

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

**REZONATÖR YAPILARLA OLUŞTURULMUŞ DÜZLEMSEL
SOĞURUCU YÜZEYLERDE SOĞURMA MEKANİZMASININ
DİELEKTRİK MALZEME ÖZELLİĞİNE GÖRE İNCELENMESİ**

Umut KÖSE

**Danışman
Doç. Dr. Evren EKMEKÇİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2019**



© 2019 [Umut KÖSE]

TEZ ONAYI

Umut KÖSE tarafından hazırlanan "Rezonatör Yapılarla Oluşturulmuş Düzlemsel Soğurucu Yüzeylerde Soğurma Mekanizmasının Dielektrik Malzeme Özelliğine Göre İncelenmesi" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Doç. Dr. Evren EKMEKÇİ
Süleyman Demirel Üniversitesi



Jüri Üyesi

Doç. Dr. Özlem COŞKUN
Süleyman Demirel Üniversitesi



Jüri Üyesi

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN
Akdeniz Üniversitesi



Enstitü Müdürü

Doç. Dr. Şule Sultan UĞUR



TAAHHÜTNAME

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

Umut KÖSE



İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK BİLGİLER VE KAYNAK ÖZETLERİ	7
2.1. Soğurma Teorisi	7
2.1.1. Empedans uyumlandırma teorisi	13
2.1.2. Girişim teorisi.....	14
2.1.3. İletim hattı teorisi.....	17
2.2. Metamalzeme Tabanlı Rezonatörler İle Tasarlanan Soğurucu Yapıları	19
2.2.1. Dielektrik malzeme özelliklerinin soğurma oranına etkisi.....	22
2.2.1.1. Dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisi.....	23
2.2.1.2. Dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi	26
3. METAMALZEME TABANLI REZONATÖRLER İLE SOĞURUCU TASARIMI, ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU.....	31
3.1. Soğurucu Tasarımı.....	31
3.2. Metamalzeme Tabanlı Soğurucu Üretimi	38
3.3. Metamalzeme Tabanlı Soğurucu Karakterizasyonu.....	38
3.3.1. Benzetim düzeneği	39
3.3.2. Deney düzeneği.....	41
4. ARAŞTIRMA BULGULARI: METAMALZEME TABANLI REZONATÖRLERİN SOĞURMA MEKANİZMASININ İNCELENMESİ	42
4.1. S-Bantta Çalışan Soğurucular	42
4.1.1. KHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı	42
4.1.1.1. Dielektrik malzemenin göreceli elektriksel geçirgenliğinin (ϵ_r) soğurma oranına etkisi.....	47
4.1.1.2. Dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisi	48
4.1.1.3. Dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi.....	52
4.1.2. AHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı	56
4.1.2.1. Dielektrik malzemenin göreceli elektriksel geçirgenliğinin (ϵ_r) soğurma oranına etkisi.....	60

4.1.2.2. Dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisi	61
4.1.2.3. Dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi.....	65
4.2. X-Bantta Çalışan Soğurucular.....	68
4.2.1. KHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzemenin göreceli elektriksel geçirgenliğinin (ϵ_r) soğurma oranına etkisi	69
4.2.2. KHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzeme kalınlığının soğurma etkisi	70
4.2.3. KHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi.....	71
4.2.4. AHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzemenin göreceli elektriksel geçirgenliğinin (ϵ_r) soğurma oranına etkisi	75
4.2.5. AHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisi	76
4.2.6. AHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzeme kaybının soğurma etkisi.....	77
4.3. Tasarlanan Soğurucu yapılarının Terahertz bölgesine ölçeklenmesi	81
4.3.1. KHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzemenin göreceli elektriksel geçirgenliğinin (ϵ_r) soğurma oranına etkisi	81
4.3.2. KHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisi	83
4.3.3. KHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi.....	84
4.3.4. AHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzemenin göreceli elektriksel geçirgenliğinin (ϵ_r) soğurma oranına etkisi	88
4.3.5. AHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisi	89
4.3.6. AHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi.....	90
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	94
KAYNAKLAR	97
ÖZGEÇMİŞ.....	103

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

REZONATÖR YAPILARLA OLUŞTURULMUŞ DÜZLEMSEL SOĞURUCU YÜZEYLERDE SOĞURMA MEKANİZMASININ DİELEKTRİK MALZEME ÖZELLİĞİNE GÖRE İNCELENMESİ

Umut KÖSE

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Evren EKMEKÇİ

Günümüzde rezonatör tabanlı soğurucu tasarımı popüler bir araştırma konusudur. Askeri ve sivil alanlarda olmak üzere çeşitli soğurucu uygulamaları literatürde yer almaktadır. Bu uygulamaların pek çoğunda soğurma oranı önemli bir yere sahiptir. Bu kapsamda mükemmel soğurucu tasarımlarından literatürde sıklıkla bahsedilmektedir. Bu çalışmalarda soğurucu yapılarının topolojileri ve geometrik parametreleri ayarlanarak maksimum seviyede soğurma elde edilmeye çalışılmaktadır. Bunun yanında literatürde dielektrik malzeme özellikleri değiştirilerek de soğurma oranının artırılmaya çalışıldığı çalışmalar yer almaktadır.

Güncel literatüre göre, dielektrik malzeme kayıplarının soğurma oranına etkileri konusunda ortak bir vargı bulunmamaktadır. Bazı çalışmalarda dielektrik kayıpların artırılmasının soğurma oranını arttırdığı öne sürülürken, bazı çalışmalarda herhangi bir değişiklik olmadığı belirtilmekte, bazılarında ise soğurma oranını azalttığı ifade edilmektedir. Dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi konusundaki belirsizlik, dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisi konusunda da bulunmaktadır. Dielektrik malzeme kalınlığının arttırılmasının kimi çalışmalarda soğurma oranını azalttığı görülürken, kimi çalışmalarda ise soğurma oranını arttırdığı görülmektedir.

Bu tez kapsamında dielektrik malzeme kayıplarının ve kalınlığının soğurma oranına olan etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçların, soğurucu çalışma frekansına ve rezonatör tipine bağlı olmadığını göstermek amacıyla S-bant, X-bant ve Terahertz bölgelerinde olmak üzere üç farklı frekans bölgesinde, metamalzeme tabanlı soğurucu olarak kapalı halka rezonatör (KHR) ve ayrık halka rezonatörleri (AHR) tasarlanmıştır. Çalışma frekansında KHR'de dipol rezonans görülürken, AHR'de LC rezonans görülmektedir.

Elde edilen bulgular sonucunda, dielektrik malzeme kalınlığının arttırılmasının, soğurucu yapısı ile serbest uzay arasında empedans uyumu sağlandığı noktaya kadar soğurma oranını arttırdığı görülmektedir. Bu noktadan sonra tüm frekans bantlarında ve tüm rezonatör yapıları için soğurma oranını azalmaktadır.

Benzetim sonuçları deneysel sonuçlarla desteklenmektedir. Benzer şekilde dielektrik malzeme kayıplarının artırılması ile soğurma oranının maksimum olduğu noktaya kadar arttığı, bu noktadan sonra azaldığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Metamalzeme, rezonatör, rezonatör tabanlı soğurucu.

2019, 104 sayfa



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF ABSORPTION MECHANISM ACCORDING TO DIELECTRIC MATERIAL PROPERTIES IN PLANAR ABSORBER SURFACES COMPOSED OF RESONATOR STRUCTURES

Umut KÖSE

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Evren EKMEKÇİ

Nowadays, resonator-based absorber design is a popular research topic. Various absorber applications including military and non-military are found in the literature. The absorption has an important place in the most of these applications. In this context, perfect absorber designs are frequently mentioned in the literature. In these studies, topologies and geometric parameters of absorber structures are adjusted and tried to obtain maximum absorption. In addition, there are studies in which the absorption is increased by adjusting the dielectric material properties in the literature.

According to the current literature, there is no consensus on the effects of the dielectric material losses on the absorption. According to some studies increasing the dielectric losses increases the absorption, some studies say that it doesn't affect the absorption and others demonstrate that it reduces the absorption. The uncertainty about the effect of dielectric material loss on the absorption is also related to the effect of dielectric thickness on the absorption. It is seen that although increasing the dielectric material thickness decreases the absorption in some studies, it increases the absorption in other studies.

In this thesis, the effects of dielectric material losses and thickness on the absorption are investigated. In order to show that the obtained results do not depend on the absorber operating frequency and resonator type; absorbers based on metamaterial, which are closed ring resonator (CRR) and split ring resonator (SRR), have designed in three different frequency regions in which S-band, X-band and Terahertz region. In the operating frequency, while dipole resonance is observed in CRR, *LC* resonance is observed in SRR.

The results show that increasing the dielectric material thickness increased the absorption up to the point of impedance matching between the absorber and the free space. After this point it decreased absorption at all frequency bands and all resonator structures. Simulation results are supported by experiments. Similarly, it is observed that increasing the dielectric material losses increased the

absorption up to the point where the absorption is maximum, after this point it reduced the absorption.

Keywords: Metamaterial, resonator, resonator-based absorber.

2019, 104 pages



TEŞEKKÜR

Akademiye, öğrenmeyi, öğretmeyi bana sevdiren, bu meslek adına hemen hemen her şeyi kendisinden öğrendiğim, ayrıca gerçekleştirmiş olduğum bu çalışmada beni yönlendiren, bir sorun ile karşılaştığımda bana yardımcı olan ve yaklaşık yedi yıldır kendisiyle çalışmaktan büyük onur ve keyif aldığım, her gün ilk günmüş gibi kendisinden yeni bir şeyler öğrenmeye devam ettiğim kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Evren EKMEKÇİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Lisansüstü tez çalışmalarımın haricinde 113E632 numaralı proje kapsamında bana bursiyer öğrenci olarak çalışma imkânı sağlayan ve burs desteği sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Proje esnasında kendileriyle birçok kez laboratuvarında sabahladığımız, uykusuz kaldığımız fakat karşılığını aldığımız, bana her anlamda yardımlarını esirgemeyen dostlarım Alparslan ÇINAR ve Özgür ERTAN'a teşekkür ederim. Ayrıca yine laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Nezihe KARACAN ve Elif Merve KÜÇÜKÖNER'e teşekkür ederim.

Tezimi yazarken beni destekleyen, çalışmaya motive eden mesai arkadaşlarım, dostlarım Sezer ÖZTÜRK ve Güner TATAR'a teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca benim maddi ve manevi olarak yalnız bırakmayan, yapmış olduğum iyi ve kötü her davranışta arkamda olan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Umut KÖSE
ISPARTA, 2019

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Mükemmel soğurucu için iletim, yansıma ve soğurma oranları.	3
Şekil 2.1. Tasarlanan bir metamalzeme soğurucu için; a) elektriksel geçirgenlik, b) manyetik geçirgenlik, c) empedans değeri, d) iletim, yansıma ve soğurma oranları.	14
Şekil 2.2. Metamalzeme soğurucu modeli için çoklu yansıma (Chen, 2011).....	15
Şekil 2.3. Metamalzeme soğurucular için eşdeğer devre modeli (Bagci ve Medina, 2017; Costa vd., 2013; Li vd., 2013; Pang vd., 2011).....	17
Şekil 2.4. Farklı geometrilerde tasarlanmış; a) kare ayırık halka, b) çoklu kare ayırık halka, c) dairesel ayırık halka, d) çoklu dairesel ayırık halka, e) elektrik LC, f) spiral metamalzeme rezonatör yapıları.	20
Şekil 2.5. Tasarlanan bir rezonatör yapısı için a) sadece elektrik uyarım, b) sadece manyetik uyarım, c) hem elektrik hem de manyetik uyarım, d) uyarım yok (Gay-Balmaz ve Martin, 2002; Katsarakis vd., 2004; Ekmekci ve Averitt, 2010).....	21
Şekil 3.1. Sandviç tipi soğurucuların genel bir şematik görünümü.....	32
Şekil 3.2. S-bantta tasarlanan KHR yapısının tasarım parametreleri ve ön yüzden şematik görünümü.	33
Şekil 3.3. S-bantta üretilen tüm KHR yapılarının a) üstten çekilmiş fotoğrafı, b) yandan çekilmiş fotoğrafı.	34
Şekil 3.4. S-bantta tasarlanan AHR yapısının tasarım parametreleri ve ön yüzden şematik görünümü.	35
Şekil 3.5. S-bant için üretilen tüm AHR yapılarının a) üstten çekilmiş fotoğrafı, b) yandan çekilmiş fotoğrafı.	36
Şekil 3.6. X-bantta tasarlanan a) KHR, b) AHR yapısının tasarım parametreleri ve ön yüzden şematik görünümü.	37
Şekil 3.7. Terahertz bölgesinde tasarlanan a) KHR ve b) AHR birim hücrelerinin tasarım parametreleri ve ön yüzden şematik görünümleri.....	38
Şekil 3.8. a) Dikdörtgen dalga kılavuzu, b) birim hücre sınır koşulları kullanılarak elde edilen benzetim düzeneklerinin şematik görünümü.	40
Şekil 3.9. a) S-bant dikdörtgen dalga kılavuzu, b) Agilent FieldFox N9926A el tipi vektör ağ çözümleyici.	41
Şekil 4.1. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısının rezonans frekansında (2,877 GHz) yansıma, iletim ve soğurma oranları.....	43
Şekil 4.2. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için elektrik alan dağılımının z bileşeni a) halka üzerinde, b) toprak düzlemde.	44
Şekil 4.3. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için yüzey akım dağılımı a) halka üzerinde, b) toprak düzlemde.	45
Şekil 4.4. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısına ait dielektrik ve metalik kayıp değerleri.....	46
Şekil 4.5. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için a) kayıp güç yoğunluğu, b) yüzey kayıp güç yoğunluğu.	46
Şekil 4.6. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.....	48

Şekil 4.7. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.....	49
Şekil 4.8. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinin soğurma oranına etkisinin deneysel sonuçları.....	50
Şekil 4.9. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için a) benzetim ortamında, b) deneysel olarak elde edilen veriler ışığında dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına ve rezonans frekansına etkisi.....	51
Şekil 4.10. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 0,762 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.	53
Şekil 4.11. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,016 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.	54
Şekil 4.12. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,524 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.	55
Şekil 4.13. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısının rezonans frekansında (3,038 GHz) yansıma, iletim ve soğurma oranları.	56
Şekil 4.14. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için elektrik alan dağılımının z bileşeni a) ayırık halka üzerinde, b) toprak düzlemde.	57
Şekil 4.15. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için yüzey akım dağılımı a) ayırık halka üzerinde, b) toprak düzlemde.	58
Şekil 4.16. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısına ait dielektrik ve metalik kayıp değerleri.	59
Şekil 4.17. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için a) kayıp güç yoğunluğu, b) yüzey kayıp güç yoğunluğu.	59
Şekil 4.18. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.....	61
Şekil 4.19. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.....	62
Şekil 4.20. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinin soğurma oranına etkisinin deneysel sonuçları.....	63
Şekil 4.21. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için a) benzetim ortamında, b) deneysel olarak elde edilen veriler ışığında dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına ve rezonans frekansına etkisi.	64
Şekil 4.22. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,016 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.	66
Şekil 4.23. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,524 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.	67
Şekil 4.24. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 2,54 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.	68
Şekil 4.25. X-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.....	70

Şekil 4.26. X-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.....	71
Şekil 4.27. X-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 0,762 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları	72
Şekil 4.28. X-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,016 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.	73
Şekil 4.29. X-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,524 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.	74
Şekil 4.30. X-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.....	75
Şekil 4.31. X-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.....	77
Şekil 4.32. X-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 0,762 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.	78
Şekil 4.33. X-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,016 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.	79
Şekil 4.34. X-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,524 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.	80
Şekil 4.35. THz bölgesinde, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.	82
Şekil 4.36. THz bölgesinde, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.	84
Şekil 4.37. THz bölgesinde, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 7 μm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.	85
Şekil 4.38. THz bölgesinde, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 10 μm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.	86
Şekil 4.39. THz bölgesinde, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 13 μm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.	87
Şekil 4.40. THz bölgesinde, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.	88
Şekil 4.41. THz bölgesinde, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.	90
Şekil 4.42. THz bölgesinde, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 13 μm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.	91

Şekil 4.43. THz bölgesinde, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 19 μm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.	92
Şekil 4.44. THz bölgesinde, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 25 μm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.	93



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. WR284 ve WR90 içi hava dolu dalga kılavuzları için boyut ve frekans bilgileri (Millimeter Wave Products Inc., 1989).....	40
Çizelge 4.1. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.	47
Çizelge 4.2. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.	48
Çizelge 4.3. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinde, deneysel olarak elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.	50
Çizelge 4.4. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 0,762 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.....	53
Çizelge 4.5. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,016 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.....	54
Çizelge 4.6. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,524 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.....	55
Çizelge 4.7. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.	60
Çizelge 4.8. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.	61
Çizelge 4.9. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinde, deneysel olarak elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.	63
Çizelge 4.10. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,016 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.....	65
Çizelge 4.11. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,524 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.....	66
Çizelge 4.12. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 2,54 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.....	67

Çizelge 4.13. X-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.	69
Çizelge 4.14. X-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.	70
Çizelge 4.15. X-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 0,762 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.....	72
Çizelge 4.16. X-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,016 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.....	73
Çizelge 4.17. X-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,524 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.....	74
Çizelge 4.18. X-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.	75
Çizelge 4.19. X-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.	76
Çizelge 4.20. X-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 0,762 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.....	77
Çizelge 4.21. X-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,016 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.....	79
Çizelge 4.22. X-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,524 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.....	80
Çizelge 4.23. THz bölgesinde, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları. ..	82
Çizelge 4.24. THz bölgesinde, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları. ..	83
Çizelge 4.25. THz bölgesinde, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 7 μm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.....	85
Çizelge 4.26. THz bölgesinde, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 10 μm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim	

ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.....	86
Çizelge 4.27. THz bölgesinde, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 13 μm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.....	87
Çizelge 4.28. THz bölgesinde, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları ..	88
Çizelge 4.29. THz bölgesinde, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları	89
Çizelge 4.30. THz bölgesinde, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 13 μm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.....	91
Çizelge 4.31. THz bölgesinde, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 19 μm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.....	92
Çizelge 4.32. THz bölgesinde, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 25 μm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.....	93

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$A(\omega)$	Soğurma oranı
AHR	Ayrık halka rezonatörü
\bar{B}	Manyetik akı yoğunluğu
C	Kapasitans
c	Serbest uzay ışık hızı
d_{diel}	Dielektrik malzeme kalınlığı
\bar{E}	Elektrik alan şiddeti
f	Dalga frekansı
F_e	Elektrik salınım şiddeti
F_m	Manyetik salınım şiddeti
g	Ayrık halka rezonatörü için halkanın ayrığı
GHz	Gigahertz
\bar{H}	Manyetik alan şiddeti
\bar{k}	Dalğanın yayılma vektörü
k	Dalga numarası
KHR	Kapalı halka rezonatörü
L	Endüktans
L_h	Ayrık halka rezonatörü için halkanın yatay boyutu
L_h	Kapalı halka rezonatörü için halkanın yatay boyutu
L_v	Ayrık halka rezonatörü için halkanın dikey boyutu
L_v	Kapalı halka rezonatörü için halkanın dikey boyutu
MWS	Microwave studio
n	Kırılma indisi
P_{abs}	Güç yoğunluğu
PEC	Mükemmel elektrik iletken
P_h	Yatay yönde dielektrik malzeme boyutu
P_v	Dikey yönde dielektrik malzeme boyutu
Q	Kalite faktörü
$R(\omega)$	Yansıma oranı
$\tilde{r}(\omega)$	Yansıma katsayısı
SRR	Ayrık halka rezonatör
$ S_{11} ^2$	Birinci kapıdan yansıyan güç miktarı
$ S_{12} ^2$	İkinci kapıdan birinci kapıya iletilen güç miktarı
$ S_{21} ^2$	Birinci kapıdan ikinci kapıya iletilen güç miktarı
$ S_{22} ^2$	İkinci kapıdan yansıyan güç miktarı
t	Metal kalınlığı
$\tilde{t}(\omega)$	İletim katsayısı
$T(\omega)$	İletim oranı
$\tan\delta$	Dielektrik malzemenin kayıp tanjant değeri
TE	Enine elektrik
THz	Terahertz
TM	Enine manyetik
TRL	Thru-Reflect-Line
w	Ayrık halka rezonatörü için halkanın kalınlığı
w	Kapalı halka rezonatörü için halkanın kalınlığı
Z_0	Serbest uzay dalga empedansı
$\tilde{Z}(\omega)$	Karmaşık normalize empedans

γ	Sönümlenme
ϵ_r	Dielektrik malzemenin göreceli dielektrik sabiti
$\tilde{\epsilon}_r(\omega)$	Karmaşık elektriksel geçirgenlik
$\tilde{\mu}_r(\omega)$	Karmaşık manyetik geçirgenlik
$\tilde{\beta}$	İlerleyen dalganın karmaşık yayılım fazı
ϵ_0	Serbest uzay elektriksel geçirgenliği
μ_0	Serbest uzay manyetik geçirgenliği
σ_{cu}	Bakır plaketaletkenliği
θ	Dalganın geliş açısı
λ	Dalga boyu
ω	Açısal frekans



1. GİRİŞ

Landy ve arkadaşlarının ilk olarak 2008 yılında literatüre kazandırdıkları ve mikrodalga bölgesinde çalışan mükemmel metamalzeme soğurucu çalışması ile ilgili çalışmalar popüler bir araştırma konusu hale gelmiştir (Landy vd. 2008). Mükemmel soğurucu ortam denildiğinde; gelen elektromanyetik dalganın diğer ortama geçmediği aynı zamanda geriye yansımadağı düşünölmelidir. Soğurucu yüzeyler gelen elektromanyetik dalgayı ısı ya da türevlerine dönüştüren yapılardır. Soğurucu yüzeyler ile ilgili çalışmalar günümüzde; mikrodalga (Schurig vd., 2006; Landy vd., 2008; Luo vd., 2011; Watts vd., 2012; Zhong vd., 2012; Cheng vd., 2013; M. H. Li vd., 2013; Nie vd., 2013; Tuong vd., 2013; Wanghuang vd., 2013; Ra'di vd., 2015; Xiong vd., 2016; Ekmekci ve Demir, 2016; Al-Badri vd., 2017; Kim vd., 2017; Bagci ve Medina, 2017; Köse ve Ekmekçi, 2018) , Terahertz (T. Li vd., 2006; Q. Y. Wen vd., 2009; Landy vd., 2009; Ye vd., 2010; Chen 2012; Shen vd., 2012; Watts vd., 2012; F. Hu vd., 2013; F. Hu vd., 2013; Ra'di vd., 2015; An vd., 2016; Astorino vd., 2017b, 2017a; Pan vd., 2017; Cardin vd., 2018; Tao vd., 2008), görünür bölge (Aydin vd., 2011; Wang vd., 2012; Watts vd., 2012) ve kızıl ötesi (Avitzour vd., 2009; Liu vd., 2010) frekans bölgelerini içinde bulunduran geniş bir spektrumda gerçekleştirilmektedir.

Soğurucularla ilgili; gelen elektromanyetik dalganın geliş açısına bağımlı (Liao ve Zhao, 2016), gelen elektromanyetik dalganın geliş açısından bağımsız (Landy vd., 2009; Ye vd., 2010; Aydin vd., 2011; Shen vd., 2011; F. Hu vd., 2013; Bagci ve Medina, 2017), tek frekansta (Landy vd., 2008; Tao vd., 2008; Watts vd., 2012; Zhong vd., 2012; Chen 2012; Costa vd., 2013; Tuong vd., 2013; Wanghuang vd., 2013; Ekmekci ve Demir, 2016; Liao ve Zhao, 2016; Al-Badri vd., 2017; Cardin vd., 2018; Duan vd., 2018), çift ya da daha çoklu frekanslarda çalışan (Q. Y. Wen vd., 2009; Shen vd., 2011; Zhong vd., 2012; M. H. Li vd., 2013; F. Hu vd., 2013; Xiong vd., 2016; Astorino vd., 2017b; Bagci ve Medina, 2017; Kim vd., 2017), geniş bantlı (Wang vd., 2012; Watts vd., Padilla 2012; Nie vd., 2013; An vd., 2016; Liao ve Zhao, 2016; Astorino vd., 2017a), dar bantlı bir soğurma elde eden (Mattiucci vd., 2012; Watts vd., 2012; F. Hu vd., 2013; Astorino vd., 2017b) pek çok uygulama

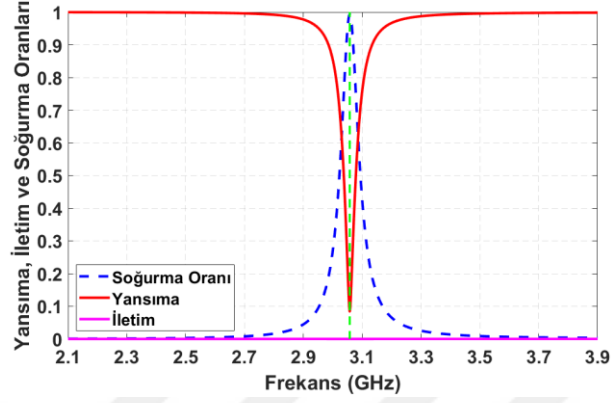
literatürde mevcuttur. Metamalzeme tabanlı soğurucular soğurma miktarının, soğurma bant genişliğinin, soğurma frekansının ayarlanabilir olması ve çok düşük kalınlıklara sahip olabilmeleri gibi özelliklerden dolayı; balometre, spektral görüntüleme, güneş pili, foto detektör, sensörler, radar kesit alanı azaltma, antenlerde yan lob azaltma, enerji hasadı gibi farklı askeri ve sivil uygulamalarda kullanılabilir (Watts vd. 2012).

Son zamanlarda tamamı metal (Mattiucci vd., 2012; Gong vd., 2017) veya tamamı dielektrik (Cardin vd., 2018) malzemeden oluşan soğurucu yapı tasarımları popüler çalışma konuları olmalarına rağmen, yaygın olarak literatürde metamalzeme soğurucu tasarımı; metal rezonatör katman, dielektrik katman ve metal toprak düzlemi olmak üzere üç farklı katmandan oluşmaktadır (Engheta, 2002; Landy vd., 2008; Tao vd., 2008; Q. Y. Wen vd., 2009; Hao vd., 2010; Liu vd., 2010; Ye vd., 2010; Luo vd., 2011; Shen vd., 2011; Chen, 2012; Mattiucci vd., 2012; Shen vd., 2012; Watts vd., 2012; Zhong vd., 2012; Cheng vd., 2013; F. Hu vd., 2013; M. H. Li vd., 2013; Nie vd., 2013; Tuong vd., 2013; Wanghuang vd., 2013; Kocer vd., 2015; An vd., 2016; Ekmekci ve Demir, 2016; D. Hu vd., 2016; Liao ve Zhao, 2016; Xiong vd., 2016; Al-Badri vd., 2017; Astorino vd., 2017a; Bagci ve Medina, 2017; Gong vd., 2017; Kim vd., 2017; Pan vd., 2017; Duan vd., 2018; Köse ve Ekmekçi, 2018).

Gelen elektromanyetik dalganın soğurucu üzerinde soğrulması için temel şart, gelen dalganın elektrik ve manyetik alanlarıyla, soğurucunun bağlaşım yapmasıdır (Landy vd., 2008). Soğurma karakteristikleri genellikle literatürde; soğurma oranı $A(\omega)$, iletim $T(\omega)$ ve yansıma oranı ise $R(\omega)$ ile ifade edilmektedir. Burada soğurma oranı; $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$ eşitliği ile hesaplanmaktadır. Bu eşitlikten de anlaşılacağı üzere maksimum seviyede soğurma elde etmek için yansıma ve iletim değerlerinin olabildiğince küçük olması gerekmektedir (Landy vd., 2009).

Soğurucu tasarımlarında gelen elektromanyetik dalganın diğer yüzeye geçmesini önlemek amacıyla soğurucu yapısının taban yüzeyi genellikle tamamen metal ile kaplanmaktadır. Böylelikle yukarıdaki denklemde bulunan iletim $T(\omega)$ ifadesi

sıfır olmaktadır. Toprak yüzeyi tamamıyla metal kaplı dar bantlı bir mükemmel soğurucu için yansımaya, iletim ve soğurma oranları Şekil 1.1’de gösterilmektedir. Burada yansımaya ve iletim değerleri minimum olduğu frekansta soğurma oranının maksimum olduğu görülmektedir.



Şekil 1.1. Mükemmel soğurucu için iletim, yansımaya ve soğurma oranları.

Soğurma oranını hesapladığımız denklemde bulunan yansımaya $R(\omega)$ ifadesinin minimum seviyede olmasını sağlamak amacıyla literatürde genellikle soğurucu yapısının empedansı serbest uzay empedansı ile uyumlu hale getirilmeye çalışılmaktadır. Soğurucu tasarımlarında metamalzemeler kullanılarak kolay bir şekilde serbest uzay ile soğurucu yapısı arasında empedans uyumu sağlanmaktadır (Landy vd., 2008; Avitzour vd., 2009; Luo vd., 2011; Shen vd., 2011; Chen, 2012; Wang vd., 2012; Watts vd., 2012; Zhong vd., 2012; Cheng vd., 2013; Costa vd., 2013; F. Hu vd., 2013; M. H. Li vd., 2013; Nie vd., 2013; Tuong vd., 2013; Wanghuang vd., 2013; Ra’di vd., 2015; Astorino vd., 2017b; Kim vd., 2017; Köse ve Ekmekçi, 2018). Metamalzemeler karmaşık elektriksel $\tilde{\epsilon}_r(\omega) = \epsilon_1 + i\epsilon_2$ ve karmaşık manyetik geçirgenliğe $\tilde{\mu}_r(\omega) = \mu_1 + i\mu_2$ sahip malzemelerdir ve bunlar metamalzeme yapısının geometrisine bağlı olarak ayarlanabilir. Çalışma frekansı tek frekans olarak düşünülürse ve $\tilde{\epsilon}_r(\omega) = \tilde{\mu}_r(\omega)$ eşitliği sağlanması durumunda karmaşık olarak normalize empedans $\tilde{Z}(\omega)$ değeri bir olur. Sonuç olarak serbest uzayla empedans uyumu sağlanmış olur ve yansımaya olmaz.

Matamalzemelerden bahsedilecek olunursa; metamalzemeler günümüz bilgilerine göre doğada bulunmayan ve yapay olarak gerçekleştirilebilen malzemelerdir. Metamalzemeler teorik olarak ilk defa 1968 yılında Veselago

tarafından ortaya sürülmüş ve geçtiğimiz 50 yıl içerisinde fiziksel uygulamaları gerçekleştirilmektedir. Metamalzemeler, negatif elektriksel geçirgenlik (ϵ), negatif manyetik geçirgenlik (μ), negatif kırılma indisi (n), ters Vavilov-Cherenkov etkisi ve ters Doppler etkisi gibi sıra dışı elektromanyetik özelliklerinden dolayı çoğu çalışmada yer almaktadır (Watts vd., 2012). Bu çalışmalardan bazıları; antenler, filtreler, süper lensler, görüntüleme, güç bölücüler, perdeleme, sensörler ve soğuruculardır (Watts vd., 2012). Tüm elektronik cihazların küçülmeye doğru gittiğini günümüzde metamalzemelerle tasarlanan yapıların fiziksel boyutunun serbest uzay dalga boyundan çok küçük olma özelliği tasarımlarda önemli bir yere sahiptir.

Metamalzeme tasarımı çeşitli rezonatör tipleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Literatürde halka, çubuk, çarpı gibi farklı geometrilerde metamalzeme rezonatör tasarımları bulunmaktadır ve bu yapılar boyutlarına bağlı olarak mikrodalga, Terahertz, yakın kızıl ötesi, optik bölgelerde çalışmaktadır (Tuong vd., 2013).

Metamalzeme rezonatör yapıları literatürde sıklıkla *LC* rezonans devresi ile modellenmektedir ve rezonans frekansı endüktif (L) ve kapasitif (C) etkilere bağlıdır. Endüktif etkiler rezonatör yapısını oluşturan iletken hattın boyuna ve şekline bağlıyken, kapasitif etkiler iletken hattın yanı sıra hattın üzerine basıldığı dielektrik plaka kalınlığına ve dielektrik sabitine bağlıdır (Baena vd., 2004; Aydın vd., 2007; Ertan vd., 2016).

Gelen elektromanyetik dalganın soğurucu yüzey tarafından ısı ya da türevlerine dönüştürüldüğü bilinmektedir. Literatürde bu enerji dönüşümünün temel sebebinin metal kısmın sebep olduğu ohmik kayıplar ve dielektrik kısmın sebep olduğu dielektrik kayıplardan kaynaklı olduğu söylenebilir (Tuong vd., 2013). Buradan yola çıkarak kimi çalışmalar metalik ve dielektrik kayıpların soğurmayı artırdığı belirtilmektedir (Landy vd., 2009; Shen vd., 2011; Hu vd., 2013; Ekmekci ve Demir, 2016; Hu vd., 2016; Al-Badri vd., 2017; Cardin vd., 2018). Fakat literatürü dikkatli incelediğimizde kimi çalışmalarda metalik ve dielektrik kayıpların soğurma oranını azalttığı (Zhong vd., 2012; Astorino vd., 2017b, 2017a), kimi çalışmalarda ise metalik ve dielektrik kayıpların soğurma oranına

etkisinin olmadığı görülmektedir (Nie vd., 2013; An vd., 2016; Pan vd., 2017; Zhai vd., 2017). Metalik ve dielektrik kayıpların soğurma oranına etkisi konusunda ki uzlaşmazlık dielektrik taban malzeme kalınlığının soğurmaya etkisi konusunda da bulunmaktadır. Dielektrik taban malzeme kalınlığının artırılmasına bağlı olarak kimi çalışmada soğurma oranını artırdığı (Liao ve Zhao, 2016; Xiong vd., 2016) belirtilirken, kimi çalışmada soğurma oranını azalttığı (Cheng vd. 2013; Kim vd., 2017a) ifade edilmektedir.

Soğurma oranının artmasının, çoğu askeri ve sivil uygulamalarda performansı artıracağını düşünülürse mükemmel soğurucu tasarımının önemli bir çalışma konusu olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında amaçlanan; dielektrik malzeme kalınlığının ve kaybının soğurmaya etkisi konusunda ortak bir sonuç belirtmektir. Bu tezin çıktılarında bir tanesi de soğurucu tasarımında soğurucu geometrisini değiştirilmeden sadece kullanılan dielektrik taban malzemenin özelliklerini ayarlayarak maksimum seviyede soğurmanın elde edilebileceğini göstermektedir.

