



T.C.
MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**METAMALZEMELER, BAKIŞIMSIZ ORTAM VE MİKRODALGA
UYGULAMALARI**

Furkan DİNÇER

ENFORMATİK ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

HATAY
MART-2015

MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METAMALZEMELER, BAKIŞIMSIZ ORTAM
VE MİKRODALGA UYGULAMALARI

FURKAN DİNÇER
ENFORMATİK ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Yrd. Doç. Dr. Emin ÜNAL danışmanlığında hazırlanan bu tez 06/03/2015 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Emin ÜNAL
Başkan

Prof. Dr. Hamit SERBEST
Üye

Doç. Dr. Faruk KARADAĞ
Üye

Doç. Dr. Cumali SABAH
Üye

Yrd. Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN
Üye

Kod No:

Doç. Dr. Okan ŞENER
Enstitü Müdürü

Bu çalışma TUBİTAK tarafından desteklenmiştir.

Proje No: 113E290, 1059B141300477

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

06.03.2015

TEZ BİLDİRİMİ

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

Furkan DİNÇER

ÖZET

METAMALZEMELER, BAKIŞIMSIZ ORTAM VE MİKRODALGA UYGULAMALARI

Metamalzemeler; doğada bulunmayan, negatif kırılma gibi ayrıcalıklı ve egzotik elektromagnetik (EM) özelliklere sahip periyodik yapıda tasarlanmış malzemelerdir. Bu malzemeler elektromagnetik pelerin, sensör, sinyal emilimi, anten vb. çok sayıda potansiyel uygulama alanlarına sahiptir.

Bu tez çalışmasında metamalzemelerin potansiyel uygulama alanları ile ilgili analitik, nümerik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan tüm çalışmalarda, farklı geometrik şekilli birim elemanlardan oluşan yapay ortamların mikrodalga ve terahertz frekans aralığında efektif dielektrik permitivite (ϵ) ve efektif magnetik geçirgenlik (μ) özellikleri göz önünde bulundurulmuştur. Nümerik çalışmalar için FIT metodu tabanlı CST simülatörü, deneysel çalışmalar için ise Agilent E5071B ENA RF, AGILENT E8362B PNA ve R&S ZVL6 Vektör Network Analizörleri ve bunlara bağlı mikrodalga horn antenler kullanılmıştır.

Farklı geometrik yapılar kullanılarak elde edilen metamalzemeler ile ilgili; optik aktivite, yansıma ve iletim parametreleri, negatif kırılma indisi gibi özellikler nümerik ve deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen metamalzeme yapıların sinyal emici özellikleri de ayrıca incelenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan yapıların efektif dielektrik permitivite (ϵ), efektif magnetik geçirgenlik (μ) ve bakışimsızlık parametresi gibi özellikleri Nicolson Ross Weir yöntemi kullanılarak s-parametrelerinden elde edilmiştir.

Bakışimsızlık parametresi küçük yeni jenerasyon metamalzemeler kullanılarak lineer polarize dalgaların asimetrik iletimi ve dinamik polarizasyon dönüşümü ile ilgili uygulamalar yapılmıştır.

Ayrıca, metamalzeme tabanlı mükemmel sinyal emilim uygulamaları, metamalzeme tabanlı güneş hücresi uygulaması, metamalzeme tabanlı sensör uygulamaları, bakışimsız metamalzeme tabanlı mikroşerit anten uygulaması çalışmaları ayrıntılı olarak incelenmiş, analiz edilmiş ve gerçekleştirilmiştir.

2015, 171 sayfa

Anahtar Kelimeler: Metamalzemeler, mikrodalga, büyük bakışimsız, küçük bakışimsız, bakışimsız metamalzeme, sinyal emici.

ABSTRACT

METAMATERIALS, CHIRAL MEDIA AND MICROWAVE APPLICATIONS

Metamaterials; having distinctive exotic electromagnetic (EM) properties such as negative refraction which cannot be found in nature, are designed in a periodic structure. These materials have many potential application areas like electromagnetic cloak, sensor, signal absorption, antenna and so on.

In this thesis, analytical, numerical and experimental studies about the potential application areas of metamaterials are performed. In each work, effective dielectric permittivity (ϵ) and effective magnetic permeability (μ) of geometrical structures at microwave and terahertz frequencies are considered. CST simulator based on FIT method is used for numerical studies and Agilent E5071B ENA RF, AGILENT E8362B PNA and R&S ZVL6 network analyzers and horn antennas are used for the experimental works.

Related to the various metamaterials obtained using different geometric structures, characteristics, such as optical activity, reflection and transmission parameters, and negative refractive index were investigated numerically and experimentally. Signal absorbent properties of the resulting metamaterial structure was also investigated.

Effective dielectric permittivity (ϵ), effective magnetic permeability (μ) and chirality values used in this work are retrieved from s-parameters using Nicolson Ross Weir method.

Using new generation small chiral metamaterials, asymmetrical transmission and dynamic polarization conversion related to linearly polarized wave was also investigated.

In addition, metamaterial-based excellent signal absorption applications, metamaterial based solar cell application, metamaterial-based sensor applications, chiral metamaterial-based microstrip antenna applications were examined, analyzed and realized.

2015, 171 pages

Key Words: Metamaterials, microwave, large chirality, small chirality, chiral metamaterial, signal absorber.

TEŞEKKÜR

Çalışma ve uygulama sürecinde önemli katkılarını esirgemeyen, çalışmamda her zaman kıymetli desteklerini verip beni cesaretlendiren Danışman hocam; Yrd. Doç. Dr. Emin ÜNAL, İkinci Danışman hocam; Doç. Dr. Cumali SABAH ve ayrıca Tez İzleme Komitesi Üyeleri; Yrd. Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN ve Doç. Dr. Faruk KARADAĞ hocalarıma teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Diğer taraftan çalışmalarımda katkıları olan, Yrd. Doç. Dr. Oğuzhan AKGÖL, Doç. Dr. Kemal DELİHACIOĞLU, Mehmet BAKIR, Yrd. Doç. Dr. Mustafa DEMİRCİ hocalarıma ve ayrıca bizleri onurlandıran ve desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Hamit SERBEST hocama, ek olarak maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	XIX
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XX
1.GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	8
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	14
3.1. Materyal.....	14
3.1.1. Çift Tabakalı Süreksiz Çapraz Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı Yapı.....	14
3.1.2. Çift Tabakalı Aralıklı Kare Şekil Rezonatör Tabanlı Yapı.....	15
3.1.3. Çift Tabakalı Gammadion Çapraz Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı Yapı.....	16
3.1.4. Daire Şekil Ayırık Halka Rezonatör Tabanlı Yapı.....	17
3.1.5. Dikdörtgen Şekil Ayırık Halka Rezonatör Tabanlı Yapı.....	18
3.1.6. Omega Şekil Ayırık Halka Rezonatör Tabanlı Yapı.....	19
3.1.7. Omega Rezonatör ve Sekizgen Yıldız Şekil Tabanlı Yapı.....	20
3.1.8. Süreksiz Çapraz Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı Yapı.....	21
3.1.9. Aralıklı Halka ve Sekizgen Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı Yapı.....	22
3.1.10. Asimetrik Dikdörtgen Şekil Rezonatör Tabanlı Yapı.....	23
3.1.11. Halka ve Çapraz Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı Yapı.....	23
3.1.12. Omega, Kare, Dikdörtgen, Çapraz Yıldız Şekil Tabanlı Yapı.....	24
3.2. Yöntem.....	26
3.2.1. Metamalzemelerde Parametrelerin Geri Elde Edilmesi.....	27
3.2.2. Bakışsız Metamalzemelerde Asimetrik İletim Hesaplamaları.....	33
3.2.3. Sinyal Emicilerin Analitik Hesabı.....	35

