

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**METAMALZEMELERDEN ESİNLENİLMİŞ REZONATÖR TABANLI  
MİKRODALGA DİELEKTRİK SENSÖRÜ TASARIMI VE UYGULAMALARI**

**Kurtay ALP**

**FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ANKARA  
2023**

**Her hakkı saklıdır**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### METAMALZEMELERDEN ESİNLENİLMİŞ REZONATÖR TABANLI MİKRODALGA DİELEKTRİK SENSÖRÜ TASARIMI VE UYGULAMALARI

Kurtay ALP

Ankara Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Fulya BAĞCI

Malzemelerin dielektrik sabitlerinin deneysel yöntemlerle tespitinin havacılık, ziraat, savunma sanayi, biyomedikal gibi pek çok alanda uygulaması bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında sıvı ve katı numunelerin dielektrik sabitlerini mikrodalga frekanslarda rezonans özelliklerin değişiminden algılamaya yönelik iki farklı dielektrik sensör geliştirilmiştir. Etanol/1-pentanol homojen karışımlarının konsantrasyonlarının ve dielektrik sabitlerinin belirlenmesine yönelik geliştirilen sensör öncelikle ticari bir tam-dalga elektromanyetik simülasyon programı kullanılarak tasarlanmış ve baskı devre yöntemi ile üretilmiştir. Farklı konsantrasyonlar için WR-229 mikrodalga dalga kılavuzu ortamında ağ analizörü aracılığı ile iletim ve yansıma spektrumları ölçülmüştür. İki farklı rezonans için, rezonans frekansının ve yansıma katsayısının büyüklüğünün değişimleri ile dielektrik sabitindeki değişimler arasında birinci dereceden matematiksel bir model kurulmuştur. Bu modele göre farklı konsantrasyonlardaki etanol/1-pentanol karışımlarının dielektrik sabitlerinin gerçel ve sanal kısımları belirlenmiştir. Belirlenen değerlerin literatürde sunulan deneysel veriler ile uyumlu olduğu görülmüştür. Birinci ve ikinci bantlar için duyarlılık 10,4 MHz and 25,5 MHz olarak elde edilmiştir.

İkinci olarak, ön yüzünde mikroşerit hat, arka yüzünde dişli kapasitör tabanlı kusurlu toprak düzlemi içeren, 0-5,0 GHz frekans aralığında iki bantlı bir dielektrik sensör tasarlanmıştır. Tasarlanan sensör baskı devre yöntemi ile üretilmiştir. Numunesiz sensörün ve dielektrik sabiti bilinen teflon ve FR4 altaşın rezonans tepkisi kullanılarak, iki iletim bandı için ayrı ayrı olarak dielektrik sabitleri ile rezonans frekanslar arasında ikinci dereceden polinomiyel eşitlikler oluşturulmuştur. Kusurlu toprak düzlemi üzerine 1,0 mm kalınlıkta teflon, tahta, polikarbonat, pleksicam ve kauçuk test numuneleri yerleştirilerek iletim spektrumları ölçülmüştür. Ölçülen iletim rezonansları, oluşturulan polinomiyel eşitliklerde kullanılarak katı numunelerin dielektrik sabiti değerleri elde edilmiştir. Bu değerler literatürde sunulan değerler ile karşılaştırılmış, sensör duyarlılığı belirlenmiştir.

**Ocak 2023, 61 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Metamalzeme, mikrodalga, dalga kılavuzu, dielektrik sensör, rezonans frekansı, dielektrik sabiti.

## ABSTRACT

Master Thesis

### METAMATERIAL-INSPIRED RESONATOR-BASED MICROWAVE DIELECTRIC SENSOR DESIGN AND APPLICATION

Kurtay ALP

Ankara University  
Graduate School of National and Applied Sciences  
Department of Physics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fulya BAĞCI

Determination of the dielectric constants of materials have applications in many areas, such as aerospace, agriculture, defense industry, biomedical, in practice. In this thesis, two different dielectric sensors have been developed to detect the dielectric constants of liquid and solid samples from the change of resonance properties at microwave frequencies. The sensor developed for the determination of concentrations and dielectric constants of homogeneous mixtures of ethanol/1-pentanol was first designed using a commercial full-wave electromagnetic simulation program and fabricated by the printed circuit method. Transmission and reflection spectra of different concentrations are measured in the WR-229 microwave waveguide environment by means of a network analyzer. For two different resonances, a first-order mathematical model is established between the changes in the resonance frequency and the magnitude of the reflection coefficient and the variation in the dielectric constant. According to this model, the real and imaginary parts of the dielectric constants of ethanol/1-pentanol mixtures at different concentrations are determined. It is seen that the determined values are compatible with the experimental data presented in the literature. The sensitivity for the first and second bands was obtained as 10.4 MHz and 25.5 MHz.

Secondly, a dual-band dielectric sensor in the 0-5 GHz frequency range is designed, which has a microstrip line on the front and an interdigital capacitor-based defected ground plane on the back side. The designed sensor is fabricated with the printed circuit method. Using the resonance response of the empty sensor and sensor with teflon and FR-4 test samples with known dielectric constant, second-order polynomial equations between the dielectric constants and the resonance frequencies for the two transmission bands have been separately established. Transmission spectra are measured by placing teflon, wood, polycarbonate, plexiglass and rubber test samples with 1 mm thickness on the defected ground plane. The dielectric constant values of the solid samples are obtained by using the measured transmission resonances in the generated polynomial equations. These values are compared with the values presented in the literature and the sensor sensitivity is determined.

**January 2023, 61 pages**

**Key Words:** Metamaterial, microwaves, waveguide, dielectric sensor, resonance frequency, dielectric constant

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması konusuna beni yönlendiren, çalışmalarımın her aşamasında her zaman desteğini aldığım, beni cesaretlendiren ve güncel araştırmalara teşvik eden tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Fulya BAĞCI'ya (Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı) içtenlikle teşekkür ederim. Bu tezin gerçekleşmesinde 21B0443004 numaralı bilimsel araştırma projesi ile sağladığı finansal destekten dolayı Ankara Üniversitesi'ne teşekkür ederim. Sundukları laboratuvar imkânlarından ötürü Prof. Dr. Barış Akaoğlu (Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı) ve Prof. Dr. A. Egemen Yılmaz'a (Ankara Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı) teşekkürlerimi sunarım. Tez savunma jüri üyelerinden Prof. Dr. Alpan Bek'e (Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı) de teşekkürü borç bilirim. Ayrıca çalışmama olan desteğinden ötürü Dr. M. Suphi Gülsu'ya teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olup maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen çok sevgili eşime yüksek lisans süresince gösterdiği tüm anlayış, hoşgörü ve sabırları için en içten teşekkürlerimi sunarım. Benim yetişmemde ve bugünlere gelmemde büyük emeği olan aileme de teşekkürlerimi sunarım.

Kurtay ALP  
Ankara, Ocak 2023

## İÇİNDEKİLER

### TEZ ONAY SAYFASI

|                                                                                                                                   |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ETİK.....                                                                                                                         | i    |
| ÖZET.....                                                                                                                         | ii   |
| ABSTRACT .....                                                                                                                    | iii  |
| TEŞEKKÜR .....                                                                                                                    | iv   |
| SİMGELER DİZİNİ .....                                                                                                             | vii  |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                                                                             | viii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                                                                                           | x    |
| 1. GİRİŞ.....                                                                                                                     | 1    |
| 2. KURAMSAL BİLGİLER.....                                                                                                         | 3    |
| 2.1 Dielektrik Özellikler.....                                                                                                    | 3    |
| 2.2 Dielektrik Özellikleri Ölçme Yöntemleri .....                                                                                 | 6    |
| 2.3 S-Parametreleri (Saçılma Parametreleri) .....                                                                                 | 7    |
| 3. REZONATÖR TABANLI MİKRODALGA DİELEKTRİK SENSÖR<br>UYGULAMALARI ÜZERİNE LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR .....                          | 9    |
| 3.1 Rezonatör Tabanlı Mikrodalga Dielektrik Sensör ile Sıvı Numunelerin<br>Karakterizasyonu.....                                  | 9    |
| 3.2 Rezonatör Tabanlı Mikrodalga Dielektrik Sensör ile Katı Numunelerin<br>Karakterizasyonu.....                                  | 12   |
| 4. MATERYAL VE METOD.....                                                                                                         | 16   |
| 4.1 Tam-Dalga Elektromanyetik Simülasyon Programı, CST Microwave<br>Studio .....                                                  | 16   |
| 4.2 Mikrodalga Dalga Kılavuzları .....                                                                                            | 16   |
| 4.3 Birinci Dereceden Matris Modeli ile Sıvıların Karmaşık Dielektrik<br>Sabitlerinin Tespiti.....                                | 18   |
| 4.4 Debye Modeli .....                                                                                                            | 20   |
| 4.5 Mikroşerit İletim Hatları.....                                                                                                | 20   |
| 4.6 Metamalzemeler .....                                                                                                          | 22   |
| 5. DALGA KILAVUZUNDA REZONATÖR TABANLI MİKRODALGA<br>DİELEKTRİK SENSÖRÜ İLE ETANOL/1-PENTANOL KARIŞIMININ<br>AYIRT EDİLMESİ ..... | 24   |

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1 Sıvı Numuneler için Rezonatör Tabanlı Mikrodalga Dielektrik Sensörünün Tasarımı, Modellenmesi ve Üretimi .....               | 24 |
| 5.2 Numunesiz Sensörün S-Parametrelerinin Ölçümü.....                                                                            | 28 |
| 5.3 Rezonatör Tabanlı Mikrodalga Dielektrik Sensör ile Etanol/1-Pentanol Karışımlarının Algılanması.....                         | 29 |
| 5.4 Birinci Dereceden Matris Modeli ile Sıvıların Karmaşık Dielektrik Sabitlerinin Tahmini Değerlerinin Hesaplanması .....       | 34 |
| 6. REZONATÖR TABANLI MİKRODALGA DİELEKTRİK SENSÖRÜ İLE KATI NUMUNELERİN AYIRT EDİLMESİ .....                                     | 40 |
| 6.1 Test Numunesi ile Elektrik Alanın Pertürbasyonu.....                                                                         | 40 |
| 6.2 Katı Numuneler için Mikroşerit Tabanlı Mikrodalga Dielektrik Sensörünün Tasarımı, Üretimi ve Deneysel Karakterizasyonu ..... | 42 |
| 6.3 Dielektrik Sabitlerinin Matematiksel Modelleme ile Tespiti .....                                                             | 49 |
| 7. SONUÇ.....                                                                                                                    | 55 |
| KAYNAKLAR .....                                                                                                                  | 57 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                                                                                    | 61 |

## SİMGELER DİZİNİ

|                       |                                             |
|-----------------------|---------------------------------------------|
| $\varepsilon$         | Karmaşık dielektrik sabiti                  |
| $\varepsilon'$        | Karmaşık dielektrik sabitinin gerçel değeri |
| $\varepsilon''$       | Karmaşık dielektrik sabitinin sanal değeri  |
| $\varepsilon_0$       | Statik dielektrik sabiti                    |
| $\varepsilon_\infty$  | Dinamik dielektrik sabiti                   |
| $\delta$              | Kayıp açısı                                 |
| $\tan\delta$          | Dielektrik kayıp tanjantı                   |
| $\vec{E}$             | Elektrik alan vektörü                       |
| $\vec{H}$             | Manyetik alan vektörü                       |
| $\vec{B}$             | Manyetik akı yoğunluğu                      |
| $\vec{J}$             | Akım yoğunluğu                              |
| $\sigma$              | Öziletkenlik                                |
| $\omega$              | Açısal frekans                              |
| $\vec{k}$             | Dalga yayılım vektörü                       |
| $\varepsilon_{etkin}$ | Etkin elektriksel geçirgenlik               |
| $\varepsilon_r$       | Bağıl dielektrik sabiti                     |
| $\tau_r$              | Gevşeme süresi                              |
| $\mu_0$               | Uzaysal manyetik geçirgenlik                |
| $\vec{D}$             | Elektrik akı yoğunluğu                      |
| $Q$                   | Kalite faktörü                              |

## Kısaltmalar

|     |                              |
|-----|------------------------------|
| AHR | Ayrık halka rezonatörü       |
| VAA | Vektörel ağ analizörü        |
| TE  | Enine elektrik               |
| TM  | Enine manyetik               |
| TEM | Enine elektromanyetik        |
| EMD | Elektromanyetik dalga        |
| PEC | Mükemmel elektriksel iletken |
| RF  | Radio frekansı               |
| FAÇ | Frekans algılama çözünürlüğü |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.1.a. Bir mikrodalga dalga kılavuzu b. dalga kılavuzunda genel yayılım modları (Anonymous, 2021).....                                                 | 17 |
| Şekil 4.2 Bir mikroşeritte elektromanyetik yayılma alanı .....                                                                                               | 21 |
| Şekil 4.3 Mikroşerit hat a. 3 boyutlu b. 2 boyutlu kesit görünümü.....                                                                                       | 21 |
| Şekil 4.4.a.Bir moleküldeki atomlar ve b.periyodik yapıya sahip metamalzemeler.....                                                                          | 22 |
| Şekil 4.5 Malzemelerin elektriksel ve manyetik geçirgenliklerinin işaretlerine bağlı olarak sınıflandırılması (Demirsoy vd, 2016).....                       | 23 |
| Şekil 5.1 Simetrik yapının a. CST Microwave Studio’da çizdirilen görünümü b. simüle edilen yansıma ( $S_{11}$ ) spektrumu .....                              | 24 |
| Şekil 5.2 Mikrodalga dalga kılavuzu içindeki metamalzemenin şematik düzeni ve geometrik parametreleri .....                                                  | 25 |
| Şekil 5.3 Manyetik karıştırıcı.....                                                                                                                          | 26 |
| Şekil 5.4.a.Ölçüm düzeneğinin şekli b. sensörün ve havuzun dalga kılavuz içerisindeki konumu .....                                                           | 27 |
| Şekil 5.5.a.Üretilen metamalzemenin fotoğrafı b. xps köpük malzemesinden üretilen yapay sıvı havuzu c. WR-229 dalga kılavuzu.....                            | 28 |
| Şekil 5.6 Numunesiz sensörün a. $S_{11}$ için simülasyon ve ölçüm sonuçları b. $S_{21}$ için simülasyon ve ölçüm sonuçları.....                              | 29 |
| Şekil 5.7 %10 Etanol/%90 1-pentanol ve %90 etanol/%10 1-pentanol karışımı için ölçülen yansıma spektrumları.....                                             | 31 |
| Şekil 5.8 Birinci bant için farklı oranlardaki etanol/1-pentanol $S_{11}$ ölçüm sonuçlarının yakından görünümü .....                                         | 32 |
| Şekil 5.9 İkinci bant için farklı oranlardaki etanol/1-pentanol $S_{11}$ ölçüm sonuçlarının yakından görünümü .....                                          | 33 |
| Şekil 5.10 %30 1-pentanol/%70 etanol için a. birinci rezonans ve b. İkinci rezonans frekanslarda elektrik alan dağılımları.....                              | 33 |
| Şekil 5.11.a. Birinci bant ve b. ikinci bant için tahmini karmaşık dielektrik sabiti değerlerinin literatür değerleriyle karşılaştırılması.....              | 37 |
| Şekil 6.1.a. Konvansiyonel paralel plakada, b. geniş dişli kapasitörlerde ve c. dişli kapasitörlü mikroşerit yapıda elektrik alan çizgilerinin görünümü .... | 42 |
| Şekil 6.2 Mikroşerit iletim hattına bağdaşan dişli kapasitör yapıya sahip sensörün a. ön ve b. arka yüzünün CST Microwave Studio’da çizdirilen görünümü ...  | 43 |
| Şekil 6.3 Numunesiz sensörün simülasyondan elde edilen iletim spektrumu .....                                                                                | 43 |
| Şekil 6.4 Simülasyon ortamında a. birinci bant ve b. ikinci bant için dielektrik sabitine karşı frekans kaymalarının değişimi .....                          | 44 |

|                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 6.5 Numunesiz sensörün a. ön yüzü, b. arka yüzü ve c. vektör ağ analizörü ile ölçülen iletim spektrumu .....                                                                 | 45 |
| Şekil 6.6 Numunesiz sensörün ölçülen iletim spektrumu .....                                                                                                                        | 46 |
| Şekil 6.7.a. Üzerinde dielektrik sabiti 4,5 olan bir numune olan sensörün birinci bant ve b. ikinci bant için CST Microwave Studio’da simüle edilen elektrik alan dağılımları..... | 47 |
| Şekil 6.8 İncelenen dielektrik numuneler .....                                                                                                                                     | 47 |
| Şekil 6.9 Üzerinde numuneler olan sensörün birinci bant için ölçülen iletim spektrumları .....                                                                                     | 48 |
| Şekil 6.10 Üzerinde numuneler olan sensörün ikinci bant için ölçülen iletim spektrumları .....                                                                                     | 49 |
| Şekil 6.11 Simülasyon ve denklem 6.6 ile elde edilen sensörün rezonans frekansına karşı numunenin dielektrik sabitinin birinci bant için grafiği .....                             | 52 |
| Şekil 6.12 Simülasyon ve denklem 6.7 ile elde edilen sensörün rezonans frekansına karşı numunenin dielektrik sabitinin ikinci bant için grafiği.....                               | 52 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 4.1 WR-229 dalga kılavuzunun teknik özellikleri .....                                                                                                                                             | 18 |
| Çizelge 5.1 %99,9 saflıkta etanol ve %100 saflıkta 1-pentanol karışım oranları .....                                                                                                                      | 30 |
| Çizelge 6.1 Farklı test numunelerinin ölçülen dielektrik sabitlerinin gerçel değerlerinin literatür sonuçlarıyla karşılaştırılması.....                                                                   | 51 |
| Çizelge 6.2 Farklı test numunelerinin ölçülen rezonans frekanslarının, ölçüm sonucuna göre oluşturulan denklemden ve simülasyondan elde edilen rezonans frekansı değerlerine göre karşılaştırılması ..... | 53 |



## 1. GİRİŞ

Metamalzemeler, olağan dışı elektromanyetik ve optik özellikler gösterebilen, periyodik, dalga boyu altı rezonatörlerden oluşan, doğada bulunmayıp yapay olarak geliştirilmiş malzemelerdir. Metamalzemelerin deneysel olarak elektriksel ve manyetik geçirgenliklerinin negatif olabildiği ispatlandıktan sonra fiziksel özellikleri bilim insanları tarafından kullanılarak farklı uygulamalar geliştirilmiştir. Metamalzemelerin çeşitli uygulama alanından biri olan metamalzeme tabanlı soğurucular, değişik dalga bantlarında yapılan çalışmalarda ilgi görmektedir. Antenlerin özelliklerinin (ışınma deseni, kazanç, geri dönüş kaybı vb.) geliştirilmesi için metamalzemelerden faydalanılmaktadır. Bu çalışmaların dışında, metamalzemeler veya metamalzemelerden esinlenilmiş yapılar baz alınarak, çok çeşitli sensör uygulamaları geliştirilmektedir.

Metamalzeme tabanlı sensörler, yüksek hassasiyette algılama yapabilmek için metamalzemelerin yerel alan geliştirme ve rezonans özelliklerini kullanmaktadır. Metamalzeme sensörleri kanser hücresi tespiti, gerinim ölçümü (Melik vd., 2009), sıcaklık ölçümü (Zhou vd., 2020), konum tespiti (Dhar vd., 2014), dielektrik sabiti tespiti (Gulsu vd. 2020; Bağcı vd. 2022), sıvıların saflık derecelerini kontrol etmek (Khanna vd, 2020) gibi çok çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır.

Metamalzeme tabanlı sensörler üzerine yapılan çalışmaların çoğu frekans kaymasına sebep olan dielektrik sabiti, sıcaklık, nem, gerinim gibi parametreler üzerine yapılmıştır. Katı malzemelerin dielektrik sabitlerinin belirlenmesi kimya, eczacılık, gıda, otomotiv, havacılık gibi pek çok sanayi ve endüstri kolunda ve savunma sanayi açısından oldukça önemlidir (Haq vd., 2019). Dielektrik sabitinin doğru ölçümü anten, mikrodalga devre tasarımı, tahribatsız monitörleme uygulamaları açısından da hayatidir. Ayrıca, metamalzeme tabanlı sensörlerin önemli sayılabilecek kullanım alanlarından birisi de katı ve sıvılar için dielektrik sensörleridir. Dielektrik sensörlerin potansiyel kullanım alanlarından birisi etanol-su karışımındaki su oranının tespit edilmesidir. Mazot ve benzinle çalışan araçların performanslarını arttırmak için hile ile akaryakıtlara etanol dışında maddeler karıştırılabilmektedir. Bu sebeple araçlarda performans kaybı yaşanmakta, hatta motorlar ciddi anlamda hasar görmektedir.

Buna ek olarak, alkollü içeceklerde etil alkol yerine metil alkol karıştırılması ile yapılan sahte içkilerin tüketilmesi sonucu zehirlenmeye bağlı olarak görme kaybı, iç organlarda ağır hasarlar yaşanmakta, hatta ölümler olabilmektedir. Sıvı-sıvı karışımlarında (alkol-alkol, alkol-su, metanol-etanol, etanol-pentanol vb.) yapılan hilelerin tespiti için fiziksel, veya kimyasal yöntemler kullanılmaktadır. Refraktometre ve benzeri araçlar kullanılarak bu tespit yapılabileceği gibi, metamalzeme tabanlı sensörler kullanılarak da bu tespitlerin yapılabilmesi mümkün olmaktadır. Metamalzeme tabanlı sensörler, yüksek duyarlılık, kolay üretilebilir olma, eşzamanlı ölçüm alabilme, düşük maliyetli olma gibi avantajlarından ötürü ilgi çekmektedir.