Bu tez çalışması sırasıyla; teorik bilgiler ve kaynak özetleri, metamalzeme tabanlı rezonatör ile soğurucu tasarımı, üretimi ve karakterizasyonu, araştırma bulguları, metamalzeme tabanlı rezonatörlerin soğurma mekanizmasının incelenmesi, son olarak ise tartışma ve sonuçlar bölümünden oluşmaktadır. Tez bölümlerinin kısa açıklamaları aşağıdaki gibi yapılabilir:

Giriş bölümünde soğurucular hakkında genel bilgiler verilmiş, soğurucu tasarımında neden metamalzeme kullanıldığı ve metamalzemenin ne olduğundan kısaca bahsedilmiştir. Mükemmel soğurucu tasarımında literatürde görülen kargaşadan bahsedilerek neden bu tezin gerçekleştirildiği açıklanmıştır.

Teorik bilgiler ve kaynak özeti bölümünde ilk olarak soğurucular hakkında teorik bilgiye ve literatürde bulunan belli başlı soğurucu yapıları ile ilgili çalışmalara yer verilmiştir. Soğurucu yapılarını analiz etmek amacıyla literatürde bulunan teorilerden bahsedildikten sonra tez kapsamında tasarlanan soğurucularda metamalzeme rezonatör yapıları kullanıldığı için çok detaya girilmeden

metamalzemelerin teorisi anlatılmıştır. Sonraki aşamada dielektrik malzeme özelliklerinin soğurmaya etkisi hakkında teorik bilgi ve literatür özetine yer verilerek bu bölüm sonlandırılmıştır.

Metamalzeme tabanlı rezonatörler ile soğurucu tasarımı, üretimi ve karakterizasyonu bölümünde ilk olarak S-bantta çalışan iki farklı rezonatör tabanlı soğurucu yapısı tasarlanmıştır. Bu rezonatörlerden kapalı halka rezonatöründe (KHR) dipol rezonans gözlenirken, ayırık halka rezonatöründe (AHR) ise LC rezonans gözlenmektedir. İki farklı rezonansa sahip rezonatör tasarlanmasının amacı; tez kapsamında öne sunulan hipotezin soğurucu yapılarında kullanılan rezonatör topolojisine bağlı olmadığını göstermektir. S-bantta tasarlanan KHR ve AHR yapıları X-bant ve Terahertz bölgesinde de tasarlanmıştır. Böylelikle öne sunulan hipotezin farklı frekans bantlarında da geçerli olduğu gösterilmiştir. Bu tez kapsamında, KHR yapısı için dielektrik malzeme özelliğinin soğurma oranına etkisi konusunda gerçekleştirilen ilk nümerik çalışmalar, S ve X-bantlarda gerçekleştirilmiş ve sonuçlar URSİ-TÜRKİYE 2018'de sözlü sunum olarak sunulmuştur. Bu bölüm farklı frekans bölgelerinde tasarımları gerçekleştirilen KHR ve AHR yapılarının analizinin; benzetim ortamında gerçekleştirildiği benzetim düzeneği ve deneysel olarak sunulduğu deney düzeneğinden bahsedilerek bu bölüm tamamlanmıştır.

Araştırma bulguları: Metamalzeme tabanlı rezonatörlerin soğurma mekanizmasının incelenmesi bölümünde S-bant, X-bant ve Terahertz bölgesinde tasarımları gerçekleştirilen KHR ve AHR tabanlı soğurucu yapılarında dielektrik malzemenin göreceli elektriksel geçirgenliğinin ve dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi benzetim ortamında incelenirken, dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisi ise benzetim ortamında ve S-bant için deneysel olarak incelenmiş ve bu bölüm sonlandırılmıştır.

Bu tez bölümlerinden sonuncusu olan tartışma ve sonuçlar bölümünde elde edilen deneysel ve benzetim sonuçları doğrultusunda genel bir sonuç çıkarılmıştır. Ayrıca gerçekleştirilen bu tezin literatüre katkılarından bahsedilmiştir.

2. TEORİK BİLGİLER VE KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde, tezin ana konusu soğurucular olduğu için, ilk olarak soğurma teorisinden bahsedilmiştir. Sonraki aşamada ise soğurucuları analiz etme yöntemleri üzerinde durulmuştur. Bu bölüm temel düzeyde metamalzemelerden bahsedildikten sonra dielektrik malzeme özelliklerinin soğurma oranına etkisini inceleyen literatür özetiyle tamamlanmaktadır.

2.1. Soğurma Teorisi

Metamalzeme tabanlı soğurucular yüksek empedans yüzeyine sahip yapılardır. Genellikle soğurucular; bir dielektrik tabaka tarafından ikiye ayrılmış, bir yüzünde rezonatör diğer yüzünde ise toprak düzlemden oluşmaktadır. Teorik yaklaşımda dielektrik katman kalınlığı çalışma frekansındaki dalga boyundan çok küçük olması gerekmektedir (Engheta 2002). Burada, dalga boyu denklem (2.1) ile hesaplanmaktadır. Denklemde f dalga frekansını, ε_{eff} etkin dielektrik sabitini, c ise ışık hızını ifade etmektedir ve serbest uzay için değeri 3×10^8 m/s'dir.

$$\lambda = \frac{c}{f(\sqrt{\varepsilon_{eff}\mu_{eff}})} \quad (2.1)$$

Literatüre baktığımızda metamalzeme soğurucularda elektriksel tepkiler rezonatör kısmından, manyetik tepkiler ise dielektrik tabakanın altında ve üstünde kalan rezonatör ve toprak yüzey arasındaki anti paralel akımlardan dolayı gerçekleşmektedir (Watts vd. 2012).

Bir sınır, ortam veya yüzey üzerine gelen bir elektromanyetik dalga yansiyabilir, iletilebilir, soğrulabilir, kırınabilir veya saçılabilir. Yansıma olayını genellikle Fresnel denklemleri ile incelenmektedir. Fresnel denklemleri Augustin Jean Fresnel tarafından ortaya atılmış ve gelen bir dalganın ikinci ortama ne kadarının iletileceği ve ne kadarının birinci ortama geri yansiyacağı söylemektedir. Denklemlerde; dielektrik malzeme kalınlığına d , karmaşık manyetik geçirgenlik $\tilde{\mu}(\omega) = \mu_0 \tilde{\mu}_r(\omega)$, karmaşık elektrik geçirgenlik ise $\tilde{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon_0 \tilde{\varepsilon}_r(\omega)$ olarak

gösterilmektedir. Burada $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} (H/m)$ ve $\varepsilon_0 = 10^7/4\pi c^2 (F/m)$ serbest uzaydaki manyetik ve elektriksel geçirgenliği simgelemektedir. Göreceli manyetik ve elektriksel geçirgenlik ise sırasıyla $\tilde{\mu}_r$ ve $\tilde{\varepsilon}_r$ ile ifade edilmekte ve bu büyüklükler birimsizdir. Enine elektrik (TE) ve enine manyetik (TM) mod altında yansıma (R) denklem (2.2) ve (2.3)'de gösterilmektedir (Watts vd. 2012).

$$R_{TE} = |r_{TE}|^2 = \left| \frac{\cos\theta - \mu_r^{-1}\sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \mu_r^{-1}\sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \right|^2 \quad (2.2)$$

$$R_{TM} = |r_{TM}|^2 = \left| \frac{\varepsilon_r \cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\varepsilon_r \cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \right|^2 \quad (2.3)$$

Burada r yansıma katsayısını, θ dalganın geliş açısını, $n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$ kırılma indisini simgelemektedir. Geliş açısını $\theta = 0^\circ$ olarak kabul edersek, (2.2) ve (2.3) denklemleri (2.4)'deki formata dönüşür (Watts vd. 2012).

$$R = \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|^2 = \left| \frac{\mu_r - n}{\mu_r + n} \right|^2 \quad (2.4)$$

Denklem (2.4)'de $Z = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ malzemenin empedansını, $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}$ ise serbest uzay dalga empedansını simgelemektedir. Serbest uzay empedansı elektromanyetik dalganın meydana getirdiği elektrik (\bar{E}) ve manyetik alanlar (\bar{H}) arasındaki orandır. \bar{E} ve \bar{H} 'nin birimi sırasıyla volt/m ve amper/m'dir. Denklem (2.5)'de $c = 1/\sqrt{\mu_0\varepsilon_0} = 3 \times 10^8$ serbest uzaydaki ışık hızını, \bar{B} manyetik akı yoğunluğunu simgelemektedir. Serbest uzay dalga empedansı (Z_0) denklem (2.5) ile gösterilebilir.

$$Z_0 = \frac{\bar{E}}{\bar{H}} = \frac{c \times \bar{B}}{\frac{\bar{B}}{\mu_0}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \approx 377\Omega \quad (2.5)$$

Literatürde soğurma oranını hesaplamak için yaygın olarak kullanılan denklem, denklem (2.6)'da gösterilmektedir (Landy vd., 2008, 2009; Tao vd., 2008; Ye vd.,

2010; Luo vd., 2011; Shen vd., 2011; Chen, 2012; Mattiucci vd., 2012; Shen vd., 2012; Watts vd., 2012; Zhong vd., 2012; Cheng vd., 2013; M. H. Li vd., 2013; Nie vd., 2013; Tuong vd., 2013; Wanghuang vd., 2013; Kocer vd., 2015; An vd., 2016; D. Hu vd., 2016; Liao ve Zhao, 2016; Xiong vd., 2016; Astorino vd., 2017a; Gong vd., 2017; Kim vd., 2017; Pan vd., 2017; Zhai vd., 2017; Duan vd., 2018; Köse ve Ekmekçi, 2018). Burada soğurma $A(\omega)$, yansıma $R(\omega)$ ve iletim ise $T(\omega)$ ile simgelenmektedir.

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) \quad (2.6)$$

Denklem (2.6) yansıma $\tilde{r}(\omega)$ ve iletim katsayısı $\tilde{t}(\omega)$ cinsinden düzenlendiğinde denklem (2.7) elde edilmektedir.

$$A(\omega) = 1 - |\tilde{r}(\omega)|^2 - |\tilde{t}(\omega)|^2 \quad (2.7)$$

Benzetim ortamında ve deneysel olarak elde ettiğimiz sonuçlar saçılma parametreleri cinsindedir. Bu bağlamda saçılma parametreleri önemli bir yere sahiptir. Literatüre bakıldığında soğurma denkleminin saçılma parametreleri kullanılarak da yazıldığı görülmektedir (Tao vd., 2008; Tao vd., 2008; Q. Y. Wen vd., 2009; Luo vd., 2011; Shen vd., 2011; Chen 2012; Mattiucci vd., 2012; Watts vd., 2012; Zhong vd., 2012; F. Hu vd., 2013; M. H. Li vd., 2013; Nie vd., 2013; Tuong vd., 2013; Wanghuang vd., 2013; Ekmekci ve Demir, 2016; Al-Badri vd., 2017; Astorino vd., 2017a; Bagci ve Medina, 2017; Kim vd., 2017; Duan vd., 2018).

Saçılma parametrelerinden çok kısa bahsedecek olursak; yüksek frekanslarda gerilim ve akım ölçümü büyük bir problem teşkil etmektedir. Belirli bir yönde ilerleyen ve duran dalgalar genlik ve faz değerleri içerir. Dolayısıyla eşdeğer gerilim, akım, empedans ve admitanslar bir soyutlamadır. Bunun için yüksek frekanslarda gerilim ve akım ölçümlerinde saçılma matrisleri kullanılmaktadır. N kapılı bir devrede kapılara gelen ve yansıyan gerilim dalgaları saçılma matrisi ile ilişkilendirilmiştir (Pozar, D.M., 2005). İki kapılı bir devrede; $|S_{11}|^2$ giriş terminalindeki yansıyan güç miktarını, $|S_{21}|^2$ birinci terminalden ikinci terminale iletilen güç miktarını, $|S_{12}|^2$ ikinci terminalden birinci terminale

iletilen güç miktarını, $|S_{22}|^2$ ise ikinci terminalden yansıyan güç miktarını simgelemektedir. Saçılma parametreleri cinsinden soğurma denklemi denklem (2.8)'de gösterilmektedir.

$$A = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (2.8)$$

Tasarlanan metamalzeme soğurucu yapısının toprak düzlemini tamamıyla metal ile kaplandığında iletim miktarı sıfır olmaktadır. Soğurma miktarı denklem (2.4) ve denklem (2.6)'yı kullanılarak yeniden yazılırsa, denklem (2.9) elde edilmektedir.

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) = 1 - \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|^2 = 1 - \left| \frac{\mu_r - n}{\mu_r + n} \right|^2 \quad (2.9)$$

Denklem (2.9)'dan da görüleceği gibi soğurucu yapısının empedansı yaklaşık 377 Ω olduğunda serbest uzay ile arasında empedans uyumu sağlanmış olur ve bunun sonucunda soğurma değeri bir olmaktadır ki bu da mükemmel bir soğurucu elde edildiğini göstermektedir.

Soğurmada yansıyan dalga Fresnel Denklemleri ile ele alınmıştır. İletilen dalgaya bakılacak olunursa burada iletim matrisi yaklaşımı karşımıza çıkmaktadır. Kalınlığı d olan bir boyutlu levhaya dik olarak gelen bir dalga için karmaşık kırılma indisine $\tilde{n}(\omega) = n_1 + in_2$ ve empedansa $\tilde{Z}(\omega) = Z_1 + iZ_2$ bağlı iletim katsayısı $\tilde{t}(\omega)$ denklem (2.10)'da gösterilmektedir (Smith ve Kroll, 2000).

$$t(\omega)^{-1} = \left[\cos(\tilde{n}kd) - \frac{i}{2} \left(\tilde{Z} + \frac{1}{\tilde{Z}} \right) \sin(\tilde{n}kd) \right] e^{ikd} \quad (2.10)$$

Burada $k = \omega/c$ gelen dalga için dalga numarası, c serbest uzay ışık hızıdır. Soğurucu için çalışma frekansında $\tilde{\epsilon}(\omega) = \tilde{\mu}(\omega)$ eşitliği sağlanması durumunda $\tilde{Z}(\omega) = 1$ olur ve serbest uzayla empedans uyumu sağlanmış olur. Bunun sonucunda herhangi bir yansıma meydana gelmez. Empedans uyumu sağlandığı durum ($\tilde{Z} = 1$) için denklem (2.10)'u tekrar yazacak olursak denklem (2.11) elde edilmektedir (Landy vd., 2009).

$$t(\omega)^{-1} = [\cos(\tilde{n}kd) - i \sin(\tilde{n}kd)]e^{ikd} \quad (2.11)$$

Denklem (2.11)'i Euler Formülü ile düzenlendiğinde denklem (2.12) elde edilmektedir.

$$t(\omega)^{-1} = e^{-i(\tilde{n}kd)} e^{ikd} = e^{-i(n_1-1)kd} e^{n_2kd} \quad (2.12)$$

İletimi $T = |\tilde{t}|^2$ şeklinde yazacak olursak denklem (2.13) elde edilmektedir.

$$T = e^{-2n_2kd} \quad (2.13)$$

Denklem (2.13)'e göre verilen bir d kalınlığında minimum seviyede iletim isteniyorsa n_2 değeri olabildiğince yüksek tutulmalıdır. Sistemde dielektrik ve manyetik kayıplar n_2 ile simgelenmektedir (Landy vd., 2009).

$$\lim_{n_2 \rightarrow \infty} T = 0 \quad (2.14)$$

Denklem (2.9) ve (2.14)'den de görüldüğü gibi yüksek seviyede soğurma elde etmek için \tilde{n} ve \tilde{Z} değerlerini hassas ayarlamalıyız. Soğurucu tasarımında metamalzeme kullanmamızın gerekçesini burada bir kez daha görmekteyiz. Metamalzemeler gelen dalganın elektrik ve manyetik alanıyla bağlaşım oluşturabilmektedir. Metamalzemeler frekansa bağlı etkin elektriksel $\varepsilon_{eff}(\omega)$ ve manyetik geçirgenliğe $\mu_{eff}(\omega)$ sahiptirler ve bunlar Drude-Lorentz modeli ile denklem (2.15) ve (2.16)'daki gibi tanımlanmaktadır (Pendry vd., 1924). Drude-Lorentz modeli bize metamalzemelerin frekans cevaplarını vermektedir (Landy vd., 2009).

$$\varepsilon_{eff}(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{F_e \omega^2}{\omega_{0,e}^2 - \omega^2 - i\gamma_e \omega} \quad (2.15)$$

$$\mu_{eff}(\omega) = \mu_{\infty} + \frac{F_m \omega^2}{\omega_{0,m}^2 - \omega^2 - i\gamma_m \omega} \quad (2.16)$$

Burada F_m ve F_e salınım şiddetini, $\omega_{0,e}$ ve $\omega_{0,m}$ salınımdaki merkez frekansı, γ_e ve γ_m sönümlenmeyi, ε_∞ ve μ_∞ çok çok yüksek frekansta elektriksel ve manyetik geçirgenliği simgelemektedir. Çalışma frekansını tek bir frekans olarak düşündüğümüzde ω_0 frekansını ω frekansına eşit olarak tanımlayabiliriz bunun sonucunda $\tilde{\varepsilon}(\omega) = \tilde{\mu}(\omega)$ eşitliği sağlanır ve bu da bize $\tilde{Z}(\omega_0) = 1$ ve $n_2(\omega_0)$ 'nin değerini denklem (2.17) ile gösterebiliriz (Landy vd., 2009).

$$n_2(\omega_0) = \frac{F\omega_0}{\gamma} \quad (2.17)$$

Gelen elektromanyetik dalgada yansımının (R) olmadığını düşünürsek ve denklem (2.17), denklem (2.13)'de yerine koyulacak olursa ve bunu takiben elde edilen iletim (T) denklem (2.6)'da verilen en genel soğurma denkleminde yerine yazılacak olursa denklem (2.18) elde edilmektedir (Landy vd., 2009).

$$A(\omega_0) = 1 - e^{2(F\omega_0^2 d/c\gamma)} \quad (2.18)$$

Gerçek durumda $\varepsilon_\infty \neq \mu_\infty$ ve $\tilde{Z}(\omega_0) \neq 1$ eşitlikleri sağlandığında soğurma (A) sadece n_2 değerine bağlı olmaz.

Metamalzeme tabanlı soğurucular; genellikle dalga boyu altı metamalzeme tabanlı rezonatörlerden oluşan, ince elektromanyetik soğuruculardır ve yaklaşık olarak mükemmel soğurma karakteristiğine sahiptir. Literatürü incelediğimizde soğurucuları analiz etme yöntemlerinden en popülerleri empedans uyumlandırma teorisi (Tao, Landy, vd., 2008; Avitzour vd., 2009; Wang vd., 2012) olduğu görülmektedir. Fakat bu teori metamalzeme rezonatör ve toprak düzlem arasındaki etkileşimi analiz etmeye uygun değildir. Analiz yöntemlerinden bir diğeri ise girişim teorisi (Chen, 2012; Wanghuang vd., 2013; Duan vd., 2018; Duan vd., 2019). Girişim teorisi bu tarz problemler için etkin bir yaklaşımdır. Ayrıca girişim teorisi sayesinde gelen elektromanyetik dalga belli bir açıyla gelse bile hesaplanabilir yapılabilmektedir (Wanghuang vd., 2013). Literatüre baktığımızda bu yöntemler haricinde iletim hattı teorisi (Q.-Y. Wen vd., 2009) ve etkin ortam teorisi (Landy vd., 2009) gibi teoriler göze çarpmaktadır.

Bu tez kapsamında soğurucuları analiz etmek amacıyla empedans uyumlandırma teorisi, girişim teorisi ve iletim hattı teorisinden faydalandığı için özellikle bu üç teori detaylı olarak ele alınmıştır.

2.1.1. Empedans uyumlandırma teorisi

Literatür incelendiğinde empedans uyumlandırma teorisi çoğu metamalzeme soğurucu yapısı için önerilmektedir. Fakat bu teorinin rezonatör ve toprak düzlemin olduğu durumlarda kullanılması uygun değildir. Soğurucu yapılarında elektriksel tepkilerin ayarlanması; periyodik metal rezonatör yapıları tarafından metamalzemenin elektriksel geçirgenliği ile $\varepsilon(\omega)$, manyetik tepkilerin ayarlanması ise rezonatör ve toprak düzlem arasında gerçekleşen etkileşim sayesinde metamalzemenin manyetik geçirgenliği $\mu(\omega)$ ile ayarlanmaktadır (Wanghuang vd., 2013).

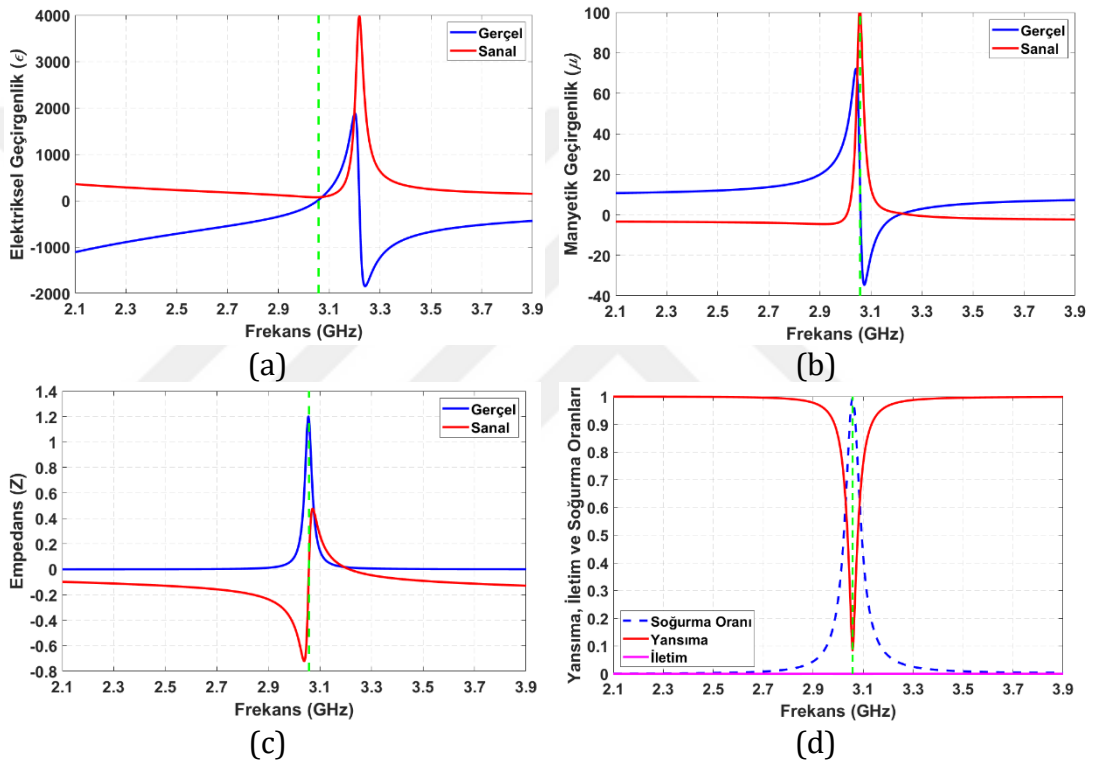
Serbest uzay dalga empedansı Z_0 yaklaşık olarak 377Ω ya da 120π 'dir. Metamalzeme tabanlı soğurucu yapısının empedansı denklem (2.19) ile hesaplanabilir.

$$Z(\omega) = \sqrt{\mu(\omega)/\varepsilon(\omega)} \quad (2.19)$$

Metamalzeme tabanlı soğurucu yapısı için $\varepsilon(\omega) = \mu(\omega)$ eşitliği sağlandığı durumda normalize olarak soğurucunun empedansı $Z(\omega)$, serbest uzay empedansına Z_0 eşit olur ve bu durumda soğurma oranı denklem (2.13)'e göre n_2kd miktarına bağlı olarak belirlenir (Tao vd., 2008; Avitzour vd., 2009; Wang vd. 2012).

Empedans uyumlandırma teorisinin doğruluğunu test etmek amacıyla çalışma frekansı 3,0576 GHz olan toprak düzlemi tamamen metal kaplı bir soğurucu tasarlanmıştır. Bu soğurucuya ait; karmaşık elektriksel geçirgenlik grafiği Şekil 2.1 (a)'da, karmaşık manyetik geçirgenlik grafiği Şekil 2.1 (b)'de, karmaşık empedans grafiği Şekil 2.1 (c)'de, iletim, yansıma ve soğurma oranları ise Şekil 2.1 (d)'de gösterilmektedir. Soğurucunun çalışma frekansında soğurma oranı

$A = 0,993$, karmaşık elektriksel geçirgenliği $\tilde{\epsilon}(\omega) = 14,381 + i 72,005$, karmaşık manyetik geçirgenliği $\tilde{\mu}(\omega) = 13,737 + i 101,356$ 'dir. Bu değerler denklem (2.19)'da yerine koyulduğunda tasarlanan soğurucunun karmaşık empedans değeri $\tilde{Z}(\omega) = 1,180 + i 0,039$ olduğu görülmektedir. Görüldüğü üzere soğurucu empedansının gerçel kısmı 1' çok yakın, sanal kısmı 0'a çok yakındır. Buradan yola çıkarak soğurucunun kompleks empedansının bire yani normalize serbest uzay empedansına yaklaşması maksimum seviyede soğurma elde edilmesini sağlamaktadır.

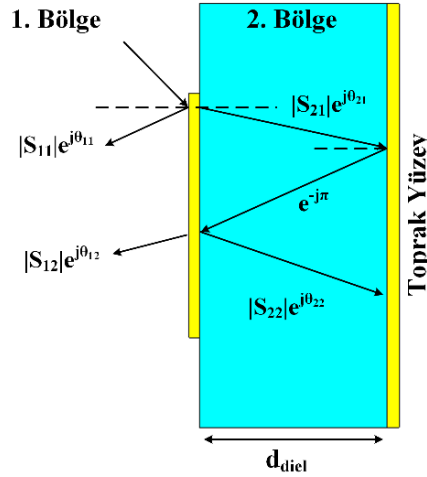


Şekil 2.1. Tasarlanan bir metamalzeme soğurucu için; a) elektriksel geçirgenlik, b) manyetik geçirgenlik, c) empedans değeri, d) iletim, yansımaya ve soğurma oranları.

2.1.2. Girişim teorisi

Tez kapsamında girişim teorisinden; dielektrik malzemenin kalınlığının soğurmaya etkisi analiz edilirken faydalanılmıştır. Bu yüzden diğer teorilere nazaran üzerinde daha detaylı durulmaktadır. Soğurucularda girişim teorisi ilk olarak Chen tarafından 2012 yılında öne atılmıştır (Chen, 2011). Chen bu teoride Şekil 2.2'de görüldüğü gibi birbirine yakın iki metal arasında çoklu yansımaya

modelini kullanmıştır. Bu düzenek metamalzeme tabanlı soğurucu yapılara benzemektedir. En genel metamalzeme tabanlı soğurucu yapıları da arada bir dielektrik katmanla ayrılmış rezonatör ve toprak düzleminde oluşmaktadır.



Şekil 2.2. Metamalzeme soğurucu modeli için çoklu yansımaya (Chen, 2011).

Bilindiği üzere empedans uyumlandırma teorisinde manyetik rezonanslardan da faydalanılmaktadır. Bu teoride Chen; tasarlanan soğurucu yapısında komşu metal yapılar ile yakın alan etkileşimleri ve rezonatör tabaka ile toprak düzlem arasında gerçekleşen manyetik rezonansları göz ardı etmiştir. Rezonatör ve toprak düzlemi arasında herhangi bir bağlaşım olmadığı, sadece çoklu yansımaya ile birbiri arasında etkileşim içinde olduğu söylenmektedir (Chen, 2011).

Girişim teorisinde benzetimler ya da deneysel ölçümler sonucu elde edilen saçılma parametreleri (S parametreleri) ve çoklu yansımaya formülleri ortak bir şekilde kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu bağlamda ilk olarak tasarlanmış olan soğurucu yapısının toprak düzlemi kaldırıp saçılma parametreleri elde edilmektedir. Bu durum bağlaşım olmayan sistem olarak adlandırılmaktadır. Elde edilen saçılma parametreleri denklem (2.20)'de yerine koyulduğunda toprak düzlem varken gerçekleştirilen benzetim sonuçları ile benzer sonuçlar çıkmaktadır.

Gelen elektromanyetik dalgada rezonatörden yansımaya katsayısı ile geri havaya yansıyan dalga $\tilde{r}_{12} = r_{12}e^{i\phi_{12}}$, iletim katsayısı ile dielektrik katmanda toprak

yüzeyle kadar iletilen dalga $\tilde{t}_{12} = t_{12}e^{i\theta_{12}}$ ile simgelenmektedir. Rezonatörden geçen dalga kompleks yayılım fazı $\tilde{\beta} = \beta_r + i\beta_i = \sqrt{\tilde{\epsilon}_{diel}}k_0d$ ile toprak yüzeye kadar devam eder. Burada d dielektrik malzeme kalınlığı, $k_0 = \omega_0\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ serbest uzay dalga sayısı, β_r yayılım fazı, β_i dielektrikte oluşan soğurmayı simgelemektedir. Toprak düzleminden yansıyan dalga yine yayılım fazı ile $\tilde{\beta}$ rezonatör kısmına ulaşır ve rezonatörden yansıyan dalga $\tilde{r}_{21} = r_{21}e^{i\phi_{21}}$, rezonatörü geçip havaya iletilen dalga $\tilde{t}_{21} = t_{21}e^{i\theta_{21}}$ ile simgelenmektedir. Çoklu yansıma sonucu oluşan toplam yansıma denklem (2.20)'deki gibi ifade edilmektedir.

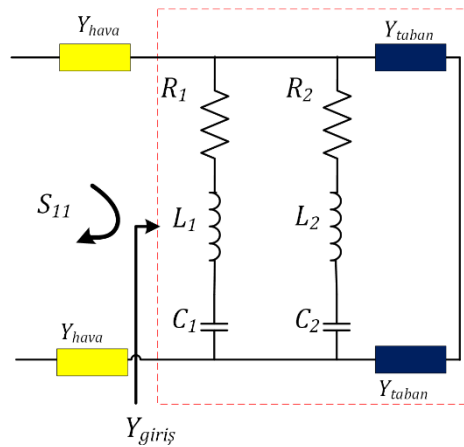
$$\tilde{r} = \tilde{r}_{12} - \frac{\tilde{t}_{12}\tilde{t}_{21}e^{i2\tilde{\beta}}}{1 + \tilde{r}_{21}e^{i2\tilde{\beta}}} \quad (2.20)$$

Burada ilk kısım rezonatörden direkt yansıyan dalgayı ifade ederken, “ – “ işaretinin de dahil olduğu ikinci kısım rezonatör ve toprak düzlem arasındaki çoklu yansımayı ifade etmektedir. Denklem (2.20)'de elde edilen yansıma değeri denklem (2.7)'de yerine koyularak yapının soğurma oranı elde edilmektedir. Burada yapının toprak düzlemi tamamen metalle kaplı olduğu için iletim katsayısı \tilde{t} sıfır alınmalıdır.

Soğurmayı analiz etme yöntemleri arasında girişim teorisinin diğer teorilere göre en büyük avantajı gelen dalga belli bir açı ile gelse bile girişim teorisi ile soğurmanın hesaplanabilmesidir. İlk olarak Chen tarafından ortaya atılan bu teori geçen zaman içerisinde daha da geliştirilmiştir. Çoklu yansıma sonucu oluşan toplam yansıma denklemi, belli bir geliş açısına sahip dalga için yenilenmiştir. Dielektrik malzeme kalınlığını $d = h \cos(\arcsin(\sin \phi / \sqrt{\epsilon_2/\epsilon_1}))$ şeklinde tanımlanırsa toplam yansıma denklemi belli bir açıyla gelen dalga için de kullanılabilmektedir (Wanghuang vd., 2013).

2.1.3. İletim hattı teorisi

Literatürde etkin ortam ve empedans uyumlandırma teorilerinin rezonatör ve toprak düzlemin olduğu durumlarda kullanımının uygun olmadığı belirtilmiştir. Bu sebepten dolayı soğurma oranı hesaplanırken farklı yöntemler kullanmanın daha verimli olacağı yine literatürde yer alan bir ibaredir (Wanghuang vd., 2013). Alternatif yöntemlerden bir tanesi girişim teorisi diğeri ise iletim hattı teorisidir. İletim hattı teorisi eşdeğer devre model teorisi olarak da adlandırılmaktadır (Wanghuang vd., 2013). Metamalzeme soğurucular genellikle rezonatör, dielektrik ve toprak olmak üzere üç katmandan oluşmaktadır. Metamalzeme soğurucu için birim hücrenin eşdeğer devre modeli Şekil 2.3’de gösterilmektedir. Birim hücrede bulunan her bir rezonatör yapısı seri LC devresi ile simgelenmektedir. Rezonatör yapısında bulunan uzun şeritler endüktans ve aralarında bir ayrık bulunan birbirine yakın metaller ise kapasitans oluşturmaktadır. İki metal arasındaki ayrıklar tarafından elde edilen kapasitans değeri, iki birim hücre arasındakinden çok daha büyük olduğu için birim hücreler arasındaki kapasitans değeri ihmal edilebilir. Bakır rezonatörlerin etrafında bulunan kayıplı taban malzemesinde oluşan elektrik alan dielektrik kayıplarını simgelenmektedir. Şekil 2.3’de bulunan dirençler her bir rezonatördeki malzeme kayıplarını simgelenmektedir (Bagci ve Medina, 2017; Costa vd., 2013; Li vd., 2013; Pang vd., 2011).



Şekil 2.3. Metamalzeme soğurucular için eşdeğer devre modeli (Bagci ve Medina, 2017; Costa vd., 2013; Li vd., 2013; Pang vd., 2011).