3.2.4. EM Dalga Problemleri için Nümerik Metotlar.....	38
3.2.5. Ölçüm Düzenegi.....	41
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	45
4.1. Optiksel Aktivitesi ve Negatif Kırılma İndisi Büyük Bakışimsız	
Metamalzemeler İle S- Parametrelerinin Geri Elde Edilmesi.....	45
4.1.1. Çift Tabakalı Süreksiz Çapraz Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı.....	45
4.1.2. Çift Tabakalı Aralıklı Kare Şekil Rezonatör Tabanlı.....	49
4.1.3. Çift Tabakalı Gammadion Çapraz Yıldız Şekil	
Rezonatör Tabanlı.....	53
4.2. Küçük Bakışimsızlık Parametre Değerine Sahip Yeni Jenerasyon	
Bakışimsız Metamalzemeler.....	56
4.2.1. Daire Şekil Ayrık Halka Rezonatör Tabanlı.....	56
4.2.2. Dikdörtgen Şekil Ayrık Halka Rezonatör Tabanlı.....	67
4.2.3. Omega Şekil Ayrık Halka Rezonatör Tabanlı.....	74
4.3. Bakışimsız Metamalzemeler ile Lineer Polarize Dalgaların Asimetrik	
İletimi ve Dinamik Polarizasyon Dönüştürümü.....	81
4.3.1. Çift Tabakalı Süreksiz Çapraz Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı.....	81
4.3.2. Çift Tabakalı Aralıklı Kare Şekil Rezonatör Tabanlı.....	88
4.4. Metamalzeme Tabanlı Mükemmel Sinyal Emilim Uygulamaları.....	93
4.4.1. Omega Rezonatör ve Sekizgen Yıldız Şekil Tabanlı Çift Bantlı	
Polarizasyon Bağımsız Sinyal Emici.....	93
4.4.2. Süreksiz Çapraz Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı Gelen Aç	
Bağımsız Mükemmel GHz-THz Sinyal Emici.....	101
4.4.3. Aralıklı Halka ve Sekizgen Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı	
Çift Bantlı Gelen Aç ve Polarizasyon Bağımsız Sinyal Emici.....	108
4.4.4. Aralıklı Halka ve Sekizgen Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı	
Multi Bantlı Ayarlanabilir Mükemmel Mikrodalga Sinyal Emici....	119
4.4.5. Asimetrik Dikdörtgen Şekil Rezonatör Tabanlı Multi Bantlı	
Sinyal Emici.....	125
4.4.6. Halka ve Çapraz Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı Gelen Aç ve	
Polarizasyon Bağımsız Mükemmel Sinyal Emici.....	130
4.4.7. GHz ve THz Frekanslarında Frekans Seçici Yüzeyler ile	

PolarizasyonBağımsız Mükemmel Sinyal Emiciler.....	137
4.5. Metamalzeme Tabanlı Güneş Hücresi Uygulaması.....	146
4.5.1. Mikrodalga, Kızılötesi ve Görünür Bölgede Aralıklı Kare Şekil Rezonatör Tabanlı Polarizasyon Bağımsız Güneş Hücresi için Sinyal Emici.....	146
4.6. Metamalzeme Tabanlı Sensör Uygulamaları.....	152
4.6.1. Halka ve Çapraz Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı.....	152
4.7. Bakışsız Metamalzeme Tabanlı Mikroşerit Anten Uygulaması.....	153
4.7.1. Aralıklı Kare Şekil Rezonatör ve Mikroşerit Anten Tabanlı.....	153
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	157
KAYNAKLAR.....	160
ÖZGEÇMİŞ.....	171

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Eş zamanlı negatif ε ve μ değerlerine sahip ilk üretilen metamalzeme.....	2
Şekil 1.2. Ortam EM parametreleri ve EM alanların ortam içerisinde ilerlemesi.....	3
Şekil 3.1. (a) Birim hücrenin ölçülerinin şematik gösterimi, (b) ve (c) üretilen yapılar.....	15
Şekil 3.2. Amaçlanan bakışimsız metamalzeme yapısı, (a) birim hücrenin ölçü değerleri, (b) üretilen yapı.....	16
Şekil 3.3. Amaçlanan bakışimsız metamalzeme, (a) birim hücrenin ölçü değerleri, (b) üretilen yapı- $c = 0.20 \text{ mm}$, (c) üretilen yapı- $c = 0.35 \text{ mm}$	17
Şekil 3.4. (a) Birim hücre ölçü değerleri, (b) Üretilen yapı	18
Şekil 3.5. (a) Birim hücre ölçü değerleri, (b) Üretilen yapı.....	18
Şekil 3.6. (a) Birinci yapı için birim hücre ölçü değerleri, (b) İkinci yapı için birim hücre ölçü değerleri, (c) üretilen birinci yapı, (d) üretilen ikinci yapı.....	19
Şekil 3.7. (a) Birim hücre ölçü değerleri, (b) Üretilen yapı.....	20
Şekil 3.8. (a) Birim hücre ölçü değerleri, (b) Üretilen yapı.....	20
Şekil 3.9. Tasarlanan ve üretilen sinyal emici yapısı , (a) birim hücre ölçü değerleri, (b) üretilen yapı.....	21
Şekil 3.10. (a) Birim hücre ölçü değerleri, (b) üretilen yapı.....	22
Şekil 3.11. Amaçlanan çift bantlı metamalzeme sinyal emici yapısı, (a) birim hücre ölçü değerleri, (b) üretilen yapı.....	22
Şekil 3.12. Çok bantlı metamalzeme sinyal emici, (a) birim hücre ölçü değerleri, (b) üretilen yapı.....	23
Şekil 3.13. (a) Birim hücre ölçü değerleri, (b) üretilen yapı.....	24
Şekil 3.14. Amaçlanan mikrodalga FSS metamalzeme sinyal emicilerin ölçü değerleri, (a) yapı-1, $a1 = 10 \text{ mm}$, $a2 = 5 \text{ mm}$, $a3 = 20 \text{ mm}$, $a4 = 2 \text{ mm}$, $a5 = 1 \text{ mm}$, $a6 = 14 \text{ mm}$, (b) yapı- 2, $a1 = 5.909 \text{ mm}$, $a2 = 20 \text{ mm}$, $a3 = 22 \text{ mm}$, $a4 = 3 \text{ mm}$, yapı-3, $a1 = 4 \text{ mm}$, $a2 = 6 \text{ mm}$, $a3 = 20 \text{ mm}$, $a4 = 3 \text{ mm}$, $a5 = 24 \text{ mm}$, $a6 = 18 \text{ mm}$, (d) yapı-4, $a1 = 18 \text{ mm}$, $a2 = 6 \text{ mm}$, $a3 = 20 \text{ mm}$, $a4 = 29 \text{ mm}$, $a5 = 1 \text{ mm}$, $a6 = 4.5 \text{ mm}$, $a7 = 24 \text{ mm}$	25
Şekil 3.15. Amaçlanan THz FSS metamalzeme sinyal emicilerin ölçü değerleri,	

yapı-5, $a_1 = 360 \text{ um}$, $a_2 = 300 \text{ um}$, $a_3 = 80$, $a_4 = 200 \text{ um}$, $a_5 =$ 40 um , $a_6 = 160 \text{ um}$, (b) yapı6, $a_1 = 340 \text{ um}$, $a_2 = 70 \text{ um}$, $a_3 =$ 240 um , $a_4 = 60 \text{ um}$	25
Şekil 3.16. Dalga kılavuzu içerisinde S parametrelerinin ölçüm konfigürasyonu.....	28
Şekil 3.17. Emilim teorisi için EM dalganın şematik gösterimi.....	36
Şekil 3.18. Vektör network analizörleri.....	41
Şekil 3.19. Çapraz etkileşimden meydana gelebilecek etkileri önleme için antenler arasına mikrodalga emici tabakasının yerleştirilmesi.....	42
Şekil 3.20. Şematik sinyal emici ölçüm gösterimi.....	42
Şekil 3.21. Sinyal emilim çalışmalarına atı ölçüm şekli, (a) kalibrasyon, (b) yapı ölçümü.....	43
Şekil 3.22. Bakışsız metamatizme için deney metodunun şematik gösterimi.....	44
Şekil 3.23. Metamatizmeler için deney metodunun şematik gösterimi.....	44
Şekil 4.1. Parametrelerin geri elde edilmesi ile negatif kırılma indisi sonuçları. Sol taraf nümerik sonuçları ifade ederken, sağ taraf deneysel sonuçları temsil etmektedir. Kırmızı düz çizgi $D = 0.25 \text{ mm}$ değeri için temsil edilirken, yeşil düz çizgi $D = 0.30 \text{ mm}$ değeri için ifade edilmektedir.....	46
Şekil 4.2. Bakışsızlık parametresi nümerik (sol taraf) ve deneysel (sağ taraf) sonuçları. Kırmızı renkli çizgi $D = 0.25 \text{ mm}$ değerini temsil ederken, yeşil renkli çizgi de $D = 0.30 \text{ mm}$ değerini temsil etmektedir.....	47
Şekil 4.3. Nümerik (sol taraf) ve deneysel (sağ taraf) dielektrik ve manyetik geçirgenlik değerleri. Kırmızı renkli çizgi $D = 0.25 \text{ mm}$ değerini temsil ederken, yeşil renkli çizgi de $D = 0.30 \text{ mm}$ değerini temsil etmektedir.....	47
Şekil 4.4. Çapraz şeritlerin farklı kalınlık değerleri için nümerik bakışsızlık değerleri.....	48
Şekil 4.5. Çapraz şeritler arasındaki mesafe değerleri için nümerik bakışsızlık değerleri.....	49
Şekil 4.6. (a) ve (b) nümerik ve deneysel $Abs(T_L)$ ve $Abs(T_R)$ sonuçları, (c) ve (d) dairesel döndürme ve teta açısı değeri sonuçları olup kırmızı renkli çizgi ölçüm değerini ifade ederken yeşil renkli çizgi de nümerik	