Bu tez çalışmasında ikili sıvı karışımlarını ve katı numuneleri yüksek duyarlılıkta algılamak üzere metamalzemelerden esinlenilmiş rezonatör tabanlı iki adet dielektrik sensör geliştirilmiştir. Farklı etanol/1-pentanol ikili homojen sıvı karışımlarının konsantrasyonları ve karmaşık dielektrik sabitleri, geliştirilen metamalzeme tabanlı iki bantlı dielektrik sensörü ile mikrodalga dalga kılavuzu ve vektör ağ analizörü kullanılarak S-parametresi ölçümlerinden tespit edilmiştir. Katı numunelerin dielektrik sabitlerinin tespitine yönelik ön yüzünde mikroşerit hat, arka yüzünde toprak düzleminde aşındırılmış dişli kapasitör içeren rezonatör tabanlı bir dielektrik sensör tasarlanmıştır. Tasarlanan sensör ürettirilerek kusurlu toprak düzlemi üzerine yerleştirilen 1 mm kalınlığındaki teflon, tahta, polikarbonat, pleksicam ve kauçuk numunelerin dielektrik sabitleri, dielektrik sabiti ile rezonans frekansı arasında oluşturulan eşitlikler kullanılarak yüksek doğrulukla belirlenmiştir.

## 2. KURAMSAL BİLGİLER

### 2.1 Dielektrik Özellikler

Dielektrik malzemeler dış elektrik alan altında kutuplanabilen elektriksel yalıtım malzemeleridir. Malzemenin dielektrik özellikleri, malzemelerdeki elektrik ve manyetik alanların depolanması ve dağıtılması hakkında değerli bilgiler sağlar ve ayrıca malzemenin potansiyel uygulamalarda kullanılmasının fizibilitesi hakkında fikir verir. Malzemenin kutuplanabilirliği karmaşık dielektrik sabiti ile ifade edilir. Karmaşık dielektrik sabiti karmaşık bir sayıdır ve gerçel kısmı enerji depolanması, sanal kısmı ise enerji kaybı ile ilişkilidir (Ozdemir vd., 2019).

Dielektrik sabiti, numunenin elektrik dipol momenti ile dış alanın etkileşiminin bir ölçüsüdür. Malzemelerin dielektrik özellikleri, yani elektriksel geçirgenlik, tipik olarak frekansın bir fonksiyonu olarak ölçülür ve dielektrik/empedans spektroskopisi olarak adlandırılır. Dielektrik ölçümü, malzemenin birçok uygulamada kullanılması için gerekli kritik bir parametre olan malzemelerin elektriksel özellikleri hakkında bilgi sağlayabildiğinden, özellikle yüksek frekanslarda, malzeme davranışını anlamak için önemlidir. Radyofrekans ve mikrodalga frekanslarında malzemelerin karmaşık dielektrik özelliklerinin ölçümü özellikle malzeme bilimi, iletişim, mikrodalga devre tasarımı, biyolojik araştırmalar ve savunma sanayi gibi alanlarda çok önemlidir.

Elektromanyetik dalgalar (EMD), ivmelendirilmiş elektrik yükleri tarafından oluşturulmaktadır. EMD serbest uzayda veya kılavuzlanmış ortamda yayılabilir. EMD'nin serbest uzayda yayılımına kablosuz haberleşme örnek gösterilebilirken, kılavuzlanmış ortam için iletim hatları, dalga kılavuzları ve mikroşerit hatlar örnek gösterilebilir.

İletim hatları, dalga kılavuzları ve mikrodalga rezonatörlerin karakterizasyonu için elektromanyetik teoremin temel denklemlerine ihtiyaç vardır. Bu denklemler Maxwell

tarafından birleştirilmiş bir teoriyle ortaya konulmuştur. Zaman bölgesindeki Maxwell denklemlerinin diferansiyel formu dielektrik madde içinde

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} \quad (2.2)$$

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

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

olarak verilmektedir.

$e^{j\omega t}$  zaman bağımlılığı olan frekans bölgesinde Maxwell denklemlerinin diferansiyel formu ise,  $\omega$  açısal frekans olmak üzere,

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \vec{B} \quad (2.5)$$

$$\nabla \times \vec{H} = -j\omega \vec{D} + \vec{J} \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.7)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.8)$$

olarak tanımlanmaktadır.

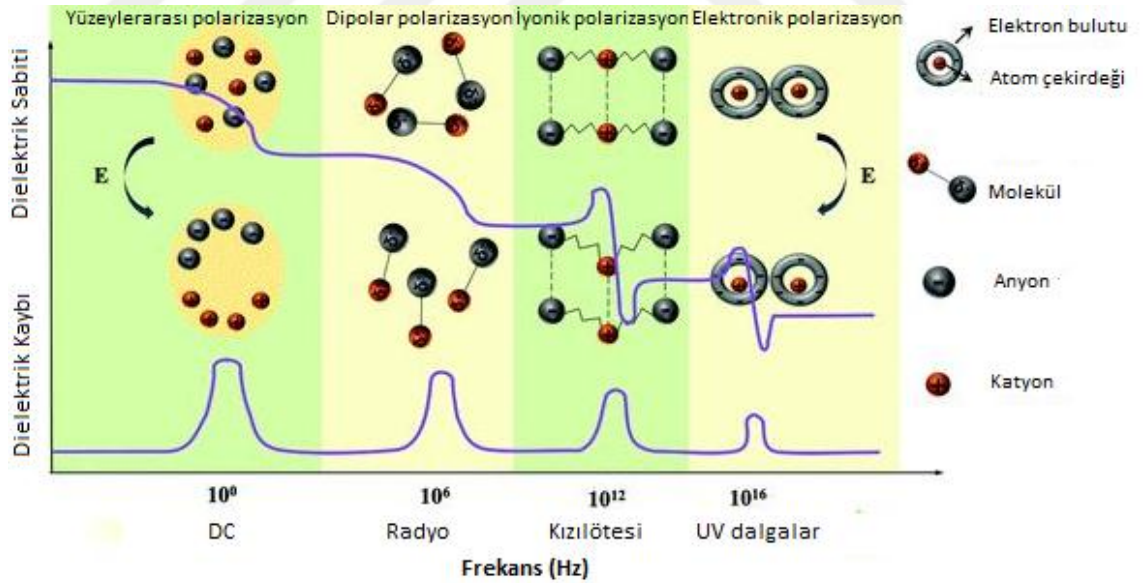
$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \text{ ve } \vec{J} = \sigma \vec{E} \text{ yazılarak} \quad (2.9)$$

$$\nabla \times \vec{H} = -j\omega \vec{E} + \sigma \vec{E} = j\omega \left( \epsilon - j\frac{\sigma}{\omega} \right) \vec{E} = j\omega(\epsilon' - j\epsilon'') \vec{E} \quad (2.10)$$

Burada  $\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega}$  ve  $\varepsilon = \varepsilon'(1 - \tan\delta) = \varepsilon_0\varepsilon_r(1 - \tan\delta)$  şeklinde gösterilir. Kayıp tanjantı olarak adlandırılan  $\tan\delta$  eşitlik 2.11 ile tanımlıdır:

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \quad (2.11)$$

İletim akımının deplasman akımına oranın ölçüsü  $\tan\delta$ 'ı verir.  $\delta$  kayıp açısı olarak tanımlanmaktadır.  $\sigma \gg \omega\varepsilon$  ise ortam iyi iletken,  $\sigma \ll \omega\varepsilon$  ise ortam iyi yalıtkan olarak adlandırılır. Düşük frekanslarda iyi iletken olan bir ortam yüksek frekanslarda kayıplı yalıtkan gibi davranabilir. Dielektrik sabiti frekansın fonksiyonu da olabilir. Böyle bir durumda ortamın dispersif olduğu söylenir (Görür 2019). Dielektrik malzemelerin bir elektrik altında gösterdiği toplam polarizasyon, çeşitli mikro polarizasyon mekanizmalarının toplamı olabilir. Bu toplam katkıyı sağlayan polarizasyon mekanizmaları (iyonik polarizasyon, dipolar polarizasyon, elektronik polarizasyon ve yüzeyler arası polarizasyon), Şekil 2.1'de gösterilmiştir (Liu vd. 2022).



Şekil 2.1 Kutuplanabilirliğin frekans ile değişimi (Liu vd., 2022)

Katı ve sıvıların mikrodalga frekansında kutuplanma özellikleri dipolar ve iyonik kutuplanmalardan kaynaklanmaktadır.

Mikrodalga fırın kullanılarak suyun ısınması suyun sahip olduğu dipol momentinin mikrodalga frekanslarda dönme hareketi yapmasından kaynaklanmaktadır. Dönme hareketi ile ortaya çıkan sürtünme kuvveti sonucunda moleküller enerji kazanarak ısınmaktadır (Gümüşdereioğlu, 2012).

## 2.2 Dielektrik Özellikleri Ölçme Yöntemleri

Dielektrik sabiti ölçüm yöntemlerinde en popüler olan yöntemler; koaksiyel hat yöntemi, iletim hattı yöntemi, serbest uzay yöntemi, rezonant kavite yöntemi ve paralel plaka yöntemidir.

Koaksiyel hat yöntemi, yüksek frekanslarda kayıplı malzemelerin dielektrik sabitinin ölçülmesinde en sık kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde numuneden yansıyan sinyalin faz ve büyüklüğü bir metal prob ile ölçülmektedir. Oldukça basit bir yöntemdir ve 0,5 GHz ile 110 GHz arasında geniş frekans aralığında dielektrik ölçümlerinin yapılabilmesini sağlar. Fakat dielektrik sabiti düşük numunelerde bu yöntem hatalı sonuçlar verebilmektedir (Khan vd., 2012).

Dalga kılavuzu iletim hattı yönteminde numune dalga kılavuzunun merkezine yerleştirilmektedir. Bu yöntemde hem iletim hem yansıma katsayıları ölçülmektedir. Bu yöntem koaksiyel hat yöntemine göre daha doğru sonuçlar verse de çalışma frekans aralığı koaksiyel hat yöntemine göre daha dardır (Khan vd., 2012).

Serbest uzay yönteminde, büyük, düz yüzeyli ve homojen katı numuneler iki horn anten arasına yerleştirilmektedir. Bu yöntem temassız ve tahribatsızdır, tipik olarak daha yüksek frekansta kullanılır, ancak düşük frekansta da kullanılabilir. Bu yöntemi kullanmanın avantajı, numuneye fiziksel temas yokken yansıma ve iletim katsayıları elde etmektir, bu da ince yassı numuneler için en iyi yöntemdir (Khan vd., 2012).

Rezonant kavite yönteminde, dalga kılavuzu/kavite içerisine numune yerleştirilerek merkez rezonans frekansındaki ve kalite faktöründeki değişim ölçülmektedir. Ölçümden

önce kavitenin kalibre edilme gerekliliği yöntemin bir dezavantajı olarak düşünülebilir. Bununla birlikte numune hazırlanması kolaydır, kısa zaman aralığında çok sayıda numune ölçülebilmektedir (Khan vd., 2012).

Paralel plaka yönteminde dielektrik numune iki elektrot arasına yerleştirilmektedir. Ölçümler LCR metre veya empedans analizörü ile gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem düşük frekanslar ( $f < 1$  GHz) için geçerlidir (Khan vd., 2012).

### 2.3 S-Parametreleri (Saçılma Parametreleri)

Mikrodalga frekanslarında, voltaj ve akımın direk ölçümü için voltmetre ve ampermetre mevcut değildir. Bundan dolayı voltaj ve akım bir mikrodalga devresinde temel rol oynamazlar. Mikrodalga devrelerinde, gelen ve yansıyan dalgalar arasında bağlantı sağlayan parametrelere ihtiyaç duyulur. Saçılma matrisiyle tanımlanan bu parametrelere saçılma parametreleri, kısaca S parametreleri, denir.

Güç ifadesini kullanarak iki kapılı elektrik ağı için yeni ifade saçılma matrisi şeklinde ifade edilir ve aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (2.13)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (2.14)$$

İki kapılı elektrik ağının S parametreleri şu şekilde elde edilir:

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0} \quad (2.15)$$

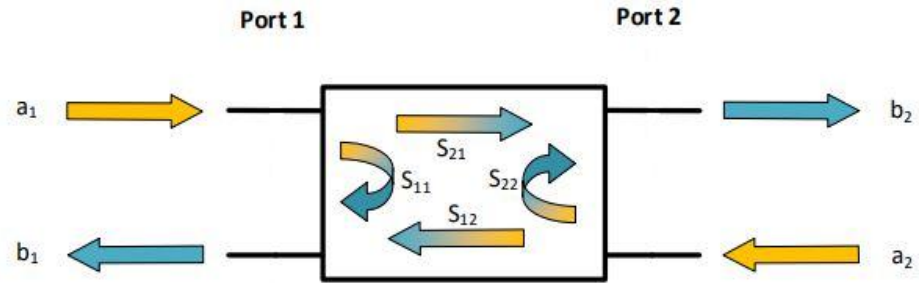
$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1=0} \quad (2.16)$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2=0} \quad (2.17)$$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1=0} \quad (2.18)$$

$S_{11}$  ve  $S_{22}$  yansıma katsayıları ile  $S_{21}$  ve  $S_{12}$  iletim katsayıları, mikrodalga frekanslarda doğrudan ölçülebilen parametrelerdir. Şekil 2.2, iki kapılı bir elektrik ağının  $S$  parametresi gösterimidir. Dört  $S$  parametresi, Port 1 ve 2'deki ( $S_{11}$  ve  $S_{22}$ ) yansıma katsayıları ile Port 1'den Port 2'ye ( $S_{21}$ ) ve Port 2'den Port 1'e ( $S_{12}$ ) iletim katsayılarıdır.

Bu şemada  $a_1$  ve  $a_2$ , sırasıyla Port 1 ve 2'deki giriş sinyalleridir. Benzer şekilde,  $b_1$  ve  $b_2$  bu portlarda yansıyan sinyallerdir.



Şekil 2.2 İki portlu bir ağın  $S$  parametresi gösterimi (Nyikayaramba vd., 2020)

Giren dalgaya bağlı olarak iletilen ve yansıyan dalgaların büyüklük ve fazı değişir. Bundan dolayı,  $S$  parametreleri karmaşık sayılardır.

### **3. REZONATÖR TABANLI MİKRODALGA DİELEKTRİK SENSÖR UYGULAMALARI ÜZERİNE LİTERATÜRDEKİ ÇALIŞMALAR**

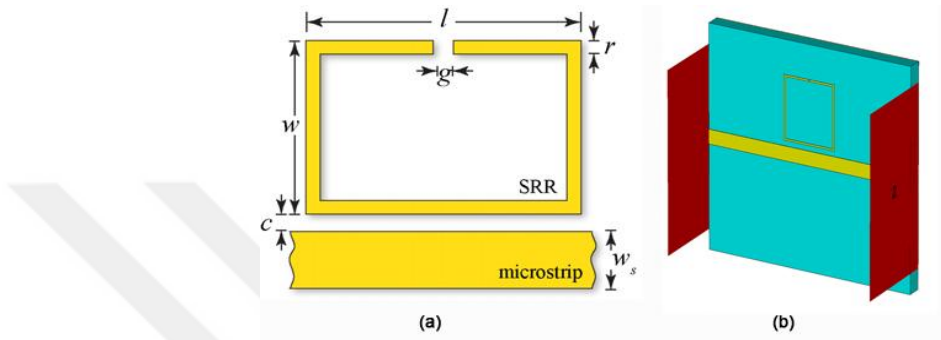
Mikrodalga sensörlere yüksek duyarlılık, kararlılık ve düşük maliyetlerinden ötürü biyomedikal, kimya, savunma sanayi gibi pek çok alanda ihtiyaç duyulmaktadır (Mirza vd., 2017; Haq vd., 2019). Son on yıl içinde metamateryaller kullanılarak yeni ve alternatif bir sensör platformu oluşturulabileceği gösterilmiştir (Gülsu vd., 2020). Metamateryaller ile sensör uygulamaları mikrodalga (Holloway vd., 2012; Salim vd., 2018), terahertz (Choudhary vd., 2013; Al-Naib vd., 2017) ve optik (Luk'yanchuk vd., 2010) bölgede olmak üzere geniş bir spektral aralıkta gerçekleştirilebilmektedir. Test edilen materyaller katı dielektrikler (Lee vd., 2013), sıvı örnekler (Bakir vd., 2017), gaz örnekler (Shahmarvandi vd., 2016) ve biyomoleküller (Lee vd., 2008) olabilmektedir. Metamateryal ile sensör çalışmalarında karmaşık dielektrik sabiti karakterize edilerek materyalin dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı hakkında tüm bilgi elde edilebilmektedir (Withayachumnankul vd., 2013; Ansari vd., 2015).

#### **3.1 Rezonatör Tabanlı Mikrodalga Dielektrik Sensör ile Sıvı Numunelerin Karakterizasyonu**

İkili sıvı karışımlarını algılamak üzere yüksek duyarlılıkta metamateryallerden esinlenilmiş rezonatör tabanlı dielektrik sensörlerinin geliştirilmesi ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Withayachumnankul vd. (2013) çalışmasında mikroşerit hatlı, ayırık halka rezonatörü ve sıvı numuneler için mikroakışkan kanal içeren metamateryal tabanlı bir dielektrik sensörü tasarlamıştır. Tasarlanan sensörün temsili gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir. Mikroşerit hattının bir ucuna gönderilen mikrodalga, yarı-TEM dalga yayılım modunu uyarmıştır. Bu mod, şerit boyunca salınan bir akım ve şerit etrafında dolaşan bir manyetik alan ile tanımlanmaktadır. Manyetik alan, ayırık halka rezonatör eksenine paralel olduğunda yakınındaki ayırık halka rezonatöründe akımı indüklemiştir. Ayırık halka rezonatör boşluğunda depolanan elektrik enerjisi, ayırık halka rezonatör döngüsünde depolanan manyetik enerjiye eşit olduğu zaman rezonans meydana gelmiştir.

Rezonans sırasında ayırık halka rezonatörün ayırık olan bölgesinde yoğun bir elektrik alan oluşmuş ve mikrokanaldaki sıvı akışı bu alan dağılımı ile rezonatörün dielektrik davranışını etkilemiştir. Ayırık halka rezonatörünün rezonansı ile numunenin karmaşık dielektrik sabiti birinci dereceden matris modeli ile ilişkilendirilmiş ve sıvıların karmaşık dielektrik sabitleri hesaplanmıştır. Karmaşık dielektrik sabiti değerleri ile literatür değerlerinin uyumlu olduğu gözlenmiştir.



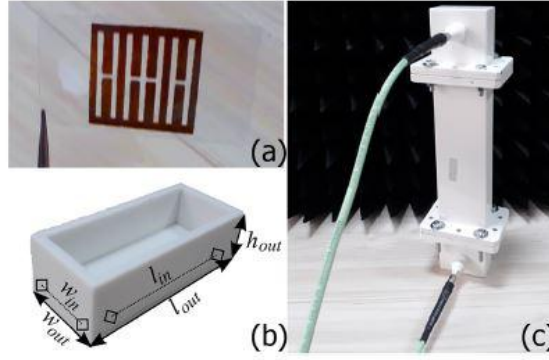
Şekil 3.1.a Mikroşerite bağlanan ayırık halka rezonatörü ve b. simülasyon ortamında görünümü (Withayachumnankul vd., 2013)

Awang vd. (2017) etanol-su karışımlarının dielektrik sabitlerini belirlemek için deney ortamı olarak dalga kılavuzunu tercih etmiştir. Bu çalışmada dar bir mikroakışkan kanal ayırık halka rezonatörü boyunca geçirilmiştir. Çift boşluklu ayırık halka rezonatörünün hassas boşlukları arasındaki sıvı kanalına sıvı numunelerinin eklenmesi rezonatörün eklenen sıvı numunelerinin dielektrik özelliklerini tespit etmesine imkan sağlamıştır. Sensörün ölçtüğü rezonans frekanslarının özelliklerinden türetilen deneysel bir model oluşturularak sıvı numunenin dielektrik özellikleri belirlenmiştir. Ayırık halka rezonatörü düz bir köpük alt tabakaya yapıştırılarak dalga kılavuzunun ortasına yerleştirilmiştir. Gelen elektromanyetik dalganın, dalga kılavuzuna dik bir şekilde manyetik vektör bileşeni meta-atom sistemini uyarmıştır. Deney modeli, su-etanol ve su-metanol karışımlarının çeşitli oranlarda karışımlarının dielektrik özelliklerinin tahmin edilmesinde fayda sağlamıştır.

2020 yılında yayınlanan bir çalışmada (Khanna ve Awasthi, 2020) etanol içindeki su ve tam yağlı sütteki üre miktarını belirleyen tamamlayıcı bir ayırık halka rezonatörü kullanan çift bantlı bir metamatizme tabanlı sensör yapısı tasarlanmıştır. Yapı, bakır

plaka zemin düzleminden aşındırılmış iç içe geçmiş dairesel iki adet ayırık halka rezonatörü ile çift bantlı sensör yapısı için optimize edilmiş dairesel merkez yamalı iletim hattından oluşturulmuştur. Tamamlayıcı ayırık halka rezonatörün ortasındaki delikten sıvı borusu geçirilmiştir. Rezonans frekanslarda elektrik alan dağılımı tamamlayıcı ayırık halka rezonatörü bölgesinde yoğunlaşmıştır. Değişik su-etanol karışımı yüzdelерinin  $S_{21}$  spektrumları ve su yüzdesi ile rezonans frekansın değişimi grafiğı verilmiştir. Etanol-su karışımında su yüzdesi arttıkça kapasitif etkinin artmasından dolayı rezonans frekansı azalmış, kalite faktörü ise artmıştır. Rezonans frekansın ve kalite faktörünün değişimi, dielektrik sabitinin gerçel ve sanal kısımlarındaki değişimler ile üçüncü dereceden bir fonksiyon oluşturularak ilişkilendirilmiştir. Oluşturulan fonksiyon deneysel verilere fit edilerek farklı etanol-su karışımlarının dielektrik sabitleri belirlenmiştir. Tahmin edilen dielektrik sabiti değeri Bao vd. (1996) tarafından yayınlanan değeri ile uyum içerisinde bulunmuştur.

