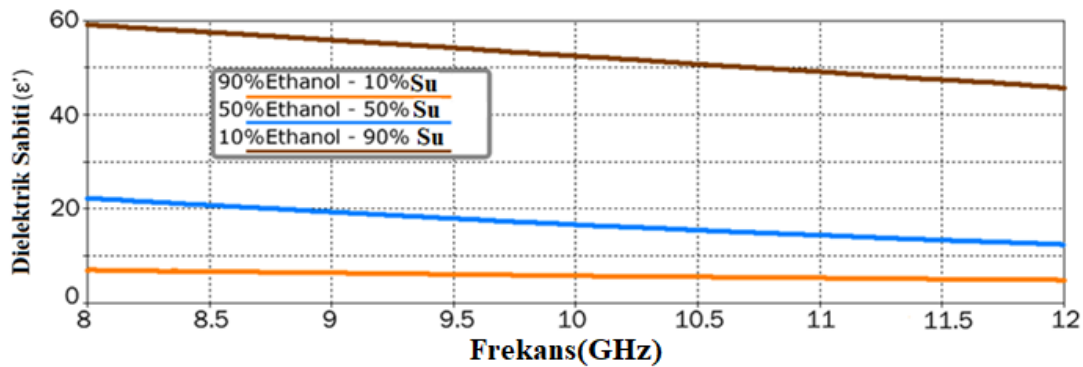


Şekil 4.60. Tasarlanan yapının yüzey akım grafiği

### 4.7.3. Sensör çalışmaları

#### Ethanol saflık çalışması

Çalışmanın bu bölümünde deneysel doğrulama için su-etanol çözeltisi hazırlanmıştır. İlk adımda, hazırlanan %10, %50 ve %90 oranlı su ve etanol karışımının dielektrik sabitini 85070 dielektrik kit kullanılarak ölçülmüştür. %10 etanol, %50 etanol ve %90 etanol su karışımı numunelerinin dielektrik sabiti değerlerinin gerçel kısmı Şekil 4.61'de gösterildiği gibi 60, 22 ve 8'dir.

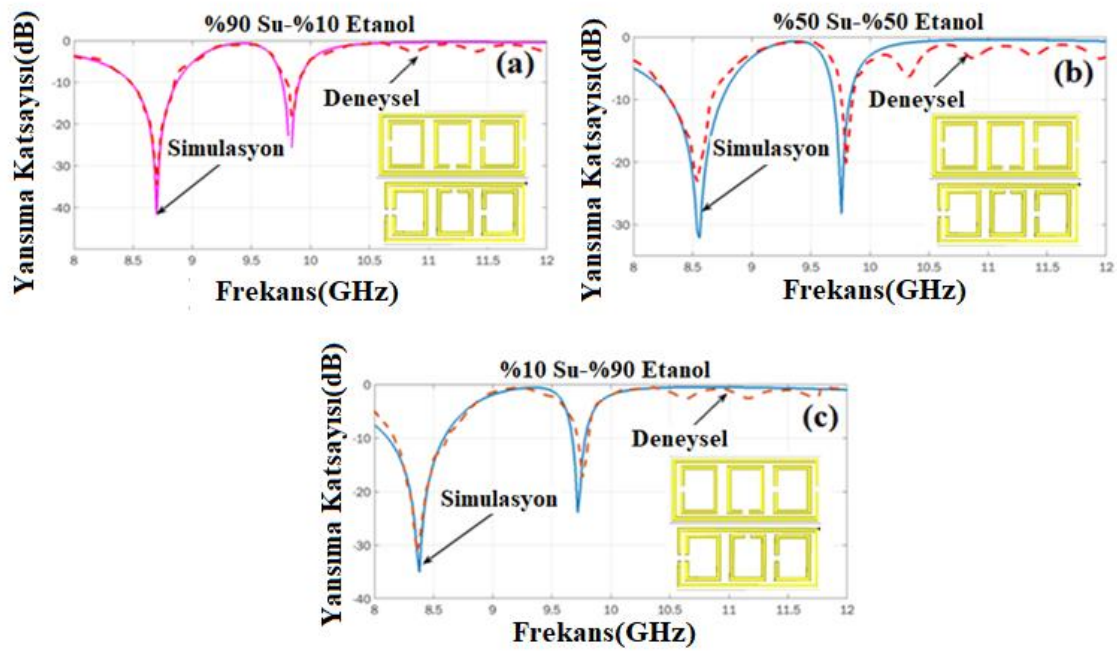


Şekil 4.61. %10, %50 ve %90 yoğunluktaki numunelerin dielektrik sabiti grafiği

İkinci adım olarak, bu numuneleri kullanarak bir simülasyon ve deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu üç numunenin S11 parametreleri ölçülmüş ve simülasyon çalışması sonuçlarıyla sunulmuştur. Bu çözümler için simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları



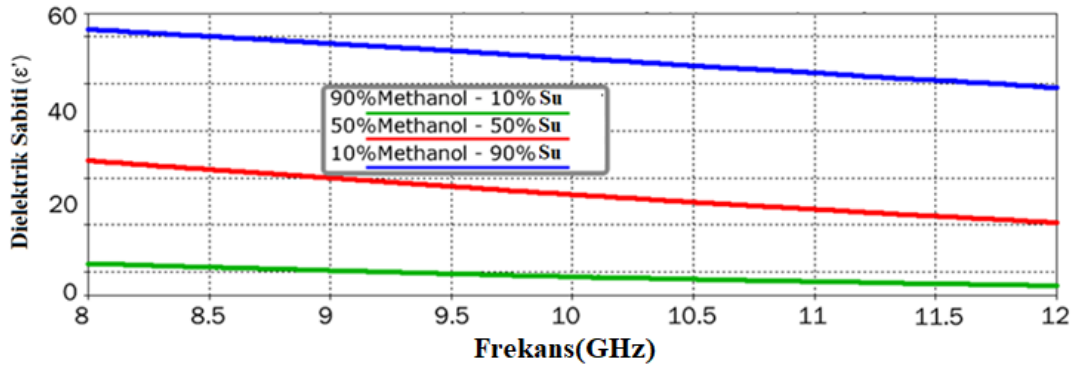
Şekil 4.62a, Şekil 4.62b ve Şekil 4.62c’de verilmektedir. Şekillerde gösterildiği gibi, CMS sisteminin rezonans frekansı etanolün içeriği arttıkça geriye doğru kaymaktadır. Solüsyonların yansımaya katsayısı rezonans frekansları, etanol-su karışımının %10, %50 ve %90 hacim oranları için 8,7 GHz, 8,55 GHz ve 8,37 GHz olarak bulunmuştur. Toplam bant genişliği, %80 etanol değişimi için 330 MHz’dir. Bunlara ek olarak, deneysel çalışma sonuçları, Şekil 4.62a, Şekil 4.62b ve Şekil 4.62c’deki simülasyon çalışması sonuçlarıyla ortaya konmuştur. Simülasyon ile deneysel çalışma sonuçları arasında 5-10 MHz’lik fark mevcuttur.



