

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**REZONATÖR TABANLI ÇOKLU-BANT SOĞURUCU TASARIMI VE
SENSÖR UYGULAMALARI**

Alparslan ÇINAR

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

TEMMUZ 2023

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**REZONATÖR TABANLI ÇOKLU-BANT SOĞURUCU TASARIMI VE
SENSÖR UYGULAMALARI**

Alparslan ÇINAR

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

TEMMUZ 2023

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

REZONATÖR TABANLI ÇOKLU-BANT SOĞURUCU TASARIMI VE
SENSÖR UYGULAMALARI

Alparslan ÇINAR
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Bu tez 20/07/2023 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Sıddık Cumhuri BAŞARAN (Danışman)

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Prof. Dr. Mesud KAHRİMAN

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf ÖZTÜRK

ÖZET

REZONATÖR TABANLI ÇOKLU-BANT SOĞURUCU TASARIMI VE SENSÖR UYGULAMALARI

Alparslan ÇINAR

Doktora Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sıddık Cumhuri BAŞARAN

Temmuz 2023; 102 sayfa

Bu tezde, rezonatör tabanlı çoklu bant soğurucu tasarımı ve sensor uygulamaları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Önerilen tasarımlar, ortada dielektrik taban malzemesi olmak üzere, üstte rezonatör ve altta toprak düzlemden oluşan bir yapıya sahiptir. Tasarımlarda, yarık halka rezonatör (YHR), elektrik LC rezonatör (ELC) gibi metamateryal yapı taşları ve asimetrik X-şekilli rezonatörler frekans belirleyici eleman olarak kullanılmıştır.

Dairesel şekilli ve eş merkezli üç adet YHR yapısı kullanılarak, görece minyatür boyutlu, WiMAX ve WLAN bantlarını kapsayan üç bantlı soğurucu benzetim ortamında tasarlanmıştır. Bir başka metamateryal yapısı olan ELC rezonatör, üç boyutlu yazıcıda imal edilmiş taban malzemesinin üzerine yerleştirilerek soğurucu sensor tasarlanmış, üretilmiş, ölçülmüş ve analitik modeli çıkartılmıştır. Üç boyutlu yazıcıyla imal edilen taban malzemesine açılan oyuk sayesinde, hem katı hem de sıvı analizleri yapılabilmektedir. Yekpare ve basit bir yapı olması sebebiyle üretim ve uygulanabilirliği oldukça kolaydır.

Kol uzunluklarının simetrik veya asimetrik olmasına bağlı olarak tek veya çift bantlı davranış sergileyen X-şekilli rezonatör kullanılarak, kompakt bir soğurucu tasarlanmıştır. Tek bir rezonatör ve tek bir dielektrik taban malzemesinden meydana gelen bu basit yapının sensor performansı, benzetim ve ölçüm ortamında incelenmiştir. Bu doğrultuda, çalışma frekansları farklı iki tane YHR tabanlı soğurucu sensörler ile kıyaslanan asimetrik X-şekilli soğurucunun daha hassas olduğu görülmüştür. Daha sonra, kol uzunlukları birbirinden farklı iki tane asimetrik X-şekilli rezonatör, taban malzemesi olarak kullanılan kot kumaş üzerine yerleştirilerek dört bantlı tekstil soğurucu elde edilmiştir. Nümerik ve deneysel sonuçları mükemmel bir uyum içinde olan bu dört bantlı tasarım, giyilebilir uygulamalar için iyi bir adaydır. Son olarak, benzetim ortamında, X-şekilli rezonatöre PIN ve Varaktor diyotlar entegre edilerek frekansı kontrol edilebilir soğurucu tasarımları önerilmiştir. Önerilen tasarımlar sayesinde soğurma frekansları geleneksel soğurucular gibi üretim sonrası sabit kalmamakta ve soğurucuların uygulama alanları genişlemektedir.

ANAHTAR KELİMELER: Çift Bantlı Soğurucu, Elektrik LC Rezonatör, Frekansı Kontrol Edilebilir Soğurucu, Giyilebilir Soğurucu, Metamateryal Soğurucu, Sensor, Tekstil Soğurucu, X-Şekilli Rezonatör, Yarık Halka Rezonatör

JÜRİ: Prof. Dr. Sıddık Cumhur BAŞARAN (Danışman)

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Prof. Dr. Mesud KAHRİMAN

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf ÖZTÜRK



ABSTRACT

DESIGN OF RESONATOR BASED MULTI-BAND ABSORBER AND SENSOR APPLICATIONS

Alparslan ÇINAR

PhD Thesis in Electrical & Electronic Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Sıddık Cumhuri BAŞARAN

July 2023; 102 pages

In this thesis, resonator-based multi-band absorber design and sensor applications have been investigated. The proposed designs consist of a resonator at the top, a dielectric substrate in the middle and a ground plane at the bottom. In the designs, asymmetric X-shaped resonator and metamaterial elements such as split ring resonator (SRR), electric LC resonator (ELC) are used as frequency determining elements.

A relatively miniaturized tri-band absorber covering WiMAX and WLAN bands has been designed in the simulation environment using three circular and concentric SRR. The ELC resonator, which is a metamaterial element, is placed on a 3D printed dielectric substrate to design absorber sensor. There is a cavity in the 3D-printed substrate to integrate the samples into the sensor. Thanks to the cavity, both solid and liquid analyses can be performed. It is a monolithic and simple structure, so it is effortless to manufacture and implement. To validate this design, the absorber sensor is fabricated, measured, and analytically modeled.

A compact absorber has been designed using an X-shaped resonator that exhibits single or dual-band behavior depending on whether the arm lengths are symmetric or asymmetric. The sensor performance of this structure consisting of a resonator and a substrate has been investigated in simulation and measurement. In this context, the asymmetric X-shaped absorber is found to be more sensitive when compared with two SRR-based absorber sensors with different absorption frequencies. Then, two asymmetric X-shaped resonators with varying lengths of arm are placed on denim fabric used as a substrate to obtain a four-band absorber. This quad-band design, whose numerical and experimental results are in perfect agreement, is a good candidate for wearable applications. Lastly, in a simulation environment, frequency tunable absorbers are designed by integrating PIN and varactor diodes into the asymmetric X-shaped resonator. Thanks to the proposed designs, the absorption frequencies do not remain fixed after fabrication like conventional absorbers, and the applications of the absorber are expanded.

KEYWORDS: Dual Band Absorber, Electric LC Resonator, Frequency Controllable Absorber, Metamaterial Absorber, Sensor, Split Ring Resonator, Textile Absorber, Wearable Absorber, X-Shaped Resonator

COMMITTEE: Prof. Dr. Sıddık Cımhur BAŞARAN (Supervisor)

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Prof. Dr. Mesud KAHRİMAN

Asst. Prof. Dr. Yusuf ÖZTÜRK



ÖNSÖZ

Doktora çalışmalarım süresince, bana yol gösteren, kıymetli görüş ve fikirleri ile katkıda bulunan saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Sıddık Cumhuri BAŞARAN'a minnet duyar ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Değerli fikirleriyle katkı veren ve ölçümler için olanak sağlayan Prof. Dr. Selçuk HELHEL hocama ve Akdeniz Üniversitesi EMUMAM araştırma merkezine; kıymetli fikirleriyle katkıda bulunan ve ölçüm imkânı sağlayan Dr. Öğr. Üyesi Yusuf ÖZTÜRK hocama ve Antalya Bilim Üniversitesine; sunduğu ölçüm olanaklarından dolayı Prof. Dr. Evren EKMEKÇİ hocama ve Süleyman Demirel Üniversitesine teşekkür ederim.

Doğduğum günden beridir, kendimi bildim bileli, koşulsuz şartsız her daim beni destekleyen canımdan çok sevdiğim aileme sonsuz saygı ve sevgilerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
AKADEMİK BEYAN	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	6
2.1. Metamalzeme Teorisi	6
2.2. Soğurma Teorisi	9
2.2.1. Etkin Ortam Teorisi	9
2.2.2. İletim Hattı Modeli	11
2.2.3. Girişim Teorisi.....	12
2.3. Rezonatör Tabanlı Soğurucular Üzerine Literatür Özeti	14
3. MATERYAL VE METOD	17
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	21
4.1. Metamalzeme Tabanlı Soğurucu Tasarımı.....	21
4.1.1. Dairesel Şekilli ve Üç Bantlı YHR Tabanlı Soğurucu	21
4.1.1.1. Tasarım ve Benzetim Ortamı	21
4.1.1.2. Parametrik Analiz ve Sonuçları	22
4.1.1.3. Elektrik Alan Dağılımların İncelenmesi	24
4.1.1.4. Çapraz Polarize Yansıma Etkisinin İncelenmesi	26
4.1.1.5. Elektriksel Boyutun İncelenmesi	26
4.1.1.6. Temel Elektromanyetik Parametrelerin Çıkartılması	27
4.1.2. 3B Yazıcıda İmal Edilmiş ELC Tabanlı Soğurucu ve Sensor Uygulaması.....	29
4.1.2.1. PLA'nın Elektriksel Geçirgenliğinin Ölçülmesi.....	29
4.1.2.2. Tasarım ve Benzetim Ortamı	31
4.1.2.3. Ölçüm Düzenegi ve Üretim	32
4.1.2.4. Parametrik Analiz ve Sonuçları	33
4.1.2.5. Sensör Frekansının Analitik Yöntemle Elde Edilmesi	35
4.1.2.6. Deney Ortamında Katı ve Sıvılar İçin Algılama Uygulaması	37

4.1.2.7. Elektrik Alan ve Yüzey Akım Dağılımlarının İncelenmesi.....	39
4.1.2.8. Temel Elektromanyetik Parametrelerin Çıkartılması	40
4.1.2.9. Sensör Performansının İncelenmesi.....	41
4.1.3. YHR Tabanlı Soğurucu ve Sensor Uygulaması	43
4.1.3.1. Tasarım ve Benzetim Ortamı	43
4.1.3.2. Ölçüm Düzenegi ve Üretim	44
4.1.3.3. Parametrik Analiz ve Ölçüm Sonuçları	45
4.1.3.4. Sensor Davranışının Analitik Yöntemle İncelenmesi.....	46
4.2. X-Şekilli Rezonatör Tabanlı Soğurucu Tasarımı	48
4.2.1. Asimetrik X-Şekilli Rezonatör Tabanlı Çift Bantlı Soğurucu.....	48
4.2.1.1. Tasarım ve Benzetim Ortamı	48
4.2.1.2. Ölçüm Düzenegi ve Üretim	50
4.2.1.3. Parametrik Analiz ve Sonuçlar	51
4.2.1.4. Ölçüm Sonuçları	52
4.2.1.5. Elektrik Alan ve Yüzey Akım Dağılımlarının İncelenmesi.....	54
4.2.1.6. Çapraz Polarize Yansımanın İncelenmesi	57
4.2.1.7. Temel Elektromanyetik Parametrelerinin Çıkartılması	57
4.2.2. Asimetrik X-Şekilli Rezonatör Tabanlı Soğurucunun Sensor Uygulaması	59
4.2.2.1. Tasarım, Benzetim Ortamı, Üretim ve Ölçüm Düzenegi	59
4.2.2.2. Parametrik Analiz ve Sonuçları	61
4.2.2.3. Asimetrik X-şekilli ve YHR Tabanlı Sensorların Performans Karşılaştırması	62
4.2.3. Giyilebilir Uygulamalar İçin Dört Bantlı X-Şekilli Rezonatör Tabanlı Soğurucu Tasarımı.....	63
4.2.3.1. Tasarım, Benzetim Ortamı, Üretim ve Ölçüm Düzenegi	63
4.2.3.2. Toplu Eşdeğer Devre Modelinin Çıkartılması.....	65
4.2.3.3. Benzetim ve Ölçüm Sonuçları	66
4.2.3.4. Temel Elektromanyetik Parametrelerinin Çıkartılması	67
4.2.3.5. Çapraz Polarize Yansımanın İncelenmesi	68
4.2.3.6. Soğurma Performansının İncelenmesi	69
4.2.4. Frekansı Kontrol Edilebilir X-Şekilli Soğurucu Tasarımı.....	70
4.2.4.1. PIN Diyotlu Frekansı Kontrol Edilebilir X-Şekilli Soğurucu.....	70

4.2.4.1.1. Tek PIN diyotu soğurucu	70
4.2.4.1.1.1. Tasarım ve benzetim ortamı.....	71
4.2.4.1.1.2. Nümerik analiz sonuçları	72
4.2.4.1.2. Çift PIN diyotu soğurucu	74
4.2.4.1.2.1. Tasarım ve benzetim ortamı.....	74
4.2.4.1.2.2. Nümerik analiz sonuçları	75
4.2.4.1.3. Dört PIN diyotu soğurucu	78
4.2.4.1.3.1. Tasarım ve benzetim ortamı.....	78
4.2.4.1.3.2. Nümerik analiz sonuçları	79
4.2.4.2. Varaktör Diyotlu Frekansı Kontrol Edilebilir X-Şekli Soğurucu.....	81
4.2.4.2.1. Tek varaktör diyotlu soğurucu	82
4.2.4.2.1.1. Tasarım ve benzetim ortamı.....	82
4.2.4.2.1.2. Nümerik analiz sonuçları	83
4.2.4.2.2. Çift varaktör diyotlu soğurucu	86
4.2.4.2.2.1. Tasarım ve benzetim ortamı.....	86
4.2.4.2.2.2. Ölçüm düzeneği ve üretim	87
4.2.4.2.2.3. Nümerik analiz sonuçları	88
4.2.4.2.2.4. Ölçüm sonuçları	92
5. SONUÇLAR	93
6. KAYNAKLAR	97
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Rezonatör Tabanlı Çoklu-Bant Soğurucu Tasarımı ve Sensör Uygulamaları” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

20/07/2023

Alparslan ÇINAR



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

C	: Kapasitans
E	: Elektrik alan şiddeti
f	: Frekans
k	: Dalga numarası
L	: Endüktans
n	: Kırılma indisi
S	: Poynting vektörü
ω	: Açısal hız
Z	: Empedans
ϵ	: Elektriksel geçirgenlik
ϵ_r	: Elektriksel geçirgenliğin gerçel kısmı
ϵ_i	: Elektriksel geçirgenliğin sanal kısmı
μ	: Manyetik geçirgenlik
μ_r	: Manyetik geçirgenliğin gerçel kısmı
μ_i	: Manyetik geçirgenliğin sanal kısmı
Γ	: Yansıma katsayısı
σ	: İletkenlik
λ_0	: Serbest uzay dalga boyu

Kısaltmalar

YHR	: Yarık halka rezonatör
ELC	: Elektrik LC

Tezde ondalık yazım kullanılmakta ve ondalık ayırıcı (“.”) noktaadır.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Yankısız oda içerisine yerleştirilmiş takoz konik soğurucu (Prof. Dr. Selçuk HELHEL tarafından fotoğraflanmıştır.).....	1
Şekil 1.2. Kompozit malzemeden oluşan çok katmanlı fayans (Micheli vd. 2011)	1
Şekil 1.3. Landy ve arkadaşlarının önerdiği mükemmel metamalzeme soğurucunun, şematik görünümüyle birlikte benzetim ortamından elde edilen sonuçları	2
Şekil 2.1. Malzemenin normal veya solak olmasına göre, gelen ışının kırılması.....	7
Şekil 2.2. YHR yapısının farklı uyarımlar altında $\mathcal{E}$ ve μ sonuçları: a) elektrik uyarım; b) manyetik uyarım; c) elektrik ve manyetik uyarım ve d) normal uyarım.....	8
Şekil 2.3. ELC yapısının farklı uyarımlar altında $\mathcal{E}$ ve μ sonuçları: a) elektrik uyarım; ve b) manyetik uyarım	8
Şekil 2.4. a) YHR yapısı için yüzey akım dağılımları; ve b) ELC rezonatör için yüzey akım dağılımları	9
Şekil 2.5. Örnek soğurucunun şematik görüntüsü ile birlikte yansıma, iletim ve soğurma sonuçları	10
Şekil 2.6. Örnek soğurucunun etkin ortam parametreleri; a) elektriksel geçirgenlik $\mathcal{E}$; ve b) manyetik geçirgenlik μ c) empedansı Z_A	11
Şekil 2.7. a) Rezonatör tabanlı soğurucun yandan şematik görünümü; b) rezonatör ve topraklanmış taban malzemesinin devre modeli	12
Şekil 2.8. Normal ve eğik gelen elektromanyetik dalga için, çoklu yansıma ve girişim teorisi modeli.....	14
Şekil 3.1. CST Studio Suite 2021 sürümünün tasarım arayüzü.....	18
Şekil 3.2. AWR Design Environment 15 sürümünün tasarım penceresi.....	19
Şekil 3.3. MATLAB R2017b sürümünün tasarım arayüzü	19
Şekil 3.4. a) Agilent Fieildfox N9923a vektör ağ analizörü; ve b) WR340 dalga kılavuzuna ait fotoğraf	20
Şekil 4.1. Tasarım parametreleri ile birlikte YHR tabanlı soğurucunun a) önden; b) arkadan; c) perspektif şematik görünümü	21
Şekil 4.2. YHR tabanlı soğurucu için benzetim ortamının şematik görünümü	22

Şekil 4.3. YHR tabanlı soğurucu tasarımının a) #1; b) #2; c) #3; d) #4; e) #5; f) #6 numaralı yapılandırma adımları	23
Şekil 4.4. YHR tabanlı soğurucu tasarımının a) #1, #2 ve #3; b) #4, #5 ve #6 numaralı yapılandırma adımları için soğurma sonuçları	23
Şekil 4.5. YHR tabanlı üç bantlı soğurucu için benzetim sonuçları	24
Şekil 4.6. YHR ve toprak düzlem için a) 2.88; b) 3.52; c) 5.16 GHz'deki elektrik alan dağılımlarının 259° faz açısında z-bileşenleri	25
Şekil 4.7. YHR tabanlı üç bantlı soğurucu için eş ve çapraz polarize yansıma bağlı soğurma davranışı	26
Şekil 4.8. YHR tabanlı üç bantlı soğurucunun a) elektriksel geçirgenliği; b) manyetik geçirgenliği.....	28
Şekil 4.9. YHR tabanlı üç bantlı soğurucunun normalize giriş empedansı	28
Şekil 4.10. PLA'nın (a) elektriksel geçirgenliği; (b) manyetik geçirgenliği; (c) fotoğrafı	30
Şekil 4.11. (a) Üç boyutlu yazıcıda imal edilmiş soğurucunun tasarım parametreleriyle birlikte şematik görünümü; (b) Algılama katmanının tasarım parametreleriyle birlikte şematik görünümü	31
Şekil 4.12. Üç boyutlu yazıcıda imal edilmiş soğurucu için benzetim ortamının şematik görünümü	32
Şekil 4.13. (a) 3 boyutlu yazıcıda üretilmiş soğurucu tabanlı sensor için ölçüm düzeneği; (b) Numune tutucu ve içine yerleştirilmiş soğurucu tabanlı sensor	33
Şekil 4.14. a) ELC rezonatörün farklı l uzunlukları için soğurma davranışı; b) ELC rezonatörün farklı hat genişlikleri w için soğurma davranışı	34
Şekil 4.15. a) ELC rezonatörün farklı yarık genişliği g için soğurma davranışı; b) ELC rezonatörün farklı m parametre değerleri için soğurma davranışı	34
Şekil 4.16. a) Farklı h ve ϵ_{rs} değerleri için önerilen soğurucunun hassasiyet analizi; b) farklı h_s ve ϵ_{rs} değerleri için önerilen soğurucunun hassasiyet analizi	35
Şekil 4.17. a) Farklı algılama katman dielektrik sabiti ϵ_{rs} ve b) Farklı algılama katman kalınlığı h_s için analitik ve nümerik yöntemlerin karşılaştırma sonuçları.....	37
Şekil 4.18. a) Katı malzemeler için benzetim ortamından elde edilen soğurma sonuçları, b) Katı malzemeler için ölçümden elde edilen soğurma sonuçları	38

Şekil 4.19. a) Sıvı malzemeler için benzetim ortamından elde edilen soğurma sonuçları, b) Sıvı malzemeler için ölçümden elde edilen soğurma sonuçları	39
Şekil 4.20. 45° faz açısı için a) 2.19 GHz'de ELC rezonatör ve toprak düzlem üzerindeki elektrik alan dağılımlarının z-bileşeni; b) 2.19 GHz'de ELC rezonatördeki yüzey akımı dağılımları.....	40
Şekil 4.21. 45° faz açısı için a) 2.19 GHz'de ELC rezonatör ve toprak düzlem üzerindeki elektrik alan dağılımlarının z-bileşeni; b) 2.19 GHz'de ELC rezonatördeki yüzey akımı dağılımları.....	41
Şekil 4.22. a) YHR tabanlı soğurucunun şematik görünümü; b) Hassasiyet katmanı eklenmiş YHR tabanlı soğurucunun şematik görünümü	43
Şekil 4.23. YHR tabanlı sensor için benzetim ortamının şematik görünümü.....	44
Şekil 4.24. YHR tabanlı soğurucunun ölçüm düzeneği	44
Şekil 4.25. Üretilen SRR tabanlı soğurucu ve hassasiyet katmanları	45
Şekil 4.26. Çeşitli kalınlık (h_s) ve dielektrik sabiti (ϵ_s) değerlerine bağlı olarak benzetim ortamında elde edilen soğurma frekansındaki değişim grafikleri, a) YHR _{alt} ; ve b) YHR _{üst}	45
Şekil 4.27. a) YHR _{alt} için farklı ϵ_s için benzetim ve ölçüm sonuçları; b) YHR _{üst} için farklı ϵ_s için benzetim ve ölçüm sonuçları	46
Şekil 4.28. Sensor yapısı için toplam kondansatör eşdeğerinin şematik görünümü.....	47
Şekil 4.29. a) Hassasiyet katmanının dielektrik sabiti ϵ_s değişimine göre toplam kapasitans C_{Toplam} davranışı; b) Hassasiyet katman kalınlığı h_s değişimine göre toplam kapasitans C_{Toplam} davranışı.....	48
Şekil 4.30. Asimetrik X-şekilli soğurucunun şematik görünümü ve tasarım parametreleri	49
Şekil 4.31. Asimetrik X-şekilli soğurucu için benzetim ortamının şematik görünümü..	49
Şekil 4.32. Asimetrik X-şekilli soğurucunun a) ölçüm düzeneği; b) içinde bir adet prototip bulunan numune tutucu	50
Şekil 4.33. Üretilen asimetrik X-şekilli soğurucunun a) önden; b) arkadan görüntüsü .	51
Şekil 4.34. Rezonatör simetrik durumdayken a) farklı kol kalınlıkları için soğurma davranışları; b) farklı kol uzunlukları için soğurma davranışları.....	51

Şekil 4.35. a) Farklı l_2 değerleri için soğurma spektrumları, a) $l_1 = 22$ mm; b) Farklı l_2 değerleri için soğurma spektrumları, $l_1 = 25$ mm; c) Farklı l_2 değerleri için soğurma frekansları, $l_1 = 22$ mm ve $l_1 = 25$ mm	52
Şekil 4.36. Benzetim ve ölçümlerden elde edilen soğurma grafikleri, a) Tasarım#1; b) Tasarım#2; c) Tasarım#3; d) Tasarım#4.....	53
Şekil 4.37. X-şekilli rezonatör ve toprak düzlemi üzerinde 180° faz açısında yüzey akımı dağılımları a) 3.56 GHz'de Tasarım#1; b) 3.12 GHz'de Tasarım#3; c) 3.52 GHz'de Tasarım#3.....	55
Şekil 4.38. X-şekilli rezonatör ve toprak düzlemlerde 270° faz açısında elektrik alan dağılımlarının z-bileşeni a) 3.56 GHz'de Tasarım#1; b) 3.12 GHz'de Tasarım#3; c) 3.52 GHz'de Tasarım#3.....	56
Şekil 4.39. Tasarım#3 için a) süper-hücre yapısı; b) süper-hücre dizisine ait soğurma, eş ve çapraz polarize yasıma sonuçları.....	57
Şekil 4.40. Tasarım#1 için a) elektriksel geçirgenlik; b) manyetik geçirgenlik; c) normalize giriş empedansı	58
Şekil 4.41. Tasarım#3 için a) elektriksel geçirgenlik; b) manyetik geçirgenlik; c) normalize giriş empedansı	59
Şekil 4.42. a) Asimetrik X-şekilli soğurucunun şematik görünümü; b) Hassasiyet katmanı eklenmiş asimetrik X-şekilli soğurucunun şematik görünümü	60
Şekil 4.43. Asimetrik X-şekilli soğurucu tabanlı sensor için benzetim ortamının şematik görünümü	60
Şekil 4.44. a) Tasarım#3 için farklı ϵ_s için benzetim ve ölçüm sonuçları; b) Tasarım#3 için farklı h_s için benzetim ve ölçüm sonuçları	61
Şekil 4.45. Tasarım#3 ve YHR için farklı kalınlık (h_s) ve dielektrik sabiti (ϵ_s) değerlerine bağlı olarak benzetim ortamında elde edilen soğurma frekansındaki değişim grafikleri, a) alt bant; ve b) üst bant.....	62
Şekil 4.46. Dört bantlı tekstil soğurucunun, a) şematik görüntüsü ve tasarım parametreleri; b) benzetim ortamının şematik görünümü.....	64
Şekil 4.47. Üretilen dört bantlı tekstil soğurucunun, a) önden görünümü; ve b) arkadan görünümü	64
Şekil 4.48. a) Deney düzeneği ve b) numune tutucuya yerleştirilen tekstil soğurucu....	65

Şekil 4.49. Tekstil tabanlı dört bantlı soğurucunun yüzey akım dağılımları ve eş değer devre modeli.....	66
Şekil 4.50. Tekstil soğurucunun ölçüm ve benzetim sonuçları	67
Şekil 4.51. Tekstil soğurucu için a) elektriksel geçirgenlik; b) manyetik geçirgenlik; ve c) normalize giriş empedansı	68
Şekil 4.52. Tekstil tabanlı soğurucu için a) süper-hücre yapısı; b) süper-hücre dizisine ait soğurma, eş ve çapraz polarize yasıma sonuçları.....	69
Şekil 4.53. Tek PIN-diyotlu soğurucu yapısının tasarım parametreleriyle birlikte, (a) önden; (b) perspektif şematik görüntüsü ve (c) benzetim ortamının şematik görünümü	71
Şekil 4.54. PIN-diyot KAPALI durumdayken, önerilen yapının farklı m değerleri için soğurma davranışı	72
Şekil 4.55. PIN-diyotun AÇIK/KAPALI durumuna göre önerilen yapının soğurma davranışı	73
Şekil 4.56. Çift PIN-diyotlu soğurucu yapısının tasarım parametreleriyle birlikte, (a) önden; (b) perspektif şematik görüntüsü ve (c) benzetim ortamının şematik görünümü	75
Şekil 4.57. Çift PIN-diyotlu soğurucu için D_1 AÇIK, D_2 KAPALI durumdayken farklı m değerleri için soğurma sonuçları ($l_1 = l_2 = 25$ mm).....	76
Şekil 4.58. Çift PIN-diyotlu soğurucu için D_1 AÇIK, D_2 KAPALI durumdayken farklı kol uzunlukları ($l_1 = l_2$) için soğurma karakteristiği ($m = 1$ mm).....	77
Şekil 4.59. Çift PIN-diyotlu soğurucunun, anahtarlama elemanlarının AÇIK ve KAPALI durumuna göre soğurma karakteristiği ($l_1 = l_2 = 23$ mm, $m = 1$ mm)	78
Şekil 4.60. Dört PIN-diyotlu soğurucu yapısının tasarım parametreleriyle birlikte, (a) önden; (b) perspektif şematik görüntüsü ve (c) benzetim ortamının şematik görünümü	79
Şekil 4.61. Dört PIN-diyotlu soğurucu için D_1 AÇIK, D_2 AÇIK, D_3 AÇIK ve D_4 KAPALI durumdayken farklı m değerleri için soğurma karakteristikleri	80
Şekil 4.62. Dört PIN-diyotlu soğurucunun, anahtarlama elemanlarının AÇIK ve KAPALI durumuna göre soğurma karakteristiği ($m = 0.5$ mm).....	81
Şekil 4.63. SMV 1405 varaktör diyotun eşdeğer devre modeli ve gerilim kapasite grafiği	82

Şekil 4.64. Tek varaktör diyotlu soğurucu yapısının tasarım parametreleriyle birlikte, (a) önden; (b) perspektif şematik görüntüsü ve (c) benzetim ortamının şematik görünümü	83
Şekil 4.65. Tek varaktör diyotlu soğurucuya 30 V uygulanmışken, farklı m değerleri için soğurma karakteristiği	84
Şekil 4.66. Tek varaktör diyotlu soğurucuya uygulanan; a) 0 – 2.5 V arası farklı gerilim değerleri için soğurma karakteristiği ve a) 3 – 30 V arası farklı gerilim değerleri için soğurma karakteristiği	85
Şekil 4.67. Çift varaktör diyotlu soğurucu yapısının tasarım parametreleriyle birlikte, (a) önden; (b) perspektif şematik görüntüsü ve (c) benzetim ortamının şematik görünümü	87
Şekil 4.68. Çift varaktör diyotlu soğurucunun a) ölçüm düzeneği; ve b) önden görünümü	87
Şekil 4.69. Çift varaktör diyotlu soğurucunun diyotlarına 30 V uygulanmışken, farklı m değerleri için soğurma karakteristiği	88
Şekil 4.70. Çift varaktörlü soğurucu için, D_2 diyota sabit 30 V uygulanmışken, D_1 diyota uygulanan; a) 0 – 2.5 V gerilimler için soğurma karakteristiği ve b) 3 – 30 V gerilimler için soğurma karakteristiği ($m = 1$ mm)	89
Şekil 4.71. Çift varaktörlü soğurucunun D_1 ve D_2 diyotlarına aynı anda uygulanan ; a) 0 – 2.5 V gerilimler için soğurma karakteristiği ve b) 3 – 30 V gerilimler için soğurma karakteristiği ($m = 1$ mm)	91
Şekil 4.72. Çift varaktör diyot bağlı X-Şekilli soğurucuya bağlı DC besleme kablolarının soğurma sonucuna etkisi	92

ÇİZELGELER DİZİNİ

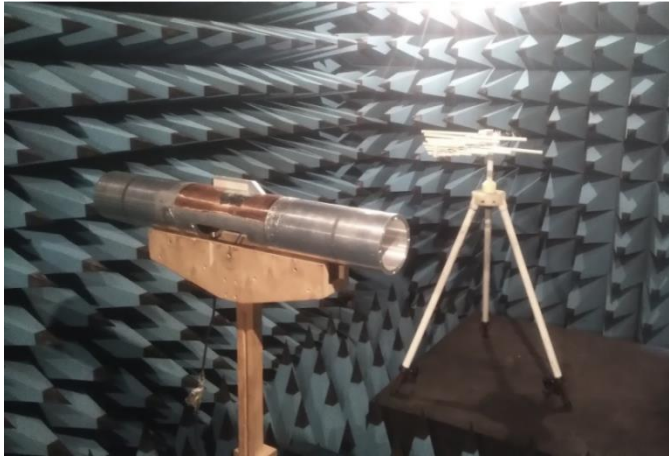
Çizelge 3.1. Tasarımların şematik görünüşleri ve kullanım özellikleri	17
Çizelge 4.1. YHR tabanlı soğurucunun tasarım parametreleri ve nihai sonuçları.....	22
Çizelge 4.2. Literatürde rapor edilmiş %90 üzerindeki soğurmaya sahip çalışmalar ile YHR tabanlı üç bantlı soğurucunun boyut karşılaştırması	27
Çizelge 4.3. Soğurma frekanslarında, YHR tabanlı soğurucunun elektriksel geçirgenlik, manyetik geçirgenlik ve normalize giriş empedans değerleri.....	29
Çizelge 4.4. 3B yazıcıda imal edilmiş soğurucu sensorun benzetim, ölçüm ve analitik yöntemle elde edilen soğurma frekansları.....	39
Çizelge 4.5. Literatürde bildirilen çalışmalarla, 3B yazıcıda imal edilmiş sensörün algılama performans karşılaştırma sonuçları	42
Çizelge 4.6. Ölçüm ve benzetim sonuçlarına göre prototiplerin soğurma frekansları ve frekans kayma yüzdeleri	54
Çizelge 4.7. Soğurma frekanslarında, X-Şekli soğurucu tasarımlarının elektriksel geçirgenlik, manyetik geçirgenlik ve normalize giriş empedans değerleri.....	59
Çizelge 4.8. Tasarım#3 ve YHR soğurucular için nümerik ve deneysel sonuçlar	63
Çizelge 4.9. Soğurma frekanslarında, tekstil tabanlı soğurucu tasarımının elektriksel geçirgenlik, manyetik geçirgenlik ve normalize giriş empedans değerleri.....	68
Çizelge 4.10. Tekstil tabanlı soğurucuların performans karşılaştırması.....	70
Çizelge 4.11. PIN-diyot KAPALI durumdayken, önerilen yapının farklı m değerleri için soğurma sonuçları	73
Çizelge 4.12. D_1 AÇIK, D_2 KAPALI durumdayken, farklı m değerleri için soğurma sonuçları ($l_1 = l_2 = 25$ mm).....	76
Çizelge 4.13. D_1 AÇIK, D_2 KAPALI durumdayken, farklı m değerleri için soğurma sonuçları ($l_1 = l_2 = 25$ mm).....	77
Çizelge 4.14. Çift PIN-diyotlu soğurucunun, anahtarlama elemanlarının AÇIK ve KAPALI durumuna göre soğurma sonuçları ($l_1 = l_2 = 23$ mm, $m = 1$ mm).....	78
Çizelge 4.15. Dört PIN-diyotlu soğurucu için D_1 AÇIK, D_2 AÇIK, D_3 AÇIK ve D_4 KAPALI durumdayken farklı m değerleri için soğurma sonuçları.....	80

Çizelge 4.16. Dört PIN-diyotlu soğurucunun, anahtarlama elemanlarının AÇIK ve KAPALI durumuna göre soğurma sonuçları ($m = 0.5$ mm)	81
Çizelge 4.17. Tek varaktör diyotlu soğurucuya 30 V uygulanmışken, farklı m değerleri için soğurma sonuçları ($m = 0.5$ mm)	84
Çizelge 4.18. Tek varaktör diyotlu soğurucuya uygulanan farklı gerilim değerleri için soğurma sonuçları	85
Çizelge 4.19. Çift varaktör diyotlu soğurucunun diyotlarına 30 V uygulanmışken, farklı m değerleri için soğurma sonuçları	89
Çizelge 4.20. Çift varaktörlü soğurucunun D_2 diyotu 30 V'ta sabitken, D_1 diyotuna uygulanan farklı gerilimler için soğurma sonuçları ($m = 1$ mm)	90
Çizelge 4.21. Çift varaktörlü soğurucunun D_1 ve D_2 diyotlarına aynı anda uygulanan farklı gerilimler için soğurma sonuçları ($m = 1$ mm).....	91
Çizelge 5.1. Tezde önerilen soğurucu tasarımları ve özellikleri.....	96

1. GİRİŞ

Elektromanyetik dalga soğurucular, çalışma frekansında, gelen radyasyonun tümünü soğurabilen aygıtlardır. Mikrodalga, terahertz ve optik bölgelerde tasarımları bulunan bu aygıtların kullanımıyla birlikte; yansıma, iletim ve saçılma gibi dalga yayılımları etkisiz hale gelebilmektedir. Tasarımları geniş bir frekans yelpazesine yayılan elektromanyetik dalga soğurucuları, temel olarak üçe ayrılırlar (Tak ve Choi 2017).

Yankısız odalarda kullanılan takoz konik soğurucular, üç tip soğurucu yapısından biridir (Dewitt ve Burnside 1988). Piramit şekilli bu yapılar genellikle, geniş bir frekans bandında, elektromanyetik dalgayı soğurmak için kullanılırlar. Ancak bu soğurucular büyük hacimli ve kırılkan olduklarından dolayı taşınabilir uygulamalar için uygun değildir. Takoz konik soğurucuya ait fotoğraf Şekil 1.1’de gösterilmektedir.



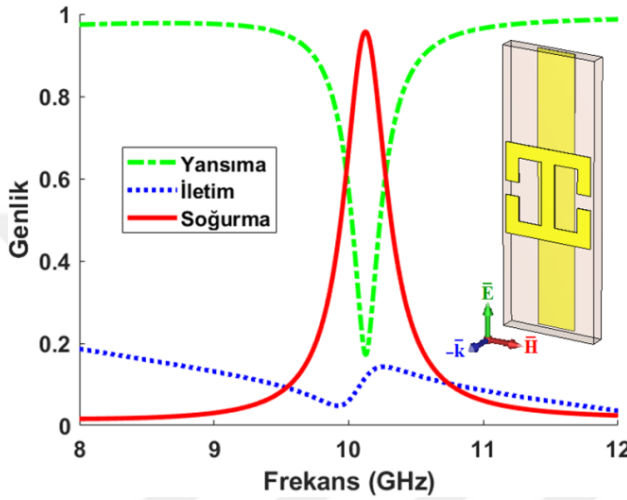
Şekil 1.1. Yankısız oda içerisine yerleştirilmiş takoz konik soğurucu (Prof. Dr. Selçuk HELHEL tarafından fotoğraflanmıştır.)

Bir diğer soğurucu tipi, yüksek elektriksel ve manyetik geçirgenliğe sahip kompozit malzemelerden yapılan kayıplı soğuruculardır (Micheli vd. 2011; Neo ve Varadan 2004; Park vd. 2009). Bu tip soğurucular, geniş bantta yüksek emiciliğe sahiptirler; ancak malzeme kıtlığından dolayı oldukça pahalıdırlar. Kayıplı soğurucunun olduğu fotoğraf Şekil 1.2’de gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Kompozit malzemeden oluşan çok katmanlı fayans (Micheli vd. 2011)

Son olarak, üzerine gelen elektromanyetik dalgayı ohmik ve dielektrik kayıplardan dolayı ısıya dönüştüren rezonatör tabanlı soğurucular, üç tip soğurucudan biridir (Landy vd. 2008). Bu tip soğurucular, Landy vd. “Mükemmel Metamalzeme Soğurucu” isimli çalışmayı literatüre sunmasıyla birlikte, on beş yılı aşkın süredir popüler bir araştırma konusu haline gelmiştir. Landy ve arkadaşlarının önerdiği çalışma, tez yazarı tarafından benzetim ortamında yeniden gerçekleştirilmiştir ve şematik görüntüsüyle birlikte elde edilen sonuçlar Şekil 1.3’te verilmiştir. İncelendiğinde, soğurmanın en fazla olduğu noktada yansıma ve iletimin sıfıra yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 1.3. Landy ve arkadaşlarının önerdiği mükemmel metamalzeme soğurucunun, şematik görünümüyle birlikte benzetim ortamından elde edilen sonuçları

On beş yıldan fazladır popüler bir araştırma konusu olan rezonatör tabanlı elektromanyetik dalga soğurucuları genellikle, kayıplı dielektrik taban malzemesinin üst katmanına yama ve alt katmanına toprak düzlem konumlandırılarak oluşturulur. Bu soğurucu yapılar esneklik, düşük profil, kolay imalat ve kompaktlık gibi avantajlar sunabilmektedir. Bahsedilen avantajlara rağmen, bu yapılar genellikle dar bir soğurma bant genişliğine sahiptirler. Bu durum, uluslararası kuruluşlar tarafından tahsis edilen frekans bantlarını aynı anda kapsamaları gereken uygulamalar için dezavantaj sağlamaktadır. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için, çok sayıda rezonatör ve/veya çok sayıda katman kullanılarak çift/çok bantlı soğurucular tasarlanmıştır (Ayop vd. 2017; Bhattacharyya vd. 2015; Tak ve Choi 2017). Ancak, bu yöntemde, tasarımlar komplike ve yüksek hacimli olabilmektedir. Çift veya çok bantlı soğurucu tasarımında bir diğer yöntem ise asimetrik yapıların kullanılmasıdır. Bu çalışmalarda ise asimetri artıkça tüm frekanslar aynı anda değişmektedir ve bu da arzulanan çift/çoklu bant frekans cevaplarının elde edilmesini zorlaştırmaktadır (Chen vd. 2016). Bu iki yönteme ilaveten, PIN ve varaktör diyotların kullanıldığı, frekansı kontrol edilebilir soğurucuların tasarımıyla dar bant genişliğinin sebep olduğu dezavantajın üstesinden gelinebilmektedir (Ghosh and Srivastava 2017a; Ghosh and Srivastava 2017b). Lakin

bu tasarımlar, basit olmamakla beraber periyodik dizilerde pahalı olabilmektedir ve DC besleme kaynağına ihtiyaç duymaktadır.

Son yıllarda hemen hemen birçok uygulamada kullanılan rezonatör tabanlı soğurucular, dielektrik sabiti değişimlerine karşı hassas olmalarından dolayı sensor uygulamalarında da kendilerine yer bulmuşlardır. Test malzemelerindeki dielektrik sabiti değişimi, bu yapıların soğurma frekansını kayda değer biçimde etkilemektedir. Bunun yansısı, rezonatör tabanlı soğurucuların yüksek kalite faktörü ve yüksek soğurma oranı sunması da, sensor uygulamaları için ekstra avantaj sağlamaktadır. Bahsedilen bu avantajlarında dolayı farklı tasarım özelliklerine sahip çeşitli tiplerde soğurucu tabanlı sensorlar literatüre sunulmuştur. Test malzemesinin rezonatör ve toprak katmanları arasına yerleştirildiği tasarımlarda; rezonatör ve toprak katmanları ayrı ayrı üretilip test malzemesi ile birlikte hizalı şekilde birleştirilmesi gerekmektedir (Bakir vd. 2018). Test malzemesinin doğrudan soğurucu rezonatörünün üzerine yerleştirildiği çalışmalarda; test malzemesi hizalı biçimde rezonatörün üzerine konulması gereklidir ve sadece katı malzeme testi için uygundur (Cinar ve Basaran 2022). Sıvı malzemelerin testi için geliştirilen çalışmalarda rezonatör çevresine “mikro akışkan kanal” yerleştirilerek analizler gerçekleştirilmektedir. Sadece sıvı testi yapan bu sistemlerin hem tasarım hem de üretimleri oldukça karmaşıktır (Yoo vd. 2016).

Tez kapsamında, rezonatör tabanlı çoklu-bant soğurucu tasarımı ve sensor uygulamaları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu tez Giriş bölümüyle birlikte altı bölümden oluşmaktadır ve her bölüm aşağıda özetlenmiştir:

Bölüm 2’de; öncelikle metamalzeme ve soğurma teorisinden kısaca bahsedilmiştir. Daha sonra, tez çalışmaları ile alakalı literatüre sunulmuş rezonatör tabanlı soğurucular özetlenmiştir.

Bölüm 3’de; tez çalışmasında kullanılan CST Studio Suite, AWR Design Environment, MATLAB gibi benzetim yazılımlarından ve vektör ağ analizörü, dalga kılavuzu gibi ölçüm ekipmanlarından kısaca bahsedilmiştir.

Bölüm 4’te; ilk olarak, metamalzeme tasarımında sıklıkla tercih edilen yarık halka ve elektrik LC rezonatörleri kullanılarak, üç farklı soğurucu tasarımı önerilmiştir. Daha sonra, simetrik olup olmama durumuna göre tek ya da çift bantta soğurma davranışı sergileyen X-şekilli rezonatör kullanılarak, özgün soğurucu tasarımları gerçekleştirilmiştir. Her bir tasarım, maddeler halinde kısaca aşağıda açıklanmıştır.

- Metamalzeme tabanlı ilk tasarımda, dar bant genişliğinin üstesinden gelmek için, minyatürleştirilmiş çok bantlı bir soğurucu tasarlanmıştır. Soğurucunun rezonatörü, üç dairesel eş merkezli yarık halka rezonatör (YHR) elemanından ve halkalar arasına yerleştirilmiş altı adet minyatür metal yükten oluşmaktadır. Önerilen tasarımda, YHR elemanları çok bantlı soğurma sağlarken, metalik yükler soğurma tepelerinin meydana geldiği bantların ince frekans ayarını

sağlamaktadır. Önerilen soğurucu, hem WiMAX (3.5 GHz) hem de WLAN (5.2 GHz) bantlarını aynı anda kapsayabilmektedir. Bilindiği üzere, YHR yapıları, dalga boylarına kıyasla daha küçük boyuttadır ve çift/çoklu bant davranış özelliği gösterebilmektedir (Başaran ve Erdemli 2008; Pendry vd. 1999; Wang 2016). Böylece tasarlanan yapı literatüre sunulan bazı çift/çok bantlı çalışmaya sahip soğurucu tasarımlarına göre daha küçük bir yapıya sahiptir. Önerilen soğurucu tasarımı, EMI/EMC, kablosuz iletişim ve WiMAX/WLAN bant işlemleri gibi potansiyel uygulamalarda kullanılabilir. Örneğin, YHR'nin küçük boyutu sayesinde, bazı EMI/EMC'lerin tasarımında yararlı olabilir. Ayrıca insan vücudu üzerindeki WiMAX/WLAN kaynaklı elektromanyetik dalga radyasyonunun zararlı etkilerini ortadan kaldırabilir.

- Metamalzeme yapısının kullanıldığı ikinci tasarımda, metamalzeme tabanlı yeni bir yekpare soğurucu sensor önerilmektedir. Söz konusu tasarımda dielektrik taban malzemesi PLA filament kullanılarak 3B yazıcıda üretilmiştir. Ayrıca taban malzemesinde, içine test malzemesinin yerleştirileceği, bir oyuk bulunmaktadır. Soğurucu sensorun rezonatörü elektrik-LC (ELC) rezonatör yapısından oluşmaktadır. ELC rezonatör ve toprak düzlem bakır bant kullanılarak elde edilmiş ve sırasıyla taban malzemesinin üstüne ve altına yapıştırılmıştır. Önerilen bu sensör yapısı, yekpare bir yapı olup, parçalı ve komplike değildir. Önerilen tasarım kolayca üretilebilmekte ve hem katı hem de sıvı testlerini gerçekleştirebilmektedir. Tasarımın doğrulanması için deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Hem katı hem de sıvı test malzemeleri kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, yapının çalışma mekanizmasını daha iyi anlaşılması için analitik modeli çıkartılmıştır. Böylelikle nümerik tasarım doğrulanmıştır. Ayrıca, önerilen yapı, oyuğa dielektrik sabiti farklı malzemeler yerleştirilerek, frekansı ayarlanabilir soğurucu olarak da kullanılabilir.
- Dielektrik sabiti değişimlerine oldukça duyarlı olan YHR ve türevlerinin, soğurucu sensor tasarımlarında yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir (Bakir vd. 2017; Hakim vd. 2021; Wang vd. 2016). Bu doğrultuda, metamalzeme yapısının kullanıldığı üçüncü tasarımda, S-bant frekans bölgesinde çalışan, frekansları birbirinden farklı iki adet YHR tabanlı soğurucu tasarlanmıştır. Tasarlanan bu soğurucuların kalınlık ve dielektrik sabiti değişimlerine bağlı sensor performansları incelenmiştir.
- X-şekilli rezonatörün kullanıldığı ilk tasarımda, rezonatörün simetrik durumuna göre tek veya çift bant davranış sergileyebilen soğurucu tasarlanmıştır. Önerilen tasarım, tek katman üzerine yerleştirilmiş tek rezonatörden oluşan basit bir yapıya sahiptir. Tasarım, topolojisinden kaynaklı tek veya çift bantlı davranış sunmaktadır. X-şekilli rezonatör simetrik olduğunda tek bantlı bir frekans cevabı elde edilmektedir. Kol uzunlukları arasında bir fark olduğunda, bu asimetrik yapı sayesinde çift bantlı frekans tepkisi gözlemlenmektedir. Literatüre sunulan asimetrik çapraz şekilli soğurucuların asimetriyi oluşturan fark artıkça tüm

frekansları aynı anda değişmekteyken; önerilen yapıyla, kol uzunlukları tek tek değiştirilerek her iki frekans da tek tek kontrol edilebilmektedir. Tasarım topolojisini doğrulamak için, çeşitli boyutlara sahip rezonatör yapıları analiz edilmiş ve ilgili frekanslarda karşılık gelen soğurma özellikleri, yüzey akımı yoğunluğu ve elektrik alan dağılımları incelenmiştir.

- Asimetrik X-şekilli rezonatör tabanlı soğurucunun davranışı incelendiğinde, soğurma frekanslarında nispeten yüksek kalite faktörüne sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek kalite faktörünün, sensor uygulamaları için ekstra bir avantaj olduğu bilinmektedir. Bu sebeple, ikinci çalışmada, asimetrik X-şekilli rezonatör tabanlı soğurucunun sensor performansını görmek amacıyla, soğurucu sensor tasarımlarında sıklıkla kullanılan YHR yapısı ile karşılaştırılmıştır. Bu doğrultuda, kıyaslama için Bölüm 4.1.3'te önerilen YHR yapıları kullanılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre, X-şekilli soğurucu tasarımı YHR'den daha hassastır. Önerilen çift bantlı soğurucu, dielektrik sabiti nem, sıcaklık, konsantrasyon gibi çevresel parametrelere duyarlı olan bazı malzemelerin sensor uygulamaları için iyi bir aday olabilir. Ayrıca bu yapı, numunenin basınçtan kaynaklanan kalınlık değişimini tespit etmek için de kullanılabilir.
- Daha sonra, giyilebilir uygulamalar için X-şekilli rezonatör tabanlı yeni bir dört bantlı tekstil soğurucu önerilmiştir. Bu çalışmada önerilen tasarım, taban malzemesi olarak kullanılan kot kumaş üzerine yan yana yerleştirilen iki adet asimetrik X-şekilli rezonatörden meydana gelmektedir. Tasarımda, rezonatörlerin her birinin kol uzunlukları diğerinden farklıdır. Önerilen bu yapı, S-bant frekans bölgesinde dört bantlı soğurma performansı sağlamaktadır. Bildiğimiz kadarıyla, yeni konfigürasyonla önerilen bu yapı, giyilebilir uygulamalar için dört bantlı soğurma davranışı sağlayan ilk tekstil soğurucudur. Bu tasarım, ekranlama özellikleri sayesinde elektromanyetik dalgaların zararlı etkilerinden kullanıcıyı korumaktayken, elektromanyetik saydamlık özellikleriyle de askeri uygulamalarda kullanılabilir.
- Son olarak, asimetrik X-şekilli rezonatöre PIN ve varaktör diyotlar entegre edilerek frekansı kontrol edilebilir çift bantlı soğurucular önerilmiştir. Önerilen yapı, diyotlara uygulanan gerilime bağlı olarak tek veya çift bant davranış sergilemekte ve her bir frekans bandı birbirinden bağımsız olarak kontrol edilmektedir. Böylece önerilen tasarım frekansı, geleneksel soğurucular gibi üretildikten sonra sabit kalmamakta ve soğurucunun kullanım alanları genişlemektedir. Ayrıca, bu sayede dar bant genişliğinin sebep olduğu dezavantajlara da çözüm olabilmektedir.

