

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**ELEKTROMANYETİK METAMALZEME TABANLI
YAPILARIN MİKRODALGA FREKANSLARDA
SENSÖR UYGULAMALARI**

Mustafa Suphi GÜLSU

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2021**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ELEKTROMANYETİK METAMALZEME TABANLI YAPILARIN MİKRODALGA FREKANSLARDA SENSÖR UYGULAMALARI

Mustafa Suphi GÜLSU

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Barış AKAOĞLU

Sensörler, güvenlik, teşhis, üretim, ürün kontrolü gibi birçok farklı alanda riskli durumları önlemek için kullanılan cihazlardır. Malzemelerin dielektrik özelliklerinin karakterizasyonu ve bağıl nem tespiti, tıp, eczacılık ve geniş kimyasal ve endüstriyel uygulama alanları açısından çok önemli bir role sahiptir. Özellikle fotonik ve elektromanyetik teknolojisine dayalı sensörlerin üretilmesi pahalı ve zordur. Bu çalışma kapsamında ucuz, etiketsiz, tahribatsız, yeniden kullanılabilir ve kullanımı kolay yeni sensör aygıtları olarak mikrodalga frekanslarda çalışan metamalzeme tabanlı sensörler önerilmiş ve geliştirilmiştir.

Bu tezin ilk sensör tasarımında ilk kez saydam, ince ve bükülebilir polikarbonat alttaş kullanılmıştır. Sensör, WR-229 dalga kılavuzuna göre yapılmış olup, yenilikçi bir tasarım içermektedir. Sıvı karışımların metamalzeme sensör yüzeyi ile temasını engellemek için sert strafor köpükten bir el yapımı havuz üretilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan ikinci sensör yapısında ise Minkowski-benzeri fraktal bir geometrik yapı kullanılmıştır. Sensörün tam ortasının yüzey normali boyunca kılcal bir cam boru yerleştirmiştir. Temassız ve gerçek zamanlı bir ölçüm imkânı olanağı sağlanmıştır. İki sensör tasarımıyla, etanol-su, metanol-su ve etanol-metanol karışımlarının, ayırt edilme hassasiyetleri incelenmiştir. Rezonans frekans ve Q faktör (veya S_{21} değeri, dB) verilerinin değişimleri kullanılarak, karışımların karmaşık dielektrik sabitlerinin öngörüsü yapılmıştır.

Son çalışma olarak, bağıl nemi algılama için metamalzeme tabanlı sensör tasarımı, sayısal yollarla ticari hesaplamalı elektromanyetik benzetim programı olan CST Microwave Studio kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ön yüzeyi neme duyarlı Kapton HN malzemesi ile kaplı metamalzeme tabanlı sensör yapısı optimize edilerek, ortamın bağıl nem değişimini algılamaya yönelik modeller yapılmıştır. Ortamın bağıl nem oranına bağlı olarak Kapton HN filmin etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değeri değişirken, rezonans frekans değişimleri incelenmiş ve yüksek duyarlıklı bir metamalzeme tabanlı bağıl nem sensörü önerilmiştir.

Şubat 2021, 91 sayfa

Anahtar Kelimeler: Metamalzeme, mikrodalga, sensör, duyarlılık, rezonans frekansı, Q-faktör, etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik, bağıl nem, rezonatör

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

SENSORS APPLICATIONS OF METAMATERIAL BASED STRUCTURES IN MICROWAVE FREQUENCIES

Mustafa Suphi GÜLSU

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

Supervisor: Prof. Dr. Barış AKAOĞLU

Sensors are devices that are used to prevent accidents and warn risk situations in many different areas such as security, diagnostics, production, product control. Characterization of the dielectric properties of materials and detection of relative humidity has a very important role in medical, pharmaceuticals and extensive chemical industrial applications. However, the production of sensors based on photonic and electromagnetic technology is expensive and difficult. Metamaterial-based sensors operating at microwave frequencies have been proposed and developed in order to produce new sensor devices that are inexpensive, label-free, non-destructive, reclaimable and easy to use.

In the first sensor design of this thesis, a transparent, thin and flexible polycarbonate substrate was used for the first time. The sensor is made in accordance with WR-229 waveguide that has innovative features. A handmade pool made from hard styrofoam foam was produced to drift away of liquid mixtures with the metamaterial sensor surface. Minkowski-like fractal geometric structure was used a second sensor design. It has placed a capillary glass tube along the surface normal of the center of the sensor. Thus, contactless and real-time measurements were made. The sensitivity of two different sensor designs was investigated for ethanol-water, methanol-water and ethanol-methanol mixtures. The complex dielectric constants of the mixtures are predicted by using the resonance frequency and Q factor (or S21 value, dB) data changes.

In the last study, metamaterial based sensor design for relative humidity sensing has been investigated only through the CST Microwave Studio which is commercial computational electrodynamics modelling program. The metamaterial sensor, the front surface of which is coated with moisture sensitive Kapton HN material, was modeled to detect the relative humidity change of the environment. While the effective complex permittivity value of Kapton film changes depending on the relative humidity of the environment, the frequency changes have been examined and a metamaterial based relative humidity sensor has been proposed.

February 2021, 91 pages

Keywords: Metamaterial, microwave, sensor, sensitivity, resonance frequency, Q-factor, effective complex permittivity, relative humidity, resonator

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Doktora eğitimine başlamamda, çalışmalarım boyunca öneriler ve sonsuz sabırla katkıda bulunan sevgili danışmanım Sayın Prof. Dr. Barış AKAOĞLU' na, tez araştırmalarım katkı sunan bana tüm deneyimlerini karşılıksız sunan çalışma arkadaşlarım değerli ve sevgili Doç. Dr. Fulya BAGCI ve Dr. Sultan CAN'a, tüm Tez İzleme Komite toplantılarında, çalışmalarım bilgi ve deneyimleriyle şekil veren Prof. Dr. A. Egemen YILMAZ ve Prof. Dr. Ş. Barış Emre' ye, maddi ve Manevi anlamda bana yardımları hiç esirgemeyen, en ufak sıkıtımda derdime derman olmaya çalışan, sevgili Prof. Dr. H. Gökhan İLK ve Doç. Dr. Kemal Dil'e, sevgili arkadaşlarım, eşsiz ve değerli dostlarım, Öğrt. Görevlisi Burak Çuhadaroğlu ve Dr. Öğretim Üyesi Çağrı Kaderoğlu'na, bana evlerini açan her türlü desteği sunan, sevili abim Tamer Kılıç ve ablam Selver Köysüren'e ve haklarını asla ödeyemeyeceğim aileme ve sevgili dostlarım ve arkadaşlarıma, şükran ve saygılarımı ifade etmek benim için zevktir.

Mustafa Suphi GÜLSU
Ankara, Şubat 2021

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAVRAMSAL MODELLER	3
2.1 Elektromanyetik Metamalzemelerin Teorisi.....	3
2.2 LH Ortamında Dalga Yayılımı	5
2.3 LH Ortamının Dispersiyon İlişkisi	7
2.4 Negatif Kırılma.....	8
2.5 EM Metamalzeme Ortam Tasarımı	9
2.5.1 Negatif elektriksel geçirgenlik ortamı	9
2.5.2 Negatif manyetik geçirgenlik ortamı	14
2.5.3 SRR ve tel ortamların birleşimi	18
2.6 Mikroşerit İletim Hattı ve Fractal Tabanlı Mikroşerit Yapılar	20
2.6.1 Yarı -TEM yaklaşımı	21
2.6.2 Karakteristik empedans ve etkin dielektrik sabiti.....	21
2.6.3 W/h Oranın Belirlenmesi.....	23
2.6.4 Faz hızı, elektriksel uzunluk, yayılım sabiti ve kılavuzun dalga boyu	24
2.6.5 Mikroşerit kayıplar	25
2.6.6 Kusurlu toprak düzlemi ve mikroşerit yapıları	26
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	29
3.1 Fotolitografi Yöntemi.....	30
3.2 Deneye Dayalı Birinci Dereceden Matris Modeli ile Karmaşık Geçirgenlik Değerlerinin Belirlenmesi	30
3.3 Birleştirilmiş Karıştırma Kuralı	32
3.4 Debye Modeli	32

3.5 Q faktörü.....	33
3.6 Duyarlılık	33
4. DALGA KILAVUZUNDA METAMALZEME TABANLI SIVI SENSÖR TASARIMI	34
4.1 Tasarım, Modelleme ve Üretim	34
4.2 Simülasyon ve Ölçüm Sonuçlarının Uyumluluğu	37
4.3 Etanol-Su Karışımları için S11 Spektrum Ölçümleri.....	38
4.3.1 Tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerinin hesaplanması .	42
4.4 Metanol-Su Karışımları için S11 Spektrum Ölçümleri.....	46
4.4.1 Tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerinin hesaplanması .	48
4.5 Metanol-Etanol Karışımları için S11 Spektrum Ölçümleri	50
5.FRAKTAL REZONATÖR TABANLI METAMALZEME SIVI SENSÖRÜ TASARIMI.....	53
5.1 Tasarım, Modelleme ve Üretim	53
5.2 Simülasyon ve Ölçüm Sonuçlarının Uyumluluğu	56
5.3 Etanol-Su Karışımları için S21 Spektrum Ölçümleri.....	59
5.3.1 Tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerinin hesaplanması .	61
5.4 Metanol-Su Karışımları için S21 Spektrum Ölçümleri.....	63
5.4.1 Tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerinin hesaplanması .	65
5.5 Metanol-Etanol Karışımları için S21 Spektrum Ölçümleri.....	66
5.5.1 Tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerinin hesaplanması .	68
5.6 WR-229 Dalga kılavuzu ile Mikroşerit tabanlı metamalzeme tabanlı, kimyasal sıvı sensör tasarımlarının karşılaştırılması.....	69
6. METAMALZEME TABANLI NEM SENSÖRÜ TASARIMI.....	70
6.1 Tasarlanan Metamalzeme Yapısı	70
6.2 Bulgular ve Tartışmalar	72
7. SONUÇLAR	80
KAYNAKLAR	82
EK.1 TRANSFER MATRİS METODU	86
EK. 2 BLOCH EMPEDANSI	88
ÖZGEÇMİŞ.....	91

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\vec{E}$	Elektrik Alan Vektörü
$\vec{H}$	Manyetik Alan Vektörü
$\vec{S}$	Poynting Vektörü
$\vec{k}$	Dalga Yayılım Vektörü
m_e	Elektronun Kütlesi
m_z	Dipolar Manyetik Moment
ϵ_0	Uzaysal Elektriksel Geçirgenlik
ϵ_{eff}	Etkin Elektriksel Geçirgenlik
ϵ_r	Bağıl Elektriksel Geçirgenlik
μ_0	Uzaysal Manyetik Geçirgenlik
μ_r	Bağıl Manyetik Geçirgenlik
c	Işık Hızı
C	Kapasitans
D	Elektrik Deplazman Vektörü
e	Elektron Yüğü
f	Frekans
I	Akım
L	İndüktans
n	Ortamın Kırılma İndisi
P	Polarizasyon
Q	Kalite Faktör
R	Direnç
S	Duyarlılık
t	Zaman
Y	Admintans
Z	Empedans
α	Sönümlenme Sabiti

α_m	Manyetik Kutuplanabilirlik
Γ	Sönümlenme Frekansı
γ	Yayılm Sabiti
π	Pi Sayısı
χ_m	Manyetik Alınganlık
Φ	Manyetik Akı
ε	Elektriksel Geçirgenlik
μ	Manyetik Geçirgenlik
ω	Açısal frekans

Kısaltmalar

CST	Computer Simulation Technology
DGS	Kusurlu Toprak Yapı (Defected Ground Structure)
DNG	Çift Negatif (Double Negative)
DPS	Çift Pozitif (Double Positive)
EBG	Elektromanyetik Bant Aralık (Electromagnetic Band Gap EBG)
EM	Elektromanyetik (Electromagnetic)
ENG	Epsilonu Negatif (Epsilon Negative)
FIT	Sonlu İntegrasyon Tekniği (Finite İntegration Technique)
KCM	Kılcal Cam Boru
LH	Sol El (Left Handed)
MFR	Minkowski-benzeri Fractal Rezonatör (Minkowski-like Fractal Resonator)
MNG	Mu Negatif (Mu Negative)
NF	Gürültü Tabanı (Noise Floor)
NRI	Negatif Kırılma İndisi (Negative Refractive Index)
PC	Fotonik Kristal (Photonic Crystals)
PCB	Baskı Devre Kart (Printed Circuit Board)
PEC	Mükemmel Elektriksel İletken (Perfect Electrical Conductor)

PMC	Mükemmel Manyetik İletken (Perfect Magnetic Conductor)
RH	Sağ El (Right Handed)
SNG	Tek Negatif (Single Negative)
SRR	Ayrık Halka Rezonatör (Split Ring Resonator)
TE	Enine Elektrik (Transverse Electric)
TEM	Enine Elektromanyetik (Transverse Electromagnetic)
TL	İletim Hattı (Transmission Line)
TM	Enine Manyetik (Transverse Magnetic)
WR	Dikdörtgen Dalga kılavuzu (Waveguide Rectangular)



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 EM dalganın a) RH ortam ve b) LH ortam içinde yayılımı	7
Şekil 2.2 Alt indis '1' olduğunda, iki RH ortamı için, alt indis '2' olduğunda RH ve LH ortamları arasında kırılarak ilerleyen ışın dalga vektörü ve Poynting vektörü ilerleyiş yönü	9
Şekil 2.3 a) ince iletken tel örgüsü b) TEM iletim hattı c) eşdeğer devre modeli	13
Şekil 2.4 a) SRR genel tasarımı, b) eşdeğer devre, c) yüzeyde yük dağılımları	17
Şekil 2.5 Kübik örgüye sahip SRRs ortamı	17
Şekil 2.6 İlk kez sentezlenen Negatif Kırılma ortamının yapısı	18
Şekil 2.7 a) LH ortamı (kesik çizgi) ve yalnızca SRR ortamı için iletim gücü b) dispersiyon ilişkisi	19
Şekil 2.8 a) Mikroşerit hattın genel yapısı, b) Elektrik ve manyetik alan çizgi dağılımları	20
Şekil 2.9 DGS rezonatör yapıları a) yarık hat, b) kıvrımlı hat c) dambıl hat d) yuvarlak hat	27
Şekil 2.10 DMS için bazı topolojik konfigürasyonlar; a) T- tipi, b) Çift T-tipi c) H-tipi d) U-tipi	28
Şekil 3.1 Sensörün giriş-çıkış karakterisitik eğrisi	33
Şekil 4.1 Sensörün a) boyutları. b) turkuaz renk kimyasal sıvı alan	35
Şekil 4.2 a) sensör tasarımı b) dalga kılavuzu içine sensör yerleşimi, c) havuz ve boyut parametreleri, d) WR-229 dalga kılavuzu fotoğrafı	36
Şekil 4.3 a) ölçüm düzeneğinin şeması b) sensör ve havuzun dalga kılavuzu içerisine olan yerleşimi	36
Şekil 4.4 S11 ve S21 spektrumları için simülasyon ve ölçüm sonuçları	37
Şekil 4.5 Etanol-saf su karışım oranları için S11 spektrum sonuçları	39
Şekil 4.6 Su hacim oranına göre rezonans frekansı ve Q faktör değerlerinin değişimi	41
Şekil 4.7 Simülasyonda yansıma spektrum için a) yüzey akım ve b) elektrik alan dağılımları	42
Şekil 4.8 Tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerinin literatür değerleri ile karşılaştırılması	44
Şekil 4.9 Tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerinin literatür değerleri ile karşılaştırılması	45
Şekil 4.10 Metanol-saf su karışım oranları için S11 spektrum sonuçları	47
Şekil 4.11 Su hacim oranına göre rezonans frekansı ve Q faktör değerlerinin değişimi	48
Şekil 4.12 Tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerinin literatür değerleri ile karşılaştırılması	50
Şekil 4.13 Metanol-etanol su karışım oranları için S11 spektrum sonuçları	51
Şekil 5.1 Metamalzeme tabanlı sıvı sensör a) iletim hattı düzlemi b) topraklama düzlemi	54

Şekil 5.2 Üretilen sensörün yapısı, a) mikroşerit hat ve b) toprak düzlem görüntüsü	55
Şekil 5.3 Sensörün ölçüm düzeneği, kılcal cam a) yokken ve b) varken.....	56
Şekil 5.4 Ölçüm düzeneğinin şeması	56
Şekil 5.5 Ölçüm ve simülasyonda, KCB kullanılmadan sensörün iletim spektrumunun grafiği	58
Şekil 5.6 Metamalzeme tabanlı sensörün elektrik alan dağılımı.....	58
Şekil 5.7 Cam kılcal boru yokken, hava, saf su, etanol ve metanol ile dolu cam kılcal borunun kullanıldığı sensörün ölçülen iletim spektrumu.....	59
Şekil 5.8 Etanol-su karışımları için iletim spektrumu.....	60
Şekil 5.9 Etanol hacim oranı için rezonans frekansı ve S21 büyüklük değerleri.....	61
Şekil 5.10 Tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerinin literatür değerleri ile karşılaştırılması	63
Şekil 5.11 Metanol-su karışımları için iletim spektrumları	64
Şekil 5.12 Metanol hacim oranları için rezonans frekansı ve S21 büyüklük değerleri	64
Şekil 5.13 Tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerinin literatür değerleri ile karşılaştırılması	66
Şekil 5.14 Metanol-etanol karışımları için iletim spektrumu.....	67
Şekil 5.15 Metanol-etanol karışımları için rezonans frekansı ve S21 büyüklük Değerleri.....	67
Şekil 5.16 Tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerinin literatür değerleri ile karşılaştırılması	69
Şekil 6.1 Bağlı nem algılama sensör hücresi a) önden ve b) üç boyutlu temsili Görünüşü	72
Şekil 6.2 Soğurucu tabanlı metamalzeme sensörün Kapton HN bant yokken ve kaplı iken yansıma spektrumları	73
Şekil 6.3 a) Elektrik-LC rezonatörü, b) bakır topraklama akım dağılımları.....	75
Şekil 6.4 Kapton HN bant kalınlık artışının rezonans frekansı üzerindeki değişiminin etkisi	76
Şekil 6.5 Bağlı nem değer değişimlerine karşı elde edilen yansıma spektrumları.....	76
Şekil 6.6 Nem değer değişimlerine karşı elde edilen rezonans frekans değişimi	78
Şekil 6.7 g1 parametre değerlerine karşı rezonans frekansı kayması üzerindeki etkisi	79
Şekil 6.8 bağlı nem değişimine karşı rezonans frekansındaki kayma miktarı (g1 = 0,05 mm ve kapton HN bant kalınlığı 0,3 mm).....	79

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 %96 saflıkta etanol ve %100 saflıkta suyun karışım oranları	38
Çizelge 4.2 %100 saflıkta metanol ve %100 saflıkta su karışım oranları.....	46



1. GİRİŞ

Sensörler günlük yaşamda, özellikle güvenlik kavramı içerisinde oynadığı hayati rol nedeniyle çok önemli bir yere sahiptir (Sehrawat ve Gill, 2019). Şüphesiz ki, gelişen yapay zekâ sistemlerine dayalı otomasyon teknolojileri ile uzaktan kontrol edilebilen cihazlar için gün geçtikçe büyüyen piyasada, daha yenilikçi ve daha güvenli yeni nesil sensörlere ihtiyaç vardır (Sehrawat ve Gill, 2019). Literatürde, hareket ve nem sensörlerinden, mikrodalga ve optik sensörlere kadar geniş bir yelpazede pek çok farklı sensör tipleri bildirilmiştir (Ekmekci vd., 2019; Okatani vd., 2020; Paczesnya vd., 2015; Rocchi vd., 2019; Xinjing vd., 2020). Sensör tip ve çeşitlerine daha geniş bir çerçeveden bakıldığında, elektromanyetik tabanlı sensörler son zamanlarda en çok ilgi çeken sensör türlerinden birisidir. Sensörler kırılma indisi (Zaky vd., 2020), güç (Asadi vd., 2017), sıcaklık (A. Zhou vd., 2020), gerinim (Wu vd., 2020), hareket (Ebrahimi vd., 2014b), konum (Dhar vd., 2014) ve polarizasyon (Yasumatsu vd Watanabe, 2012) gibi birçok farklı parametreyi algılama ve değişimleri ölçme becerilerine sahiptir. Elektromanyetik tabanlı sensörler arasında özellikle metamalzeme tabanlı mikrodalga sensörler, üretim kolaylığı, düşük maliyet, kompakt yapı, pratik ölçüm gibi kabiliyetler sayesinde önem kazanmıştır.

Elektromanyetik metamalzemeler, dalga boyundan çok küçük eş rezonatör yapıların belirli bir periyodik düzen içerisinde birleştirilmesi ile elde edilen yapay olarak yapılandırılmış malzemelerdir. Metamalzemeler, elektromanyetik dalga ile etkileştiklerinde negatif kırılma, Doppler etkisi ve ters Cherenkow ışıınımı gibi oldukça şaşırtıcı elektromanyetik özellikler sergileyebilirler (Martín vd., 2003; Ziemkiewicz ve Zielińska-Raczyńska, 2015). Metamalzemenin rezonans frekansı, metamalzemeyi oluşturan malzemenin elektriksel büyüklüğüne göre rezonatör boyutu ve şekli değiştirilerek, istenilen çalışma aralığına getirilebilme özelliğine sahiptir. Rezonans durumunda, bir rezonatör, kapasitif alanlarda çok yüksek yoğunluklu elektrik alan yoğunlaşması oluşturur (Guarin vd., 2015). Bu kapasitif bölgede elektrik alan yoğunluğu dielektrik özelliklerin değişimine karşı çok hassastır. Metamalzemelerin bu özelliğinden dolayı, yakın alan sensör uygulamaları için oldukça güzel bir adaydır. Bu

yüzden, çeşitli frekans bölgeleri için farklı sensör uygulamalarında kullanılmıştır (Abdulkarim vd., 2019; Cheng vd., 2016; Zou ve Cheng, 2019).

Metamalzeme tabanlı sıvı sensörler, özellikle kimya, ilaç ve petrol endüstrisinde çok geniş bir kullanım alanına sahiptir (Lee vd., 2019). Nem sensörlerinin ise, hastanelerde, müze ve muayede salonlarında, arşiv ve temiz odalarda, çeşitli hassas elektronik ve elektro optik cihazların korunmasında ve yüksek gerilim uygulamalarının yapıldığı laboratuvarlarda kullanımı çok büyük bir öneme sahiptir (Md Amin vd., 2013). Bu nedenlerden dolayı, tez çalışmasında metamalzeme tabanlı sensörlerin, sıvı ve nem algılama yeteneğine sahip çeşitli tasarımlar önerilmiş ve geliştirilmiştir.

Metamalzeme tabanlı sıvı sensörler olarak, iki farklı tasarım anlayışına sahip sensör gerçekleştirilmiştir. İlk tasarımda, WR-229 dalga kılavuzu içerisinde metamalzeme tabanlı birim hücrede eş-rezonatör mimarisine sahip sensörler tasarlanmıştır. İkinci tasarımda, mikroşerit tabanlı sensör tasarımı önerilmiştir. Bu mimaride, topraklama düzlemi üzerinde Minkowski benzeri fraktal kusurları oluşturularak rezonatör yapısı geliştirilmiştir. İki sensör tipi de CST Microwave Studio benzetim programı kullanılarak modellenmiş ve üretimleri gerçekleştirilmiştir. Etanol-su, metanol-su ve etanol-metanol ikili homojen karışımların, temassız bir şekilde ölçümleri yapılmıştır. Sensörlerin duyarlılıkları hesaplanmış ve sahip oldukları kategorilere göre değerlendirmiştir. Withayachumnankul ve ark. (2013b) tarafından tanıtilan deneysel matris model kullanılarak, karışımların tahmini karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri hesaplanmış ve literatürle karşılaştırılmıştır.

Son bölümde metamalzeme tabanlı bağıl nem sensör tasarımı, CST Microwave Studio benzetim programı kullanılarak yalnızca modellenmiştir. Elektromanyetik soğurucu olarak, güçlü kapasitif indüktif özelliğe sahip olmasından dolayı elektrik-LC rezonatör yapısı bağıl nem sensörünün ana bileşeni olarak kullanılmıştır. Neme duyarlı Kapton HN bandın dielektrik sabitinin değişiminden sayısal bir problem modellenmiştir. Bant kalınlığı ve kapasitif aralığın geometrik parametre değerlerinin değişmesinin sensör duyarlılığı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

2. KAVRAMSAL MODELLER

2.1 Elektromanyetik Metamalzemelerin Teorisi

Metamalzemelerin normlara uyan genel bir tanımı yoktur (Martin, 2015). Mekanik, akustik, optik ve elektromanyetik (Electromagnetic, EM) alanlar içerisinde, sıra dışı özellikler sergileyebilen yapay malzemelerin hepsine birden metamalzeme denir. Metamalzemeler, çoğunlukla kompozit bir yapı oluşturacak şekilde metal ve dielektrik malzemelerin bir araya getirilmesiyle elde edilir. Kompozit yapılar, birim hücre adı verilen yapılar ile kendini belirli bir periyodik düzende tekrar ederler. Sıra dışı özellikler, kompozit yapısından değil, birim hücrenin kendisinden kaynaklıdır. Bu nedenle, metamalzemeler doğada doğal bir davranışın ötesinde bilinmeyen yeni özellikler ortaya çıkartabilirler. Aynı zamanda, sıra dışı davranışların mühendislik alanı içerisinde kontrol edilmesiyle istenilen belirli gereksinimlere göre ayarlanabilirler.

Fizikçiler ve Elektrik Mühendisleri tarafından metamalzemeler; ışığın dalga boyundan çok çok küçük birim hücre boyutuna sahip periyodik yapılar olarak tanımlanmaktadır. Metamalzeme yapıların çalışma bölgelerine uygun gelen elektromanyetik dalgalar, bu yapıları sürekli (veya etkin) bir ortam olarak görür. Bazı araştırmacılar için ise, metamalzemeler, EM dalganın dalga boyuyla eş veya karşılaştırılabilir boyutlara sahip fotonik kristaller (PC'ler) veya elektromanyetik bant aralıklı (Electromagnetic Band Gap, EBG) yapılarına da kapsamaktadır (Martin, 2015).

Metamalzemenin davranışı ortaya çıkarmak için gerekli etkin ortam davranışı çok fazla birim hücre gereklidir. Bu ortamın büyüklüğü, ilgili frekansın dalga boyundan büyüktür. Fakat, tek bir birim hücre bu davranışı sağlamaz. Birim hücre yapılarının devre tasarımları, periyodik olma şartını sağlamasa da dispersiyon ve empedans mühendisliği üzerinden, örneğin sensörler gibi ilgi çekici çeşitli çalışmalar mevcuttur. Basit amaçlar için yapılan bu tasarımlara, meta-çizgi (metalines) ve meta-yapı (metastructure) olarak ifade edebiliriz.

Eş zamanlı olarak negatif etkin elektriksel ve manyetik geçirgenlik gösteren ilk etkin ortam davranışı, Smith vd. (2000) tarafından yapıldığından bu yana, çeşitli araştırma ve uygulamalar yürütülmektedir. Öncülük eden bu ve sonraki tüm çalışmalarda, Veselago (1968) yapmış olduğu kuramsal (hypothetical) ortamın varlığı doğrulandı (Veselago V. G., 1968). Sensörler, tıbbi teşhis cihazlar, anten gibi pek çok çeşitli konunun, micro ve nano teknoloji, akustik, photonik, fizik ve elektrik elektronik vb. farklı disiplinler arası çalışmaları yan yana gelmesini sağlamıştır. 2000 yılından günümüze, pek çok araştırmacı, farklı disiplinler çeşitli araştırma konuları, yüzlerce kitap ve binlerce yayın yapılmıştır (Martin, 2015). Çok fazla araştırma yapılmasının temel anahtarı, eş zamanlı olarak negatif etkin elektriksel ve manyetik geçirgenlik değerli ortamların ön görülemeyen fiziki özelliklerin ortaya çıkmasından kaynaklıdır. Bu ortam, literatürde pek çok adla karşımıza çıkmaktadır: çift-negatif (double-negative, DNG) ortam, negatif kırılma indisi (negative refractive index NRI) ortam, sol-el (left-handed, LH) ortam.

2000 yılı öncesi araştırmacılar, tek-negatif (single negative SNG) ortamları tasarlamayı başarmışlardır. Gerçekte, ilk kez mikrodalga frekanslarda yapay plazma ortamı Rotman tarafından 1960 yılında tasarlandı (Solymar ve Shamonina, 2009). Bu çalışma, negatif etkin elektriksel geçirgenlik özelliğine sahip ortam tasarımının önünü açtı. SNG ortamlar, epsilon negatif (epsilon negative, ENG) yapılar olarak adlandırıldı. 90'ların sonunda etkin negatif manyetik geçirgenlikli yapılar, ayrık halka rezonatörler (split ring resonators, SRRs) periyodik bir dizilimden Pendry vd. ark. tarafından tasarlandı. Bu yapılar μ negatif (μ negative, MNG) ortam olarak adlandırıldı (J. B. Pendry vd., 1999). SNG'nin yapısal özelliklerine, doğada çok az malzeme sahiptir. Optik ve kızıl ötesi frekanslarda yarı iletken ve altın gibi metaller plazma frekansına yakın bölgede negatif elektriksel geçirgenlik değeri gösterirler. Negatif manyetik geçirgenlikli ortam doğada neredeyse hiç yoktur. Mıknatıslanmada doyuma ulaşmış demir bir malzeme, ferromanyetik rezonansa çok yakın olduğunda, negatif elemanlara sahip manyetik geçirgenlik bir tensör ortaya çıkartırlar. Böylece, bu çalışmaların öncülüğünde, $-\epsilon / +\mu$ ve $+\epsilon / -\mu$ özelliklerine sahip çeşitli yapay ortamlar elde edildi (Caloz ve Itoh, 2005). Buna karşın, DNG özelliği gösteren bir malzemeye, doğada doğal olarak rastlanılmamıştır. Doğada doğal olarak DNG malzemelerinin, neden var olmadığı hala büyük bir muammadır. Yine de bir malzeme eş zamanlı olarak MNG ve ENG

özelliklerine sahip olduğunda, ışık geçirmez bir ortama dönüştürmez. $k = \omega\sqrt{\varepsilon\mu}$ yayılım sabitli bir düzlem dalga ortamda yayılmaya devam eder. DNG ortamının dalga empedansı çevreleyen ortamdan farklı değildir.

2.2 LH Ortamında Dalga Yayılımı

Herhangi bir ortamın dispersif olup olmadığı, bağıl elektriksel geçirgenlik ' ε_r ' ve manyetik geçirgenlik ' μ_r ' değerleri ile belirlenir (Veselago V. G., 1968). Vakum ortamı haricinde aslında tüm ortamlar dispersiftir (Hecht, 2002).

$$\left| \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_{ij} \mu_{ij} - k^2 \delta_{ij} + k_i k_j \right| = 0 \quad (2.1)$$

Monokromatik bir dalganın, ω açısal frekans dalga vektörü k arasındaki ilişki, denk. 2.1 içerisinde gösterilmiştir. İzotropik bir ortam için, Kronecker delta fonksiyonunun tanımından faydalanılarak, denk. 2.2 de dispersiyon ilişkisi verilir. Ortamın kırılma indisi ' n ' ile gösterilmiştir ve denk. 2.3 formülüyle tanımlanmıştır.

$$k^2 \cong \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon \mu \quad (2.2)$$

$$n^2 = \varepsilon \mu \quad (2.3)$$

Elektriksel ve manyetik geçirgenlik için işaret değişimi bağıl parametrelerin değişimine bağlıdır. Eş zamanlı işaret değişimi dalga yayılımında hiçbir etki yaratmaz. Bu sonuç su şekilde yorumlanabilir: parametrelerin negatif değer alması doğa ile çelişebilir, bu nedenle de $\varepsilon_r < 0$ ve $\mu_r < 0$ özellikli bir malzeme, doğada asla var olamaz. İkincisi, $\varepsilon < 0$ ve $\mu < 0$ özelliğine sahip bir malzeme, $\varepsilon > 0$ ve $\mu > 0$ malzemeden farklı davranabilir. Sonuncu durum, $\varepsilon < 0$ ve $\mu < 0$ özelliğine sahip bir malzeme doğada doğal olarak var olmadığından, deneysel bir gözlemlerde karşılaştırma yapılamaz.

Veselago, tartışmalarda geçen negatif kırılma indisine sahip bir malzemenin varlığını ileri sürdükten sonra, Maxwell denklemleri üzerinden negatif kırılma etkisinin sonuçlarını gösterdi(Solymar ve Shamonina, 2009). Monokromatik bir düzlem dalganın, $e^{-j(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t)}$ maddesel bir ortamda yayılım ilişkisi, Maxwell denklemleri ve bünye parametreleri ile birlikte denklem verilen 2.4a ve 2.4b eşitlikleri ile verilir.