Şekil 4.62. %10, %50 ve %90 yoğunluktaki numunelerin yansımaya katsayısı grafiği

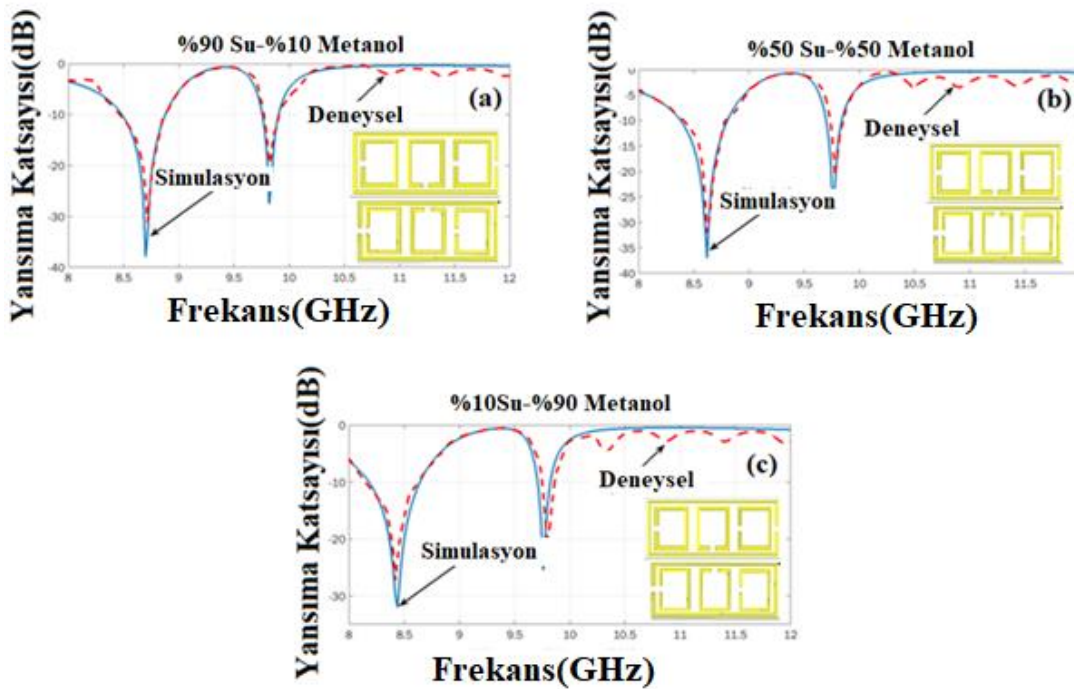
#### Methanol saflık çalışması

Önerilen sensörün ikinci saflık çalışması olarak, önceki bölümdeki gibi %10, %50 ve %90’lık bir hacim fraksiyonu olan üç farklı su-metanol karışımı hazırlanmıştır. Dielektrik sabiti değerleri, 85070E dielektrik prob kiti kullanılarak, 23 °C’de 8 GHz ve 12 GHz arasında tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Şekil 4.63’te gösterilmiştir. Su-metanol çözeltisinin hacimsel oranının %90, %50 ve %10 çözeltileri için etkin dielektrik sabiti değerleri 8 GHz değerinde 62, 34 ve 12’dir. Bu değerler 12 GHz’de 50, 20 ve 7’ye düşmüştür.



Şekil 4.63. %10, %50 ve %90 yoğunluktaki numunelerin dielektrik sabiti grafiği

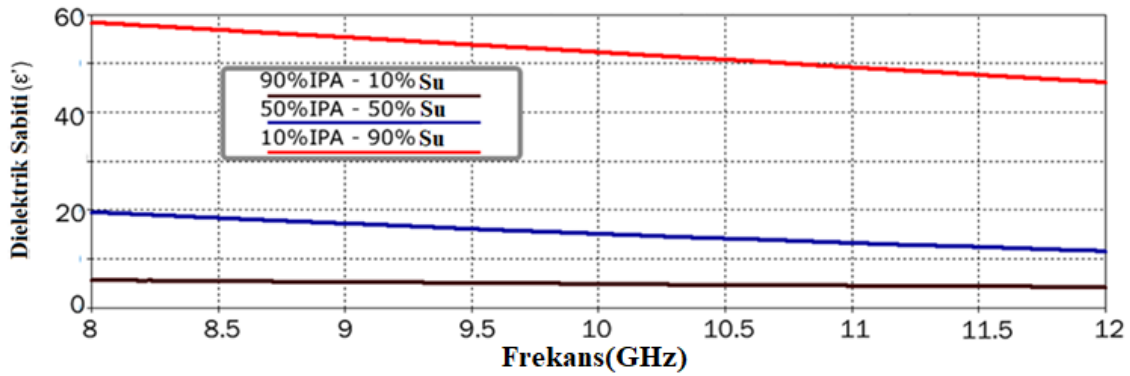
İkinci adım olarak, bu numuneleri kullanarak bir simülasyon ve deneysel çalışma hazırlanmıştır. Simülasyon programında tanımlanan malzeme parametrelerini 85070E dielektrik prob kitinden alınan deneysel değerleri kullanılarak tanımlanmıştır. Bu çözümler için simülasyon çalışması sonuçları Şekil 4.64'te verilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi, metanol içeriği arttıkça, rezonans frekansı geriye doğru kaymaktadır. Solüsyonların yansımaya katsayısı rezonans frekansları metanol-su karışımının %10, %50 ve %90 hacim fraksiyonu için 8,7 GHz, 8,61 GHz ve 8,43 GHz olarak bulunmuştur. Toplam bant genişliği, hacimdeki %80'lik metanol değişimi için 270 MHz'dir.