Rezonatördeki dielektrik kayıpla ilişkin direnç değeri (R_{taban}) kapasitans değerine, elektriksel geçirgenliğin gerçek ve sanal kısmına bağlıdır ve denklem (2.21)'de gösterilmektedir.

$$R_{taban} \cong \frac{1}{\omega C} \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r' + 1} \quad (2.21)$$

Denklem (2.21) kullanılarak Şekil 2.3'de gösterilen eşdeğer devredeki bir dalın (RLC devresi) empedansı denklem (2.22) ile ifade edilmektedir.

$$Z_{RLC} = R_{taban} + \frac{\omega^2 LC - 1}{\omega C} j \quad (2.22)$$

Topraklanmış kayıplı taban malzemesi eş değer devrede kısa devre olan bir iletim hattı ile temsil edilmekte ve analitik olarak denklem (2.23)'deki gibi gösterilmektedir.

$$Z_{taban} = jZ_M^{TM,TE} \tan(\beta h) \quad (2.23)$$

Burada $Z_M^{TM,TE}$ TM veya TE polarizasyon için serbest uzay karakteristik empedansını, β dielektrik içerisinde ilerleyen dalğanın sabitini ve h dielektrik taban malzeme kalınlığını ifade etmektedir. Girişten görülen eşdeğer admitans birbirine paralel bağlanmış RLC devreleri gibi düşünülmekte ve giriş admitansı (Y_{in}) denklem (2.24)'de gösterildiği gibi yazılmaktadır.

$$Y_{in} = Y_{RLC,1} + Y_{RLC,2} + Y_{taban} \quad (2.24)$$

Saçılma parametreleri cinsinden birinci porttaki yansıma denklem (2.25) ile ifade edilmektedir. Burada $Y_m^{TM,TE}$ TM veya TE polarizasyon için serbest uzay karakteristik admitansını ifade etmektedir (Bagci ve Medina, 2017).

$$|S_{11}(\omega)| = \left| \frac{Y_m^{TM,TE} - Y_{in}(\omega)}{Y_m^{TM,TE} + Y_{in}(\omega)} \right| \quad (2.25)$$

Toprak düzleminin tamamen bakır kaplı olduğunu düşünöldüğü durumda; soğurma oranı sadece yansımaya bağılı olacaktır. Denklem (2.25)'de elde edilen yansımaya değeri denklem (2.8)'de yerine yazarak iletim hattı teorisi ile soğurma oranını hesaplamış oluruz (Bagci ve Medina, 2017).

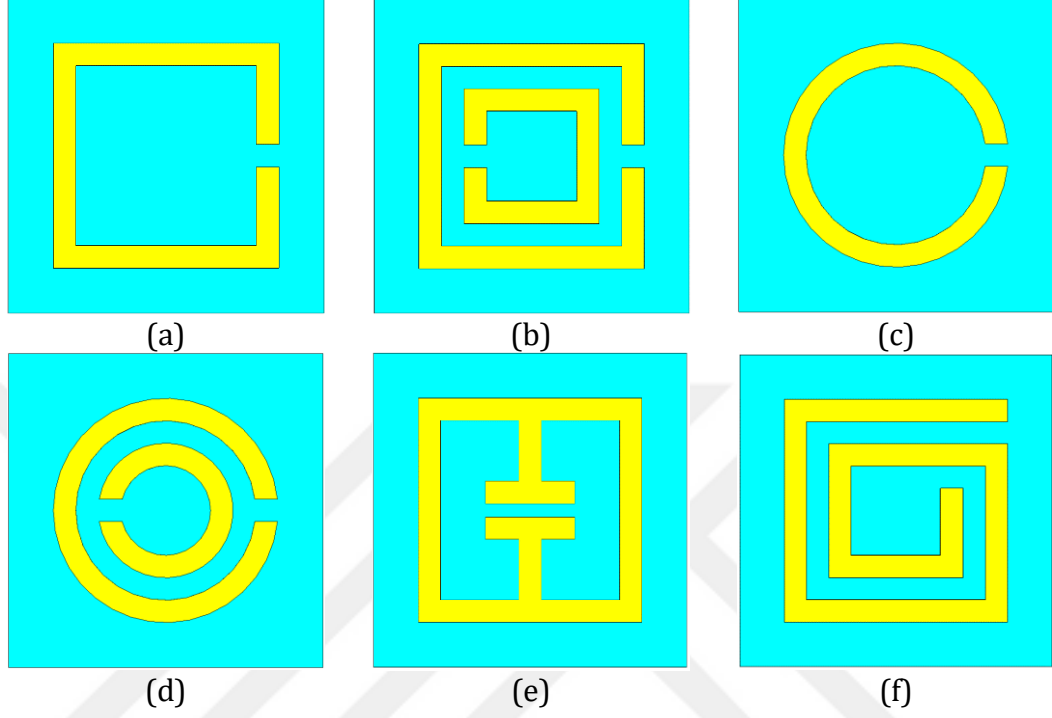
2.2. Metamalzeme Tabanlı Rezonatörler İle Tasarlanan Soğurucu Yapıları

Metamalzemeler ile tasarlanan yapılar serbest uzay dalga boyundan çok küçük yapılardır ve bunlar negatif etkin elektriksel geçirgenlik $\epsilon_{eff}(\omega)$ ve negatif manyetik geçirgenlik $\mu_{eff}(\omega)$ ile ifade edilebilirler. Metamalzemeler doğada bulunmayan fakat yapay olarak üretilen malzemelerdir. İlk olarak 1968 yılında Veselago aynı frekans bandında hem negatif etkin elektriksel geçirgenlik hem de negatif manyetik geçirgenliğe sahip malzemelerin, doğada bulunan malzemelerin aksine negatif kırılma indisi, negatif grup hızı ve negatif Vavilov-Cerenkov etkisi gibi özelliklere sahip olacağını teorik olarak göstermiştir. Veselago pozitif elektriksel ve manyetik geçirgenliğe sahip bir ortamda yayılma vektörü (\vec{k}), elektrik alan şiddeti (\vec{E}) ve manyetik alan şiddeti (\vec{H}) sağ el kuralı ile bulunurken, elektriksel ve manyetik geçirgenliğin negatif olduğu bir ortamda sol el kuralına göre bulunabileceğini söylemiştir (Veselago, 1968; 2006). Buradan yola çıkarak Veselago metamalzemeleri, solak malzemeler olarak adlandırmaktadır (Ozbay vd., 2003).

Solak malzemelerin sergilediği sıra dışı özellikler çoğu bilim insanının dikkatini çekmiş ve 1999 yılında ilk olarak Pendry ve arkadaşları ayırık halka rezonatör (SRR) kullanarak negatif etkin manyetik geçirgenliğin elde edilebileceğini göstermiştir (Pendry vd., 1999). Sonraki yıllarda SRR ve iletken çubuklardan oluşan bir karma yapı ile metamalzeme elde edilebileceği deneysel olarak gösterilmiştir. Burada negatif elektriksel geçirgenlik iletken çubuklar ile, negatif manyetik geçirgenlik ise SRR'lar ile elde edilmiştir (Ozbay vd., 2003).

Pendry ve arkadaşlarının ortaya attığı ilk metamalzeme rezonatör yapısı olan SRR'dan sonra farklı geometrilerde metamalzeme rezonatör tasarımı literatüre çok sayıda sunulmuştur ve bu konuda çalışmalar halen devam etmektedir.

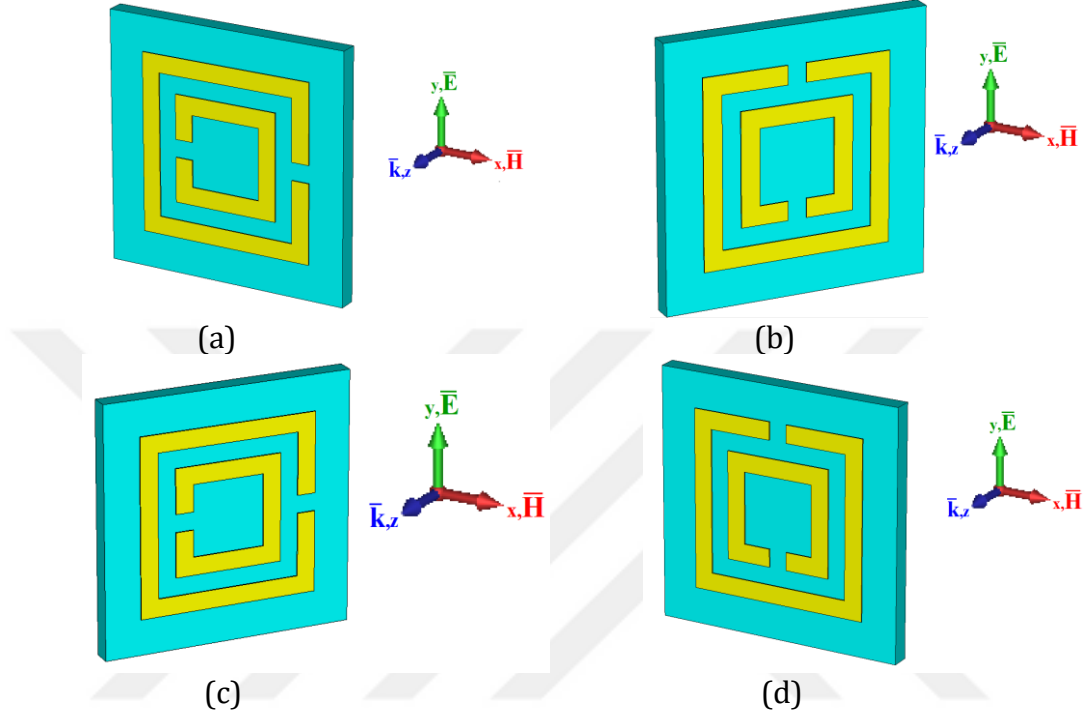
Literatürde bulunan metamalzeme rezonatörlerden bazıları; halka, çubuk, çarpı, spiral, elektrik LC rezonatördür. Farklı geometrilerde tasarlanmış metamalzeme rezonatör örnekleri Şekil 2.4'de gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Farklı geometrilerde tasarlanmış; a) kare ayrıık halka, b) çoklu kare ayrıık halka, c) dairesel ayrıık halka, d) çoklu dairesel ayrıık halka, e) elektrik LC , f) spiral metamalzeme rezonatör yapıları.

Metamalzeme rezonatör yapıları geometrisine ve uyarım türüne bağlı olarak negatif elektrik ve negatif manyetik geçirgenliğe sahip olabilirler. Literatüre baktığımızda metamalzeme yapıları üç farklı şekilde uyarılabilir. Bunlar; elektrik uyarım, manyetik uyarım ve hem elektrik hem de manyetik uyarımdır. Uyarım tipi seçimi kullanılan uygulamaya göre farklılık göstermektedir. Örneğin negatif manyetik geçirgenliğin gerektiği bir ortamda rezonatör yapısı manyetik olarak uyarılmalı, negatif elektriksel geçirgenliğin gerektiği bir ortamda ise rezonatör yapısı elektrik olarak uyarılmalıdır. Şekil 2.5'de tasarlanan bir rezonatör yapısı için farklı tiplerde uyarım tekniği gösterilmektedir. Bir rezonatör yapısının Şekil 2.5 (a)'da görüldüğü üzere elektrik uyarımı için; rezonatörlerde bulunan ayrıık ilerleyen dalganın elektrik alan bileşenine (\vec{E}) dik olması gerekmektedir. Eğer ilerleyen dalganın manyetik alan bileşeni (\vec{H}) rezonatör yapısının yüzeyine dikse rezonatör yapısı manyetik olarak uyarılır (Şekil 2.5 (b)). Bu iki durumun birlikte

sağlandığı durumlarda ise rezonatör yapısı hem elektrik hem de manyetik olarak uyarılmaktadır (Şekil 2.5 (c)). Bu üç durum haricindeki durumlarda herhangi bir uyarım mevcut değildir (Şekil 2.5 (d)) (Gay-Balmaz ve Martin, 2002; Katsarakis vd., 2004; Ekmekci ve Averitt, 2010).



Şekil 2.5. Tasarlanan bir rezonatör yapısı için a) sadece elektrik uyarım, b) sadece manyetik uyarım, c) hem elektrik hem de manyetik uyarım, d) uyarım yok (Gay-Balmaz ve Martin, 2002; Katsarakis vd., 2004; Ekmekci ve Averitt, 2010).

Literatürde tasarlanan metamalzeme rezonatör yapıları boyutlarıyla orantılı olarak mikrodalga, Terahertz, yakın kızıl ötesi, optik bölgede çalışmaktadır. Metamalzeme rezonatör yapıları literatürde sıklıkla LC rezonans devresi ile modellenmektedir ve rezonans frekansı ($\omega = \sqrt{LC}$); endüktif (L) ve kapasitif (C) etkilere bağlıdır. Endüktif etkiler rezonatör yapısını oluşturan iletken hattın boyuna ve şekline bağlıyken, kapasitif etkiler iletken hattın yanı sıra hattın üzerine basıldığı dielektrik plaka kalınlığına ve dielektrik sabitine bağlıdır (Baena vd., 2004; Bilotti vd., 2007; Ertan vd., 2016).

Metamalzemeler sahip oldukları sıra dışı özelliklerden dolayı çoğu askeri ve sivil uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Bunlardan bir tanesi de soğuruculardır.

Literatür incelendiğinde, metamalzeme tabanlı soğurucu çalışmaları hala popülerliğini devam ettirmektedir (Engheta, 2002; Landy vd., 2008; Tao vd., 2008; Tao vd., 2008; Avitzour vd., 2009; Q. Y. Wen vd., 2009; Q.-Y. Wen vd., 2009; Hao vd., 2010; Liu vd., 2010; Luo vd., 2011; Pang vd., 2011; Shen vd., 2011; Chen, 2012; Shen vd., 2012; Watts vd., 2012; Zhong vd., 2012; Cheng vd., 2013; Costa vd., 2013; Hu vd., 2013; Hu vd., 2013; Li vd., 2013; Nie vd., 2013; Wanghuang vd., 2013; An vd., 2016; Ekmekci ve Demir, 2016; Hu vd., 2016; Xiong vd., 2016; Al-Badri vd., 2017; Astorino vd., 2017b, 2017a; Bagci ve Medina, 2017; Kim vd., 2017; Pan vd., 2017; Duan vd., 2018; Zhai vd., 2017;). Metamalzeme soğurucu yapıları genellikle üç katmandan oluşmaktadır. Bunlar yukarıdan aşağıya doğru; en üstte metal rezonatör, ikinci katmanda dielektrik malzeme ve en alt katmanda ise metal toprak yüzeydir. Maksimum seviyede soğurma oranına sahip soğurucular çoğu uygulamada istenilen bir durumdur. İkinci bölüm kapsamında bulunan soğurma teorisi bölümünde bahsedildiği üzere maksimum seviyede soğurma elde etmek için yansıyan ve iletilen dalga miktarının minimum seviyede olması gerekmektedir. Yansıma miktarını minimum seviyede elde etmenin yollarından bir tanesi de soğurucu yapısının empedansı (Z) ile serbest uzay empedansının ($Z_0 \approx 377\Omega$) uyumlu olmasını sağlamaktır. Bu aşamada metamalzeme rezonatör yapıları işimizi kolaylaştırmaktadır. Metamalzemeler sahip oldukları, aynı zamanda da geometrisine ve uyarım şekline bağlı olarak ayarlanabilen karmaşık elektriksel ve manyetik geçirgenlik sayesinde serbest uzay ile empedans uyumu sağlamaktadır.

2.2.1. Dielektrik malzeme özelliklerinin soğurma oranına etkisi

Metamalzeme rezonatör tabanlı soğurucu yapılarının; geliş açısına bağımlı, geliş açısından bağımsız, tek frekansta, çift ya da daha çoklu frekansta çalışan, geniş bantlı, dar bantlı bir soğurma elde eden vb. pek çok uygulama literatürde mevcuttur. Genellikle bu uygulamalar tasarlanan soğurucu yapısının geometrisine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bunların yanında tasarlanan soğurucu yapısında soğurma oranı, soğurma bant genişliği, çalışma frekansı gibi özellikler soğurucu yapısının dielektrik malzeme özelliğine bağlı olarak da değişiklik gösterebilmektedir. Böylece tasarlanan yapının geometrik boyutları

hiç değiştirilmeden uygun dielektrik malzeme özellikleri ile istenilen seviyede soğurma elde edilebilir. Bu bağlamda dielektrik malzeme özelliğinin soğurma oranına etkisinin incelenmesi önem arz etmektedir.

2.2.1.1. Dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisi

Metamalzeme soğurucularda elektriksel tepkiler rezonatör kısmından, manyetik tepkiler ise dielektrik tabakanın altında ve üstünde kalan rezonatör ve toprak yüzey arasındaki anti paralel akımlardan dolayı gerçekteği soğurma teorisi bölümünde bahsedilmişti (Watts vd., 2012). Rezonatör kısım ile toprak düzlem arasındaki etkileşimde rol oynayan etmenlerden bir tanesi de dielektrik malzeme kalınlığıdır. Bu olay kapasitöre benzetilebilir: İki metal plaka arasındaki boşluk mesafesi, levha alanı ve boşluğun dielektrik sabiti bağlaşım miktarını belirler. Burada da benzer bir olay söz konusudur. Buradan yola çıkarak dielektrik malzeme kalınlığının manyetik rezonans üzerinde hassas bir etkisinin olduğunu söyleyebiliriz (Li vd., 2013). Literatür incelendiğinde dielektrik malzemenin kalınlığının soğurma oranına etkisi konusundaki ortak bir varđı bulunmamaktadır. Bu konu kapsamında literatürde bulunan belli başı birkaç çalışmadan bahsedilecek olunursa:

Li vd. 2013, birleşik element metodu kullanılarak; mikrodalga frekans bölgesinde, çift bantta çalışan metamalzeme soğurucu tasarlanmışlardır. Tasarlanan soğurucu, iki metal arasında dielektrik taban malzemesi ile ayrılmış bir yapıdan oluşmaktadır. Soğurucu yapısı ayrıık halka ve merkezde metalik çubuk olan halka olmak üzere iki elemandan oluşmaktadır. Tasarlanan yapı ile 9,02 GHz'de %99,3 ve 11,85 GHz'de ise %99,4 oranında soğurma elde edilmiştir. Sonuçlar benzetim ve deneysel olarak gösterilmektedir. Soğurmanın fiziksel mekanizmasının anlaşılması için akım ve alan dağılımları incelenmiştir. Yapılan analizler doğrultusunda; soğurucuyu oluşturan elemanlardan ayrıık halkada elektriksel dipol ve merkezde metalik çubuk olan halkada ise manyetik dipol gözlenmiştir. Çalışmada son olarak ise dielektrik malzeme kalınlığının soğurmaya etkisi üzerinde durulmuştur. Benzetim ortamında gerçekteştirilen çalışmada, dielektrik malzeme kalınlığı 0,3 mm'den 0,8 mm'ye kadar kademeli

olarak değiştirilmiştir. Dielektrik malzeme kalınlığındaki değişime oranla soğurma oranı belli bir noktaya kadar artarken buradan sonra azalmaya başladığı gözlenmektedir. Bu değişim yüksek frekanslarda belirginken, alçak frekanslarda ise belirgin değildir. Çalışmada yüksek frekansta manyetik dipol gözlendiğinden dolayı, dielektrik malzeme kalınlığının etkisi manyetik rezonans üzerinde daha etkili olduğu çalışmanın sonucu olarak bizlere aktarılmaktadır.

Landy vd. (2009), Terahertz bölgesinde, kutuplanma değişiminden bağımsız bir soğurucu yapısının tasarımını, teorik yaklaşımını ve ölçüm sonuçlarını gerçekleştirmişlerdir. Soğurma mekanizmasının açıklanmasında etkin ortam teoremini kullanmışlardır. Tasarlamış oldukları soğurucu yapısı 1,145 THz'de, benzetim ortamında %95, deney ortamında ise %77 soğurma oranına sahiptir. Tasarlanan soğurucu, iki metal arasında dielektrik taban malzemesi ile ayrılmış bir yapıdan oluşmaktadır. Çalışmanın teorik kısmında maksimum seviyede soğurma elde etmek için soğurucu yapısı ile serbest uzay empedansı arasında empedans uyumunun sağlanması gerektiği ve bunu metamalzemeler kullanarak sağlanabileceği ortaya koyulmuştur. Tasarlanan soğurucu yapısında elektriksel tepkiler elektrik bağlaşımlı halka rezonatör (ERR) ile, manyetik tepkiler ise ERR ile dielektrik malzemenin arkasında bulunan haç yapısı arasındaki etkileşim ile sağlanmaktadır. ERR ve haç yapısı ile soğurucu yapısının elektriksel ve manyetik geçirgenlik değerleri ayarlanabilmektedir. Böylece soğurucu ile serbest uzay arasındaki empedans uyumu sağlanabilir. Çalışma kapsamında kullanılan teoride iletim $T = e^{-2n_2kd}$ formülü ile ifade edilmektedir. Burada; n_2 kırılma indisinin imajinal kısmı, k dalga numarası ve d de dielektrik malzeme kalınlığıdır. Bu denklemden yola çıkarak; kullanılan dielektrik malzeme kalınlığının artması veya dielektrik malzeme kaybının azalması soğurmayı artırdığı söylenmiştir.

Cheng vd. (2013), artırılmış bant genişliğine sahip, çoklu haç rezonatör tabanlı metamalzeme soğurucu tasarımı gerçekleştirmiştir. Çalışma benzetim ortamında ve deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ilk olarak tek katmanlı haç rezonatör tasarlanmıştır ve tasarlanan bu yapının bant genişliğinin dar olduğu gözlenmiştir. Sonraki aşamada haç rezonatörleri üst üste konularak bant genişliğindeki değişim gözlenmiştir. İki, üç ve dört katmanlı yapılar için yapılan

analizler sonucunda dört katmanlı yapı için bant genişliği benzetim ortamında 2 GHz, deneysel olarak ise 1,9 GHz olarak bulunmuştur ki bu da tek katlı yapıya nazaran %90'lık bir bant genişliği artışı demektir. Çalışma kapsamında tasarlanan soğurucu yapısının LC devresi şeklinde modellenebileceği söylenmektedir. Çalışma haç rezonatörün geometrik parametrelerinin soğurmaya etkisini ve dielektrik malzemenin kalınlığının soğurmaya etkisini analiz ederek tamamlanmıştır. Dielektrik malzeme kalınlığı 0,3 mm'den 1,1 mm'ye kademeli olarak artırılırken soğurma oranının azaldığı gözlenmiştir.

Liao ve Zhao (2016), yığın metal-dielektrik ızgara yapısını kullanarak orta kızılötesi frekans bölgesinde bir soğurucu yapısı tasarlamıştır. Dar banttaki soğurucu yapısı; altından oluşan metal tabaka, üstünde dielektrik malzeme olarak silica ve en üst tabakada ise yine altından oluşan metal kısımdan oluşmaktadır. Soğurucu yapısının bant genişliğini artırmak için literatürde yaygın bir şekilde kullanılan çoklu katman metodu kullanılmıştır. Farklı kalınlıklarda metal ve dielektrik malzemeler kullanılarak geniş bantta bir soğurucu elde edilmiştir. Tasarlanan bu soğurucu yapısı, gelen dalganın kutuplanmasına bağlıdır. Benzetim sonuçlarına göre geniş bantlı soğurucu için TM kutuplanma altında geliş açısı 60° üstünde minimum soğurma oranı 0,8'den büyüktür. Aynı durumda TE kutuplanma altında soğurma ihmal edilebilecek kadar küçüktür. TM kutuplanma altında bu geniş bant soğurması ızgaranın küçültülüp veya büyütülmesiyle ayarlanabilir olduğu çalışma kapsamında söylenmektedir. Çalışmada gerçekleştirilen analizlerden bir tanesi de dielektrik malzeme kalınlığının soğurmaya etkisi üzerindedir. Çalışmada dielektrik malzeme kalınlığı $0,010 \mu\text{m}$ 'den $0,018 \mu\text{m}$ 'ye kadar kademeli olarak artırılmıştır. Elde edilen bulgular neticesinde kalınlığın artması, soğurma oranını artırdığı gözlenmektedir.

Kim vd. (2017), dikdörtgen şeklinde metamalzeme soğurucu ile üç bantta soğurma elde etmiştir. Yapılan analizler doğrultusunda ilk soğurma tepesinin dikdörtgen boşluğun etrafındaki metal kısımlarda temel manyetik rezonanstan dolayı, ikinci soğurma tepesinin tornado manyetik alanının indüklemesinden dolayı, üçüncü soğurma tepesinin ise dikdörtgen boşluğun etrafındaki metal

kısımlarda üçüncü harmonik manyetik rezonanstaki dolaylı meydana geldiğini söylenmektedir. Sonuçlar benzetim ortamında ve deneysel olarak gösterilmiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizlerden bir tanesi de farklı geliş açılarının soğurmaya etkisidir. Bu amaçla benzetim ortamında geliş açısı 0°'den 50°'ye kademeli olarak artırılmıştır. Değişen geliş açılarında birinci soğurma tepesinde rezonans frekansı ve soğurma oranında kayda değer bir değişim görülmemiştir, ikinci tepe değerinde açı arttığında rezonans frekansı kaymakta ve soğurma oranında kayda değer bir değişim görülmemektedir, üçüncü tepe değerinde ise açı arttığında rezonans frekansında kayda değer bir değişim görülmezken soğurma oranında azalma görülmektedir. Çalışmada yapılan bir diğer analiz ise dielektrik malzeme kalınlığının soğurmaya etkisidir. Dielektrik malzeme kalınlığı kademeli olarak artırıldığında; birinci soğurma tepesinin soğurma oranı %98,96'dan %82,6'ya düşerken, ikinci soğurma tepesinin soğurma oranı %24'den %99,9'a yükseldiği söylenmektedir. Çalışmada yapılan analizler ve deney ortamında yapılan ölçümlerin hepsinin mikrodalga bölgesinde yapılmasının yanında, çalışmanın sonunda tasarlanan soğurucu Terahertz bölgesine ölçeklenerek orada da üç bantta çalışan bir soğurucu elde edilmiştir.

2.2.1.2. Dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi

Metamalzeme soğurucu üzerine gelen bir elektromanyetik dalganın, soğurucu üzerinde soğurularak ısı ya da ışığa dönüştüğü bilinmektedir. Literatürde yaygın olarak kabul edilen senaryo; metamalzeme soğurucularda soğurmaya artırmak amacıyla iki farklı ısı üretimi vardır. Bunlara ohmik kayıplar ile ısının metal kısımda üretilmesi ve dielektrik kayıplar ile ısının dielektrik malzeme üzerinde üretilmesidir. Metal, dielektrik ve metal olmak üzere üç katmandan oluşan bir soğurucu için metal kısımdaki levha direncinin artması ohmik kayıpları artırmaktadır (Raynolds vd., 2003; Landy vd., 2008; Tuong vd., 2013). Metamalzeme soğurucularda rezonans frekansında, etkin elektriksel geçirgenliğin $\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) + j\varepsilon''(\omega)$ ve manyetik geçirgenliğin $\mu(\omega) = \mu'(\omega) + j\mu''(\omega)$ gerçel kısmı serbest uzay ile empedans uyumunu sağlamak için kullanılırken, sanal kısmı ise kayıp faktörünü ayarlamakta kullanılmaktadır. Yani dielektrik malzemenin kayıp tanjant değerinin artması kayıp faktörünün

artmasını dolayısıyla soğurmanın artmasını sağlamaktadır (Landy vd., 2008; Tuong vd., 2013).

Literatürdeki bu yaygın senaryonun aksine, çalışmalar dikkatli şekilde incelendiğinde dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi konusunda ortak vargı bulunmadığı görülmektedir. Kimi çalışmalarda dielektrik malzeme kaybının artırılmasının soğurmayı artırdığı, kimi çalışmalarda soğurmayı azalttığı, kimi çalışmalarda ise soğurmaya etkisinin olmadığı söylenmektedir. Bunun sebebi; dielektrik malzeme kaybı değişimi sadece soğurucunun kaybını etkilemeyip soğurucu yapısının empedansını da etkilemesidir. Bilindiği üzere soğurucu yapısının empedansı ile serbest uzay empedansının uyumu sağlandığı durumda maksimum seviyede soğurma elde edilmektedir. Sonuç olarak kayıp miktarının artması ya da azalması soğurma oranını kesin olarak artırır ya da azaltır demek yanlış bir yorum olacaktır. Literatürde bulunan dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi konusundaki belli başlı birkaç çalışmaya bakacak olursak:

Tuong vd. (2013), kare şeklinde bir metamalzeme soğurucu tasarlanmıştır. Tasarlanan bu yapı en altta tamamı metal kaplı toprak düzlemi, üstünde dielektrik katman ve en üstte ise metalden oluşan rezonatörden oluşmaktadır. Tasarlanmış oldukları metamalzeme soğurucu 16 GHz'de çalışmaktadır. Çalışmada ohmik ve dielektrik olmak üzere iki tane kayıptan bahsetmekte ve bu kayıpların artması soğurmayı artırdığı söylemektedir. Hatta bu kayıpları artırarak %100 oranında soğurma elde edildiğinden bahsedilmiştir. Bu kayıplardan ilki olan ohmik kayıplar metal yüzeylerdeki dirençten kaynaklanmaktadır. İkincisi ise dielektrik kayıplardır ki o dielektrik malzemenin kayıp tanjantı etkisiyle dielektrik malzemedeki gerçekleşir. Çalışmada metal katmanın kalınlığı 10 nm'den 50 nm'ye kadar artırılmıştır. Metal kalınlığının artırılması ohmik kayıpların ve etkin yüzey empedansının azalmasına dolayısıyla soğurmanın azalmasına sebep olmaktadır. Bir diğer çalışma ise dielektrik malzemenin kayıp tanjant değeri 0'dan 0,09'a kadar kademeli olarak artırılmıştır. Analizler doğrultusunda kayıp tanjant değerinin artması soğurmayı artırdığı söylenmektedir. Çalışmada gerçekleştirilen tüm analizler benzetim ortamında

gerçekleştirilmiştir. Çalışma tasarlanan soğurucunun TE ve TM kutuplanmalar için aynı sonuçları verdiği gösterilerek tamamlanmıştır.

Hu vd. (2013), Terahertz bölgesinde, kutuplanmadan bağımsız çok bantta çalışan bir metamalzeme soğurucu tasarımı gerçekleştirmiştir. 0,68 THz, 1,27 THz, 2,21 THz ve 3,05 THz'de sırasıyla %98, %97, %98 ve %97 oranında soğurma elde etmişlerdir. Soğurucu en altta toprak düzlemi, üzerinde dielektrik katman, onun üstünde metal katman, üstünde dielektrik katman ve en üstte de tekrar metal katmandan oluşmaktadır. Çalışma benzetim ortamında elde edilen sonuçlar teorik olarak desteklenmiştir. Çalışmada ohmik ve dielektrik kayıpların etkisini gözlemlemek amacıyla dört farklı senaryo üzerinde durulmuştur. Bunlardan ilki kayıplı metal ve kayıplı polimer, ikincisi kayıplı metal ve kayıpsız polimer, üçüncüsü mükemmel elektrik iletken (PEC) metal ve kayıplı polimer, dördüncüsü ise (PEC) ve kayıpsız polimerdir. Benzetim ortamında gerçekleştirilen analizler doğrultusunda; ohmik kayıpların artması soğurmayı artırdığı ayrıca kayıplı metalin kayıplı polimere oranla soğurmada daha etkili olduğu söylenmektedir. Bir diğer analiz ise PEC ve kayıpsız polimer durumunda soğurma gerçekleşmediğidir. Çalışmada ayrıca dielektrik malzemenin elektriksel geçirgenliğinin gerçel kısmı sabit tutularak sanal kısmı değiştirilmiştir. Sanal kısım artırıldığında diğer soğurma tepelerinde kayda değer bir değişim yokken birinci soğurma tepesi için soğurma azalmış. Buradan yola çıkarak dielektrik kayıpların etkisi diğer üç yüksek frekans soğurma tepesine göre birinci soğurma tepesinde daha etkili olduğu söylenmektedir. Çalışma tasarım parametrelerinin ve gelen elektromanyetik dalganın geliş açısının soğurmaya etkisi üzerinden analizler gerçekleştirilerek tamamlanmıştır.

Zhang vd. (2012), tek ve çift bantta çalışan bir metamalzeme soğurucu tasarlamıştır. Çalışmayı mikrodalga frekans bölgesinde gerçekleştirmişlerdir. Soğurucunun tek veya çift bantta çalışması kısa devre hattı ile belirlenmektedir. Çalışmada sonuçlar benzetim ortamında ve deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Tek bantta çalışan soğurucu için 8,65 GHz'de %99,74, çift bantta çalışan soğurucu için 8,525 GHz ve 9,1 GHz için sırasıyla %99,75 ve %97,25 oranında soğurma elde edilmiştir. Çalışmada tasarlanan soğurucunun numerik analizleri için eşdeğer

devresi verilmektedir. Çalışmada gerçekleştirilen analizlerden bir tanesi de dielektrik malzeme kayıp tanjantının soğurmaya etkisidir. Kayıp tanjant değeri 0'dan 0,1'e kadar kademeli olarak artırılmıştır. Analizler doğrultusunda dielektrik malzeme kaybının artması soğurmaya azalttığı söylenmektedir. Çalışmada son olarak gelen elektromanyetik dalganın farklı geliş açılarında, TE ve TM kutuplanma altında tek ve çift bantta çalışan soğurucu için soğurmaya etkisi incelenmiştir.

Pan vd. (2017), Terahertz bölgesinde çalışan geniş bantlı bir soğurucu tasarımı gerçekleştirmiştir. Soğurucu yapısı; iç içe geçmiş iki tane halka ayırık altında dielektrik ve en altta ise toprak düzlemden oluşmaktadır. Çalışmadaki tüm sonuçlar benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. Normal uyarım altında 0,85 THz'den 1,926 THz'e kadar %90 üzerinde bir soğurma gözlenmektedir. Çalışmada maksimum soğurma elde etmek için serbest uzay ile empedans uyumunun sağlanması gerektiği söylenmiştir ve bu bağlamda benzetim ortamında tasarlanan yapının elektriksel (ϵ) ve manyetik geçirgenliği (μ) hesaplanmıştır. $z = \sqrt{\mu/\epsilon}$ denklemi kullanılarak z 'nin 1 olduğu frekans değerlerinde maksimum soğurma olduğu gösterilmektedir. Ayrıca tasarlanan yapının TE ve TM kutuplanmalarından bağımsız olduğu söylenmektedir. Çalışmada dielektrik malzemenin kaybının soğurmaya etkisini analiz etmek amacıyla dielektrik malzeme kayıplı ve kayıpsız seçilerek benzetimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analizler doğrultusunda dielektrik malzemenin kayıplı ve kayıpsız olmasının soğurmaya kayda değer bir etkisinin olmadığı söylenmektedir. Çalışmada son olarak tasarlanan yapı mikrodalga frekans bölgesine ölçeklenerek aynı yapı ile farklı frekans bölgelerinde geniş bantlı soğurma elde edilebileceği gösterilmiştir.