sonuç değerini temsil etmektedir.....	50
Şekil 4.7. (a) chirality (κ), (b) n_+ , (c) n , (d) n_- , (e) ε , and (f) μ değerleri için nümerik ve ölçüm değerleri. Kırmızı çizgiler ölçüm değerlerini temsil ederken yeşil çizgiler de nümerik sonuçlarını temsil etmektedir.....	51
Şekil 4.8. Ortamın (a), FOM (n) ve (b), LF (n) için nümerik değerleri.....	52
Şekil 4.9. Bakışsızlık değeri için parametrik çalışma, (a) aralık uzunluğuna göre, (b) arka rezonatörün açısına göre.....	53
Şekil 4.10. Kırılma indisi değerleri, nümerik sonuçlar. Kırmızı çizgi $d = 0.40 \text{ mm}$ olan yapıyı temsil ederken, yeşil çizgiler $d = 0.70 \text{ mm}$ olan yapıyı ifade etmektedir.....	54
Şekil 4.11. Kırılma indisi değerleri, deneysel sonuçlar. Kırmızı çizgi $d = 0.40 \text{ mm}$ olan yapıyı temsil ederken, yeşil çizgiler $d = 0.70 \text{ mm}$ olan yapıyı ifade etmektedir.....	54
Şekil 4.12. Bakışsızlık değerleri, nümerik ve deneysel sonuçlar. Kırmızı çizgi $d = 0.40 \text{ mm}$ olan yapıyı temsil ederken, yeşil çizgiler $d = 0.70 \text{ mm}$ olan yapıyı ifade etmektedir.....	55
Şekil 4.13. Elektriksel ve magnetik geçirgenlik değerleri. Nümerik sonuçlar. Kırmızı çizgi $d = 0.40 \text{ mm}$ olan yapıyı temsil ederken, yeşil çizgiler $d = 0.70 \text{ mm}$ olan yapıyı ifade etmektedir.....	55
Şekil 4.14. Elektriksel ve magnetik geçirgenlik değerleri. Deneysel sonuçlar. Kırmızı çizgi $d = 0.40 \text{ mm}$ olan yapıyı temsil ederken, yeşil çizgiler $d = 0.70 \text{ mm}$ olan yapıyı ifade etmektedir.....	56
Şekil 4.15. Tasarlanan çift ayırık halka rezonatörlerin şematik gösterimi-yapı 1.....	56
Şekil 4.16. Tasarlanan çift ayırık halka rezonatörlerin şematik gösterimi-yapı 2.....	56
Şekil 4.17. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışsız metalmalzemelerin içteki rezonatörün 0° 'den 360° 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon yansıma katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.....	57
Şekil 4.18. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışsız metalmalzemelerin içteki rezonatörün 0° 'den 360° 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon T_{xx} iletim katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.....	58

Şekil 4.19. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışsız metamatizeminin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon T_{yy} iletim katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.....	59
Şekil 4.20. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışsız metamatizeminin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon T_{xy} iletim katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.....	59
Şekil 4.21. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışsız metamatizeminin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon T_{yx} iletim katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.....	60
Şekil 4.22. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışsız metamatizeminin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon $Abs(T_L)$ iletim katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.....	61
Şekil 4.23. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışsız metamatizeminin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon $Abs(T_R)$ iletim katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.....	61
Şekil 4.24. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışsız metamatizeminin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon dairesel dichroism değeri. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.....	63
Şekil 4.25. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışsız metamatizeminin deneysel dairesel dichroism değeri. Yukarı taraf geometri 1'i, aşağı taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.....	63
Şekil 4.26. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışsız metamatizeminin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon teta açısı değeri. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.....	64
Şekil 4.27. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışsız metamatizeminin	

deneysel teta açısı değeri. Yukarı taraf geometri 1'i, aşağı taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.....	64
Şekil 4.28. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamatizemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon bakışimsızlık değeri. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.....	65
Şekil 4.29. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamatizemenin deneysel bakışimsızlık değeri. Yukarı taraf geometri 1'i, aşağı taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.....	66
Şekil 4.30. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamatizemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon yansıma katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.....	67
Şekil 4.31. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamatizemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon T_{xx} iletim katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.....	68
Şekil 4.32. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamatizemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon T_{yy} iletim katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.....	69
Şekil 4.33. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamatizemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon T_{xy} iletim katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.....	69
Şekil 4.34. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamatizemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon $Abs(T_L)$ iletim katsayıları.	

Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.....	70
Şekil 4.35. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon $Abs(T_R)$ iletim katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.....	70
Şekil 4.36. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon dairesel dichroism değeri. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.....	71
Şekil 4.37. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin deneysel dairesel dichroism değeri. Yukarı taraf geometri 1'i, aşağı taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.....	71
Şekil 4.38. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon teta açısı değeri. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.....	72
Şekil 4.39. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin deneysel teta açısı değeri. Yukarı taraf geometri 1'i, aşağı taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.....	72
Şekil 4.40. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon bakışimsızlık değeri. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.....	73
Şekil 4.41. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin deneysel bakışimsızlık değeri. Yukarı taraf geometri 1'i, aşağı taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.....	74
Şekil 4.42 Tasarlanan omega şekil tabanlı rezonatörlerin şematik gösterimleri.....	75

- Şekil 4.43. Omega ayrık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin içindeki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon yansıma katsayıları. Sol taraf geometri 1'i, sağ taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.....76
- Şekil 4.44. Omega ayrık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin içindeki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon $Abs(T_L)$ iletim katsayıları. Sol taraf geometri 1'i, sağ taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.....76
- Şekil 4.45. Daire ayrık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin içindeki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon $Abs(T_R)$ iletim katsayıları. Sol taraf geometri 1'i, sağ taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.....77
- Şekil 4.46. Omega ayrık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin içindeki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon dairesel dichroism değeri. Sol taraf geometri 1'i, sağ taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.....78
- Şekil 4.47. Daire ayrık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin deneysel dairesel dichroism değeri. Yukarı taraf geometri 1'i, aşağı taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.....78
- Şekil 4.48. Omega ayrık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin içindeki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon teta açısı değeri. Sol taraf geometri 1'i, sağ taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.....79
- Şekil 4.49. Omega ayrık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin deneysel teta açısı değeri. Yukarı taraf geometri 1'i, aşağı taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.....79
- Şekil 4.50. Dikdörtgen ayrık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin içindeki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon bakışimsızlık değeri. Sol taraf geometri 1'yi, sağ taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.....80
- Şekil 4.51. Daire ayrık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin

deneysel bakışimsızlık değeri. Yukarı taraf geometri 1'i, aşağı	
taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.....	81
Şekil 4.52. +z ve -z yayılım yönleri için bakışimsız plakaya ait dört matris	
elemanının (T_{xx} , T_{xy} , T_{yx} , T_{yy}) ölçüm ve simülasyon iletim spektrumları...	82
Şekil 4.53. Lineer ve dairesel polarizasyon için asimetric iletim Δ parametresinin	
nümerik ve deneysel sonuçları.....	83
Şekil 4.54. Üretilen bakışimsız metamatizeme yapısı için bakışimsızlık	
parametresinin nümerik ve deneysel sonucu.....	84
Şekil 4.55. Amaçlanan model için Figure of Merit sonucu.....	85
Şekil 4.56. Çapraz yıldız şekil tabanlı bakışimsız metamatizeme için farklı	
ölçülerdeki bakışimsızlık parametresi için simülasyon sonuçları	
(a) şeritler arasındaki aralık değışiminin sonuçları	
(b) şerit uzunluklarının değışimlerinin sonuçları.....	85
Şekil 4.57. 8.36 GHz mağnetik rezonans frekansında (sol -taraf) ve 6.46 GHz	
elektrik rezonans frekansında yüzey akım dağılımları.....	86
Şekil 4.58. 8.36 GHz rezonans frekansında yapıdaki mağnetik alan dağılımı	
(sol-taraf) ve 6.46 GHz rezonans frekansındaki yapıdaki elektrik alan	
sağılımı (sağ-taraf).....	87
Şekil 4.59. +z ve -z yönlerindeki yayılımlar için yapının T_{xx} , T_{xy} , T_{yx} , T_{yy}	
matris elementlerinin nümerik ve deneysel değeri.....	88
Şekil 4.60. Lineer ve dairesel polarizasyon için asimetric iletimin nümerik ve	
deneysel sonuçları.....	90
Şekil 4.61. Üretilen bakışimsız tasarım için nümerik ve deneysel	
bakışimsızlık parametresi.....	91
Şekil 4.62. Önerilen yapı için FOM gösterimi.....	91
Şekil 4.63. 4.41 GHz ve 5.36 GHz rezonans frekansları için yüzey akım dağılımları...	92
Şekil 4.64. 4.41 GHz ve 5.36 GHz rezonans frekansları için elektrik alan dağılımları..	92
Şekil 4.65. Amaçlanan mikrodalga sinyal emici için yansıma ve emilim	
nümerik değeri. İçteki şekil: Ω rezonatör için aralıksız metamatizeme	
sinyal emicinin yansıma karakteristiğı.....	95
Şekil 4.66. Amaçlanan mikrodalga sinyal emici için ölçülen yansıma ve	
emilim değeri.....	95

Şekil 4.67. Birim hücrenin 4.0 GHz rezonans frekansında ön ve arka kısmının elektrik alan dağılımının görünüşü.....	96
Şekil 4.68. Birim hücrenin 4.0 GHz rezonans frekansında ön ve arka kısmının yüzey akım dağılımının görünüşü.....	97
Şekil 4.69. Birim hücrenin 5.6 GHz rezonans frekansında ön ve arka kısmının elektrik alan dağılımının görünüşü.....	97
Şekil 4.70. Birim hücrenin 5.6 GHz rezonans frekansında ön ve arka kısmının yüzey akım dağılımının görünüşü.....	98
Şekil 4.71. Farklı gelen açılar için yansıma ve emilim değerleri.....	99
Şekil 4.72. TE ve TM polarizasyonlar için emilimin açısal bağımlılığının nümerik sonuçları.....	100
Şekil 4.73. Amaçlanan metamalzeme sinyal emici için nümerik yansıma-emilim değerleri ve FBW hesaplamaları.....	102
Şekil 4.74. Amaçlanan metamalzeme sinyal emici için deneysel yansıma-emilim değerleri ve FBW hesaplamaları.....	102
Şekil 4.75. Farklı açı değerlerinde TE ve TM gelen dalga için nümerik emilim değerleri.....	103
Şekil 4.76. 3.42 GHz rezonans frekansında yüzey akım dağılımlarının görünüşü.....	104
Şekil 4.77. 3.42 GHz rezonans frekansında elektrik alan dağılımlarının görünüşü....	104
Şekil 4.78. Amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısının motife edilmiş nümerik emilim değerleri.....	105
Şekil 4.79. Amaçlanan geometri için yüksek frekanstaki emilim karakteristiği.....	106
Şekil 4.80. Amaçlanan çift bantlı metamalzeme sinyal emicinin nümerik yansıma ve emilim değerleri.....	109
Şekil 4.81. Amaçlanan çift bantlı metamalzeme sinyal emicinin ölçülen yansıma ve emilim değerleri.....	110
Şekil 4.82. Amaçlanan çift bantlı modife edilmiş metamalzeme sinyal emicinin nümerik emilim.....	111
Şekil 4.83. Yatay ve dikey aralıklı rezonatörler için elektrik alan, manyetik alan ve yüzey akım dağılımlarının nümerik gösterimi.....	112
Şekil 4.84. 4.32 GHz ilk rezonans frekansı için elektrik alan dağılımı.....	113
Şekil 4.85. 5.73 GHz ikinci rezonans frekansı için elektrik alan dağılımı.....	113

Şekil 4.86. 4.32 GHz ilk rezonans frekansı için yüzey akım dağılımı.....	114
Şekil 4.87. 5.73 GHz ikinci rezonans frekansı için yüzey akım dağılımı.....	115
Şekil 4.88. Farklı gelen açılar için 0°'den 90°'ye kadar nümerik yansıma ve emilim değerlerinin karakteristiği.....	116
Şekil 4.89. TE ve TM polarize olmuş dalgalar için nümerik açısal bağımlılık özellikleri.....	117
Şekil 4.90. Amaçlanan model ve referans [41] çalışması için nümerik bakışsızlık değerleri.....	118
Şekil 4.91. Amaçlanan çift bantlı metamalzeme sinyal emici için nümerik (devamlı çizgi) ve ölçülen (noktasal çizgi) yansıma-emilim değerleri.....	120
Şekil 4.92. Farklı polarizasyon açılarında nümerik emilim değerleri.....	121
Şekil 4.93. TE ve TM gelen dalga durumları için farklı açı değerlerindeki nümerik emilim değerleri.....	121
Şekil 4.94 Modifiye versiyonları için nümerik emilim değerleri.....	123
Şekil 4.95 Yüksek frekans tasarımı için nümerik emilim değerleri.....	124
Şekil 4.96. Frekansın bir fonksiyonu olarak amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısı için nümerik ve deneysel yansıma sonuçları.....	125
Şekil 4.97. Frekansın bir fonksiyonu olarak amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısı için nümerik ve deneysel emilim sonuçları.....	126
Şekil 4.98. Amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısının nümerik yüksek frekans çözümü.....	126
Şekil. 4.99. TE gelen açı için emilim değerlerinin açısal değişimi.....	127
Şekil. 4.100. 5.19 GHz rezonans frekansı için elektrik alan dağılımı.....	128
Şekil. 4.101. 5.19 GHz rezonans frekansı için yüzey akım dağılımı.....	128
Şekil 4.102. Amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısı için sensör uygulaması.....	129
Şekil 4.103. Amaçlanan mikrodalga sinyal emici için nümerik (üst-taraf) ve deneysel (alt-taraf) yansıma-emilim ve FBW sonuçları.....	131
Şekil 4.104. Amaçlanan metamalzeme sinyal emicinin modifiye versiyonlar için nümerik emilim değerleri.....	132
Şekil. 4.105. Farklı polarizasyon açı değerleri için nümerik emilim değerleri.....	133

Şekil 4.106. TE ve TM polarize olmuş dalganın farklı gelen açı değerlerindeki nümerik emilim karakteristiği.....	134
Şekil 4.107. 2.76 GHz rezonans frekansında elektrik alan dağılımı.....	135
Şekil 4.108. 2.76 GHz rezonans frekansında yüzey akım dağılımı.....	135
Şekil 4.109. Frekansın fonksiyonu olarak normalize edilmiş empedans eğrisi.....	136
Şekil 4.110. Amaçlanan FSS metamalzeme sinyal emici yapısı için nümerik-deneysel yansıma-emilim değerleri.....	138
Şekil 4.111 Amaçlanan mikrodalga FSS metamalzeme yapısı-2, a) nümerik yansıma ve emilim değerleri, (b) farklı polarizasyon açıları için nümerik emilim performansı değerleri, (c) TE ve TM gelen dalga durumunda farklı açılardaki nümerik emilim değerleri.....	139
Şekil 4.112. 10 GHz rezonans frekansı için elektrik alan ve yüzey akım dağılımları.....	140
Şekil 4.113. Amaçlanan mikrodalga FSS metamalzeme yapısı-3, a) nümerik yansıma ve emilim değerleri, (b) farklı polarizasyon açıları için nümerik emilim performansı değerleri, (c) TE ve TM gelen dalga durumunda farklı açılardaki nümerik emilim değerleri.....	141
Şekil 4.114. Amaçlanan mikrodalga FSS metamalzeme yapısı-4, a) nümerik yansıma ve emilim değerleri, (b) farklı polarizasyon açıları için nümerik emilim performansı değerleri, (c) TE ve TM gelen dalga durumunda farklı açılardaki nümerik emilim değerleri.....	143
Şekil 4.115. Amaçlanan mikrodalga FSS metamalzeme yapısı-5, a) nümerik yansıma ve emilim değerleri, (b) farklı polarizasyon açıları için nümerik emilim performansı değerleri.....	144
Şekil 4.116. Amaçlanan mikrodalga FSS metamalzeme yapısı-6, a) nümerik yansıma ve emilim değerleri, (b) farklı polarizasyon açıları için nümerik emilim performansı değerleri.....	145
Şekil 4.117. Mikrodalga frekans aralığı için amaçlanan yapının nümerik yansıma-emilim değerleri.....	147
Şekil 4.118 Mikrodalga frekans aralığı için amaçlanan yapının deneysel yansıma-emilim değerleri.....	147