Şekil 4.64. %10, %50 ve %90 yoğunluktaki numunelerin yansımaya katsayısı grafiği

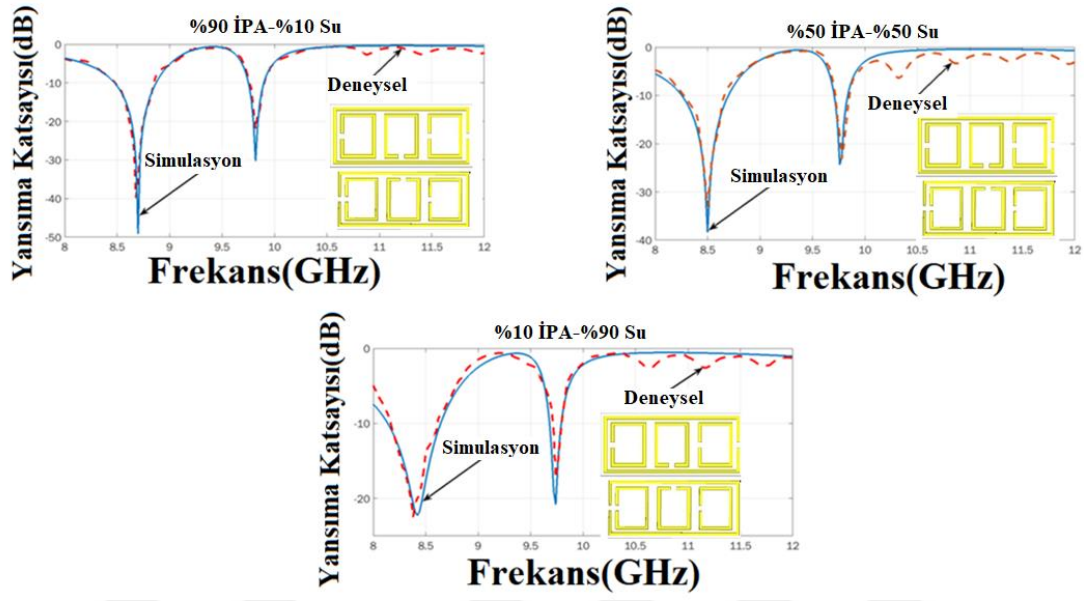
### İzo propil alkol saflık çalışması

Önerilen yapının üçüncü saflık validasyonu olarak, izopropil alkol (IPA) örnek olarak alınmıştır. %90 su ile %90 IPA, %50 su ile %50 IPA ve %90 su ile %10 IPA gibi üç farklı su- IPA çözeltisi hazırlanmıştır. İlk adım olarak, dielektrik sabiti değerleri, 85070E dielektrik prob kiti kullanılarak, 23 °C’de 8 GHz ve 12 GHz arasında tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Şekil 4.65’te gösterilmiştir. Su-IPA çözeltisinin %90, %50 ve %10’luk izo propil alkol çözeltileri için dielektrik sabiti değerleri 8 GHz’de 59, 11 ve 7’dir. Şekil 4.65’te gösterildiği gibi bu değerler 12 GHz’de 47, 20 ve 7’ye düşmektedir.



Şekil 4.65. %10, %50 ve %90 yoğunluktaki numunelerin dielektrik sabiti grafiği

İkinci adım olarak, bu numuneleri kullanarak bir simülasyon ve deneysel çalışma hazırlanmıştır. IPA-Su numuneleri için simülasyon çalışma sonuçları Şekil 4.66’da gösterilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi, sensör sisteminin rezonans frekansı IPA içeriği artarken geriye doğru kaymaktadır. Çözeltilerin yansımaya katsayısı rezonans frekansları, IPA-su karışımının %10, %50 ve %90 hacim fraksiyonu için 8,7 GHz, 8,50 GHz ve 8,42 GHz olarak bulunmuştur. Hacimde %80’lik IPA değişimi için toplam bant genişliği 280 MHz’dir. Bu çalışma aynı zamanda sınır koşulları ve önerilen yapının bakışsızlık özellikleri nedeniyle doğrusal ve daha güçlü çıktılar vermektedir. Deneysel çalışma sonuçları da simülasyon çalışmaları ile uyumludur. Kalibrasyon ve test hatalarından dolayı maksimum 5 MHz fark gözlemlenmiştir.



Şekil 4.66. % 10, % 50 ve %90 yoğunluktaki numunelerin yansima katsayısı grafiği

## 5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında bakışsımsız metamalzeme tabanlı sensör uygulamaları birçok farklı çalışmayla desteklenmiştir. Öncelikle ilk çalışmada ayırık halka tasarımı önerilmiş ve mükemmel elektrik iletken sınır şartı altında 8 GHz ve 12 GHz arasında incelenmiştir. Simülasyon çalışma sonuçları, önerilen yapının sensör tabakası havadan oluştuğunda, 10,34 GHz rezonans frekansında büyük optik aktiviteye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca önerilen yapını sensör uygulamasını göstermek için, Bor, Portland, kolemanit, kolemanit atığının dielektrik sabiti değerleri iki horn antenle açık uzay ortamında ölçülmüştür. Bununla birlikte ölçülen değerler simülasyon programına aktarılarak yansımaya katsayısı değerleri 10,45 GHz ile 10,8 GHz arasında elde edilmiştir. Elde edilen S11 yansımaya katsayısı grafiğiyle dielektrik sabiti değerleri arasında lineer bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir.

Diğer çalışmada, su, amonyak, aseton, etanol, metanol gibi farklı kimyasal sıvıları ve %10, %50 ve %90 saflık oranına sahip aseton ve ipa (izo-propil alkol) içeren maddeleri ayırmak için bakışsımsız metamalzeme sensör uygulaması önerilmiştir. Simülasyon çalışmaları mükemmel iletken sınır koşulları altında yapılmıştır. Belirlenen numunelerin dielektrik sabiti 85070E dielektrik prob kiti 8 GHz ve 12 GHz arasında ölçülmüştür. Diğer aşamada, tüm örneklerin S11 parametreleri elde edilmiş ve bu sonuçlar simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Son olarak, her bir simülasyon sonucundan 220 MHz, 380 MHz ve 400 MHz bant genişlikleri elde edilmiştir.

Ülkemizde zeytinyağı, benzin ve mazot hilelerinin önüne geçmek için bakışsımsız metamalzeme sensör yapısı geliştirilmiştir. İlk önce benzinin içine farklı miktarlarda gazyağı katılarak çalışmalar yapılmış ve 270 MHz bant genişliği elde edilmiştir. Benzin ve mazot için bir diğer hile tespiti çalışmasında için bu iki numune içine farklı oranlarda etanol katılmıştır ve çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Etanol- benzin karışımı için 350 MHz bant genişliği gözlenirken, önerilen sensör yapısının tepkisi etanol-mazot için bu değer 250 MHz'e düşmektedir. Son çalışmada ise zeytinyağı hilelerine çözüm için bir çalışma yapılmıştır ve rezonans frekansında 230 MHz'lik kaymanın olduğu gözlemlenmiştir.