Bagci vd. (2022) yılındaki çalışmasında, etanol-metanol karışımının karmaşık dielektrik sabitini belirlemek için H şeklinde slot rezonatörlerden oluşan metamalzeme tabanlı bir dielektrik sensör sunmuştur. Metamalzeme üzerine sert köpükten imal edilmiş sıvı havuzu ve içerisine ikili homojen sıvı karışımı numune yerleştirilmiştir. Böylelikle rezonatörler sıvı karışımlarıyla temas etmeyecek biçimde sensör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Üretilen metamalzeme Şekil 3.2.a'da, kullanılan sıvı havuz Şekil 3.2.b'de ve kullanılan mikrodalga dalga kılavuzu Şekil 3.2.c'de gösterilmiştir. %0'dan %100 etanol-metanol karışımına kadar %20 hacimsel oranlarla değişen konsantrasyonlarda etanol-metanol karışımı için  $S_{11}$  spektrumları ölçülmüştür. Karışımın hacim oranındaki değişim, rezonans frekanslarında önemli bir kaymaya neden olmuştur. Rezonans özellikleri ve karmaşık dielektrik sabitleri arasında birinci dereceden matris modeli, karışımların karmaşık dielektrik sabitlerini belirlemek için kullanılmıştır. Karmaşık dielektrik sabitinin gerçel ve sanal kısımlarının deney sonuçlarıyla literatür değeri ile karşılaştırmalı grafiğı de yayında gösterilmiştir. Etanol-metanol karışımlarının ölçüm sonuçları literatür değeri ile uyumluluk göstermiştir.



Şekil 3.2.a Üretilen metamalzeme, b. kullanılan sıvı havuz ve c. dalga kılavuzu (Bagci vd., 2022)

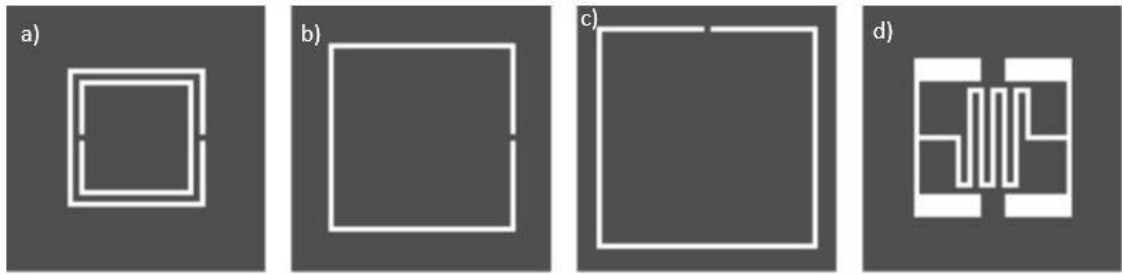
2022 yılında Güliz Sili (Sili, 2022) tarafından yapılan doktora tez çalışmasında tamamlayıcı ayırık halka rezonatörlü sensör içinden cam tüp geçirilmiş ve simülasyon programı kullanılarak su-metanol ve su-etanol karışımlarının farklı hacimsel yüzdeleri için S-parametreleri hesaplanmıştır.  $S_{11}$  ve kalite faktörü gibi rezonans parametrelerin değişimi incelenmiştir. Bu değişikliği hesaplamak için en küçük kareler algoritması kullanılmıştır. Yine benzer bir yöntemle sonraki çalışmada bir dipol anten kullanılıp tamamlayıcı ayırık halka rezonatörlü sensörün geometrik parametreleri değiştirilmiş, böylece, kandaki değişen glikoz seviyelerini algılayabilen bir sensör simülasyon ortamında tasarlanmıştır. Sonuçların gerçeğe yakın olması için glikoz numuneleri deri katmanını üzerinde modellenmiştir.

### 3.2 Rezonatör Tabanlı Mikrodalga Dielektrik Sensör ile Katı Numunelerin Karakterizasyonu

Katı numunelerin fiziksel parametrelerinin metamalzeme tabanlı sensörler ile rezonans özelliklerden tespitine yönelik literatür çalışmaları bu kısımda incelenmiştir.

Yeo ve Lee (2019) çalışmasında dielektrik algılama yapabilmek için dört farklı rezonatör tipi tasarlamıştır. Birincisi çift halkalı tamamlayıcı ayırık halka rezonatör, ikincisi tek halkalı tamamlayıcı ayırık halka rezonatör, üçüncüsü ayırık kısmı yukarı yöne döndürülmüş ayırık halka rezonatör, dördüncüsü ise dişli kapasitör şekilli kusurlu toprak düzlemidir. Dört farklı rezonatör Şekil 3.3.a'da gösterilmiştir. Bu dört yapı da 1,5

GHz’de rezonans verecek şekilde ayarlanmıştır. Numuneler, slot rezonatörlü toprak düzleminin altına yerleştirilmiş. Simülasyon ortamında numunenin dielektrik sabiti 1,0’den 10,0’a kadar 1,0’er aralıklı olarak değiştirilmiş ve her bir yapı için  $S_{21}$  spektrumu grafikleri incelenmiştir. Frekans kayması en çok IDCS-DGS yapısında görülmüştür. Bu dört yapı içerisinde çift halkalı tamamlayıcı ayırık halka rezonatör yapısı için frekans kayması ve duyarlılık en az olmuştur. Duyarlılık düşük dielektrik sabitli numuneler için daha yüksek olarak bulunmuştur. Dört dielektrik sensörü RF-35 alttaş üzerine üretilmiştir. S-parametreleri network analizörü ile ölçülmüştür. Dört dielektrik sensörü ile beş farklı dielektrik numunenin  $S_{21}$  spektrumları ölçülmüştür. Benzetim sonuçları ile uyumlu olarak ölçüm sonucuna göre de en yüksek sensör duyarlılığını dişli kapasitörlü Şekil 3.3’de gösterilen yapı vermiştir.



Şekil 3.3.a Çift halkalı tamamlayıcı ayırık halka rezonatör b. tek halkalı tamamlayıcı ayırık halka rezonatör c. ayırık kısmı döndürülmüş ayırık halka rezonatör d. dişli kapasitör şekilli kusurlu toprak düzlemi (Yeo vd., 2019)

Ebrahimi vd. (2019) kalınlık ve dielektrik sabitin belirlenmesi için mikrodalga frekanslarda çalışabilen, ön yüzünde mikroşerit beslemeli bir iletim hattı, arka yüzünde manyetik LC rezonatör içeren bir sensör yapısı tasarlamıştır. Tasarımda FR-4 alttaş kullanılmıştır. Mikroşeritin arka yüzündeki metal düzlemi aşındırılarak bir manyetik LC rezonatör yapısı oluşturulmuştur. Mikroşerit iletim hattı yapının simetri eksenine göre kaydırılarak yapının iletim spektrumundaki rezonans sayısı ikiye çıkarılmıştır (Ebrahimi vd, 2019).

Manyetik LC rezonatöre dielektrik numune yerleştirildiğinde düşük ve yüksek frekanslı rezonansların frekanslarının azaldığı görülmüştür. Bu rezonanslar, test edilen numunenin dielektrik sabiti ve kalınlığına bağlıdır. Rezonans frekansları dielektrik

sabiti ve kalınlığa bağlayan matematiksel bir model geliştirilmiştir. Bir sensör prototipi üretilerek geliştirilen matematiksel modeller çeşitli dielektrik sabiti ve kalınlıktaki dielektrik numunelerin dielektrik sabitini ve kalınlığını belirlemek için kullanılmıştır. Dielektrik numunelerin tespit edilen dielektrik sabitleri ve kalınlıklarının gerçek değerleri ile yüksek derecede uyumlu olduğu görülmüştür (Ebrahimi vd., 2019).

Haq vd. (2020) çalışmasında düşük dielektrik sabitli malzemelerin dielektrik sabitlerini hesaplamak için mikroşerit tabanlı ve toprak düzleminde aşındırılmış tamamlayıcı spiral rezonatör içeren bir mikrodalga sensörü sunmuştur. Toprak düzleminden aşındırılan spiral rezonatörlerin sayısı arttığında  $S_{21}$  rezonans bandının genliğinin ve bant genişliğinin arttığı, rezonans frekansının ise değişmediği tespit edilmiştir. Sensör yapısı standart baskı devre üretim yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen sensörün toprak düzlemi üzerine dört farklı dielektrik numune konularak vektör ağ analizörü ile  $S_{21}$  spektrumları ölçülmüştür. Ölçülen rezonans frekansları ile numunenin dielektrik sabiti arasında ikinci dereceden bir polinom fonksiyonu tanımlanmıştır. Bu polinom fonksiyonu ile hesaplanan dielektrik sabiti değerlerinin numunelerin bilinen dielektrik sabiti değerleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Önerilen tasarımın kompakt ve imalatının kolay ve ucuz olduğu belirtilmiştir (Haq. vd., 2020).

2020 yılında yayınlanan farklı bir çalışmada ise (Wang vd., 2020) katı malzemelerin karmaşık dielektrik sabitinin tespiti için ön yüzünde mikroşerit beslemeli iletim hattı, arka yüzünde toprak düzleminden aşındırılmış dişli kapasitör yapısı içeren iki bantlı bir mikrodalga sensör yapısı geliştirilmiştir. Dielektrik numuneler, dişli yapı parmaklarının yakınındaki en hassas elektrik alan bölgesine konulmuş, toprak düzlemindeki dişli kapasitör yapısı algılama bölgesi olarak kullanılmıştır. Dişli yapının parmakları arasındaki boşluklar, numune ve rezonatör arasında güçlü bir elektromanyetik etkileşime yol açmıştır. Elektrik alanın gücü dişli rezonatör yapısı optimize edilerek artırılmıştır. Lineer regresyon yöntemi ile rezonans frekansı ile karmaşık dielektrik sabiti arasında bağıntı kurulmuştur.

Bu bağıntı kullanılarak test edilen numunelerin dielektrik sabitleri belirlenmiştir. Numunelerin dielektrik sabitinin referans ve ölçülen değerleri gösterilmiş ve bu

değerlerin birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Önerilen sensör, dielektrik sabitindeki 2.2 kadarlık bir değişimde 0.29 GHz kadarlık bir frekans kayması göstermektedir (Wang vd., 2020).



## **4. MATERİYAL VE METOD**

### **4.1 Tam-Dalga Elektromanyetik Simülasyon Programı, CST Microwave Studio**

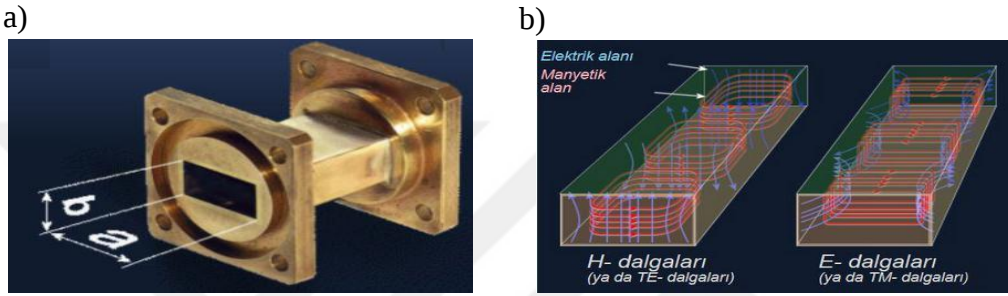
CST Studio Suite, elektromanyetik bileşenleri ve sistemleri tasarlamak, analiz etmek ve optimize etmek için kullanılan yüksek performanslı üç boyutlu ticari bir elektromanyetik analiz yazılım paketidir. Yüksek frekans bileşenlerinin üç boyutlu elektromanyetik simülasyonu için CST Studio Suite içerisinde CST Microwave Studio modülü bulunmaktadır. Program, anten, filtre, yönlü kuplör gibi cihazların yüksek frekans analizinin hızlı ve doğru bir biçimde yapılabilmesine olanak tanımaktadır. Özgül soğurma oranı, radar kesit alanı hesabı gibi hesaplamalar; anten, sensör, mikrodalga ve RF bileşenleri gibi çeşitli tasarımlar, mikrodalga ve radyo frekans bölgesinde CST Microwave Studio kullanılarak yapılabilmektedir. Bu tez çalışmasında algılama amaçlı kullanılacak metamalzemelerden esinlenilmiş rezonatör yapıları öncelikle lisanslı üç boyutlu bir elektromanyetik simülasyon programı olan CST Microwave Studio kullanılarak tasarlanmıştır.

### **4.2 Mikrodalga Dalga Kılavuzları**

Dalga kılavuzları; elektromanyetik dalgaların enerjilerinin iletimini bir yöne sınırlandırarak enerji kaybını minimuma indiren dalga yönlendiricisi yapılarıdır. Yüksek güç taşıyabilme kapasitesine sahip oldukları için yüksek frekanslarda bilgi sinyallerinin iletimi için yoğun olarak kullanılmaktadırlar. Dalga kılavuzları, elektromanyetik dalga spektrumunun 1 GHz ile 100 GHz arasındaki bölgesinde kullanılmaktadır. Bu bölgedeki dalgalara mikrodalga denilmektedir. Dalganın mikro terimi ile adlandırılmasının sebebi, elektromanyetik dalganın dalga boyunun fiziksel olarak kısalığıdır. Kısa dalga boyu enerjisi, çoğu uygulamalarda belirgin avantajlar sunmaktadır. Mesela, mükemmel yönelme yeteneği, göreceli olarak küçük antenler ve düşük kuvvetli vericiler kullanılması ile elde edilebilmektedir. Birçok mikrodalga uygulamalarında dalga kılavuzuna ihtiyaç duyulmaktadır.

Dalga kılavuzunun iletim hattı olarak kullanılabilmesi için boyutlarının en az ileteceği dalganın dalga boyunun yarısına eşit veya daha büyük olması gerekmektedir. Bu yüzden alçak frekanslarda dalga kılavuzları kullanılamaz.

Şekil 4.1’de mikrodalga frekanslarda kullanılan bir dalga kılavuzu yapısı gösterilmiştir. Dalga kılavuzunun açıklık genişliğine uygun olan frekanslardaki elektromanyetik dalgalar dalga kılavuzu içerisinde ilerleyebilmektedir.



Şekil 4.1.a. Bir mikrodalga dalga kılavuzu, b. dalga kılavuzunda genel yayılım modları (Anonymous, 2021)

Dalga kılavuzlarında çok sayıda dalga modu uyarılabilir. Hem elektrik hem manyetik alanın yayılma eksenine dik düzlemde kaldığı TEM modu, manyetik alanın yayılma eksenine dik düzlemde kaldığı TM modu ile elektrik alanın yayılma eksenine dik düzlemde kaldığı TE modu şeklinde yayılım modları vardır. Ancak tek iletkenli dalga kılavuzlarında TEM modunun uyarılması mümkün değildir. TEM modları en az iki iletkenli iletim hatlarındaki yayılım modlarıdır. TM ve TE modlarının her ikisi de karakteristik kesim frekanslarına sahiptir. Belirli bir modun kesim frekansının altındaki frekanslarda dalgaları iletebilmesi mümkün değildir. Belirli bir modda güç ve sinyal iletimi, sadece o modun kesim frekansından yüksek frekanslarda mümkün olabilmektedir. Bu açıdan dalga kılavuzları, yüksek geçiren filtre gibi düşünülebilir.

Dalga kılavuzları sayesinde dalgalar kılavuz içerisinde test edilecek olan numuneye hiçbir şekilde güç kaybına uğramadan ulaşmaktadır. Bu durum dalga kılavuzlarının mikroşerit yapılara göre avantajlarından birisidir. Çizelge 4.1’de örnek olarak WR-229 dalga kılavuzunun teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.1 WR-229 dalga kılavuzunun teknik özellikleri

| WR-229 Dalga kılavuzunun teknik özellikleri     |         |           |           |
|-------------------------------------------------|---------|-----------|-----------|
| Kesim<br>aralığı                                | frekans | 2,577 GHz | 5,154 GHz |
| $a$ ve $b$ kenarlarının<br>(Şekil 4.1.a) boyutu |         | 58,166 mm | 29,083 mm |

### 4.3 Birinci Dereceden Matris Modeli ile Sıvıların Karmaşık Dielektrik Sabitlerinin Tespiti

Dielektrik sabitlerinin gerçel ve sanal kısımlarının mikrodalga frekanslarda rezonant özelliklere dayalı olarak tespiti için, rezonans durumdaki S-parametresi ölçümleri ve bu ölçümlerden elde edilen verilerin karmaşık dielektrik sabiti ile matematiksel bir algılama modeli çerçevesinde ilişkilendirilmesi gerekir (Gulsu, 2021). Bu modeli kullanmanın avantajı, üretilen sensörün toleranslarının tamamen dikkate alınmasıdır.

Karmaşık dielektrik sabitinin değişimi ile rezonans frekans ve  $S_{11}$  (yansıma katsayısı) genliği arasında matris formunda şu şekilde bir bağlantı kurulabilir:

$$\begin{bmatrix} \Delta\epsilon' \\ \Delta\epsilon'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_0 \\ |\Delta S_{11}| \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Burada  $m$  ile belirtilen değerler karakteristik matrisin değerleridir.  $\Delta\epsilon'$  ile ifade edilen karmaşık dielektrik sabitinin gerçel kısmındaki değişim olup  $\Delta\epsilon''$  ise sanal kısımdaki değişimi göstermektedir.  $\Delta\epsilon'$  ve  $\Delta\epsilon''$  nin matematiksel değerleri,

$$\Delta\epsilon' = \epsilon'_{numune} - \epsilon'_{referans} \quad (4.2)$$

$$\Delta\epsilon'' = \epsilon''_{numune} - \epsilon''_{referans} \quad (4.3)$$

olarak ifade edilmektedir.  $\Delta f_0$  ve  $\Delta S_{11}$ , rezonans frekansındaki ve  $S_{11}$  genliği değerlerindeki meydana gelen değişimler olarak ifade edilip matematiksel olarak denklem 4.4 ve 4.5 ile gösterilmiştir.

$$\Delta f_0 = f_{numune} - f_{referans} \quad (4.4)$$

$$\Delta S_{11} = S_{11numune} - S_{11referans} \quad (4.5)$$

Karakteristik matristeki katsayılar dielektrik sabiti bilinen referans sıvısı kullanılarak en küçük kareler yöntemi ile bulunabilir. Denklem 4.1 içerisinde  $m$  ile belirtilen bilinmeyen katsayıları bulmak için Debye modelinden karışımların karmaşık dielektrik sabiti değerleri teorik olarak hesaplanır. Karışımlar için rezonans frekansı ve hesaplanan  $S_{11}$  büyüklük değerleri, denklem 4.6'da verilen üç adet matris dizi yapısı ile tanımlanır.

$$X = \begin{bmatrix} \Delta \varepsilon'_1 & \Delta \varepsilon''_1 \\ \Delta \varepsilon'_2 & \Delta \varepsilon''_2 \\ \vdots & \vdots \\ \Delta \varepsilon'_n & \Delta \varepsilon''_n \end{bmatrix} \quad Y_1 = \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta f_2 \\ \vdots \\ \Delta f_n \end{bmatrix} \quad Y_2 = \begin{bmatrix} \Delta S_{11_1} \\ \Delta S_{11_2} \\ \vdots \\ \Delta S_{11_n} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Burada ' $n$ ' indisi numune sayısını göstermektedir.  $X$  matrisi değerleri literatürdeki değerlerden  $Y_1$  ve  $Y_2$  matrisleri değerleri ölçümlerden alınır. Karakteristik matrisi hesaplamak için son olarak,

$$[m_{11} \quad m_{12}]^T = (X^T X)^{-1} X^T Y_1 \quad [m_{11} \quad m_{12}] = (X^T X)^{-1} X^T Y_2 \quad (4.7)$$

İşlemleri yapılır. Bu denklemler test edilen sıvının karmaşık dielektrik sabitini rezonans özelliklere (rezonans frekans değişimi ve rezonans büyüklüğü değişimi) bağlayan ilgili karakteristik matrisi verir.

Bu model, bilinmeyen sıvı numunelerin karmaşık dielektrik sabitlerini belirlemek için kullanılabilir. Rezonans özellikler kullanılarak karmaşık dielektrik sabiti ölçüm sonuçlarından bulunabilir.

#### 4.4 Debye Modeli

Bazı alkoller için, dielektrik sabiti Debye modeli kullanılarak frekansa bağlı olarak modellenebilir. Bir sıvıya harici bir elektrik alan uygulandığında, moleküller polarize olur. Bir süre sonra, bu polarizasyon kaybolur ve moleküller başlangıç durumuna geri döner. Bu arada geçen süreye gevşeme süresi ( $\tau_r$ ) denilir. Debye denklemi şu şekilde ifade edilebilir (Bao, 1996).

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_r''(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau_r} \quad (4.8)$$

Denlem (4.8)'de  $\varepsilon_s$  statik dielektrik sabitini,  $\varepsilon_\infty$  dielektrik sabitinin yüksek frekans limitini temsil etmektedir ve  $\omega$  açısal frekanstır.