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega\mu\vec{H} \quad (2.4a)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega\varepsilon\vec{E} \quad (2.4b)$$

Denk. 2.4'e göre, ε ve μ 'nun değerleri, eğer $\varepsilon > 0$ ve $\mu > 0$ formunda ise, çift pozitif (DPS) indisine sahip, sağ-el (right hand RH) bir ortamı ifade etmektedir. $\vec{E}$, $\vec{H}$ ve $\vec{k}$ orthogonal vektörler sistemi oluşturulur. Fakat, DNG ortamı için, denk. 2.5'de tanımlanır.

$$\vec{k} \times \vec{E} = -\omega|\mu|\vec{H} \quad (2.5a)$$

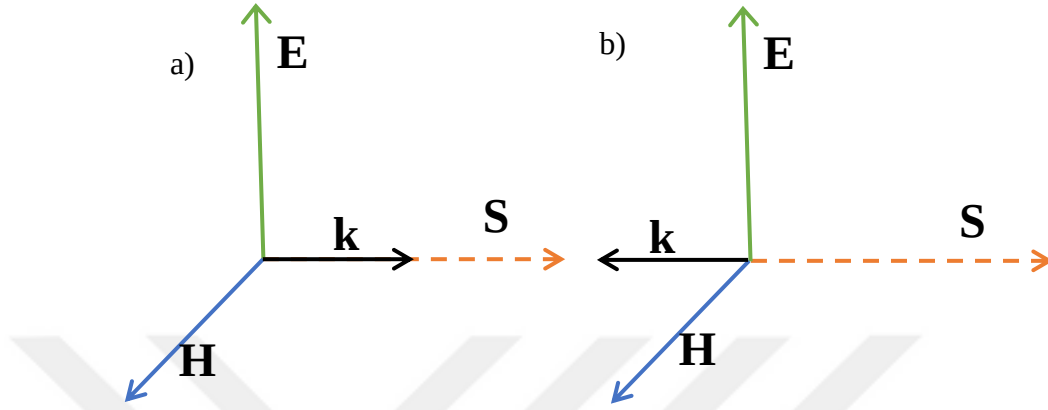
$$\vec{k} \times \vec{H} = \omega|\varepsilon|\vec{E} \quad (2.5b)$$

RH ve LH ortamlarının dalga yayılım vektörünün yönü, Şekil 2.1' de, denk. 2.6 da tanımlanan Poynting vektörünün reel kısmı ile tanımlanan enerjinin zaman ortalama akış yayılım yönüne göre değişimi gösterilmiştir.

$$\vec{S} = \frac{1}{2}\vec{E} \times \vec{H}^* \quad (2.6)$$

Enerji akışının yayılım yönü, ε ve μ 'nin eş zamanlı işaret değişimlerinden etkilenmez. Bunun anlamı, DPS ve DNG ortamlar içinde, $\vec{E}$, $\vec{H}$ ve $\vec{S}$ vektörel büyüklükleri her zaman yönleri korunur. LH ortamında, enerji akış yönü, dalga yayılım yönünün tersidir. LH ortamlar, tersine yayılan dalgaları gelişmesini sağlarlar. Bu nedenle bu tür

ortamlar literatürde, tersinir ortam (backward media) olarak adlandırılmaktadır(Martin, 2015).



Şekil 2.1 EM dalganın a) RH ortam ve b) LH ortam içinde yayılımı.

2.3 LH Ortamının Dispersiyon İlişkisi

RH bir ortam içerisinde, ilerleyen EM dalgalar enerjilerinin bir kısmını kaybederler ve dalgalarda bozulmalar meydana gelir. LH ortamında ise, EM dalgalar enerjinin yayılım yönünde enerji kaybederlerken, dalga cephesinin yayılım yönünde dalgalar büyürler. Bu sonuçlara göre, LH ortamı için bağıl ϵ_r ve μ_r 'nin gerçekte kısmının negatif olmasının yanı sıra sanal kısımlarının her ikisinde negatif olduğunda, karmaşık Poynting vektörünün yönü ve enerjisi korunur. Denklem 2.2 de dispersif bir ortamda yayılan karmaşık düzlem dalga yayılım vektörü denk. 2.7 de gösterilir(Martin, 2015).

$$k^2 = \omega^2 \epsilon_r \mu_r \quad (2.7)$$

Denk. 2.7 de, karmaşık dalga yayılım sayısı, LH ortamında, sanal kısmı $Im(k^2) > 0$ dır. Denk.2.8 de karmaşık dalga sayısı, elektriksel ve manyetik geçirgenlik gösterimleri sunulmuştur.

$$k = k' + jk'' \quad (2.8a)$$

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.8b)$$

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (2.8c)$$

RH ortamı için, bağıl ε_r ve μ_r 'nin sanal kısımlarının negatif işarete sahip olduğu dikkate alınırsa, o zaman sanal kısımlar $Im(\varepsilon) = -\varepsilon''$ ve $Im(\mu) = -\mu''$, şeklinde yazılır. 2.8b ve 2.8c denklemi 2.8a denklemi içerisinde yerlerine yazılırsa denk 2.9 elde edilir.

$$k'^2 - k''^2 + 2j k' k'' = \omega^2 [\mu' \varepsilon' - \mu'' \varepsilon'' - j(\mu' \varepsilon'' + \varepsilon' \mu'')] \quad (2.9)$$

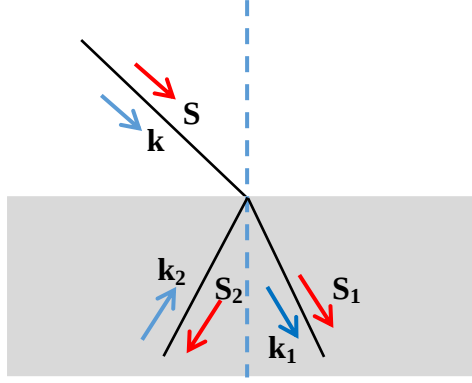
Denk. 2.9'a bakıldığında, etkin ε_r ve μ_r 'nin sanal kısımları negatif olursa o zaman yayılım sabitinin sanal kısmı, $Im(k^2) = 2k' k'' > 0$ pozitif olur. Sonuç olarak, $Im(k^2) > 0$ için, RH ve LH ortamlarında yayılan dalganın dalga vektörünün gerçekte ve sanal kısımları denk. 2.10 verilir.

$$\begin{aligned} Re(k) &> 0 \\ Im(k) &> 0 \end{aligned} \quad \text{ve} \quad (2.10a)$$

$$Re(k) < 0 \text{ ve } Im(k) < 0 \quad (2.10b)$$

2.4 Negatif Kırılma

RH ile LH ortamları arasındaki sınır koşulları, ara yüz boyunca dalga vektörünün teğetsel bileşenleri için süreklidir. Böylece, belirli bir açıda arayüz normaline gelen bir ışık demeti veya dalga cephesi, normalin aynı yüzünde kalarak negatif kırılıma uğrar. Kırılıma uğrayan ışık (RH ortamından farklı yönde), dalga yayılım vektörü ilerlediği Şekil 2.2 de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Alt indis '1' olduğunda, iki RH ortamı için, alt indis '2' olduğunda RH ve LH ortamları arasında kırılarak ilerleyen ışın dalga vektörü ve Poynting vektörü ilerleyiş yönü.

LH ortamı, literatürde genellikle negatif kırıcı ortam (negative refractive media) veya negatif kırılma indisi (negative refractive index NRI) olarak söz edilir.

2.5 EM Metamalzeme Ortam Tasarımı

2.5.1 Negatif elektriksel geçirgenlik ortamı

Şekil 2.3a da metalik ince teller dikdörtgen periyodik bir yapı oluşturacak biçimde dizilişi gösterilmiştir. Teller arası mesafe elektromanyetik (Electromagnetic EM) dalganın, dalga boyundan çok çok küçük aralık ve çapa sahiptir. Böyle bir ortam içerisine enine elektrik veya enine manyetik (Transverse Electric or Magnetic, TE or TM) modlu dalgalar gönderildiğinde, aşağıda açıklanacak özel bir frekans aralığında negatif ' ϵ ' elektriksel geçirgenlikli bir plazma ortamı davranışı gösterirler. Teller arası uzaklık l ve telin yarıçapı a dır. Şekil 2.3b de, metal teller ile TE (veya TM) modu etkileşime girdiği (plazma frekansına çok yakın) bir frekans da negatif ϵ 'lu bir ortam oluşur. Şekil 2.3c de, lumped devre modeli kullanılarak, matematiksel modeli de yazılabilir. Böylece, tek bir tel için sırasıyla, seri indüktans, paralel kapasitans ve metalik teller arası paralel indüktans katkısı denk. 2.11 eşitliklerinden bulunur(Martin, 2015).

$$L_s = \mu_0 l \quad (2.11a)$$

$$C_s = \varepsilon_0 l \quad (2.11b)$$

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln\left(\frac{l}{r}\right) \quad (2.11c)$$

Periyodik bir yapı içerisinde seçilen n-inci birim hücrenin, lumped devre modeline göre, her bir kenarı üzerinde ortaya çıkan akım ve gerilimler, ABCD matris metodu ile incelenebilir (**Ek.1**). İletim hattı boyunca oluşan yayılımda meydana gelen gerilim ve akımlar, özvektörlere karşı gelirken, yayılım faktörü sistemin öz-değer veya öz-modlarını açıklar. Aşikâr olmayan çözümden, matrisin determinantı her zaman sıfır olmalıdır. Kısaca, ortamımızın dispersiyon ilişkisi $\cos(\gamma l) = (A + D)/2$ olarak yazılır. Böylece, iletim hattının karakteristik empedansı, akım gerilim ilişkisinden hesaplanır. Tüm iletim hatları periyodik değildir. Peki, periyodikliği sağlayan bir iletim hattı ortamının karakteristik empedansı nedir? Periyodik bir yapı içerisinde yayılan dalgalar Bloch dalgası olduğundan, periyodik bir ortamın karakteristik empedansını, Bloch empedans Z_B şeklinde tanımlamak daha çok uygundur (**Ek.2**). Bloch empedansın periyodik yapılar içinde çözümünün önemi (**Ek.1**) ve (**Ek.2**) içerisinde daha detaylı gösterilmiştir. $\cos(\gamma l) = (A + D)/2$ dispersiyon ilişkisi, simetrik birin hücre içinde yayılan Bloch dalgaları ABCD matris elemanları cinsinden kolayca hesaplanabilir.

Kayıpsız bir ortamda yayılan Bloch dalgası için dispersiyon ilişkisi $\cos(\beta l) = 1 + Z_s/(2 \cdot Z_p)$ yoluyla elde edilir. $Z_s(\omega) = j\omega L_s$ ve $Z_p(\omega) = Y_p^{-1}(\omega) = [j\omega C_s + 1/(j\omega L)]^{-1}$ empedansları, dispersiyon ilişkisi içerisine yazıldığında dispersiyon ilişkisi denk. 2.12 da verilir.

$$\cos(kl) = 1 - \frac{1}{2} L_s C_s \omega^2 \left(1 - \frac{1}{L C_s \omega^2}\right) \quad (2.12)$$

Uzun dalga boyunun limiti ($kl \rightarrow 0$) yaklaşırken, $\cos(kl) \cong 1 - (kl)^2/2$ ve dalga sayısı (ya da faz sabiti) denk. 2.13 olduğu görülür. $k_0^2 = \varepsilon_0 \mu_0 \omega^2$, boş uzayın dalga sayısıdır.

$$k^2 = k_0^2 \left(1 - \frac{2\pi}{\mu_0 \epsilon_0 l^2 \omega^2 \ln(l/r)} \right) \quad (2.13)$$

Kesim frekansı plazma frekansının alternatif olarak kullanıldığında, elde edilen dispersiyon ilişkisi, ideal bir plazma ortamının dispersiyon ilişkisi ile aynıdır. Bu durumda, doğru bir polarizasyon koşulu sağlanması durumunda, denk. 2.14'e göre tel örgü yapısı için, plazma frekansında ideal bir plazma ortamı davranışı sergiler.

$$\omega_p^2 = \frac{2\pi}{\mu_0 \epsilon_0 l^2 \ln(l/a)} \quad (2.14)$$

Plazma frekansına eş veya çok yakın frekans da gelen EM bir dalganın elektrik alan çizgileri tel yüzeyi üzerinde bir akım uyarırlar. Şekil 2.3.a da gösterilen dikdörtgen bir yapı oluşturacak şekilde dizilen ince tel örgüler üzerine TE (veya TM) polarizasyon doğrultusunda gelen elektromanyetik dalgalar izotropik bir plazma ortamı oluşmasını sağlar. TE (veya TM) dalgasının frekansı, eğer plazma frekansı altındaysa, o zaman kayıpsız bir ortamın denk. 2.15 verilen bağıl elektriksel geçirgenliği negatif olur.

$$\epsilon_r = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \right) \quad (2.15)$$

Metallerin plazma davranışını Drude modeliyle açıklanır. Serbest bir elektronun maruz kaldığı dış bir elektrik alan etkisinden kaynaklı oluşan elektron hareketi, Newton'un ikinci hareket kanunu kullanılarak yazılır (Maier, 2007). Denk. 2.16 içinde elektronun kütlesi ve yükü m_e ve e ile gösterilir.

$$m_e \ddot{r} + m_e \Gamma \dot{r} = -e E \quad (2.16)$$

Elektromanyetik alan, $E(t) = E_0 e^{-i\omega t}$, bilindiği üzere zamana bağlı harmonik salınıcı hareketi yapar, özel bir çözüm kullanıldığında, $r(t) = r_0 e^{-i\omega t}$ elektron salınımını tanımlar. Uygulanan elektromanyetik alan ile elektronun yapmış olduğu salınım hareket, $\Gamma = 1/\tau$ sönümlenme frekansı ile ilişkilidir. Elektromanyetik bir dalga ile

uyarılan bir elektron ikinci bir uyarılma için geçen süre τ rahatlatma zamanı olarak bilinir.

$$r(t) = \frac{e}{m_e(\omega^2 + i\Gamma\omega)} E(t) \quad (2.17)$$

N tane elektron üzerine etkiyen dış bir elektromanyetik bir kuvvet için, $P = -n e r$ zamana bağlı harmonik salınıcı hareket denkleminde göre yazılırsa denk. 2.18 verilen Polarizasyon ifadesi bulunur.

$$P = - \frac{n e^2 r}{m_e (\omega^2 + i\Gamma\omega)} E(t) \quad (2.18)$$

Ortam içerisinde tanımlanan elektriksel yer değiştirme, $D = \epsilon_0 E + P$, serbest elektron gazının plazma frekansı $\omega_p = ne^2/\epsilon_0 m_e$, denklem içerisinde polarizasyon katkısı ile birlikte yerlerine yazıldığında denk. 2.19 elde edilir.

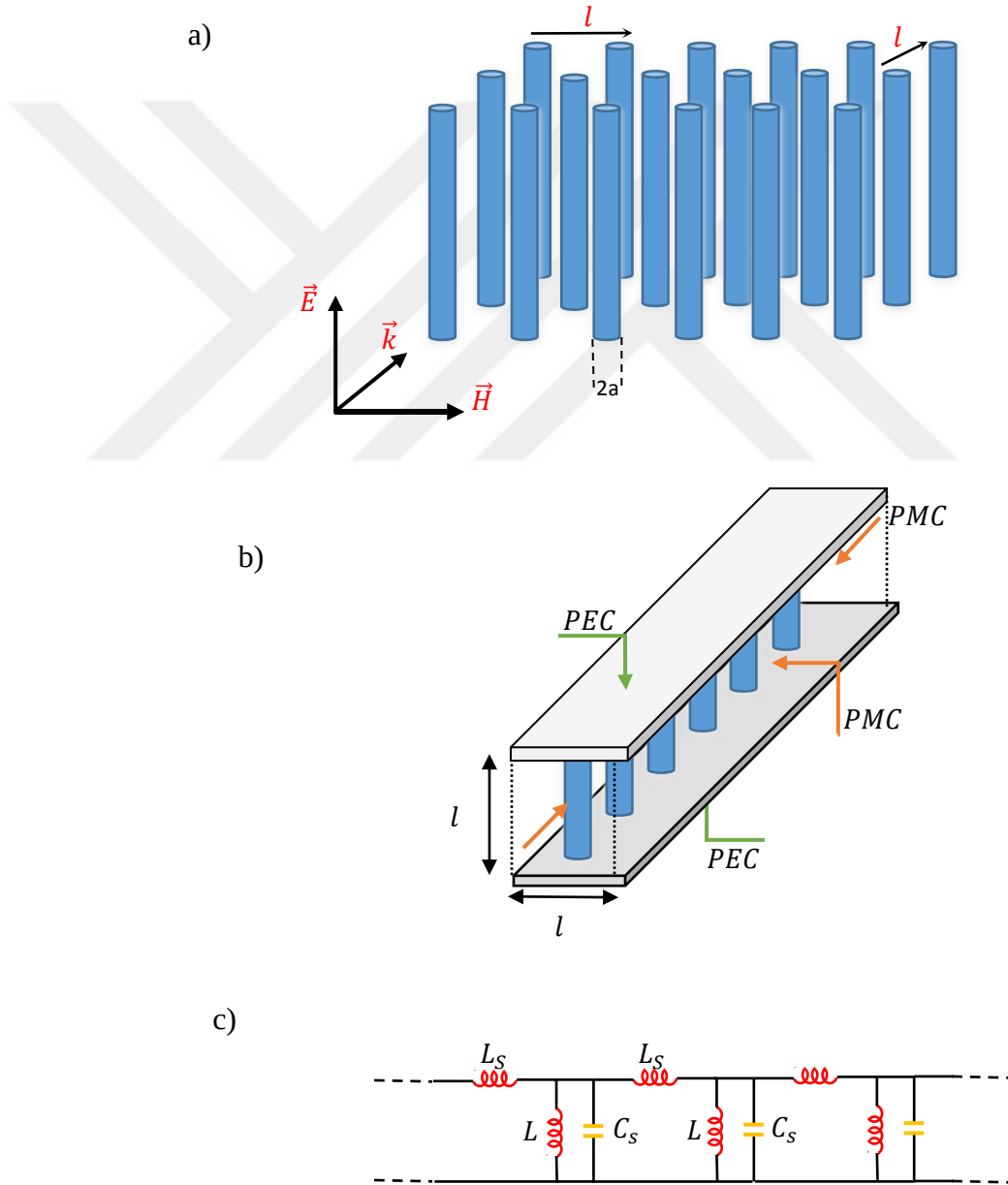
$$D = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\Gamma\omega} \right) E \quad (2.19)$$

Lineer bir ortam için tanımlanan yer değiştirme $D = \epsilon_0 \epsilon_r E$ denkleminin, bağlı elektriksel geçirgenlik değeri 2.20 ile verilir.

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\Gamma\omega} \quad (2.20)$$

Eğer (2.20) denklemi içerisinde, $\Gamma = 0$ olarak alınırsa, yukarıda yazılan (2.15) denkleminin aynısı olduğu görülebilir. Eğer metal bir ortam üzerine gelen elektromanyetik dalgalar, plazma frekansının altında bir frekans değerine sahip ise, $\omega^2 < \omega_p^2$, o zaman, ortamın bağlı elektriksel geçirgenliğinin gerçek kısmı hem negatif hem de sanal kısmına göre çok büyük ve baskın olur. Bu koşullar altında, iletkenlik akımı yer değiştirme akımından daha baskın hale gelir. Fiziksel olarak olaya

bakıldığında, plazma frekansından çok düşük frekans bölgesinde, metal yüzeyi üzerinde bulunan serbest elektronlar, sürekli düzen bozucu çarpışmalara maruz kalırlar ve plazma gibi bir davranış gösterdikleri söylenemez. Yalnız, plazma frekansının altında, fakat oldukça yakın frekansa sahip elektromanyetik dalganın meydana getirdiği tüm elektron salınımlarının genliği, uyarılan elektronun aldığı serbest ortalama yol ile karşılaştırıldığında çok küçüktür. Bu tür metallerin plazma ortamına benzer bir davranış gösterdiği söylenebilir.



Şekil 2.3 a) ince iletken tel örgüsü b) TEM iletim hattı c) eşdeğer devre modeli.

2.5.2 Negatif manyetik geçirgenlik ortamı

Manyetik malzemeler, yalnızca manyetik özellikler sergileyen malzemelerdir(Martin, 2015). Bu nedenle dielektrik malzemelerden çok farklıdırlar ve doğada genellikle daha az yaygın rastlanırlar. Özellikle, belirli frekanslarda ferrite (mıknatıslanma özelliği gösteren) malzemeler haricinde, doğada doğal olarak negatif etkin manyetik geçirgenliğe sahip bir malzeme yoktur. Bu tür bir malzeme, yalnızca sol-el (Left-Hand) bir ortam tasarlamak için değil, aynı zamanda GHz frekans bölgesinde manyetik özelliklerin ortaya çıkarılması içinde çok önemli olacaktır. Periyodik olarak belirli bir yönde dizilmiş SRRs yapılarının yüzey normaline, paralel yönde manyetik alan yönelimli TE (veya TM) modlu dalgalar ile uyarıldığında, negatif etkin manyetik geçirgenlikli bir ortam üretmek mümkündür(J. Pendry, 2004). EM dalgaının zamanla değişen manyetik alanı, SRRs yüzeyleri üzerinde belirli bir yönde hareket eden akımlar ortaya çıkar, üstelik bu akımlar uygulanan dış manyetik alana zıt yönde ikinci bir manyetik alan oluştururlar. Halkanın manyetik kutuplanabilirlik değeri negatiftir. Bu durum, negatif değere sahip bir dipol moment ortaya çıkmasına neden olur. Böylece, halkalar kümesi, toplamda negatif manyetik alınganlıklı bir ortam meydana üretirler. Yine de bu durum, diamanyetik davranış yeteri kadar güçlü negatif manyetik geçirgenlikli bir ortam üretmek için güçlü değildir. Bu problemin üstesinden gelmek için, halkalar üzerinde belirli bir kapasitif bölge oluşturacak şekilde kesilirler. Şekil 2.4 de tasarlanan yapının topolojisi gösterilmektedir. Bu topolojiye sahip yapılar, ilk kez Pendry ve ark. (1999) tarafından literatüre geçti ve SRRs olarak adlandırıldı. SRRs'ın rezonans frekansının üstünde ki frekanslarda, manyetik alanın kutuplandığı eksen yönünde güçlü bir diamanyetik davranış gösterir. Bu nedenle, polarizasyon koşulu altında, yalnızca belirli küçük bir frekans aralığında SRRs, negatif bağlı manyetik geçirgenlik özelliği sergilerler.

Şekil 2.5 de, x ve z ekenleri boyunca, sırasıyla, elektrik ve manyetik alana sahip bir elektromanyetik dalga ile ayırık halka rezonatörler etkileşime girdiğin de manyetik alanın yönüne bağlı olarak halkaların yüzeyi üzerinde bir akım indüklerler. Birbirine çok yakın SRRs arasında kapasitif etkileşimlerden dolayı yük geçişleri de meydana gelir. Bu olaya dağıtık kapasitif etkileşim adı verilir. Yarı-statik analiz içerisine de bu

kapasitif etki katılır ve şekil 2.4b içinde gösterilen eşdeğer devre modeli ile SRRs yapısı modellenir. Oluşan eş devre modeli içerisinde L harfi ile öz-indüktans temsil edilirken, C harfi ile, halkaların birbirine dönük iç kenarları boyunca oluşan kapasitif etki temsil edilir. SRR'ın kapasitif etkileşimi; $C = \pi r_0 C_{pul}$ formülünden hesaplanır. SRR'ın ortalama yarıçapı; $r_0 = r_{dış} - c - d/2$ ve halkalar arası birim uzunluk başına (per-unit-length, pul) düşen kapasitans; C_{pul} dır. Öz indüktans, r_0 ortalama yarıçapa sahip özdeş halkaların, ' c ' özdeş genişliği kullanılarak halkanın ortalama indüktans hesaplanabilir. SRR'ın temel rezonans frekansı denklem 2.21 de verilir.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} = \sqrt{\frac{1}{L\pi r_0 C_{pul}}} \quad (2.21)$$

' y ', eksen yönünde gelen elektromanyetik dalganın taşıdığı manyetik alan yoluyla SRR uyarıldığında, EM dalganın manyetik alan yöneliminin tersi yönünde dış bir manyetik akı üretirler; $\Phi_{dış} = \pi r_0^2 B_z^{dış}$. SRR üzerinde indüklenen akım, denk 2.22 ile hesaplanır.

$$I = -j\omega \Phi_{dış} \left(\frac{2}{j\omega C} + j\omega L \right)^{-1} \quad (2.22)$$

İndüklenen dipolar manyetik moment $m_z = \pi r_0^2 I$ formülü ile tanımlanır. Dipolar manyetik moment ile uygulanan manyetik alan arasında, $m_z = \alpha_m B_z^{dış}$ manyetik kutuplanabilirlik katsayısı kullanılarak, bir ilişkisi kurulur. Manyetik kutupluluk denk. 2.23 tanımlanır. SRR'ın rezonans frekansında yüksek pozitif değerlerden negatif yüksek değerlere kadar güçlü bir değişim gösterirler.

$$\alpha_m = \frac{\pi^2 r_0^4}{L} \left(\frac{\omega_0^2}{\omega^2} - 1 \right)^{-1} \quad (2.23)$$

Bir önceki analizde, kayıplar ihmal edilmişti. Omik kayıpları ihmal edilmediğinde, SRRs 'ın daha çok gerçekçi davranışı elde edilir. AC geriliminin etkisini altında ortaya çıkan direnç etkisinden dolayı, $\Gamma = R/L$ kullanıldığında, SRRs 'ın kutuplanabilirlik, denk. 2. 24 formülüyle hesaplanır.

$$\alpha_m = \frac{\pi^2 r_0^4}{L} \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega\Gamma} \right) \quad (2.24)$$

Manyetik kutuplanabilirlik elde edildiğinde, manyetik geçirgenlik hesaplanabilir. $\chi_m = \mu_0 \alpha_m / a^3$, olarak birinci dereceden yaklaşım yapıldığında, Şekil 2.3 de gösterilen kübik örgüye sahip AHR ortamı için, bağıl manyetik geçirgenlik değeri 2.25 formülüyle hesaplanır.

$$\mu_r = \mu_0 (1 + \chi_m) = \mu_0 \left(1 + \frac{\mu_0 \pi^2 r_0^4}{a^3 L} \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega\Gamma} \right) \right) \quad (2.25)$$

Kübik SRRs 'ın yapısını birim hacim hücresi a^3 ile tanımlanır. Denk. 2.26 da verildiği gibi daha çok derli toplu yazılabilir.

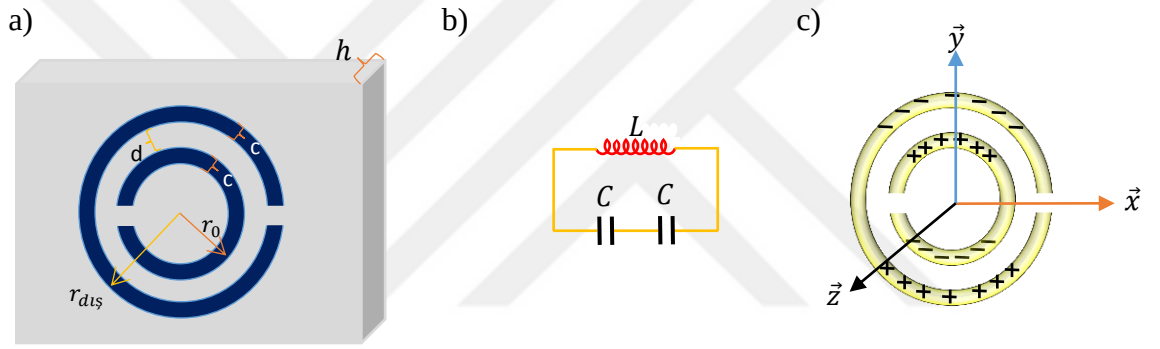
$$\mu_r = \mu_0 \left(1 - \frac{F \omega^2}{\omega^2 - \omega_0^2 - j\omega\Gamma} \right) \quad (2.26)$$

Denklem içinde verilen, F , boyutsuz bir faktördür ve 1' den çok çok küçük bir değere sahiptir.

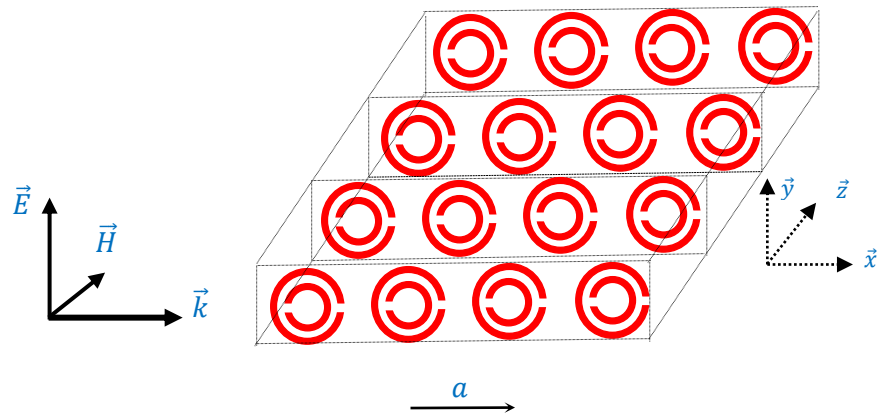
$$F = \frac{\mu_0 \pi^2 r_0^4}{a^3 L} \quad (2.27)$$

Kayıpların çok küçük olduğunu varsayılırsa, çok küçük bir bant aralığında; $\omega_0 < \omega < (\omega_0 / (1 - F)^{1/2})$, manyetik geçirgenlik negatiftir.

Denk. 2.26, Şekil 2.5 de 'z' yönünde yayılan dalganın yapı üzerinde oluşturduğu bağlı manyetik geçirgenlik değerinin hesaplanmasını sağlar. Tam olarak, Şekil 2.5 de verilen yapı, bi-anizotropik olduğundan, çapraz kutuplanabilirlik özelliği sergilerler ve kurucu ilişki elektrik, manyetik ve manyeto elektrik alınganlık tensörleri ile karakterize edilirler. Ayrıca SRRs, 'y' düzleminde de elektrik dipol moment gösterirler, bu durum Şekil 2.4c ye bakıldığında, halkalar üzerindeki yük dağılımından kolayca anlaşılabilir. Bunun anlamı, SRR'ın y yönünde de zamanla değişen elektrik alan uygulandığında da çalıştırılabilmesidir. Diğer bir deyişle, seçilen uygun yönde elektrik ve manyetik alanlar yoluyla manyetik ve elektrik momentler ortaya çıkar.



Şekil 2.4 a) SRR genel tasarımı, b) eşdeğer devre, c) yüzeyde yük dağılımları.



Şekil 2.5 Kübik örgüye sahip SRRs ortamı.

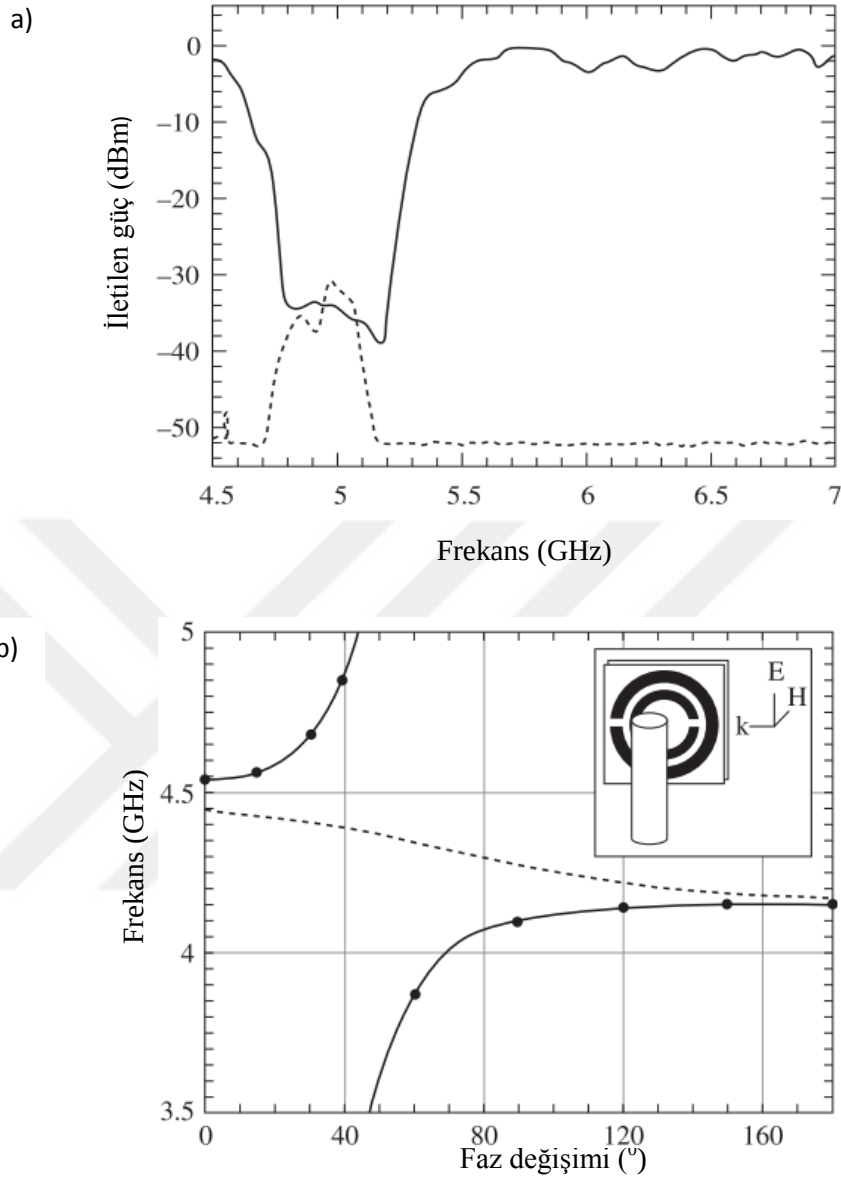
2.5.3 SRR ve tel ortamların birleşimi

ENG ve MNG ortamları Şekil 2.6 da gösterildiği gibi, tek boyutta üst üste yerleştirildiğinde, uygun uyarım koşulunda bir LH ortamı oluştururlar. LH ortamı, iki farklı kurucu ilişkisinin eş-ortamda birleşiminden ortaya çıkarlar.



