



**T.C.**  
**MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METAMALZEME TABANLI ÇOK AMAÇLI SENSÖR UYGULAMALARI**

**Hatice ÜNAL**

**ENFORMATİK ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HATAY**  
**ŞUBAT-2017**



T.C.  
MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**METAMALZEME TABANLI ÇOK AMAÇLI SENSÖR UYGULAMALARI**

**Hatice ÜNAL**

**ENFORMATİK ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HATAY  
ŞUBAT-2017**

T.C.  
MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


**METAMALZEME TABANLI ÇOK AMAÇLI SENSÖR UYGULAMALARI**

Hatice ÜNAL  
ENFORMATİK ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yrd. Doç. Dr. Oğuzhan AKGÖL danışmanlığında hazırlanan bu tez 22/02/2017 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

  
Yrd. Doç. Dr. Oğuzhan AKGÖL

Başkan

  
Doç. Dr. Muğharrem KARAASLAN

Üye

  
Yrd. Doç. Dr. Furkan DİNÇER

Üye

Bu tez Enstitümüz Enformatik Anabilim Dalında hazırlanmıştır.

**Kod No:**

**Prof. Dr. Erdal SERTKAYA**  
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

22/02/2017

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını ve tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu beyan ederim.

**Hatice ÜNAL**

## ÖZET

### METAMALZEME TABANLI ÇOK AMAÇLI SENSÖR UYGULAMALARI

Bakışimsız bir nesne; çevrilerek veya döndürülerek asla aynadaki görüntüsü ile örtüşemez. Bu nesnelere sağ el ya da sol el polarizasyonuna sahiptir. Bakışimsız metamalzemeler, EM dalganın polarizasyonunu değiştirirler. Bakışimsız ortam, RCP ve LCP EM dalgalarında ortamın bakışimsız asimetriğinden dolayı farklı tepkiler verirler.

Bu tezdeki tasarımlarda bakışimsız metamalzeme kullanılmasının nedeni; iletim ve yansıma parametrelerini diğer parametrelere göre daha fazla etkilemesidir. Ayrıca sensör içerisinde bu yapının kullanılması sıradan metamalzemeler ile yapılan sensör uygulamaları ile karşılaştırıldığında, daha hassas ve verimli sensör yapıları elde edilmesidir. İletim oranı sıradan metamalzemelerden fazla olması da avantaj sağlamaktadır.

Bu tezdeki çok fonksiyonlu bakışimsız sensör yapısı, çift tabanlı kare şekil ayırık halka rezonatördür. Bakışimsızlığı sağlamak için yapının ön yüzeyi sabit, arka yüzey ise 90° döndürülmüştür. Basınç ölçümü yapmak için kalınlık değişken yapılmıştır. Bu yüzey içi hava ile doldurulmuştur. Nem ve sıcaklık ölçümü için, sensör kalınlığı sabit tutulup, yüzeyler arasındaki maddenin farklı elektrik geçirgenlik ve kayıp tanjant değerleri için ölçüm yapılmıştır. Yoğunluk sensörü için sensör kalınlığı sabit tutulup, yüzeyler arasındaki maddenin farklı elektrik geçirgenlik değerleri için ölçüm yapılmıştır. Sonuçlanan sensörün rezonans frekansı; dielektrik geçirgenlik, sıcaklık, nem, yoğunluk, basınç gibi çevresel faktörlere bağlı olarak değişim göstermektedir. Hem nümerik hem de analitik sonuçlar; X bandında, çok fonksiyonlu minyatürize edilmiş bakışimsız metamalzeme sensör simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Yapı nem, yoğunluk, sıcaklık, basınç sensörlerini bir arada bulunduran çok fonksiyonlu bakışimsız sensör olarak tasarlanmıştır.

Kapasitif etki gösteren şerit (CLS) ve üzerinde yarık bulunan şerit içeren düzlemsel olmayan metamalzeme (MTM) yapıların belli açıyla döndürülmesiyle elde edilen bakışimsız sensör yapısı FIT tabanlı 3D simülasyon programı kullanılarak, dikey gelişteki yansıma ( $S_{11}$ ) ve iletim ( $S_{21}$ ) değerleri elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar için ise Agilent E5071B ENA RF, AGILENT E8362B PNA ve R&S ZVL6 Vektör Network analizörleri ve bunlara bağlı mikrodalga horn antenler kullanılmıştır.

Ayrıca bu çalışmada kullanılan çok fonksiyonlu sensör yapısının dielektrik geçirgenliği ( $\epsilon$ ), manyetik geçirgenliği ( $\mu$ ) ve bakışimsızlık parametresi gibi özellikleri Nicolson Ross Weir yöntemi kullanılarak s- parametreleri geri elde edilmiştir.

2017, 56 Sayfa

**Anahtar Kelimeler:** Metamalzeme (MTM), bakışimsız sensör, çok fonksiyonlu bakışimsız sensör, bakışimsızlık

## ABSTRACT

### METAMATERIAL BASED MULTIFUNCTIONAL SENSOR APPLICATIONS

A chiral object does not overlap with its mirror image when it is being rotated or turned. These objects have right-handed or left-handed polarization. Chiral metamaterials change the polarization of EM waves. Moreover, chiral environments give different responses due to chiral asymmetry of the environment in RCP and LCP EM waves.

The reason for the use of chiral metamaterials in the designs in this thesis is that they affect the transmission and reflection characteristics more than the other parameters. Higher transmission rate than traditional metamaterials also provides an advantage. The multifunctional chiral sensor structure used in this thesis is a double-sided square shape discrete ring resonator. In order to obtain chirality, the front face of the structure is left stationary while the back surface is rotated by 90°. Sensor thickness is made variable for pressure measurement. This surface is also filled with air. For moisture and temperature measurement, the sensor thickness was kept constant and measurements were conducted for different electrical conductivity and loss tangent values of the material between the surfaces. While keeping the sensor thickness for density sensor, the measurements are made for different electrical conductivity values of the material placed between the surfaces.

The resonance frequency of the resulting sensor varies depending on environmental factors such as dielectric permeability, temperature, humidity, density and pressure. As a proof of studies, multifunctional miniaturized chiral metamaterial sensor simulation results are obtained in X band both numerically and analytically. The structure is designed as a multifunctional chiral sensor with a combination of humidity, density, temperature, pressure sensors.

The strip showing capacitive effect (CLS) and the chiral sensor structure obtained by rotating the non-planar metamaterial (MTM) structures containing a strip with a slit on it are analyzed by using based FIT 3D simulator program and the vertical reflection (S11) and transmission values are obtained. For experimental studies, Agilent E5071B ENA RF, AGILENT E8362B PNA and R & S ZVL6 Vector Network Analyzer, dielectric probe and related calibration kits are used.

In addition dielectric permittivity ( $\epsilon$ ) and magnetic permeability ( $\mu$ ) of the multifunctional sensor structure used in this study and the parameters like chirality are calculated from scattering parameters by using Nicolson Ross Weir method.

2017, 56 Pages

**Key Words:** Metamaterials (MTM), chiral sensor, multifunctional chiral sensor, chirality

## TEŐEKKÖR

Yüksek lisans konusunun belirlenmesinde yardımcı olan ve tecrübeleriyle tezime katkıda bulunan danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Oğuzhan AKGÖL'e ve lisans dönemimden beri hocam olan görüşleriyle aydınlatan Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN'a ve Yrd. Doç. Dr. Furkan DİNÇER'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında desteğini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	VI
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	VII
1. GİRİŞ.....	1
1.1.Malzeme Çeşitleri.....	3
1.2.Bakışsızlık ve Bakışsız Metamalzemeler.....	3
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	9
3.1. Çok Fonksiyonlu Bakışsız Metamalzeme Tabanlı Sensör.....	9
3.1.1. Bakışsız Metamalzeme Tabanlı Basınç Sensörü.....	10
3.1.2. Bakışsız Metamalzeme Tabanlı Sıcaklık Sensörü.....	11
3.1.3. Bakışsız Metamalzeme Tabanlı Yoğunluk Sensörü.....	12
3.1.4. Bakışsız Metamalzeme Tabanlı Nem Sensörü.....	13
3.2. Yöntem.....	13
3.2.1. Metamalzemelerde Parametrelerin Geri Elde Edilmesi.....	15
3.2.2. Nicolson Ross Weir Metodu.....	20
3.2.3. Elektromanyetik Dalgalar için Nümerik Metotlar.....	21
3.3. Ölçüm Metotları ve Düzenegi.....	25
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	29
4.1. Çok Fonksiyonlu Bakışsız Metamalzeme Tabanlı Sensör.....	29
4.1.1. Bakışsız Metamalzeme Tabanlı Basınç Sensörü Uygulamaları.....	31
4.1.2. Sıcaklık, Yoğunluk ve Nem Ölçümü İçin Bulgular.....	32
4.1.3. Sıcaklık Sensörü Uygulamaları.....	34
4.1.4. Yoğunluk Sensörü Uygulamaları.....	37
4.1.5. Nem Sensörü Uygulamaları.....	39
4.2. Metamalzeme Tabanlı Çok Fonksiyonlu Nem ve Etanol Yoğunluğu Sensörü.....	42
4.2.1. Akışkan Sensör Uygulaması.....	44
4.2.2. Nem Sensörü Uygulamaları.....	46
4.2.3. Konsantre Yaş Sensörü.....	47
4.2.4. Metamalzeme Tabanlı Nem ve Etanol Yoğunluğu Sensörü için Patent Çalışması.....	47
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	52
KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ.....	56

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 a) LH materyallerde, EM enerjinin (Poynting vektörü) yayılma yönü (S1) ile EM dalganın yayılma yönü ( $k_1$ ) zıttır. (b) Snell kırılma kanunu negatif indisli LH materyallerde, tersine işlemektedir. ....	2
Şekil 1.2. Ortam değişkenleri cetveli .....	2
Şekil 3.1. Çok fonksiyonlu bakışsız metamalzeme tabanlı sensör yapısı.....	9
Şekil 3.2. Çok fonksiyonlu sensör yapının boyutları .....	10
Şekil 3.3. Basınç sensörü için değişken aralık değerleri.....	11
Şekil 3.4. Vektör network analizörleri .....	25
Şekil 3.5. Yansıma değerlerinin ölçümü için örnek kurulum .....	26
Şekil 3.6. Deney metodunun şematik gösterimi .....	27
Şekil 4.1. Çok fonksiyonlu bakışsız sensör yapısı.....	29
Şekil 4.2. Farklı maddeler için simülasyon sonuçları .....	30
Şekil 4.3. Çok fonksiyonlu bakışsız metamalzeme tabanlı sensör yapısı.....	31
Şekil 4.4 Basınç sensörü için rezonans frekans simülasyon sonuçları.....	32
Şekil 4.5. Rezonans frekansın sıcaklık sabitine göre değişimi .....	36
Şekil 4.6. Yoğunluk oranı- rezonans frekans- dielektrik sabiti oran grafiği.....	38
Şekil 4.7. Rezonans frekansın yoğunluk sabitine göre değişimi.....	39
Şekil 4.8. Nem oranı- rezonans frekans- dielektrik sabiti oran grafiği.....	40
Şekil 4.9. Rezonans frekansın nem sabitine göre değişimi.....	41
Şekil 4.10. Nem ve etanol yoğunluğu sensörünün boyutları .....	43
Şekil 4.11. Sensör yapının baskı devresi.....	43
Şekil 4.12. Nem ve etanol yoğunluğu sensörünün yapısı .....	43
Şekil 4.13. Kalibrasyon işlemi için deney düzeneği .....	44
Şekil 4.14. Metamalzeme tabanlı çok fonksiyonlu sensör deney düzeneği.....	45
Şekil 4.15. Etanol-su karışımı için rezonans frekansı simülasyon grafiği .....	46
Şekil 4.16. Etanol-su karışımı için rezonans frekansı deney grafiği.....	46
Şekil 4.17. Toprak-su karışımı için rezonans frekansı simülasyon grafiği .....	47
Şekil 4.18. Konsantre yaşı için simülasyon grafiği.....	47
Şekil 4.19. Metamalzeme tabanlı çok fonksiyonlu sensör .....	49
Şekil 4.20. Metamalzeme tabanlı çok fonksiyonlu sensörün teknik çizimi.....	49
Şekil 4.21. Metamalzeme tabanlı çok fonksiyonlu sensörün simülasyon grafiği .....	51
Şekil 4.22. Metamalzeme tabanlı çok fonksiyonlu sensörün deney grafiği.....	51

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Basınç sensörü için simülasyon sonuçları .....	32
Çizelge 4.2. Kemik iliği – sıcaklık- dielektrik tablosu .....	35
Çizelge 4.3. Kalsiyum klorit yoğunluk – dielektrik değer tablosu .....	38
Çizelge 4.4. Talaş nem – dielektrik tablosu .....	40
Çizelge 4.5. Etanol-su karışımı dielektrik tablosu .....	45
Çizelge 4.6. Metamalzeme tabanlı çok fonksiyonlu sensörün boyut tablosu .....	50



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

$\varepsilon$	: Dielektrik sabiti
$\mu$	: Manyetik geçirgenlik
$\lambda$	: Dalga boyu
$\lambda_g$	: Kılavuz dalga boyu
$\rho_e$	: Elektrik yük yoğunluğu
$\rho_m$	: Manyetik yük yoğunluğu
$\sigma_e$	: Sonlu elektrik iletkenliğine bağlı kayıp
$\sigma_m$	: Sonlu manyetik iletkenliğe bağlı kayıp
$\chi_e$	: Elektriksel yatkınlık
$\chi_m$	: Manyetik yatkınlık
$v_p$	: Faz hızı
$l^d$	: Yerel alanların kaybolma mesafesi
$\eta$	: Dalga empedansı
B	: Manyetik akı yoğunluğu
D	: Elektrik akı yoğunluğu
d	: Tabaka kalınlığı
E	: Elektrik alan şiddeti
H	: Manyetik alan şiddeti
$J_s$	: Elektrik akım yoğunluğu
k	: Dalga numarası
$k_0$	: Serbest uzay dalgası
n	: Kırılma indisi
$n$	: Reaktif indeks sabiti
P	: Elektriksel polarizasyon
S	: Poynting vektörü
$S_{11}$	: Yansıma değerleri
$S_{21}$	: İletim değerleri
s	: Duyarlılık sabiti
$\vec{j}_e$	: Elektrik iletim akı yoğunluğu

$\vec{j}_m$	: Manyetik iletim akı yoğunluğu
$\vec{k}$	: Dalga vektörü
$\omega$	: Açısal frekans
$Z$	: Empedans
$\Gamma$	: Yansıma katsayısı
$T$	: İletim katsayısı
$c$	: Işık hızı
$\eta$	: Döndürme açısı
$\theta$	: Polarizasyon dönme açısı
$\kappa$	: Bakışsızlık parametresi
$\chi$	: Manyetik-elektrik hassasiyeti
$\beta$	: Kompleks yayılım fazı
$A(\omega)$	: Emilim değeri
$R(\omega)$	: Yansıma değeri
$T(\omega)$	: İletim değeri
$t$	: Zaman ifadesi
$\Delta$	: Asimetrik iletim parametresi
$\emptyset_-$	: Sol el polarizasyon açısı
$\emptyset_+$	: Sağ el polarizasyon açısı

### **KISALTMALAR**

EM	: Elektromanyetik
FDTD	: Sonlu farklar zaman domeni
FOM	: Kayıp değeri
FIT	: Sonlu toplamlar metodu
FEM	: Sonlu elemanlar metodu
LCP	: Sol eli dairesel polarizasyon
LHM	: Sol-elli ortam
MTM	: Metamalzeme
MRTD	: Çoklu zaman domeni
NRI	: Negatif kırılma indisi
PSTD	: Sözcükte spektral zaman domeni

PSSD : Söзде spektral uzay domeni  
RCP : Sağ elli dairesel polarizasyon  
TLM : İletim hattı matrisi  
SRDS : Çift bölünmüş halka rezonatör  
DNG : Çift negatif indisli ortam  
TM : Dik-manyetik alan  
TE : Dik-elektrik alan  
NRW : Nicolson Ross Weir metodu



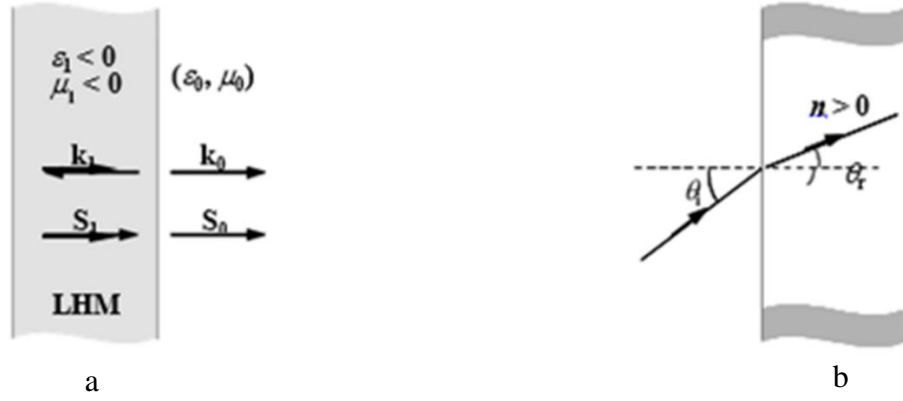
## 1. GİRİŞ

Metamalzemeler, yapay ve fiilen homojen elektromanyetik yapılar olup, doğal olmayan özelliklere sahiptirler. Bu yapay malzemelerin en önemli özelliği; ortamda sahip oldukları dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerlerinin aynı anda negatif işaretli olmasıdır. Bu durumun sonucu olarak ise; negatif kırılma indisine sahip olmasıdır. Ayrıca metamalzemeler tüm dalganın iletilip, aynı zamanda da odaklanmasını sağlamaktadır. Metamalzemeler; telekomünikasyon, radarlar, elektromanyetik pelerin, sensör, radar, mikro elektronik, sinyal emilimi, anten, görüntüleme, sağlık ve savunma sanayi vb. çok sayıda uygulama alanına sahiptir ve sürekli geliştirilmektedir.

Bu yapay malzemelerin üretilmesinin asıl nedeni her zaman olduğu gibi insanların ihtiyaçları olmuştur. Çünkü seneler geçip, teknoloji ilerledikçe; yüksek frekanslarda çalışan ve daha iyi performans gösteren gelişmiş malzeme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Ayrıca doğada bulunan malzemelerin elektromanyetik ortam tepkilerinin çok azına teorik olarak ulaşılabilir. Fakat yapay olarak üretilen ortam sayesinde bu malzemelerin tepkilerini mevcutta olmayan değerlere kadar genişletilebilir. Ve daha fazla veri elde edilir.

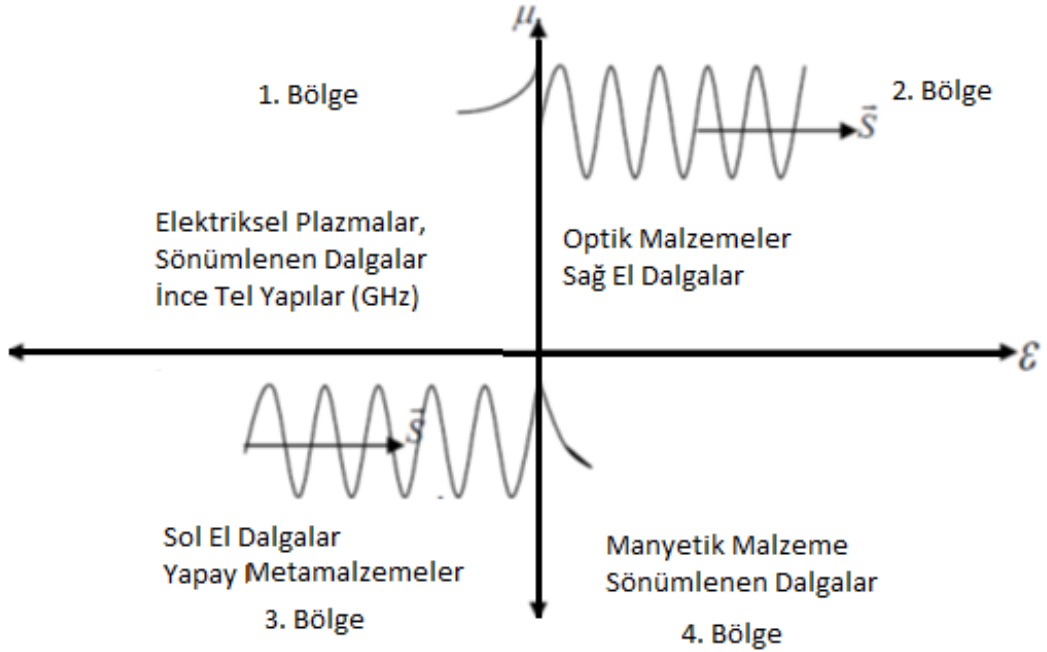
1967 yılında, bir malzemenin EM özelliğini belirten ilk sistematik çalışma Rus bilim adamı Veselago tarafından yapılmıştır. Veselago bu çalışmada, belirli bir frekans aralığında dielektrik sabitinin ve manyetik geçirgenlik değerinin negatif olması halinde, ortamın kırılma indisinin de negatif olacağını öne sürmüştür. O, bu tür negatif malzemeleri Sol El Metamalzemeler (LHMs) olarak adlandırmıştır. (Veselago,1967) Bu tür malzemelere elektromanyetik dalga nüfuz ettiğinde, elektrik alan vektörü (E) , manyetik alan vektörü (H) ve dalga vektörü (k) sol el kuralına uyar.