Denklem (4.8) ile verilen dielektrik sabitinin gerçel ve sanal kısımları ayrı ayrı olarak sırasıyla denklem (4.9) ve (4.10) ile sunulmuştur.

$$\varepsilon_r'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau_r^2} \quad (4.9)$$

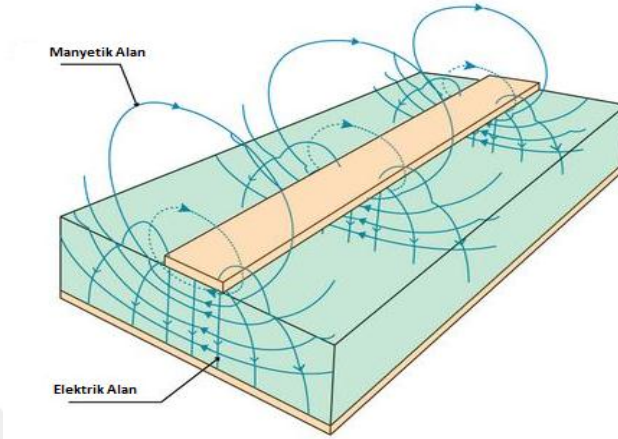
$$\varepsilon_r''(\omega) = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \frac{\omega\tau_r}{1 + \omega^2\tau_r^2} \quad (4.10)$$

#### 4.5 Mikroşerit İletim Hatları

Düzlemsel iletim hatları arasında en popüler olanı, mikroşerit iletim hatlarıdır. Mikroşerit iletim hatları RF ve mikrodalga uygulamalarında çok sık kullanılmaktadır. Mikroşerit iletim hatları kompakt yapıdadır ve mikrodalga cihazlara entegre edilebilir özelliktedir. Ayrıca mikroşerit iletim hatları açık hatlardır.

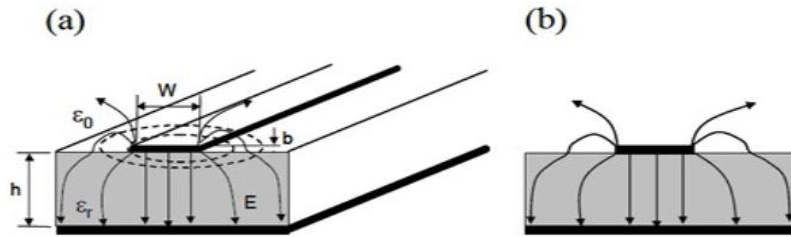
Mikroşerit hatlar iletim modunun hemen hemen TEM modu (yarı-TEM) olmasından dolayı düzlemsel iletim hatları içerisinde en yaygın kullanılan yapılardır (Pozar 2012).

Şeritin kılavuzladığı elektromanyetik alanların bir kısmı dielektrik taban içinde, bir kısmı ise şeritin yerleştirildiği taban yüzeyinin üst kısmındaki hava ortamında bulunur. Şekil 4.2’de elektromanyetik alanın yayılması gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Bir mikroşeritte elektromanyetik alanın yayılması (Anonymous. 2020)

Şekil 4.3’de mikroşerit iletim hattının yapısı gösterilmektedir. Dielektrik tabanın bağıl dielektrik sabiti  $\epsilon_r$ , genişliği  $w$ , kalınlığı  $b$  ve yükseliği  $h$  ile gösterilmiştir. Elektrik alan çizgileri sürekli çizgi ve manyetik alan çizgileri kesikli çizgi ile gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Mikroşerit hat a. üç boyutlu ve b. iki boyutlu kesit görünümü (Anonymous, 2019)

Mikroşerit iletim hattının dielektrik tabanına ilişkin bağıl dielektrik sabiti ve şerit iletkenin boyutu  $w/h$  biliniyorsa mikroşerit hattın karakteristik empedansı, denklem (4.11) ile (4.12) ile hesaplanabilir (Pozar 2012).

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \left\{ \frac{w}{h} + 1.393 + 0.677 \ln \left( \frac{w}{h} + 1.4444 \right) \right\}^{-0.5} \quad \frac{w}{h} \geq 1 \quad (4.11)$$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \left( \frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right)^{-0.5} \quad \frac{w}{h} \leq 1 \quad (4.12)$$

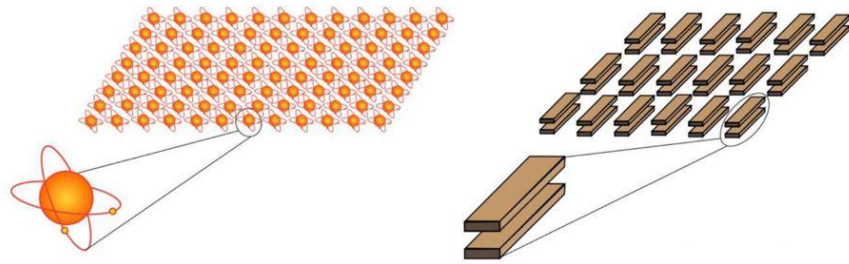
Burada etkin dielektrik sabiti denklem 4.13’de verilmiştir (Pozar 2012).

$$\epsilon_{etkin} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\left( 1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{0.5}} \quad (4.13)$$

#### 4.6 Metamalzemeler

Metamalzemeler dielektrik ve metal gibi doğada bulunan malzemelerin belirli bir kalıpta ve geometride dalga boyu altı periyodiklikte bir araya getirilmeleri ile elde edilen yapay malzemelerdir. Metamalzemeler periyodik dizilmiş dalga boyu altı birim hücrelerden oluşmaktadır. Zaman içerisinde metamalzemelerin radomlar, oldukça ince kaviterler, süper mercekler (Yang vd., 2015) gibi pek çok uygulama alanı oluşmuştur.

Metamalzemeler kristal yapılara benzerliklerinden ötürü metaatom veya metamolekül olarak da adlandırılmaktadırlar (Şekil 4.4). Metamalzemelerin birim hücreleri gönderilen elektromanyetik dalgaları iletmeyecek ve yansıtmayacak şekilde tasarlanabilmektedir.

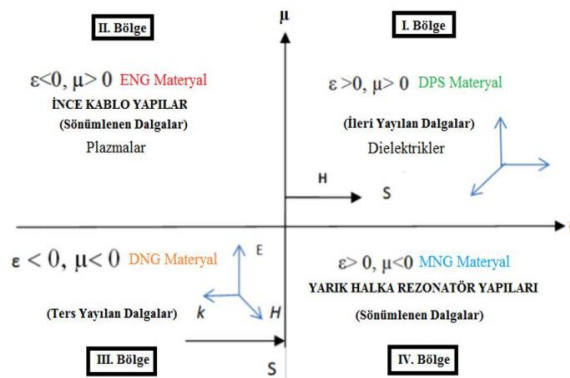


Şekil 4.4 a. Bir moleküldeki atomlar ve b. periyodik yapıya sahip metamalzemeler (Anonymous, 2018)

Metamalzemelerin geleneksel malzemelere göre birtakım avantajları bulunmaktadır. Metaatomlara istenilen tasarım verilebilmektedir, periyodikliği istenilen şekilde ayarlanılabilmektedir. Fakat, doğal atomlarda bu diziliş ve şekillenim sınırlıdır. Doğal atomların dizilimini özel sıralara göre yapmak oldukça zordur.

Metamalzemeler yüksek soğurma özelliklerini iyi optimize edilmiş rezonatör yapıların tasarlanmasıyla kazanmaktadırlar (Wegener 2009). Elektromanyetik malzemelerin karmaşık elektriksel geçirgenlik ( $\epsilon$ ) ve manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ) değerlerinin alacağı pozitif veya negatif değerler göz önünde bulundurulduğunda karşımıza dört farklı kombinasyon çıkmaktadır. Bu dört farklı bölge  $x$  eksenini  $\epsilon$  ve  $y$  eksenini  $\mu$ 'yü göstermek üzere Şekil 4.5'de verilmiştir. I. bölgede hem karmaşık elektriksel geçirgenlik değeri hem de manyetik geçirgenlik değeri pozitiftir. Bu bölgede sağ el kuralı geçerli olup dalga yayılımı ileri yöndedir. Yalıtkanlar, yarıiletkenler ve plazma frekansının üzerinde metaller bu özelliği göstermektedir. Alışlagelmiş tüm izotropik dielektrik malzemeler bu bölgede bulunmaktadır. Dalga yayılımı ile enerji aktarımı bu bölgede aynı yöndedir.

II. bölgede elektriksel geçirgenlik değerleri negatiftir. Plazmalar, katkılı yarı iletken malzemeler ve optik frekanslarda metaller için geçerli olan bu bölgede dalga yayılımı yoktur, dalga sönümlüdür. IV. bölgede ise manyetik geçirgenlik negatif olup bu durum ferit yapıları malzemelerde gözlenmektedir. Bu bölgede sönümlenen dalgalar gözlenmektedir.  $\epsilon$  ve  $\mu$  değerlerinden her ikisinin de negatif olduğu durumla ise III. bölgede karşılaşılacaktır. Bu durumda kırılma indisi de negatif olduğundan ötürü dalgalar enerji aktarım yönüne zıt yönde yayılım yapmaktadır. Negatif  $\epsilon$  ve  $\mu$  değerlerine sahip malzemelere sol-el malzemeler de denilmektedir. Metamalzemeler ile sol-el malzemeler oluşturulabilmektedir (Demirsoy vd, 2016).

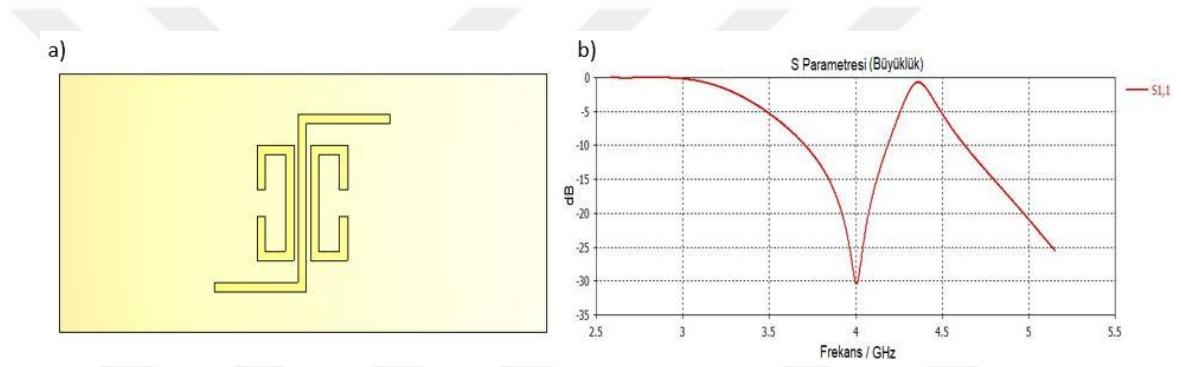


Şekil 4.5 Malzemelerin elektriksel ve manyetik geçirgenliklerinin işaretlerine bağlı olarak sınıflandırılması (Demirsoy vd, 2016)

## 5. DALGA KILAVUZUNDA REZONATÖR TABANLI MİKRODALGA DİELEKTRİK SENSÖRÜ İLE ETANOL/1-PENTANOL KARIŞIMININ AYIRT EDİLMESİ

### 5.1 Sıvı Numuneler için Rezonatör Tabanlı Mikrodalga Dielektrik Sensörünün Tasarımı, Modellenmesi ve Üretimi

Bu çalışmada 2,577- 5,154 GHz aralığında çalışan WR-229 dalga kılavuzu içerisine yerleştirilmiş metalmalzemedan esinlenilmiş rezonatör tabanlı dielektrik sensörü kullanılarak saf etanol/1-pentanol karışımlarının yansıma spektrumu ölçümleri alınmıştır.

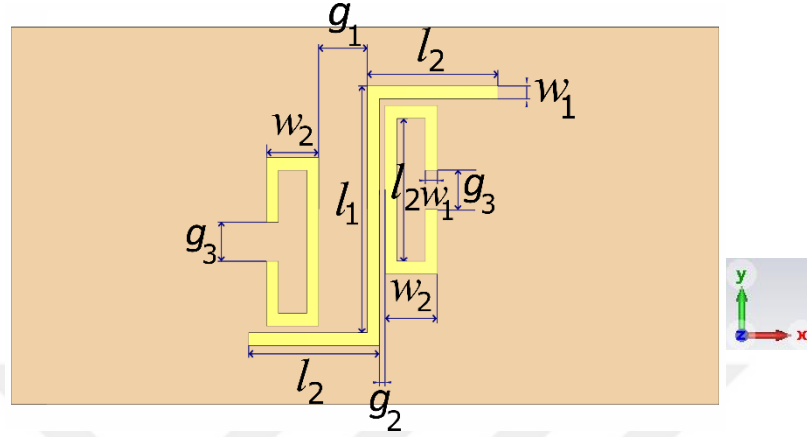


Şekil 5.1 Simetrik yapının a. CST Microwave Studio’da çizdirilen görünümü b. simüle edilen yansıma ( $S_{11}$ ) spektrumu

Metalmalzemedan esinlenilmiş sensörün, alttaş ve rezonatör yapılarının geometrik şekilleri ve boyutsal parametreleri, Şekil 5.2’de verilmiştir. Metalmalzeme birim hücresi, basamak şeklindeki bir rezonatörün her iki tarafında asimetrik olarak hizalanmış ayrık halka rezonatörleri (AHR) içermektedir. Şekil 5.1’de, Şekil 5.2’deki yapının simetrik olan başlangıç aşaması verilmiştir. Simetrik yapıda yansıma spektrumundaki rezonans frekans 4,0 GHz olarak hesaplanmıştır.

Metalmalzemedan esinlenilmiş sensörün alttaşı olarak, 1,524 mm kalınlığa sahip, dielektrik sabiti ( $\epsilon_r'$ ) 3,45 ve kayıp tanjantı ( $\tan\delta$ ) 0,0031 olan düşük kayıplı bir alttaş, Isola I-Tera MT40 kullanılmıştır. Alttaş boyutları deneylerde kullanılan WR-229 mikrodalga dalga kılavuzu ile uyumlu olacak şekilde düzenlenmiştir. Rezonatörleri oluşturan bakır,  $5,8 \times 10^8$  S/m iletkenliğe ve 18  $\mu\text{m}$  kalınlığa sahiptir. Şekil 5.2’de

verilen metamalzeme birim hücresinin parametre değerleri,  $l_1=19,0$ ,  $l_2=11,0$ ,  $w_1=1,0$ ,  $w_2=4,4$ ,  $g_1=4,1$ ,  $g_2=0,5$ ,  $g_3=3$  olarak seçilmiştir.



Şekil 5.2 Mikrodalga dalga kılavuzu içindeki metamalzemenin şematik düzeni ve geometrik parametreleri

Metamalzeme yapısının tasarımı ve  $S$  parametrelerinin hesaplanması, üç boyutlu bir tam-dalga elektromanyetik simülasyon programı olan CST Microwave Studio kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda WR-229 dalga kılavuzu ortamını taklit etmek için dalga kılavuzunun dört kenarı boyunca mükemmel elektrik iletkeni (PEC) sınırları kullanılmıştır. Elektromanyetik dalgalar metamalzemeye Şekil 5.2’de gösterilen  $z$ -ekseni doğrultusunda gönderilmiştir. WR-229 dalga kılavuzunun çalışma frekansı 2,58 GHz ile 5,15 GHz arasında olduğundan, gelen elektromanyetik dalgaların frekansı simülasyonda bu aralıkta tutulmuştur. Simülasyon sonuçlarını doğrulamak ve sensör prototipinin çalışabilirliğini göstermek için metamalzemenin standart baskı devre yöntemi ile üretiminden sonra, WR-229 dalga kılavuzunun çalışma frekansları içinde  $S$  parametresi büyüklüklerinin ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

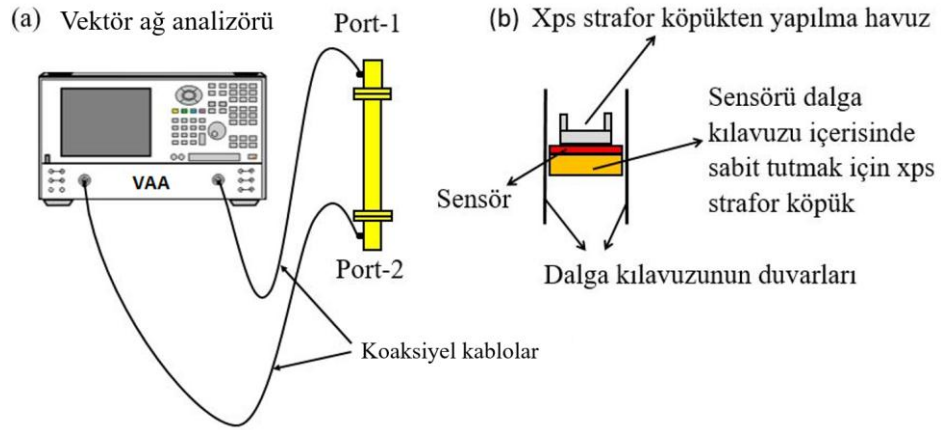
Hazırlanan sıvı karışımların metamalzemededen esinlenilmiş rezonatör tabanlı dielektrik sensör ile temas etmemesi için XPS sert strafor köpükten üretilmiş yapay bir havuz kullanılmıştır. Yapay sıvı havuzunun dielektrik sabiti havanınki ile aynıdır. Bu nedenle metamalzemenin rezonans frekansları, boş havuz metamalzemenin üzerine yerleştirildiğinde değişmemiştir.

XPS sert strafor köpükten yapılan havuz içerisine 2 ml hacimde etanol/1-pentanol karışımları konulmuş ve karışımların dielektrik sabitleri kesim 4.3’de verilen modelleme yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Etanol/1-pentanol ikili karışımları, gerekli miktarlardaki sıvıların 300 devir/dakika hızdaki manyetik karıştırıcıda 10 dakika karıştırılmasıyla homojen olarak hazırlanmıştır. Kullanılan manyetik karıştırıcı Şekil 5.3’de gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Manyetik karıştırıcı

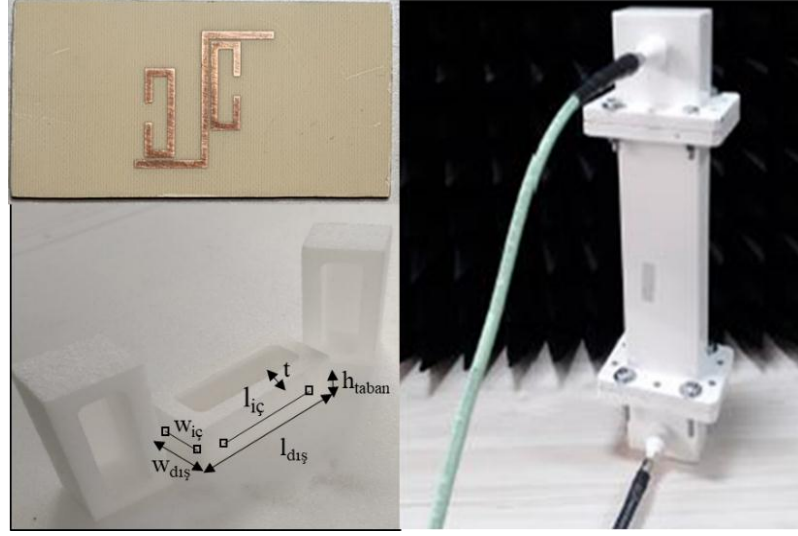
Numuneler, 50 ml cam beherde yedi farklı karışım oranında titizlikle hazırlanmış ve WR-229 dalga kılavuzunda metamalzemedan esinlenilmiş rezonatör tabanlı dielektrik sensörün vektör ağ analizörü (VAA) kullanılarak S-parametresi ölçümleri yapılmıştır. Dalga kılavuzu sabit bir masa üzerine Şekil 5.4.a’da gösterildiği gibi dikey olarak konulmuştur. Dalga kılavuzunun merkezine sensör yerleştirildikten sonra dalga kılavuzunun giriş ve çıkış portları VAA’nın birinci ve ikinci portlarına bağlanmıştır. Ölçümler sırasında metamalzeme tabanlı sensör ve üzerindeki havuzun içerisindeki sıvı karışımların konumunun her zaman merkezde veya dalga kılavuzunun merkezinden  $\pm 1$  cm sınırlar içinde olması sağlanmıştır. Tüm ölçümler 25,0 °C sıcaklıkta ve %30 bağıl nemde laboratuvar ortamında yapılmıştır. TE<sub>10</sub> modlu elektromanyetik dalgalar dalga kılavuzunun içinde yayılmış ve S parametreleri Rohde-Schwarz ZVL-13 ağ analizörü ile ölçülmüştür. Şekil 5.4’te ölçüm düzeneğinin şekli gösterilmiştir.



Şekil 5.4.a. Ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi, b. sensör ve havuzun dalga kılavuzu içerisindeki konumu.

Rezonans frekansı ve  $S_{11}$  (yansıma spektrumu) değerleri ile karmaşık dielektrik sabiti değerleri arasında, bilinmeyen sıvı numunelerin karmaşık dielektrik sabitini belirlemek için kullanılan varsayımsal basit bir deneysel matris modeli oluşturulmuştur. (Withayachumnankul vd., 2013). Rezonans özellikleri kullanılarak karmaşık dielektrik sabitleri ölçüm sonuçlarından bulunmuştur.

Geleneksel aşındırma yöntemiyle üretilen metamalzeme tabanlı sensör, yapay sıvı havuzu ve WR-229 dalga kılavuzunun fotoğrafı sırasıyla Şekil 5.5.a, Şekil 5.5.b ve Şekil 5.5.c'de gösterilmektedir. Havuzun taban yüksekliği ( $h_{taban}$ ) 6 mm, dış uzunluğu ( $l_{dış}$ ) 55 mm, iç uzunluğu ( $l_{iç}$ ) 45 mm, havuzun dış genişliği ( $w_{dış}$ ) 28 mm, iç genişliği ( $w_{iç}$ ) 18 mm ve havuz duvarlarının genişliği ( $t$ ) 5 mm'dir. Bu yapay sıvı havuzlarının üretimi bilgisayarlı sayısal kontrol makinesi kullanılarak yapılmıştır. Yapay sıvı havuzu boyutları, incelenen rezonans frekanslar için maksimum elektrik alan bölgelerini kaplayacak şekilde düzenlenmiştir.