Köse ve Ekmekçi (2018), mikrodalga frekans bölgesinde çalışan, kare şeklinde bir metamalzeme tabanlı soğurucu yapısı tasarlanmıştır. Tasarlanan soğurucu yapısı metal rezonatör katman, dielektrik malzeme ve metal toprak düzlem olmak üzere üç katmandan oluşmaktadır. Çalışmada dielektrik malzeme özelliğinin soğurma oranına etkisi ele alınmıştır. Bu bağlamda ilk olarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzeme kalınlı hariç tüm parametreler sabit tutulmuştur.

Dielektrik malzeme kalınlı S-bant için 0,2 mm'den 3 mm'ye, X-bant için ise 0,1 mm'den 1 mm'ye kademeli olarak değiştirilerek soğurma oranına etkisi incelenmektedir. Analizler sonucunda görölmektedir ki dielektrik malzeme kalınlığının artması soğurmayı belli bir noktaya kadar artırırken bu noktadan sonra kalınlık artsa bile soğurma oranı azalmaktadır. Benzer bir analiz dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisini incelemek amacıyla da gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda dielektrik malzeme kaybı hariç tüm parametreler sabit tutulmuş ve kayıp değeri S ve X-bant için de 0'dan 0,04'e kadar kademeli olarak artırılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde dielektrik malzeme kaybının artması soğurmayı belli bir noktaya kadar artırırken bu noktadan sonra kayıp artsa bile soğurma oranının azaldığı gözlenmektedir. Hem X-bant hem de S-bantta benzer sonuçların elde edilmesi öne atılan hipotezin soğurucunun çalışma frekansına bağlı olmadığını göstermektedir.

3. METAMALZEME TABANLI REZONATÖRLER İLE SOĞURUCU TASARIMI, ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

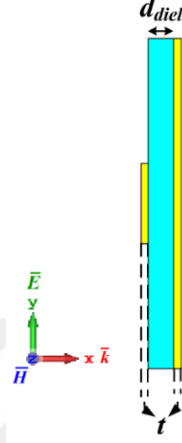
Bu bölümde tez çalışmaları sırasında tasarlanan ve üretimi gerçekleştirilen metamalzeme soğurucu yapılarından bahsedilmiştir. Ayrıca tasarım ve üretimleri gerçekleştirilen yapıların karakterizasyonunda kullanılan benzetim ve ölçüm düzeneği hakkında da bilgiler verilmiştir.

3.1. Soğurucu Tasarımı

Bu tez kapsamında öne atılan hipotezin soğurucu çalışma frekansına bağlı olmadığını göstermek amacıyla; S-bant (2 GHz – 4 GHz), X-bant (8 GHz – 12 GHz) ve Terahertz bölgesi (300 GHz – 3 THz) olmak üzere üç farklı frekans bölgesinde metamalzeme soğurucu tasarımları gerçekleştirilmiştir. Öne atılan hipotezin rezonatör türüne bağlı olmadığını göstermek amacıyla ise; her bir frekans bölgesi için iki farklı rezonatör tabanlı metamalzeme soğurucu yapısı tasarlanmıştır. Bunlardan kapalı halka rezonatörde (KHR) dipol rezonans gözlenirken, ayrık halka rezonatörde (AHR) ise *LC* rezonans görülmektedir.

Bir dielektrik malzeme ile ayrılmış iki metal tabakadan oluşan soğurucu yapıları literatürde sandviç tipi olarak adlandırılmakta ve bu tasarım çeşidi literatürde yaygın olarak görülmektedir (Engheta, 2002; Landy vd., 2008; Tao vd., 2008; Q. Y. Wen vd., 2009; Hao vd., 2010; Liu vd., 2010; Ye vd., 2010; Luo vd., 2011; Shen vd., 2011; Chen, 2012; Mattiucci vd., 2012; Shen vd., 2012; Watts vd., 2012; Zhong vd., 2012; Cheng vd., 2013; F. Hu vd., 2013; M. H. Li vd., 2013; Nie vd., 2013; Tuong vd., 2013; Wanghuang vd., 2013; Kocer vd., 2015; An vd., 2016; Ekmekci ve Demir, 2016; D. Hu vd., 2016; Liao ve Zhao, 2016; Xiong vd., 2016; Al-Badri vd., 2017; Astorino vd., 2017a; Bagci ve Medina, 2017; Gong vd., 2017; Kim vd., 2017; Pan vd., 2017; Duan vd., 2018; Köse ve Ekmekçi, 2018). Teorik bilgiler ve kaynak özetleri bölümünde de bahsedildiği gibi, maksimum seviyede soğurma elde etmek için gelen elektromanyetik dalga soğurma yüzeyine temas ettiği anda yansıma ve iletim miktarlarının sıfır olması gerekmektedir. Sandviç tipi soğurucu tasarımlarımda toprak düzlemin tamamen metal ile kaplı olması iletim

miktarının sıfır olmasını sağlamaktadır. Bundan dolayı bu tez kapsamında farklı frekans bölgelerinde tasarlanan tüm soğurucular sandviç tipinde tasarlanmıştır. Şekil 3.1’de sandviç tipi soğurucuların genel bir şematik görünümü gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Sandviç tipi soğurucuların genel bir şematik görünümü.

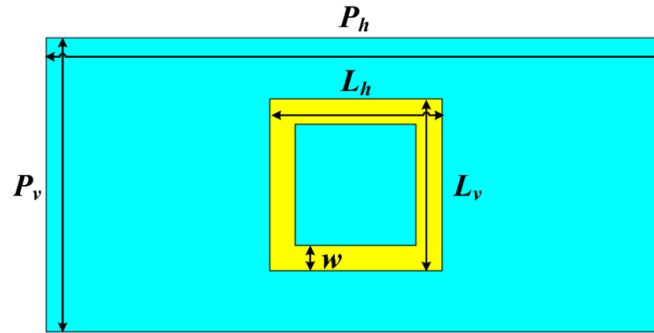
Şekil 3.1’de sarı renkler metal kısımları simgelemekte ve metal kalınlığı t ile, turkuaz renkli kısım ise dielektrik malzemeyi simgelemekte ve dielektrik malzeme kalınlığı ise d_{diel} olarak ifade edilmektedir.

Bu tez kapsamında dielektrik malzeme özelliğinin soğurma oranına etkisi konusunda gerçekleştirilen ilk nümerik çalışmalar Şekil 3.2’de tasarım parametreleri verilen KHR yapısı için, S ve X-bantlarda gerçekleştirilmiş ve ilk sonuçlar URSİ-TÜRKİYE 2018’de sözlü sunum olarak sunulmuştur (Köse ve Ekmekçi, 2018). Bu çalışmada S ve X-bantlarda dielektrik sabiti $\epsilon_r = 3$ olan bir taban malzemesi kullanılmıştır. Kayıp analizleri için taban malzemesi kalınlığı sabit tutulup; S-bant için 1 mm ve X-bant için 0,508 mm seçilirken dielektrik kayıp tanjantı her iki frekans bandında da 0 ile 0,04 arasında yedi farklı değer için incelenmiştir. Benzer şekilde dielektrik taban malzemesi kalınlığı analizlerinde, kayıp tanjantı 0,02’de sabit tutulmuş ve taban malzemesi kalınlığı; S-bant için 0,2 mm ila 3 mm ve X-bant için ise 0,1 mm ila 1 mm aralıklarında beş farklı değer için incelenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda; dielektrik malzeme kalınlığının artması soğurma oranını maksimum değer alana kadar artırırken, bu noktadan sonra azaltmaktadır. Benzer şekilde dielektrik malzeme kaybının artması soğurma

oranını maksimum olduğu noktaya kadar artırırken, bu noktadan sonra azaltmaktadır (Köse ve Ekmekçi, 2018). Bu sonuçlar tez çalışmasının ilk bulguları olup elde edilen vargı üzerine tez çalışması detaylı olarak sürdürülmüştür.

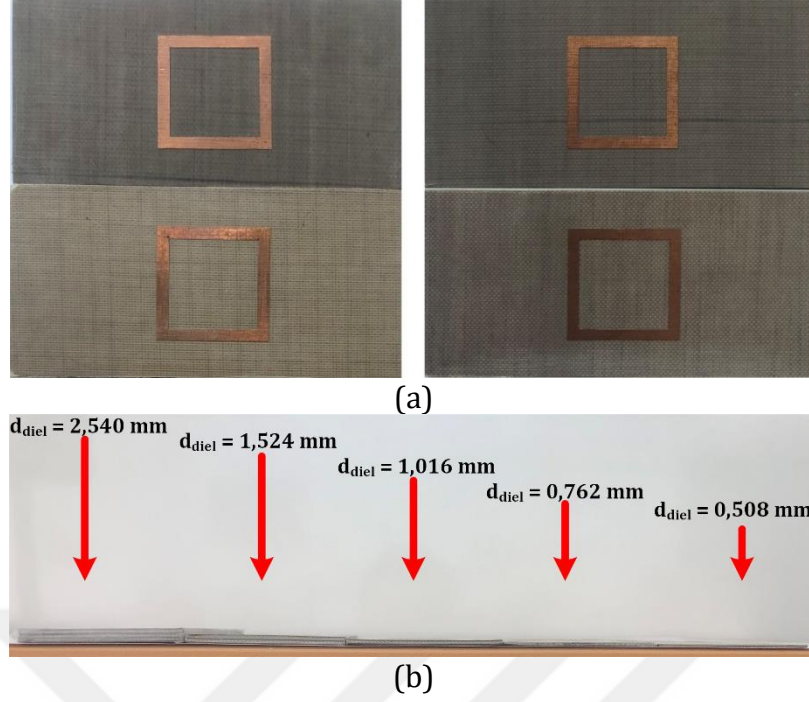
Tez kapsamında S-bantta tasarlanan tüm yapılar için dielektrik taban malzemesi boyutları; $P_v = 34,036$ mm, $P_h = 72$ mm olarak belirlenmiştir. Ayrıca metal yüzey olarak iletkenliği $\sigma_{cu} = 58 \times 10^6$ S/m, kalınlığı $t = 0,035$ mm olan bakır kullanılmıştır. Dielektrik malzemenin kalınlığının soğurma oranına etkisi üzerinde gerçekleştirilen analizlerinde, dielektrik malzemenin göreceli dielektrik sabiti 10 GHz'de $\epsilon_r = 3$, kayıp tanjantı $\tan\delta = 0,002$ olarak sabit tutulmuştur. Dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi üzerinde gerçekleştirilen analizlerinde ise; göreceli dielektrik sabiti 10 GHz'de $\epsilon_r = 3$ sabit kalarak üç farklı dielektrik malzeme kalınlığı için de analizler gerçekleştirilmiştir.

Tasarımlarda KHR yapısının tasarım parametreleri ve ön yüzden şematik görünümü Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Burada rezonatör yapısını oluşturan büyüklüklerden halkanın yatay boyutu ve dikey boyutu sırasıyla; $L_h = 20$, $L_v = 20,3$ mm, halkanın kalınlığı ise $w = 2,1$ mm'dir.



Şekil 3.2. S-bantta tasarlanan KHR yapısının tasarım parametreleri ve ön yüzden şematik görünümü.

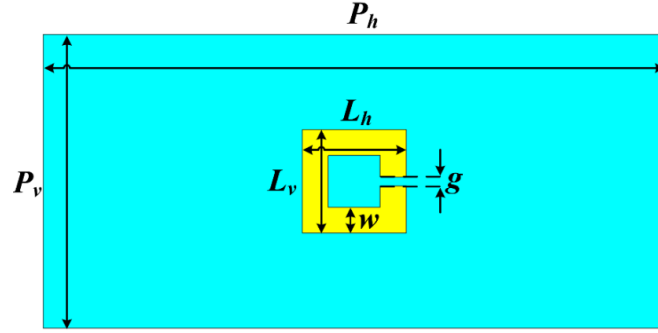
Farklı dielektrik taban malzeme kalınlığına sahip (0,508 mm, 0,762 mm, 1,016 mm ve 1,524 mm), S-bantta üretilen tüm KHR yapılarının üstten çekilmiş bir fotoğrafı Şekil 3.3 (a)'da, yandan çekilmiş bir fotoğrafı ise Şekil 3.3 (b)'de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. S-bantta üretilen tüm KHR yapılarının a) üstten çekilmiş fotoğrafı, b) yandan çekilmiş fotoğrafı.

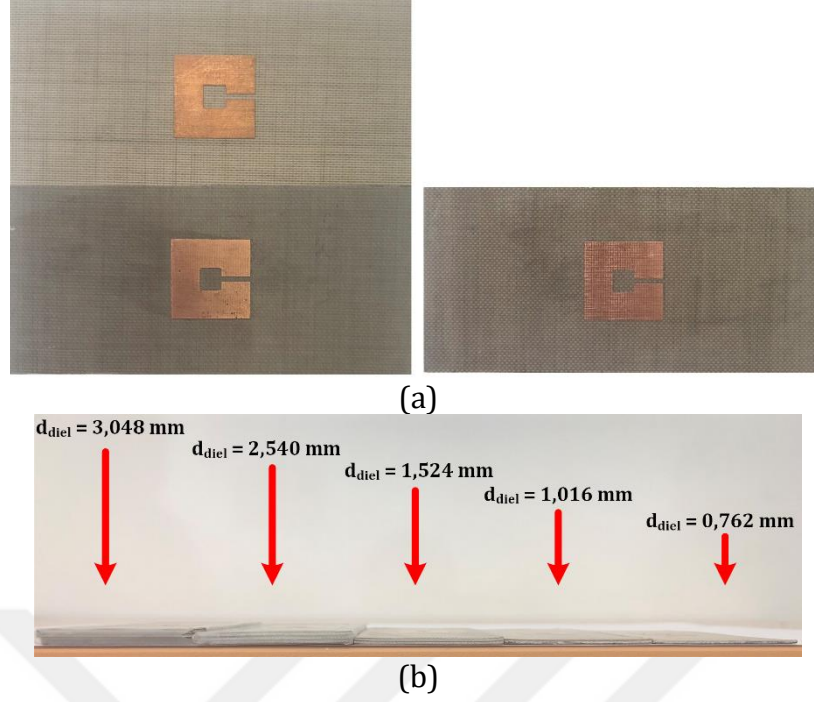
Şekil 3.3 (b)'den de görüldüğü üzere 2,540 mm kalınlığına sahip soğurucu yapısı; 1,524 mm kalınlığına sahip alt yüzü tamamen metal kaplı diğer yüzü ise dielektrik olan malzeme üzerine 1,016 mm kalınlığına sahip üst yüzü rezonatör diğer yüzü ise dielektrik olan malzeme konularak elde edilmiştir. Bu iki malzeme bant yardımıyla birbirine yapıştırılmıştır. Burada bantın farklı bir dielektrik sabitine sahip olduğunu düşünürsek sağlıklı bir yöntem olamadığı düşünülebilir. Fakat bant kullanmanın kayda değer bir etkisinin olmadığı ölçüm sonuçlarının benzetim sonuçlarına yakın olması sonucunda anlaşılmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, elektromanyetik dalganın yoğun olarak geldiği bölgelerde bant miktarının az olmasıdır.

AHR yapısının tasarım parametreleri ve ön yüzden şematik görünümü Şekil 3.4'de gösterilmektedir. Burada ayırık halka rezonatör yapısının yatay boyutu ve dikey boyutu sırasıyla; $L_h = 14$ mm ve $L_v = 14,2$ mm, halkanın ayrığı $g = 0,95$ mm ve halkanın kalınlığı ise $w = 5,1$ mm'dir.



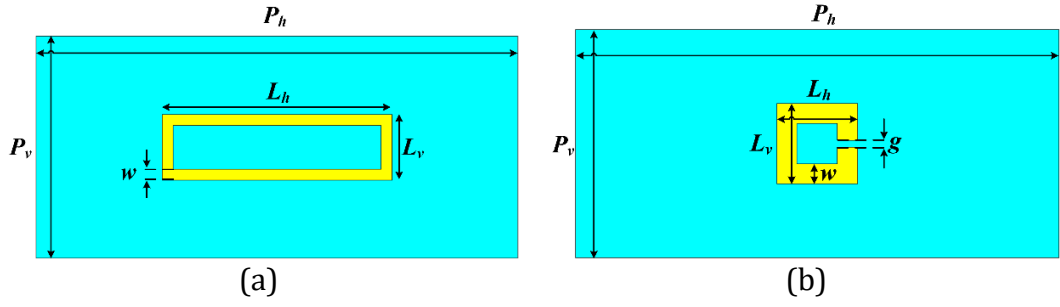
Şekil 3.4. S-bantta tasarlanan AHR yapısının tasarım parametreleri ve ön yüzden şematik görünümü.

Farklı dielektrik taban malzeme kalınlığına sahip (0,762 mm, 1,016 mm ve 1,524 mm), S-bantta üretilen tüm AHR yapılarının üstten çekilmiş bir fotoğrafı Şekil 3.5 (a)'da, yandan çekilmiş bir fotoğrafı ise Şekil 3.5 (b)'de gösterilmektedir. Şekil 3.5 (b)'de gösterilen 2,540 mm ve 3,048 mm kalınlıklarına sahip soğurucu yapıları KHR yapısında olduğu gibi farklı kalınlıklara sahip dielektrik malzemeler kullanılarak elde edilmiştir. Burada 2,540 mm kalınlığına sahip soğurucu yapısı; altta 1,524 mm kalınlığa üstte ise 1,016 mm kalınlığa sahip dielektrik malzeme kullanılarak elde edilmiştir. 3,048 mm kalınlığa sahip soğurucu yapısı ise; en altta 1,524 mm kalınlığa sahip altı tamamen metal kaplı bir yapı, onun üstünde 0,524 mm kalınlığa sahip iki tarafı da metalden arındırılmış bir dielektrik malzeme ve en üstte ise bir yüzü metal rezonatör diğer yüzü dielektrik olan malzeme üst üste konularak elde edilmiştir. Ölçüm ve benzetim sonuçlarının tutarlı olmasından yola çıkılarak KHR için yapılan benzer yorumlar burada da yapılabilir.



Şekil 3.5. S-bant için üretilen tüm AHR yapılarının a) üstten çekilmiş fotoğrafı, b) yandan çekilmiş fotoğrafı.

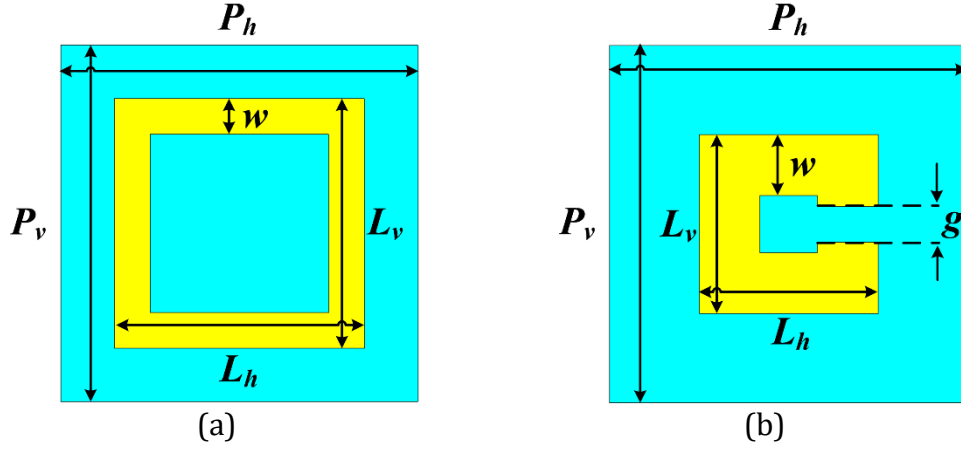
S-bantta olduğu gibi X-bantta da tasarımı gerçekleştirilen tüm yapılar için dielektrik taban malzemesi boyutları; $P_v = 10,16$ mm, $P_h = 22$ mm olarak belirlenmiştir. Ayrıca metal yüzey olarak iletkenliği $\sigma_{cu} = 58 \times 10^6$ S/m, kalınlığı $t = 0,035$ mm olan bakır kullanılmıştır. Dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisi üzerinde gerçekleştirilen analizlerinde S-bant analizlerinin gerçekleştirildiği gibi, dielektrik malzemenin göreceli dielektrik sabiti 10 GHz'de $\epsilon_r = 3$, kayıp tanjantı $\tan\delta = 0,002$ olarak sabit tutulmuştur. Dielektrik malzemenin kaybının soğurma oranına etkisi üzerinde gerçekleştirilen analizlerinde ise; göreceli dielektrik sabiti 10 GHz'de $\epsilon_r = 3$ sabit kalarak üç farklı dielektrik malzeme kalınlığı için de analizler gerçekleştirilmiştir. X-bant tasarımları için KHR yapısının tasarım parametreleri ve ön yüzden şematik görünümü Şekil 3.6 (a)'da gösterilmektedir. Burada rezonatör yapısını oluşturan büyüklüklerden halkanın yatay boyutu $L_h = 10,5$, dikey boyutu $L_v = 3$ mm, halkanın kalınlığı ise $w = 0,5$ mm'dir. AHR yapısının tasarım parametreleri ve ön yüzden şematik görünümü ise Şekil 3.6 (b)'de gösterilmektedir. Burada ayırık halka rezonatör yapısını yatay boyutu ile dikey boyutu birbirine eşit ve $L_h = L_v = 3,5$ mm, halkanın ayrığı $g = 0,5$ mm ve halkanın kalınlığı ise $w = 0,5$ mm'dir.



Şekil 3.6. X-bantta tasarlanan a) KHR, b) AHR yapısının tasarım parametreleri ve ön yüzden şematik görünümü.

Tez kapsamında S ve X-bantta tasarlanan AHR ve KHR yapıları Terahertz bölgesine uygun olarak ölçeklenmiştir. Tasarlanan tüm yapılar için dielektrik taban malzemesi boyutları; $P_v = P_h = 100 \mu\text{m}$ olarak belirlenmiştir. Ayrıca metal yüzey olarak iletkenliği $\sigma_{\text{au}} = 4,561 \times 10^7 \text{ S/m}$, kalınlığı $t = 0,2 \mu\text{m}$ olan altın kullanılmıştır. Dielektrik malzemenin kalınlığının soğurma oranına etkisi üzerinde gerçekleştirilen analizlerinde, dielektrik malzemenin göreceli dielektrik sabiti 0,8 THz'de $\epsilon_r = 3,1$, malzemenin kayıp tanjantı $\tan\delta = 0,007$ olacak şekilde sabit tutulmuştur. S ve X-bantta olduğu gibi burada da dielektrik malzemenin kaybının soğurma oranına etkisi üzerinde gerçekleştirilen analizlerinde ise; göreceli dielektrik sabiti 0,8 THz'de $\epsilon_r = 3,1$ sabit kalarak üç farklı dielektrik malzeme kalınlığı için analizler gerçekleştirilmiştir.

Terahertz bölgesinde tasarlanan yapılardan KHR birim hücrelerine ait tasarım parametreleri ve ön yüzden şematik görünümü Şekil 3.7 (a)'da gösterilmektedir. Burada rezonatör yapısını oluşturan büyüklüklerden halkanın yatay boyutu ile dikey boyutu birbirine eşit ve $L_h = L_v = 70 \mu\text{m}$, halkanın kalınlığı ise $w = 10 \mu\text{m}$ 'dir. AHR birim hücrelerinin tasarım parametreleri ve ön yüzden şematik görünümü Şekil 3.7 (b)'de gösterilmektedir. Burada ayrık halka rezonatör yapısını yatay boyutu ile dikey boyutu birbirine eşit ve $L_h = L_v = 50 \mu\text{m}$, halkanın ayrığı $g = 10 \mu\text{m}$ ve halkanın kalınlığı ise $w = 17 \mu\text{m}$ 'dir.



Şekil 3.7. Terahertz bölgesinde tasarlanan a) KHR ve b) AHR birim hücrelerinin tasarım parametreleri ve ön yüzden şematik görünüşleri.

3.2. Metamalzeme Tabanlı Soğurucu Üretimi

Tasarımları gerçekleştirilen soğurucuların üretimleri için kimyasal aşındırma tekniği kullanılmıştır. Bu yöntemde ilk olarak tasarlanan yapı; bir çizim programında ölçekli olarak çizilir ve çözünürlüğü yüksek bir lazer yazıcı ile transfer kağıdına çıktı alınır. Transfer kağıdındaki mürekkebin temiz bir bakır plakete ısı (ütü ya da farklı bir cihaz kullanılarak) ile transferi sağlanır. 4 ölçek HCl ve 1 ölçek H₂O₂ ile hazırlanan kimyasal çözeltiye atılan bakır plakette boya haricindeki bakırlar erimektedir. Son olarak ise bakır üzerindeki boyalar aseton yardımıyla temizlenmektedir.

Bu yöntemin maliyetinin düşük olması ve bir altyapı istememesi bir avantajdır. Mikrodalga bölgesindeki yapıların boyutları genellikle milimetre mertebesinde olmakta ve çok küçük üretim hataları yapının farklı frekansta çalışmasına ve soğurma oranlarının farklılık göstermesine neden olmaktadır. Bu yüzden yüksek frekanslar için kimyasal aşındırma tekniğinin en büyük dezavantajı üretim hassasiyetinin düşük olmasıdır.

3.3. Metamalzeme Tabanlı Soğurucu Karakterizasyonu

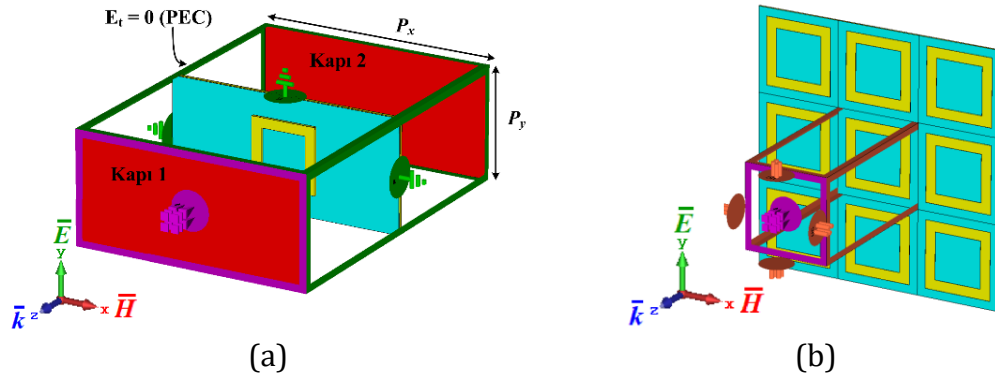
Literatür incelendiğinde, farklı geometrilere metamalzeme soğurucu tasarımlarına rastlanmaktadır. Belirli geometrilerin haricinde çoğu geometri için

analitik formülasyona rastlanmamaktadır. Tasarlanan metamalzeme soğurucu yapıları genellikle karmaşık geometrilere sahip olduğu için benzetim programları soğurucu tasarımında ve sonuçlarının analizinde önemli bir yere sahiptir. Bu sebepten dolayı tez kapsamında önerilen S-bant, X-bant ve Terahertz bölgesi için soğurucu yapılarının tasarımı ve bu yapıların benzetimleri CST Microwave Studio (MWS) ile gerçekleştirilmiştir. CST MWS, tam dalga elektromanyetik çözümleyici bir yazılımdır (CST, 1992). CST MWS programında nümerik olarak analiz edilen yapılardan S-bantta olanların üretimleri kimyasal aşındırma yöntemi ile gerçekleştirilmiş ve Agilent marka FieldFox N9926A model el tipi vektör ağ çözümleyici ve aksesuarları kullanılarak ölçümleri gerçekleştirilmiştir. X-bant ve Terahertz bölgesinde tasarlanan yapıların üretim ve ölçümleri ilerleyen çalışmalarda düşünülmektedir, bu tez kapsamında gerçekleştirilememiştir.

3.3.1. Benzetim düzeneği

CST MWS içerisinde çeşitli nümerik çözümleyiciler olmasına rağmen rezonatör tabanlı metamalzeme soğurucu benzetimlerinde en çok kullanılan çözümleyiciler zaman bölgesi çözümleyici ve frekans bölgesi çözümleyicidir. Özellikle rezonatör yapıların kullanıldığı modellerde sonlu elemanlar yöntemine dayalı frekans bölgesi çözümleyicinin doğruluk payı yüksektir (CST, 1992). Bu tez kapsamında CST MWS programında gerçekleştirilen tüm benzetimlerde frekans bölgesi çözümleyicisi kullanılmıştır.

Bu tez kapsamında, S-bant, X-bant ve Terahertz bölgesi için iki farklı benzetim düzeneği kullanılmıştır. S-bant ve X-bant için tasarlanan soğurucuların benzetim düzeneği; dikdörtgen kesitli dalga kılavuzuna yerleştirilmiş soğurucu yöntemi ile elde edilmiş benzetim düzeneği, Terahertz bölgesinde tasarlanan soğurucu yapılar için; birim hücre sınır koşulları ile düzlemsel olarak periyodik hale getirildiği benzetim düzeneğidir. Bu düzenekler için şematik görünümmler sırasıyla Şekil 3.8 (a) ve Şekil 3.8 (b)'de gösterilmektedir.



Şekil 3.8. a) Dikdörtgen dalga kılavuzu, b) birim hücre sınır koşulları kullanılarak elde edilen benzetim düzeneklerinin şematik görünümü.

Dikdörtgen dalga kılavuzları için standartlar mevcuttur. Süleyman Demirel Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü bünyesinde S ve X- bant için dalga kılavuzları bulunmaktadır. Bundan dolayı tasarımlar S ve X-bantta gerçekleştirilmiştir. S-bant için EIA-Electronic Industries Alliance standardı WR284, X-bant için ise WR90 olarak anılan dalga kılavuzları mevcuttur. WR284 standardına göre dalga kılavuzu boyutları ($P_x \times P_y$) 72,136 mm \times 34,036 mm ve WR90 standardına göre 22,86 mm \times 10,16 mm'dir (Millimeter Wave Products Inc., 1989). İçi hava dolu (boş) WR284 ve WR90 dalga kılavuzları için boyut ve frekans bilgileri Çizelge 3.1'de verilmektedir. Tasarlanan tüm metamalzeme soğurucu yapılarının uyarımları temel modda (TE_{10}) yapılmıştır.

Şekil 3.8 (a)'da gösterilen CST MWS ortamında dikdörtgen dalga kılavuzu benzetim düzeneği; Çizelge 3.1'de verilen boyutlarda iki adet dalga kılavuzu portu kullanarak ve elektromanyetik dalga ilerleme yönüne dik temel düzlemlerde toplam dört adet $E_t = 0$ sınırı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

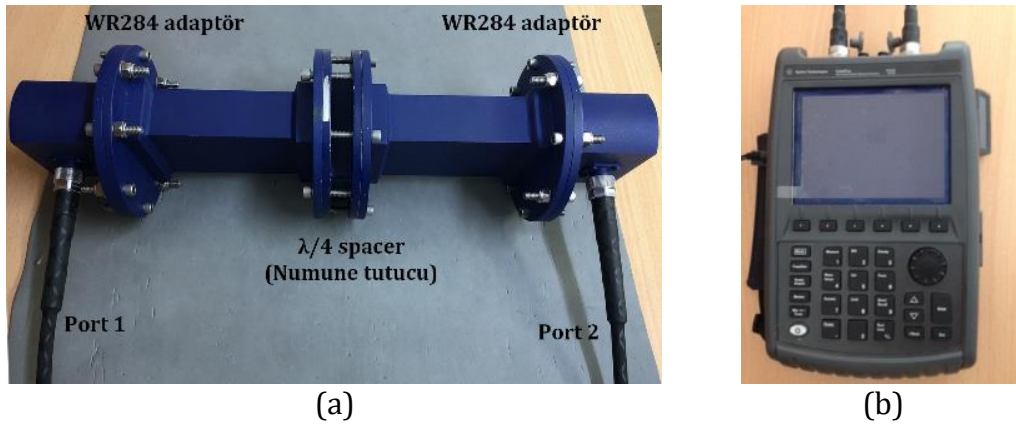
Çizelge 3.1. WR284 ve WR90 içi hava dolu dalga kılavuzları için boyut ve frekans bilgileri (Millimeter Wave Products Inc., 1989).

Frekans Bandı	EIA Standardı	Boyutlar (mm x mm)	En Düşük Mod Kesim Frekansı (GHz)	Bir Üst Mod Kesim Frekansı (GHz)	Frekans Aralığı (GHz)
S	WR284	72,136 \times 34,036	2,078	4,156	2,60-3,95
X	WR90	22,86 \times 10,16	6,557	13,114	8,20-12,40

Şekil 3.8 (b)'de gösterilen Terahertz deney düzeneğinde iletim karakteristiği genellikle dik girme durumu için elde edilebilmektedir. Bu tür düzenekler için düzlemsel periyodik yapılar tasarlanır ve elektromanyetik dalga dizi yüzeyine dik girer. Bu gibi bir deney düzeneğinin CST MWS ortamında gerçekleştirilmesinin hızlı ve kolay yolu birim hücre sınır koşullarının kullanılması yapıların ilk mod uyarımı için Floquet portlarla ilk modda beslenmesidir.

3.3.2. Deney düzeneği

Süleyman Demirel Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü bünyesinde; S-bant mikrodalga frekansı uygulamalarında kullanılmak üzere iki adet WR284 dikdörtgen kesitli dalga kılavuzu (Şekil 3.9 (a)), S-bant $\lambda/4$ numune tutucu ve Agilent marka FieldFox N9926A model el tipi vektör ağ çözümleyici (Şekil 3.6 (b)) bulunmaktadır. FieldFox N9926A, 30 kHz–14 GHz frekans aralıklarında karmaşık S-parametreleri ölçümlerini gerçekleştirebilmektedir. Yapılan ölçümlerin doğruluğunu artırmak amacıyla, yapılan ölçümlerden TRL (Thru-Reflect-Line) kalibrasyon tekniğiyle kalibre edilmiştir.