Fakat doğal malzemeler ise sağ el kuralına uyar. Bu malzemelerin dielektrik sabiti ( $\epsilon$ ) ve manyetik geçirgenlik değeri ( $\mu$ ) pozitifdir. Yani pozitif parametrelilerdir. Pozitif parametrelili çoğu malzeme Sağ El Malzemeler (RHMs) olarak adlandırılmıştır. Aşağıda LH materyallerde, EM enerjinin yayılma yönü ile EM dalganın yayılma yönü zıt olduğu ve sol el ortamlarda Snell kanunu tersine işlediği (Çünkü kırılma indisi negatiftir.) Şekil 1.1 de gösterilmiştir.



Şekil 1.1 a) LH materyallerde, EM enerjinin (Poynting vektörü) yayılma yönü ( $S_1$ ) ile EM dalganın yayılma yönü ( $k_1$ ) zıttır. (b) Snell kırılma kanunu negatif indisli LH materyallerde, tersine işlemektedir.

Aşağıdaki ortam değişkenleri için bir cetvel oluşturulmuştur. Oluşturulan cetveldен de anlaşılacağı gibi metamalzemeler 4 sınıfta toplanabilir.



Şekil 1.2. Ortam değişkenleri cetveli

## 1.1. Malzeme Çeşitleri

Malzemeleri 4 başlık altında sınıflandırabiliriz:

- 1- Çift Pozitif Malzemeler:** Bu tür malzemelerin dielektrik sabiti ( $\epsilon$ ) ve manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ) değerlerinin gerçel kısımları pozitiftir. Yani;  $\epsilon > 0$  ve  $\mu > 0$  'dır. Sağ el kuralına uyarlar.
- 2- Epsilon Negatif Malzemeler:** Bu tür malzemelerin dielektrik sabitinin ( $\epsilon$ ) gerçel kısmı negatif, manyetik geçirgenlik değerinin ( $\mu$ ) gerçel kısmı ise pozitiftir. Yani  $\epsilon < 0$  ve  $\mu > 0$  'dır. Dielektrik sabitinin ( $\epsilon$ ) gerçel kısmı ile manyetik geçirgenlik değerinin ( $\mu$ ) gerçel kısmı birbirinden zıt işaretli olduğu için birbirlerini sönmümlerler.
- 3. Çift Negatif Malzemeler:** Bu tür malzemelerin hem dielektrik sabitinin ( $\epsilon$ ) hem de manyetik geçirgenlik değerinin ( $\mu$ ) gerçel kısmı negatiftir. Yani  $\epsilon < 0$  ve  $\mu < 0$  'dır. Sol el kuralına uyarlar. Manyetik özelliklerinin her ikisinin de değeri negatif olduğundan negatif kırılma indisine sahip malzemelerdir.
- 4. Mu Negatif Malzemeler:** Bu tür malzemeler ise manyetik geçirgenlik değerinin ( $\mu$ ) gerçel kısmı negatif, dielektrik sabitinin ( $\epsilon$ ) gerçel kısmı ise pozitiftir. Yani  $\epsilon > 0$  ve  $\mu < 0$  'dır. Dielektrik sabitinin ( $\epsilon$ ) gerçel kısmı ile manyetik geçirgenlik değerinin ( $\mu$ ) gerçel kısmı birbirinden zıt işaretli olduğu için birbirlerini sönmümlerler.

## 1.2. Bakışsızlık ve Bakışsız Metamalzemeler

Bakışsızlık, bir nesnenin el simetrisini ifade eden geometrik bir yapıdır. Bakışsız malzemeler, doğada bulunmayan, negatif kırılma indisine sahip periyodik olarak tasarlanmış EM malzemelerdir. Bu nesnelere ya sağ el ya da sol el polarizasyonuna sahiptir. Böyle bir ortama giren düzlem dalga, bakışsız ortamda sol el (LCP) ve sağ el (RCP) olarak iki ayrı dalga şeklinde ilerlemesini sürdürürler. Bu dalgaların dalga numaraları ve faz hızları birbirinden farklıdır. Bakışsız metamalzemeler, EM dalganın polarizasyonunu değiştirirler. Böylece optiksel etkinliği ve aktiviteyi sağlarlar (Xi ve ark. 2008, Aydın ve ark. 2008, Li ve ark. 2010, Nikooei

Tehrani ve ark. 2013). Bu sayede EM dalgalara istenilen şekilde yönlendirilmesi gerçekleştirilmektedir.

Ayrıca bakışimsız ortam, RCP ve LCP EM dalgalarda ortamın asimetrisinden dolayı farklı tepkiler verir. Yani; bakışimsız ortamda bulunan elektrik alan ve manyetik alan arasında çapraz etkileşim etkisi meydana gelir. Bu çapraz bağlanma etkisini ( $k$ ) tanımlamak için bakışimsızlık parametresi kullanılır. Sağ ve sol dairesel polarizasyon kırılma indislerinin farklı olmasının nedeni  $k$  parametresidir.

$$k = \frac{n_R - n_L}{2} \quad (1.1)$$

Burada  $n_R$ ,  $n_L$  sağ ve sol dairesel polarizasyon dalgalarının kırılma indisidir (Zhao ve ark. 2011).

Sensör uygulamalarında artık bakışimsız ortam tercih edilmektedir. Nedeni ise, sahip olduğu bakışimsızlık parametresidir. Bu parametre iletim ve yansıma karakteristiğini etkiler. Bu parametre boyutsuzdur. Ayrıca verimliliği, hassaslığı ve iletim oranını artırmaktadır. Bu özellikler, sensör yapılarında bakışimsız malzemelerin kullanımını artırmaktadır.

Ayrıca bakışimsız malzemelerde; pelerin, radara yakalanmama, ışık örüntüsü yüksek verimli anten, mükemmel lens, gelişmiş biosensör vb. birçok alanda kendine uygulama alanı bulmaktadır.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Yapay malzemeler ile ilgili çalışmalar ve deneyler 19 yy'da başlamıştır. Bakışsızlık terimi, ilk kez 1873 yılında Lord Kelvin tarafından kullanılmıştır (Kelvin 1893). 1898 yılında Hintli Jagadis Chinder Bose tarafından burkulmuş yapı üzerinde ilk mikrodalga deneyi yapılmıştır (Bose 1898). 1904 yılında, H. Lamb backward dalgaların varlığından bahsetmiştir (Lamb 1904). 1910 yılında Lindeman, görünür ışıktaki radyo dalgalarının optik aktivite olgusu, sarmal bobin görevi sunan bir koleksiyon ile göstermesiyle, mikrodalga formundaki bakışsız ortam çalışmaları, antenler, polariztörler ve dalga kılavuzlarında uygulama alanı bulmuştur. 1946 yılında Winston E. Kock, radyo frekansının optik özelliklerini içinde barındıran yeni tip anten; metal-lens antenler, 1947 yılında ise mikrodalga antenler üzerinde çalışma yapmıştır (Kock 1946, 1947). Yine Kock 1950'li ve 1960'lı yıllarda mikro dalga antenler için yapay dielektrik üzerinde çalışmıştır. 1957 yılında Tinoco ve Freeman, lineer polarize dalgaların dönmesi ve bakışsızlık durumunu araştırmışlardır (Tinoco ve Freeman 1957). Bu tür yapay malzemeler, yapılan birçok araştırma ve çalışmanın ardından bilim adamlarının ilgisini çekmeyi başarmıştır.

Daha sonra ilk olarak 1967 yılında, Rus bilim adamı Veselago tarafından dielektrik geçirgenliğin, manyetik geçirgenliğin ve kırılma indisinin aynı anda negatif olabileceği teorik olarak kanıtlanmıştır (Veselago 1967). Ayrıca Veselago, bu tür manyetik özelliklere sahip bir ortamın ters Snell kanunu, ters Doppler etkisi, zıt Cherenkov yayılımlarını ve ters moment sağlayacağını ortaya koymuştur. Fakat Veselago'nun bu yöndeki çalışmaları doğada bu özelliklere sahip bir ortam olmadığı için uzun yıllar kimsenin ilgisini çekmemiş ve üzerinde çalışma yapmamıştır.

1996 yılında negatif dielektrik sabitinin ve 1999 yılında ise negatif manyetik geçirgenlik değerinin suni yapılarla elde edilebileceği Pendry ve ark. tarafından gösterilmiştir. Veselago'nun 1967 yılında yapmış olduğu teorik çalışmayı ispatlamışlardır.

2000 yılında, ince tel ve ayırık halka tipi rezonatörden oluşan ilk metamalzemenin yapay olarak üretimi Smith ve ark. tarafından yapılmıştır. 2001 yılında, mikrodalga frekansında kırılma indisinin negatif olduğu bir metamalzeme üzerinde çalışma Shelby ve ark. tarafından yapılmıştır. Yapılan deneyde kullanılan malzeme, iki ayırık halka

rezonatörden ve bir düz çubuk şeklinde iletken periyodik bir yapıdan oluşmaktadır. Böyle bir malzemeden üretilmiş prizma içerisine iletilen dalganın açısının saçılma ölçümü ile efektif kırılma indisi değeri elde etmişlerdir (Shelby 2001).

Sürekli olmayan teller ve bölünmüş halkalardan oluşan çift negatifli ortam için iletim ve yansıma ölçümleri yapılmıştır (Ozbay ve ark. 2003). Pendry, 2004 yılında bakışimsızlık üzerinde çalışmalar yapmıştır. Amaç, bakışimsız bir malzemede negatif kırılmanın elde etmektir. Bakışimsız malzemede, negatif  $\epsilon$  ve  $\mu$  gerektiren düzgün metamalzemelerden daha kolay olduğunu ortaya koymuştur. (Pendry 2004).

Sol elli metamalzemelerin anten uygulamaları bu döneme kadar yeterince araştırılmamıştır. 2005 yılında ilk kez anten teknolojisinde kullanılmıştır.

Metamalzemelerin potansiyel uygulama alanları araştırılmıştır. 2006 yılında, negatif indisli ortam olarak adlandırılan (DNG) ortam içerisindeki EM dalgaların etkileşiminden dolayı yansıyan ve iletilen dalgaların güçleri incelenmiştir (Sabah ve ark. 2006). Sabah ve Uçkun 2007'de, iki farklı yarı sonsuz ortam arasına yerleştirilmiş frekans bağımlı ve kayıplı çift negatif tabaka içerisinde EM dalganın yayılımını incelemişlerdir (Sabah ve Uçkun 2007). Aynı yıl, DNG ve pozitif indisli (DPS) ortam için EM dalganın etkileşimi incelemiştir (Urbani ve ark. 2007).

2008'de manyetik dimer tabanlı bakışimsız metamalzeme içerisinde mikrodalğanın yayılımı Li ve ark. deneysel olarak incelenmiştir (Li ve ark. 2008). Bu yapılan çalışmalarda negatif kırılmanın sağlandığı görülmüştür. Ayrıca  $\epsilon$  ve  $\mu$  değerlerinin bazı frekans aralıklarında aynı anda negatif olduğunu görmüşlerdir. Fakat bakışimsızlık değerinin yüksek ve geniş bant aralığında yer almadığı da görülmüştür (Wang ve ark. 2009c ). Zhiu ve ark. çift tabakalı iletken çubuk tel tabanlı açılal farklılığı sahip bakışimsız metamalzeme tasarlamıştır (Zhoa ve ark. 2009). Aynı yıl Zhou ve ark., negatif kırılma indisi sağlayan bakışimsız metamalzemeleri deneysel olarak THz frekans bölgesinde tasarlamışlardır. Tasarlanan yapı basit geometrik şekle sahip rezonatörleri olmadığı için THz frekans bölgesinde yapının üretimi sorun yaratmıştır (Zhou ve ark. 2009). 2009 yılında Karaaslan, farklı geometrik şekillerdeki birim hücrelerden oluşan yapay ortamların mikrodalga frekansında  $\epsilon$  ve  $\mu$  değerlerinin negatif olma durumunu incelemiş ve bu durumu sağlamıştır. Bu yapıları FEM tabanlı simülasyon programını kullanarak yapmıştır (Karaaslan 2009).

Metamalzemeler ilerleyen zamanlarda farklı bir uygulama alanı bulmuştur. Bu uygulama alanı; metamalzemeler sensörlere entegre edilerek, sensörlerin algılama hassasiyetini ve kazancını arttırmaya yöneliktir. 2008 yılında, düzlemsel metamalzemelerin birim hücrelerinin küçük bakışimsız asimetrisinden dolayı dairesel polarizeli ışık için güçlü rezonans asimetrik iletme yol açması incelenmiştir. 2009 senesinde, metamalzeme tabanlı ayırık halka tipi rezonatör yapı ile esnek kablosuz gerilme ölçümü yapan bir sensör tasarımı ve üretimi yapılmıştır (Melik ve ark. 2009). Melik ve ark. yeni bir sensör tasarımını da gündeme getirmişlerdir. Bu tasarım ise SRR yapıların dışındaki farklı rezonatör yapılarıyla da sensör uygulaması gerçekleştirilebileceğidir.

Yine Melik ve ark. metamalzeme tabanlı RF- mikro elektromekanik sistem basınç sensörü tasarımını ve üretimini gerçekleştirmişlerdir. Bu sensör çoklu halka rezonatörün birleştirilmesinden oluşmuştur (Melik ve ark. 2010). 2013 yılında, THz frekans bölgesinde çalışan hassas bir sensör üretilebileceğini nümerik olarak gösterilmiştir (Sabah ve Roskos 2013a). Ayrıca, metamalzeme tabanlı ayırık halka tipi rezonatör ile mikro akışkan ölçümü yapan sensör tasarımı ve üretimini yapmışlardır (Withayachumnankul ve ark. 2013).

2013 senesinde, çok fonksiyonlu bir sensör tasarlanmıştır. Bu sensör elektriksel büyüklüğü geleneksel metamalzeme sensörlerine göre azaltılmış ve hassaslığı artırılmış ayırık halka tip rezonatör sensör yapısına sahipti. Bu tasarım üretime yapılmıştır. Fakat bazı uygulamalar için deneysel çalışmaları yapılmıştır. Diğer uygulamaları için ise, nümerik çalışmaları yapılmıştır. (Ekmekçi ve Sayan 2013). 2014 yılında magnetostatik salınımlı alt dalga boylu ferit disk rezonatör tabanlı sensör tasarımı yapılmıştır. (Joffe 2014). Yine biyolojik yapılar için mikrodalga frekansında çalışan magnetostatik magnon sensörü tasarlanmıştır (Hollander ve ark. 2014).

Klasik geometrik yapılara sahip metamalzeme yapıların sensör uygulamaları birçok çalışma yürütülmüştür (Huang ve ark. 2009, He ve ark. 2010, Yang ve ark. 2010, Fabio ve ark. 2013, Yang ve ark. 2013, Karaaslan ve Bakıroğlu 2014).

Metamalzemelerin sensör uygulaması yeni bir konu olması ve geliştirilmeye yatkın bir konu olmasından, sürekli olarak araştırılacak ve üretimi yapılacak bir uygulama alanıdır.

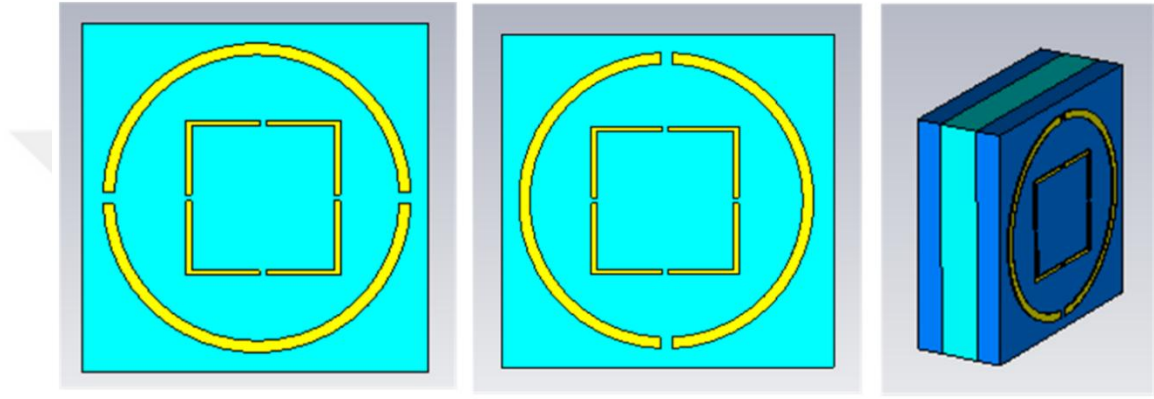
Bakışimsız metamalzeme içerisinde dalga yayılımı analizi parametrelerin geri elde edilme metodu ile bakışimsız metamalzeme tabakasına 2010 ve 2011 yıllarında Zhao ve ark. tarafından uygulanmıştır (Zhao ve ark. 2010). Ardından gamalı haç eşleniği şeklinde bakışimsız bir metamalzeme tasarlanmıştır. Bu tasarım üzerinde deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmıştır. Tasarlanan yapının optik aktivasyon ve dairesel polarizasyon gösterdiği tespit edilmiştir (Zhao ve ark. 2011). Böylece bakışimsız metamalzemeler ile dielektrik geçirgenlik sabiti, manyetik geçirgenlik ve bakışimsızlık parametresi gibi parametrelerin geri elde edilmesi çalışmaları diğer çalışmalara örnek olmuştur. Bu çalışmalarda üretimi etkileyen en önemli nokta rezonatörün geometrik yapısının basitliğidir. Bu çalışmadaki geometrik yapı basit bir yapıya sahip değildir. Bu da mekanik ayarlanabilirliği olumsuz etkilemektedir. Ayrıca yine bu çalışmada bakışimsızlık parametresi ve indis için FOM analizi gerçekleştirilmemiştir.

Ayrık halka tipi rezonatör ve şerit iletkenlerden oluşan çift yönlü izotropik olmayan metamalzeme tabakaların EM özelliklerini parametrelerin geri elde edilmesi metodu ile Hasar ve ark. tarafından gözlemlenmiştir (Hasar ve ark. 2012a). Yine aynı yıl içerisinde, bu kez çalışmalarında izotropik ayrık halka tipi rezonatör ve çubuk iletkenlerden oluşan bir yapı kullanmışlardır. Bu metamalzeme tabanlı yapının EM özelliklerini parametrelerin geri elde edilme metodu için üç farklı metot uygulamışlardır. Birinci ve ikinci teknikte, belirli kalibrasyon bağımlı ve bağımsız yöntemleri analitik olarak kullanmış olup, son metotta ise Lorentz ve Drude dispersiyon metodu kullanılmıştır (Hasar ve ark. 2012b).