Şekil 2.6 İlk kez sentezlenen Negatif Kırılma ortamının yapısı. Fotoğraf Dr. Smith ait.

Şekil 2.6 de gösterilen yapıyı oluşturan metalik çubuk ve SRR üzerine, belirli bir yönde elektrik ve manyetik alana yönelimine sahip kutuplanmış bir düzlem dalga gönderildiğinde, gelen elektromanyetik dalganın yalnızca çok küçük bir kısmının geçişine izin verir. Geçiş bant aralığı, yalnızca, negatif kırılma indisinin üretildiği dar bir bant aralığında gerçekleşir.



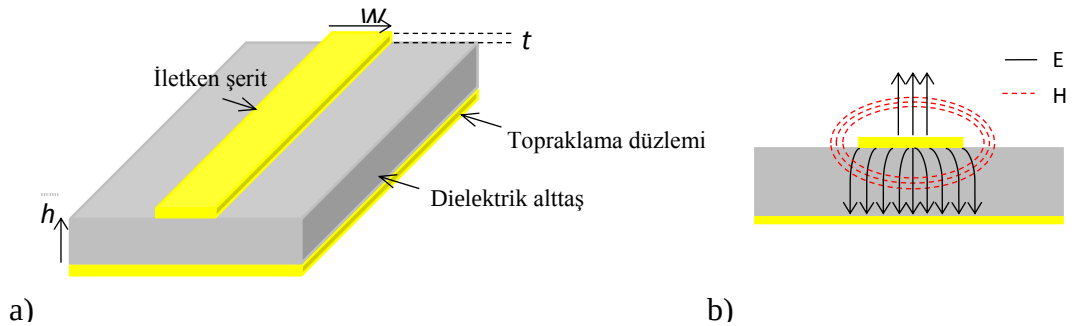
Şekil 2.7 a) LH ortamı (kesik çizgi) ve yalnızca SRR ortamı için iletim gücü b) dispersiyon ilişkisi (Martin, 2015)

Negatif Kırılma ortamı içerisinde, yalnızca SRR rezonans frekansın bölgesinin dar bir bant aralığında iletim bant özelliği, Şekil 2.7 a da kesikli çizgilerle gösterilmiştir. Metalik teller, yapı içerisinde çıkarıldığında da, SRR ortamı yalnızca durdurma bant özelliği sergilemiştir ve rezonans tepkisi, Şekil 2.7a içerisinde sürekli çizgilerle gösterilmiştir. Ortaya çıkan durdurma bandının varlığı, SRR'ın negatif bağlı manyetik geçirgenlik özelliğine sahip olduğuyla ilişkilendirilmiştir. Yine de, SRR yapısı, negatif elektriksel geçirgenlikli bir ortam içerisine gömülür ise, ortaya çıkan kompozit ortam,

bağıl elektriksel ve manyetik geçirgenlik değerlerinin negatif olduğu bölgede, LH dalga yayılım sergilerler. Bu bant aralığının dışında, yapı ENG özelliği görülür ve gürültü tabanı (noise floor NF) altında EM dalgalar sönümlenir. Şekil 2.7c de, 4.15-4.45 GHz aralığında kesikli çizgi iletim bant bölgesini var olması; faz ve grup hızının farklı işaretlere sahip olan LH ortamını tasvir eder. Metal tellerin olmadığı SRR ortamı için dispersiyon ilişkisi, şekil 2.7c de düz çizgi ile gösterildi. Şekil 2.7c’de kalın çizgi ile gösterilen eğriler, iletken tel yapıların olmadığı SRR ortamından kaynaklı dispersiyon ilişkisi, izinli bölgelerde dalga yayılımının olduğu ifade ederken, kompozit SRR-tel ortamının LH bandının durdurma bandı ile kabaca çakıştığını söyler.

2.6 Mikroşerit İletim Hattı ve Fractal Tabanlı Mikroşerit Yapılar

Mikroşerit iletim hatları, basit, hızlı ve ucuz üretilme, aynı zamanda diğer mikro dalga aygıt ve cihazlarla kolayca birleşme özelliklerinden dolayı, düzlem iletim hatlar içerisinde en popüler örneklerinden biridir(Pozar, 2012). Mikroşerit iletim hattının genel yapısı Şek 2.8 de gösterilir. Mikroşerit yapısını oluşturan parametreler; sırasıyla, iletken şerit hattın genişliği W , kalınlığı t , alttaş kalınlığı h , etkin dielektrik sabiti ϵ_r , (iletken) topraklama düzlem kalınlığı t dir(Hong ve Lancaster, 2001). Mikroşerit iletim hat tasarımı, alt taşın dielektrik sabiti ve yüksekliği ile birlikte mikro şerit hattın genişliği ve uzunluğu; karakteristik empedans (50 ohm) ve elektriksel uzunluk gibi elektriksel parametre değerlerine uygun bir şekilde optimize edilerek gerçekleştirilir.



Şekil 2.8 a) Mikroşerit hattın genel yapısı, b) Elektrik ve manyetik alan çizgi dağılımları.

Mikroşerit iletim hattının altında ve üstünde ki ortamların, farklı dielektrik özelliklere sahip olmasından dolayı, çevrelerinde homojen olmayan bir ortam oluşur. Böyle bir ortamda, elektrik ve manyetik alan dağılımları çok karmaşıktır. Bu nedenle analizleri zordur(Pozar, 2012). Homojen olmayan ortamın doğasından dolayı, mikroşerit iletim hattı üzerinde enine elektromanyetik (TEM) dalgalar ilerleyemezler. TEM dalgaları enine elektromanyetik dalga bileşenlerine sahip olmalarından dolayı, bu dalgaların yayılım hızı yalnızca homojen bir ortamın sahip olduğu elektriksel ve manyetik geçirgenlik değerlerine bağlıdır. Homojen olmayan bir ortam içerisinde iletken şerit ile kılavuzlanan dalgalar, elektrik ve manyetik alanların boyuna bileşenleri asla kaybolmazlar. Dalgaların yayılım hızları yalnızca malzemenin özelliğiyle ilişkili değildir, aynı zamanda mikro şeritin fiziksel boyutları da belirleyicidir(Pozar, 2012).

2.6.1 Yarı -TEM yaklaşımı

Mikroşerit iletim hattı içerisinde, yayılan dalganın modunun boyuna alan bileşeni enine alan bileşenine göre çok küçük ise, o zaman boyuna modun varlığı ihmal edilebilir. Bu kabul altında, TE ve TM mod yayılımının bir TEM modu gibi davrandığını söyleyebiliriz. Bu nedenle, mikroşerit iletim hattı içerisinde TEM iletim teorisi geçerlidir ve bu yaklaşım, yarı-TEM yaklaşımı olarak adlandırılır(Hong ve Lancaster, 2001).

2.6.2 Karakteristik empedans ve etkin dielektrik sabiti

Yarı-TEM yaklaşımı içerisinde, mikroşerit iletim hattını meydana getiren hava ve dielektrik ortamlarının sahip olduğu farklı dielektrik sabit değerleri, etkin elektriksel geçirgenlikli bir ortama dönüşür. Mikroşerit yapısının iletim karakteristiği, etkin dielektrik sabit ϵ_{etk} ve karakteristik empedans Z_c parametreleri ile belirlenir. Yarı-statik analizde, mikroşerit içerisinde yayılan dalganın ana modu TEM dalgası olduğu varsayılır(Hong ve Lancaster, 2001). Mikroşerit yapıyı tanımlayan iki parametre kolayca, iki kapasitans vasıtasıyla hesaplanabilir.

$$\epsilon_{etk} = C_d/C_a \quad (2.28)$$

$$Z_0 = \frac{1}{c_0 \sqrt{C_d C_a}} \quad (2.29)$$

C_d ve C_a sırasıyla, dielektrik alttaşı ve havanın birim uzunluğu başına düşen kapasitans miktarları ve c_0 boş uzayda elektromanyetik dalganın yayılım hızıdır.

$W/h \leq 1$ için:

$$\varepsilon_{etk} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left\{ \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-0.5} + 0.04 \left(1 - \frac{W}{h} \right)^2 \right\} \quad (2.30)$$

$$Z_c = \frac{\eta}{2\pi \sqrt{\varepsilon_{etk}}} \ln \left(\frac{8h}{W} + 0.25 \frac{W}{h} \right) \quad (2.31)$$

Havanın yaklaşık empedansı $\eta = 120\pi$ ohm dur.

$W/h \geq 1$ için:

$$\varepsilon_{etk} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-0.5} \quad (2.32)$$

$$Z_c = \frac{\eta}{\sqrt{\varepsilon_{etk}}} \left\{ \frac{W}{h} + 1.393 + 0.677 \ln \left(\frac{W}{h} + 1.444 \right) \right\}^{-1} \quad (2.33)$$

Mikroşerit yapıların karakteristik empedans ve etkin dielektrik sabit değerlerinin bulunması için daha doğru bir yaklaşım, Hammerstad ve Jensen tarafından rapor edildi.

$$\varepsilon_{etk} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{10}{u} \right)^{-ab} \quad (2.34)$$

W/h yerine u kısaltması kullanılmıştır. Denklem içerisinde bilinmeyen ‘ a ’ ve ‘ b ’ bilinmeyenleri sırasıyla aşağıda verilir.

$$a = 1 + \frac{1}{49} \ln \left(\frac{u^4 + \left(\frac{u}{52}\right)^2}{u^4 + 0.432} \right) + \frac{1}{87.7} \ln \left[1 + \left(\frac{u}{18.1}\right)^3 \right]$$

$$b = 0.564 \left(\frac{\varepsilon_r - 0.9}{\varepsilon_r + 3} \right)^{0.053}$$

Bu modelin doğruluğu, $0.01 \leq u \leq 100$ aralığında $\varepsilon_r \leq 128$ olduğunda %0,2 dan daha iyidir. Karakteristik empedans için daha doğru bir ifade denk 2.35 ile verilir.

$$Z_c = \frac{\eta}{2\pi\sqrt{\varepsilon_{etk}}} \ln \left[\frac{F}{u} + \sqrt{1 + \left(\frac{2}{u}\right)^2} \right] \quad (2.35)$$

$$F = 6 + (2\pi - 6) \exp \left[- \left(\frac{30.666}{u} \right)^{0.7528} \right]$$

$Z_c\sqrt{\varepsilon_{etk}}$ ’nin değeri, $u \leq 1000$ ’dan küçük olduğunda %0.03 ve $u \leq 1$ ’dan %0.01’den daha yüksek doğruluğa sahiptir.

2.6.3 W/h Oranın Belirlenmesi

Wheeler ve Hammerstad tarafından türetilen ε_r ve Z_c terimlerine göre W/h ’nin yaklaşık değerleri(Hong ve Lancaster, 2001):

$W/h \leq 2$ için,

$$\frac{W}{h} = \frac{8 \exp(A)}{\exp(2A) - 2} \quad (2.36a)$$

$$A = \frac{Z_c}{60} \left\{ \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right\}^{0.5} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left\{ 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right\}$$

$W/h \geq 2$ için,

$$\frac{W}{h} = \frac{2}{\pi} \left\{ (B - 1) - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (2.36b)$$

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_c \sqrt{\epsilon_r}}$$

Bu denklemler, %1 den daha iyi doğruluk sağlarlar.

2.6.4 Faz hızı, elektriksel uzunluk, yayılım sabiti ve kılavuzun dalga boyu

Eğer bir mikroşerit yapısının, ϵ_{etk} etkin dielektrik sabiti biliniyorsa, o zaman kılavuzun dalga boyu(Hong ve Lancaster, 2001) denklem 2.37 ile hesaplanır.

$$\lambda_k = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{etk}}} \quad (2.37)$$

λ_0 , boş uzayda yayılan dalganın dalga boyu, ‘k’ alt indisi kılavuzda yayılan dalganın dalga boyunu temsil eder. GHz frekans bölgesinde, kılavuzlanan bir dalganın dalga boyu direk olarak milimetre boyundadır.

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{etk}}} \quad (2.38)$$

Mikroşerit hat içerisinde, kılavuzlanan dalganın yayılım sabiti β ve faz sabiti v_p sırasıyla denklem 2.39 ve 2.40 ile tanımlanır.

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_k} \quad (2.39)$$

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_{etk}}} \quad (2.40)$$

Mikroşerit hattın verilen fiziksel uzunluğu ‘ l ’ için elektriksel uzunluğu ‘ θ ’ nin, denklem 2.41 ile hesaplanır.

$$\theta = \beta l \quad (2.41)$$

$l = \lambda_k/4$ olduğunda, o zaman elektriksel uzunluk $\theta = \pi/2$ olur. Bu küçük bilgi, mikroşerit filtre tasarımının boyunu belirlememiz için önemlidir.

2.6.5 Mikroşerit kayıplar

Mikroşerit hat üzerinde ilerleyen EM dalgalar, iletken ve dielektrik malzemelerin sahip olduğu yapısal problemlerden dolayı zayıflarlar ve bazı kayıplar ortaya çıkar (Hong ve Lancaster, 2001). Kayıplı bir iletim hattı üzerinde, ‘ γ ’ yayılım sabiti karmaşıktır.

$$\gamma = \alpha + i\beta \quad (2.42)$$

‘ α ’ birim uzunluk başına düşen sönümlenme sabitidir ve dielektrik ve iletkenlik kayıplarının toplam etkisini ifade eder.

$$\alpha(\text{dB/unit length}) = (20 \log_{10} e) \alpha (\text{nebers/birim uzunluk})$$

$$\approx 8.686\alpha (\text{nebers/birim uzunluk})$$

İletkenlik kaybının üretmiş olduğu tahmini sönümlenme α_c gösterilir.

$$\alpha_c = \frac{8.686 R_s}{Z_c W} \quad (\text{dB/birim uzunluk}) \quad (2.36)$$

Z_c karakteristik empedans, W mikroşerit genişliği, metalik hat ve topraklama düzleminin R_s yüzey direncini temsil eder.

İletkenin yüzey direnci R_s :

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}}$$

σ iletkenlik dir.

Mikroşerit iletim hattı içerisinde dielektrik kayıplardan dolayı ortaya çıkan kayıplar α_d parametresi ile bulunur.

$$\alpha_d = 8.686 \pi \left(\frac{\epsilon_{eff} - 1}{\epsilon_r - 1} \right) \frac{\epsilon_r}{\epsilon_{eff}} \frac{\tan \delta}{\lambda_g} \text{ dB/birim uzunluk} \quad (3.37)$$

$\tan \delta$ dielektrik alttaşın kayıp tanjant değerini ifade eder.

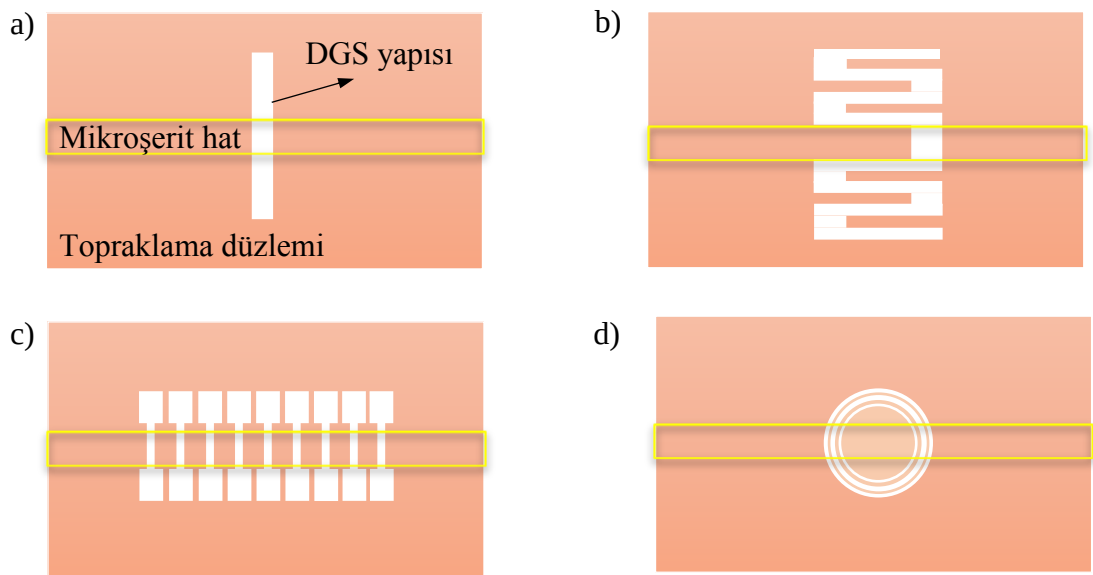
2.6.6 Kusurlu toprak düzlemi ve mikroşerit yapıları

Mikroşerit hattın arka tarafındaki topraklama düzlemi; tipik bir katı metal levhadır ve hattın tasarımında her hangi bir serbestlik derecesine sahip değildir(Gupta vd., 1996). Kusurlu toprak yapılar (Defected Ground Structure DGS), mikroşerit iletim hattı tasarımlarında mikrodalga devre tasarımlarında yapının performansını ve amacını; geliştirmek ve değiştirmek için kullanılırlar. Metalik zemin üzerinde açılan kovuk şeklinde ki boşluklar ‘kusur (defected)’ olarak adlandırılır. Açılan kovukların geometrik yapısı zemin düzleminde akım dağılımını düzgün bir şekilde bozar. Böylece, mikroşerit iletim hattı üzerinde istenilen elektromanyetik davranış etkisi ortaya çıkması sağlanır. Amaca uygu geometrik yapı dikkatli bir şekilde seçilir ve optimize edilir.

DGS’ler çok farklı tasarım yapılarına sahiptirler. Genellikle bu yapılar, çoklu ve tekli olmak üzere iki alt grup içerisinde incelenirler. Birinci grup, tek bir kusura dayalı yapılardan oluşur; simetrik ve anti-simetrik geometrik yapıya sahip olabilirler. İkinci grup, periyodik ya da değil, fakat çoklu kusur yapıların simetrik veya anti-simetrik yapılarından meydana gelir(Gupta vd., 1996). Tek bir kusura dayalı yapılar, mikro şerit

hattın frekans tepkisini değiştirmek için genellikle kullanılır. Kusurun yaratmış olduğu ek indüktans ve kapasitans etkisinden kaynaklı, iletilen dalğanın belirli bir aralıkta durdurulmasına imkân verir. Tek kusur tasarımı, daha kolay modelleme, küçük boyut ve çok küçük saçılma etkilerinden dolayı tercih edilir.

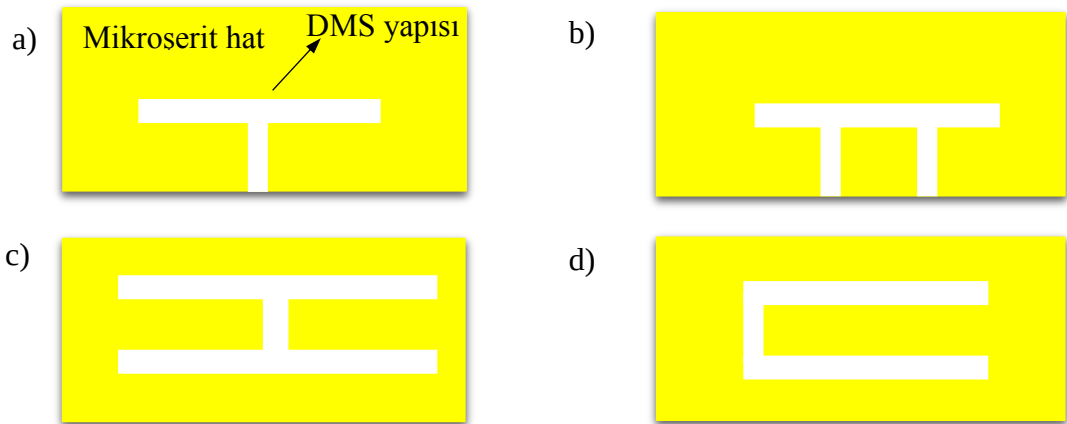
DSG ilk kez 2000 yılında tanıtıldı(Mandal ve Sanyal, 2000). Fotonik bant aralığı (PBG) ve elektromanyetik bant aralığı (EBG) üzerinde yürütölen çeşitli araştırma faaliyetleri sonucu ortaya atılmıştır. DGS ve PBG (mikrodalga bölgesi içerisinde tercih edilen: EBG yapıları) arasında oldukça önemli farklar vardır. PBG yapıları, çok sayıda kusurun periyodik olarak dizilmesi ile elde edilirler. Ortaya çıkan periyodiklik belirli frekanslarının geçişine izine vermeyerek yasaklı bant aralıklarının ortaya çıkmasını sağlarlar. DGS yapılarında bu tür bir etkiyi görmek için, periyodik olmalarına gerek yoktur ve bu yüzden de tek bir kusurlu yapı dahi bu etkiyi çıkartabilir. DSG mimarisi, iletim durdurucu mikroşerit filtre tasarımlarından, yavaş dalga yayılımı sağlayan iletim hattı mimarisine, aynı zamanda yüksek karakteristik empedans sahip iletim hatlara, hibrit kuplör, osilatör ve güç yükseltelerine kadar birçok baskı devre mimarisi içerisinde kullanılmaktadır. Yapısal olarak farklı geometrik şekiller sahip DGS rezonatör tipleri örnek olarak, şekil 2.9 de gösterilmektedir(Kumar ve Machavaram, 2013).



şekil 2.9 DGS rezonatör yapıları a) yarık hat, b) kıvrımlı hat c) dambıl hat d) yuvarlak hat.

DGS mimarisi, mikroşerit hattı üzerinden geçen iletim frekans bandını belirli bir aralıkta iletimi keserek yalnızca filtre özelliği kazanmasını sağlamazlar, aynı zamanda seçiciliği yüksek filtrelerin yapımına imkân verirler ve bant aralığı dışı gürültü girişlerini de engellerler. Kusurların biçim ve boyutu değişikçe durdurucu bant frekansı da değişir. Örneğin; kusurun boyutu arttıkça durdurucu bant frekansı azalır(Garg ve Kaur, 2014).

Kusurlu mikroşerit yapı (DMS) tasarımları; mikroşerit hat boyunca dar iletken alan içerisinde özel geometrik boyutlara sahip kusurlar oluşturularak elde edilir. DGS mimarisi ile karşılaştırılırsa, daha az karmaşık ve çok daha küçük boyutlara sahiptir(Xiao, 2013). DGS yapılarının içerisinde görülen sızıntı dalgalar bu yapılarda mevcut olmadığından, oyuk problemlerinin dikkate alınmasına gerek yoktur. DGS mimarisinde öne çıkan ilerleyen dalga faz hızında azalma ve durdurucu bant özellikleri DMS mimarisi içerisinde de gözlemlenir. DMS yapısı, elektromanyetik girişimlerden kaynaklı gürültüden etkilenmeme özelliğinden dolayı RF anten tasarımlarında avantaj sağlarlar. DGS yapıları ile karşılaştırıldığında çok yüksek bir indüktif etkiye sahipken, hemen hemen aynı kapasitif etki gösterirler(Xiao, 2013). DMS mikroşerit hat üzerinde boşluklar açılarak elde edildiklerinden, DGS göre daha verimli bir şekilde uyarılırlar. DMS, mikroşerit hattın elektriksel uzunluğunu artırır ve yüzey akım dağılımını bozarak daha güçlü indüktif ve kapasitif etki yaratırlar. Şekil 2.10 de, DMS yapıları için çeşitli geometrik konfigürasyonlar gösterilmektedir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez kapsamı dahilinde, nem ve kimyasal sıvıları ayırt edebilme özelliklerine sahip, mikrodalga frekans bölgesinde çalışan, metamateryale tabanlı sensörler tasarlanmıştır. Bu sensör tasarımlarının her biri seçilen uygun frekans bölgesinde çalışmaları için, karşı gelen uygun boyutlar belirlenmiştir. Sensör tasarımları, CST Microwave Studio simülasyon programı kullanılarak geliştirilmiştir. CST Microwave Studio programı, sonlu integrasyon yöntemi (FIT) kullanarak nümerik çözümlemeler yapan bir programdır. Sonlu integrasyon yöntemi, üç boyutlu hesap uzayı içerisinde Maxwell denklemlerinin elektrik ve manyetik alan bileşenlerini en küçük adım aralığı içerisinde iteratif olarak birbirine göre yarım adım kayık hesap uzay alanına yerleştirilir. Böylece, sanal hesap uzayı içerisinde kurgulanan malzemelerin sahip olduğu elektriksel ve manyetik geçirgenlik değişimlerine göre Maxwell denklemlerinin alan bileşenleri integrasyon yöntemi içerisinde kullanılarak çözümleri elde edilir.

Mikrodalga frekans bölgesinde çalışan metamateryale tabanlı sensörlerin algılama aralığı küçük olmasından dolayı yüksek hassasiyete sahip olması gerekmektedir. Bundan dolayı, metamateryale tabanlı sensör tasarımında kullanılacak alt taşın kayıp tanjant sabiti ($\tan \delta$) çok küçük seçilmelidir. Böylece gelen elektromanyetik dalganın soğurulmasından daha çok, metal yüzeyi üzerinde daha yüksek enerji depolaması amaçlanmıştır. Rogers5880 alt taş için, 10 GHz de kayıp tanjant değeri 0.0009 iken, Polikarbonat alt taşın, 1.0 MHz de kayıp tanjant değeri, 0.01 dir.

Polikarbonat alttaş, anten ve mikrodalga endüstrisinde kullanılan bir alttaş olmadığından dolayı 0.035 mm kalınlıklı bakır bant ile kaplanarak rezonatör yapıları fotolitografi yöntemi kullanılarak rezonatör yapıları elde edilmiştir. Rogers5880 alttaş, anten devre tasarımı endüstrisinde en çok kullanılan malzeme olmasından dolayı, LDK ProtoMat S43 baskı devre kazıma cihazı kullanarak, metal yüzey üzerinde rezonatör desenleri oluşturulmuştur.

3.1 Fotolitografi Yöntemi

Fotolitografi, belirlenen bir geometrik şeklin metal yüzey üzerine deseni, ışık ve çeşitli kimyasal aşamalar yoluyla aktarılması işlemidir. Metamalzeme tabanlı C ve elektrik-LC rezonatör yapılandırmasına benzer, eş-rezonatör yapıları; Ankara Üniversitesi Elektrik Elektronik ve Fizik Mühendisliği Bölümlerimim iş birliği ile kurulan, Nümerik Metotlar ve Sayısal Optimizasyon Laboratuvarı bünyesinde yer alan Fotolitografi Üretim Laboratuvarı içerisinde üretilmiştir.

Fotolitografi ile üretim aşamaları;

- a. Negatif kuru film temiz PCB bakır yüzey üzerine karanlık bir ortamda kaplanır.
- b. 120°C derece sıcaklığa ulaşmış Laminasyon cihazı içerisinde negatif kuru film bakır yüzeye yapışması için birkaç kez geçirilir.
- c. Üretilecek birim hücre yapısının iki boyutlu modeli asetat üzerine 1:1 oranda printer ile basılır.
- d. Pozlama ünitesinde, asetat kalıp geometrisi negatif kuru film kaplı PCB karta aktarmak için 180 saniye boyunca pozlanır.
- e. Pozlama sonrası, hazırlanan Sodyum Karbonat çözeltisi ile PCB üzerinde polimerleşmemiş kısımlar atılır.
- f. PCB üzerinde açığa çıkan bakır kısımları eritmek için; 1:2 oranında hazırlanan Hidroklorik Asit ve Hidrojen Peroksit çözeltisinin içerisine atılır.
- g. Polimerleşmiş yüzeyin altında bulunan, belirli bir desen ve geometriye sahip bakır yüzeyi ortaya çıkarmak için, polimer giderici Sodyum Hidroksit çözeltisi içerisine atılır.

3.2 Deneye Dayalı Birinci Dereceden Matris Modeli ile Karmaşık Geçirgenlik Değerlerinin Belirlenmesi

Ölçüm yapılan sıvı numunelerin sahip olduğu karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri ile rezonans frekansı ve Q faktör değerleri arasında lineer olmayan fonksiyonlar yoluyla, bir ilişki tanımlanabilir (Withayachumnankul vd., 2013a). Sensörün sahip olduğu karmaşık geometri ile birlikte bu ilişki daha da karmaşılaşır. Bu nedenle

problemi basitleştirmek için, doğrusal fonksiyonlar kümesi ile bağımsız bir yaklaşım kurulmuştur. Bu durumda, belirli bir referans etrafında, karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerinin gerçek ve sanal kısımlarındaki değişim, yeterince küçük olduğu varsayımı yapılabilir. O zaman, karmaşık geçirgenlik değerlerindeki küçük değişimler rezonans frekansı ve Q faktörler değişimleri ilişkilendirilen basitleştirilmiş bir deneysel model, karakteristik matris denk 3.1 formunda ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \Delta f_0 \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \varepsilon'_{num} \\ \Delta \varepsilon''_{num} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Karakteristik matris formulasyonu içerisinde verilen parametreler, sırasıyla, $\Delta f_0 = f_{0num} - f_{0ref}$, $\Delta Q_{num} = Q_{num} - Q_{ref}$, $\Delta \varepsilon'_{num} = \varepsilon'_{num} - \varepsilon'_{ref}$, $\Delta \varepsilon''_{num} = \varepsilon''_{num} - \varepsilon''_{ref}$, formunda yazılır. Alt indis ‘num’ herhangi bir numuneyi temsil ederken, ‘ref’ alt indisi sabit bir numuneyi referans değerini temsil etmektedir. Karakteristik matris denklemi içerisinde bilinmeyen katsayılar, kontrollü bir şekilde hazırlanan numunelerin ölçüm verilerinden hesaplanabilir. Bu deneysel modelin en ilginç tarafı; tüm ölçüm hatalarının ve üretim toleransını da hesaplama içerisine dahil edilmesini sağlamasıdır. En küçük kareler yöntemi karakteristik matris içerisinde bilinmeyen katsayıları tahmin etmek için kullanılır. Denk. 3.1 içerisinde bilinmeyen katsayıları bulmak için, Debye modelinden karışımların karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri teorik olarak hesaplanır, karışımlar için ölçülen rezonans frekansı ve hesaplanan Q faktör değerleri, denk. 3.2 gösterilen üç adet matris dizi yapısı tanımlanır.

$$X = \begin{bmatrix} \Delta \varepsilon'_1 & \Delta \varepsilon''_1 \\ \Delta \varepsilon'_2 & \Delta \varepsilon''_2 \\ \vdots & \vdots \\ \Delta \varepsilon'_n & \Delta \varepsilon''_n \end{bmatrix}, \quad Y_1 = \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta f_2 \\ \vdots \\ \Delta f_n \end{bmatrix}, \quad Y_2 = \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

‘n’ indisi numune sayısını gösterir. Doğrusal bir matris dizi yapısı için en küçük kareler yöntemi, denk. 3.3 ile verilir.

$$[m_{11} \quad m_{12}]^T = (X^T X)^{-1} X^T Y_1 \text{ ve } [m_{21} \quad m_{22}] = (X^T X)^{-1} X^T Y_2 \quad (3.3)$$

3.3 Birleştirilmiş Karıştırma Kuralı

Aynı aile grubuna ait homojen olarak karışabilen karışımların, karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerini teorik olarak hesaplamak için, bütün karışım modellerinin en iyi yönlerinin bir araya getirildiği karışım kuralı; birleştirilmiş karışım kuralıdır(Capolino, 2017; Sihvola, 1999). İzotropik bir malzeme ortamı ε_c içerisine, izotropik ε_i başka bir ortam eklenmesi ile oluşan yeni ortamın ε_{eff} efektif karmaşık elektriksel geçirgenlik değeri, denk 3.4 ile hesaplanır.

$$\frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_c}{\varepsilon_{eff} + 2\varepsilon_c + 2\nu(\varepsilon_{eff} - \varepsilon_c)} = f \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_c}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_c + \nu(\varepsilon_{eff} - \varepsilon_c)} \quad (3.4)$$

‘ ν ’ boyutsuz bir parametredir ve $\nu=2$ değeri alındığında Bruggeman formülünü verir. Bruggeman formülü, karışıma katılan ve katan ortamın aynı anda simetrik olmalarından dolayı, özel bir özelliğe sahiptir. Karışımın bilinmeyen etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değeri, katılan ortamın bileşenin hacimsel ağırlık oranı kullanılarak teorik olarak hesaplanabilir. Katılan ve katan ortamın hacimsel ağırlık oranı, sırasıyla, f ve $(1-f)$ ile verilmektedir. ‘ f ’ parametresi karışım içerisinde suyun hacimsel oranını göstermektedir ($0 \leq f \leq 1$).