Şekil 3.9. a) S-bant dikdörtgen dalga kılavuzu, b) Agilent FieldFox N9926A el tipi vektör ağ çözümleyici.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI: METAMALZEME TABANLI REZONATÖRLERİN SOĞURMA MEKANİZMASININ İNCELENMESİ

Tezin bu bölümünde S-bant, X-bant ve Terahertz bölgesinde tasarlanan yapılar için elde edilen benzetim ve deneysel olarak elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Ayrıca dielektrik malzeme özelliklerinin soğurma oranına etkisi üzerinde gerçekleştirilen analiz sonuçları yine bu bölüm kapsamında yer almaktadır.

Bu bölümde elde edilen sonuçların hepsi ikinci bölümde anlatılan soğurma teorisine dayanarak hesaplanmaktadır. Nümerik olarak elde edilen benzetim sonuçları ve ağ çözümleyici yardımıyla elde edilen deneysel sonuçlar saçılma parametresi cinsindedir. İkinci bölümde bahsedildiği gibi; iki kapılı bir devrede, saçılma parametrelerinden $|S_{11}|^2$ giriş terminalindeki yansıyan güç miktarını, $|S_{21}|^2$ birinci kapıdan ikinci kapıya iletilen güç miktarını simgelemektedir. Buradan yola çıkarak soğurma oranı denklem (2.8)'de gösterildiği gibi yazılabilir.

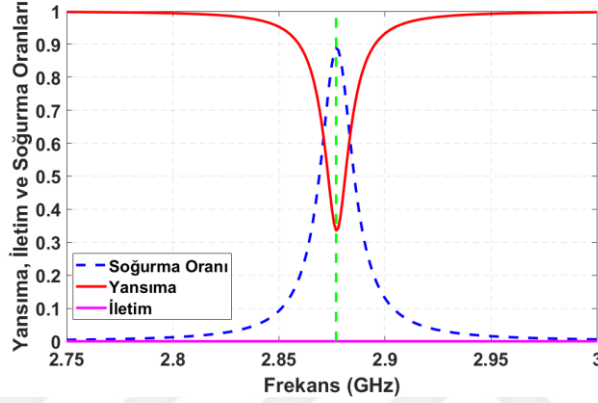
4.1. S-Bantta Çalışan Soğurucular

Bu tez kapsamında S-bant için bir önceki bölümde tasarım parametreleri ve şematik görünümleri verilen kapalı halka rezonatör (KHR) ve ayrık halka rezonatör (AHR) çalışılmıştır. Bunlardan çalışma frekanslarında KHR'de dipol rezonans gözlenirken, AHR soğurucu yapısında ise *LC* rezonans görülmektedir.

4.1.1. KHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı

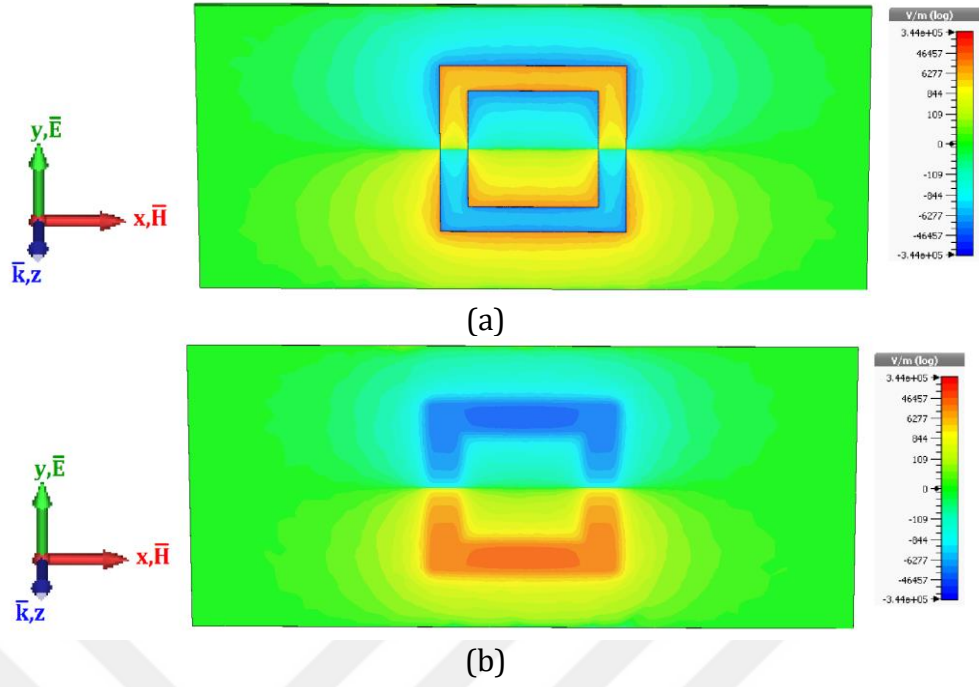
S-bant için, KHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısının soğurma mekanizmasını incelemek amacıyla bir soğurucu yapısı tasarlanmıştır. Tasarlanan bu soğurucu yapısı için maksimum soğurmanın gerçekleştirdiği rezonans frekansında (2,877 GHz), yansıma, iletim ve soğurma grafikleri Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Rezonans frekansında yansıma oranı 0,335, toprak düzlemi tamamen metal kaplı olduğu için iletim oranı 0 ve soğurma oranı ise 0,888'dir. Burada tasarlanan soğurucu yapısında, halkanın yatay boyutu ile dikey boyutu birbirine eşit ve $L_h = L_v = 20$ mm, halkanın kalınlığı ise $w = 2$ mm'dir.

Tasarımda; göreceli dielektrik sabiti 10 GHz'de $\epsilon_r = 3$ ve kayıp tanjantı $\tan\delta = 0,002$ ve dielektrik malzeme kalınlığı $d_{\text{diel}} = 0,508$ mm olan Arlon AD 300A kullanılmıştır. Kullanılan dielektrik taban malzemesi boyutları ise; $P_v = 34,036$ mm, $P_h = 72$ mm'dir. Verilen parametreler doğrultusunda tasarlanan KHR yapısının soğurma mekanizmasını anlamak amacıyla CST MWS ortamında elektrik alan ve yüzey akım dağılımları incelenmiştir.



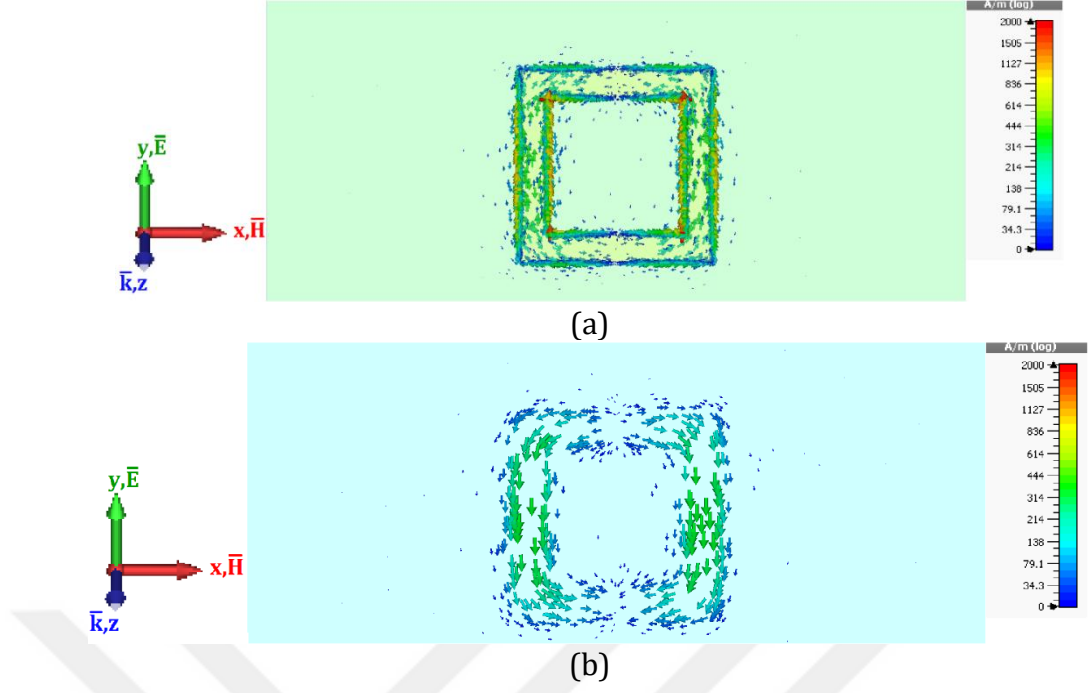
Şekil 4.1. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısının rezonans frekansında (2,877 GHz) yansıma, iletim ve soğurma oranları.

Şekil 4.2'de KHR yapısı kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için elektrik alan dağılımı gösterilmektedir. Aynı faz değerinde (0°) kaydedilen görüntülerde Şekil 4.2 (a)'da gösterilen halka üzerindeki elektrik alan dağılımı ile Şekil 4.2 (b)'de gösterilen toprak düzlem üzerindeki elektrik alan dağılımları birbirine zıt olduğu gözlenmektedir. Ayrıca Şekil 4.2 (a)'da bulunan halkanın alt kısmındaki elektrik alan dağılımı ile üst kısmındaki elektrik alan dağılımının da zıt yönde olduğu görülmektedir. Buradan yola çıkarak KHR üzerinde elektrik dipol rezonans olduğu söylenebilir (Ye vd., 2010; Luo vd., 2011; Hu vd., 2013; Ekmekci ve Demir, 2016).



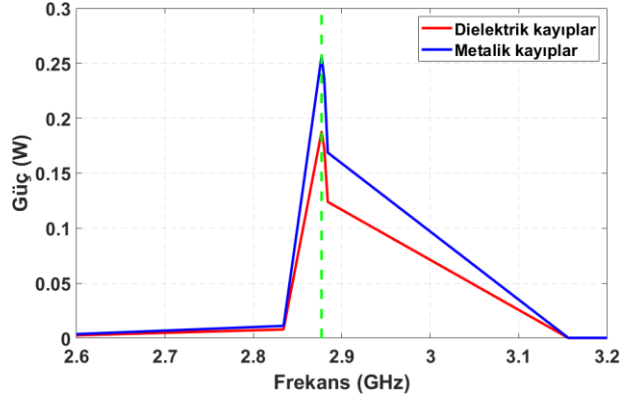
Şekil 4.2. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için elektrik alan dağılımının z bileşeni a) halka üzerinde, b) toprak düzleminde.

Elektrik dipol toprak düzlemi ile kuvvetli bir bağlaşım oluşturmaktadır. Bunun sonucu olarak kuvvetli bir manyetik rezonansa neden olan manyetik dipol oluşur (Luo vd., 2011; Cheng vd., 2013; Al-Badri vd., 2018). Oluşan manyetik rezonansı daha iyi gözlemlemek amacıyla Şekil 4.3'de aynı yapı ve rezonans frekansında akım dağılımları gösterilmektedir. Rezonans frekansında sağ ve sol kolda kuvvetli bir akım dağılımının olduğu gözlenmektedir. Bunlar elektrik dipolleri göstermektedir. Ayrıca Şekil 4.3 (a)'da gösterilen halka üzerindeki yüzey akım dağılımları yukarı doğru iken, Şekil 4.3 (b)'de gösterilen toprak düzlem üzerindeki yüzey akım dağılımları aşağı doğrudur. Birbirine zıt yöndeki akımlar kuvvetli bir manyetik dipol oluşturmaktadır (Li vd., 2006; Landy vd., 2008; Tao vd., 2008; Ye vd., 2010 Luo vd., 2011; Hu vd., 2013).



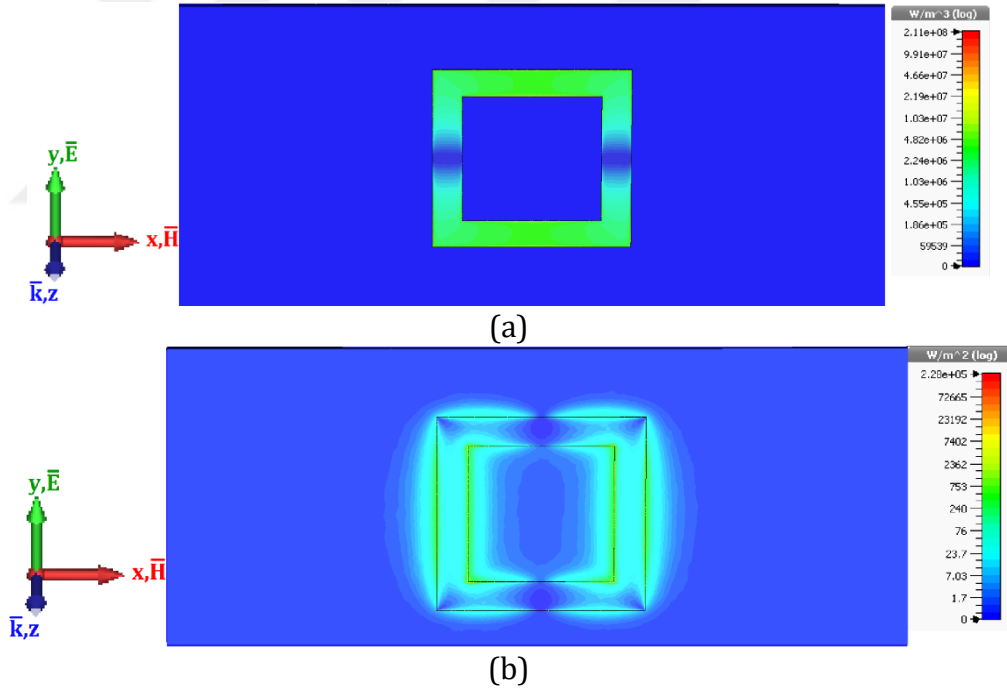
Şekil 4.3. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için yüzey akım dağılımı a) halka üzerinde, b) toprak düzleminde.

Soğurucu üzerine gelen elektromanyetik dalganın soğurma oranıyla orantılı olarak ısı ya da türevlerine dönüştüğünden ikinci bölüm kapsamında bahsedilmiştir. Soğurma oranı; soğurucuların metalik ve dielektrik kayıplarıyla ifade edilmektedir. KHR yapısı kullanılarak tasarlanan soğurucu için dielektrik ve metalik kayıplar Şekil 4.4’de gösterilmektedir. CST MWS programında birinci porttan basılan güç miktarı 0,5 W olarak belirtilmiştir. Maksimum soğurmanın gerçekleştiği rezonans frekansında (2,877 GHz) dielektrik kayıpların değeri 0,188 W, metalik kayıpların değerleri ise 0,256 W’dır. 0,056 W’lık bir güç ise portta harcanmıştır.



Şekil 4.4. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısına ait dielektrik ve metalik kayıp değerleri.

KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için son olarak kayıp güç yoğunluğu (Şekil 4.5 (a)) ve yüzey kayıp güç yoğunluğu (Şekil 4.5 (b)) incelenmiştir.



Şekil 4.5. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için a) kayıp güç yoğunluğu, b) yüzey kayıp güç yoğunluğu.

Şekil 4.5 (a)'da kaybolan güç yoğunluğu halkanın üst ve alt bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Şekil 4.2 (a)'da bulunan elektrik alan dağılımına bakılacak olunursa, benzer bölgelerde elektrik alan dağılımının yoğun olduğu görülmektedir. Literatür incelendiğinde bunun bir tesadüf olmadığını söyleyebiliriz.

(Kocer vd., 2015). Soğrulan güç yoğunluğu (P_{abs}) denklem 4.1'de ifade edilmiştir. Burada $|E|$ toplam elektrik alanı, ω açısal frekansı, $\text{Im}(\epsilon)$ dielektrik malzemenin elektriksel geçirgenliğinin sanal kısmını simgelemektedir.

$$P_{abs} = 1/2 \omega \text{Im}(\epsilon) |E|^2 \quad (4.1)$$

Şekil 4.5 (b)'de yüzeyde kaybolan güç yoğunluğu halkanın sağ ve sol bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Şekil 4.3 (a)'da bulunan yüzey akım dağılımlarına bakılacak olunursa benzer bölgelerde yüzey akım dağılımının yoğun olduğu görülebilir. Buradan yola çıkarak yüzey kayıp güç yoğunluğu ile manyetik alan dağılımının veya yüzey akım dağılımının ilişkili olduğu söylenebilir.

4.1.1.1. Dielektrik malzemenin göreceli elektriksel geçirgenliğinin (ϵ_r) soğurma oranına etkisi

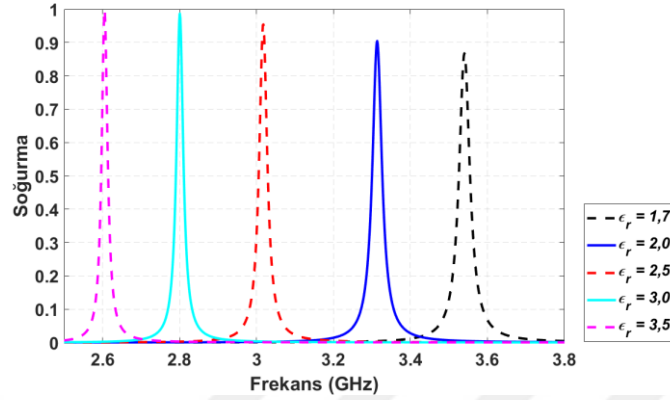
Tasarım parametreleri üçüncü bölümde verilen KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısının farklı göreceli elektriksel geçirgenlik değerleri için, benzetim ortamında elde edilen soğurma oranları Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.1'de yer almaktadır. Analizler sırasında dielektrik malzemenin kayıp tanjantı $\tan\delta = 0,002$, ve dielektrik malzeme kalınlığı $d_{\text{diel}} = 1,016$ mm olarak sabit tutulmuştur.

Çizelge 4.1. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

ϵ_r	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
1,7	3,540	0,867
2,0	3,314	0,905
2,5	3,018	0,954
3,0	2,801	0,987
3,5	2,606	0,997

Metamalzeme tabanlı rezonatör yapılarında rezonans frekansı $\omega_0 = 1/LC$ ile hesaplanmaktadır (Baena vd., 2004, Chowdhury vd., 2011, Ertan vd., 2016).

Burada C değerinin dielektrik malzemenin göreceli elektriksel geçirgenliği ile doğru orantılı olduğu bilinmektedir. Şekil 4.6'dan da görüldüğü üzere ϵ_r değerinin artması rezonans frekansının azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.6. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

Dielektrik malzemenin ϵ_r değerine bağlı olarak rezonans frekansındaki bu değişim ve soğurma tepelerinin kalite (Q) faktörlerinin dar olması, sensör uygulamalarında avantaj sağlamaktadır (Duan vd., 2018).

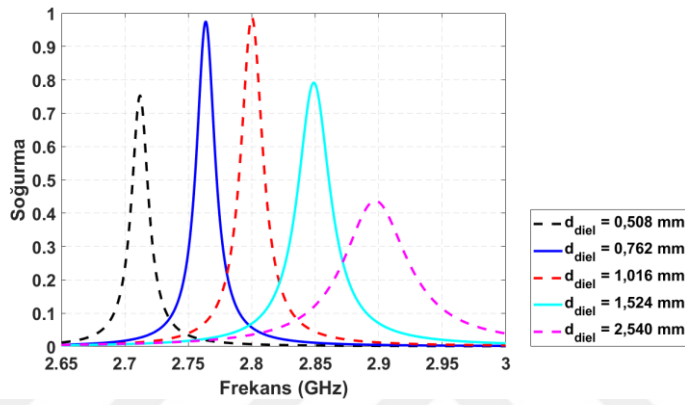
4.1.1.2. Dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisi

KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısının, farklı dielektrik malzeme kalınlıkları için benzetim ortamında elde edilen soğurma oranları Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.2'de yer almaktadır.

Çizelge 4.2. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

d_{diel} (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
0,508	2,712	0,753
0,762	2,764	0,975
1,016	2,800	0,987
1,524	2,849	0,791
2,540	2,897	0,437

Çizelge 4.2'den de görüldüğü gibi d_{diel} değeri 0,508 mm'den 2,540 mm'ye kadar kademeli olarak artırılmıştır. Soğurma tepe değeri kalınlık 1,016 mm olana kadar artarken, 1,016 mm'den sonra azalmaya başlamaktadır. İkinci bölümde girişim teorisi alt başlığında bahsedilen yapıcı ve yıkıcı etkiler burada görülmektedir. Denklem (2.20)'de rezonatörden geçen dalganın karmaşık yayılım fazı dielektrik malzeme kalınlığına bağlıdır. Burada 1,016 mm'den sonra toplam yansımanın faz değeri değişmiş ve kalınlık artması yıkıcı bir etki sağlamıştır.



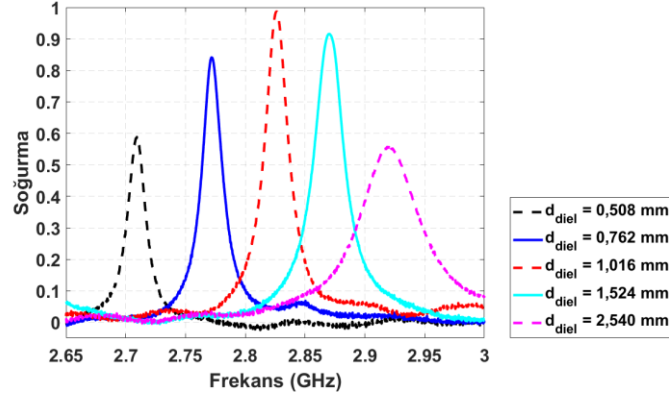
Şekil 4.7. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

Tez kapsamında KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısının, farklı dielektrik malzeme kalınlıklarının soğurma oranına etkisi deneysel olarak da incelenmiştir. Deneyler sırasında 10 GHz'de; ϵ_r değeri 3, $\tan\delta$ değeri 0,002 olan 0,508 mm, 0,762 mm, 1,016 mm ve 1,524 mm kalınlıklarına sahip Arlon AD300A dielektrik taban malzemesi kullanılmıştır. 2,540 mm kalınlığına sahip soğurucu ise 1,016 mm ve 1,524 mm kalınlıklarına sahip iki taban malzemesi birleştirilerek elde edilmiştir. Burada 1,524 mm kalınlığa sahip taban malzemesinin bir yüzeyindeki metal tabaka tamamen eritilmiş diğer yüzü ise tamamen metal kaplı olarak bırakılmıştır. Elde edilen bu malzemenin üstüne 1,016 mm kalınlığa sahip taban malzemesinin altta kalan yüzeyi tamamen metalden eritilmiş, diğer yüzünde ise rezonatör yapısı bulunmaktadır. Deneysel olarak elde edilen soğurma oranları Şekil 4.8'de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.3'de yer almaktadır.

Çizelge 4.3. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinde, deneysel olarak elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

d_{diel} (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
0,508	2,709	0,589
0,762	2,772	0,842
1,016	2,826	0,987
1,524	2,870	0,916
2,540	2,921	0,559

Benzetim sonuçlarda olduğu gibi burada da yapıcı ve yıkıcı etkiler görülmektedir. Çizelge 4.3'den de görüldüğü gibi soğurma tepe değeri kalınlık 1,016 mm olana kadar artarken, 1,016 mm 'den sonra azalmaya başlamaktadır.

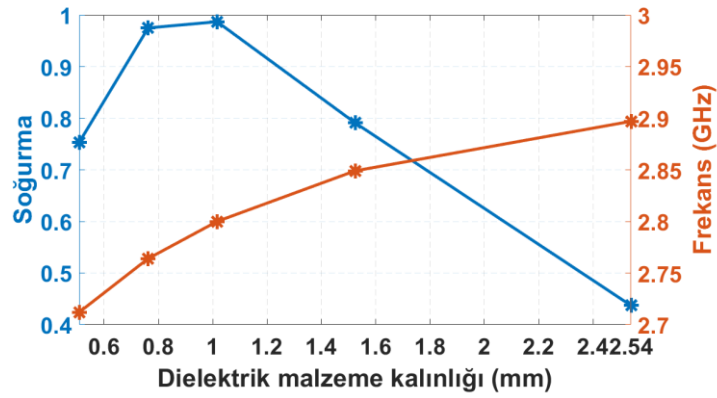


Şekil 4.8. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinin soğurma oranına etkisinin deneysel sonuçları.

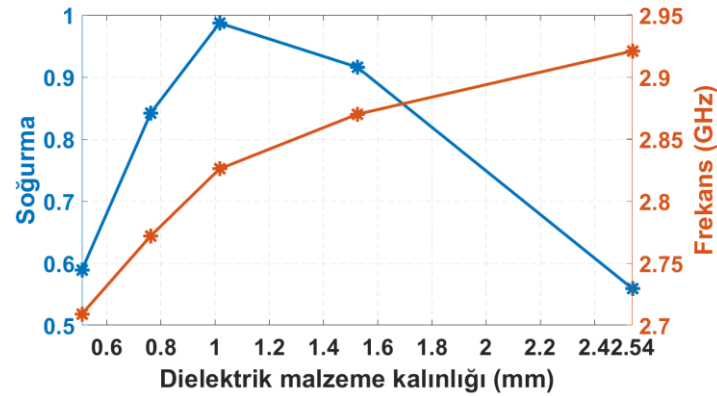
Şekil 4.8'de bulunan deneysel sonuçlar incelendiğinde Şekil 4.7'de bulunan benzetim sonuçlarıyla tutarlı olduğu görülmektedir. Burada deneysel sonuçlar ile benzetim sonuçları rezonans frekansı bakımından kıyaslandığında elde edilen en yüksek yüzdelik hata %0,92'dir. Bu hatanın sebebi ise üretim hataları, ölçümlerde hizalama hatası veya dielektrik malzeme elektriksel ve fiziksel özelliklerinin zamana bağlı olarak katalog değerlerinden sapmasından kaynaklanabilir.

Bu bölüm dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına ve rezonans frekansına etkisinin aynı grafikte gösterildiği bir grafik ile tamamlanmıştır. Şekil 4.9 (a)'da bulunan grafikte benzetim ortamında elde edilen veriler kullanılırken,

Şekil 4.9 (b)'de bulunan grafikte ise gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılmıştır. Grafikler bir kez daha göstermektedir ki; dielektrik malzeme kalınlığının artışı rezonans frekansında artışa sebep olurken, soğurmada ise empedans uyumunun sağlandığı noktaya kadar artışa ve o noktadan sonra azalmaya sebep olmaktadır. Ayrıca Şekil 4.9'da bulunan grafikler dikkatli incelendiğinde, soğurucunun çalışma frekansındaki kayma miktarının dielektrik malzeme kalınlığı arttıkça azaldığı görülmektedir. Gözlenen bu değişim soğurucu tabanlı sensör uygulamalarında kullanılabilir.



(a)



(b)

Şekil 4.9. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için a) benzetim ortamında, b) deneysel olarak elde edilen veriler ışığında dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına ve rezonans frekansına etkisi.

4.1.1.3. Dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi

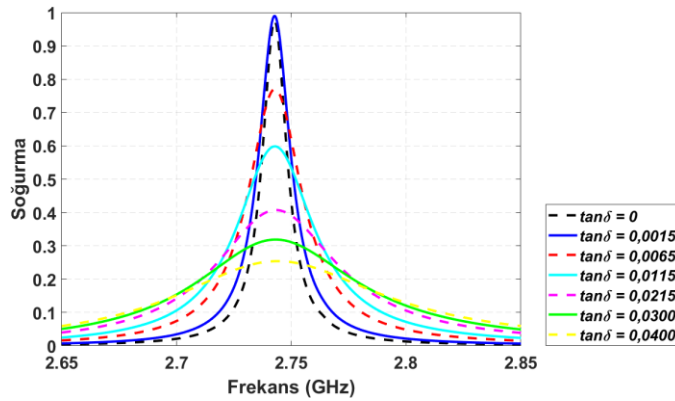
Soğurucu yüzeye çarpan bir elektromanyetik dalganın dielektrik ve metalik kayıplar ile soğurucu üzerinde soğrulduğu bilinmektedir. Literatürde pek çok çalışmada bu noktadan yola çıkarak dielektrik malzeme kayıplarının artmasının soğurmayı artırdığını söylemektedir. Fakat bu çalışmalarda atlanan nokta; dielektrik malzeme kayıplarındaki değişimin sadece dielektrik kayıplarını etkilemediği aynı zamanda ikinci bölüm kapsamında bulunan soğurma teorisi bölümünde bahsedilen soğurucu yapısının empedansı ile serbest uzay empedansının uyumuna da etki ettiğiidir. Gelen elektromanyetik dalganın maksimum seviyede soğrulmasını sağlamanın bir yolu da minimum seviyede yansıma elde etmektedir. Minimum seviyede yansıma elde etmek için soğurucu yapısının empedansı ile serbest uzay empedansının uyumlu olması sağlanmalıdır. Dielektrik malzeme empedansı denkleminde (Denklem (2.23)) bulunan dielektrik içerisinde ilerleyen dalganın yayılma fazını (β) etkileyen faktörlerden bir tanesi de dielektrik malzeme kaybıdır. Denklem (2.23)'de yayılma fazı tanjantın içinde verilmiştir. Dolayısıyla β değerinin yani dielektrik malzeme kaybının artması soğurmayı maksimum empedans uyumuna ulaşılan noktaya kadar arttırıp bu noktadan sonra azaltması gerekmektedir.

KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısının farklı dielektrik malzeme kayıplarındaki soğurma oranları incelenmiştir. İncelemeler üç farklı dielektrik malzeme kalınlığı için gerçekleştirilmiştir. Bu değerler rasgele seçilmiş olup bunlardan ilki dielektrik malzeme kalınlığının 0,762 mm olduğu durum içindir. $\tan\delta$ değeri 0'dan 0,04'e kadar yedi farklı değer için rezonans frekansları ve soğurma oranlarındaki değişim benzetim ortamında incelenmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4.10'da gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.4'de yer almaktadır.

Çizelge 4.4. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 0,762 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

$\tan\delta$	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
0	2,743	0,975
0,0015	2,743	0,990
0,0065	2,743	0,770
0,0115	2,743	0,598
0,0215	2,744	0,407
0,0300	2,743	0,319
0,0400	2,744	0,254

Dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisinin bir benzeri dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisinde de görülmektedir. Çizelge 4.4'den de görüldüğü üzere soğurma oranının $\tan\delta = 0,0015$ 'e kadar arttığını bu noktadan sonra $\tan\delta$ artmaya devam ettiği halde soğurmanın azaldığını görmekteyiz. Bununla birlikte $\tan\delta$ değerindeki değişim soğurucunun rezonans frekansında kayda değer bir değişikliğe sebep olmamaktadır.



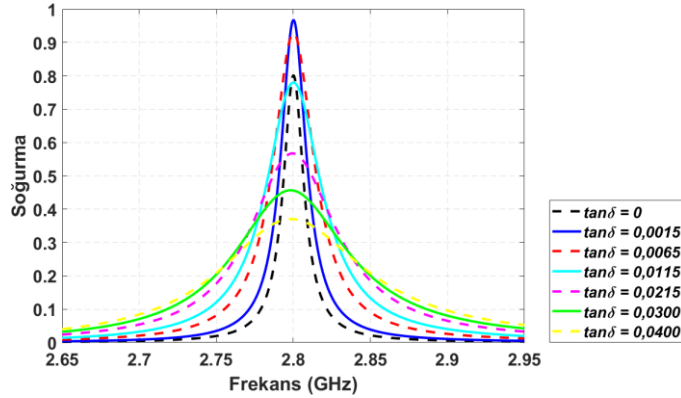
Şekil 4.10. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 0,762 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

İkinci aşamada d_{diel} değeri 1,016 mm olarak belirlenmiş ve yine $\tan\delta$ değeri 0'dan 0,04'e kadar yedi farklı değer için rezonans frekansları ve soğurma oranlarındaki değişim incelenmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4.11'de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.5'de yer almaktadır.

Çizelge 4.5. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,016 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

$\tan\delta$	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
0	2,800	0,801
0,0015	2,800	0,967
0,0065	2,800	0,928
0,0115	2,800	0,780
0,0215	2,800	0,567
0,0300	2,800	0,457
0,0400	2,800	0,370

Çizelge 4.5'e bakacak olursak soğurmanın $\tan\delta = 0,0015$ 'e kadar arttığını bu noktadan sonra $\tan\delta$ artmaya devam ettiği halde soğurmanın azaldığını görmekteyiz. Yine burada da soğurucunun rezonans frekansında kayda değer bir değişiklik olmadığı gözlenmektedir.



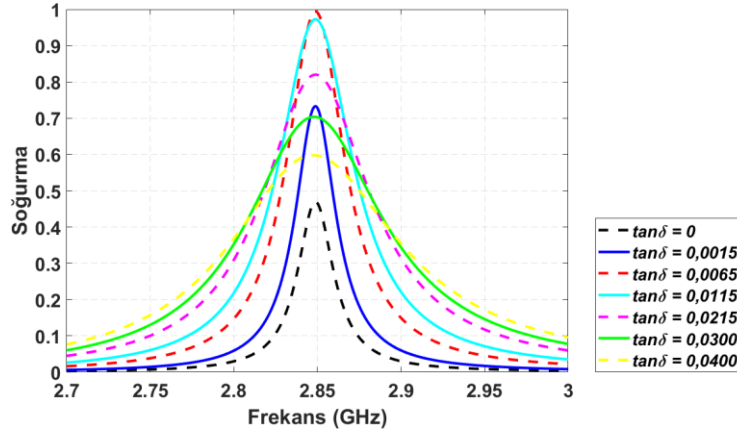
Şekil 4.11. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,016 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

Bu bölümde son olarak d_{diel} değerinin 0,762 mm ve 1,016 mm olduğu değerler için gerçekleştirilen analizler $d_{\text{diel}} = 1,524$ mm için de gerçekleştirilmiştir. Yine burada da $\tan\delta$ değeri 0'dan 0,04'e kadar yedi farklı değer için rezonans frekansları ve soğurma oranlarındaki değişim incelenmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4.12'de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.6'da yer almaktadır.

Çizelge 4.6. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,524 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

$\tan\delta$	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
0	2,849	0,470
0,0015	2,849	0,733
0,0065	2,849	0,994
0,0115	2,849	0,973
0,0215	2,849	0,820
0,0300	2,848	0,704
0,0400	2,848	0,598

$d_{\text{diel}} = 1,016$ mm için elde edilen sonuçların bir benzeri de burada görülmektedir. Çizelge 4.6'ya bakılırsa soğurmanın $\tan\delta = 0,0065$ 'e kadar arttığı bu noktadan sonra $\tan\delta$ artmaya devam ettiği halde soğurmanın azaldığı görülebilir. Tez kapsamında öne sürülen hipotezin burada da sağlandığı söylenebilir. Diğer iki d_{diel} değerinde olduğu gibi burada da soğurucunun rezonans frekansında kayda değer bir değişiklik olmadığı gözlenmektedir.