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1.Çok Fonksiyonlu Bakışsız Metamalzeme Tabanlı Sensör

Aşağıda bu çalışmada kullanılan yapı hakkında bilgi verilmiştir. Kullanılan bu yapı FIT tabanlı 3D simülasyon programı kullanılarak analiz edilmiştir. Deneysel çalışmalarında ise, dielektrik alt taşı malzemeler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

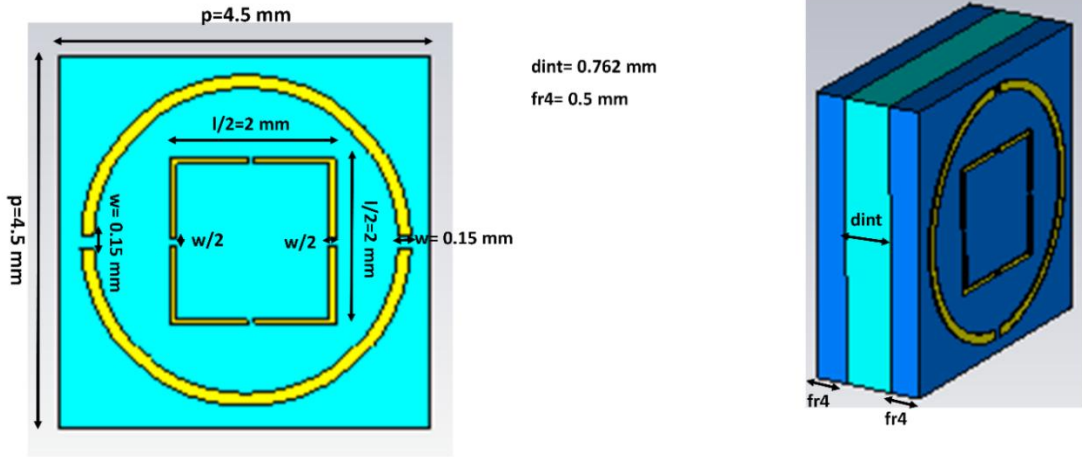


Şekil 3.1. Çok fonksiyonlu bakışsız metamalzeme tabanlı sensör yapısı

Ölçümler ise network analizörler kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca aşağıda yapılan çalışmada kullanılan metamalzeme yapının özellikleri, boyutları ve üretim tekniği ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Amaçlanan bakışsız metamalzeme çok fonksiyonlu sensör yapısı olduğundan, üç yüzeyin birleşmesinden oluşmaktadır. Tasarımda sensör yüzey 2 bakışsız malzeme arasına yerleştirilmiştir. Bu yüzey; basınç, nem, yoğunluk, sıcaklık ölçen çok fonksiyonlu bir sensördür. Üst ve alt yüzeye SDRS kalıntılar yerleştirilmiştir. Arka tarafındaki SDRS yapı 90° döndürülmüştür. Yüzeyde bulunan dielektrik yapı tüm sensörler için aynı boyut ve ölçülerde yapılmıştır. Buradaki amaç ise, bakışsız madde sabitini sağlamaktır. İlk yüzey Gil GML 1000 cinsi dielektrik alt taşı, kalınlığı ise 0.5 mm olarak belirlenmiştir. Ara yüzey kalınlığı ve EM özellikleri sensörün amacına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Üçüncü yüzey ise yine Gil GML 1000 cinsi dielektrik alt taşı, kalınlığı ise 0.5 mm olarak belirlenmiştir. Dielektrik olarak Gil GML 1000 cinsi alt taşı, metal tabakalar için ise,  $5.8001 \times 10^7$  S/m elektrik iletkenliğine ve

0.035 mm kalınlığa sahip bakır cinsi metal seçilmiştir. Gil GML 1000 dielektriğin kalınlığı, kayıp tanjantı ve dielektrik geçirgenlik değerleri sırasıyla 0.5 mm (hem n hem de arka yüzey için), 0.004 ve 3.2 şeklindedir.



Şekil 3.2. Çok fonksiyonlu sensör yapının boyutları

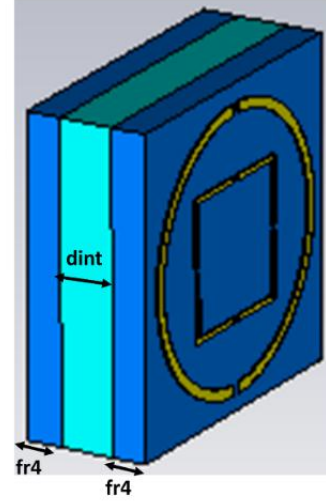
Burada her SDRS yapı güçlü bir çift oluşturmak ve snmleninin olmaması için birim hücrenin zıt taraflarına yerleştirilmiştir. Böyle bir tasarımın diğer bir avantajı ise hassaslığı artırmasıdır.

### 3.1.1. Bakışsız Metamalzeme Tabanlı Basınc Sensörü

Yukarıda tanımlanan çok fonksiyonlu sensör vasıtasıyla basınc ölümü yapılmak istenildiğinde, tasarımda sadece sensör yüzeyinin kalınlığının değişken yapılması gerekmektedir. Ara yüzeyin kalınlığı dint; 0.3mm ile 1.8mm arasında 5 adım arasında değer almıştır.

Diğer tüm ller ve boyutlar sabittir. İlk yüzey Gil GML 1000 cinsi dielektrik alt taşı, kalınlığı ise 0.5 mm olarak belirlenmiştir. Ara yüzey Vacuum (hava) ile doldurularak basınc sensörü için aradaki mesafe değişken olarak atanmıştır. Ara yüzeyin dielektrik geçirgenliği ve kayıp tanjantı sırayla; 1 ve 0.001 'dir. nc yüzey ise yine Gil GML 1000 cinsi dielektrik alt taşı, kalınlığı ise 0.5 mm olarak belirlenmiştir.

dint= 0.3 mm  
dint= 0.675 mm  
dint= 1.05 mm  
dint= 1.425 mm  
dint= 1.8 mm



Şekil 3.3. Basınç sensörü için değişken aralık değerleri

Dielektrik olarak Gil GML 1000 cinsi alt taşı, metal tabakalar için ise,  $5.8001 \times 10^7$  S/m elektrik iletkenliğine ve 0.035 mm kalınlığa sahip bakır cinsi metal seçilmiştir. Gil GML 1000 dielektriğin kalınlığı, kayıp tanjantı ve dielektrik geçirgenlik değerleri sırasıyla 0.5 mm (hem ön hem de arka yüzey için), 0.004 ve 3.2 şeklindedir.

Üçüncü yüzeyin üzerindeki SDRS yapı  $90^\circ$  çevrilmiştir. Burada her SDRS yapı güçlü bir çift oluşturmak ve sönümlenmenin olmaması için birim hücrenin zıt taraflarına yerleştirilmiştir. Böyle bir tasarımın diğer bir avantajı ise hassaslığı artırmasıdır.

Ölçüm X ekseninde yapılmaktadır. Değişken koordinat X ekseninde bulunmaktadır. Değişken uzaklığa bağlı olarak rezonans frekans da lineer değişim göstermesi sensörün başarılı bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Aslında mesafe arttıkça; rezonans dalga boyu yukarı kayar, rezonans frekansı ise aşağıya doğru kayar. Ayrıca diğer metamalzeme tabanlı sensör yapılarından kazancı daha yüksektir.

### 3.1.2. Bakışsız Metamalzeme Tabanlı Sıcaklık Sensörü

Amaçlanan bakışsız sensör yapısı üç yüzeyin birleşmesinden oluşmaktadır. Tasarımda sensör yüzey 2 bakışsız malzeme arasına yerleştirilmiştir. Üst ve alt yüzeye SDRS kalıntıları yerleştirilmiştir. Arka tarafındaki SDRS yapı  $90^\circ$  döndürülmüştür. Yüzeyde bulunan dielektrik yapı sabit boyut ve ölçülerde yapılmıştır. Buradaki amaç ise, bakışsız madde sabitini sağlamaktır. İlk yüzey Gil GML 1000

cinsi dielektrik alt taşı, kalınlığı ise 0.5 mm olarak belirlenmiştir. Ara yüzey kalınlığı 0.76 mm olarak tanımlanmıştır. Ara yüzeyde kullanılan maddenin dielektrik geçirgenlik sabiti ve kayıp tanjant değerleri maddenin sıcaklık değerlerine bağlı olan farklı değerleri için değişiklik göstermektedir. Kemik iliğinin sıcaklık değeri 30°C ile 90°C arasındaki değişikliğe bağlı olarak, oluşan dielektrik değerlere göre yapılmıştır. Bu şekilde bir tasarım yapılmasındaki amaç sıcaklık değerlerine bağlı olarak sensörün de rezonans frekansında lineer bir tepki görmektir. Lineer tepki, sensörün başarılı bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Üçüncü yüzey ise yine Gil GML 1000 cinsi dielektrik alt taşı, kalınlığı ise 0.5 mm olarak belirlenmiştir. Dielektrik olarak Gil GML 1000 cinsi alt taşı, metal tabakalar için ise,  $5.8001 \times 10^7$  S/m elektrik iletkenliğine ve 0.035 mm kalınlığa sahip bakır cinsi metal seçilmiştir. Gil GML 1000 dielektriğin kalınlığı, kayıp tanjantı ve dielektrik geçirgenlik değerleri sırasıyla 0.5 mm (hem ön hem de arka yüzey için), 0.004 ve 3.2 şeklindedir. Burada her SDRS yapı güçlü bir çift oluşturmak ve sönümlemenin olmaması için birim hücrenin zıt taraflarına yerleştirilmiştir. Böyle bir tasarımın diğer bir avantajı ise hassaslığı artırmasıdır. Sıcaklık arttıkça, rezonans frekans düşmektedir.

### **3.1.3. Bakışsız Metamalzeme Tabanlı Yoğunluk Sensörü**

Amaçlanan bakışsız sensör yapısı üç yüzeyin birleşmesinden oluşmaktadır. Tasarımda sensör yüzey 2 bakışsız malzeme arasına yerleştirilmiştir. Üst ve alt yüzeye SDRS kalıntıları yerleştirilmiştir. Arka tarafındaki SDRS yapı 90° döndürülmüştür. Yüzeyde bulunan dielektrik yapı sabit boyut ve ölçülerde yapılmıştır. Buradaki amaç ise, bakışsız madde sabitini sağlamaktır. İlk yüzey Gil GML 1000 cinsi dielektrik alt taşı, kalınlığı ise 0.5 mm olarak belirlenmiştir. Ara yüzey kalınlığı 0.762 mm olarak tanımlanmıştır. Ara yüzeyde kullanılan maddenin dielektrik geçirgenlik sabiti değerleri maddenin yoğunluk değerlerine bağlı olan farklı değerleri için değişiklik göstermektedir.

Kalsiyum kloritin yoğunluk değeri %17 ile %22 arasında değişikliğe bağlı olarak, oluşan dielektrik değerlere göre yapılmıştır. Değişim diğer sensör çalışmalarında olduğu gibi lineer olarak değişiklik göstermektedir. Üçüncü yüzey ise yine Gil GML 1000 cinsi dielektrik alt taşı, kalınlığı ise 0.5 mm olarak belirlenmiştir. Dielektrik olarak

Gil GML 1000 cinsi alt taşı, metal tabakalar için ise,  $5.8001 \times 10^7$  S/m elektrik iletkenliğine ve 0.035 mm kalınlığa sahip bakır cinsi metal seçilmiştir. Gil GML 1000 dielektriğin kalınlığı, kayıp tanjantı ve dielektrik geçirgenlik değerleri sırasıyla 0.5 mm (hem ön hem de arka yüzey için), 0.004 ve 3.2 şeklindedir. Burada her SDRS yapı güçlü bir çift oluşturmak ve sönümlemenin olmaması için birim hücrenin zıt taraflarına yerleştirilmiştir.

#### **3.1.4. Bakımsız Metamalzeme Tabanlı Nem Sensörü**

Aynı şekilde sensör yapısı 3 yüzeyden oluşmaktadır. Arka ve ön yüzeyde SDRS yapı bulunmaktadır. Arka yüzeydeki SDRS yapı  $90^\circ$  döndürülmüştür. Ara yüzey sensör kısmıdır. Nem sensörü için bu ara yüzey kalınlığı sabit belirlenmiştir. Fakat bu ara yüzey EM özellikleri nem değerine bağlı olarak değişkendir. Aradaki malzemenin dielektrik sabiti ve kayıp tanjant değerleri değişkendir. Ara yüzey kalınlığı 0.762 mm olarak tanımlanmıştır. Diğer tüm boyut ve ölçüler sabittir. İlk yüzey Gil GML 1000 cinsi dielektrik alt taşı, kalınlığı ise 0.5 mm olarak belirlenmiştir. Üçüncü yüzey ise yine Gil GML 1000 cinsi dielektrik alt taşı, kalınlığı ise 0.5 mm olarak belirlenmiştir. Dielektrik olarak Gil GML 1000 cinsi alt taşı, metal tabakalar için ise,  $5.8001 \times 10^7$  S/m elektrik iletkenliğine ve 0.035 mm kalınlığa sahip bakır cinsi metal seçilmiştir. Gil GML 1000 dielektriğin kalınlığı, kayıp tanjantı ve dielektrik geçirgenlik değerleri sırasıyla 0.5 mm (hem ön hem de arka yüzey için), 0.004 ve 3.2 şeklindedir. Burada her SDRS yapı güçlü bir çift oluşturmak ve sönümlemenin olmaması için birim hücrenin zıt taraflarına yerleştirilmiştir. Nem sensörü mükemmel bir hassaslık sağlamıştır. Literatür incelendiğinde, metamalzeme sensörlerinden oldukça verimli, adımları düzenlidir. Sensör yüzeyindeki dielektrik artış, ara yüzeyin kırılma indeksini artırır ve dalga boyu kayar. Sonuç olarak rezonans frekans üst frekanslara kayar.

#### **3.2.Yöntem**

Metamalzemelerin dielektrik özelliklerinin ölçülmesi için birçok metot geliştirilmiştir. Çift port, tek port, frekans domeni, zaman domeni vb. metotlar kullanılmaktadır. Bu yöntemler kendi içinde sınırlandırmaları veya spesifik

kısıtlamalara sahiptir. Bu yöntemler sayesinde S parametrelerinin ölçümleri gerçekleştirilmektedir. S parametreleri ölçümleri Network Analizör yardımıyla yapmaktayız. Dielektrik geçirgenlik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerleri, S parametreleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

S parametrelerini ölçmek için kullanılan metotlar şunlardır:

- İletim/Yansıma hat metodu
- Açık/Kapalı koaksiyel probu metodu
- Serbest uzay metodu
- Rezonans metodu

Metot tercihi ise elde etmek istediğimiz parametrelere bağlıdır. Eğer S parametrelerinin direkt olarak kullanıp; dielektrik geçirgenlik sabiti, manyetik geçirgenlik, kırılma indisi ve bakışimsızlık parametresi gibi parametrelerin elde edildiği metotlar belirlidir. Bu metotlar, serbest uzay metodu ve iletim/yansıma hat metodudur. Bu çalışmada ise kullanılan metot serbest uzay metodudur. Çünkü üzerinde çalışılan yapının; üretim ve ölçüm şartları açısından en uygun metottur.

Teknolojinin ilerlemesiyle, yukarıdaki metotlar kullanılarak ölçülen S parametreleri kullanılarak; bakışimsızlık parametresi, efektif manyetik geçirgenlik ve efektif dielektrik sabiti gibi parametreler geri elde edilebilir.

Bu parametrelerin elde edilme için 4 ana yöntem kullanılmaktadır:

- Nicolson Ross Weir (NRW) metodu
- NIST iterative metodu
- Yeni non-iterative metodu
- Kısa devre hat metodu

Bu çalışmada Nicolson Ross Weir metodu kullanılmıştır. Bu metodun tercih edilmesinin nedeni S parametrelerinden; kırılma indisini, efektif dielektrik sabitini, bakışimsızlık parametresini ve efektif manyetik geçirgenlik değerlerinin hesaplamasından dolayı tercih edilmektedir.

### 3.2.1. Metamalzemelerde Parametrelerin Geri Elde Edilmesi

Ortamın EM özelliklerinin karakterize edilebilmesi için kullanılan en yaygın ve önemli teknik parametrelerin geri elde edilme yöntemidir. Nümerik ve deneysel sonuçların doğrulanabilmesi, yeni metamalzemelerin tasarlanması, negatif kırılma indisinin bulunması için kullanılmaktadır.

Aslında yapılan işlem şudur: Simülasyon çalışmaları yapılan bir yapının EM karakteristiğini incelemek için Nicolson Ross Weir metodu kullanılmasıdır. Mikrodalga frekansında S parametrelerinden yapının kompleks  $\epsilon$  ve  $\mu$  değerleri elde edilir.

Manyetik Geçirgenlik;

$$\mu = \mu_0 \mu_r, \quad (3.1)$$

Dielektrik Geçirgenlik;

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r, \quad (3.2)$$

$$\text{Dalga Kılavuzunun Kalınlığı; } d \quad (3.3)$$

Empedansı;

$$\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} Z_0 \quad (3.4)$$

Farklı empedans değerine sahip 2 farklı ortamda,  $Z$  ve  $Z_0$  olsun.  $d$ ,  $Z$  empedanslı ortamın kalınlığı ve sonsuz olarak varsayılırsa,  $Z$  empedanslı ortama gelen dalganın yansımaya katsayısı (3.5) numaralı denklemdeki gibi yazılabilir (Nicolson ve Ross 1970).

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} = \frac{\sqrt{\mu_r/\epsilon_r} - 1}{\sqrt{\mu_r/\epsilon_r} + 1} \quad (3.5)$$

Sonsuz d kalınlığı için tabakanın Z empedanslı ortamın sağındaki ve solundaki yüzleri arasındaki S11 ve S21 katsayıları için (Nicolson ve Ross 1970, Luukkonen ve ark. 2011);

$$z = \exp -j\omega\sqrt{\mu\epsilon}d = \exp[-j(\omega/c)\sqrt{\mu_r\epsilon_r}d] \quad (3.6)$$

$$S_{21}(\omega) = \frac{(1+\Gamma)(1-\Gamma)Z}{1-\Gamma^2Z^2} = \frac{(1-\Gamma^2)Z}{1-\Gamma^2Z^2} \quad (3.7)$$

$$S_{11}(\omega) = \frac{(1-z^2)\Gamma}{1-\Gamma^2Z^2} \quad (3.8)$$

$$Z = \pm \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (3.9)$$

empedans değeri hesaplanabilir. İletim ve yansıma katsayılarının toplamları ve çıkarımları ele alınırsa (Dinçer 2015);

$$V_1 = S_{21} + S_{11} \quad (3.10)$$

$$V_2 = S_{21} - S_{11} \quad (3.11)$$

$$X = \frac{1+V_1V_2}{V_1+V_2} = \frac{1+Z^2}{2Z} \quad (3.12)$$

$$Y = \frac{1-V_1V_2}{V_1-V_2} = \frac{1+\Gamma^2}{2\Gamma} \quad (3.13)$$

İletim ve yansıma parametreleri için;

$$Z = \frac{V_1-\Gamma}{1-\Gamma V_1} \quad (3.14)$$

$$\Gamma = \frac{Z-V_2}{1-ZV_2} \quad (3.15)$$

olarak bulunur. Metamalzemenin elektriksel kalınlığının çok büyük olmadığı kabul edilirse;

$k_{real}d \leq 1$  ve bilinen kompleks dalga numarası;

$$k = \omega \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} / c = k_0 \sqrt{\mu_r \varepsilon_r}$$

dalga empedans değeri, dielektrik geçirgenlik ve manyetik geçirgenliği elde etmek için  $Z \sim 1 - jkd$  kabul edilirse;

$$k \sim \frac{1}{jd} \frac{(1 - V_1)(1 + \Gamma)}{1 - \Gamma V_1} \quad (3.16)$$

$$\mu_r \sim \left( \frac{2}{jk_0 d} \right) \frac{(1 - V_2)}{1 + V_2} \quad (3.17)$$

$$\varepsilon_r \sim \left( \frac{2}{jk_0 d} \right) \frac{(1 - V_1)}{1 + V_1} \quad (3.18)$$

Şeklinde etkin ortam parametre değeri hesaplanabilir.

Nicolson Ross Weir metodu, Matlab programı ile yazılmıştır. Tasarlanma amacı nümerik çalışması yapılan metamalzeme yapıların etkin ortam parametrelerinin rahatlıkla hesaplanabilmesi içindir.

