

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTROMANYETİK REZONATÖR TABANLI HUBUBAT NEM
SENSÖRÜ TASARIMI, ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU**

Alparslan ÇINAR

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. Evren EKMEKÇİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2016**



© 2016 [Alparslan ÇINAR]

TEZ ONAYI

Alparslan ÇINAR tarafından hazırlanan "Elektromanyetik Rezonatör Tabanlı Hububat Nem Sensörü Tasarımı, Üretimi ve Karakterizasyonu" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman Yrd. Doç. Dr. Evren EKMEKÇİ
Süleyman Demirel Üniversitesi



Jüri Üyesi Doç. Dr. Özlem COŞKUN
Süleyman Demirel Üniversitesi



Jüri Üyesi Yrd. Doç. Dr. Kağan TOPALLI
İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi



Enstitü Müdürü Doç. Dr. Yasin TUNCER

.....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Alparslan ÇINAR



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	3
2.1. Metamalzeme Ortamında Dalgaların Yayılması	3
2.2. Negatif Dielektrik Sabiti	4
2.3. Negatif Manyetik Geçirgenlik.....	5
2.4. Metamalzeme Tasarımında Kullanılan Ayrık Halkalı Rezonatör.....	6
2.5. Rezonatör Tabanlı Sensör Çalışmaları Üzerine Kaynak Özetleri.....	8
3. ÖZGÜN SENSÖR YAPISININ ARAŞTIRILMASI GELİŞTİRİLMESİ VE ÜRETİLMESİ.....	12
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	18
4.1. ÇAHR ve ÇLTR yapılarının Deney Ortamında Nem Algılama Uygulaması.....	19
4.2. Nohut Tozlarının Epsilon Ölçümleri.....	23
4.3. ÇAHR ve ÇLTR yapılarının Benzetim Ortamında Nem Algılama Uygulaması.....	28
4.4. ÇAHR ve ÇLTR Sensör Prototiplerinin Performans Analizleri.....	30
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	35
KAYNAKLAR	37
ÖZGEÇMİŞ.....	43

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTROMANYETİK REZONATÖR TABANLI HUBUBAT NEM SENSÖRÜ TASARIMI, ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Alparslan ÇINAR

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Evren EKMEKÇİ

Metamalzemeler tasarım frekanslarında negatif elektriksel geçirgenlik, negatif manyetik geçirgenlik, negatif kırılma indisi ve ters Doppler etkisi gibi elektromanyetik özellikler gösterebilen yapay malzemelerdir. Bu özellikleri nedeniyle metamalzemelere birçok elektromanyetik uygulamada yer verilmiştir.

Metamalzeme yapılarının sıklıkla kullanıldığı uygulama alanlarından birisi de sensörlerdir. Tasarlanan yapıların topolojilerine bağlı olarak çalışma prensiplerini açıklamak için rezonatör tabanlı yapılar eşdeğer devre modellerinde endüktans (L) ve kapasitans (C) parametreleri ile tanımlanmaktadır. Bu model yapıların rezonans frekansı değişimlerinin endüktif ve kapasitif değişimlere karşı hassas olduğunu göstermektedir. Modelde tanımlanan kapasitans parametresi dielektrik sabiti değişimine karşı oldukça hassastır. Bu özellik rezonans tabanlı bu yapıları, dielektrik sabiti nem, sıcaklık, konsantrasyon v.b. ortam parametrelerine hassas olan malzemelerle birlikte kullanılmasıyla sensör uygulamaları için iyi bir alternatif yapar.

Ayrık halkalı rezonatör (AHR) yapıları literatürde mevcut olan metamalzeme örneklerinden birisidir. Uygun şekilde elektromanyetik dalgaya maruz bırakılmaları durumunda negatif elektriksel geçirgenlik ve negatif manyetik geçirgenlik gösterebilmektedirler.

Bu tezde, nohut tozundaki nem değişiminden kaynaklı rezonans frekansındaki kaymayı gözlemek amacıyla çift taraflı AHR yapısı ve özgül olarak tasarlanan çift taraflı L tipi rezonatör (ÇLTR) tabanlı hububat nem sensör prototipleri sunulmuştur. Yapılar, mikrodalga bölgesi S-Bant frekans aralığı için tasarlanmıştır. Sunulan iki farklı sensör prototipinin nohut tozundaki nem değişimlerine olan hassasiyetleri hem benzetim hem de deneysel ortamda karşılaştırılmıştır. Sonuçlar ÇLTR yapısının nohut tozundaki nem değişimine ÇAHR yapısına göre daha hassas olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik Rezonatör, Hububat Nem Sensörü, Mikrodalga.

2016, 43 sayfa



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

ELECTROMAGNETIC RESONATOR BASED CEREAL HUMIDITY SENSOR DESIGN, FABRICATION AND CHARACTERIZATION

Alparslan ÇINAR

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Electronics and Communications Engineering**

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Evren EKMEKÇİ

Metamaterials are artificial materials which may show electromagnetic properties such as negative permittivity, negative permeability, negative refractive index and reverse Doppler effect in the design frequency. Due to these properties, Metamaterials take places in many electromagnetic applications.

One of the common applications that mematerials take place is sensors. Depending on the topologies of the designed structures, resonator based structures are defined by inductance (L) and capacitance (C) parameters in their equivalent circuit models to explain their operation principle. This model shows that the resonance frequencies of these structures are sensitive to the inductive and capacitive changes. The capacitance parameter defined in the model is strongly sensitive to the dielectric constant changes. This property makes these resonance based structures a good alternative for sensor applications together with the use of materials whose dielectric constant is sensitive to the ambient parameters which are humidity, temperature, concentration, etc.

Split ring resonator (SRR) structures are one of the examples for metamaterial structures proposed in literature. When they are properly exposed into electromagnetic wave, they are able to show negative permittivity and negative permeability.

In this thesis, double sided SRR (DSRR) structure and novel double sided L type resonator (DLTR) based humidity sensor prototypes are proposed to observe the resonance frequency shift due to the change of the humidity in chickpea powder. The structures are designed to operate in microwave S-band region. The sensitivities of both prototypes on the change of humidity in chickpea powder are compared in both simulations and experiments. The results show that DLTR is more sensitive than DSRR to the changes in humidity ratio in chickpea powders.

Keywords: Electromagnetic Resonator, Cereal Humidity Sensor, Microwave.

2016, 43 pages

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada beni yönlendiren, önüme çıkan zorluklarda bilgi ve tecrübesi ile yardımcı olan ve mesleki anlamda gelişmemde emeği olan değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Evren EKMEKÇİ' ye teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Umut KÖSE ve Özgür ERTAN' a teşekkür ederim.

Tezimin gerçekleşmesinde "Mikrodalga ve Terahertz Bölgelerinde Metamalzeme Tabanlı Özgün Sensörler: Tasarım, Üretim Ve Çeşitli Sensör Uygulamalarında Kullanılması" isimli 113E632 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Alparslan ÇINAR
ISPARTA, 2016

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Farklı geometride tasarlanmış AHR yapılarının şematik gösterimi	6
Şekil 2.2. AHR'nin farklı şekillerde uyarılması. a) Manyetik uyarım. b) Elektrik uyarım. c) Hem elektrik hem de manyetik uyarım. d) LC Uyarım yok.....	7
Şekil 2.3. Metamalzeme tabanlı sensör modeli ve tasarım parametreleri. a) perspektif görünüm. b) yan görünüm (Ekmekci vd., 2013).....	10
Şekil 3.1. Çift taraflı AHR (ÇAHR) sensör modeli ve tasarım parametreleri. a) perspektif görünüm. b) yan görünüm (Ekmekci vd., 2013).....	12
Şekil 3.2. ÇAHR yapısının Çizelge 3.1'deki tasarım parametrelerine göre $d_{int} = 1$ için $\epsilon_{int} = 1$ 'den $\epsilon_{int} = 5$ 'e değişmesine bağlı $ S_{21} $ grafikleri.	13
Şekil 3.3. ÇAHR yapısının Çizelge 3.1'deki tasarım parametrelerine göre $\epsilon_{int} = 1$ ve $d_{int} = 1$ için $\text{loss}_{tanint} = 0$ 'dan $\text{loss}_{tanint} = 0,25$ 'e değişmesine bağlı $ S_{21} $ grafikleri.	13
Şekil 3.4. Alternatif çift taraflı sensör tiplerinin üstten şematik görünümleri ve tasarım parametleri.....	15
Şekil 3.5. Özgün yapı araştırmasında kullanılan benzetim düzeneği.....	16
Şekil 3.6. Üretilen AHR ve LTR yapılarının dijital mikroskop ile çekilmiş ve ölçeklendirilmiş fotoğrafları.	17
Şekil 4.1. a) Deney için kullanılan 5 adet farklı nem değerlerine sahip nohut tozları. b) Radwag Mac50 nem ölçüm cihazı.....	18
Şekil 4.2. Agilent Field Fox N9926A vektör ağ çözümleyicisi fotoğrafı.	19
Şekil 4.3. ÇLTR ve ÇAHR sensör yapılarının ve farklı nemlerdeki nohut tozlarının dielektrik sabitini ölçmede kullanılan S bant deney düzeneği.	19
Şekil 4.4. Çift taraflı AHR (ÇAHR) sensör modeli ve tasarım parametreleri. a) perspektif görünüm. b) yan görünüm (Ekmekci ve Turhan-Sayan, 2013)..	20
Şekil 4.5. Hassasiyet katmanını $d_{int} = 1$ mm kalınlığında sabit tutmak amacıyla, rezonatör yapıların köşelerine yerleştirilen 1 mm kalınlığında ince tahta çubuk parçalarının fotoğrafı.....	21
Şekil 4.6. ÇLTR prototipinin farklı nem yüzdelerine sahip hassasiyet katmanı nohut tozları için deneysel sonuçları.	22
Şekil 4.7. ÇAHR prototiplerinin farklı nem yüzdelerine sahip hassasiyet katmanı nohut tozları için deneysel sonuçları.	22
Şekil 4.8. Pembe köpük desteği ile $\lambda/4$ numune tutucu içine yerleştirilmiş ÇLTR yapısı.....	23
Şekil 4.9. NWR yöntemi kullanılarak pembe köpüğün ve ϵ ve μ parametrelerinin çıkartımı.	25
Şekil 4.10. %16,3 nemli nohut tozlarının karmaşık elektrik geçirgenlik, karmaşık manyetik geçirgenlik, S_{11} ve S_{21} parametreleri.	26
Şekil 4.11. Nem sensörü simülasyonlarında kullanılmak üzere %9,1, 11,8, %13,8, %16,3 ve %17,9 nemli nohut tozları için karmaşık elektrik geçirgenliğinin gerçek kısımları.....	26

Şekil 4.12. Nem sensörü simülasyonlarında kullanılmak üzere %9,1, 11,8, %13,8, %16,3 ve %17,9 nemli nohut tozları için karmaşık elektrik geçirgenliğinin sanal kısımları.....	27
Şekil 4.13. ÇLTR yapısının manyetik uyarım altında benzetim düzeneği.	29
Şekil 4.14. ÇLTR prototipinin farklı nem yüzdelerine sahip hassasiyet katmanı nohut tozları için benzetim sonuçları.	29
Şekil 4.15. ÇAHR prototipinin farklı nem yüzdelerine sahip hassasiyet katmanı nohut tozları için benzetim sonuçları.	30
Şekil 4.16. a) ÇLTR yapısının ölçüm sonuçları. b) ÇLTR yapısının benzetim sonuçları.....	31
Şekil 4.17. a) ÇAHR yapısının ölçüm sonuçları. b) ÇAHR yapısının benzetim sonuçları.....	31
Şekil 4.18. Hassasiyet katmanı olarak farklı yüzdede nem değerine sahip nohut tozunun kullanıldığı ÇLTR ve ÇAHR yapıları için tekrarlanan 5 ölçümden elde edilen hata grafikleri.....	32
Şekil 4.19. Hassasiyet katmanı olarak farklı yüzdede nem değerine sahip nohut tozunun kullanıldığı ölçümlerde ÇLTR ve ÇAHR yapıları için rezonans frekansının neme bağlı değişim grafikleri.	33
Şekil 4.20. Hassasiyet katmanı olarak farklı yüzdede nem değerine sahip nohut tozunun kullanıldığı benzetimlerde ÇLTR ve ÇAHR yapıları için rezonans frekansının neme bağlı değişim grafikleri.....	34

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Şekil 3.1 ve Şekil 3.3'te verilen çift taraflı sensör yapıları için tasarım pametreleri ve ϵ_{int} 'in 1'den 5'e kayması durumunda f_0 % kayma miktarları.....	14
Çizelge 4.1. ÇLTR prototiplerinin farklı nem değerlerine sahip nohut tozu için deneysel olarak elde edilen rezonans frekansları ve bu rezonans frekanslarında nohut tozunun NRW metodu ile elde edilen ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerleri.....	27
Çizelge 4.2. ÇAHR prototiplerinin farklı nem değerlerine sahip nohut tozu için deneysel olarak elde edilen rezonans frekansları ve bu rezonans frekanslarında nohut tozunun NRW metodu ile elde edilen ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerleri.....	27
Çizelge 4.3. ÇAHR prototiplerinin farklı nem değerlerine sahip nohut tozu için 3,1 GHz frekansında nohut tozunun NRW metodu ile elde edilen ve ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerleri..	28

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AHR	Ayrık halkalı rezonatör
a_s	Dizi elemanları arası mesafe
\vec{B}	Manyetik akı yoğunluğu
C	Kapasitans
C_{mut}	Karşılıklı kapasitans
C_{self}	Self kapasitans
CST	Computer Simulation Technology
c_0	Serbest uzayda ışık hızı
ÇAHR	Çift taraflı ayrık halkalı rezonatör
ÇLTR	Çift taraflı L tipi rezonatör
\vec{D}	Elektrik akı yoğunluğu
d	Rulonun her dönüşünde tabakalar arası mesafe
d_{int}	Hassasiyet katman kalınlığı
d_{sub}	Taban malzemesinin kalınlığı
\vec{E}	Elektrik alan vektörü
ELC	Elektrik alan kuplajlı rezonatör
f_i	%9,1 nem değerine sahip tozu için rezonans frekansı
f_s	%17,1 nem değerine sahip tozu için rezonans frekansı
g	ayrık genişliği
GHz	Giga Hertz
mm	milimetre
MWS	Microwave studio
\vec{H}	Manyetik alan vektörü
h_L	ÇLTR sensörünün nem artışına bağlı yüzde frekans kayması
h_A	ÇAHR sensörünün nem artışına bağlı yüzde frekans kayması
\vec{k}	Dalga vektörü
n	Kırılma indisi
L	Endüktans
LTR	L tipi rezonatör
L_{mut}	Karşılıklı endüktans
L_{self}	Self endüktans
L_x	Taban malzemesinin x eksen boyutu
L_y	Taban malzemesinin y eksen boyutu
l_h	Rezonatörün x eksen boyutu
l_v	Rezonatörün y eksen boyutu
N	Tur sayısı
r	Yarıçap
s	Halkalar arası mesafe
\vec{S}	Poynting vektörü
w	hat kalınlığı
ω	Açısal frekans
ω_p	Plazma frekansı
ϵ	Elektrik geçirgenlik
ϵ'	Elektrik geçirgenliğin gerçel kısmı
ϵ''	Elektrik geçirgenliğin sanal kısmı
$\epsilon_{eff,sub}$	Taban malzemesinin etkin dielektrik sabiti

ϵ_{int}	Hassasiyet katmanının dielektrik sabiti
ϵ_{metal}	İnce tel dizilerinin dielektrik sabiti
ϵ_{sub}	Taban malzemesinin dielektrik sabiti
μ	Manyetik geçirgenlik
μ'	Manyetik geçirgenliğin gerçel kısmı
μ''	Manyetik geçirgenliğin sanal kısmı
μ_{eff}	Etkin manyetik geçirgenlik
σ	Birim alan başına silindir yüzey direnci
σ_1	birim uzunluk başına direnç
Γ	Yansıma katsayısı
T	İletim katsayısı
λ_0	Serbest uzayda dalga boyu
λ_c	Kesim dalga boyu



1. GİRİŞ

Metamalzemeler doğada saf halde bulunmayan ve sıra dışı elektromanyetik özellikler gösterebilen yapay malzemelerdir. Metamalzemeler ile ilgili teori ilk olarak 1968 yılında Veselago tarafından ortaya koyulmuştur. Bu yapılar negatif dielektrik sabiti (ϵ), negatif manyetik geçirgenlik (μ), negatif kırılma indisi ve ters Doppler etkisi gibi özellikler gösterebilmektedirler. Diğer yapıların aksine dalga vektörü \vec{k} , elektrik alan vektörü \vec{E} ve manyetik alan vektörü \vec{H} sol el kuralı ile belirlenmektedir. Bu nedenle metamalzemeler solak malzeme olarak da adlandırılmaktadır. Solak malzemelerde dalga vektörü (\vec{k}) ile Poynting vektörü birbirine \vec{S} zıt yönlüdür. Bu malzemelerde yayılan dalganın faz hızı ve grup hızı birbirine ters yönlüdür (Veselago, 1968).