Diğer bir çalışmada transformatör yağlarını ve diğer sıvı malzemelerini saflığını belirlemek için geleneksel bölünmüş ayırık kare halkalardan oluşan metamalzeme tabanlı sensör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen çalışmanın önemli bölümlerinden biri, dielektrik sabitleri 2 ile 24 arasında değişen malzemeler için yüksek kalite faktörü elde edilmesidir. Trafo sistemlerinde kullanılmış yağlar ile saf trafo yağının birbirinden ayırt edilmesi sağlanmıştır. Sensör hassasiyetini ortaya koymak için farklı derişimlerdeki etanol ve metanol sıvılarıyla çalışma gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmaları deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır.

Diğer çalışmada ise kalınlık, dielektrik sabiti, manyetik geçirgenlik ve kayıp tanjant değerinin etkilerini karakterize etmek için bakışimsız metamalzeme sensör uygulaması gerçekleştirilmiştir. Kalınlık karakterizasyon çalışması için sensör yapısının arka kısmına yerleştirilen numunenin kalınlık değeri parametrik olarak değiştirilmiştir ayrıca farklı dielektrik sabiti değerlerine sahip Arlon tipi dielektrik tabakaları kullanılarak dielektrik sabiti karakterizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Aynı işlemler manyetik geçirgenlik, kayıp tanjant karakterizasyonu çalışmaları içinde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar hem simülasyon hem de deneysel olarak birbirleriyle uyumludur.

Beton malzemelerinde hasarsız tespit çalışmasına örnek olacak şekilde bakışimsız metamalzeme sensör uygulamasını geliştirilmiştir. Gerçekleştirilen tüm çalışmalar, x, y ve z yönündeki açık uzay sınır koşullarında yapılmıştır. Numune olarak alınan %0,5, %1 ve %1,5 karbon çelik lifi içeren beton malzemelerin farklı nem ve sıcaklık değerlerinin dielektrik özellikler üzerinde etkisi incelenmiştir. Buna ek olarak, farklı oranlarda çelik lif içeren beton numunelerinde oransal tespiti yapılmıştır. Ayrıca 910 MHz, 120 MHz ve 400 MHz gibi elde edilen bant genişlikleri sensör uygulamasının hassasiyetini göstermektedir. Bu çalışmanın benzersiz yanı, MTM sensör uygulamasının beton malzemeler üzerinde herhangi bir zarar vermeden incelemeyi sağlamasıdır.

Son çalışmada ise sıvının saflığını ve benzinde hile algılamak için kullanılan bir sensör uygulaması geliştirilmesini içermektedir. Tüm deney ve simülasyon çalışmaları mükemmel iletken sınır şartlarında gerçekleştirilmiştir. Saflık oranı %10, %50 ve %90 olan Metanol, Etanol ve IPA çözeltileri mikroakışkan saflık çalışmaları için numune olarak alınmıştır. Kaçak yakıt tespiti için %95, %90, %85 ve %80 petrol-gazyağı çözeltisi kullanılmıştır. Tüm numunelerin dielektrik sabiti değerleri ölçülerek simülasyon çalışmaları yapılmıştır.

Önerilen sensör yapısı için simulasyon ve test edilmiş yansıma katsayısı verileri son derece uyumludur ve doğrusal sonuçlar elde edildiği sonuçlarda gösterilmektedir.

Son olarak bu tez çalışmasında tasarlanan yapılar birçok alanda sensör uygulamaları olarak kullanılmıştır. Eğer yapılan çalışmalar ilerletilirse sağlık, askeriye, savunma ve kimya gibi birçok sektörde kullanım alanları ortaya çıkabilir.



## KAYNAKLAR

1. Veselago, V. G. (1968). The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ . *Soviet physics uspekhi*, 10(4), 509.
2. Pendry, J. B., Holden, A. J., Stewart, W. J., and Youngs, I. (1996). Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. *Physical review letters*, 76(25), 4773.
3. Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., and Stewart, W. J. (1999). Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 47(11), 2075-2084.
4. Smith, D. R., Padilla, W. J., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S. C., and Schultz, S. (2000). Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Physical review letters*, 84(18), 4184.
5. Shelby, R. A., Smith, D. R., and Schultz, S. (2001). Experimental verification of a negative index of refraction. *Science*, 292(5514), 77-79.
6. Altıntaş, O., Aksoy, M., Ünal, E., ve Karaaslan, M. (2019). Chemical Liquid and Transformer Oil Condition Sensor Based on Metamaterial-Inspired Labyrinth Resonator. *Journal of The Electrochemical Society*, 166(6), B482-B488.
7. Cheng, Y. Z., Withayachumnankul, W., Upadhyay, A., Headland, D., Nie, Y., Gong, R. Z., ... ve Abbott, D. (2014). Ultrabroadband reflective polarization convertor for terahertz waves. *Applied Physics Letters*, 105(18), 181111.
8. Scarborough, C. P., Jiang, Z. H., Werner, D. H., Rivero-Baleine, C., ve Drake, C. (2012). Experimental demonstration of an isotropic metamaterial super lens with negative unity permeability at 8.5 MHz. *Applied Physics Letters*, 101(1), 014101.
9. Manjappa, M., Pitchappa, P., Wang, N., Lee, C., ve Singh, R. (2018). Active control of resonant cloaking in a terahertz MEMS metamaterial. *Advanced Optical Materials*, 6(16), 1800141.
10. Wang, B. X., Xie, Q., Dong, G., ve Huang, W. Q. (2019). Quad-Spectral Perfect Metamaterial Absorber at Terahertz Frequency Based on a Double-Layer Stacked Resonance Structure. *Journal of Electronic Materials*, 1-6
11. Withayachumnankul, W., Jaruwongrungee, K., Tuantranont, A., Fumeaux, C., ve Abbott, D. (2013). Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization. *Sensors and Actuators A: Physical*, 189, 233-237. (Bir daha atf yapma)
12. Hu, X., Xu, G., Wen, L., Wang, H., Zhao, Y., Zhang, Y., ... ve Chen, Q. (2016). Metamaterial absorber integrated microfluidic terahertz sensors. *Laser & Photonics Reviews*, 10(6), 962-969.