Bakışimsız yapılarda meydana gelen çift yönlü izotropik ortam özelliği aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir (Wang ve ark. 2009b, Wang ve ark. 2009c, Fu ve ark. 2011):

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E + (\chi + i\kappa) \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} H \quad (3.19)$$

$$B = \mu_0 \mu_r H + (\chi - i\kappa) \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} E \quad (3.20)$$

Yukarıdaki denklemlerde kullanılan  $\varepsilon_r$  ortamın dielektrik sabiti,  $\varepsilon_0$  boşluğun dielektrik sabiti,  $\mu_r$  ortamın manyetik geçirgenlik sabiti,  $\mu_0$  boşluğun manyetik geçirgenliği,  $\chi$  elektrik-manyetik hassasiyeti ve  $\kappa$  malzemenin bakışimsızlık parametresidir. İzotropik bakışimsız ortam içerisinde bir düzlem dalga yayılımı dikkate alınır (Wang ve ark. 2009b);

Elektrik alan;

$$kx(kxE) = -k_0^2(\epsilon\mu - \kappa^2)E - 2i\kappa k_0(kxE) \quad (3.21)$$

eşitsizliğinden elde edilebilir.

Burada,  $k_0 = \omega/c$  serbest uzaydaki dalga vektörünü ve  $c = \sqrt{\epsilon_0\mu_0}$  boşluktaki ışık hızını ifade etmektedir.

Sağ el ve sol el dairesel polarize dalgaların vektörleri birbirlerinden farklıdır. Bu farklılığın nedeni bakışimsız ortamda ilerleyen dalgaların sağ ve sol el dairesel polarize dalgaların faz hızlarının farklı olmasıdır. Bakışimsız ortamda ilerleyen dalganın dairesel polarize olur. Bu durumun sonucu olarak bakışım ortam içinde lineer polarize olan dalganın polarizasyon düzlemi değişir ve döner. Bu etkiye optik aktivite denilmektedir. Eliptik polarize dalganın polarizasyon dönme açısı olarak ifade edilmektedir (Li ve ark. 2010a, Li ve ark. 2010b, Cheng ve ark. 2013).

$$\theta = 0.5[\arg(T^+) - \arg(T^-)] \quad (3.22)$$

$T^+$  ve  $T^-$  sırasıyla sağ el ve sol el dairesel polarizasyon dalganın iletim katsayılarıdır. Ortam bakışimsız olduğundan, sağ ve sol el polarize dalgalar ortam ile her biri farklı etkileşim içerisinde olur. Bu nedenle emilim ve zayıflama oluşur. Buna ise dairesel dikroizm denir. Dairesel döndürme şu şekilde ifade edilebilir (Wang ve ark. 2009b, Wang ve ark. 2009c, Dincer ve ark. 2014g):

$$\eta = 0.5 \tan^{-1}(|T^+|^2 - |T^-|^2) / (|T^+|^2 + |T^-|^2) \quad (3.23)$$

$$T_{\pm} = \frac{4ze^{ik_{\pm}d}}{(1+z)^2 - (1-z)^2 e^{2ink_0d}} \quad (3.24)$$

$$R_{\pm} = \frac{(1-z^2)(e^{2ink_0d} - 1)}{(1+z)^2 - (1-z)^2 e^{2ink_0d}} \quad (3.25)$$

Burada  $R^+$  ve  $R^-$  sağ eli ve sol eli dairesel polarizasyonlu EM dalgalarda birbirine eşittir. Dolayısı ile ortamın bakışsızlık parametresi sıfır değerine eşit varsayılırsa;

$$R_{\pm}=R \quad (3.26)$$

$$T_{\pm}=T e^{\pm i k k^0 d} \quad (3.27)$$

olarak yazılabilir.

Yansıma ve iletim parametreleri kullanılarak;

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1+R)^2 - T_+ T_-}{(1-R)^2 - T_+ T_-}} \quad (3.28)$$

$$n_{\pm} = \frac{i}{k_0 d} \left\{ \log \left[ \frac{1}{T_{\pm}} \left( 1 - \frac{z-1}{z+1} R \right) \right] \pm 2m\pi \right\} \quad (3.29)$$

$m$  düğüm sayısı değeridir. Ve tamsayıdır. Bakışsız metalmalzemelerin empedans değeri ve sağ / sol el kırılma indis değeri bulunduktan sonra diğer parametreleri de bu değerleri kullanarak bulunabilir.

Bakışsızlık parametresi, negatif kırılma indisi, manyetik ve dielektrik geçirgenlik değerleri için (Wang ve ark. 2009b, Wang ve ark. 2009c);

$$\kappa = \frac{n_+ - n_-}{2} \quad (3.30)$$

$$n = \frac{n_+ + n_-}{2} \quad (3.31)$$

$$\mu = n z \quad (3.32)$$

$$\varepsilon = \frac{n}{z} \quad (3.33)$$

olarak hesaplanır.

### 3.2.2. Nicolson Ross Weir Metodu

$S_{11}$  ve  $S_{21}$  parametrelerinden dielektrik sabiti ( $\epsilon$ ) ve manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ) katsayılarını elde etmek için Nicolson, Ross ve Weir' in oluşturduğu denklemlerdir. Bu çalışmada da bu yöntem kullanılmıştır. Bu yöntem sayesinde  $S_{11}$  ile  $S_{21}$  parametrelerinin, yansımaya katsayısının ( $\Gamma$ ) , iletim katsayısının ( $T$ ), manyetik geçirgenlik katsayısının ( $\mu$ ) ve dielektrik katsayısının ( $\epsilon$ ) hesaplanması; aşağıdaki denklemlerle gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca bu değerler, FIT tabanlı 3D simülasyon programı veya FEM tabanlı simülasyon programları ile de elde edilebilmektedir.

$$S_{11} = \frac{\Gamma(1-T^2)}{1-\Gamma^2T^2} \quad \text{ve} \quad S_{21} = \frac{T(1-\Gamma^2)}{1-\Gamma^2T^2} \quad (3.34)$$

Yansımaya Katsayısı;

$$\Gamma = X \pm \sqrt{X^2 - 1} \quad (3.35)$$

$$X = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (3.36)$$

İletim Katsayısı;

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (3.37)$$

Manyetik geçirgenlik katsayısının gerçel sayı kısmı;

$$\mu_r = \frac{1 + \Gamma_1}{\Lambda(1 - \Gamma) \sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \quad (3.38)$$

$\lambda_0$  Boşluktaki dalga boyunu,  $\lambda_c$  kesim dalga boyunu ifade etmektedir.

$$\frac{1}{\Lambda^2} = \left( \frac{\epsilon_r \mu_r}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2} \right) = - \left( \frac{1}{2\pi L} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \right)^2 \quad (3.39)$$

Dielektrik sabiti de aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$\epsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r} \left( \frac{1}{\lambda_c^2} - \left[ \frac{1}{2\pi L} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \right]^2 \right) \quad (3.40)$$

Dalga empedansı ( $z$ )'nin S11 ve S21 ile ilişkisi;

$$z = \sqrt{\frac{(1+S11)^2 - S21^2}{(1-S11)^2 - S21^2}} \quad (3.41)$$

Kırılma indisi ise aşağıdaki gibidir.

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \text{ veya } \epsilon = n/Z, \mu = nZ \quad (3.42)$$

formüllerinden hesaplanabilir.

3.38 ve 3.40 denklemlerinden elde edilen sonuçlar tasarlanan malzemelerin epsilon negatif veya çift negatif özelliğini belirlemek için kullanılmıştır. ENG malzeme için  $\epsilon_r < 0$  olması sağlanacak, aranan bakışimsızlık değerleri ile  $\epsilon_r < 0$  ortam değişkenleri koşullarının aynı zamanda gerçekleşmesi sağlanacaktır.

### 3.2.3. Elektromanyetik Dalgalar için Nümerik Metotlar

Simülasyon çalışmalarında birçok metot kullanılabilceği gibi, nümerik metotlar da kullanılabilir. Maxwell denklemleri, çalışmalarda en önemli ihtiyaç olan elektrik ve manyetik alanı belirlemek için kullanılır. Maxwell denklemleri diferansiyel denklemlerdir. Elbette ki, diferansiyel denklemleri çözmek için birçok metot ve yöntem vardır. Metot belirlerken ise, ihtiyaçlarımıza karşılık vermesi ana etken olacaktır.

Maxwell denklemleri hiperbolik ve kısmi diferansiyel denklemlerdir. İzotropik, lineer ve dispersif olmayan ortamlar için bu denklemler;

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \nabla \times \vec{H} - \vec{J}_e \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E} - \vec{J}_m \quad (3.44)$$

Elektrik ve manyetik alanlar için Gauss yasası;

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (3.45)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.46)$$

Aşağıdaki akı vektörleri  $\vec{D}$  ve  $\vec{B}$  için, alan vektörleriyle  $\vec{E}$  ve  $\vec{H}$  ile olan ilişkisinden dolayı;

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (3.47)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.48)$$

olarak tanımlanır.

Dielektrik sabiti  $\epsilon$  ve manyetik geçirgenlik  $\mu$ , lineer ve izotropik olan bir ortamda boşluğun fiziksel bir fonksiyonudur. Elektrik ve manyetik kayıplar ise, elektrik akım  $\vec{J}_e$  ve manyetik akım  $\vec{J}_m$  yoğunlukları kullanılarak bulunabilir.

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} = \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} \quad (3.49)$$

$$\vec{J}_m = \sigma^* \vec{H} \quad (3.50)$$

Diferansiyel denklem çözme metotları;

- ❖ Sonlu Farklar Zaman Domeni (Finite Difference Time Domain- FDTD)
- ❖ Çoklu Zaman Domeni (Multiresolution Time Domain- MRTD)
- ❖ Sonlu Elemanlar Metodu (Finite Element metot- FEM)
- ❖ Sonlu Toplamlar Metodu (Finite Integration Technique- FIT)
- ❖ Sözde Spektral Zaman Domeni (Pseudo Spectral Time Domain- PSTD)
- ❖ Sözde Spektral Uzak Domeni (Pseudo Spectral Spatial Domain- PSSD)
- ❖ Bir Boyutlu Yerel FDTD (Locally One Dimensional FDTD)

Bu çalışmadaki Sonlu Toplamlar Metodu (FIT) tabanlı 3D simülasyon programı kullanılmıştır. Çünkü hem zaman hem de frekans domeninde EM alan problemlerini nümerik olarak çözümlenmesini başarmaktadır. FIT metodunun ayrık tabanlı metot olması her iki domende de çözüm sunmasına ayrıcalık sağlamıştır.

### **1- Sonlu Farklar Zaman Domeni Metodu**

Bu metot kullanıcının tek başına uygulayıp kullanabileceği tam dalga çözücü gibi özel problemlerin çözümünde kullanılacak son derece anlaşılır ve pratik bir metottur. Farklı zaman domenine modellenmesine sahiptir. Bu metotla tam dalga EM dalga problemleri çözümlenirken, farklar denklemlerinin içerisine kısmi diferansiyel olan Maxwell denklemleri eklenir. Belirlenen zaman sabitine bağlı periyodik olarak elektrik alan çözümlenmesi yapılır. Yine zaman sabitine bağlı olarak ardından manyetik alan çözümlenmesi yapılır (Weiland 1996, Rokhlin 1985, Mohammadian ve ark. 1991, Davidson 2010).

### **2- Çoklu Zaman Domeni Metodu**

Yaygın bir kullanım alanı yoktur. Bir boyutlu yerel FDTD metodu için alternatif olabilecek bir metottur (Greengard ve Rokhlin 1987, Mohammadian ve ark. 1991).

### **3- Sonlu Elemanlar Metodu**

Karmaşık denklemlerin ya da zaman domeninde hassas kısmi farklar denklemleri için kullanılabilecek bir çözümdür. Sıralı farklı denklemlerin içine iki zaman türevi (ki sabit olmalı) alıp, kısmi denklemlerini kullanır. Daha sonra standart çözümleri kullanarak sonuca ulaştırır (Rokhlin 1985, Greengard ve Rokhlin 1987, Manzanares-Martinez ve Gaspar-Armenta 2007).

#### **4- Sonlu Toplamlar Metodu**

Tam dalga EM çözümü yapan ve istenilen frekans bölgesinde çalışan, bilgisayar için en uygun integral biçimlerinde Maxwell denklemlerinde ayrık formül haline getiren metottur. Ayrıca Maxwell denklemlerini lineer sistem denklemlerine dönüştürerek, bizlere ara yüzeylerdeki ve farklı ortamlardaki bağlantıyı hassas olarak inceleme olanağı tanır. Geometrik modellemesi esnek olduğundan kavisli sınırlarda ve karmaşık geometriye sahip şekillerde doğru sonuç vermektedir (Clemens ve Weiland, 2001; Rahimi, 2011).

Bu özellikler yapının daha kolay test edilmesini ve tercih edilen bir yöntem olmasını sağlar. Bu metot sayesinde, enerji ve yükün korunması gibi sürekli denklemlerin temel özelliklerini bozulmaz.

#### **5- Söзде Spektral Zaman Domeni Metodu**

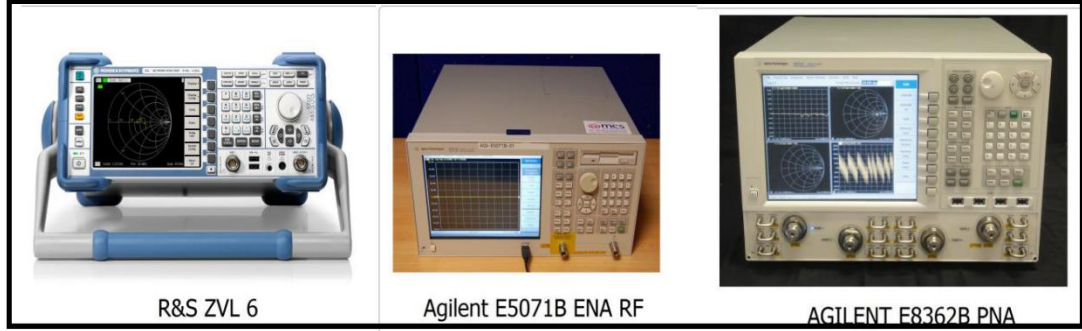
Temel olarak hem Fourier hem de Chebyshev dönüşümlerini kullanan metottur. Maxwell denklemlerinin çözümünde kullanıldığında, elektrik ve manyetik alan vektörlerini uzay koordinatlarına bağlı olarak türevlerini alıp hesaplamasını iki ya da üç boyutlu birim düzlemde sonuca ulaştırır. Elektriksel olarak daha büyük yapılar için göreceli hataları ihmal ederek çözüme imkân sağlar. Zaman domenli bir metottur (Mohammadian ve ark. 1991).

#### **6- Söзде Spektral Uzay Domeni Metodu**

Elektrik ve manyetik alanı zamanın bir fonksiyonu olarak tutarak, belirlenen uzay koordinatlarına bağlı Maxwell denklemlerini temel alarak çözüme ulaştırır. Frekans domeninde geçici türev hesaplamaları yaptığı için söзде spektraldir.

### 3.3.Ölçüm Metotları ve Düzenegi

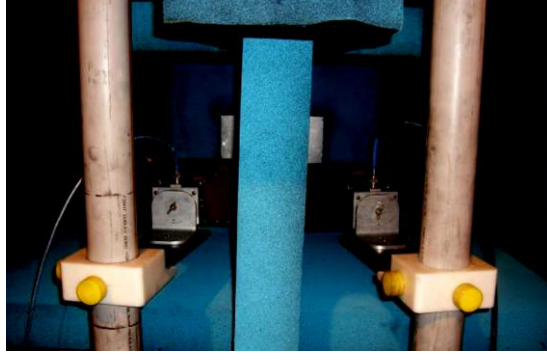
Deneysel çalışmalarda Agilent E5071B ENA RF, AGILENT E8362B PNA ve R&S ZVL6 Vektör Network Analizörleri ve bunlara bağılı mikrodalga horn antenler iletim ve yansıma katsayılarını ölçmek için kullanılmıştır. Şekil 3.4'de deneysel ölçümler için kullanılan bu analizörlere ait resimler gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Vektör network analizörleri

Deney yapısında 2 adet port bulunmaktadır. Bu 2 port, vektör network analizöre (VNA) dalga kılavuzu ara parçası kullanılarak 8-12 GHz frekans aralığında haberleştirilir. Kalibrasyon yapmak amacıyla, ölçüm yapmadan önce metalmalzeme yapısı olmadan serbest uzay ölçümleri uygulanır. Yani portların arasına metalmalzemeler ilk olarak yerleştirilmeden ölçüm yapılır. Kullanılan anten çeşidi horn antendir. Ve bu ölçüm değerleri network analizöründe kalibrasyon datası olarak kullanılır.

Yansıma değerlerinin ölçümü için, iki adet horn anten arasındaki açı minimum değerde olacak kadar yerleştirilir. Bakışsımsız metalmalzemelerden kaynaklanan çapraz etkileşmenin önüne geçmek için, antenler arasına mikrodalga emici tabaka konulur (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Yansıma değerlerinin ölçümü için örnek kurulum

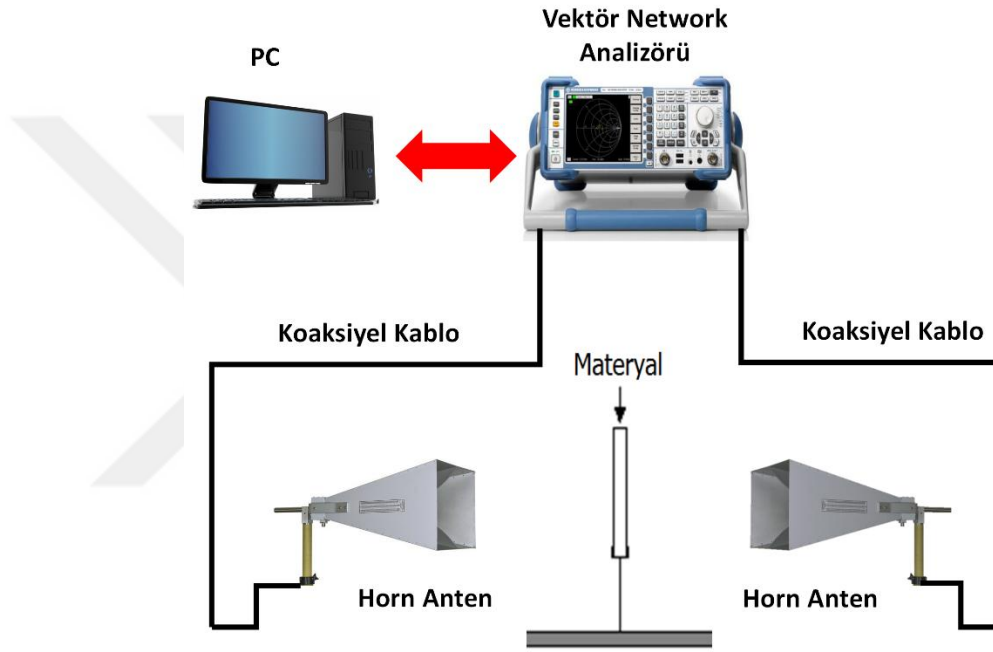
İletken duvar sınır koşulları; X-Y düzleminde iken, açık sınır koşulları Z düzlemi yönündedir. Buradaki amaç yapının 3 yüzeyden oluşması ve koordinatlarının diğer sensör yapılarından farklı tasarlanmalarından kaynaklanmaktadır. Yapının küçük olmasından dolayı 3 adet sensör yapısı birleştirilerek deney gerçekleştirilir. Fakat verimli bir yapıdır. Yani şekli dizi halindedir. Bu dizi ihmal edilebilir. Çünkü dalga kılavuz hücrelerinin ve birim hücre dizilerinin elektromanyetik karakteristiklerinin ayna ilişkisi, birim hücrenin periyodik dizisini daha yakınlaştırır. Birden fazla benzer hücre olan sensör için boş uzayda tek hücre ölçüm sonuçlarında ve dalga kılavuzunda fark edilebilir. Bu ölçüm tekniği, özellikler anekoik kabı olmayan durumda birçok metalmalzeme çalışmasında birim hücre dalga kılavuzunda dizi olarak kullanılır.

Bu tabakalar yansıma değerleri ölçülürken, antenler arasında girişimin meydana gelmesini engeller. Sensör yapısı, uygun yaklaşım sağlamak için kalibre edilmiş dalga kılavuzunun (Horn anten) altına yerleştirilir. Üretilen sensör yapısı doğru ölçümü gerçekleştirebilmesi için numune tutucusu ile birim hücre sabit olmalıdır. Numune tutucusunun tüm EM değerleri neredeyse havayla aynıdır. Yani ölçüm değerlerini etkilememektedir.