Şekil 4.12. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,524 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

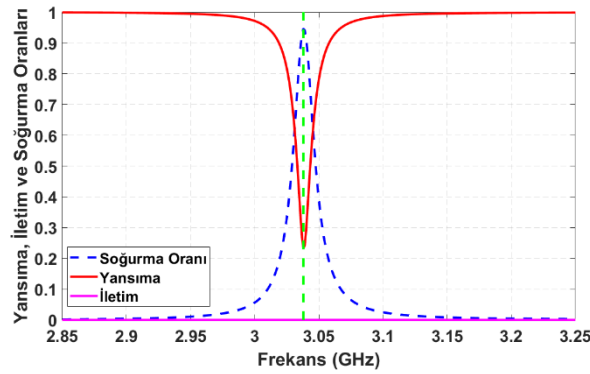
KHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için, farklı dielektrik malzeme kalınlıklarında gerçekleştirilen dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi ile ilgili analizlerde benzer sonuçlar gözlenmektedir. Sonuç olarak dielektrik malzeme kaybının artması soğurmayı maksimum empedans uyumuna

ulaşılan noktaya kadar arttırıp, bu noktadan sonra kayıp artsa bile soğurma azalmaktadır.

4.1.2. AHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı

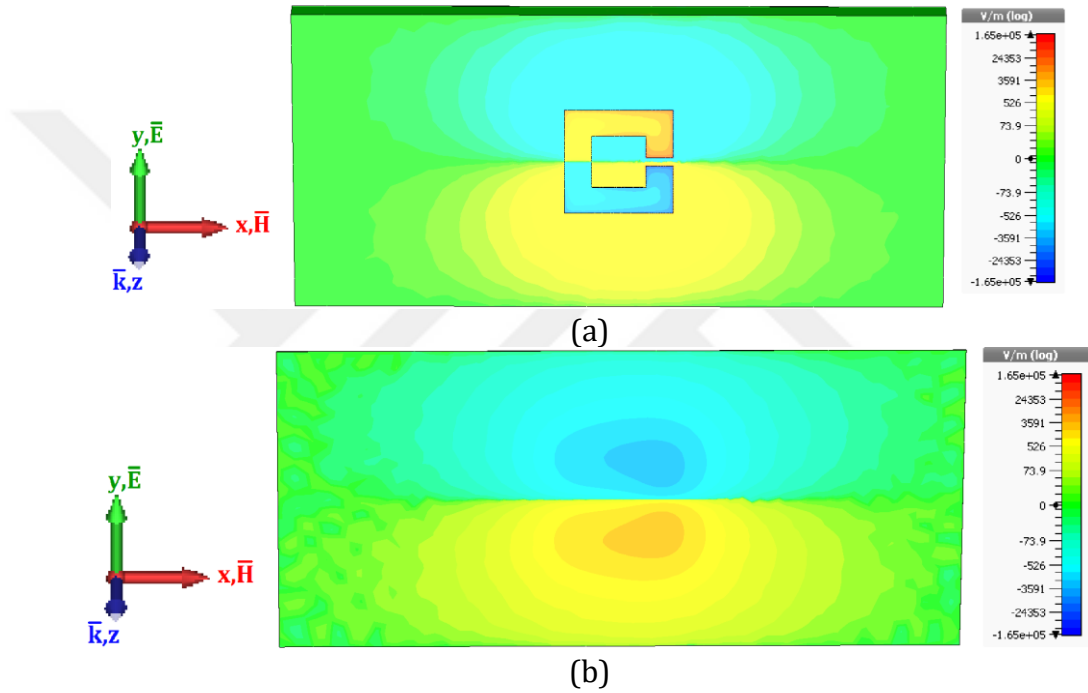
Bu tez kapsamında dielektrik malzeme kalınlık ve kaybının soğurmaya etkisiyle ilgili öne sürülen hipotezlerin soğurucu rezonans frekans türüne bağlı olmadığını göstermek amacıyla AHR kullanılarak bir soğurucu tasarlanmıştır. Bir önceki bölümde analizleri gerçekleştirilen KHR yapısında dipol rezonans gözlenirken, AHR yapısında ise *LC* rezonans görülebilmektedir.

S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısının çalışma mekanizmasını incelemek amacıyla bir soğurucu yapısı tasarlanmıştır. Tasarlanan bu soğurucu yapısı için maksimum soğurmanın gerçekleştirdiği rezonans frekansında (3,038 GHz), yansıma, iletim ve soğurma grafiği Şekil 4.13’de gösterilmektedir. Rezonans frekansında yansıma oranı 0,233, toprak düzlemi tamamen metal kaplı olduğu için iletim oranı 0 ve soğurma oranı ise 0,946’dır. Burada tasarlanan soğurucu yapısında, halkanın yatay boyutu ile dikey boyutu birbirine eşit ve $L_h = L_v = 12$ mm, halkanın ayrığı $g = 1$ mm ve halkanın kalınlığı ise $w = 3$ mm’dir. Tasarımda; göreceli dielektrik sabiti 10 GHz’de $\epsilon_r = 3$ ve kayıp tanjantı $\tan\delta = 0,002$ ve dielektrik malzeme kalınlığı $d_{diel} = 3$ mm olan bir malzeme kullanılmıştır. Kullanılan dielektrik taban malzemesi boyutları ise; $P_v = 34,036$ mm, $P_h = 72$ mm’dir.



Şekil 4.13. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısının rezonans frekansında (3,038 GHz) yansıma, iletim ve soğurma oranları.

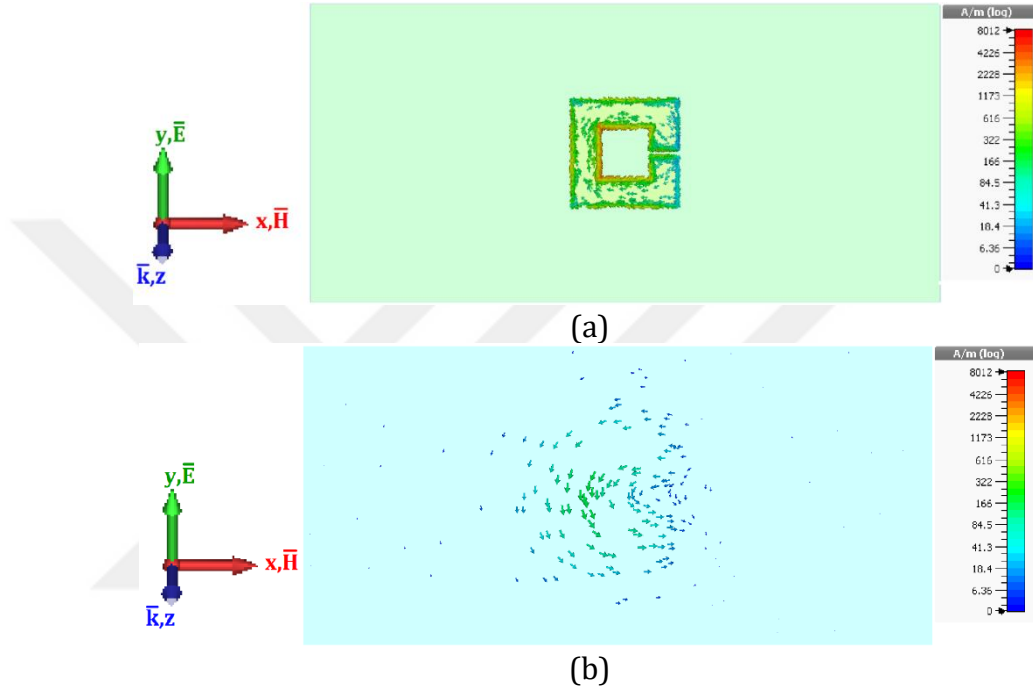
Şekil 4.14’de AHR yapısı kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için elektrik alan dağılımı gösterilmektedir. Aynı faz değerinde (0°) kaydedilen görüntülerde Şekil 4.14 (a)’da gösterilen halka üzerindeki elektrik alan dağılımı ile Şekil 4.14 (b)’de gösterilen toprak düzlem üzerindeki elektrik alan dağılımları birbirine zıt olduğu gözlenmektedir. Bu bize halka ile toprak düzlemi arasında kuvvetli bir bağlaşım olduğunu söylemektedir. KHR tabanlı soğurucu yapısında oluşan zıt elektrik alan dağılımı halkadan kaynaklı iken, burada ise halkanın sadece ayırık olmayan kolundan kaynaklıdır.



Şekil 4.14. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için elektrik alan dağılımının z bileşeni a) ayırık halka üzerinde, b) toprak düzlemde.

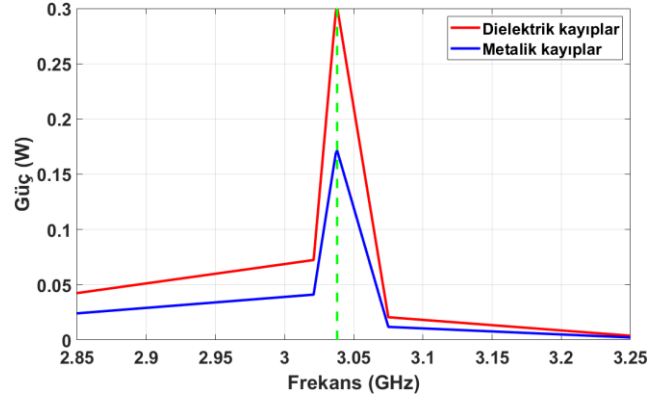
Rezonatörün arka taraftaki metal kısım ile kuvvetli bir bağlaşım oluşturduğu, bunun sonucunda da manyetik dipolden dolayı kuvvetli bir manyetik rezonans meydana geldiği bilinmektedir. Yine KHR’de olduğu gibi oluşan manyetik rezonansı daha iyi gözlemlemek amacıyla Şekil 4.15’de rezonans frekansında akım dağılımları gösterilmektedir. Burada ayırığın bir ucundan başlayarak diğer ucuna doğru, saat yönünde akım dağılımı görülmektedir. Bu akım dağılımı bize burada LC rezonansın olduğunu söylemektedir (Duan vd., 2018). Dipol rezonansında akım dağılımlarının sağ ve sol kolda olduğu bilinmektedir. Buradan

yola çıkararak LC rezonans paralel kutuplanma için uyarılırken, dipol rezonansın ise dik kutuplanma için uyarıldığı yorumu yapılabilir (Duan vd., 2018). Bunlara ek Şekil 4.15 (a)'da gösterilen ayırık halka üzerindeki yüzey akım dağılımları saat yönünde iken, Şekil 4.15 (b)'de gösterilen toprak düzlem üzerindeki yüzey akım dağılımları ise saat yönünün tersindedir. Sonuç olarak birbirine zıt yöndeki akımların kuvvetli bir manyetik bağlaşım oluşturduğu söylenebilir.



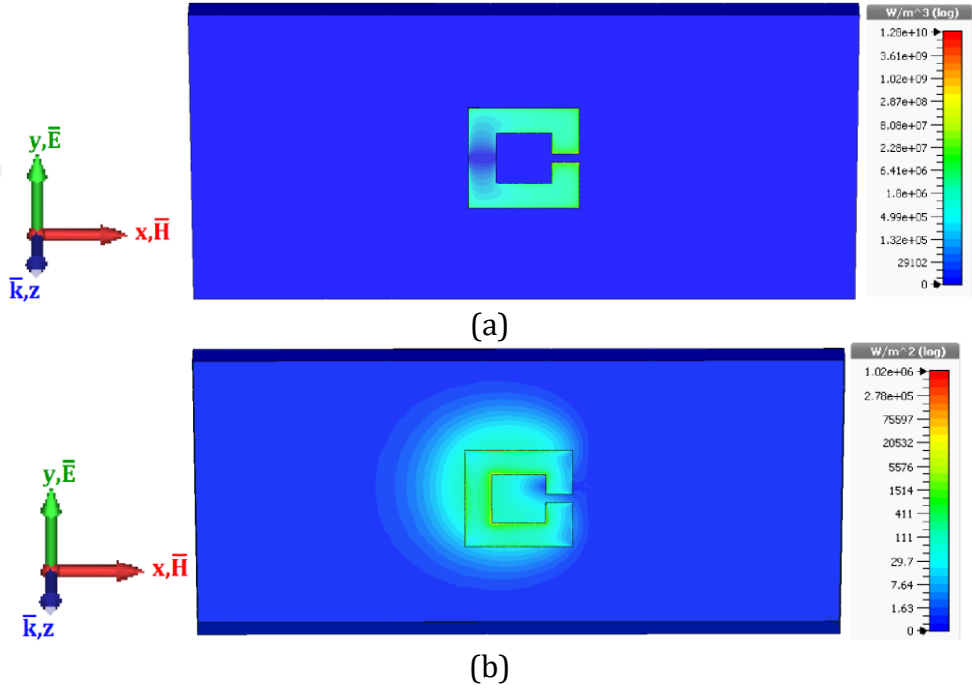
Şekil 4.15. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için yüzey akım dağılımı a) ayırık halka üzerinde, b) toprak düzlemde.

KHR için yapılan kayıp analizi AHR yapısı için de yapılmıştır. AHR yapısı kullanılarak tasarlanan soğurucu için dielektrik ve metalik kayıplar Şekil 4.16'da gösterilmektedir. Şekil 4.16'dan da görüldüğü üzere gelen elektromanyetik dalganın çoğu dielektrik malzeme üzerinde harcanmıştır. Maksimum soğurmanın gerçekleştiği rezonans frekansında (3,038 GHz) kayıp değerlerine bakacak olursak; dielektrik kaybı değeri 0,301 W, metalik kayıpların değerleri ise 0,172 W'dır. 0,027 W'lık bir güç ise portta harcanmıştır.



Şekil 4.16. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısına ait dielektrik ve metalik kayıp değerleri.

AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için son olarak kayıp güç yoğunluğu (Şekil 4.17 (a)) ve yüzey kayıp güç yoğunluğu (Şekil 4.17 (b)) incelenmiştir.



Şekil 4.17. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için a) kayıp güç yoğunluğu, b) yüzey kayıp güç yoğunluğu.

Şekil 4.17 (a)'da kaybolan güç yoğunluğu halkanın üst ve alt bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Şekil 4.14 (a)'da bulunan elektrik alan dağılımına bakılacak olursa benzer bölgelerde elektrik alan dağılımının yoğun olduğu görülebilir.

Denklem 4.2'ye bakıldığında KHR'de olduğu gibi burada da kayıp güç yoğunluğu ile elektrik alan arasında bir bağlantı olduğu söylenebilir.

Şekil 4.17 (b)'de yüzeyde kaybolan güç yoğunluğu halkanın üzerinde yoğunlaşmıştır. Şekil 4.15 (a)'da bulunan yüzey akım dağılımlarına bakılacak olunursa benzer bölgelerde yüzey akım dağılımının yoğun olduğu görülebilir. KHR'de elde edilen sonuç burada da görmektedir. Yüzey kayıp güç yoğunluğu ile manyetik alan dağılımının veya yüzey akım dağılımı arasında bir ilişki vardır.

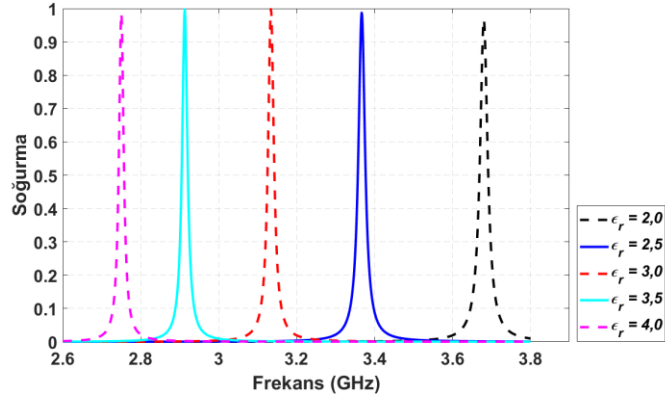
4.1.2.1. Dielektrik malzemenin göreceli elektriksel geçirgenliğinin (ϵ_r) soğurma oranına etkisi

Tasarım parametreleri üçüncü bölümde verilen AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısının farklı göreceli elektriksel geçirgenlik değerleri için, benzetim ortamında elde edilen soğurma oranları Şekil 4.18'de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.7'de yer almaktadır. Analizler sırasında dielektrik malzemenin kayıp tanjantı $\tan\delta = 0,002$ ve dielektrik malzeme kalınlığı $d_{\text{diel}} = 1,524$ mm olarak sabit tutulmuştur.

Çizelge 4.7. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

ϵ_r	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
2,0	3,680	0,966
2,5	3,667	0,987
3,0	3,134	0,999
3,5	2,913	0,998
4,0	2,750	0,985

KHR'de olduğu gibi yine burada da ϵ_r değerinin artması rezonans frekansının azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.18. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

Dielektrik malzemenin ϵ_r değerine bağlı olarak rezonans frekansındaki bu değişim ve soğurma tepelerinin kalite (Q) faktörlerinin dar olması KHR'lerde olduğu gibi AHR'nin de sensör uygulamalarında kullanılabileceğini göstermektedir.

4.1.2.2. Dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisi

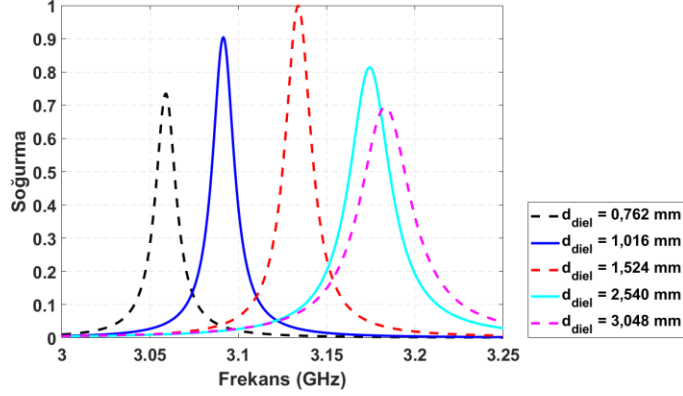
AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısının farklı dielektrik malzeme kalınlıkları için, benzetim ortamında elde edilen soğurma oranları Şekil 4.19'da gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.8'de yer almaktadır.

Çizelge 4.8. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

d_{diel} (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
0,762	3,059	0,735
1,016	3,092	0,905
1,524	3,134	0,999
2,540	3,175	0,814
3,048	3,183	0,694

Çizelge 4.8'den de görüldüğü gibi d_{diel} değeri 0,762 mm'den 3,048 mm'ye kadar kademeli olarak artırılmıştır. Soğurma tepe değeri; kalınlık 1,524 mm olana kadar artarken, 1,524 mm'den sonra azalmaya başlamaktadır. Burada 1,524

mm'den sonra toplam yansımanın faz değeri değişmiş ve kalınlık artması yıkıcı bir etki sağlamıştır.



Şekil 4.19. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinin soğurma oranına etkisi Şekil 4.7'de görülmüştü. Benzer bir sonuç AHR için Şekil 4.19'de gözlemlenebilir. Sonuç olarak dielektrik malzeme kalınlığının artması soğurmayı belli bir noktaya kadar artırırken, belli bir noktadan sonra azaltmakta ve bu soğurucu yapısının rezonans türüne bağlı değildir.

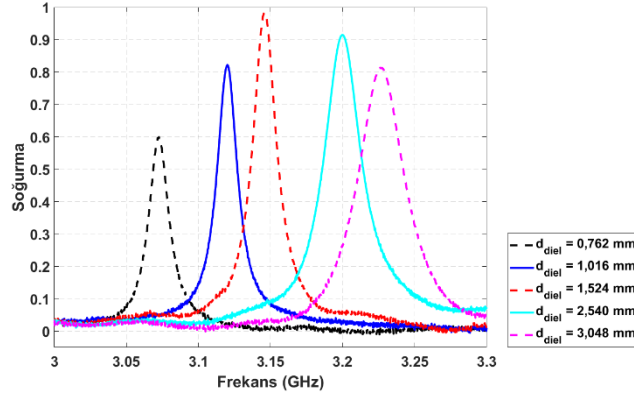
Tez kapsamında deneysel olarak gerçekleştirilen yapılardan bir diğeri de AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısıdır. Üretimi gerçekleştirilen soğurucu yapısı için farklı dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisini inceleyen deneyler sırasında 10 GHz'de; ϵ_r değeri 3, $\tan\delta$ değeri 0,002 olan 0,762 mm, 1,016 mm ve 1,524 mm kalınlıklarına sahip Arlon AD300A taban malzemesi kullanılmıştır. 2,540 mm kalınlığına sahip soğurucu yapısı KHR'de olduğu gibi 1,016 mm ve 1,524 mm kalınlıklarına sahip iki taban malzemesi birleştirilerek elde edilmiştir. 3,048 mm kalınlığına sahip soğurucu yapısı ise, 2,540 mm kalınlığına sahip soğurucu yapısının arasına metal kısımları tamamen eritilmiş 0,508 mm kalınlığına sahip bir taban malzemesi eklenerek elde edilmiştir. Burada 2,540 mm ve 3,048 mm kalınlığına sahip soğurucu yapıları katmanlı olduğu için aralarında boşluk kalmaya müsaittir. Yapılar arasında kalan bu hava boşlukları deneysel sonuçlarda az da olsa hataya sebep olmaktadır. Deneysel olarak elde edilen

soğurma oranları Şekil 4.20’de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.9’da yer almaktadır.

Çizelge 4.9. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinde, deneysel olarak elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

d_{diel} (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
0,762	3,073	0,599
1,016	3,120	0,822
1,524	3,146	0,984
2,540	3,200	0,915
3,048	3,226	0,814

Benzetim sonuçlarda olduğu gibi yine burada da yapıcı ve yıkıcı etkiler görülmektedir. Çizelge 4.9’dan da görüldüğü gibi soğurma tepe değeri kalınlık 1,524 mm olana kadar artarken, 1,524 mm’den sonra azalmaya başlamaktadır.

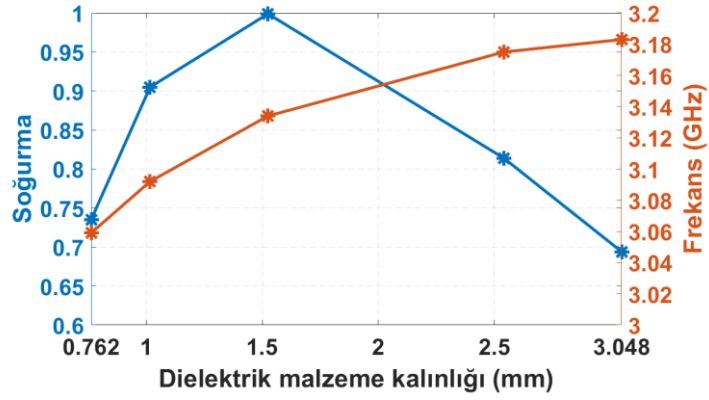


Şekil 4.20. S-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinin soğurma oranına etkisinin deneysel sonuçları.

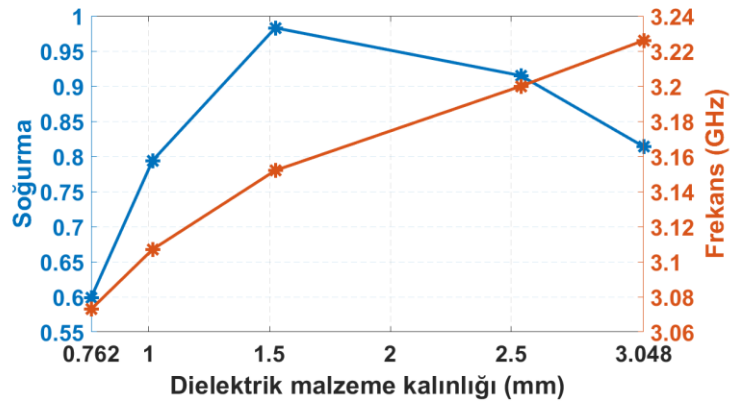
Şekil 4.20’de bulunan deneysel sonuçlara baktığımızda Şekil 4.17’de bulunan benzetim sonuçlarıyla tutarlı olduğu görülmektedir. Burada deneysel sonuçlar ile benzetim sonuçları rezonans frekansı bakımından kıyaslandığında elde edilen en yüksek yüzdelik hata %1,33’dür. Burada en yüksek ölçüm hatası 3,048 mm kalınlığa sahip soğurucu yapısı içindir. Bunun sebebi ise daha önceden belirtildiği gibi üç katmanlı yapı kullanılmasından kaynaklıdır. KHR yapısında olduğu gibi yine burada da üretim hataları, ölçümlerdeki hizalama hatası veya dielektrik malzeme elektriksel ve fiziksel özelliklerinin zamana bağlı olarak

katalog değerlerinden sapmasından kaynaklı hatalar deneysel sonuçlarla benzetim sonuçları arasındaki farka sebep olmaktadır.

KHR tabanlı soğurucuda olduğu gibi bu bölüm de dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına ve rezonans frekansına etkisinin aynı grafikte gösterildiği bir grafik ile tamamlanmıştır. Şekil 4.21 (a)'da bulunan grafikte benzetim ortamında elde edilen veriler kullanılırken, Şekil 4.21 (b)'de bulunan grafikte ise deneysel olarak elde edilen veriler kullanılmıştır. Grafikler bir kez daha göstermektedir ki; dielektrik malzeme kalınlığının artışı rezonans frekansında bir artışa sebep olurken, soğurmada ise belli bir yere kadar artışa, o noktadan sonra azalmaya sebep olmaktadır. Yine burada da soğurucunun çalışma frekansındaki kayma miktarı dielektrik malzeme kalınlığı arttıkça azalmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 4.21. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için a) benzetim ortamında, b) deneysel olarak elde edilen veriler ışığında dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına ve rezonans frekansına etkisi.

4.1.2.3. Dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi

KHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yüzeylerde dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi bölümünde; dielektrik malzeme kayıplarının artması ya da azalması sadece dielektrik kayıpları etkilemediğinden bahsedilmişti. Yapılan analizler sonucunda dielektrik malzeme kaybının artması soğurmayı belli bir noktaya kadar artırdığı, bu noktadan sonra kayıp artmaya devam etse bile soğurmanın azaldığı gösterilmişti. Dielektrik malzeme kaybının değişiminin soğurma oranına tez kapsamında öne sürülen şekilde etkisinin soğurucunun rezonans türüne bağlı olmadığını göstermek amacıyla benzer analizler AHR kullanılarak tasarlanmış bir soğurucu içinde yapılmıştır.

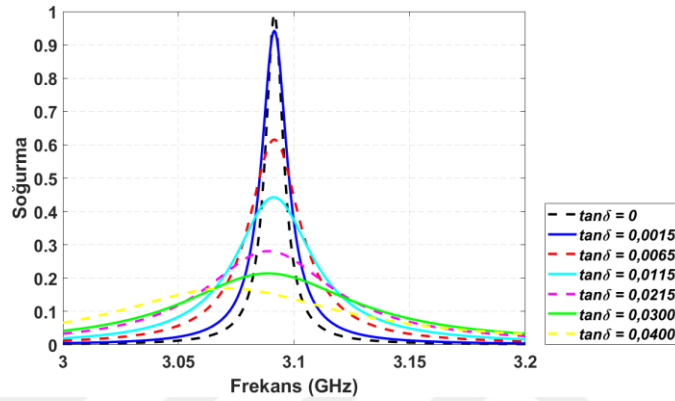
AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısının farklı dielektrik malzeme kayıplarındaki soğurma oranları incelenmiştir. İncelemeler üç farklı dielektrik malzeme kalınlığı için gerçekleştirilmiştir. Bu değerler rasgele seçilmiş olup bunlardan ilki dielektrik malzeme kalınlığının 1,016 mm olduğu durum içindir. $\tan\delta$ değeri 0'dan 0,04'e kadar yedi farklı değer için rezonans frekansları ve soğurma oranlarındaki değişim benzetim ortamında incelenmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4.22'de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.10'da yer almaktadır.

Çizelge 4.10. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,016 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

$\tan\delta$	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
0	3,092	0,993
0,0015	3,092	0,943
0,0065	3,092	0,616
0,0115	3,091	0,443
0,0215	3,089	0,281
0,0300	3,089	0,214
0,0400	3,071	0,170

Çizelge 4.10'da dielektrik malzeme kaybının artması soğurma oranını azalttığı görülmektedir. İlk bakışta diğer analizde gözlenen değişimin burada olmadığı

düşünülebilir. Değişim dikkatli incelendiğinde $\tan\delta$ değeri 0 ile 0,0015 arasında maksimum soğurma noktasına ulaşıldığı bu aralıkta tekrardan soğurmanın azalan duruma geçtiği gözlenmektedir. Bu olayın en büyük sebebi $\tan\delta$ değeri 0 iken soğurmanın yüksek olmasıdır. Yine burada diğer analizlerde olduğu gibi $\tan\delta$ değerine bağlı olarak soğurucunun rezonans frekansında kayda değer bir değişiklik sağlamamaktadır.



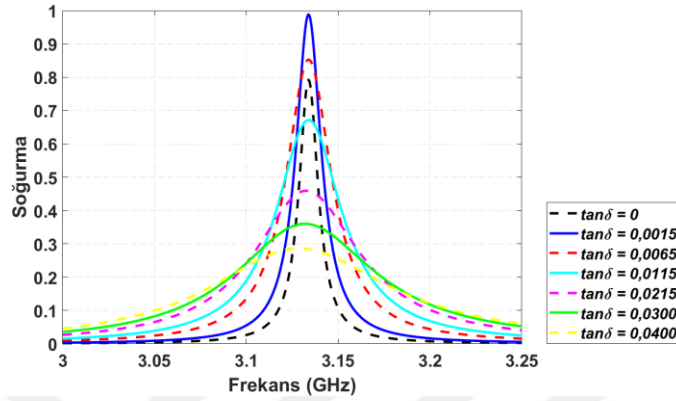
Şekil 4.22. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,016 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

İkinci aşamada d_{diel} değeri 1,524 mm olarak belirlenmiş ve yine $\tan\delta$ değeri 0'dan 0,04'e kadar yedi farklı değer için rezonans frekansları ve soğurma oranlarındaki değişim incelenmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4.23'de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.11'de yer almaktadır.

Çizelge 4.11. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,524 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

$\tan\delta$	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
0	3,134	0,792
0,0015	3,134	0,988
0,0065	3,134	0,853
0,0115	3,134	0,672
0,0215	3,133	0,459
0,0300	3,132	0,360
0,0400	3,128	0,287

Çizelge 4.11'e bakılacak olunursa soğurmanın $\tan\delta = 0,0015$ 'e kadar arttığı bu noktadan sonra $\tan\delta$ artmaya devam ettiği halde soğurmanın azaldığını görülebilir. Yine burada da soğurucunun rezonans frekansında kayda değer bir değişiklik olmadığı gözlenmektedir.



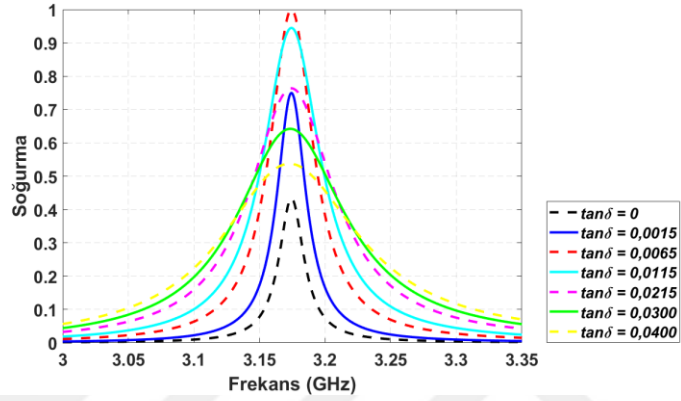
Şekil 4.23. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,524 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

Bu bölümde son olarak d_{diel} değerinin 1,016 mm ve 1,524 mm olduğu değerler için gerçekleştirilen analizler $d_{\text{diel}} = 2,54$ mm için de gerçekleştirilmiştir. Yine burada da $\tan\delta$ değeri 0'dan 0,04'e kadar yedi farklı değer için rezonans frekansları ve soğurma oranlarındaki değişim incelenmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4.24'de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.12'de yer almaktadır.

Çizelge 4.12. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 2,54 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

$\tan\delta$	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
0	3,175	0,433
0,0015	3,175	0,750
0,0065	3,175	1
0,0115	3,175	0,945
0,0215	3,175	0,764
0,0300	3,173	0,642
0,0400	3,173	0,537

$d_{\text{diel}} = 1,524$ mm için elde edilen sonuçların bir benzeri de burada görülmektedir. Çizelge 4.12'ye bakılacak olunursa soğurmanın $\tan\delta = 0,0065$ 'e kadar arttığı bu noktadan sonra $\tan\delta$ artmaya devam ettiği halde soğurmanın azaldığını görülebilir. Tez kapsamında öne sürülen hipotezin burada da sağlandığını söylenebilir. Diğer iki d_{diel} değerinde olduğu gibi burada da soğurucunun rezonans frekansında kayda değer bir değişiklik olmadığı gözlenmektedir.



Şekil 4.24. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 2,54 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

KHR'de olduğu gibi AHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için farklı dielektrik malzeme kalınlıklarında gerçekleştirilen dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi ile ilgili analizlerde benzer sonuçlar gözlenmektedir. Sonuç olarak dielektrik malzeme kaybının artması soğurmayı belli bir noktaya kadar artırırken, bu noktadan sonra kayıp artsa bile soğurma azalmaktadır ve bu değişim karakteri soğurucu yapısının rezonans türüne bağlı değildir.

4.2. X-Bantta Çalışan Soğurucular

X-bant frekans bölgesi için de S-bantta olduğu gibi KHR ve AHR kullanılarak soğurucu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu yapılara ait tasarım parametreleri ve şematik görünüşleri bir önceki bölümde verilmiştir. Yapılara ait gerekli analizlerin S-bantta gerçekleştiği için burada tekrarlanmamıştır. S-bantta çalışan soğurucular bölümünde tasarlanan bu yapılara ait elektrik alan dağılımı, yüzey

akım dağılımı gibi analizler yardımıyla KHR'de dipol rezonans gözlenirken, AHR soğurucu yapısının ise LC rezonansa sahip olduğu gözlenmişti.