3.4 Debye Modeli

Frekansa bağlı olarak ortamın etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri teorik olarak, Debye modeli ile hesaplanır(Bao vd., 1996). Bruggeman metoduna göre daha çok gerçek bir yaklaşık model sunar. Karışım oranlarının frekans bağımlı parametreler bilinmesi durumunda Debye modeli, bunun dışında kalan tüm karışımlar için Bruggeman veya eş-değer metotlar kullanılır. Debye model denklem 3.5 ile verilir.

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon_D}{1 - j\omega\tau_D} \quad (3.5)$$

Denklemin içerisinde ki parametreler sırasıyla, ϵ_r bağıl elektriksel geçirgenlik, yüksek frekans da bağıl elektriksel geçirgenlik, ϵ_∞ , dielektrik azalma, $\Delta\epsilon_D$, ve Debye rahatlama süresi τ_D .

3.5 Q faktörü

Q ‘kalite’ faktörü, bir sistem içerisinde depolanan enerjinin kaybolan enerjiye oranı olarak tanımlanır ve rezonans devresi içerisinde ortaya çıkan frekansları bir birinden ayırt etmenin bir ölçüsü olarak kullanılır(Chris 2008). Rezonans devresinin bant genişliğinin rezonans frekansına oranı olarak tanımlanır. Q faktör denklem 3.6 ile tanımlanır.

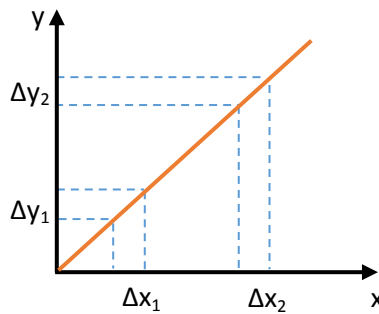
$$Q = \frac{f_m}{f_s - f_i} \quad (3.6)$$

Denklem içerisinde: merkezi frekans f_m , ileri frekansı f_s ve geri frekansı, f_i gösterilir ve ‘m, s ve i’ alt indisleri sırasıyla rezonans frekansının -3 dB de, merkezi, son ve ilk frekans noktalarını temsil eder.

3.6 Duyarlılık

Hassasiyet ‘S’, x ‘giriş sinyali’ ile y ‘çıkış sinyali’ arasında ki doğrusal bir eğim içinde, ölçülen en küçük giriş sinyal değeri Δx ile ölçülen en küçük çıkış sinyal değeri Δy arasındaki orandır. ‘n’ alt indisi doğrusal eğrinin en küçük eğimin sayısını tanımlar.

$$S = \frac{\Delta y_n}{\Delta x_n} \quad (3.7)$$



Şekil 3.1 Sensörün giriş-çıkış karakterisitik eğrisi

4. DALGA KILAVUZUNDA METAMALZEME TABANLI SIVI SENSÖR TASARIMI

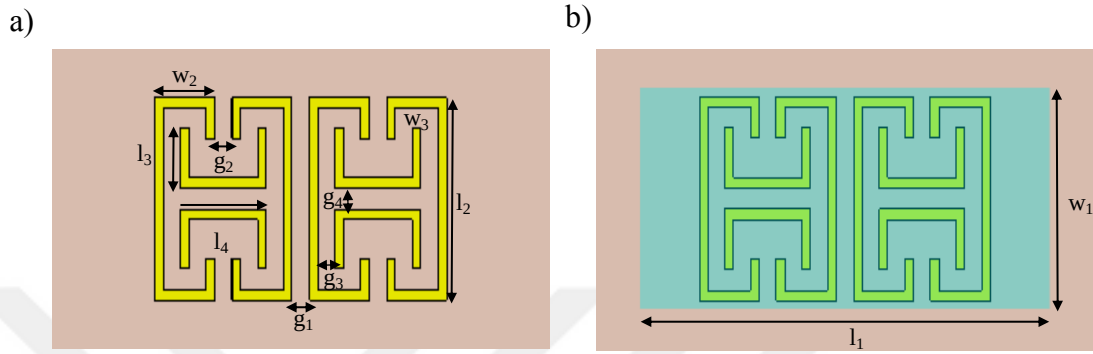
Bu çalışmada, WR-229 dalga kılavuzu içerisinde, etanol-su, metanol-su ve etanol-metanol karışım oranlarını ayırt etmek için, metamalzeme tabanlı bir sensör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Numuneler, eşit hacimli bir kaptan on farklı karışım oranında titizlikle hazırlanmış ve WR-229 dalga kılavuzunda metamalzeme tabanlı sensör vasıtasıyla ölçümleri yapılmıştır. Dikdörtgen dalga kılavuzunda yapılan ölçümlerde, sıvı karışımların metamalzeme sensör yüzeyi ile temasını engellemek için altı kez sıkıştırılmış sert strafor köpükten yapılan, (el yapımı) yapay bir havuz kullanılmıştır. Havuz, temassız ve girişimsel olmayan (noninvasive) bir ölçüm imkânı sağlamıştır. Rezonans frekansı ve kalite faktör (Q-faktör) değerleri ile bağıl elektriksel geçirgenlik değerleri arasında, varsayımsal bir ilişki kuran basit bir deneysel matris modeli kurulmuştur (Withayachumnankul vd., 2013b). Deneysel matris modelinden çıkarılan tahmini karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri literatür değerleri ile karıştırılmıştır.

4.1 Tasarım, Modelleme ve Üretim

Metamalzeme tabanlı sensör tasarımına ait, alttaş ve rezonatör yapılarının geometrik şekilleri ve boyutsal parametreleri, Şekil 4.1 de verilmiştir. Sensör topolojisi, CST Microwave Studio benzetim programıyla, WR-229 dalga kılavuzu 2.577- 5.154 GHz çalışma frekans aralığında, 3 GHz civarında rezonans frekansı tepkisini elde etmek için, sıvı karışımlarda benzetime dahil edilmiştir. Şekil 1.b de sıvı karışım yapısı turkuaz renkle gösterilmiştir. Sensör yapısı, WR-229 dalga kılavuzunun iç yüzey alanına paralel bir alttaş üzerine iki adet simetrik rezonatör yapısından oluşur. Bu eş-rezonatör yapılar, iç içe ve sırt sırta dönük iki adet eş-topolojik halka bileşenlerinden meydana gelirler. Birim hücrenin topolojik konfigürasyonu, C ve elektrik-LC rezonatör yapılandırmasına benzer şekilde tasarlanmıştır.

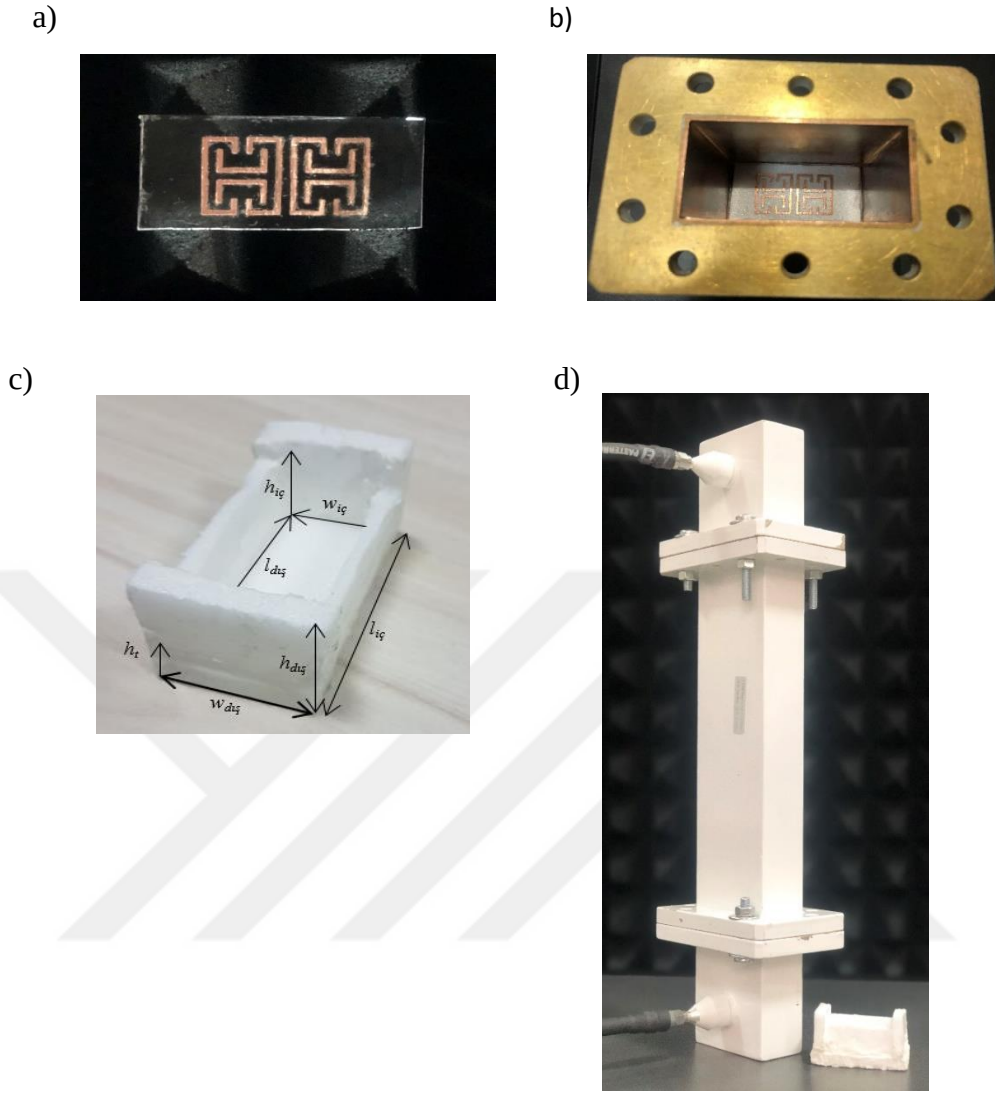
Sıvı karışımlar, $w_1 \times l_1$ 'lık bir yüzey alanına sahiptir. Alttaş olarak, 1 mm kalınlıklı Polikarbonat malzemesi, WR-229 dalga kılavuzunun iç kenar uzunluklarına uyumlu olması için $58,16 \times 29,03$ mm büyüklüğünde kesilmiştir. Polikarbonat malzemesi

$\epsilon_p=2,416$ dielektrik sabitine ve $\tan \delta_p = 0,01$ kayıp tanjant değerine sahiptir. Şekil 4.1'de rezonatör bileşenleri ile kimyasal sıvının yüzey alanının, parametre değerleri: $l_2=19,5$, $w_2=7$, $l_3=5,7$, $w_3=1$, $l_4=10$, $g_1=2$, $g_2=2,3$, $g_3=2,2$, $g_4=2$, $w_1=20,9$, $l_1=47,4$. Bakırın kalınlığı $35 \mu\text{m}$ ve iletkenliği $5,8 \times 10^8 \text{ S/m}$ dir.

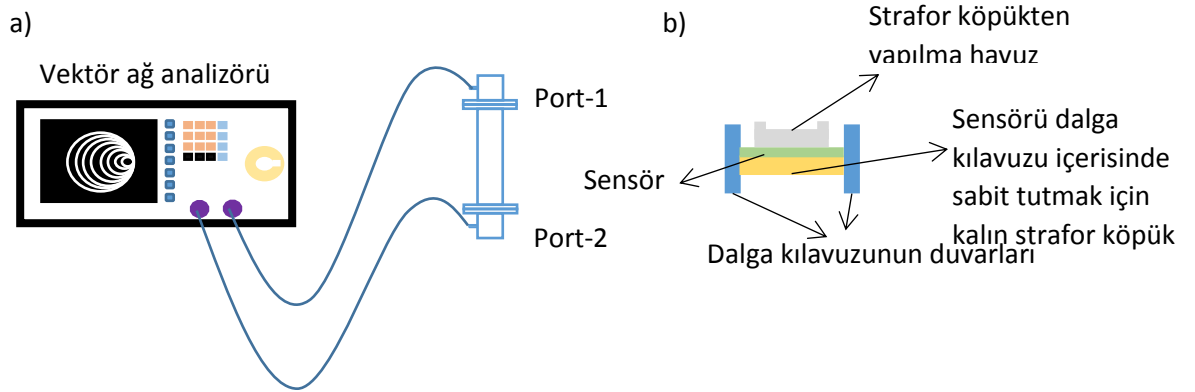


Şekil 4.1 Sensörün a) boyutları. b) turkuaz renk kimyasal sıvı alan

Polikarbonat alttaşın üstüne yapıştırılan $35 \mu\text{m}$ kalınlığa sahip bakır folyo üzerine, fotolitografi tekniği kullanılarak, benzetim programı ile geliştirilen rezonatör topolojisi aktarılmıştır. Şekil 4.2 a) da metamalzeme tabanlı sensörün önden görünüşü, b) de WR-229 dalga kılavuzuna yerleştirilen sensörün fotoğrafı, c) de havuzun geometrik parametreleri (taban kalınlığı $h_t=6,00 \text{ mm}$, havuzun dış yüksekliği, $h_{dış}=20,00 \text{ mm}$, iç derinliği $h_{iç}=14,00 \text{ mm}$, enine dış genişliği $w_{dış}=29,1 \text{ mm}$, enine iç genişliği $w_{iç}=20,9 \text{ mm}$, boyuna dış $l_{dış}=47,4 \text{ mm}$ ve boyuna iç uzunluğu $l_{iç}=58,2 \text{ mm}$) ile görünümü, d) de WR-229 dalga kılavuzu gösterilmektedir. Strafor havuz havanın etkin elektriksel ve manyetik geçirgenlik değerlerine çok yakın olduğundan, ölçümler üzerinde herhangi bir etkiye sahip değildir. Yapılan tüm ölçümlerde havuzun içerisine konan sıvı miktarı $3,4 \text{ ml}$ dir.



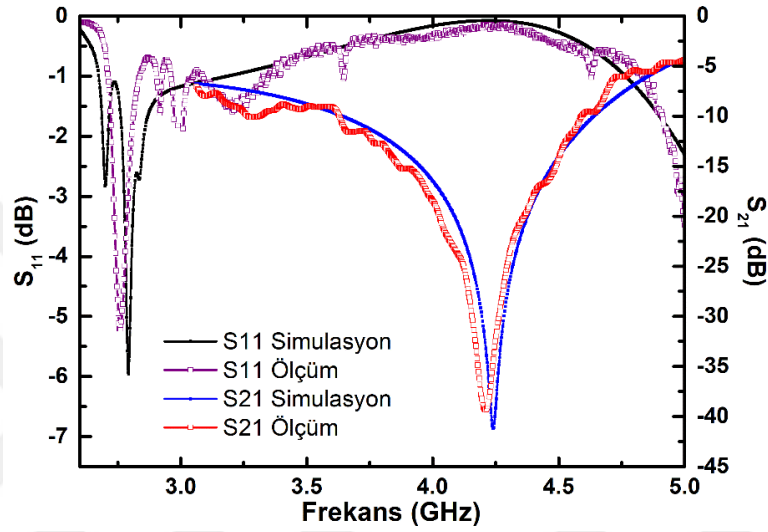
Şekil 4.2 a) sensör tasarımı, b) dalga kılavuzu içine sensör yerleşimi, c) havuz ve boyut parametreleri, d) WR-229 dalga kılavuzu fotoğrafı.



Şekil 4.3 a) ölçüm düzeneğinin şeması. b) sensör ve havuzun dalga kılavuzu içine olan yerleşimi

4.2 Simülasyon ve Ölçüm Sonuçlarının Uyumluluğu

İlk ölçüm, yalnızca metamalzeme sensörün spektral tepkisini ölçmek ve simülasyon sonuçları ile uyumluluğunu Şekil 4.4 karşılaştırılmıştır. WR-229 dalga kılavuzu içerisinde yayılan elektromanyetik dalganın uyarım modu TE_{10} dır. Saçılma parametreleri, Rohde-Schwarz ZVL-13 ağ analizörü kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 4.4 S_{11} ve S_{21} spektrumları için simülasyon ve ölçüm sonuçları.

Yansıma spektrumu S_{11} için ölçüm ve simülasyon sonuçları; sırasıyla, 2.76 GHz ve 2.79 GHz rezonans frekanslarında zayıf bastırma çukurları (geri dönüş kaybı, return loss) olduğu gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, iletim spektrumu S_{21} için sonuçlar karşılaştırıldığında: sırasıyla, 4.21 GHz ve 4.24 GHz rezonans frekansları için güçlü bastırma çukurları (geçiş kaybı, insertion loss) olduğu görülmüştür. Ölçüm ve simülasyonlardan S_{11} ve S_{21} spektrumlarının rezonans frekansları arasında 30 MHz'lik küçük bir fark ortaya çıkmıştır. Bu küçük farklılık; üretim, ölçüm kusurları ve ticari olarak satın alınan polikarbonat malzemesinin sahip olduğu karmaşık dielektrik sabitin, CST Microwave Studio programı içerisinde tanımlanan değerden farklı olmasından kaynaklı olabilir.

Ölçümlerde numune olarak kullanılan etanol, metanol ve saf su ticari olarak satın alınmıştır. Etanol ve metanol sırasıyla %96 ve %99,9 saflık oranlarına sahiptir. 1ml

etanol içerisinde %96'sı etanol varken, geriye kalan %4'lük kısım saf sudan oluşmaktadır. Hazırlanan karışım oranlarında, referans numunesi olarak seçilen saf suyun hacimsel oranı artarken, yansıma S_{11} ve iletim S_{21} spektrumlarının rezonans frekansı değeri küçüldüğü gözlemlenmiştir. Yansıma spektrumunun değişim büyüklüğü ile iletim spektrumunun değişim büyüklüğü karşılaştırıldığında, yansıma spektrumunun değişim büyüklüğü çok büyük olduğu bulunmuştur. Bu nedenle, alkol-su karışımlarının bağlı karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerini nitelendirmek için S_{11} yansıma spektrum ölçüm sonuçları kullanılmıştır.

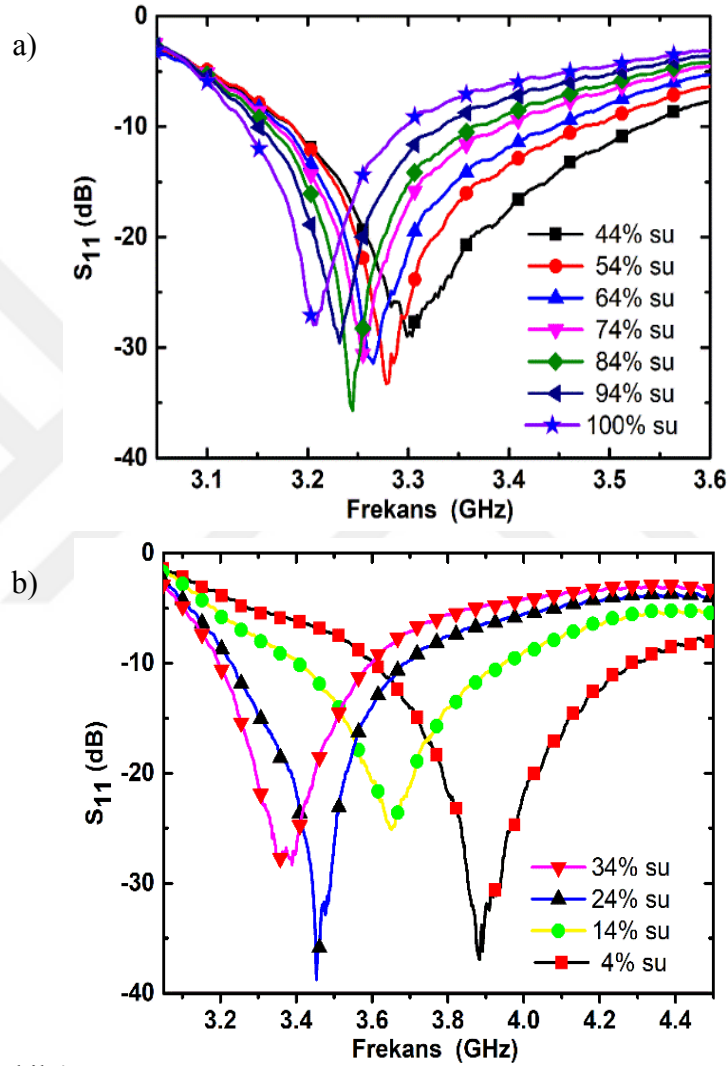
4.3 Etanol-Su Karışımları için S_{11} Spektrum Ölçümleri

%96 saflıkta etanol ile saf su için hazırlanan tüm karışım oranları; 10 ml' lik hacim oranlarına sahiptir. Ölçüm öncesi, numuneler daha hızlı ve pratik hazırlanması için, 10 ml' lik karışım hacim oranı tercih edilmiştir. Etanolün sahip olduğu %4 lük safsızlık miktarı, %100 saf suyun hacimsel oranına eklenmesi gereklidir. Bu nedenle, hazırlanan numunelerin 10 ml karışımları içinde, yeniden hacimsel karışım oranları belirlenmesi gereklidir.

Çizelge 4.1 %96 saflıkta etanol ve %100 saflıkta suyun karışım oranları.

Karışıma katılma oranı	Etanol ml	Saf su ml	%96 Etanol karışım oranı	%100 Saf Su karışım oranı
%100 saf su- %0 Etanol	0.0 ml	10.0 ml	0.000	1.000
%90 saf su- %10 Etanol	1.0 ml	9.0 ml	0.096	0.904
%80 saf su- %20 Etanol	2.0 ml	8.0 ml	0.192	0.808
%70 saf su- %30 Etanol	3.0 ml	7.0 ml	0.288	0.712
%60 saf su- %40 Etanol	4.0 ml	6.0 ml	0.384	0.616
%50 saf su-%50 Etanol	5.0 ml	5.0 ml	0.480	0.520
%40 saf su-%60 Etanol	6.0 ml	4.0 ml	0.576	0.424
%30 saf su- %70 Etanol	7.0 ml	3.0 ml	0.672	0.328
%20 saf su-%80 Etanol	8.0 ml	2.0 ml	0.768	0.232
%10 saf su- %90 Etanol	9.0 ml	1.0 ml	0.864	0.136
%0 saf su – 100 Etanol	10.0 ml	0.0 ml	0.960	0.040

Çizelge 4.1 de verilen on bir karışım oranı için, WR-229 dalga kılavuzu içerisinde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Her bir karışım oranı, on defa hazırlanıp ölçümler yapılmıştır. On adet S_{11} büyüklüklerinden tek bir spektrum elde etmek için, ortancaları alınmıştır. Elde edilen ortalama S_{11} büyüklüğü Şekil.4.5 de gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Etanol-saf su karışım oranları için S_{11} spektrum sonuçları.

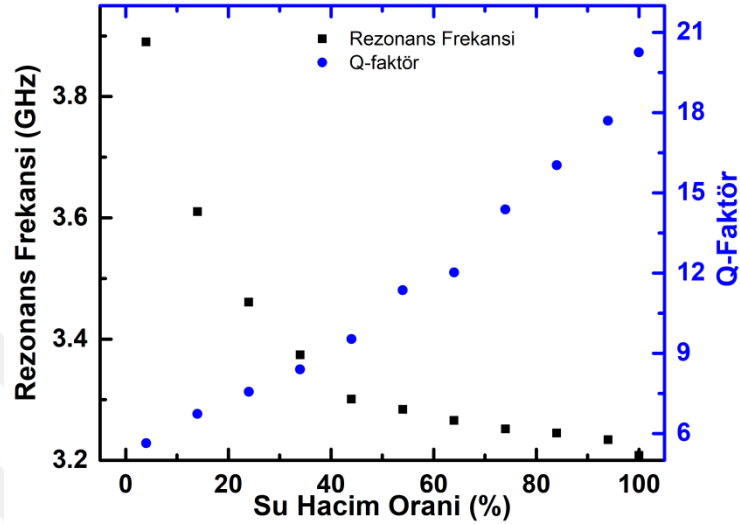
Şekil 4.5 de, karışım içerisinde saf suyun hacimsel miktarı %4 ve %100 olduğunda, sırasıyla, rezonans frekansları 3,88–3,20 GHz olarak bulunmuştur. Karışım içerisinde saf suyun bulunma oranı artırıldığında, 0,68 GHz’lik (680 MHz) bir frekans değişimi gözlemlenmiştir. Etanol-saf su karışımlarını, sensörün ayırt edebilme duyarlılığı; 9,8

MHz $\cdot \epsilon^{-1}$ dir ve çok büyük bir hassasiyet değerine sahip olduğu açıktır. Tüm ölçümler 24 $^{\circ}\text{C}$ derece oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Literatür araştırmalarında üzerinde en çok durulan ve incelenen, Awang ve ark. (2017) ve Withayachumnankul ve ark. (2013) yapmış oldukları çalışmalar içerisinde rezonans frekansında kayma miktarı, sırasıyla, 0,052 GHz ve 0,11 GHz dir. Awang ve ark. (2017) WR-284 dikdörtgen dalga kılavuzu içerisine mikro akışkan kanallı çift yarık bir rezonatöre sahip bir metamateryal tabanlı sensör kullanarak %100 saflıkta etanol ve %100 saflıkta su hacimsel karışım oranları için ölçümler yapmışlardır. Withayachumnankul ve ark. (2013), mikro şerit iletim hattına bitişik kare ayırık halka rezonatör tasarımı üzerine yerleştirilen mikro akışkan kanal yerleştirilerek ölçümler gerçekleştirilmiştir. Dalga kılavuzu içerisinde gerçekleştirilen ölçümler iletim hattı tasarımı ile gerçekleştirilen ölçümlerle karşılaştırıldığında daha büyük duyarlılık değerine sahip olduğu açıktır(Awang vd., 2017; Withayachumnankul vd., 2013b). Aynı zamanda tasarlamış olduğumuz rezonatör yapısının ayırt edebilme yeteneği, literatürde elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında kat kat daha çok hassasiyete sahip olduğu açıktır. Buna karşın, tasarımın en büyük dezavantajı, mikro akışkan kanal yapıların kullanıldığı diğer çalışmalar göre oranla daha fazla miktarda alkol su karışım kullanmaktadır(Awang vd., 2017; Withayachumnankul vd., 2013b).

Etanol-su karışımlarının ölçümlerinden elde edilen rezonans frekansları ve karşı gelen Q-faktör değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.6 da göstermiştir. Saf suyun karışım içerisinde hacimsel oranı %4' den %34 ulaştığında rezonans frekansı üstel bir şekilde azalırken, %44'den %100 artırıldığında lineer bir azalma meydana gelmiştir. Rezonans frekansındaki değişimler; karışımı oluşturan sıvının miktarı ile rezonatör üzerinde ortaya çıkan öngörülemez kapasitif alan etkileşimlerinden dolayı muğlak sonuçlar yaratmıştır. Diğer taraftan, Şekil 4.6 içerisinde, Q faktör değerleri karışım içerisinde suyun hacimsel oranı artarken neredeyse doğrusal bir artış ortaya çıkmıştır. Q faktör değerinin artışı rezonans frekansındaki kaymaya oranla kıyaslandığında, daha fazla oranda bir artış sergilediği gözlemlenmiştir. Suyun hacimsel oranının artışı, iki şeyi değiştirmiştir. Rezonans frekansında kayma miktarı git gide azalmış ve rezonans frekansının bant genişliğini frekans kaymasından daha fazla oranda azalmasına neden

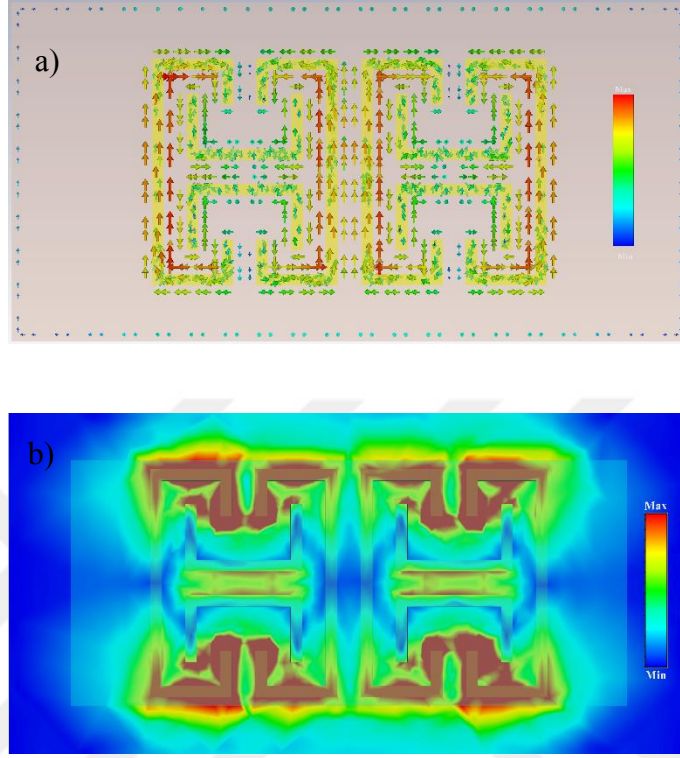
olmuştur. Bundan dolayı, rezonans kaymasından daha fazla miktarda bant genişliğinde yaşanan küçülme Q faktör değerini artırmıştır. %96 saflıkta etanol için elde edilen Q faktör değeri 5.64 iken, %100 saf su için Q faktör değeri, 20,25 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.6 Su hacim oranına göre rezonans frekansı ve Q faktör değerlerinin değişimi.

Benzetim programında metamalzeme tabanlı sensör geliştirilirken, sensör saf su etkileşimini öngörebilmek için, simülasyon içerisinde rezonatör yapısının önünde saf su ve strafor köpük tanımlandı. Böylece, saf suyun dielektrik sabitinin kapasitif alanların elektrik alan saçaklanmaları ile etkileşimi için gerçekçi bir yaklaşım sağlanmıştır. Simülasyonda tasarlanan havuz içerisine 3,4 ml lik hacime sahip %100 saflıkta su numunesi tanımlanmıştır. Simülasyon sonuçlarından, S_{11} büyüklüğü için rezonans frekansı 3,20 GHz olarak bulunmuştur. Yüzey akım dağılımları, Şekil 4.7.a da rezonatörün dış kolları üzerinde çok yoğun yüzey akım dağılımları ortaya çıkmıştır. İç kollar üzerinde ki akım dağılımlarına bakıldığında daha çok zayıf akım dağılımları oluşurken, dış rezonatör kollarının yüzey akımlarına göre zıt yönde dağılımlar meydana geldiği görülebilir. Elektrik alan yoğunluğu, Şekil 4.7'b) de gösterilmektedir. Elektrik alan dağılımları rezonatörün dış kolları uçuna doğru daha da yoğunlaştığı görülebilir. Dış kolların birbirine en yakın olduğu kapasitif bölgeler de ortaya çıkan elektrik alan dağılımları, güçlü yüzey akımlarını uyarırlar. İç tarafta yer alan rezonatör kolları arasında daha zayıf kapasitif etkileşim dolayı, cılız yüzey akımlarının meydana

geldiğini söyleyebiliriz. Simülasyon içerisinde, %100 saf su kullanılması beklenildiği gibi daha güçlü ayırt ediciliğe sahip rezonatör tasarlanmasına yardımcı olmuştur.



Şekil 4.7 Simülasyonda yansıma spektrum için a) yüzey akım ve b) elektrik alan dağılımları

4.3.1 Tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerinin hesaplanması

Alkol ailesinin molekül bileşen yapıları suyun moleküler bileşen yapısı ile aynı aile grubundan meydana gelirler. Bu yüzden, alkol-su karışımları homojen olarak karışırlar. Etanol, metanol ve propanolün moleküler boyutları, suyun moleküler boyutundan çok daha büyüktür. Alkol-su karıştırıldıklarında, alkol molekülleri arasındaki boşluklara, kendilerinden kat ve kat küçük boyutlu su molekülleri yerleşirler(Bao vd., 1996). İlk kez, Bao ve ark. (1996) da etanol-su, metanol- su ve metanol-etanol ikili karışımlarının karmaşık dielektrik sabitlerini tespit etmek için, açık uçlu bir koaksiyel sensör vasıtasıyla oda sıcaklığında farklı hacimsel karışım oranlarında ölçümler yapmışlardır. 45 MHz den 26.5 GHz kadar geniş bir spektral aralıkta bu ölçümler tamamlanmıştır. Etanol-su hacimsel karışım oranları için yapılan ölçüm sonuçları Şekil 1.c) içerisinde

verilmiştir. Dielektrik sabit değerleri, yüksek frekanslara doğru doğrusal olmayan bir değişim sergilemişlerdir. Özellikle dielektrik sabitin reel kısımları, yaklaşık 2.5 GHz frekans eşiğinden sonra, hızlı bir şekilde küçülmeye başladığı görülmüştür. Dielektrik sabitin sanal kısımları, tüm spektral ölçüm bölgesi aralığında düzensiz bir rejimde değişmişlerdir.