Metamalzeme tasarımında çeşitli elektromanyetik rezonatör topolojileri kullanılabilir. Bu rezonatör topolojilerinden bazıları elektrik alan kuplajlı (ELC) rezonatör (Landy vd., 2008; Padilla vd., 2007; Schurig vd., 2006; Tao vd., 2010), spiral rezonatör (Bilotti vd., 2007; Bilotti vd., 2007), labirent rezonatör (Bilotti vd., 2007; Bulu vd., 2005; Bulu vd., 2006), geniş taraflı ayırık halkalı rezonatör (BC-AHR) (Freire ve Marques, 2005; Ekmekci ve Turhan-Sayan, 2009; Ekmekci vd., 2011; Marques vd., 2003), ayırık halkalı rezonatör (AHR) (Pendry vd., 1999; Shelby vd., 2001; Smith vd., 2000; Smith vd., 2002) ve L tipi rezonatördür (LTR) (Engelbrecht vd., 2014; Yang vd., 2016; Zhao vd., 2015).

Metamalzemeler antenler (Alici ve Ozbay, 2007; Dong ve Itoh, 2012; Dişken ve Ekmekçi, 2014), soğurucular (Landy vd., 2008; Ekmekci ve Demir, 2016; Shen vd., 2011; Tao vd., 2010), filtreler (Falcone vd., 2004; Garcia-Garcia vd., 2005; Martin vd., 2003;), yönlü bağlaçlar (Liu vd., 2007; Menachem vd., 2012; Çınar vd., 2016b), elektromanyetik indüklenmiş saydam pencere (Kim vd., 2010; Papasimakis vd., 2008; Tassin vd., 2009), perdeleme (Edwards vd., 2009; Schurig vd., 2006) gibi birçok mikrodalga bölgesi uygulamasında kullanılmıştır. Bunlardan birisi de sensörlerdir (Kenanakis vd., 2012; Wiwatcharagoses vd., 2012; Ekmekci vd., 2011; Ekmekci ve Turhan-Sayan, 2013; Karaaslan ve Bakir,

2014; Ebrahimi vd., 2014; Horestani vd., 2013; Naqui ve Martin, 2014; Withayachumnankul vd., 2013; Wiwatcharagoses vd., 2011; Sabah vd., 2014).

Metamalzeme yapılarının davranışını açıklamak için kullanılan yöntemlerden bir tanesi bu yapılar için elektriksel devre modeli oluşturmaktır (Baena vd., 2004; Bilotti vd., 2007; Bilotti vd., 2007). Metamalzemelerin elektromanyetik davranışı LC rezonans devresi ile açıklanabilmektedir (Baena vd., 2004; Ekmekci vd., 2011b). Tez çalışmasında kullanılan sensör topolojisi katman kalınlığına ve dielektrik sabiti değişimine karşı hassastır (Ekmekci ve Turhan-Sayan, 2013; Karaaslan ve Bakir, 2014). Bu hassasiyetin nedeni ise kalınlık değişimi endüktansa (L) ve kapasitansa (C), dielektrik sabiti değişimi kapasitansa (C) etki etmektedir. Endüktans (L) ve kapasitans (C) değişimi ile LC rezonans frekansı değişmektedir (Ekmekci ve Turhan-Sayan, 2013; Karaaslan ve Bakir, 2014). Bu frekans değişiminden yararlanılarak farklı alanlarda sensör uygulaması sunulabilir. Basınç ile malzeme kalınlığı; nem, sıcaklık, yoğunluk ve konsantrasyon değişimi ile malzemenin dielektrik sabiti değişmektedir. Bahsedilen değişimler sunulan çalışmada frekans değişimine sebebiyet verebilirler. Bu sayede nem, sıcaklık, yoğunluk, konsantrasyon ve basınç sensörü olarak kullanılabilir (Ekmekci ve Turhan-Sayan, 2011; Ekmekci ve Turhan-Sayan, 2013; Karaaslan ve Bakir, 2014).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde kısaca metamalzemelerin teorisi, metamalzeme tasarımında yaygın olarak kullanılan ayırık halkalı rezonatör (AHR) ve elektromanyetik rezonatör tabanlı sensör hakkında kaynak özetleri verilmiştir.

2.1. Metamalzeme Ortamında Dalgaların Yayılması

Bir elektromanyetik dalganın ortamdaki yayılma özelliğini belirleyen temel parametreler dielektrik sabiti (ϵ) ve manyetik geçirgenliktir (μ). Bu iki parametre dispersiyon denkleminde yer almaktadır. Aşağıda izotropik bir ortamda dispersiyon denklemi verilmektedir (Veselago, 1968):

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c_0^2} n^2 \quad (2.1)$$

$$n = \sqrt{\epsilon\mu} \quad (2.2)$$

Burada k dalga numarası, ω açısal frekans, c_0 serbest uzaydaki ışık hızı ve n kırılma indisidir. (2.2.) denkleminde göre dielektrik sabiti (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) işaretlerinin aynı anda pozitif ya da negatif olması durumunda kırılma indisinin (n) işaretinde bir değişiklik olmaz. Ancak malzemeler bu işaret değişikliğinden etkilenmektedir. Bu değişiklikten meydana gelen farklılıkları anlamak için Maxwell denklemlerinden Faraday ve Amper kanunları incelenmiştir (Veselago, 1968).

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

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

Burada \vec{E} elektrik alan şiddeti, \vec{B} manyetik akı yoğunluğu, \vec{H} manyetik alan şiddeti ve \vec{D} ise elektrik akı yoğunluğudur. Alan şiddetleri ve akı yoğunlukları arası ilişki aşağıda verilmiştir:

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (2.5)$$

$$\vec{D} = \epsilon\vec{E} \quad (2.6)$$

Faraday ve Amper kanunlarının tek frekanslı düzlemsel için formu şu şekildedir:

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega\mu\vec{H} \quad (2.7)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega\epsilon\vec{E} \quad (2.8)$$

Burada \vec{k} dalga vektörüdür. Verilen (2.7) ve (2.8) denklemlerine göre dielektrik sabiti (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) değerlerinin her ikisi de pozitif olursa dalga vektörü (\vec{k}), elektrik alan şiddeti (\vec{E}), manyetik alan şiddeti (\vec{H}) sağ el kuralı ile belirlenir. Eğer her ikisi de negatif olursa sol el kuralı ile belirlenmektedir (Veselago, 1968).

Metamalzeme ortamında Poynting vektörü (\vec{S}) ve dalga vektörü (\vec{k}) birbirine zıt yönlüdür. Poynting vektörü ϵ ve μ değerlerinden bağımsız olduğu için her zaman sağ el kuralı ile belirlenmektedir (Veselago, 1968).

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (2.9)$$

2.2. Negatif Dielektrik Sabiti

Pendry ve arkadaşları 1998 yılında ince metal tel dizi yapıları yardımıyla plazma frekansının altında negatif dielektrik sabiti elde etmişlerdir. Bu olay (2.10) denklemi ile ifade edilmiştir. Burada ω_p plazma frekansını ω ise frekansını temsil etmektedir (Pendry vd., 1998).

$$\epsilon_{metal} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (2.10)$$

İnce metal tel dizileri ile elde edilen plazma frekansı şu şekilde ifade edilmektedir;

$$\omega_p^2 = \frac{2\pi c_0^2}{a_s^2 \ln(a_s/r)} \quad (2.11)$$

Burada c_0 serbest uzayda ışık hızı, a_s ince metal teller arası mesafe ve r ise ince metal tellerin yarıçapını ifade etmektedir (Pendry vd., 1998).

2.3. Negatif Manyetik Geçirgenlik

Pendry ve arkadaşları 1999 yılında manyetik olmayan iletken levhalar ile etkin manyetik geçirgenlik göstermişlerdir. Yaptıkları bu çalışma kapsamında da negatif manyetik geçirgenlik elde etmişlerdir. Bunun içinde, manyetik alana paralel olacak şekilde kapasitif etki oluşturabilecek Swiss rulosu yapıları kullanmıştır (Pendry vd., 1999). Swiss rulosu için manyetik geçirgenlik şu şekilde ifade edilmiştir:

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{\frac{\pi r^2}{a_s^2}}{1 + \frac{2\sigma i}{\omega r \mu_0 (N-1)} - \frac{d c_0^2}{2\pi^2 r^3 (N-1) \omega^2}} \quad (2.12)$$

Burada a_s rulolar arası mesafe, d her dönüşteki tabakalar arası mesafe, σ birim alan başına silindir yüzeyinin direnci, ω frekansı ve N rulonun tur sayısını belirtmektedir (Pendry vd., 1999).

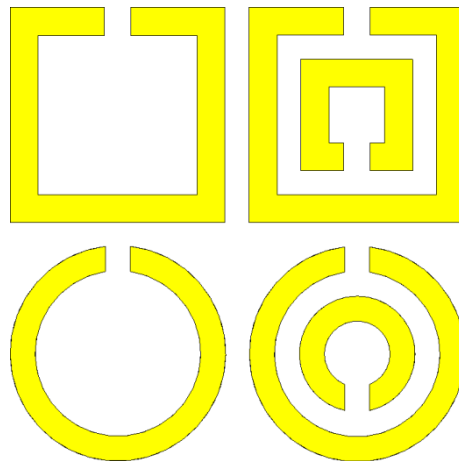
Elektrik alan silindirlere paralel olmamasına rağmen sistem cevabı etkin metal gibidir. Çünkü akım silindir boyunca serbestçe akabilmektedir. Bu yüksek anizotropik durum bazı uygulamalar için istenilmeyebilir. Bu durumu azaltmak için ayrıık halkalı rezonatör (AHR) tasarlanmıştır (Pendry vd., 1999). AHR yapıları için manyetik geçirgenlik şu şekilde ifade edilmiştir.

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{\frac{\pi r^2}{a_s^2}}{1 + \frac{2l\sigma_1}{\omega r \mu_0} i - \frac{3lc_0^2}{\pi \omega^2 \ln \frac{2w}{s} r^3}} \quad (2.13)$$

Burada r iç halka yarıçapı, a_s AHR dizinde elemanlar arası mesafe, c_0 serbest uzayda ışık hızı, w AHR'nin hat kalınlığını, s iç ve dış halka arası mesafeyi, ω frekansı ve σ_1 ise birim uzunluktaki direnci temsil etmektedir.

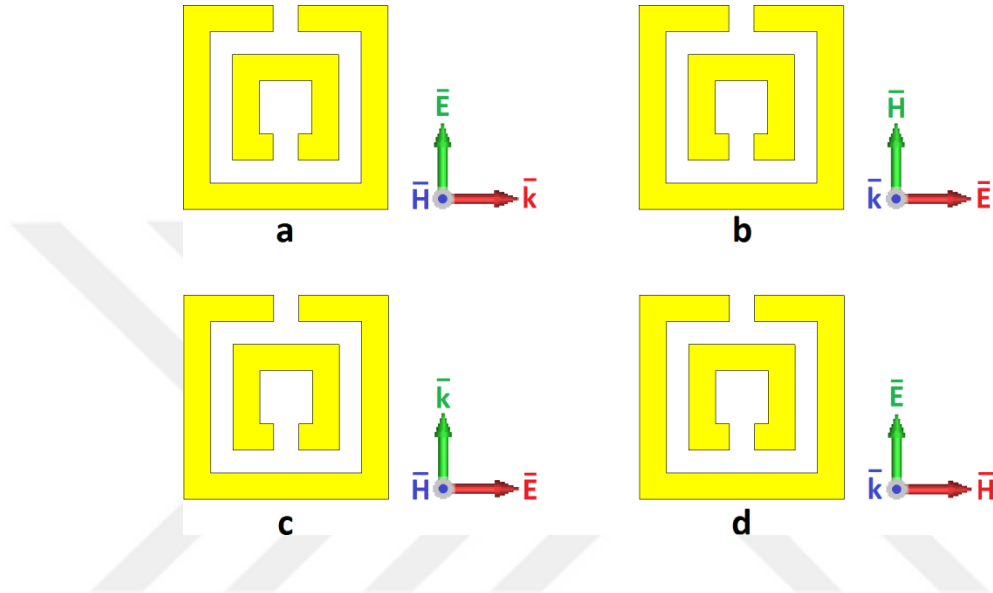
2.4. Metamalzeme Tasarımında Kullanılan Ayrık Halkalı Rezonatör

Ayrık halkalı rezonatör (AHR) metamalzeme tasarımında sıklıkla kullanılan bir yapıdır (Alici ve Ozbay, 2007; Pendry vd., 1999; Shelby vd., 2001; Smith vd., 2000; Smith vd., 2002; Ekmekci vd., 2011; Falcone vd., 2004; Bilotti vd., 2007; Ekmekci ve Turhan-Sayan, 2009; Ekmekci ve Turhan-Sayan, 2013; Karaaslan ve Bakir, 2014; Withayachumnankul vd., 2013). AHR genel olarak ayrığa sahip bir halka şeklindedir. Farklı geometrilerde tasarlanmış AHR yapılarının şematik gösterimi Şekil 2.1' de verilmiştir. Manyetik olmayan iletken levhalar ile etkin manyetik geçirgenlik elde etmek için çalışmalar yapan Pendry ve arkadaşları tarafından literatüre sunulmuştur (Pendry vd., 1999). Sunulan bu çalışmalarında etkin manyetik geçirgenliğin yanı sıra negatif manyetik geçirgenlikte elde etmişlerdir.



Şekil 2.1. Farklı geometrilerde tasarlanmış AHR yapılarının şematik gösterimi.

AHR yapılarından negatif dielektrik sabiti ya da negatif manyetik geçirgenlik elde etmek için uygun şekilde uyarılmalıdır. Bu uyarım şekilleri 3 tanedir (Şekil 2.2). Bunlar manyetik uyarım, elektrik uyarım ve hem manyetik hem de elektrik uyarımdır (Baena vd., 2005; Katsarakis vd., 2004). Negatif elektrik geçirgenlik elde etmek amacıyla elektrik uyarıma, negatif manyetik geçirgenlik için manyetik uyarıma maruz kalmalıdır.



Şekil 2.2. AHR'nin farklı şekillerde uyarılması. a) Manyetik uyarım. b) Elektrik uyarım. c) Hem elektrik hem de manyetik uyarım. d) LC Uyarım yok.

\vec{E} alan AHR yapısının sahip olduğu ayrıkların arasına denk gelecek şekilde elektromanyetik alan uygulanırsa elektrik uyarım; \vec{H} alan AHR yapısına dik olacak şekilde elektromanyetik alan uygulanırsa Şekil 2.2' de görüldüğü gibi manyetik uyarım oluşabilmektedir (Baena vd., 2005; Katsarakis vd., 2004). AHR yapıları eğer uygun şekilde elektromanyetik dalga ile uyarılırsa LC rezonans oluşturabilmektedir (Penciu vd., 2008). Oluşan bu rezonans frekansı şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\omega = \sqrt{LC} \quad (2.10)$$

2.5. Rezonatör Tabanlı Sensör Çalışmaları Üzerine Kaynak Özetleri

Literatürde farklı çalışma prensiplerine sahip elektromanyetik rezonatör tabanlı birçok sensör çalışması mevcuttur. Bu çalışma prensiplerine göre farklı uygulama alanlarında kullanılabilirler.

Mikroşerit iletim hattı çevresine konumlandırılan rezonatör yapıları ile açışal konum sensörü sunulabilmektedir. Rezonatör yapılarının mikroşerit iletim hattı ile aralarındaki mesafeleri ya da iletim hattına göre konumları değişmektedir. Bu nedenle aralarındaki bağlaşım miktarı değişmektedir. Bağlaşım miktarı değişikçe tasarımların iletim rezonans frekanslarında kayma gözlemlenmektedir (Ebrahimi vd., 2014; Çınar ve Ekmekçi, 2016). Başka çalışmalarda ise rezonans frekansı sabit iken iletim seviyelerinin desibel (dB) olarak değişimi gözlemlenmiştir (Horestani vd., 2013; Naqui ve Martin, 2014). Sabit frekansta iletim seviyesini incelemek, rezonans frekansındaki kaymaları incelemeye göre ucuzdur. Bunun nedeni frekans taramak için kullanılan network analizörlerin pahalı olmasıdır (Horestani vd., 2013).