Bölüm 5'te; tez çalışmasında elde edilen bulgular önceki çalışmalarla kıyaslanarak, tezin literatüre katkılarından bahsedilmiştir.

Bölüm 6'te; tez çalışması boyunca referans alınan ve yararlanılan kaynaklara yer verilmiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

Bu tez çalışmasında, mikrodalga uygulamaları için rezonatör tabanlı soğurucu tasarım ve üretim süreçlerinde, rezonatör olarak YHR ve ELC gibi metamalzeme elemanları ve X-Şekilli rezonatör kullanılmıştır. Dolayısıyla, bu bölümde öncelikle metamalzeme teorisinden kısaca bahsedilmiştir. Daha sonra soğurucunun çalışma mekanizmasını anlamak için soğurma teorisi incelenmiştir. Son olarak, literatüre sunulan rezonatör tabanlı soğurucu çalışmaları özetlenmiştir.

2.1. Metamalzeme Teorisi

Metamalzemeler tasarım frekanslarında alışılmışın dışında elektromanyetik özellikler gösterebilen yapay malzemelerdir. Metamalzeme teorisi ilk olarak Veselago tarafından 1968 yılında ortaya atılmıştır (Veselago 1968). Her ne kadar metamalzeme teorisi 1968 yılında ortaya atılsa da; deneysel ortamda, ilk defa Shelby ve arkadaşları tarafından, 2001 yılında gerçekleştirilmiştir (Shelby vd. 2001). Bu yapay malzemeler negatif kırılma indisi, negatif manyetik geçirgenlik, ve negatif elektriksel geçirgenlik ve ters Doppler etkisi gibi davranışlar sergileyebilmektedirler. Metamalzemelerin bir diğer ismi de solak malzemelerdir ve bunun sebebiyse elektrik alan vektörü $\mathbf{E}$, manyetik alan $\mathbf{H}$ ve dalga vektörünün $\mathbf{k}$ sol el kuralı ile belirlenmesidir. Solak malzemelerde Poynting vektörü $\mathbf{S}$ ve dalga vektörü $\mathbf{k}$ birbirlerine ters yönlüdür. Bu malzemelerde yayılan dalganın grup hızı ve faz hızı birbirine zıt yönlüdür.

Elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik parametreleri, elektromanyetik dalganın ortamdaki yayılma özelliğini belirlemektedir. Bu iki parametrenin aynı anda pozitif ya da negatif olmasının, elektromanyetik dalga yayılımına etkisini yorumlamak amacıyla Faraday ve Amper kanunlarının düzlemsel formu incelenmiştir.

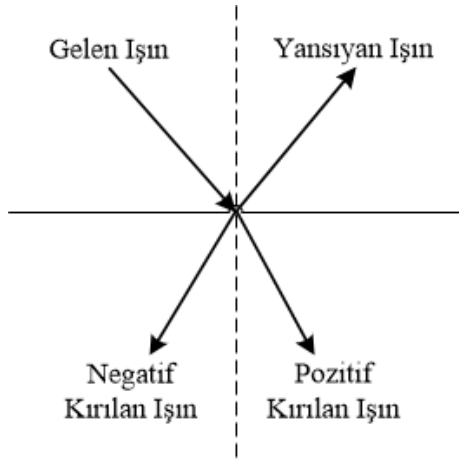
$$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = \omega \mu \mathbf{H} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H} = -\omega \varepsilon \mathbf{E} \quad (2.2)$$

Burada $\mathbf{k}$ dalga numarasını, $\mathbf{E}$ elektrik alan şiddetini, ω açısal frekansı, μ manyetik geçirgenliği, $\mathbf{H}$ manyetik alan şiddetini ve ε elektriksel geçirgenliği ifade etmektedir. Eşitlik (2.1) ve (2.2)'de verilen Faraday ve Amper yasalarına göre ε ve μ değerleri aynı anda pozitif olursa $\mathbf{k}$, $\mathbf{E}$ ve $\mathbf{H}$ sağ el kuralı ile belirlenir. Ancak ε ve μ aynı anda negatif olursa $\mathbf{k}$, $\mathbf{E}$ ve $\mathbf{H}$ sol el kuralı ile belirlenir.

Bir ortamın kırılma indisi n , ortamın ε ve μ parametreleri ile ilişkilidir. Eşitlik (2.3)'e göre ε ve μ değerlerinin aynı anda pozitif ya da negatif olması, n değerinin işaretinde bir değişikliğe sebep olmaz. Ancak malzemeler bu işaret değişikliğinden etkilenirler. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, normal malzemelerde pozitif kırılma oluşurken, solak malzemelerde negatif kırılma meydana gelmektedir.

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

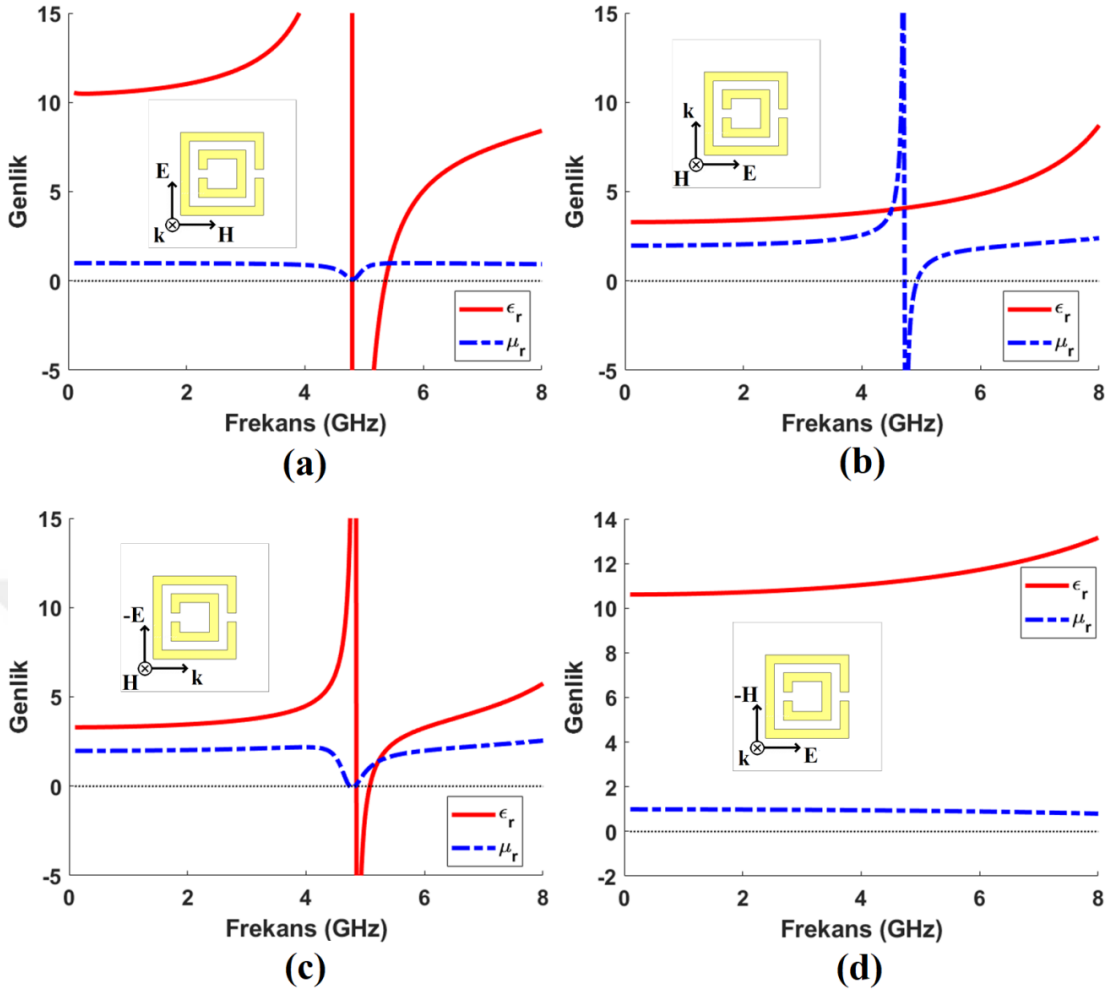


Şekil 2.1. Malzemenin normal veya solak olmasına göre, gelen ışının kırılması

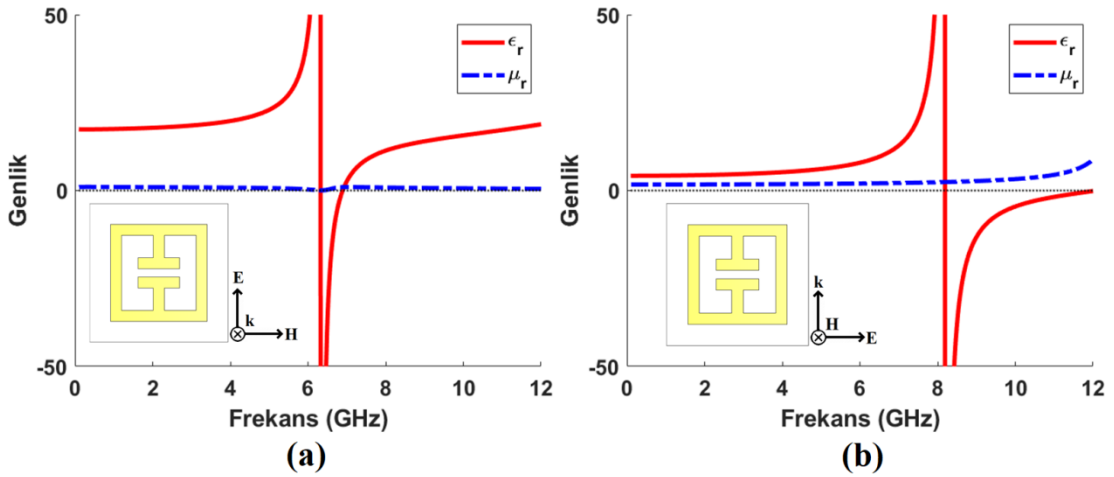
Eşitlik (2.4)'de verilen denkleme göre Poynting vektörü $\mathbf{S}$, ϵ ve μ parametrelerinden bağımsızdır. Bir başka ifadeyle $\mathbf{S}$, her zaman sağ kuralı ile belirlenmektedir. Bu durumda, solak malzemelerde $\mathbf{S}$ ve $\mathbf{k}$ birbirine zıt yönlüdür.

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (2.4)$$

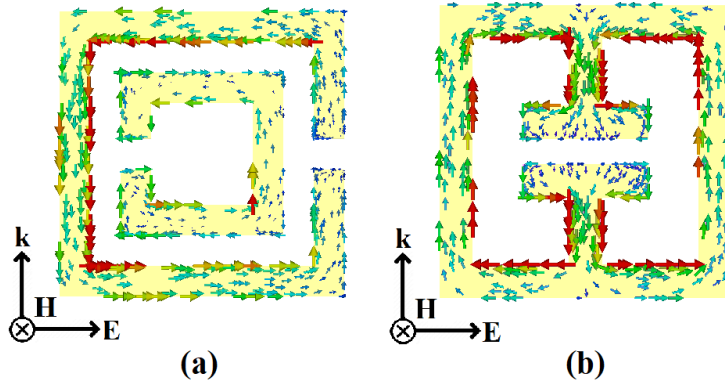
Metamalzeme tasarımı için yarık halkalı rezonatör (YHR) ve elektriksel-LC rezonatör (ELC) yapıları sıklıkla kullanılmaktadır. Farklı tasarım geometrilerine sahip olan YHR yapıları, ilk defa Pendry ve arkadaşları tarafından 1999 yılında literatüre sunulmuştur (Pendry vd. 1999). Şekil 2.2'de gösterildiği gibi, bu yapılar uyarım şekline göre negatif elektriksel geçirgenlik veya negatif manyetik geçirgenlik sağlayabilmektedir (Baena vd. 2005). 2006 yılında Schuring ve arkadaşları tarafından literatüre sunulan ELC rezonatör de, uygun uyarımda pozitif ya da negatif elektriksel geçirgenlik oluşturabilir. Ancak, Şekil 2.3'de görüldüğü üzere ELC yapısı her hangi bir uyarım altında negatif manyetik geçirgenlik sağlamamaktadır (Schuring vd. 2006). YHR ve ELC yapıları, uygun biçimde elektromanyetik dalga ile uyarıldıkları zaman, dairesel yüzey akım dağılımı ve buna bağlı olarak da LC rezonans oluşturabilmektedirler (Turkmen vd. 2012). Şekil 2.4'te, her iki yapı için, dairesel yüzey akım dağılımları gösterilmektedir.



Şekil 2.2. YHR yapısının farklı uyarımlar altında ϵ ve μ sonuçları: **a)** elektrik uyarım; **b)** manyetik uyarım; **c)** elektrik ve manyetik uyarım ve **d)** normal uyarım



Şekil 2.3. ELC yapısının farklı uyarımlar altında ϵ ve μ sonuçları: **a)** elektrik uyarım; ve **b)** manyetik uyarım



Şekil 2.4. a) YHR yapısı için yüzey akım dağılımları; ve **b)** ELC rezonatör için yüzey akım dağılımları

2.2. Soğurma Teorisi

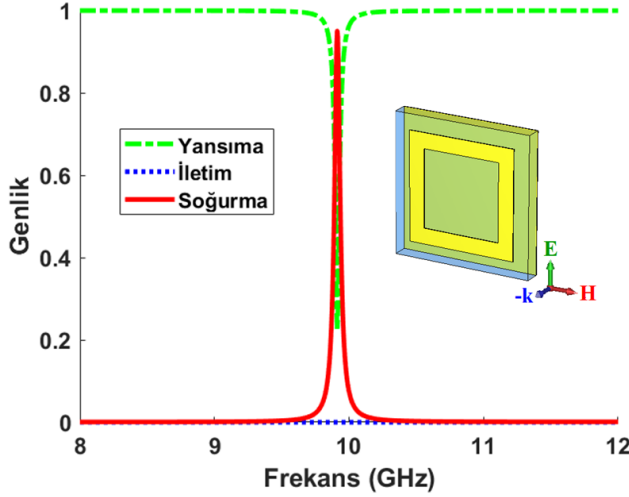
Rezonatör tabanlı soğurucular genellikle rezonatör, dielektrik taban malzemesi ve toprak düzlemden oluşan üç katmanlı yapılardır. Bu yapılar belirli frekans aralığında yüksek oranda elektromanyetik dalga soğurabilmekte ve böylelikle yansıma, iletim ve saçılma gibi dalga yayılımlarını etkisiz kılabilir. Yansıma, iletim ve soğurma arasındaki bu ilişki, matematiksel olarak Eşitlik (2.5)'de ifade edilmektedir. Burada S_{11} ve S_{21} sırasıyla, yansıma ve iletimi olarak adlandırılırlar. Denklemden de anlaşılacağı gibi, yansıma ve iletim hiç olmadığında mükemmel yani %100 soğurma gerçekleşmektedir.

$$\text{soğurma} = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (2.5)$$

Rezonatör tabanlı soğurucuların soğurma davranışını açıklamak için etkin ortam teorisi, iletim hattı modeli ve girişim teorisi incelenmiştir.

2.2.1. Etkin Ortam Teorisi

Bu bölümde, rezonatör tabanlı soğurucuların soğurma davranışı, etkin ortam teorisi ile açıklanmıştır. Bu amaçla, benzetim ortamında bir soğurucu tasarlanmış ve bu tasarım üzerinden incelemeler yapılmıştır. Örnek soğurucu yapısı kare halka rezonatör, dielektrik taban malzemesi ve toprak düzlemden oluşmaktadır. Örnek soğurucunun şematik görüntüsü ile birlikte yansıma, iletim ve soğurma sonuçları Şekil 2.5'te verilmiştir. Verilen şekle göre, 9.91 GHz'de yaklaşık %95 oranında soğurma gözlemlenmektedir.



Şekil 2.5. Örnek soğurucunun şematik görüntüsü ile birlikte yansım, iletim ve soğurma sonuçları

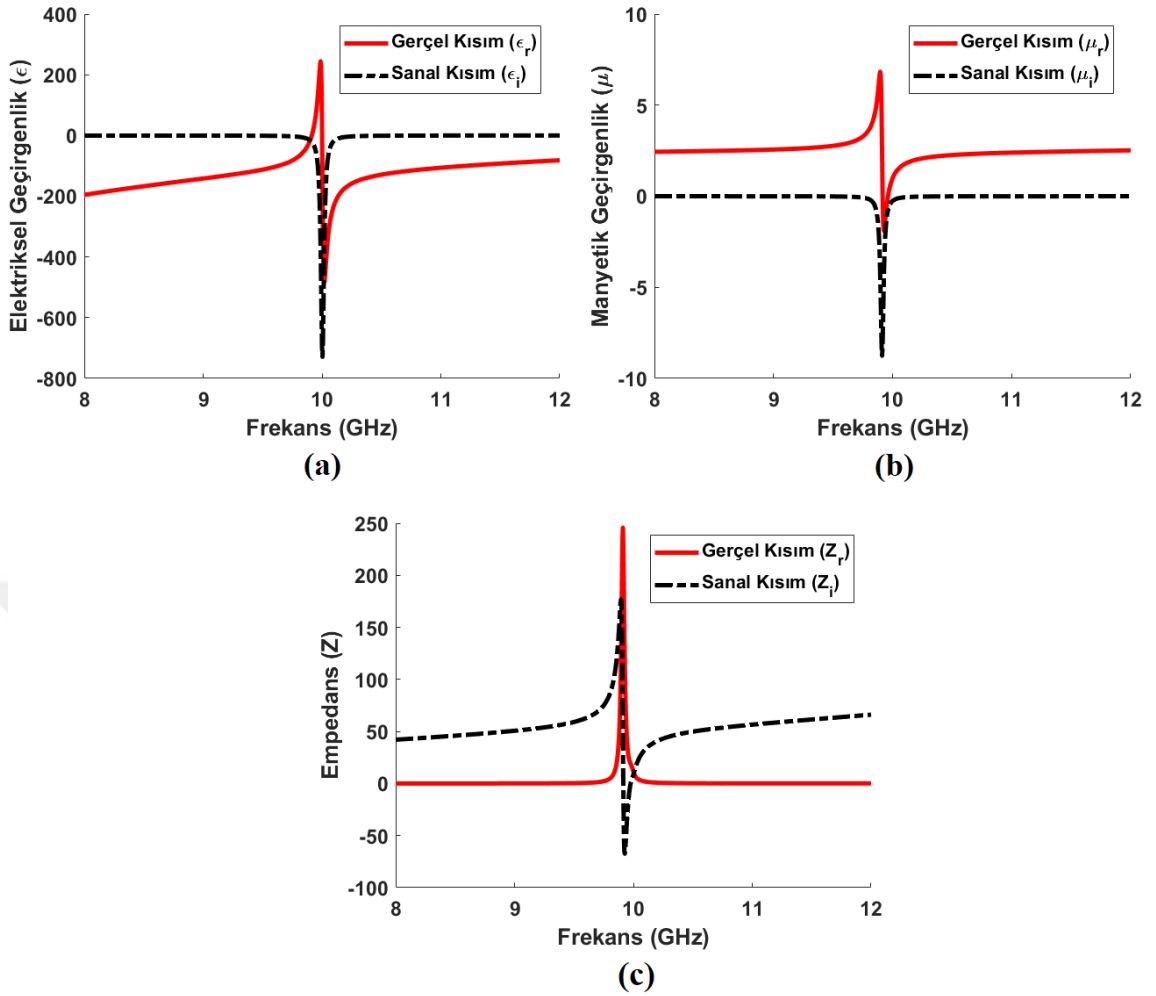
Etkin ortam teorisi için, elektriksel geçirgenlik $\mathcal{E}$, manyetik geçirgenlik μ 'nin ve empedansı Z_A 'nın bilinmesi gereklidir. Şekil 2.6'da görüldüğü üzere, soğurucunun 9.91 GHz'de $\mathcal{E}$ ve μ değerleri sırasıyla $-2.15 - 20.5j$ ve $2.35 + 8.76j$ 'dir. $\mathcal{E}$ ve μ değerleri kullanılarak, malzemenin etkin empedansı Eşitlik (2.6)'daki gibi hesaplanabilmektedir. Bu eşitlikte, Z_A malzemenin etkin empedansıdır; $\mathcal{E}_0$ ve μ_0 ise sırasıyla, serbest uzayın elektriksel ve manyetik geçirgenliğidir. $\mathcal{E}_r$ ve $\mathcal{E}_i$ malzemenin elektriksel geçirgenliğinin gerçel ve sanal kısmını temsil etmektedir. μ_r ve μ_i sırasıyla, malzemenin manyetik geçirgenliğinin gerçel ve sanal kısımları olarak adlandırılmaktadır (Duan vd 2019).

$$Z_A = \sqrt{\frac{\mu_0(\mu_r + j\mu_i)}{\epsilon_0(\epsilon_r + j\epsilon_i)}} \quad (2.6)$$

Şekil 2.27'de görüldüğü üzere, soğurucunun 9.91 GHz'deki etkin empedansı $Z_A = 245.9 + 45.51j \Omega$ 'dur. Bu empedans değeri, serbest uzay empedansı Z_0 'a (377Ω) en yakın empedanstır. Eşitlik (2.7)'dan anlaşılacağı üzere, eğer bir soğurucunun empedansı Z_A , serbest uzay empedansı Z_0 ile uyumlu olursa, yansımaya sıfıra olacaktır. Ayriyeten, metalik toprak düzlem nedeniyle, iletim de sıfırdır ($|S_{21}| = 0$). Bunun sonucunda gelen elektromanyetik dalganın hepsi soğurulacaktır ve soğurma denklemi Eşitlik (2.8) ile ifade edilebilir (Duan vd 2019).

$$|S_{11}| = \left| \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \right| \quad (2.7)$$

$$\text{soğurma} = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 = 1 - \left| \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \right|^2 \quad (2.8)$$



Şekil 2.6. Örnek soğurucunun etkin ortam parametreleri; **a)** elektriksel geçirgenlik ϵ ; ve **b)** manyetik geçirgenlik μ **c)** empedansı Z_A

Etkin ortam teorisiyle, rezonatör tabanlı soğurucuların çalışma prensibi, malzeme yönünden basit şekilde anlaşılabilmektedir. Ancak bu teoride, soğurucu tek bir yapı gibi ele alınmaktadır ve her bir katmanın etkisini açıklayamamaktadır. Başka bir ifadeyle, iletim hattı modeli ve girişim teorisine kıyasla, etkin ortam teorisi rezonatör tabanlı soğurucuların fiziksel davranışı hakkında daha az bilgi verir (Duan vd 2019).

2.2.2. İletim Hattı Modeli

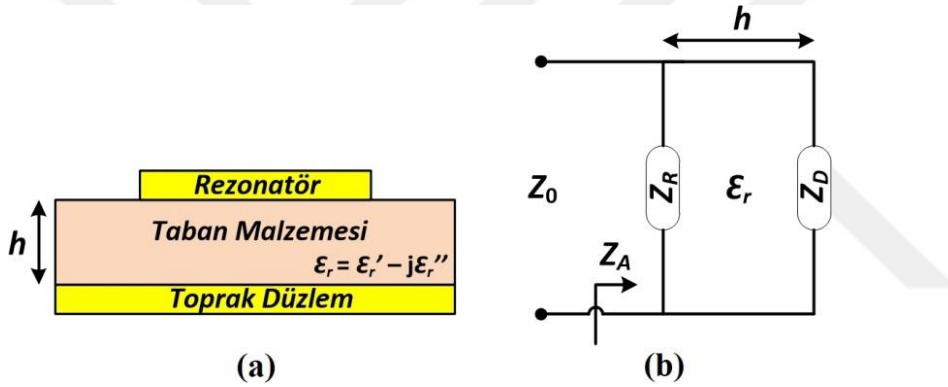
Rezonatör tabanlı soğurucular, Şekil 2.7a'da görüldüğü gibi, genellikle topraklanmış dielektrik taban malzemesi ve rezonatörden oluşmaktadır. Bu yapıların çalışma prensibi, iletim hattı modeliyle açıklanabilmektedir. Modele göre, frekansın bir fonksiyonu olan soğurucu empedansı Z_A , havanın karakteristik empedansı Z_0 ile uyumlu hala geldiğinde, Eşitlik (2.7)'de anlaşılabileceği gibi, neredeyse hiç yansıma olmayacaktır. Soğurucu empedansı Z_A , Eşitlik (2.9) ile hesaplanmaktadır. Bu denklemde, Z_R ve Z_D sırasıyla, rezonatör ve topraklanmış taban malzemesinin empedanslarıdır. Şekil 2.7b'de görüldüğü üzere, bu iki yapı bir birine paralel bağlıdır (Sun vd. 2012).

$$Z_A = \frac{Z_R Z_D}{Z_R + Z_D} \quad (2.9)$$

Rezonatör empedansı Z_R , rezonatörün toplu eleman eş değer devre empedansıdır. Bu eş değer devre, rezonatörün şekline ve tasarım parametresine göre değişiklik göstermektedir. Topraklanmış taban malzemesinin empedansı Z_D , Eşitlik (2.10) ile edilmektedir. Taban malzemesinin toprak düzlemlerle kaplanması sebebi ise dalga iletimini engellemektir ($|S_{21}| = 0$). Burada, f frekans, c ışık hızı, h taban malzemesinin kalınlığı ve ϵ_r taban malzemesinin elektriksel geçirgenliğidir. Bu kısımdaki açıklamalara istinaden soğurma Eşitlik (2.11) ile hesaplanmaktadır (Sun vd. 2012).

$$Z_D = j \frac{Z_0 \tan\left(\frac{2\pi f}{c} h \sqrt{\epsilon_r}\right)}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.10)$$

$$\text{soğurma} = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 = 1 - \left| \frac{\frac{Z_R Z_D}{Z_R + Z_D} - Z_0}{\frac{Z_R Z_D}{Z_R + Z_D} + Z_0} \right|^2 \quad (2.11)$$



Şekil 2.7. a) Rezonatör tabanlı soğurucunun yandan şematik görünümü; **b)** rezonatör ve topraklanmış taban malzemesinin devre modeli

Mükemmel bir soğurma davranışı elde etmek için, yansıma sıfır olmalıdır. Bu kapsamda, serbest uzay empedansı ve soğurucu empedansı eşleşmelidir. Soğurucunun frekansı ve empedansı, rezonatörün şekli ve tasarım parametreleri ile ayarlanabilmektedir. Aynı zamanda taban malzemesinin tasarım parametreleriyle de, soğurucu frekansı ve empedansı değiştirilebilmektedir. Kısacası mükemmel soğurma için; rezonatör şekli, rezonatörün tasarım parametreleri ve taban malzemesinin parametreleri en uygun hale getirilmelidir. Diğer yandan, iletim hattı teorisi sadece normal geliş durumunda kullanılabilir. Eğik geliş durumu için uygun değildir (Sun vd. 2012).

2.2.3. Girişim Teorisi

Bu kısımda, rezonatör tabanlı soğurucuların çalışma mekanizmasını anlamak için, bir diğer model olan girişim teorisi incelenmiştir. Bu teori normal ve eğik geliş koşullarında uygulanabilmektedir. İlk olarak Şekil 2.8'de gösterilen Katman 1'in sıfır

kalınlığa sahip olduğunu farz edelim. Burada $S_{11} = |S_{11}|e^{j\theta_{11}}$ Katman 1 için Bölge 1'den Bölge 1'e yansıma katsayısını ifade eder. $S_{21} = |S_{21}|e^{j\theta_{21}}$ Katman 1 için Bölge 1'den Bölge 2'e iletim katsayısını temsil etmektedir. $S_{12} = |S_{12}|e^{j\theta_{12}}$ Katman 1 için Bölge 2'den Bölge 1'e iletim katsayısı olarak adlandırılmaktadır. Son olarak, $S_{22} = |S_{22}|e^{j\theta_{22}}$ Katman 1 için Bölge 2'den Bölge 2'e yansıma katsayısıdır. Toprak düzleminden kaynaklı, Katman 1 için Bölge 1'den Bölge 1'e toplam yansıma katsayısı Eşitlik (2.12)'de verilmiştir (Wanghuang vd. 2013).

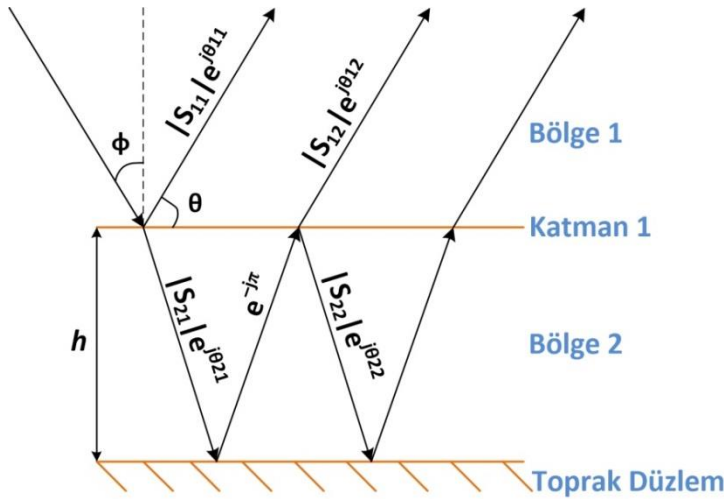
$$\begin{aligned}
 S_{11toplam} &= S_{11} + S_{12}e^{-j\beta}e^{-j\pi}e^{-j\beta}S_{21} + S_{12}e^{-j\beta}e^{-j\pi}e^{-j\beta}(S_{22}e^{-j\beta}e^{-j\pi}e^{-j\beta})^1S_{21} \\
 &\quad + S_{12}e^{-j\beta}e^{-j\pi}e^{-j\beta}(S_{22}e^{-j\beta}e^{-j\pi}e^{-j\beta})^2S_{21} + \dots \\
 &= S_{11} + S_{12}e^{-j(2\beta+\pi)}S_{21} \sum_{n=0}^{\infty} (S_{22}e^{-j(2\beta+\pi)})^n \\
 &= S_{11} + \frac{S_{12}e^{-j\beta}e^{-j\pi}e^{-j\beta}S_{21}}{1-S_{22}e^{-j\beta}e^{-j\pi}e^{-j\beta}} \\
 &= |S_{11}|e^{j\theta_{11}} + \frac{|S_{12}||S_{21}|e^{j(\theta_{12}+\theta_{21}-2\beta-\pi)}}{1-|S_{22}|e^{j(\theta_{22}-2\beta-\pi)}} \quad (2.12)
 \end{aligned}$$

Burada, $\beta=kd$ karmaşık yayılma fazı ve k Bölge 2'nin dalga numarasıdır. d , Katman 1'den Toprak Düzleme doğru ilerleyen dalganın yayılma mesafesidir ve Eşitlik (2.13) ile hesaplanmaktadır. Eşitlik (2.12)'de verilen $\mathcal{E}_1$ ve $\mathcal{E}_2$, sırasıyla Bölge 1 ve Bölge 2'nin elektriksel geçirgenlikleridir. ϕ , gelen dalganın normal ile yaptığı açıdır. h ise Katman 1 ile toprak düzlem arasındaki en kısa mesafedir. Ayrıca, önerilen bu modelin pasif olmasından dolayı, S_{21} ve S_{12} birbirine eşittir ($S_{21} = S_{12}$). Bu durumda, Eşitlik (2.12) sadeleştirilirse toplam yansıma Eşitlik (2.14)'de son halini alır. Bununla beraber, metalik toprak düzleminden dolayı iletim olmayacaktır. Girişim teorisine göre soğurma Eşitlik (2.15) ile hesaplanmaktadır (Wanghuang vd. 2013).

$$d = h \cos \left(\sin^{-1} \left(\sin \left(\frac{\phi}{\sqrt{\mathcal{E}_2/\mathcal{E}_1}} \right) \right) \right) \quad (2.13)$$

$$S_{11toplam} = |S_{11}|e^{j\theta_{11}} + \frac{|S_{12}|^2 e^{j(2\theta_{12}-2\beta-\pi)}}{1-|S_{22}|e^{j(\theta_{22}-2\beta-\pi)}} \quad (2.14)$$

$$soğurma = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 = 1 - |S_{11toplam}|^2 \quad (2.15)$$



Şekil 2.8. Normal ve eğik gelen elektromanyetik dalga için, çoklu yansıma ve girişim teorisi modeli

Girişim teorisine göre, rezonatör tabanlı soğurucunun soğurma davranışı, yalnızca rezonatörün saçılma karakteristikleriyle ilgili olduğunu görülmektedir. Toprak düzlemin ana katkısı ise elektromanyetik dalgaları yansıtmaktır (Wanghuang vd. 2013).

2.3. Rezonatör Tabanlı Soğurucular Üzerine Literatür Özeti

Landy ve arkadaşları, 2008 yılında benzetim ortamında 11.5 GHz’de %96 oranında soğurma sağlayan, “Mükemmel Metamalzeme Soğurucu” isimli çalışmayı literatüre sunmuşlardır. Literatüre önerilen bu çalışmanın birim hücresi sırasıyla elektriksel halka rezonatör, dielektrik taban malzemesi ve mikroşerit hattı olmaktadır. Bu tasarım yüksek soğurma oranına ve dalga boyundan küçük boyuta sahip olsa da bant genişliği oldukça dardır. Landy vd. önerdikleri bu çalışmayla birlikte, rezonatör tabanlı soğurucular yaygın bir araştırma konusu olmuştur. Bu bölümde, tez kapsamında yapılan rezonatör tabanlı çalışmalar ile ilgili, literatür özetlerine yer verilmiştir:

Çift ya da çok bantlı soğurma davranışı elde etmek için, topraklanmış dielektrik taban malzemesi üzerine farklı rezonans frekanslarına sahip benzer şekilli rezonatörler yerleştirilerek, soğurucu tasarımları önerilmiştir. Başka bir ifadeyle, eklenen bu rezonatörlerin şekilleri aynı ancak boyutları farklıdır ve bu sebeple birden fazla frekansta soğurma gözlemlenmektedir. (Deng vd. 2018; Guo vd. 2013; Liv d. 2011; Tak ve Choi 2017; Zhai vd. 2013; Zhang vd. 2015; Zheng vd. 2013).

Arka yüzeyi metalik toprak düzlemle kaplanmış dielektrik taban malzemesinin ön yüzüne farklı şekil ve boyutta çok sayıda rezonatör yerleştirilerek çift veya çok bantlı soğurucular elde edilmiştir (Ayop vd. 2017; Deng vd. 2020; Hoque vd. 2018; Ji vd. 2019; Kaur and Singh, 2020; Mishra vd. 2019; Shater and Zarifi, 2017).

Çok sayıda katman kullanımıyla da çift veya çok bant soğurucu literatüre sunulmuştur. Bu tasarımlarda genellikle, toprak düzlem ile rezonatör arasındaki mesafe artıkça kapasitans değeri azalmaktadır; dolayısıyla rezonatörün oluşturduğu soğurma frekansı da artmaktadır. Böylece en alttaki katman (toprak düzleme en yakın katman) en düşük soğurma frekansını oluştururken üstteki katmanlar da diğer soğurma frekanslarını meydana getirir (Bhattacharyya vd. 2015; Ghosh vd. 2015; Ozturk ve Yilmaz 2016; Tran ve Phuong 2018). Tek katmanlı soğurucu dizisinin belirli bir bölgesine dielektrik malzeme konumlandırılarak da çift ya da çok bantlı soğurma davranışı elde edilebilmektedir (Zhu vd. 2012).

Çift bantlı soğurucu tasarımında bir diğer yöntem ise asimetrik yapıların kullanılmasıdır. Bu yapılar simetrikten tek bantlı soğurma sergilemektedir. Lakin simetri bozuldukça, çift bantlı soğurma davranışı ortaya çıkmaktadır. Asimetri artıkça, tüm frekans bantları aynı anda değişmekte ve soğurma tepeleri arasındaki mesafe artmaktadır. Yapışık kesik-tel-çiftinin dikey kaydırılması ve asimetrik çapraz şekilli rezonatörlerin kullanılması asimetrik yapılara örnektir (Al-Badri vd. 2018; Chen vd. 2012; Chen vd. 2016).

Bilindiği üzere varaktör diyotlar, üzerine uygulanan gerilime bağlı olarak kapasitesi değişen devre elemanlarıdır ve böylece frekans kontrol devrelerinde kullanılabilirler. Çalışma frekansının kontrol edilmesi için, varaktör diyotların kullanıldığı devrelerden birisi de soğuruculardır. Soğurucuya entegre edilen varaktörlere, farklı gerilim değerleri uygulanarak soğurma frekansı değiştirilebilmektedir. (Ghosh and Srivastava 2017a; Xu vd. 2018; Yuan vd. 2015; Zhao vd. 2013; Zhu vd. 2015). Soğurucuların çalışma frekansını anahtarlama veya kontrol için kullanılan devre elemanlarından bir diğeri de PIN diyotlardır. Bilindiği gibi, PIN diyotlar gerilim uygulanınca kısa devre; gerilim uygulanmaz ise açık devre gibi davranmaktadırlar. Böylece soğurucuya monte edilen PIN diyota gerilim uygulanıp uygulanmamasına göre, soğurma frekansı anahtarlanabilmektedir (Ghosh and Srivastava 2017b; Xu and Sonkusale 2013; Zheng vd. 2017).

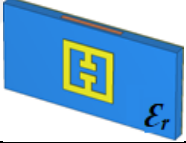
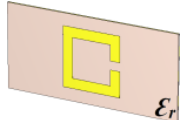
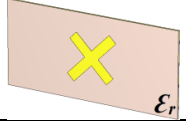
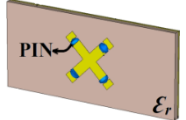
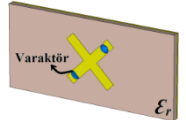
Günlük kıyafetlerin veya aksesuarların bir parçası olarak tasarlanabilen giyilebilir soğurucular, sağlık, güvenlik ve askeri uygulamalara kadar geniş bir aralıkta kullanılması düşünülmektedir. Elektromanyetik ekranlama veya saydamlık konusunda ön plana çıkan tekstil tabanlı tasarımlar araştırmacılar için popüler bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu kapsamda, bir adet rezonatörden oluşan tek bantlı bir tekstil soğurucular tasarlanmıştır (Almirall vd. 2022; Lee vd. 2017; Yang vd. 2022). Bir başka çalışmada farklı boyutlarda ve eş merkezli iki adet kare halka rezonatör kullanılarak çift bant tekstil tabanlı soğurucu önerilmiştir (Tak and Choi, 2016). Ayrıca geniş bant performanslı tekstil soğurucu tasarımları da literatüre bildirilmiştir (Singh vd. 2019; Singh vd. 2021).

Yüksek soğurma oranı ve yüksek kalite faktörüne sahip olan rezonatör tabanlı soğurucular, dielektrik sabiti ve kalınlığın bir fonksiyonu olan kapasitenin değişimine karşı oldukça duyarlıdır. Bu sebeple, rezonatör tabanlı soğurucular sensor uygulamaları için çekici bir hale gelmiştir. Dielektrik sabitinin değişimine bağlı sıcaklık, nem, konsantrasyon gibi ortam parametrelerinin ve kalınlık değişimine bağlı basıncın algılandığı, farklı topolojilere sahip sensor uygulamaları mevcuttur. Shukoor ve arkadaşları, toprak düzlem ve rezonatör arasına FR4 yerleştirdiklerinde soğurma frekansı 14.03 GHz iken; Arlon AD300A yerleştirdiklerinde soğurma frekansının 14.54 olduğunu gözlemlemişlerdir. Numunenin araya yerleştirildiği bu tür çalışmalarda, rezonatör ve toprak düzlemi oluşturan katmanların ayrı ayrı üretilmesi gerekmektedir (Bakir vd. 2018; Hakim vd. 2021; Hoque vd. 2018; Shukoor vd. 2021). Cinar ve Basaran, soğurucu üzerine direkt Rogers 3006 dielektrik malzeme konumlandırıdıklarında önerdikleri yapı 2.90 GHz’de soğurma gerçekleştirirken; Rogers 3010 yerleştirdiklerinde 2.79 GHz’de soğurma elde etmişlerdir. Numunenin direkt soğurucu üzerine yerleştirildiği bu tarz çalışmalar daha çok katı malzemelerin analizine uygundur (Cinar ve Basaran 2022; Hakim vd. 2022; Saadeldin vd. 2019). Yoo ve arkadaşları, sıvı malzemelerin analizini yapmak için, mikroakışkan kanallı soğurucu tasarlamışlardır. Bu kanaldan etanol ve musluk suyu geçirdiklerinde sırasıyla 11.46 ve 10.54 GHz soğurma frekansı elde etmişlerdir. Sıvı analizleri için önerilen bu tarz sensorların tasarımları oldukça karmaşıktır (Huang vd. 2019; Kim vd. 2016; Yoo vd. 2016).

3. MATERYAL VE METOD

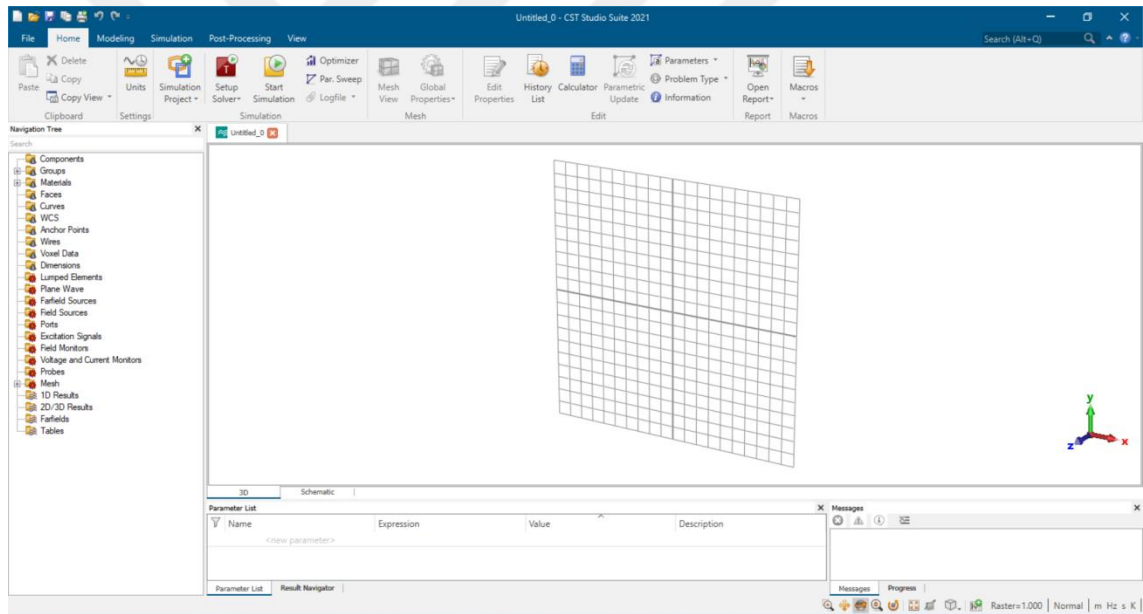
Bu tezde, rezonatör tabanlı çift/çoklu bant soğurucu tasarımı ve sensor uygulamaları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Tasarımlar, topraklanmış dielektrik taban malzemesi üzerine frekans belirleyici eleman olarak kullanılan rezonatörler yerleştirilerek oluşturulmuştur. Rezonatör olarak kullanılan yarık halka ve elektrik-LC yapıları metamalzeme tasarımlarında sıklıkla tercih edilmektedir. Minyatür boyut elde etmeyi sağlayan bu metamalzeme rezonatörleri, dielektrik sabiti değişimine karşı oldukça hassas olduklarından dolayı, sensor uygulamalarında kendilerine yer edinmiştir. Tez çalışmasında kullanılan bir diğer frekans belirleyici eleman ise X-şekilli rezonatördür. Bu X-şekilli rezonatörün kol boyları birbirine eşitken simetriktir ve tek bir bantta soğurma sağlarken; kol boyları birbirinden farklı olduğunda asimetriktir ve çift bantlı soğurma sergilemektedir. Tasarımların şematik görünüşleri ve kullanım özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Tasarımların şematik görünüşleri ve kullanım özellikleri

Tasarım		Çift/ çoklu bant davranış	Sensor Uygulaması	Frekans Kontrolü
Rezonatör	Konfigurasyon			
Metamalzeme		✓	✗	✗
		✗	✓	✗
		✗	✓	✗
Asimetrik X-Şekilli Rezonatör		✓	✓	✗
		✓	✗	✗
		✓	✗	✓
		✓	✗	✓

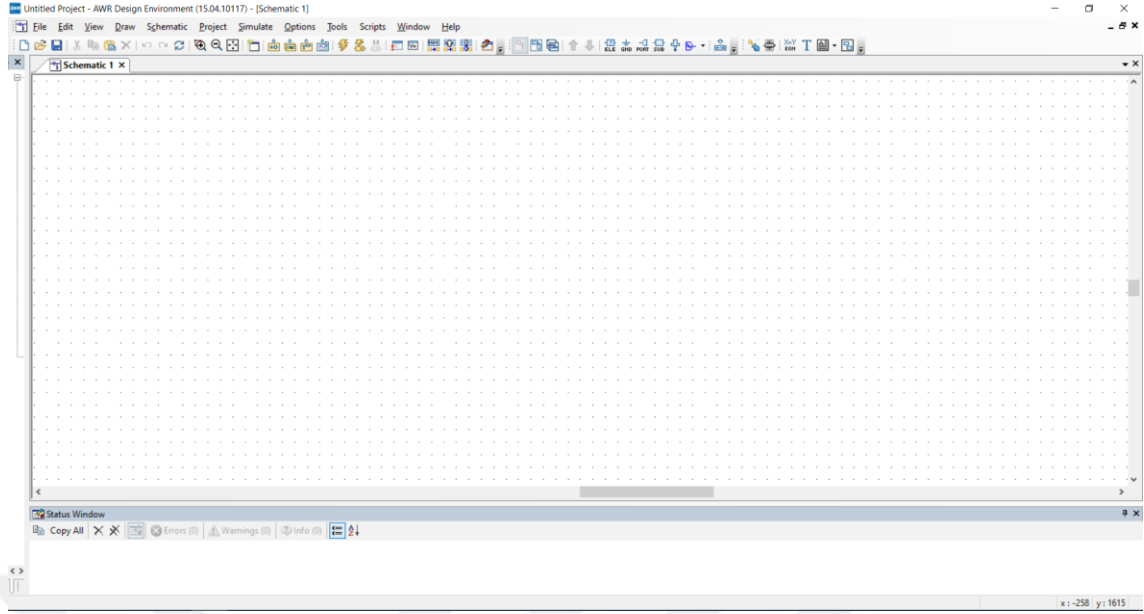
Tez çalışmasında kullanılan CST Studio Suite, AWR Design Environment, MATLAB gibi benzetim yazılımlarından ve vektör ağ analizörü, dalga kılavuzu gibi ölçüm ekipmanlarından kısaca bahsedilmiştir.

Tez süresinde, soğurucu tasarım ve analizleri CST Studio Suite 2021 sürümü ile yapılmıştır ve tasarım arayüzü Şekil 3.1’de verilmiştir. CST Studio Suite, elektromanyetik komponentleri tasarlayıp analiz eden üç boyutlu elektromanyetik analiz yazılımıdır. CST Studio Suite ile elektromanyetik bileşenlerin (anten, filtre vd.) performansı ve verimliliği, elektromanyetik uyumluluk ve girişim (EMC/EMI), insan vücudunun elektromanyetik alanlarına maruz kalması gibi konular analiz edilebilmektedir. CST Studio Suite, genellikle üniversitelerde ve mühendislik şirketlerinde kullanılmaktadır. Araştırma geliştirme süreçlerini kolaylaştırmakta ve maliyetleri düşürmektedir. Bu yazılım sayesinde tasarım performansları en iyi hale getirilebilir, tasarım aşamasındaki muhtemel problemler benzetim aşamasında saptanıp ortadan kaldırılabilir, ekstra üretimler azaltılabilir ve deneysel başarısızlıklar en aza indirilebilir (Anonymous 1).



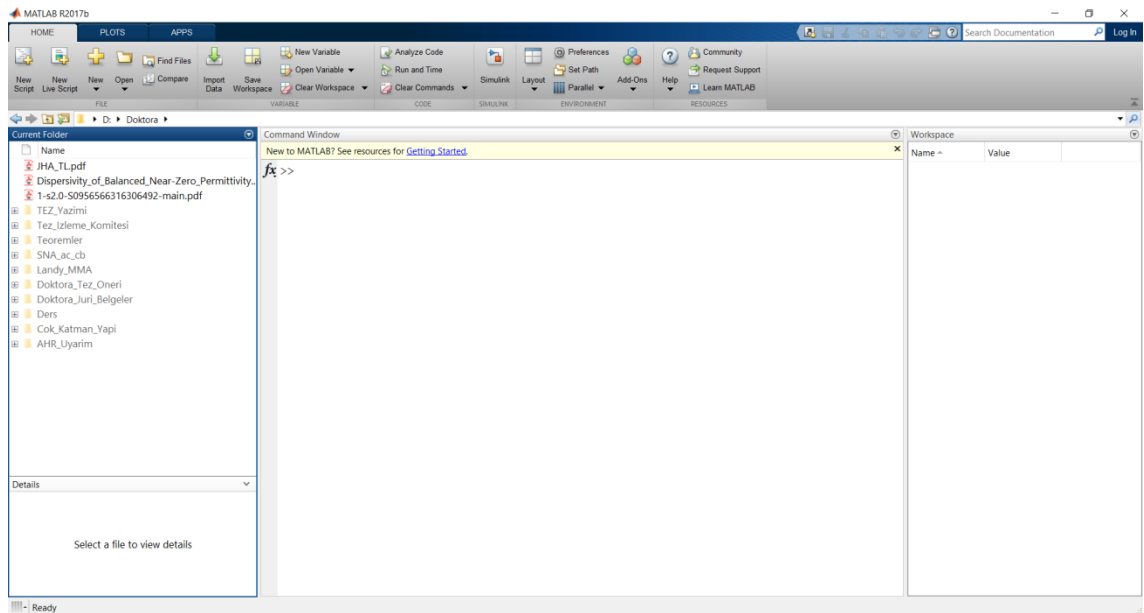
Şekil 3.1. CST Studio Suite 2021 sürümünün tasarım arayüzü

Tez kapsamında, ilgili tasarımın eş değer devre modeli AWR Design Environment 15 yazılımı ile elde edilmiştir ve yazılıma ait tasarım arayüzü Şekil 3.2’de verilmiştir. AWR Design Environment yazılımı, RF/mikrodalga mühendislerine, yüksek frekanslı devre ve sistemlerin elektromanyetik benzetim ve tasarımlarına olanak sağlamaktadır. Yazılım, tasarım süreçlerinde güvenilir ve en iyi sonuçları elde etmek için, devrelerin davranışlarını tüm yönleriyle ele almaktadır (Anonymous 2).