Ticari olarak satın alınan etanol, %96 oranında saflık derecesine sahiptir. Geriye kalan %4'lük oran saf sudan oluşmaktadır. Etanol-su hacimsel karışım oranları içerisinde, %4'lük saf su hacmi, %100 saf suyun hacimsel oranına katılması gerekli görülmüştür. Tablo 1. de yeni hacimsel karışım oranlarına yer verilmiştir. Ortaya çıkan bu hacimsel karışım oranları için, literatürde herhangi bir hesaplama ve ölçüm bulunmamaktadır. Bu problemin üstesinden gelmek için, etanolun içerdiği %4 lük saf su miktarı karışım oranlarına küçük etkisi hesaba katılarak, Bao ve ark. (1996) şekil 1.c den ve Awang ve ark. (2017b) Şekil.6'dan, literatür verileri yaklaşık olarak alınmıştır. Bao ve ark. (1996) Şekil 1.c içerisinde %100 saf su ve etanol için, etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri, 3 GHz de sırasıyla, $\epsilon_{su} = 76.80 + i10.2$, %100, $\epsilon_{etanol} = 7.15 + i7.15$ olarak çekilmiştir.

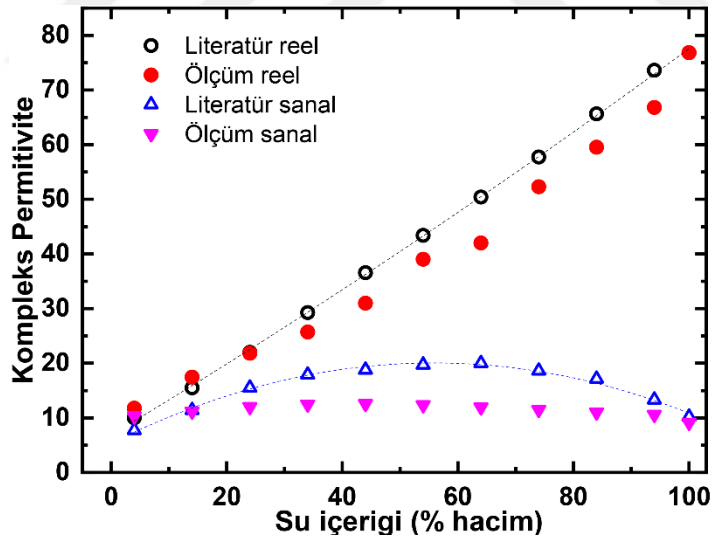
Withayachumnankul ve ark. (2013a) tarafından (karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri tahmin etmek için) sunulan deneysel karakteristik matris model bu çalışmada kullanılmıştır. Bu deneysel model, tüm ölçüm hatalarının ve üretim toleransını, hesaplama içerisinde almasından dolayı tercih edilmiştir. Karakteristik matris model, referans olarak kullanacağımız elektriksel geçirgenlik değerleri, denk. 3.3 verilen Bruggeman yönteminden sağlanmıştır. Tablo 1. de sunulan hacimsel karışım oranlarına göre, $\epsilon_{su} = 76.80 + i10.2$ $\epsilon_{etanol} = 7.15 + i7.15$ değerlerinden faydalanılarak Bruggeman'den teorik olarak elektriksel geçirgenlik değerleri hesaplanmıştır. Bu elektriksel geçirgenlik değerleri ile birlikte rezonans frekansı ve Q faktör değerleri, denklem 3.1 bilinmeyen matris katsayıları bulmak için, (en küçük kareler metodu) denk. 3.2 içerisinde yazılarak hesaplanmıştır. En küçük kareler metodu içerisinde referans elektriksel geçirgenlik değeri olarak, %100 saf su seçilmiştir. Karakteristik matris içerisinde bilinmeyen katsayılar elde edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \Delta f_0 \\ \Delta Q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0071 & 0.0178 \\ -0.2057 & 0.1796 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \varepsilon'_{num} \\ \Delta \varepsilon''_{num} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Karakteristik matris denklemi, tersine çevrildiğinde, denklem 4.2 bulunur.

$$\begin{bmatrix} \Delta \varepsilon'_{num} \\ \Delta \varepsilon''_{num} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 36.34 & -3.60 \\ 41.63 & 1.44 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_0 \\ \Delta Q_0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Denk 4.2 de, elektriksel geçirgenlik değeri bilinmeyen karışım oranları için ölçümlerinden elde edilen rezonans frekansı ve Q faktör değerlerinden, referans olarak seçtiğimiz, %100 saf suyun rezonans ve Q faktör değerleri çıkılarak, karakteristik matris içerisine yazılmıştır. Küçük bir matris çarpım işleminden sonra, elektriksel geçirgenlik değerlerinin en küçük değişim miktarları bulunmuştur. Referans elektriksel geçirgenlik değerinden tekrar çıkarılmalarıyla, bilinmeyen elektriksel geçirgenlik değerinin tahmini değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4.8 Tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerinin, literatür değerleri ile karşılaştırılması

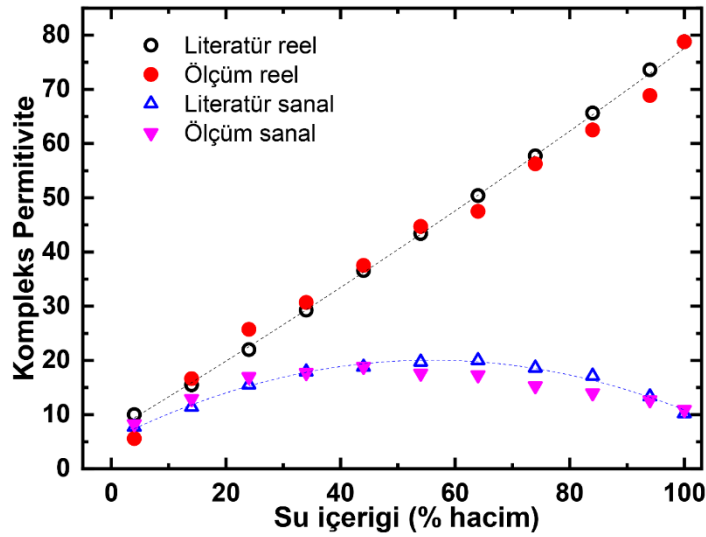
Şekil 4.8 içerisinde, tahmin etkin elektriksel geçirgenlik değerleri literatür değerleri ile karşılaştırılmıştır. Tahmini değerler, reel kısım için görece olarak literatür değerleri ile uyum içerisinde. Fakat Bruggeman formülü, polinomal eğimleri tanımlayan fonksiyon değişimlerini belirlemek için uygunluğa sahip olmadığından, karmaşık

elektiriksel geçirgenlik değerlerini özellikle sanal kısmını karakterize etmek için uygun değildir. %44 –%84 su oranına sahip ara karışım lar oranları için elektiriksel geçirgenlik değerlerinin literatür değerlerine göre özellikle sanal kısımlarının çok düşük olduğunu söyleyebiliriz.

Bruggeman formülü yetersizliğinden dolayı, çok iyi tahmin yapılamamıştır. Daha doğru tahmin yapabilmek için, Avang ve ark. (2017b) şekil.6’dan çekilen veriler, bilinmeyen matris katsayılarının hesaplanmasında kullanılmıştır. 3 GHz de etkin karmaşık elektiriksel geçirgenlik değerleri sırasıyla $\epsilon_{su} = 78.80 + i 10.20$ $\epsilon_{etanol} = 7.15 + i 7.15$ olarak alınmıştır. Denk. 3.2’den, elde edilen karakteristik matris model, denk 4.3 ile verilir.

$$\begin{bmatrix} \Delta \epsilon'_{num} \\ \Delta \epsilon''_{num} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -30.73 & 3.58 \\ -24.40 & -0.95 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_0 \\ \Delta Q_0 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Denk. 4.3’den, tahmini karmaşık elektiriksel geçirgenlik değerleri hesaplanmıştır ve şekil 4.9 içerisinde, Avang ve ark. (2017b)’den literatür veriler ile karşılaştırılmıştır.



şekil 4.9 tahmini etkin karmaşık elektiriksel geçirgenlik değerlerinin, literatür değerleri ile karşılaştırılması

Avang ve ark. (2017b) elde edilen etkin karmaşık elektiriksel geçirgenlik değerlerinin gerçek ve sanal kısmı için, standart sapma değerleri sırasıyla, 2,87 ve 1,87 dir.

Bruggeman formülü kullanılarak, ölçümlerden elde edilen etkin karmaşık elektriksel geçirgenliğin gerçek ve sanal kısımları için standart sapma değerleri, 5,08 ve 4,44 dür. Yapılan bu analizden standart sapmanın bu kadar yüksek çıkmasının nedeni Bruggeman formülünün yetersizliğinden kaynaklıdır.

4.4 Metanol-Su Karışımları için S_{11} Spektrum Ölçümleri

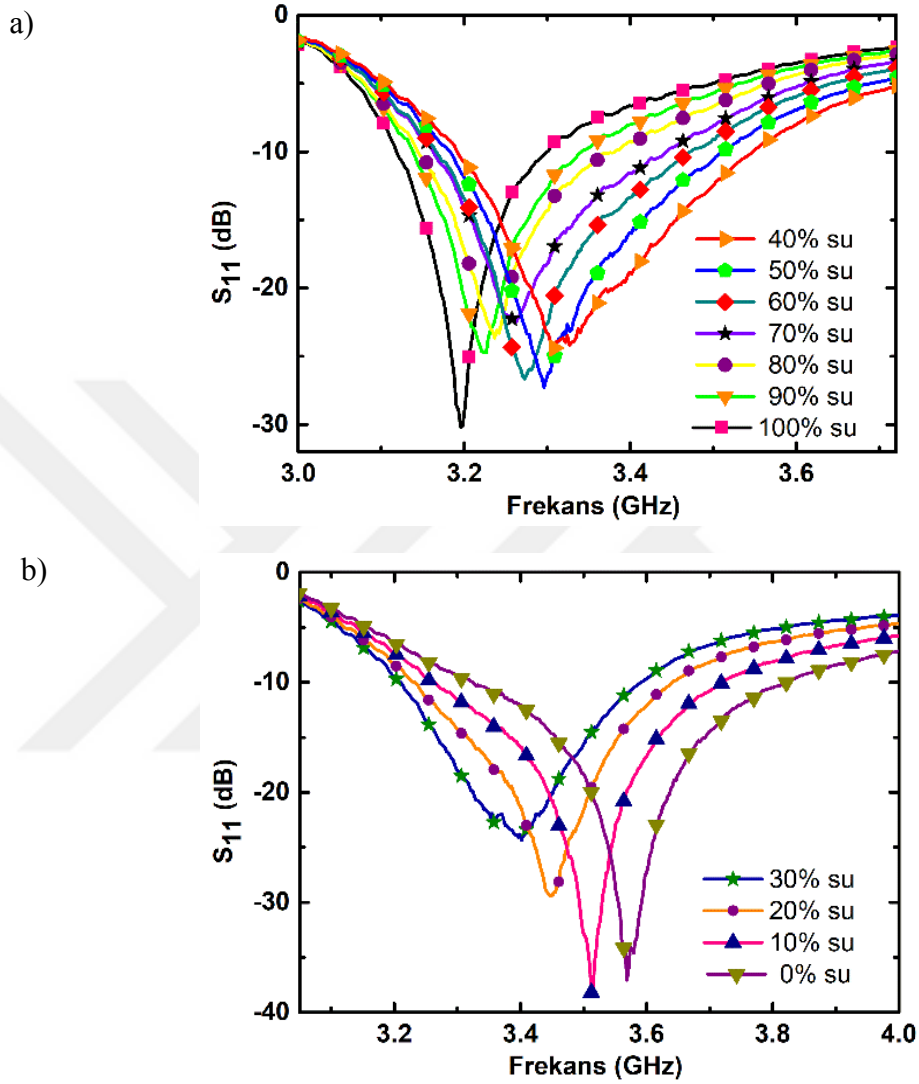
Metanol ve saf suyun hacimsel karışım oranı ölçüm öncesi belirlenmiştir. Hazırlanan bütün karışım miktarları 10 ml' lik karışım hacim oranlarında oluşturulmuş. 10 ml' lik bir karışım hacmi, ölçüm numunesinin kolay ve hızlı hazırlandığından tercih edilmiştir. Ölçüm içerisinde kullanılan metanolün içerisinde bulunan %0,01 lik safsızlık miktarı ihmal edilecek kadar küçüktür. Bu yüzden safsızlık miktarı ihmal edilmiştir.

Çizelge 4.2 %99,9 saflıkta metanol ve %100 saflıkta su karışım oranları.

Karışıma katılma oranı	Metanol ml	Saf su ml
%100 saf su- %0 Metanol	0.0 ml	10.0 ml
%90 saf su- %10 Metanol	1.0 ml	9.0 ml
%80 saf su- %20 Metanol	2.0 ml	8.0 ml
%70 saf su- %30 Metanol	3.0 ml	7.0 ml
%60 saf su- %40 Metanol	4.0 ml	6.0 ml
%50 saf su-%50 Metanol	5.0 ml	5.0 ml
%40 saf su-%60 Metanol	6.0 ml	4.0 ml
%30 saf su- %70 Metanol	7.0 ml	3.0 ml
%20 saf su-%80 Metanol	8.0 ml	2.0 ml
%10 saf su- %90 Metanol	9.0 ml	1.0 ml
%0 saf su – 100 Metanol	10.0 ml	0.0 ml

Çizelge 4.2 de verilen karışım oranları için, dalga kılavuzunda spektrum ölçümleri tamamlanmıştır. Her bir karışım oranı, on defa hazırlanmış ve ölçümleri yapılmıştır. Aynı karışım oranına sahip on adet S_{11} yansıma spektrum ölçüm sonuçları, tek bir spektrum grafiğinde birleştirmek için, ortancalarını alınmıştır. Saf suyun karışıma katılma oranı, her bir karışım oranı içinde %10 luk hacim oranı kadar arttırılmıştır.

Şekil 4.10 içerisinde, suyun hacmi %0 dan %100'e ulaşana kadar, ortalama S_{11} büyüklüklerinin grafiği gösterilmektedir.

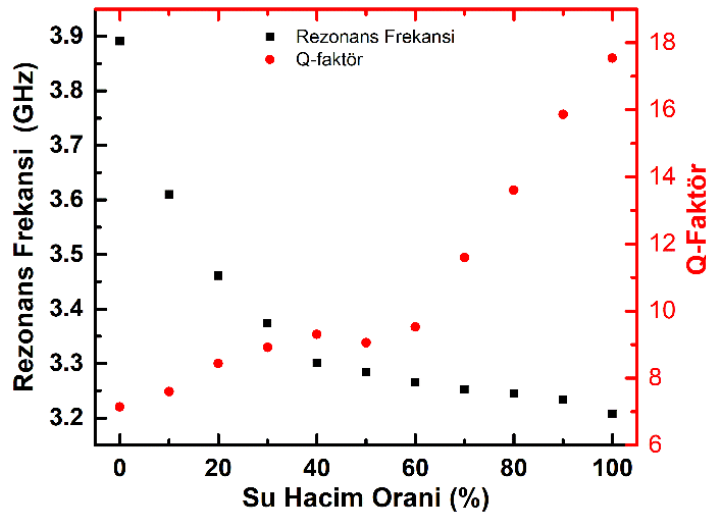


Şekil 4.10 Metanol-saf su karışım oranları için S_{11} spektrum sonuçları.

Saf suyun hacimsel oranı %100 ve %0 için; ortalama S_{11} büyüklükleri sırasıyla, 3,20 GHz–3,57 GHz olarak ölçülmüştür. Saf suyun karışıma katılma oranı %100'den %0'a kadar azaldığında, 0.37 GHz'lik (370 MHz) bir frekans değişimi meydana gelmiştir. Metanol–su karışımlarını, sensör tarafından ayırt edilebilme duyarlılığı; $7,4 \text{ MHz} \cdot \epsilon^{-1}$ dir. Withayachumnankul ve ark. (2013) ve Awang ve ark. (2017b) tarafından yapılan benzer çalışmalar içerisinde, rezonans frekansları, sırasıyla, 1.84 GHz den 1.94 GHz'e ve 2.993 GHz den 3,037 GHz' e değişirken, rezonans frekanslarında 0.1 GHz ve 0.044

GHz kayma ortaya çıkmıştır. Literatür ile çalışmamız arasında ortaya çıkan rezonans frekansında kayma farkının büyüklüğü, kullanılan sıvı miktarının rezonatör yapısı ile oluşturduğu etkileşim bölgesinin büyüklüğü ilişkilidir. Tüm ölçümler 24 °C derece oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Metanol-su karışım oranlarından elde edilen rezonans frekansları ve Q faktör değerleri Şekil 4.11 de gösterilmiştir. Karışım içerisinde, suyun hacimsel oranı %0'dan %40 kadar artarken, Q faktör değerleri doğrusal bir şekilde artmıştır. %50'de, Q faktör değeri değişme miktarında doğrusallığı bozmuştur. Karışım oranı içerisinde saf suyun varlığı, %60 dan %100 doğru, Q faktör değerleri doğrusal olarak artmıştır. Karışım içerisinde suyun hacimsel oranı %60'dan %100'a çıkarken Q faktör değerlerindeki değişim, %0'dan %40'a göre çok daha büyüktür. Rezonans frekansı için benzer bir şekilde suyun hacimsel oranı %0'dan %40 artarken, rezonans frekansında kayma miktarı hızlı bir şekilde azalmıştır. Saf suyun hacimsel oranı %50' den %100 'çıkarken rezonans frekansında kayma miktarı daha yavaş ve daha doğrusal olarak azalma eğilimi meydana getirdiği bulunmuştur.



Şekil 4.11 Su hacim oranına göre rezonans frekansı ve Q faktör değerlerinin değişimi.

4.4.1 Tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerinin hesaplanması

İkili karışımların etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri, genellikle karışım oranı ile lineer olarak değişmezler(Bao vd., 1996). Bao ve ark. (1996) tarafından alkol-

su ve alkol-alkol karışımları için Debye fonksiyonu, suyun hacimsel oranı ile çok yakın bir lineer ilişki gösterdikleri rapor edildi. Hidrojen ailesinden oluşan su, metanol ve etanol grubu mikrodalga frekans bölgesinde Debye dispersiyon tipinde bir dispersiyon sergilerler. Karışımların karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri, çok geniş bir spektral aralıkta açık uçlu koaksiyel sonda ile ölçüldü(Bao vd., 1996). Dielektrik spektra frekansın sürekli bir fonksiyonu olarak elde edildi. Çok iyi bilinir ki, geniş spektral aralığı kaplayan veriler tek başına yetersizdir. Karmaşık doğrusal olmayan en küçük kareler (complex nonlinear least squares CNLS) uyumlama tekniği kullanılarak, her bir karışım oranı için Debye fonksiyonunun dispersiyon parametreleri belirlenmiştir(Bao vd., 1996). Bilinmeyen bir karışımın hacim oranı, karışımı oluşturan sıvıların ilgili değerleri bilinmesiyle, dispersiyon parametrelerinden karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerini hesaplama imkânı sağlamıştır. Bao ve ark. (1996), ikili karışımlar için hacimsel oranı tahmin edilmesinde dispersiyon modeli olarak en iyi sonucu Debye fonksiyonuyla sağlamasından dolayı kullanmayı tercih etmişlerdir.

Şekil 4’de, su-metanol, su-etanol ve metanol-etanol karışımları için su ve metanol hacimsel oranının artışının dispersif parametreleri arasındaki ilişkiler gösterilmiştir. Sensörün çalışma frekansı 3 GHz için, denk 3.5 de tanımlanan Debye fonksiyonu kullanılarak, Şekil 4. den çekilen ilgili parametreler vasıtasıyla karışımların etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri bulunmuştur. Metanol için, karmaşık elektriksel geçirgenlik değeri, $\epsilon_{\text{metanol}} = 20 + i14$ olarak bulunmuştur.

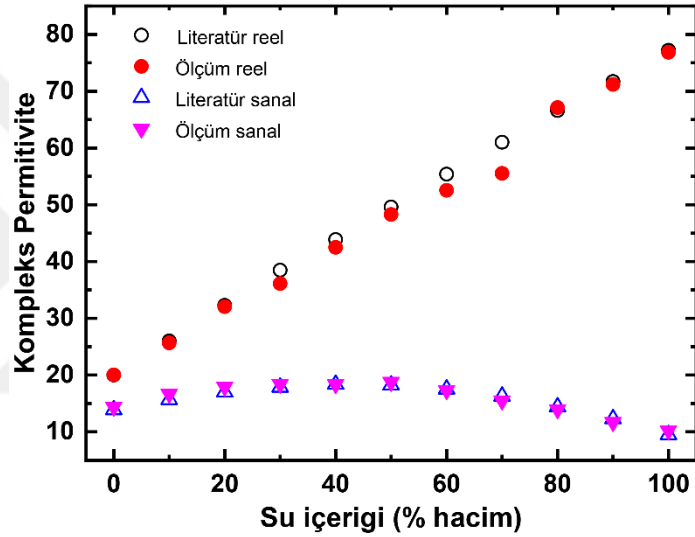
Çalışmamızda her bir karışım oranı için Debye formülünden çıkartılan etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerine karşı gelen rezonans frekansı ve Q faktör değerleri ile birlikte denk. 3.3 de veriler yerlerine yazılarak, karakteristik matrisin bilinmeyen katsayıları elde edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \Delta f_0 \\ \Delta Q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0079 & 0.0151 \\ -0.1302 & 0.5226 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \epsilon'_{num} \\ \Delta \epsilon''_{num} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Denk. 4.4 de verilen karakteristik matris denklemi ters çevrildiğinde, denk. 4.5 elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \Delta \varepsilon'_{num} \\ \Delta \varepsilon''_{num} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 85.76 & -2.48 \\ 21.36 & 1.29 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_{num} \\ \Delta Q_{num} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Referans olarak %100 saf su alınmıştır. Referans olarak alınan %100 saf suyun rezonans frekansından ve Q faktör değerinden, diğer tüm olası karışım oranlarının değerleri çıkarılmıştır ve denklem 4.5 de, yerlerine yazılarak etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen veriler, Awang ve ark. (2017b) tarafından verilen literatür değerleri ile karşılaştırılmıştır ve Şekil 4.12 de aralarında çok güzel bir uyum olduğu görülmektedir.



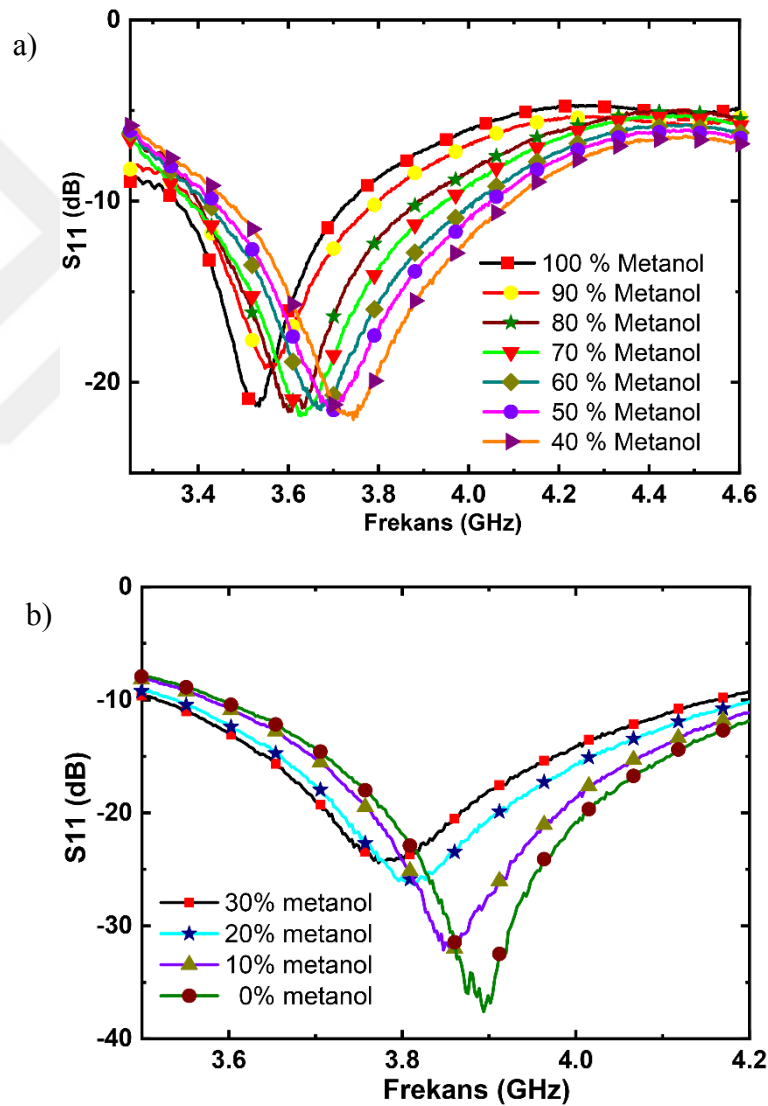
Şekil 4.12 tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerinin literatür değerleri ile karşılaştırılması.

Debye formülü kullanılarak ölçümlerden elde edilen etkin karmaşık elektriksel geçirgenliğin gerçek ve sanal kısımlarının literatür değerlerine göre standart sapma değerleri, 2,1 ve 0,67 olarak bulunmuştur. Standart sapma değerlerinin çok küçük olmasının nedeni, Debye modelinin sağladığı doğru sonuçlardan kaynaklıdır.

4.5 Metanol-Etanol Karışımları için S₁₁ Spektrum Ölçümleri

%96 saflıkta etanol ile %100 saflıkta metanol, etanolün safsızlık oranı yüksek olmasından dolayı, hazırlanan etanol-metanol iki karışımları bu yüzden üçlü karışım özelliğine sahiptir. Bu nedenle, hazırlanan bir karışım numunesi içerisinde, etanol, saf

su ve metanol mevcuttur. Yapılan ölçümlerde etanolün sahip olduğu (%4 lük saf su içermesiyle) yüksek safsızlık miktarından dolayı, hazırlanan numunelerde varlığı yok sayılamamıştır. Tüm karışımlar, 10 ml'lik hacim oranlarında hazırlanmış ve 3,4 ml'lik örnekler halinde ölçülmüştür. Numunelerin kolay ve hızlı hazırlanması için, karışım oranları içerisinde, %4 lük saf su katkısı yok sayılmıştır. On bir adet karışım oranı; on kez hazırlanmış ve S_{11} yansıma spektrum ölçümleri yapılmıştır. Tek bir karışımdan elde edilen on adet ölçüm sonucunun ortancaları alınarak ölçüm sonuçlarının doğruluğu artırılmıştır. Ölçüm sonuçları 4.13 de gösterilmiştir.



Şekil 4.13 Metanol-Etanol su karışım oranları için S_{11} spektrum sonuçları

Metanolün karışım içerişine katılma oranı %100 ve %0 olduğunda yansıma spektrumu için rezonans frekans değerleri sırasıyla, 3,57–3,88 GHz olarak ölçülmüştür. 300 MHz' lik bir frekans değişimi ortaya çıkmıştır. Böylece, %100 saf metanol-%96 saf etanol-%4 saf su karışım oranlarını sensörün ayırt edebilme duyarlılığı; $15.9 \text{ MHz} \cdot \epsilon^{-1}$ dir ve çok güçlü hassasiyet değerine sahip olduğu açıktır. Tüm ölçümler 24°C derece oda sıcaklığında yapılmıştır.

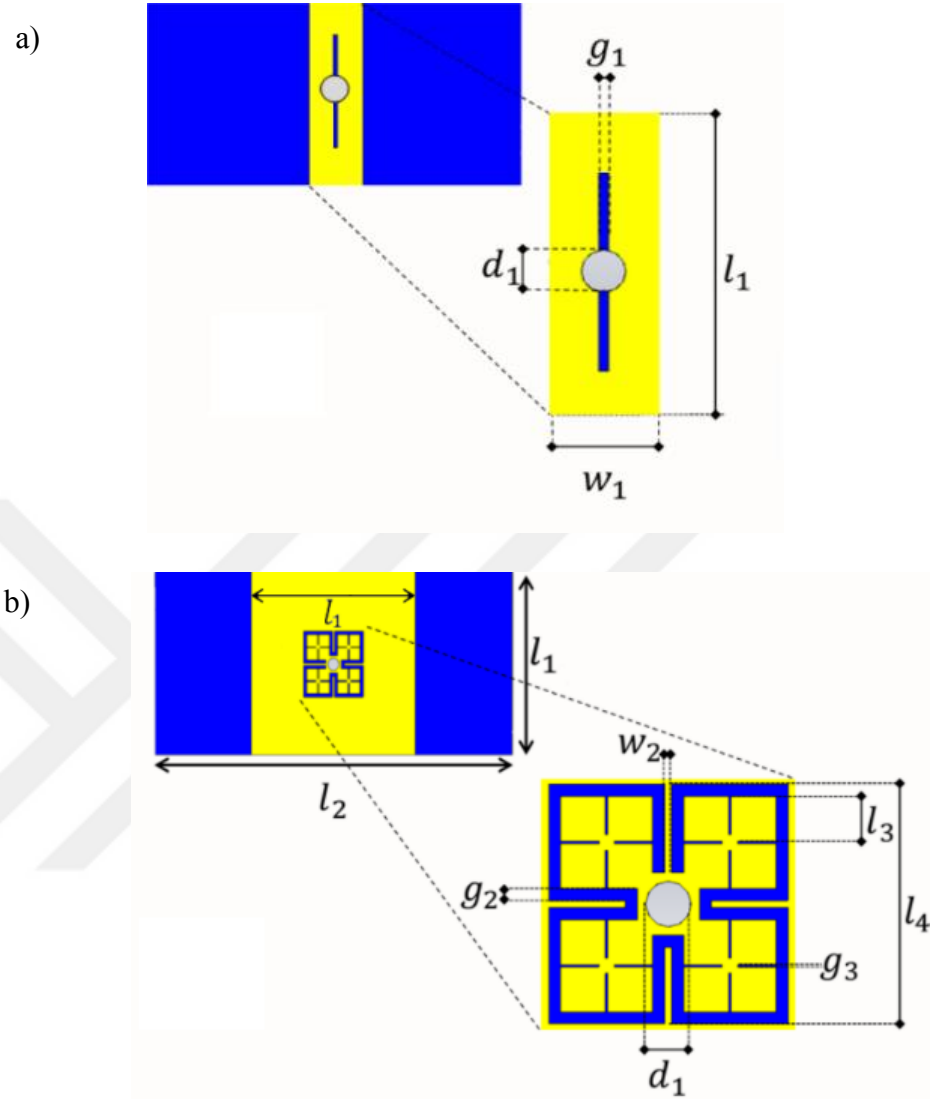
Literatürde daha önce üçlü karışımların dielektrik sabitinin karakterize edildiği herhangi bir çalışma var olmadığından, etanol-metanol ve su karışımı için tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri hesaplanamamıştır. Bu nedenle bu çalışma burada sonlandırılmıştır.

5. FRAKTAL REZONATÖR TABANLI METAMALZEME SIVI SENSÖRÜ TASARIMI

Bu çalışmada, etanol-su, metanol-su ve etanol-metanol karışım oranlarını ayırt etmek için, Minkowski benzeri fraktal rezonatör (Minkowski-like fractal resonator MFR) yapısı içeren DGS sahip metamalzeme tabanlı mikrodalga sensör tasarımı önerilmiştir. Numuneler, metamalzeme tabanlı sensör ile temasını kesmek için, sensörün tam ortasına, yüzey normali boyunca kılcal cam boru (KCB) yerleştirmiştir. Böylece, sensör tasarımı, sürekli kullanılabilir, invazif olmayan ve gerçek zamanlı bir ölçüm imkânı sağlamıştır. Sıvı karışımların etkin karmaşık elektriksel geçirgenlikleri, rezonans frekansı ve S_{21} büyüklük değerlerinin değişmesine dayalı olarak, karakteristik matris modeline dahil edilmesi ile tahmini değerler elde edilmiştir. Tahmini değerler, rapor edilen çalışmalardaki değerlerle çok iyi uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

5.1 Tasarım, Modelleme ve Üretim

Minkowski benzer bir fractal mimarisine sahip DGS yapısı ile birlikte kusurlu mikroşerit mimarisinin DMS yapısının bir araya getirildiği, metamalzeme tabanlı sıvı sensör tasarımı ve boyutsal parametreleri Şekil 5.1 de gösterilmiştir. Sensör tasarımında alt taş olarak; kayıp tanjant $\tan\delta = 0.0009$, kalınlığı $h=1.575$ mm ve $\epsilon_r=2,2$ dielektrik sabitine sahip Rogers RT/duroid 5880 malzemesi kullanılmıştır. Sıvı akışı, sensörün merkezinde açılan bir delik boyunca geçen ince kılcal bir boru vasıtasıyla sağlanmıştır.