Metamalzeme tasarımında kullanılan rezonatörlerde farklı dielektrik sabitine sahip taban malzemeleri kullanıldığında rezonans frekansında kayma meydana gelmektedir. Farklı dielektrik sabitlerine sahip taban malzemeleri için yapılan analizler de göstermektedir ki; rezonans frekansı ile dielektrik sabiti ilişkilidir. Dielektrik sabitinin değeri artıkcça rezonans frekansında düşme görülmektedir (Ekmekci ve Turhan-Sayan, 2009; Kenanakis vd., 2012; Wiwatcharagoses vd., 2012).

Malzemelerin sıcaklığı değişikçe dielektrik sabitleri değişebilmektedir. Bu özelliklerinden yararlanılarak sıcaklık sensörü sunulmuştur. Sıcaklık artıkcça yapının dielektrik sabiti artmaktadır. Dielektrik sabiti artmasından dolayı rezonans frekansı düşmektedir (Zemouli vd., 2015).

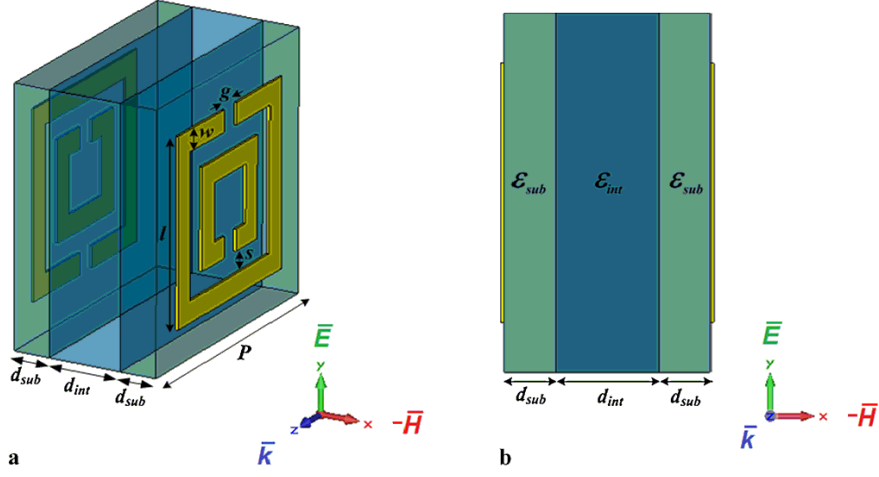
Mikroşerit yama yöntemi ile tasarlanan rezonatör yapıları mikro akışkan sensörlerinde de kullanılabilir. Tasarlanan rezonatörler üzerinden kanallar yardımıyla sıvı geçişi sağlanmaktadır. Birbirine karıştırılmış sıvıların karışma oranı ya da sıvının türü değişikçe dielektrik sabiti de değişmektedir.

Bu nedenle tasarımın saçılma parametrelerindeki rezonans frekansı değişmektedir. Dielektrik sabiti artıkça rezonans frekansı düşmektedir (Withayachumnankul vd., 2013; Wiwatcharagoses vd., 2011).

Rezonatör yapılarının elektromanyetik dalgaya verdikleri tepkiler kırılma indisi değerine bağlı olabilmektedir. Bu özellikten yararlanılarak kırılma indisi sensörü sunulmuştur. Kırılma indisi artıkça yapının dalga boyu da artmıştır (Mandal 2015).

Soğurucular istenilen frekanslarda elektromanyetik dalganın yansımaları ve iletilmesini engelleyen yapılardır. Literatüre sunulan soğurucu yapıları sensör uygulamalarında da kullanılabilir. Soğurucu tasarımında kullanılan taban malzemesinin kalınlığı ya da dielektrik sabiti değiştirilerek sensör uygulaması tasarlanmıştır (Sabah vd., 2014; Sabah vd., 2014; Unal vd., 2015). Kırılma indisi değişiminden faydalanarak soğurucular sensör uygulamasında kullanılabilir (Cheng vd., 2016; Ma vd., 2015; Wang vd., 2015; Wang vd., 2016). Kanallar yardımıyla soğurucu üzerinden sıvılar geçirilerek sensör tasarlanmıştır, böylece sıvı analizi yapılabilir (Yoo vd., 2016).

Bir başka çalışma prensibine sahip sensör yapısında sırasıyla metal rezonatör, dielektrik katman, analiz edilecek malzeme, dielektrik katman ve metal rezonatör olmak üzere beş katmandan oluşur (Şekil 2.3) (Ekmekci ve Turhan-Sayan, 2013; Karaaslan ve Bakir, 2014). Tez kapsamında bu sensör topolojisi kullanılacaktır. Kullanılacak olan bu topolojinin eş değer devre modellerinde endüktif (L) ve kapasitif (C) değerler bulunmaktadır. Bu nedenle metmalzeme yapıların rezonans frekansı endüktif (L) ve kapasitif (C) değişimlere karşı çok hassastır. Yapının kapasitif değeri (C) dielektrik sabiti değişimine karşı hassastır. Analizi edilen malzemenin nem, sıcaklık, yoğunluk ve konsantrasyon gibi özellik değişimlerine bağlı olarak etkin dielektrik sabiti değişmektedir. Tasarlanan bu sensörler; sıcaklık, nem, yoğunluk, konsantrasyon uygulamalarında kullanılabilir (Ekmekci ve Turhan-Sayan, 2013, Karaaslan ve Bakir, 2014).



Şekil 2.3. Metamalzeme tabanlı sensör modeli ve tasarım parametreleri. a) perspektif görünüm. b) yan görünüm (Ekmekci ve Turhan-Sayan, 2013).

Hassasiyet katmanının kalınlığı arttıkça AHR yapıları arasındaki karşılıklı endüktans (L_{mut}) ve karşılıklı kapasitans (C_{mut}) değerleri azalır. Bu da rezonans frekansında artmaya sebep olur (Ekmekci ve Turhan-Sayan, 2013). Hassasiyet katmanının kalınlığı (d_{int}) değiştirilmeden dielektrik sabiti (ϵ_{int}) arttığında; sensör yapısının rezonans frekansı düşmektedir (Ekmekci ve Turhan-Sayan, 2013). Bireysel SRR yapılarının L_{self} değeri, taban malzemesi parametrelerinden (ϵ_{sub} , d_{sub} , ϵ_{int} ve d_{int}) bağımsızdır. Bu nedenle self-endüktanslar değişim göstermezler. AHR yapıları arasındaki mesafe sabit kaldığı sürece L_{mut} değişmez. Yapının boşluk kapasitansları ihmal edilir, AHR'nin iç ve dış halkalar arası kapasitans self-kapasitansa (C_{self}) daha hâkimdir. Self-kapasitans taban malzemesinin etkin dielektrik sabiti ($\epsilon_{eff,sub}$) ile doğru orantılıdır (Ekmekci ve Turhan-Sayan, 2013; Bilotti vd., 2007).

$$\epsilon_{eff,sub} = 1 + \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left[\frac{d_{sub}}{2\pi(w+s)} \right] (\epsilon_{int} - 1) \quad (2.16)$$

Burada d_{sub} taban malzemesinin kalınlığı, ϵ_{int} taban malzemesinin dielektrik sabiti, w halka genişliği ve s ise iç ve dış halka arası mesafedir. Taban malzemesinin kalınlığı ve dielektrik sabiti arttıkça her bir AHR'nin C_{self} değeri artar. İki AHR yapısı arasında C_{mut} oluşmaktadır. Sensör yapısındaki her bir

katmanın kapasitans değerinin seri bağlantısı C_{mut} değerini verir (Ekmekci ve Turhan-Sayan, 2013).

$$\frac{1}{C_{mut}} = \frac{1}{C_{base}} + \frac{1}{C_{int}} + \frac{1}{C_{base}} \quad (2.17)$$

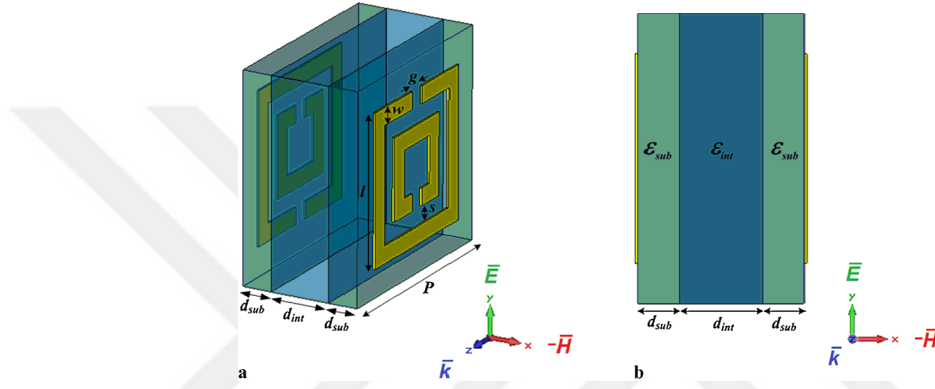
$$C_{base} = \frac{\varepsilon_{sub}A}{d_{sub}} \quad (2.18)$$

$$C_{int} = \frac{\varepsilon_{int}A}{d_{int}} \quad (2.19)$$

Burada A her AHR için metal içermiş etkin alanıdır. Diğer parametreler sabit kalmak şartı ile ε_{int} artarsa C_{self} ve C_{mut} değerleri de artar. Pratik uygulamadaki kısıtlamalar dâhilinde d_{sub} ve d_{int} değerlerini oldukça küçük tutarak C_{mut} değerini büyük yapmak gerekir. Taban malzemesinin kalınlıklarını küçük değerler seçerek C_{self} değeri de küçük tutulur. Bu sayede C_{mut} , C_{self} değerine göre daha baskın olur (Ekmekci ve Turhan-Sayan, 2013).

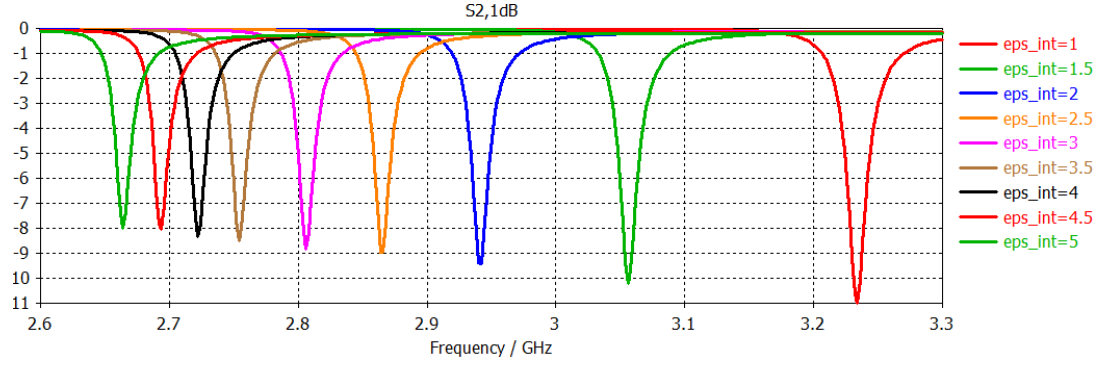
3. ÖZGÜN SENSÖR YAPISININ ARAŞTIRILMASI GELİŞTİRİLMESİ VE ÜRETİLMESİ

Özgün sensör yapısı tasarımında temel amaç sensör hassasiyetinin artırılmasıdır. Burada hassasiyet rezonans frekansındaki dielektrik sabiti değişimine bağlı yüzde kayma oranıdır. Hassasiyet artışını karşılaştırmak referans yapı olarak çift taraflı ayırık halkalı rezonatör (ÇAHR) yapısı kullanılmıştır (Şekil 3.1).

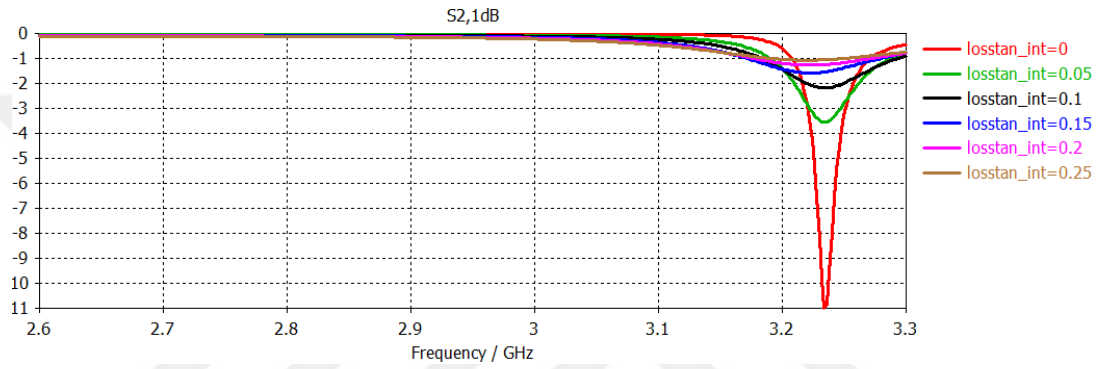


Şekil 3.1. Çift taraflı AHR (ÇAHR) sensör modeli ve tasarım parametreleri. a) perspektif görünüm. b) yan görünüm (Ekmekci ve Turhan-Sayan, 2013).

Bu yapı Çizelge 3.1’de verilen tasarım parametreleri için mikrodalga bölgesi S bant frekans aralığında tasarlanmıştır. CST Microwave Studio (MWS) ortamında hassasiyet katmanının dielektrik sabiti (ϵ_{int}) değeri 1’den 5’e kadar 0,5 adım aralıkları ile değiştirilerek, hassasiyet katmanının dielektrik sabitinin rezonans frekansına olan etkisi incelenmiş ve $|S_{21}|$ grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen grafikler Şekil 3.2’de verilmiştir. Daha sonra aynı yapının, CST Microwave Studio (MWS) ortamında hassasiyet katmanının dielektrik sabiti $\epsilon_{int} = 1$ ve katman kalınlığı $d_{int} = 1$ mm’de sabit tutularak, kayıp tanjant değerinin etkisi incelenmiştir. Kayıp tanjantı ($\tan\delta_{int}$) 0’dan 0,25’e kadar 0,05 adım aralıkları ile değiştirilmiş ve $|S_{21}|$ grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen grafikler Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.2. ÇAHR yapısının Çizelge 3.1’deki tasarım parametrelerine göre $d_{int} = 1$ için $\epsilon_{int} = 1$ ’den $\epsilon_{int} = 5$ ’e değişmesine bağlı $|S_{21}|$ grafikleri.



Şekil 3.3. ÇAHR yapısının Çizelge 3.1’deki tasarım parametrelerine göre $\epsilon_{int} = 1$ ve $d_{int} = 1$ için $losstan_{int} = 0$ ’dan $losstan_{int} = 0,25$ ’e değişmesine bağlı $|S_{21}|$ grafikleri.

Şekil 3.2’de sunulan $|S_{21}|$ grafikleri göstermektedir ki; ϵ_{int} değeri arttıkça yapının ϵ_{int} değerindeki artışa olan duyarlılığı azalmaktadır. Bu sorunu azaltmak amacıyla ÇAHR yapısına alternatif olabilecek birçok yapı üzerinde çalışmış ve bu yapıların üstten şematik görünümleri Şekil 3.4’te verilmiştir. Şekil 3.4’teki tüm yapılar Şekil 3.1’de sunulduğu gibi çift taraflı olarak tasarlanmıştır. Alt katman rezonatörü üst katman rezonatörünün y eksenine göre ayna görüntüsüdür ancak ayırık bölgeleri birbirlerine zıt yönlüdürler. Bu iki rezonatör arasında sırasıyla alt katman, hassasiyet katmanı ve katman bulunmaktadır. Bu iki rezonatör yz düzleminde hizalıdır. Yapılarda taban malzemesi olarak $d_{sub} = 0,508$ mm kalınlığında Arlon AD300A kullanılmıştır ($\epsilon_r = 3$ ve $\tan\delta = 0,002$, bakır kalınlığı 0,035 mm).