Şekil 3.2. AWR Design Environment 15 sürümünün tasarım penceresi

Tez boyunca, nümerik ve deneysel yöntemlerle elde edilen S-parametreleri MATLAB R2017b yazılımında işlenerek soğurma, elektriksel geçirgenlik, manyetik geçirgenlik ve empedans gibi performans verileri hesaplanmıştır. MATLAB, bir programlama dili ve çok modellenmiş sayısal hesaplama yazılımıdır. MATLAB veri ve fonksiyon çizme, matris işleme, kullanıcı arayüzü oluşturma, algoritma uygulama gibi olanaklar sağlamaktadır. MATLAB ekonomi, bilim ve mühendislik gibi çeşitli alanlarda tercih edilmektedir. MATLAB, genellikle akademide, araştırma kurumlarında ve endüstriyel şirketlerde kullanılmaktadır (Anonymous 3).



Şekil 3.3. MATLAB R2017b sürümünün tasarım arayüzü

CST Studio Suite Benzetim ortamında tasarlanan soğurucu yapılarını doğrulamak amacıyla, tasarımlar üretilmiş ve vektör ağ çözümleyicisinde S-parametreleri ölçülmüştür. Vektör ağ analizörü filtreler, antenler ve diğer RF/mikrodalga devre elemanlarının analizi için kullanılan ölçü aletidir. Ağ analizörü analizörü ile iletim, yansıma, empedans ve S-parametresi ölçümleri gerçekleştirilmektedir (Anonymous 4). Ölçümler esnasında Agilent Fieldfox N9923a ve Libre VNA ölçüm cihazları kullanılmıştır. Şekil 3.4a’da gösterilen Agilent Fieldfox N9923a, 100 kHz – 18 GHz aralığında çalışmakta ve iki portludur. Libre VNA ise 100 kHz – 6 GHz aralığında çalışmakta ve iki portludur. Deneysel çalışmalar esnasında, prototipler vektör ağ analizörüne koaksiyel kablo ile bağlanmış dalgakılavuzlarının içine yerleştirilmiştir. Kullanılan dikdörtgen dalgakılavuzları WR284 ve WR340’ın frekans aralıkları sırasıyla 2.6–3.95 ve 2.2–3.3 GHz’dir. Ek olarak, WR340 dalga kılavuzuna ait fotoğraf Şekil 3.4b’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.4. a) Agilent Fieldfox N9923a vektör ağ analizörü; ve **b)** WR340 dalga kılavuzuna ait fotoğraf

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Metamalzeme Tabanlı Soğurucu Tasarımı

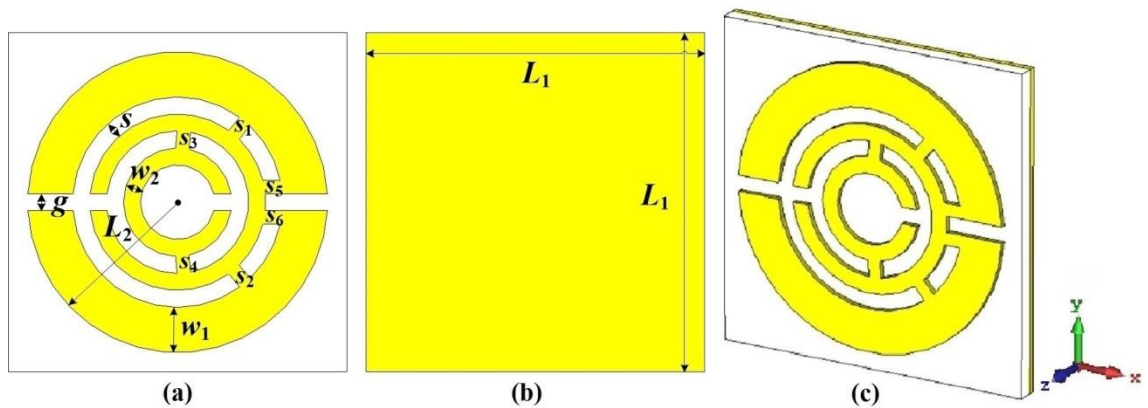
Bu bölümde, metamalzeme tasarımında sıklıkla tercih edilen yarık halka ve elektrik LC rezonatörleri kullanılarak, çok bantlı soğurucu ve sensor uygulamaları üzerine tasarımlar önerilmiştir.

4.1.1. Dairesel Şekilli ve Üç Bantlı YHR Tabanlı Soğurucu

Bu kısımda, üç adet dairesele eş merkezli YHR ve halkalar arasına yerleştirilmiş altı minyatür metal yükten oluşan çok bantlı soğurucu tasarlanmıştır. Tasarlanan yapının elektrik alan dağılımları, çapraz polarize yansıması, temel elektromanyetik parametreleri ve elektriksel boyutu incelenmiştir.

4.1.1.1. Tasarım ve Benzetim Ortamı

Önerilen YHR'li soğurucunun şematik görünümü ve tasarım parametreleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Optimize edilmiş nihai tasarım parametre değerleri de Çizelge 4.1'de verilmiştir. Soğurucunun üst katmandaki temel rezonatör yaması, üç eş merkezli dairesele yarık halka elemanından oluşur. İki yarıkli en dıştaki halka, her biri bir yarıkli iç halkalardan daha geniştir. Halkalar arasına uygun şekilde yerleştirilmiş altı minyatür metal yük ($s_1 - s_6$) $1.0 \times 1.2 \text{ mm}^2$ boyuta sahiptir. Önerilen tasarımda, YHR elemanları üç bantlı soğurma sağlarken, metalik yükler soğurma tepelerinin meydana geldiği bantların ince frekans ayarını sağlar. Giriş kapısı 1'den giriş kapısı 2'ye iletimi engellemek için soğurucunun arka tarafı tamamen toprak düzlem ile kaplanmıştır. Yama ve toprak düzlem $t = 0.035 \text{ mm}$ kalınlığa ve $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ iletkenliğe sahip bakırdan oluşturulmuştur. Ayrıca taban malzemesi olarak $h = 1.5 \text{ mm}$ kalınlığa, $\epsilon_r = 4.3$ dielektrik sabitine ve $\tan\delta = 0.025$ kayıp tanjanta sahip FR4 dielektrik malzeme kullanılmıştır.



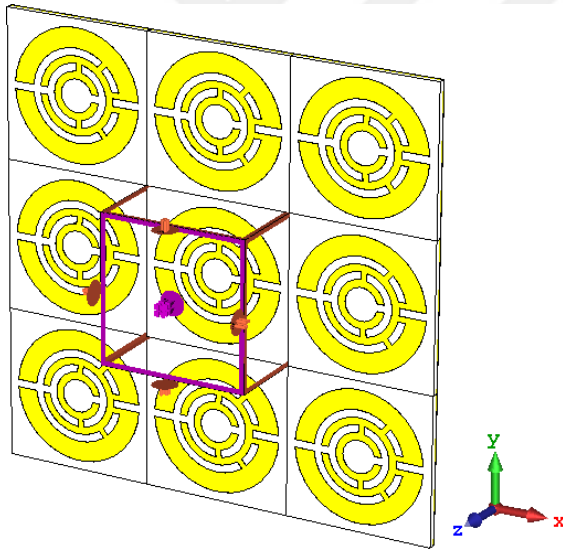
Şekil 4.1. Tasarım parametreleri ile birlikte YHR tabanlı soğurucunun **a)** önden; **b)** arkadan; **c)** perspektif şematik görünümü

YHR tabanlı soğurucu tasarımı ve analizler CST Microwave Studio (MWS) yazılımında Frekans Bölgesi Çözümleyici (Frequency Domain Solver) kullanılarak

gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi soğurucu elektrik alan vektörü E , manyetik alan vektörü H ve yayılma vektörü k 'nın sırasıyla y , x ve $-z$ yönlerinde olduğu elektromanyetik dalga tarafından uyarılır. Ayrıca, sınır koşulları sırasıyla x , y ve z eksenleri için birim hücre (unit cell), birim hücre (unit cell) ve açık (add space) seçilmiştir.

Çizelge 4.1. YHR tabanlı soğurucunun tasarım parametreleri ve nihai sonuçları

Parametre	Değer (mm)
L_1	30
L_2	13.4
w_1	5
w_2	1.2
s	1
g	1

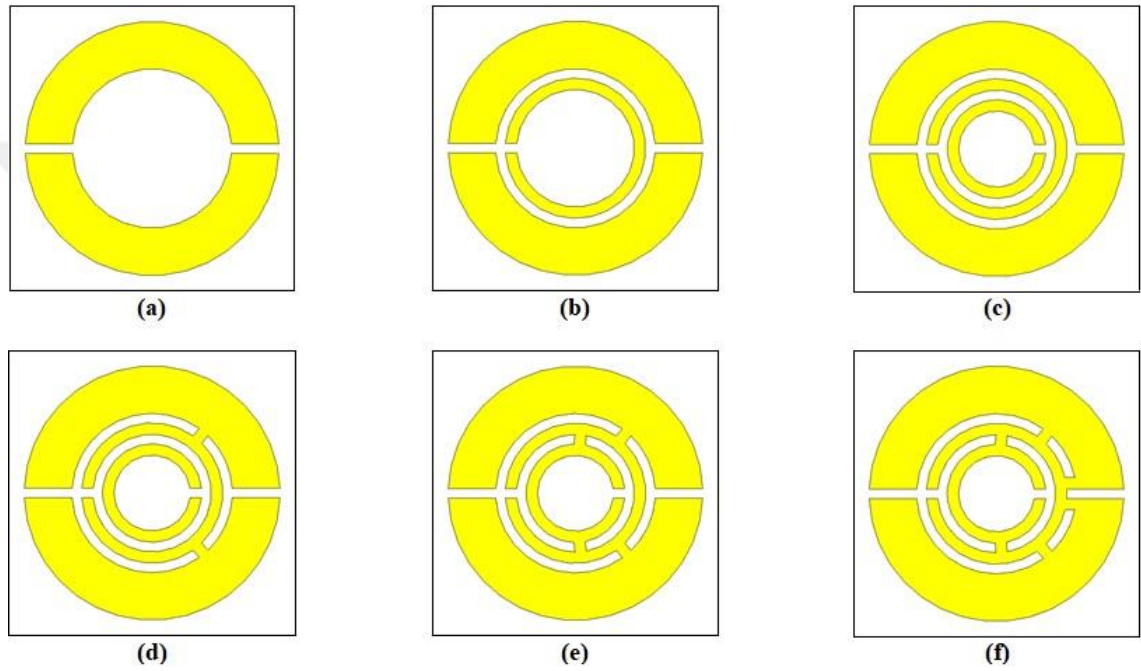


Şekil 4.2. YHR tabanlı soğurucu için benzetim ortamının şematik görünümü

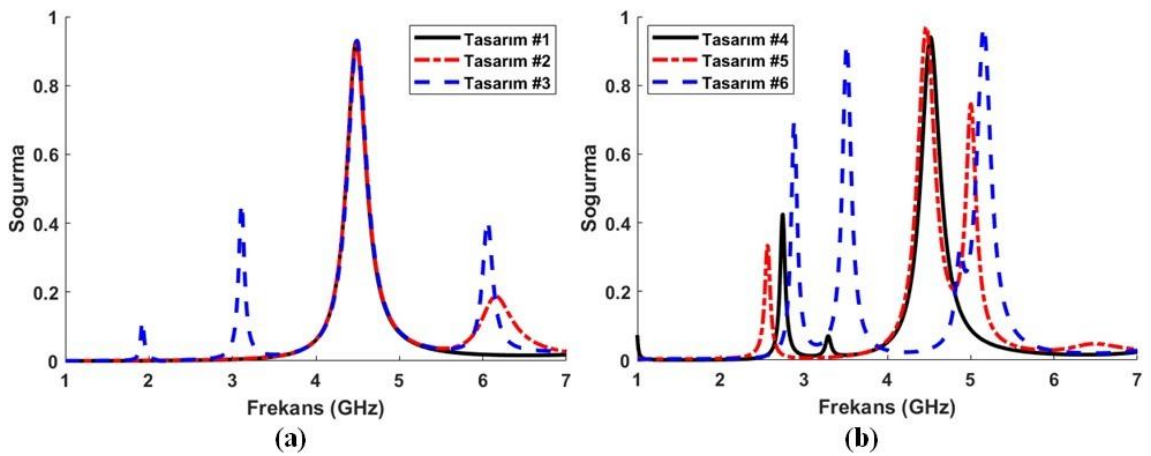
4.1.1.2. Parametrik Analiz ve Sonuçları

Önerilen yarık halka soğurucunun tasarım ve parametrik analiz adımları Şekil 4.3'de sunulmuştur. İstenilen frekans değerlerini elde etmek için bir dizi parametrik çalışmalar yapılmıştır. Başlangıç yapılandırması (#1) için iki yarıklı halka elemanı kullanılmıştır ve 4.49 GHz'de 0.93 seviyesinde tek bant soğurma gözlemlenmiştir. Daha sonra bu rezonatörün içine ikinci bir dairesel YHR eklenmiştir (#2). Bu durumda, 6.15 GHz'de 0.19 seviyesinde ikinci bir soğurma bandı görülmüştür. Üçüncü yapılandırma (#3) adımı ise yine eş merkezli başka bir YHR yerleştirilmiştir. Böylece 1.92, 3.11, 4.49 ve 6.06 GHz'de sırasıyla 0.12, 0.46, 0.93 ve 0.41 seviyelerine sahip soğurma

tepeleri elde edilmiştir. İlk üç yapılandırma adımlarına ait soğurma sonuçları Şekil 4.4a’da verilmiştir. Dört numaralı yapılandırma (#4) adımı ise en dış ve orta sıradaki halkaların arasına iki adet metalik yük (s_1 - s_2) yerleştirilmiştir; 2.75 ve 4.52 GHz’de sırasıyla, 0.42 ve 0.94 seviyelerinde soğurma tepeleri görülmüştür. En içteki ve ortadaki halkalar arasına s_3 ve s_4 olarak adlandırılan iki adet metalik yük eklenerek, beşinci yapılandırma (#5) adımı 2.56, 4.47 ve 5 GHz’de üç adet soğurma tepesi elde edilmiştir; bu frekanslardaki soğurma seviyeleri sırasıyla 0.33, 0.97 ve 0.75’tir. En sonunda s_5 ve s_6 isimli metalik yükler de eklenerek final tasarımı gerçekleştirilmiştir ve böylece WiMAX ve WLAN bantlarını kapsayacak şekilde, 2.88, 3.52 ve 5.16 GHz’de 0.69, 0.92 ve 0.97 seviyelerde soğurma tepeleri elde edilmiştir. Yapılandırma adımları #4, #5 ve #6 için soğurma sonuçları Şekil 4.4b’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. YHR tabanlı soğurucu tasarımının a) #1; b) #2; c) #3; d) #4; e) #5; f) #6 numaralı yapılandırma adımları

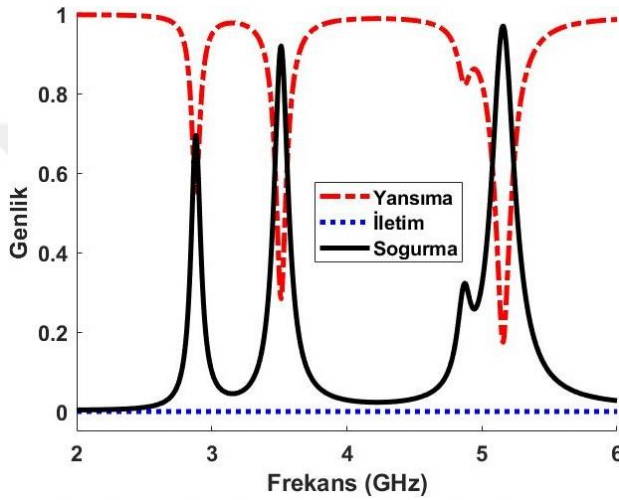


Şekil 4.4. YHR tabanlı soğurucu tasarımının a) #1, #2 ve #3; b) #4, #5 ve #6 numaralı yapılandırma adımları için soğurma sonuçları

Nihai tasarım için, nümerik analizler ile elde edilen S-parametre ve soğurma grafikleri Şekil 4.5'te verilmiştir. Soğurma sonuçları şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\text{soğurma} = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (4.1)$$

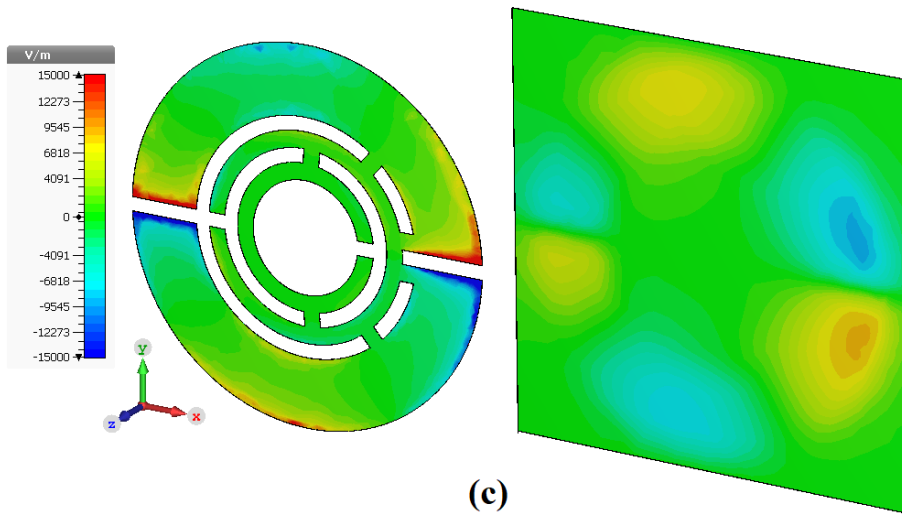
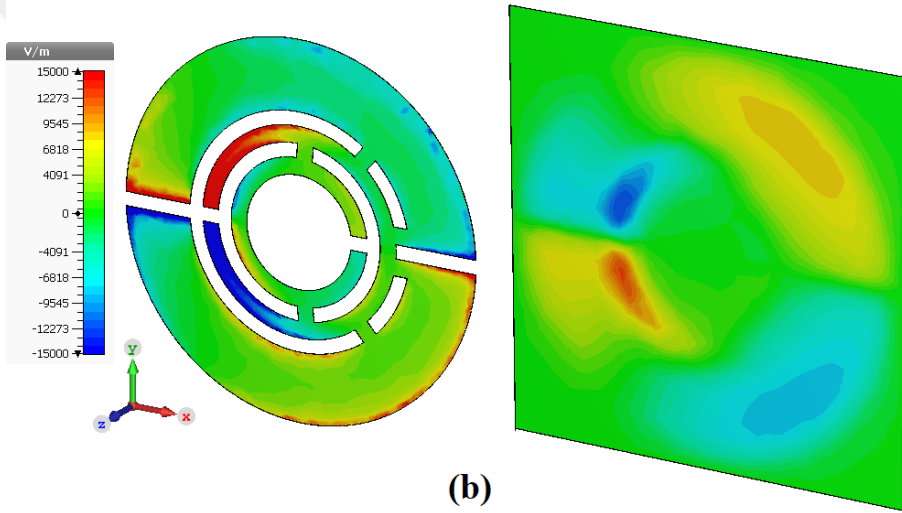
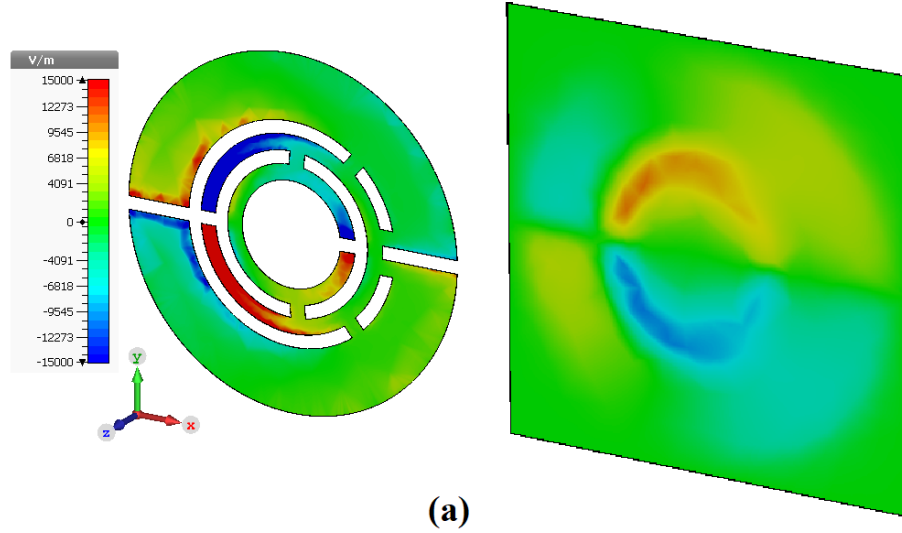
burada $|S_{11}|$ ve $|S_{21}|$ sırasıyla yansıma ve iletimdir. Şekil 4.5'te gösterildiği gibi, 2.88, 3.52 ve 5.16 GHz'de sırasıyla 0.69, 0.92 ve 0.97 seviyelerde soğurma sağlayarak aynı anda WiMAX ve WLAN bantlarını kapsayan soğurucu elde edilmiştir. Önerilen yapının arka tarafı tamamen metalik toprak yüzey ile kaplanmıştır. Bu şekilde giriş kapısı 1'den giriş kapısı 2'ye hiçbir iletim yoktur. Sonuç olarak, iletim neredeyse sıfırdır ve bu durum Şekil 4.5'te görülmektedir.



Şekil 4.5. YHR tabanlı üç bantlı soğurucu için benzetim sonuçları

4.1.1.3. Elektrik Alan Dağılımların İncelenmesi

Önerilen tasarımın üç bantlı soğurma davranışını araştırmak için, her üç frekanstaki elektrik alan dağılımlarının z-bileşeni sayısal olarak hesaplanmıştır. Soğurma tepelerinin oluştuğu frekanslarda, her bir tasarımın hem rezonatör hem de toprak düzlemindeki elektrik alan dağılımları 259° faz açısı için Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Şekil 4.6a'da gösterildiği gibi, rezonatörün en iç ve orta halkalardaki yarık bölgeler 2.88 GHz'deki soğurma rezonansı üzerinde daha fazla etkiye sahiptir. Ayrıca, toprak düzlemindeki elektrik alan dağılımları rezonatördeki alana zıt polaritededir ve bu durum yama ile toprak arasındaki bağlantıyı (coupling) gösterir. Bu bağlantı (couple), manyetik dipol rezonans oluşmasına neden olur. Şekil 4.6b'de gösterildiği gibi, rezonatörün orta halkasının yarık bölgesi 3.52 GHz'deki soğurma rezonansı üzerinde daha fazla etkiye sahiptir. Toprak düzlemin 3.52 GHz'deki elektrik alan dağılımı incelendiğinde, 2.88 GHz'deki davranışa benzer şekilde, rezonatöre göre ters yönde bir elektrik alan dağılımı vardır. Şekil 4.6c'ye göre, rezonatörün dış halkasının yarık kısımları 5.16 GHz'deki rezonans üzerinde etkilidir. Toprak düzlemin 5.16 GHz'deki elektrik alan dağılımı incelendiğinde, 2.88 GHz'deki davranışa benzer şekilde, rezonatöre göre ters yönde bir elektrik alan dağılımı vardır.



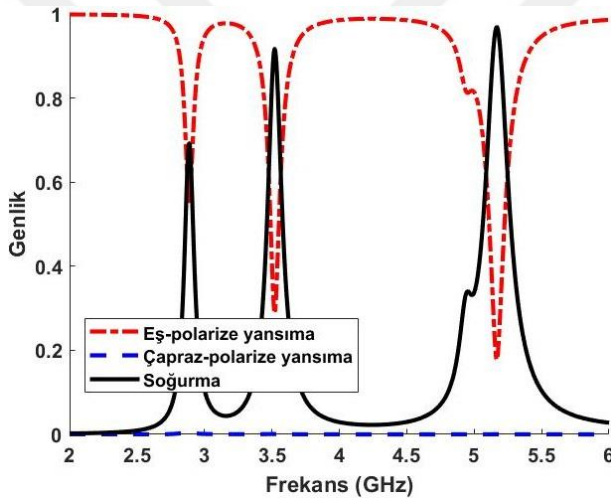
Şekil 4.6. YHR ve toprak düzlem için a) 2.88; b) 3.52; c) 5.16 GHz'deki elektrik alan dağılımlarının 259° faz açısında z-bileşenleri

4.1.1.4. Çapraz Polarize Yansımaya Etkisinin İncelenmesi

Simetrik olmayan yapılarda bilindiği üzere çapraz polarize yansımaları oluşabilmektedir. Bu nedenle, önerilen YHR tabanlı soğurucu yapısının çapraz polarize yansımaları, CST MWS ortamında iki Floquet modu kullanılarak analiz edilmiştir. Benzetim ortamından elde edilen S-parametreleri, bağıntı (4.2)'de kullanılarak soğurma hesaplanmıştır. Şekil 4.7'te verilen sonuçlara göre çapraz polarize yansımaları neredeyse sıfırdır.

$$\text{soğurma} = 1 - |S_{11(eş-)}|^2 - |S_{11(çapraz-)}|^2 - |S_{21(eş-)}|^2 - |S_{21(çapraz-)}|^2 \quad (4.2)$$

burada $S_{11(eş-)}$, $S_{11(çapraz-)}$, $S_{21(eş-)}$ ve $S_{21(çapraz-)}$ sırasıyla eş polarize yansımaları, çapraz polarize yansımaları, eş polarize iletim ve çapraz polarize iletim olarak adlandırılır. Önerilen soğurucunun arka yüzeyinin tamamen metalik toprak düzlem olmasından dolayı iletim yoktur. Bu sebeple $S_{21(eş-)}$ ve $S_{21(çapraz-)}$ değerleri 0 (sıfır) alınmıştır (Karacan vd. 2020).



Şekil 4.7. YHR tabanlı üç bantlı soğurucu için eş ve çapraz polarize yansımaya bağlı soğurma davranışı

4.1.1.5. Elektriksel Boyutun İncelenmesi

Bilindiği üzere YHR yapıları, boyut olarak geleneksel rezonatör yapılarına göre daha küçüktür ve çift/çoklu bant davranış özelliği gösterebilmektedir (Wang 2016). Önerilen tasarımdaki YHR elemanları üç bantlı soğurma sağlarken, aynı zamanda literatüre sunulan bazı çift bantlı ve çok bantlı soğurucu tasarımlarına göre daha küçük bir yapıya sahiptir. Önerilen YHR tabanlı soğurucu yapısı, Çizelge 4.2'de verilen boyut, rezonans frekansı ve bant sayısı açısından daha önce sunulan iki veya çok bantlı soğurucularla karşılaştırılmıştır. %90 üzerindeki soğurma oranına en düşük rezonans frekansı dikkate alındığında, önerilen tasarımın elektriksel boyutu diğerlerinden oldukça küçüktür.

Çizelge 4.2. Literatürde rapor edilmiş %90 üzerindeki soğurmaya sahip çalışmalar ile YHR tabanlı üç bantlı soğurucunun boyut karşılaştırması

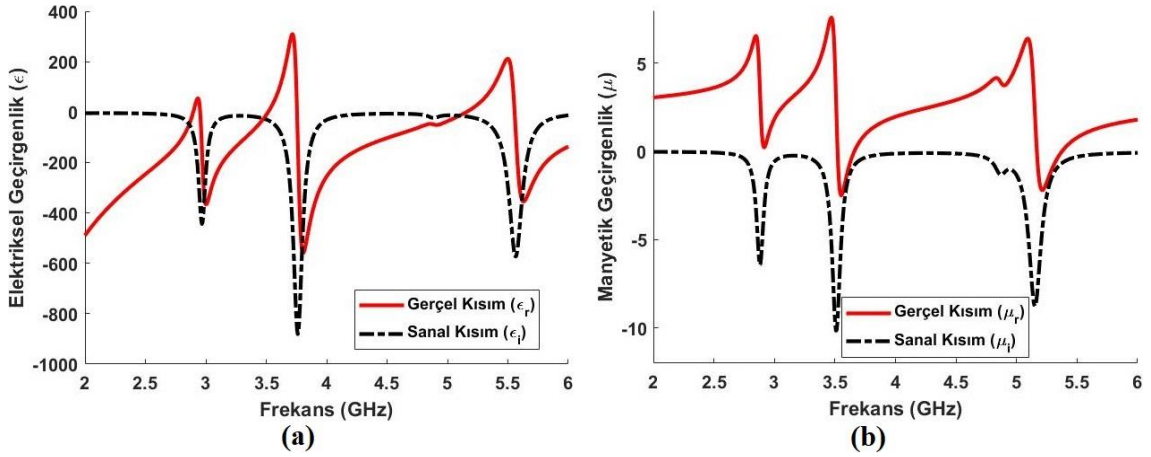
Referans	Frekans (GHz)	Bant Sayısı	Birim Hücre Boyutu (λ_0)
Bu çalışma	3.52, 5.16	2	0.352 x 0.352
Deng vd. 2018	101.25, 108.75, 129	4	0.493 x 0.493
Guo vd. 2013	6.30, 9.75, 12.35	3	0.420 x 0.420
Zhai vd. 2013	5.95, 12.25	2	0.365 x 0.365
Zheng vd. 2013	6.69, 7.48, 8.67	3	0.446 x 0.446

4.1.1.6. Temel Elektromanyetik Parametrelerin Çıkartılması

Benzetim ortamından elde edilen S-parametreleri kullanılarak, bağıntı 4.3 ve 4.4 yardımıyla, etkin elektriksel geçirgenlik (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) hesaplanmıştır. Bağıntılarda verilen k_0 ve d sırasıyla, serbest uzaydaki dalga numarası ve soğurucunun kalınlığıdır (Bhattacharyya and Vaibhav-Srivastava 2014). Elde edilen ϵ ve μ sonuçları, gerçek ve sanal kısımlarıyla birlikte, sırasıyla Şekil 4.8a ve Şekil 4.8b’de verilmiştir. Şekil 4.8 ve Çizelge 4.3’de görüldüğü üzere, 2.88 ve 3.52 GHz soğurma frekanslarında önerilen yapının elektriksel geçirgenliğinin gerçel kısmı sıfırdan küçükken ($\epsilon_r < 0$) manyetik geçirgenliğinin gerçel kısmı sıfırdan büyüktür ($\mu_r > 0$). Bu frekanslarda, dairesel şekilli YHR tabanlı soğurucu, epsilonu negatif malzeme (ENM) olarak tanımlanabilir. 5.16 GHz soğurma frekansında ise yapının elektriksel geçirgenliğinin ve manyetik geçirgenliğinin gerçel kısımların her ikisi de sıfırdan büyüktür ($\epsilon_r > 0$, $\mu_r > 0$). Bu durumda, 5.16 GHz soğurma frekansında, önerilen yapı çift pozitif malzeme (ÇPM) olarak adlandırılabilir. Şekil 4.8’da görüldüğü üzere, soğurma tepelerinin olmadığı diğer frekanslarda, önerilen yapının elektriksel geçirgenliğinin gerçel kısmın (ϵ_r) ve manyetik geçirgenliğinin gerçel kısmın (μ_r) işaretleri farklıdır. Bu sebeple, kırılma indisi sanal değer alacak ve dalga yayılımı olmayacaktır. Bilindiği üzere, elektriksel ve manyetik geçirgenliğin sanal kısımları (ϵ_i ve μ_i) kayıplardan sorumludurlar (Tak and Choi 2016). Çalışma frekanslarında yüksek bir soğurma seviyesi elde etmek için ϵ_i ve μ_i değerleri, Şekil 4.8’deki gibi, yüksek olmalıdır.

$$\epsilon = 1 + \frac{2j(S_{11}-1)}{k_0 d(S_{11}+1)} \quad (4.3)$$

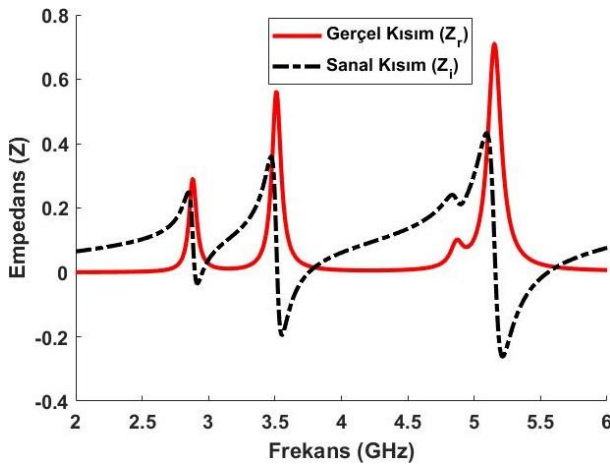
$$\mu = 1 + \frac{2j(S_{11}+1)}{k_0 d(S_{11}-1)} \quad (4.4)$$



Şekil 4.8. YHR tabanlı üç bantlı soğurucunun **a)** elektriksel geçirgenliği; **b)** manyetik geçirgenliği

Dairesel şekilli YHR tabanlı soğurucunun normalize giriş empedansı ($Z = \sqrt{\mu/\epsilon} = Z_r + jZ_i$), benzetim ortamından elde edilen S-parametreleri kullanılarak, bağıntı (4.5) yardımıyla, hesaplanmıştır (Bhattacharyya and Vaibhav-Srivastava 2014). Önerilen yapının arka yüzeyi tamamen toprak düzlem olarak kullanılan bakır ile kaplandığı için $|S_{21}|$ değeri sıfırdır. Şekil 3.9’da görüldüğü gibi, soğurma frekanslarında empedansın gerçel kısmı (Z_r) birim değere yakınlaşırken, sanal kısım (Z_i) sıfıra yaklaşmaktadır (Tak and Choi 2016). Soğurma frekanslarında, önerilen soğurucu yapısının normalize giriş empedans değerleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

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



Şekil 4.9. YHR tabanlı üç bantlı soğurucunun normalize giriş empedansı

Çizelge 4.3. Soğurma frekanslarında, YHR tabanlı soğurucunun elektriksel geçirgenlik, manyetik geçirgenlik ve normalize giriş empedans değerleri

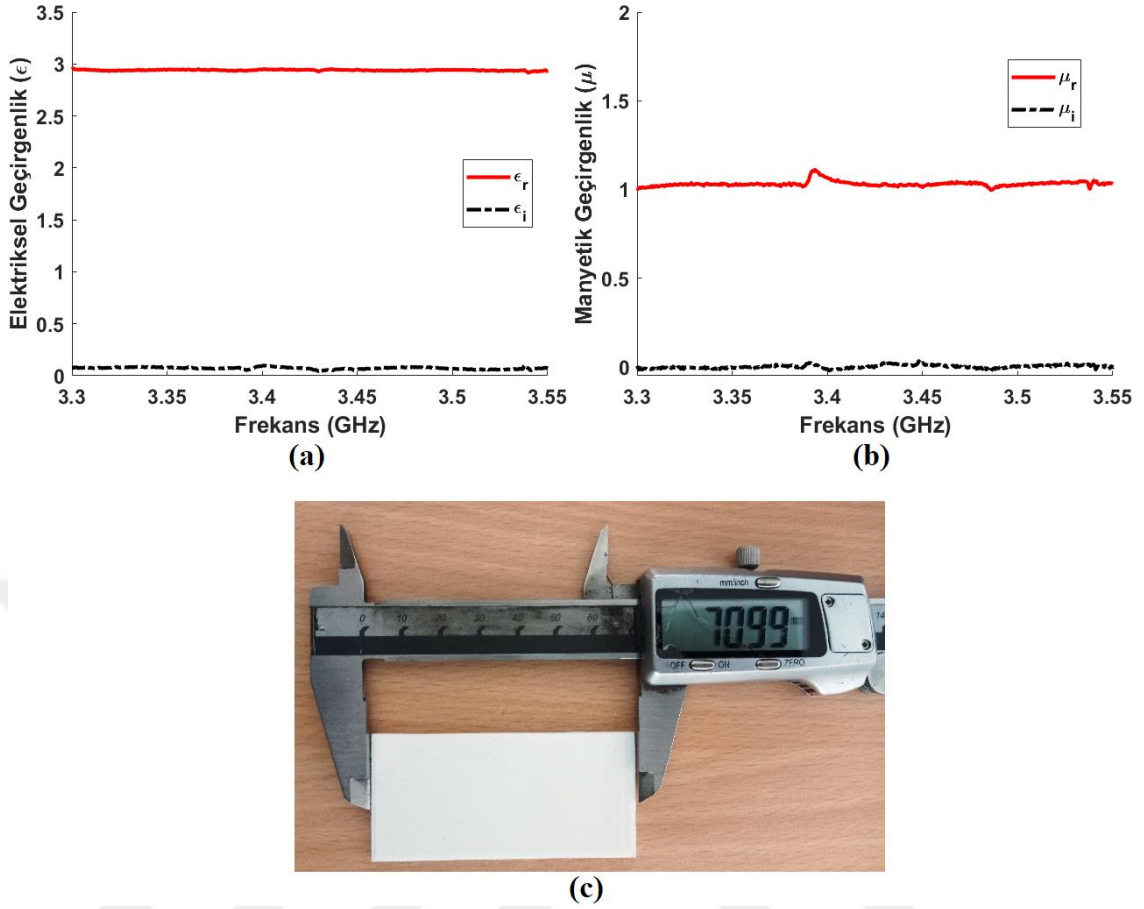
f (GHz)	ϵ	μ	Z (Ω)
2.88	$-18.97 - 70.34i$	$2.82 - 6.40i$	$0.29 + 0.08i$
3.52	$-1.26 - 32.20i$	$1.71 - 10.13i$	$0.56 + 0.04i$
5.16	$0.50 - 17.51i$	$1.25 - 8.68i$	$0.70 + 0.02i$

4.1.2. 3B Yazıcıda İmal Edilmiş ELC Tabanlı Soğurucu ve Sensor Uygulaması

Bu kısımda, hem katı hem de sıvı test malzemelerin analizlerinde kullanılmak üzere, üç boyutlu yazıcı imal edilmiş soğurucu tabanlı sensor tasarlanmış, üretilmiş ve ölçülmüştür. Sensor tasarımının elektrik alan dağılımları ve temel elektromanyetik parametreleri hesaplanmıştır. Ayrıca çalışma mekanizmasını açıklamak için analitik metot kullanılmış ve algılama performansı literatür ile kıyaslanmıştır.

4.1.2.1. PLA'nın Elektriksel Geçirgenliğinin Ölçülmesi

Soğurucu tasarımlarının yapılabilmesi için taban malzemesi olarak kullanılan PLA'nın dielektrik sabiti ϵ_r 'ın bilinmesi kritik öneme sahiptir. Bu sebeple ϵ_r değerleri kesin olarak bilinmeyen PLA'nın, dielektrik sabiti ölçümü büyük önem arz etmektedir. Dielektrik sabiti ϵ_r ölçümü için, Creality Ender 3 Pro 3D Yazıcı kullanılarak $71 \times 34 \times 2.5$ mm³ hacimli dikdörtgenler prizması üretilmiştir. Üretim esnasında beyaz renkli 1.75 mm Creality marka PLA kullanılmıştır. Üretim öncesi dilimleme işlemi, Ultimaker Cura yazılımında %90 doluluk ve 45° açılı dizgiler ile yapılmıştır. Dielektrik sabiti ölçümü için, Agilent FieldFox N9926A Network Analizöre ve WR284 dalga kılavuzu kullanılmıştır. Numune tutucuya yardımıyla dalga kılavuzuna yerleştiren PLA'nın S_{11} ve S_{21} parametreleri ölçülmüştür. Elde edilen S-parametrelerine Nicholson-Ross-Weir (NRW) yöntemi uygulanarak elektriksel geçirgenlik ϵ hesaplanmıştır (Kuek 2012). Ölçüm sonuçlarına göre dielektrik sabiti $\epsilon_r = 2.94$ ve kayıp tanjantı $\tan \delta = 0.026$ 'dır. Ölçüm için üretilen PLA ve ölçüm sonuçları Şekil 4.10'de verilmiştir.



Şekil 4.10. PLA'nın (a) elektriksel geçirgenliği; (b) manyetik geçirgenliği; (c) fotoğrafı

Nicholson-Ross-Weir (NRW) yöntemine göre ϵ_r değeri Eşitlik (4.6) ile hesaplanmıştır (Kuek 2012).

$$\epsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r} \left(\frac{1}{\lambda_c^2} - \left[\frac{1}{2\pi L} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right]^2 \right) \quad (4.6)$$

Burada λ_0 serbest uzay dalga boyu, λ_c kesim dalga boyu, L malzeme kalınlığı, μ_r manyetik geçirgenlik ve T iletim katsayısıdır. μ_r ve T , sırasıyla Eşitlik (4.7) ve Eşitlik (4.8) ile hesaplanmıştır.

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

$$T = \frac{S_{11}+S_{21}-\Gamma}{1-(S_{11}+S_{21})\Gamma} \quad (4.8)$$

Burada Γ yansıma katsayısıdır. S_{11} ve S_{21} , S-parametreleridir ve vektör ağ çözümleyicisinden elde edilmektedir. Γ ve Λ , sırasıyla Eşitlik (4.9) ve Eşitlik (4.10) ile hesaplanmıştır.

$$\Gamma = X \pm \sqrt{X^2 - 1}, \text{ burada } |\Gamma| < 1 \quad (4.9)$$

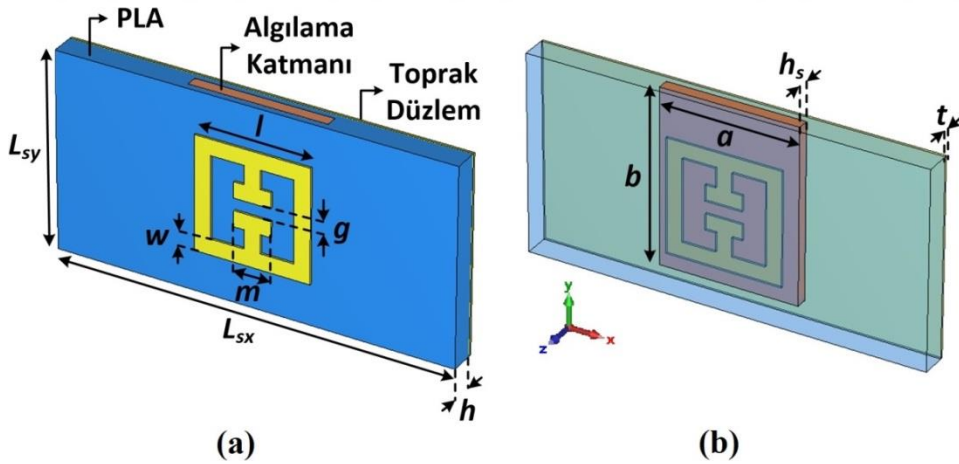
$$\frac{1}{\Lambda^2} = \left(\frac{\varepsilon_r^* \mu_r}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2} \right) = - \left(\frac{1}{2\pi L} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right)^2 \quad (4.10)$$

Burada X , Eşitlik (4.11) ile hesaplanmıştır.

$$X = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (4.11)$$

4.1.2.2. Tasarım ve Benzetim Ortamı

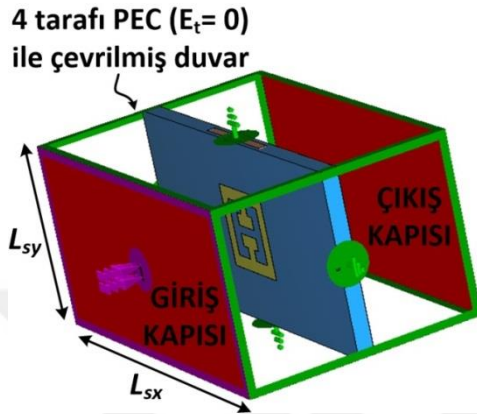
Önerilen yapının tasarım parametreleriyle birlikte şematik görünümü Şekil 4.11a'da verilmiştir. Tasarımda taban malzemesi olarak, geçirgenliği $\varepsilon_r = 2.94$ ve kayıp tanjantı $\tan\delta = 0.026$ olan beyaz renkli PLA kullanılmıştır. PLA'dan yapılan taban malzemesinin hacmi $L_{sx} \times L_{sy} \times h$ 'dir; burada L_{sx} , L_{sy} ve h sırasıyla 86.36, 43.18 ve 4.4 mm'dir. Test edilecek malzemeyi sensora eklemek için, taban malzemesi $a \times b \times h_s$ mm³ boyutlarında oyulmuştur. Burada a , b ve h_s sırasıyla 25, 36.2 ve 2 mm'dir. Ayrıca bu boşluğa eklenen ε_{rs} dielektrik sabitine sahip malzemelere, algılama katmanı denmektedir. Oyulmuş PLA'nın arka yüzü $t = 0.05$ mm kalınlığında bakır ile kaplanmıştır. Oyulmuş PLA'nın ön yüzüne, $t = 0.05$ mm kalınlığında bakırdan oluşan ELC rezonatörü yerleştirilmiştir. ELC rezonatörün tasarım parametreleri l , w , g ve m sırasıyla 19, 3, 2 ve 7 mm'dir. PLA'nın oyuğuna yerleştirilen ve algılama katmanı olarak adlandırılan test malzemesinin şematik görünümü ve tasarım parametreleri Şekil 1.11b'de verilmiştir. Burada algılama katmanının daha iyi görülebilmesi için, PLA saydam bir görünüme sahiptir.



Şekil 4.11. (a) Üç boyutlu yazıcıda imal edilmiş soğurucunun tasarım parametreleriyle birlikte şematik görünümü; **(b)** Algılama katmanının tasarım parametreleriyle birlikte şematik görünümü

Nümerik analizler, CST MWS'da frekans alanı çözümleyicisi kullanılarak gerçekleştirilir. S-parametreleri (yani S_{11} ve S_{21}), içi boş dikdörtgen WR340 dalga kılavuzunda elde edilmiştir. WR340 dalga kılavuzunun kesit alanı 86.36×43.18 mm²'dir. Dalga kılavuzunun içi z eksenı boyunca boştur, x ve y eksenleri boyunca yan duvarları mükemmel elektrik iletkenidir (PEC). Bu nedenle benzetim ortamında x-, y- ve z-

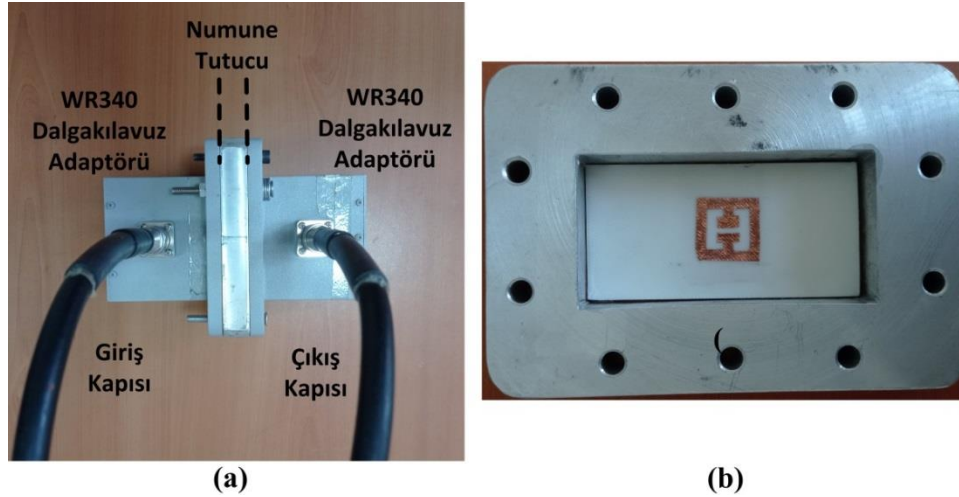
eksenleri için sırasıyla elektrik ($E_t = 0$), elektrik ($E_t = 0$) ve açık (boşluk ekle) olarak seçilmiştir. Önerilen yapıyı uyarmak için, dalga kılavuzu modeli giriş ve çıkış portu olarak iki dalga kılavuzu portu ile sonlandırılmıştır. Önerilen soğurucu, manyetik alan vektörü H 'nin x eksenı boyunca, elektrik alan vektörü E 'nin y eksenı boyunca ve dalga yayılma vektörü k 'nin z eksenı boyunca olduğu TE_{10} moduyla uyarılır. Benzetim ortamının şematik görünümü Şekil 4.12'te verilmiştir.



Şekil 4.12. Üç boyutlu yazıcıda imal edilmiş soğurucu için benzetim ortamının şematik görünümü

4.1.2.3. Ölçüm Düzeneği ve Üretim

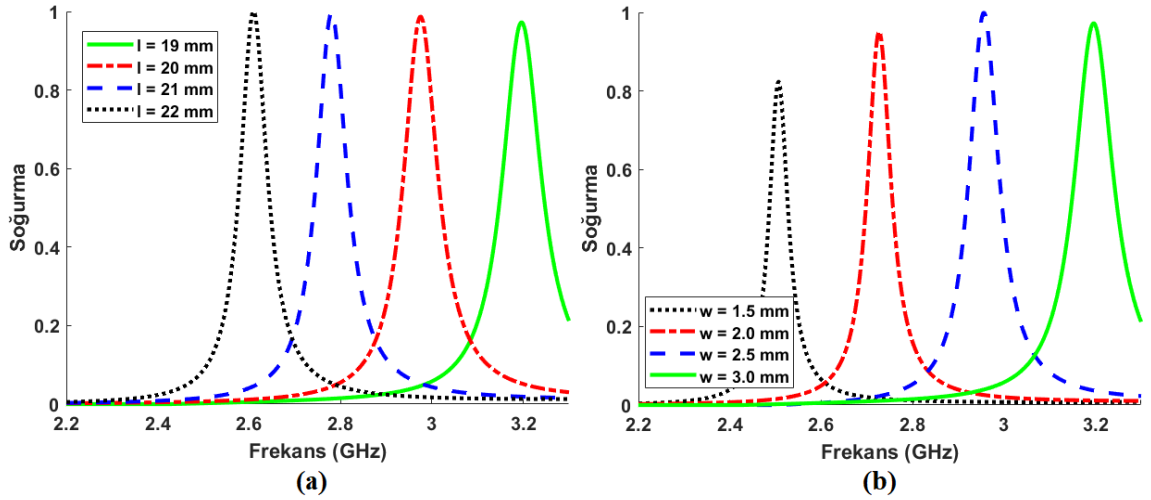
İlk olarak CST MWS'da tasarlanan oyuklu taban malzemesinin STL uzantılı 3 boyutlu dosyası dışa aktarılır. Dışa aktarılan bu dosya, Ultimaker Cura programı yardımıyla açılır ve 3 boyutlu nesne sanal olarak katmanlara ayrılır. Ultimaker Cura programında, doluluk %90 ve katmanlaştırma 45° 'lik çizgi seçilmiştir. Programda katmanlara ayrılmış oyuklu taban malzemesi, GCODE uzantısı ile dışa aktarılır. GCODE uzantılı dosya, Creality Ender 3 Pro 3D Yazıcı'ya yüklenir. 3 boyutlu yazıcının nozulu ve tablası uygun sıcaklığa gelince tasarlanan nesne üretilmeye başlanır. Uygun sıcaklıktaki nozul, beyaz renkli polilaktik asiti (PLA) eritir. Eritilen PLA, üst üste eklenerek katmanları oluşturur. Tüm katmanlar oluşturulduktan sonra üretim bitmiştir ve tabla soğuduktan sonra üretilen nesne tabla üzerinden kaldırılır. 3 boyutlu yazıcıda üretilmiş oyuklu taban malzemesinin arka yüzeyi iletken bakır bant ile tamamen kaplanır. Ön yüzeyine iletken bakır banttan yapılmış ELC rezonatör yerleştirilir. Üretilen bu yapının S-parametre ölçümleri, Agilent Fieldfox N9926A vektör ağ çözümleyicisi cihazına bağlı WR340 dalga kılavuzu kullanılarak elde edilir. Ölçüm düzeneği ve içinde sensor prototipi olan numune tutucu Şekil 4.13a ve Şekil 4.13b'de gösterilmektedir.