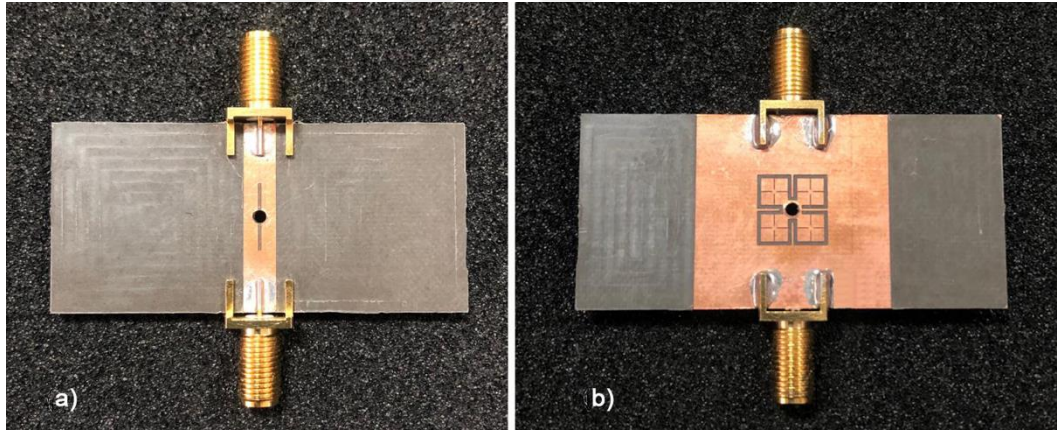


Şekil 5.1 Metamalzeme tabanlı sıvı sensör a) iletim hattı düzlemi b) topraklama düzlemi.

Giriş empedansı 50Ω için, mikroşerit hattının genişliği $w_1 = 4,8$ mm dir. MFR sensörünün iletimin spektrumunun durdurma bant genişliğini azaltmak için, mikroşerit üzerinde bazı kusurlar oluşturularak, DMS elde edilmiştir. DMS'nin genişliği ve boyu, sırasıyla $g_1 = 0,4$ mm ve $9,8$ mm dir. Sensör üretimi için, $l_1 = 27,5$ mm ve $l_2 = 60,0$ mm boyutlarına sahip bir alt taş kesilmiştir. Sensörü sabitlemek için, iletken toprak düzleminin genişliğinden daha uzun bir alt taş boyutu tercih edilmiştir. Uzatılmış dielektrik kısımların varlığı, rezonans frekansı üzerinde hiçbir etkisi olmadığı simülasyon çalışmalarında görülmüştür. Kılcal borunun geçeceği boşluğun çapı $d_1 = 1,55$ mm dir. MFR'yi oluşturan parametreler, sırasıyla, $w_2 = 0,3$ mm, $g_2 = 0,5$ mm, $g_3 = 0,1$ mm,

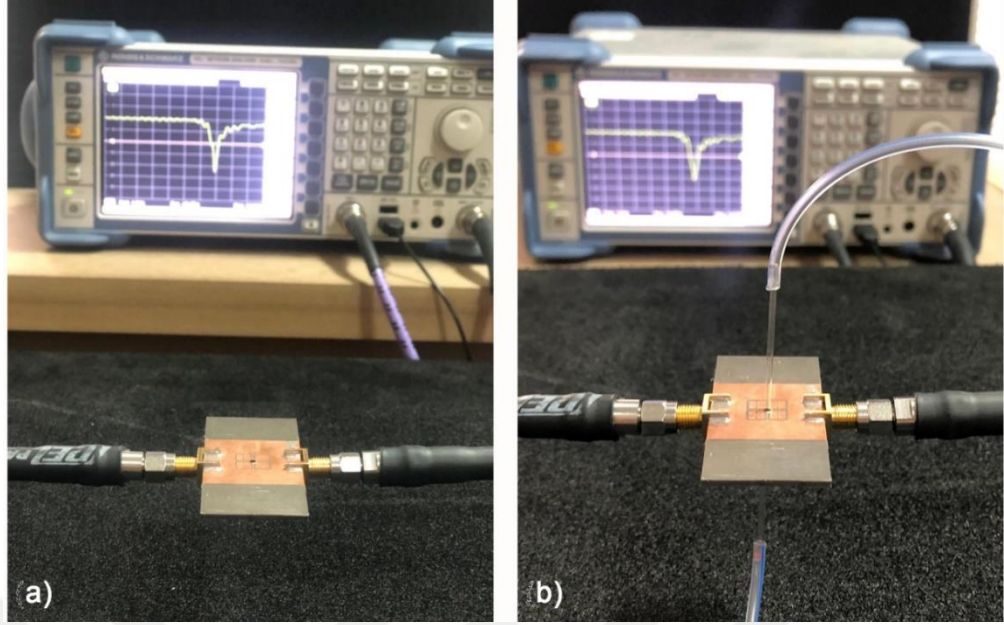
$l_3=1,9$ mm ve $l_4=10,0$ mm dir. KCB'nun iç ve dış çapı, 1,0 mm ve 1.5 mm dir. Alttaşın içerisinde geçen sıvının hacimsel boyutu $1,26$ mm³ dür. Sensör tasarımı, CST Microwave Studio benzetim programı kullanılarak tasarlanmıştır. MFR yapısını oluşturan, $w_2=0,3$ mm genişlikli kollardan yalnızca teki dört yapraklı yonca benzeyen iletken topraklama zemini ile birleştirilmiştir. Böylece, simetri bozulmasından 1.9 GHz de S_{21} için güçlü bastırma çukuru (geçiş kaybı, insertion loss) oluşmuştur.

Sensör prototipi, LPKF ProtoMat S63 baskı devre çizme cihazı vasıtasıyla üretilmiştir. Üretim, Rogers RT/duroid 5880 alttaşın üzerinde 35 µm kalınlıklı bakır katman, kazılarak aşındırılmış. Bu işlem için, RF tipi helezon uçlu iğnelerle birlikte çeşitli konik uçlu sarmal kanallı araçlar kullanılmıştır. Üretilen sensör yapısı, Şekil 5.2 a) da DMS'li mikroşerit yapısı, b) de MFR'li toprak düzlemi sunulmuştur.

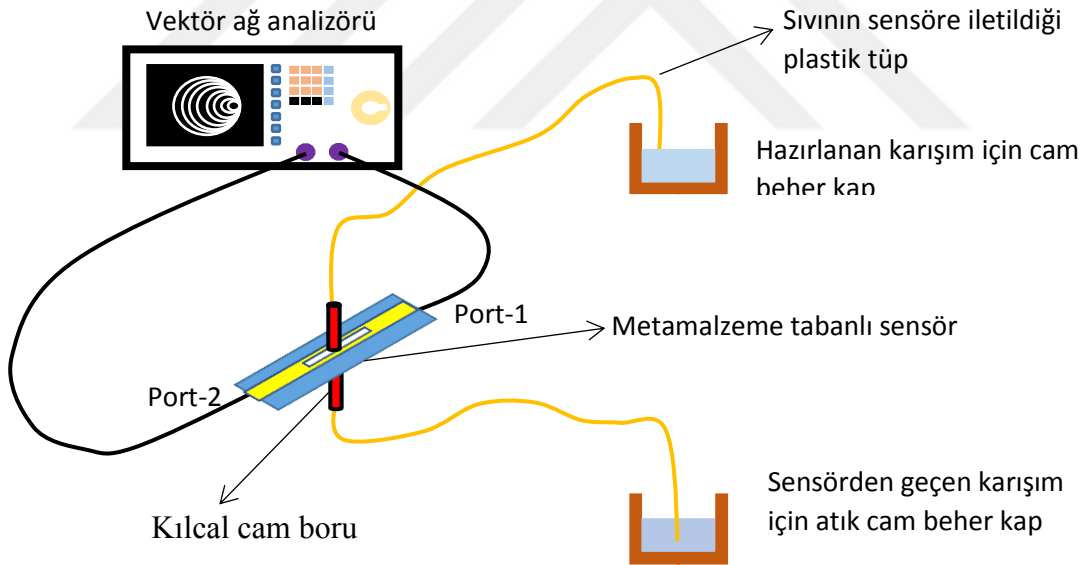


Şekil 5.2 Üretilen sensörün yapısı, a) mikroşerit hat ve b) toprak düzlem görüntüsü

Spektral ölçümler için, 9 kHz ile 13.6 GHz aralığında ölçüm yapma özelliğine sahip Rohde & Schwarz ZVL13 vektörel ağ analizörü kullanılmıştır. Ölçümler, Şekil 5.3 de kurulan ölçüm düzeneği içerisinde, önce KCB yokken ve daha sonra KCB hava ile doluyken ve etanol, metanol, su ve hacimsel karışım oranları enjekte edilerek gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.3 Sensörün ölçüm düzeneği, kılcal cam a) yokken ve b) varken.



Şekil 5.4 Ölçüm düzeneğinin şeması

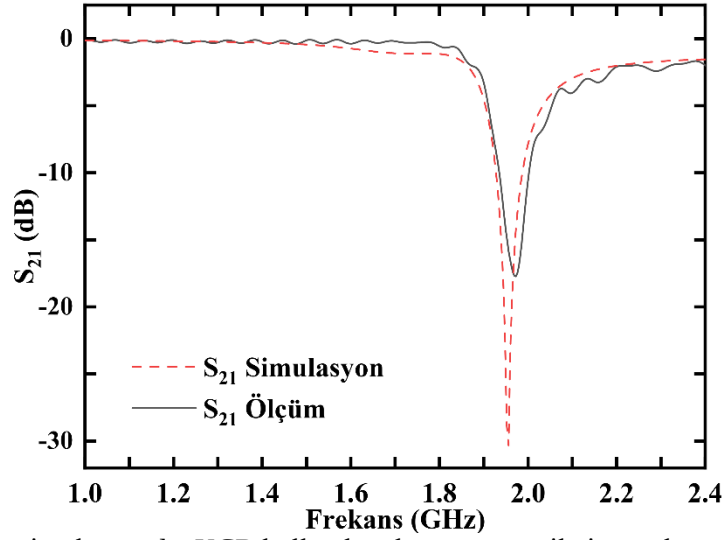
5.2 Simülasyon ve Ölçüm Sonuçlarının Uyumluluğu

Bu bölümde, MFR ve DMS ile oluşturulan metamalzeme tabanlı sıvı sensörlerin, tasarımı, karakterizasyon ve sıvıların ölçümleri ile ilişkilendirilen sonuçlar tartışılmıştır.

Etanol-su, metanol-su ve etanol-metanol karışım oranları ayırt edilmiş ve karışım oranları için tahmini karmaşık geçirgenlik değerleri karakterizasyonu sunulmuştur.

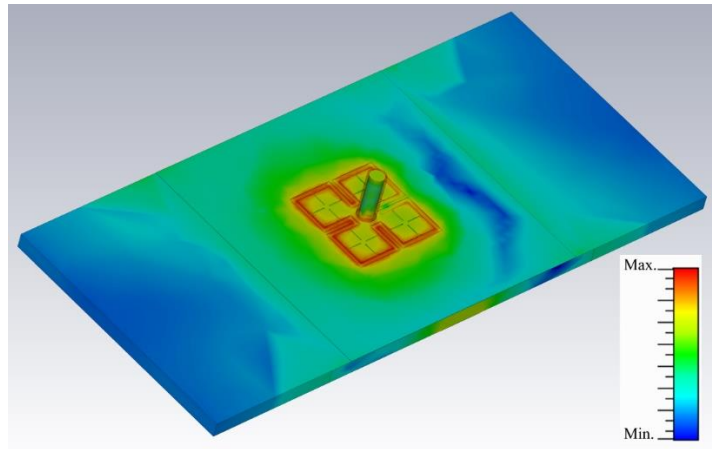
Sensör yapısı üzerinde sinyaller, iletim hattı boyunca ilerlerken, MFR yapısından kaynaklı alt ve üst plakalar arasında karmaşık kapasitif etkileşim ortaya çıkar. Sensör oluşturan DGS'li MFR yapısı ile DMS'li iletim hattı (Transmission Line) TL üzerlerinde depolanan manyetik ve elektrik alan enerjileri birbirine çok yakın ve eşit olduğunda rezonans ortaya çıkmıştır.

Sensör üzerinde KCB kullanılmadan, simülasyon ve ölçümden elde edilen iletim spektrumlarının karşılaştırılması Şekil 5.5 de gösterilmiştir. Şekilde, kırmızı kısa çizgi simülasyondan elde edilen S_{21} iletim spektrumunu temsil ederken, siyah düz çizgi ölçümden iletim spektrumunu göstermektedir. Şekil 5.3 a) da gösterilen ölçüm düzeneği içerisinde gerçekleştirilen ölçümde, rezonans frekansı 1,97 GHz de -17,89 dB büyüklük ile -3 dB'de 245 MHz bant genişliğine sahip olduğu gözlemlendi. Diğer taraftan yürütülen simülasyonda, 1.96 GHz'de -30.32 dB büyüklük ile -3 dB de 216 MHz'lik bant genişliği sonucuna ulaşılmıştır. Ölçüm ve Simülasyondan elde edilen durdurma bantları arasında S_{21} büyüklükleri haricinde, rezonans frekansları için çok güzel bir uyum vardır. S_{21} büyüklükleri arasındaki fark, dielektrik ve iletken malzemeler içinde orta çıkabilecek kayıpların yanı sıra olası ölçüm ve üretim hatalarından kaynaklı olabilir. S_{21} büyüklükleri için -3 dB eşiğinde bant genişliği dikkate alındığında, ortaya çıkan fark önemsiz olarak kabul edilebilir.



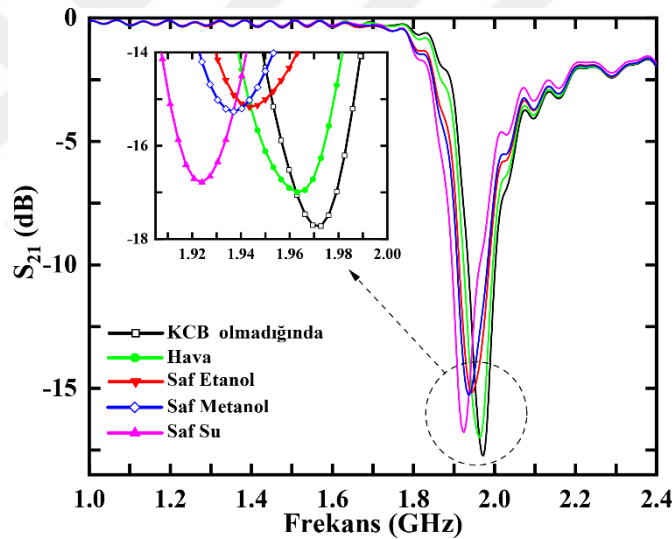
Şekil 5.5 Ölçüm ve simülasyonda, KCB kullanılmadan sensörün iletim spektrumunun grafiği.

KCM'nin içerisinde saf su ile dolu olduğu simülasyon tasarımı için rezonans frekansında elektrik alan dağılımları, Şekil 5.6 de gösterilmektedir. MFR tasarımından kaynaklı, ortaya çıkan güçlü elektrik alan dağılımları KCB üzerinde keskin bir etkiye sahip olmasının yanı sıra, rezonatör tasarımının asimetric kısmı dışında yüksek yoğunluklu alan dağılımlarının ortaya çıktığı görülmüştür. Simetrinin kırıldığı bölgede manyetik alan dağılımları, elektrik alan dağılımının tersi, yüksek yoğunluğa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ek olarak, DMS tabanlı mikroşerit hat yüzeyinin ortasında elektrik alan dağılımı yerleştiği görülmüştür. MFR ve DMS tabanlı mikroşerit hat tasarımında elektrik alan dağılımının güçlü bir yük yoğunluğunun sensörün merkezinde toplanmasına imkân sağlamıştır.



Şekil 5.6 Metamalzeme tabanlı sensörün elektrik alan dağılımı.

Sensör, KCB olmadığında veya borunun içi hava, saf etanol, saf metanol ve saf su ile doldurularak belirlenen beş farklı durum için, iletim spektrum ölçümleri yapılmış ve elde edilen sonuçların karşılaştırılması, Şekil 5.7’ de sunulmuştur. İlk olarak, KCB yokken ve borunun içi hava ile dolu olduğu durumlar için ölçümler gerçekleştirilmiştir. KCB’nun içi hava ile dolu olduğunda, sensörün rezonans frekansı (1,97 GHz’den 1,96 GHz’e değişirken) 10 MHz’lik bir kaymaya ve -3 dB bant eşiğinde 12 MHz’lik bant genişlemesine neden olmuştur. İkinci olarak, KCB içerisine saf su pompalandığında, rezonans frekansı 1,92 GHz’de ve S_{21} büyüklüğü -16,78 dB olarak ölçülmüştür. Saf su -3 dB eşiğinde 217 MHz’lik bant genişliğine sahiptir. Son olarak, saf etanol ve metanol için rezonans frekansları ve -3 dB’deki bant genişlikleri, sırasıyla, 1,94 GHz, 1,93 GHz ve 270 MHz, 268 MHz bulunmuştur. KCB’nun içindeki sıvının dielektrik sabiti azaldıkça, -3 dB eşiğinde bant genişliğinde artış yaşandığı görülmüştür.

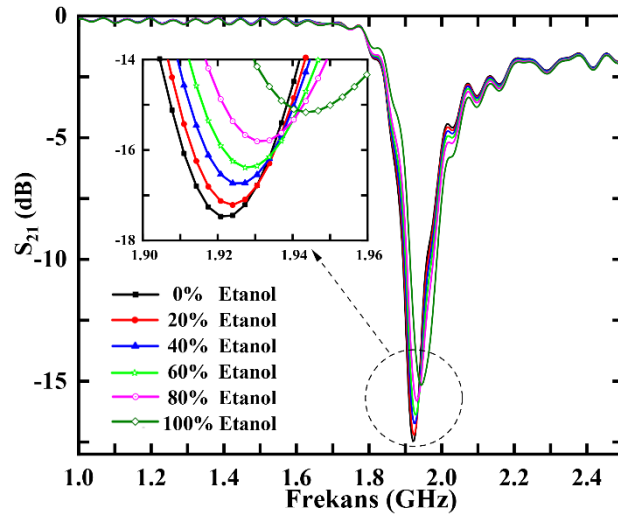


Şekil 5.7 Cam kılcal boru yokken, hava, saf su, etanol ve metanol ile dolu cam kılcal borunun kullanıldığı sensörün ölçülen iletim spektrumu.

5.3 Etanol-Su Karışımları için S_{21} Spektrum Ölçümleri

Bu bölümde, etanol-saf su ikili karışımları için elde edilen rezonans frekansı ve S_{21} büyüklük değerlerini kullanarak, karışımların tahmini karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri araştırılmış ve literatürle karşılaştırılmıştır. Karışımlar içerisinde etanolün hacimsel oranı %0 dan %100 kadar, karışımın %20’lik hacim miktarı kadar artırılarak

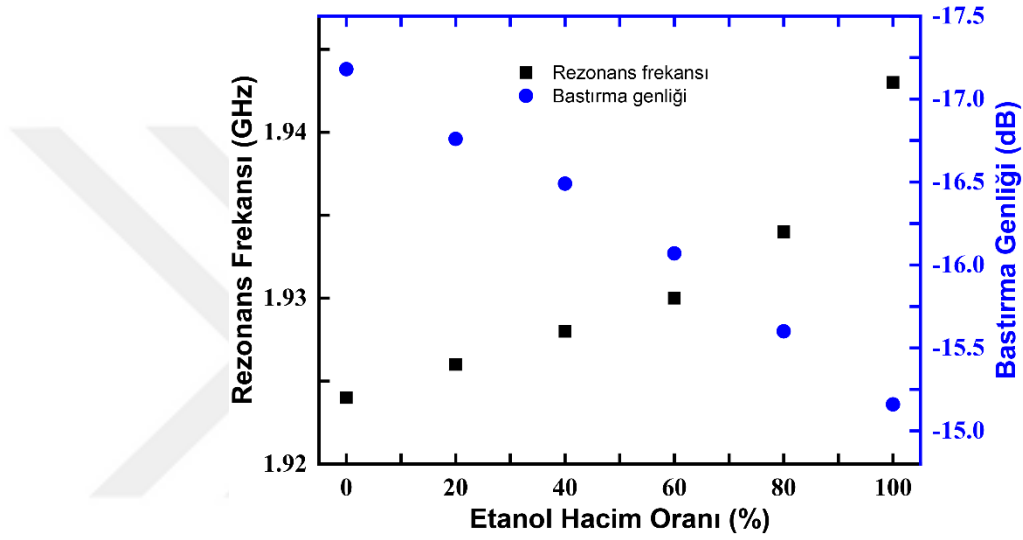
hazırlandı. Elde edilen toplam 6 farklı numune için, yapılan ölçümlerden iletim spektrumları kaydedildi. Şekil 5.8 de bu ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Sensörün rezonans frekansı, mikro şerit hat ile MFR 'nin sahip olduğu karmaşık geometrik yapı arasında ortaya çıkan, önceden kestirilemez indüktif ve kapasitif etkileşimden meydana gelir. Elde edilen ölçümlerde %100 saf suyun rezonans frekansı 1,92 GHz iken, %100 etanolün rezonans frekansı 1,94 GHz olarak bulunmuştur. Etanol karışım içerisindeki oranı artarken, karışımın sahip olduğu karmaşık elektriksel geçirgenliğinin reel kısmının değerinin azalması, rezonatörün içerisinde oluşan kapasitif etkinin azalması sonucu, rezonans frekans değerinin artmasına neden olmuştur. Ölçümlerde reel kısmın sistematik bir şekilde değişimi, rezonans frekansında toplam 20 MHz lik bir değişim ortaya çıkartmıştır. Etanol-saf su karışımlarını, sensörün ayırt edebilme duyarlılığı; 0,2 MHz $\cdot \epsilon^{-1}$ dir ve çok küçük bir hassasiyet değerine sahip olduğu kesindir, fakat sensör içerisinde geçen sıvının çok küçük bir kapasitif bir alanla etkileşime girmesinden kaynaklı olduğu da açıktır. Tüm ölçümler ortalama 23,5 $^{\circ}\text{C}$ derece oda sıcaklığında yapılmıştır.



Şekil 5.8 Etanol-su karışımları için iletim spektrumu.

Etanol-su karışımlarından, ölçülen rezonans frekans ve S_{21} büyüklük değişim değerleri, etanolün hacimsel oranının değişiminin bir fonksiyonu olarak, Şekil 5.9 de çizilmiştir. Karışımın içerisinde etanolün hacimsel oranı %0 ile %60 aralığında artarken rezonans frekansı doğrusal olarak artarmıştır. %60 ile %100 aralığında doğrusal olmayan bir

davranışla artış eğilimi göstermiştir. Benzer şekilde, S_{21} büyüklük değişim değerleri incelendiğinde, ölçüm hataları göz artı edildiğinde, doğrusal bir artış gösterdikleri, Şekil 5.9 de görülebilir. Rezonans durumunda, metalik yüzeyler üzerinde açılan özel kovuklarda depolanan enerjinin miktarı sensörü ortamını oluşturan malzemelerin dielektrik sabiti ile yakından ilişkilidir. Etanolün hacimsel oranının artışı, sensör içerisinde depolanan enerji miktarı azalırken rezonans frekansı artar S_{21} büyüklük değeri azalır.



Şekil 5.9 Etanol hacim oranı için rezonans frekansı ve S_{21} büyüklük değerleri.

5.3.1 Tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerinin hesaplanması

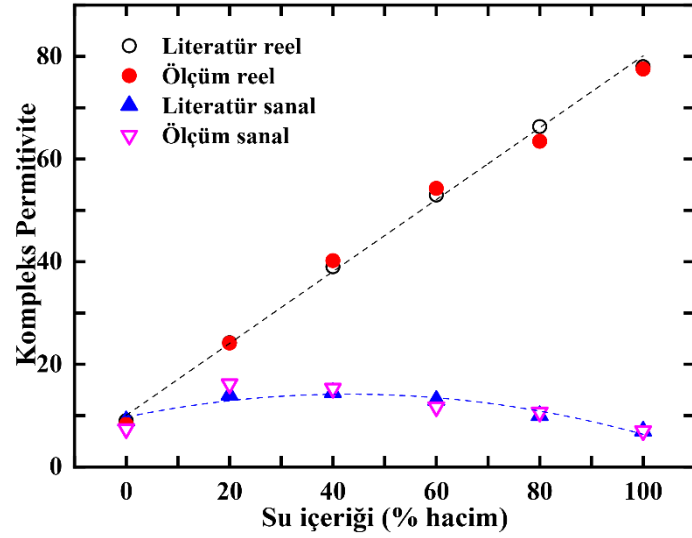
Etanol-su karışımlarının sahip olduğu karmaşık elektriksel geçirgenliği tahmin etmek için, deneysel karakteristik matris model kullanılmıştır. Karışımların karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri teorik olarak, Bao ve ark. (1996), Şekil 4 de verilen parametrelerden çekilerek Debye modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Karakteristik matris denklemi içerisinde bilinmeyen matris katsayılarını hesaplamak için, teorik olarak elde edilen veriler, ölçülen rezonans frekansı ve S_{21} büyüklük değerleri ile birlikte, en küçük kareler metodu içerisinde kullanılmıştır. Bilinmeyen matris katsayılarının bulunması ile, karışımın sahip olduğu karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri ile rezonans frekansı ve S_{21} büyüklük değerleri arasında bir ilişki kurulmuştur.

$$\begin{bmatrix} \Delta f_0 \\ |\Delta S_{21}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.00027 & -0.00052 \\ -0.029 & 0.0025 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \varepsilon'_{num} \\ \Delta \varepsilon''_{num} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Karakteristik matris denklemi tersi alınmasıyla, matris katsayılarının rezonans frekansı ve S_{21} büyüklük ile ilişkisinden, karmaşık elektriksel geçirgenliğin gerçel ve sanal kısımları kolayca hesaplanabilir. Yeni karakteristik matris denklemi (5.1) dan, ethanol-su karışımının bilinmeyen hacim oranının karmaşık elektriksel geçirgenlik değeri kolayca bulunabilir.

$$\begin{bmatrix} \Delta \varepsilon'_{num} \\ \Delta \varepsilon''_{num} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 159.14 & 32.7 \\ 1819.13 & -17.3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_0 \\ |\Delta S_{21}| \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Withayachumnankul ve ark. (2013a), çalışma frekansı 1.9 GHz da çalışan sensör tasarımı için, saf ethanol ve suyun tahmini elektriksel geçirgenlik değerleri sırasıyla, şekil 7.dan $\varepsilon_{\text{etanol}} = 9 + i9$, ve $\varepsilon_{\text{su}} = 78 + i9$ olarak verilmiştir. 3.2 GHz çalışma frekansına sahip metalmalzeme tabanlı sensör çalışmamızda, saf ethanol ve suyun tahmini elektriksel geçirgenlik değeri sırasıyla, $\varepsilon_{\text{etanol}} = 7,15 + i 7,15$, ve $\varepsilon_{\text{su}} = 76,80 + i10,2$ elde edilmiştir. Debye 'ye dayalı sonuçlarımızdan, saf ethanolün ve suyun karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri sırasıyla $\varepsilon_{\text{etanol}} = 7 + i 7$, ve $\varepsilon_{\text{su}} = 77,5 + i8,3$ olarak bulunmuştur. Şekil 5.10 da, saf su-ethanol karışımı için karakteristik matrix denkleminde elde edilen tahmini verilerle Withayachumnankul ve ark. (2013a) dan alınan dataların karşılaştırması gösterilmiştir.



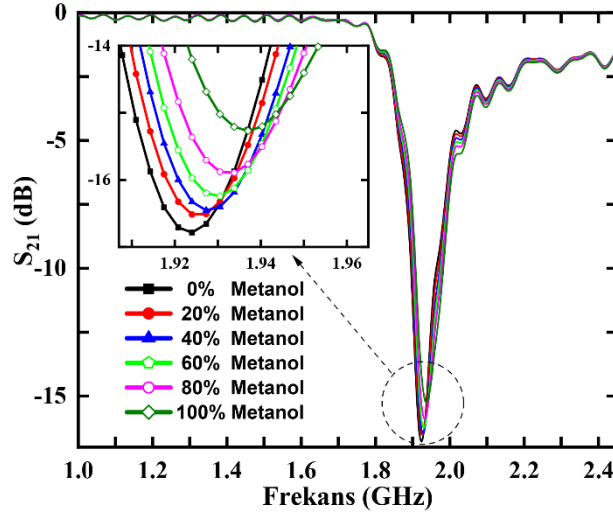
Şekil 5.10 tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerinin literatür değerleri ile karşılaştırılması.

Tahmini karmaşık elektriksel geçirgenliğin gerçek ve sanal kısımları, literatüre göre standart sapma değerleri, sırasıyla 1,54 ve 1,41 olarak bulunmuştur. Standart sapma değerlerinin çok küçük olmasının nedeniyle, ölçüm ve literatür arasında çok güzel bir uyum vardır.

5.4 Metanol-Su Karışımları için S_{21} Spektrum Ölçümleri

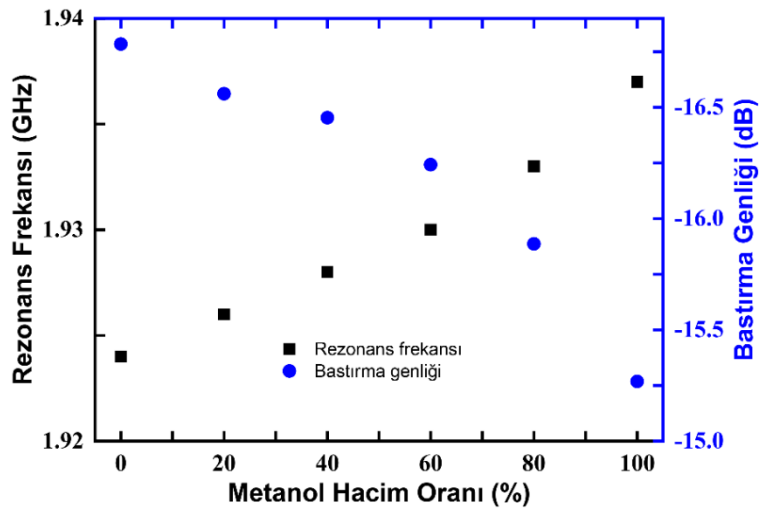
Bu bölümde, sensörün metanol-saf su ikili karışımları için iletim spektrumu için ayırt ediciliği araştırılmış. Ölçülen rezonans frekansı ve S_{21} büyüklük değerlerini kullanarak, çıkartılan tahmini karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri ile literatürle karşılaştırılmıştır. Hazırlanan 100 ml lik numenin içerisinde bulunan metanolün, her bir karışım oranına katılma oranı %20 lik hacim miktarı kadar artırılmış ve böylece toplam altı farklı karışım elde edilmiştir. Altı adet numune için, iletim spektrum ölçümleri VNA vasıtasıyla alınmıştır. Bu ölçüm sonuçları, Şekil 5.11 da verilmiştir. Ölçümlerde, %100 saf suyun rezonans frekansı 1.92 GHz iken, %100 saf metanolün rezonans frekansı 1.93 GHz olarak bulunmuştur. Metanolün karışım içerisinde ki hacimsel oranı artarken, karışımın toplam karmaşık elektriksel geçirgenlik değerinin azalmasına yol açmıştır. Bundan dolayı rezonatörün içerisinde ortaya çıkan kapasitif etki azalmasına ve bunun bir sonucu olarak rezonans frekansının değerinin artmasına yol açmıştır. Karışım karmaşık elektriksel geçirgenlik değerinin reel kısmında görülen azalma, rezonans

frekansında yaklaşık 10 MHz lik artışa yol açmıştır. Metanol-saf su karışımlarını, sensörün ayırt edebilme duyarlılık; $0,19 \text{ MHz} \cdot \epsilon^{-1}$ dir. Tüm ölçümler ortalama $23,5^\circ\text{C}$ derece oda sıcaklığında yapılmıştır.



Şekil 5.11 Metanol-su karışımları için iletim spektrumları

Şekil 5.11 da her bir karışım oranlarının S_{21} büyüklük değerleri çıkartılmıştır. Şekil 5.12 de, rezonans frekansı ve S_{21} büyüklük değerlerinin birbirine göre değişimi sunulmuştur. Benzer şekilde, S_{21} büyüklük ve rezonans frekans değişim değerleri incelendiğinde, ölçüm hataları göz artı edildiğinde, doğrusal bir artış gösterdiği, Şekil 5.12' den söylenebilir.



Şekil 5.12 Metanol hacim oranları için rezonans frekansı ve S_{21} büyüklük değerleri.