Şekil 4.119. Kızıl ötesi frekans bölgesi için nümerik emilim-yansıma değerleri.....	148
Şekil 4.120. Görünür frekans bölgesi için nümerik emilim-yansıma değerleri.....	148
Şekil 4.121. Mikrodalga frekans bölgesinde farklı polarizasyon açıları için emilim değerleri.....	149
Şekil 4.122. Yapının aralık uzunlukları için emilim değerleri ($a_7 = 2, 4, 6, 8$ ve 10 mm).....	149
Şekil 4.123. Mikrodalga, kızıl ötesi ve görünür bölge için rezonans frekansındaki elektrik alan dağılımları.....	151
Şekil 4.124. Mikrodalga, kızıl ötesi ve görünür bölge için rezonans frekansındaki yüzey akım dağılımları.....	151
Şekil 4.125. Yerleştirilen dielektrik tabakasının farklı kalınlıkları için emilim değerleri.....	153
Şekil 4.126. Kare şekilli rezonatör eklenmiş yama anten için (sol-taraf) simülasyon ve (sağ-taraf) deneysel yapı.....	154
Şekil 4.127. Kare şekilli rezonatör eklenmiş yama antenin yansıma değeri.....	155
Şekil 4.128. Kare şekilli bakışsız metamalzeme rezonatörler eklenmiş yama antenin yönlülük değerinin simülasyon (kırmızı renkli çizgi) ve ölçüm (mavi renkli çizgi) sonuçları.....	155

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Dönüşüm metotları ile ilgili karşılaştırma.....	27
Çizelge 4.1. TE ve TM polarize olmuş dalgalar için nümerik açısal emilim değerleri.....	117

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

ε	: Dielektrik geçirgenlik
μ	: Mağnetik geçirgenlik
E	: Elektrik alan
H	: Mağnetik alan
D	: Elektrik akı yoğunluğu
B	: Mağnetik akı yoğunluğu
$\vec{J}_e$	: Elektrik iletim akı yoğunluğu
$\vec{J}_m$	: Mağnetik iletim akı yoğunluğu
$\vec{k}$	: Dalga vektörü
ω	: Açısal frekans
n	: Kırılma indisi
Z	: Empedans
Γ	: Yansımaya katsayısı
T	: İletim katsayısı
c	: Işık hızı
S_{ij}	: Saçılma parametreleri
η	: Döndürme açısı
θ	: Polarizasyon dönme açısı
κ	: Bakışimsızlık parametresi
χ	: Mağnetik-elektrik hassasiyeti
β	: Kompleks yayılım fazı
$A(\omega)$	: Emilim değeri
$R(\omega)$	: Yansımaya değeri
$T(\omega)$	: İletim değeri
$\mathbb{R}^3$	: Üç boyutlu öklit uzayı
t	: Zaman ifadesi
Δ	: Asimetrik iletim parametresi

KISALTMALAR

EM	: Elektromagnetik
RCP	: Sağ elli dairesel polarizasyon
LCP	: Sol elli dairesel polarizasyon
SRR	: Ayrık halka rezonatör
FOM	: Kayıp değeri
FIT	: Sonlu toplamlar metodu
FEM	: Sonlu elemanlar metodu
MRTD	: Çoklu zaman domeni
PSTD	: Sözde spektral zaman domeni
PSSD	: Sözde spektral uzay domeni
TLM	: İletim hattı matrisi
FDTD	: Sonlu farklar zaman domeni
SRR	: Ayrık halka rezonatör
DNG	: Çift negatif indisli ortam
TM	: Dik-magnetik alan
TE	: Dik-elektrik alan
NRW	: Nicolson Ross Weir metodu

1. GİRİŞ

Suni malzemeler ile ilgili çalışmalar 19. yy.'da başlamıştır. 1898 yılında Hintli Jagadis Chinder Bose'un burkulmuş yapı üzerinde ilk mikrodalga deneyi gerçekleştirdiği bilinmektedir. Bu yapıya günümüzde suni bakışsız yapı denilmektedir. Daha sonra, 1904 yılında H. Lamb backward dalgaların varlığından bahsetmiştir. Süregelen bu çalışmalar sonrasında 1967 yılında ilk sistematik çalışma, Rus bilim adamı Veselago, bir malzemenin EM özelliğini belirten dielektrik (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) parametrelerinin belirli bir frekans aralığında negatif olması durumunda, ortamın da negatif kırılma indisli olabileceği teorisini ortaya koymuştur. Veselago (1967), yapay olarak elde edilebilen bu ortam için; terslenmiş Snell kırılma kanununu, ters Doppler etkisini ve zıt Cherenkov yayılımlarını ortaya koymasına rağmen, onun bu çalışması, doğada bu özelliklere sahip bir ortam olmadığından uzun yıllar ilgi görmemiştir. Kırılma indisinin kayıpları açıklamak için kompleks bir ifade şeklinde belirtilmesi, hatta yön bağımlı malzemeleri tanımlarken bir tensör olarak ifade edilmesi gerekirken, indis işaretinin negatif olabileceği uzun yıllar sorgulanmamıştır (Karaaslan, 2009).

Pendry ve ark., 1996 yılında negatif dielektrik permitivitenin suni yapılarla elde edilebileceğini, 1999 yılında ise negatif manyetik geçirgenliğin suni yapılarla elde edilebileceğini göstermişler ve Veselago'nun 1967 yılında yaptığı çalışmayı yeniden gündeme getirmişlerdir başarmışlardır (Pendry ve ark. 1996, 1999). Nihayet, 2000 yılında Smith ve arkadaşları ince tel ve ayrık halka tipi rezonatörden oluşan ilk metamalzemeyi suni olarak üretmeyi başarmışlardır (Smith ve ark. 2000).

Bir malzemenin EM özelliklerinin temel karakteristiklerini dielektrik sabiti (ϵ), manyetik geçirgenlik katsayısı (μ) ve bakışsızlık parametreleri belirler (Engheta ve Ziolkowski 2006, Sabah ve ark. 2006, Sabah 2012, Burlak 2013). Bunlar makroskobik parametrelerdir. Bütün bu parametreler, dış alanlar tarafından etkilenen atomik veya moleküler osilatörlerin frekansa bağlı olarak makroskobik ölçümlerinin ortalamalarıdır. Bu fikir homojen olmayan daha büyük hacimler için de ortaya konulabilir.

Sol elli malzemeler olarak da nitelendirilen bu malzemeler bilim insanlarınca yoğun ilgi gören, hızla gelişen, potansiyeli yüksek ve hakkında önemli çalışmalar yapılan güncel bir konudur (Enoch ve ark. 2002). Bu malzemeler, uyartım dalga boyundan daha küçük nesnel periyodik yapılardır. Metamalzemeler, dalga boyundan daha küçük periyodik yapılar olduğundan gelen dalga için homojen olarak görünürler ve birim

hücrelerinin geometrik yapısının kontrol edilebilen efektif veya ortalama parametreleri olarak tanımlanabilir (Plum 2010). Bu malzemeler; doğada bulunmayan, negatif kırılma gibi ayrıcalıklı ve egzotik EM özelliklere sahip periyodik yapıda tasarlanmış malzemelerdir. Metamalzemelerin sunmuş olduğu en önemli özelliklerinden birisi, EM dalganın polarizasyonunu değiştirerek optiksel etkinliği ve aktiviteyi sağlamasıdır. Böylece, EM dalganın istenilen şekilde yönlendirilmesi, polarize edilmesi ve kontrol edilebilmesi (Wei ve ark. 2011, Hasar ve ark. 2012a) gerçekleştirilebilmektedir. Smith ve ark. (2000)'nın ilk olarak ürettikleri aynı frekans bandında negatif ϵ ve μ değerlerine sahip metamalzeme Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1. Eş zamanlı negatif ϵ ve μ değerlerine sahip ilk üretilen metamalzeme

Şekil 1.2'de ise ϵ ve μ parametreleri için dört farklı bölgenin EM özellikleri belirtilmiştir (Karaaslan, 2009). Birinci bölgede (üçüncü bölgede) her iki parametre pozitifdir (negatiftir), EM dalgalar ilerler ve sağ el kuralına (sol el kuralına) uyarlar. İkinci (dördüncü) bölgede ise dielektrik katsayısı negatif (pozitif) ve manyetik geçirgenlik katsayısı pozitifdir (negatiftir), parametreler zıt işaretli olduğundan EM dalga sönmünecektir. Dielektrik permitivite (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) gibi

makroskobik parametreler, metamalzemelerin EM özelliklerini belirlemede kullanılmaktadır (Nicolson ve Ross 1970, Wang ve ark. 2009a).