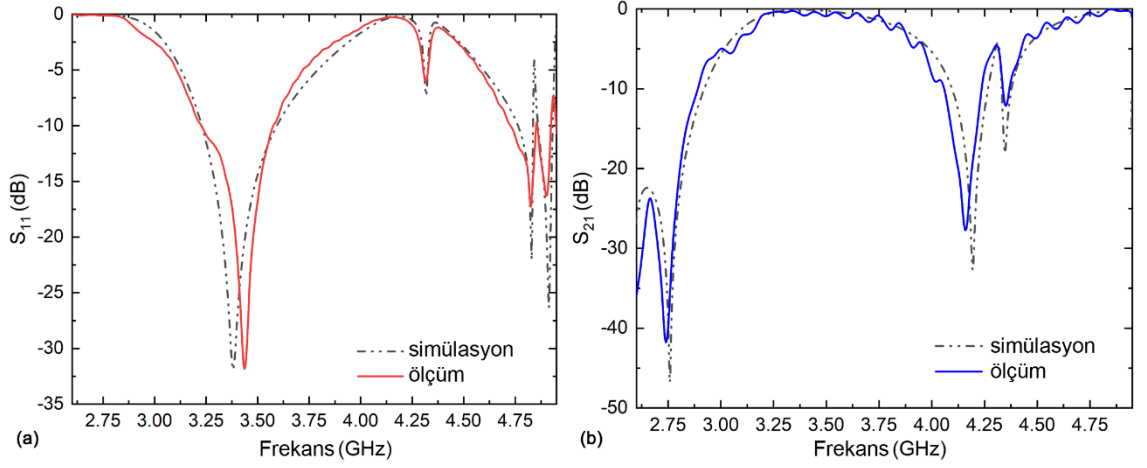


Şekil 5.5.a. Üretilen metamalzemenin fotoğrafı, b. xps köpük malzemesinden ürettirilen yapay sıvı havuzu, c. WR-229 dalga kılavuzu

## 5.2 Numunesiz Sensörün S-Parametrelerinin Ölçümü

Sensör özellikleri analiz edilmeden önce numunesiz sensörün ölçülen S-parametrelerinin simülasyon sonuçlarıyla uyumlu olup olmadığı incelenmiştir. Bu amaçla üretilen numunesiz sensörün ölçülen  $S_{11}$  (yansımaya katsayısı) ve  $S_{21}$  (iletim katsayısı) spektrumları ile simülasyon sonuçları Şekil 5.6’da karşılaştırılmıştır.

Numunesiz sensörün simülasyon sonuçları, -31,90 dB zayıflama değeri ile 3,38 GHz’de belirgin bir yansımaya rezonansı vermiştir. Ölçüm sonuçları, -31,83 dB zayıflama değeri ile 3,43 GHz’de tek bir belirgin yansımaya rezonansı ile simülasyon sonuçlarını desteklemiştir. Bu rezonans, AHR’ler ile basamak şeklindeki rezonatör arasında dikey yönde yerleşen elektrik alandan kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.6 Numunesiz sensörün ölçülen ve simüle edilen a.  $S_{11}$  ve b.  $S_{21}$  spektrumları

Ölçülen sonuçlar, simüle edilen sonuçlarla küçük tutarsızlıklar dışında iyi bir uyum göstermiştir. Tutarsızlıklar iki nedenden kaynaklanabilir. İlk olarak, sensörde üretim hataları olabilir. İkincisi, mikrodalga dalga kılavuzunun içindeki metalmalzeme örneği, dalga kılavuzunun duvarlarına tamamen dik olmayabilir. Numunenin az miktarda eğimi, gelen elektromanyetik dalgaların normal yönden çok az sapmasına neden olmuş olabilir.

Karmaşık dielektrik sabitlerinin belirlenmesinde  $S_{11}$  sonuçları dikkate alınmıştır. Bunun sebebi yapay sıvı havuzu incelenen sıvılarla doldurulduğunda 4.32 GHz'deki küçük rezonansa yakın (Şekil 5.6.a'da) belirgin bir ikinci rezonansın ortaya çıkması ve çok bantlı dielektrik algılama yapılabilmesine imkân sağlamasıdır. Sonraki bölümlerde, karmaşık dielektrik sabitini karakterize etmek için  $S_{11}$  ölçüm sonuçları dikkate alınmıştır.

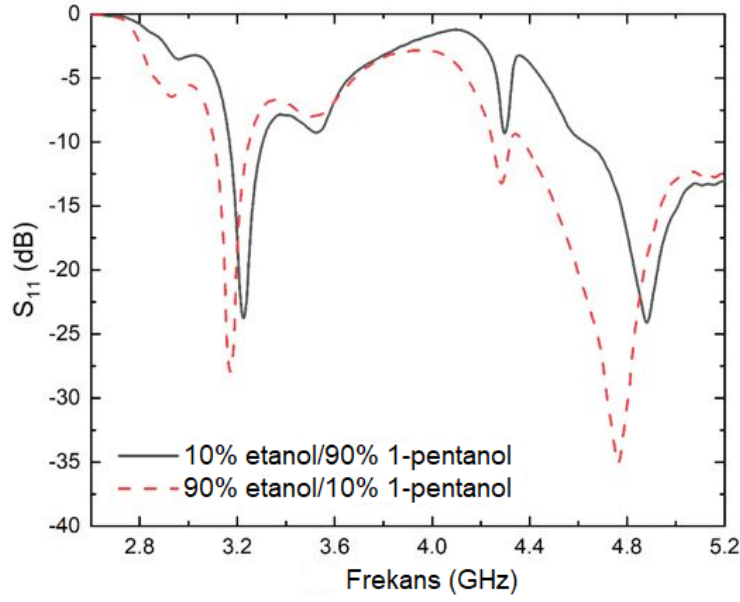
### 5.3 Rezonatör Tabanlı Mikrodalga Dielektrik Sensör ile Etanol/1-Pentanol Karışımlarının Algılanması

Farklı oranlardaki yedi adet etanol/1-pentanol karışımı için dalga kılavuzunda vektör ağ analizörü ile  $S_{11}$  parametresi ölçümleri alınmıştır. Etanol/1-pentanol ikili homojen karışımının nasıl hazırlandığına dair bilgi Çizelge 5.1'de sunulmuştur. Her ikili sıvı karışım konsantrasyonundaki tüm ölçümler farklı günlerde üç kez tekrarlanmıştır. S-parametrelerinin tepkisinden, imal edilen sensörün tekrarlanabilir özellikte ve güvenilir olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Çizelge 5.1 %99,9 saflıkta etanol ve %100 saflıkta 1-pentanol ikili homojen karışımı için hazırlanan karışım oranları

| Etanol/1-pentanol karışım oranları | 1-pentanol miktarı (ml) | Etanol miktarı (ml) |
|------------------------------------|-------------------------|---------------------|
| %90 etanol / %10 1-pentanol        | 5,0 ml                  | 45,0 ml             |
| %80 etanol / %20 1-pentanol        | 10,0 ml                 | 40,0 ml             |
| %70 etanol / %30 1-pentanol        | 15,0 ml                 | 35,0 ml             |
| %50 etanol / %50 1-pentanol        | 25,0 ml                 | 25,0 ml             |
| %30 etanol / %70 1-pentanol        | 35,0 ml                 | 15,0 ml             |
| %20 etanol / %80 1-pentanol        | 40,0 ml                 | 10,0 ml             |
| %10 etanol / %90 1-pentanol        | 45,0 ml                 | 5,0 ml              |

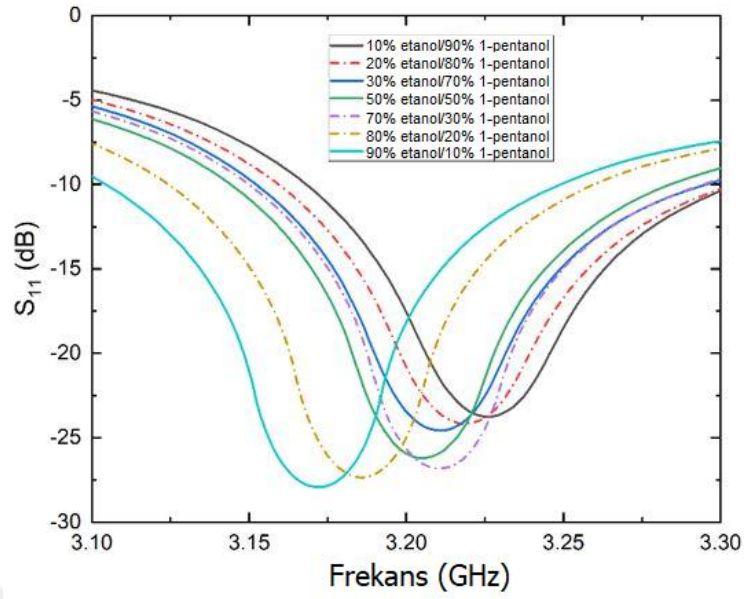
Yansıma spektrumunu, rezonansları ve frekans kaymasını göstermek için, %10 etanol/%90 1-pentanol ve %90 etanol/%10 1-pentanol çözeltileri için ölçülen  $S_{11}$  spektrumları Şekil 5.7'de çizilmiştir. %10 etanol/%90 1-pentanol içeren karışımda, sırasıyla 3,23 GHz ve 4,88 GHz frekanslarda -23,76 dB ve -27,91 dB zayıflama değeri ile iki belirgin yansıma rezonansı oluşmuştur. Ayrıca -9.30 dB zayıflama değeri ile 4,32 GHz'de küçük bir rezonans daha oluşmuştur. Bu küçük rezonans dielektrik sabitinin karakterizasyonunda dikkate alınmamıştır. Etanol oranı %90'a yükseldiğinde ve 1-pentanol oranı %10'a düştüğünde, iki rezonans da daha düşük frekanslara kaymıştır. Statik dielektrik sabiti değerleri, etanol/1-pentanol karışımında artan 1-pentanol konsantrasyonu ile aşamalı bir düşüş göstermektedir (Gurudas vd., 2022). 1-pentanolün daha yüksek hacim oranları için yüksek rezonans frekansları literatür ile uyumludur (Gurudas vd., 2022). Dielektrik sabitlerinin azalması, 1-pentanol hacim oranlarının daha yüksek zincir uzunlukları nedeniyle dipol sayısının azalmasına bağlıdır. Şekil 5.7'de gösterildiği gibi, etanolün karışıma katılma oranı %10'dan %90'a kadar arttırıldığında, birinci bant için 0,06 GHz'lik (60 MHz) ve ikinci bant için 0,12 GHz'lik (120 MHz) bir frekans değişimi meydana gelmiştir. Yüksek frekanslı bant için iki kat daha yüksek frekans değişimi olmasının nedeni bu bandın yüksek rezonans frekans değeri ile açıklanabilir. Mutlak rezonans değişiminin daha yüksek frekanslarda daha fazla oranda olduğu rapor edilmiştir (Alahnomi vd., 2021).



Şekil 5.7 %10 Etanol/%90 1-pentanol ve %90 etanol/%10 1-pentanol karışımı için ölçülen yansıma spektrumları

Karmaşık dielektrik sabitleri, aşağıdaki bölümlerde açıklandığı gibi düşük ve yüksek frekanslı rezonans bantları için ayrı ayrı incelenmiştir. Karmaşık dielektrik sabitinin rezonans özellikleri üzerindeki etkileri, etanol/1-pentanol karışımları kullanılarak yansıma ( $S_{11}$ ) spektrumu ölçümleri gerçekleştirilerek incelenmiştir.

Etanol ve 1-pentanolün farklı ikili sıvı karışımları kullanılarak birinci bant için ölçülen yansıma spektrumları Şekil 5.8’de verilmiştir. Etanol/1-pentanol karışımındaki etanol oranı %10’dan %90’a değiştiğinde, rezonans frekansı 3,23 GHz’den 3,17 GHz’e ve  $S_{11}$  genliği -23,76 dB’den -27,91 dB’ye değişmiştir. Dikkat edilecek olursa %70 etanol/%30 %1-pentanol karışımı için rezonans frekansı 3,210 GHz olarak gözlemlenmiştir. Ancak %50 etanol/%50 %1-pentanol karışımı için rezonans frekansı 3,205 GHz’dedir. Rezonans frekansındaki bu düşüş %50 etanol/%50 %1-pentanol karışımının dielektrik sabitinin gerçel değerinin %70 etanol/%30-pentanol karışımından daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu sonucun, %50 etanol/%50 %1-pentanol ve %70 etanol/%30 1-pentanol karışımları için Gurudas ve ark.’nın (2022) Tablo 1’deki hesaplanan dielektrik sabitinin gerçel değerleriyle uyumlu olarak beklenilir bir durum olduğu görülmüştür.

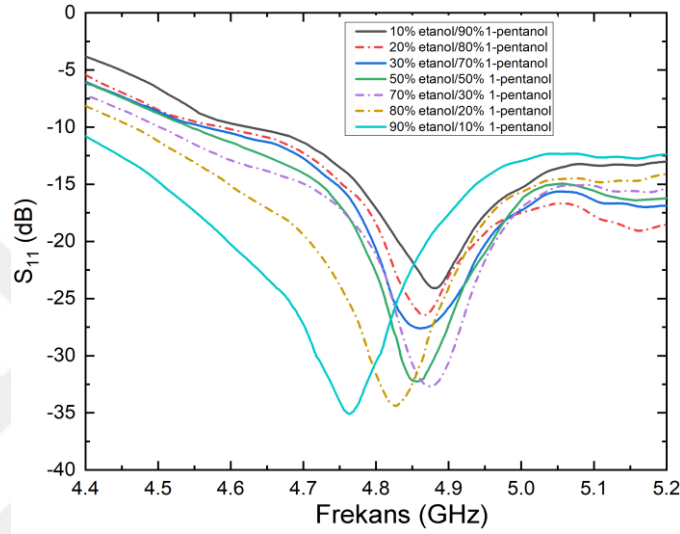


Şekil 5.8 Birinci bant için farklı oranlardaki etanol/1-pentanolün ölçülen  $S_{11}$  spektrumları

Polar-polar ikili sistemlerde moleküller arası etkileşimler dipol-dipol etkileşimlerinden veya hidrojen bağlarından ötürüdür. Çoğu alkol -OH grubuna sahiptir. Bu alkollerde dielektrik sabitindeki değişiklik moleküller arasındaki etkileşimlerin değişikliğinden kaynaklanmaktadır. Polar ideal sıvı karışımlarında moleküller birbiri ile etkileşmiyorsa dielektrik sabiti ve durulma süresinde konsantrasyon ile doğrusal bir değişim beklenir (Lone vd., 2015; Gurudas vd., 2022). Fakat etanol/1-pentanol ikili karışımı için statik dielektrik sabiti ve durulma sabitinde konsantrasyonla olan değişim doğrusal değildir (Lone vd., 2015; Gurudas vd., 2022). Bu durum moleküller arası etkileşimin olduğunu göstermektedir (Lone vd., 2015; Gurudas vd., 2022).

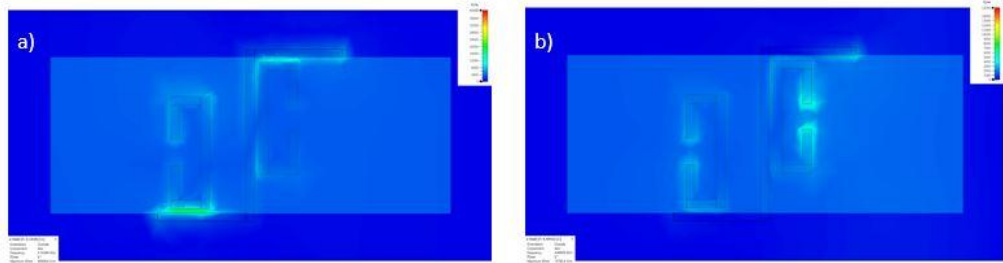
İkinci bant için etanol/1-pentanol karışımındaki etanol oranı %10'dan %90'a değiştiğinde rezonans frekansları 4,88 GHz'den 4,76 GHz'e doğru azalmış ve  $S_{11}$  genliği -24,09 dB'den -35,10 dB'ye değişmiştir. İkinci bant için ölçülen  $S_{11}$  spektrumları Şekil 5.9'da gösterilmiştir. Birinci bant spektrumuna benzer şekilde %50 etanol/%50 %1-pentanol karışımı için rezonansı frekans 4,855 GHz olarak gözlemlenmişken, %70 etanol/%30 1-pentanol karışımı için rezonans frekansı 4,875 GHz olarak elde edilmiştir.

Bu sonucun da %50 etanol/%50 %1-pentanol ve %70 etanol/%30-pentanol karışımları için Gurudas ve ark.'nın (2022) Tablo 1'deki hesaplanan dielektrik sabiti değerleri göz önüne alındığında beklenilir olduğu görülmüştür. Daha önce belirtildiği gibi, etanol ve 1-pentanol karışımının molekülleri arasındaki hetero etkileşimler nedeniyle (Gurudas vd., 2022), %50 etanol/%50 1-pentanol karışımının dielektrik sabitinin gerçel değeri, %70 etanol/%30 1-pentanol karışımınıninkinden daha yüksektir.



Şekil 5.9 İkinci bant için farklı oranlardaki etanol/1-pentanolün ölçülen  $S_{11}$  spektrumları

Metamalzeme üzerinde %70 etanol/%30 1-pentanol karışımı varken birinci rezonans ve ikinci rezonans frekanslarda simüle edilen elektrik alan dağılımları Şekil 5.10'da gösterilmiştir. Elektrik alanı, birinci rezonans frekansında sensörün dış kolları arasındaki boşluklarda yüksek oranda yoğunlaşmıştır. İkinci rezonans frekansında ise elektrik alan AHR'nin ayırık kısımları arasında yoğunlaşmıştır.



Şekil 5.10 %70 etanol/%30 1-pentanol karışımı için a. birinci rezonans ve b. ikinci rezonans frekanslarda elektrik alan dağılımları.

#### 5.4 Birinci Dereceden Matris Modeli ile Sıvıların Karmaşık Dielektrik Sabitlerinin Tahmini Değerlerinin Hesaplanması

Gurudas ve ark. (2021) çalışmasındaki Tablo 1’de sunulan Debye parametre değerleri, Denklem 5.1’de yerine konularak birinci ve ikinci bant için ölçülen ortalama rezonans frekanslar olan 3,20 GHz ve 4,85 GHz’de farklı etanol/1-pentanol karışımları için karmaşık dielektrik sabiti değerleri hesaplanmıştır. Dielektrik sabitinin gerçel ve sanal kısımlarındaki değişimler, referans numunesinin dielektrik sabitine göre küçük olduğunda, numunenin dielektrik sabitlerini tahmin etmek için birinci dereceden bir ampirik model kullanılabilir. Bu çalışmada referans numunesi olarak %50 etanol/%50 1-pentanol ikili sıvı karışımı kullanılmıştır. Bulunan değerler ampirik model içinde kullanılarak, ölçülen değerler için bir karakteristik matris denklemi oluşturulmuştur (Withayachumnankul vd., 2013)

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_r'(\omega) + j\varepsilon_r''(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau_r} \quad (5.1)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon' \\ \Delta\varepsilon'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_0 \\ \Delta|S_{11}| \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Burda  $\Delta\varepsilon' = \varepsilon'_{\text{numune}} - \varepsilon'_{\text{referans}}$ ,  $\varepsilon'' = \varepsilon''_{\text{numune}} - \varepsilon''_{\text{referans}}$ ,  $\Delta f_0 = f_{\text{numune}} - f_{\text{referans}}$ ,  $\Delta|S_{11}| = |S_{11,\text{numune}}| - |S_{11,\text{referans}}|$  olarak tanımlanmıştır. Dielektrik sabitinin gerçel ve sanal kısımlarındaki değişimler, referans numunesinin dielektrik sabitine göre küçük olduğunda, numunenin dielektrik sabitlerini tahmin etmek için birinci dereceden Denklem 5.2 ile matematiksel olarak ifade edilmiş bir ampirik model kullanılabilir.

Denklem 5.3’te sunulan  $X$  matrisi, Şekil 5.8’in ortalama frekansı olan 3,20 GHz’de ve Şekil 5.9’un ortalama frekansı olan 4,85 GHz’de Gurudas ve ark. (2021) çalışmasındaki Tablo 1’de verilen Debye parametresi değerlerinden hesaplanan karmaşık dielektrik sabitlerinden oluşturulmuştur.

$Y_1$  ve  $Y_2$  matrisleri değerleri ise ölçümlerden alınmış olup, rezonans frekanstaki ve genlikteki referans numunesine göre olan değişimler hesaplanarak oluşturulmuştur.

$$X = \begin{bmatrix} \Delta\epsilon'_{10\%etn./90\%pent.} & \Delta\epsilon''_{10\%etn./90\%pent.} \\ \Delta\epsilon'_{20\%etn./80\%pent.} & \Delta\epsilon''_{20\%etn./80\%pent.} \\ \Delta\epsilon'_{30\%etn./70\%pent.} & \Delta\epsilon''_{30\%etn./70\%pent.} \\ \Delta\epsilon'_{70\%etn./30\%pent.} & \Delta\epsilon''_{70\%etn./30\%pent.} \\ \Delta\epsilon'_{50\%etn./50\%pent.} & \Delta\epsilon''_{50\%etn./50\%pent.} \\ \Delta\epsilon'_{80\%etn./20\%pent.} & \Delta\epsilon''_{80\%etn./20\%pent.} \\ \Delta\epsilon'_{90\%etn./10\%pent.} & \Delta\epsilon''_{90\%etn./10\%pent.} \end{bmatrix} \quad Y_1 = \begin{bmatrix} \Delta f_{10\%etn./90\%pent.} \\ \Delta f_{20\%etn./80\%pent.} \\ \Delta f_{30\%etn./70\%pent.} \\ \Delta f_{70\%etn./30\%pent.} \\ \Delta f_{50\%etn./50\%pent.} \\ \Delta f_{80\%etn./20\%pent.} \\ \Delta f_{90\%etn./10\%pent.} \end{bmatrix} \quad Y_2 = \begin{bmatrix} \Delta |S_{11,10\%etn./90\%pent.}| \\ \Delta |S_{11,20\%etn./80\%pent.}| \\ \Delta |S_{11,30\%etn./70\%pent.}| \\ \Delta |S_{11,70\%etn./30\%pent.}| \\ \Delta |S_{11,50\%etn./50\%pent.}| \\ \Delta |S_{11,80\%etn./20\%pent.}| \\ \Delta |S_{11,90\%etn./10\%pent.}| \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Denklem 5.3'de %50 etanol/%50 1-pentanol karışımının dielektrik sabiti daha yüksek değerde olduğu için %30 etanol/%70 1-pentanol'ün altına yazılmıştır.