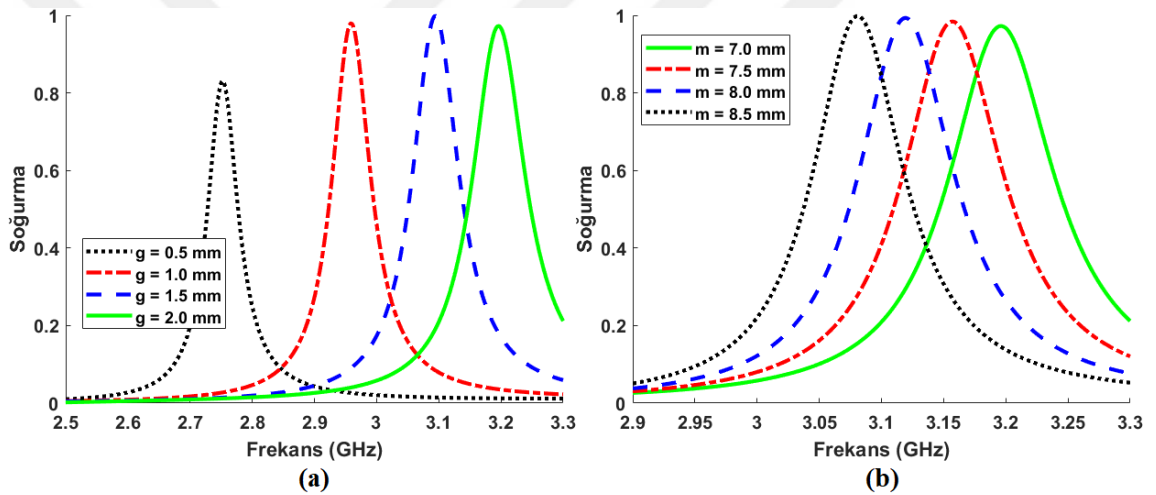
Şekil 4.13. (a) 3 boyutlu yazıcıda üretilmiş soğurucu tabanlı sensor için ölçüm düzeneği; **(b)** Numune tutucu ve içine yerleştirilmiş soğurucu tabanlı sensor

4.1.2.4. Parametrik Analiz ve Sonuçları

3B yazıcıda imal edilmiş metamazeme soğurucu tabanlı sensör parametrelerinin, soğurma davranışı üzerine etkilerini incelemek için parametrik analizler yapılmıştır. Öncelikle, ELC rezonatörün farklı uzunluk l değerleri için önerilen yapının soğurma davranışları incelenmiştir. Şekil 4.14a'da gösterildiği gibi, $l = 19$ mm'den 22 mm'ye kadar arttıkça soğurma frekansı 3.20 GHz'den 2.61 GHz'e düşmektedir. Özetle rezonatör boyutu arttıkça, soğurma frekansı azalmaktadır. Bu analizler sırasında $w = 3$, $g = 2$, $m = 7$, $h = 4.4$ ve $h_s = 2$ mm'de sabit tutulmuştur. Bir diğer parametrik analizde de ELC rezonatörün hat kalınlığı w 'nın etkisi incelenmiştir. Şekil 4.14b'de gösterildiği gibi, $w = 1.5$ mm'den 3 mm'ye kadar arttıkça, soğurma frekansı 2.51 GHz'den 3.20 GHz'e artmaktadır. Bir başka deyişle, rezonatörün hat kalınlığı arttıkça, soğurma frekansı da artmaktadır. Bu analizler sırasında $l = 19$, $g = 2$, $m = 7$, $h = 4.4$ ve $h_s = 2$ mm'de sabit tutulmuştur. Başka bir parametrik çalışmada ise, ELC rezonatörün yarık genişliği g değerleri için soğurma analizleri yapılmıştır. Şekil 4.15a'da gösterildiği gibi, $g = 0.5$ mm'den 2 mm'ye kadar arttıkça soğurma frekansı 2.75 GHz'den 3.20 GHz'e artmaktadır. Özetle yarık genişliği arttıkça, soğurma frekansı artmaktadır. Bu analizler sırasında $l = 19$, $w = 3$, $m = 7$, $h = 4.4$ ve $h_s = 2$ mm'de sabit tutulmuştur. ELC rezonatörle ilgili son olarak, m parametresinin soğurmaya etkisi incelenmiştir. Şekil 4.15b'de gösterildiği gibi, $m = 7$ mm'den 8.5 mm'ye kadar arttıkça, soğurma frekansı 3.20 GHz'den 3.08 GHz'e düşmektedir. Kısacası, rezonatörün m parametresi arttıkça, soğurma frekansı azalmaktadır. Bu analizler sırasında $l = 19$, $w = 3$, $g = 2$, $h = 4.4$ ve $h_s = 2$ mm'de sabit tutulmuştur.



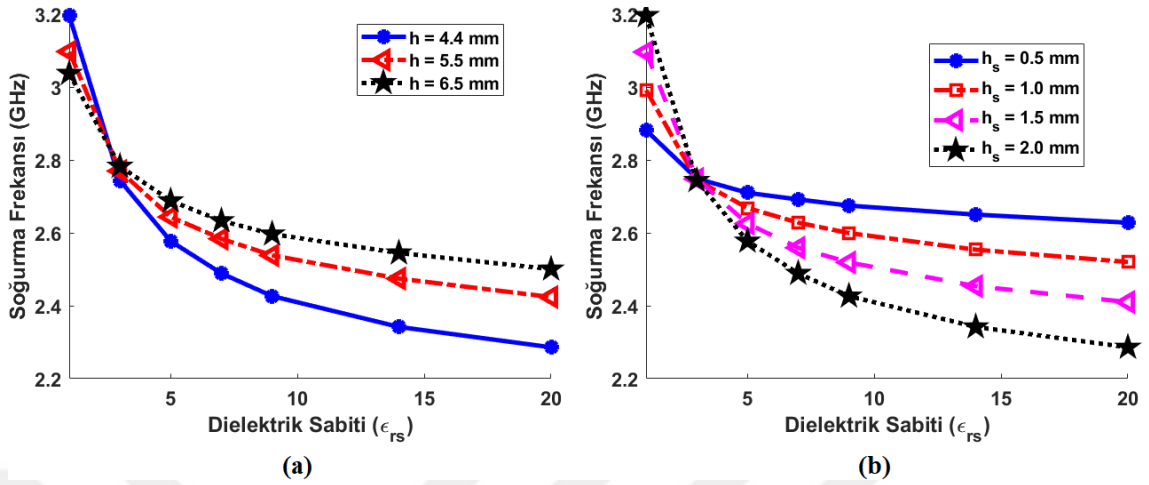
Şekil 4.14. a) ELC rezonatörün farklı l uzunlukları için soğurma davranışı; **b)** ELC rezonatörün farklı hat genişlikleri w için soğurma davranışı



Şekil 4.15. a) ELC rezonatörün farklı yarık genişliği g için soğurma davranışı; **b)** ELC rezonatörün farklı m parametre değerleri için soğurma davranışı

Rezonatör parametrelerinin etkileri incelendikten sonra taban malzemesi ve algılama katman parametrelerinin soğurma davranışına etkileri incelenmiştir. İlk olarak, taban malzeme kalınlığı h ve algılama katmanının dielektrik sabiti ϵ_{rs} için parametrik analizler yapılmıştır. Bu amaçla, $h = 4.4, 5.5$ ve 6.5 mm değerleri için ϵ_{rs} 1'den 20'ye kadar artırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.16a'da verilmiştir. Verilen grafiğe göre taban malzemesi kalınlığı h arttıkça, sensorun ϵ_{rs} değişimine karşı hassasiyeti azalmaktadır. Bu analizler sırasında $l = 19$, $w = 3$, $m = 7$, $g = 2$ ve $h_s = 2$ mm'de sabit tutulmuştur. Son olarak algılama katman kalınlığı h_s ve algılama katmanının dielektrik sabiti ϵ_{rs} için parametrik analizler yapılmıştır. Bu amaçla, $h_s = 0.5, 1, 1.5$ ve 2 mm değerleri için ϵ_{rs} 1'den 20'ye kadar artırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.16b'de verilmiştir. Verilen grafiğe göre algılama katman kalınlığı h_s arttıkça, sensorun ϵ_{rs}

değişimine karşı hassasiyeti de artmaktadır. Analizler sırasında $l = 19$, $w = 3$, $m = 7$, $g = 2$ ve $h = 4.4$ mm'de sabit tutulmuştur.



Şekil 4.16. a) Farklı h ve ϵ_{rs} değerleri için önerilen soğurucunun hassasiyet analizi; **b)** farklı h_s ve ϵ_{rs} değerleri için önerilen soğurucunun hassasiyet analizi

4.1.2.5. Sensör Frekansının Analitik Yöntemle Elde Edilmesi

Metamalzeme tasarımında kullanılan ELC rezonatörün çalışma frekansı Denklem (4.12) ile ifade edilebilmektedir. Denklemde verilen C ve L , sırasıyla ELC rezonatörün eş değer kapasitansı ve endüktansıdır. Kapasitans C , Denklem (4.13) ile elde edilir. ϵ_0 , serbest uzayın elektriksel geçirgenliğidir; ϵ_{rT} , 3B yazıcıda imal edilmiş yekpare soğurucunun elektriksel geçirgenliğidir; A , ELC rezonatörünün yüzey alanıdır; h , taban malzemesinin kalınlığıdır; w , ELC rezonatörünün hat genişliğidir; t metal kalınlığıdır; g , ELC rezonatörünün boşluğudur ve c_1 , geometrik bir faktör olarak kabul edilir. Endüktans L , Denklem (4.14) ile elde edilir. Burada μ_0 , serbest uzayın manyetik geçirgenliği ve l , ELC rezonatörün uzunluğudur (Gülsu vd. 2020).

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.12)$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_{rT} \frac{c_1 A}{h} + \epsilon_0 \epsilon_{rT} \frac{wt}{g} \quad (4.13)$$

$$L = \mu_0 h \left(\frac{2w}{l} + \frac{2l}{w} + \frac{l-2w-g}{w} \right) \quad (4.14)$$

ELC rezonatörün kapasitansı C 'yi hesaplamak için ϵ_{rT} bilinmelidir. Ancak önerilen soğurucu üç katmanlıdır. Ayrıca algılama katmanının dielektrik sabiti ϵ_{rs} , test edilecek numuneye bağlı olarak değişmektedir. Algılama katmanı olarak eklenen her yeni numune için ϵ_{rT} , Denklem (4.15) ile hesaplanmaktadır (Jha and Singh 2010; Jha and Singh 2011).

$$\epsilon_{rT} = \frac{|d_1| + |d_2| + \dots + |d_n|}{\left| \frac{\epsilon_1}{d_1} + \frac{\epsilon_2}{d_2} + \dots + \frac{\epsilon_n}{d_n} \right|} \quad (3.15)$$

Yukarıda verilen denklemde, ϵ_n n. katmanın dielektrik sabitidir. Ve ayrıca, d_n aşağıda verilen Denklem (4.16) ile elde edilmektedir.

$$d_n = \frac{K(k_n)}{K'(k_n)} - \dots - \frac{K(k_2)}{K'(k_2)} - \frac{K(k_1)}{K'(k_1)} \quad (4.16)$$

d_n 'i hesaplamak için kullanıla Denklem (4.16)'daki $\frac{K(k_n)}{K'(k_n)}$ bileşeni, aşağıda verilen Denklem (4.17) ile elde edilmektedir.

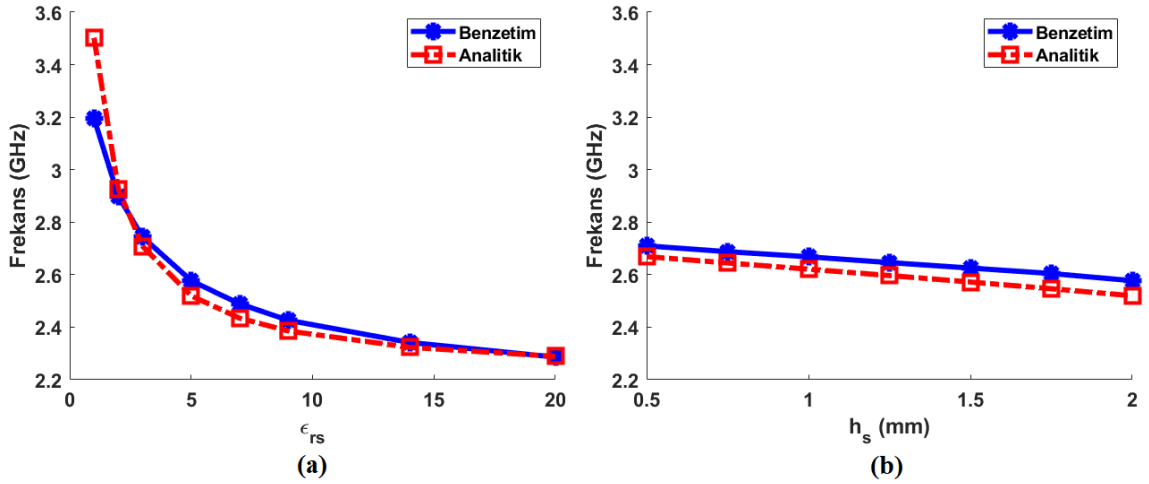
$$\frac{K(k_n)}{K'(k_n)} = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \ln \left(2 \frac{1+\sqrt{k_n}}{1-\sqrt{k_n}} \right), & 0.707 \leq k_n \leq 1 \\ \frac{\pi}{\ln \left(2 \frac{1+\sqrt{k'_n}}{1-\sqrt{k'_n}} \right)}, & 0 \leq k_n < 0.707 \end{cases} \quad (4.17)$$

Yukarıdaki denklemde kullanılan k_n ve k'_n bileşenleri, sırasıyla Denklem (4.18) ve Denklem (4.19) yardımıyla hesaplanmaktadır. Ayrıca Denklem (4.18)'daki w ve h_n sırasıyla ELC rezonatörün hat kalınlığı ve n. katmanın kalınlığıdır.

$$k_n = \frac{1}{\cosh \left(\frac{\pi w}{4(h_n + h_{n-1} + h_{n-2} + \dots + h_1)} \right)} \quad (4.18)$$

$$k'_n = \sqrt{1 - (k_n)^2} \quad (4.19)$$

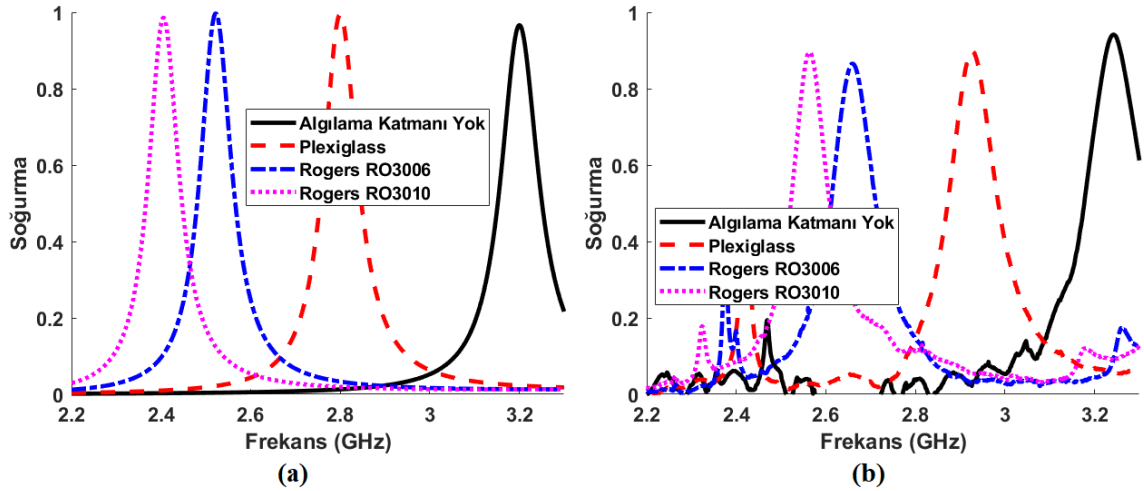
Soğurucu tabanlı sensorun soğurma frekansını tahmin etmek amacıyla kullanılan analitik yöntem sonuçları, nümerik yöntemle karşılaştırılmıştır. Öncelikle her iki yöntemde de, algılama katmanının farklı dielektrik sabiti ϵ_{rs} değerleri için parametrik analizler yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.17a'da verilmiştir. Bu analizler sırasında $l = 19$, $g = 2$, $m = 7$, $w = 3$, $h = 4.4$ ve $h_s = 2$ mm'de sabit tutulmuştur. Daha sonra, algılama katmanının farklı kalınlık h_s değerleri için parametrik analizler yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.17b'de verilmiştir. Bu analizler sırasında $l = 19$, $g = 2$, $m = 7$, $w = 3$, $h = 4.4$ mm ve $\epsilon_{rs} = 5$ 'de sabit tutulmuştur. Şekil 4.17'de verilen grafiklere göre her iki yöntem birbirleriyle oldukça uyumludur.



Şekil 4.17. a) Farklı algılama katman dielektrik sabiti ϵ_{rs} ve **b)** Farklı algılama katman kalınlığı h_s için analitik ve nümerik yöntemlerin karşılaştırma sonuçları

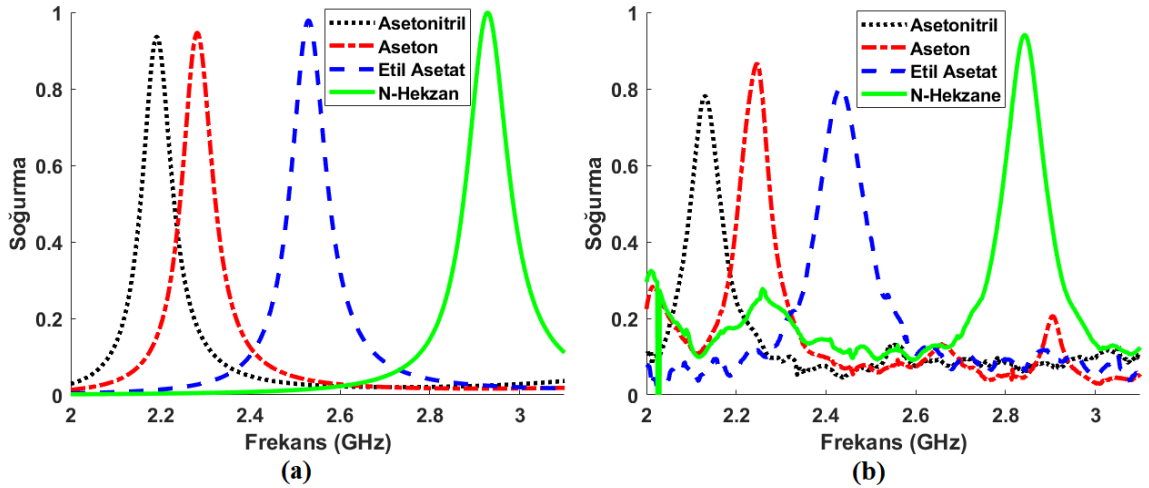
4.1.2.6. Deney Ortamında Katı ve Sıvılar İçin Algılama Uygulaması

İlk olarak, önerilen yapının katı malzeme uygulamalarında test edilebilmesi için kalınlıkları yaklaşık $h_s = 2$ mm olan üç farklı malzeme algılama katmanı olarak kullanılmıştır. Algılama katmanı olarak kullanılan Plexiglas, Rogers RO3006 ve RO3010 malzemelerinin dielektrik sabitleri ϵ_{rs} sırasıyla 2.6, 6.15 ve 10.2'dir. Önerilen yapı, benzetim ortamında hassasiyet katmanı olmadan 3.2 GHz'de çalışmaktadır. Sensora algılama katmanı olarak eklenen Plexiglas, RO3006 ve RO3010 için CST MWS'den elde edilen soğurma frekansları sırasıyla 2.80, 2.52 ve 2.41 GHz'dir. Nümerik yöntemlerle elde edilen sonuçlar Şekil 4.18a'da verilmiştir. Şekil 4.18a'da görüldüğü gibi %96'nın üzerinde soğurma mevcuttur. Benzetim sonuçlarını doğrulamak için soğurma ölçümleri yapılmıştır. Ölçümde, sensorun soğurma frekansı algılama katmanı olmadan 3.24 GHz'dir. Sensora algılama katmanı olarak eklenen Plexiglas, RO3006 ve RO3010 için ölçümlerde elde edilen soğurma frekansları sırasıyla 2.93, 2.66 ve 2.56 GHz'dir. Ölçüm sonuçları Şekil 4.18b'de gösterilmektedir. Şekil 4.18b'ye göre, %86'nın üzerinde soğurma vardır. Benzetim ve ölçüm ortamından elde edilen sonuçlar ve analitik yöntemle hesaplanan soğurma frekansları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Görüldüğü üzere, ölçüm ve benzetim sonuçları arasında iyi bir uyum vardır. Aralarındaki kabul edilebilir frekans kayması, üretim toleransı olarak kabul edilebilir.



Şekil 4.18. a) Katı malzemeler için benzetim ortamından elde edilen soğurma sonuçları, **b)** Katı malzemeler için ölçümden elde edilen soğurma sonuçları

Daha sonra, önerilen yapıyı sıvı malzeme uygulamalarında test etmek için, 1.7–1.8 ml hacimli dört farklı kimyasal sıvı, algılama katmanı olarak kullanılmıştır. Algılama katmanı olarak kullanılan N-Hekzan, Etil Asetat, Aseton ve Asetonitrilin dielektrik sabitleri ϵ_{rs} sırasıyla 1.88, 5.99, 20.7 ve 37.5'tir. Sensora algılama katmanı olarak doldurulan N-Hekzan, Etil Asetat, Aseton ve Asetonitril için CST MWS'den elde edilen soğurma frekansları sırasıyla 2.93, 2.53, 2.28 ve 2.19 GHz'dir. Nümerik yöntemlerle elde edilen sonuçlar Şekil 3.20a'da verilmiştir. Şekil 4.19a'da görüldüğü gibi %93'ün üzerinde soğurma mevcuttur. Benzetim sonuçlarını doğrulamak için soğurma ölçümleri yapılmıştır. Sensora algılama katmanı olarak doldurulmuş N-Hekzan, Etil Asetat, Aseton ve Asetonitril için ölçümlerden elde edilen soğurma frekansları sırasıyla 2.84, 2.43, 2.25 ve 2.13 GHz'dir. Ölçüm sonuçları Şekil 4.19b'de gösterilmektedir. Şekil 4.19b'ye göre, %78'in üzerinde soğurma vardır. Benzetim ve ölçüm ortamından elde edilen sonuçlar ve analitik yöntemle hesaplanan soğurma frekansları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Görüldüğü üzere, ölçüm ve benzetim sonuçları arasında iyi bir uyum gözlemlenmektedir. Aralarındaki kabul edilebilir frekans kayması, üretim toleransı olarak düşünülmektedir.



Şekil 4.19. a) Sıvı malzemeler için benzetim ortamından elde edilen soğurma sonuçları, **b)** Sıvı malzemeler için ölçümden elde edilen soğurma sonuçları

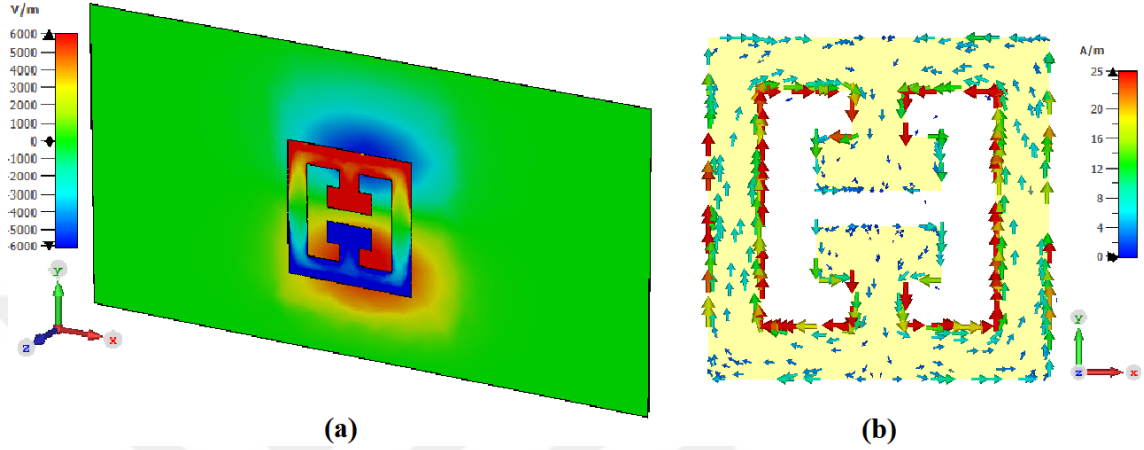
Çizelge 4.4. 3B yazıcıda imal edilmiş soğurucu sensorun benzetim, ölçüm ve analitik yöntemle elde edilen soğurma frekansları

Numune			Frekans (GHz)		
Adı	Hali	Dielektrik Sabiti (ϵ_{rs})	Benzetim	Analitik Yöntem	Ölçüm
Hava	Gaz	1	3.20	3.50	3.24
Plexiglas	Katı	2.6	2.80	2.78	2.93
RO3006		6.15	2.52	2.46	2.66
RO3010		10.2	2.41	2.37	2.56
N-Hekzan	Sıvı	1.88	2.93	2.97	2.84
Etil Asetat		5.99	2.53	2.47	2.43
Aseton		20.7	2.28	2.29	2.25
Asetonitril		37.5	2.19	2.25	2.13

4.1.2.7. Elektrik Alan ve Yüzey Akım Dağılımlarının İncelenmesi

Soğurucu tabanlı sensörün soğurma davranışını araştırmak için elektrik alan dağılımının z bileşeni, yapı asetonitril ile doluyken ki frekansta sayısal olarak hesaplanmıştır. Hem rezonatörün hem de toprak düzlemin 2.19 GHz soğurma frekansındaki elektrik alan dağılımları, 45° faz açısı için Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Şekil 4.20a'da görüldüğü gibi, ELC rezonatörü ve toprak düzlemi, soğurma frekansında dikey elektriksel dipol tepkisi göstermektedir. Ayrıca, ELC rezonatöründeki ve toprak

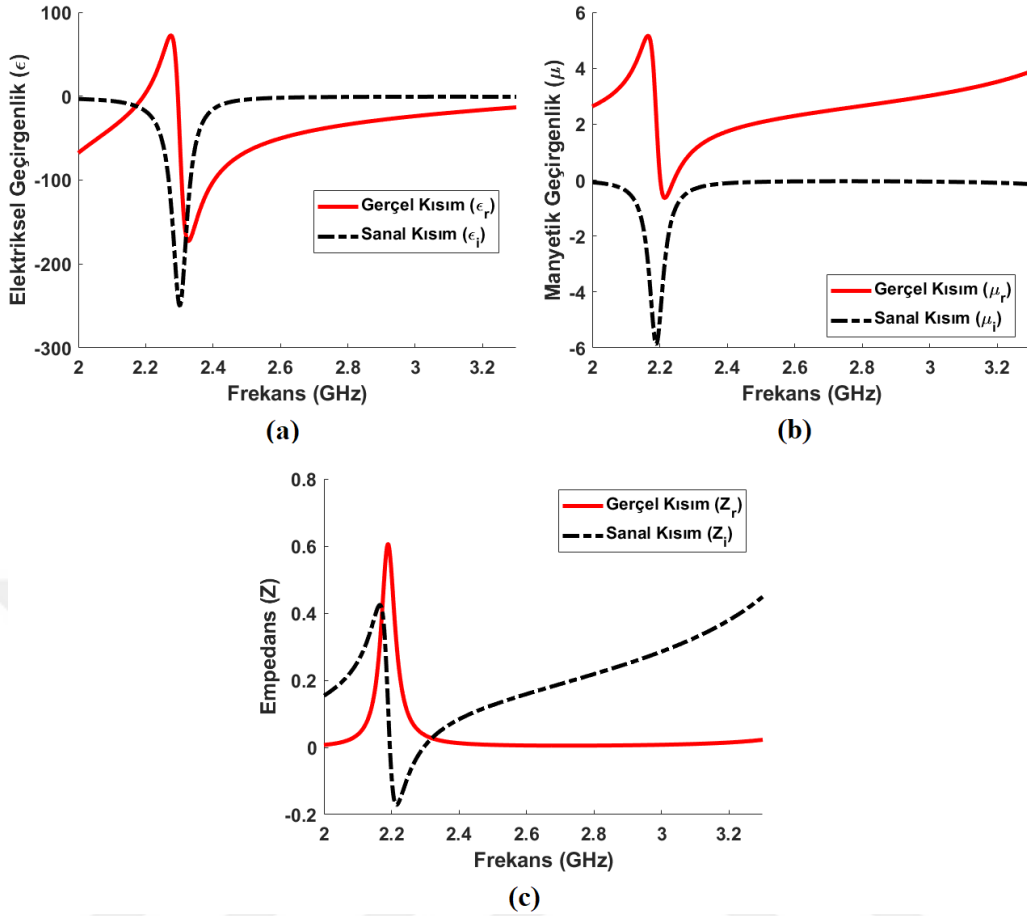
düzlemindeki elektrik alan dağılımlarının ters polaritesi, aralarındaki eşleşmeyi (coupling) gösterir. Bu eşleşme sayesinde manyetik dipol rezonans meydana gelir. Ayrıca ELC rezonatörünün 2.19 GHz soğurma frekansındaki yüzey akım dağılımına bakıldığında, dairesel akım akışından dolayı LC rezonansın olduğu görülmektedir. 45° faz açısı için, 2.19 GHz'de ELC rezonatör üzerindeki yüzey akım dağılımları Şekil 4.20b'de gösterilmektedir.



Şekil 4.20. 45° faz açısı için **a)** 2.19 GHz'de ELC rezonatör ve toprak düzlem üzerindeki elektrik alan dağılımlarının z-bileşeni; **b)** 2.19 GHz'de ELC rezonatördeki yüzey akımı dağılımları

4.1.2.8. Temel Elektromanyetik Parametrelerin Çıkartılması

Önerilen soğurucu tabanlı sensorun elektriksel geçirgenlik ($\epsilon = \epsilon_r + j\epsilon_i$), manyetik geçirgenlik ($\mu = \mu_r + j\mu_i$) ve empedans ($Z = \sqrt{\mu/\epsilon} = Z_r + jZ_i$) gibi elektromanyetik parametreleri Eşitlik (4.3 – 4.5) kullanılarak hesaplanmıştır. Asetonitril doldurulmuş sensorun elektromanyetik parametreleri Şekil 4.21'de verilmiştir. Bilindiği üzere, ELC rezonatörün elektriksel geçirgenliğin gerçel kısmı (ϵ_r) çalışma frekansında negatif olabilmektedir. Ancak manyetik tepkisi yoktur ve manyetik geçirgenliğin gerçel kısmı (μ_r) bire yakındır. Bu doğrultuda, asetonitril ile doldurulmuş sensorun 2.19 GHz'deki ϵ_r değeri -1,48 iken, μ_r bire yakındır. Şekil 4.21a ve 4.22b'de görüldüğü gibi, yüksek bir soğurma seviyesi elde etmek için çalışma frekansında elektriksel geçirgenliğin sanal kısmı (ϵ_i) ve manyetik geçirgenliğin sanal kısmı (μ_i) yüksek olmalıdır. Asetonitril doldurulmuş sensorun normalize edilmiş giriş empedansı, Şekil 4.21c'de verilmiştir. Şekil 4.21c'ye göre, soğurma frekansında normalize edilmiş empedansın gerçel kısmı (Z_r) bire yakinken, sanal kısım (Z_i) sıfıra yakındır.



Şekil 4.21. 45° faz açısı için **a)** 2.19 GHz'de ELC rezonatör ve toprak düzlem üzerindeki elektrik alan dağılımlarının z-bileşeni; **b)** 2.19 GHz'de ELC rezonatördeki yüzey akımı dağılımları

4.1.2.9. Sensör Performansının İncelenmesi

Önerilen soğurucu tabanlı sensorun literatüre katkısını değerlendirmek için, hassasiyet performansı literatürde daha önce sunulan sensor çalışmaları ile karşılaştırılır. Karşılaştırma sonuçları Çizelge 4.5'de özetlenmiştir. Şekil 4.17a'da görüldüğü gibi, dielektrik sabiti değişimine bağlı frekans tepkisi doğrusal değildir. Şekil 4.17a'daki eğim üç parçaya bölünüp incelendiğinde ilk parçanın ($1 \leq \epsilon_r \leq 5$) duyarlılığı en yüksektir. İkinci kısmın ($5 < \epsilon_r \leq 9$) hassasiyeti, birinci parçaya göre daha azdır. Üçüncü parçanın ($9 < \epsilon_r \leq 20$) hassasiyeti, ise en düşük olanıdır. Bu nedenle önerilen sensor yapısı, aynı test materyallerini kullanan literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.5'te görüldüğü gibi, önerilen çalışma Referanslar (Acevedo-Osorio vd. 2020; Cao vd. 2022; Cinar ve Basaran 2022; Dalgac vd. 2020; Gholamian vd. 2020)'dan daha hassastır. Ancak Referans (Samad vd. 2021) ölçümde daha hassas iken, önerilen yapı benzetim ortamında daha hassastır. Benzer şekilde, Referans (Wei vd. 2018) benzetim ortamında daha hassas iken, önerilen yapı ölçümde daha hassastır. Ayrıca Referanslar (Acevedo-Osorio vd. 2020; Cinar ve Basaran 2022) çift bant performans sunmaktadır;

ancak en yüksek hassasiyete sahip bantlar Çizelge 4.5'te yazılmıştır. Hassasiyet karşılaştırması aşağıdaki Eşitlik (4.20)'ye göre yapılmıştır.

$$Hassasiyet = \frac{f_{hava} - f_s}{f_{hava}(\epsilon_s - \epsilon_{hava})} \quad (4.20)$$

Burada, f_{hava} sensorun algılama katmanı boşken soğurma frekansı, f_s algılama katmanı test edilecek numune ile doluyken ki soğurma frekansıdır. ϵ_s test edilen malzemenin dielektrik sabiti ve $\epsilon_{hava} = 1$ havanın dielektrik sabitidir.

Çizelge 4.5. Literatürde bildirilen çalışmalarla, 3B yazıcıda imal edilmiş sensörün algılama performans karşılaştırma sonuçları

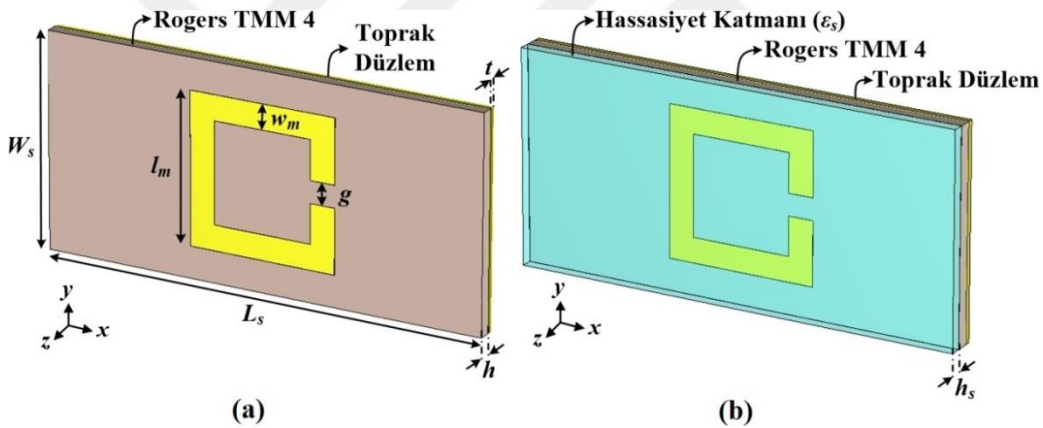
Test Edilen Malzeme	Referans	Dielektrik Sabiti	Frekans Aralığı (GHz)	Hassasiyet (MHz)
Rogers RO3010	Cinar ve Basaran 2022	1 – 10.2	3.10 – 3.52 (ben.) 3.18 – 3.50 (ölç.)	12.97 (ben.) 9.94 (ölç.)
	Bu Çalışma	1 – 10.2	2.41 – 3.20 (ben.) 2.56 – 3.24 (ölç.)	26.84 (ben.) 22.81 (ölç.)
Pleksiglas	Samad vd. 2021	1 – 3.4	4.36 – 5.15 (ben.) 4.33 – 5.07 (ölç.)	63.92 (ben.) 60.82 (ölç.)
	Bu Çalışma	1 – 2.9	2.76 – 3.20 (ben.) 2.93 – 3.24 (ölç.)	72.37 (ben.) 50.36 (ölç.)
Aseton	Dalgac vd. 2020	1 – 23	8.80 – 9.50 (ben.)	3.35 (ben.)
	Bu Çalışma	1 – 20.7	2.28 – 3.20 (ben.) 2.25 – 3.24 (ölç.)	14.59 (ben.) 15.51 (ölç.)
Asetonitril	Acevedo-Osorio vd. 2020	1 – 35.28	2.55 – 2.58 (ölç.)	0.27 (ölç.)
	Bu Çalışma	1 – 37.5	2.19 – 3.20 (ben.) 2.13 – 3.24 (ölç.)	8.65 (ben.) 9.39 (ölç.)
Etil Asetat	Cao vd. 2022	1 – 6.04	11.57 – 11.20 (ben.) 11.58 – 11.20 (ölç.)	6.35 (ben.) 6.43 (ölç.)
	Wei vd. 2018	1 – 5.92	1.72 – 2.19 (ben.) 1.73 – 2.19 (ölç.)	43.62 (ben.) 42.69 (ölç.)
	Bu Çalışma	1 – 5.99	2.53 – 3.20 (ben.) 2.43 – 3.24 (ölç.)	41.96 (ben.) 50.10 (ölç.)
N-Hekzan	Wei vd. 2018	1 – 1.89	1.96 – 2.19 (ben.) 1.97 – 2.19 (ölç.)	118 (ben.) 112.87 (ölç.)
	Gholamian vd. 2020	1 – 1.95	6.19 – 6.25 (ben.) 6.18 – 6.25 (ölç.)	10.61 (ben.) 11.79 (ölç.)
	Bu Çalışma	1 – 1.88	2.93 – 3.20 (ben.) 2.84 – 3.24 (ölç.)	95.88 (ben.) 140.29 (ölç.)

4.1.3. YHR Tabanlı Soğurucu ve Sensor Uygulaması

Bu kısımda, S-bant frekans bölgesinde çalışan, frekansları birbirinden farklı iki adet YHR tabanlı soğurucu tasarlanmış, üretilmiş ve ölçülmüştür. Ayrıca sensor mekanizmasını açıklamak için analitik model oluşturulmuştur.

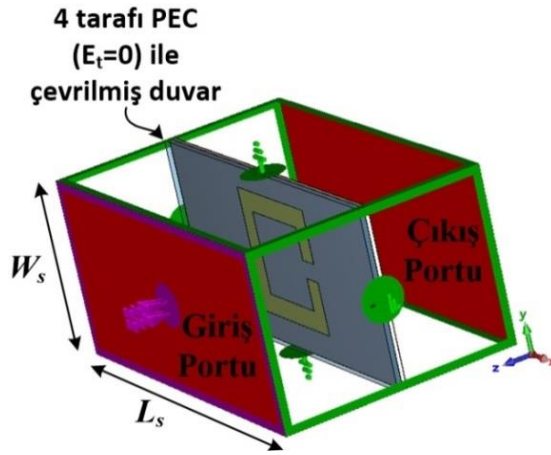
4.1.3.1. Tasarım ve Benzetim Ortamı

3.12 ve 3.51 GHz'de çalışan iki adet YHR tabanlı soğurucu tasarlanmış ve bunların tasarım parametreleri ve şematik görüntüleri Şekil 4.22a'da verilmiştir. 3.12 GHz'de çalışan YHR soğurucu, YHR_{alt} olarak adlandırılmıştır. YHR_{alt} 'ın tasarım parametreleri l_m , w_m ve g sırasıyla 24, 4 ve 3.5 mm'dir. 3.51 GHz'deki YHR tabanlı soğurucu, $YHR_{üst}$ olarak adlandırılmıştır. $YHR_{üst}$ 'ün tasarım parametreleri l_m , w_m ve g sırasıyla 22, 4 ve 4 mm'dir. Taban malzemesi olarak kullanılan Rogers TMM4'ün tasarım parametreleri $L_s \times W_s \times h$ sırasıyla, 72.136, 34.036 ve 0.76 mm'dir. Şekil 4.22b'de görüldüğü gibi, çift bantlı soğurucunun hassasiyetini incelemek için, rezonatörün üzerine h_s kalınlığı ve ϵ_s dielektrik sabiti olan bir hassasiyet katmanı eklenmiştir.



Şekil 4.22. a) YHR tabanlı soğurucunun şematik görünümü; b) Hassasiyet katmanı eklenmiş YHR tabanlı soğurucunun şematik görünümü

Soğurucu tasarımı ve nümerik analizler CST Microwave Studio (MWS)'da Frekans Bölgesi Çözümleyicisi kullanılarak yapılmıştır. Soğurucuya ait benzetim düzeneği Şekil 4.23'de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere dalga kılavuzunun z-ekseni boyunca, yan duvarları mükemmel elektrik iletken (PEC) ile sınırlandırılmıştır. Soğurucuyu uyarmak için, dalga kılavuzunun her iki ucu da giriş ve çıkış portları ile sonlandırılmıştır. Önerilen tasarım TE_{10} modu ile uyarılmıştır. Ayrıca elektrik alan vektörü E , manyetik alan vektörü H ve yayılma vektörü k sırasıyla x , y ve z eksenini boyunca ilerlemektedir.



Şekil 4.23. YHR tabanlı sensor için benzetim ortamının şematik görünümü

4.1.3.2. Ölçüm Düzeneği ve Üretim

Benzetim ortamında yapılan tasarımları doğrulamak için, farklı boyut ve frekanslardaki prototipler üretilmiş ve ölçülmüştür. Ölçüm düzeneği Şekil 4.24'te gösterilmiştir. Numune tutucu arasına yerleştirilen her bir prototipin yansıma ve iletim katsayı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler için, S-bant WR284 dalga kılavuzuna bağlı Agilent Fieldfox N9926A vektör ağ analizörü kullanılmıştır.



Şekil 4.24. YHR tabanlı soğurucunun ölçüm düzeneği

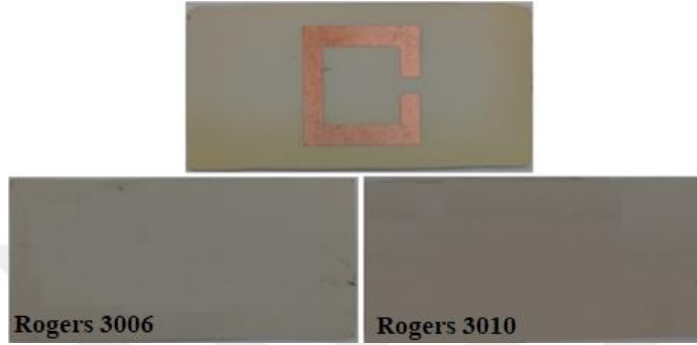
Üretimler geleneksel baskı devre tekniğiyle yapılmıştır ve üretim adımları sırasıyla aşağıda verilmiştir:

- İlk olarak CST MWS ortamından, tasarlanan yapının sınır hatları belirli biçimde, DXF uzantılı dosya alınır.
- DXF uzantılı dosya, DoubleCAD XT programında açılır ve sınır hatlarının içi siyah ile doldurulur. Daha sonra bu dosya PDF uzantılı dosyaya dönüştürülür.
- PDF uzantılı dosya, tonerli lazer yazıcı ile %100 boyutta kuşe kâğıda yazdırılır.
- Üzerinde YHR şekilli siyah desen yazılı olan kuşe kâğıt Rogers TMM4 üzerine ütülenir. Ütünden oluşan sıcak baskı sayesinde, YHR şekilli desen plakete

aktarılır.

- Desenli plaket, 1 ölçek H_2O_2 ve 4 ölçek HCl karışımıyla elde edilen asit havuzuna bırakılır. Plaket üzerindeki metal, asitle tepkimeye girer ve kalkar. Ancak tonerden dolayı YHR şekilli metal kısım asit ile tepkimeye girmez.
- Son olarak YHR şekilli desen ve toprak düzlem üzerindeki toner aseton ile silinir.

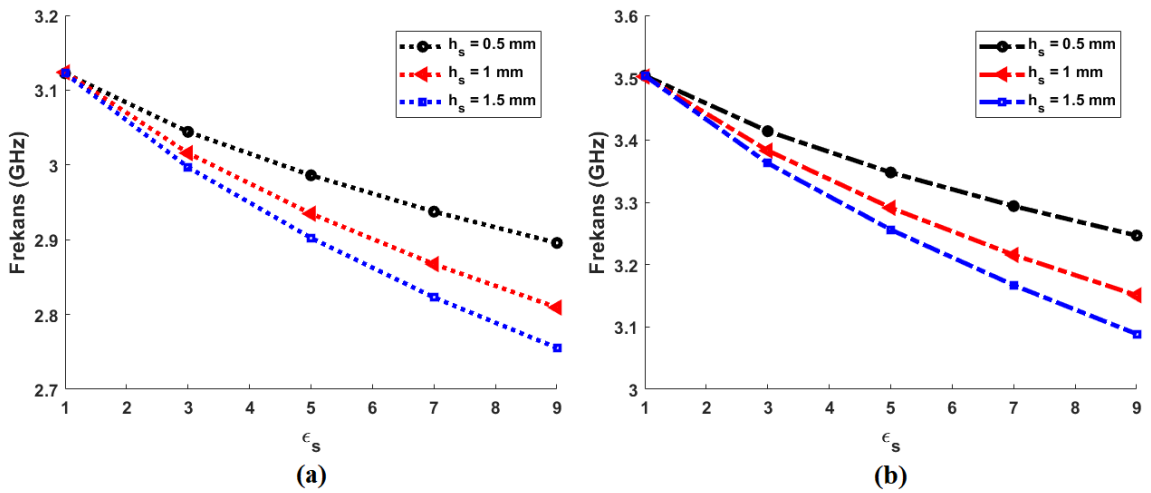
Üretilen SRR tabanlı soğuruculardan bir tanesinin önden görünümü ve hassasiyet katmanlarından birkaçı Şekil 4.25’de gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Üretilen SRR tabanlı soğurucu ve hassasiyet katmanları

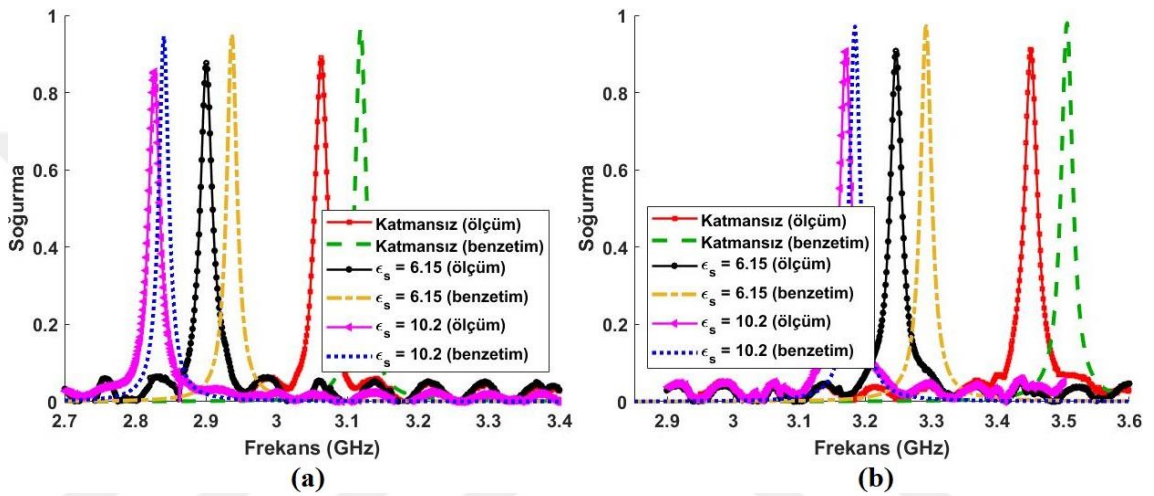
4.1.3.3. Parametrik Analiz ve Ölçüm Sonuçları

YHR yapılarının, algılama katmanının dielektrik sabitine ϵ_s ve kalınlığına h_s bağlı frekans cevapları benzetim ortamında hesaplanmıştır. YHR_{alt} ve $YHR_{üst}$ için nümerik sonuçlar sırasıyla, Şekil 4.26a ve Şekil 4.26b’de verilmiştir. Algılama katmanının dielektrik sabiti ϵ_s , arttıkça yapının çalışma frekansı düşmektedir. Benzer şekilde kalınlık h_s arttıkça, sensorun çalışma frekansı azalmaktadır. Ayrıca, Şekil 4.26’deki grafiklerden anlaşılabileceği üzere, kalınlık h_s arttıkça sensorun hassasiyeti de artmaktadır.