13. Zhu, M., Zhang, L., Ma, S., Wang, J., Su, J., ve Liu, A. (2018). Terahertz metamaterial designs for capturing and detecting circulating tumor cells. *Materials Research Express*.
14. Akgol, O., Unal, E., Bağmancı, M., Karaaslan, M., Sevim, U. K., Öztürk, M., ve Bhadauria, A. (2019). A Nondestructive Method for Determining Fiber Content and Fiber Ratio in Concretes Using a Metamaterial Sensor Based on a V-Shaped Resonator. *Journal of Electronic Materials*, 48(4), 2469-2481.
15. Sabah, C., Turkmen-Kucuksari, O., ve Turhan-Sayan, G. (2014). Metamaterial absorber-based sensor embedded into X-band waveguide. *Electronics Letters*, 50(15), 1074-1076.
16. Alkurt, F. O., Altintas, O., Atci, A., Bakir, M., Unal, E., Akgol, O., ... ve Sabah, C. (2018). Antenna-based microwave absorber for imaging in the frequencies of 1.8, 2.45, and 5.8 GHz. *Optical Engineering*, 57(11), 113102.
17. Hossain, M. J., Faruque, M. R. I., and Islam, M. T. (2018). Perfect metamaterial absorber with high fractional bandwidth for solar energy harvesting. *PloS one*, 13(11), e0207314.
18. Lei, L., Li, S., Huang, H., Tao, K., and Xu, P. (2018). Ultra-broadband absorber from visible to near-infrared using plasmonic metamaterial. *Optics express*, 26(5), 5686-5693.
19. Pendry, J. B. (2004). A chiral route to negative refraction. *Science*, 306(5700), 1353-1355.
20. Tretyakov, S., Nefedov, I., Sihvola, I., Maslovski, S., 2003, A metamaterial with extreme properties: The chiral nihility, Progress In Electromagnetics Research Symposium, 468, Honolulu, Hawaii, USA, Oct. 13-16.
21. Karaaslan, M., ve Bakir, M. (2014). Chiral metamaterial based multifunctional sensor applications. *Progress In Electromagnetics Research*, 149, 55-67.
22. Zarifi, D., Oraizi, H., and Soleimani, M. (2012). Improved performance of circularly polarized antenna using semi-planar chiral metamaterial covers. *Progress In Electromagnetics Research*, 123, 337-354.
23. Plum, E., Zhou, J., Dong, J., Fedotov, V. A., Koschny, T., Soukoulis, C. M., and Zheludev, N. I. (2009). Metamaterial with negative index due to chirality. *Physical Review B*, 79(3), 035407.
24. Dave, T. P., and Rathod, J. M. (2019). A thin layer dielectric and metamaterial unit-cell stack loaded miniaturized SRR based antenna for triple narrow band 4G-LTE applications. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 29(5), e21659.
25. Panda, P. K., and Ghosh, D. (2019). Wideband bow tie antenna with increased gain and directivity by using high impedance surface. *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*, 29(3), e21619.

26. Painam, S., and Bhuma, C. (2019). Miniaturizing a Microstrip Antenna Using Metamaterials and Metasurfaces [Antenna Applications Corner]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 61(1), 91-135.
27. Scarborough, C. P., Wu, Q., Werner, D. H., Lier, E., Shaw, R. K., and Martin, B. G. (2013). Demonstration of an octave-bandwidth negligible-loss metamaterial horn antenna for satellite applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61(3), 1081-1088.
28. Islam, M., Samsuzzaman, M., Islam, M., and Kibria, S. (2018). Experimental Breast Phantom Imaging with Metamaterial-Inspired Nine-Antenna Sensor Array. *Sensors*, 18(12), 4427.
29. Gupta, A., Reddy, S., and Gangwar, R. K. (2018). Dielectric resonator antenna array for X band and microwave imaging applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 60(4), 960-965.
30. Islam, M., Samsuzzaman, M., Islam, M., & Kibria, S. (2018). Experimental breast phantom imaging with metamaterial inspired nine antenna sensor array. *Sensors*, 18(12), 4427
31. Schurig, D., Mock, J. J., Justice, B. J., Cummer, S. A., Pendry, J. B., Starr, A. F., and Smith, D. R. (2006). Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science*, 314(5801), 977-980.
32. Alù, A., and Engheta, N. (2009). Cloaking a sensor. *Physical review letters*, 102(23), 233901.
33. Smith, D. R. (2005). How to build a superlens. *Science*, 308(5721), 502-503.
34. Smith, D. R., Schultz, S., Markoš, P., and Soukoulis, C. M. (2002). Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients. *Physical Review B*, 65(19), 195104.
35. Ziolkowski, R. W. (2003). Design, fabrication, and testing of double negative metamaterials. *IEEE Transactions on antennas and Propagation*, 51(7), 1516-1529.
36. Smith, D. R., Vier, D. C., Koschny, T., and Soukoulis, C. M. (2005). Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials. *Physical review E*, 71(3), 036617.
37. Applequist, J. (1987). Optical activity: Biot's bequest. *American Scientist*, 75, 58-68.
38. Barron, L. D. (2009). *Molecular light scattering and optical activity*. Cambridge University Press.
39. Lindell, I. V., Sihvola, A. H., Tretyakov, S. A., and Viitanen, A. J. (1994). Electromagnetic waves in chiral and bi-isotropic media.
40. Karadağ, F., Çömez, İ., Dinçer, F., Bakır, M., ve Karaaslan, M. (2016). Dynamical Chiral Metamaterial with Giant Optical Activity and Constant Chirality Over a

- Certain Frequency Band. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 31(8).
41. Gonulal, S., Karaaslan, M., Unal, E., Delihacioglu, K., Dincer, F., Tetik, E., and Sabah, C. (2015). 90° Polarization rotator and antireflector using meanderline chiral metamaterials: Analytical and numerical approach. *Optik*, 126(24), 5587-5592.
  42. Hu, Y., Wang, Y., Liang, L., He, Y., Chen, W., and Yan, Z. (2018). Study on Circularly Polarized Patch Antenna With Asymmetric Chiral Metamaterial. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17(5), 907-910.1
  43. Guo Juanjuan, Wang Maosheng and Huang Wanxia. (2017). Optical properties of a three-dimensional chiral metamaterial. *Chinese Physics B*, 26(12), 124211-124211.
  44. Zarifi, D., Soleimani, M., and Nayyeri, V. (2013). Parameter retrieval of chiral metamaterials based on the causality principle. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 23(5), 610-618.
  45. Bakır, M., Karaaslan, M., Akgol, O., ve Sabah, C. (2017). Multifunctional metamaterial sensor applications based on chiral nihility. *Optical and Quantum Electronics*, 49(11), 346.
  46. Dincer, F., Akgol, O., Karaaslan, M., Unal, E., Demirel, E., ve Sabah, C. (2016). New generation chiral metamaterials with small and flat chirality over a certain frequency band based on circular split ring resonators for microwave filter applications. *Modern Physics Letters B*, 30(08), 1650114.
  47. Sun, B., and Yu, Y. (2018). Analysis of circular dichroism in chiral metamaterial at terahertz frequencies. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(2), 025105.
  48. Akgol, O., Unal, E., Bağmancı, M., Karaaslan, M., Sevim, U. K., Öztürk, M., ve Bhadauria, A. (2019). A Nondestructive Method for Determining Fiber Content and Fiber Ratio in Concretes Using a Metamaterial Sensor Based on a V-Shaped Resonator. *Journal of Electronic Materials*, 48(4), 2469-2481.
  49. Sabah, C., Dincer, F., Karaaslan, M., Bakır, M., Unal, E., ve Akgol, O. (2015). Biosensor applications of chiral metamaterials for marrowbone temperature sensing. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 29(17), 2393-2403.
  50. Karaaslan, M., ve Bakır, M. (2014). Chiral metamaterial based multifunctional sensor applications. *Progress In Electromagnetics Research*, 149, 55-67.
  51. Wu, J., Wang, P., Huang, X., Rao, F., Chen, X., Shen, Z., and Yang, H. (2018). Design and validation of liquid permittivity sensor based on rrrr microstrip metamaterial. *Sensors and Actuators A: Physical*, 280, 222-227.
  52. Tümkaya, M. A., Karaaslan, M., ve Sabah, C. (2018). Metamaterial-based fluid sensor for identifying different types of fuel oil samples. *Chinese Journal of Physics*, 56(5), 1872-1878.