5.4.1 Tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerinin hesaplanması

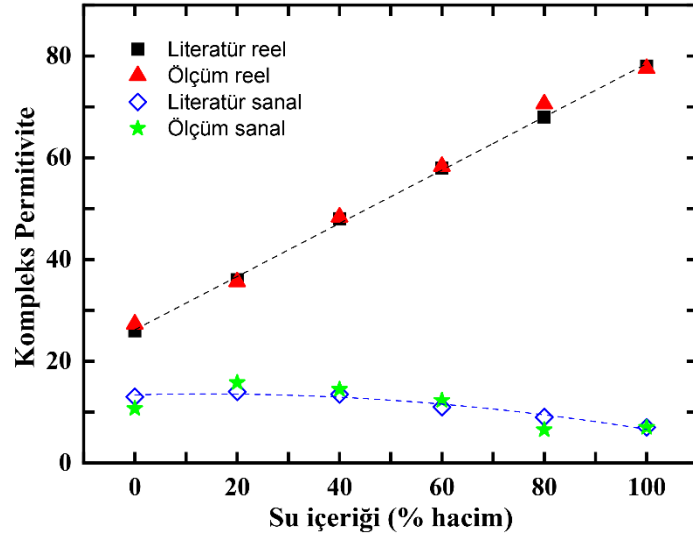
Metanol-saf su Karışımlarının karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerini tahmin etmek için, önceki bölümde yapılan tüm işlemler tekrar kullanılarak, bu bölümde metanol-saf su karışımları için aşağıda verilen denk 5.3 ile gösterilen karakteristik matris modeli kurulmuştur.

$$\begin{bmatrix} \Delta f_0 \\ |\Delta S_{21}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.000273 & -0.000199 \\ -0.034 & -0.064 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \varepsilon'_{num} \\ \Delta \varepsilon''_{num} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Denk. 5.3 de verilen karakteristik matris tersine çevrilmesiyle, bilinmeyen matris katsayıları ile rezonans frekansı ve S_{21} büyüklük değerleri denk. 5.4'de tanımlanan ilişkiden, bilinmeyen bir sıvının sanal ve gerçek elektriksel geçirgenlik değerleri direk tahmin edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \Delta \varepsilon'_{num} \\ \Delta \varepsilon''_{num} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -6077.11 & 18.95 \\ 3309.25 & -25.92 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_0 \\ |\Delta S_{21}| \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Withayachumnankul ve ark. (2013a), 1.9 GHz da saf methanol tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değeri, Şekil 9. da $\varepsilon_{\text{metanol}} = 26+i 13$, olarak verilmiştir. 3.2 GHz çalışma frekansına sahip tasarlanan sensör, saf methanol tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değeri; $\varepsilon_{\text{metanol}} = 19,37+i 13,68$ bulunmuştur. 1.9 GHz de çalışan sensörümüz için, saf etanolün ve suyun karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri sırasıyla $\varepsilon_{\text{etanol}} = 27+i 10$, ve $\varepsilon_{\text{su}} = 77,5+ i 7$ dir. Şekil 5.13 içerisinde, saf su-ethanol karışımı için karakteristik matrix denkleminde elde edilen tahmini veriler, Withayachumnankul ve ark. (2013a) dan alınan dataların karşılaştırması yapılmıştır.



Şekil 5.13 tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri ile literatür değerleri ile karşılaştırılması.

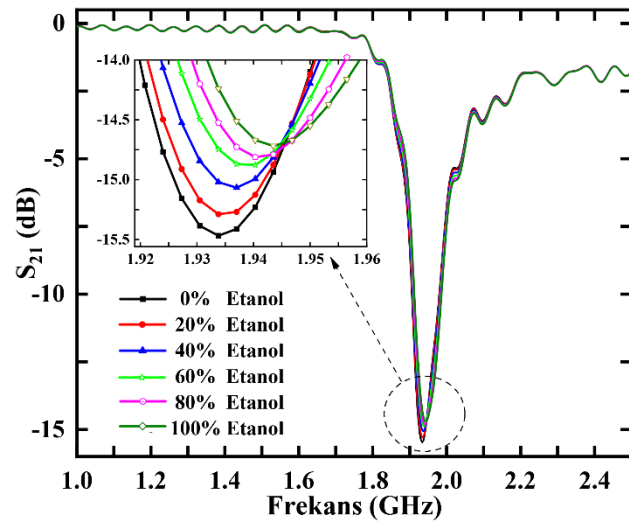
Referans alınan verilere göre tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenliğin gerçek ve sanal kısmı için standart sapma değerleri; sırasıyla 1,33 ve 2,04 olarak bulunmuştur. Standart sapma değerleri çok küçük olmasından dolayı, böylece literatür ve tahmini sonuçlar arasında çok güzel bir uyum ortaya çıkmıştır.

5.5 Metanol-Etanol Karışımları için S_{21} Spektrum Ölçümleri

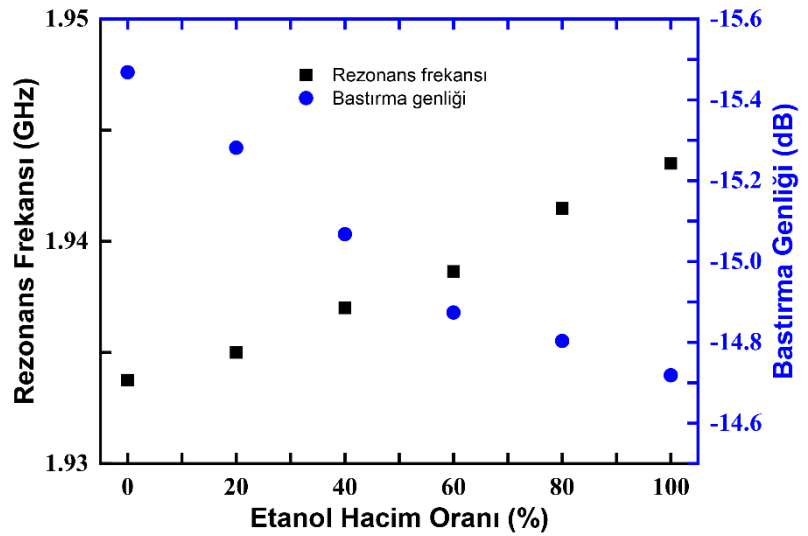
Son olarak, saf etanol ve metanolün ikili karışımlarının karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerini tahmin etmek için, iletim spektrumları S_{21} değerleri ölçülmüştür ve hesaplamalar yapılmıştır. Bildiğimiz kadar, literatürde, etanol-metanol karışımları ayırt etmek için ve karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerini tahmin etmek için, metanolzeme tabanlı sensor tarafından yürütülen deneysel çalışmalar mevcut değildir. Literatürde, Zhou ve ark. (2018), etanol metanol karışımları, simülasyon çalışmasında SRR kullanılarak ayırt edici bir çalışma ile hesaplanmış, ancak deneysel olarak hesaplamalar doğrulanmamıştır. Karışıma katılan etanolün hacimsel oranı %0 dan %100 kadar, %20 lik hacim oranı miktarı kadar artışlar yapılarak, altı adet farklı karışım oranı hazırlanmıştır. Karışımlardan elde edilen iletim spektrum ölçüm verileri, şekil 5.14 de çizdirilmiştir. Etanolün hacimsel oranı %20 oranında artarken, iletim spektrumunun rezonans frekansı, 1,93 GHz den 1,94 GHz kadar artmıştır. İletim spektrumunda, 10 MHz lik bir frekans kayması oluşmuştur. Etanol-metanol

karişımlarını, sensörün ayırt edebilme hassasiyeti; $0,52 \text{ MHz} \cdot \epsilon^{-1}$ dir. Etanol-metanol karişımındaki etanol miktarı arttıkça, S_{21} 'in büyüklüğü azalır ve rezonans daha yüksek frekanslara çıkar. Etanolün geçirgenliğinin gerçek kısmının metanolden daha düşük olmasından dolayı, rezonans frekansı sağı doğru kayması da mantıklıdır. Tüm ölçümler ortalama $23,5^\circ\text{C}$ derece oda sıcaklığında yapılmıştır.

Karişım içerisinde etanolün hacimsel oranı artıkça, iletim spektrumu S_{21} 'in rezonans bandı frekansı artarken ve S_{21} büyüklüklerinin azaldığı Şekil 5.15 'de gösterilmiştir.



Şekil 5.14 Metanol-Etanol karişımları için iletim spektrumları.



Şekil 5.15 Metanol-etanol karişımları için rezonans frekansı ve S_{21} büyüklük değerleri.

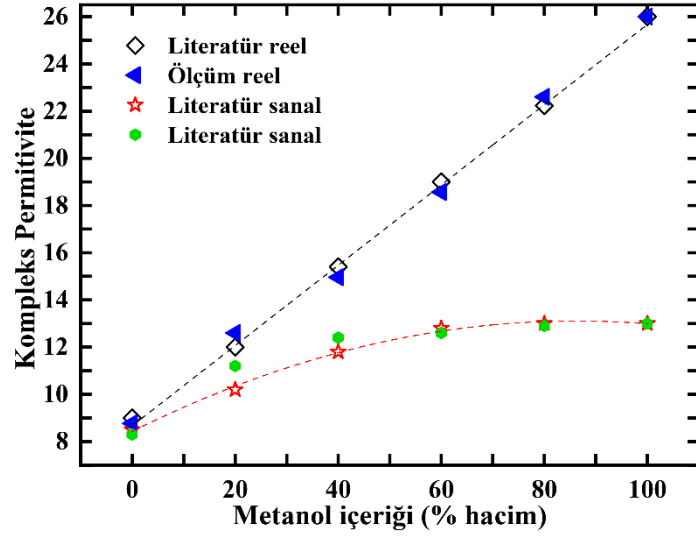
5.5.1 Tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerinin hesaplanması

Etanol-metanol karışımlarının karmaşık geçirgenlik değerleri, denk. 3.1 de, sunulan ampirik model aracılığıyla hesaplanmıştır. Bao ve ark. (1996) da verilen Şekil 4'ten ilgili parametreler Debye modeli kullanılarak çıkartılmış ve rezonans ile S_{21} büyüklük değerleri birlikte en küçük kareler yönteminde kullanılarak; bilinmeyen karakteristik matris katsayıları bulunmuştur ve denk. 5.5 de gösterilmiştir. Karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri, rezonans frekansı ve S_{21} büyüklük değerlerindeki değişime bağlı ilişki denklem 5.6 da verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \Delta f_0 \\ \Delta |S_{21}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.00041 & -0.00057 \\ -0.05607 & 0.04652 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \epsilon'_{num} \\ \Delta \epsilon''_{num} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \epsilon'_{num} \\ \Delta \epsilon''_{num} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 906.1 & 11.1 \\ 1092.2 & -7.9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_0 \\ \Delta |S_{21}| \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Bao ve ark. (1996), Şekil 1.a da 1.9 GHz için metanol ve etanolün karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri, sırasıyla, $\epsilon_{metanol} = 26+i 13$ ve $\epsilon_{etanol} = 9+i 8,5$ olarak çekilmiştir. Denk. 5.6 da verilen karakteristik matris yöntemi kullanılarak, tahmini metanol ve etanolün karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri; $\epsilon_{metanol} = 26+i 13$ ve $\epsilon_{metanol} = 9+i 8,2$ olarak bulunmuştur. Bao ve ark. (1996), Şekil 1.a dan alınana verilerle tahmini değerleri, Şekil 5.16 de karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.16 Tahmini etkin karmaşık elektriksel geçirgenlik değerlerinin literatür değerleri ile karşılaştırılması.

Tahmin ve literatür reel ve sanal değerleri arasında standart sapma değerleri, sırasıyla 0,43 ve 0,90 olarak bulunmuştur. Reel ve sanal değerler arasında çok güzel bir uyum çıkması sensör ölçümlerinin doğruluğunu göstermiştir.

5.6 WR-229 Dalga kılavuzu ile Mikroşerit tabanlı metalmalzeme tabanlı, kimyasal sıvı sensör tasarımlarının karşılaştırılması

Dalga kılavuzu tabanlı sıvı sensör tasarımı, 3,4 ml sıvı kullanılarak, ölçüm yapabilmektedir. Bu sensörün avantajı çok daha fazla tekrarlı ölçümün ortancası alınarak ölçüm sonucu bulunmaktadır. Bu zorluğa rağmen daha yüksek duyarlılığa sahip bir ölçüm sunmaktadır. Mikroşerit mimarisine dayanan tasarım, çok çok küçük sıvı miktarını ayırt edebilme imkânı sunarken, yüksek duyarlılık yerine çok küçük bir duyarlılık göstermektedir. Bu sensörün aynı karışım oranı için yapılan tüm ölçüm sonuçları aynı kararlılıkta rezonans frekansı vermektedir. İster endüstriyel isterse sağlık alanında olsun sürekli takip altında tutulması gereken sıvıların takip edileme imkânı sunmaktadır.

6. METAMALZEME TABANLI NEM SENSÖRÜ TASARIMI

Havadaki su buharına nem denir. Havdaki su baharı miktarı, bağıl nem adı verilen bir parametre ile belirlenir. Nem su deviniminin en önemli parçasıdır. Bağıl nem, sabit sıcaklıkta, 1 m³ hava içerisinde bulunan su buharının, maksimum taşıyabileceği su buharı miktarına olan yüzdelik oranıdır (Gunawardhana vd., 2017).

Bu çalışmada, ortamın bağıl nemini ayırt edebilme yeteneğine sahip metamalzeme tabanlı bir sensör tasarımı yapılmış ve bağıl nem değişiminin sensörü oluşturan malzemeler üzerindeki etkisini incelenmiştir. Literatürde, çok sayıda ayırık halka ile fraktal geometrik yapısına sahip metamalzeme tabanlı rezonatör tasarımına rastlamak mümkündür. Onlarca geometrik şekil içerisinde, bağıl nemi ayırt edebilmek için en uygun rezonatör geometrisini ve yapının alt taşıyıcı seçmek önemlidir. Literatür araştırmalarında, rezonatör olarak güçlü kapasitif etki, elektrik indüktif-kapasitif (Electric inductance-capacitance ELC) rezonatörü sensör tasarımında seçilmiştir. Sensör tasarımında en önemli konulardan biriside alt taşıyıcı seçimidir; saydam, esnek, ucuz, neme ve korozyona karşı dayanıklı özelliklere sahip olmasından dolayı polikarbonat malzemesi kullanılmıştır. Mikrodalga frekanslarda nem sensörü yapabilmek için su tutma özelliğine sahip ticari olarak satılan Kapton HN bant seçilmiştir. Ortamda bulunan bağıl nem miktarı, artar ve azılırken Kapton HN bandının tuttuğu su buharı miktarı da değişmiştir. Böylece, bandın dielektrik sabitinin değişmesine neden olmuştur. Kapton HN bandın dielektrik sabitinin değişimi rezonans frekansı üzerinde bir kayma ortaya çıkmıştır. Ortamdaki bağıl nem değişimini algılama yeteneği üç boyutlu ticari bir elektromanyetik benzetim programı olan CST Microwave Studio programı kullanılarak incelenmiştir.

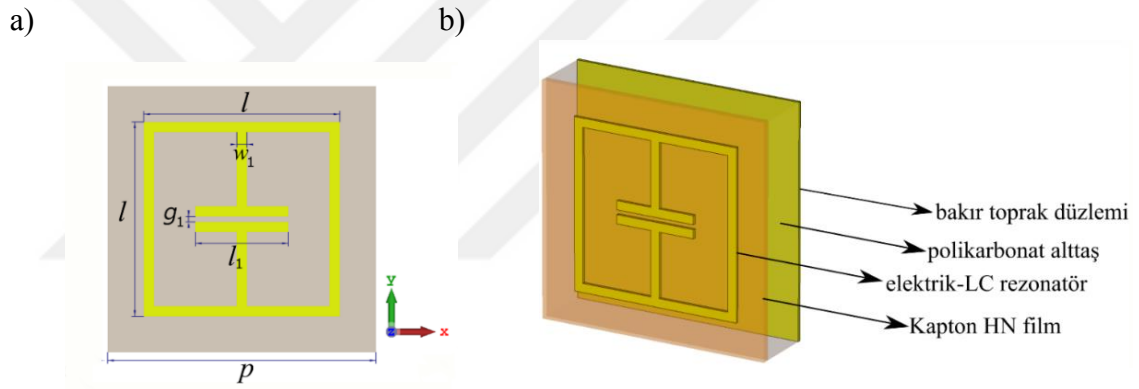
6.1 Tasarlanan Metamalzeme Yapısı

Bu çalışmanın tasarımında, elektromanyetik soğurucu özelliğine sahip, elektrik-LC rezonatör tabanlı bir elektromanyetik metamalzeme yapısı kullanılmıştır. EM metamalzeme tabanlı sensör yapımında, elektrik-LC rezonatörün seçilmesinin temel nedeni; elektrik-LC yapısının geometrik özelliğinden dolayı, gelen elektromanyetik

alanın taşıdığı elektrik alan ayrık bölge üzerinde çok güçlü kapasitif bir bölge oluşturur(Landy vd., 2008; Schurig vd., 2006; Withayachumnankul vd., 2010; Zayed vd., 2015). Güçlü kapasitif bir bölgenin varlığı metamalzeme tabanlı sensörün, sensör duyarlılığı üzerinde büyük bir katkı sağlayacağı öngörülmüştür. Bu tasarıma ait üç boyutlu geometrik yapı ve yapıya ait parametreler Şekil 6.1a' da gösterilmiştir. Elektromanyetik metamalzeme tabanlı sensörün kare şeklinde ki birim hücresinin kenar uzunluğu p parametresi ile gösterilir ve 5,2 mm değerindedir. Alt taş olarak 1,25 mm kalınlığında polikarbonat malzemesi kullanılmıştır. Alt taşın sahip olduğu iki geniş yüzeyden birisinin üzerine Elektrik-LC rezonatörü diğer geniş yüzeyi üzerine de soğurucu özelliği kazandırmak için yüzeyinin tamamı, bakır katman ile kaplanmıştır. Rezonatör ve topraklama hattının yapımında iletken olarak bakırın kullanılmasını nedeni; yüksek iletkenlik özelliğinin yanı sıra düşük üretim maliyeti sağlamasından dolayı tercih edilmiştir. Bakır, 5.8×10^8 S/m iletkenliğe ve 35 μ m kalınlığa sahiptir. Şekil 1(a)' da elektrik-LC rezonatörünü oluşturan şeritin genişliği ve boyu, sırasıyla $w_1=0,2$ mm ve $l=3,8$ mm; güçlü kapasitif etki sağlayan şeritin kol uzunluğu ve kollar arası boşluk, sırasıyla, $l_1=1,8$ mm ve $g_1= 0,10$ mm'dir. Şekil 1(b)'de elektromanyetik metamalzeme tabanlı sensörün ön yüzeyini kaplayan Kapton HN bandın kalınlığı 0,1 mm'dir.

Elektromanyetik metamalzeme tabanlı bağıl nem algılama sensörü, üç farklı malzemeyi her katmana farklı bir malzeme yerleştirilerek, dört katmanlı kompozit bir ortam haline getirilmiştir (Şekil 6.1b). Elektromanyetik dalgalar ile ilk karşılaşan katman Kapton HN bandıdır. Kapton HN bandı neme karşı duyarlı bir malzemedir. Bu nedenle sahip olduğu karmaşık elektriksel geçirgenlik değeri, ortamda bulunan bağıl nem değişimiyle birlikte değişmektedir. Bir alt katman olarak elektrik -LC rezonatör yapısı yer almıştır. Bu katman bulunan rezonatör gelen elektromanyetik dalga ile etkileşime girmiştir. Rezonatör üzerinde, $x=0$ düzlemine göre ayna simetrisi özelliğine sahip olduğundan, rezonatörün merkezinde net bir manyetik alan oluşumu gözlemlenmez (Withayachumnankul vd., 2010). Yalnızca, rezonans frekansına katkı, elektrik-LC rezonatörü üzerinde yer alan kapasitif kollar arasında vuku bulan kapasitif etki ile beraber, bakır toprak düzleminin rezonatör oluşturan bakır şerit hatlar ile etkileşmesinden indüktif bir etkiden kaynaklıdır. Ortaya çıkan bu etkileşimler belirli bir

frekans aralığında üst üste binerek bir rezonans oluşmasını ve bu rezonans frekansı aralığında dalga iletiminin en aza inmesini yol açmaktadır. Elektrik-LC rezonatör ile bakır toprak düzlemi arasında bulunan üçüncü katmanda polikarbonat alt taş malzemesi kullanılmıştır. Alt taşın kalınlığı ve karmaşık dielektrik sabit değerlerinin elektromanyetik dalgayı soğurma üzerinde çok önemli bir etkisi vardır(Withayachumnankul vd., 2010). Polikarbonat malzemesinin dielektrik sabiti, CST Microwave Studio programı içinde yer alan malzeme kütüphanesinden alınmıştır. Dielektrik sabiti 2,9; kayıp tanjant parametresi 0,01'dir. Bağıl nem değişimi, Âmin ve ark. (2013) çalışması içerisinde, deneysel olarak, Kapton HN bandının etkin karmaşık dielektrik sabitinin gerçel kısmı ve kayıp tanjant değeri üzerindeki etkisi, sırasıyla, $3,05 + 0,008 \times \%BN$, $0,0015 + 0,000036 \times \%BN$ olarak elde edilmiştir.

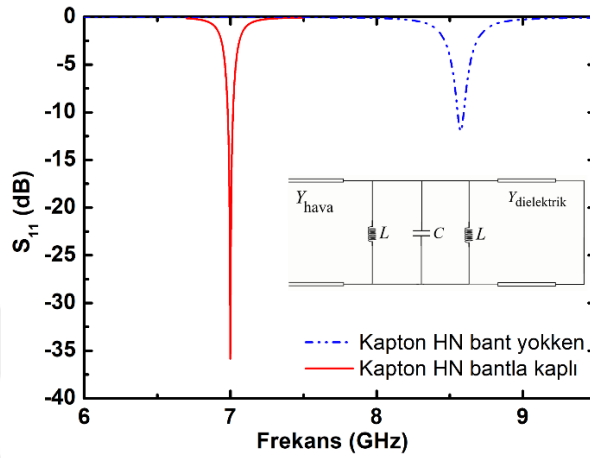


Şekil 6.1 Bağıl nem algılama sensör hücresi a) önden ve b) üç boyutlu temsili görünüşü

6.2 Bulgular ve Tartışmalar

Benzetim programı kullanılarak bağıl nemi algılamak için tasarlanan, elektromanyetik metamateryal tabanlı sensör üzerinde bulunan, Kapton HN bandının olmadığı durumda, 8,6 GHz frekansta, -11,94 dB'de yansıma katsayısına sahip olduğu görülmüştür. Kapton HN bandının var olduğu durumda, rezonans frekansı 8,6 GHz'den 7,0 GHz kayarken, yansıma katsayısı -11,94 dB'den -36,0 dB'ye düşerek güçlü bir tepki ortaya çıkarmıştır. Bağıl nem oranının %0 olarak kabul edildiği bir ortam için, nem sensörü üzerinde Kapton HN bandının var olup olmadığı tasarımlardan elde edilen yansıma spektrum verileri Şekil 6.2'de karşılaştırılmıştır. Metamateryal sensörün birim hücresinin boyu ve kalınlığı, rezonans frekansının dalga boyuna göre, elektriksel boyutu

sırasıyla, $p=\lambda_0/8,2$ ve $\lambda_0/25,2$ ’ dir (λ_0 , rezonans frekansının boşluktaki dalga boyu). Bu hesaplamalardan, metamalzeme tabanlı bağıl nem sensörünün elektriksel olarak oldukça küçük boyuta sahiptir. Elektromanyetik Metamalzeme tabanlı sensörün arka yüzeyi tamamen bakırla kaplı olmasından dolayı, gelen elektromanyetik dalgaların hiç birisi sensörü geçememektedir. Yansıyan dalgalarda da 7 GHz civarında %99,9 oranında soğurma gerçekleşmiştir.



Şekil 6.2 Soğurucu tabanlı metamalzeme sensörün Kapton HN bant yokken ve kaplı iken yansıma spektrumları

Elektromanyetik metamalzeme sensörü üzerinde bulunan Kapton HN bandı çıkarıldığında, elektrik-LC rezonatör geometrik tasarım bileşenine sahip metamalzeme yapısının eş değer devre şeması Şekil 6.2 içerisinde gösterilmiştir. $Y_{dielektrik}$ ve Y_{hava} , sırasıyla, polikarbonat alt taşın ve havanın admitanslarını ifade etmektedir. En alt katmanın bakır olmasından dolayı, $Y_{dielektrik}$, alt taş admintansından sonra gelen devre devamı kısa devre ile bitirilmiştir. Şekil 1.a)’ da verilen rezonatör yapısına uygun eşdeğer devre modeli için, C ve L sembolü ile sırasıyla gösterilmiştir. Kapasitans değeri, kapasitif kollar arasında ki aralık yoluyla eşdeğer devreye katkı sunarken. Benzer şekilde indüktans değeri L de, farklı kollar üzerinden iki adet indüktif bir katkı sağladığı eş değer devre üzerinde görülmektedir. Eş değer devre üzerinde sırasıyla verilen, indüktans L, kapasitans C, indüktans L, devre elemanları bir birine paralel bağlıdır ve elektrik-LC rezonatörün rezonans frekansı $f = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ formülü ile elde edilir (Withayachumnankul vd., 2010). Elektrik-LC rezonatörü için yaklaşık kapasitans değeri, denklem 6.1 formülü ile belirlenmektedir(Luu vd., 2016).

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_{hava} \frac{w_1 h_m}{g_1} + \varepsilon_0 \varepsilon_p \frac{c_1 \cdot S}{h_p} \quad (6.1)$$

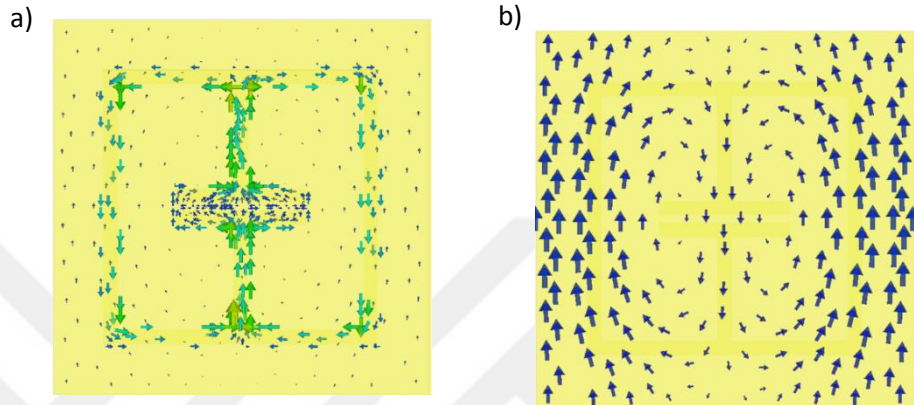
Bu denklemde verilen parametreler, c_1 , S , ε_0 , ε_{hava} , ε_p , h_p , h_m , sırasıyla, geometrik bir etki faktörü, rezonatörün yüzey alanı, boş uzayın elektriksel geçirgenliği, havanın ve polikarbonatın dielektrik sabiti, bakırın kalınlığı ve polikarbonatın altta kalınlığıdır (Luu vd., 2016; J. Zhou vd., 2006). Kapasitans değeri, kapasitif kollar arasındaki uzaklık g_1 ve kolların yüzey genişliği w_1 ile hesaplanırken, hesaplama içerisine toprak düzlemi ile elektrik-LC rezonatörün etkileşimi ile ortaya çıkan kapasitif etkide dikkate alınmıştır. Elektrik alan dağılımına bakıldığında, birim hücreler arası mesafenin fazla olması ve rezonatör kollarının küçük olmasından dolayı, rezonatörler arası kapasitif olarak zayıf bir etkileşim ortaya çıkmıştır. Bu nedenle kapasitans denklemi içerisine dahil edilmemiştir. Elektrik-LC rezonatörü için yaklaşık indüktans değeri, denklem 6.2 sunulan formülü ile tanımlanmıştır (Dhouibi vd., 2012). ' μ_0 ', boş uzayın manyetik geçirgenliğidir.

$$L = \mu_0 h_p \left(\frac{2w_1}{l} + \frac{2l}{w_1} + \frac{l - 2w_1 - g_1}{w_1} \right) \quad (6.2)$$

Elektrik- LC rezonatör tabanlı bir elektromanyetik metamateryalin, yaklaşık bir eşdeğer devre modeli kullanılarak yürütülen hesaplamalarda, rezonans frekansı 8,38 GHz olarak bulunmuştur. CST Microwave Studio kullanıldığında, rezonans frekansı 8,57 GHz bulunduğu hatırlarsak, iki sonuç arasında 0.19 GHz kadar bir frekans farkı ortaya çıkmıştır. Eşdeğer devre modeli içine, öngörülemeyen elektrik alan çizgilerinden kaynaklı kapasitans etkisi katılamadığından dolayı rezonans frekansları arasında bir farklılık meydana gelmiştir.

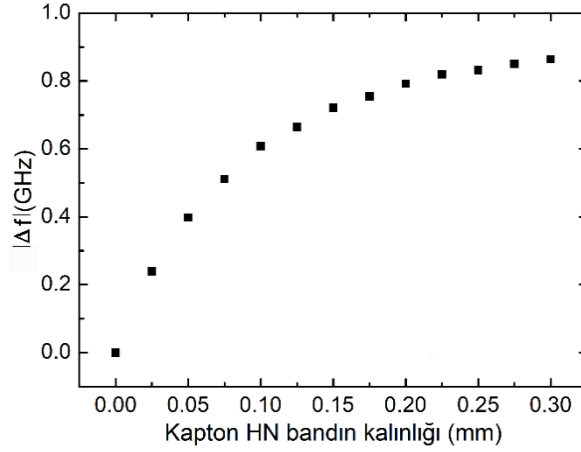
Rezonans durumunda, Kapton HN bantlı rezonatör yapısı ile bakır topraklama zemini üzerinde ortaya çıkan akımları sırasıyla Şekil 6.3.a ve b gösterilmiştir. Şekil 6.3.a' da, $x=0$ düzlemine göre yüzey akımları simetrik bir yapıya sahip olduğundan net bir manyetik akı oluşumuna izin vermezler (Withayachumnankul vd., 2010). Şekil 6.3.a ve b' ye bakıldığında ortaya çıkan yüzey akım dağılımları birbirine göre zıt olduğu aşikardır. Ortaya çıkan yüzey akım dağılımlarının zıtlığı, birim hücrenin merkezi

üzerinde toplam bir manyetik moment ortaya çıkmasına neden olur(Ebrahimi vd., 2014a; Li vd., 2011; Tao vd., 2008). Ayrıca, rezonatörün ayırık kısımlarından kaynaklı bir elektrik dipol momentini de ortaya çıkarmıştır. Elektrik ve manyetik momentler arasında gerçekleşen etkileşim sonucu, 7,0 GHz de güçlü bir rezonans frekansı ortaya çıktığı görülmüştür.



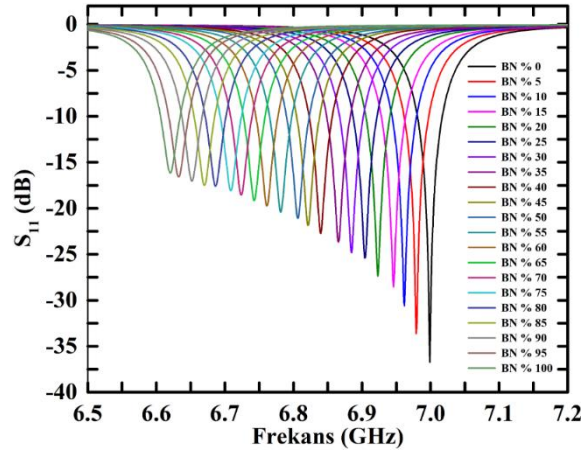
Şekil 6.3 a) Elektrik-LC rezonatörü, b) bakır topraklama üzerinde akım dağılımları.

Kapton HN bant kalınlığı 0,0 mm'den 0,3 mm' ye kadar 0,05 mm artış adım aralığı ile artırıldığında, rezonans frekansında nasıl bir değişim olduğu bu kısımda incelenmiştir. Kapasitans kolları çevresinde ortaya çıkan elektrik alan saçakları, kapton HN bant kalınlığının artışıyla birlikte daha fazla içeride kapton HN bandının etkin dielektrik sabiti ile etkileşmesinden dolayı, artan kapasitans değerini, rezonans frekansında azalmaya neden olmuştur. Kapton HN bandının bant kalınlığının yeterli miktarda artırıldığında, elektrik alan saçaklanmaları dış alana doğru zayıflamaya başlarlar. Bu nedenle, kapasitif alanın değeri logaritmik olarak yavaşlayarak artmasına neden olmuş ve rezonans frekansının tıpkı logaritmik hızda yavaşlayarak değiştiği Şekil 6.4' de gösterilmiştir. Bant kalınlığı 0,3 mm geçtiğinde frekanstaki değişim ihmal edilecek kadar küçük boyutlara ulaşmıştır.



Şekil 6.4 Kapton HN bant kalınlık artışının rezonans frekansı üzerindeki değişiminin etkisi.

Benzetim programı içerisinde kapton HN bandının bant kalınlığı 0,1 mm olacak şekilde belirlendi. Bağlı nem oranının değişimi, kapton HN bandının dielektrik sabiti üzerinde etkisi belirlenerek yapılan hesaplamalarda, elde edilen yansıma spektrum verileri Şekil 6.5’de gösterilmiştir. Bağlı nem miktarı %0’ dan %100’ e kadar, yüzde %10’luk artış adımı ile değişirken, kapton HN bandının dielektrik sabitini ve kayıp tanjant değerini artırmış, bu nedenle de rezonans frekans 7,00 GHz’ den 6,62 GHz’e kadar azalmıştır.

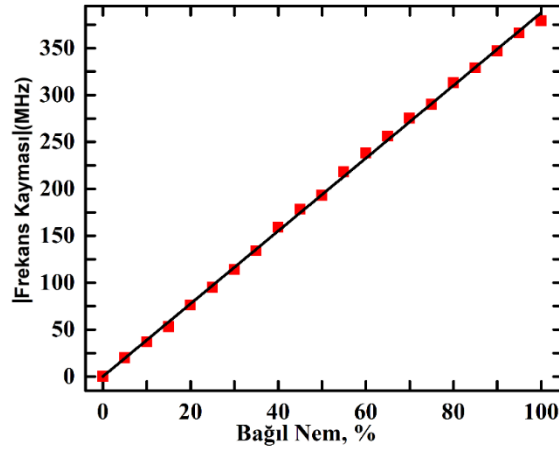


Şekil 6.5 Bağlı nem değeri değişimlerine karşı elde edilen yansıma spektrumları.