S-bantta tasarlanan iki soğurucu yapısı içinde gerçekleştirilen; dielektrik malzemenin göreceli elektriksel geçirgenliğinin (ϵ_r), dielektrik malzeme kalınlığının ve dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi gibi analizler X-bant içinde gerçekleştirilmiş ve benzer sonuçlar bulunmuştur. Böylece tez kapsamında dielektrik malzemenin soğurma oranına etkisiyle ilgili öne atılan hipotezin soğurucunun çalışma frekansına bağlı olamadığı gösterilmiştir.

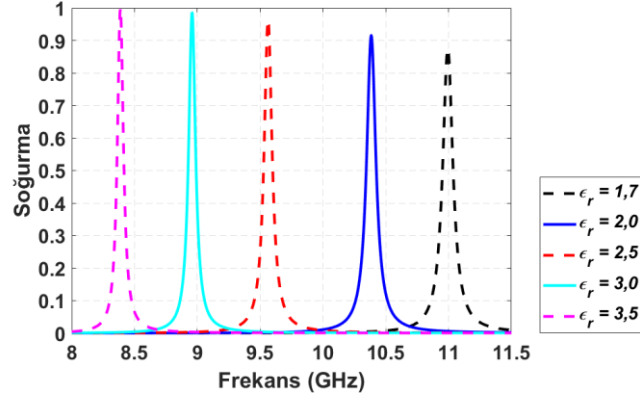
4.2.1. KHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzemenin göreceli elektriksel geçirgenliğinin (ϵ_r) soğurma oranına etkisi

Tasarım parametreleri üçüncü bölümde verilen KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısının farklı göreceli elektriksel geçirgenlik değerlerindeki soğurma oranları Şekil 4.25'de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.13'de yer almaktadır. Analizler sırasında dielektrik malzemenin kalınlığı $d_{diel} = 1,016$ mm ve kayıp tanjantı $\tan\delta = 0,002$ olarak sabit tutulmuştur.

Çizelge 4.13. X-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

ϵ_r	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
1,7	10,992	0,875
2,0	10,384	0,916
2,5	9,564	0,962
3,0	8,960	0,985
3,5	8,388	0,999

S-bantta olduğu gibi burada da ϵ_r değerinin artması rezonans frekansının azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.25. X-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

Dielektrik malzemenin ϵ_r değerine bağlı olarak rezonans frekansındaki bu değişim ve soğurma tepelerinin kalite (Q) faktörlerinin dar olması S-bantta olduğu gibi burada da sensör uygulamalarında kullanılabileceğini göstermektedir.

4.2.2. KHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzeme kalınlığının soğurma etkisi

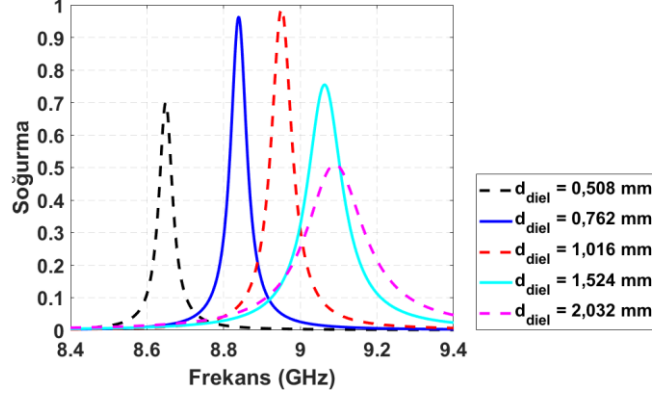
KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısının farklı dielektrik malzeme kalınlıklarındaki soğurma oranları Şekil 4.26'da gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.14'de yer almaktadır.

Çizelge 4.14. X-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

d_{diel} (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
0,508	8,649	0,700
0,762	8,840	0,963
1,016	8,950	0,988
1,524	9,064	0,754
2,032	9,090	0,510

Çizelge 4.14'den de görüldüğü gibi d_{diel} değeri 0,508 mm'den 2,032 mm'ye kadar kademeli olarak artırılmıştır. Soğurma tepe değeri kalınlık 1,016 mm olana kadar artarken, 1,016 mm'den sonra azalmaya başlamaktadır. Burada 1,016 mm'den

sonra toplam yansımanın faz değeri değişmiş ve kalınlık artması yıkıcı bir etki yaratarak soğurmanın azalmasını sağlamıştır.



Şekil 4.26. X-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

S-bantta tasarlanan iki farklı yapı için elde edilen sonuçların bir benzeri de burada görülmektedir. Burada yine dielektrik malzeme kalınlığının artması soğurmayı belli bir noktaya kadar artırırken, belli bir noktadan sonra azaltmaktadır.

4.2.3. KHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi

Tez kapsamında sunulan teorik bölümlerde ve yapılan analizler sonucunda; dielektrik malzeme kayıplarının artmasının ya da azalmasının sadece dielektrik kayıpları etkilemediğinden bahsedilmişti. Dielektrik malzeme kaybının artması soğurmayı belli bir noktaya artırdı, bu noktadan sonra kayıp artmaya devam etse bile soğurmanın azaldığı gösterilmişti. Dielektrik malzeme kaybının değişimin soğurma oranına tez kapsamında öne sürülen şekilde etkisinin soğurucunun rezonans frekansına bağlı olmadığını, farklı frekans aralıklarında da gerçekleştiğini göstermek amacıyla benzer analizler burada da yapılmıştır.

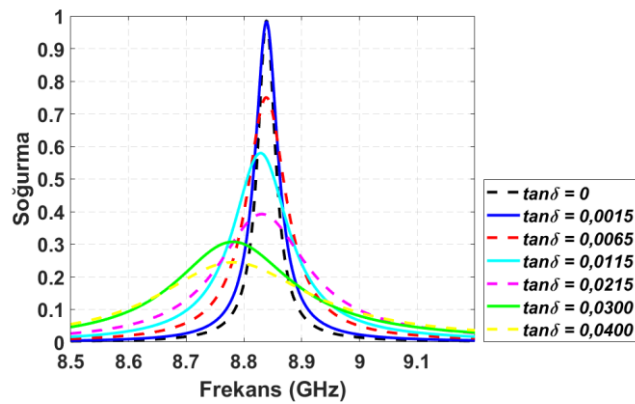
KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısının farklı dielektrik malzeme kayıplarındaki soğurma oranlarıyla ilgili incelemeleri üç farklı dielektrik malzeme kalınlığı için gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki dielektrik malzeme

kalınlığının 0,762 mm olduğu durum içindir. $\tan\delta$ değeri 0'dan 0,04'e kadar yedi farklı değer için rezonans frekansları ve soğurma oranlarındaki değişim incelenmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4.27'de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları izelge 4.15'de yer almaktadır.

Çizelge 4.15. X-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 0,762 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

$\tan\delta$	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
0	8,840	0,985
0,0015	8,840	0,982
0,0065	8,838	0,750
0,0115	8,828	0,579
0,0215	8,831	0,392
0,0300	8,780	0,307
0,0400	8,782	0,244

Çizelge 4.15'de dielektrik malzeme kaybının artması soğurma oranını azalttığı görülmektedir. S-bantta, AHR kullanılarak tasarlanan, dielektrik malzeme kalınlığı 1,016 mm olan soğurucu yapısında gözlenen olay burada da gözlenmektedir. $\tan\delta$ değeri 0 iken yüksek soğurma olması bu soruna sebep olmaktadır. Diğer tüm yapılarda gözlendiği gibi burada da $\tan\delta$ değişimi soğurucunun rezonans frekansında kayda değer bir değişiklik sağlamamaktadır.



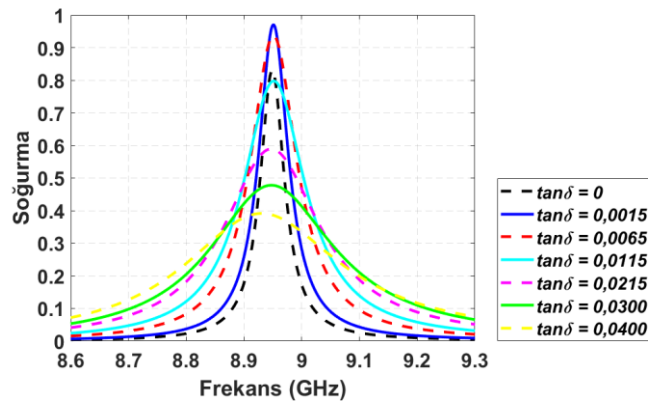
Şekil 4.27. X-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 0,762 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları

İkinci aşamada d_{diel} değeri 1,016 mm olarak belirlenmiş ve yine $\tan\delta$ değeri 0'dan 0,04'e kadar yedi farklı değer için rezonans frekansları ve soğurma oranlarındaki değişim incelenmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4.28'de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.16'da yer almaktadır.

Çizelge 4.16. X-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,016 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

$\tan\delta$	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
0	8,949	0,831
0,0015	8,950	0,970
0,0065	8,950	0,936
0,0115	8,952	0,797
0,0215	8,947	0,589
0,0300	8,947	0,478
0,0400	8,930	0,391

Teorik olarak öne atılan hipotez burada gözlenmektedir. Çizelge 4.16'ya bakılacak olunursa soğurmanın $\tan\delta = 0,0015$ 'e kadar arttığı bu noktadan sonra $\tan\delta$ artmaya devam ettiği halde soğurmanın azaldığı görülmektedir. Burada da soğurucunun rezonans frekansında kayda değer bir değişiklik olmadığı gözlenmektedir.



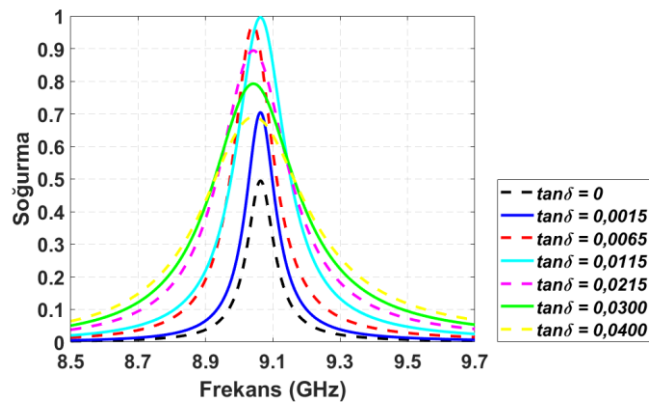
Şekil 4.28. X-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,016 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

Bu bölümde son olarak d_{diel} değerinin 0,762 mm ve 1,016 mm olduğu değerler için gerçekleştirilen analizler $d_{\text{diel}} = 1,524$ mm için de gerçekleştirilmiştir. Yine burada da $\tan\delta$ değeri 0'dan 0,04'e kadar yedi farklı değer için rezonans frekansları ve soğurma oranlarındaki değişim incelenmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4.29'da gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.17'de yer almaktadır.

Çizelge 4.17. X-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,524 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

$\tan\delta$	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
0	9,064	0,494
0,0015	9,064	0,704
0,0065	9,040	0,971
0,0115	9,063	0,996
0,0215	9,042	0,894
0,0300	9,042	0,792
0,0400	9,042	0,691

Çizelge 4.17'ye bakılacak olunursa soğurmanın $\tan\delta = 0,0115$ 'e kadar arttığı bu noktadan sonra $\tan\delta$ artmaya devam ettiği halde soğurmanın azaldığı görülebilir. Tez kapsamında öne sürülen hipotezin burada da sağlandığı söylenebilir. Diğer iki d_{diel} değerinde olduğu gibi burada da soğurucunun rezonans frekansında kayda değer bir değişiklik olmadığı gözlenmektedir.



Şekil 4.29. X-bantta, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,524 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

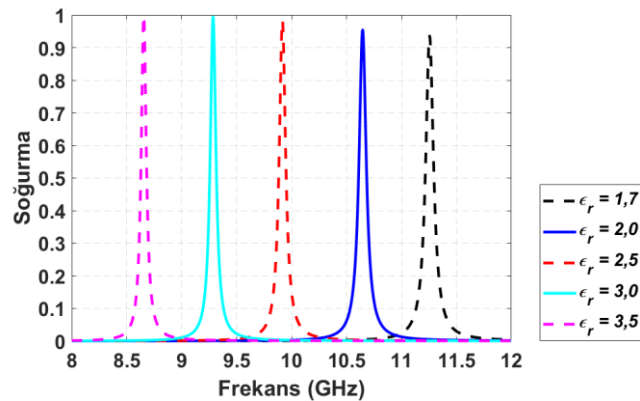
4.2.4.AHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzemenin göreceli elektriksel geçirgenliğinin (ϵ_r) soğurma oranına etkisi

Tasarım parametreleri üçüncü bölümde verilen AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısının farklı göreceli elektriksel geçirgenlik değerlerindeki soğurma oranları Şekil 4.30'da gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.18'de yer almaktadır. Analizler sırasında dielektrik malzemenin kalınlığı $d_{\text{diel}} = 1,016$ mm ve kayıp tanjantı $\tan\delta = 0,002$ olarak sabit tutulmuştur.

Çizelge 4.18. X-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

ϵ_r	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
1,7	11,256	0,936
2,0	10,648	0,954
2,5	9,916	0,983
3,0	9,288	0,994
3,5	8,656	0,998

Dielektrik malzemenin ϵ_r değerinin soğurma oranına etkisi hakkında yapılan tüm analizler gibi burada da ϵ_r değerinin artması rezonans frekansının azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.30. X-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

Dielektrik malzemenin ϵ_r değerine bağlı olarak rezonans frekansındaki bu değişim ve soğurma tepelerinin kalite (Q) faktörlerinin dar olması diğer tüm yapılarda olduğu gibi burada da sensör uygulamalarında kullanılabileceğini göstermektedir.

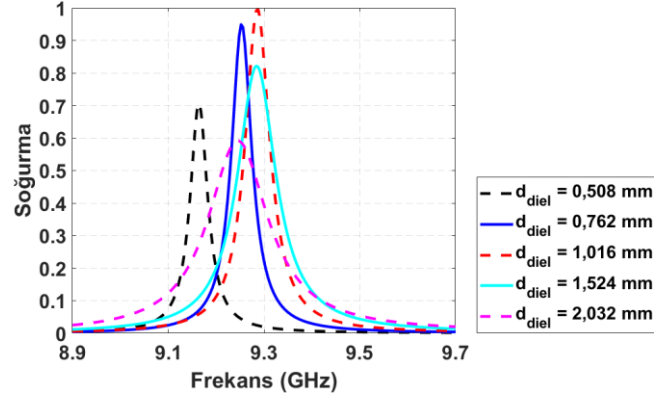
4.2.5. AHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisi

AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısının farklı dielektrik malzeme kalınlıklarındaki soğurma oranları Şekil 4.31’de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.19’da yer almaktadır.

Çizelge 4.19. X-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

d_{diel} (mm)	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
0,508	9,162	0,706
0,762	9,252	0,949
1,016	9,288	0,994
1,524	9,284	0,822
2,032	9,246	0,591

Çizelge 4.19’dan da görüldüğü gibi d_{diel} değeri 0,508 mm’den 2,032 mm’ye kadar kademeli olarak artırılmıştır. Soğurma tepe değeri kalınlık 1,016 mm olana kadar artarken, 1,016 mm’den sonra azalmaya başlamaktadır. Burada 1,016 mm’den sonra toplam yansımanın faz değeri değişmiş ve kalınlık artması yıkıcı bir etki yaratarak soğurmanın azalmasını sağlamıştır.



Şekil 4.31. X-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

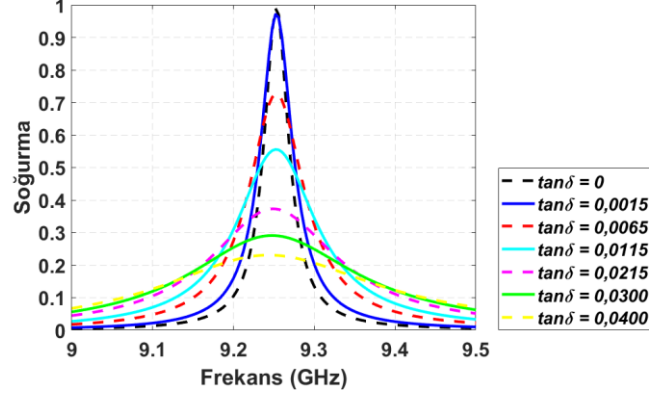
4.2.6. AHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzeme kaybının soğurma etkisi

AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısının farklı dielektrik malzeme kayıplarındaki soğurma oranlarıyla ilgili incelemeleri S-bantta olduğu gibi burada da üç farklı dielektrik malzeme kalınlığı için gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki dielektrik malzeme kalınlığının 0,762 mm olduğu durum içindir. $\tan\delta$ değeri 0'dan 0,04'e kadar yedi farklı değer için rezonans frekansları ve soğurma oranlarındaki değişim incelenmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4.32'de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.20'de yer almaktadır.

Çizelge 4.20. X-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 0,762 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

$\tan\delta$	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
0	9,252	0,989
0,0015	9,252	0,971
0,0065	9,252	0,726
0,0115	9,252	0,556
0,0215	9,248	0,373
0,0300	9,248	0,291
0,0400	9,244	0,231

Çizelge 4.20'den de görüldüğü üzere dielektrik malzeme kaybının artması soğurma oranını azaltmaktadır. Bununla birlikte soğurucunun rezonans frekansında kayda değer bir değişiklik sağlamamaktadır.



Şekil 4.32. X-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 0,762 mm iken farklı $\tan \delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

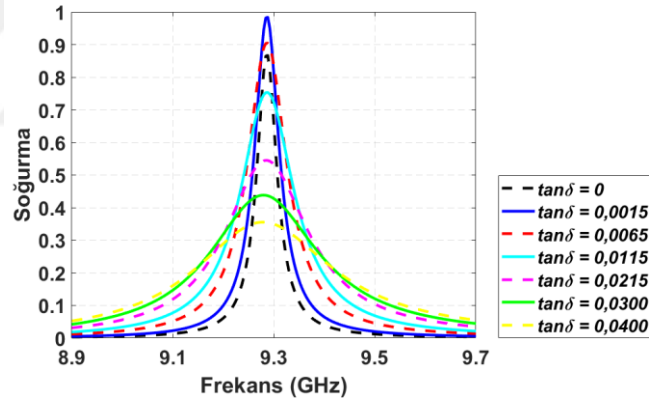
Burada da dielektrik malzeme kaybı artarken soğurmanın azaldığını görmekteyiz. X-bant KHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için gerçekleştirilen yorumlar burada da yapılabilir. Yine burada da soğurma değeri 0 ile 0,0015 arasında maksimum seviyeyi görmekte ve bu değerden sonra soğurmanın azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi daha önce bahsedildiği gibi dielektrik malzeme kayıpsız iken en yüksek seviyede soğurmanın gerçekleşmesidir.

İkinci aşamada d_{diel} değeri 1,016 mm olarak belirlenmiş ve yine $\tan \delta$ değeri 0'dan 0,04'e kadar yedi farklı değer için rezonans frekansları ve soğurma oranlarındaki değişim incelenmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4.33'de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.21'de yer almaktadır.

Çizelge 4.21. X-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,016 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

$\tan\delta$	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
0	9,288	0,867
0,0015	9,288	0,984
0,0065	9,288	0,905
0,0115	9,288	0,753
0,0215	9,284	0,545
0,0300	9,280	0,438
0,0400	9,280	0,356

Çizelge 4. 21'e bakacak olursak soğurmanın $\tan\delta = 0,0015$ 'e kadar arttığını bu noktadan sonra $\tan\delta$ artmaya devam ettiği halde soğurmanın azaldığını görmekteyiz. Burada da soğurucunun rezonans frekansında kayda değer bir değişiklik olmadığı gözlenmektedir.



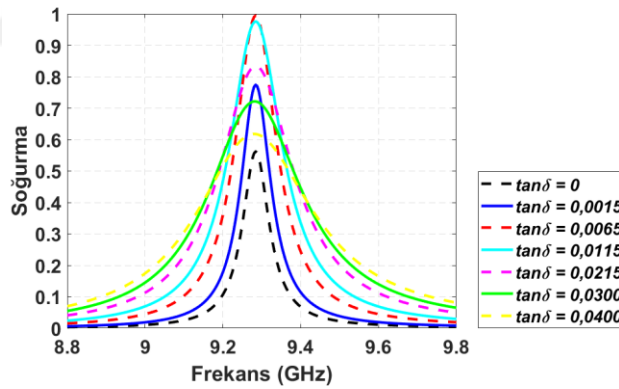
Şekil 4.33. X-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,016 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

Bu bölümde son olarak d_{diel} değerinin 0,762 mm ve 1,016 mm olduğu değerler için gerçekleştirilen analizler $d_{\text{diel}} = 1,524$ mm için de gerçekleştirilmiştir. Yine burada da $\tan\delta$ değeri 0'dan 0,04'e kadar yedi farklı değer için rezonans frekansları ve soğurma oranlarındaki değişim incelenmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4.34'de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.22'de yer almaktadır.

Çizelge 4.22. X-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,524 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

$\tan\delta$	Rezonans Frekansı (GHz)	Soğurma Oranı
0	9,284	0,562
0,0015	9,284	0,774
0,0065	9,284	0,995
0,0115	9,284	0,976
0,0215	9,284	0,833
0,0300	9,280	0,721
0,0400	9,280	0,618

Benzer sonuçların bir benzeri de burada görülmektedir. Çizelge 4.22'ye bakılacak olunursa soğurmanın $\tan\delta = 0,0065$ 'e kadar arttığı bu noktadan sonra $\tan\delta$ artmaya devam ettiği halde soğurmanın azaldığı görülebilir. Tez kapsamında öne sürülen hipotezin burada da sağlandığını söylenebilir. Şimdiye kadar gerçekleştirilen benzer analizlerinde olduğu gibi burada da soğurucunun rezonans frekansında kayda değer bir değişiklik olmadığı gözlenmektedir.



Şekil 4.34. X-bantta, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 1,524 mm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

S-bantta gerçekleştirilen analizler ve X-bantta tasarlanan KHR soğurucu yapılarında olduğu gibi burada da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak dielektrik malzeme kaybının artması soğurmayı belli bir yere kadar artırırken bu noktadan sonra kayıp artmaya devam ettiği halde soğurma oranı azalmaktadır. Hem S-bant hem de X-bantta benzer karakteristiğin gözlenmesi bize dielektrik

malzeme kaybının soğurucuya etkisi üzerinde öne atılan hipotezin soğurucunun rezonans frekansına bağlı olmadığını göstermektedir.

4.3.Tasarlanan Soğurucu yapılarının Terahertz bölgesine ölçeklenmesi

Elektronik cihazların küçülmeye gitti günümüzde gerçekleştirilen çalışmaların çoğu Terahertz bölgesinde gerçekleştirilmektedir. Terahertz bölgesindeki çalışmaların popülerliğinden dolayı S-bant ve X-bantta gerçekleştirilen analizler burada da gerçekleştirilmiştir. Böylece tasarlanan iki farklı rezonatör (KHR, AHR) tabanlı soğurucu yapısı için üç farklı frekans bölgesinde analizler yapılmış ve benzer sonuçların elde edildiği gösterilmiştir.

Terahertz bölgesi için de S ve X-bantta olduğu gibi KHR ve AHR kullanılarak soğurucu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu yapılara ait tasarım parametreleri ve şematik görünümüleri bir önceki bölümde verilmiştir. Yapılara ait gerekli analizlerin S-bantta gerçekleştiği için burada tekrarlanmamıştır. S-bantta çalışan soğurucular bölümünde tasarlanan bu yapılara ait elektrik alan dağılımı, yüzey akım dağılımı gibi analizler yardımıyla KHR’de dipol rezonans gözlenirken, AHR soğurucu yapısının ise *LC* rezonansa sahip olduğu gözlenmişti.

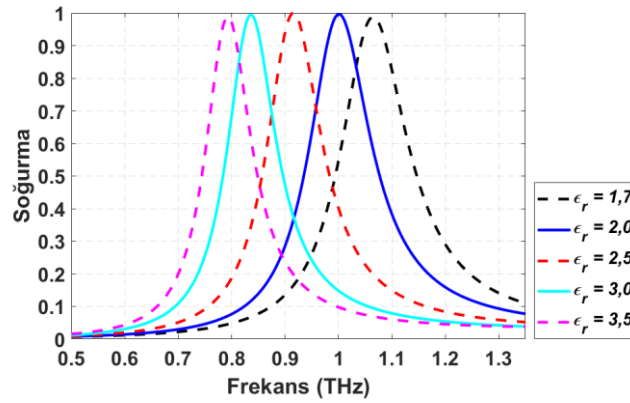
4.3.1.KHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzemenin göreceli elektriksel geçirgenliğinin (ϵ_r) soğurma oranına etkisi

Terahertz bölgesinde tasarlanan soğurucu yapılarından ilki olan KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısının farklı göreceli elektriksel geçirgenlik değerlerindeki soğurma oranları Şekil 4.35’de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.23’de yer almaktadır. Analizler sırasında dielektrik malzemenin kalınlığı $d_{\text{diel}} = 10 \mu\text{m}$ ve kayıp tanjantı $\tan\delta = 0,07$ olarak sabit tutulmuştur.

Çizelge 4.23. THz bölgesinde, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

ϵ_r	Rezonans Frekansı (THz)	Soğurma Oranı
1,7	1,065	0,988
2,0	1,000	0,996
2,5	0,916	1,000
3,1	0,835	0,995
3,5	0,794	0,988

Önceki bölümlerde gerçekleştirilen analizlerde olduğu gibi burada da ϵ_r değerinin artması kapasitansı artırmakta ve dolayısıyla rezonans frekansının azalmasına sebep olmaktadır. Şekil 4.35'den de görüldüğü üzere soğurma oranlarında kayda değer bir değişim gözlenmemektedir.



Şekil 4.35. THz bölgesinde, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

Literatüre baktığımızda kalite (Q) faktörü dar olan yapılarla gerçekleştirilen sensör uygulamalarının hassasiyetinin, geniş olanlara kıyasla daha fazla olduğunu görmekteyiz. THz bölgesinde gerçekleştirilen dielektrik malzemenin farklı ϵ_r değerindeki soğurma oranlarına baktığımızda soğurma tepelerin bant genişlikleri S ve X-bantta tasarlanan soğuruculara kıyasla daha geniş olduğu gözlenmektedir. Bant genişliğinin geniş olması kalite (Q) faktörlerinin dar olması anlamına gelmektedir. Bu sonuç bize literatürde THz ile ilgili çalışmaların neden popüler olduğunu bir kez daha göstermektedir.

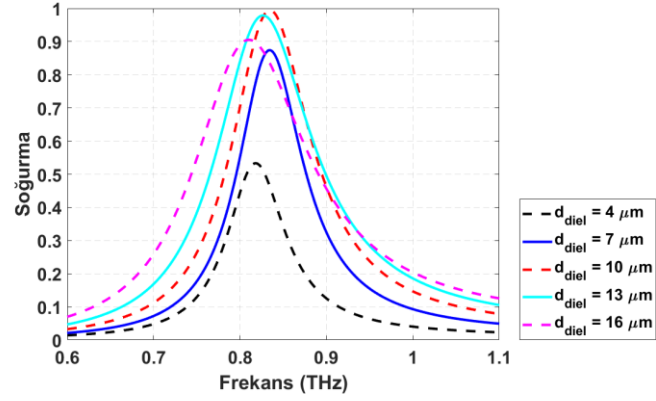
4.3.2. KHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisi

KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısının farklı dielektrik malzeme kalınlıklarındaki soğurma oranları Şekil 4.36'da gösterilmektedir. Literatürde genellikle bu kalınlıkta dielektrik malzemeler kullanılmamaktadır. Burada d_{diel} kalınlıkları test amaçlı seçilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.24'de yer almaktadır.

Çizelge 4.24. THz bölgesinde, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

d_{diel} (μm)	Rezonans Frekansı THz	Soğurma Oranı
4	0,818	0,533
7	0,834	0,874
10	0,835	0,995
13	0,827	0,979
16	0,810	0,905

Çizelge 4.24'e baktığımızda; d_{diel} değeri 4 μm 'den 16 μm 'ye kadar kademeli olarak artırılmıştır. Soğurma tepe değeri kalınlık 10 μm olana kadar artarken, 10 μm 'den sonra azalmaya başlamaktadır. S ve X-bantta olduğu gibi burada da yapıcı ve yıkıcı etkileri burada görmekteyiz. Burada 10 μm 'den sonra toplam yansımının faz değeri değişmiş ve kalınlık artması yıkıcı bir etki sağlamıştır.



Şekil 4.36. THz bölgesinde, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

Şimdiye kadar d_{diel} değeriyle ilgili gerçekleştirilen analizlerin hepsinde olduğu gibi benzer bir sonuç burada da görülmektedir. Sonuç olarak dielektrik malzeme kalınlığının artması soğurmayı belli bir noktaya kadar artırırken, belli bir noktadan sonra azaltmakta ve bu soğurucu yapısının rezonans türüne ve çalışma frekansına bağlı değildir.

4.3.3. KHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi

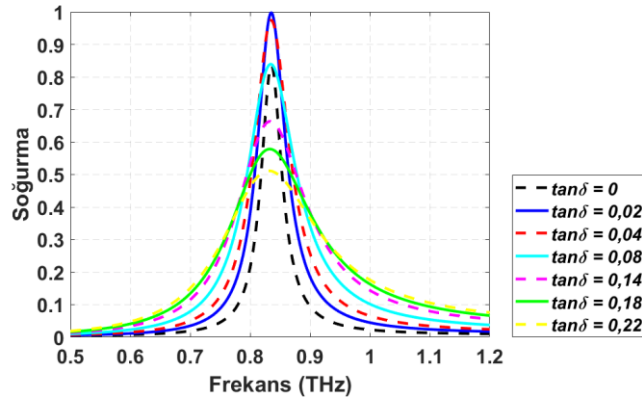
Terahertz bölgesi için, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısının farklı dielektrik malzeme kayıplarındaki soğurma oranlarıyla ilgili incelemeler üç farklı dielektrik malzeme kalınlığı için gerçekleştirilmiştir. Bu değerler S ve X-bantta gerçekleştirilen analizlerde olduğu gibi rasgele belirlenmiştir.

Analizler sırasında kullanılan kalınlıklardan ilki; dielektrik malzeme kalınlığının $7 \mu\text{m}$ olduğu durum içindir. $\tan\delta$ değeri 0'dan 0,22'ye kadar yedi farklı değer için rezonans frekansları ve soğurma oranlarındaki değişim incelenmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4.37'de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.25'de yer almaktadır.

Çizelge 4.25. THz bölgesinde, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 7 μm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

$\tan\delta$	Rezonans Frekansı (THz)	Soğurma Oranı
0	0,835	0,835
0,02	0,835	0,997
0,04	0,835	0,974
0,08	0,835	0,839
0,14	0,833	0,664
0,18	0,833	0,578
0,22	0,831	0,511

Çizelge 4.25'e bakacak olursak soğurmanın $\tan\delta = 0,02$ 'ye kadar arttığını bu noktadan sonra $\tan\delta$ artmaya devam ettiği halde soğurmanın azaldığını görmekteyiz. Yine burada da soğurucunun rezonans frekansında kayda değer bir değişiklik olmadığı gözlenmektedir.



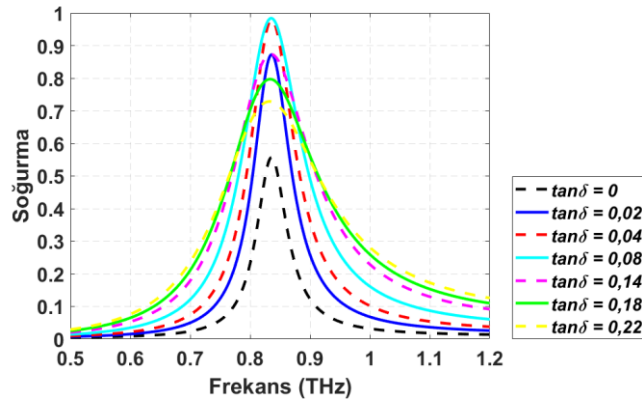
Şekil 4.37. THz bölgesinde, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 7 μm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

İkinci aşamada d_{diel} değeri 10 μm olarak belirlenmiş ve yine $\tan\delta$ değeri 0'dan 0,22'ye kadar yedi farklı değer için rezonans frekansları ve soğurma oranlarındaki değişim incelenmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4.38'de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.26'de yer almaktadır.

Çizelge 4.26. THz bölgesinde, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri $10 \mu\text{m}$ iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

$\tan\delta$	Rezonans Frekansı (THz)	Soğurma Oranı
0	0,836	0,557
0,02	0,836	0,872
0,04	0,836	0,979
0,08	0,835	0,984
0,14	0,835	0,874
0,18	0,833	0,797
0,22	0,833	0,729

Üçüncü bölümde teorik olarak da anlatılan hipotez, d_{diel} değeri $7 \mu\text{m}$ 'de olduğu gibi burada da doğrulanmıştır. Çizelge 4.26'ya bakılacak olunursa soğurmanın $\tan\delta = 0,08$ 'e kadar arttığı bu noktadan sonra $\tan\delta$ artmaya devam ettiği halde soğurmanın azaldığı görülebilir. Yine burada da soğurucunun rezonans frekansında kayda değer bir değişiklik olmadığı gözlenmektedir.



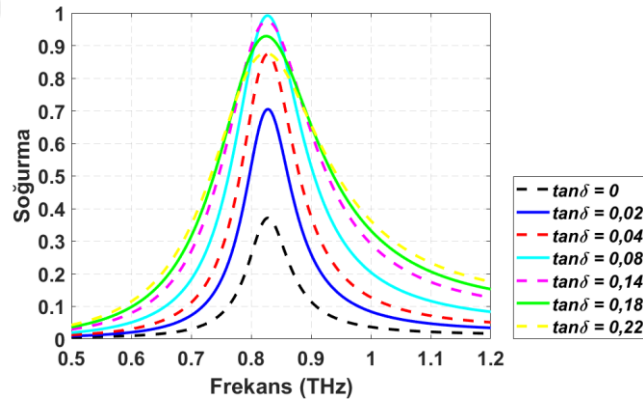
Şekil 4.38. THz bölgesinde, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri $10 \mu\text{m}$ iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

Bu bölümde son olarak d_{diel} değerinin $13 \mu\text{m}$ olduğu durum için farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisi incelenmiştir. Diğer analizler olduğu gibi yine burada da $\tan\delta$ değeri 0'dan 0,22'ye kadar yedi farklı değer için rezonans frekansları ve soğurma oranlarındaki değişim incelenmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4.39'de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.27'de yer almaktadır.