Şekil 4.26. Çeşitli kalınlık (h_s) ve dielektrik sabiti (ϵ_s) değerlerine bağlı olarak benzetim ortamında elde edilen soğurma frekansındaki değişim grafikleri, a) YHR_{alt} ; ve b) $YHR_{üst}$

Hassasiyet katmanı olarak, $h_s = 0.64$ mm kalınlığındaki Rogers 3006 ve Rogers 3010 malzemelerinin kullanıldığı durumlar için, YHR tabanlı soğurucuların nümerik ve deneysel analizleri yapılmıştır. Hassasiyet katmanı yokken YHR_{alt} ve $YHR_{üst}$ benzetim ortamında sırasıyla 3.12 GHz ve 3.51 GHz’de çalışırken; ölçümlerde 3.06 GHz ve 3.45 GHz’de çalışmaktadır. Hassasiyet katmanı olarak Rogers RO3006 varken, YHR_{alt} ve $YHR_{üst}$ benzetim ortamında sırasıyla 2.94 GHz ve 3.29 GHz’de çalışırken; ölçümlerde 2.90 GHz ve 3.25 GHz’de çalışmaktadır. Rogers RO3010 için, YHR_{alt} ve $YHR_{üst}$ benzetim ortamında sırasıyla 2.84 GHz ve 3.19 GHz’de çalışırken; ölçümlerde 2.83 GHz ve 3.17 GHz’de çalışmaktadır. YHR_{alt} ve $YHR_{üst}$ için, nümerik ve deneysel analiz sonuçları sırasıyla Şekil 4.27a ve Şekil 4.27b’de gösterilmiştir.



Şekil 4.27. a) YHR_{alt} için farklı ϵ_s için benzetim ve ölçüm sonuçları; b) $YHR_{üst}$ için farklı ϵ_s için benzetim ve ölçüm sonuçları

4.1.3.4. Sensor Davranışının Analitik Yöntemle İncelenmesi

Hassasiyet katmanının kalınlık h_s ve dielektrik sabiti ϵ_s 'deki değişimlerine bağlı olarak, sensor yapısının frekans davranışını açıklamak için Eşitlik (4.21) ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bilindiği gibi rezonans frekansı şu formüle ifade edilir:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{Toplam}C_{Toplam}}} \quad (4.21)$$

burada, L_{Toplam} sensor yapısının toplam endüktansdır ve h , h_s , ϵ_r ve ϵ_s gibi taban malzemesinin parametrelerinin değişiminden etkilenmemektedir. Eşitlik (4.22) ile elde edilen C_{Toplam} , sensor yapısının toplam kapasitansdır ve Şekil 4.28'deki gibi seri bağlı üç kondansatörden oluşmaktadır. Bu üç kondansatör, soğurucu yapıdan ($C_{soğurucu}$), hassasiyet katmanından ($C_{hassasiyet}$) ve havadan (C_{hava}) dolayı oluşmaktadır. $C_{soğurucu}$, $C_{hassasiyet}$ ve C_{hava} 'nin eşitlikleri sırasıyla Eşitlik (4.23–4.25)'de verilmiştir. Burada, A rezonatörün toplam alanı, $\epsilon_0=8.85\times10^{-12}$ F/m serbest uzayın dielektrik sabiti ve d ise hassasiyet katmanının ve havanın toplam kalınlığıdır. Kapasitans değerinin daha gerçekçi bir şekilde hesaplanması için, optimum kalınlıkta ($d-h_s$) bir hava aralığı tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemine dayalı Elektromanyetik Çözücüde bu hava

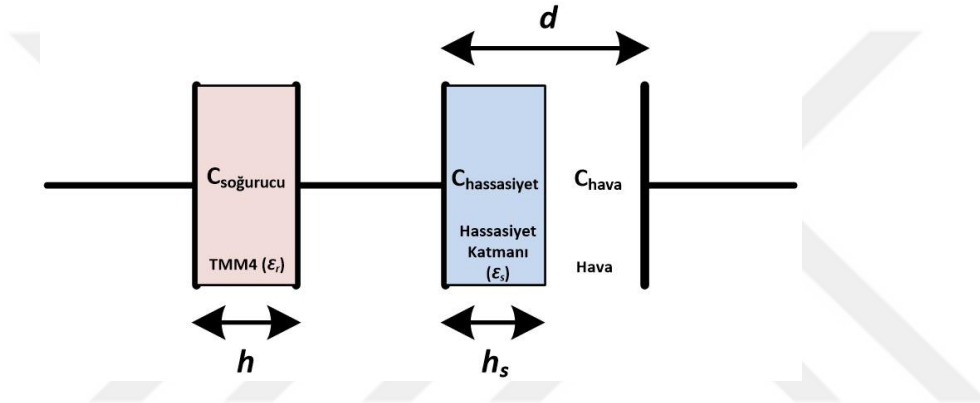
aralığının en az $\lambda/4$ olduğu belirtilmektedir (El Mrabet 2006). Bu bağlamda, WR284 dalga kılavuzunun frekans aralığı 2.6 ila 3.95 GHz'dir. 2.6 GHz alt frekansın çeyrek dalga boyu 28.85 mm'dir ve hassasiyet katmanı ve hava aralığı kalınlığı d bu değerde seçilmiştir.

$$\frac{1}{C_{Toplam}} = \frac{1}{C_{soğurucu}} + \frac{1}{C_{hassasiyet}} + \frac{1}{C_{hava}} \quad (4.22)$$

$$C_{soğurucu} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{h} \quad (4.23)$$

$$C_{hassasiyet} = \frac{\epsilon_s \epsilon_0 A}{h_s} \quad (4.24)$$

$$C_{hava} = \frac{\epsilon_0 A}{d-h_s} \quad (4.25)$$



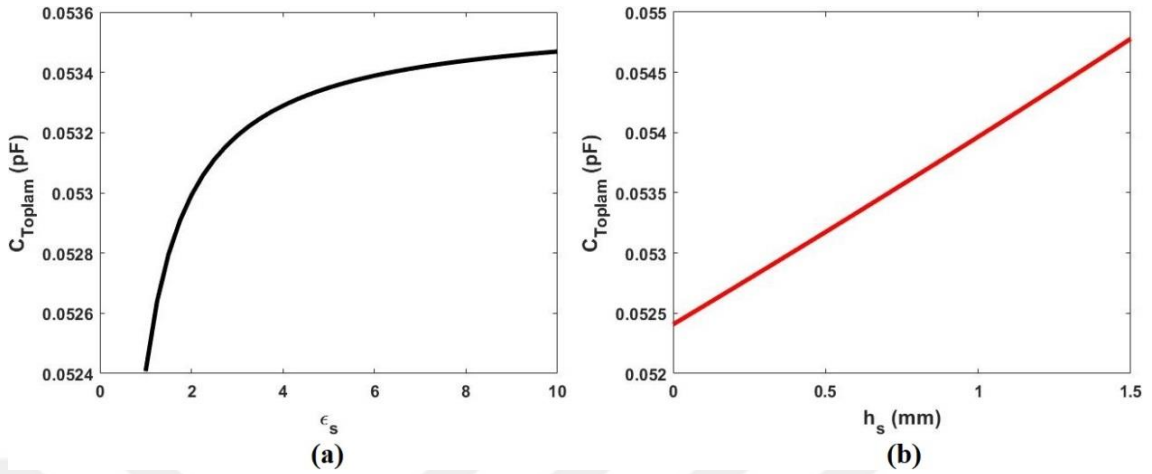
Şekil 4.28. Sensor yapısı için toplam kondansatör eşdeğerinin şematik görünümü

Eşitlik (4.23–4.25)'de verilen değerler Eşitlik (3.23)'te yerine yazılırsa toplam kapasite yeniden hesaplanır. Buna göre yeniden hesaplanan toplam kapasite denklem (4.26)'de verilmektedir.

$$C_{Toplam} = \frac{\epsilon_r \epsilon_s \epsilon_0 A}{\epsilon_r h_s + \epsilon_s h + \epsilon_r \epsilon_s (d - h_s)} \quad (4.26)$$

Eşitlik (4.26)'de görüldüğü gibi, hassasiyet katmanının ϵ_s dielektrik sabiti hem pay hem de paydada bulunmaktadır. Ancak paydaki bu değer, metre cinsinden taban malzemelerin kalınlığı ile çarpım durumundadır. Kalınlıklar metre cinsinden 1'den küçük ondalık değerlerdir. Bu durumda paydaki ϵ_s değerinin çarpanları, paydadakinden daha etkilidir. Hassasiyet katmanının dielektrik sabiti ϵ_s arttıkça, toplam kapasitans C_{Toplam} artar ve buna bağlı olarak Eşitlik (4.21)'de verilen rezonans frekansı azalır. Eşitlik (4.26)'ya göre, hassasiyet katman kalınlığı h_s arttırılırsa, paydaki $\epsilon_s h_s$ değeri artarken $\epsilon_r \epsilon_s (d - h_s)$ değeri azalacaktır. $\epsilon_r \epsilon_s (d - h_s)$, $\epsilon_s h_s$ 'den daha büyük olduğundan, hassasiyet katman kalınlığı h_s 'nin arttırılması paydayı küçültecektir. Sonuç olarak, hassasiyet katman kalınlığı h_s artınca toplam kapasitans artar ve rezonans frekansı azalır. Eşitlik (4.26)'yi doğrulamak amacıyla, $h_s = 0.64$ mm'de sabit tutularak, farklı ϵ_s

değerleri için C_{Toplam} davranışı Şekil 4.29a’da verilmiştir. Daha sonra, $\epsilon_s = 6.15$ ’te sabit tutularak, farklı h_s değerleri için C_{Toplam} değişimi Şekil 4.29b’de gösterilmiştir.



Şekil 4.29. a) Hassasiyet katmanının dielektrik sabiti ϵ_s değişimine göre toplam kapasitans C_{Toplam} davranışı; **b)** Hassasiyet katman kalınlığı h_s değişimine göre toplam kapasitans C_{Toplam} davranışı

4.2. X-Şekilli Rezonatör Tabanlı Soğurucu Tasarımı

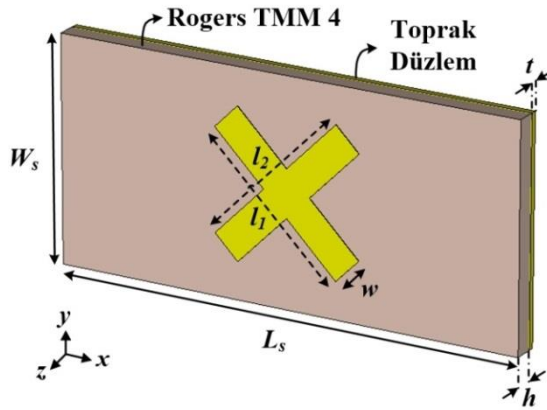
Bu bölümde, simetrik olup olmamasına göre tek veya çift bant davranış sergileyen X-şekilli rezonatör kullanılarak, çift/çok bantlı soğurucu ve sensor uygulamaları üzerine tasarımlar önerilmiştir.

4.2.1. Asimetrik X-Şekilli Rezonatör Tabanlı Çift Bantlı Soğurucu

Bu kısımda, tek katman üzerine yerleştirilmiş asimetrik X-şekilli rezonatörden oluşan basit bir soğurucu yapısı tasarlanarak çift bantlı soğurma davranışı elde edilmiştir. Tasarımı doğrulamak için üretim ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ayriyeten, önerilen tasarımın elektrik alan dağılımları, çapraz polarize yansıması ve temel elektromanyetik parametreleri incelenmiştir.

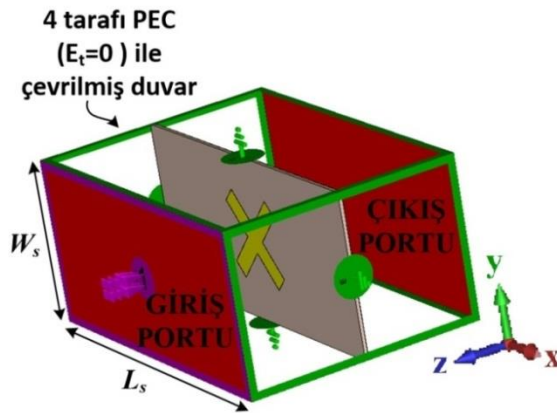
4.2.1.1. Tasarım ve Benzetim Ortamı

Önerilen yapının tasarım parametreleri ve şematik görünümü Şekil 4.30’da gösterilmiştir. Soğurucunun üst katmanı, $t = 0.035$ mm kalınlığa sahip bakır olan ($\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m) X-şekilli rezonatördür. Bu bakır rezonatör, $\epsilon_r = 4.5$ dielektrik sabiti, $\tan \delta = 0.002$ kayıp tanjantı ve $h = 0.76$ mm kalınlığı olan Rogers TMM4 taban malzemesi üzerine konumlandırılmıştır. Taban malzemesinin diğer yüzeyi ise, tamamen toprak düzlem olması amacıyla, bakır ile kaplanmıştır. Kullanılan Rogers TMM4’ün boyutları $L_s \times W_s$ sırasıyla, 72.136 ve 34.036 mm’dir. Ayrıca, rezonatörün her bir kolunun boyutları l_1 ve l_2 , kol kalınlıkları ise w ile temsil edilmiştir.



Şekil 4.30. Asimetrik X-şekilli soğurucunun şematik görünümü ve tasarım parametreleri

Soğurucu tasarımı ve nümerik analizler CST Microwave Studio (MWS)'da Frekans Bölgesi Çözümleyicisi kullanılarak yapılmıştır. Soğurucuya ait benzetim düzeneği Şekil 4.31'de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere dalga kılavuzunun z-ekseni boyunca, yan duvarları mükemmel elektrik iletken (PEC) ile sınırlandırılmıştır. Soğurucuyu uyarmak için, dalga kılavuzunun her iki ucu da giriş ve çıkış portları ile sonlandırılmıştır. Önerilen tasarım TE₁₀ modu ile uyarılmıştır. Ayrıca elektrik alan vektörü E , manyetik alan vektörü H ve yayılma vektörü k sırasıyla x , y ve z eksenini boyunca ilerlemektedir.



Şekil 4.31. Asimetrik X-şekilli soğurucu için benzetim ortamının şematik görünümü

Önerilen geometrinin boyutu ile soğurma frekansı arasındaki ilişki aşağıdaki Eşitlik (4.27) ile açıklanmıştır.

$$l = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_e}} \quad (4.27)$$

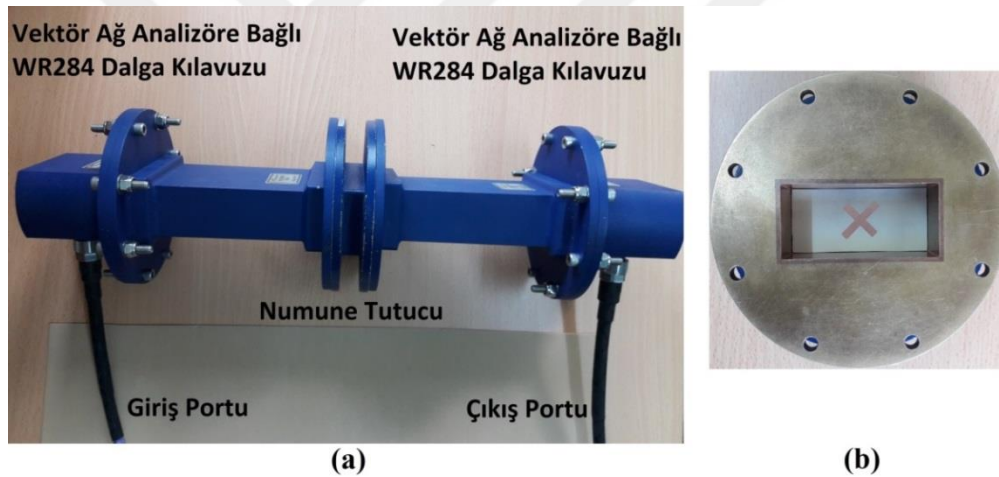
Burada, l X-Şekilli rezonatörün herhangi bir kolunun uzunluğu, c ışık hızı, f soğurma frekansı ve ϵ_e X-Şekilli soğurucunun efektif elektriksel geçirgenliğidir. Ayrıca, X-Şekilli soğurucunun efektif elektriksel geçirgenliği aşağıdaki Eşitlik (4.28) kullanılarak hesaplanmıştır (Pozar 2012).

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}} \quad (4.28)$$

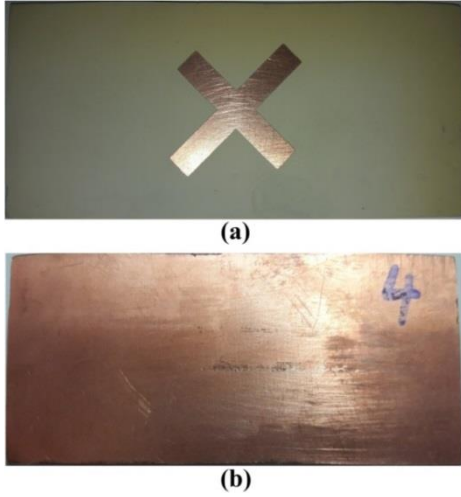
Burada, ε_r X-Şekilli soğurucunun taban malzemesinin dielektrik sabiti, h X-Şekilli soğurucunun taban malzemesinin kalınlığı ve w X-Şekilli rezonatörün herhangi bir kolunun kalınlığıdır.

4.2.1.2. Ölçüm Düzeneği ve Üretim

Benzetim ortamında yapılan tasarımları doğrulamak için, farklı boyutlarda 4 adet prototip üretilmiş ve ölçülmüştür. Ölçüm düzeneği ve içinde prototip olan numune tutucu Şekil 4.32a ve Şekil 4.32b’de gösterilmiştir. Numune tutucu arasına yerleştirilen her bir prototipin yansıma ve iletim katsayı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler için, S-bant WR284 dalga kılavuzuna bağlı Agilent Fieldfox N9926A vektör ağ analizörü kullanılmıştır. Üretimler geleneksel baskı devre tekniğiyle yapılmıştır ve üretim aşamaları daha önceden Bölüm 4.1.3.2’de ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Üretilen soğuruculardan bir tanesinin X-şekilli deseni ve toprak düzlemi sırasıyla Şekil 4.33a ve Şekil 4.33b’de gösterilmiştir.



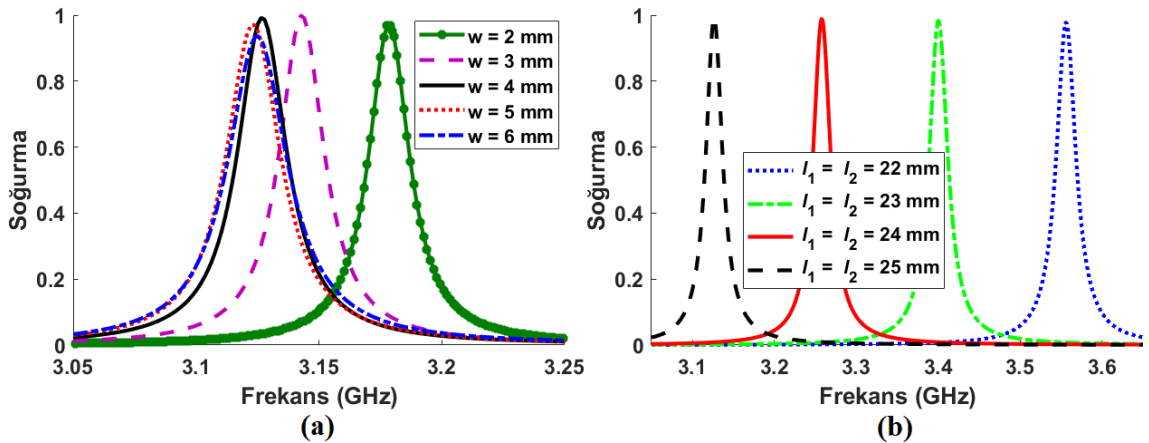
Şekil 4.32. Asimetrik X-şekilli soğurucunun **a)** ölçüm düzeneği; **b)** içinde bir adet prototip bulunan numune tutucu



Şekil 4.33. Üretilen asimetrik X-şekilli soğurucunun **a)** önden; **b)** arkadan görüntüsü

4.2.1.3. Parametrik Analiz ve Sonuçlar

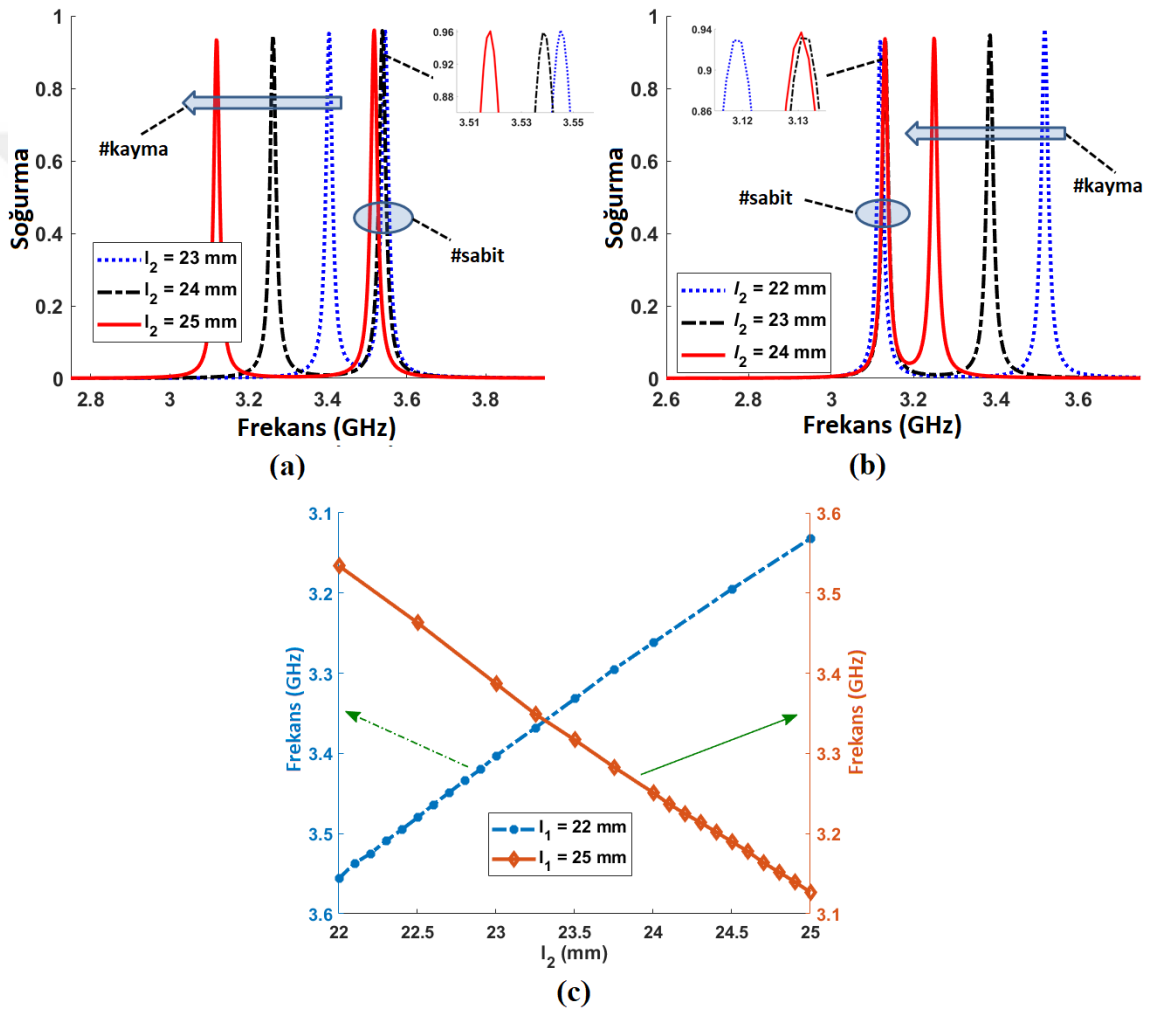
İlk olarak, rezonatör kollarının genişliğini elde etmek amacıyla $l_1 = l_2 = 25$ mm’de sabit tutularak, farklı kol genişliği w değerleri için soğurma analizleri yapılmıştır. Şekil 4.34a’da gösterildiği gibi, $w = 2$ mm’den 4 mm’ye kadar arttıkça rezonans frekansı azalmaktadır. Ancak $w = 4$ mm’den sonra 6 mm’ye kadar arttığında ise rezonans frekansında değişim gözlemlenmemektedir. Daha sonra rezonatörün simetrisi bozulmadan $w = 4$ mm’de sabit tutularak, farklı kol boyu uzunlukları için soğurma analizleri yapılmıştır ve S-bant frekans aralığında tek çalışma frekansı gözlemlenmiştir. Şekil 4.34b’de görüldüğü üzere, kol boyları arttıkça rezonans frekansında azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca, soğurma sonuçları Eşitlik (4.1) kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.34. Rezonatör simetrik durumdayken **a)** farklı kol kalınlıkları için soğurma davranışları; **b)** farklı kol uzunlukları için soğurma davranışları

Rezonatörün kol uzunlukları (l_1 ve l_2) birbirinden farklı olduğu zaman çift bantlı bir frekans tepkisi elde edilir ve bantların soğurma frekansları, kollar boyları

değiştirilerek ayarlanabilir. Asimetrik durum için elde edilen frekans tepkileri Şekil 4.35'de verilmiştir. Şekil 4.35a'da görüldüğü gibi, $l_1 < l_2$ ($l_1 = 22$ mm) durumunda üst bant soğurma frekansı değişmezken alt bant frekansı düşüş yönünde değişmektedir. Ters durumda ise $l_1 > l_2$ ($l_1 = 25$ mm) durumu için, Şekil 4.35b'de gösterildiği gibi alt bant soğurma frekansı değişmezken üst bant frekansı düşüş yönünde değişmektedir. l_1 ve l_2 değişimlerinin, soğurma tepelerinin oluştuğu frekansa etkisini gözlemlemek için analizler yapılmıştır. Bu analizlerde, l_1 22 ve 25 mm'de sabit tutulurken, farklı l_2 değerleri için nümerik incelemeler yapılmıştır. Sonuçlar grafiksel olarak Şekil 4.35c'de verilmiştir ve kol boyları arasındaki fark ile soğurma frekansları arasında doğrusal bir ilişki vardır.

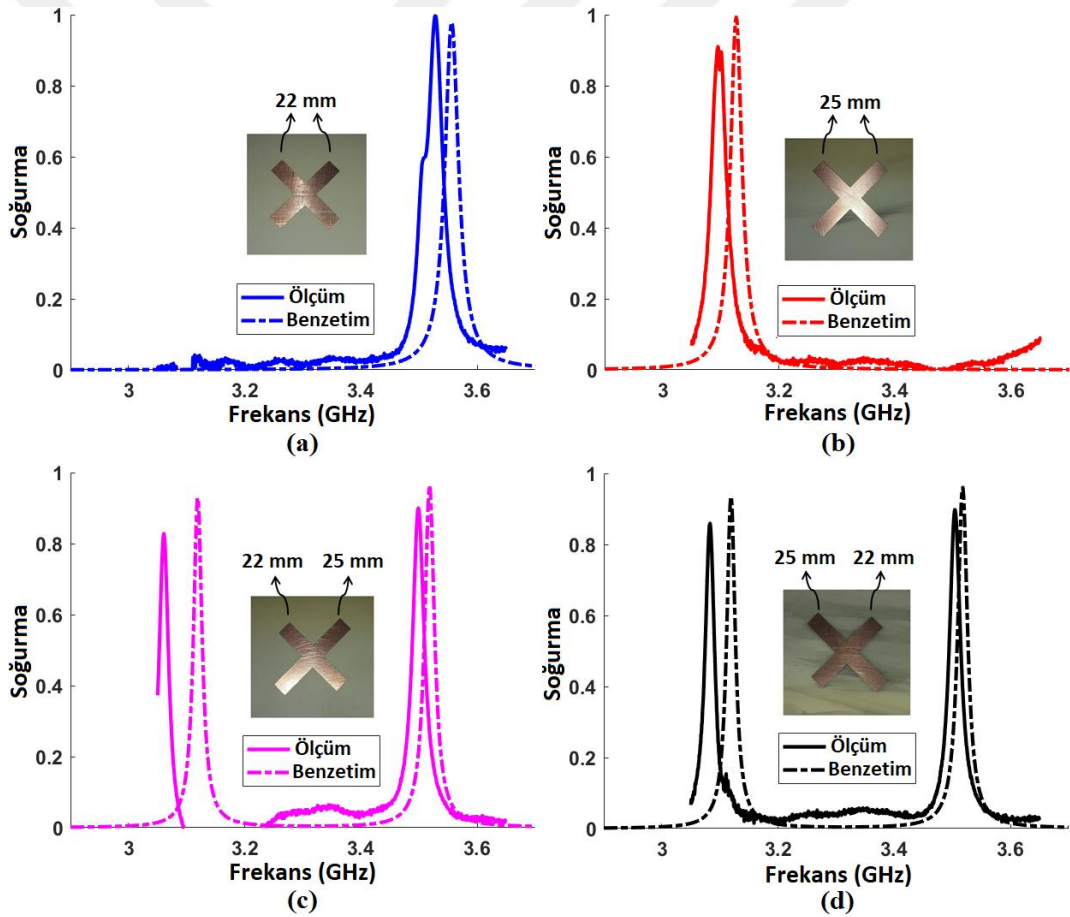


Şekil 4.35. a) Farklı l_2 değerleri için soğurma spektrumları, **a)** $l_1 = 22$ mm; **b)** Farklı l_2 değerleri için soğurma spektrumları, $l_1 = 25$ mm; **c)** Farklı l_2 değerleri için soğurma frekansları, $l_1 = 22$ mm ve $l_1 = 25$ mm

4.2.1.4. Ölçüm Sonuçları

Önerilen tasarımı doğrulamak için farklı boyutlara sahip 4 adet prototip rezonatör, üretilmiştir ve ölçülmüştür. Bu prototiplerin ilk ikisi (Tasarım#1 ve

Tasarım#2) kol boyları eşit ve simetrik rezonatörlere sahiptir. Tasarım#1’de kol uzunlukları $l_1 = l_2 = 22$ mm, Tasarım#2’de ise $l_1 = l_2 = 25$ mm olarak belirlenmiştir. Diğer iki prototipin (Tasarım#3 ve Tasarım#4) rezonatörleri farklı kol uzunluklarına sahip ve simetrik değildir. Tasarım#3’te kol uzunlukları $l_1 = 22$ mm ve $l_2 = 25$ mm, Tasarım#4’te ise $l_1 = 25$ mm ve $l_2 = 22$ mm olarak belirlenmiştir. Her bir prototip için elde edilen nümerik ve deneysel sonuçlar Şekil 4.36’da gösterilmiştir. CST MWS benzetim sonuçlarına göre, Tasarım#1 Şekil 4.36a’da görüldüğü gibi 3.56 GHz’de 0.98 soğurma tepesi sağlamaktadır. Şekil 4.36b’ye göre Tasarım#2 3.13 GHz ‘de 0.99 soğurma gerçekleştirmektedir. Şekil 4.36c ve Şekil 4.36d, sırasıyla Tasarım#3 ve Tasarım#4’ün nümerik ve deneysel soğurma özelliklerini göstermektedir. Burada, her iki prototipin de beklenildiği gibi aynı soğurma karakteristiğine sahip olduğu ve çift bantlı soğurma tepelerinin elde edildiği görülmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre, tasarımlar sırasıyla 3.12 GHz ve 3.52 GHz’de 0.93 ve 0.96 soğurma tepeleri sağlamaktadır.



Şekil 4.36. Benzetim ve ölçümlerden elde edilen soğurma grafikleri, **a)** Tasarım#1; **b)** Tasarım#2; **c)** Tasarım#3; **d)** Tasarım#4

Prototiplerin üretim hatası ve deney düzeneğinin kalibrasyon hassasiyeti nedeniyle benzetim ve ölçüm sonuçları arasında az miktarda soğurma seviye farkı ve %2’den daha az bir frekans kayması mevcuttur. Çizelge 4.6’da, prototiplerin benzetim

ve ölçümde elde edilen soğurma tepe frekansları ve frekans kayma oranları ayrıntılı olarak verilmiştir.

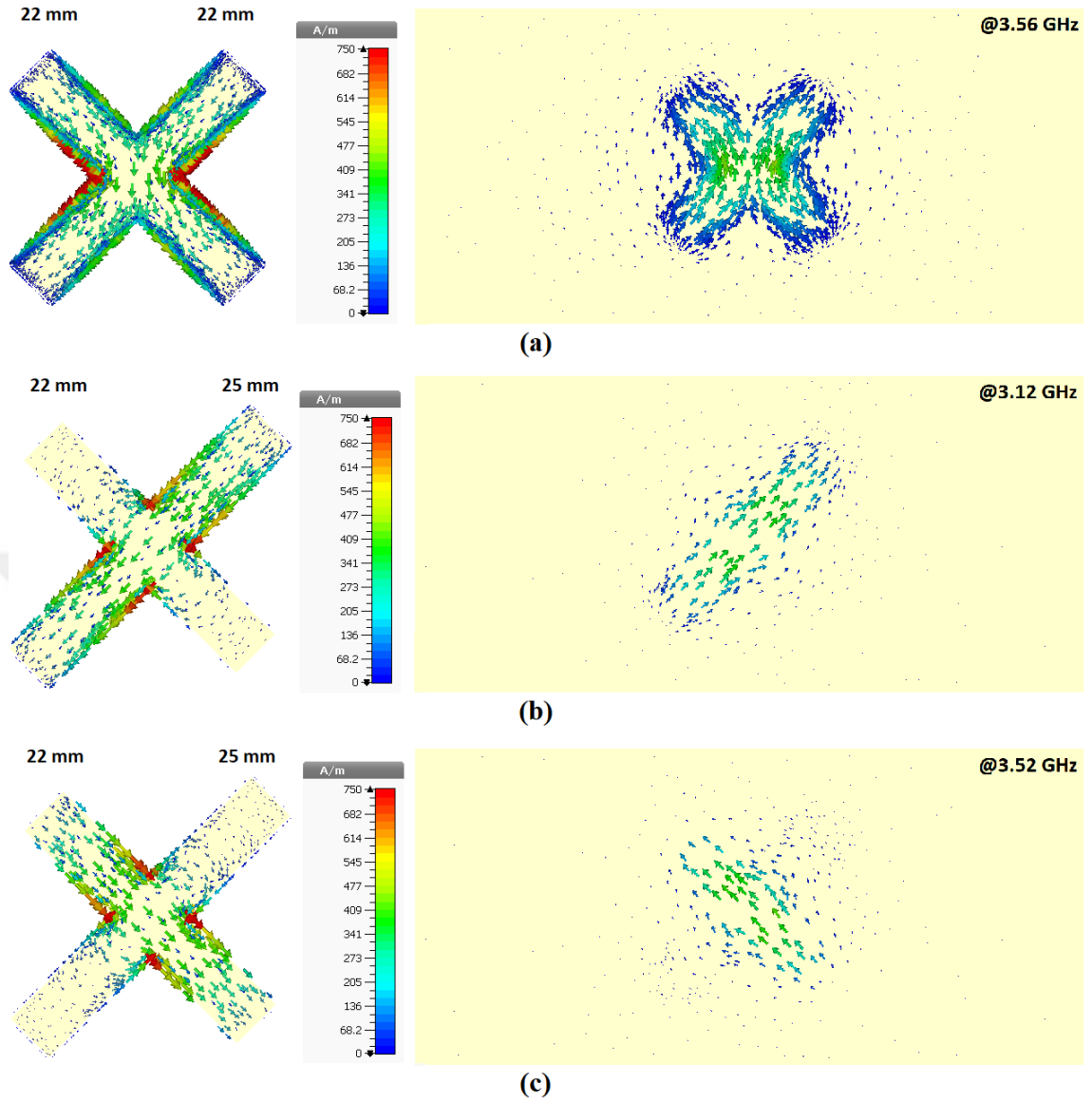
Çizelge 4.6. Ölçüm ve benzetim sonuçlarına göre prototiplerin soğurma frekansları ve frekans kayma yüzdeleri

Prototip	Frekans (GHz)				Yüzde Kayma $\left(\frac{f_{benzetim} - f_{ölçüm}}{f_{benzetim}} \times 100 \right)$	
	Benzetim		Ölçüm			
Tasarım#1	3.56	—	3.53	—	0.84	—
Tasarım#2	3.13	—	3.10	—	0.96	—
Tasarım#3	3.12	3.52	3.06	3.50	1.92	0.57
Tasarım#4	3.12	3.52	3.08	3.50	1.28	0.57

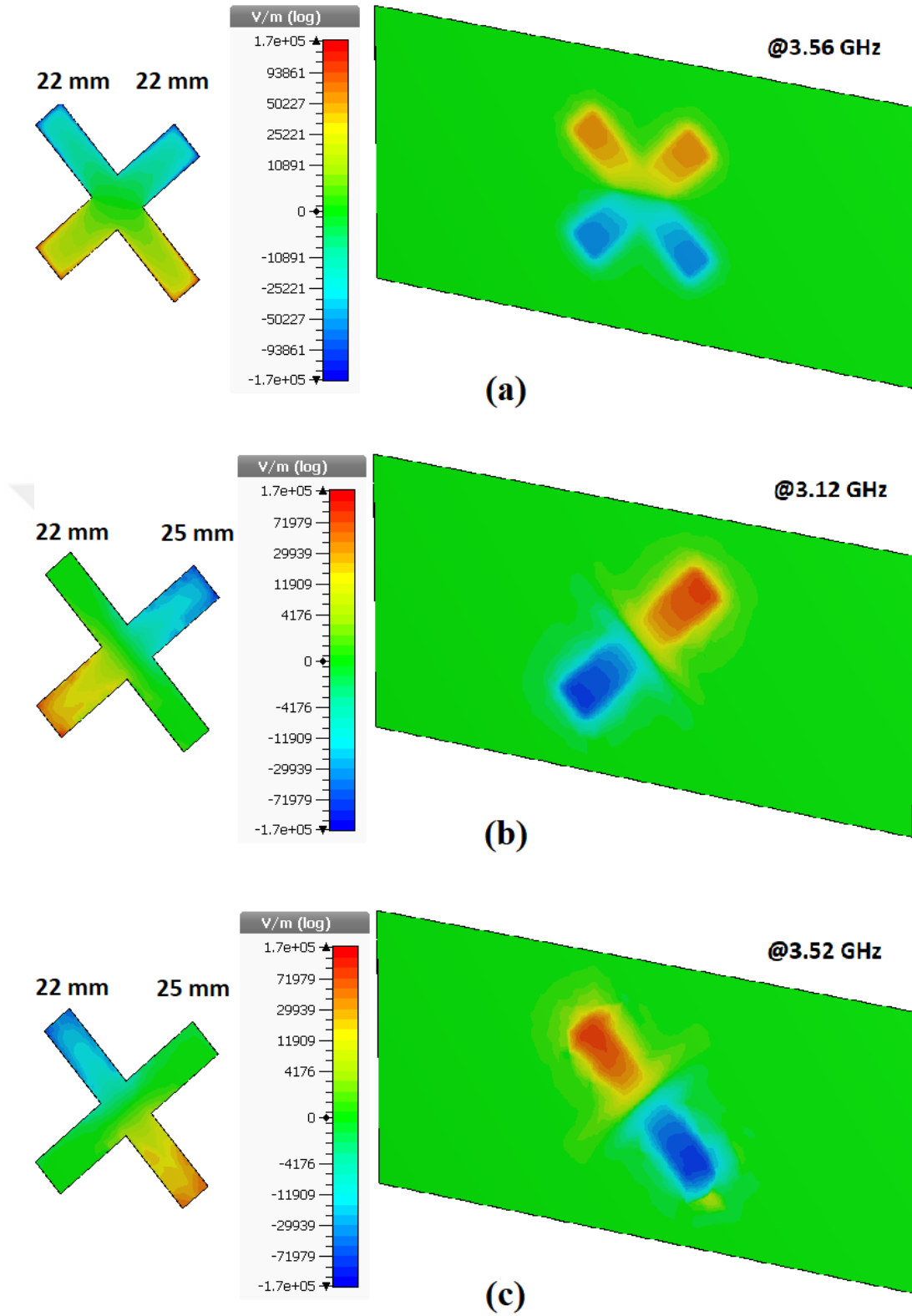
4.2.1.5. Elektrik Alan ve Yüzey Akım Dağılımlarının İncelenmesi

Önerilen tasarımın tek ve çift bantlı soğurma davranışını açıklamak amacıyla, X-şekilli rezonatörün simetrik olduğu (Tasarım#1) ve simetrik olmadığı (Tasarım # 3) her iki durum için yüzey akım yoğunluğu dağılımları ilgili frekanslarda nümerik olarak incelenmiştir. Soğurma tepelerinin olduğu frekanslarda, her bir tasarımın hem rezonatör hem de toprak düzlemindeki, benzetim ortamından elde edilen yüzey akım dağılımları Şekil 4.37'de gösterilmektedir. Tasarım#1 için, 3.56 GHz'de sadece tek bir soğurma tepesi elde edilmiştir ve bu frekanstaki akım dağılımları Şekil 4.37a'da gösterilmektedir. Rezonatörün her iki kolunda yüzey akımlarının eşit olarak aktığı ve her iki kenardaki yüzey akımlarının elektrik dipol rezonans davranışı sergilediği görülmektedir. Ayrıca rezonatördeki akımların tersi yönde toprak düzleminde akan yüzey akımları, manyetik dipolün varlığını da gösteren sirkülasyon akımını ortaya çıkarmaktadır. Tasarım#3 için, 3.12 ve 3.52 GHz frekanslarında iki farklı soğurma tepesi elde edilmektedir ve bu frekanslardaki akım dağılımları sırasıyla Şekil 4.37b ve 4.37c'de gösterilmektedir. Asimetrik X-şekilli rezonatör üzerindeki yüzey akımları daha düşük frekansta uzun kol boyunca akarken, daha yüksek frekans modunda kısa kol boyunca akmaktadır. Ayrıca Tasarım#1'e benzer şekilde, toprak düzlemi ile rezonatör arasında akan sirkülasyon akımı nedeniyle manyetik bir dipol oluşmaktadır.

Tasarımların yüzey akım dağılımına ek olarak, elektrik alan dağılımlarının z-bileşeni de her bir yapı için hesaplanmış ve bunlara karşılık gelen sonuçlar Şekil 4.38'de 270° faz açısı için sunulmuştur. Şekil 4.38a'da, rezonatörün her iki kolunda ve toprak düzleminde bir elektrik dipol uyarımı görülmektedir. Görüldüğü üzere, elektrik alan simetrik rezonatör üzerinde eşit olarak dağılmıştır. Ancak, rezonatör simetrik olmadığında, Şekil 4.38b ve Şekil 4.38c 'de gösterildiği gibi soğurma tepe frekansına bağlı olarak, rezonatörün yalnızca bir kolunda elektrik dipol tepkisi mevcuttur.



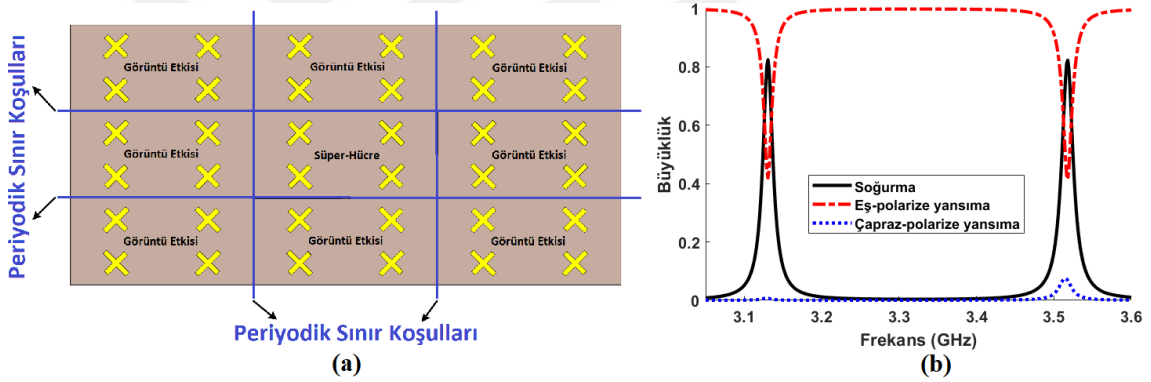
Şekil 4.37. X-şekilli rezonatör ve toprak düzlemi üzerinde 180° faz açısında yüzey akımı dağılımları **a)** 3.56 GHz'de Tasarım#1; **b)** 3.12 GHz'de Tasarım#3; **c)** 3.52 GHz'de Tasarım#3



Şekil 4.38. X-şekilli rezonatör ve toprak düzlemlerde 270° faz açısında elektrik alan dağılımlarının z-bileşeni **a)** 3.56 GHz'de Tasarım#1; **b)** 3.12 GHz'de Tasarım#3; **c)** 3.52 GHz'de Tasarım#3

4.2.1.6. Çapraz Polarize Yansımanın İncelenmesi

Asimetrik yapılarda çapraz polarize yansımanın meydana gelebileceği bilindiğinden, bu çalışmada asimetrik soğurucu konfigürasyonlarından birinin (Tasarım#3) çapraz polarize yansıması analiz edilmiştir. Bu analiz sürecinde, dikdörtgen dalga kılavuzunda çapraz polarize yansımanın hesaplanması mümkün olmadığından, CST MWS ortamında, Karacan vd. (2020)'de bildirildiği gibi, bir serbest uzay süper-hücre periyodik dizisi oluşturulmuştur ve iki Floquet modu kullanılmıştır. Süper-hücre dizisini gerçekleştirmek için, Şekil 4.39a'da gösterildiği gibi bir süper-hücresinin sınırlarında periyodik sınır koşulları (PBC) uygulanmıştır. Ayrıca süper-hücreyi oluştururken, benzetim ortamında dalga kılavuzunun mükemmel elektriksel iletken (PEC) duvarlarından kaynaklanan ayna görüntüsü etkisi hesaba katılmıştır. Sonuç olarak, serbest uzay dizileri için eş ve çapraz polarize yansımalar, benzetim yazılımı tarafından hesaplanmış ve soğurma spektrumları denklem (4.2) ile hesaplanmıştır. Ayrıca, soğurucunun arka yüzeyinin tamamen metalik toprak düzlem olmasından dolayı geçirgenlik sıfırdır. Hesaplamaya göre, Şekil 4.39b'de gösterildiği gibi her iki frekansta 0.8'den fazla soğurma seviyeleri elde edilebilmektedir.



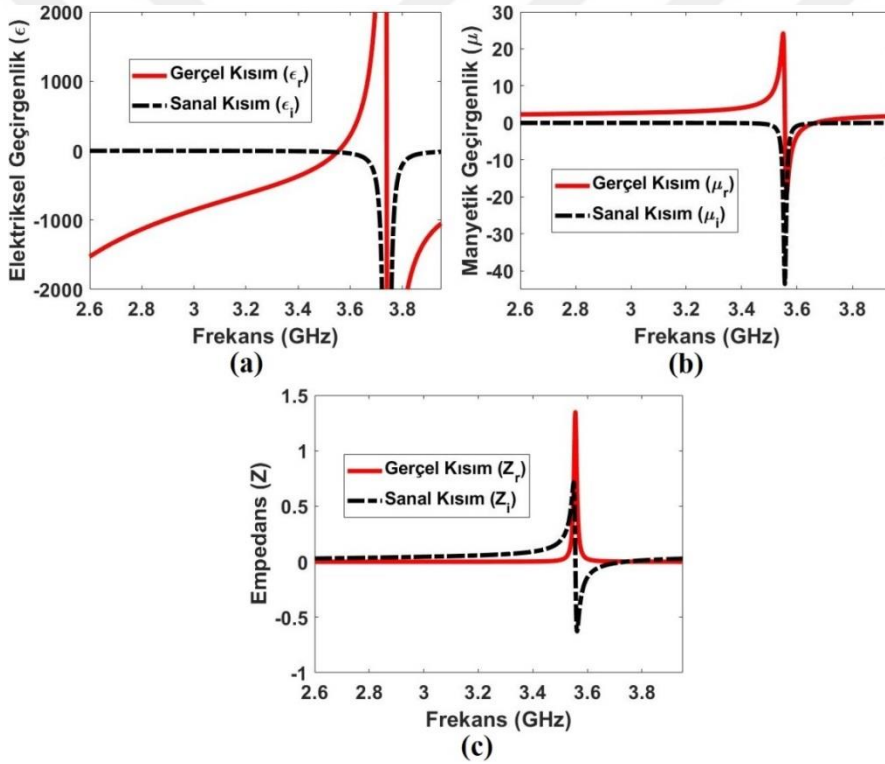
Şekil 4.39. Tasarım#3 için **a)** süper-hücre yapısı; **b)** süper-hücre dizisine ait soğurma, eş ve çapraz polarize yansıma sonuçları

4.2.1.7. Temel Elektromanyetik Parametrelerinin Çıkartılması

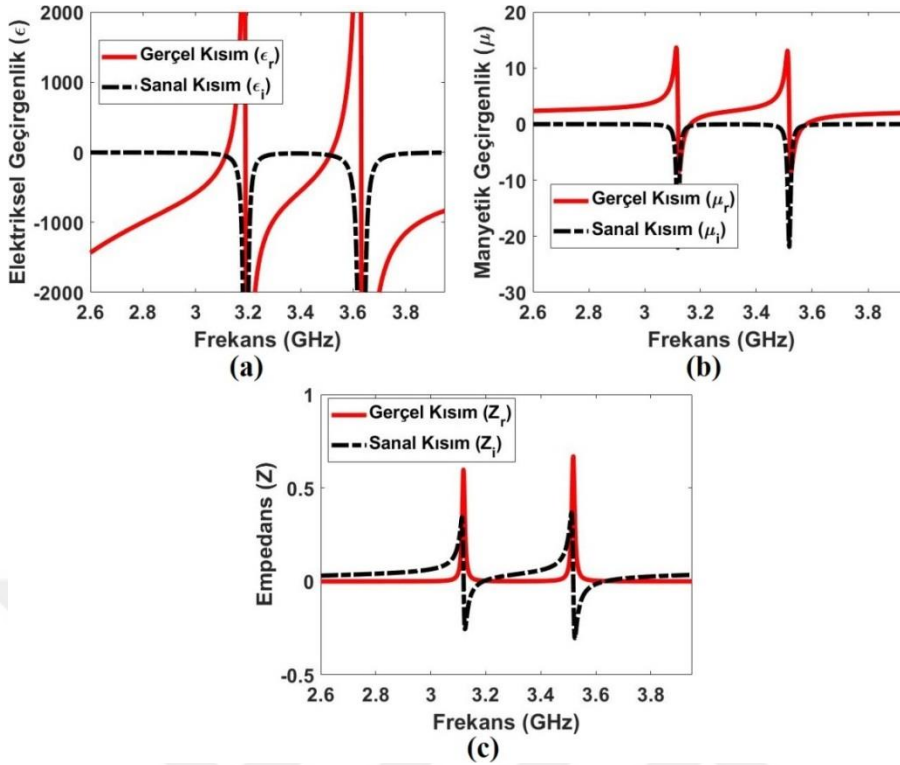
Benzetim ortamından elde edilen S-parametreleri kullanılarak, bağıntı 4.3 ve 4.4 yardımıyla, Tasarım#1 için etkin elektriksel geçirgenlik (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) hesaplanmıştır. Elde edilen ϵ ve μ sonuçları, gerçekte ve sanal kısımlarıyla birlikte, sırasıyla Şekil 4.40a ve Şekil 4.40b'de verilmiştir. Benzer şekilde, Tasarım#3 için etkin elektriksel geçirgenlik (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) hesaplanmış ve sırasıyla Şekil 4.41a ve Şekil 4.41b'de gösterilmiştir. Şekil 4.40 ve Çizelge 4.7'te görüldüğü üzere, 3.56 GHz soğurma frekansında Tasarım#1'in elektriksel geçirgenliğinin ve manyetik geçirgenliğinin gerçekte kısımların her ikisi de sıfırdan büyüktür ($\epsilon_r > 0$, $\mu_r > 0$). Bu durumda, 3.56 GHz soğurma frekansında, Tasarım#1 çift pozitif malzeme (ÇPM) olarak adlandırılabilir. Şekil 4.41 ve Çizelge 4.7'ye bakıldığında, Tasarım#3 3.12 GHz'de epsilonu negatif malzeme ($\epsilon_r < 0$, $\mu_r > 0$) olarak tanımlanırken, 3.52 GHz'de çift pozitif

malzeme ($\epsilon_r > 0$, $\mu_r > 0$) özelliği göstermektedir. Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’de görüldüğü üzere, soğurma tepelerinin olmadığı diğer frekanslarda, önerilen yapının elektriksel geçirgenliğinin gerçel kısmın (ϵ_r) ve manyetik geçirgenliğinin gerçel kısmın (μ_r) işaretleri farklıdır. Bu sebeple, kırılma indisi sanal değer alacak ve dalga yayılımı olmayacaktır. Bilindiği üzere, elektriksel ve manyetik geçirgenliğin sanal kısımları (ϵ_i ve μ_i) kayıplardan sorumludurlar. Çalışma frekanslarında yüksek bir soğurma seviyesi elde etmek için ϵ_i ve μ_i değerleri, Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’deki gibi, yüksek olmalıdır.