Öncelikli olarak kalibrasyon yapmak için, bakır plaka yerleştirilir. Ardından bakır levhalar çıkarılıp, üretilen metalmalzeme yapısı yerleştirilir. Sistemin çalışma mantığı ise; dalga ileten horn anten metalmalzeme yapının üzerine sinyal gönderir. Alıcı horn anten ise EM dalgayı alarak, EM dalganın genlik değerini ölçer. Fakat antenler arasındaki yakın alana etkisini engellemek amacıyla frekans değeri belirli bir düzeyde tutulmalıdır. Aslında bu antenler network analizörüne S parametrelerini ölçmek için

bağlanmıştır. Ayrıca bakımsız ortamın cross-polar ölçümünün yapılmasının nedeniyle antenler 90° döndürülmüştür.

Basınç sensörü uygulaması için, ön ve arka yüzey boyutları ve ölçüleri sabit tutulup, ara yüzey kalınlığı değişken belirlenir. X ekseninde değişim incelenir. Mesafenin değişimine bağlı olarak sensörün rezonans frekansı değişim gösterecektir. Böylece simülasyonlardan elde edilen sonuçları deney sonuçları ile desteklenmiş olur. Deney metodunu şematik olarak göstermek gerekirse;



Şekil 3.6. Deney metodunun şematik gösterimi

Sıcaklık ve nem sensörü uygulaması için, 3 yüzeyli sensör için yine port1 ve port 2 ile ölçümü yapılır. Fakat bu çalışmalarda basınç sensörü uygulamasında olduğu gibi ara yüzeyin kalınlığı değişken değildir. Çünkü amaç arada bulunan maddelerin sıcaklığını ve nemini ölçmektir. Aradaki malzemenin dielektrik geçirgenlik sabiti ve kayıp tanjant değerleri, farklı sıcaklık ve nem değerleri için değişmektedir. Bu değişiklik rezonans frekansı etkilemektedir.

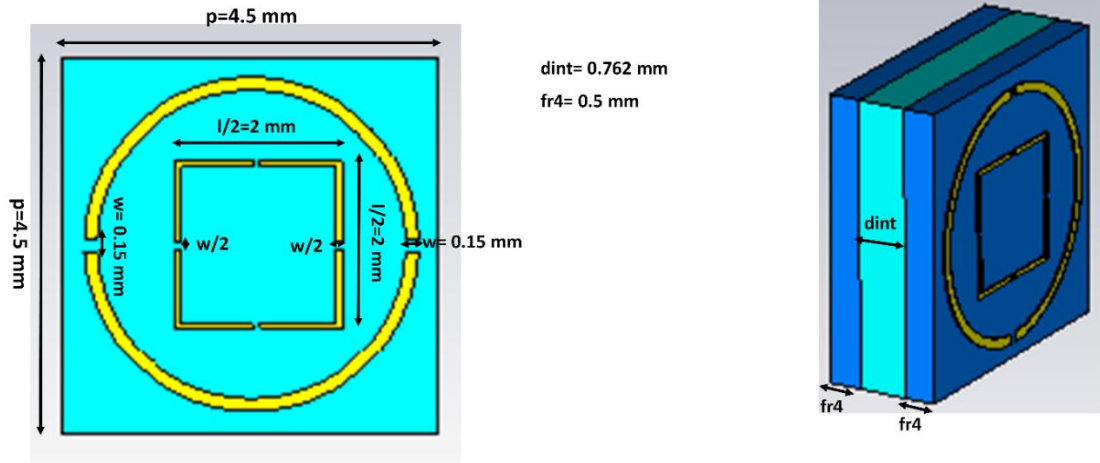
Yoğunluk sensörü uygulaması için yine port1 ve port 2 ile ölçümler yapılır. Ara yüzeyin kalınlığı sabittir. Dielektrik geçirgenlik sabiti, farklı yoğunluk değerleri için değişken olarak atanmıştır. Sıcaklık ve nem sensörü uygulamaları için kullanılan kayıp

tanjant değeri yoğunluk sensörü için kullanılmamıştır. Çünkü yoğunluk sensörü tam lineerlik göstermemektedir. Bu değişim değişkenlere bağlı olarak lineerlik göstermesi sensörün görevini yerine getirdiği anlamına gelmektedir.



#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada kullanılan çok fonksiyonlu bakışsımsız sensör yapısının; yansıma, iletim, kırılma ve bakışsımsızlık gibi EM özellikleri aşağıda ayrıntılı bir şekilde sayısal ve deneysel olarak analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlara ait grafikler çizilerek tartışılmıştır.



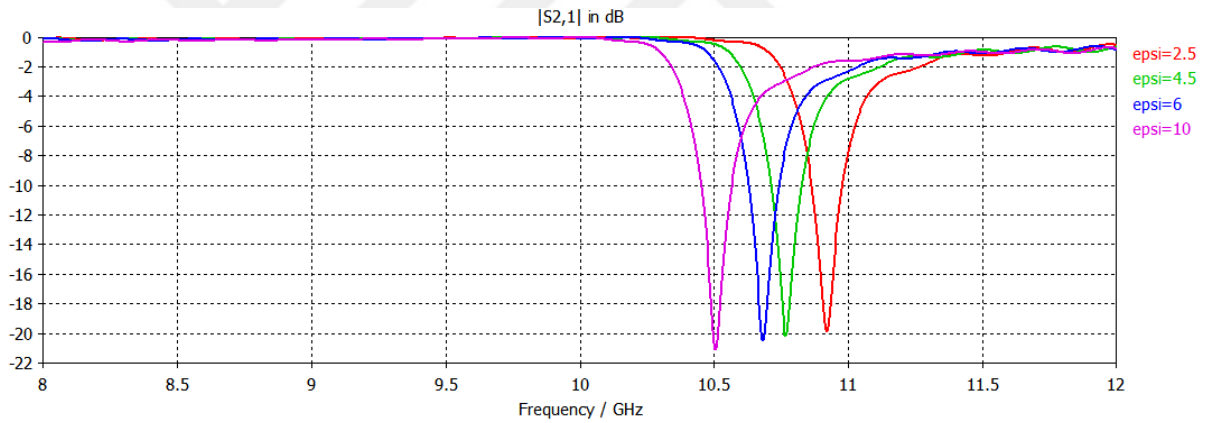
Şekil 4.1. Çok fonksiyonlu bakışsımsız sensör yapı

##### 4.1.Çok Fonksiyonlu Bakışsımsız Metamalzeme Tabanlı Sensör

SDRS yapı birden fazla birim hücre çiftinden oluşmaktadır. Sensör şu tabanlı olmalıdır. Alt yüzeyin emilimini önlemek için kayıp faktörü düşük olan bir malzeme kullanılması gereklidir. Bunu sağlamak için, alt yapı taşı GML 1000 kullanılmıştır. Değişen değerlere ve parametrelere karşılık ölçülebilir bir sinyal değeri vermelidir. Sensör yapısı lineerlik göstermelidir. Yani rezonans frekansı keskin veya yumuşak bir şekilde incelenen parametre içinde düzeli olarak kaymalıdır. Sonucusu ise, hassasiyeti yüksek olmalıdır. Bunun nedeni ise; ilgili kayma network cihazından rahatlıkla gözlemlenebilir. Bu çalışmada sensör yüzeyi, çevresel parametrelerin değişikliğini ölçmek için kullanılacaktır. Sensör yüzeyinin kalınlığındaki değişimler ve sensör yüzeyinin dielektrik sabitinin değişiminin etkisi çevresel parametreleri ölçmek için verimlidir. Ayrıca sensör yüzeyinin ön tarafındaki SDRS yapının döndürülme açısı  $0^\circ$  iken, arka yüzeydeki SDRS yapı  $90^\circ$  döndürülmüştür. Bu özellik sensöre bakışsımsızlık

özelliği katmakla beraber sağ-sol elli dairesel polarize olmuş parçaların döndürülmüş EM birleşimi sağlar.

Ayrıca metamateryal tabanlı sensöre nazaran bakışimsız metamateryal tabanlı sensör daha hassastır. Hem deney hem simülasyonlarda port 1 ve port 2 kullanılmıştır. Gerekli ayarlamalar yapıldıktan sonra X ve Y düzleminde ölçümler yapılmıştır. Ölçümlerde yapının boyutu çok küçük olduğundan, birden fazla benzer hücre kullanılmıştır. Bu yapının en önemli özelliği, çok hassas olması ve lineer grafik eğrisine sahip olmasıdır. SDRS yapı arasında kalan ara yüzey dielektrik sabitinin değiştirilmesini ve sıradan metamateryallerden hassas olmasını sağlar. SDRS tabanlı bakışimsız yapının sensör yüzeyin fiziksel mekanizması, asimetrik dalgaların ve ölçüm yüzeyinin etkileşimi yardımıyla açıklanabilir. Elektrik alan ise SDRS yüzey üzerinde yoğun şekilde dağılımı gözlenmektedir. Ayrıca sensör yapısının üzerinde bulunan SDRS yapı sensörün rezonans frekansını etkilemektedir.



Şekil 4.2. Farklı maddeler için simülasyon sonuçları

Rezonans frekansın kayması, bakışimsız yüzey ile SDRS yapı arasında kalan dielektrik yüzeyle ilgili olarak (Karaaslan ve Bakır 2014);

$$\Delta\lambda = s\Delta n \left[ 1 - e^{\left(\frac{-2d}{1^d}\right)} \right] \quad (4.1)$$

Burada; s yerel kırılma indeksinin içindeki değişim duyarlılık sabiti, n dielektrik yüzeyden kaynaklanan etkin reaktif indeks sabiti, d dielektrik yüzeyim kalınlığı,  $1^d$  yerel alanların kaybolan mesafesidir.

Ayrıca bu eşitlik için tahmini durumu bakışsızlığın varlığıdır. K bakışsızlık değeri olmak üzere;

$$\text{Re}(K) = \frac{\phi_+ - \phi_- + 2m\pi}{2k_0d} \quad (4.2)$$

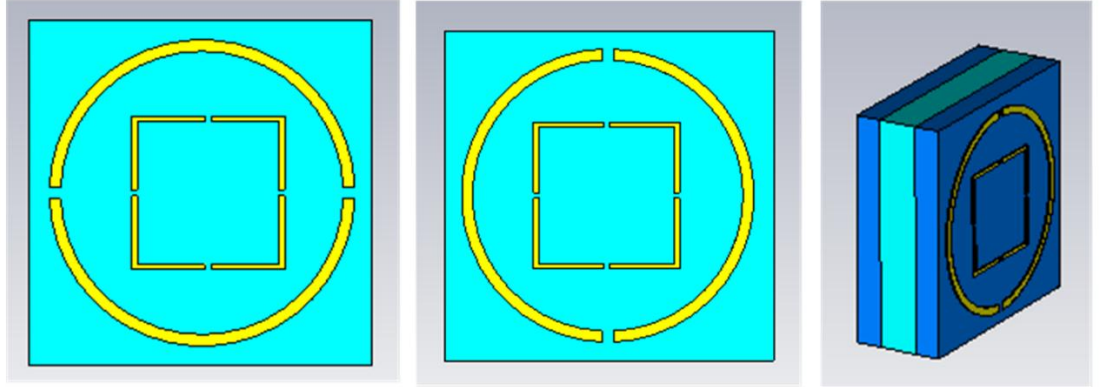
$\phi_+$  ve  $\phi_-$  SDRS yapının içinden geçen EM dalgaların sağ ve sol el rotasyonlu dairesel bileşenlerin polarizasyon açısıdır. m tam sayı olmak üzere;

$-\pi < \phi_+ - \phi_- + 2m\pi < \pi$  aralığındadır.

$k_0$ , serbest uzay dalga sayısı, d yapının genel kalınlığıdır.

#### 4.1.1. Bakışsız Metamalzeme Tabanlı Basınç Sensörü Uygulamaları

Ara yüzeye yerleştirilen dielektrik (vacuum) tabakasının kalınlık değeri 0.3 mm'den 1.8 mm'ye kadar arttırılmıştır. Böylece amaçlanan metamalzeme yapısının basınç sensörü olarak da kullanabileceği gösterilmek istenmiştir. Farklı kalınlık değerleri için elde edilen rezonans frekans değerleri Çizelge 1.1'de gösterilmektedir.



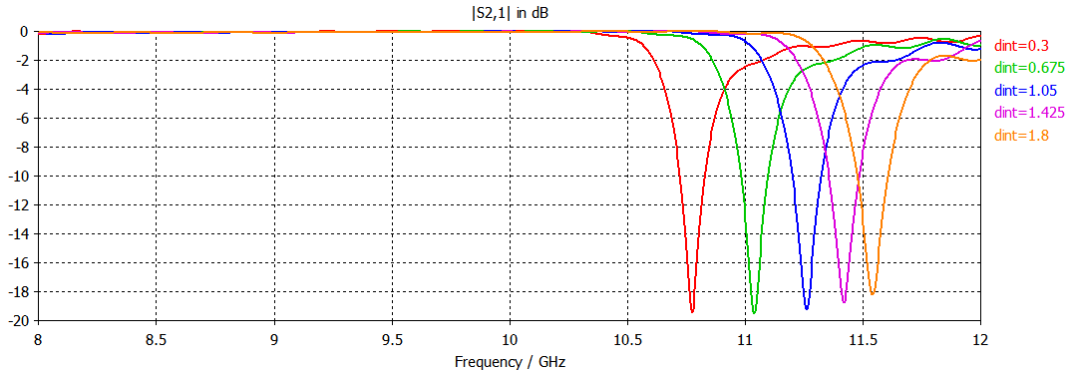
Şekil 4.3. Çok fonksiyonlu bakışsız metamalzeme tabanlı sensör yapısı

Yerleştirilen dielektrik kalınlığı 0.3 mm olduğu zaman iletim değeri 19 dB olurken kalınlık 1.8 mm değerine yükseltildiğinde iletim 18 dB değeri olmaktadır. Normal metamalzeme sensörlerden daha kazançlıdır. Çünkü normal metamalzeme

sensörlerinde kazanç %47 düşecekti. Ayrıca mesafe arttıkça; rezonans dalga boyu yukarı kayarken, rezonans frekans aşağıya doğru kayar.

Çizelge 4.1. Basınç sensörü için simülasyon sonuçları

Sensor Ara Yüz Kalınlığı mm	Rezonans Frekansı Simülasyon Sonuçları GHz
0.3mm	10.676
0.675mm	11.12
1.05mm	11.36
1.425mm	11.433
1.8mm	11.612



Şekil 4.4 Basınç sensörü için rezonans frekans simülasyon sonuçları

#### 4.1.2. Sıcaklık, Yoğunluk ve Nem Ölçümü İçin Bulgular

Bu çalışmada, sensör yüzey boyutları sabittir. Sensör yüzeyi farklı metamalzemeler ile doldurulmuştur. Yani değişken bir ( $\epsilon_i$ ) dielektrik geçirgenlik sabitine sahiptir. Nem, sıcaklık ve yoğunluk için hassasiyeti ölçmek için sensör yüzeyine farklı malzemeler konulmuştur.

Bu farklı malzemeler için, simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında %7'lik bir frekans kayması vardır.  $\epsilon_i$  değeri 2,5'den 10'e kadar artırıldığında, rezonans frekans 10,844 GHz'den 10,056 GHz'e kaymıştır.

Amaçlanan yapının ana avantajı; iletim sabitinin değeri ve iletimin düşük değeri diğer sensör yapılarına göre stabildir. Her SDRS yapının self indüktansı ( $L_{self}$ ) sabittir.

Çünkü bu, gelen dalga boyuna ve dolaştığı metal yol boyutlarına bağlıdır. Bundan dolayı geçirgenliğin değişimi SDRS yapının self indüktansını etkilemez. Çünkü manyetik özelliğe sahip değildir. Döndürülmüş SDRS yapı arasındaki karşılıklı endüktans değişmez. Bunun nedeni ise, sensör yüzeyinin kalınlığı ve alt tabakanın boyutları sabittir.

SDRS yapının self kapasitansı ( $C_{self}$ ) yapının boşlukları ile ilgilidir. Yani iç kare ve dış kare arasındaki kapasitans ile alakalıdır.  $C_{self}$  ve bağıl dielektrik sabiti arasındaki etkileşim ile direkt olarak ilgilidir. Aslında elektrik dağılımıyla alakalıdır. Hem boşluk hem de kareler arasındaki kapasitans, sensör yüzeyin dielektrik sabitine bağlı olarak artar. Elektrik alan rezonatör boşluğunda yoğunlaşmıştır ve yüzey akım metal kalıntılarda daha çok yoğunlaşmıştır.

$\epsilon_{eff}(sub)$  direkt olarak  $C_{self}$ 'i etkiler.  $C_{self}$  yüzey dielektrik sabitine ve alt tabakanın kalınlığına bağlı olarak artar. Ve döndürülmüş SDRS yapının  $\epsilon_i$ ,  $\epsilon_g$ ,  $g_i$  ve  $g_s$  (sensörün kalınlığı ve dielektrik değerleri) ile alakalıdır (Karaaslan ve Bakır 2014).

### İkili kapasitans değeri;

$$\frac{1}{C_{mut}} = \frac{1}{C_{b1}} + \frac{1}{C_{int}} + \frac{1}{C_{b2}} \quad (4.3)$$

$$C_b = \frac{\epsilon_s(a)}{g_s} \quad (4.4)$$

$$\frac{\epsilon_{int}(A)}{g_i} \quad (4.5)$$

A, metal SDRS yapının metal alanıdır. Diğer değerler sabit olduğunda;  $C_{mut}$ , ara sensör yüzeyinin geçirgenlik sabitinin değişimine bağlıdır ( $C_{int}$ ). Yani  $C_{mut}$  ve  $C_{self}$  sensör geçirgenliği ile birlikte artar.  $g_s$  ve  $g_i$  değerleri ile  $C_{mut}$  değişir.  $g_s$ 'deki

değişim,  $C_b$ 'nin orantısız değerini değiştirir ve hem optik aktivitenin değişimi ile sonuçlanan döndürülmüş SDRS yapının hem de  $C_{self}$ 'in değerini farklılaştırır.

Döndürülmüş SDRS yapının etkileşimleri  $C_{self}$ 'in karşılıklı kapasitansına büyük etkisi vardır. Sonuç olarak ise, bakışsız sensör tabanlı SDRS'nin rezonans frekansı, algılama sisteminin toplam kapasitansı ile ters orantılıdır. Diğer yandan  $C_{tot}$ , direkt olarak yüzeyin dielektrik sabitiyle alakalıdır. Rezonans frekansın kayması, bakışsız sensör tanımı ile açıklanır. Algılayıcı yüzeyin dielektrik sabiti arttıkça, reaktif indeks artar ve rezonans frekans dalga boyunun tersi ile azalır.

### 4.1.3. Sıcaklık Sensörü Uygulamaları

Sıcaklık sensörü için yapılan tasarımda yukarıda bahsedilen formülasyonlardan yararlanılmıştır. Ayrıca tasarım 3 adet yüzeyden oluştuğundan; ön yüzeyin ve üzerindeki SDRS yapının boyutu ve ölçüsü sabittir. Bunun yanında ön yüzeyde bulunan SDRS yapı döndürülmemiştir. Ön yüzey GML 1000 malzemesi kullanılarak yapılmıştır. Bu maddenin kullanılma amacı kaybın daha az olmasındandır. Böylece deneysel çalışmalarda sonuçları rahatlıkla gözlemleyebiliriz. SDRS yapı bakır malzemeden yapılmıştır. Ara yüzeyin kalınlığı bu uygulamada 0.762 mm'de sabit tutulmuştur. Bunun nedeni sensör yüzeyindeki kalınlık değişiminin önüne geçmek içindir. Ara yüzeyin dielektrik geçirgenlik sabiti ve kayıp tanjant değeri farklı nem değerlerine bağlı olarak değişen değerler atanmıştır. Çünkü sıcaklık sensörü, incelenmesi gereken maddenin dielektrik geçirgenliği ve kayıp tanjant değerine bağlı olarak rezonans frekansında kayma göstermektedir. Bunu yaparken ise maddenin sıcaklık sabitini bilmemiz ve buna göre dielektrik geçirgenlik değerini ve kayıp tanjant değerini bilmeliyiz.