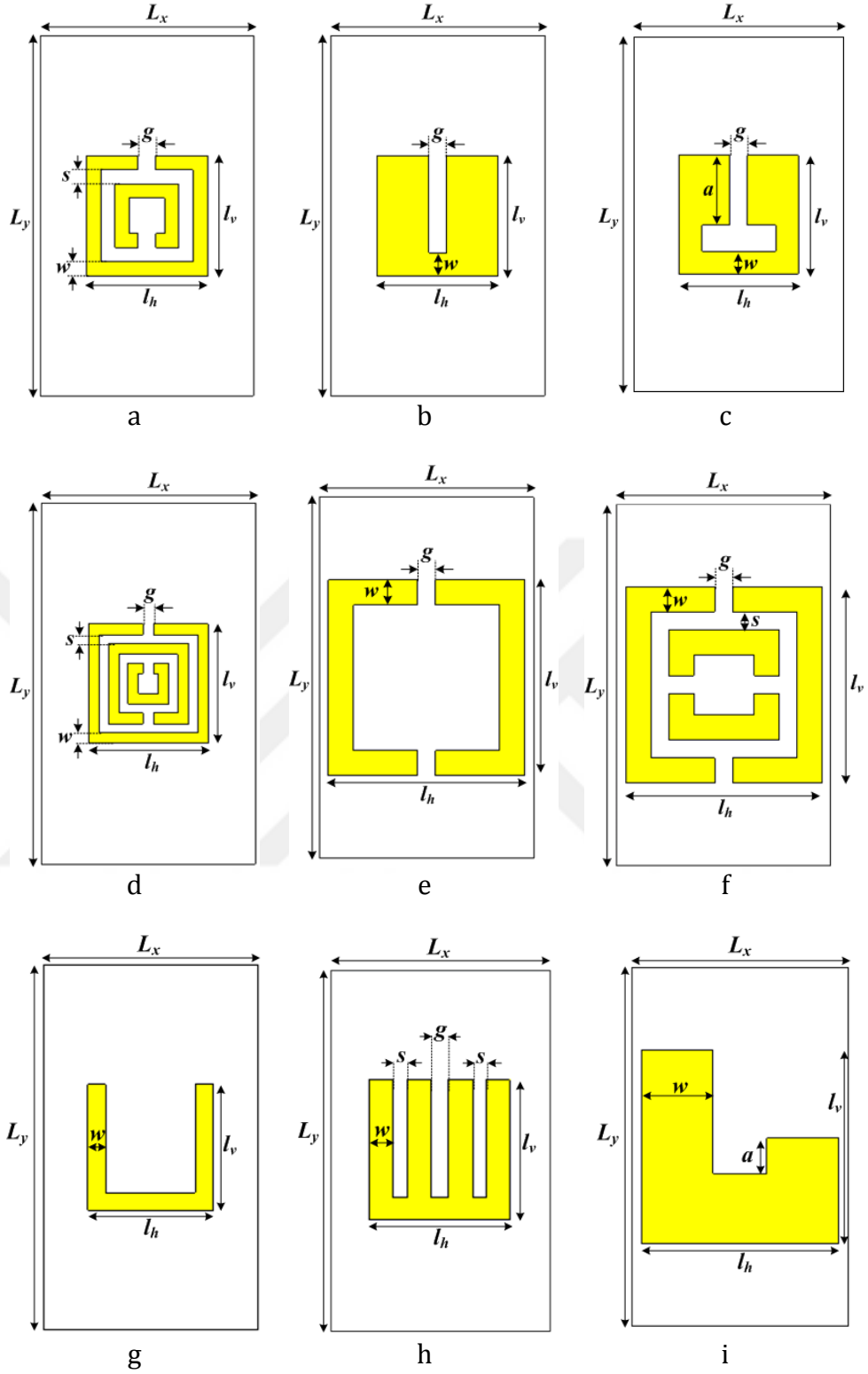
Çizelge 3.1. Şekil 3.1 ve Şekil 3.3'te verilen çift taraflı sensör yapıları için tasarım parametreleri ve ϵ_{int} 'in 1'den 5'e kayması durumunda f_0 yüzde kayma miktarları

Yapı Şematığı	f_0 % kayma	Parametre (mm)							
		L_x	L_y	l_h	l_v	w	g	s	a
Şekil 4.3 (a)	17,63	15	34	8,5	8,5	1,0	0,9	1,0	-
Şekil 4.3 (b)	24,59			11,0	11,0	1,3	1,5	-	-
Şekil 4.3 (c)	22,84			9,5	9,5	1,7	1,5	-	7,2
Şekil 4.3 (d)	13,39			8,5	8,5	0,8	0,8	0,7	-
Şekil 4.3 (e)	22,58			14,0	14,0	1,8	1,5	-	-
Şekil 4.3 (f)	21,54			14,0	14,0	1,8	1,5	1,5	-
Şekil 4.3 (g)	22,58			10,5	10,5	1,5	-	-	-
Şekil 4.3 (h)	23,97			10,0	10,0	1,5	1,5	1,0	-
Şekil 4.3 (i)	27,01			14,0	14,0	5,0	-	-	3,0

Çizelge 3.1'de bu yapılara ait tasarım parametreleri ve $d_{int} = 1$ mm kalınlığındaki hassasiyet katmanının dielektrik sabiti ϵ_{int} 'in 1'den 5'e değişmesi durumundaki rezonans frekansındaki yüzde kayma (f_0 % kayma) hesaplanmıştır. Bu hesaplama için (3.1) denklemi kullanılmıştır.

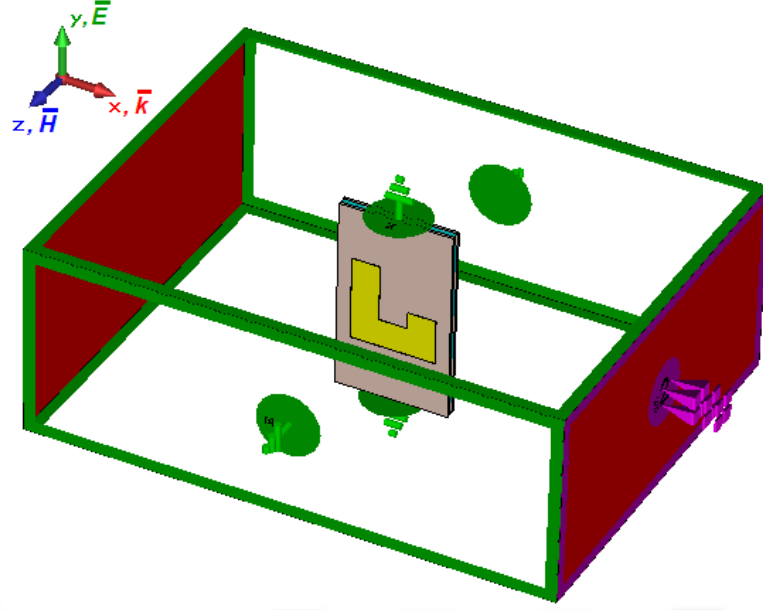
$$f_0 \text{ \% kayma} = \frac{f_1 - f_5}{f_1} \times 100 \quad (3.1)$$

Burada f_1 sensör yapısının $\epsilon_{int} = 1$ için rezonans frekansını ve f_5 sensör yapısının $\epsilon_{int} = 5$ için rezonans frekansını temsil etmektedir.



Şekil 3.4. Alternatif çift taraflı sensör tiplerinin üstten şematik görünüşleri ve tasarım parametreleri.

Benzetimler CST Microwave Studio 2015 yazılımı kullanılarak frekans bölgesi çözümleyicisinde yapılmıştır. Yapılar dalga kılavuzu içerisinde manyetik olarak uyarılmış ve sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Özgün yapı araştırmasında kullanılan benzetim düzeneği.

Çizelge 3.1’de verilen f_0 % kayma değerleri sensör yapısının hassasiyetinin bir göstergesidir. Bu durumda incelenen yapılar arasında en yüksek hassasiyete Şekil 3.4(i)’de gösterilen çift taraflı L-tipi rezonatör (ÇLTR) sahiptir. Bu amaçla üretim ve karakterizasyon aşamasında referans yapısı olarak ÇAHR, özgün sensör tasarımı olarak ÇLTR seçilmiştir.

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere üretilen sensör prototiplerinin ölçekli dijital fotoğrafları Şekil 3.6’te gösterilmiştir. Fotoğraflar dijital mikroskopla çekilmiş olup resim içinde ölçek çubuğu verilmiştir. Üretimi yapılan malzemelerin tasarım parametreleri şu şekildedir:

ÇAHR yapısı için (tüm boyutlar mm cinsindedir);

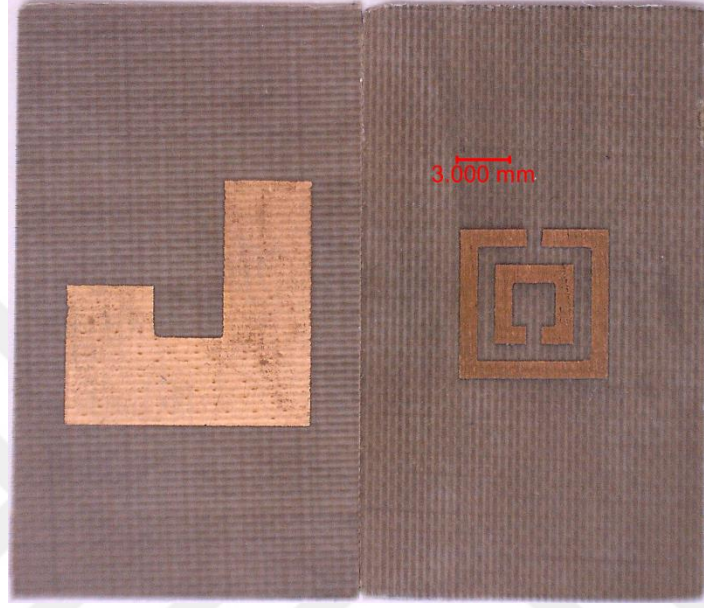
$$L_x = 20, L_y = 34, l_h = 8,5, l_v = 8,5, w = 1, s = 1, g = 0,9$$

ÇLTR yapısı için (tüm boyutlar mm cinsindedir);

$$L_x = 20, L_y = 34, l_h = 14, l_v = 14, w = 5, a = 3$$

Üretilen tüm yapılarda taban malzemesi olarak $d_{int} = 0,508$ mm dielektrik kalınlığına ve 0,035 mm bakır kalınlığına sahip Arlon AD300A taban malzemesi kullanılmıştır. Arlon AD300A için 10 GHz’deki elektriksel özellikler $\epsilon_r = 3$ ve $\tan\delta = 0,002$ olarak verilmektedir.

Üretimler baskı devre tekniğiyle yapılmıştır. Metal tabaka üzerine tonerli desen sıcak baskı ile aktarılır. Daha sonra 4 ölçek HCl ve 1 ölçek H₂O₂ karışımı ile elde edilen asit havuzuna bu plaket bırakılır. Tonerden dolayı desen şeklindeki metal, asit ile tepkimeye girmez. Ancak diğer bölgelerdeki metal tepkimeye girerek plaket üzerinden kalkar.



Şekil 3.6. Üretilen AHR ve LTR yapılarının dijital mikroskop ile çekilmiş ve ölçeklendirilmiş fotoğrafları.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Üretilen yapıların nem algılama uygulamalarında test edilebilmesi için çift taraflı rezonatör yapılarında hassasiyet katmanı olarak 5 farklı nem değerine sahip ve $d_{int} = 1$ mm kalınlığında nohut tozu kullanılmıştır. Kullanılan numuneler %9,1, %11,8, %13,8, %16,3 ve %17,9 nem değerlerine sahiptir. Farklı oranlarda nem değeri elde etmek için öğütücü yardımıyla toz haline getiren nohutlardan eşit ağırlıkta 5 adet numune hazırlanmıştır. Daha sonra bu numunelerden 4 tanesine farklı miktarlarda saf su ilave edilmiştir. Diğer numuneye ise saf su ilave edilmemiştir. Nemin homojen olarak dağılması için numuneler belirli bir süre bekletilmiştir. Nem ölçümleri Radwag Mac50 nem ölçer cihazıyla 5 gram ağırlığında nohut tozu örneğiyle yapılmıştır (Şekil 4.1). Nem ölçer cihazı eklenen malzemeyi 120 saniyede içinde 1 mg'lık ağırlık değişimi olmayıncaya kadar 120 °C'ye kadar ısıtmakta ve sıcaklığı sabit tutarak malzeme içindeki suyu buharlaştırmaktadır. Malzemenin ilk ağırlığından (m_i) son ağırlığına (m_s) göre yüzde değişim elde edilerek yüzde nem değeri hesaplanmaktadır. Burada ilk ağırlık her numune için 5 gramdır. Burada ölçülen nem değerleri malzeme içindeki nem değeridir.

$$\text{yüzde nem} = \frac{m_i - m_s}{m_i} \times 100 \quad (4.1)$$



a



b

Şekil 4.1. a) Deney için kullanılan 5 adet farklı nem değerlerine sahip nohut tozları. b) Radwag Mac50 nem ölçüm cihazı.

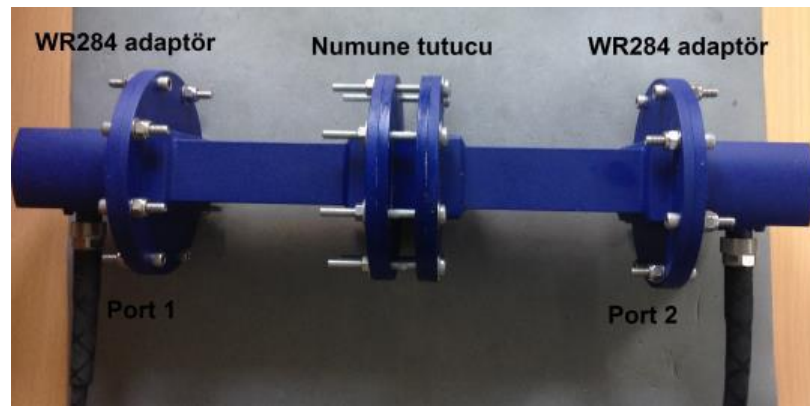
4.1. ÇAHR ve ÇLTR yapılarının Deney Ortamında Nem Algılama Uygulaması

Bu tez çalışmasında Agilent FieldFox N9926A vektör ağ çözümleyicisi kullanılmıştır. Bu cihaz iki portludur ve 30 kHz – 14 GHz arasında karmaşık S parametrelerini ölçebilmektedir (Şekil 4.2).

Tez kapsamında S parametresi ölçümleri için S bant dalga kılavuzu iletim hattı düzeneği kurulmuştur (Şekil 4.3) ve TRL (Thru-Reflect-Line) kalibrasyonu yapılmıştır. Sensör prototipleri dalga kılavuzu içerisinde manyetik olarak uyarılmıştır.

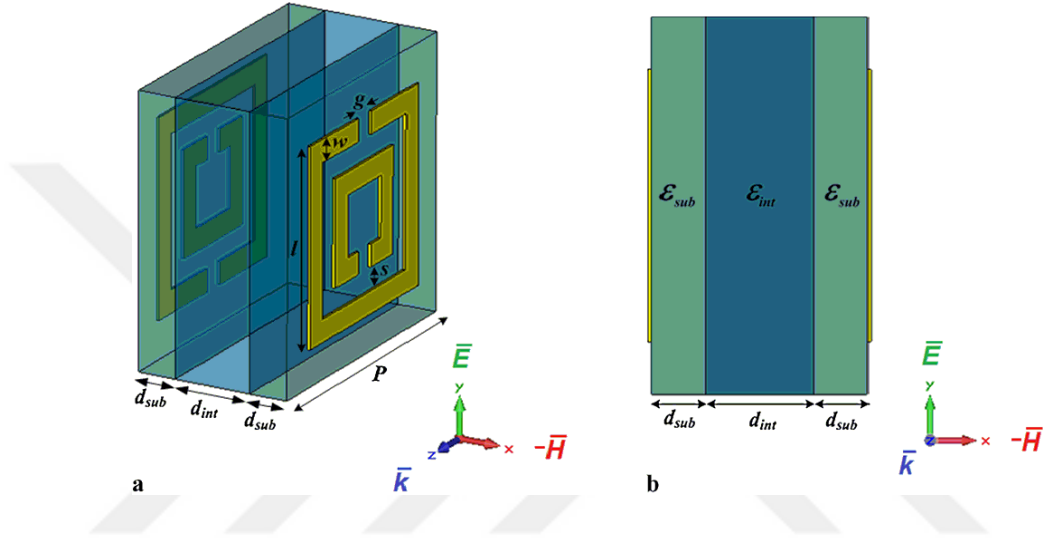


Şekil 4.2. Agilent Field Fox N9926A vektör ağ çözümleyicisi fotoğrafı.