Tasarım#1 ve Tasarım#3’ün normalize giriş empedansı ($Z = \sqrt{\mu/\epsilon} = Z_r + jZ_i$), benzetim ortamından elde edilen S-parametreleri kullanılarak, bağıntı 4.5 yardımıyla, hesaplanmıştır. Bu yapıların arka yüzeyi tamamen toprak düzlem olarak kullanılan bakır ile kaplandığı için $|S_{21}|$ değeri sıfırdır. Şekil 4.40.c ve Şekil 4.41.c’de görüldüğü gibi, soğurma frekanslarında empedansın gerçel kısmı (Z_r) birim değere yaklaşırken, sanal kısım (Z_i) sıfıra yaklaşmaktadır.



Şekil 4.40. Tasarım#1 için **a)** elektriksel geçirgenlik; **b)** manyetik geçirgenlik; **c)** normalize giriş empedansı



Şekil 4.41. Tasarım#3 için **a)** elektriksel geçirgenlik; **b)** manyetik geçirgenlik; **c)** normalize giriş empedansı

Çizelge 4.7. Soğurma frekanslarında, X-Şekilli soğurucu tasarımlarının elektriksel geçirgenlik, manyetik geçirgenlik ve normalize giriş empedans değerleri

Tasarım	f (GHz)	ϵ	μ	Z (Ω)
#1	3.56	$0.34 - 23.97i$	$2.20 - 43.58i$	$1.35 + 0.04i$
#3	3.12	$-8.21 - 60.29i$	$4.37 - 22.03i$	$0.60 + 0.09i$
	3.52	$2.46 - 48.78i$	$0.34 - 21.87i$	$0.67 - 0.02i$

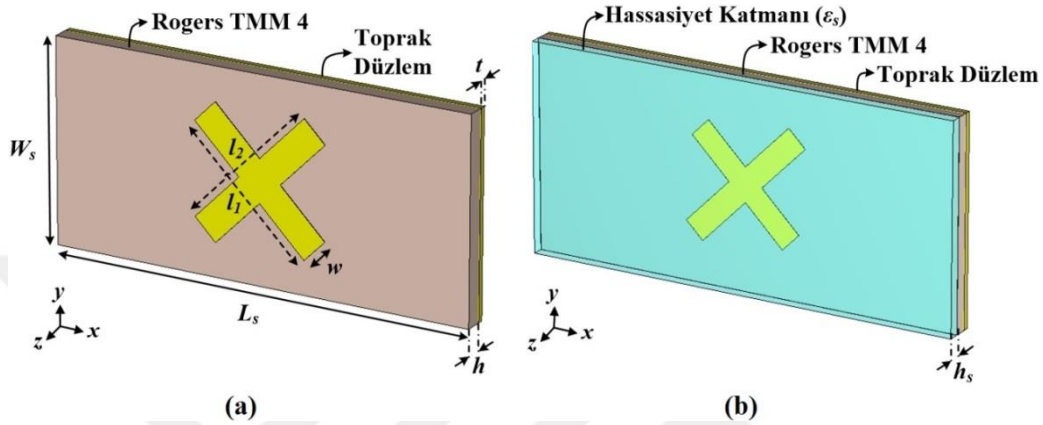
4.2.2. Asimetrik X-Şekilli Rezonatör Tabanlı Soğurucunun Sensor Uygulaması

Bu çalışmada, asimetrik X-şekilli rezonatör tabanlı soğurucunun sensor performansını anlamak amacıyla, soğurucu ve sensor tasarımlarında sıklıkla kullanılan YHR yapısı ile kıyaslanmıştır. Performans karşılaştırmaları için, Bölüm 4.1.3’de önerilen YHR yapıları ile Bölüm 4.2.1’de önerilen Tasarım#3 yapısı kullanılmıştır.

4.2.2.1. Tasarım, Benzetim Ortamı, Üretim ve Ölçüm Düzeneği

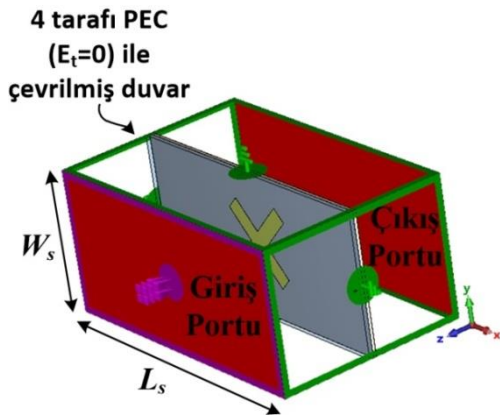
Önerilen yapının tasarım parametreleri ve şematik görünümü Şekil 4.42a’da gösterilmiştir. Soğurucunun üst katmanı, $t = 0.035$ mm kalınlığa sahip bakır olan ($\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m) X-şekilli rezonatördür. Bu bakır rezonatör, $\epsilon_r = 4.5$ dielektrik sabiti, $\tan\delta = 0.002$ kayıp tanjantı ve $h = 0.76$ mm kalınlığı olan Rogers TMM4 taban malzemesi

üzerine konumlandırılmıştır. Taban malzemesinin diğer yüzeyi ise, tamamen toprak düzlem olması amacıyla, bakır ile kaplanmıştır. Kullanılan Rogers TMM4'ün boyutları $L_s \times W_s$ sırasıyla, 72.136 ve 34.036 mm'dir. Ayrıca, rezonatörün her bir kolunun boyutları l_1 ve l_2 , kol kalınlıkları w sırasıyla 22, 25 ve 4 mm'dir. Ayrıca, bu yapı Bölüm 4.1'de tasarlanan ve analizler yapılan Tasarım#3'tür. Şekil 4.42b'de görüldüğü gibi, çift bantlı soğurucunun hassasiyetini incelemek için, rezonatörün üzerine h_s kalınlıklı ϵ_s dielektrik sabiti olan bir hassasiyet katmanı eklenmiştir.



Şekil 4.42. a) Asimetrik X-şekilli soğurucunun şematik görünümü; **b)** Hassasiyet katmanı eklenmiş asimetrik X-şekilli soğurucunun şematik görünümü

Soğurucu tasarımı ve nümerik analizler CST Microwave Studio (MWS)'da Frekans Bölgesi Çözümleyicisi kullanılarak yapılmıştır. Soğurucuya ait benzetim düzeneği Şekil 4.43'te gösterilmiştir. Görüldüğü üzere dalga kılavuzunun z-ekseni boyunca, yan duvarları mükemmel elektrik iletken (PEC) ile sınırlandırılmıştır. Soğurucuyu uyarmak için, dalga kılavuzunun her iki ucu da giriş ve çıkış portları ile sonlandırılmıştır. Önerilen tasarım TE_{10} modu ile uyarılmıştır. Ayrıca elektrik alan vektörü E , manyetik alan vektörü H ve yayılma vektörü k sırasıyla x , y ve z eksenı boyunca ilerlemektedir.



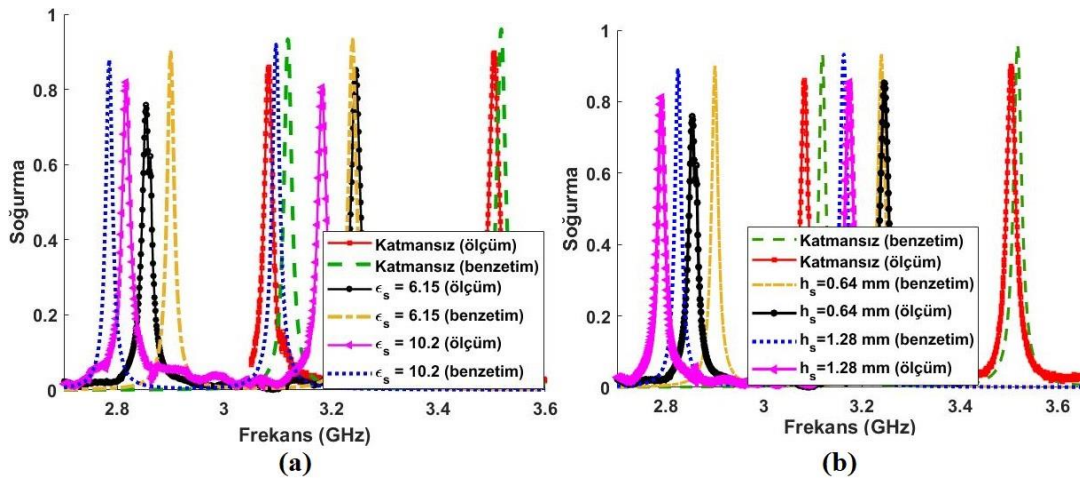
Şekil 4.43. Asimetrik X-şekilli soğurucu tabanlı sensor için benzetim ortamının şematik görünümü

Bölüm 4.2.1’de üretim adımları ayrıntılı olarak bahsedilen Tasarım#3, bu çalışmada da prototip olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan deney düzeneği Bölüm 4.1.3’de daha önceden ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

4.2.2.2. Parametrik Analiz ve Sonuçları

Öncelikle benzetim ortamında asimetrik X-şekilli rezonatör üzerine 0.64 mm kalınlığında taban malzemesi yerleştirildi ve soğurma frekanslarındaki değişimler gözlemlendi. Burada, hassasiyet katmanı olarak kullanılan malzemeler Rogers RO3006 ($\epsilon_r = 6.15$) ve Rogers RO3010 ($\epsilon_r = 10.2$)’dır. Hassasiyet katmanı olmadan asimetrik X-şekilli rezonatör, 3.12 ve 3.52 GHz frekanslarında çalışırken, Rogers RO3006 eklenmesiyle çalışma frekansları 2.9 ve 3.24 GHz’e düşmüştür. Benzer şekilde Rogers RO3010 için, 2.79 ve 3.1 GHz’de soğurma frekansları gözlemlenmiştir. Daha sonra bu analizler deney ortamında da gerçekleştirilmiştir. 3.08 ve 3.50 GHz çalışma frekanslı asimetrik X-şekilli rezonatöre Rogers RO3006 hassasiyet katmanı olarak eklendiğinde, frekanslar 2.85 ve 3.25 GHz’e düşmüştür. Hassasiyet katmanı olarak Rogers RO3010 kullanıldığında, elde edilen frekans tepeleri 2.82 ve 3.18 GHz’dir. Nümerik ve deneysel yöntemlerle elde edilen tüm soğurma grafikleri Şekil 4.44a’da verilmiştir.

Hassasiyet katman kalınlığı h_s ’in etkisini incelemek için hem nümerik hem de deneysel analizler yapılmıştır. Hassasiyet katmanı olmadan asimetrik X-şekilli rezonatör, 3.12 ve 3.52 GHz frekanslarında çalışırken, h_s 0.64 mm’lik Rogers RO3006 eklenmesiyle çalışma frekansları 2.9 ve 3.24 GHz’e düşmüştür. Daha sonra, $h_s = 1.28$ mm için, 2.82 ve 3.16 GHz’de soğurma frekansları gözlemlenmiştir. Nümerik analizleri desteklemek amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. 3.08 ve 3.50 GHz çalışma frekanslı asimetrik X-şekilli rezonatör, $h_s = 0.64$ mm’lik bir hassasiyet katmanı eklendiğinde frekanslar 2.85 ve 3.25 GHz’e düşmüştür. Hassasiyet katman kalınlığı $h_s = 1.28$ mm için elde edilen frekans tepeleri 2.79 ve 3.17 GHz’dir. Benzetim ve ölçüm soğurma sonuçları uyumludur ve Şekil 4.44b’de çizilmiştir.



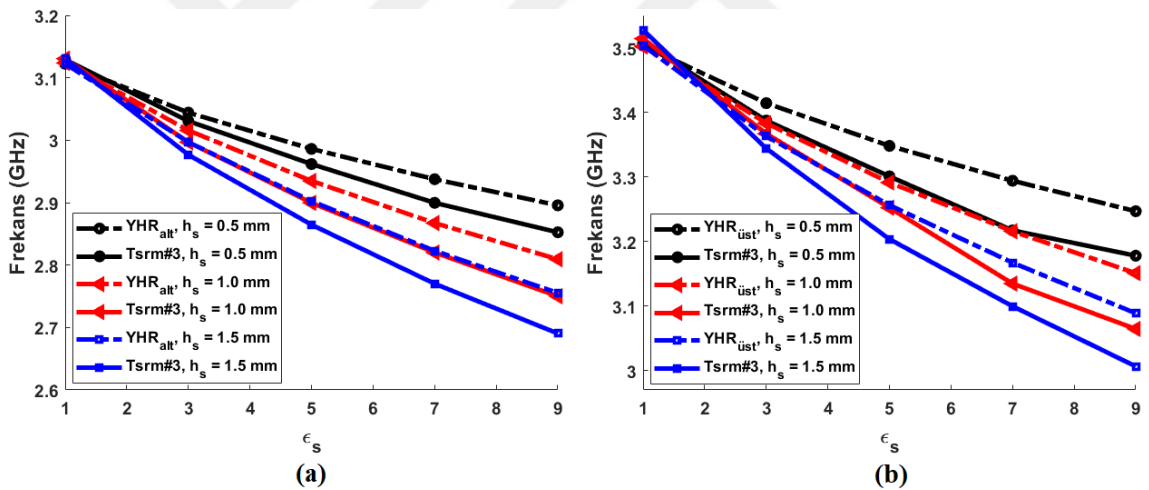
Şekil 4.44. a) Tasarım#3 için farklı ϵ_s için benzetim ve ölçüm sonuçları; b) Tasarım#3 için farklı h_s için benzetim ve ölçüm sonuçları

4.2.2.3. Asimetrik X-şekilli ve YHR Tabanlı Sensorların Performans Karşılaştırması

Asimetrik X-şekilli rezonatör (Tasarım#3, bkz. Bölüm 4.2.1) ve YHR yapılarının (YHR_{alt} ve $YHR_{üst}$, bkz. Bölüm 4.1.3), dielektrik sabitine ϵ_s ve hassasiyet katman kalınlığına h_s bağlı frekans değişimleri benzetim ortamında hesaplanmıştır. Nümerik sonuçlar, Şekil 4.45'de karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Asimetrik X-şekilli rezonatörün tüm kalınlık ve dielektrik sabiti değerleri için hassasiyet performansı, YHR'lerden daha yüksektir.

Hassasiyet katmanı olan ve olmayan sensorların simüle edilen ve ölçülen soğurma frekansları karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.8'de verilmiştir. Çizelgedeki frekans kaymaları Eşitlik (4.29) kullanılarak hesaplanır. Burada, f_0 ve f_s sırasıyla, algılama katmanı olmadan ve algılama katmanı varken ki soğurma frekanslarını temsil etmektedir. Çizelgede verilen frekans kayması değerlerine göre Tasarım#3'ün algılama performansı, her iki frekans bandında da YHR'lere göre daha yüksektir.

$$\%frekans\ kayması = \frac{f_0 - f_s}{f_0} \times 100 \quad (4.29)$$



Şekil 4.45. Tasarım#3 ve YHR için farklı kalınlık (h_s) ve dielektrik sabiti (ϵ_s) değerlerine bağlı olarak benzetim ortamında elde edilen soğurma frekansındaki değişim grafikleri, **a)** alt bant; ve **b)** üst bant

Çizelge 4.8. Tasarım#3 ve YHR soğurucular için nümerik ve deneysel sonuçlar

Yapı	Hassasiyet Katmanı	Benzetim		Ölçüm	
		f_s (GHz)	Frekans kayması (%)	f_s (GHz)	Frekans kayması (%)
Tasarım#3	Katman Yokken	3.12	—	3.08	—
		3.52	—	3.50	—
YHR _{alt}		3.12	—	3.06	—
YHR _{üst}		3.52	—	3.45	—
Tasarım#3	Rogers RO3006	2.90	7.05	2.85	7.47
		3.24	7.95	3.25	7.14
YHR _{alt}		2.94	5.80	2.90	5.23
YHR _{üst}		3.29	6.27	3.25	5.80
Tasarım#3	Rogers RO3010	2.79	10.58	2.82	8.44
		3.10	11.93	3.18	9.14
YHR _{alt}		2.84	8.97	2.83	7.52
YHR _{üst}		3.19	9.12	3.17	8.12

4.2.3. Giyilebilir Uygulamalar İçin Dört Bantlı X-Şekilli Rezonatör Tabanlı Soğurucu Tasarımı

Bu kısımda, giyilebilir uygulamalar için X-şekilli rezonatör kullanılarak özgün dört bantlı tekstil tabanlı soğurucu önerilmektedir. Tasarımı doğrulamak amacıyla üretim ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Tekstil tabanlı soğurucunun temel elektromanyetik parametreleri ve çapraz polarize yansıması incelenmiştir. Ayrıca, tasarımın soğurma performansı literatür ile karşılaştırılmıştır.

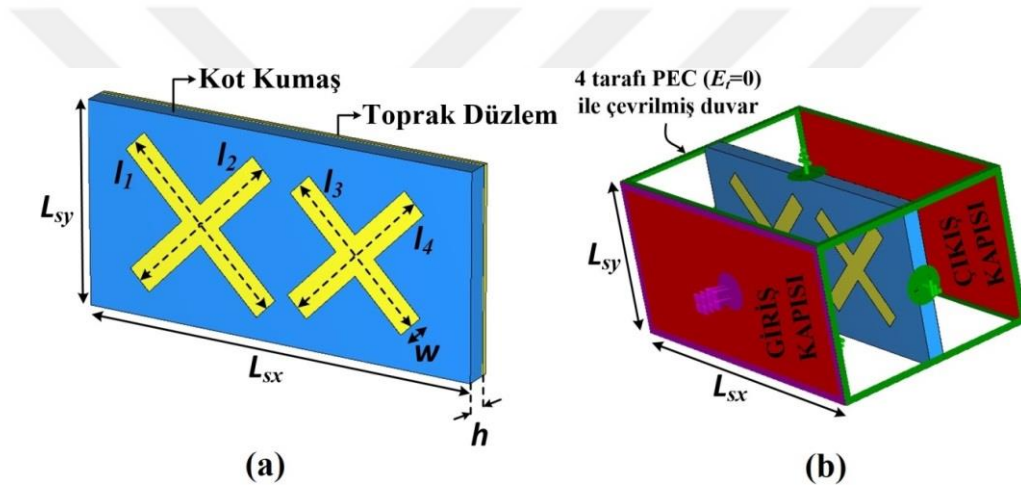
4.2.3.1. Tasarım, Benzetim Ortamı, Üretim ve Ölçüm Düzeneği

Önerilen tekstil tabanlı dört bantlı soğurucunun şematik görünümü ve tasarım parametreleri Şekil 4.46a'da gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, taban malzemesi olarak kullanılan kot kumaşın üzerine 0.05 mm kalınlığında iki asimetric X-şekilli rezonatör yerleştirilmiştir. Kumaşın arka yüzeyi ise, toprak düzlemi olarak 0.05 mm kalınlığında bakır bantla kaplanmıştır. İletken bakır banttan oluşan asimetric X-Şekilli rezonatörlerin tasarım parametreleri l_1 , l_2 , l_3 , l_4 ve w sırasıyla 42, 40, 35, 37 ve 5 mm'dir. Dielektrik sabiti $\epsilon_r = 1.8$ ve kayıp tanjantı $\tan\delta = 0.025$ olan kot, $L_{sx} \times L_{sy} \times h$ boyutundadır; burada L_{sx} , L_{sy} ve h sırasıyla 86.36, 43.18 ve 4.4 mm'dir. Nümerik tasarım ve analizler, frekans bölgesi çözümleyicisi kullanılarak CST MWS'da gerçekleştirilmiştir. Önerilen yapının

S-parametre değerleri, $86.36 \times 43.18 \text{ mm}^2$ alana sahip WR340 dalga kılavuzu modelinde elde edilmiştir. Şekil 4.46b'de verildiği gibi, WR340 dalga kılavuzunu modellemek için x , y ve z eksenleri için, sırasıyla elektrik ($E_t = 0$), elektrik ($E_t = 0$) ve açık (boşluk ekle) sınır koşulları seçilmiştir. Dalga kılavuzu, önerilen yapıyı uyarmak için giriş ve çıkış portlarıyla sonlandırıldı. Önerilen soğurucu tasarımı, elektrik alan vektörü $\mathbf{E}$, manyetik alan vektörü $\mathbf{H}$ ve yayılma vektörü $\mathbf{k}$ 'nin x , y ve $-z$ eksenleri boyunca olduğu TE_{10} modunda uyarılmıştır. Ayrıca, önerilen geometrinin boyutu ile soğurma frekansı arasındaki ilişki aşağıdaki Eşitlik (4.30) ile açıklanmıştır.

$$l = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.30)$$

Burada, l X-Şekilli rezonatörün herhangi bir kolunun uzunluğu, c ışık hızı, f soğurma frekansı ve $\epsilon_r = 1.8$ kot kumaşın elektriksel geçirgenliğidir.



Şekil 4.46. Dört bantlı tekstil soğurucunun, **a)** şematik görüntüsü ve tasarım parametreleri; **b)** benzetim ortamının şematik görünümü

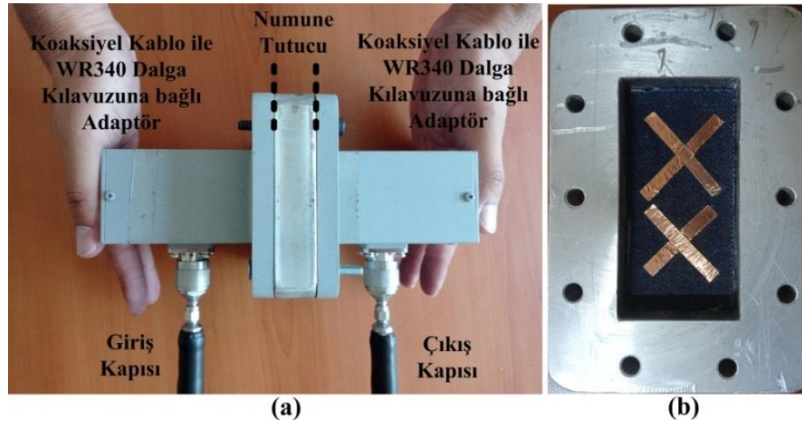
İletken bakır banttıan oluşan asimetrik X-Şekilli rezonatörler ve toprak düzlem, kot kumaşın üst ve alt kısımlarına yapıştırılarak üretilmiştir. Üretilen tekstil soğurucunun önden ve arkadan görünümü Şekil 4.47a ve Şekil 4.48b'de verilmiştir.



Şekil 4.47. Üretilen dört bantlı tekstil soğurucunun, **a)** önden görünümü; ve **b)** arkadan görünümü

Deneyisel ölçümler, koaksiyel kablo ile LibreVNA vektör ağ analiz cihazına bağlı WR340 dalga kılavuzu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dalga kılavuzu ve

numune tutucu içine yerleştirilmiş tekstil soğurucu Şekil 4.48a ve Şekil 4.48b'de verilmiştir.



Şekil 4.48. a) Deney düzeneği ve b) numune tutucuya yerleştirilen tekstil soğurucu

4.2.3.2. Toplu Eşdeğer Devre Modelinin Çıkartılması

Önerilen soğurucunun çalışma mekanizmasının daha net anlaşılması için, Şekil 4.49'de gösterildiği gibi, CST MWS kullanılarak soğurma frekanslarındaki yüzey akım dağılımları ve AWR Yazılımı kullanılarak da toplu eleman eşdeğer devre modeli çıkarılmıştır. Asimetrik X-Şekilli rezonatör, paralel bir RLC devresi ile modellenmiştir ve devreler birbirlerine seri dirençler (R_5 ve R_6) bağlanmıştır. Asimetrik X-Şekilli rezonatör elemanları arasındaki dielektrik boşluk, bir seri kapasitör (C_5) aracılığıyla modellenmiştir. Ayrıca AWR yazılımı kullanılarak elde edilen ilgili frekanslarda dört bant soğurma tepe noktaları sağlayan RLC elemanlarının optimal değerleri şu şekildedir: $R_1 = 422 \, \Omega$, $L_1 = 355 \, \text{pH}$, $C_1 = 10 \, \text{pF}$; $R_2 = 395 \, \Omega$, $L_2 = 344 \, \text{pH}$, $C_2 = 9.4 \, \text{pF}$; $R_3 = 385 \, \Omega$, $L_3 = 312 \, \text{pH}$, $C_3 = 8 \, \text{pF}$; $R_4 = 412 \, \Omega$, $L_4 = 327 \, \text{pH}$, $C_4 = 8.6 \, \text{pF}$; $R_5 = 1 \, \Omega$; $C_5 = 100 \, \text{pF}$ ve $R_6 = 1 \, \Omega$.

Tekstil tabanlı dört bantlı soğurucunun eşdeğer devresi, iletim hattı modeliyle analiz edilmiştir ve soğurma cevabı Eşitlik (4.31) ile hesaplanmıştır. Ayrıca, önerilen soğurucunun arka yüzeyi tamamen bakır toprak ile kaplandığı için iletim olmamakta ve $|S_{21}|$ sıfıra eşittir. Z_0 , serbest uzayın karakteristik empedansıdır ve değeri $377 \, \Omega$ 'dur. Z_{TS} , tekstil tabanlı soğurucunun eşdeğer devresinin toplam empedansıdır. Z_{TS} , Eşitlik (4.32) ile hesaplanmaktadır. Z_1 , Z_2 , Z_3 ve Z_4 sırasıyla l_1 , l_2 , l_3 ve l_4 kollarının empedansıdır ve Eşitlik (4.33–4.36) ile elde edilmektedirler. Ayrıca seri kapasitörün empedansı X_{C_5} Eşitlik (4.37)'de verilmiştir.

$$\text{soğurma} = 1 - |S_{11}|^2 = 1 - \left| \frac{Z_{TS} - Z_0}{Z_{TS} + Z_0} \right|^2 \quad (4.31)$$

$$Z_{TS} = Z_1 + R_5 + Z_2 + X_{C_5} + Z_3 + R_6 + Z_4 \quad (4.32)$$

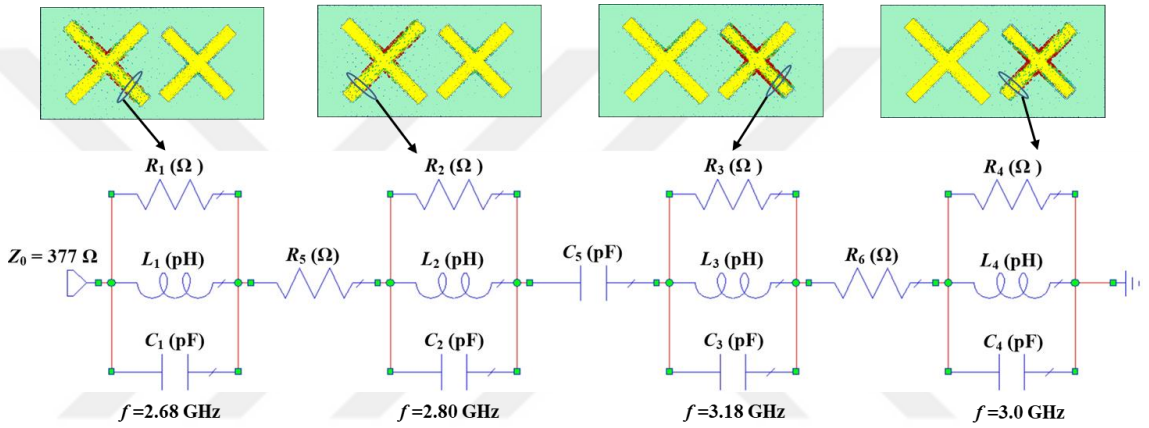
$$\frac{1}{Z_1} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{j2\pi f L_1} + \frac{1}{\frac{1}{j2\pi f C_1}} \quad (4.33)$$

$$\frac{1}{Z_2} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{j2\pi f L_2} + \frac{1}{\frac{1}{j2\pi f C_2}} \quad (4.34)$$

$$\frac{1}{Z_3} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{j2\pi f L_3} + \frac{1}{\frac{1}{j2\pi f C_3}} \quad (4.35)$$

$$\frac{1}{Z_4} = \frac{1}{R_4} + \frac{1}{j2\pi f L_4} + \frac{1}{\frac{1}{j2\pi f C_4}} \quad (4.36)$$

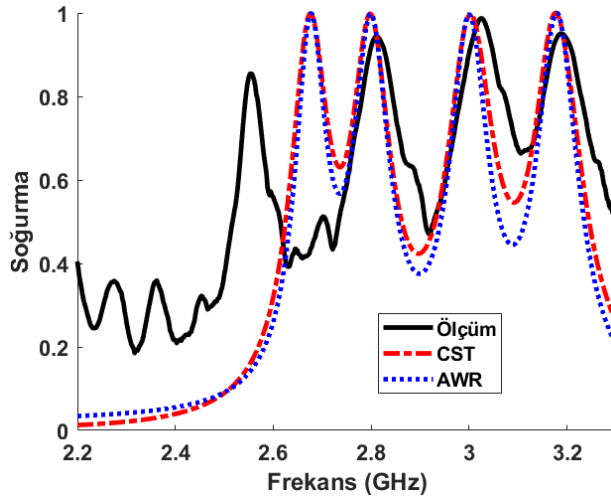
$$X_{C_5} = \frac{1}{j2\pi f C_5} \quad (4.37)$$



Şekil 4.49. Tekstil tabanlı dört bantlı soğurucunun yüzey akım dağılımları ve eş değer devre modeli

4.2.3.3. Benzetim ve Ölçüm Sonuçları

Şekil 4.50'de önerilen tasarımın benzetim ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. CST ve AWR yazılımları kullanılarak elde edilen benzetim sonuçlarının mükemmel bir uyum içinde olduğu görülmektedir. Önerilen tekstil tabanlı dört bantlı soğurucu, benzetim ortamında 2.68, 2.80, 3.00 ve 3.18 GHz frekanslarında, 0.99'un üzerinde soğurma tepe noktası sağlamaktadır. Önerilen yapı, ölçüm sonucuna göre 2.55, 2.81, 3.02 ve 3.19 GHz frekanslarında 0.85'in üzerinde soğurma sunmaktadır. Muhtemelen üretim ve ölçüm toleransı farklılıklarından kaynaklanan, birinci frekansta sadece küçük bir kayma mevcuttur. Bunun dışında benzetim ve ölçüm sonuçları arasında mükemmel bir uyum elde edilmiştir.

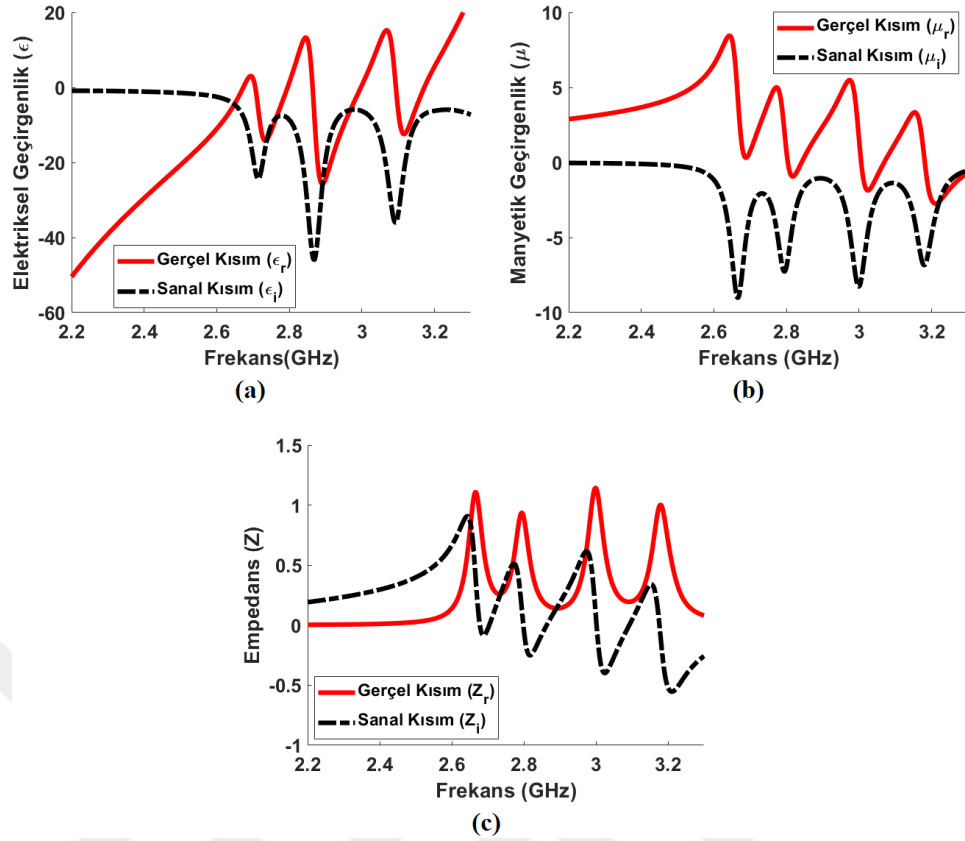


Şekil 4.50. Tekstil soğurucunun ölçüm ve benzetim sonuçları

4.2.3.4. Temel Elektromanyetik Parametrelerinin Çıkartılması

Benzetim ortamından elde edilen S-parametreleri kullanılarak, bağıntı 4.3 ve 4.4 yardımıyla, dört bantlı tekstil soğurucu için etkin elektriksel geçirgenlik ($\mathcal{E}$) ve manyetik geçirgenlik (μ) hesaplanmıştır. Elde edilen $\mathcal{E}$ ve μ sonuçları, gerçek ve sanal kısımlarıyla birlikte, sırasıyla Şekil 4.51a ve Şekil 4.51b’de verilmiştir. Şekil 4.51 ve Çizelge 4.9’da görüldüğü üzere, 2.68, 2.80, 3.00 ve 3.18 GHz soğurma frekanslarında tekstil soğurucunun elektriksel geçirgenliğinin ve manyetik geçirgenliğinin gerçel kısımların her ikisi de sıfırdan büyüktür ($\mathcal{E}_r > 0$, $\mu_r > 0$). Buna göre, soğurma frekanslarında, tekstil soğurucu çift pozitif malzeme (ÇPM) olarak adlandırılabilir. Şekil 4.51a ve 4.52b’de soğurma frekanslarında elektriksel ve manyetik geçirgenliğin gerçel kısımlarının ($\mathcal{E}_r$ ve μ_r) sıfıra yakın olduğu ve bu frekanslarda yansımanın minimum olduğu görülmektedir. Bilindiği üzere, normal doğrultusunda gelen bir düzlem dalgada, $\mathcal{E}_r = \mu_r \approx 0$ olan bir yüzey ile serbest uzay mükemmel şekilde eşleşir. Şekil 4.51’de görüldüğü üzere, soğurma tepelerinin olmadığı diğer frekanslarda, önerilen yapının elektriksel geçirgenliğinin gerçel kısmın ($\mathcal{E}_r$) ve manyetik geçirgenliğinin gerçel kısmın (μ_r) işaretleri farklıdır. Bu sebeple, kırılma indisi sanal değer alacak ve dalga yayılımı olmayacaktır. Bilindiği üzere, elektriksel ve manyetik geçirgenliğin sanal kısımları ($\mathcal{E}_i$ ve μ_i) kayıplardan sorumludurlar. Çalışma frekanslarında yüksek bir soğurma seviyesi elde etmek için $\mathcal{E}_i$ ve μ_i değerleri, Şekil 4.51’deki gibi, yüksek olmalıdır.

Dört bantlı tekstil soğurucunun normalize giriş empedansı ($Z = \sqrt{\mu/\mathcal{E}} = Z_r + jZ_i$), benzetim ortamından elde edilen S-parametreleri kullanılarak, bağıntı 4.5 yardımıyla, hesaplanmıştır. Bu yapıların arka yüzeyi tamamen toprak düzlem olarak kullanılan bakır ile kaplandığı için $|S_{21}|$ değeri sıfırdır. Şekil 4.51c’de görüldüğü gibi, soğurma frekanslarında empedansın gerçel kısmı (Z_r) birim değere yakınlaşırken, sanal kısım (Z_i) sıfıra yaklaşmaktadır. Kısacası, soğurucunun ve serbest uzayın empedansları soğurma frekanslarında eşleştiğinden, bu frekanslarda yansıma sıfıra yakındır.



Şekil 4.51. Tekstil soğurucu için **a)** elektriksel geçirgenlik; **b)** manyetik geçirgenlik; ve **c)** normalize giriş empedansı

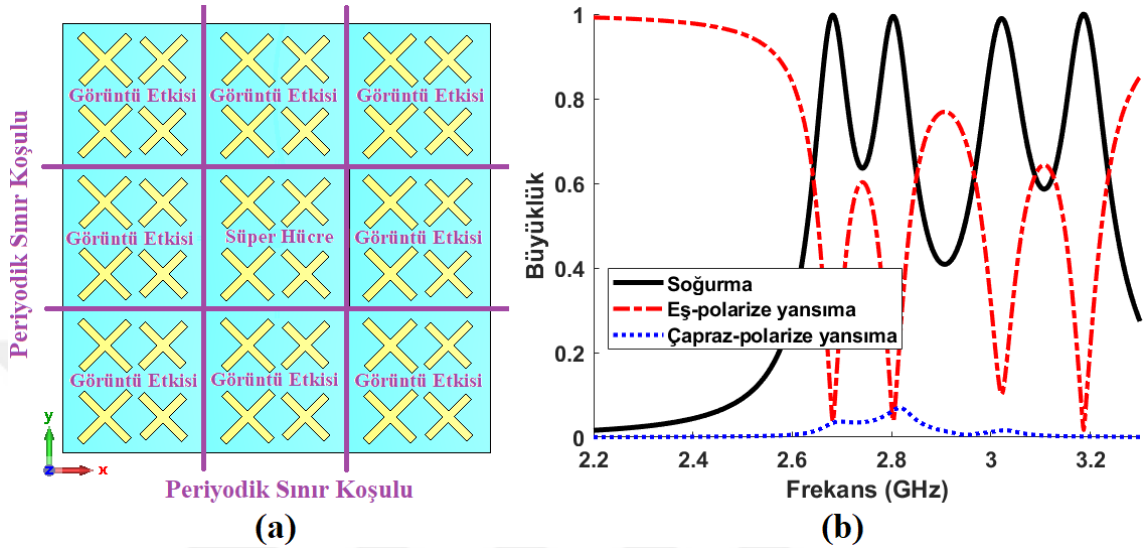
Çizelge 4.9. Soğurma frekanslarında, tekstil tabanlı soğurucu tasarımının elektriksel geçirgenlik, manyetik geçirgenlik ve normalize giriş empedans değerleri

f (GHz)	ϵ	μ	Z (Ω)
2.68	$0.66 - 8.52i$	$1.31 - 7.70i$	$0.95 + 0.04i$
2.80	$0.92 - 8.48i$	$1.07 - 7.09i$	$0.91 + 0.01i$
3.00	$1.25 - 6.43i$	$0.69 - 8.18i$	$1.12 - 0.00i$
3.18	$1.09 - 6.86i$	$0.91 - 6.79i$	$1.00 - 0.01i$

4.2.3.5. Çapraz Polarize Yansımanın İncelenmesi

Asimetrik yapılarda çapraz polarize yansımanın meydana gelebileceği bilindiğinden, önerilen tekstil tabanlı soğurucunun çapraz polarize yansıması analiz edilmiştir. Bu analiz sürecinde, dikdörtgen dalga kılavuzunda çapraz polarize yansımanın hesaplanması mümkün değildir. Bu sebeple, önerilen yapıya, $-y$ yönünde ayna görüntüsü eklenerek $86.36 \times 86.36 \text{ mm}^2$ alana sahip süper-hücre oluşturulmuştur (Karacan vd. 2020). Daha sonra Şekil 4.52a'da gösterildiği gibi bir süper-hücrenin sınırlarında periyodik sınır koşulları (PBC) uygulanmış ve iki Floquet modu

kullanılmıştır. Sonuç olarak, serbest uzay dizileri için eş ve çapraz polarize yansımalar, benzetim yazılımı tarafından hesaplanmış ve soğurma spektrumları denklem (4.2) ile hesaplanmıştır. Ayrıca, soğurucunun arka yüzeyinin tamamen metalik toprak düzlem olmasından dolayı geçirgenlik sıfırdır. Hesaplamaya göre, Şekil 4.52b'de gösterildiği gibi her iki frekansta 0.99'dan fazla soğurma seviyeleri elde edilebilmektedir.



Şekil 4.52. Tekstil tabanlı soğurucu için **a)** süper-hücre yapısı; **b)** süper-hücre dizisine ait soğurma, eş ve çapraz polarize yansıma sonuçları

4.2.3.6. Soğurma Performansının İncelenmesi

Önerilen tekstil tabanlı soğurucu; literatürdeki diğer tekstil tabanlı soğurucular kıyaslanmıştır. Kıyaslamada rezonatör tipi, boyut, frekans bandı, rezonatör sayısı ve soğurma bant sayısı dikkate alınmıştır. Çizelge 4.10 incelendiğinde, üç tanesi tek bant ve bir tanesi çift bant soğurma davranışı sergilerken; önerilen yapı dört bantlı bir soğurma sağlamaktadır. Ek olarak, önerilen yapının boyutu, diğer soğurucu tasarımlarla karşılaştırılabilir seviyededir.

Çizelge 4.10. Tekstil tabanlı soğurucuların performans karşılaştırması

Referans	Rezonatör Tipi	Boyut (λ_0)	Frekans Bandı	Rezonatör Sayısı	Soğurma Bant Sayısı
Lee vd. 2017	Chanel Logo	0.252×0.252	X Bant	1	1
Yang vd. 2022	Kare Halka	0.223×0.238	S Bant	1	1
Tak ve Choi 2017	Kare Halka	0.9×0.9	X Bant	2	2
Almirall vd. 2022	Altıgen	0.566×0.566	X Bant	1	1
Bu çalışma	Asimetrik X-Şekil	0.386×0.771	S Bant	2	4

4.2.4. Frekansı Kontrol Edilebilir X-Şekilli Soğurucu Tasarımı

Bu bölümde, X-şekilli rezonatöre farklı sayılarda PIN ve varaktör diyotlar monte edilerek, benzetim ortamında frekansı kontrol edilebilir soğurucular tasarlanmıştır. PIN diyotların iletimde yada yalıtımda olmasına göre, önerilen tasarımlar tek veya çift bant davranış sergilemektedir. Varaktör diyotlu tasarımlarda ise uygulanan gerilim değerine göre, ilgili frekans bandı kontrol edilebilmektedir.

4.2.4.1. PIN Diyotlu Frekansı Kontrol Edilebilir X-Şekilli Soğurucu

PIN diyot, katkılanmış P-tipi ve N-tipi yarı iletkenlerin arasında I-bölgesi olan bir devre elemanıdır. Ters öngerilimlemede, çoğunluk yük taşıyıcısı olan elektronlar N-bölgesine, çoğunluk yük taşıyıcısı olan delikler P-bölgesine çekilirler. Bu durumda I-bölgesi yük taşıyıcılardan temizlenir. Bu sebeple PIN diyot kondansatör gibi davranır. I-bölgesinin eni genişledikçe PIN diyotun kapasite değeri azalır. Böylece mikrodalga frekans devrelerinde yüksek direnç gösterir. Doğru öngerilimlemede, P- ve N-bölgelerindeki yük taşıyıcıları, I-bölgesine yerleşirler. Bu sayede diyotun direnci azalır ve P-bölgesinden N-bölgesine doğru akım akışı olur.

Bu çalışmada HPND-4028 model PIN diyot kullanılmıştır. Eklenen bu diyotun konumuna ve AÇIK/KAPALI durumuna göre soğurma davranışları incelenmiştir. Diyot AÇIK (iletimde) durumdayken iletimdedir ve veri sayfasına göre, 2.3Ω dirence paralel 0.025 pF kapasite değeri göstermektedir. KAPALI (yalıtımda) durumda yalıtımdadır ve yaklaşık $4 \text{ k}\Omega$ direnç sergilemektedir.

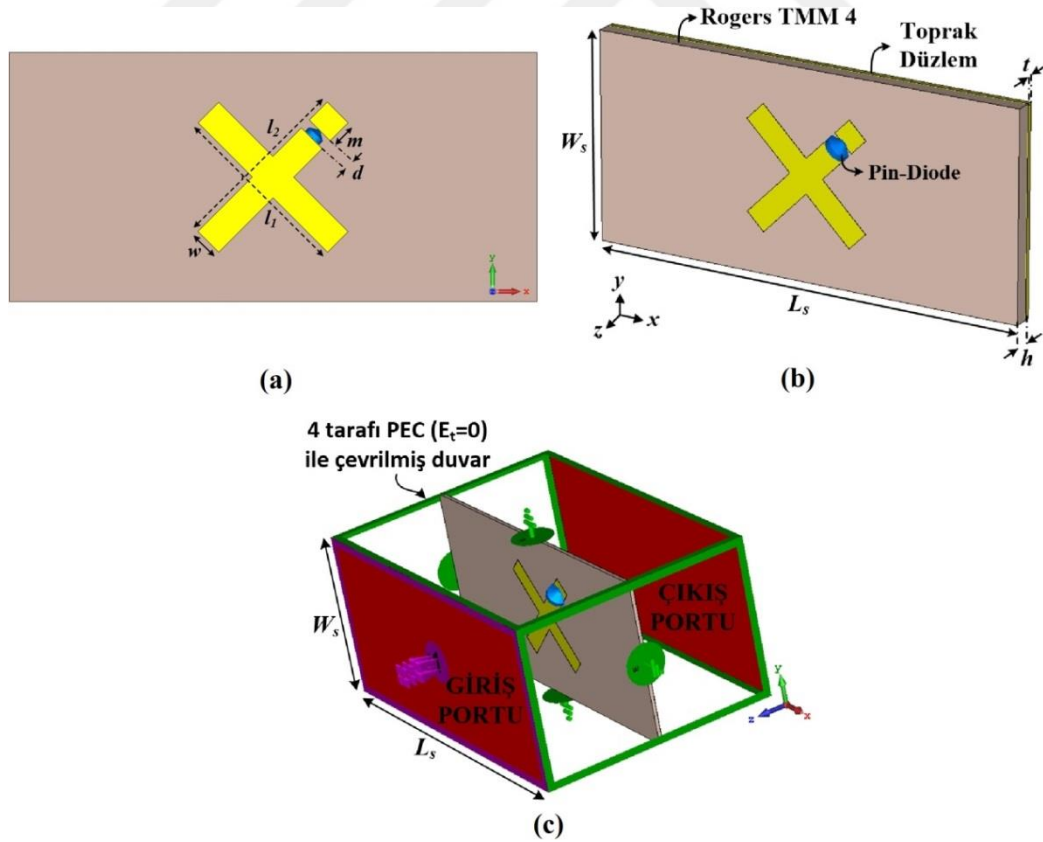
4.2.4.1.1. Tek PIN diyotu soğurucu

Bu kısımda, X-şekilli rezonatöre bir HPND-4028 model PIN diyot monte edilmiştir. Monte edilen PIN diyotun konumuna ve açık/kapalı durumuna göre benzetim ortamında parametrik analizler yapılmıştır.

4.2.4.1.1.1. Tasarım ve benzetim ortamı

Önerilen yapının tasarım parametreleriyle birlikte şematik görünümü Şekil 4.53a ve Şekil 4.53b’de verilmiştir. Soğurucunun üst katmanı $t = 0.035$ mm kalınlığa sahip bakır ($\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m) X-şekilli rezonatör ve bir adet PIN diyottan (HPND-4028) oluşmaktadır. Bu bakır rezonatör, $\epsilon_r = 4.5$ dielektrik sabiti, $\tan\delta = 0.002$ kayıp tanjantı ve $h = 0.76$ mm kalınlığı olan Rogers TMM4 taban malzemesi üzerine konumlandırılmıştır. Taban malzemesinin diğer yüzeyi ile tamamen toprak yüzey olarak bakır ile kaplanmıştır. Kullanılan Rogers TMM4’ün boyutları $L_s \times W_s$ sırasıyla, 72.136 ve 34.036 mm’dir. Ayrıca, rezonatörün her bir kolunun boyutları l_1 ve l_2 , kol kalınlıkları ise w ile temsil edilmiştir ve sırasıyla 25, 25 ve 4 mm’dir. PIN diyot ise rezonatörün l_2 kolundaki $d = 0.5$ mm genişlik değerine sahip boşluğa yerleştirilmiştir.