Şekil 1.2. Ortam EM parametreleri ve EM alanların ortam içerisinde ilerlemesi

Negatif dielektrik permitivite ve negatif manyetik geçirgenlik (ϵ, μ), elde edebilmek için iki farklı yapı kullanılması gerekmektedir. Bu konuda ilk yapı ince tel iletken ve ayırık halka rezonatör kullanılarak oluşturulmuştur. Bu çiftin negatif özelliğinden dolayı bu ortam içerisine giren EM dalgaların faz ve grup hızları zıt yönde ilerlemektedir. Ek olarak; bu tip malzemeler insan yapımı olduklarından ötürü istenilen frekansta tasarlanabilmektedirler (Zhang ve ark. 2005, Dolling ve ark. 2007). Bu durumda istenilen frekans değerlerinde negatif manyetik özelliğe sahip yapay malzemelerin üretilmesi söz konusu olabilmektedir. Düzlem harmonik bir dalga için aşağıdaki eşitlikler ele alınacak olursa (zaman bağılılığı; $e^{-i\omega t}$);

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega \mu \vec{H} \quad (1.1.)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega \epsilon \vec{E} \quad (1.2.)$$

Burada, $\vec{E}$, elektrik alan vektörünü, $\vec{H}$, magnetik alan vektörünü, $\vec{k}$, dalga vektörünü, ϵ ve μ ortamın makroskopik parametrelerini ifade etmektedir. Her iki parametre negatif olan bir ortam farz edilip sanal kısımları çok küçük alınıp ihmal edilirse; ortam içerisinde elektrik alan, magnetik alan ve dalga vektörü sol el kuralına uygun olarak hareket edeceklerdir. Bu özelliğinden dolayı, böyle bir ortam negatif kırılma indisli olarak adlandırılmaktadır. Dalga vektörü ile ortamın kırılma indisi arasındaki bağıntı ele alınırsa;

$$\vec{k} = \frac{n\omega}{c} \hat{n} \quad (1.3.)$$

kırılma indisinin de negatif olabileceği gözlemlenebilir. Burada ω açısal frekansı ifade etmektedir. Bu tip bir ortamda dalganın faz ve grup hızlarının zıt yönde ilerleyebileceği anlaşılmaktadır. Günümüzde, üretim tekniklerindeki ilerleme ve gelişmeler ile sol elli malzemelerin farklı malzemelere entegre edilmesiyle metamalzemeler ile çeşitli savunma sanayi için büyük önem arz eden ve potansiyel teşkil eden çalışmalar yapılabilmektedir (Fang ve ark. 2005, Alici ve Ozbay 2007, Melik ve ark. 2009, Sabah ve Roskos 2012, Dincer ve ark. 2014a). Bu uygulamalar metamalzemelerin ne denli önemli büyük potansiye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca metamalzemelerin bu ve benzeri uygulamalar için pratik olarak çok sayıda avantaj sunduğu (EM özelliklerinin kullanılması ile) bilim insanlarınca literatür çalışmalarında kanıtlanmıştır. Ayrıntılı bilgiler Önceki Çalışmalar bölümünde verilmiştir.

Metamalzemelerin pelerin uygulaması için yapılan çalışmalarda; dar bir bant aralığında da olsa görünmezliğin mümkün olabileceği üzerine çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Fakat bu çalışmalar daha çok yenidir. Schurig ve ark. (2006), ilk olarak bu konu üzerinde deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bakır bir silindir şeklini önceki teorik çalışmalar ışığında mikrodalga frekans bandı üzerinde görünmezliğin sağlanabileceği şekilde tasarlayıp belirli bir şekilden oluşan metamalzeme ile kaplamışlardır. Görünmezlik tamamen olmasa da kısmen yapılabilmektedir. Bu tarz uygulamalar daha çok radara yakalanmama uygulamalarıyla literatürde yer almaktadır. Grbic ve Eleftheriades (2004) ise 1.057 GHz frekansında düzlemsel sol elli lens özelliği gösteren, bağıl kırılma indisi -1 olan deneysel bir çalışma ortaya koymuştur. Bu ve benzeri çalışmalar metamalzemelerin potansiyel uygulamalarının sadece bazılarıdır.

Metamalzemelerin yeni bir sınıfı olan bakışimsız metamalzemeler konsepti ise 2003'te Tretyakov ve ark., ve 2004'te Pendry tarafından ortaya atılmış olup, bakışimsız metamalzemelerin EM özelliklerini incelemiş ve pratik olarak çok sayıda avantajı olduğuna dair çalışmalar yapmışlardır. Çünkü bakışimsız metamalzemeler de; pelerin, radara yakalanmama, ışıma örüntüsü yüksek verimli anten, mükemmel lens, gelişmiş biosensör vs. gibi sayılamayacak kadar birçok önemli potansiyel uygulama alanlarına sahipler (Xi ve ark. 2008, Aydın ve ark. 2008, Li ve ark. 2010, Nikooei Tehrani ve ark. 2013).

Bakışimsız ortam, RCP ve LCP EM dalgalarda ortamın bakışimsız asimetriğinden dolayı farklı tepkiler vermektedir ve bakışimsız ortamdaki elektrik alan ve manyetik alan arasında çapraz etkileşim (cross-coupling) etkisi meydana gelmektedir. Bu durum, bakışimsızlık parametresi, κ , ile gerçekleşir. Optiksel aktivite olarak da bilinen EM bakışimsızlık kavramı; optik, mikrodalga, milimetredalga frekanslarında ve henüz ağırlıklı simülasyon çalışmalarında olan terahertz frekanslarında ortaya çıkan özelliklerinden dolayı araştırmacıların sürekli olarak ilgisini çekmiş ve çekmektedir (Wiltshire ve ark. 2009, Wiltshire ve ark. 2009, Wei ve ark. 2011). Bakışimsız metamalzemelerin üretim zorluklarından dolayı bakışimsız ortamın frekans aralığı genellikle mikrodalga, milimetrik dalga veya optik dalga olmaktadır (Baccarelli ve ark. 2003).

Metamalzemelerin diğer önemli uygulama alanlarından biri de sinyal emicilerdir. Metamalzemeli sinyal emici konsepti ise deneysel olarak ilk 2006'da Bilotti ve ark. tarafından sunulmuştur. Dolayısıyla, sinyal emici konsepti hala yeni bir konu olmakta ve güncelliğini korumaktadır. Son yıllarda sinyal emici ile ilgili de çok sayıda çalışma yapılmıştır (Bilotti ve ark. 2006, Wang ve ark. 2009a, Dincer ve ark. 2013b, Sabah ve ark. 2014a, Dincer ve ark. 2014a, Dincer ve ark. 2014b, Dincer ve ark. 2014e). Çünkü metamalzemeler ile sinyal emici yapılarına esneklik, verimlilik ve daha yüksek kazanç özellikleri entegre edilebilmiştir. Özellikle son yıllarda metamalzeme sinyal emici çalışmaları sunmuş olduğu esneklik ve mükemmel emilimden ötürü büyük önem kazanmıştır.

Metamalzemelerin bir diğer önemli uygulama alanlarından biri de sensör uygulamalarıdır. Literatürdeki çalışmalar tarandığında metamalzemelerin sensör uygulamalarına entegrasi ile ilgili geçmiş yıllara ait çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu

alışmalar ağırlıklı olarak genel ve bilinen, klasik geometrik yapılaraya sahip metamalzeme yapılarının sensör uygulamalarına entegrasyonu şeklinde gerçekleşmektedir (Huang ve ark. 2009, He ve ark. 2010, Yang ve ark. 2010, Sabah ve Roskos 2013, Fabio ve ark. 2013, Yang ve ark. 2013, Karaaslan ve Bakir 2014).