Çizelge 4.27. THz bölgesinde, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 13 μm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

$\tan\delta$	Rezonans Frekansı (THz)	Soğurma Oranı
0	0,828	0,371
0,02	0,828	0,705
0,04	0,828	0,874
0,08	0,828	0,992
0,14	0,826	0,975
0,18	0,826	0,929
0,22	0,824	0,877

d_{diel} değerinin 7 μm ve 10 μm olduğu durumlarda elde edilen sonuçların bir benzerini de burada görülmektedir. Çizelge 4.27'ye bakılacak olunursa soğurmanın $\tan\delta = 0,08$ 'e kadar arttığı bu noktadan sonra $\tan\delta$ artmaya devam ettiği halde soğurmanın azaldığı görülebilir. Diğer iki d_{diel} değerinde olduğu gibi burada da soğurucunun rezonans frekansında kayda değer bir değişiklik olmadığı söylenebilir.



Şekil 4.39. THz bölgesinde, KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 13 μm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

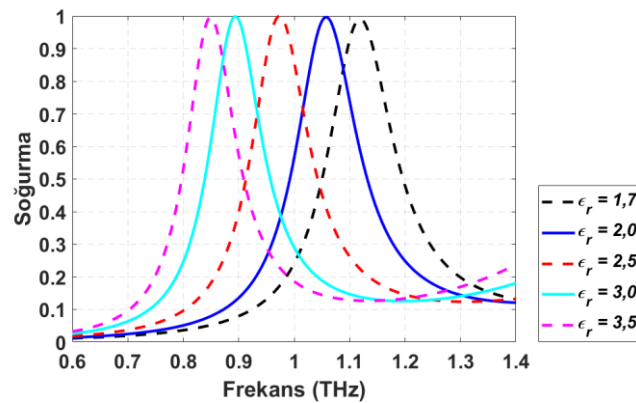
4.3.4. AHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzemenin göreceli elektriksel geçirgenliğinin (ϵ_r) soğurma oranına etkisi

Bu tez kapsamında son olarak tasarlanan soğurucu yapısı, Terahertz bölgesi için AHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısıdır. AHR yapısına ait tasarım parametreleri üçüncü bölümde verilmiştir. AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısının farklı göreceli elektriksel geçirgenlik değerlerindeki soğurma oranları Şekil 4.40'da gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.28'de yer almaktadır. Analizler sırasında dielektrik malzemenin kalınlığı $d_{\text{diel}} = 19 \mu\text{m}$ ve kayıp tanjantı $\tan\delta = 0,07$ olarak sabit tutulmuştur.

Çizelge 4.28. THz bölgesinde, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

ϵ_r	Rezonans Frekansı (THz)	Soğurma Oranı
1,7	1,119	0,991
2,0	1,058	0,996
2,5	0,973	1,000
3,1	0,893	0,999
3,5	0,849	0,996

KHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısında olduğu gibi burada da ϵ_r değerinin artması rezonans frekansının azalmasına sebep olmaktadır.



Şekil 4.40. THz bölgesinde, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı ϵ_r değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

Şekil 4.40'a baktığımızda 1.4 THz'den sonra AHR yapısına ait diğer moddaki rezonansı gelmektedir. S-bant, X-bant ve Terahertz bölgesinde tasarlanan tüm yapılarda gerçekleştirilen analizler temel moddaki soğurma tepesi için gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.40'daki soğurma tepelerinin bozuk olama sebebi budur. Bir diğer sebebi ise seçilen dielektrik malzeme kalınlığı THz bölgesi için kalın gelmektedir. Bilindiği üzere dielektrik malzeme kalınlığı, dalga boyundan çok çok küçük seçilmelidir.

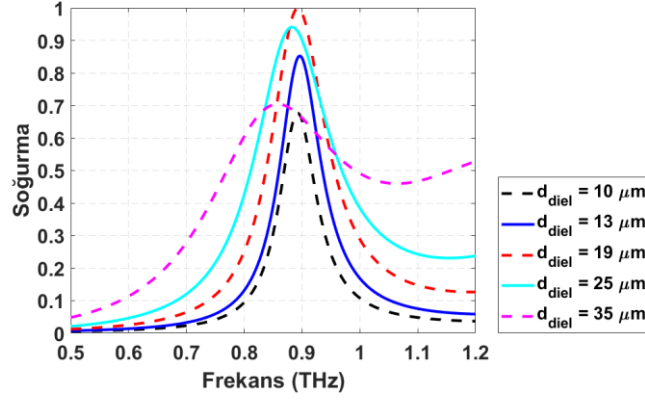
4.3.5. AHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisi

AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısının farklı dielektrik malzeme kalınlıklarındaki soğurma oranları Şekil 4.41'de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.29'da yer almaktadır.

Çizelge 4.29. THz bölgesinde, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

d_{diel} (μm)	Rezonans Frekansı THz	Soğurma Oranı
10	0,893	0,676
13	0,896	0,852
19	0,893	0,999
25	0,883	0,941
35	0,858	0,704

Çizelge 4.29'a bakıldığında; d_{diel} değeri 10 μm 'den 19 μm 'ye kadar kademeli olarak artırılmıştır. Soğurma tepe değeri kalınlık 19 μm olana kadar artarken, 19 μm 'den sonra azalmaya başlamaktadır. Burada 19 μm 'den sonra toplam yansımanın faz değeri değişmiş ve kalınlık artması yıkıcı bir etki sağlamıştır.



Şekil 4.41. THz bölgesinde, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

KHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için farklı d_{diel} değerlerinin soğurma oranına etkisini Şekil 4.36'da görülmüştü. Benzer bir sonuç AHR için Şekil 4.41'de görülebilir. Yine burada da dielektrik malzeme kalınlığının artması soğurmaya belli bir noktaya kadar artırırken, belli bir noktadan sonra azaltmaktadır.

4.3.6. AHR kullanılarak tasarlanan soğurucu yapısı için dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi

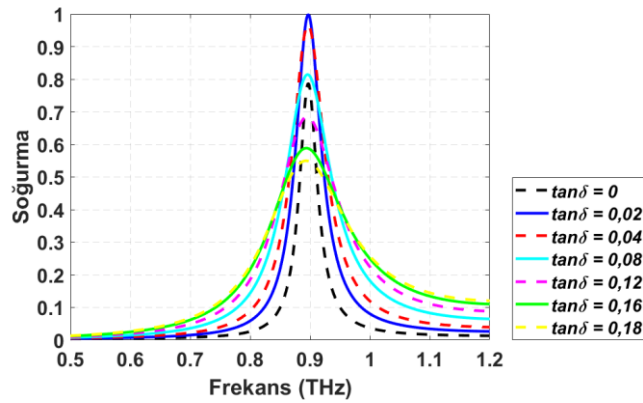
Terahertz bölgesi için, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısının farklı dielektrik malzeme kayıplarındaki soğurma oranlarıyla ilgili incelemeler KHR'de olduğu gibi burada da üç farklı dielektrik malzeme kalınlığı için gerçekleştirilmiştir.

Analizler sırasında kullanılan kalınlıklardan ilki; dielektrik malzeme kalınlığının $13 \mu\text{m}$ olduğu durum içindir. $\tan\delta$ değeri 0'dan 0,18'e kadar yedi farklı değer için rezonans frekansları ve soğurma oranlarındaki değişim incelenmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4.42'de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.30'da yer almaktadır.

Çizelge 4.30. THz bölgesinde, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri $13 \mu\text{m}$ iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

$\tan\delta$	Rezonans Frekansı (THz)	Soğurma Oranı
0	0,897	0,786
0,02	0,897	0,998
0,04	0,897	0,966
0,08	0,896	0,814
0,12	0,895	0,685
0,16	0,894	0,589
0,18	0,893	0,550

Çizelge 4.30'a bakılacak olunursa soğurmanın $\tan\delta = 0,02$ 'ye kadar arttığı bu noktadan sonra $\tan\delta$ artmaya devam ettiği halde soğurmanın azaldığı görülebilir. Yine burada da soğurucunun rezonans frekansında kayda değer bir değişiklik olmadığı gözlenmektedir.



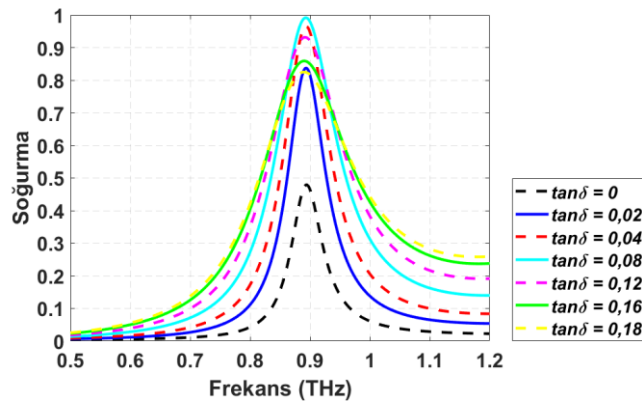
Şekil 4.42. THz bölgesinde, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri $13 \mu\text{m}$ iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

İkinci aşamada d_{diel} değeri $19 \mu\text{m}$ olarak belirlenmiş ve yine $\tan\delta$ değeri 0'dan 0,18'ye kadar yedi farklı değer için rezonans frekansları ve soğurma oranlarındaki değişim incelenmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4.43'de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.31'de yer almaktadır.

Çizelge 4.31. THz bölgesinde, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri $19 \mu\text{m}$ iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

$\tan\delta$	Rezonans Frekansı (THz)	Soğurma Oranı
0	0,894	0,479
0,02	0,893	0,837
0,04	0,893	0,965
0,08	0,893	0,991
0,12	0,892	0,931
0,16	0,891	0,859
0,18	0,890	0,825

d_{diel} değeri $13 \mu\text{m}$ 'de elde edilen sonuçların benzeri burada da elde edilmiştir. Çizelge 4.31'e bakılacak olunursa soğurmanın $\tan\delta = 0,08$ 'e kadar arttığı bu noktadan sonra $\tan\delta$ artmaya devam ettiği halde soğurmanın azaldığı görülebilir. Yine burada da soğurucunun rezonans frekansında kayda değer bir değişiklik olmadığı gözlenmektedir.



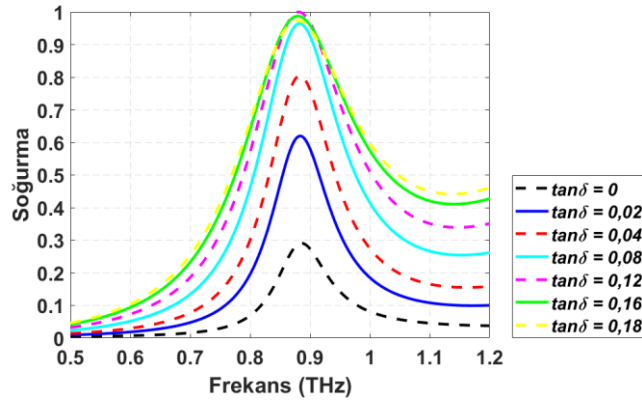
Şekil 4.43. THz bölgesinde, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri $19 \mu\text{m}$ iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen son analiz; d_{diel} değerinin $25 \mu\text{m}$ olduğu durum için farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisidir. Diğer analizler olduğu gibi yine burada da $\tan\delta$ değeri 0'dan 0,18'e kadar yedi farklı değer için rezonans frekansları ve soğurma oranlarındaki değişim incelenmiştir. Elde edilen bulgular Şekil 4.44'de gösterilmektedir. Elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekans değerleri ve soğurma oranları Çizelge 4.32'da yer almaktadır.

Çizelge 4.32. THz bölgesinde, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 25 μm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinde, benzetim ortamında elde edilen soğurma tepelerinin rezonans frekansları ve soğurma oranları.

$\tan\delta$	Rezonans Frekansı (THz)	Soğurma Oranı
0	0,886	0,291
0,02	0,884	0,620
0,04	0,883	0,804
0,08	0,882	0,964
0,12	0,882	1,000
0,16	0,879	0,987
0,18	0,879	0,974

d_{diel} değerinin 13 μm ve 19 μm olduğu durumlarda elde edilen sonuçların bir benzeri de burada görülebilir. Çizelge 4.32'ye bakılacak olunursa soğurmanın $\tan\delta = 0,12$ 'ye kadar arttığı bu noktadan sonra $\tan\delta$ artmaya devam ettiği halde soğurmanın azaldığı görülebilir. Diğer iki d_{diel} değerinde olduğu gibi burada da soğurucunun rezonans frekansında kayda değer bir değişiklik olmadığı söylenebilir.



Şekil 4.44. THz bölgesinde, AHR kullanılarak tasarlanmış soğurucu yapısı için d_{diel} değeri 25 μm iken farklı $\tan\delta$ değerlerinin soğurma oranına etkisinin benzetim sonuçları.

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Soğurucuların; balometre, spektral görüntüleme, güneş pili, foto detektör, sensörler, radar kesit alanı azaltma, antenlerde yan lob azaltma, enerji hasadı gibi farklı askeri ve sivil uygulamaları literatürde görülmektedir. Bu uygulamaların çoğunda soğurma oranı önemli bir yere sahiptir. Bu bağlamda maksimum seviyede soğurma elde etmeyi hedefleyen çalışmalar literatürde yaygın bir şekilde görülmektedir ve tasarlanan bu soğurucu yapılarının geometrik özellikleri değiştirilerek maksimum seviyede soğurma elde edilmeye çalışılmaktadır.

Bu tez kapsamında tasarlanan soğurucu yapısının geometrisi değiştirilmeden uygun dielektrik malzeme özellikleri kullanılarak maksimum soğurma elde edilebileceği gösterilmiştir. Bu bağlamda dielektrik malzeme göreceli elektriksel geçirgenliğinin, dielektrik malzeme kalınlığının ve son olarak da dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi incelenmiştir. Bunlarda S-bantta dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisi deneysel olarak da gösterilmiştir.

Gerçekleştirilen literatür incelemesinde dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisi üzerinde ortak bir yargı bulunmadığı gözlenmiştir. Kimi çalışmalarda dielektrik malzeme kalınlığının artırılması soğurmayı artırdığını söylerken, kimi çalışmalarda ise azalttığını söylemektedir. Literatürde bulunan bu kargaşayı çözmek amacıyla S, X-bant ve Terahertz bölgesi olmak üzere üç farklı frekans bandında iki farklı metamalzeme rezonatör (AHR ve KHR) tabanlı soğurucu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Dielektrik malzeme kalınlığı hariç tüm parametreleri sabit tutularak her bir yapının beş farklı kalınlıktaki soğurma miktarları ve soğurmanın gerçekleştiği frekanslar kaydedilmiştir. Tüm frekans bantlarında ve tüm soğurucu yapılarında, dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisi üzerine benzer sonuç elde edilmiştir. Böylelikle tez kapsamında öne atılan hipotezin soğurucunun geometrisine veya çalışma frekans bandına bağlı olmadığı ispat edilmiştir.

Dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisi üzerinde deneysel ve benzetim ortamında elde edilen sonuçlar neticesinde; dielektrik malzeme kalınlığının artması soğurmayı belli bir noktaya kadar artırdığı, bu noktadan sonra kalınlık artsa bile soğurmanın azaldığı gözlemlenmiştir.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen bir diğer çalışma ise dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi üzerinedir. Literatürdeki genel algı; soğurucu üzerine gelen elektromanyetik dalga soğurucuda metalik ve dielektrik kayıplar sayesinde ısı ya da türevlerine dönüşerek soğrulduğu yönündedir. Buradan yola çıkarak dielektrik malzeme kayıplarının artması soğurmayı artırdığı söylenmektedir. Literatürde detaylı bir analiz gerçekleştirildiğinde bazı çalışmalarda dielektrik malzeme kaybının artırılması, soğurma oranını azalttığını söylerken, kimi çalışmalarda ise soğurma oranına hiçbir etkisinin olmadığı söylenmektedir. Dielektrik malzeme kalınlığının soğurma oranına etkisi üzerinde bulunan kargaşa burada da görülmektedir. Literatürde mevcut olan çoğu çalışmada atladıkları nokta; dielektrik malzeme kaybının değiştirilmesi dielektrik kaybın artmasının yanı sıra soğurucu empedansına da etki etmektedir. Bu bağlamda dielektrik kayıpların artması soğurucu empedansının serbest uzayla uyumlu olduğu noktaya kadar soğurma oranını artırır. Kayıpların artmaya devam etmesi serbest uzay ile uyum sağlayan soğurucu yapısının empedans değerini değiştirir ve soğurmanın azalmasına sebep olmaktadır.

Dielektrik malzeme kaybının soğurmaya etkisini incelemek amacıyla; S, X-bant ve Terahertz bölgesi olmak üzere üç farklı frekans bandında iki farklı metamalzeme rezonatör (AHR ve KHR) tabanlı soğurucu tasarımı gerçekleştirilmiştir. Dielektrik malzeme kayıpları hariç tüm parametreleri sabit tutularak üç farklı kalınlık için yedi farklı kayıp değerinde benzetim ortamında analizler gerçekleştirilmiştir. Dielektrik malzeme kaybının soğurma oranına etkisi üzerine tüm frekans bölgelerinde gerçekleştirilen analizlerde dielektrik kayıpların artması soğurmayı belli bir noktaya kadar artırdığı bu noktadan sonra soğurmayı azalttığı gözlenmiştir.

Tez kapsamında ayrıca benzetim ortamında dielektrik malzeme göreceli elektriksel geçirgenliğinin soğurma oranına etkisi üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular neticesinde; dielektrik malzeme göreceli elektriksel geçirgenliğinin artırılması, soğurucunun rezonans frekansının azalmasına sebep olurken soğurma miktarında kayda değer bir değişikliğe sebep olmadığı sonucu çıkarılmıştır.



KAYNAKLAR

- Al-Badri, K.S.L., Cinar, A., Kose, U., Ertan, O., Ekmekci, E., 2017. Monochromatic Tuning of Absorption Strength Based on Angle-Dependent Closed-Ring Resonator-Type Metamaterial Absorber. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 16, 1060–1063.
- Al-Badri, K.S.L., Karacan, N., Kucukoner, E.M., Ekmekci, E., 2017. Sliding planar conjoined cut-wire-pairs: A novel approach for splitting and controlling the absorption spectra. *Journal of Applied Physics* 124(10), 105103.
- Astorino, M.D., Frezza, F., Tedeschi, N., 2017a. Broad-band Terahertz metamaterial absorber with stacked electric ring resonators. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 31(7), 727–739.
- Astorino, M.D., Frezza, F., Tedeschi, N., 2017b. Ultra-thin narrow-band, complementary narrow-band, and dual-band metamaterial absorbers for applications in the THz regime. *Journal of Applied Physics*. 121(6), 063103.
- Avitzour, Y., Urzhumov, Y.A., Shvets, G., 2009. Wide-angle infrared absorber based on a negative-index plasmonic metamaterial. *Physical Review B*. 79(4), 045131.
- Aydin, K., Ferry, V.E., Briggs, R.M., Atwater. H.A., 2011. Broadband polarization-independent resonant light absorption using ultrathin plasmonic super absorbers. *Nature Communications*. 2(1), 517.
- Baena, J.D., Marqués, B., Medina, F., Martel, J., 2004. Artificial magnetic metamaterial design by using spiral resonators. *Physical Review B*. 69(1), 014402.
- Bagci, F., Medina, F., 2017. Design of a wide-angle, polarization-insensitive, dual-band metamaterial-inspired absorber with the aid of equivalent circuit model. *Journal of Computational Electronics*. 16(3), 913–921.
- Bilotti, F., Toscano, A., Vegni, L., Aydin, K., Alici, K.B., Ozbay, E., 2007. Equivalent-Circuit Models for the Design of Metamaterials Based on Artificial Magnetic Inclusions. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 55(12), 2865–2873.
- Cardin, A., Fan, K., Padilla, W., 2018. Role of loss in all-dielectric metasurfaces. *Optics Express*. 26(13), 17669.
- Chen, H.T., 2012. Interference theory of metamaterial perfect absorbers. *Optics Express*. 20(7), 7165.
- Cheng, Y., Nie, Y., Gong, R., 2013. A polarization-insensitive and omnidirectional broadband Terahertz metamaterial absorber based on coplanar multi-

squares films. *Optics and Laser Technology* 48, 415–421.

- Cheng, Y., Nie, Y., Gong, R., 2013. Metamaterial absorber and extending absorbance bandwidth based on multi-cross resonators. *Applied Physics B*. 111(3), 483–488.
- Chowdbury, D.R., Singh, R., Reiten, M., Chen, H., Taylor, A.J., O’Hara, J.F., Azad, A.K., 2011. A Broadband Planar Terahertz Metamaterial with Nested Structure. *Optics Express*, 19 (17), 15817-15823.
- Costa, F., Genovesi, S., Monorchio, A., Manara, G., 2013. A circuit-based model for the interpretation of perfect metamaterial absorbers. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 61(3), 1201–1209.
- CST-Computer Simulation Technology, 1992. Erişim Tarihi: 09.02.2019. <https://www.cst.com/products/cstmws>
- Duan, G., Schalch, J., Zhao, X., Li, A., Chen, C., Averitt, R.A., Zhang, X., 2019. A survey of theoretical models for Terahertz electromagnetic metamaterial absorbers. *Sensors and Actuators A: Physical*. 287, 21–28.
- Duan, G., Schalch, J., Zhao X., Zhang, J., Averitt R.D., Zhang, X., 2018. An air-spaced Terahertz metamaterial perfect absorber. *Sensors and Actuators A: Physical* 280, 303–308.
- Ekmekci, E., Averitt, R.D., 2010. Effects of Substrate Parameters on the Resonance Frequency of Double-sided SRR Structures under Two Different Excitations. *PIERS Proceedings*, July, USA, 538–540.
- Ekmekci, E., Demir, E., 2016. On/Off Switching of Absorption Spectra by Layer Shifting for Double-Layer Metamaterial-Based Absorber. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 15, 532–535.
- Engheta, N., 2002. Thin absorbing screens using metamaterial surfaces. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, August, USA, 392-395.
- Ertan, Ö., Köse, U., Çınar, A., Ekmekçi, E., 2016. Mikrodalga Bölgesinde Farklı Rezonatör Yapılarının Sensör Uygulamaları İçin Hassasiyet Analizi. *Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı (ELECO)*, Aralık, Bursa, 550-553.
- Gay-Balmaz, P., Martin, O.J.F., 2002. Electromagnetic resonances in individual and coupled split-ring resonators. *Journal of Applied Physics*. 92(5), 2929–2936.
- Gong, J., Yang, F., Zhang, X., 2017. A novel wideband optical absorber based on all-metal 2D gradient nanostructures. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 50(45), 455105.

- Hao, J., Wang, J., Liu X., Padilla W.J., Zhou, L., Qiu, M. 2010. High performance optical absorber based on a plasmonic metamaterial. *Applied Physics Letters*. 96(25).
- Hu, D., Wang, H., Tang Z., Zhang, X., 2016. Investigation of a broadband refractory metal metamaterial absorber at Terahertz frequencies. *Applied Optics*. 55(19),5257.
- Hu, D., Wang, H., Tang, Z., Zhang, X., Zhu, Q., 2016. Design of four-band Terahertz perfect absorber based on a simple #-shaped metamaterial resonator. *Applied Physics A*. 122(9).
- Hu, F., Qian, Y., Li, Z., Niu, J., Nie, K., Xiong, X., Zhang, W., Peng, Z. 2013. Design of a tunable Terahertz narrowband metamaterial absorber based on an electrostatically actuated MEMS cantilever and split ring resonator array. *Journal of Optics*. 15(5).
- Hu, F., Wang, L., Quan, B., Xu, X., Zhi, L., Wu, Z., Pan, X., 2013. Design of a polarization insensitive multiband Terahertz metamaterial absorber. *Journal of Physics D*. 46(19).
- Katsarakis, N., Koschny, T., Kafesaki, M., Economou, E. N., Soukoulis, C. M., 2004. Electric coupling to the magnetic resonance of split ring resonators. *Applied Physics Letters*. 84(15), 2943–2945.
- Kim, S.J., Yoo, Y.J., Kim, Y.J., Lee, Y.P., 2017. Triple-band metamaterial absorption utilizing single rectangular hole. *Optics Communications*. 382, 151–156.
- Kocer, H., Butun, S., Li, Z., Aydin, K. 2015. Reduced near-infrared absorption using ultra-thin lossy metals in Fabry-Perot cavities. *Scientific Reports*. 5(1),8157.
- Köse, U., Ekmekçi, E., 2018. Metamalzeme Tabanlı Soğurucu Yüzeylerde Soğurma Miktarının Dielektrik Malzeme Özelliğine Göre Nümerik Olarak İncelenmesi. 9. URSI-Türkiye Bilimsel Kongresi, Eylül, Konya, 223-225.
- Landy, N. I., Bingham, C.M., Tyler, T., Jokerst, N., Smith, D.R., Padilla, W.J., 2009. Design, theory, and measurement of a polarization-insensitive absorber for Terahertz imaging. *Physical Review B* . 79(12),125104.
- Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J.J., Smith, D.R., Padilla, W.J., 2008. Perfect Metamaterial Absorber. *Physical Review Letters*. 100(20), 207402.
- Li, M., Liu, S., Guo, L.; Lin, H., Yang, H., Xiao, B., 2013. Influence of the dielectric-spacer thickness on the dual-band metamaterial absorber. *Optics Communications*.295, 262–267.
- Li, T., Liu, H., Wang, F.M., Dong, Z.G., Zhu, S.N., Zhang, X. 2006. Coupling effect of magnetic polariton in perforated metal/dielectric layered metamaterials

- and its influence on negative refraction transmission. *Optics Express*. 14(23),11155-63.
- Liao, Y., Zhao, Y., 2016. A wide-angle broadband polarization-dependent absorber with stacked metal-dielectric grating. *Optics Communications*. 370, 245–249.
- Liu, X., Starr, T., Starr, A.F., Padilla, W.J., 2010. Infrared Spatial and Frequency Selective Metamaterial with Near-Unity Absorbance. *Physical Review Letters*. 104(20), 207403.
- Luo, H., Cheng, Y.Z., Gong, R.Z., 2011. Numerical study of metamaterial absorber and extending absorbance bandwidth based on multi-square patches. *European Physical Journal B*. 81(4), 387–392.
- Mattiucci, N., Trimm, R., D’Aguanno, G., Aközbek, N., Bloemer, M.J., 2012. Tunable, narrow-band, all-metallic microwave absorber. *Applied Physics Letters*. 101(14), 141115.
- Millimeter Wave Products Inc. 1989. Erişim Tarihi: 09.02.2019. <http://miwv.com/images/Waveguide-Chart.pdf>
- Yan, N., Yong-Zhi, C., Rong-Zhou, G., 2013. A low-frequency wideband metamaterial absorber based on a cave-disk resonator and resistive film. *Chinese Physics B*. 22(4).
- Ozbay, E., Aydin, K., Cubukcu, E., Bayindir, M., 2003. Transmission and reflection properties of composite double negative metamaterials in free space. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 51(10), 2592–2595.
- Pan, W., Yu, X., Zhang, J., Zeng, W., 2017. A Broadband Terahertz Metamaterial Absorber Based on Two Circular Split Rings. *IEEE Journal of Quantum Electronics* 53(1).
- Pang, Y.Q., Zhou, Y.J., Wang, J., 2011. Equivalent circuit method analysis of the influence of frequency selective surface resistance on the frequency response of metamaterial absorbers. *Journal of Applied Physics*. 110(2).
- Pendry, J. B., Holden, A.J., Robbins, D.J., Stewart, W.J., 1999. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 47(11), 2075–2084.
- Pozar, D.M., 2005. *Microwave Engineering 4e*. John Wiley and Sons International Rights, 725p, United States of America.
- Ra’di, Y., Simovski, C.R., Tretyakov, S. A., 2015. Thin Perfect Absorbers for Electromagnetic Waves: Theory, Design, and Realizations. *Physical Review Applied*. 3(3).

- Raynolds, J.E., Munk, B.A., Pryor, J.B., Marhefka, R.J., 2003. Ohmic loss in frequency-selective surfaces. *Journal of Applied Physics*. 93(9), 5346–5358.
- Schurig, D., Mock, J.J., Smith, D.R., 2006. Electric-field-coupled resonators for negative permittivity metamaterials. *Applied Physics Letters*. 88(4).
- Shen, X., Yang, Y., Zang, Y., Gu, J., Han, J., Zhang, H., Cui, T.J., 2012. Triple-band Terahertz metamaterial absorber: Design, experiment, and physical interpretation. *Applied Physics Letters*. 101(15).
- Smith, D.R., Kroll, N., 2000. Negative Refractive Index in Left-Handed Materials. *Physical Review Letters*. 85(14), 2933–2936.
- Tao, H., Bingham, C.M., Strikwerda, A.C., Pilon, D., Shrekenhamer, D., Landy, N.I., Fan, K., Zhang, X., Padilla, W.J., Averitt, R.D., 2008. Highly flexible wide angle of incidence Terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization. *Physical Review B*. 78(24).
- Tao, H., Landy, N.I., Bingham, C.M., Zhang, X., Averitt, R.D., Padilla, W.J., 2008. A metamaterial absorber for the Terahertz regime: design, fabrication and characterization. *Optics Express*. 16(10).
- Tuong, P.V., Park, J.W., Lam, V.D., Jang, W.H., Nikitov, S.A., Lee, Y.P., 2013. Dielectric and Ohmic losses in perfectly absorbing metamaterials. *Optics Communications*. 295, 17–20.
- Wang, J., Fan, C., Ding, P., He, J., Cheng, Y., Hu, W., Cai, G., Liang, E., Xue, Q., 2012. Tunable broad-band perfect absorber by exciting of multiple plasmon resonances at optical frequency. *Optics Express*. 20(14).
- Wanghuang, T. Chen, W., Huang, Y., Wen, G., 2013. Analysis of metamaterial absorber in normal and oblique incidence by using interference theory. *AIP Advances*. 3(10).
- Watts, C.M., Liu, X., Padilla, W.J., 2012. Metamaterial Electromagnetic Wave Absorbers. *Advanced Materials*. 24(23).
- Wen, Q., Xie, Y., Zhang, H., Yang, Q., Li, Y., Liu, Y., 2009. Transmission line model and fields analysis of metamaterial absorber in the Terahertz band. *Optics Express*. 17(22).
- Wen, Q., Zhang, H., Xie, Y., Yang, Q., Liu, Y., 2009. Dual band Terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization. *Applied Physics Letters*. 95(24).
- Xiong, H., Yu, Y., Tang, M., Chen, S., Liu, D., Ou, X., Zeng, H., 2016. Varied absorption peaks of dual-band metamaterial absorber analysis by using reflection theory. *Applied Physics A*. 122(3).

- Veselago, V.G., 1968. The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of Permittivity and Permeability. *Soviet Physics Uspekhi*, 10(4), 509-514.
- Veselago, V., Braginsky, L. Shkover, V., Hafner, C., 2006. Negative refractive index materials. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 3(2), 189-218.
- Ye, Y.Q., Jin, Y., He, S., 2010. Omnidirectional, polarization-insensitive and broadband thin absorber in the Terahertz regime. *Journal of the Optical Society of America B*. 27(3).
- Zhai, H., Zhang, B., Zhang, K., Zhan, C. 2017. A stub-loaded reconfigurable broadband metamaterial absorber with wide-angle and polarization stability. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* .31(4), 447–459.
- Zhong, J., Huang, Y., Wen, G., Sun, H., Wang, P., Gordon, O., 2012. Single-/dual-band metamaterial absorber based on cross-circular-loop resonator with shorted stubs. *Applied Physics A*. 108(2), 329–335.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Umut KÖSE
Doğum Yeri ve Yılı : Isparta, 1993
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : umut.kose29@gmail.com.tr



Eğitim Durumu

Lise : Isparta Anadolu Lisesi, 2011
Lisans : SDÜ, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği 2016

Mesleki Deneyim

Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Araştırma Görevlisi. 2017-(halen)

Yayımlar

Al-Badri, K.S.L., Cinar, A., Kose, U., Ertan, O., Ekmekci, E., 2017. Monochromatic Tuning of Absorption Strength Based on Angle-Dependent Closed-Ring Resonator-Type Metamaterial Absorber. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters 16, 1060-1063.

Çınar, A., Köse, U., Ertan, Ö., Karacan, N., Başer, C., Ekmekçi, E., 2016. Ayrık Halkalı Rezonatör Tabanlı Bağlaşım Değeri Ayarlanabilir Mikroşerit Yönlü Bağlaç Tasarımı ve Benzetimleri. 8. URSI-Türkiye Bilimsel Kongresi, Eylül, Ankara.

Ertan, Ö., Köse, U., Çınar, A., Ekmekçi, E., 2016. Mikrodalga Bölgesinde Farklı Rezonatör Yapılarının Sensör Uygulamaları İçin Hassasiyet Analizi. Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı (ELECO), Aralık, Bursa, 550-553.

Küçüköner, E.M., Köse, U., Ekmekçi, E., 2016. Dambıl İlaveli Tamamlayıcı Ayrık Halka Rezonatör Tipi Bozulmuş Toprak Yüzeyde Rezonatör Konumunun

Elektriksel Boyut, Bant Genişliği ve Giriş Empedansına Etkisinin Nümerik Olarak İncelenmesi. Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı (ELECO), Aralık, Bursa, 543-546.

Köse, U., Ekmekçi, E., 2016. Ayrık Halka ve Kapalı Halka Rezonatör Kullanılarak Oluşturulan Kompozit Bir Yapı ile Saydam Pencere Uygulamasının Nümerik Olarak İncelenmesi. 8. URSI-Türkiye Bilimsel Kongresi, Eylül, Ankara.

Köse, U., Ekmekçi, E., 2018. Metamalzeme Tabanlı Soğurucu Yüzeylerde Soğurma Miktarının Dielektrik Malzeme Özelliğine Göre Nümerik Olarak İncelenmesi. 9. URSI-Türkiye Bilimsel Kongresi, Eylül, Konya, 223-225.