Soğurucu tasarımı ve nümerik analizler CST Microwave Studio (MWS)’da Frequency Domain Solver kullanılarak yapılmıştır. Soğurucuya ait benzetim düzeneği Şekil 4.53c’de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere dalga kılavuzunun z-ekseni boyunca yan duvarları mükemmel elektrik iletken (PEC) ile sınırlandırılmıştır. Soğurucuyu uyarmak için, dalga kılavuzunun her iki ucu da giriş ve çıkış portları ile sonlandırılmıştır. Önerilen tasarım TE_{10} modu ile uyarılmıştır, ayrıca elektrik alan vektörü E , manyetik alan vektörü H ve yayılma vektörü k sırasıyla x, y ve z eksenini boyuncaya ilerlemektedir.

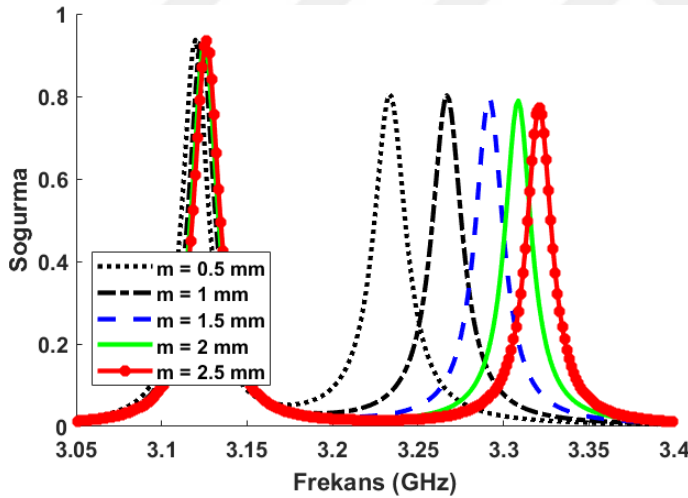


Şekil 4.53. Tek PIN-diyotlu soğurucu yapısının tasarım parametreleriyle birlikte, (a) önden; (b) perspektif şematik görüntüsü ve (c) benzetim ortamının şematik görünümü

4.2.4.1.1.2. Nümerik analiz sonuçları

Önerilen soğurucu tasarımı, X-şekilli rezonatöre eklenmiş bir adet PIN-diyotun AÇIK/KAPALI durumuna göre, tek veya çift bant davranış sergilemektedir. PIN diyot AÇIK durumda (iletimde), rezonatör simetrik olacak ve tek bantlı bir soğurma gözlemlenecektir. PIN diyot KAPALI durumda (yalıtımda), rezonatör asimetrik olacak ve çift bantlı bir soğurma gözlemlenecektir. Bahsedilen bu davranışları desteklemek amacıyla, PIN-diyotun farklı yerleştirme konumu ve AÇIK/KAPALI durumları için nümerik araştırmalar yapılmıştır. Nümerik araştırmalar boyunca soğurma Eşitlik (4.1)'e göre hesaplanmıştır.

İlk olarak, Şekil 4.54'de gösterildiği gibi PIN-diyotun uygun konumunu elde etmek amacıyla, farklı m parametre değerleri için soğurma analizleri yapılmıştır. PIN-diyot KAPALI konumda olacak şekilde, m değeri 0.5 mm'den 2.5 mm'ye 0.5 mm'lik adımlarla artırılmıştır. Bu durumda soğurucu yapısı çift bant davranış sergilemiştir. Alt bant frekansı f_{alt} 3.13 GHz'de sabit iken; üst bant frekansı $f_{üst}$, m değeri arttıkça 3.23 GHz'den 3.32 GHz'e kaymıştır. Ancak üst bantın soğurma seviyesi 0.8'den 0.77'ye göreceli olarak az miktarda azalmıştır. Alt ve üst soğurma tepeleri arasındaki en yüksek frekans farkının $\Delta f (f_{üst} - f_{alt})$, $m = 2.5$ mm değerinde 190 MHz olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar ayrıntılı olarak Çizelge 4.11'de verilmiştir.

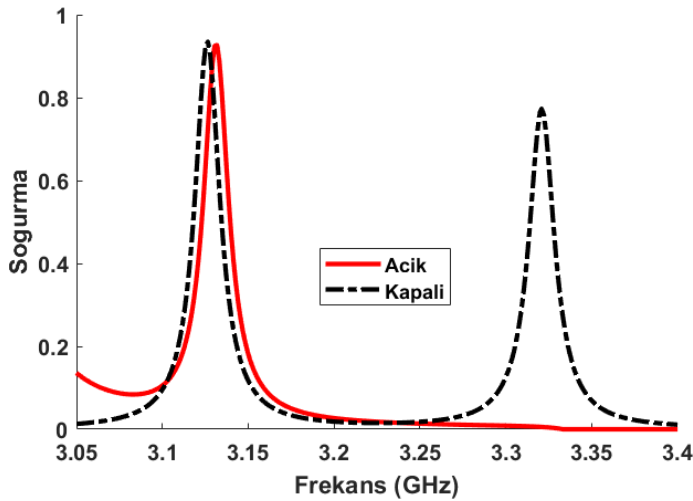


Şekil 4.54. PIN-diyot KAPALI durumdayken, önerilen yapının farklı m değerleri için soğurma davranışı

Çizelge 4.11. PIN-diyot KAPALI durumdayken, önerilen yapının farklı m değerleri için soğurma sonuçları

m (mm)	Alt Soğurma Tepesi		Üst Soğurma Tepesi		Δf (MHz)
	f_{alt} (GHz)	Soğurma Seviyesi	$f_{üst}$ (GHz)	Soğurma Seviyesi	
0.5	3.12	0.94	3.23	0.8	110
1	3.12	0.94	3.27	0.8	150
1.5	3.13	0.94	3.29	0.8	160
2	3.13	0.94	3.31	0.79	180
2.5	3.13	0.94	3.32	0.77	190

Daha sonra m parametresi 2.5 mm’de sabit tutularak PIN-diyotun AÇIK/KAPALI durumuna göre önerilen yapının soğurma davranışı incelenmiştir. PIN-diyot AÇIK durumda iletimdedir ve böylece X-şekilli rezonatör simetrik davranış sergileyerek 3.13 GHz’de tek çalışma frekansı gözlemlenmiştir. PIN-diyot KAPALI durumda iken yalıttır ve m boyutundaki parça ile X-şekilli rezonatörün elektriksel bağlantısı kesilmektedir. Bu nedenle X-şekilli rezonatör asimetrik davranış göstermekte ve 3.13 ve 3.32 GHz’de çift bant soğurma sağlamaktadır. PIN-diyotun AÇIK/KAPALI durumuna göre önerilen yapının soğurma davranışları Şekil 4.55’de verilmiştir.



Şekil 4.55. PIN-diyotun AÇIK/KAPALI durumuna göre önerilen yapının soğurma davranışı

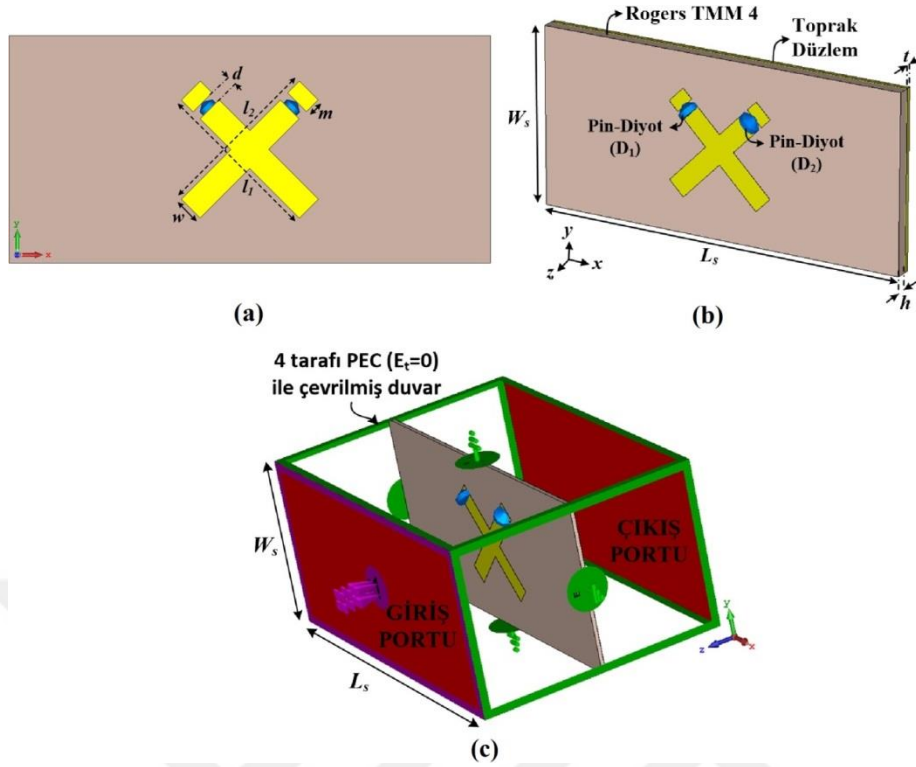
4.2.4.1.2. Çift PIN diyotu soğurucu

Bu kısımda, X-şekilli rezonatöre iki adet HPND-4028 model PIN diyot monte edilmiştir. Monte edilen PIN diyotun konumuna ve açık/kapalı durumuna göre benzetim ortamında parametrik analizler yapılmıştır.

4.2.4.1.2.1. Tasarım ve benzetim ortamı

Önerilen yapının tasarım parametreleriyle birlikte şematik görünümü Şekil 4.56'te verilmiştir. Soğurucunun üst katmanı $t = 0.035$ mm kalınlığa sahip bakır ($\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m) X-şekilli rezonatör ve iki adet PIN diyottan (HPND-4028) oluşmaktadır. Bu bakır rezonatör, $\epsilon_r = 4.5$ dielektrik sabiti, $\tan\delta = 0.002$ kayıp tanjantı ve $h = 0.76$ mm kalınlığı olan Rogers TMM4 taban malzemesi üzerine konumlandırılmıştır. Taban malzemesinin diğer yüzeyi ile tamamen toprak yüzey olarak bakır ile kaplanmıştır. Kullanılan Rogers TMM4'ün boyutları $L_s \times W_s$ sırasıyla, 72.136 ve 34.036 mm'dir. Ayrıca, rezonatörün her bir kolunun boyutları l_1 ve l_2 , kol kalınlıkları ise w ile temsil edilmiştir ve sırasıyla 25, 25 ve 4 mm'dir. PIN diyotlar, rezonatörün l_1 ve l_2 kolundaki $d = 0.5$ mm genişlik değerine sahip boşluklara yerleştirilmiştir.

Soğurucu tasarımı ve nümerik analizler CST Microwave Studio (MWS)'da Frequency Domain Solver kullanılarak yapılmıştır. Soğurucuya ait benzetim düzeneği Şekil 4.56c'de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere dalga kılavuzunun z-ekseni boyunca yan duvarları mükemmel elektrik iletken (PEC) ile sınırlandırılmıştır. Soğurucuyu uyarmak için, dalga kılavuzunun her iki ucu da giriş ve çıkış portları ile sonlandırılmıştır. Önerilen tasarım TE_{10} modu ile uyarılmıştır, ayrıca elektrik alan vektörü $\mathbf{E}$, manyetik alan vektörü $\mathbf{H}$ ve yayılma vektörü $\mathbf{k}$ sırasıyla x, y ve z eksenini boyunca ilerlemektedir.

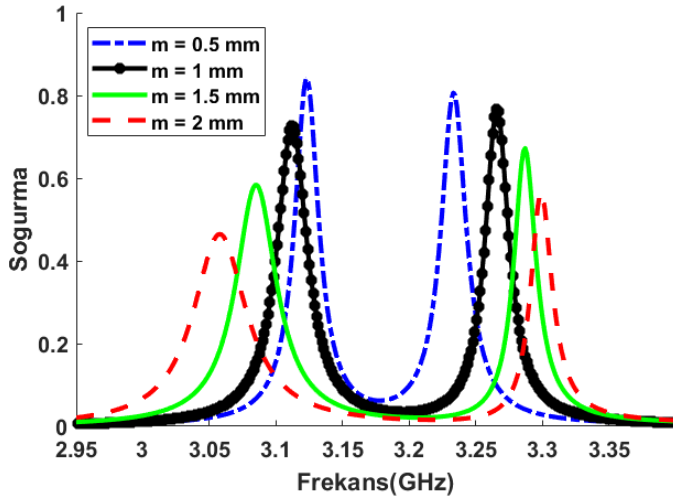


Şekil 4.56. Çift PIN-diyotlu soğurucu yapısının tasarım parametreleriyle birlikte, (a) önden; (b) perspektif şematik görüntüsü ve (c) benzetim ortamının şematik görünümü

4.2.4.1.2.2. Nümerik analiz sonuçları

Önerilen soğurucu tasarımı, X-şekilli rezonatöre eklenmiş iki adet PIN-diyotun AÇIK/KAPALI olup olmamasına göre tek veya çift bant davranış sergilemektedir. PIN-diyotlar eş zamanlı AÇIK (iletimde) veya KAPALI (yalıtımda) durumda, rezonatör simetrik olacak ve tek bantlı bir soğurma gözlemlenecektir. PIN-diyotun biri AÇIK diğeri KAPALI durumda, rezonatör asimetrik olacak ve çift bantlı bir soğurma gözlemlenecektir. Bahsedilen bu davranışları desteklemek amacıyla, PIN-diyotların farklı yerleştirme konumu ve AÇIK/KAPALI durumları için nümerik analizler yapılmıştır. Nümerik araştırmalar boyunca soğurma Eşitlik (4.1)'e göre hesaplanmıştır.

Öncelikle, Şekil 4.57'da gösterildiği gibi PIN-diyotların uygun konumunu elde etmek amacıyla, l_1 ve l_2 25 mm'de sabit tutularak, farklı m parametre değerleri için soğurma analizleri yapılmıştır. PIN-diyotlardan D_1 AÇIK ve D_2 KAPALI durumda olacak şekilde, m değeri 0.5 mm'den 2 mm'ye 0.5 mm'lik adımlarla artırılmıştır. Bu durumda soğurucu yapısı çift bant davranış sergilemiştir. m değeri arttıkça, alt bant frekansı f_{alt} azalırken üst bant frekansında $f_{üst}$ artış gözlemlenmiştir. Başka bir ifadeyle m değeri arttıkça, alt ve üst soğurma tepeleri arasındaki frekans farkı da $\Delta f (f_{üst} - f_{alt})$ artmıştır. Ancak Δf 'deki artmaya rağmen her iki soğurma tepesindeki seviyelerde azalma meydana gelmiştir. Elde edilen bu sonuçlar ayrıntılı olarak Çizelge 4.12'de verilmiştir.

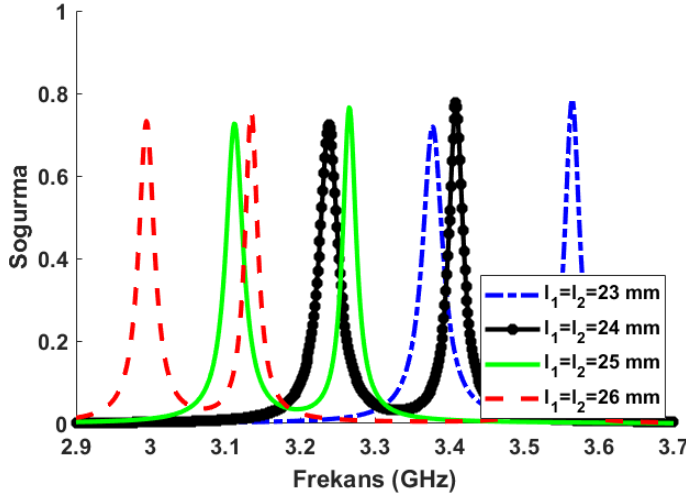


Şekil 4.57. Çift PIN-diyotlu soğurucu için D_1 AÇIK, D_2 KAPALI durumdayken farklı m değerleri için soğurma sonuçları ($l_1 = l_2 = 25$ mm)

Çizelge 4.12. D_1 AÇIK, D_2 KAPALI durumdayken, farklı m değerleri için soğurma sonuçları ($l_1 = l_2 = 25$ mm)

m (mm)	Alt Soğurma Tepesi		Üst Soğurma Tepesi		Δf (MHz)
	f_{alt} (GHz)	Soğurma Seviyesi	$f_{üst}$ (GHz)	Soğurma Seviyesi	
0.5	3.12	0.84	3.23	0.81	110
1	3.11	0.73	3.27	0.77	160
1.5	3.09	0.58	3.29	0.67	200
2	3.06	0.46	3.30	0.57	240

Daha sonra m parametresi 1 mm’de sabit tutularak X-şekilli rezonatörün kol uzunlukları l_1 ve l_2 için parametrik analizler yapılmıştır. PIN-diyotlardan D_1 AÇIK ve D_2 KAPALI durumda olacak şekilde, kol uzunlukları 23 mm’den 26 mm’ye 1 mm’lik adımlarla artırılmıştır. Şekil 4.58’de görüldüğü üzere kol boyları ($l_1 = l_2$) artıkça her iki soğurma tepesinin çalışma frekansları azaltmaktadır. Bununla birlikte alt ve üst soğurma tepeleri arasındaki frekans farkı da Δf azalmıştır. Bu parametrik analizle ilgili sonuçlar Çizelge 4.13’de verilmiştir.

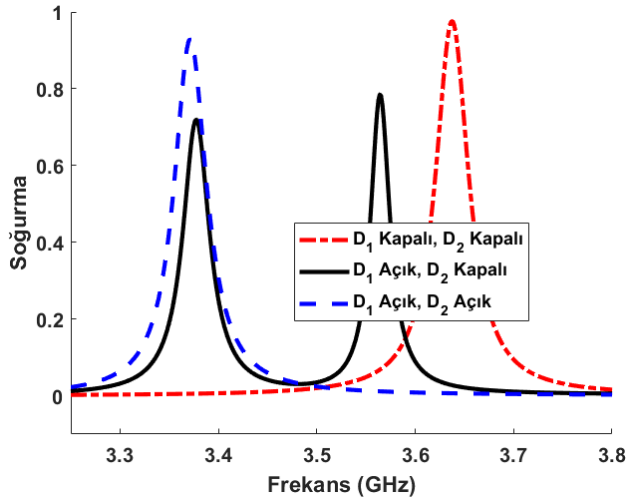


Şekil 4.58. Çift PIN-diyotlu soğurucu için D_1 AÇIK, D_2 KAPALI durumdayken farklı kol uzunlukları ($l_1 = l_2$) için soğurma karakteristiği ($m = 1$ mm)

Çizelge 4.13. D_1 AÇIK, D_2 KAPALI durumdayken, farklı m değerleri için soğurma sonuçları ($l_1 = l_2 = 25$ mm)

$l_1 = l_2$ (mm)	Alt Soğurma Tepesi		Üst Soğurma Tepesi		Δf (MHz)
	f_{alt} (GHz)	Soğurma Seviyesi	$f_{üst}$ (GHz)	Soğurma Seviyesi	
23	3.38	0.72	3.56	0.79	180
24	3.24	0.72	3.41	0.78	170
25	3.11	0.73	3.27	0.77	160
26	2.99	0.73	3.14	0.76	150

Son olarak m parametresi 1 mm’de ve $l_1 = l_2 = 23$ mm’de sabit tutularak, PIN-diyotların AÇIK/KAPALI durumuna göre önerilen yapının soğurma davranışı incelenmiş ve Şekil 4.59’da verilmiştir. PIN-diyotların her ikisi de aynı anda AÇIK veya KAPALI durumdayken, X-şekilli rezonatör simetrik davranış sergileyerek tek bir soğurma tepesi oluşturmuştur. D_1 ve D_2 aynı anda; AÇIK durumda 3.37 GHz’de 0.93 soğurma seviyesine, KAPALI durumda 3.64 GHz’de 0.98 soğurma seviyesi sahiptir. PIN-diyotlar AÇIK durumda iken iletimdedir ve m boyutlu parçalar ile X-şekilli rezonatör arasında elektriksel bağlantı vardır. PIN-diyotlar KAPALI durumda iken yalıtmadadır ve m boyutlu parçalar ile X-şekilli rezonatörün elektriksel bağlantısı kesilmektedir. Bu nedenle diyotlar KAPALI durumdayken rezonatörün boyutu, diyotların AÇIK duruma göre, kısaldığı için daha yüksek frekansta soğurma gözlemlenmiştir. PIN-diyotlardan biri AÇIK diğeri de kapalı haldeyken X-şekilli rezonatör asimetrik davranış sergileyerek 3.38 ve 3.56 GHz’de çift bant soğurma sağlamaktadır. Bu parametrik çalışmayla ilgili sonuçlar Çizelge 4.14’de verilmiştir.



Şekil 4.59. Çift PIN-diyotlu soğurucunun, anahtarlama elemanlarının AÇIK ve KAPALI durumuna göre soğurma karakteristiği ($l_1 = l_2 = 23$ mm, $m = 1$ mm)

Çizelge 4.14. Çift PIN-diyotlu soğurucunun, anahtarlama elemanlarının AÇIK ve KAPALI durumuna göre soğurma sonuçları ($l_1 = l_2 = 23$ mm, $m = 1$ mm)

D_1	D_2	Alt Soğurma Tepesi		Üst Soğurma Tepesi	
		f_{alt} (GHz)	Soğurma Seviyesi	$f_{üst}$ (GHz)	Soğurma Seviyesi
KAPALI	KAPALI	3.37	0.93	—	—
AÇIK	KAPALI	3.64	0.98	—	—
AÇIK	AÇIK	3.38	0.72	3.56	0.79

4.2.4.1.3. Dört PIN diyotu soğurucu

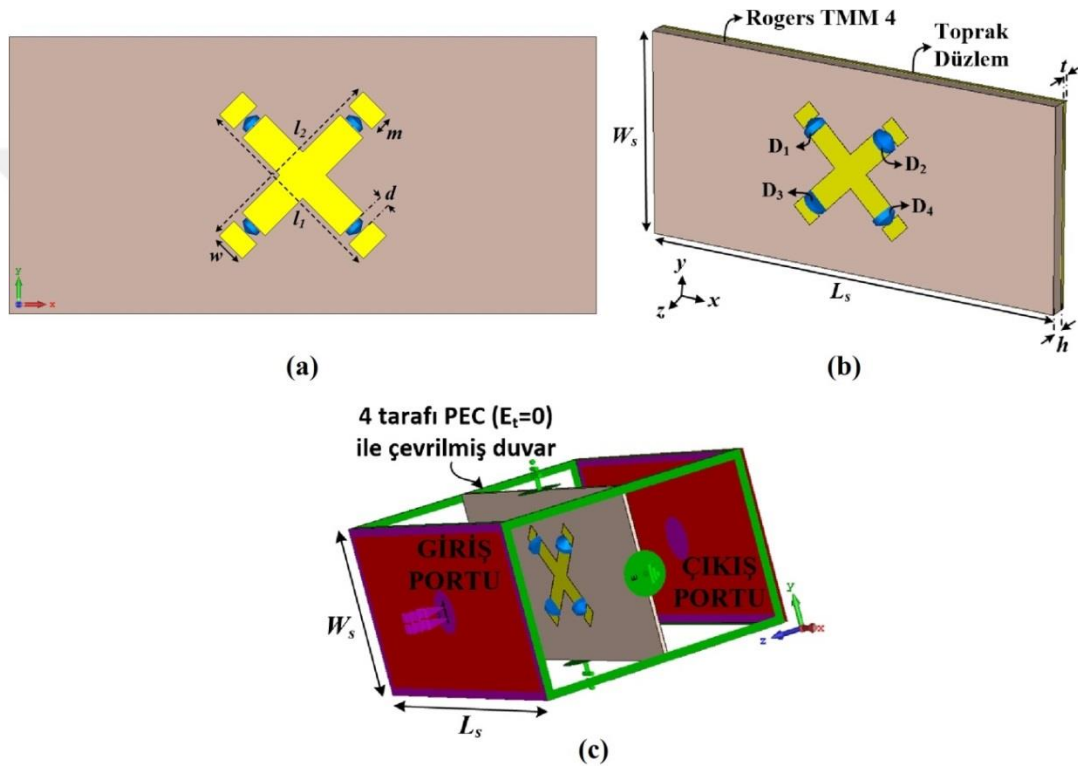
Bu kısımda, X-şekilli rezonatöre dört adet HPND-4028 model PIN diyot monte edilmiştir. Monte edilen PIN diyotun konumuna ve açık/kapalı durumuna göre benzetim ortamında parametrik analizler yapılmıştır.

4.2.4.1.3.1. Tasarım ve benzetim ortamı

Önerilen yapının tasarım parametreleriyle birlikte şematik görünümü Şekil 4.60'da verilmiştir. Soğurucunun üst katmanı $t = 0.035$ mm kalınlığa sahip bakır ($\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m) X-şekilli rezonatör ve dört adet PIN diyottan (HPND-4028) oluşmaktadır. Bu bakır rezonatör, $\epsilon_r = 4.5$ dielektrik sabiti, $\tan\delta = 0.002$ kayıp tanjantı ve $h = 0.76$ mm kalınlığı olan Rogers TMM4 taban malzemesi üzerine konumlandırılmıştır. Taban malzemesinin diğer yüzeyi ile tamamen toprak yüzey olarak bakır ile kaplanmıştır. Kullanılan Rogers TMM4'ün boyutları $L_s \times W_s$ sırasıyla, 72.136 ve 34.036 mm'dir. Ayrıca, rezonatörün her bir kolunun boyutları l_1 ve l_2 , kol kalınlıkları

ise w ile temsil edilmiştir ve sırasıyla 25, 25 ve 4 mm'dir. PIN diyotlar, rezonatörün l_1 ve l_2 kolundaki $d = 0.5$ mm genişlik değerine sahip boşluklara yerleştirilmiştir.

Soğurucu tasarımı ve nümerik analizler CST Microwave Studio (MWS)'da Frequency Domain Solver kullanılarak yapılmıştır. Soğurucuya ait benzetim düzeneği Şekil 4.60c'de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere dalga kılavuzunun z-ekseni boyunca yan duvarları mükemmel elektrik iletken (PEC) ile sınırlandırılmıştır. Soğurucuyu uyarmak için, dalga kılavuzunun her iki ucu da giriş ve çıkış portları ile sonlandırılmıştır. Önerilen tasarım TE_{10} modu ile uyarılmıştır, ayrıca elektrik alan vektörü E , manyetik alan vektörü H ve yayılma vektörü k sırasıyla x , y ve z eksenı boyunca ilerlemektedir.

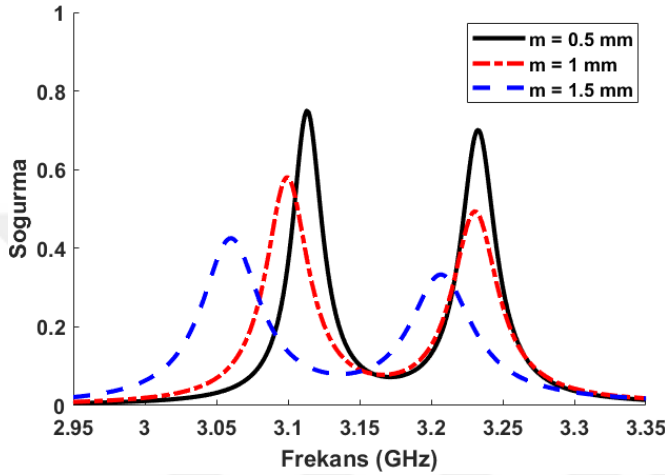


Şekil 4.60. Dört PIN-diyotlu soğurucu yapısının tasarım parametreleriyle birlikte, (a) önden; (b) perspektif şematik görüntüsü ve (c) benzetim ortamının şematik görünümü

4.2.4.1.3.2. Nümerik analiz sonuçları

Önerilen dört PIN-diyotlu soğurucu tasarımı, X-şekilli rezonatöre eklenmiş dört adet PIN-diyotun AÇIK/KAPALI olup olmamalarına göre tek veya çift bant davranış sergilemektedir. PIN-diyotların AÇIK (iletimde) veya KAPALI (yalıtımda) durumuna göre rezonatör simetrik olursa tek bantlı bir soğurma gözlemlenecektir. Eğer rezonatör asimetrik olursa çift bantlı bir soğurma gözlemlenecektir. Bahsedilen bu davranışları desteklemek amacıyla, PIN-diyotların farklı yerleştirme konumu ve AÇIK/KAPALI durumları için nümerik araştırmalar yapılmıştır. Nümerik araştırmalar boyunca soğurma, Eşitlik (4.1)'e göre hesaplanmıştır. Ayrıca, yapının arka yüzeyi tamamen toprak düzlem ile kaplı olduğu için $|S_{21}| = 0$ 'dır.

İlk olarak, Şekil 4.61’te gösterildiği gibi PIN-diyotların uygun konumunu elde etmek amacıyla, farklı m parametre değerleri için soğurma analizleri yapılmıştır. PIN-diyotlar sırasıyla D_1 AÇIK, D_2 AÇIK, D_3 AÇIK ve D_4 KAPALI konumda olacak şekilde; m değeri 0.5 mm’den 1.5 mm’ye 0.5 mm’lik adımlarla artırılmıştır. Bu durumda soğurucu yapısı çift bant davranış sergilemiştir. m değeri arttıkça alt ve üst soğurma tepeleri arasındaki frekans farkı da Δf ($f_{üst} - f_{alt}$) artmıştır. Ancak soğurma seviyelerinde önemli ölçüde azalma görülmüştür. Sonuçlar ayrıntılı şekilde Çizelge 4.15’de verilmiştir.

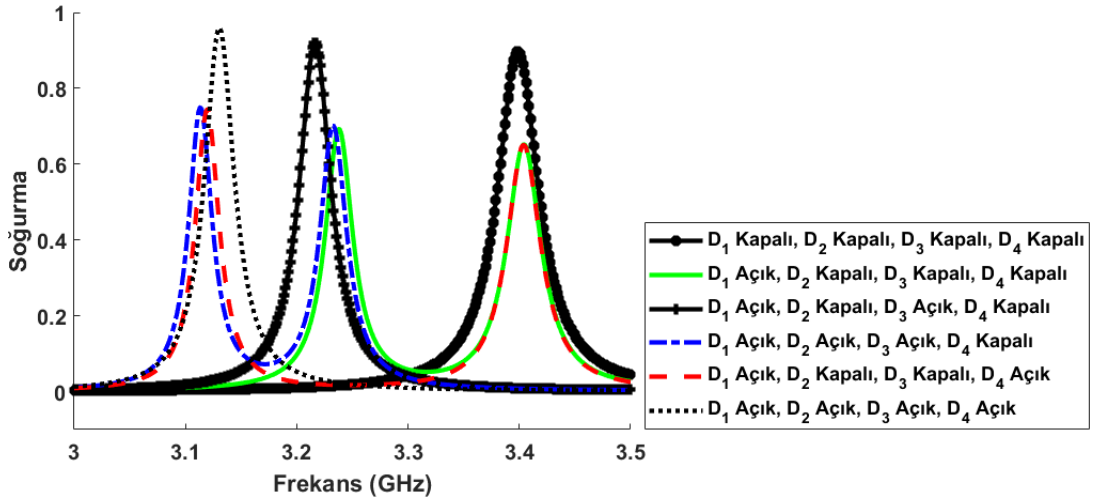


Şekil 4.61. Dört PIN-diyotlu soğurucu için D_1 AÇIK, D_2 AÇIK, D_3 AÇIK ve D_4 KAPALI durumdayken farklı m değerleri için soğurma karakteristikleri

Çizelge 4.15. Dört PIN-diyotlu soğurucu için D_1 AÇIK, D_2 AÇIK, D_3 AÇIK ve D_4 KAPALI durumdayken farklı m değerleri için soğurma sonuçları

m (mm)	Alt Soğurma Tepesi		Üst Soğurma Tepesi		Δf (MHz)
	f_{alt} (GHz)	Soğurma Seviyesi	$f_{üst}$ (GHz)	Soğurma Seviyesi	
0.5	3.11	0.75	3.23	0.7	120
1	3.1	0.58	3.23	0.49	130
1.5	3.06	0.43	3.21	0.33	150

Daha sonra m parametresi 0.5 mm’de sabit tutularak PIN-diyotların AÇIK/KAPALI durumuna göre önerilen yapının soğurma davranışları incelenmiştir. Dört adet PIN-diyotun, $2^4 = 16$ tane AÇIK/KAPALI kombinasyonu vardır. Lakin bu kombinasyonlardan bir kısmı kendi aralarında benzerlik göstermektedir ve sadeleştirme yapılırken 6 tane farklı sonuç elde edilmektedir. Şekil 4.62’te görüldüğü üzere, rezonatör simetrik olduğu durumlarda tek bant; asimetrik olduğu durumlarda ise çift bant davranış sergilemektedir. Bu 6 farklı kombinasyonun nümerik analiz sonuçları Çizelge 4.16’de verilmiştir.



Şekil 4.62. Dört PIN-diyotlu soğurucunun, anahtarlama elemanlarının AÇIK ve KAPALI durumuna göre soğurma karakteristiği ($m = 0.5$ mm)

Çizelge 4.16. Dört PIN-diyotlu soğurucunun, anahtarlama elemanlarının AÇIK ve KAPALI durumuna göre soğurma sonuçları ($m = 0.5$ mm)

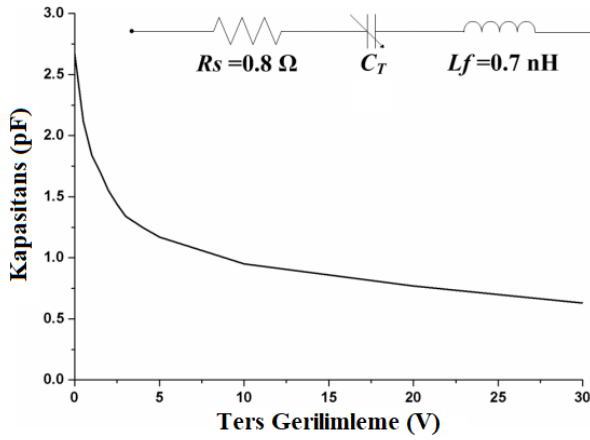
D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	Alt Soğurma Tepesi		Üst Soğurma Tepesi	
				f_{alt} (GHz)	Soğurma Seviyesi	$f_{üst}$ (GHz)	Soğurma Seviyesi
KAPALI	KAPALI	KAPALI	KAPALI	3.4	0.9	—	—
AÇIK	KAPALI	KAPALI	KAPALI	3.24	0.69	3.41	0.65
AÇIK	KAPALI	AÇIK	KAPALI	3.22	0.92	—	—
AÇIK	AÇIK	AÇIK	KAPALI	3.11	0.75	3.23	0.7
AÇIK	KAPALI	KAPALI	AÇIK	3.12	0.74	3.4	0.65
AÇIK	AÇIK	AÇIK	AÇIK	3.13	0.96	—	—

4.2.4.2. Varaktör Diyotlu Frekansı Kontrol Edilebilir X-Şekilli Soğurucu

Varaktör diyot, kapasitansı elektriksel olarak değişebilen P-N bağlantılı bir diyot çeşididir. Ters öngerilimlemede, çoğunluk yük taşıyıcısı olan elektronlar N-bölgesine, çoğunluk yük taşıyıcısı olan delikler P-bölgesine çekilirler. Bu durumda P-tipi ve N-tipi yarı iletkenlerin arasındaki deplasman bölgesi dielektrik malzeme gibi davranır. Böylece diyot, kapasitif bir etki gösterir. Üzerine uygulanan gerilim arttıkça, deplasman bölgesi genişler ve kapasite değeri azalır. Bu kapsamda, varaktör diyot ters öngerilimlemede değişken bir kapasitans sağlar.

Bu çalışmada SMV1405 model varaktör diyot kullanılmıştır. Kullanılan bu diyot, 0.5 V – 30 V gerilim aralığında 0.63 pF – 2.67 pF aralığında değişen kapasitans

sunmaktadır. Veri sayfasına göre, Şekil 4.63’de gösterildiği gibi, diyot $0.8 \, \Omega$ dirence seri bağlı $0.7 \, \text{nH}$ bobin ve değişken C_T kapasiteli kondansatör değeri göstermektedir.



Şekil 4.63. SMV 1405 varaktör diyotun eşdeğer devre modeli ve gerilim kapasite grafiği

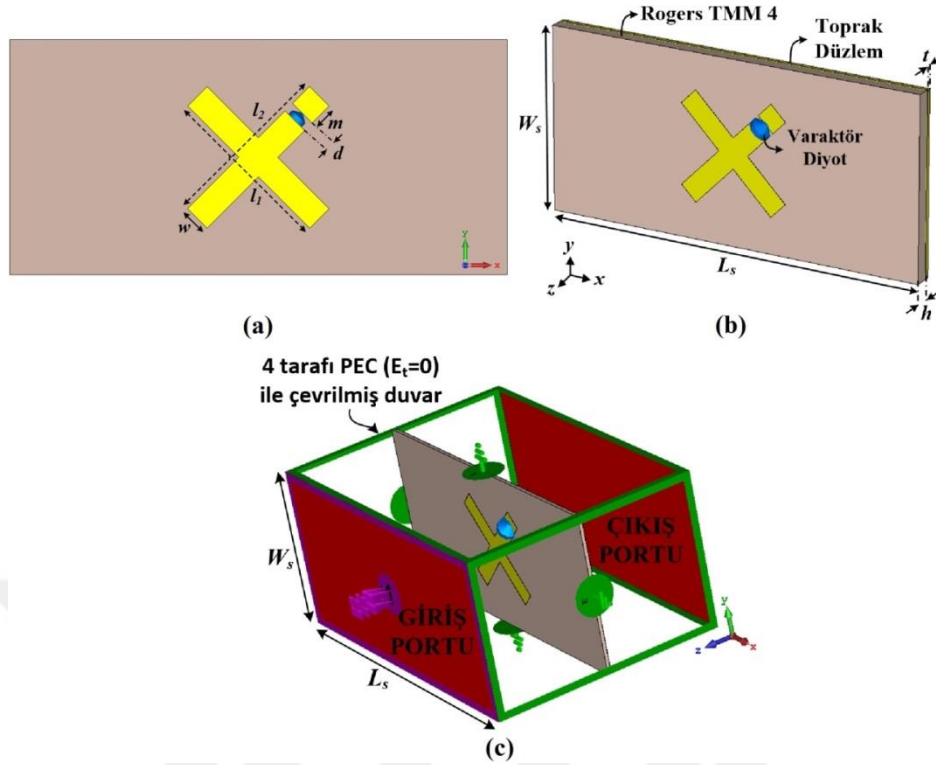
4.2.4.2.1. Tek varaktör diyotlu soğurucu

Bu kısımda, X-şekilli rezonatöre bir adet SMV1405 model varaktör diyot monte edilmiştir. Monte edilen varaktör diyotun konumuna ve kapasite değerine göre, benzetim ortamında parametrik analizler yapılmıştır.

4.2.4.2.1.1. Tasarım ve benzetim ortamı

Önerilen yapının tasarım parametreleriyle birlikte şematik görünümü Şekil 4.64’de verilmiştir. Soğurucunun üst katmanı $t = 0.035 \, \text{mm}$ kalınlığa sahip bakır ($\sigma = 5.8 \times 10^7 \, \text{S/m}$) X-şekilli rezonatör ve bir adet varaktör diyottan (SMV1405) oluşmaktadır. Bu bakır rezonatör, $\epsilon_r = 4.5$ dielektrik sabiti, $\tan \delta = 0.002$ kayıp tanjantı ve $h = 0.76 \, \text{mm}$ kalınlığı olan Rogers TMM4 taban malzemesi üzerine konumlandırılmıştır. Taban malzemesinin diğer yüzeyi ile tamamen toprak yüzey olarak bakır ile kaplanmıştır. Kullanılan Rogers TMM4’ün boyutları $L_s \times W_s$ sırasıyla, 72.136 ve 34.036 mm’dir. Ayrıca, rezonatörün her bir kolunun boyutları l_1 ve l_2 , kol kalınlıkları ise w ile temsil edilmiştir ve sırasıyla 25, 25 ve 4 mm’dir. Varaktör diyot ise rezonatörün l_2 kolundaki $d = 1 \, \text{mm}$ genişlik değerine sahip boşluğa yerleştirilmiştir.

Soğurucu tasarımı ve nümerik analizler CST Microwave Studio (MWS)’da Frequency Domain Solver kullanılarak yapılmıştır. Soğurucuya ait benzetim düzeneği Şekil 4.64c’de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere dalga kılavuzunun z-ekseni boyunca yan duvarları mükemmel elektrik iletken (PEC) ile sınırlandırılmıştır. Soğurucuyu uyarmak için, dalga kılavuzunun her iki ucu da giriş ve çıkış portları ile sonlandırılmıştır. Önerilen tasarım TE_{10} modu ile uyarılmıştır, ayrıca elektrik alan vektörü $\mathbf{E}$, manyetik alan vektörü $\mathbf{H}$ ve yayılma vektörü $\mathbf{k}$ sırasıyla x , y ve z eksenı boyunca ilerlemektedir.



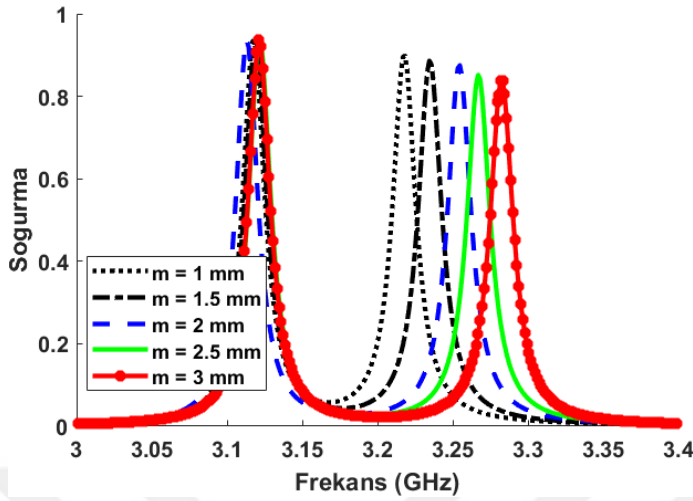
Şekil 4.64. Tek varaktör diyotlu soğurucu yapısının tasarım parametreleriyle birlikte, (a) önden; (b) perspektif şematik görüntüsü ve (c) benzetim ortamının şematik görünümü

4.2.4.2.1.2. Nümerik analiz sonuçları

Benzetim ortamında, X-şekilli rezonatöre eklenmiş bir adet varaktör diyota farklı besleme gerilimleri (0 – 30 V) uygulanmaktadır. Bu sayede, üst soğurma frekansı sınırlı aralıkta kontrol edilebilmektedir. $m = 1$ mm için diyota her hangi bir gerilim uygulanmadığında, rezonatör simetrik olmakta ve 3.12 GHz’de tek bantlı bir soğurma gözlemlenmektedir. Diyotun 30 V ile beslenmesi durumunda, rezonatör asimetric davranış sergilemekte ve 3.22 GHz’de ikinci soğurma tepesi oluşarak çift bantlı bir soğurma gözlemlenmektedir. Bahsedilen bu davranışları desteklemek amacıyla, varaktör diyotun farklı yerleştirme konumu ve besleme gerilimleri için nümerik araştırmalar yapılmıştır. Nümerik araştırmalar boyunca soğurma, Eşit (4.1)’e göre hesaplanmıştır. Ayrıca, yapının arka yüzeyi tamamen toprak düzlem ile kaplı olduğu için $S_{21} = 0$ ’dır.

İlk olarak, Şekil 4.65’de gösterildiği gibi varaktör diyotun uygun konumunu elde etmek amacıyla, farklı m parametre değerleri için soğurma analizleri yapılmıştır. Diyot 30 V ile besleniyorken, m değeri 1 mm’den 3 mm’ye 0.5 mm’lik adımlarla artırılmıştır. Bu durumda soğurucu yapısı çift bant davranış sergilemiştir. Alt bant frekansı f_{alt} 3.12 GHz’de sabit iken; üst bant frekansı $f_{üst}$, m değeri artıkça 3.22 GHz’den 3.28 GHz’e kaymıştır. Ancak üst bantın soğurma seviyesi 0.9’den 0.84’ye göreceli olarak az miktarda azalmıştır. Alt ve üst soğurma tepeleri arasındaki en yüksek frekans farkının

$\Delta f (f_{üst} - f_{alt})$, $m = 3$ mm değerinde 160 MHz olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar ayrıntılı olarak Çizelge 4.17’de verilmiştir.

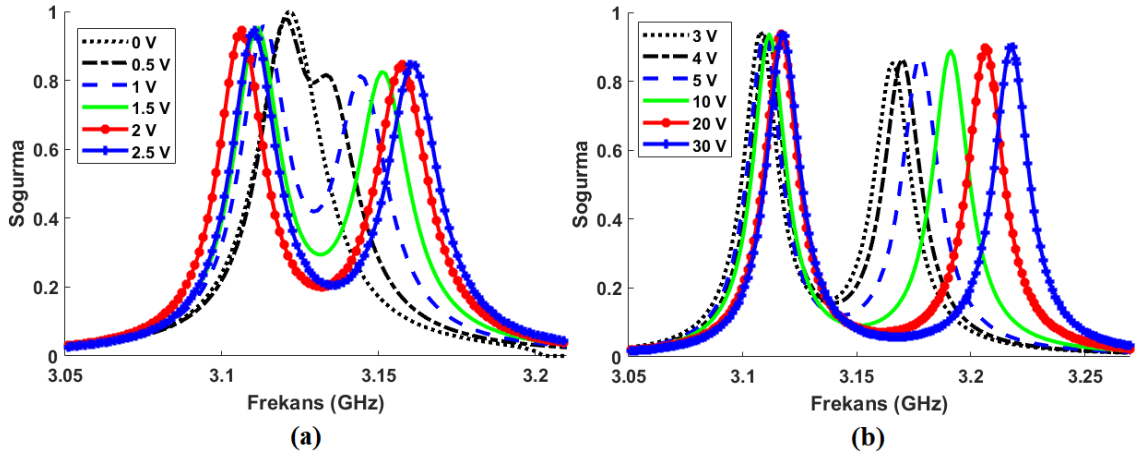


Şekil 4.65. Tek varaktör diyotlu soğurucuya 30 V uygulanmışken, farklı m değerleri için soğurma karakteristiği

Çizelge 4.17. Tek varaktör diyotlu soğurucuya 30 V uygulanmışken, farklı m değerleri için soğurma sonuçları ($m = 0.5$ mm)

m (mm)	Alt Soğurma Tepesi		Üst Soğurma Tepesi		Δf (MHz)
	f_{alt} (GHz)	Soğurma Seviyesi	$f_{üst}$ (GHz)	Soğurma Seviyesi	
1	3.12	0.93	3.22	0.9	100
1.5	3.12	0.93	3.24	0.89	120
2	3.11	0.94	3.26	0.88	150
2.5	3.12	0.94	3.27	0.85	150
3	3.12	0.94	3.28	0.84	160

Daha sonra m parametresi 1 mm’de sabit tutularak, diyota uygulanan farklı besleme gerilimlerine göre önerilen yapının soğurma davranışı incelenmiştir. Varaktör diyotun besleme gerilimi 0 V’tan 30 V’a artığında kapasitesi C_T 2.67 pF’tan 0.63 pF’a düşmektedir. Diyot herhangi bir gerilim ile beslenmez iken 3.12 GHz’de tek bant davranış sergilemektedir. Şekil 4.66’da görüldüğü gibi, besleme gerilimini 30 V’a kadar kademeli olarak artırdıkça, 3.12 GHz’den 3.22 GHz’e kadar artan ikinci bir soğurma tepesi oluşmaktadır. Elde edilen bu sonuçlar ayrıntılı olarak Çizelge 4.18’te verilmiştir.



Şekil 4.66. Tek varaktör diyotlu soğurucuya uygulanan; **a)** 0 – 2.5 V arası farklı gerilim değerleri için soğurma karakteristiği ve **b)** 3 – 30 V arası farklı gerilim değerleri için soğurma karakteristiği

Çizelge 4.18. Tek varaktör diyotlu soğurucuya uygulanan farklı gerilim değerleri için soğurma sonuçları

Gerilim (V)	C_t (pF)	Alt Soğurma Tepesi		Üst Soğurma Tepesi	
		f_{alt} (GHz)	Soğurma Seviyesi	$f_{üst}$ (GHz)	Soğurma Seviyesi
0	2.67	3.12	1	—	—
0.5	2.12	3.12	0.98	3.13	0.82
1	1.84	3.11	0.96	3.14	0.81
1.5	1.70	3.11	0.95	3.15	0.82
2	1.55	3.11	0.94	3.16	0.84
2.5	1.44	3.11	0.94	3.16	0.85
3	1.34	3.11	0.94	3.17	0.85
4	1.25	3.11	0.94	3.17	0.86
5	1.17	3.11	0.94	3.18	0.87
10	0.95	3.11	0.94	3.2	0.89
20	0.77	3.12	0.94	3.21	0.9
30	0.63	3.12	0.93	3.22	0.9

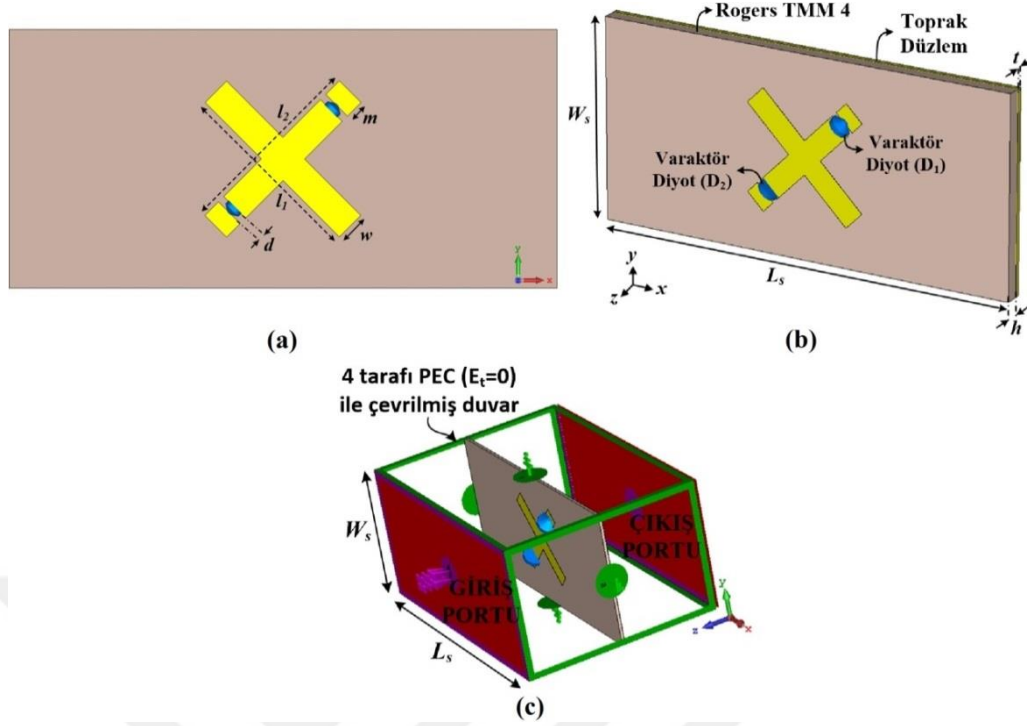
4.2.4.2.2. Çift varaktör diyetli soğurucu

Bu kısımda, X-şekilli rezonatöre iki adet SMV1405 model varaktör diyet monte edilmiştir. Monte edilen varaktör diyetlerin konumuna ve kapasite değerine göre, benzetim ortamında parametrik analizler yapılmıştır.