Metamalzeme tabanlı sensörlerin algılama hassasiyetini ve kazancı arttırdığı çalışmalar literatürde mevcuttur. Literatürde büyük çoğunlukla yayınlanan sensör çalışmalarının önemli bir kısmı dahi ayırık halka rezonatör (Split Ring Resonator, SRR) tabanlıdır (Driscoll ve ark. 2007, Tao ve ark. 2010a, Melik ve ark. 2010, Chang ve ark. 2010, Ekmekci and Sayan 2013). Literatürdeki bu çalışmalara ek olarak güncel bir çalışmada 2013'te Ekmekci and Sayan tarafından metamalzeme tabanlı SRR geometri ile elektriksel büyüklüğü azaltılmış, rezonans frekans değerinde hassaslığı artırılmış sensör tasarımı ile gerçekleştirilmiştir.

Metamalzemelerin geniş uygulama potansiyel alanlarından biri de anten uygulamalarıdır. Literatürdeki alışmalar tarandığında metamalzemelerin anten uygulamalarına entegresi ile ilgili geçmiş yıllara ait çeşitli çalışmalar bulunmaktadır (Buell ve ark. 2006, Alù ve ark. 2007, Iizuka ve Hall 2007, Unal ve ark. 2010). Bu alışmalar ağırlıklı olarak klasik metamalzeme yapılarının antene entegrasyonu şeklinde gerçekleşmektedir. Genel itibariyle; bu antenlerin mevcut antenlere göre ışıma örüntüleri, bant genişliği ve anten kazanç değerlerinin, metamalzesiz antenlere göre daha iyi olduğu bilinmektedir. Ayrıca güncel literatür geçmişi incelendiğinde antenlerde metamalzemeler ile performansın artırılabilirdiğı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak bu tez çalışmasında bakışmsız metamalzemelerin de antenlere entegrasyonu ayrı olarak incelenmiş ve metamalzemeli antenlere göre performansı da karşılaştırılmıştır. Bilindiğı üzere bakışmsız ortam, RCP ve LCP dalgalarda ortamın bakışmsız asimetriğinden dolayı farklı tepkiler vermektedir. Ayrıca bakışmsız ortamdaki elektrik alan ve mağnetik alan arasında çapraz etkileşim etkisi meydana gelmektedir. Her iki ortamın dalgaya getirdiğı odaklama kazancı ve bu etkinin anten uygulamalarına tasarlanması antenler için büyük önem arz etmektedir. Çünkü, bakışmsız metamalzemelerin gösterdiğı egzotik EM özellikler ile antende kazanç, bant genişliğinin iyileştirilmesi ve yapı boyutlarının optimize edilmesi gibi birçok önemli avantajlar sağlanabilmektedir.

Ayrıca bakışmsız metamalzemelerde bulunan EM dalgaların polarizasyon yönünde dönme sağladığı bilinmektedir. Böylece, yayılan sinyallerin daha fazla kısmında

hem yönelme ($n = 0$), hem de dönme sağlanarak kazanç değeri arttırılacağı gibi ışın genişliği daraltılması da gerçekleştirilebilmektedir (Wu ve ark. 2005).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Suni malzemeler ile ilgili konsept 19. yy. sonlarına doğru 1898 yılında Hintli Jagadis Chinder Bose'un burkulmuş yapı üzerindeki ilk mikrodalga deneyi ile başladığı bilinmektedir (Bose 1898). Bu yapıya günümüzde suni bakışsız yapı denilmektedir. Süregelen çalışmalar sonrasında 1957 yılında Tinoco ve Freeman, lineer polarize dalgaların dönmesi ve bakışsızlık durumu üzerinde durmuşlardır (Tinoco ve Freeman 1957). Daha sonraları gerçekleştirilen çalışmalar ile suni kompleks malzemeler çok sayıda araştırmacının ilgi alanına girmiş ve suni bu malzemelerin son versiyonu olarak negatif kırılma indisli metamalzemeler günümüzde elektromagnetik alanında çalışma yapanların ilgisini çekmiştir.

Dielektrik permitivite, magnetik geçirgenlik ve kırılma indisinin aynı anda negatif olabileceği ilk olarak 1967 yılında Rus bilim adamı Veselago tarafından teorik olarak ortaya konmuştur (Veselago 1967), bu çalışma metamalzemeler konusunda ilk sistematik çalışma olarak kabul edilmektedir. Veselago, terslenmiş Snell kırılma kanununu, ters Doppler etkisini ve zıt Cherenkov yayılımlarını ortaya koymasına rağmen, onun bu çalışması, doğada bu özelliklere sahip doğal bir ortam olmadığından uzun yıllar ilgi görmemiştir ve kırılma indisinin negatif olabileceği uzun yıllar sorgulanmamıştır.

Sonunda, Pendry ve ark., 1996 yılında negatif dielektrik permitivitenin suni yapılarla elde edilebileceğini, 1999 yılında ise negatif magnetik geçirgenliğin suni yapılarla elde edilebileceğini göstermişler ve Veselago'nun 1967 yılında yaptığı çalışmayı yeniden gündeme getirmişlerdir. Nihayet, 2000 yılında Smith ve arkadaşları ince tel ve ayırık halka tipi rezonatörden oluşan ilk metamalzemeyi suni olarak üretmeyi başarmışlardır.

Daha sonrasında 2001 yılında Shelby ve ark., mikrodalga frekansında kırılma indisinin negatif olduğu bir metamalzeme üzerinde deneysel çalışma yapmışlardır. Malzeme, birim hücresi iki ayırık halka tipi rezonatör ve bir düz çubuk şeklinde iletken, periyodik bir yapıdan oluşmaktadır. Bu malzemedan üretilmiş prizma içerisine iletilen dalganın açısının saçılma ölçümünün yapılması ile efektif kırılma indisi değerini elde etmişlerdir (Shelby ve ark. 2001).

Süregelen bu çalışmalar ile araştırmacılar metamalzemelerin uygulanması ve potansiyel uygulamalara entegre edilmesi konularında detaylı araştırmalar yapmışlar ve yapmaya devam etmektedirler. Ayrıca metamalzemeler literatüründe en önemli isimler

arasında yer alan Engheta ve Ziolkowski de metamalzemelerin potansiyel uygulama alanları konusunda araştırmacıların önünü açmış ve konunun ilerlemesinde literatüre önemli katkılar sunmuşlardır (Engheta ve Ziolkowski 2006). Günümüze kadar uzanan ve devam eden bu çalışmalardan bazılarına değinilmiştir.

2006 yılında Sabah ve ark., negatif indisli (DNG) ortam içerisinde EM dalgaların etkileşiminden dolayı yansıyan ve iletilen dalgaları detaylıca incelemişlerdir. Daha sonra 2007 yılında Sabah ve Uckun, iki farklı yarı sonsuz ortam arasına yerleştirilmiş frekans bağımlı ve kayıplı çift negatif tabaka içerisinde EM dalganın yayılımını incelemişlerdir (Sabah ve Uckun 2007). Aynı yıl, Sabah; EM dalganın DNG ortam içerisinde yansıma ve iletim durumlarını analitik ve nümerik olarak inceleyen farklı bir çalışma daha gerçekleştirmiştir (Sabah 2007b). Ardından, Sabah ve ark. 2010 yılındaki çalışmalarında mikrodalga deneyimleri ile sekizgen şeklinde SRR ve çubuk iletken şeklinden oluşan yeni bir metamalzeme geliştirmişlerdir (Sabah ve ark. 2010). 2012 yılında ise Sabah ve Roskos, THz altı frekans aralığında çalışan çift bantlı ve frekans bağımlı fishnet tipi metamalzemeler üzerine çalışmışlardır (Sabah ve Roskos 2012a). Sabah ve Roskos bir diğer çalışmalarında, bakışsız metamalzemeler yardımıyla THz frekans bölgesinde dalganın polarizasyon kontrolünü sağlamışlardır (Sabah ve Roskos 2012b). Ek olarak Sabah, 2012 yılında çok düşük kayıp değerine sahip bir çift homojen sekizgen şeklinde metamalzemenin mikrodalga frekans aralığında eş zamanlı negatif ϵ ve μ değerlerine sahip olan bir yapı tasarlamışlardır (Sabah 2012d). 2013 yılında ise Sabah ve Roskos, metamalzemelerin farklı bir uygulama konsepti olan sensöre entegre edilmesi konusunda çalışmalar yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre THz frekans bölgesinde hassas çalışabilen sensör üretilebileceğini nümerik olarak göstermiştir (Sabah ve Roskos 2013a).