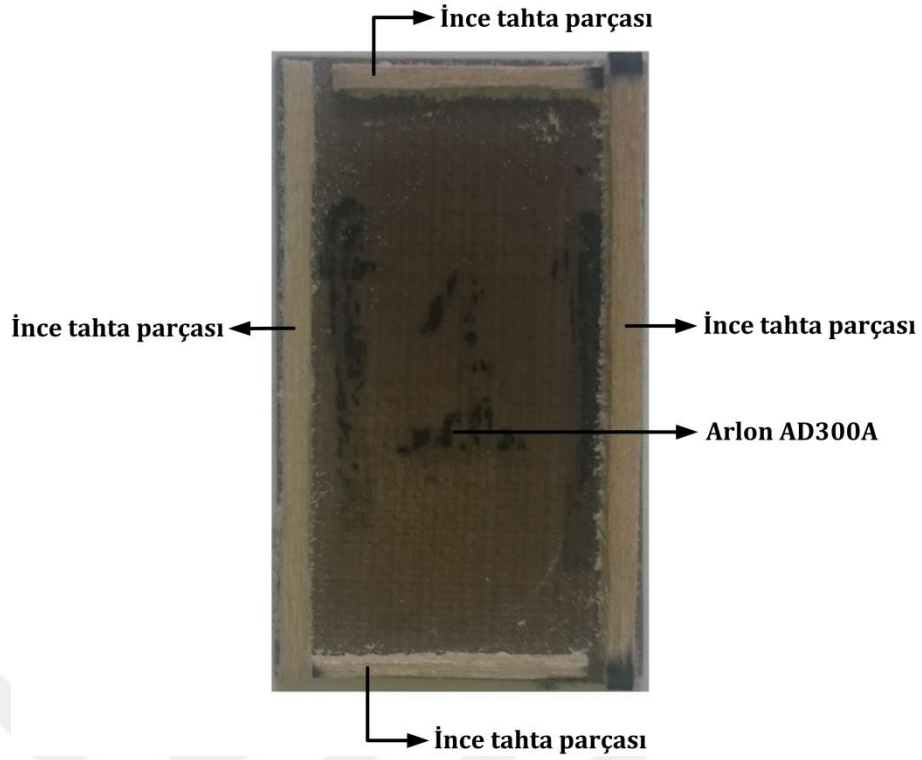
Şekil 4.3. ÇLTR ve ÇAHR sensör yapılarının ve farklı nemlerdeki nohut tozlarının dielektrik sabitini ölçmede kullanılan S bant deney düzeneği fotoğrafı.

Üretilen yapıları nem uygulamasında test etmek amacıyla farklı nem değerine sahip beş nohut tozu örneği kullanılmıştır. Sırasıyla kullanılan nohut tozlarının nemleri %9,1, %11,8, %13,84, %16,3 ve %17,9'dir. Nohut tozları $d_{int} = 1$ mm kalınlığında hassasiyet katmanı olarak kullanılmıştır. Daha önce $d_{sub} = 0,508$ mm kalınlığında Arlon AD300A üzerine üretilen LTR ve AHR yapıları ve $d_{int} = 1$ kalınlığında nohut tozu kullanılarak sandviç şeklinde çift taraflı yapı hazırlanmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Çift taraflı AHR (ÇAHR) sensör modeli ve tasarım parametreleri. a) perspektif görünüm. b) yan görünüm (Ekmekci ve Turhan-Sayan, 2013).

Hassasiyet katmanını $d_{int} = 1$ mm kalınlığında sabit tutmak amacıyla, rezonatör yapıların köşelerine 1 mm kalınlığında ince tahta çubuk parçaları yerleştirilmiştir (Şekil 4.5). Yerleştirilen bu parçaların yüksekliği kadar nohut tozu eklenerek $d_{int} = 1$ mm kalınlığa sahip hassasiyet katmanı oluşturulmuştur. Ölçümlerde kullanılan bu tahta parçaları ince olduğu için benzetim ortamında kullanılmamıştır. Benzetim ortamında sadece nohut tozlarının elektriksel özelliğine sahip $d_{int} = 1$ mm kalınlığında hassasiyet katmanı oluşturulmuştur.

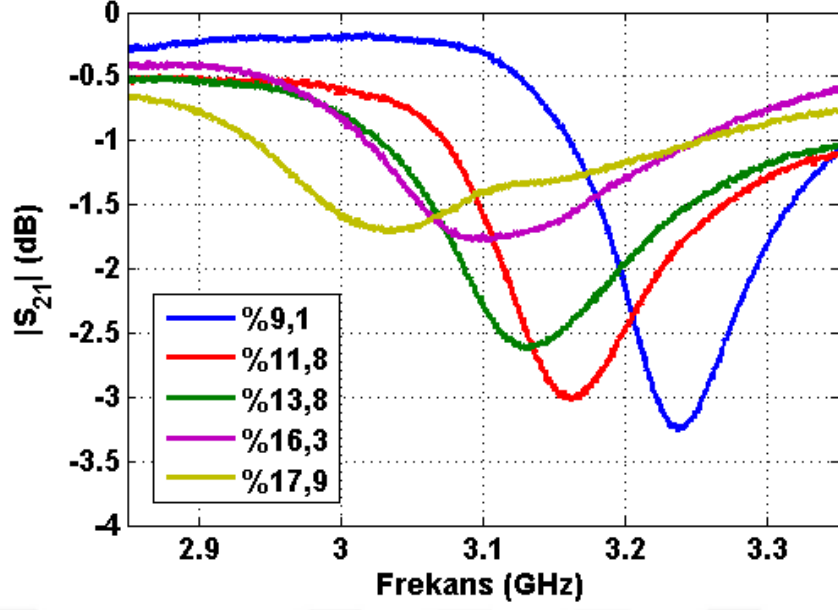


Şekil 4.5. Hassasiyet katmanını $d_{int} = 1$ mm kalınlığında sabit tutmak amacıyla, rezonatör yapıların köşelerine yerleştirilen 1 mm kalınlığında ince tahta çubuk parçalarının fotoğrafı.

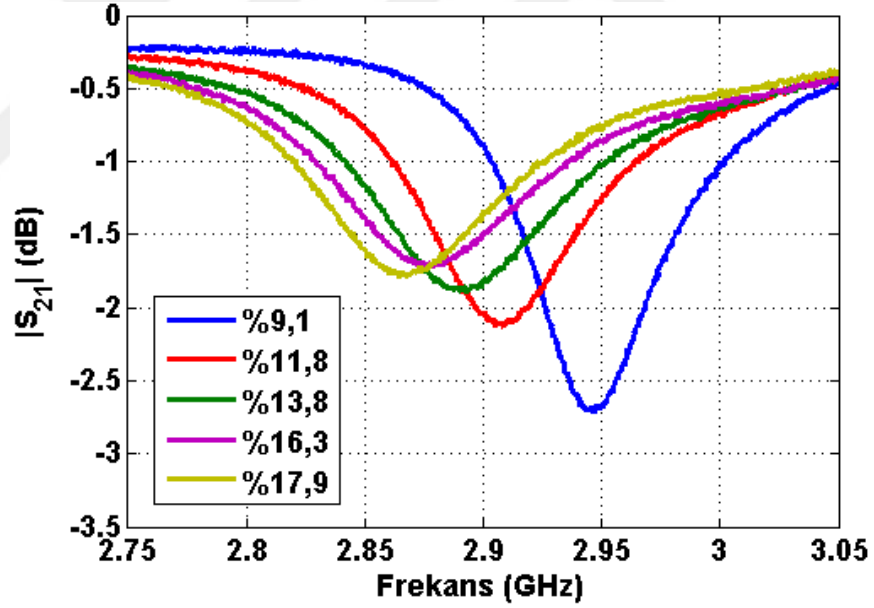
Değişen nem miktarına bağlı olarak nohudun karmaşık epsilon değeri değişir. Bu sebeple rezonans frekansında kaymaya neden olur. Her bir ölçüm 5 kere tekrarlanmıştır ve ölçüm çizimi olarak ortalama rezonans frekansına en yakın değere sahip $|S_{21}|$ grafikleri çizdirilmiştir.

ÇLTR yapısının ortalama rezonans frekansı, nem değeri %9,1'den %17,9'ye çıkarken 3,240 GHz'den 3,039 GHz'e düşmüştür. Nem arttıkça ölçümlerde desibel (dB) cinsinden rezonans frekansının genliği artmıştır (Şekil 4.6).

ÇAHR yapısının ortalama rezonans frekansı, nem değeri %9,1'den %17,9'ye çıkarken 2,946 GHz'den 2,865 GHz'e düşmüştür. Nem arttıkça ölçümlerde desibel (dB) cinsinden rezonans frekansının genliği artmıştır (Şekil 4.7).

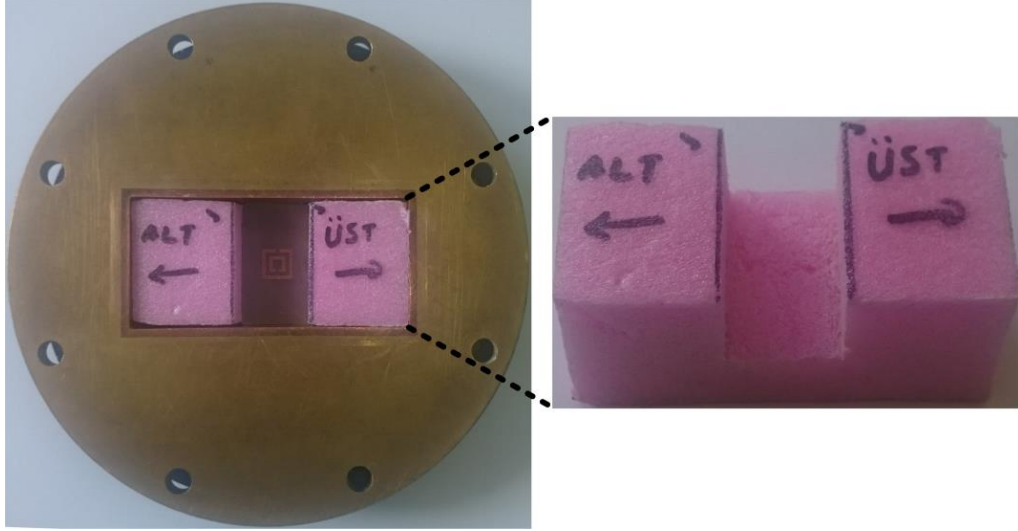


Şekil 4.6. ÇLTR prototiplerinin farklı nem yüzdelere sahip hassasiyet katmanı nohut tozları için deneysel sonuçları.



Şekil 4.7. ÇAHR prototiplerinin farklı nem yüzdelere sahip hassasiyet katmanı nohut tozları için deneysel sonuçları.

Deneyleerde hassasiyet katman kalınlığı $d_{int} = 1$ mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Yapıları desteklemek amacıyla pembe köpük kullanmaktadır (Şekil 4.8). Kullanılan bu pembe köpük havaya benzer elektriksel özellik göstermektedir ($\epsilon_r=1,02$, $\mu_r=1$) ve kaybı çok azdır.



Şekil 4.8. Pembe köpük desteği ile $\lambda/4$ numune tutucu içine yerleştirilmiş ÇLTR yapısı.

4.2. Nohut Tozlarının Epsilon Ölçümleri

Değişen nem miktarı nohudun karmaşık epsilon değerini değiştirir ve bu da rezonans frekansında kaymaya neden olmaktadır. Rezonans frekansındaki kayma nem değişiminin bir ifadesidir. Çalışma prensibinin doğrulanması ve nohut verilerinin benzetim ortamına aktarılması için karmaşık epsilon ölçümleri yapılmıştır.

Karmaşık ϵ ve μ ölçmek için ilk önce S bant dalga kılavuzu fiziksek olarak kurulmuş ve TRL kalibrasyonu yapılmıştır. Sonra $\lambda/4$ numune tutucu içerisine nohut tozu yerleştirilmiştir. Ancak nohut tozunun nemi arttıkça kayıplar artmıştır ve $\lambda/4$ numune tutucu tamamen nohut tozu ile doldurulunca iletim oldukça azalmakta ve malzeme parametrelerinin elde edilmesi tam verimli çalışmamıştır. Bu nedenle 10 mm kalınlıklarda nohut tozu eklenerek başarılı olunmuştur. Nohut tozu $\lambda/4$ numune tutucu içerisine tam olarak doldurulmadığı için S_{11} ve S_{21} için faz ötelemesi yapılmıştır. En son olarak Nicholson-Ross-Weir (NRW) yöntemini uygulayarak Karmaşık ϵ ve μ değerleri elde edilmiştir. Ölçümlerde Agilent N9926A vektör ağ çözümleyicisi kullanılmıştır.

Nicholson-Ross-Weir (NRW) yöntemi denklemi aşağıda verilmiştir (Rohde-Schwarz).

$$S_{11} = \frac{\Gamma(1-T^2)}{(1-\Gamma^2-T^2)} \quad (4.2)$$

$$S_{21} = \frac{T(1-\Gamma^2)}{(1-\Gamma^2-T^2)} \quad (4.3)$$

Burada (4.2) ve (4.3) denklemleriyle elde edilen parametreler vektör ağ çözümleyicisinden doğrudan elde edilebilir (Rohde-Schwarz).

$$\Gamma = X \pm \sqrt{X^2 - 1}, \text{ burada } |\Gamma| < 1 \quad (4.4)$$

Burada Γ yansımaya katsayısını vermektedir ve (4.4) denklemi ile çıkarılabilir (Rohde-Schwarz).

$$X = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (4.5)$$

$$T = \frac{S_{11} - S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (4.6)$$

Burada T iletim katsayısını vermektedir ve (4.6) denklemi ile çıkarılabilir (Rohde-Schwarz).

$$\mu_r = \frac{1 + \Gamma_1}{\Lambda(1-\Gamma) \sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}}} \quad (4.7)$$

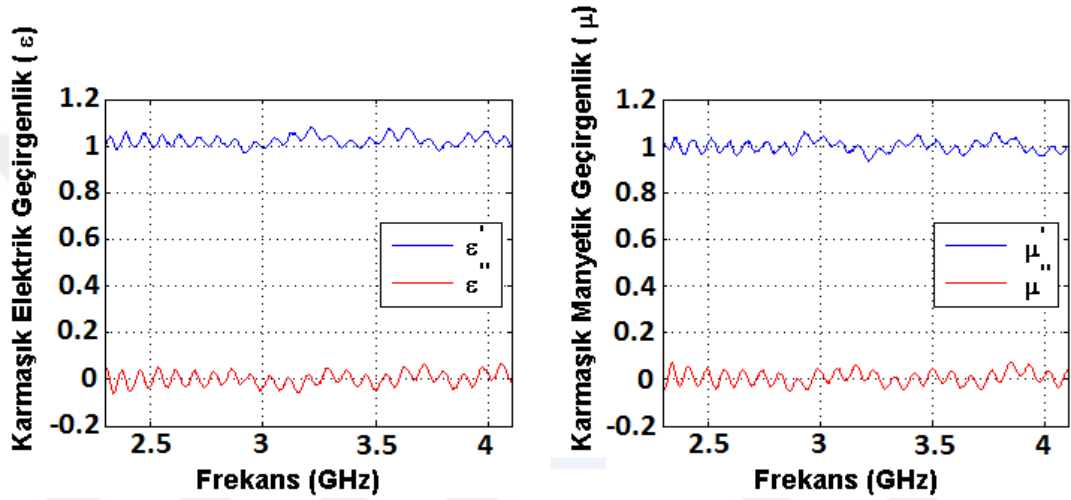
Burada μ_r manyetik geçirgenlik katsayısını vermektedir ve (4.7) denklemi ile çıkarılabilir. Denkleminde yer alan λ_0 serbest uzayda dalga boyunu ve λ_c kesim dalga boyunu vermektedir (Yaw, 2012).

$$\frac{1}{\Lambda^2} = \left(\frac{\epsilon_r \mu_r}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2} \right) = - \left(\frac{1}{2\pi L} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right)^2 \quad (4.8)$$

$$\epsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r} \left(\frac{1}{\lambda_c^2} - \left[\frac{1}{2\pi L} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right]^2 \right) \quad (4.9)$$

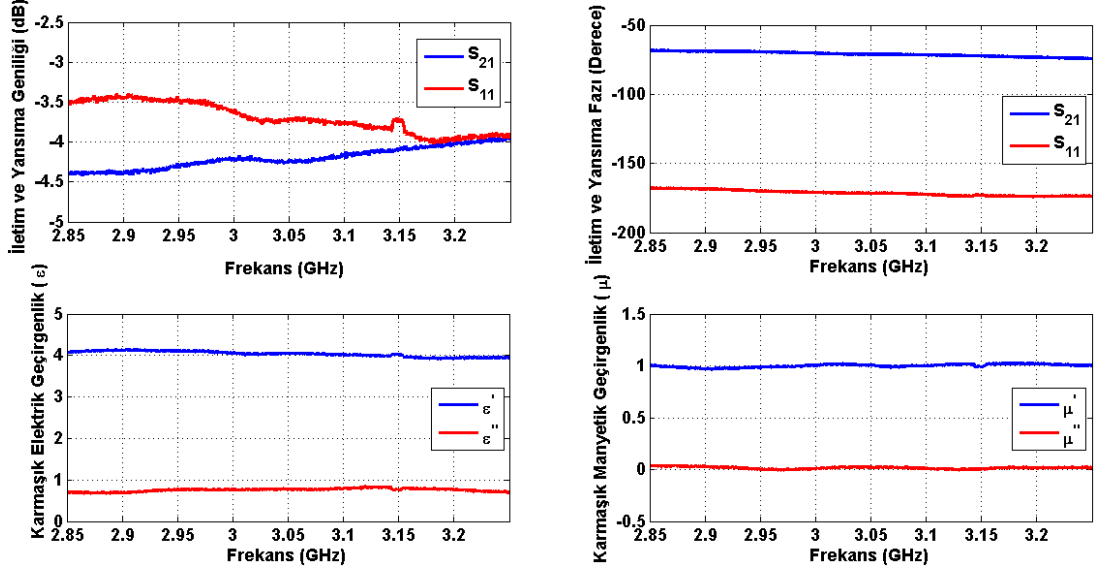
Burada ϵ_r elektriksel geçirgenlik katsayısını vermektedir ve (4.9) denklemi ile çıkarılabilir (Rohde-Schwarz).