4.2.4.2.2.1. Tasarım ve benzetim ortamı

Önerilen yapının tasarım parametreleriyle birlikte şematik görünümü Şekil 4.67'de verilmiştir. Soğurucunun üst katmanı $t = 0.035$ mm kalınlığa sahip bakır ($\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m) X-şekilli rezonatör ve iki adet varaktör diyottan (SMV1405) oluşmaktadır. Bu bakır rezonatör, $\epsilon_r = 4.5$ dielektrik sabiti, $\tan \delta = 0.002$ kayıp tanjantı ve $h = 0.76$ mm kalınlığı olan Rogers TMM4 taban malzemesi üzerine konumlandırılmıştır. Taban malzemesinin diğer yüzeyi ile tamamen toprak yüzey olarak bakır ile kaplanmıştır. Kullanılan Rogers TMM4'ün boyutları $L_s \times W_s$ sırasıyla, 72.136 ve 34.036 mm'dir. Ayrıca, rezonatörün her bir kolunun boyutları l_1 ve l_2 , kol kalınlıkları ise w ile temsil edilmiştir ve sırasıyla 25, 25 ve 4 mm'dir. Varaktör diyetler ise rezonatörün l_2 kolundaki $d = 1$ mm genişlik değerine sahip boşluklara yerleştirilmiştir.

Soğurucu tasarımı ve nümerik analizler CST Microwave Studio (MWS)'da Frequency Domain Solver kullanılarak yapılmıştır. Soğurucuya ait benzetim düzeneği Şekil 4.67c'de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere dalga kılavuzunun z-ekseni boyunca yan duvarları mükemmel elektrik iletken (PEC) ile sınırlandırılmıştır. Soğurucuyu uyarmak için, dalga kılavuzunun her iki ucu da giriş ve çıkış portları ile sonlandırılmıştır. Önerilen tasarım TE_{10} modu ile uyarılmıştır, ayrıca elektrik alan vektörü $\mathbf{E}$, manyetik alan vektörü $\mathbf{H}$ ve yayılma vektörü $\mathbf{k}$ sırasıyla x, y ve z eksenini boyunca ilerlemektedir.



Şekil 4.67. Çift varaktör diyotlu soğurucu yapısının tasarım parametreleriyle birlikte, (a) önden; (b) perspektif şematik görüntüsü ve (c) benzetim ortamının şematik görünümü

4.2.4.2.2. Ölçüm düzeneği ve üretim

Benzetim ortamında yapılan tasarımları doğrulamak için, çift varaktör diyotlu soğurucu prototip üretilmiş ve ölçülmüştür. Ölçüm düzeneği ve prototip Şekil 4.68a ve Şekil 4.68b’de gösterilmiştir. Numune tutucu arasına yerleştirilen prototipin yansıma ve iletim katsayı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler için, S-bant WR284 dalga kılavuzuna bağlı Agilent Fieldfox N9926A vektör ağ analizörü kullanılmıştır.

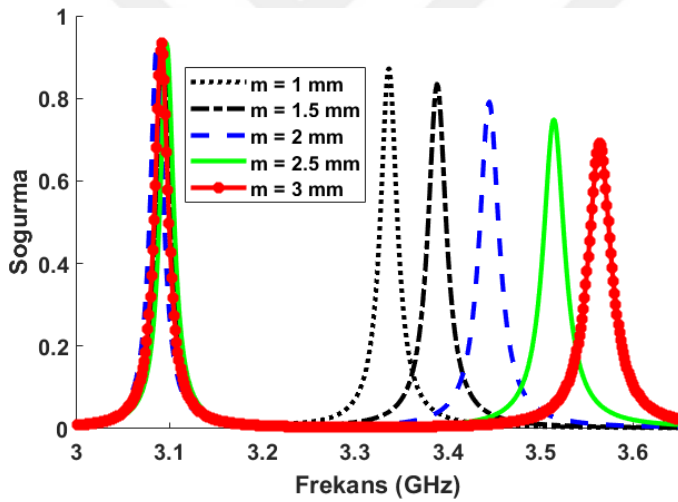


Şekil 4.68. Çift varaktör diyotlu soğurucunun a) ölçüm düzeneği; ve b) önden görünümü

Önerilen çift varaktör diyotlu soğurucu yapısı üretilmiştir. Üretimler geleneksel baskı devre tekniğiyle yapılmıştır ve üretim adımları daha önceden Bölüm 4.1.3’de ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Baskı devre tekniği ile üretilen yapıya 2 adet SMV1405 varaktör diyot ve 3 adet bobin lehimlenmiştir. Bobinlerin eklenme amacı yapıya uygulanan elektromanyetik dalgaların DC besleme hattına geçişini önlemektir.

4.2.4.2.2.3. Nümerik analiz sonuçları

İlk olarak, Şekil 4.69’da gösterildiği gibi varaktör diyotların uygun konumunu elde etmek amacıyla, farklı m parametre değerleri için soğurma analizleri yapılmıştır. Diyotlar 30 V ile besleniyorken, m değeri 1 mm’den 3 mm’ye 0.5 mm’lik adımlarla artırılmıştır. Bu durumda soğurucu yapısı çift bant davranış sergilemiştir. Alt bant frekansı f_{alt} 3.1 GHz’de sabit iken; üst bant frekansı $f_{üst}$, m değeri artıkça 3.34 GHz’den 3.56 GHz’e kaymıştır. Ancak üst bantın soğurma seviyesi 0.87’den 0.69’ye göreceli olarak azalmıştır. Alt ve üst soğurma tepeleri arasındaki en yüksek frekans farkının $\Delta f (f_{üst} - f_{alt})$, $m = 3$ mm değerinde 470 MHz olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar ayrıntılı olarak Çizelge 4.19’da verilmiştir.

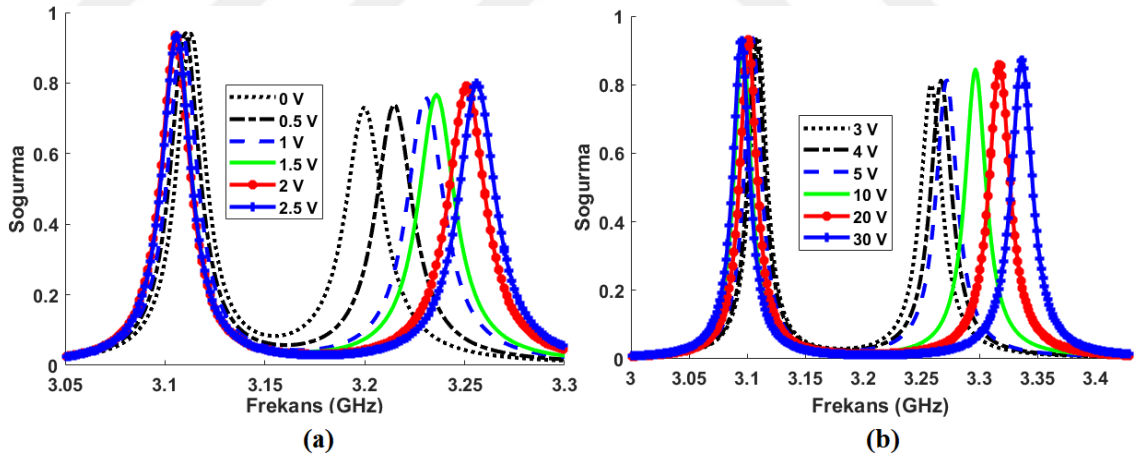


Şekil 4.69. Çift varaktör diyotlu soğurucunun diyetlerine 30 V uygulanmışken, farklı m değerleri için soğurma karakteristiği

Çizelge 4.19. Çift varaktör diyotlu soğurucunun diyotlarına 30 V uygulanmışken, farklı m değerleri için soğurma sonuçları

m (mm)	Alt Soğurma Tepesi		Üst Soğurma Tepesi		Δf (MHz)
	f_{alt} (GHz)	Soğurma Seviyesi	$f_{üst}$ (GHz)	Soğurma Seviyesi	
1	3.1	0.93	3.34	0.87	240
1.5	3.1	0.93	3.39	0.83	280
2	3.09	0.93	3.45	0.79	360
2.5	3.1	0.93	3.51	0.75	400
3	3.09	0.93	3.56	0.69	470

Daha sonra m parametresi 1 mm’de sabit ve D_2 diyotuna 30 V uygulanmışken, D_1 diyota uygulanan farklı besleme gerilimleri için önerilen yapının soğurma davranışı incelenmiştir. Varaktör diyot D_1 ’in besleme gerilimi 0 V’tan 30 V’a arttığında kapasitesi C_T 2.67 pF’tan 0.63 pF’a düşmektedir. Şekil 4.70’de görüldüğü üzere, alt bant soğurma frekansı f_{alt} 3.11 GHz’de sabit iken; besleme gerilimi 0 V’dan 30 V’a artırılınca üst bant soğurma frekansı $f_{üst}$ 3.2 GHz’den 3.34 GHz’e artmıştır. Elde edilen bu sonuçlar ayrıntılı olarak Çizelge 4.20’de verilmiştir.

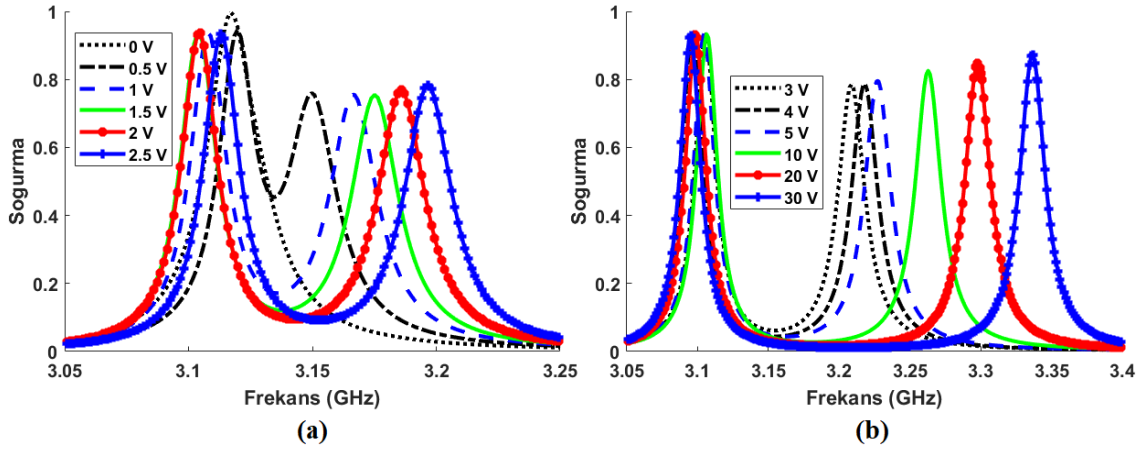


Şekil 4.70. Çift varaktörlü soğurucu için, D_2 diyota sabit 30 V uygulanmışken, D_1 diyota uygulanan; **a)** 0 – 2.5 V gerilimler için soğurma karakteristiği ve **b)** 3 – 30 V gerilimler için soğurma karakteristiği ($m = 1$ mm)

Çizelge 4.20. Çift varaktörlü soğurucunun D_2 diyotu 30 V’da sabitken, D_1 diyotuna uygulanan farklı gerilimler için soğurma sonuçları ($m = 1$ mm)

Gerilim (V)	C_t (pF)	Alt Soğurma Tepesi		Üst Soğurma Tepesi	
		f_{alt} (GHz)	Soğurma Seviyesi	$f_{üst}$ (GHz)	Soğurma Seviyesi
0	2.67	3.11	0.94	3.2	0.73
0.5	2.12	3.11	0.94	3.21	0.74
1	1.84	3.11	0.94	3.23	0.76
1.5	1.70	3.11	0.94	3.24	0.77
2	1.55	3.11	0.94	3.25	0.79
2.5	1.44	3.11	0.93	3.26	0.8
3	1.34	3.11	0.94	3.26	0.8
4	1.25	3.11	0.93	3.27	0.81
5	1.17	3.11	0.94	3.27	0.81
10	0.95	3.1	0.93	3.3	0.84
20	0.77	3.1	0.93	3.32	0.86
30	0.63	3.1	0.93	3.34	0.87

Son olarak, m parametresi 1 mm’de sabit ve D_1 ve D_2 diyotlarına aynı değerde 0 V ile 30 V arası gerilimler uygulanmıştır ve önerilen yapının soğurma davranışı incelenmiştir. Varaktör diyotların besleme gerilimleri 0 V’tan 30 V’a artığında kapasitesi C_T 2.67 pF’tan 0.63 pF’a düşmektedir. Alt bant soğurma frekansı f_{alt} yaklaşık 3.11 GHz’de sabit iken; besleme gerilimleri 0 V’da ikinci bir frekans oluşmamaktadır. Ancak Şekil 4.71’de görüldüğü gibi, gerilimler artıkça üst bant soğurma frekansı oluşmaktadır. Diyotlara 30 V uygulanınca üst bant soğurma frekansı $f_{üst}$ 3.34 olarak gözlemlenmektedir. Elde edilen bu sonuçlar ayrıntılı olarak Çizelge 4.21’de verilmiştir.



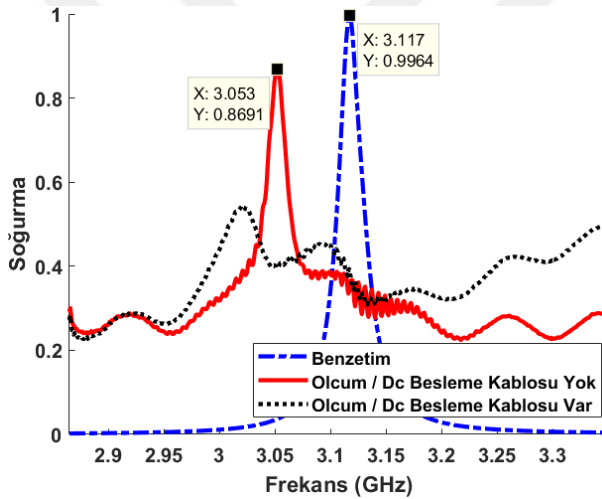
Şekil 4.71. Çift varaktörlü soğurucunun D_1 ve D_2 diyotlarına aynı anda uygulanan ; **a)** 0 – 2.5 V gerilimler için soğurma karakteristiği ve **b)** 3 – 30 V gerilimler için soğurma karakteristiği ($m = 1$ mm)

Çizelge 4.21. Çift varaktörlü soğurucunun D_1 ve D_2 diyotlarına aynı anda uygulanan farklı gerilimler için soğurma sonuçları ($m = 1$ mm)

Gerilim (V)	C_t (pF)	Alt Soğurma Tepesi		Üst Soğurma Tepesi	
		f_{alt} (GHz)	Soğurma Seviyesi	$f_{üst}$ (GHz)	Soğurma Seviyesi
0	2.67	3.12	1	—	—
0.5	2.12	3.12	0.95	3.15	0.76
1	1.84	3.11	0.94	3.17	0.76
1.5	1.70	3.1	0.94	3.18	0.75
2	1.55	3.11	0.94	3.19	0.77
2.5	1.44	3.11	0.94	3.2	0.78
3	1.34	3.11	0.93	3.21	0.79
4	1.25	3.1	0.94	3.22	0.79
5	1.17	3.11	0.94	3.23	0.8
10	0.95	3.11	0.93	3.26	0.83
20	0.77	3.1	0.93	3.30	0.85
30	0.63	3.1	0.93	3.34	0.87

4.2.4.2.4. Ölçüm sonuçları

Şekil 4.71b’de gösterilen çift varaktör diyotlu X-Şekilli soğurucu yapısı, WR-284 dalga kılavuzu içerisinde ölçülmüştür. Ölçüm esnasında, yapıya uygulanan elektromanyetik dalganın DC besleme güç kaynağına etki etmemesi için bobinler eklenmiştir. Ancak üretilen yapıya eklenen bobinler beklenen etkiyi göstermemiştir. DC besleme için yapıya monte edilen kablolar varken, yapı herhangi bir frekans tepkisi vermemektedir. Bu istenmeyen davranışı yok etmek için 47 nH, 56 nH ve 10 μ H’lik üç farklı değerde bobin kullanılmıştır. Ancak hiç birinde istenilen sonuç elde edilmemiştir. Lakin bu kablolar yapıdan söküldüğünde, 3.05 GHz’de tek bantlı bir soğurma gerçekleştirilmektedir. Bu ölçüm sonucu, benzetim ortamında varaktörlere gerilimin uygulanmadığı durumdaki sonuçla uyumludur. Özetle, kullanılan bobinler ile elektromanyetik dalganın DC besleme hattına geçişi engellenememiştir. Montaj esnasında, lehim makinasının aşırı ısısından kaynaklı, bobinleri bozulduğu düşünülmektedir. Ölçümlerde elde edilen bu sonuçlar Şekil 4.72’de verilmiştir.



Şekil 4.72. Çift varaktör diyot bağlı X-Şekilli soğurucuya bağlı DC besleme kablolarının soğurma sonucuna etkisi

5. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında, rezonatör tabanlı çoklu-bant soğurucu tasarımı ve sensor uygulamaları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar, kullanılan rezonatörlerin topolojisine göre, iki ayrı kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda, metamalzemelerin yapı taşı olan YHR ve ELC rezonatörleri kullanılırken; ikinci kısımda simetrik olup olmamasına göre tek veya çift bant davranış sergileyen X-şekilli rezonatör kullanılmıştır. İki ayrı kısımda ele alınan soğurucuların konfigürasyonları ve performansları Çizelge 5.1’de özetlenmektedir.

İlk kısımda, YHR ve ELC rezonatörleri kullanılarak üç farklı soğurucu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu kısımdaki her bir tasarım, aşağıda özetlenmiştir:

Öncelikle, iç içe geçmiş, eş merkezli, üç adet dairesel şekilli YHR yapıları kullanılarak üç bantlı minyatür bir soğurucu tasarlanmıştır. Tasarlanan bu soğurucu 2.88, 3.52 ve 5.16 GHz frekans bantlarında çalışmaktadır ve aynı anda hem WiMAX hem de WLAN bantlarını kapsamaktadır. Çizelge 3.2’deki verilere göre, bu tasarımın elektriksel boyutunun, %90 üzerinde soğurma sağlayan çift veya çok bantlı bazı çalışmalar ile kıyaslandığında, daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, önerilen yapının temel elektromanyetik parametreleri ve çapraz polarize yansıması incelenmiştir. Önerilen tasarım 2.88 ve 3.52 GHz’de negatif dielektrik sabitine sahipken; her üç soğurma frekansında da çapraz polarize etkisi gözlemlenmemiştir. Bu çekici özellikler sayesinde, önerilen soğurucu EMI/EMC, kablosuz iletişim ve WiMAX/WLAN işlemleri gibi çeşitli uygulamalar için iyi bir aday olabilir.

İkinci tasarımda, taban malzemesi üç boyutlu yazıcıda imal edilen soğurucu tabanlı sensor tasarlanmıştır. Rezonatör olarak da sensor uygulamalarında sıklıkla kullanılan ELC rezonatör yapısı kullanılmıştır. Test malzemelerini sensora entegre etmek amacıyla, taban malzemesine oyuk açılmıştır. Bu oyuk sayesinde yapı tek bir parçadan oluşmaktadır. Böylece, test malzemesini sensora entegre etmek için, birden fazla katman ve yapı üretmeye gerek yoktur. Ayrıca, bu oyuk sayesinde, hem katı hem de sıvı analizleri yapılabilir. Tasarımın doğrulanması için deneysel çalışmalar yürütülmüş ve hem katı hem de sıvı test malzemeleri kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Böylelikle nümerik tasarım doğrulanmıştır. Deneysel çalışmalara ek olarak, önerilen bu yapının çalışma mekanizmasını daha iyi anlaşılması için analitik modeli çıkartılmıştır. Üç boyutlu yazıcıda üretilen bu sensorun algılama performansı, literatürdeki soğurucu sensor çalışmaları ile karşılaştırılmış. Önerilen bu tasarımın dielektrik sabiti değişimine göstermiş olduğu frekans tepkisi doğrusal olmadığı için; performans kıyaslamasında aynı test malzemelerini kullanan çalışmalar dikkate alınmıştır. Çizelge 3.5’te verilen sonuçlara göre, önerilen sensor yapısının literatürdeki bazı çalışmalara göre daha hassas olduğu gözlemlenmiştir. Buna göre, bu soğurucu yapısı, katı ve sıvı sensor uygulamaları için iyi bir adaydır. Ayrıca önerilen yapı, oyuğa dielektrik sabiti farklı malzemeler yerleştirilerek, frekansı ayarlanabilir soğurucu olarak da kullanılabilir.

Üçüncü ve son tasarımda kare şekilli YHR yapısı kullanılarak, S-bant frekans bölgesinde, çalışma frekansları farklı iki adet soğurucu tasarlanmıştır. Tasarlanan bu iki soğurucunun, üzerine eklenen test malzemesinin dielektrik sabiti ve kalınlık değişimine bağlı, frekans tepkileri incelenmiştir. Tasarımın doğrulanması amacıyla yapılan deneysel çalışmaların, benzetim ortamından elde edilen sonuçlarla uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir. Ek olarak, sensorun çalışma mekanizması analitik yöntemle açıklanmıştır. Önerilen bu tasarım; dielektrik sabiti değişimine bağlı sıcaklık, nem, konsantrasyon gibi ortam parametrelerinin ve kalınlık değişimine bağlı basıncın algılanmasında iyi bir aday olabilir.

İkinci kısımda, asimetrik X-şekilli rezonatör kullanılarak dört farklı soğurucu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu kısımdaki her bir tasarım, aşağıda özetlenmiştir:

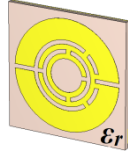
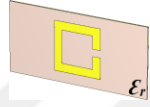
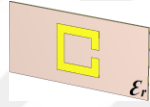
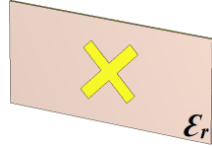
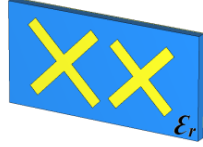
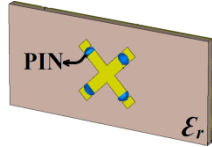
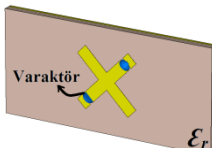
İlk olarak, simetrik olup olmama durumuna göre, tek veya çift bant davranış sergileyen X-şekilli rezonatör tabanlı soğurucu tasarlanmış, üretilmiş ve ölçülmüştür. Önerilen bu soğurucu yapısı, tek katman üzerine konumlandırılmış bir adet X-şekilli rezonatörden oluşmaktadır. Böylece, çift veya çok bantlı davranış elde etmek için tasarlanan çok katmanlı ve/veya çok rezonatörlü tasarımlara kıyasla, daha basit ve sade bir tasarıma sahiptir. Önerilen yapı, rezonatör topolojisine bağlı olarak, tek veya çift bantlı soğurma tepkisi vermektedir. X-şekilli rezonatörün her iki kol uzunluğu da birbirine eşitken, tek bir soğurma tepesi gözlemlenmekte; ancak kol uzunlukları birbirinden farklıyken, çift bantlı soğurma davranışı görülmektedir. Ayrıca, daha önce literatüre sunulan asimetrik çapraz şekilli soğurucuların asimetriyi meydana getiren farkları değiştikçe, her iki soğurma frekansı da aynı anda değişmektedir; bu da arzu edilen frekans bantlarının elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Ancak önerilen yapının kol uzunlukları ayrı ayrı değiştirilerek, her iki frekans da tek tek kontrol edilebilmektedir. Ek olarak, asimetrik X-şekilli yapının çapraz polarize yansıması incelenmiş ve ayna görüntüsü etkisi ile çapraz polarize yansımanın neredeyse olmadığı görülmüştür. Öne çıkan bu avantajlar sayesinde, asimetrik X-şekilli rezonatör tabanlı soğurucu, mikrodalga uygulamaları için iyi bir adaydır.

Asimetrik X-şekilli rezonatörün soğurma davranışı incelendiğinde; önerilen soğurucunun nispeten yüksek kalite faktörüne sahip olduğu görülmektedir ki bu davranış sensor uygulamaları için bir avantajdır. Buna istinaden, ikinci tasarımda, S-bant frekans bölgesinde tasarlanan asimetrik X-şekilli rezonatörün sensor davranışı ve performansı araştırılmıştır. Bu bağlamda, önerilen yapının üzerine farklı kalınlığa ve dielektrik sabitine sahip malzemeler yerleştirilerek, frekans değişimleri incelenmiştir. Ayrıca, Bölüm 3.3'te tasarlanan YHR tabanlı sensorlarla, algılama performansı karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.3'teki sonuçlarda da görüldüğü üzere, asimetrik X-şekilli rezonatör, YHR tabanlı soğuruculardan daha hassastır. YHR yapılarının soğurucu ve sensor uygulamalarında sıklıkla kullanıldığını göz önüne alınırsa; asimetrik X-şekilli rezonatör, sensor uygulamaları için iyi bir alternatiftir.

Üçüncü tasarımda, taban malzemesi olarak kullanılan kot kumaş üzerine iki adet asimetric X-şekilli rezonatör yerleştirilerek tekstil tabanlı bir soğurucu tasarlanmıştır, üretilmiş ve ölçülmüştür. Kumaş üzerine konumlandırılan bu X-şekilli rezonatörlerin her birinin kol uzunlukları diğerinden farklıdır ve bu sayede dört bantlı frekans cevabı elde edilmiştir. Önerilen tasarım, bant sayısı, soğurma tepe sayısı ve boyut açısından daha önceden literatüre sunulmuş tekstil tabanlı soğurucularla karşılaştırılmıştır. Bu yapı, dört bantlı davranış sağlayan ilk tekstil tabanlı soğurucudur ve Çizelge 4.5'teki karşılaştırma sonuçları bu çıkarımı desteklemektedir. Ek olarak, elektriksel boyutu açısından diğer çalışmalar ile karşılaştırılabilir seviyededir. Bu özelliklerinden dolayı, önerilen yapı, giyilebilir teknolojilerin çeşitli uygulamaları için önemli bir adaydır.

Son tasarımda, PIN ve varaktör diyotların entegre edildiği asimetric X-şekilli rezonatörler kullanılarak, frekansı kontrol edilebilir çift bantlı soğurucular önerilmiştir. Bu tasarımlarda soğurma frekansları, üretildikten sonra frekansları sabit kalan geleneksel soğuruculardan farklı olarak, istenen değere ayarlanabilmektedir. PIN diyota gerilim uygulandığında iletimde olup akım akışına izin vermekteyken; gerilim uygulanmadığında yalıtımda olup akım geçirmemektedir. Eklenen PIN diyotların iletimde olup olmamasına göre, X-şekilli rezonatör simetrik ya da asimetric davranış sergilemektedir. Böylece tek ya da çift bantlı soğurma davranışı elde edilmektedir. Varaktör diyot ise, üzerine uygulanan gerilim değeri arttıkça, kapasitesi azalan devre elemanıdır. X-şekilli rezonatöre eklenen varaktör diyotlara gerilim uygulanmazken rezonatör simetrik davranış sergilemekte ve tek frekanslı soğurma sağlamaktadır. Diyota gerilim uygulanınca rezonatörün simetrisi bozulmakta ve ikinci frekans bandı oluşmaktadır. Uygulanan gerilim değeri arttıkça, oluşan ikinci bandın frekansı da artmaktadır. Benzetim ortamında tasarlanan PIN ve varaktör diyotlu soğurucular içerisinde, çift varaktör diyotlu X-Şekilli soğurucu üretilmiş ve ölçülmüştür. Ölçüm esnasında, elektromanyetik dalga ile DC beslemeyi bloklamak için, rezonantör ve besleme hatları arasına bobinler eklenmiştir. Ancak bu bobinler istenen etkiyi göstermemiştir bu sebeple arzu edilen deneysel çıktılar elde edilememiştir.

Çizelge 5.1. Tezde önerilen soğurucu tasarımları ve özellikleri

Tasarım		Performans
Açıklama	Konfigurasyon	
Dairesel Şekilli ve Üç Bantlı YHR Tabanlı Soğurucu		Çok bantlı soğurma: 2.88/3.52/5.16 GHz Soğurma oranı: %69, %92, %97 Minyatür boyut: $0.352\lambda_0 \times 0.352\lambda_0$
3B Yazıcıda İmal Edilmiş ELC Tabanlı Soğurucu Sensor		Yekpare tasarım ve kolay uygulanabilirlik Yüksek algılama hassasiyeti Katı ve sıvılar için analiz imkanı
YHR Tabanlı Soğurucu		Tek bant soğurma: 3.12 GHz Yüksek soğurma oranı: %97
		Tek bant soğurma: 3.51 GHz Soğurma oranı: %98
Asimetrik X-Şekilli Rezonatör Tabanlı Soğurucu		Çift bant davranış: 3.12/3.52 GHz Soğurma oranı: %93, %96 YHR'ye kıyasla yüksek algılama hassasiyeti
Giyilebilir Uygulamalar İçin Dört Bantlı X-Şekilli Soğurucu		Çok bantlı soğurma: 2.68/2.80/3.00/3.18 GHz Soğurma oranı: %100, %100, %100, %100
Dört PIN diyotlu soğurucu X-Şekilli Soğurucu		Frekansı kontrol edilebilir çift bant soğurma davranışı Yüksek soğurma oranı
Çift varaktör diyotlu soğurucu X-Şekilli Soğurucu		Frekansı kontrol edilebilir çift bant soğurma davranışı Yüksek soğurma oranı

6. KAYNAKLAR

- Acevedo-Osorio, G., Reyes-Vera, E. and Lobato-Morales, H. 2020. Dual-band microstrip resonant sensor for dielectric measurement of liquid materials. *IEEE Sensors Journal*, 20(22): 13371-13378.
- Almirall, O., Fernández-García, R. and Gil, I. 2022. Wearable metamaterial for electromagnetic radiation shielding. *The Journal of The Textile Institute*, 113(8): 1586-1594.
- Al-Badri, K.S.L., Karacan, N., Kucukoner, E.M. and Ekmekci, E. 2018. Sliding planar conjoined cut-wire-pairs: A novel approach for splitting and controlling the absorption spectra. *Journal of Applied Physics*, 124(10): 105103.
- Anonymous 1: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/> [Son erişim tarihi: 11.07.2023].
- Anonymous 2: https://www.cadence.com/en_US/home/tools/system-analysis/rf-microwave-design/awr-design-environment-platform.html [Son erişim tarihi: 11.07.2023].
- Anonymous 3: <https://tr.wikipedia.org/wiki/MATLAB> [Son erişim tarihi: 11.07.2023].
- Anonymous 4: <https://www.keysight.com/us/en/products/network-analyzers.html> [Son erişim tarihi: 11.07.2023].
- Ayop, O., Rahim, M.K.A., Murad, N.A., Samsuri, N.A., Zubir, F. and Majid, H.A. 2017. Dual-band metamaterial perfect absorber with nearly polarization-independent. *Applied Physics A*, 123: 1-7.
- Baena, J.D., Bonache, J., Martín, F., Sillero, R.M., Falcone, F., Lopetegui, T., ... and 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.
- Bakir, M., Karaaslan, M., Unal, E., Akgol, O. and Sabah, C. 2017. Microwave metamaterial absorber for sensing applications. *Opto-Electronics Review*, 25(4): 318-325.
- Bakir, M., Karaaslan, M., Akgol, O., Altintas, O., Unal, E. and Sabah, C. 2018. Sensory applications of resonator based metamaterial absorber. *Optik*, 168: 741-746.
- Başaran, S.C. and Erdemli, Y.E. 2008. Dual-band split-ring antenna design for WLAN applications. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 16(1): 79-86.
- Bhattacharyya, S. and Vaibhav Srivastava, K. 2014. Triple band polarization-independent ultra-thin metamaterial absorber using electric field-driven LC resonator. *Journal of Applied Physics*, 115(6): 064508.
- Bhattacharyya, S., Ghosh, S., Chaurasiya, D. and Srivastava, K.V. 2015. Bandwidth-enhanced dual-band dual-layer polarization-independent ultra-thin metamaterial absorber. *Applied Physics A*, 118: 207-215.

- Cao, Y., Ruan, C., Chen, K. and Zhang, X. 2022. Research on a high-sensitivity asymmetric metamaterial structure and its application as microwave sensor. *Scientific Reports*, 12(1): 1255.
- Chen, K., Adato, R. and Altug, H. 2012. Dual-band perfect absorber for multispectral plasmon-enhanced infrared spectroscopy. *ACS nano*, 6(9): 7998-8006.
- Chen, N., Pitchappa, P., Ho, C.P., Hasan, D., Kropelnicki, P., Alioto, M. and Lee, C. 2016. Polarization controllable multispectral symmetry-breaking absorber in mid-infrared. *Journal of Applied Physics*, 120(6): 063105.
- Cinar, A. and Basaran, S.C. 2022. Dual-Band X-Shaped Absorber Design for Sensor Applications. *Informacije MIDEM*, 52(3): 159-167.
- Dalgac, S., Bakır, M., Karadag, F., Karaaslan, M., Akgol, O., Unal, E. And Sabah, C. 2020. Microfluidic sensor applications by using chiral metamaterial. *Modern Physics Letters B*, 34(05): 2050031.
- Deng, G., Xia, T., Yang, J., and Yin, Z. 2018. Triple-band polarisation-independent metamaterial absorber at mm wave frequency band. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 12(7): 1120-1125.
- Deng, G., Lv, K., Sun, H., Yang, J., Yin, Z., Li, Y., Chi B. and Li, X. 2020. An ultrathin, triple-band metamaterial absorber with wide-incident-angle stability for conformal applications at X and Ku frequency band. *Nanoscale Research Letters*, 15: 1-10.
- Dewitt, B.T. and Burnside, W.D. 1988. Electromagnetic scattering by pyramidal and wedge absorber. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 36(7): 971-984.
- Duan, G., Schalch, J., Zhao, X., Li, A., Chen, C., Averitt, R.D. and Zhang, X. 2019. A survey of theoretical models for terahertz electromagnetic metamaterial absorbers. *Sensors and Actuators A: Physical*, 287: 21-28.
- El Mrabet, O. 2006. High frequency structure simulator (HFSS) tutorial. *IETR, UMR CNRS*, 6164: 2005-2006.
- Gholamian, M., Shabanpour, J. and Cheldavi, A. 2020. Highly sensitive quarter-mode spoof localized plasmonic resonator for dual-detection RF microfluidic chemical sensor. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53(14): 145401.
- Ghosh, S., Bhattacharyya, S., Chaurasiya, D. and Srivastava, K.V. 2015. Polarisation-insensitive and wide-angle multi-layer metamaterial absorber with variable bandwidths. *Electronics Letters*, 51(14): 1050-1052.
- Ghosh, S. and Srivastava, K.V. 2017a. Polarization-insensitive single-/dual-band tunable absorber with independent tuning in wide frequency range. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(9): 4903-4908.
- Ghosh, S. and Srivastava, K.V. 2017b. Polarization-insensitive dual-band switchable absorber with independent switching. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16: 1687-1690.

- Gülsu, M.S., Bağcı, F. and Akaoğlu, B. 2020. Bağlı Nem Oranını Algılamaya Yönelik Soğurucu Tabanlı Metamalzeme Sensör. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 8(3): 561-571.
- Guo, X.R., Zhang, Z., Wang, J.H. and Zhang, J.J. 2013. The design of a triple-band wide-angle metamaterial absorber based on regular pentagon close-ring. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 27(5): 629-637.
- Hakim, M.L., Alam, T., Almutairi, A.F., Mansor, M.F. Islam, M.T. 2021. Polarization insensitivity characterization of dual-band perfect metamaterial absorber for K band sensing applications. *Scientific reports*, 11(1): 1-14.
- Hakim, M.L., Alam, T., Soliman, M.S., Sahar, N.M., Baharuddin, M.H., Almalki, S.H. and Islam, M.T. 2022. Polarization insensitive symmetrical structured double negative (DNG) metamaterial absorber for Ku-band sensing applications. *Scientific reports*, 12(1): 1-18.
- Hoque, A., Tariqul Islam, M., Almutairi, A.F., Alam, T., Jit Singh, M. and Amin, N. 2018. A polarization independent quasi-TEM metamaterial absorber for X and Ku band sensing applications. *Sensors*, 18(12): 4209.
- Huang, J., Li, J.S., Xu, G. and Wei, Z. 2019. A microfluidic sensor based on meta-surface absorber for rapid and nondestructive identification of edible oil species. *Progress In Electromagnetics Research C*, 96: 153-163.
- Jha, K.R. and Singh, G. 2010. Analysis and design of rectangular microstrip antenna on two-layer substrate materials at terahertz frequency. *Journal of computational electronics*, 9: 68-78.
- Jha, K.R. and Singh, G. 2011. Analysis of narrow terahertz microstrip transmission-line on multilayered substrate. *Journal of computational electronics*, 10: 186-194.
- Ji, S., Jiang, C., Zhao, J., Yang, J., Wang, J., and Dai, H. 2019. An ultra-thin dual-band wide-angle polarization-insensitive metamaterial absorber with near-unity absorbance. *Current Applied Physics*, 19(11): 1164-1171.
- Karacan, N., Ekmekci, E. and Turhan-Sayan, G. 2020. Response to “Comment on ‘Sliding planar conjoined cut-wire-pairs: A novel approach for splitting and controlling the absorption spectra’”[J. Appl. Phys. 128, 126101 (2020)]. *Journal of Applied Physics*, 128(12): 126102.
- Kaur, M. and Singh, H.S. 2020. Design and analysis of a compact ultrathin polarization-and incident angle-independent triple band metamaterial absorber. *Microwave and optical technology letters*, 62(5): 1920-1929.
- Kim, H.K., Lee, D. And Lim, S. 2016. A fluidically tunable metasurface absorber for flexible large-scale wireless ethanol sensor applications. *Sensors*, 16(8): 1246.
- Kuek, C. 2012: Measurement of Dielectric Material Properties. Application Note. *Rohde & Schwarz*, 1-35.
- Landy, N.I., Sajuyigbe, S., Mock, J.J., Smith, D.R. and Padilla, W.J. 2008. Perfect metamaterial absorber. *Physical review letters*, 100(20): 207402.

- Lee, D., Kim, H.K. and Lim, S. 2017. Textile metamaterial absorber using screen printed chanel logo. *Microwave and Optical Technology Letters*, 59(6): 1424-1427.
- Li, H., Yuan, L.H., Zhou, B., Shen, X.P., Cheng, Q., and Cui, T.J. 2011. Ultrathin multiband gigahertz metamaterial absorbers. *Journal of Applied Physics*, 110(1): 014909.
- Micheli, D., Pastore, R., Apollo, C., Marchetti, M., Gradoni, G., Primiani, V.M. and Moglie, F. 2011. Broadband electromagnetic absorbers using carbon nanostructure-based composites. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 59(10), 2633-2646.
- Mishra, N., Kumari, K. and Chaudhary, R.K. 2019. A dual resonator-based polarisation-independent dual-band metamaterial absorber. *International Journal of Electronics Letters*, 7(3): 338-351.
- Neo, C.P. and Varadan, V.K. 2004. Optimization of carbon fiber composite for microwave absorber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 46(1): 102-106.
- Ozturk, Y. and Yilmaz, A.E. 2016. Multiband and perfect absorber with circular fishnet metamaterial and its variations. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 1445-1451.
- Park, K.Y., Han, J.H., Lee, S.B., Kim, J.B., Yi, J.W. and Lee, S.K. 2009. Fabrication and electromagnetic characteristics of microwave absorbers containing carbon nanofibers and NiFe particles. *Composites Science and Technology*, 69(7-8): 1271-1278.
- Pendry, J.B., Holden, A.J., Robbins, D.J. and Stewart, W.J. 1999. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 47(11): 2075-2084.
- Pozar D.M., 2012 "Microwave Resonators," in *Microwave Engineering*, 4th ed. Hoboken, United States of America: John Wiley & Sons, Inc., ch. 6, sec. 2, pp. 283.
- Saadeldin, A.S., Hameed, M.F.O., Elkaramany, E. M. and Obayya, S.S. 2019. Highly sensitive terahertz metamaterial sensor. *IEEE Sensors Journal*, 19(18): 7993-7999.
- Samad, A., Hu, W.D., Shahzad, W., Lighthart, L.P. and Raza, H. 2021. High-Precision Complementary Metamaterial Sensor Using Slotted Microstrip Transmission Line. *Journal of Sensors*, 2021: 1-13.
- Schurig, D., Mock, J.J. and Smith, D.R. 2006. Electric-field-coupled resonators for negative permittivity metamaterials. *Applied physics letters*, 88(4): 041109.
- Shater, A. and Zarifi, D. 2017. Radar cross section reduction of microstrip antenna using dual-band metamaterial absorber. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal (ACES)*, 135-140.
- Shelby, R.A., Smith, D.R., and Schultz, S. 2001. Experimental verification of a negative index of refraction. *Science*, 292(5514): 77-79.

- Shukoor, M.A., Kumar, V. and Dey, S. 2021. Compact polarisation insensitive wide angular stable triple band absorber for RF energy harvesting, RCS reduction, and sensor applications. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 31(9): e22763.
- Singh, G., Sheokand, H., Chaudhary, K., Srivastava, K.V., Ramkumar, J. and Ramakrishna, S.A. 2019. Fabrication of a non-wettable wearable textile-based metamaterial microwave absorber. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(38): 385304.
- Singh, G., Bhardwaj, A., Srivastava, K.V., Ramkumar, J. and Ramakrishna, S. A. 2021. Perforated lightweight microwave metamaterial broadband absorber with discontinuous ground plane. *Applied Physics A*, 127(11): 858.
- Sun, L., Cheng, H., Zhou, Y. and Wang, J. 2012. Broadband metamaterial absorber based on coupling resistive frequency selective surface. *Optics express*, 20(4): 4675-4680.
- Tak, J. and Choi, J. 2016. A wearable metamaterial microwave absorber. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16: 784-787.
- Tran, M.C. and Phuong, T.T.H. 2018. Two-layered dual-band perfect metamaterial absorber at K band frequency. *Advanced Electromagnetics*, 7(2): 25-27.
- Turkmen, O., Ekmekci, E., and Turhan-Sayan, G. 2012. Nested U-ring resonators: a novel multi-band metamaterial design in microwave region. *IET microwaves, antennas & propagation*, 6(10): 1102-1108.
- Wang, B.X., Wang, G.Z. and Sang, T. 2016. Simple design of novel triple-band terahertz metamaterial absorber for sensing application. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49(16): 165307.
- Wang, B.X. 2016. Quad-band terahertz metamaterial absorber based on the combining of the dipole and quadrupole resonances of two SRRs. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 23(4): 1-7.
- Wanghuang, T., Chen, W., Huang, Y. and Wen, G. 2013. Analysis of metamaterial absorber in normal and oblique incidence by using interference theory. *Aip Advances*, 3(10): 102118.
- Wei, Z., Huang, J., Li, J., Xu, G., Ju, Z., Liu, X. and Ni, X. 2018. A high-sensitivity microfluidic sensor based on a substrate integrated waveguide re-entrant cavity for complex permittivity measurement of liquids. *Sensors*, 18(11): 4005.
- Xu, W. and Sonkusale, S. 2013. Microwave diode switchable metamaterial reflector/absorber. *Applied Physics Letters*, 103(3): 031902.
- Xu, J., Wang, J., Yang, R., Tian, J., Chen, X. and Zhang, W. 2018. Frequency-tunable metamaterial absorber with three bands. *Optik*, 172: 1057-1063.
- Veselago, V.G. 1967. Electrodynamics of substances with simultaneously negative ϵ and μ . *Usp. fiz. nauk*, 92(7): 517.
- Yang, Y., Wang, J., Song, C., Pei, R., Purushothama, J.M. and Zhang, Y. 2022. Electromagnetic shielding using flexible embroidery metamaterial absorbers: Design, analysis and experiments. *Materials & Design*, 222: 111079.

- Yoo, M., Kim, H.K. and Lim, S. 2016. Electromagnetic-based ethanol chemical sensor using metamaterial absorber. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 222: 173-180.
- Yuan, H., Zhu, B.O. and Feng, Y. 2015. A frequency and bandwidth tunable metamaterial absorber in x-band. *Journal of applied physics*, 117(17): 173103.
- Zhai, H., Li, Z., Li, L. and Liang, C. 2013. A dual-band wide-angle polarization-insensitive ultrathin gigahertz metamaterial absorber. *Microwave and Optical Technology Letters*, 55(7): 1606-1609.
- Zhang, Y., Li, T., Chen, Q., Zhang, H., O'Hara, J.F., Abele, E., Taylor A.J., Chen H.T and Azad, A.K. 2015. Independently tunable dual-band perfect absorber based on graphene at mid-infrared frequencies. *Scientific reports*, 5(1): 18463.
- Zhao, J., Cheng, Q., Chen, J., Qi, M.Q., Jiang, W.X. and Cui, T.J. 2013. A tunable metamaterial absorber using varactor diodes. *New Journal of Physics*, 15(4): 043049.
- Zheng, D., Cheng, Y., Cheng, D., Nie, Y. and Gong, R.Z. 2013. Four-band polarization-insensitive metamaterial absorber based on flower-shaped structures. *Progress In Electromagnetics Research*, 142: 221-229.
- Zeng, X., Zhang, L., Wan, G. and Gao, M. 2017. Active metamaterial absorber with controllable polarisation and frequency. *Electronics Letters*, 53(16): 1085-1086.
- Zhu, J., Li, D., Yan, S., Cai, Y., Liu, Q.H. and Lin, T. 2015. Tunable microwave metamaterial absorbers using varactor-loaded split loops. *Europhysics Letters*, 112(5): 54002.
- Zhu, W., Huang, Y., Rukhlenko, I.D., Wen, G. and Premaratne, M. 2012. Configurable metamaterial absorber with pseudo wideband spectrum. *Optics Express*, 20(6): 6616-6621.

ÖZGEÇMİŞ

ALPARSLAN ÇINAR

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora	Akdeniz Üniversitesi
2017-2023	Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans	Süleyman Demirel Üniversitesi
2015-2016	Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta
Lisans	Süleyman Demirel Üniversitesi
2010-2014	Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Isparta
Lise	Kumluca Anadolu Lisesi
2006-2010	Fen Bilimleri Kumluca, Antalya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Öğretim Görevlisi	Akdeniz Üniversitesi
2017-Devam Ediyor	Elmalı Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Antalya

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

- 1- Al-Badri K.S.L., **Cinar A.**, Kose U., Ertan O., Ekmekci E., (2016). Monochromatic Tuning of Absorption Strength Based on Angle-Dependent Closed-Ring Resonator-Type Metamaterial Absorber. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 16, 1060-1063. Doi: 10.1109/LAWP.2016.2620599. (SCI-Expanded)
- 2- Ekmekci E., Kose U., **Cinar A.**, Ertan O., Ekmekci Z., (2019). The use of metamaterial type double-sided resonator structures in humidity and concentration sensing applications. Sensors and Actuators A: Physical, 297, 111559. Doi: 10.1016/j.sna.2019.111559. (SCI-Expanded)
- 3- Kucukoner E.M., **Cinar A.**, Kose U., Ekmekci E., (2021). Electrical Size Reduction of Microstrip Antennas by Using Defected Ground Structures Composed of Complementary Split Ring Resonator. Advanced Electromagnetics, 10(1), 62-69. Doi: 10.7716/aem.v10i1.1556. (ESCI)
- 4- **Cinar A.**, Basaran S.C., (2022). Dual-Band X-Shaped Absorber Design For Sensor Applications. Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials, 52(3), 159. Doi: 10.33180/InfMIDEM2022.302. (SCI-Expanded)

Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

- 1- **Cinar A.**, Bicer S., (2020). Band-stop filter design based on split ring resonators loaded on the microstrip transmission line for GSM-900 and 2.4 GHz ISM band. International Advanced Researches and Engineering Journal, 4(1), 29-33. Doi: 10.35860/iarej.641459. (TR Dizin)
- 2- **Cinar A.**, Basaran S.C., (2021). Dual-Band Frequency Absorber Based on Split-Ring Resonators for WiMAX and WLAN Bands. European Journal of Science and Technology, 26, 151-154. Doi: 10.31590/ejosat.946574.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- 1- Ekmekci E., **Cinar 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. (Tam Metin Bildiri)
- 2- Ertan O., Kose U., **Cinar A.**, Ekmekci E., (2016). Sensitivity Analysis of Different Resonator Structure for Sensor Applications in Microwave Region. National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO). (Tam Metin Bildiri)
- 3- **Cinar A.**, Kose U., Ertan O., Karacan N., Baser C., Ekmekci E., (2016). Ayrık Halkalı Rezonatör Tabanlı Bağlaşım Değeri Ayarlanabilir Mikroşerit Yönlü Bağlaç Tasarımı ve Benzetimleri. 8. URSI-Türkiye Bilimsel Kongresi (Tam Metin Bildiri)

4- **Cinar A.**, Ekmekci E., (2016). Ayırık Halkalı Rezonatör Tabanlı Dönme Sensörü Tasarımı ve Nümerik Olarak İncelenmesi. 8. URSI-Türkiye Bilimsel Kongresi (Tam Metin Bildiri)

5- **Cinar A.**, Basaran S.C., (2018). A Compact Dual-Band Textile Antenna Design For Wearable Applications. 3rd International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2018). (Tam Metin Bildiri)

6- **Cinar A.**, Gunes G., Basaran S.C., (2018). CPW-Fed UWB Textile Antenna Design For Wearable Applications. 3rd International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2018). (Tam Metin Bildiri)

7- **Cinar A.**, Bicer S., (2018). Mikrodalga Bölgesinde Enerji Hasadı İçin Elektrik-LC Tabanlı Rezonatör Tasarımı. National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO). (Tam Metin Bildiri)