Karakteristik matrisin bilinmeyen katsayılarını hesaplamak için son olarak,

$$[m_{11} \quad m_{12}]^T = (X^T X)^{-1} X^T Y_1 \quad [m_{21} \quad m_{22}]^T = (X^T X)^{-1} X^T Y_2 \quad (5.4)$$

matrisleri hesaplanmıştır. %50 etanol/%50 1-pentanol karışımının dielektrik sabiti birinci bant için  $4,194 + 3,380j$ , ikinci bant için  $3,723 + 2,304j$  olarak kabul edilmiştir (Gurudas vd., 2022).

Birinci bantta test edilen ikili sıvı karışımı için karmaşık dielektrik sabitini rezonans özelliklere (rezonans frekans değişimi ve rezonans büyüklüğü değişimi) bağlayan karakteristik matris denklemi,

$$\begin{bmatrix} \Delta f_0 \\ |\Delta S_{11}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0132 & -0.0034 \\ 0.2193 & 0.8596 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\epsilon' \\ \Delta\epsilon'' \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

ile verilmiştir.

Denklem 5.5'deki karakteristik matrisin tersi alınarak denklem 5.6 şu şekilde bulunmuştur.

$$\begin{bmatrix} \Delta\epsilon' \\ \Delta\epsilon'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 71.170 & 0.2836 \\ -18.159 & 1.0909 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_0 \\ |\Delta S_{11}| \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

İkinci bantta test edilen ikili sıvı karışımı için karmaşık dielektrik sabitini rezonans özelliklere (rezonans frekans değişimi ve rezonans büyüklüğü değişimi) bağlayan karakteristik matris,

$$\begin{bmatrix} \Delta f_0 \\ |\Delta S_{11}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0392 & -0.0214 \\ 0.4846 & 3.5017 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\epsilon' \\ \Delta\epsilon'' \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

ile verilmiştir.

Denklem 5.7'deki karakteristik matrisin tersi alınarak dielektrik sabitini rezonans özelliklere bağlayan model şu şekilde bulunmuştur:

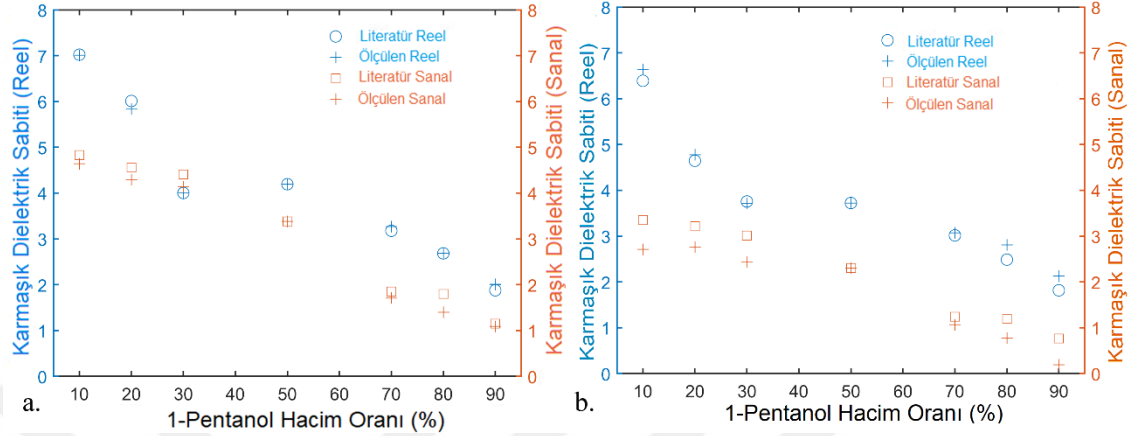
$$\begin{bmatrix} \Delta\epsilon' \\ \Delta\epsilon'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 23.7194 & 0.1447 \\ -3.2825 & 0.2656 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_0 \\ |\Delta S_{11}| \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Bulunan karakteristik matris denklemlerinden karmaşık dielektrik sabitlerinin gerçel ve sanal kısımları hesaplanmıştır. Burada  $\Delta f_0$  ve  $\Delta S_{11}$ , ikili sıvı karışımının incelenen tüm konsantrasyonlarını içeren  $7 \times 1$  matris değerlerini temsil etmektedir.

Denklem 5.6 ve 5.8'den  $\Delta\epsilon'$  ve  $\Delta\epsilon''$  değerleri elde edilmiştir.  $\epsilon'_{numune} = \epsilon'_{referans} + \Delta\epsilon'$  ve  $\epsilon''_{numune} = \epsilon''_{referans} + \Delta\epsilon''$  denklemlerinden yola çıkılarak her bir karışım oranı için  $\epsilon'_{numune}$  ve  $\epsilon''_{numune}$  değerleri bulunmuştur.

Karmaşık dielektrik sabitinin gerçel ve sanal kısımlarının deney sonuçlarıyla literatür değerlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 5.11'de birinci ve ikinci bant için görülmektedir. Literatür değerleri olarak Gurudas vd. (2022) yayınında Şekil 1'de sunulan deneysel veriler esas alınmıştır. Şekil 5.11'den görüldüğü gibi dielektrik

sabitinin hem gerçel hem de sanal kısımları için literatür ve ölçülen değerler arasında iyi bir uyum vardır.



Şekil 5.11.a. Birinci bant ve b. ikinci bant için tahmini karmaşık dielektrik sabiti değerlerinin literatür değerleriyle karşılaştırılması

Kullanılan yöntemin ve sensör sisteminin algılama doğruluğunu ayrıntılı bir şekilde değerlendirmek için standart sapmalar hesaplanmıştır. Karmaşık dielektrik sabitinin gerçel ve sanal kısımları için standart sapma denklem 5.9 (Bagci vd., 2022) kullanılarak birinci bant ve ikinci bant için tek tek hesaplanmıştır:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(\varepsilon_{r,literatür} - \varepsilon_{r,ölçülen})^2}{n-1}} \quad (5.9)$$

‘n’ numune sayısını göstermektedir. Karmaşık dielektrik sabitinin gerçel ve sanal kısımları için literatür değerlerinden standart sapmalar hesaplanmıştır.

Birinci banda yönelik standart sapma dielektrik sabitinin gerçel kısmı için 0,10 ve sanal kısmı için 0,22 olarak elde edilmiştir. İkinci banda yönelik olarak standart sapma ise dielektrik sabitinin gerçel kısmı için 0,10 ve sanal kısım için 0,48 olarak elde edilmiştir.

Frekans algılama çözünürlüğü ( $FAÇ$ ), bir sensörün algılama performansını değerlendirmek için kullanılan önemli bir husustur.  $FAÇ$  denklem 5.10 ile tanımlanmaktadır (Bagci vd., 2022).

$$FAÇ = \frac{f_1 - f_2}{\Delta\epsilon_r} \quad (5.10)$$

Burada  $f_1$  ve  $f_2$  sırasıyla, düşük ve yüksek dielektrik sabitine sahip numunenin rezonans frekansı olarak tanımlanmaktadır.

Düşük dielektrik sabitine sahip numune olarak %10 etanol/%90 1-pentanol karışımı ve yüksek dielektrik sabitine sahip numune olarak %90 etanol/%10 1-pentanol karışımı kabul edilmiştir.  $\Delta\epsilon_r$  %10 etanol/%90 1-pentanol karışımı ile %90 etanol/%10 1-pentanol karışımı arasındaki karmaşık dielektrik sabitinin gerçel kısmının değişimi olarak tanımlanmıştır.  $\Delta\epsilon_r$  birinci bant için 5,14 ve ikinci bant için 4,57 olarak hesaplanmıştır.  $FAÇ$  ise birinci bant için 10,44 MHz ve ikinci bant için 25,50 MHz olarak hesaplanmıştır. Rezonans kaymasının daha yüksek rezonans frekansları için daha fazla miktarda meydana geldiği ve bunun da daha yüksek  $FAÇ$  değerlerine neden olduğu rapor edilmiştir (Alahnomi vd., 2021).

Normalize edilmiş sensör duyarlılığı  $FAÇ$ 'yi kapsayacak şekilde denklem 5.11 ile tanımlanmıştır.

$$S(\%) = \frac{FAÇ}{f_1} \times 100 \quad (5.11)$$

Bu çalışmada  $f_1$ , düşük dielektrik sabitine sahip numune olarak %10 etanol/%90 1-pentanol karışımının rezonans frekansını ifade etmektedir.

Jankovic vd. (2017) çalışmasında normalize edilmiş sensör duyarlılığı birinci ve ikinci bant için sırasıyla 0,18 ve 0,12, Kiani vd. (2020) çalışmasında 0,28 ve 0,30, Zhou vd. (2018) çalışmasında 0,062 ve 0,047, Khanna vd. (2020) çalışmasında 0,17 ve 0,07, Acevedo vd. (2020) çalışmasında ise 0,26 ve 0,10 olarak elde edilmiştir.

Bu çalışmaların ortak özelliği sensörü uyarma tipi olarak mikroşerit hat bağlantılı yapılar kullanılmasıdır. Bağci vd. (2022) çalışmasında sensörü uyarma tipi olarak dalga kılavuzu kullanmış ve normalize edilmiş sensör duyarlılığını birinci ve ikinci bant için sırasıyla 0,73 ve 0,22 olarak elde etmiştir.

Bu tez çalışmasında normalize edilmiş sensör duyarlılığı birinci ve ikinci bant için sırasıyla 0,32 ve 0,62 olarak bulunmuş ve bu sonucun mikroşerit hat bağlantılı yapı çalışmalardan daha yüksek olduğu görülmüş ve dalga kılavuzlu yapı çalışması için ise birinci bandın daha düşük fakat ikinci bandın daha yüksek olduğu görülmüştür.

Sensörün elektriksel boyutu  $0,327\lambda_0 \times 0,655\lambda_0 \times 0,045\lambda_0$  olarak elde edilmiştir. Burada  $\lambda_0$  numunesiz sensörün düşük frekans rezonansındaki vakum dalga boyunu ifade etmektedir. 2,0 ml sıvıya karşılık gelen sıvı yüksekliği 2,47 mm'dir ve sensörün elektriksel kalınlığı  $0,045\lambda_0$  olarak hesaplanmıştır.

## **6. REZONATÖR TABANLI MİKRODALGA DİELEKTRİK SENSÖRÜ İLE KATI NUMUNELERİN AYIRT EDİLMESİ**

Son zamanlarda gıda, sağlık, tarım ve çevre gibi çeşitli alanlarda kalite güvencesini iyileştirmek için mikrodalga sensörlerin kullanımında artış gözlenmektedir (Haq vd., 2019). Bu çalışmada katı numunelerin dielektrik sabitini belirlemek üzere ön yüzünde mikroşerit beslemeli iletim hattı, toprak düzleminde aşındırılmış dişli kapasitör yapısı içeren iki bantlı bir mikrodalga sensör yapısı tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu sensör ile 1 mm kalınlıkta altı farklı katı numunenin (tahta, polikarbonat, teflon, pleksicam, kauçuk ve FR4) karmaşık dielektrik sabitlerinin gerçel kısımlarının değerleri vektör network analizörü aracılığıyla ölçülen iletim spektrumları değerlendirilerek tahmini olarak bulunmuştur. Bulunan değerlerin literatürde verilen değerler ile uyumlu olduğu görülmüştür.

### **6.1 Test Numunesi ile Elektrik Alanın Pertürbasyonu**

Malzemelerin dielektrik sabitlerinin belirlenmesi endüstriyel, bilimsel ve medikal uygulamalarda, savunma sanayinde ve gıda güvenliğinde önem arz etmektedir. Literatürde dielektrik sabitlerinin tespiti için çok çeşitli yöntemler öne sürülmüştür. Bu çok sayıda yöntemin içerisinde yüksek doğruluğu ve yüksek duyarlılığı açısından rezonant yöntem öne çıkmaktadır. Rezonant yöntem kendi içerisinde rezonatör yöntemi ve rezonant pertürbasyon yöntemi olarak ikiye ayrılmaktadır (Nair vd., 2018). Rezonatör yönteminde numunenin kendisi rezonatör olarak davranmaktadır. Rezonant pertürbasyon yönteminde ise incelenen numune rezonatörün rezonans özelliklerini değiştirmektedir (Nair vd., 2018). Bu tez çalışmasında dielektrik sabitlerinin ölçüm sonuçlarına göre elde edilmesinde rezonant pertürbasyon yöntemi kullanılmıştır.

Mikrodalga rezonatörlerde rezonans frekansında, yapıda depolanan elektrik ve manyetik alanın enerjisi birbirine eşit olmaktadır. Rezonatör test edilecek numune ile etkileştiğinde rezonans frekansı azalır. Numunenin elektriksel geçirgenliği kapasitansı etkiler ve rezonatörde depo edilen elektrik alan değişime uğrar. Rezonans frekansındaki

değişim ( $\Delta f_r$ ) numunenin malzeme özellikleri ( $\varepsilon$ ,  $\mu$ ) ile ilişkilidir. Bu ilişki aşağıdaki denklemle ifade edilebilmektedir (Wang vd., 2020):

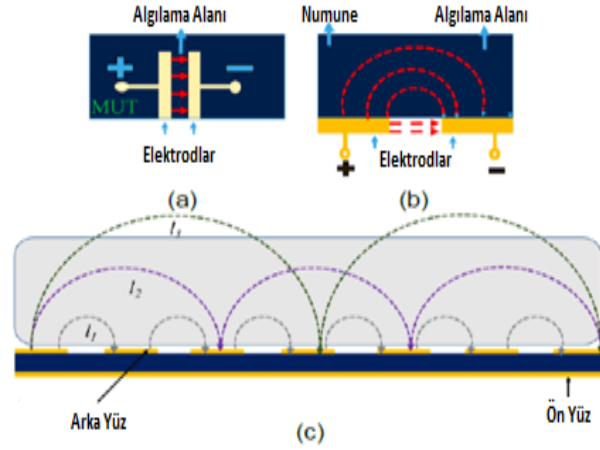
$$\frac{\Delta f_r}{f_r} = \frac{\int_v (\Delta \varepsilon E_1 \cdot E_0 + \Delta \mu H_1 \cdot H_0) dv}{\int_v (\varepsilon_0 |E_0|^2 + \mu_0 |H_0|^2) dv} \quad (6.1)$$

Rezonans frekansında, rezonatörde depolanan elektrik alan ( $E_0$ ) ile manyetik alan ( $H_0$ ) birbirine eşit olmaktadır. Bir numune, rezonatör ile etkileşime girdiğinde, depo edilen elektromanyetik alanları değiştirir ve yeni elektrik alanı ( $E_1$ ) ve manyetik alanı ( $H_1$ ) oluşturur. Numunenin rezonans bir yapının alan dağılımı ile etkileşime girmesi ile rezonans frekansı değişmiş olur. Rezonans frekansındaki bu değişim, karmaşık dielektrik sabitindeki değişim ( $\Delta \varepsilon$ ), manyetik geçirgenlikteki değişiklik ( $\Delta \mu$ ) ile numunenin hacmindeki değişime bağlıdır. Dielektrik malzemeler için, manyetik geçirgenlik  $\mu$ 'deki değişimin sıfır olduğu varsayılabilir. Bu koşullar altında  $\Delta f_r/f_r$ ,

$$\frac{\Delta f_r}{f_r} = \frac{\int_{v_n} (\Delta \varepsilon E_1 \cdot E_0) dv}{\int_{v_r} (\varepsilon_0 |E_0|^2) dv} \quad (6.2)$$

ile ifade edilir. İntegral sınırlarını belirleyen  $v_n$  numune hacmi ve  $v_r$  rezonatörün hacmi olarak tanımlanmıştır (Wang vd., 2020).

Bu tez çalışmasında dışlı kapasitörler arasındaki elektrik alanın yoğunlaştığı bölge, Şekil 6.1'deki gibi geleneksel plaka kapasitörlerinkinden daha fazla hacimlidir. Dışlı yapının parmakları arasındaki boşluklar, elektrik alan çizgilerinin penetrasyon derinliğini belirlemektedir ve bu da numune ve rezonatör arasında güçlü bir etkileşime yol açmaktadır.

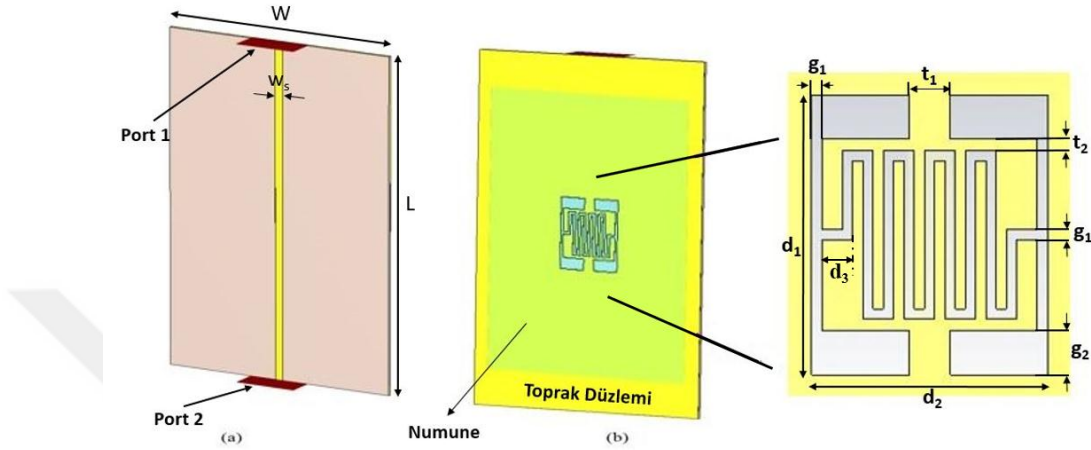


Şekil 6.1 a. Konvansiyonel paralel plakada, b. geniş dişli kapasitörlerde ve c. dişli kapasitörlü mikroşerit yapıda elektrik alan çizgilerinin görünümü (Wang vd., 2020)

## 6.2 Katı Numuneler için Mikroşerit Tabanlı Mikrodalga Dielektrik Sensörünün Tasarımı, Üretimi ve Deneysel Karakterizasyonu

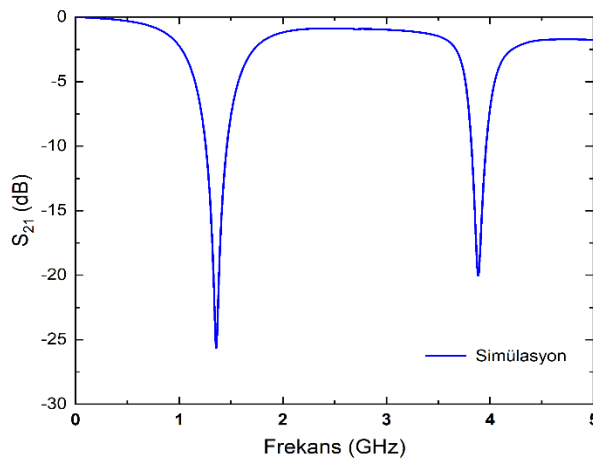
Sensör tasarımında alttaş olarak  $5,0 \text{ cm} \times 7,0 \text{ cm}$ 'lik ebatlarda, 1,0 mm kalınlıkta FR4 alttaş ( $\epsilon_r' = 4,2$  ve  $\tan\delta = 0,025$ ) kullanılmıştır. Mikroşerit hattın genişliği  $50 \Omega$  karakteristik empedansına sahip olacak biçimde 2,10 mm olarak ayarlanmıştır. Sensör yapısının ön yüzü Şekil 6.2(a)'da, arka yüzü Şekil 6.2(b)'de gösterilmiştir. Dişli kapasitör yapısının geometrik parametreleri de Şekil 6.2(b)'de verilmiştir. Yapıya ait geometrik parametre değerleri şöyledir:  $w_s=2,10 \text{ mm}$ ,  $d_1=14,0 \text{ mm}$ ,  $d_2=11,5 \text{ mm}$ ,  $d_3=1,5 \text{ mm}$ ,  $t_1=2,0 \text{ mm}$ ,  $t_2=0,6 \text{ mm}$ ,  $g_1=0,5 \text{ mm}$ ,  $g_2=2,2 \text{ mm}$ . Numune boyutu  $5,5 \text{ cm} \times 4,0 \text{ cm}$ 'lik ebatlarda kullanılmıştır. Bu tasarımın oluşturulmasında Yeo ve Lee (2019) tarafından önerilen sensör yapısı temel alınmış, fakat bazı geometrik parametre değerleri ve alttaş malzemesi değiştirilmiştir. Dişli kapasitördeki diş sayısı artırılmıştır. Böylelikle  $S_{21}$  rezonans sayısı ikiye çıkarılarak iki farklı frekans için dielektrik algılama çalışması gerçekleştirilmiştir.

Tasarım tam-dalga bir elektromanyetik benzetim programı olan CST Microwave Studio'da gerçekleştirilmiştir. Mikroşerit hat genişliği  $50 \Omega$  empedansı sağlayacak ebatta ayarlanıp Şekil 6.2'de gösterilen port 1 ile uyarılmış ve iletilen sinyal port 2 ile algılanmıştır.