Deneilerde pembe köpük deney düzeneklerinde yapıları desteklemek için kullanılmaktadır. Bunun nedeni elektriksel özelliklerinin havaya benzemesidir. Pembe köpüğün bu özelliğini kanıtlamak ve NWR yöntemini test etmek için $\lambda/4$ numune tutucu içerisine pembe köpük yerleştirilmiş ve ϵ ve μ değerleri hesaplanmıştır (Şekil 4.9).



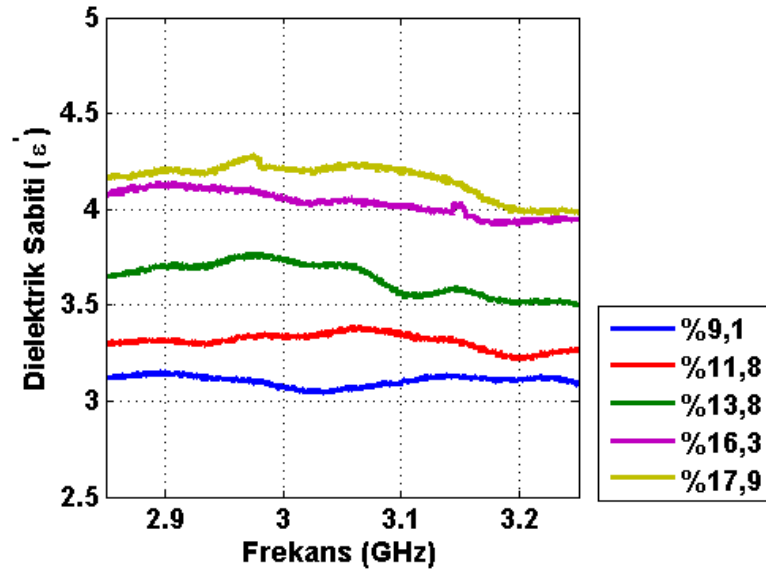
Şekil 4.9. NWR yöntemi kullanılarak pembe köpüğün ve ϵ ve μ parametrelerinin çıkartımı.

Nicholson-Ross-Weir (NRW) metodu ile kurulan deney düzeneği ile frekansa bağlı karmaşık epsilon ölçümleri yapılmıştır. Şekil 4.10' da bir örnek olarak nem değeri %16,3 olan nohut tozu için karmaşık elektrik geçirgenliği, manyetik geçirgenliği, S_{11} ve S_{21} parametreleri gösterilmiştir.

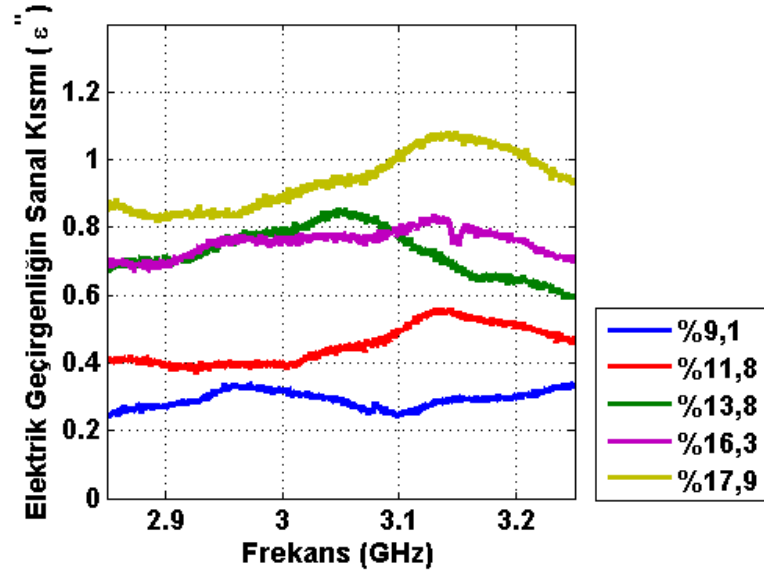


Şekil 4.10. %16,3 nemli nohut tozlarının karmaşık elektrik geçirgenlik, karmaşık manyetik geçirgenlik, S_{11} ve S_{21} parametreleri.

Karmaşık elektrik geçirgenlik değerlerinin gerçel kısımlarının grafikleri çizdirilmiş ve Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Karmaşık dielektrik geçirgenlik değerlerinin sanal kısmı yine frekansa bağlı olarak elde edilmiş ve $\tan\delta$ hesabında kullanılmıştır (Şekil 4.12). Nem artıkça dielektrik sabiti ve kayıp tanjant değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.11. Nem sensörü simülasyonlarında kullanılmak üzere %9,1, %11,8, %13,8, %16,3 ve %17,9 nemli nohut tozları için karmaşık elektrik geçirgenliğinin gerçel kısımları.



Şekil 4.12. Nem sensörü simülasyonlarında kullanılmak üzere %9,1, %11,8, %13,8, %16,3 ve %17,9 nemli nohut tozları için karmaşık elektrik geçirgenliğinin sanal kısımları.

Nem sensörü uygulamalarında ölçülen her yapı için ilgili rezonans frekansında nohut tozunun elektriksel özellikleri Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir. Her sensör ölçümü 5 kere tekrarlanmış, nohutun elektriksel özellikleri Şekil 4.3’den ortalama rezonans frekansları için çıkartılmıştır.

Çizelge 4.1. ÇLTR prototiplerinin farklı nem değerlerine sahip nohut tozu için deneysel olarak elde edilen rezonans frekansları ve bu rezonans frekanslarında nohut tozunun NRW metodu ile elde edilen ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerleri.

Nem Oranı	%9,1	%11,8	%13,8	%16,3	%17,9
f_0 (GHz)	3,240	3,163	3,128	3,101	3,039
ϵ'	3,110	3,273	3,566	4,011	4,225
ϵ''	0,333	0,523	0,729	0,787	0,912
$\tan\delta$	0,107	0,160	0,204	0,196	0,216

Çizelge 4.2. ÇAHR prototiplerinin farklı nem değerlerine sahip nohut tozu için deneysel olarak elde edilen rezonans frekansları ve bu rezonans frekanslarında nohut tozunun NRW metodu ile elde edilen ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerleri.

Nem Oranı	%9,1	%11,8	%13,8	%16,3	%17,9
f_0 (GHz)	2,946	2,908	2,892	2,878	2,865
ϵ'	3,116	3,318	3,695	4,109	4,170
ϵ''	0,320	0,400	0,709	0,683	0,856
$\tan\delta$	0,103	0,121	0,192	0,166	0,205

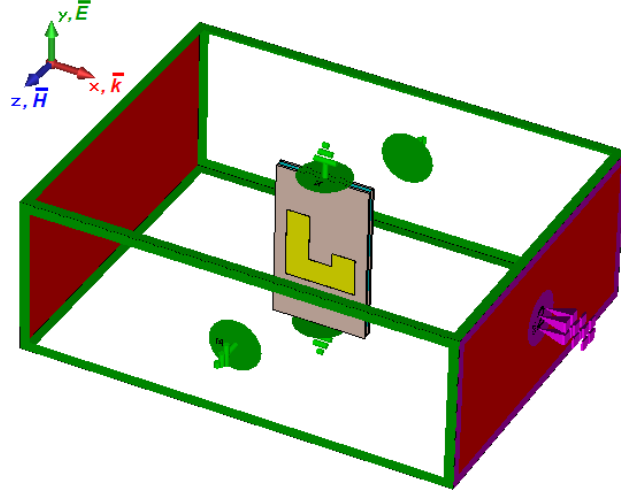
Nem sensörü uygulamalarında kullanılan nohut tozunun elektriksel özellikleri 3,1 GHz için Çizelge 4.3'de verilmiştir. Nem artıkça dielektrik sabiti değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum nem değeri artıkça ölçümlerde rezonans frekansının düşmesini açıklamaktadır. Nem artıkça kayıp tanjant değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Nem artıkça nohut tozunun kaybının artması, ölçümlerde desibel (dB) cinsinden rezonans frekansının genliğinin neden arttığını açıklamaktadır.

Çizelge 4.3. ÇAHR prototiplerinin farklı nem değerlerine sahip nohut tozu için 3,1 GHz frekansında nohut tozunun NRW metodu ile elde edilen ve ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerleri.

Nem Oranı	%9,1	%11,8	%13,8	%16,3	%17,9
f_0 (GHz)	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
ϵ'	3,101	3,344	3,556	4,018	4,182
ϵ''	0,251	0,502	0,785	0,779	1,005
$\tan \delta$	0,081	0,150	0,221	0,194	0,240

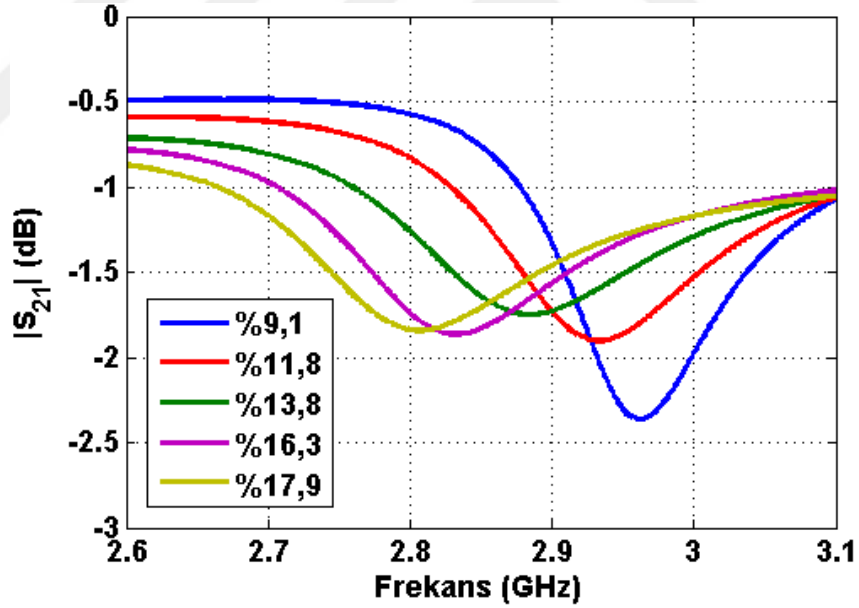
4.3. ÇAHR ve ÇLTR yapılarının Benzetim Ortamında Nem Algılama Uygulaması

Her sensör ölçümü 5 kere tekrarlanmış ve ortalama rezonans frekansları için nohutun elektriksel özellikleri ÇLTR için Çizelge 4.1'de, ÇAHR için Çizelge 4.2'de verilmiştir. Her bir nem değeri için elde edilen bu veriler benzetim ortamına aktarılarak bu 2 sensör yapısının ayrı ayrı benzetimleri yapılmıştır. Bu tez kapsamında benzetimler CST Microwave Studio 2015 yazılımı yardımıyla frekans bölgesi çözümleyicisinde yapılmıştır. Tasarımlar dalga kılavuzunda manyetik olarak uyarılmıştır. Benzetim düzeneği Şekil 4.13'da verilmiştir. $|S_{21}|$ benzetim sonuçları Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'de çizdirilmiştir.



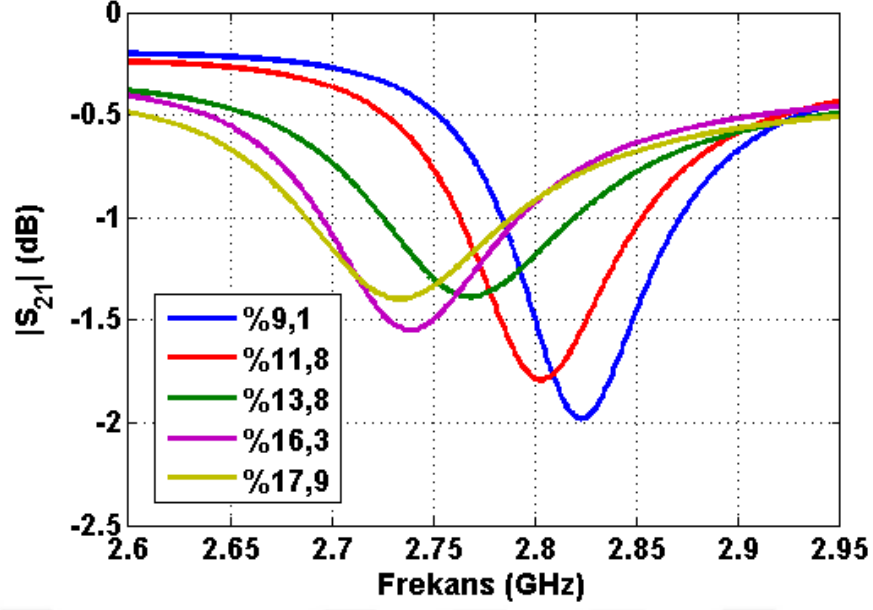
Şekil 4.13. ÇLTR yapısının manyetik uyarım altında benzetim düzeneği.

ÇLTR yapısının rezonans frekansı, nem değeri %9,1'den %17,9'ye çıkarken 2,962 GHz'den 2,807 GHz'e düşmüştür (Şekil 4.14). Benzetim ve ölçüm sonuçları uyumludur. Nem değişimine göre $|S_{21}|$ değişimi uyumludur.



Şekil 4.14. ÇLTR prototipinin farklı nem yüzdelerine sahip hassasiyet katmanı nohut tozları için benzetim sonuçları.

ÇAHR yapısının rezonans frekansı, nem değeri %9,1'den %17,9'ye çıkarken 2,823 GHz'den 2,733 GHz'e düşmüştür (Şekil 4.15). Benzetim ve ölçüm sonuçları uyumludur. Nem değişimine göre $|S_{21}|$ değişimi uyumludur.

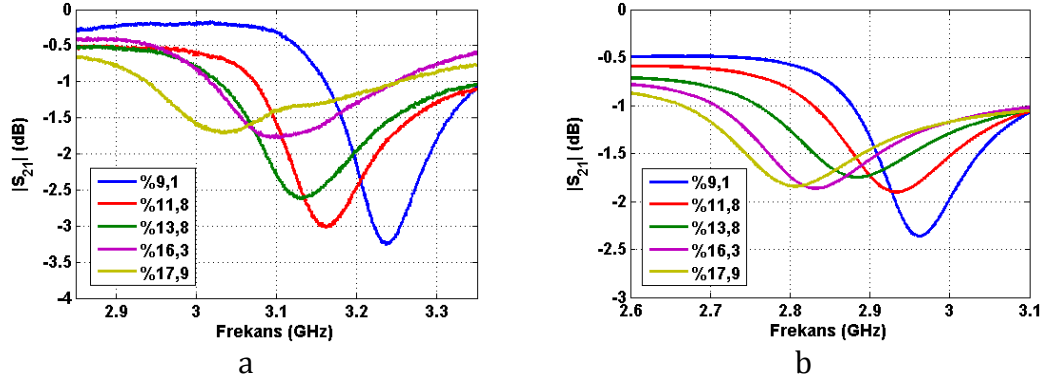


Şekil 4.15. ÇAHR prototipinin farklı nem yüzdelere sahip hassasiyet katmanı nohut tozları için benzetim sonuçları.