Bu sebeple yüzde madde sıcaklık sabiti ve kompleks bağıl geçirgenlik değerleri alınmıştır. Sensör yüzeyinin dielektrik sabiti Hippel metodunda 10 GHz civarında (Karaaslan ve Bakır 2014);

$$\epsilon' = \frac{k^2 + \beta^2 - a^2}{\beta_0^2} \quad (4.6)$$

$$\tan\delta = \frac{2a\beta}{k^2 + \beta^2 - a^2} \quad (4.7)$$

$$\gamma = \alpha + i\beta, \quad (4.8)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_c} \quad (4.9)$$

$$\beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4.10)$$

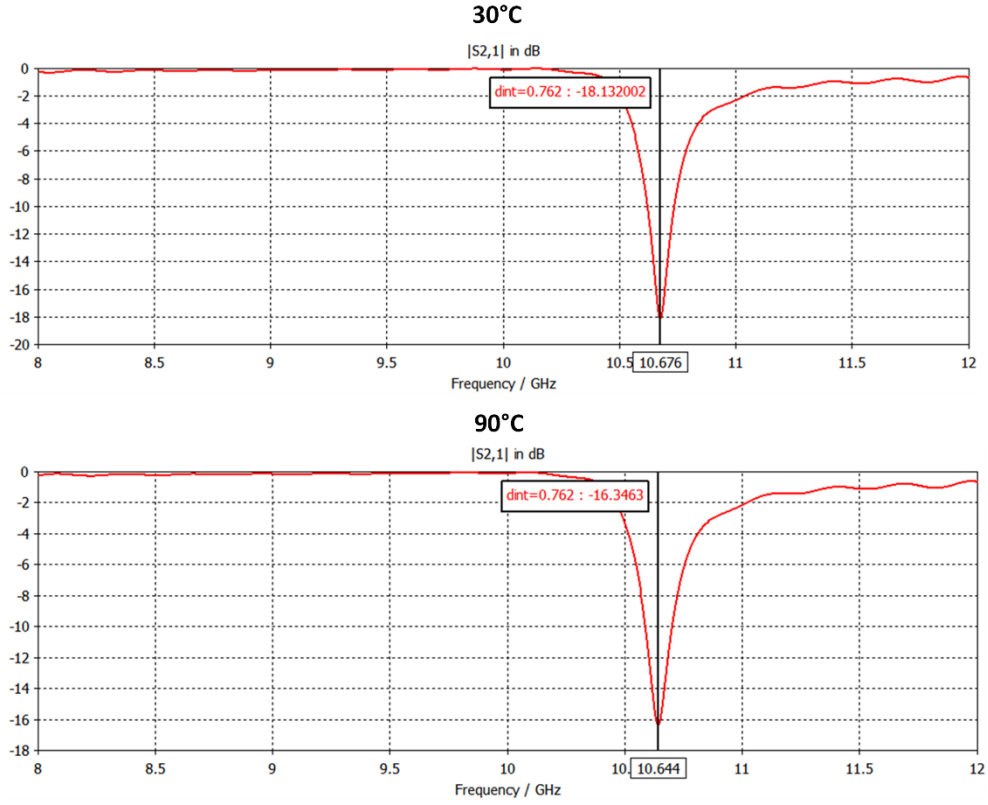
Yayıma sabiti burada normal tanjant yerine hiperbolik tanjant eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Diğer tüm miktarlar yukarıda bahsedilen ‘minimum iki’ metodu ile aynıdır.

Çizelge 1.2’ da kemik iliği maddesinin sıcaklığa bağlı kompleks dielektrik sabiti ve kayıp tanjant değerleri verilmiştir (Karaaslan ve Bakır, 2014). Simülasyon ve deneyler bu değerler baz alınarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.2. Kemik iliği – sıcaklık- dielektrik tablosu

Sıcaklık (°C)	$\epsilon'_r$	$\tan\delta$	Rezonans Frekans (GHz)
30°C	6.15	0.018	10.676
90°C	6.85	0.036	10.644

Yukarıdaki datalar bakışimsız tabanlı SDRS sıcaklık sensörünün dielektrik sabiti değişimine karşılık duyarlılığını gözlemlemek için yani sıcaklığını ölçmek için kullanılmıştır. Simülasyon sonucunda rezonans frekans sıcaklık grafiği çizildi. Sıcaklık 30°C ile 90°C arasında artırıldığında rezonans frekans 10.676 GHz’den 10.644 GHz’a düşer. Eğrinin dökülümü 1° sıcaklık artışı başına denk gelen değişim 1,07 MHz’dir.



Şekil 4.5. Rezonans frekansın sıcaklık sabitine göre değişimi

Diğer yandan yapının bakışsızlık değeri hesaplanmak istenirse;  
Bakışsızlık,  $\kappa$ , iletim katsayısından,

$$Re(\xi) = [\arg(T^+) - \arg(T^-) + 2m\pi] / (2k_0d) \quad (4.11)$$

formülü ile direkt olarak elde edilebilir.

Burada  $k_0$ , vakumdaki dalga vektörünü,  $d$  yapının kalınlığını (burada 0.762 mm olarak alınmıştır) ve  $m$  de düğüm tam sayı değeridir.

Ayrıca  $T^+$  ve  $T^-$  değerleri  $-\pi < \arg(T^+) - \arg(T^-) + 2m\pi < \pi$  ile sınırlandırılmıştır (Smith ve ark. 2002, Zhao ve ark. 2011).

Negatif indisli kırılma değeri, büyük optiksel aktivite ve büyük bakışsızlık değerinden dolayı da polarizasyon döndürme sağlamaktadır. Bu özellik sayesinde polarizasyon dönüşümü kolaylıkla sağlanabilmektedir. Böylece rezonans değerinde negatif değerli kırılma indisi elde edilmektedir ( $n_{\pm} = n \pm \kappa$ ).

Bu durum dairesel döndürme olarak da ifade edilmektedir. Dairesel döndürme ellipticity ile ifade edilir ve iletilen dalga için;

$$\eta=1/2\sin^{-1}\left(\frac{|T_{++}|^2-|T_{--}|^2}{|T_{++}|^2+|T_{--}|^2}\right) \quad (4.12)$$

formülü ile bulunur (Wang ve ark. 2009b, Wang ve ark. 2009c, Li ve ark. 2009).

Sağ ve sol dairesel polarizasyonlu dalganın kırılma indisi değerinin ortalaması,  $n=(nL+nR)/2$  ve empedans  $z$ , değerlerinden parametrelerin geri elde edilme yöntemi kullanılarak dielektrik ( $\epsilon=n/z$ ) ve manyetik geçirgenlik ( $\mu=nz$ ) katsayısı değerleri de hesaplanır.

Bu bakışsız metamateryel tasarımı basit, esnek ve kolay konfigüre edilebilir bir yapıya sahiptir. Bundan dolayı, diğer bakışsız metamateryel tasarımları ile karşılaştırıldığında diğer frekans bölgeleri için de verimli olarak kullanılabilir. Ek olarak, mekanik ayarlanabilirlik ve kolay konfigürasyon özelliklerini göstermek için parametrik çalışmalar da gerçekleştirilmiştir.

#### 4.1.4. Yoğunluk Sensörü Uygulamaları

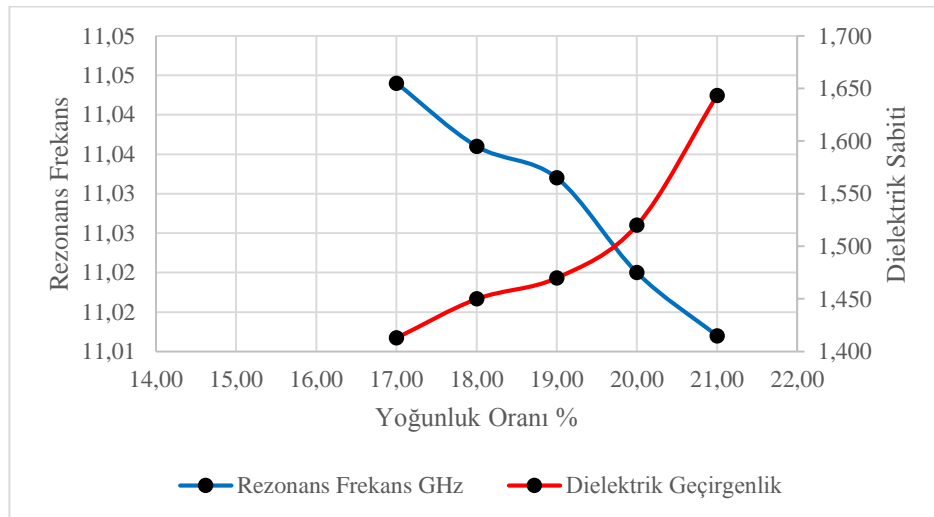
Bu çalışmada yine nem, sıcaklık ve yoğunluk ölçümü için gerekli formülasyonlar kullanılmıştır. Ayrıca tasarım 3 adet yüzeyden oluştuğundan; Ön yüzeyin ve üzerindeki SDRS yapının boyutu ve ölçüsü sabittir. Bunun yanında ön yüzeyde bulunan SDRS yapı döndürülmemiştir. Ön yüzey GML 1000 malzemesi kullanılarak yapılmıştır. Bu maddenin kullanılma amacı kaybın daha az olmasındandır. Böylece deneysel çalışmalarda sonuçları rahatlıkla gözlemleyebiliriz. SDRS yapı bakır malzemedan yapılmıştır. Ara yüzeyin kalınlığı bu uygulamada 0.762 mm'de sabit tutulmuştur. Bunun nedeni sensör yüzeyindeki kalınlık değişiminin önüne geçmek içindir. Yoğunluk sensörü, nem ve sıcaklık sensöründen farklı olarak sadece ara yüzeyin dielektrik geçirgenlik sabiti farklı nem değerlerine bağlı olarak değişen değerler atanmıştır. Dielektrik sabiti değişimi 8 ile 12 GHz aralığında incelenmiştir. Çünkü kompleks geçirgenliğin X bandında hiçbir önemli değişikliği yoktur. Bu bir dezavantajdır.

Arka yüzeyin ve üzerindeki SDRS yapının boyutları ve ölçüleri sabittir. Arka yüzeyde bulunan SDRS yapı 90° döndürülmüştür. Böylece yapıya bakışsızlık özelliği kazandırılmıştır. Arka yüzey GML 1000 malzemesi kullanılarak yapılmıştır. Bu maddenin kullanılma amacı kaybın daha az olmasındandır. Böylece deneysel çalışmalarda sonuçları rahatlıkla gözlemleyebiliriz. SDRS yapı bakır malzemeden yapılmıştır.

Gerekli datalar referans alındıktan sonra (Karaaslan ve Bakır, 2014), yansıma ve iletim katsayıları (S-parametreleri); 2 port yapısı için FIT tabanlı 3D simülasyon programı kullanılarak hesaplanmıştır. Rezonans frekansın yoğunluk sabitine karşı değişimi Çizelge 1.3.' de gösterilmiştir.

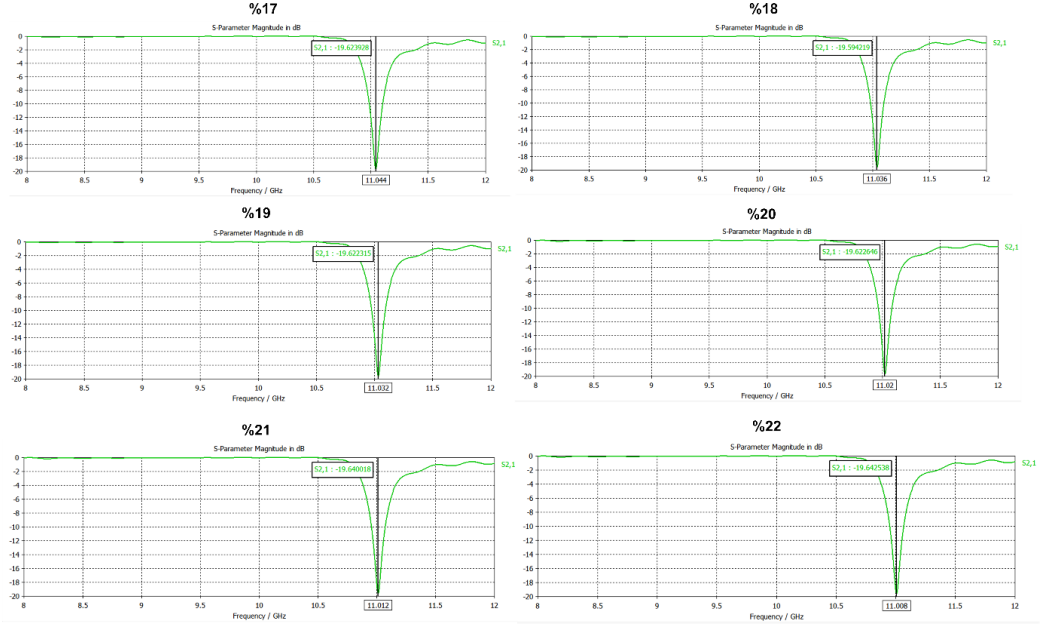
Çizelge 4.3. Kalsiyum klorit yoğunluk – dielektrik değer tablosu

% Yoğunluk Oranı	$\epsilon'_r$	Rezonans Frekansı (GHz)
17	1.413	11.044
18	1.450	11.036
19	1.470	11.032
20	1.520	11.02
21	1.6433	11.012
22	1.68	11.008



Şekil 4.6. Yoğunluk oranı- rezonans frekans- dielektrik sabiti oran grafiği

Ara yüzeydeki maddenin yoğunluğu %17'den %22'ye kadar değiştirildiğinde, bağıl geçirgenlik 1.413 ile 1.68 arasında değişim göstermektedir. Rezonans frekans ise 11.044 GHz'den 11.008 GHz'e kayar. Dielektrik sabitinin artışı rezonans frekansın düşmesine neden olur. Çünkü hem  $C_{self}$  hem de  $C_{mut}$  artar.



Şekil 4.7. Rezonans frekansının yoğunluk sabitine göre değişimi

Yine metalmalzeme tabanlı yoğunluk sensörlerine nazaran bakımsız tabanlı SDRS yoğunluk sensörü daha hassastır.

#### 4.1.5. Nem Sensörü Uygulamaları

Nem sensörü için yapılan tasarımda yukarıda bahsedilen formülasyonlardan yararlanılmıştır. Ayrıca tasarım 3 adet yüzeyden oluştuğundan; Ön yüzeyin ve üzerindeki SDRS yapının boyutu ve ölçüsü sabittir. Bunun yanında ön yüzeyde bulunan SDRS yapı döndürülmemiştir. Ön yüzey GML 1000 malzemesi kullanılarak yapılmıştır. Bu maddenin kullanılma amacı kaybın daha az olmasındandır. Böylece deneysel çalışmalarda sonuçları rahatlıkla gözlemleyebiliriz. SDRS yapı bakır malzemeden yapılmıştır. Ara yüzeyin kalınlığı bu uygulamada 0.762 mm'de sabit tutulmuştur. Bunun nedeni sensör yüzeyindeki kalınlık değişiminin önüne geçmek içindir. Ara

yüzeyin dielektrik geçirgenlik sabiti ve kayıp tanjant değeri farklı nem değerlerine bağlı olarak değişen değerler atanmıştır. Çünkü nem sensörü, incelenmesi gereken maddenin dielektrik geçirgenliği ve kayıp tanjant değerine bağlı olarak rezonans frekansında kayma göstermektedir. Bunu yaparken ise su sabitini bilmemiz ve buna göre dielektrik geçirgenlik değerini ve kayıp tanjant değerini bilmeliyiz.

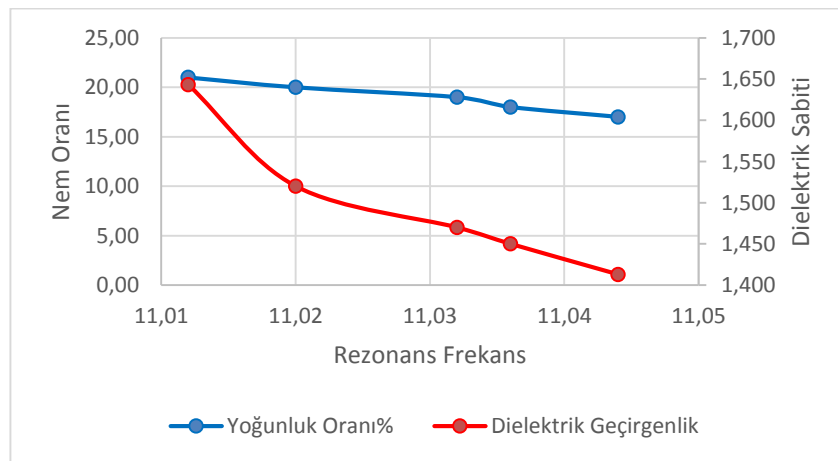
Bu sebeple yüzde su sabiti ve kompleks bağlı geçirgenlik değerleri alınmıştır. Sensör yüzeyinin dielektrik sabiti (Karaaslan ve Bakır 2014);

$\epsilon_i = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$  ile bulunmuştur.

Gerekli dataları (Ekmekci ve Turhan-Sayan, 2013) referans alındıktan sonra (**Çizelge 1. 5**)

Çizelge 4.4. Talaş nem – dielektrik tablosu

Talaşın % Nem Oranı	$\epsilon'_r$	$\epsilon''_r$	$\tan\delta$	Rezonans Frekans (GHz)
13	1.33	0.09	0.068	11.056
21	1.62	0.26	0.161	11.02
27	1.99	0.49	0.246	10.98
37	2.61	0.80	0.307	10.92
45	3.53	1.23	0.348	10.844



Şekil 4.8. Nem oranı- rezonans frekans- dielektrik sabiti oran grafiği

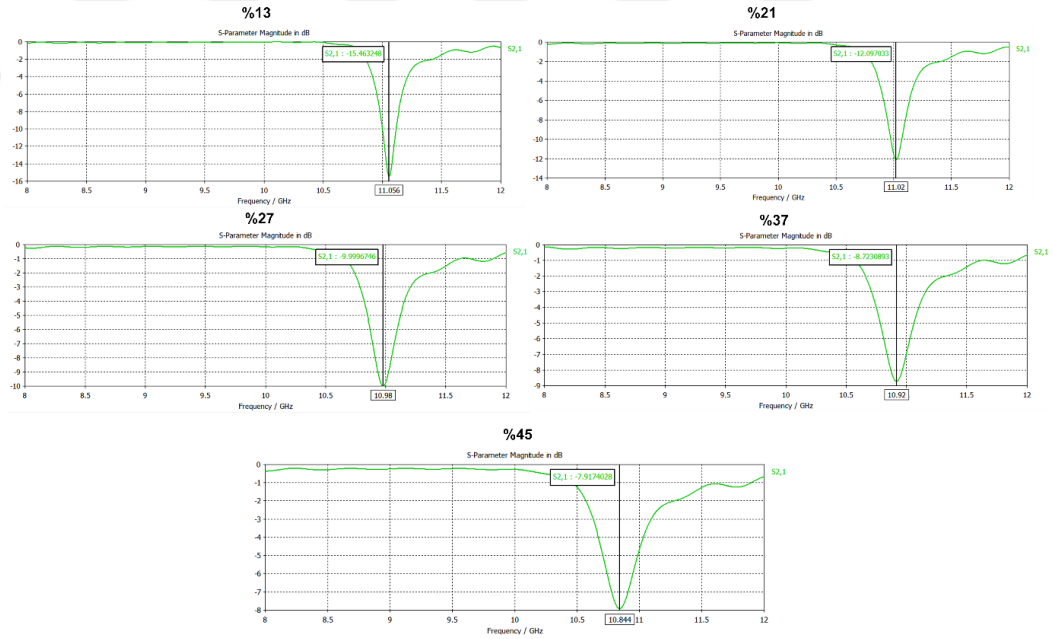
Kayıp tanjant değeri şöyle bulunur;

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (4.13)$$

Arka yüzeyin ve üzerindeki SDRS yapının boyutları ve ölçüleri sabittir. Arka yüzeyde bulunan SDRS yapı 90° döndürülmüştür. Böylece yapıya bakışsızlık özelliği kazandırılmıştır. Arka yüzey GML 1000 malzemesi kullanılarak yapılmıştır. Bu maddenin kullanılma amacı kaybın daha az olmasındandır. Böylece deneysel çalışmalarda sonuçları rahatlıkla gözlemleyebiliriz. SDRS yapı bakır malzemeden yapılmıştır.