53. Withayachumnankul, W., Jaruwongrungssee, K., Tuantranont, A., Fumeaux, C., and Abbott, D. (2013). Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization. *Sensors and Actuators A: Physical*, 189, 233-237.
54. Bakır, M., Karaaslan, M., Unal, E., Karadag, F., Alkurt, F. Ö., Altıntaş, O., ... ve Sabah, C. (2018). Microfluidic and Fuel Adulteration Sensing by Using Chiral Metamaterial Sensor. *Journal of The Electrochemical Society*, 165(11), B475-B483.
55. Chuma, E. L., Iano, Y., Fontgalland, G., and Roger, L. L. B. (2018). Microwave Sensor for Liquid Dielectric Characterization Based on Metamaterial Complementary Split Ring Resonator. *IEEE Sensors Journal*, 18(24), 9978-9983.
56. Zhou, H., Hu, D., Yang, C., Chen, C., Ji, J., Chen, M., ... and Mu, X. (2018). Multi-Band Sensing for Dielectric Property of Chemicals Using Metamaterial Integrated Microfluidic Sensor. *Scientific reports*, 8(1), 14801.
57. Bakır, M., Karaaslan, M., Akgol, O., ve Sabah, C. (2017). Multifunctional metamaterial sensor applications based on chiral nihility. *Optical and Quantum Electronics*, 49(11), 346.
58. Neu, J., Aschaffenburg, D. J., Williams, M. R., and Schmuttenmaer, C. A. (2017). Optimization of Terahertz Metamaterials for Near-Field Sensing of Chiral Substances. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 7(6), 755-764.
59. Tamer, A., Alkurt, F. O., Altintas, O., Karaaslan, M., Unal, E., Akgol, O., ... ve Sabah, C. (2018). Transmission Line Integrated Metamaterial Based Liquid Sensor. *Journal of The Electrochemical Society*, 165(7), B251-B257.
60. Keshavarz, A., and Vafapour, Z. (2018). Water-based terahertz metamaterial for skin cancer detection application. *IEEE Sensors Journal*, 19(4), 1519-1524.
61. Lee, W., Jung, Y., Jung, H., Seo, C., Choo, H., and Lee, H. (2019). Wireless-Powered Chemical Sensor by 2.4 GHz Wi-Fi Energy-Harvesting Metamaterial. *Micromachines*, 10(1), 12.
62. Lin, B., Guo, J., Ma, Y., Wu, W., Duan, X., Wang, Z., and Li, Y. (2018). Design of a wideband transmissive linear-to-circular polarization converter based on a metasurface. *Applied Physics A*, 124(10), 715.
63. Akgol, O., Unal, E., Altintas, O., Karaaslan, M., Karadag, F., ve Sabah, C. (2018). Design of metasurface polarization converter from linearly polarized signal to circularly polarized signal. *Optik*, 161, 12-19.
64. Zou, H., Xiao, Z., Li, W., and Li, C. (2018). Double-use linear polarization convertor using hybrid metamaterial based on VO<sub>2</sub> phase transition in the terahertz region. *Applied Physics A*, 124(4), 322.
65. Zhao, J. C., and Cheng, Y. Z. (2017). Ultra-broadband and high-efficiency reflective linear polarization convertor based on planar anisotropic metamaterial in microwave region. *Optik*, 136, 52-57.

66. Xu, J., Li, R., Wang, S., and Han, T. (2018). Ultra-broadband linear polarization converter based on anisotropic metasurface. *Optics express*, 26(20), 26235-26241.
67. Duan, G., Schalch, J., Zhao, X., Zhang, J., Averitt, R. D., and Zhang, X. (2018). An air-spaced terahertz metamaterial perfect absorber. *Sensors and Actuators A: Physical*, 280, 303-308.
68. Ramya, S., and Rao, I. S. (2019). An Ultra-Thin, Bandwidth Enhanced Metamaterial Absorber for X-Band Applications. *Wireless Personal Communications*, 1-11
69. Karaaslan, M., Bağmancı, M., Ünal, E., Akgol, O., Altıntaş, O., ve Sabah, C. (2018). Broad band metamaterial absorber based on wheel resonators with lumped elements for microwave energy harvesting. *Optical and Quantum Electronics*, 50(5), 225.
70. Ji, S., Jiang, C., Zhao, J., Zhang, X., ve He, Q. (2019). Design of a polarization-insensitive triple-band metamaterial absorber. *Optics Communications*, 432, 65-70.
71. Kaur, K. P., Upadhyaya, T., ve Palandoken, M. (2018). Dual-Band Compact Metamaterial-Inspired Absorber with Wide Incidence Angle and Polarization Insensitivity for GSM and ISM Band Applications. *Radioengineering*, 27(4).
72. Yin, Z., Wan, C., Deng, G., Zheng, A., Wang, P., Yang, Y., ... ve Lu, H. (2018). Fast-Tunable Terahertz Metamaterial Absorber Based on Polymer Network Liquid Crystal. *Applied Sciences*, 8(12), 2454.
73. Bağmancı, M., Akgöl, O., Özaktürk, M., Karaaslan, M., Ünal, E., ve Bakır, M. (2019). Polarization independent broadband metamaterial absorber for microwave applications. *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*, 29(1), e21630.
74. Ünal, E., Bağmancı, M., Karaaslan, M., Akgol, O., ve Sabah, C. (2018). Strong absorption of solar energy by using wide band metamaterial absorber designed with plus-shaped resonators. *International Journal of Modern Physics B*, 1850275.
75. Liu, H., Wang, Z. H., Li, L., Fan, Y. X., and Tao, Z. Y. (2019). Vanadium dioxide-assisted broadband tunable terahertz metamaterial absorber. *Scientific reports*, 9(1), 5751
76. Bağmancı, M., Karaaslan, M., Unal, E., Özaktürk, M., Akgol, O., Karadağ, F., ... ve Bakır, M. Wide band fractal based perfect energy absorber and power harvester. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, e21597.
77. Shang, S., Yang, S., Liu, J., Shan, M., and Cao, H. (2016). Metamaterial electromagnetic energy harvester with high selective harvesting for left-and right-handed circularly polarized waves. *Journal of Applied Physics*, 120(4), 045106.
78. Karakaya, E., Bagci, F., Yilmaz, A. E., ve Akaoglu, B. (2019). Metamaterial-Based Four-Band Electromagnetic Energy Harvesting at Commonly Used GSM and Wi-Fi Frequencies. *Journal of Electronic Materials*, 1-10.