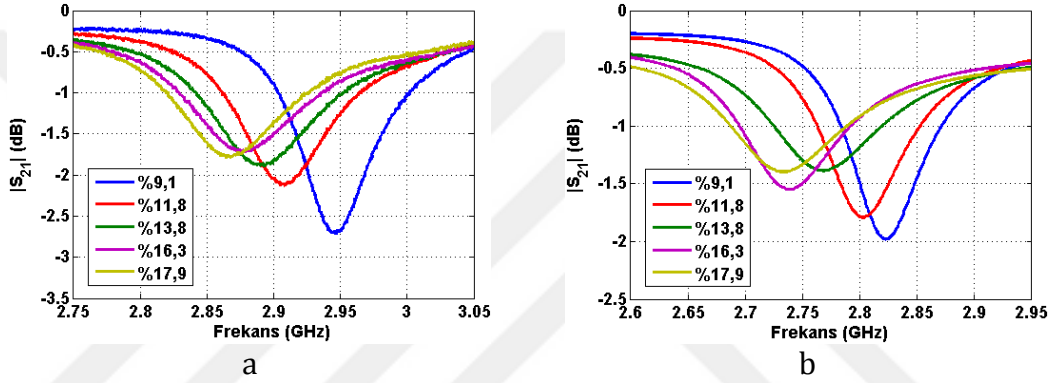
4.4. ÇAHR ve ÇLTR Sensör Prototiplerinin Performans Analizleri

Tasarlanan sensör yapıları hassasiyet katman kalınlığı değişimine ve hassasiyet katmanının dielektrik sabiti değişimine tepki vermektedir. Bu yapılar dielektrik sabiti değişimine dayanan sensör uygulamalarında kullanılabilir. Bu yapılar aynı hububatın aynı nem değişimlerine benzer cevaplar verecektir. Ancak hububatın cinsi değişirse vereceği tepki farklı olabilecektir.

Bu çalışmada, ÇLTR ve ÇAHR yapılarının ölçüm ve benzetim sonuçları oldukça uyumludur. Her iki yapı için de nem değişimine göre $|S_{21}|$ değişimi uyumludur. Ancak ölçüm ve benzetim sonuçları arasında farklılıklar vardır. Benzetim ortamında tasarlanan rezonatörler ile üretilen rezonatörler arasında küçük miktarlarda boyut farklılıkları olabilmektedir. Bu küçük üretim hatalarından dolayı benzetimlerin ve ölçümlerin rezonans frekanslarında farklılıklar meydana gelebilmektedir. ÇLTR yapısının rezonans frekansı nem değeri %9,1'den %17,9'ye çıkarken; ölçümlerde 3,240 GHz'den 3,039 GHz'e (Şekil 4.16.a), benzetimlerde 2,962 GHz' den 2,807 GHz'e düşmüştür (Şekil 4.16.b). ÇAHR yapısının rezonans frekansı nem değeri %9,1'den %17,9'ye çıkarken; ölçümlerde 2,946 GHz'den 2,865 GHz'e (Şekil 4.17.a), benzetimlerde 2,823 GHz' den 2,733 GHz'e düşmüştür (Şekil 4.17.b).

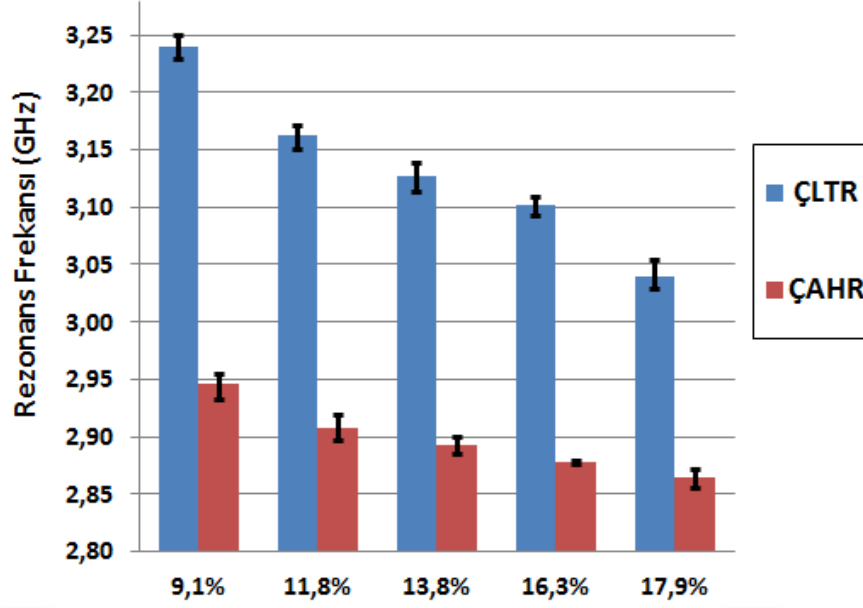


Şekil 4.16. a) ÇLTR yapısının ölçüm sonuçları. b) ÇLTR yapısının benzetim sonuçları.



Şekil 4.17. a) ÇAHR yapısının ölçüm sonuçları. b) ÇAHR yapısının benzetim sonuçları.

Tez kapsamında üretilen ÇLTR ve ÇAHR yapıları için hata grafikleri Şekil 4.18'de verilmiştir. Bu grafiklerde barlar yapılan 5 ölçümün ortalamasını vermektedir ve barlar üzerindeki çubuklar maksimum ve minimum ölçüm değerlerini vermektedir. Ölçümlerde değişim kabul edilebilir durumdadır. Bu nedenle yapılar için tekrarlanabilirlik oldukça yüksek sayılabilir.



Şekil 4.18. Hassasiyet katmanı olarak farklı yüzdede nem değerine sahip nohut tozunun kullanıldığı ÇLTR ve ÇAHR yapıları için tekrarlanan 5 ölçümden elde edilen hata grafikleri.

ÇLTR yapısının ortalama rezonans frekansı, deneysel ölçümlerde nem değeri %9,1'den %17,9'ye çıkarken 3,240 GHz'den 3,039 GHz'e düşmüştür. Denklem 4.10'a göre rezonans frekansında %6,20'lik bir kayma meydana gelmiştir. ÇLTR yapısı için ölçümlerde %1 nem değişimine karşılık yaklaşık olarak 22,84 MHz frekans değişimi gözlenmektedir. ÇAHR yapısının ortalama rezonans frekansı, deneysel ölçümlerde nem değeri %9,1'den %17,9'ye çıkarken 2,946 GHz'den 2,865 GHz'e düşmüştür (Şekil 4.19). Denklem 4.10'a göre rezonans frekansında %2,75'lik bir kayma meydana gelmiştir. ÇAHR yapısı için ölçümlerde %1 nem değişimine karşılık yaklaşık olarak 9,20 MHz frekans değişimi gözlenmektedir.

$$neme\ bağı\ %\ kayma = \frac{f_i - f_s}{f_s} \times 100 \quad (4.10)$$

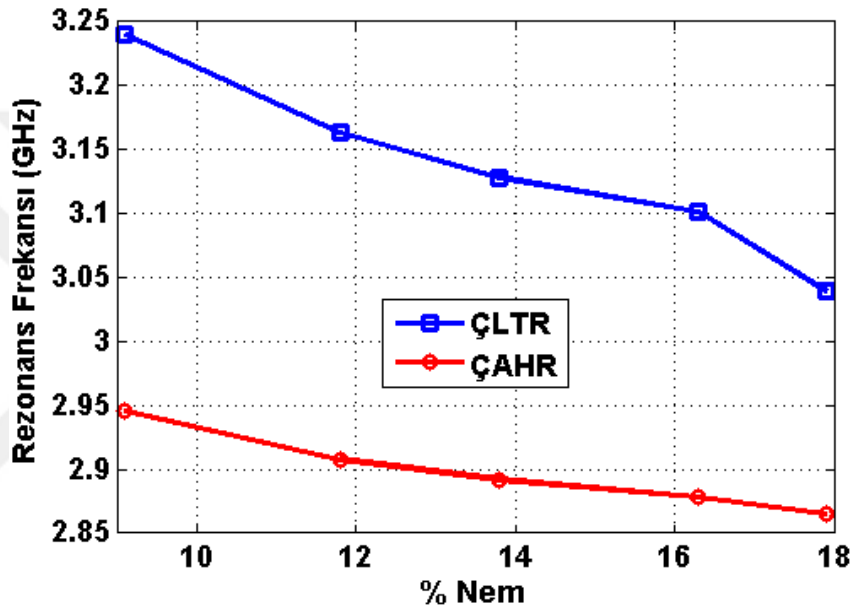
Burada, f_i %9,1 nem değeri için rezonans frekansı ve f_s ise % 17,1 nem değeri için rezonans frekansdır.

ÇLTR ve ÇAHR yapılarının çalışma frekansları farklıdır. Bu nedenle rezonans frekanslarındaki yüzde değişime bakılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçlarına göre ÇLTR yapısı nem sensörü uygulamalarında daha hassastır. Başka bir ifadeyle

denklem 4.11'e göre ölçümlerde ÇLTR yapısı ÇAHR yapısına göre %125,45 daha hassastır.

$$\% \text{ hassasiyet} = \frac{h_L - h_A}{h_A} \times 100 \quad (4.11)$$

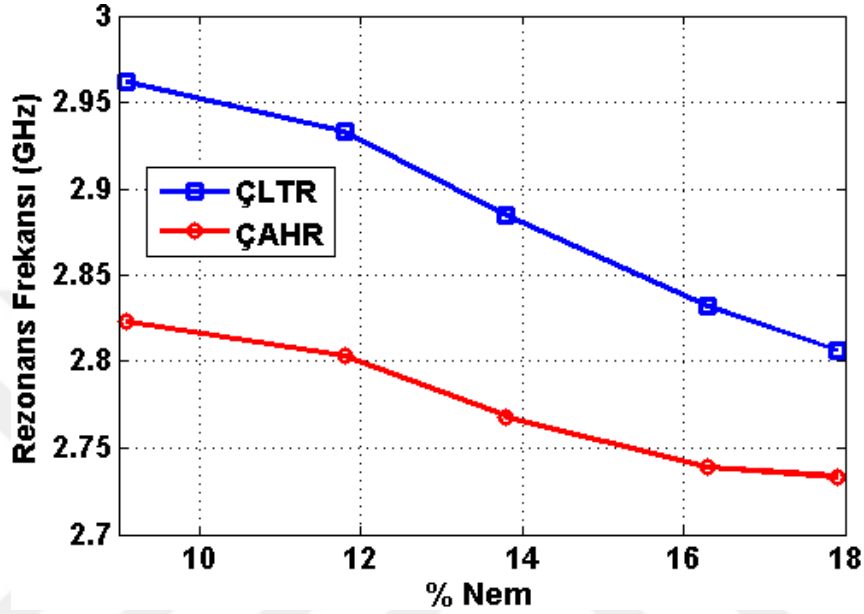
Burada, h_L ÇLTR sensörü için %9,1'den %17,1'e nem artışına bağlı yüzde frekans kayması ve h_A ÇAHR sensörü için %9,1'den %17,1'e nem artışına bağlı yüzde frekans kaymasıdır.



Şekil 4.19. Hassasiyet katmanı olarak farklı yüzdede nem değerine sahip nohut tozunun kullanıldığı ölçümlerde ÇLTR ve ÇAHR yapıları için rezonans frekansının neme bağlı değişim grafikleri.

ÇLTR yapısının benzetim ortamında nem değeri %9,1'den %17,9'ye çıkarken rezonans frekansı 2,962 GHz'den 2,807 GHz'e düşmüştür. Denklem 4.10'a göre rezonans frekansında %5,23'luk bir kayma meydana gelmiştir. ÇLTR yapısı için benzetimlerde %1 nem değişimine karşılık yaklaşık olarak 17,61 MHz frekans değişimi gözlenmektedir. ÇAHR yapısının benzetim ortamında nem değeri %9,1'den %17,9'ye çıkarken rezonans frekansı 2,823 GHz'den 2,733 GHz'e düşmüştür (Şekil 4.20). Denklem 4.10'a göre rezonans frekansında %3,19'luk bir kayma meydana gelmiştir. ÇAHR yapısı için benzetimlerde %1 nem değişimine karşılık yaklaşık olarak 10,23 MHz frekans değişimi gözlenmektedir.

ÇLTR ve ÇAHR yapılarının çalışma frekansları farklıdır. Bu nedenle rezonans frekanslarındaki yüzde değişime bakılmıştır. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre ÇLTR yapısı nem sensörü uygulamalarında daha hassastır. Başka bir ifadeyle denklem 4.11'e göre benzetimlerde ÇLTR yapısı ÇAHR yapısına göre %63,95 daha hassastır.



Şekil 4.20. Hassasiyet katmanı olarak farklı yüzdede nem değerine sahip nohut tozunun kullanıldığı benzetimlerde ÇLTR ve ÇAHR yapıları için rezonans frekansının neme bağlı değişim grafikleri.

ÇLTR yapısı ÇAHR yapısına göre ölçümlerde %125,45, benzetimlerde %63,95 daha hassastır. Ölçüm ve benzetimlerdeki bu farklılıkların nedeni üretim yapılarından meydana gelmektedir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu tez kapsamında S bant frekans aralığında elektromanyetik rezonatör tabanlı hububat nem sensörü tasarımı, üretimi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Sonuçların uluslararası dergi, uluslararası konferansta ve ulusal konferanslarda değerlendirilmesi düşünülmektedir. İlk olarak Aralık 2016' da Bursa' da düzenlenecek olan ulusal Elektrik Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansına tez kapsamında bir adet bildiri gönderilmiştir. Tez boyunca izlenen adımlar sırayla aşağıda özetlenmiştir.

İlk olarak tez hakkında kısa bir giriş yapılarak metalmalzeme hakkında özet şeklinde bilgi verilmiştir. Metalmalzeme tasarımında kullanılan AHR yapıları ve kullanım alanları yüzeysel şekilde incelenmiştir. Literatürde mevcut bazı sensör çalışmaları analiz edilmiştir.

Literatürde mevcut olan ÇAHR sensör prototipine kıyasla daha hassas yapı araştırılmıştır. Araştırma kapsamında farklı şekillerde yapılar incelenmiştir. İncelemeler sonucu LTR yapısına karar kılınmıştır. Benzetim ortamında tasarlanan LTR yapısı üretilmiştir.

Nemin rezonans frekansına etkisini incelemek amacıyla 5 adet farklı nem değerlerine sahip nohut tozları hazırlanmıştır. Hazırlanan nohut tozları ÇAHR ve ÇLTR sensör yapılarına hassasiyet katmanı olarak eklenmiş ve ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçüm sonuçlarını desteklemek için nohut tozlarının dielektrik sabitleri ölçülen S parametre değerlerinden NRW yöntemi ile hesaplanmıştır. Dielektrik sabiti ölçümleri sonucunda elde edilen veriler benzetim ortamına aktarılmıştır. Benzetim ve ölçümler uyumludur. Ancak üretim hatalarından dolayı benzetimlerin ve ölçümlerin rezonans frekanslarında farklılıklar meydana gelebilmektedir. Deneysel çalışmada her bir ölçüm 5 defa tekrar edilmiştir. Bu sayede sensör yapılarının seçicilik ve tekrarlanabilirlik gibi performans analizleri yapılmıştır.

Tez çalışmasını daha detaylı incelemek gerekirse elde edilen sonuçlar aşağıda tartışılmıştır.

Bu çalışmada ilk olarak ÇAHR sensör tipinden daha hassas bir yapı araştırılmıştır. Bunun için ÇAHR de dâhil olmak üzere her bir yeni yapının hassasiyet katmanının dielektrik sabiti 1'den 5'e kadar değiştirmiştir. Tüm yapılar için dielektrik sabiti 1 için f_1 rezonans frekansı ve dielektrik sabiti 5 için f_5 rezonans frekansına yüzde kayma hesaplanmıştır. Bu kayma sonuçları karşılaştırılmış ve en yüksek kaymaya sahip ÇLTR sensör yapısı seçilmiştir.