Gerekli dataları elde ettikten sonra, yansıma ve iletim katsayıları (S-parametreleri); 2 port yapısı için FIT tabanlı 3D simülasyon programı kullanılarak hesaplanmıştır.

Rezonans frekansın nem sabitine karşı değişimi Şekil 4.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Rezonans frekansın nem sabitine göre değişimi

Nem değeri %13'den %45'e değişirken sensörün rezonans frekansı 11.056 GHz'den 10.844 GHz değerine kaymıştır. Burada yaklaşık olarak 212 MHz değişim söz konusudur.

Talaş maddesindeki nem oranı rezonans frekansı yaklaşık olarak %4,25 değerde etkilemiştir. Bu artış bütün network cihazlarında gözlemlenebilecek düzeydedir.

Bakışmsız tabanlı SDRS sensör mükemmel hassasiyet ile nemin ölçümü için uygundur. Bu nem sensörü MTM tabanlı nem sensöründen daha gerçekçidir. Literatür incelendiğinde, test edilen metamalzeme tabanlı sensörlerin su sabiti değerleri çok büyüktür ve düzenli adımlarla ilerlemez. Bu doğrusallığın bozulmasının nedeni, geçirgenlik sabitinin lineer olmamasından kaynaklanmaktadır. Sensör mekanizmasının tümünde rezonans frekansın değişimi hem devre eşitliklerinden hem de bakışmsız MTM tabanlı sensör topolojisi ile tanımlanabilir.

Bakışmsız MTM tabanlı sensör topolojisine göre; sensör yüzeyinin dielektrik sabitindeki artış, ara yüzeyin kırılma indeksini artırır ve dalga boyu kayar. Sonuç olarak ise, rezonans frekans üst frekanslara kayar.

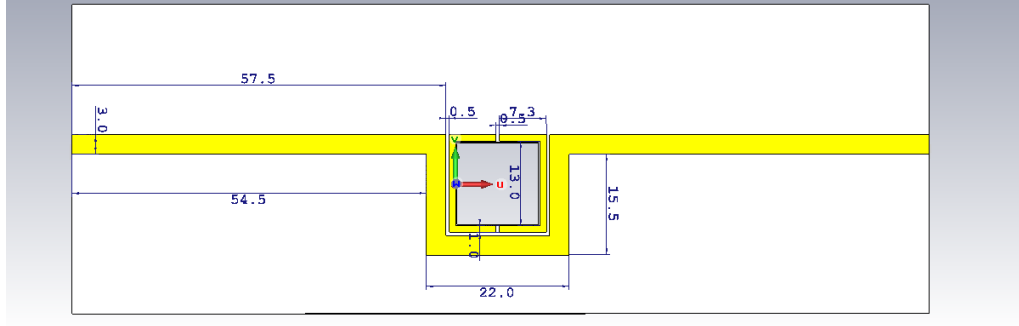
Devre eşitliği yaklaşımı ise, devrenin tüm kapasitansının sensör yüzeyin dielektrik sabiti ile direkt oranlıdır. Tüm kapasitansın artışı rezonans frekansı azaltır.

#### **4.2. Metamalzeme Tabanlı Çok Fonksiyonlu Nem ve Etanol Yoğunluğu Sensörü**

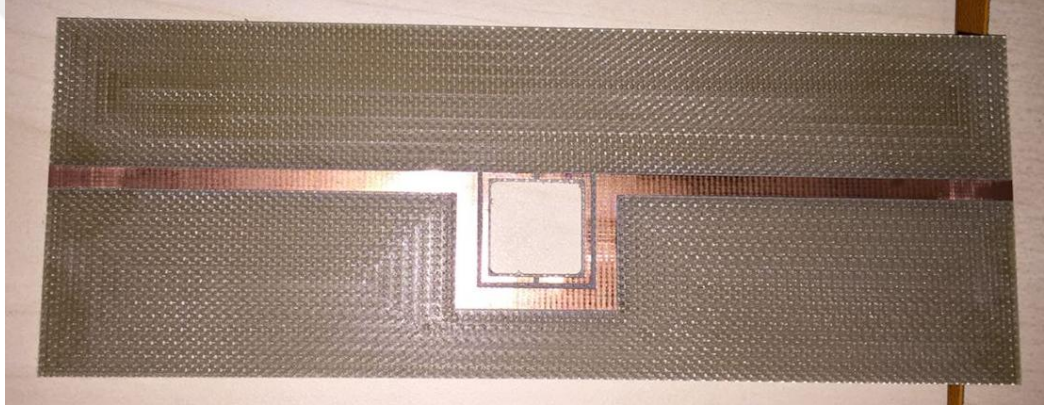
Metamalzeme tabanlı nem, yoğunluk ve konsantrenin yaşını belirleme sensör tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Bu sensör saf su içindeki sıvı yoğunluğunu ölçen ve aynı orandaki karışımların yaşını belirlemektedir. Yapı kare şekilli rezonans frekansı ayarlanabilen hücreden oluşmaktadır. Testi gerçekleştirmek için hücrenin ortasında bulunan kare şekilli deliğe pipet yerleştirilir. Kare pipetin içine test yapılacak örnek sıvı geçirilir. Değişen nem ve yoğunluk değerlerine bağlı olarak, sensörün rezonans frekansında lineer kayma gerçekleşir. Bu çalışmada yapılan sensörün çalışma aralığı akıllı telefonlara ve sadece tek damla ile ölçüm yapabilecek uygulamalara uyum sağlayabilmesi için özellikle seçilmiştir.

Çalışmada alt dalga boylu rezonatörlerin dalga olayına verdiği tepki prensibi kullanılmıştır. FR4 alt yapı taşı ortasında kare şekilli bir delik bulunan, kare şekilli

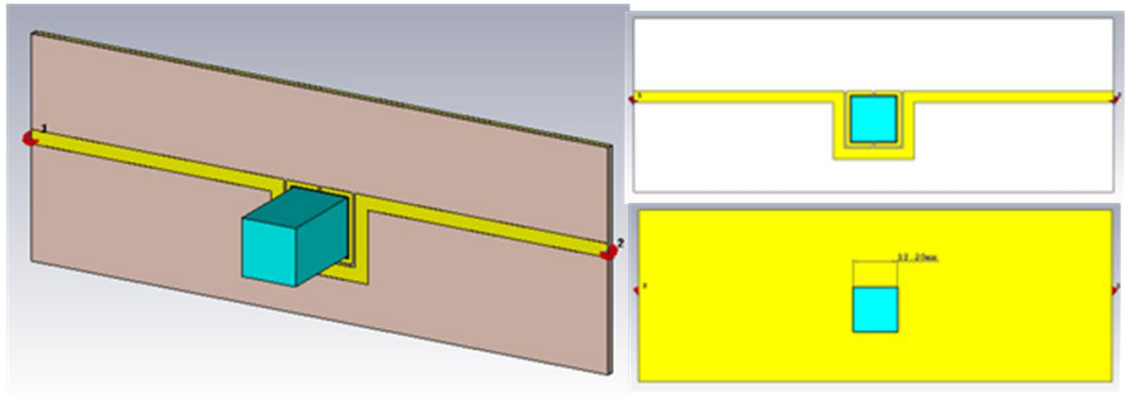
hücre sensör kullanılmıştır. Rezonans frekansı 3-4 GHz aralığındadır. Rezonans frekans dielektrik sabitine bağlı olarak aşağı ya da yukarı kaymaktadır.



Şekil 4.10. Nem ve etanol yoğunluğu sensörünün boyutları



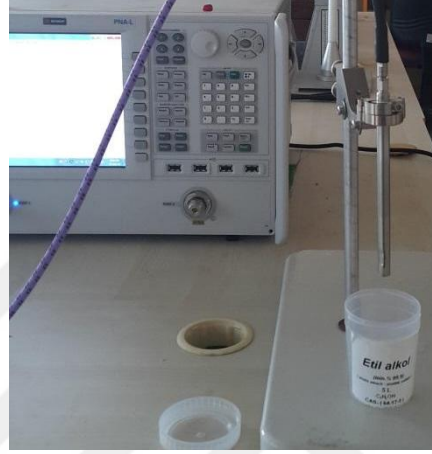
Şekil 4.11. Sensör yapının baskı devresi



Şekil 4.12. Nem ve etanol yoğunluğu sensörünün yapısı

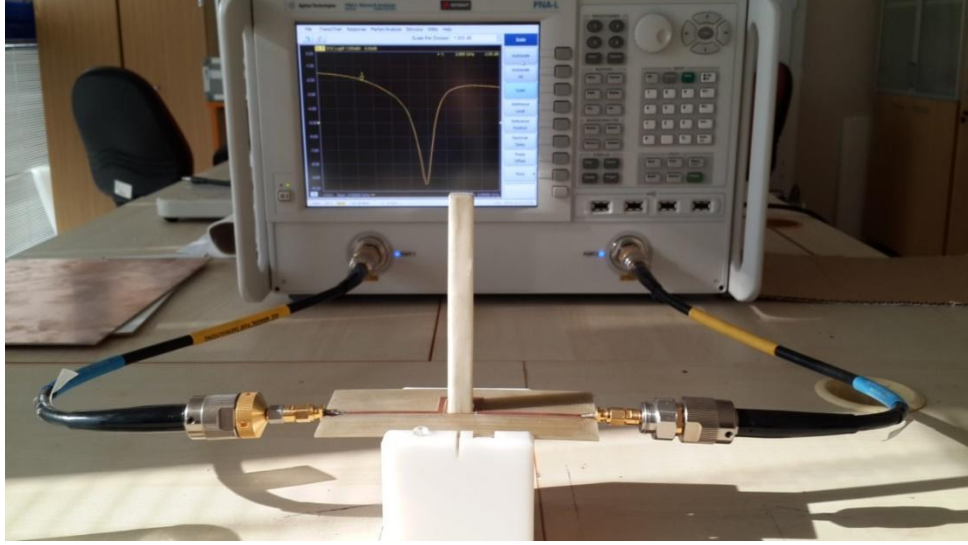
#### 4.2.1. Akışkan Sensör Uygulaması

Sıvıların dielektrik karakteristiği network analizör, ilgili program ve araçlarla belirlenebilmektedir. Prob saf su bulunan kaba daldırılır ve kalibrasyon işlemi yapılır. Kalibrasyon işleminden sonra örneğin içine daldırılır. Bu işlemler oda sıcaklığında (25° C) gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4.13. Kalibrasyon işlemi için deney düzeneği

Kalibrasyon işleminden sonra, karışımın dielektrik özelliklerini belirlemek için sensörün network analizör cihazı ile bağlantısı sağlanır. Sensörün kare şeklindeki deliğine kare pipet yerleştirilerek, karışım sensöre temas ettirilir. Böylece dielektrik özellikler belirlenebilir.



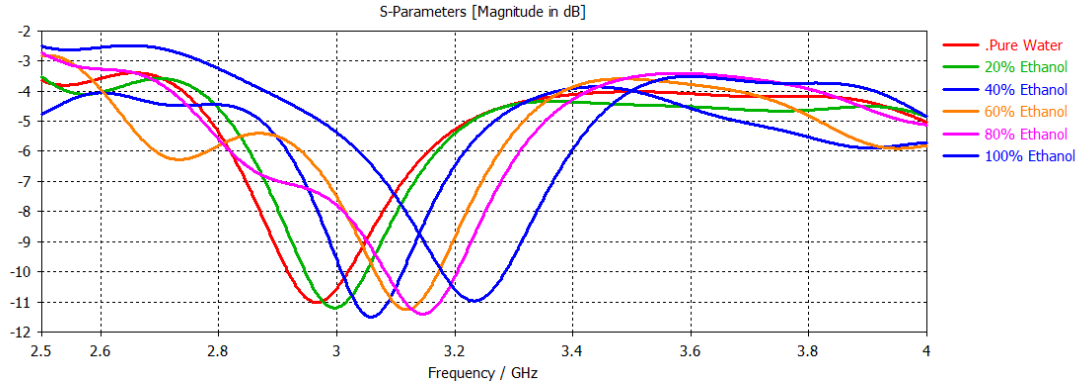
Şekil 4.14. Metamalzeme tabanlı çok fonksiyonlu sensör deney düzeneği

Deney sonucunda elde edilen değerler Çizelge 1.7.' de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Etanol-su karışımı dielektrik tablosu

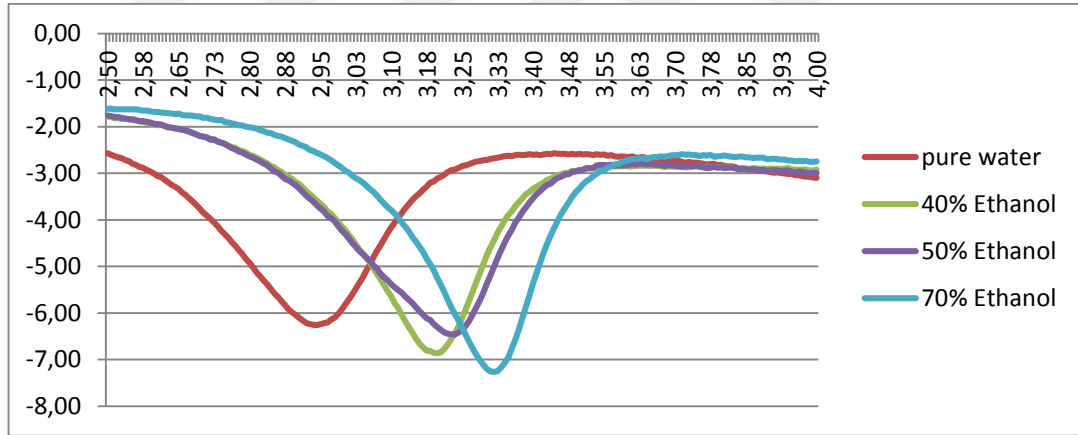
<b>Etanol Yoğunluğu (%)</b>	$\epsilon'$	$\epsilon''$	<b>Kayıp Tan.</b>	<b>Sim. Rez. Frekans (GHz)</b>
0	78.65	11.16	0.142	3
20	70.32	9.99	0.142	3
40	55.17	8.74	0.158	3
60	41.5	7.565	0.182	3
80	29.07	6.89	0.237	3
100	10.14	5.97	0.588	3

Simülasyon sonucunu veren rezonans frekans grafiği Şekil 4.13.'de gösterilmiştir. Şekilden görüleceği gibi önerilen metamalzeme tabanlı sensör saf su ve %20'lik oranlarla artan etanol miktarına lineer bir şekilde tepki vermiş ve etanol miktarını hassas bir şekilde ölçmemize imkân sağlamıştır.



Şekil 4.15. Etanol-su karışımı için rezonans frekansı simülasyon grafiği

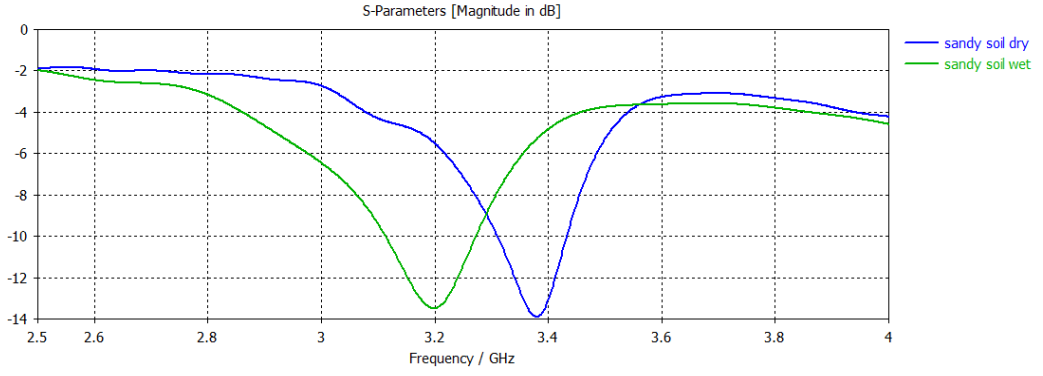
Deney sonucu rezonans frekans grafiği Şekil 1.1’de verilmiş olup, sırasıyla saf su, %40, %50 ve %70’lik etil alkol karışımlarına fabrikasyonu yapılan sensörümüzün tepkisi görülmektedir. Etil alkol yoğunluğu arttıkça rezonans frekansı sağa doğru kaymakta ve yoğunluğu hassas bir şekilde ölçmemize yarayacak bir frekans bandını bize sağlamaktadır.



Şekil 4.16. Etanol-su karışımı için rezonans frekansı deney grafiği

#### 4.2.2. Nem Sensörü Uygulamaları

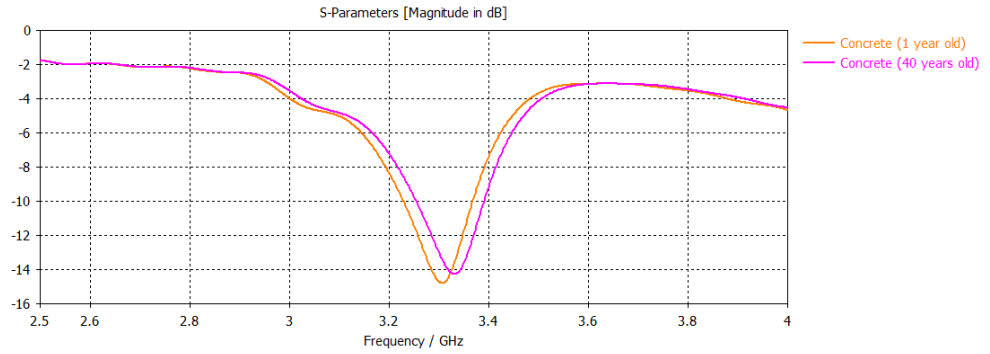
Çalışma kumlu toprakta nem ölçümü için kullanılmıştır. Toprağı nem oranı düştükçe rezonans frekans sağa doğru kayar. S12 ikinci porttan birinci porta enerji aktarımı sağlanırken rezonans frekans 3.198 GHz değerindedir. Kuru kumlu toprakta ise rezonans frekans 3.38 GHz değerindedir. 182 MHz’lik bant genişliği oluşmaktadır. Bu bant genişliği nem oranını anlamak için yeterlidir.



Şekil 4.17. Toprak-su karışımı için rezonans frekansı simülasyon grafiği

#### 4.2.3. Konsantre Yaş Sensörü

Konsantrenin ya da karışımın yaşı bazı durumlarda önem arz etmektedir. Bu durumlarda sensör ihtiyaca cevap verecektir.



Şekil 4.18. Konsantre yaşı için simülasyon grafiği

#### 4.2.4. Metamalzeme Tabanlı Nem ve Etanol Yoğunluğu Sensörü için Patent Çalışması

Bu buluş, mikrodalga frekanslarında toprak-su, etanol-su veya 2 malzemeli benzer karışımların, nem oranını belirleyen nem sensörü ile ilgilidir. Buluş sayesinde, 3,198 GHz - 3.80 GHz aralığında olmak üzere 182 MHz'lik bant genişliğinde su - etanol karışımındaki etanol ve su oranının belirlenmesi deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Aynı şekilde su- toprak karışımındaki, su – toprak oranının belirlenmesi deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Bilinen bir çok nem sensörünün aksine bu buluş S ve C bandında

bir çok uygulamada kullanılmaya elverişli olmasının dışında kolay üretilebilme, konfigüre edilebilme, taşınabilme ve entegre edilebilme özelliklerine sahiptir.

Mikrodalga frekanslarındaki sensör tekniğinde, sıvı mikro kanallardan geçerek rezonans frekansını, dielektrik sabitini ve bant genişliğini etkiler. Bu etkileşim karışımın su oranı değiştikçe, rezonans frekansında kayma, dielektrik sabitinde ve bant genişliğinde değişiklik meydana getirecektir.