Şekil 6.2 Mikroşerit iletim hattına bağdaşan dişli kapasitör yapıya sahip sensörün a. ön ve b. arka yüzünün CST Microwave Studio'da çizdirilen görünümü

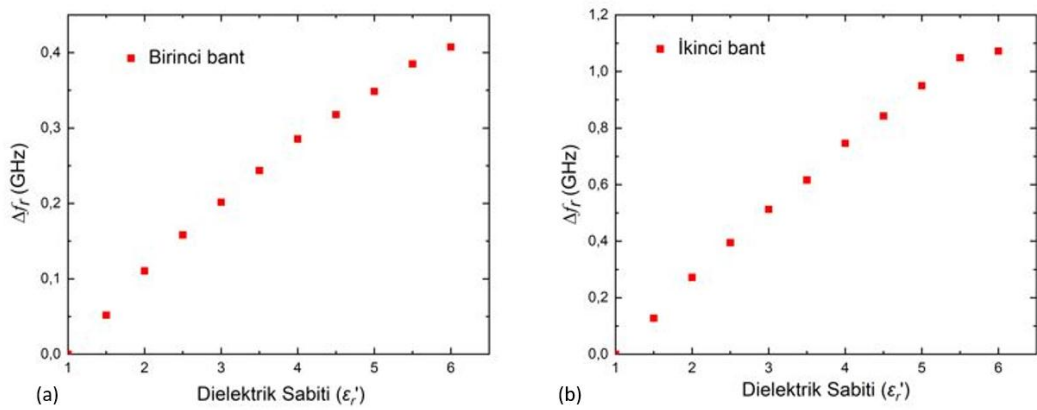
Numunesiz sensörün simüle edilen  $S_{21}$  (iletim katsayısı) spektrumu Şekil 6.3'de gösterilmiştir. Sensörün üzerinde numune yokken birinci bant için rezonans frekansı 1,358 GHz ve  $S_{21}$  genliği -25,66 dB, ikinci bant için rezonans frekansı 3,886 GHz ve  $S_{21}$  genliği -20,04 dB'dir.



Şekil 6.3 Numunesiz sensörün simülasyondan elde edilen iletim spektrumu

Benzetim ortamında numunenin dielektrik sabiti 1,0'den 6,0'ya kadar 0,5'er aralıklarıyla değiştirilmiş ve her bir numunenin birinci ve ikinci bandı için iletim spektrumu grafikleri çizdirilmiştir.

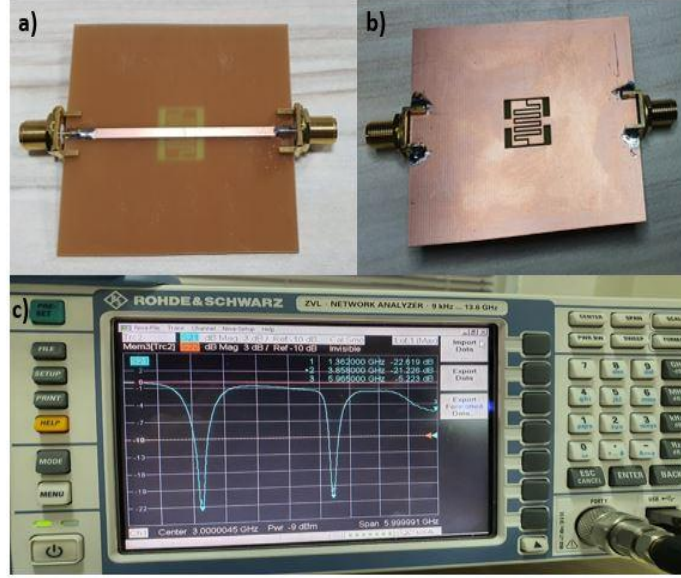
Farklı dielektrik sabitindeki numuneler için sensörün numunesiz olduğu duruma göre frekans kayma miktarları ( $\Delta f_r$ ) hesaplanmıştır. Dielektrik sabitinin frekans kayma miktarına bağlı eğrileri birinci bant için Şekil 6.4(a)'da, ikinci bant için ise Şekil 6.4(b)'de gösterilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi dielektrik sabitine karşı rezonans frekans değişimi paraboliktir. Literatürde yüksek frekanslarda frekans kaymasının daha fazla olduğu rapor edilmiştir (Alahnomi vd., 2021). Şekil 6.4(b)'deki frekans kayma oranının Şekil 6.4(a)'ya göre daha fazla olmasının nedeni ikinci bandın rezonans frekansının daha yüksek olması olarak açıklanabilir. Dielektrik sabiti 1'den 6'ya kadar artarken mutlak frekans değişimi birinci bant için 0,41 GHz, ikinci bant için ise 1,07 GHz olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.4 Simülasyon ortamında a. birinci bant ve b. ikinci bant için dielektrik sabitine karşı frekans kaymalarının değişimi

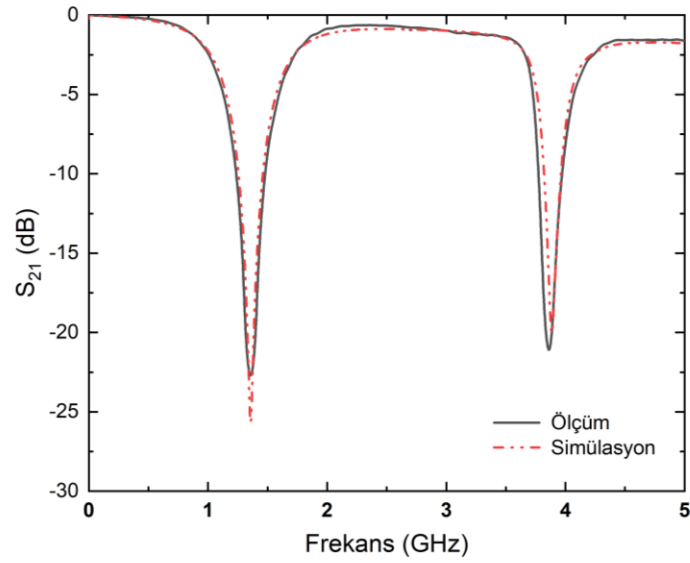
FR4 alttaşın ön yüzünde mikroşerit hat, arka yüzünde kusurlu dişli kapasitörlü toprak düzlemi olan sensör yapısı geleneksel fotolitografi ve kimyasal aşındırma yöntemiyle ile üretilmiştir. Geleneksel aşındırma yöntemiyle üretilen mikroşerit tabanlı mikrodalga sensör yapısının mikroşerit hat içeren ön yüzü Şekil 6.5.a'da, kusurlu toprak düzlemine sahip arka yüzü Şekil 6.5.b'de gösterilmiştir. Şekil 6.5.c'de ise mikroşerit tabanlı mikrodalga sensörün numunesiz durumda ölçülen iletim spektrumu görülmektedir.

Ölçümler laboratuvar ortamında Rohde-Schwarz ZVL13 vektör ağ analizörü ile gerçekleştirilmiştir. 50  $\Omega$  empedanslı SMA portlar mikroşerit hattın giriş ve çıkışına lehimlenmiştir. Ölçümlere başlanmadan önce vektör ağ analizörü Rohde&Schwarz ZV-Z21 kalibrasyon kiti ile kalibre edilmiştir.



Şekil 6.5 Numunesiz sensörün a. ön yüzü, b. arka yüzü ve c. vektör ağ analizörü ile ölçülen iletim spektrumu

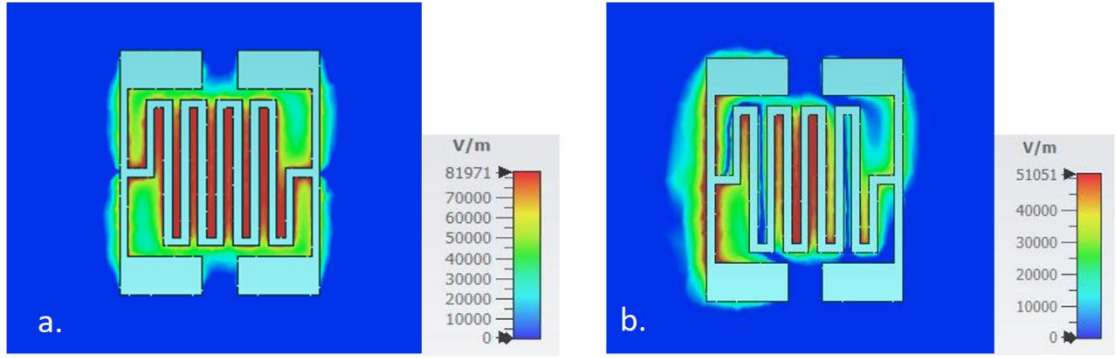
Numunesiz sensörün  $S_{21}$  (iletim katsayısı) spektrumu vektör ağ analizörü ile ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarına göre 1,35 GHz frekansta -22,76 dB genliğinde ve 3,86 GHz frekansta ve -21,10 dB genliğinde iki rezonans elde edilmiştir. Ölçülen iletim spektrumu ile simüle edilen iletim spektrumu Şekil 6.6'da karşılaştırılmıştır. Şekil 6.6'dan görüldüğü gibi ölçülen sonuçlar, simüle edilen sonuçlar ile iyi bir uyum göstermektedir.



Şekil 6.6 Numunesiz sensörün ölçülen iletim spektrumu

Sensör toprak düzlemi üzerinde dielektrik sabiti 4,5 olan bir numune olduğunda simülasyon sonuçları, birinci bant için 1,042 GHz frekans ve -27,217 dB zayıflama değeri, ikinci bant için 3,070 GHz frekans ve -9,53 dB zayıflama değeri vermiştir. Üzerinde dielektrik sabiti 4,5 olan bir numune olan sensörün elektrik dağılımı Şekil 6.7’de görülmektedir.

Kalite faktörü ( $Q$ -faktörü) rezonans frekansın, sinyalin büyüklüğünün minimum olduğu değer  $+3$  dB üzerindeki bant genişliğine bölümü ile tanımlıdır (Alahnomi vd., 2021).  $Q$  faktörü, bir sistem içerisinde depolanan enerjinin kaybolan enerjiye oranı olarak tanımlıdır. Birinci rezonans için  $+3$  dB bant genişliği 0,01536 GHz iken ikinci rezonans için bu değer 0,07411 GHz olarak hesap edilmiştir. Buradan birinci rezonans için kalite faktörü 67,7; ikinci rezonans için kalite faktörü ise 41,42 olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.7’den görüldüğü gibi birinci rezonans frekansta maksimum elektrik alan şiddeti 81971 V/m iken ikinci rezonansta 51051 V/m’dir. Maksimum elektrik alan şiddeti, ikinci rezonansa kıyasla birinci rezonansta daha fazladır. Bu durum birinci rezonansta ikinci rezonansa göre kalite faktörünün daha yüksek olması ile uyum içersindedir.



Şekil 6.7.a. Üzerinde dielektrik sabiti 4,5 olan bir numune olan sensörün birinci bant ve b. ikinci bant için CST Microwave Studio’da simüle edilen elektrik alan dağılımları

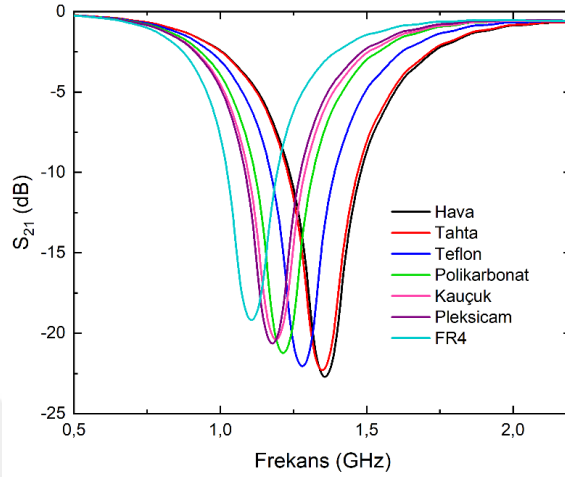
Karmaşık dielektrik sabitinin gerçel kısımlarının tahmini değerlerini deneysel olarak elde etmek için 1,0 mm kalınlıkta, 4,0×5,5 mm ebatlarda altı farklı test numunesi kullanılmıştır. Bunlar, teflon, tahta, polikarbonat, pleksicam, FR4 ve kauçuk olarak seçilmiştir. Numunelerin fotoğrafı Şekil 6.8’de gösterilmiştir.



Şekil 6.8 İncelenen dielektrik numuneler

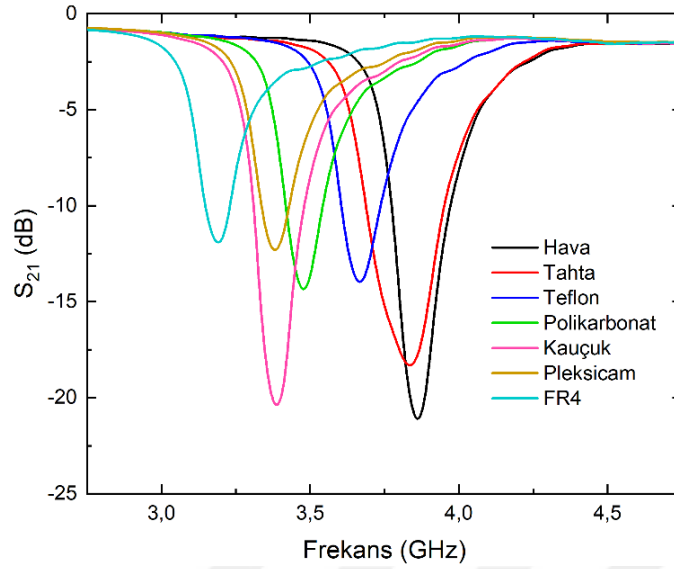
Karmaşık dielektrik sabitinin rezonans özellikleri üzerindeki etkileri, altı farklı katı numune kullanılarak birinci bant ve ikinci bant frekansları için ayrı ayrı incelenmiştir. Birinci bant için, sensörün üzerinde numune yokken (hava), rezonans frekansı 1,356 GHz ve  $S_{21}$  genliği -22,70 dB’dir.

Sensör üzerinde tahta kullanıldığında 1,347 GHz, teflon kullanıldığında 1,281 GHz, polikarbonat kullanıldığında 1,215 GHz, kauçuk kullanıldığında 1,191 GHz, pleksicam kullanıldığında 1,179 GHz, FR-4 numunesi konulduğunda rezonans frekansı 1,107 GHz'e değişmiştir.



Şekil 6.9 Üzerinde numuneler olan sensörün birinci bant için ölçülen iletim spektrumları

İkinci bant için ölçülen iletim spektrumları Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Sensörün üzerinde numune yokken rezonans frekansı 3,861 GHz ve  $S_{21}$  genliği -21,09 dB olarak ölçülmüştür. Sensör üzerine tahta konulduğunda 3,834 GHz, teflon konulduğunda 3,666 GHz, polikarbonat konulduğunda 3,477 GHz, pleksicam konulduğunda 3,381 GHz, kauçuk konulduğunda rezonans frekansı 3,387 GHz ve FR-4 numunesi koyulduğunda rezonans frekansı 3,192 GHz'e değişiklik göstermiştir.



Şekil 6.10 Üzerinde numuneler olan sensörün ikinci bant için ölçülen iletim spektrumları

### 6.3 Dielektrik Sabitlerinin Matematiksel Modelleme ile Tespiti

Ölçülen rezonans frekansları ile numunenin dielektrik sabiti arasındaki ilişki ikinci dereceden bir polinom fonksiyonu ile tahmin edilebilmektedir. İkinci dereceden polinom fonksiyonu şu şekilde verilir:

$$f_{r,numune} = A_1 + A_2 \epsilon'_r + A_3 \epsilon'^2_r \quad (6.3)$$

Bu denklemde  $A_1$ ,  $A_2$  ve  $A_3$  ikinci dereceden parabolik denklemin sabitleridir. Referans olarak hava alındığında numunenin rezonans frekansının  $A_1$ 'e eşit olması için denklem 6.3, denklem 6.4 şeklinde değiştirilmiştir (Haq vd., 2019).

$$f_{r,numune} = A_1 + A_2(\epsilon'_r - 1) + A_3(\epsilon'_r - 1)^2 \quad (6.4)$$

Dielektrik sabitlerinin iyi bilindiği standart malzemeler olarak hava ( $\epsilon'_r = 1,0$ ), teflon ( $\epsilon'_r = 2,1$ ) ve FR4 ( $\epsilon'_r = 4,2$ ) kullanılmıştır. Bu malzemelerin birinci ve ikinci bant için rezonans frekansları ölçülerek denklem 6.4'e fit edilmiştir (Haq vd., 2019).

Bu denklemden  $A_2$  ve  $A_3$  parametrelerinin değerleri çıkarılmıştır.  $A_1$  numune olarak hava olduğu durumdaki rezonans frekansı olan değerdir. Birinci bant için  $A_1=1,356$ ,  $A_2=0,0631$  ve  $A_3=-0,0046$  olarak bulunmuştur. İkinci bant için ise  $A_1=3,861$ ,  $A_2=-0,1606$  ve  $A_3=-0,0151$  olarak elde edilmiştir. Denklem 6.4’de belirtilen ikinci dereceden denklem çözölerek kökü olan  $\varepsilon'_r$  değeri denklem 6.5’de ifade edilmiştir.

$$\varepsilon'_r = \frac{-A_2 - \sqrt{A_2^2 - 4A_3(A_1 - f_{r,numune})}}{2A_3} + 1 \quad (6.5)$$

Bu denklem kullanılarak dielektrik sabiti bilinmeyen numunelerin dielektrik sabiti rezonans frekans ölçümlerine dayalı olarak hesaplanmıştır. Birinci bant ve ikinci bant için rezonans frekansı ve karmaşık dielektrik sabitinin gerçel değeri arasındaki ilişki denklem 6.6 ve denklem 6.7 ile gösterilmiştir.

$$f_{r,numune} = 1,356 - 0,0631(\varepsilon'_r - 1) - 0,0046(\varepsilon'_r - 1)^2 \quad (6.6)$$

$$f_{r,numune} = 3,861 - 0,1606(\varepsilon'_r - 1) - 0,0151(\varepsilon'_r - 1)^2 \quad (6.7)$$

İkinci dereceden olan bu denklemler birinci bant ve ikinci bant için çözölerek ve denklem 6.8 ve denklem 6.9 kullanılarak altı farklı katı numune (tahta, polikarbonat, teflon, pleksicam, kauçuk ve FR4) için dielektrik sabitlerinin değerleri hesaplanmıştır.

$$\varepsilon'_r = \frac{-0,0631 + \sqrt{0,003982 + 0,0184(1,356 - f_{r,numune})}}{0,0092} + 1 \quad (6.8)$$

$$\varepsilon'_r = \frac{-0,1606 + \sqrt{0,025792 + 0,0604(3,861 - f_{r,numune})}}{0,032} + 1 \quad (6.9)$$

Denklem 6.8 ve denklem 6.9’un doğruluğunu kontrol etmek için altı farklı katı numunenin (tahta, teflon, polikarbonat, kauçuk, pleksicam ve FR4) ve numunesiz (hava) sensörün ölçülen rezonans frekansları ölçüm sonucuna göre oluşturulan denklemlerde yerine koyularak karmaşık dielektrik sabitlerinin gerçel kısımları her iki

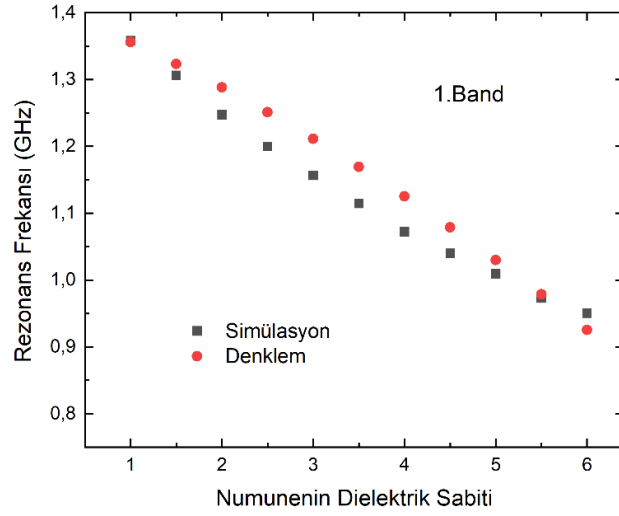
bant için hesaplanmış ve Çizelge 6.1’de literatürdeki değerleri ile karşılaştırılmıştır. Tahta, pleksicam, polikarbonat ve kauçuk için hesaplanan değerler literatürde belirtilen değer aralığına yakın çıkmıştır.

Çizelge 6.1 Farklı test numunelerinin ölçülen dielektrik sabitlerinin gerçel değerlerinin literatür sonuçlarıyla karşılaştırılması (Wang vd., 2021; Haq vd., 2019; Anonymous, 2022)

| Numune                            | Dielektrik Sabiti ( $\epsilon_r'$ )<br>Literatür | Dielektrik Sabiti ( $\epsilon_r'$ )<br>Denklem |        |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------|
|                                   |                                                  | 1.Bant                                         | 2.Bant |
| Hava<br>(Haq vd., 2019)           | 1,0                                              | 1,0003                                         | 1,0000 |
| Kauçuk<br>(Anonymous, 2022)       | 3-4                                              | 3,2471                                         | 3,4068 |
| Polikarbonat<br>(Anonymous, 2022) | 2,8-3,4                                          | 2,9560                                         | 3,0108 |
| Tahta<br>(Anonymous, 2022)        | 1,2-2,1                                          | 1,1415                                         | 1,1655 |
| Pleksicam<br>(Anonymous, 2022)    | 2,2-3,4                                          | 3,3892                                         | 3,4486 |
| Teflon<br>(Wang vd., 2021)        | 2,1                                              | 2,0060                                         | 2,1010 |
| FR4<br>(Anonymous, 2022)          | 4,2                                              | 4,2000                                         | 4,2070 |

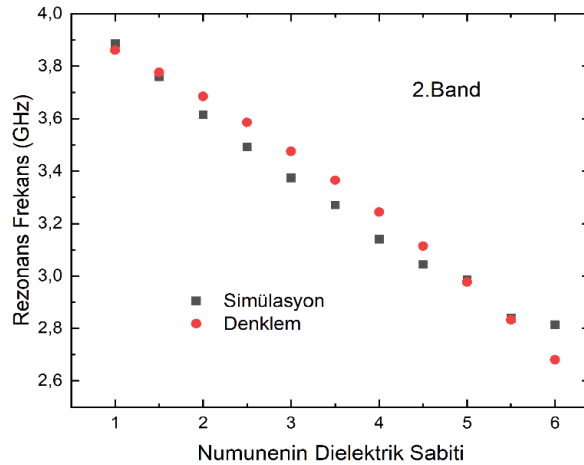
Denklem 6.6, farklı dielektrik sabatine sahip numunelerin birinci bant için olan rezonans frekansını tahmin etmek için kullanılmıştır. Denklem 6.6’nın doğruluğunu kontrol etmek için sensöre çeşitli numuneler yerleştirilmiş ve elektromanyetik simülasyon programı aracılığıyla rezonans frekansları elde edilmiştir.