Seçilen bu ÇAHR ve ÇLTR sensör yapılarını test etmek amacıyla hazırlanan 5 farklı nem değeri ile ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçümler 5 defa tekrarlanmıştır. Her iki sensör prototipinde de nem değeri artıkça rezonans frekansı düşmektedir. Ölçümler karşılaştırıldığında ÇLTR sensör yapısının ÇAHR sensör yapısına göre daha hassas olduğu gözlemlenmiştir. Hassasiyet karşılaştırması yüzde frekans kaymasına göre yapılmıştır.

Ölçümleri sonuçlarını desteklemek ve açıklamak amacıyla deneyde kullanılan farklı nemlerdeki nohutların dielektrik sabitleri ölçülmüştür. Nem değeri artıkça nohut tozunun dielektrik sabiti ve kaybı artmaktadır. Bu da nem artıkça rezonans frekansının neden düştüğünü kanıtlamaktadır. Nohut tozları için yapılan dielektrik sabiti ölçümlerinde elde edilen veriler benzetim ortamına aktarılmıştır. Benzetimler ile deneysel ölçümler uyum göstermektedir. Performans analizi yapıldığında her iki sensör yapısı da seçici ve tekrarlanabilir olduğu incelenmiştir.

Literatür incelendiğinde, bazı çalışmalarda Terahertz bölgesinde de sensör çalışmalarının sunulduğu gözlemlenmiştir. Mikrodalga bölgesi S bant frekans aralığında yapılan bu çalışmanın boyutları ölçeklenirse Terahertz frekanslarında da uygulanabilir. Terahertz frekans bölgesinde çalışmalar planlanmış ve devam etmektedir.

KAYNAKLAR

- Alici, K. B., Ozbay, E., 2007. Electrically small split ring resonator antennas. *Journal of Applied Physics*, 101(8), 083104.
- Baena, J. D., Marqués, R., Medina, F., Martel, J., 2004. Artificial magnetic metamaterial design by using spiral resonators. *Physical review B*, 69(1), 014402.
- Baena J.D., Bonache J., Martin F., Marques R., Falcone F., Lopetegi T., Laso M.A.G., Garcia-Garcia J., Gil I., Portillo M.F., Sorolla M., 2005. Equivalent-Circuit Models for Split-Ring Resonators and Complementary Split-Ring Resonators Coupled to Planar Transmission Lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 53(4), 1451-1461.
- Bilotti, F., Toscano, A., Vegni, L., Aydin, K., Alici, K. B., Ozbay, E., 2007. Equivalent-circuit models for the design of metamaterials based on artificial magnetic inclusions. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 55(12), 2865-2873.
- Bilotti, F., Toscano, A., Vegni, L., 2007. Design of spiral and multiple split-ring resonators for the realization of miniaturized metamaterial samples. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 55(8), 2258-2267.
- Bulu, I., Caglayan, H., Ozbay, E., 2005. Experimental demonstration of labyrinth-based left-handed metamaterials. *Optics express*, 13(25), 10238-10247.
- Bulu, I., Caglayan, H., Ozbay, E., 2006. Designing materials with desired electromagnetic properties. *Microwave and optical technology letters*, 48(12), 2611-2614.
- Cheng, Y., Mao, X. S., Wu, C., Wu, L., Gong, R., 2016. Infrared non-planar plasmonic perfect absorber for enhanced sensitive refractive index sensing. *Optical Materials*, 53, 195-200.
- Çınar, A., Ekmekçi, E., 2016. Ayrık Halkalı Rezonatör Tabanlı Dönme Sensörü Tasarımı ve Nümerik Olarak İncelenmesi. 8. URSI-Türkiye Bilimsel Kongresi.
- Çınar, A., Köse, U., Ertan, Ö., Karacan, N., Başer, C., Ekmekçi, E., 2016. Ayrık Halkalı Rezonatör Tabanlı Bağlaşım Değeri Ayarlanabilir Mikroşerit Yönlü Bağlaç Tasarımı ve Benzetimleri. 8. URSI-Türkiye Bilimsel Kongresi.
- Dişken, G., Ekmekçi, E., 2014. Ayrık Halka Rezonatör Dizisi ile İki Modlu Anten Tasarımı. *IEEE 22. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı*, 91-94.

- Dong, Y., Itoh, T., 2012. Metamaterial-based antennas. *Proceedings of the IEEE*, 100(7), 2271-2285.
- Ebrahimi, A., Withayachumnankul, W., Al-Sarawi, S. F., Abbott, D., 2014. Metamaterial-inspired rotation sensor with wide dynamic range. *IEEE Sensors Journal*, 14(8), 2609-2614.
- Edwards, B., Alù, A., Silveirinha, M. G., Engheta, N., 2009. Experimental verification of plasmonic cloaking at microwave frequencies with metamaterials. *Physical Review Letters*, 103(15), 153901.
- Ekmekci, E., Turhan-Sayan, G., 2009. Comparative investigation of resonance characteristics and electrical size of the double-sided SRR, BC-SRR and conventional SRR type metamaterials for varying substrate parameters. *Progress In Electromagnetics Research B*, 12, 35-62.
- Ekmekci, E., Turhan-Sayan, G., 2011. Metamaterial sensor applications based on broadside-coupled SRR and V-Shaped resonator structures. In *2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*.
- Ekmekci, E., Strikwerda, A. C., Fan, K., Keiser, G., Zhang, X., Turhan-Sayan, G., Averitt, R. D., 2011. Frequency tunable terahertz metamaterials using broadside coupled split-ring resonators. *Physical Review B*, 83(19), 193103.
- Ekmekci, E., Turhan-Sayan, G., 2013. Multi-functional metamaterial sensor based on a broad-side coupled SRR topology with a multi-layer substrate. *Applied Physics A*, 110(1), 189-197.
- Ekmekci, E., Demir, E., 2016. On/Off Switching of Absorption Spectra by Layer Shifting for Double-Layer Metamaterial-Based Absorber. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15, 532-535.
- Engelbrecht, S., Kraushofer, F., Shuvaev, A. M., Jin, B., Kuznetsov, S. A., Pimenov, A., 2014. Asymmetric split-ring resonators: a way toward high-quality metamaterials. *Optical Engineering*, 53(3), 031207-031207.
- Falcone, F., Lopetegi, T., Baena, J. D., Marqués, R., Martín, F., Sorolla, M., 2004. Effective negative-epsilon; stopband microstrip lines based on complementary split ring resonators. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 14(6), 280-282.
- Freire, M. J., Marques, R., 2005. Planar magnetoinductive lens for three-dimensional subwavelength imaging. *Applied Physics Letters*, 86(18), 182505.

- Garcia-Garcia, J., Martín, F., Falcone, F., Bonache, J., Baena, J. D., Gil, I., ... Sorolla, M., 2005. Microwave filters with improved stopband based on sub-wavelength resonators. *IEEE Transactions on Microwave theory and techniques*, 53(6), 1997-2006.
- Horestani, A. K., Abbott, D., Fumeaux, C., 2013. Rotation sensor based on horn-shaped split ring resonator. *IEEE Sensors Journal*, 13(8), 3014-3015.
- Ma, H., Song, K., Zhou, L., Zhao, X., 2015. A Naked Eye Refractive Index Sensor with a Visible Multiple Peak Metamaterial Absorber. *Sensors*, 15(4), 7454-7461.
- Mandal, P., 2015. H-shape plasmonic metasurface as refractive index sensor. *Plasmonics*, 10(2), 439-445.
- Martin, F., Falcone, F., Bonache, J., Marqués, R., Sorolla, M., 2003. Miniaturized coplanar waveguide stop band filters based on multiple tuned split ring resonators. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 13(12), 511-513.
- Marqués, R., Mesa, F., Martel, J., Medina, F., 2003. Comparative analysis of edge- and broadside-coupled split ring resonators for metamaterial design-theory and experiments. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 51(10), 2572-2581.
- Menachem, Z., Haridim, M., Tapuchi, S., Chattah, Y., 2012. Directional coupler based on metamaterial square CSRR shape. *Applied Physics Research*, 4(2), 258.
- Naqui, J., Martín, F., 2014. Angular displacement and velocity sensors based on electric-LC (ELC) loaded microstrip lines. *IEEE Sensors Journal*, 14(4), 939-940.
- Karaaslan, M., Bakir, M., 2014. Chiral metamaterial based multifunctional sensor applications. *Progress In Electromagnetics Research*, 149, 55-67.
- Katsarakis, N., Koschny, T., Kafesaki, M., Economou, E. N., Soukoulis, C. M., 2004. Electric coupling to the magnetic resonance of split ring resonators. *Applied Physics Letters*, 84(15), 2943-2945.
- Kenanakis, G., Shen, N. H., Mavidis, C., Katsarakis, N., Kafesaki, M., Soukoulis, C. M., Economou, E. N., 2012. Microwave and THz sensing using slab-pair-based metamaterials. *Physica B: Condensed Matter*, 407(20), 4070-4074.
- Kim, J., Soref, R., Buchwald, W. R., 2010. Multi-peak electromagnetically induced transparency (EIT)-like transmission from bull's-eye-shaped metamaterial. *Optics express*, 18(17), 17997-18002.

- Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R., Padilla, W. J., 2008. Perfect metamaterial absorber. *Physical review letters*, 100(20), 207402.
- Liu, K. Y., Li, C., Li, F., 2007. A new type of microstrip coupler with Complementary Split-Ring Resonator (CSRR). *PIERS Online*, 3(5), 603-606.
- Padilla, W. J., Aronsson, M. T., Highstrete, C., Lee, M., Taylor, A. J., Averitt, R. D., 2007. Electrically resonant terahertz metamaterials: Theoretical and experimental investigations. *Physical Review B*, 75(4), 041102.
- Papasimakis, N., Fedotov, V. A., Zheludev, N. I., Prosvirnin, S. L., 2008. Metamaterial analog of electromagnetically induced transparency. *Physical Review Letters*, 101(25), 253903.
- Penciu, R. S., Aydin, K., Kafesaki, M., Koschny, T., Ozbay, E., Economou, E. N., Soukoulis, C. M., 2008. Multi-gap individual and coupled split-ring resonator structures. *Optics express*, 16(22), 18131-18144.
- Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., Stewart, W. J., 1999. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 47(11), 2075-2084.
- Sabah, C., Turkmen-Kucuksari, O., Turhan-Sayan, G., 2014. Metamaterial absorber-based sensor embedded into X-band waveguide. *Electronics Letters*, 50(15), 1074-1076.
- Sabah, C., Dincer, F., Karaaslan, M., Unal, E., Akgol, O., Demirel, E., 2014. Perfect metamaterial absorber with polarization and incident angle independencies based on ring and cross-wire resonators for shielding and a sensor application. *Optics Communications*, 322, 137-142.
- Schurig, D., Mock, J. J., Smith, D. R., 2006. Electric-field-coupled resonators for negative permittivity metamaterials. *Applied Physics Letters*, 88(4), 041109.
- Schurig, D., Mock, J. J., Justice, B. J., Cummer, S. A., Pendry, J. B., Starr, A. F., Smith, D. R. 2006. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science*, 314(5801), 977-980.
- Shelby, R. A., Smith, D. R., Schultz, S., 2001. Experimental verification of a negative index of refraction. *Science*, 292(5514), 77-79.
- Shen, X., Cui, T. J., Zhao, J., Ma, H. F., Jiang, W. X., Li, H., 2011. Polarization-independent wide-angle triple-band metamaterial absorber. *Optics Express*, 19(10), 9401-9407.

- Smith, D. R., Padilla, W. J., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S. C. Schultz, S., 2000. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Physical review letters*, 84(18), 4184.
- Smith, D. R., Schultz, S., Markoš, P. Soukoulis, C. M., 2002. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients. *Physical Review B*, 65(19), 195104.
- Tassin, P., Zhang, L., Koschny, T., Economou, E. N., Soukoulis, C. M., 2009. Low-loss metamaterials based on classical electromagnetically induced transparency. *Physical Review Letters*, 102(5), 053901.
- Tao, H., Bingham, C. M., Pilon, D., Fan, K., Strikwerda, A. C., Shrekenhamer, D., Padilla W. J., Zhang X., Averitt, R. D., 2010. A dual band terahertz metamaterial absorber. *Journal of physics D: Applied physics*, 43(22), 225102.
- Unal, E., Dincer, F., Tetik, E., Karaaslan, M., Bakir, M., Sabah, C., 2015. Tunable perfect metamaterial absorber design using the golden ratio and energy harvesting and sensor applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26(12), 9735-9740.
- Veselago V.G., 1968. The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of Permittivity and Permeability. *Soviet Physics Uspekhi*, 10(4), 509-514.
- Wang, B. X., Zhai, X., Wang, G. Z., Huang, W. Q., Wang, L. L., 2015. A novel dual-band terahertz metamaterial absorber for a sensor application. *Journal of Applied Physics*, 117(1), 014504.
- Wang, B. X., Wang, G. Z., Wang, L. L., Zhai, X., 2016. Design of a five-band terahertz absorber based on three nested split-ring resonators. *IEEE Photonics Technology Letters*, 28(3), 307-310.
- Wiwatcharagoses, N., Park, K. Y., Chahal, P., 2012. Metamaterial-inspired miniaturized microwave sensing probes. In 2012 IEEE 62nd Electronic Components and Technology Conference, 2106-2111.
- Withayachumnankul, W., Jaruwongrungrsee, K., Tuantranont, A., Fumeaux, C., Abbott, D., 2013. Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization. *Sensors and Actuators A: Physical*, 189, 233-237.
- Wiwatcharagoses, N., Park, K. Y., Hejase, J. A., Williamson, L., Chahal, P., 2011. Microwave artificially structured periodic media microfluidic sensor. In 2011 IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference, 1889-1893.

- Yang, Z., Zhou, Q., Long, W., Li, C., Shi, Y., Wu, A., ... Zhang, C., 2016. Study of asymmetric U-shaped resonator at terahertz frequencies. *Optics Communications*, 368, 119-122.
- Yaw, K. C., 2012. Measurement of dielectric material properties. *Application Note*, Rohde & Schwarz, 1-35.
- Yoo, M., Kim, H. K., Lim, S., 2016. Electromagnetic-based ethanol chemical sensor using metamaterial absorber. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 222, 173-180.
- Zhao, J. X., Xiao, B. X., Huang, X. J., Yang, H. L., 2015. Multiple-band reflective polarization converter based on complementary L-shaped metamaterial. *Microwave and Optical Technology Letters*, 57(4), 978-983.
- Zemouli, S., Chaabi, A., Talbi, H. S. 2015. Design of a Compact and High Sensitivity Temperature Sensor Using Metamaterial. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Alparslan ÇINAR
Doğum Yeri ve Yılı : Finike, 1992
Medeni Hali : Bekâr
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : alparslancinar1992@hotmail.com



Eğitim Durumu

Lise : Kumluca Anadolu Lisesi, 2010
Lisans : SDÜ, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, 2014

Yayınları

- Ekmekçi, E., Çınar, A., Ayan, A., Korucu, H., D., Demir, E., 2014. Enine Kuplajlı ve AHR Tabanlı Anten Yapıları İçin Elektriksel Boyut ve Kazanç Analizi. 7. URSI-Türkiye Bilimsel Kongresi.
- Çınar, A., Ekmekçi, E., 2016. Ayrık Halkalı Rezonatör Tabanlı Dönme Sensörü Tasarımı ve Nümerik Olarak İncelenmesi. 8. URSI-Türkiye Bilimsel Kongresi.
- Çınar, A., Köse, U., Ertan, Ö., Karacan, N., Başer, C., Ekmekçi, E., 2016. Ayrık Halkalı Rezonatör Tabanlı Bağlaşım Değeri Ayarlanabilir Mikroşerit Yönlü Bağlaç Tasarımı ve Benzetimleri. 8. URSI-Türkiye Bilimsel Kongresi.
- Çınar A., Köse, U., Ekmekçi E., 2016. Toz Halindeki Nohudun Karmaşık Elektriksel Geçirgenlik Değerlerinin Mikrodalga Frekans Bölgesinde Tayin Edilmesi İçin Deneysel Bir Yöntem. Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı (ELECO). (GÖNDERİLDİ)
- Ertan Ö., Köse U., Çınar A., Ekmekçi E., 2016. Mikrodalga Bölgesinde Farklı Rezonatör Yapılarının Sensör Uygulamaları İçin Hassasiyet Analizi. Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı (ELECO). (GÖNDERİLDİ)