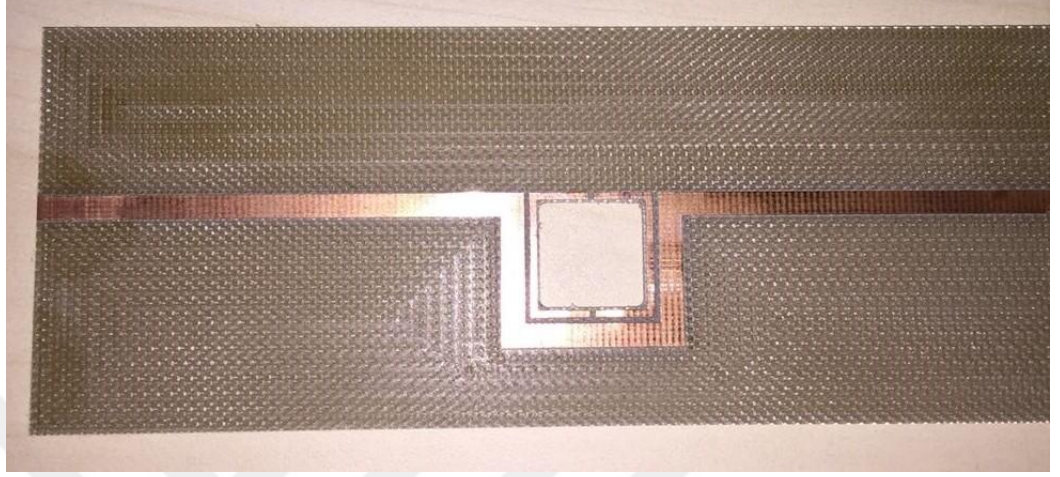
Portlardan elektromanyetik dalga gönderilerek, sensörün farklı su oranlarındaki karışıma rezonans frekansındaki kaymalar incelenerek sonuç elde edilmektedir.

Frekans seçici yüzey, yapay elektromanyetik malzeme veya metamalzeme temelli patent çalışmalarında ise sensör için gerekli rezonans frekansında kayma meydana gelmesi şeritler sayesinde elde edilmektedir. Bu buluşlara, belli bir dielektrik sabitine sahip alt taşı üzerine olarak döşenmiş metalik rezonatörlere farklı su oranlarındaki karışım temas ederek dik doğrultuda gelen elektromanyetik dalgalara rezonans frekansında kayma kazandırılarak gerçekleştirilmiştir. Patent çalışmalarında kullanılan alt taşların dielektrik sabitleri ve kalınlıkları ile rezonatör desenlerin boyutları; nem sensörünün frekans aralığında ve bant genişliği değerlerinde önemli rol oynamaktadır.

Bu buluş, iletken metallere yapılan nem sensörlerinin yetersiz kaldığı (hassas olmaması, ek donanım gerektirmesi, süresiz olması, malzemeye zarar vermesi vs.) ve bundan dolayı hassas ve ek donanım gerektirmeyen metamalzeme tabanlı sensörlere ihtiyaç duyulan teknik problemlere çözüm getirmeyi amaçlamaktadır. İletkenler hava koşullarından doğrudan etkilenerek yanlış sonuç verebilmektedirler. Bunun yanı sıra hassasiyetleri çok düşük olabilmektedir. Dahası bağıl neme göre sonuç verdiklerinden, kalibrasyonlarında kayma ve sonuçlarında hata meydana gelmektedir. Fakat metamalzeme tabanlı nem sensörleri bu anormallikten etkilenmeyip doğru sonuçlar verebilmektedir.

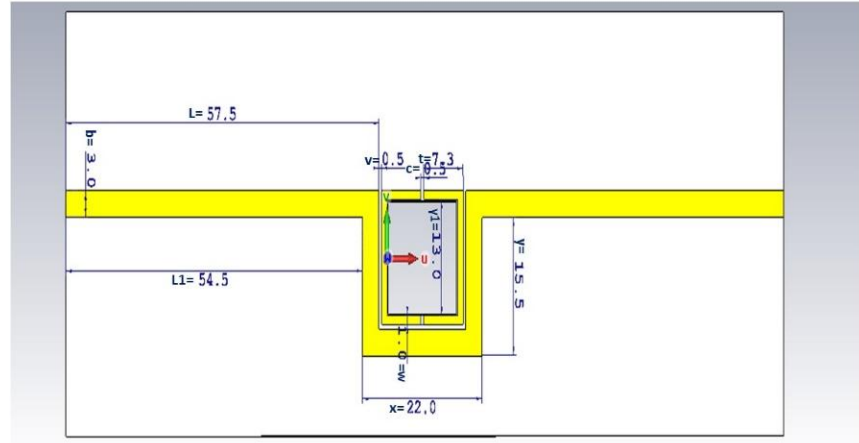
Buluş sayesinde, S ve C bandında 3.198 GHz - 3.80 GHz aralığında çalışan nem sensörleri, yakıt içine karıştırılacak etanolün saflık değerini hassas ve sürekli şekilde ölçer. Bu buluş ayrıca, kolay konfigüre edilebilme, üretilebilme ve entegre edilebilme özellikleri sayesinde yukarıda bahsedilen teknik problemlere daha hızlı ve kolay bir çözüm getirmeyi amaçlamaktadır.

Nem sensörünün yapısı metalmalzeme yüzey tabanlıdır ve FR4 alt taşından oluşmaktadır. FR4 alt taşının dielektrik sabiti 4.4, kayıp tanjantı 0.016 ve kalınlığı 1.6 mm olarak seçilmiştir. Metalik rezonatörler bakır cinsidir.



Şekil 4.19. Metalmalzeme tabanlı çok fonksiyonlu sensör

Sıvının rezonans frekansında kayma meydana getirmesi için metalik rezonatördeki açıklığın ve metalik hattın paralel olacak şekilde tasarlanmasıyla mümkündür. Tasarımın birim hücresi sensörü oluşturmaktadır.

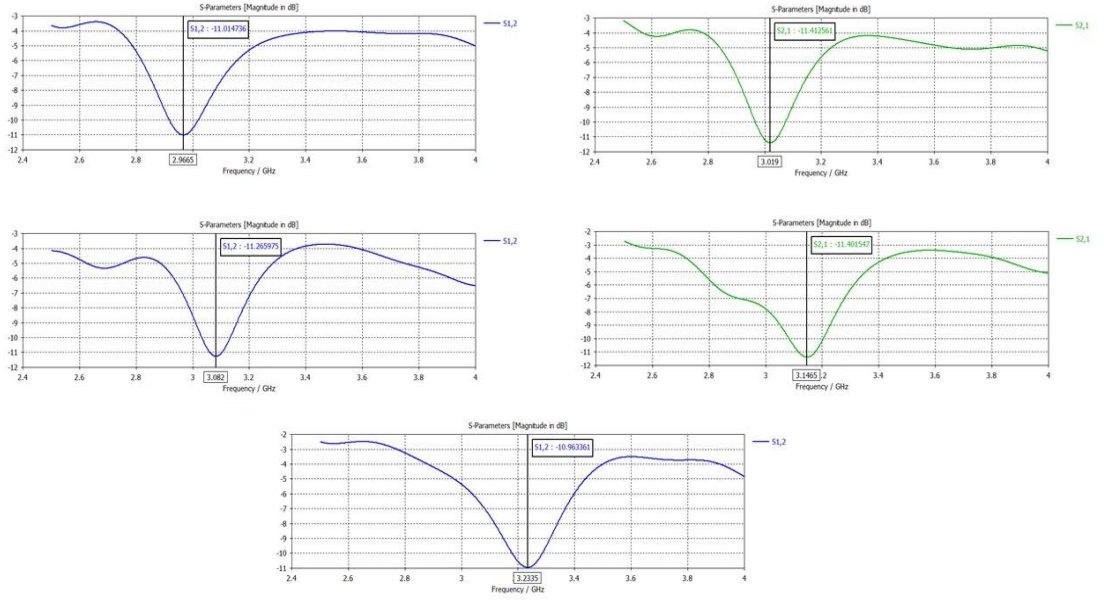


Şekil 4.20. Metalmalzeme tabanlı çok fonksiyonlu sensörün teknik çizimi

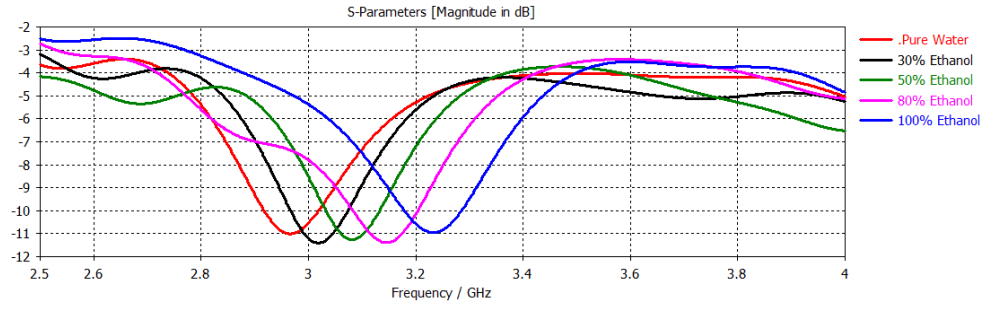
Çizelge 4.6. Metamalzeme tabanlı çok fonksiyonlu sensörün boyut tablosu

<b>Metamalzeme Sensör Boyut Tablosu</b>	
<b>c</b>	0.50 mm
<b>v</b>	0.50 mm
<b>w</b>	1.00 mm
<b>b</b>	3.00 mm
<b>t</b>	7.30 mm
<b>x</b>	22.00 mm
<b>y</b>	15.50 mm
<b>y1</b>	13.00 mm
<b>L1</b>	54.50 mm
<b>L</b>	57.50 mm

Nem sensörü için karışımdaki etanol oranları artırılıp incelendiğinde, karışımdaki etanol oranı arttıkça rezonans frekans değeri artış göstermiştir. Elde edilen eksen oranı grafiğinde 3 dB ve altı referans alınıp hangi frekans aralığında ölçümün gerçekleştiği tespit edilmiştir. 3.198 GHz ve 3.80 GHz frekanslarında mükemmel etanol oranı ölçümü gerçekleşmiştir. Eksen oranı bant genişliği yine 3 dB ve altı incelendiğinde, 3.198 GHz ve 3.80 GHz arasında yaklaşık 182 MHz civarında bulunmaktadır. Nem sensörü yapısı tamamen özgün olarak tasarlanmıştır. Nümerik çalışmaları analiz edildikten sonra baskı devre cihazında üretilmiştir. Deneysel çalışmaları ise iki adet horn anten ve vektör network analizör vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.21. Metamalzeme tabanlı çok fonksiyonlu sensörün simülasyon grafiği



Şekil 4.22. Metamalzeme tabanlı çok fonksiyonlu sensörün deney grafiği

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada farklı sensör uygulama alanlarına sahip metamalzeme kullanılarak bu malzemenin EM özellikleri ayrıntılı olarak analiz edilmiş ve incelenmiştir. Çalışmada kullanılan yapı Çok fonksiyonlu bakışsımsız sensör yapısıdır. Bu yapı, FIT tabanlı 3D simülasyon programı kullanılarak analiz edilmiş olup; deneysel çalışmalar için üretimleri farklı dielektrik alt taşı malzemeler kullanılarak gerçekleştirilmiş ve ölçümler için Agilent E5071B ENA RF, Agilent E8362B PNA ve R&S ZVL6 Vektör Network Analizörleri ve bunlara bağlı mikrodalga horn antenler kullanılmıştır.

Ayrıca tasarımı yapılan metamalzemeler ile ilgili; optik aktivite, yansıma ve iletim parametreleri, negatif kırılma indisi gibi özellikler nümerik ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada kullanılan yapıların efektif dielektrik permitivite ( $\epsilon$ ), efektif manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ) ve bakışsımsızlık parametresi gibi özellikleri Nicolson Ross Weir yöntemi kullanılarak S-parametrelerinden elde edilmiştir. Ve çok fonksiyonlu metamalzeme yapılı sensör uygulamaları hem simülasyon hem de deneysel olarak gerçekleştirilmiş oldu. Sensörün farklı basınç, nem, yoğunluk ve sıcaklık değerleri için lineer bir sonuç elde edilmiştir. Çok fonksiyonlu bakışsımsız metamalzeme tabanlı sensör için simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Çok fonksiyonlu metamalzeme tabanlı sensör çalışması için hem simülasyon hem de deney çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Metamalzeme tabanlı sensörler sıradan sensörlerden daha avantajlıdır. Hem çok fonksiyonlu bir yapıdır hem de kolay fabrikasyon tekniği vardır. Ve düşük kayıplıdır. Özellikle basınç sensörü için iletim stabilliği varaktörlerle ayarlanabilir. Sadece sabit frekanslar için gelecekte çalışma yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- Alves F., Grbovic D., Kearney B., Lavrik N. V. and Karunasiri G., 2013. Bi-material terahertz sensors using metamaterial structures. **Optics Express**, 21:13256-13271.
- Armani, A., Kulkarni, R.P., Fraser, S.E. and Vahala, K.J., 2007. Label-free, single-molecule detection with optical microcavities. **Science**, 317(5839):783-787.
- Aydın, K., Bulu, İ., Güven, K., Kafesaki, M., Soukoulis, C., Ozbay, E., 2005. Investigation of magnetic resonances for different split-ring resonator parameters and designs. **New Journal of Physics**, 7 (168): 1-15.
- Baker-Jarvis, J., Janezic, M., D., Riddle, B., F., Jhonk, R., T., Kabos, P., Holloway, C., L., Geyer, R., G., Grosvenor, G., A., 2005. Measuring the permittivity and permeability of lossy materials: solids, liquids, metals, building materials, and negative-index materials. **Natl. Inst. Stand. Techno. Tech. Note 1536**.
- Chen, T., Liand, S., Suun, H., 2012. Metamaterials application in sensing. **Sensors**, 12 (3): 2742-2765.
- Cheng, Y., Nie, Y., Wu, L. and Gong, R. Z., 2013. Giant circular dichroism and negative refractive index of chiral metamaterial based on split-ring resonators. **Progress In Electromagnetics Research**, 138:263-272.
- Cheng, Y., Nie, Y., Cheng, Z. and Gong, R. Z., 2014. Dual-band circular polarizer and linear polarization transformer based on twisted split-ring structure asymmetric chiral metamaterial. **Progress In Electromagnetics Research**, 145:263-272.
- Çubukçu, E., Zhang, S., Park, Y.S., Bartal, G. and Zhang, X., 2009. Split ring resonator sensors for infrared detection of single molecular monolayers. **Applied Physics Letters**, 95, 043113.
- Dincer, F., 2015. Metamalzemeler, bakışsımsız ortam ve mikrodalga uygulamaları, **Doktora tezi**, Mustafa Kemal Üniversitesi, 171 s , Hatay.
- Dincer, F., Sabah, C., Karaaslan, M., Ünal, E., Bakir, M., Erdiven, U., 2013. Asymmetric transmission of linearly polarized waves and dynamically wave rotation using chiral metamaterial. **Progress In Electromagnetics Research**, 140:227–239.
- Dincer, D., Karaaslan, M., Unal, E., Akgol, O., Sabah, C., 2014. Chiral metamaterial structures with strong optical activity and their applications. **Optical Engineering**, 53(10): 107101-8.
- Ekmekci, E., Averitt, R.D. and Sayan, G. T., 2010. Effects of substrate parameters on the resonance frequency of double-sided SRR structures under two different excitations. **PIERS Proceedings**, 538-540.
- Ekmekci, E., Sayan, G. T., 2013. Multi-functional metamaterial sensor based on a broad- side coupled SRR topology with a multi-layer substrate. **Appl Phys A**, 110:189–197.
- Haes, A. J. and Duyne, R.P., 2002. A nanoscale optical biosensor: Sensitivity and selectivity of an approach based on the localised surface plasmon resonance spectroscopy of triangular silver nanoparticles. **J. Am. Chem. Society**, 124: 10596–10604.
- Huang, M., Yang J., Sun J., Shi J. and Peng J., 2009. Modelling and analysis of  $\omega$ -shaped double negative material-assisted microwave sensor. **Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves**. 30:1131–1138.

- Hunt, H.K., Soteropulos, C. and Armani A., 2010. Bioconjugation strategies for microtoroidal optical resonators. **Sensors**, 10(10): 9317-9336.
- Jakšić, Z., Jakšić, O. and Kment, C., 2007. A consideration of the use of metamaterials for sensing applications: field fluctuations and ultimate performance. **Journal of Optics A: Pure and Applied Optics**, 9(9): 377–384.
- Karaaslan, M. and Bakır, M., 2014. Chiral metamaterial based multifunctional sensor applications. **Progress In Electromagnetics Research**, 149:55-67.
- Kiti, G., Radoni, V. Crnojevi–Bengin, V. 2012. Soil moisture sensors based on metamaterials, 34(6): 689-693.
- Orghici, R., Lützow, P., Burgmeier, J. and Waldvogel, S.R., 2010. A microring resonator sensor for sensitive detection of 1,3,5-trinitrotoluene (TNT). **Sensors**, 10(7):6788-6795.
- Pandey, G., Wang, K.N., Kumar, R. and Weber, R.J., 2014. Employing a metamaterial inspired small antenna for sensing and transceiving data in an underground soil sensor equipped with a GUI for end-user. **IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)**, Oct. 2014.
- Plum, E., Zhou, J., Dong, J., Fedotov, V., Koschny, T., Soukoulis, C., M., Zheludev, N., 2009a. Metamaterial with negative index due to chirality, **Phys. Rev. B**. 79, 035407.
- Quan, H. and Guo, Z., 2005. Simulation of whispering-gallery-mode resonance shifts for optical miniature biosensors. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, 93(1):231-243.
- Rahimi, Z., 2011. The finite integration technique (FIT) and the application in lithography simulations. **Der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg zur Erlangung des Grades**, 132 s.
- Sabah, C., Roskos, H., G., 2012. Design of a terahertz polarization rotator based on a periodic sequence of chiral-metamaterial and dielectric slabs, **Progress In Electromagnetics Research**, 124:301-314.
- Sabah, C., Roskos H. G., 2013. Broadside-coupled triangular split-ring-resonators for terahertz sensing. **Eur. Phys. J. Appl. Phys**, 61:30402.
- Schueler, M., C. Mandel, M. Puentesand, and R. Jakoby, 2012. Metamaterial inspired microwave sensors. **IEEE Microwave Magazine**, 13:57-68.
- Shadrivov, I., Kozyrev, A. and Weide, D. and Kivshar, Y., 2006. Tunable split-ring resonators for nonlinear negative-index metamaterials. **Optics Express**, 14 (20): 9344.
- Vishvakarma, R. B. and Raid, C. S., 1993. Measurement of complex dielectric constant of sand and dust particles as a function of moisture content. **European Microwave Conference**, 23:568-570.
- Wang, B., Zhou, J., Koschny, T., Kafesaki, M., Soukoulis, C., M., 2009b. Chiral metamaterials: simulations and experiments. **J. Opt. A: Pure Appl. Opt.** 11: 114003-10.
- Withayachumnankul, W., Jaruwongrunsee, K. C., Tuantranont, A., Fumeaux, C., Abbott, D., 2013. Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization, **Sensors and Actuators A**.189, 233– 237.
- Yang J. J., Huang M., Xiao Z. & Peng J. H., 2010. Simulation and analysis of asymmetric metamaterial resonator-assisted microwave sensor. **Mod. Phys. Lett. B**. 24:1207–215.

Yang, J. J., Huang, M. and Sun, J., 2011. Double negative metamaterial sensor based on microring resonator. **IEEE Sensor**, 11:2254-2259.



## ÖZGEÇMİŞ

Hatice ÜNAL, 1990 yılında Dörtyol'da doğdu. İlkokul, Ortaokul ve Süleyman Demirel Anadolu Lisesi Fen Bilimleri Bölümü'nü Dörtyol'da tamamladı. Mustafa Kemal Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünü 2008 yılında kazandı. Üniversiteden 2012 yılında mezun oldu. 2012 yılında Mustafa Kemal Üniversitesi İskenderun Meslek Yüksek Okulunda öğretim görevlisi olarak işe başladı. Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enformatik Anabilim Dalında Eylül 2012-2017 tarihleri arasında Yüksek Lisans öğrenimine devam etti. 2014 – 2016 tarihleri arasında İstanbul Üniversitesi Avcılar yerleşkesi Argem ofisinde Ar-Ge mühendisi olarak Astra Medikal firmasında çalıştı. 2016 – 2017 tarihleri arasında İstanbul Üniversitesi Avcılar yerleşkesi Argem ofisinde Ar-Ge mühendisi olarak Dtsis firmasında görev yapmaktadır. 2017 yılında Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enformatik Anabilim Dalı bölümünden mezun oldu.