Şekil 6.11’de kırmızı noktalar denklem 6.6’ya göre rezonans frekanslarını ve siyah noktalar ile gösterilen frekanslar ise simülasyon yoluyla elde edilen rezonans frekanslarını göstermektedir. Şekil 6.11’de ölçüm sonuçlarına dayalı denklem 6.6 ile simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında, denklem 6.6’nın, 1,0’dan 6,0’a kadar olan (0.5’er aralıklarla değişen) dielektrik sabitlerindeki numuneler için sensörün rezonans frekansını tahmin etmede oldukça güvenilir olduğu görülmektedir.



Şekil 6.11 Sensör için simülasyon sonucuna göre ve denklem 6.6 ile elde edilen numunenin dielektrik sabitine karşı rezonans frekansının birinci bant için grafiği

Şekil 6.12’de, kırmızı noktalar, denklem 6.7’den ölçüm sonuçlarına dayalı rezonans frekanslarını ve siyah noktalar ile gösterilen ise, simülasyon yoluyla (numunelerin simülasyon programında dielektrik sabitleri değiştirilerek) elde edilen rezonans frekanslarını göstermektedir. Denklem 6.7, referans olarak hava ( $\epsilon_r'=1$ ), teflon ( $\epsilon_r'=2,1$ ) ve FR-4 ( $\epsilon_r'=4,2$ ) kullanılarak çıkarıldığı için Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de bu  $\epsilon_r'$  değerleri için uyumun daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 6.12 Sensör için simülasyon sonucuna göre ve denklem 6.7 ile elde edilen numunenin dielektrik sabitine karşı rezonans frekansının birinci bant için grafiği

Haq ve ark. (2019) çalışmasında izlenen yöntem izlenerek, ölçümden denklem 6.8 ve 6.9 kullanılarak elde edilen  $\varepsilon_r'$  değerleri simülasyon programında dielektrik numuneler için tanıtılıp birinci ve ikinci bant için rezonans frekans değerleri elde edilmiştir. Bu frekans değerleri Çizelge 6.2'de üçüncü sütunda gösterilmiştir. Karşılaştırma amaçlı birinci sütunda ölçümden elde edilen rezonans frekans değerleri ve ikinci sütunda ise denklem 6.6 ve 6.7 kullanılarak ölçümden elde edilen rezonans frekans değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.2 Farklı test numunelerinin ölçülen rezonans frekanslarının, ölçüm sonucuna göre oluşturulan denkleme ve simülasyondan elde edilen rezonans frekansı değerlerine göre karşılaştırılması

|              | Rezonans Frekans (GHz) (Ölçüm) |        | Rezonans Frekans (GHz) (Denklem) |        | Rezonans Frekans (GHz) (Simülasyon) |        |
|--------------|--------------------------------|--------|----------------------------------|--------|-------------------------------------|--------|
|              | 1.Bant                         | 2.Bant | 1.Bant                           | 2.Bant | 1.Bant                              | 2.Bant |
| Hava         | 1,356                          | 3,861  | 1,355                            | 3,861  | 1,355                               | 3,878  |
| Kauçuk       | 1,191                          | 3,387  | 1,191                            | 3,388  | 1,125                               | 3,234  |
| Polikarbonat | 1,215                          | 3,477  | 1,215                            | 3,477  | 1,150                               | 3,323  |
| Tahta        | 1,347                          | 3,834  | 1,347                            | 3,834  | 1,347                               | 3,829  |
| Pleksicam    | 1,179                          | 3,381  | 1,179                            | 3,381  | 1,116                               | 3,200  |
| Teflon       | 1,281                          | 3,666  | 1,281                            | 3,665  | 1,230                               | 3,532  |
| FR4          | 1,107                          | 3,192  | 1,107                            | 3,191  | 1,055                               | 3,040  |

Ölçülen rezonans frekansları, simülasyon sonuçlarından elde edilen rezonans frekanslar ile küçük tutarsızlıklar dışında iyi bir uyum göstermiştir. Simülasyon ve denklem arasında da iyi bir uyuşma olduğu fakat bazı küçük farklılıkların olduğu görülmüştür. En fazla fark pleksicam numunesi için ikinci banda yönelik olarak denklem ve simülasyon arasındaki farktır. Bu fark % 0,056 olarak bulunmuştur.

Frekans algılama çözünürlüğü, bir sensörün algılama performansını değerlendirmek için kullanılan önemli bir parametredir. Katı numunelere dayalı sensör çalışması için FAÇ denklem 6.10 kullanılarak hesaplanmıştır (Wang, 2020).

$$FAÇ = \frac{\Delta f_r}{\Delta \epsilon_r} = \frac{|f_{hava} - f_{numune}|}{|\epsilon_{r'hava} - \epsilon_{r'numune}|} \quad (6.10)$$

Dielektrik sabiti 2,1 olan teflon numunesi temel alınarak ölçüm sonuçlarına göre birinci bant için duyarlılık 0,068 GHz ve ikinci bandı için 0,177 GHz olarak hesaplanmıştır. Kiani vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen mikroşerit tabanlı sensör çalışmasında FR4 ve RO4350 dielektrik numunelerinin dielektrik sabitleri belirlenmiş olup sensörün  $FAÇ$  değeri 0,170 GHz olarak elde edilmiştir.

## 7. SONUÇ

Bu tez çalışmasında ilk olarak sıvılara yönelik metamalzeme tabanlı dielektrik sensör için ikili sıvı numuneleri olarak etanol/1-pentanol homojen karışımı esas alınmıştır. İkili sıvı numunelerin konsantrasyonlarının ve dielektrik sabitlerinin belirlenmesine yönelik sensör ilk olarak ticari bir tam-dalga elektromanyetik simülasyon programı kullanılarak tasarlanmış, sonra standart baskı devre yöntemiyle üretilmiştir. Rezonatör yapısı özgün bir tasarımıdır. Metamalzeme birim hücresi, basamak şeklindeki bir rezonatörün her iki tarafında asimetrik olarak hizalanmış ayırık halka rezonatörleri (AHR) içermektedir. Farklı konsantrasyonlar için WR-229 mikrodalga dalga kılavuzu ortamında ağ analizörü aracılığı ile 2,577- 5,154 GHz çalışma frekans aralığında iletim ve yansıma spektrumları ölçülmüştür. İki farklı rezonans için, rezonans frekansının ve yansıma katsayısının büyüklüğünün değişimleri ile dielektrik sabitindeki değişimler arasında birinci dereceden matematiksel bir model kurulmuştur. Farklı etanol/1-pentanol homojen karışımları için, ölçüm sonuçlarına dayalı olarak karmaşık dielektrik sabiti değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler literatür değerleri ile karşılaştırılmış ve oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Birinci ve ikinci bantlar için frekans algılama çözünürlüğü 10,4 MHz and 25,5 MHz olarak elde edilmiştir. Literatür içerisinde ilk kez etanol/1-pentanol karışımları için tahmini karmaşık dielektrik sabiti değerleri metamalzeme tabanlı sensör ile belirlenmiştir. Metamalzeme tabanlı dielektrik sensörün avantajları; kolayca üretilebilir olması, kompakt yapıda olması, temassız ve gerçek zamanlı ölçüm alabilmesi, tekrar kullanılabilir olması ve kullanım pratikliği olarak sıralanabilir.

İkinci çalışmada ön yüzünde mikroşerit hat, arka yüzünde toprak düzleminden aşındırılmış dişli kapasitör içeren, 0-5 GHz frekans aralığında iki bantlı bir dielektrik sensör ticari bir tam-dalga elektromanyetik simülasyon programı kullanılarak tasarlanmış, sonra üretilmiş ve üzerine farklı dielektrik sabitine sahip numuneler yerleştirilmiştir. Katı numuneler olarak, pleksicam, teflon, polikarbon, kauçuk, tahta ve FR4 malzemeleri kullanılmıştır. Rezonans frekans kayması,  $S_{21}$  büyüklüğü değişimi ile dielektrik sabitinin gerçel ve sanal kısımları arasında ikinci dereceden bir polinom fonksiyonuna dayalı ilişki kurularak numunelerin dielektrik sabiti değerleri elde edilmiş ve literatür değerleri ile karşılaştırılmıştır. Sensöre ait frekans algılama duyarlılığı

birinci bant için 0,068 GHz ve ikinci bant için 0,177 GHz olarak bulunmuştur. Geliştirilen dielektrik sensörün kompakt ve kolay üretilebilir yapıda olma, gerçek zamanlı ölçüm alabilme, tekrar kullanılabilirlik ve kullanım pratikliği gibi avantajları bulunmaktadır.



## KAYNAKLAR

- Acevedo-Osorio, G., Reyes-Vera, E., Lobato-Morales, H. 2020. Dual-band microstrip resonant sensor for dielectric measurement of liquid materials. *IEEE Sensors Journal*, 20(22), 13371-13378.
- Alahnomi, R. A., Zakaria, Z., Yussof, Z. M., Althuwayb, A. A., Alhegazi, A., Alsariera, H., Rahman, N. A. 2021. Review of recent microwave planar resonator-based sensors: Techniques of complex permittivity extraction, applications, open challenges and future research directions. *Sensors*, 21(7), 2267.
- Al-Naib, I., Withayachumnankul, W. 2017. Editorial introduction to the special issue: Terahertz metamaterials and photonic crystals. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 38(9), 1031-1033.
- Anonymous. 2022. Web Sitesi: <https://www.rfcafe.com/references/electrical/dielectric-constants-strengths.htm>, Eriřim Tarihi: 12.09.2022
- Anonymous. 2021. Web Sitesi: <https://www.radartutorial.eu/03.linetheory/Waveguides.en.html>, Eriřim tarihi: 05.12.2021
- Anonymous. 2020. Web Sitesi: <https://www.protoexpress.com/blog/difference-between-microstrip-stripline-pcb/>, Eriřim Tarihi: 29.11.2022
- Anonymous. 2019. Web Sitesi: <https://slideplayer.biz.tr/slide/2763425>, Eriřim Tarihi: 03.12.2022
- Anonymous. 2018. Web Sitesi: [https://ocw.mit.edu/courses/8-07-electromagnetism-ii-fall-2012/resources/mit8\\_07f12\\_ln12/](https://ocw.mit.edu/courses/8-07-electromagnetism-ii-fall-2012/resources/mit8_07f12_ln12/), Eriřim Tarihi: 21.12.2022
- Ansari, M. A. H., Jha, A. K., & Akhtar, M. J. 2015. Design and application of the CSRR-based planar sensor for noninvasive measurement of complex permittivity. *IEEE Sensors Journal*, 15(12), 7181-7189.
- Awang, R.A., Tovar-Lopez, F.J., Baum, T., Sriram, S., Rowe, W.S.T. 2017. Meta-atom microfluidic sensor for measurement of dielectric properties of liquids. *Journal of Applied Physics* 121, 094506.
- Bagci, F. ve Akaoglu, B. 2012. Effects of structurally deformed sub-lattice points on the dispersion properties of 2D hybrid triangular-graphite photonic crystal. *Optics Communications*, vol. 285, pp. 1486-1493.
- Bagci, F., Gulsu, M. S., Akaoglu, B. 2022. Dual-band measurement of complex permittivity in a microwave waveguide with a flexible, thin and sensitive metamaterial-based sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 338, 113480.
- Bakir, M. 2017. Electromagnetic-based microfluidic sensor applications. *Journal of the electrochemical society*, 164(9), B488.
- Bao, J.Z. 1996. Microwave dielectric characterization of binary mixtures of water, methanol, and ethanol, *J. Chem. Phys.* 104, 4441.

- Choudhury, B., Reddy, P. V., Bisoyi, S., Jha, R. M. 2013. Soft computing for terahertz metamaterial absorber design for biomedical application. *Computers, Materials and Continua*, 37(3), 135-46.
- Demirsoy, T. 2016. Yapay periyodik yapılarda ışığın davranışının sayısal ve deneysel çözümlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Dhar, S. K., Bhunia, S. S., Mukherjee, N. 2014. Interference aware scheduling of sensors in IoT enabled health-care monitoring system. In 2014 Fourth International Conference of Emerging Applications of Information Technology (pp. 152-157). IEEE.
- Ebrahimi, A., Scott, J., Ghorbani, K. 2019. Dual-mode resonator for simultaneous permittivity and thickness measurement of dielectrics. *IEEE Sensors Journal*, 20(1), 185-192.
- Gurudas, N. S., Wahed, P. A., Champatrao, K. A., Deshmukh, A., Abdul Haque, A. J., Shaikh, Y. H. 2022. Dielectric relaxation study of 1-pentanol–ethanol binary mixtures at 10 MHz–50GHz frequency range using TDR technique. *Physics and Chemistry of Liquids*, 60(1), 1-8.
- Gülsu, M.S., Bağcı, F., Can, S., Yılmaz, A.E., Akaoğlu, B. 2020. Metamaterial-based sensor with a polycarbonate substrate for sensing the permittivity of alcoholic liquids in a WR-229 waveguide. *Sensors Actuators, A Phys.* 312, 112139.
- Gülsu, M.S. 2021. Elektromanyetik metamatizeme tabanlı yapıların mikrodalga frekanslarda sensör uygulamaları. Doktora Tezi. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Gümüşderelioğlu, M., Kaynak, G. 2012. Mikrodalgalar ve uygulamaları. *Bilim ve Teknik*, 536, 38-42.
- Görür, A. 2019. Çözümlü Örneklerle Mikrodalga Tekniği. Nobel Akademik Yayıncılık, 337 s., Ankara
- Grant, J., Ma, Y., Saha, S., Khalid, A., Cumming, D.R.S. 2011. Polarization insensitive, broadband terahertz metamaterial absorber. *Opt. Lett.*, 36, 17, 3476-3478.
- Harry, S. R., Zakaria, Z., Said, M. A. M., Alahnomi, R., Misran, M. H. 2021. Design of Dual Band Meta-Material Resonator Sensor for Material Characterization. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 473-478.
- Hasan, M. Md., Faruque, M.R., Islam, M.T. 2018. Dual Band Metamaterial Antenna For LTE/Bluetooth/WiMAX System, *Sci. Rep.*, 8, 1240.
- Haq, T. U., Ruan, C., Zhang, X., Ullah, S. 2019. Complementary metamaterial sensor for nondestructive evaluation of dielectric substrates. *Sensors*, 19(9), 2100.
- Holloway, C. L., Kuester, E. F., Gordon, J. A., O'Hara, J., Booth, J., Smith, D. R. 2012. An overview of the theory and applications of metasurfaces: The two-dimensional equivalents of metamaterials. *IEEE antennas and propagation magazine*, 54(2), 10-35.
- Jankovic, N., Radonic, V. 2017. A microwave microfluidic sensor based on a dual-mode resonator for dual-sensing applications. *Sensors*, 17(12), 2713.
- Khan, M. T., & Ali, S. M. 2012. A brief review of measuring techniques for characterization of dielectric materials. *International Journal of Information Technology and Electrical Engineering*, 1(1).

- Khanna, Y., Awasthi, Y. K. 2020. Dual-band microwave sensor for investigation of liquid impurity concentration using a metamaterial complementary split-ring resonator. *Journal of Electronic Materials*, 49(1), 385-394.
- Kiani, S., Rezaei, P., Navaei, M., Abrishamian, M. S. 2018. Microwave sensor for detection of solid material permittivity in single/multilayer samples with high quality factor. *IEEE Sensors Journal*, 18(24), 9971-9977.
- Kiani, S., Rezaei, P., Navaei, M. 2020. Dual-sensing and dual-frequency microwave SRR sensor for liquid samples permittivity detection. *Measurement*, 160, 107805.
- Kinayman, N., Aksun, M. I. 2005. *Modern Microwave Circuits*. Boston, MA: Artech House.
- Lee, H. J., Yook, J. G. 2008. Biosensing using split-ring resonators at microwave regime. *Applied Physics Letters*, 92(25), 254103.
- Lee, C. S., Yang, C.L. 2013. Thickness and permittivity measurement in multi-layered dielectric structures using complementary split-ring resonators. *IEEE Sensors Journal*, 14(3), 695-700.
- Liu, X. J., Zheng, M. S., Chen, G., Dang, Z. M., & Zha, J. W. 2022. High-temperature polyimide dielectric materials for energy storage: theory, design, preparation and properties. *Energy & Environmental Science*, 15(1), 56-81.
- Lone, B. G., Khirade, P. W., Mehrotra, S.C. 2015. Molecular interaction of 1-pentanol in ethanol. *Bionano Front*, 8(3), 353-356.
- Luk'Yanchuk, B., Zheludev, N. I., Maier, S. A., Halas, N. J., Nordlander, P., Giessen, H., Chong, C. T. 2010. The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials. *Nature materials*, 9(9), 707-715.
- Melik, R., Unal, E., Perkgöz, N. K., Puttlitz, C., Demir, H.V. 2009. Metamaterial-based wireless strain sensors. *Applied Physics Letters*, 95, 011106.
- Mirza, A. F., See, C. H., Danjuma, I. M., Asif, R., Abd-Alhameed, R. A., Noras, J. M., Excell, P. S. 2017. An active microwave sensor for near field imaging. *IEEE Sensors Journal*, 17(9), 2749-2757.
- Nair, R.U., Dutta, M., Yazeen, M., Venu, K.S. 2018. *EM material characterization techniques for metamaterials*, 1st ed., Springer, Singapore.
- Nyikayaramba, G., & Murmann, B. 2020. S-Parameter-Based Defect Localization for Ultrasonic Guided Wave SHM. *Aerospace*, 7(3), 33.
- Ozdemir, M.C., Sevgili, O., Orak, İ., Turut, A. 2020. Arayüzey doğal oksit tabakalı al/p-si/al yapıların dielektrik karakteristiklerine ölçüm frekansının etkileri, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(1), 91-100.
- Pendry, J B, Holden, A J, Robbins, D J, Stewart, W J. 1999. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 472075–84.
- Pozar, D. 2012. *Microwave Engineering*. Wiley, ISBN: 978-0-470-63155-3.
- Salim, A., Lim, S., 2016. Complementary split-ring resonator-loaded microfluidic ethanol chemical sensor, *Sensors* 16(11), 1802.

- Salim, A., Kim, S. H., Park, J. Y., Lim, S. 2018. Microfluidic biosensor based on microwave substrate-integrated waveguide cavity resonator. *Journal of Sensors*, 2018.
- Schurig, D., Mock, J. J., Justice, B. J., Cummer, S. A., Pendry, J. B., Starr, A. F., Smith, D. R. 2006. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science*, 314, 5801, 977-980.
- Sili, G. 2022. Metamalzeme tabanlı sensörler ve bu sensörlerin mikrodalga algılamada kullanılması. Doktora Tezi, İstanbul.
- Sipahioğlu, O., Barringer, S.A. 2003. Dielectric properties of vegetables and fruits as a function of temperature, ash, and moisture content. *J. Food Sci.*, 68, 1, 234-239.
- Shahmarvandi, E. K., Ghaderi, M., Ayerden, N. P., de Graaf, G., & Wolffenbuttel, R. F. 2016. CMOS-compatible metamaterial-based wideband mid-infrared absorber for microspectrometer applications. In *Metamaterials X* (Vol. 9883, pp. 30-38). SPIE.
- Shelby, R.A., Smith, D., Schultz, S. 2001. Experimental verification of a negative index of refraction, *Science* 29277–9.
- Veselago, V.G.1968. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ , *Sov. Phys.-Usp.* 10509–18.
- Wang, C., Ali, L., Meng, F. Y., Adhikari, K. K., Zhou, Z. L., Wei, Y. C., Yu, H. 2020. High-accuracy complex permittivity characterization of solid materials using parallel interdigital capacitor-based planar microwave sensor. *IEEE Sensors Journal*, 21(5), 6083-6093.
- Wang, C., Liu, X., Gan, L., Cai, Q. (2021). A Dual-Band Non-destructive Dielectric Measurement Sensor Based on Complementary Split-Ring Resonator. *Frontiers in Physics*, 178.
- Wegener, M., Zheludev, N. I. 2009. Artificial chiral materials, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 11, 070201.
- Withayachumnankul, W., Jaruwongrungrsee, K., Tuantranont, A., Fumeaux, C., Abbott, D. 2013. Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization, *Sensors Actuators, A Phys.* 189, 233.
- Yang, X., Yin, J., Yu, G., Peng, L., Wang, N. 2015. Acoustic superlens using Helmholtz-resonator-based metamaterials. *Appl. Phys. Lett.*, 107, 19, 193505.
- Yeo, J., Lee, J. I. 2019. High-sensitivity microwave sensor based on an interdigital-capacitor-shaped defected ground structure for permittivity characterization. *Sensors*, 19(3), 498.
- Zhou, H., Hu, D., Yang, C., Chen, C., Ji, J., Chen, M., Mu, X. 2018. Multi-band sensing for dielectric property of chemicals using metamaterial integrated microfluidic sensor. *Scientific reports*, 8(1), 14801.