79. Karaaslan, M., Bağmancı, M., Ünal, E., Akgol, O., ve Sabah, C. (2017). Microwave energy harvesting based on metamaterial absorbers with multi-layered square split rings for wireless communications. *Optics Communications*, 392, 31-38.
80. Sabah, C. (2018, February). Tunable graphene integrated perfect metamaterial absorber for energy harvesting and visible light communication. In *2018 Global LIFI Congress (GLC)* (pp. 1-4). IEEE.
81. Oudich, M., and Li, Y. (2017). Tunable sub-wavelength acoustic energy harvesting with a metamaterial plate. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(31), 315104.
82. Smith, K. L., and Adams, R. S. (2018, July). A Circularly-Polarized Horn Antenna with Tunable Handedness Using Chiral Metamaterial Loading. In *2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting* (pp. 49-50). IEEE.
83. TÛTÛNCÛ, B., Torpi, H., ve URUL, B. (2018). A comparative study on different types of metamaterials for enhancement of microstrip patch antenna directivity at the Ku-band (12 GHz). *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 26(3), 1171-1179.
84. Dave, T. P., and Rathod, J. M. A thin-layer dielectric and metamaterial unit cell stack loaded miniaturized SRR based antenna for triple narrow band 4G LTE applications. *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*, e21659.
85. Duangtang, P., Mesawad, P., and Wongsan, R. (2016). Creating a gain enhancement technique for a conical horn antenna by adding a wire medium structure at the aperture. *Journal of electromagnetic engineering and science*, 16(2), 134-142
86. Suthar, H., Sarkar, D., Saurav, K., and Srivastava, K. V. (2015, February). Gain enhancement of microstrip patch antenna using near-zero index metamaterial (NZIM) lens. In *2015 Twenty First National Conference on Communications (NCC)* (pp. 1-6). IEEE.
87. Katiyar, P., and Liza Wan Mahadi, W. N. (2015). Impact analysis on distance variation between patch antenna and metamaterial. *Microwave and Optical Technology Letters*, 57(1), 178-183.
88. Ashyap, A. Y., Zainal Abidin, Z., Dahlan, S. H., Majid, H. A., and Saleh, G. (2019). Metamaterial inspired fabric antenna for wearable applications. *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*, 29(3), e21640.
89. Painam, S., and Bhuma, C. (2019). Miniaturizing a Microstrip Antenna Using Metamaterials and Metasurfaces [Antenna Applications Corner]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 61(1), 91-135.
90. Arora, C., Pattnaik, S. S., and Baral, R. N. (2017). Performance enhancement of patch antenna array for 5.8 GHz Wi-MAX applications using metamaterial inspired technique. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 79, 124-131.

91. Hu, Y., Wang, Y., Liang, L., He, Y., Chen, W., and Yan, Z. (2018). Study on Circularly Polarized Patch Antenna With Asymmetric Chiral Metamaterial. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17(5), 907-910.
92. Ali, H., Forsberg, E., and Jun, H. (2017). Brain imaging with slotted hybridized magnetic metamaterial hat at 7-T MRI. *Applied Magnetic Resonance*, 48(1), 67-83.
93. Islam, M., Samsuzzaman, M., Islam, M., and Kibria, S. (2018). Experimental Breast Phantom Imaging with Metamaterial-Inspired Nine-Antenna Sensor Array. *Sensors*, 18(12), 4427.
94. Zubkov, M., Hurshkainen, A. A., Brui, E. A., Glybovski, S. B., Gulyaev, M. V., Anisimov, N. V., ... and Melchakova, I. V. (2018). Small-animal, whole body imaging with metamaterial inspired RF coil. *NMR in Biomedicine*, 31(8), e3952.
95. Khan, S., and Eibert, T. F. (2018). A Multifunctional Metamaterial-Based Dual-Band Isotropic Frequency-Selective Surface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(8), 4042-4051.
96. Li, L., Wang, J., Wang, J., Du, H., Huang, H., Zhang, J., ... and Xu, Z. (2015). All-dielectric metamaterial frequency selective surfaces based on high-permittivity ceramic resonators. *Applied Physics Letters*, 106(21), 212904.
97. Bai, Z., Zhang, Q., Ju, Y., Tao, G., Jiang, X., Kang, N., ... and Zhang, L. (2015). Flexible metamaterial narrow-band-pass filter based on magnetic resonance coupling between ultra-thin bilayer frequency selective surfaces. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49(6), 065002.
98. Dong, B., Ma, H., Wang, J., Shi, P., Li, J., Zhu, L., ... and Qu, S. (2018). A thermally tunable THz metamaterial frequency-selective surface based on barium strontium titanate thin film. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(4), 045301.
99. Engheta, N., and Ziolkowski, R. W. (Eds.). (2006). *Metamaterials: physics and engineering explorations*. John Wiley & Sons.
100. Barron, L. D. (2009). *Molecular light scattering and optical activity*. Cambridge University Press.
101. Stojanović, D. B., Beličev, P. P., Gligorić, G., and Hadžievski, L. (2018). Terahertz chiral metamaterial based on twisted closed ring resonators. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51(4), 045106.
102. Semichaevsky, A., and Akyurtlu, A. (2005). A new uniaxial perfectly matched layer absorbing boundary condition for chiral metamaterials. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 4, 51-54.
103. Shi, H., Zhang, A., Zheng, S., Li, J., and Jiang, Y. (2014). Dual-band polarization angle independent 90° polarization rotator using twisted electric-field-coupled resonators. *Applied Physics Letters*, 104(3), 034102.
104. Kordi, M., and Mirsalehi, M. M. (2016). Optical chiral metamaterial based on the resonant behaviour of nanodiscs. *Journal of Modern Optics*, 63(15), 1473-1479.