Bağlı nem değişimine göre rezonans frekansında meydana gelen kayma değerleri, Şekil 6.6’da verilmiştir. Sensörün bağlı nem değişimini ayırt edebilme kabiliyeti sensörün sahip olduğu duyarlılığı göstermiştir. Sensörün duyarlılığı, bağlı nem oranında yaşanan %1’lik bir değişim değerinin rezonans frekansında ne kadarlık bir kayma yarattığının

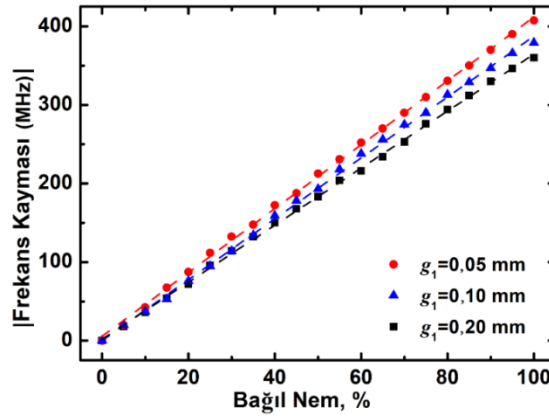
bir ölçüsüdür. Elde edilen simülasyon sonuçlarından, elektromanyetik metamalzeme tabanlı sensörünün bağıl nem algılama duyarlılığı 3,87 MHz/BN olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuç, elektrik-LC rezonatörün yalnızca ayırık halka kısmına Kapton HN bandının yerleştirildiği ve soğurucu özelliği olmayan metamalzeme bağıl nem sensörünün (Md Amin vd., 2013) sahip olduğu bağıl nem duyarlılığından yaklaşık 2,3 kat büyüktür. THz frekanslarda, su buharını tutmak için yüzeyi ipek protein fibroin ile kaplı elektromanyetik metamalzeme tabanlı bağıl nem sensör, 0,22 GHz/BN büyüklüğünde bir duyarlılığa sahip olduğu rapor edilmiştir (Kim vd., 2018). Çalışma içerisinde elde edilmiş bu değer ilk an gözümüze büyük görünse de THz frekans aralığına göre çalışıldığından mukayese yapmak doğru değildir. Emekçi ve çalışma arkadaşları, ayırık halka rezonatör tasarımına sahip soğurma özelliği olmayan elektromanyetik metamalzeme yoluyla ortamın bağıl nem değerini algılamak için, rezonatör alt taşları arasına bağıl nem değeri %10,5 den %21,0 kadar değişen nohut unu yerleştirilmiştir. Dalga kılavuzu içinde yapılan sensör çalışmalarında, ortamın bağıl nem değişimine karşı sensör tasarımının göstermiş olduğu duyarlılığın deney ve simülasyon sonuçları, sırasıyla, 20,76 MHz/BN, 12,57 MHz/BN dir (Ekmekci vd., 2019). Nohut onu, çalışmamızda kullandığımız Kapton HN polimit filmi kadar, ortamdaki bağıl nem değişimine çok da duyarlı bir malzeme değildir. Nohut unu belirli bir süre nemli ortamda bekletildikten sonra ölçüm yapılarak, nemlilik hakkında fikir sahibi olunabilir.

Bağıl nem değişimi ile rezonans frekansında ortaya çıkan değişme miktarı doğrusal biçimde olması, tasarlanan elektromanyetik metamalzeme tabanlı bağıl nem sensörünün uygulanabilirlik özelliğine sahip olduğu göstermiştir. Bu bilginin ışığında, herhangi bir ortamda bilinen bir referans değeri üzerinden, ortaya çıkabilecek tüm bağıl nem değişim değerleri kolayca hesaplanmıştır.



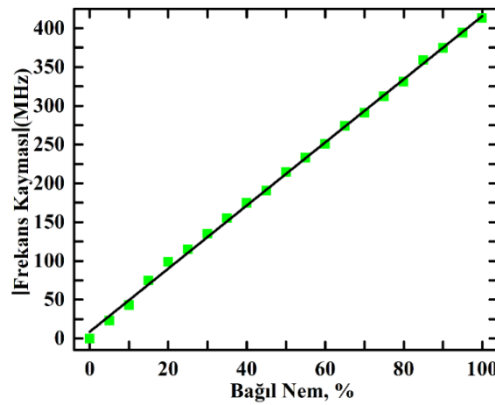
Şekil 6.6 Nem değer değişimlerine karşı elde edilen rezonans frekans değişimi

Bu bölümde, kapasitif kollar arası ayırık genişliği g_1 'in sahip olduğu boyut değişiminin bağıl nem sensörü duyarlılığına etkisi araştırılmıştır. Yapılan çalışmada, g_1 parametresinin parametrik tarama adımları artırıldığında sırasıyla, 0,05, 0,100, 0,125, 0,150, 0,200 mm olduğunda, karşı gelen duyarlılık değerleri 4,07 MHz/BN, 3,87 MHz/BN, 3,73 MHz/BN, 3,70 MHz/BN, 3,60 MHz/BN elde edilmiştir. g_1 parametresinin artım aralığı göre haya payları sırasıyla 1,71 ,1,68 ,1,62, 1,43, 1,36 olarak bulunmuştur. g_1 parametresi büyüdükçe hata payı da azalmaya başlamıştır. g_1 'in parametrik değerleri, sırasıyla, 0,05, 0,10, 0,20 mm olduğunda, mukayese olması açısından, duyarlılık grafikleri Şekil 6.7'de verilmiştir. Ayırık bölgenin aralık mesafesinin küçülmesi, bölge içerisinde daha fazla miktarda elektrik alan enerjisinin depolanmasına neden olmuştur. Bundan dolayı, sensörün duyarlılığının artmasını sağlamıştır. Metamalzeme tabanlı bağıl nem sensörü, literatür çalışmaları ile karşılaştırıldığında ilk defa rezonatörün ayırık alanın küçültülmesi ile, büyüyen elektrik alan enerjisinin sensör duyarlılığına katkı sağladığı gösterilmiştir. Geometrik parametre değerleri ile rezonans frekansında gözlemlenen kayma değerinin doğrusal olarak değişmesi istenen bir özelliktir.



Şekil 6.7 g_1 parametre değerlerine karşı rezonans frekansı kayması üzerindeki etkisi

Bu bölümde, kapasitif kollar arasında aralık $g_1=0,05$ mm iken, kapton HN bandın bant kalınlığı $300\ \mu\text{m}$ alındığında bağıl nem değişiminin rezonans frekansı üzerinde ki etkisi incelenmiştir. Şekil 6.8’de, bağıl nem değişiminin rezonans frekansı üzerindeki etkisi gösterilmiştir. $g_1=0,05$ mm ve bant kalınlığı $0,3$ mm olarak alındığında, duyarlılık $4,13$ MHz/BN olarak elde edilirken, $g_1=0,05$ mm ve bank kalınlığı $0,1$ mm olduğunda elde edilen duyarlılık değeri $4,07$ MHz/BN bulunmuştur. . $g_1=0,05$ mm ve bant kalınlığı $0,3$ mm olduğunda hata payı $1,86$ olarak bulunmuştur . Kapton HN bandının bant kalınlığının artırılması, bağıl nem sensörünün duyarlılığı üzerinde önemsiz derecede bir katkı sağladığı göstermektedir. Kapton HN bandının kalınlığının sensörün bağıl nem duyarlılığını etkilememesinin nedeni, bağıl nem değişiminin, rezonatör yüzeyi üzerinde ortaya çıkan elektrik alan ve yüzey alan dağılımı üzerinde neredeyse aynı etkileşim meydana getirmesinden kaynaklıdır.



Şekil 6.8 Bağıl nem değişimine karşı rezonans frekansındaki kayma miktarı ($g_1 = 0,05$ mm ve Kapton HN bant kalınlığı $0,3$ mm).

7. SONUÇLAR

Tez çalışmaları dahilinde metamalzeme tabanlı sensör tasarımları ve araştırmaları gerçekleştirilmiştir. Kullanılan malzeme ve yöntemlerin, araştırma grubumuzda ile daha iyi sensör tasarımlarının yapılabilmesi için iyi bir başlangıç düzeyi oluşturacağı öngörülmektedir.

Metamalzeme sıvı sensör tasarımları için farklı üretim teknikleri kullanılmıştır. Bölüm 4' de tasarlanan metamalzeme tabanlı sıvı sensör, WR-229 dalga kılavuzu 2,577- 5,154 GHz çalışma frekans aralığına uygun olacak şekilde, daha önce literatürde var olmayan eş-topolojik halka bileşenlerinden oluşmaktadır. Topolojik konfigürasyonu, C ve elektrik-LC rezonatör yapılandırmasına benzetilmiş olsa da kendisine özgü yenilikçi bir tasarım geliştirilmiştir. Sensör tasarımında ilk kez alt taş olarak polikarbonat malzemesi kullanılmıştır. Polikarbonat malzemesinin alttaş olarak kullanılan diğer malzemelere göre sunduğu eşsiz özellikler sayesinde daha ucuz ve daha büyük hassasiyete sahip sensörler yapılabileceği gösterilmiştir. Etanol-su, metanol-su ve etanol-metanol karışımlarının ölçümlerinden sırasıyla, 0,68 GHz (680 MHz), 0,37 GHz (370 MHz) ve 0,31 GHz'lik (310 MHz) frekans kayması elde edilmiştir. Sensörün yukarıda belirtilen karışımları için duyarlılıkları $9,8 \text{ MHz} \cdot \epsilon^{-1}$, $7,4 \text{ MHz} \cdot \epsilon^{-1}$ ve $15,9 \text{ MHz} \cdot \epsilon^{-1}$ olarak bulunmuştur. Etanol-su ve metanol-su karışımları için, ölçüm sonuçlarına dayalı tahmini karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerleri literatür değerleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın bu kısmında yapılan çalışmalardan derlenen bilgiler SCI indeksli, 'Sensors and Actuators A: Physical' dergisinde bir makale olarak yayımlanmıştır.

Bölüm 5'de, mikroşerit mimarisine sahip Minkowski benzeri fraktal rezonatör'lü bir sıvı sensör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sensörün çalışma frekansı 1,9 GHz olacak şekilde optimize edilerek, sıvıların frekansa bağımlı dağılımı azaltılmıştır. Minkowski benzeri fraktal rezonatör tasarımı, literatürde var olmasına karşı, farklı parametrik değerler ve simetri kırılıp asimetrik özellik kazandırılarak özgün bir mimarı tasarım sunulmuştur. Mikroşerit hattı üzerinde açılan DMS yapısının sunmuş olduğu etkiyle, S_{21} için güçlü bir bastırma çukuru (geçiş kaybı, insertion loss) oluşturulmuştur. Sensörün

ortasında açılan çok küçük bir delik boyunca geçen ince kılcal bir boru vasıtasıyla karışımların akışı sağlanmıştır. Etanol-su, metanol-su ve etanol-metanol için duyarlılıklar; $0,2 \text{ MHz} \cdot \epsilon^{-1}$, $0,19 \text{ MHz} \cdot \epsilon^{-1}$ ve $0,52 \text{ MHz} \cdot \epsilon^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Duyarlılık değerinin nispeten küçük olmasının nedeni, sensör içerisinde geçen sıvının miktarının az olmasından kaynaklıdır. Tahmini karmaşık elektriksel değerleri hesaplanarak literatür değerleri ile karşılaştırılmıştır. Literatür içerisinde ilk kez etanol-metanol karışımları için tahmini karmaşık elektriksel geçirgenlik değerleri hesaplanmıştır. Bu kısımda yapılan çalışmalardan derlenen bilgiler SCI indeksli bir dergiye makale olarak gönderilmiş olup ve yayımlanması beklenmektedir.

Bölüm 6’ da, havadaki bağıl nemin oranını ayırt edebilen metamalzeme tabanlı bir sensör tasarımı, CST Microwave benzetim programı ile yapılmıştır. Sensör tasarımında neme karşı çok dayanıklı polikarbonat malzemesi alttaş olarak kullanılarak alttaşın ön yüzü nem tutucu özelliği ile bilinen Kapton HN bandı ile kaplanmıştır. Metamalzeme tabanlı EM dalga soğurucu yüksek hassasiyete sahip bir sensör tasarımı nispeten güçlükler içerir. Sensör tasarımında elektrik-LC rezonatörü sağlamış olduğu yüksek kapasitif bölgeden dolayı bu çalışma içerisinde tercih edilmiştir. Literatürde, ELC çalışmaları çok sayıda var olmasına karşın, bu çalışmada kullanılan tasarım parametreleri kendine özgü değerlere sahiptir. Kapton HN bandın 0,1 mm’ lik bant kalınlığı için ortamın bağıl nem %0’dan %100 olana kadar, %10’luk adım aralıkları ile artırılmıştır. %1’lik nem değişimine karşılık gelen duyarlılık 3,87 MHz/BN olarak bulunmuştur. Kapasitif kollar arası açıklığın, sensör duyarlılığı üzerine etkisi araştırılmış, açıklık büyüdükçe sensör duyarlılığının azaldığı görülmüştür. En yüksek duyarlılık, g_1 parametre değeri 0,05 mm olduğunda 4,07 MHz/BN elde edilmiştir. Bant kalınlığının artırılmasının, sensörün duyarlılığı üzerine önemsiz bir etkisi olduğu görülmüştür. Bu kısımda yapılan çalışma, „Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji dergisinde yayımlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Abdulkarim, Y.I., Deng, L., Altıntaş, O., Ünal, E., Karaaslan, M. 2019. Metamaterial absorber sensor design by incorporating swastika shaped resonator to determination of the liquid chemicals depending on electrical characteristics. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 114, 113593. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2019.113593>
- Asadi, E., Askari, H., Behrad Khamesee, M., Khajepour, A. 2017. High Frequency nano Electromagnetic self-powered sensor: Concept, modelling and analysis. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 107; 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.04.019>
- 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*, 129(9), 094506. <https://doi.org/10.1063/1.4978012>
- Amin M. E., Karmakar, N., Winther-Jensen, B., 2013. Polyvinyl-Alcohol (PVA)-Based RF Humidity Sensor In Microwave Frequency. *Progress In Electromagnetics Research B*, 54;149-166.
- Bao, J.Z., Swicord, M.L., Davis, C. C. 1996. Microwave dielectric characterization of binary mixtures of water, methanol, and ethanol. *Journal of Chemical Physics*, 104(12); 4441-4450. <https://doi.org/10.1063/1.471197>
- Caloz, C., Itoh, T. 2005. *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications: The Engineering Approach*. Wiley, ISBN-13: 978-0-471-66985-2.
- Capolino, F. 2009. *Theory and Phenomena of Metamaterials*. CRC Press, ISBN 978-1-4200-5425-5.
- Chris B. 2008. *RF Circuit Design*. Elsevier, ISBN: 9780080553429.
- Cheng, Y., Mao, X.S., Wu, C., Wu.L., Gong, R.Z. 2016. Infrared non-planar plasmonic perfect absorber for enhanced sensitive refractive index sensing. *Optical Materials*, 53;195-200.
- Dhar, S.K., Bhunia, S. S., Mukherjee, N. 2014. Interference aware scheduling of sensor in IoT enabled health-care monitoring system. *Proceedings-4th International Conference on Emerging Applications of Information Technology, EAIT*, 152-157.
- Dhouibi, A., Burokur, S. N., de Lustrac, A., Priou, A. 2012. Study and analysis of an electric Z-shaped meta-atom. *Advanced Electromagnetics*, 1(2); 64-70.
- Ebrahimi, A., Withayachumnankul, W., Al-Sarawi, S.F., Abbott, D. 2014a. Dual mode behavior of the complementary electric-LC resonators loaded on transmission line. *Journal of Applied Physics*, 116(8); <https://doi.org/10.1063/1.4893751>.
- Ebrahimi, A., Withayachumnankul, W., Al-Sarawi, S.F., Abbott, D. 2014b. Metamaterial inspired rotation sensor with wide dynamic range. *IEEE Sensors Journal*, 14(8);1609-2614.

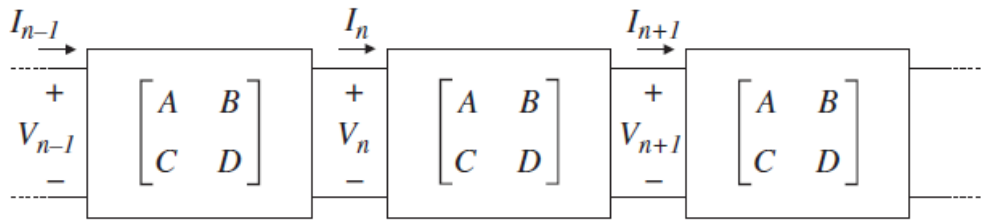
- Ekmekci, E., Kose, U., Cinar A., Eran, O., Ekmekci, Z. 2019. The use of metamaterial Type double-sided resonator structures in humidity and concentration sensing applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 297,111559.[https:// doi. org/10.1016/j.sna.2019.111559](https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111559)
- Garg, C., Kaur, M. 2014. A Review of Defected Ground Structure (DGS) in Microwave Desing. *Int. J. Innov. Res. Electr. Electron. Instrum. Control Eng.* 2(3); 1285-1290.
- Guarin, G., Hofmann, M., Nehring, J., Weigel, R., Fischer, G. 2015. Miniature Microwave Biosensors: Noninvasive Applications. *IEEE Microwave Magazine*, 16(4); 71-86. DOI: 10.1109/MMM.2015.2394024
- Gunawardhana, L.N. Al-Rawas, G. A., Kazama,S. 2017.An alternative method for predicting relative humidity for climate change studies. *Meteorological Applications*, 24(4): 551–559. DOI: 10.1002/met.1641
- Gupta, K.C., Garg, R., Bahl, I., Bhartia, P. 1996. *Microstrip lines and slotlines*. Artech House, ISBN-13: 978-1-60807-535-5.
- Hecth, E. 2002. *Optics*. Addison Wesley, ISBN 0-321-18878-0.
- Hong, J., Lancaster M. J. 2001. *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*. Wiley, ISBN 0-471-38877-7.
- Kumar, A., Machavaram, K. V. 2013. Microstrip filter with defected ground structure: A close perspective. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 5(5); 589–602. <https://doi.org/10.1017/S1759078713000639>.
- Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R., Padilla, W. J. 2008. Perfect metamaterial absorber. *Physical Review Letters*, 100(20), 207402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.207402>
- Lee, C. Sen, Bai, B., Song, Q. R., Wang, Z. Q., Li, G. F. 2019. Open Complementary Split-Ring Resonator Sensor for Dropping-Based Liquid Dielectric Characterization. *IEEE Sensors Journal*, 19(24); 11880–11890. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2938184
- Li, H., Yuan, L. H., Zhou, B., Shen, X. P., Cheng, Q., Cui, T. J. 2011. Ultrathin multiband gigahertz metamaterial absorbers. *Journal of Applied Physics*, 110(1), 014909.<https://doi.org/10.1063/1.3608246>
- Luu, D. H., Van Dung, N., Hai, P., Giang, T. T., Lam, V. D. 2016. Switchable and tunable metamaterial absorber in THz frequencies. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 1(1); 65–68. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2016.04.002>
- Maier, S. A. 2007. *Plasmonics: Fundamentals and Applications*. Springer, ISBN-10: 0387331506
- Mandal, M. K., Sanyal, S. 2000. A novel defected ground structure for planar circuits. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 10(4); 131–133. DOI: 10.1109/LMWC.2005.863192
- Martin, F. 2015. *Artificial Transmission Lines For RF and Microwave Applications*. Wiley, ISBN 978-1-118-48760-0

- Martín, F., Bonache, J., Falcone, F., Sorolla, M., Marqués, R. 2003. Split ring resonator-based left-handed coplanar waveguide. *Applied Physics Letters*, 83(22); 4652–4654. <https://doi.org/10.1063/1.1631392>
- Md Amin, E., Karmakar, N., Winther-Jensen, B. 2013. "Polyvinyl-alcohol (PVA)-based RF humidity Sensor in microwave frequency". *Progress In Electromagnetics Research B*, (54); 149–166. DOI: 10.2528/PIERB13061716
- Okatani, T., Sekiguchi, S., Hane, K., Kanamori, Y. 2020. Surface-plasmon-coupled optical force sensors based on metal–insulator–metal metamaterials with movable air gap. *Scientific Reports*, 10(1); 1–6. DOI: 10.1038/s41598-020-71825-x
- Paczesnya, D., Tarapata, G., Michał, M., Jachowicz, R. 2015. The capacitive sensor for liquid level measurement made with ink-jet printing technology. *Procedia Engineering*, 120; 731–735. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.776>
- Pendry, J. 2004. Negative Refractive. *Contemporary Physics*, 45(3); 1–5. DOI: 10.1080/00107510410001667434
- Pendry, J.B., Holden, A. J., Robbins, D. J., Stewart, W. J. 1999. Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena". *IEEE Transactions On Microwave Theory And Techniques*, 47(11); 2075-2085. DOI: 10.1109/22.798002
- Pozar, D. 2012. *Microwave Engineering*. Wiley, ISBN: 978-0-470-63155-3.
- Rocchi, A., Santecchia, E., Barucca, G., Mengucci, P. 2019. Characterization and Optimization of Level Measurement by an Ultrasonic Sensor System. *Materials Today: Proceedings*, 19(8); 3077–3084. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2890568
- Schurig, D., Mock, J. J., Smith, D. R. 2006. Electric-field-coupled resonators for negative permittivity metamaterials. *Applied Physics Letters*, 88(4); 1–3. <https://doi.org/10.1063/1.2166681>
- Sehrawat, D., Gill, N. S. 2019. Smart sensors: Analysis of different types of IoT sensors. *Proceedings of the International Conference on Trends in Electronics and Informatics, ICOEI 2019, (Icoei)*, 523–528.
- Sihvola, A. 1999. *Electromagnetic Mixing Formulas and Applications*. IEEE Electromagnetic Waves Series, 47., ISBN: 9780852967720.
- Solymar, L., Shamonina, E. 2009. *Wave in Metamaterials*. Oxford University Press, ISBN: 978-0-19-921533-1 13579108642
- Tao, H., Bingham, C. M., Strikwerda, A. C., Pilon, D., Shrekenhamer, D., Landy, N. I., Averitt, R. D. 2008. Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 78(24), 241103. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.78.241103>
- Veselago V. G. 1968. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Physics*, 10(4).
- Withayachumnankul, W., Fumeaux, C., Abbott, D. 2010. Compact electric-LC resonators for metamaterials. *Optics Express*, 18(25), 25912. <https://doi.org/10.1364/OE.18.025912>

- Withayachumnankul, W., Jaruwongrungrsee, K., Tuantranont, A., Fumeaux, C., Abbott, D. 2013a. Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 189, 233–237. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.10.027>
- Wu, L., Yao, D., Gao, X., Yu, Z., Wang, X., He, Y., ... Li, K. 2020. An efficient flexible strain sensor based on anhydride-grafted styrene-butadiene-styrene triblock copolymer/carbon black: Enhanced electrical conductivity, sensitivity and stability through solvent swelling. *Smart Materials and Structures*, 29(12), 125018. DOI: 10.1088/1361-665x/abc26d
- Xiao, J.-K. 2013. Defected Microstrip Structure. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, 3. <https://doi.org/10.1002/047134608X.W8199>
- Xinjing, H., Yutian, Y., Jinyu, M., Jian, L., Xiaobo, R. 2020. An Acoustic Metamaterial-Based Sensor Capable of Multiband Filtering and Amplification. *IEEE Sensors Journal*, 20(8); 4413–4419.
- Yasumatsu, N., Watanabe, S. 2012. Precise real-time polarization measurement of terahertz electromagnetic waves by a spinning electro-optic sensor. *Review of Scientific Instruments*, 83(2), 023104. <https://doi.org/10.1063/1.3683570>
- Zaky, Z. A., Ahmed, A. M., Shalaby, A. S., Aly, A. H. 2020. Refractive index gas sensor based on the Tamm state in a one-dimensional photonic crystal: Theoretical optimisation. *Scientific Reports*, 10(1), 9736. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66427-6>
- Zayed, M. W., Shafuzzaman, M., Goni, M. O. 2015. "ELC resonator based narrow band metamaterial absorber". 8th International Conference on Electrical and Computer Engineering: Advancing Technology for a Better Tomorrow, ICECE 2014, 564–567.
- Zhou, A., Song, F., Song, F., Min, C., Ren, X., An, L., Gao, X. 2020. Tunable red-to-green emission ratio and temperature sensing properties of NaLuF₄:Ho³⁺/Yb³⁺ microcrystals by doping with Ce³⁺ ions. *CrystEngComm*, 22(41); 6831–6837. DOI: 10.1039/D0CE01052A
- Zhou, J., Economou, E. N., Koschny, T., Soukoulis, C. M. 2006. Unifying approach to left-handed material design. *Optics Letters*, 31(24); 3620. DOI: 10.1364/OL.31.003620
- Ziemkiewicz, D., Zielińska-Raczyńska, S. 2015. Complex Doppler effect in left-handed metamaterials. *Journal of the Optical Society of America B*, 32(3); 363–369. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.32.000363>
- Zou, H., Cheng, Y. 2019. Design of a six-band terahertz metamaterial absorber for temperature sensing application. *Optical Materials*, 88; 674–679. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.01.002>

EK 1 Transfer Matris Metodu

Uzaysal harmoniler, periyodik yapıların bazı özelliklerini açıklanmasında bir temel olmasına karşın, genellikle uzaysal harmoniler baskındır ve birçok periyodik yapının açıklanmasında yeterlidir. Esas harmonik uzayın dispersiyon özelliklerini elde etmek için, transver matris metot, periyodik olarak ayrılmış iki pozisyona yerleşen alanların, birim hücrenin karakteristiği belirleyen bir transfer fonksiyon yoluyla karşılıklı bir şekilde bağımlı olduğu söylenebilir(Martin, 2015).



Şekil.1 Birim hücrenin periyodik yapısı, transfer ABCD matris ile tanımı (Martin, 2015).

Dispersiyon İlişkisi

Şekil.1 içerisinde verilen periyodik yapılar, birim hücreler kutu ile temsil edilmiştir (Martin, 2015). Birim hücrelerin birleştiği referans düzlemlerinde gerilim ve akımlar tanımlanmıştır ve nicelikler ölçülmüştür. n. inci hücrenin her iki kenarı üzerinde akım ve gerilimler ABCD matris ile ilişkilidir.

$$\begin{pmatrix} V_n \\ I_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{n+1} \\ I_{n+1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Floquet's teorimine göre, n ve n+1 düzlemlerinde voltaj ve akımlar yayılım faktörü kadar farklıdır,

$$V_{n+1} = e^{-\gamma l} \cdot V_n \quad (2)$$

$$I_{n+1} = e^{-\gamma l} \cdot I_n \quad (3)$$

Denk. (2) ve (3), Denk. (1) içerisinde yerine yazılırsa,

$$\begin{pmatrix} V_n \\ I_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{n+1} \\ I_{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{\gamma l} \cdot V_{n+1} \\ e^{\gamma l} \cdot I_{n+1} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} A - e^{\gamma l} & B \\ C & D - e^{\gamma l} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{n+1} \\ I_{n+1} \end{pmatrix} = 0 \quad (5)$$

Adi olmayan çözüm için, Denk. (5) matris determinant sıfır olmalıdır.

$$(A - e^{\gamma l})(D - e^{\gamma l}) - BC = 0 \quad (6. a)$$

$$AD + e^{2\gamma l} - (A + D)e^{\gamma l} - BC = 0 \quad (6. b)$$

$AD - BC = 1$, karşılık bir sistem için,

$$e^{\gamma l} + e^{-\gamma l} = A + D \quad (7)$$

$$\cos(\gamma l) = \frac{A + D}{2} \quad (8)$$

EK 2 Bloch Empedansı

Diğer önemli bir parametrede, periyodik bir yapının, n. inci birim hücresinde ki akım ve gerilim arasında oluşturulan bağıntıdır (Martin, 2015). Bu parametre şöyle ifade edilir,

$$(A - e^{\gamma l})V_{n+1} + Bl_{n+1} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{V_{n+1}}{I_{n+1}} = -\frac{B}{A - e^{\gamma l}}, \forall n \quad (2)$$

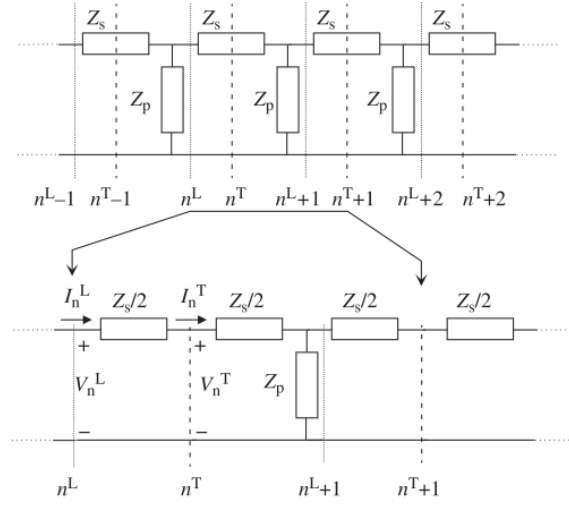
Denklem (2) de, akım-gerilim arasındaki ilişki konuma bağlı değildir. Bu yüzden, herhangi bir konumda yayılan dalganın akım-gerilim arasındaki ilişki, iletim hattının karakteristik empedans yapısına benzer. Periyodik yapılar içerisinde yayılan dalgalar Bloch dalgaları olmalarından dolayı, Z_B Bloch empedansını, Denk. 2 ile verilen eşitlikten tanımlamak daha çok uygundur. EK.1 de verilen Denk. 7, Denk. 2 içerisine yazıldığında, Bloch empedansı iki çözüme sahiptir:

$$Z_B^{\pm} = -\frac{2B}{A - D \pm \sqrt{(A + D)^2 - 4}} \quad (3)$$

biri ileri doğru yayılan dalgaları temsil ederken diğeri geriye doğru yayılan dalgaları temsil eder. Denk. 3'ün iki çözümü, genellikle karmaşıktır. Yayılım bölgesinde, $(A + D)^2 < 4$, ve ortaya çıkan çözümler aynı büyüklüğe zıt işaretli aynı sanal ve gerçek kısımlara sahiptir. Yasaklanmış bölgelerde, birim hücre simetrik olmadıkça, iki çözümde kesinlikle sanaldır ve farklı büyüklükler gösterirler. $A=D$ eşit ise, denk. 3 basitleşir.

$$Z_B^{\pm} = \pm \frac{B}{\sqrt{A^2 - 1}} \quad (4)$$

Kayıpsız ve simetrik yapılar için, izinli bölgelerde Bloch empedansının iki çözümü hem gerçek hemde zıt işaretlere sahiptir. Farklı işaretler dalganın ileri ve geri yönde yayılımını gösterirler.



Şekil .1 Ardışık n. inci simetrik T ve asimetrik L birim hücrelerinin devre şeması.

Şekil .1 de içerisinde düşünülen birim hücreler için ABCD matris elemanları kolayca çıkarılır. Simetrik birim hücreler için,

$$A = D = 1 + \frac{Z_s}{2Z_p} \quad (5. a)$$

$$B = Z_s + \frac{Z_s^2}{4Z_p} \quad (5. b)$$

$$C = \frac{1}{Z_p} \quad (5. c)$$

Asimetrik Birim hücreler için,

$$A = 1 + \frac{Z_s}{Z_p} \quad (6. a)$$

$$B = Z_s \quad (6. b)$$

$$C = \frac{1}{Z_p} \quad (6. c)$$

$$D = 1 \quad (6. d)$$

Simetrik yapılar için, Bloch empedansı,

$$Z_B^{\pm} = \pm \frac{Z_s \left(1 + \frac{Z_s}{4Z_p}\right)}{\sqrt{\left(1 + \frac{Z_s}{2Z_p}\right)^2 - 1}} = \pm \sqrt{\frac{Z_s}{2} \left(\frac{Z_s}{2} + 2Z_p\right)} \quad (7)$$

Asimetrik Yapılar için, Bloch empedansı,

$$Z_B^{\pm} = \pm \frac{2Z_s}{\frac{Z_s}{Z_p} \pm \sqrt{\left(2 + \frac{Z_s}{Z_p}\right)^2 - 4}} = \pm \sqrt{\frac{Z_s}{2} \left(\frac{Z_s}{2} + 2Z_p\right)} + \frac{Z_s}{2} \quad (8)$$

İleri ve geriye doğru yayılan dalgalar için pozitif akımın tanımına göre, Bloch empedansının iki çözümü gerçekte tam olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$Z_B^{\pm} = \sqrt{\frac{Z_s}{2} \left(\frac{Z_s}{2} + 2Z_p\right)} \pm \frac{Z_s}{2} \quad (9)$$

Ek.1 de denk. (8) de sönümlenmenin olmadığı yayılım için denklem:

$$\cos(\beta l) = \frac{A + D}{2} \quad (10)$$

Denk. 5 ve 6 içerisinde ki, A ve D değerleri Denk. 10 da yerlerine yazılırsa:

$$\cos(\beta l) = 1 + \frac{Z_s}{2Z_p} \quad (11)$$