105. Li, Z., Caglayan, H., Colak, E., Zhou, J., Soukoulis, C. M., and Ozbay, E. (2010). Coupling effect between two adjacent chiral structure layers. *Optics express*, 18(6), 5375-5383.
106. Li, Z., Zhao, R., Koschny, T., Kafesaki, M., Alici, K. B., Colak, E., and Soukoulis, C. M. (2010). Chiral metamaterials with negative refractive index based on four “U” split ring resonators. *Applied Physics Letters*, 97(8), 081901.
107. Weiland, T. (1977). A discretization model for the solution of Maxwell's equations for six-component fields. *Archiv Elektronik und Uebertragungstechnik*, 31, 116-120.
108. Weiland, T. (1996). Time domain electromagnetic field computation with finite difference methods. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 9(4), 295-319.
109. Thoma, P., and Weiland, T. (1995, September). A subgridding method in combination with the finite integration technique. In *Microwave Conference, 1995. 25th European* (Vol. 2, pp. 770-774). IEEE.
110. Yee, K. (1966). Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 14(3), 302-307.
111. Nicolson, A. M., and Ross, G. F. (1970). Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 19(4), 377-382.
112. Luukkonen, O., Maslovski, S. I., and Tretyakov, S. A. (2011). A stepwise Nicolson–Ross–Weir-based material parameter extraction method. *IEEE antennas and wireless propagation letters*, 10, 1295-1298.
113. Adrian Fernandez-Perez, Bart Frijns, Alireza Tourani-Rad, Contemporaneous interactions among fuel, biofuel and agricultural commodities, *Energy Economics*, Volume 58, 2016, Pages 1-10
114. Richter, R. (1949). Transformator. In *Kurzes Lehrbuch der Elektrischen Maschinen* (pp. 107-142). Springer, Berlin, Heidelberg.
115. Fu, X., and Chung, D. D. L. (1997). Effect of curing age on the self-monitoring behavior of carbon fiber reinforced mortar. *Cement and concrete Research*, 27(9), 1313-1318.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı :DALGAÇ, Şekip  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum, tarihi ve yeri :10.07.1992, Hatay  
 Medeni hali : Bekar  
 Telefon : 0 (535) 868 2784  
 e-mail : s.dalgac@gmail.com



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yükseklisans	İskenderun Teknik Üniversitesi/ Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Gaziantep Üniversitesi/ Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2016
Lise	Osman Ötken Anadolu Lisesi	2010

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	Tubitak Bursiyeri

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

Bakır, M., Karaaslan, M., Unal, E., Karadag, F., Alkurt, F. Ö., Altıntaş, O., ... & Sabah, C. (2018). Microfluidic and Fuel Adulteration Sensing by Using Chiral Metamaterial Sensor. *Journal of The Electrochemical Society*, 165(11), B475-B483.

Bakır, M., Karaaslan, Karadag, F, S. Dalgac, E. Unal, O. Akgol (2019). Metamaterial Sensor for Transformer oil and Microfluidics. *The applied computational Electromagnetic Society* (35/4)

Bakir, M., Karaaslan, M., Karadag, F., Dalgac, S., Alkurt, F. O., Bagmanci, M., & Altintas, O. (2018, August). Chiral Metamaterial Based Microfluidic Sensor. In *2018 12th International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials)* (pp. 43-45). IEEE.

### **Hobiler**

Kitap okumak, doğa gezisi, futbol



## DİZİN

**A**

amonyak · 36, 79  
anten · 4, 13, 66, 67, 79  
aseton · 31, 35, 36, 53, 79

**B**

bakımsız · 4, 7, 8, 9, 13, 18, 19,  
20, 26, 27, 29, 31, 32, 39, 40  
basınç · 8, 10

**Ç**

çelik lif · 66, 68, 70, 71, 81

**D**

DC · 3  
dielektrik sabiti · 1, 2, 6, 7, 8, 9,  
17, 22, 24, 26, 27, 29, 31, 38,  
41, 43, 44, 45, 46, 47, 49, 50,  
52

**E**

endüktif · 2, 55, 59  
etanol · 10, 31, 36, 38, 39, 43, 44,  
45, 72, 75, 79

**F**

frekans · 2, 3, 8, 14, 15, 21, 29,  
31, 34, 41, 55, 58, 59, 66, 67,  
69, 70

**G**

görüntüleme · 5, 14

**H**

hacim · 31, 41, 50, 51, 75, 76, 78  
hasarsız · 2, 9, 24, 80  
homojen · 7, 64, 67

horn anten · 13, 29, 67  
horn Anten · 87

**İ**

iletkenlik · 26, 39, 48, 54

**K**

kapasitif · 2, 56, 57  
karakterizasyon · 54, 58, 59, 61,  
62, 63, 64, 80  
Karakterizasyon · 57  
kayıp tanjant · 58, 59, 60, 61, 63,  
80  
Kayıp tanjant değeri · 58  
kırılma indisi · i, 1, 6, 7, 8, 13,  
19, 24  
kırılma indisi, · 6

**M**

malzeme · 1, 2, 5, 6  
Malzeme · 1  
manyetik geçirgenlik · 1, 6, 7, 8,  
17, 22, 24  
metamalzeme · 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8,  
9, 10, 11, 12, 13  
Metamalzeme · 1  
metanol · 77, 79  
mikrodalga · 5, 15, 27, 55, 66  
mükemmel elektrik iletken · 27,  
31, 73, 79

**N**

nem · 8, 9, 10, 64, 68, 69, 81  
numune · 30, 32, 48, 62, 68, 70,  
73, 79, 80, 81

**O**

optik · 12, 28, 79

**P**

periyodik · 3,5

polarizasyon · 1, 8, 11, 14, 20, 74

**R**

rezonans frekansı · 27, 36, 45, 46,  
49, 51, 57, 58, 63, 69, 70, 75,  
77, 78

Rezonans frekansı · 2  
rezonatör · 3, 9, 11, 14, 15, 19,  
24, 26, 27, 55, 65, 74

**S**

sensör · 2, 4, 8, 9, 10, 11, 24, 29,  
30, 31, 32, 33, 36, 76  
Sensör · 2  
sıcaklık · 9, 10, 64, 66, 69, 70,  
71, 81  
simülasyon · 31, 32, 34, 35, 36,  
37, 39, 41, 43, 45, 46, 47, 49,  
51, 55, 57, 59, 60, 76  
sinyal emici · 1, 2, 3, 11, 12

**Ş**

şekil · 4,5, 18, 21, 25, 26, 28,78

**T**

trafo yağı · 24, 49, 53, 54

**V**

veselago · 1,6, 18

**Y**

yoğunluk · 10, 75, 76, 77, 78, 79

**Z**

zeytinyağı · 39, 45, 46, 52, 80



**TEKNOVERSİTE**



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