2007 yılında ise Urbani ve ark., DNG ve pozitif indisli (DPS) ortam için EM dalganın etkileşimini incelemişlerdir. Teorik olarak tasarladıkları yapı N sayıda farklı malzeme özellikleri ve kalınlıklarına sahip DNG ve DPS tabakalardan oluşmaktadır. Bir sonraki yıl, 2008'de ise Li ve ark., manyetik dimer tabanlı bakışsız metamalzeme içerisinde mikrodalgaların yayılımını deneysel olarak incelemişlerdir. Daha önceki yaptıkları teorik modeli göz önünde bulundurdıklarında iletim spektrumunda iki farklı rezonans pikleri elde etmişlerdir. Bunların, bu sistem içerisindeki manyetik rezonansın hibrid etkisinden kaynaklandığını tespit etmişlerdir (Li ve ark. 2008). Daha sonra 2009'da ise Wang ve ark. da, metamalzemelerin önemi konusuna değinip bakışsız ortam için

yapılan metamalzeme çalışmalarına değinmişlerdir. Yapılan çalışmalarda negatif kırılmanın sağlandığı ve EM ortamın özelliklerini belirleyen makroskobik parametreler olan ε ve μ değerlerinin bazı frekans aralıklarında aynı anda negatife girdiğinden bahsetmişlerdir. Fakat yapılan çalışmalarında bakışimsızlık değerinin yüksek ve geniş bant aralığında yer almadığı görülmektedir. (Wang ve ark. 2009c). Ayrıca, aynı yıl yapılan başka çalışmalarda Zhou ve ark., çift tabakalı iletken çubuk tel tabanlı açılabilir farklılığı olan bakışimsız metamalzeme tasarlamışlardır (Zhou ve ark. 2009). Aynı yıl yapılan başka bir çalışmada ise negatif kırılma sağlayan bakışimsız metamalzemeleri deneysel olarak THz frekans bölgesinde tasarlanması Zhang ve ark. tarafından sağlanmıştır. Fakat yapılan bu çalışmalarda THz frekanslarında fabrikasyon önemli bir dezavantajı oluşturmaktadır. Tasarlanan yapılar basit geometrik şekillere sahip rezonatörler barındırmadığı için özellikle THz frekans bölgesinde yapının üretilmesi önemli bir sorun oluşturmaktadır (Zhang ve ark. 2009).

2009 yılında Karaaslan, FEM tabanlı HFSS (High Frequency Structural Simulator) simülasyon programını kullanarak farklı geometrik şekillerdeki birim elemanlardan oluşan yapay ortamların mikrodalga frekans aralığında elektriksel ε ve manyetik μ parametrelerinin negatif olma durumunu incelemiş ve negatif olmasını sağlamıştır (Karaaslan 2009).

2010 ve 2011 yıllarında Zhao ve ark., bakışimsız metamalzeme içerisinde dalga yayılımını analiz ederek parametrelerin elde edilme metodunu bakışimsız metamalzeme tabakasına uygulamışlardır (Zhao ve ark. 2010). Daha sonrasında gamalı haç eşleniği şeklinde bir bakışimsız metamalzeme tasarlamışlardır. Deneysel ve nümerik çalışmalar sonucunda yapının optik aktivasyon ve dairesel polarizasyon gösterdiğini tespit etmişlerdir (Zhao ve ark. 2011). Yapılan bu çalışma daha sonraki bakışimsız metamalzemeler ile permitivite, manyetik geçirgenlik ve bakışimsızlık parametresi gibi parametrelerin elde edilmesi çalışmalarına önemli katkı sağlamıştır. Fakat rezonatörün geometrik yapısı basit bir geometriye sahip değildir. Bu durum da mekanik ayarlanabilirlik konusunda sıkıntı oluşturabilmektedir. Ayrıca bakışimsızlık parametresi ve indis için FOM analizi gerçekleştirmemişlerdir.

2012 yılında Hasar ve ark., ayırık halka tipi rezonatör ve şerit iletkenlerden oluşmuş çift yönlü izotropik olmayan metamalzeme tabakalarının EM özelliklerinin parametrelerin geri elde edilmesi metodu ile gözlemlenmişlerdir (Hasar ve ark. 2012a).

Aynı yıl Hasar ve ark., çalışmalarında izotropik ayırık halka tipi rezonatör ve tamamlayıcı olarak çubuk iletkenlerden oluşan metamalzemelerin EM özelliklerini parametrelerin geri elde edilme metodu için üç farklı metodu uygulamışlardır. İlk iki teknikte belirli kalibrasyon bağımlı ve bağımsız yöntemleri analitik olarak kullanırken, üçüncü teknik olarak da Lorentz ve Drude dispersiyon metodunu kullanmışlardır (Hasar ve ark. 2012b).

Metamalzemelerin başka bir uygulaması olan antenlere entegre edilmesi konusu üzerine de araştırmacılar çeşitli çalışmalar yapmışlardır. 2007 yılında Majid ve ark., 2000’li yıllar ile ortaya çıkan bir ayırık halka tipi rezonatör ve bir şerit çubuk şeklinden meydana gelen klasik metamalzeme yapısını mikroşerit anten yapısına uygulamışlardır (Majid ve ark. 2009).

Yapılan başka bir metamalzemeli anten uygulamasında ise Song ve ark., I-şekilli sol elli metamalzeme tabanlı bir yama anten simülasyon çalışması yapmışlardır. Çalışmalarını FDTD metodu ile simüle etmişlerdir. Fakat yapı ile ilgili gerekli parametrik çalışma yapılmadığı için kazanç değeri beklenen kadar iyi olmamıştır (Song ve ark. 2011).

2012 yılında ise Doğan da, metamalzemeli anten çalışması yapmıştır. Yapılan bu çalışma ile 7 adet sol elli metamalzemeli yapılar mikroşerit anten üzerine çoklu bir biçimde yerleştirilmiştir. Ayrıca yaptıkları diğer farklı bir yapıdaki anten uygulamasında, tasarlanan yapı literatürde olsa da antene uygulanması yenilik getirerek anten performansında önemli artış sağladıklarını ifade etmişlerdir (Doğan 2012). Aynı yıl Zarifi ve ark., metamalzemelerin başka bir uygulaması olan antene entegre edilmesi konusu üzerine çalışmışlar ve dairesel polarizasyonlu antende yarı düzlemsel bakışsız metamalzeme yapılarının etkisini araştırmışlardır. Fakat burada da bant genişliği konusunda geniş bantta rezonans elde edilememiştir (Zarifi ve ark. 2012a).

Metamalzemelerin başka bir uygulaması olan absorber çalışmaları da araştırmacılar tarafından detaylı olarak incelenmiş ve incelenmeye de devam etmektedir. 2008 yılında Landy ve ark., nümerik ve deneysel olarak metamalzemeli sinyal emici çalışması yapmışlardır. Tasarladıkları yapı elektrik ve manyetik rezonans sağlayan iki rezonatörden oluşmaktadır. Metamalzemeli absorber literatüründe temel alınan çalışmalar arasında yer almaktadır (Landy ve ark. 2008). Aynı yıl, Tao ve ark., THz frekanslarında gelen EM dalganın emilimini sağlayabilen bir absorber çalışması yapmışlardır (Tao ve ark. (2008a)). Bir sonraki yıl Wang ve ark., nümerik ve deneysel

olarak bakışsız metamalzeme tabanlı sinyal emici çalışması gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışma ile farklı polarizasyon açıları ve gelen açı (TE , TM) durumlarından bağımsız bir sinyal emici tasarlamışlardır. Fakat fabrikasyon özelliğinin kolay olmaması çalışmanın dezavantajını oluşturmaktadır (Wang ve ark. 2009a).

2010 yılında ise Cheng ve Yang, mikrodalga frekans aralığında emilim sağlayabilen metamalzeme sinyal emici çalışması yapmışlardır (Cheng ve Yang 2010). Aynı yıl Zhu ve ark., nümerik ve deneysel olarak farklı bir şekilde ayarlanabilir metamalzemeli sinyal emici çalışması yapmışlardır. Ayarlanabilir metamalzemeli sinyal emici tasarımı için rezonatörler arasına diyotlar yerleştirilmiştir. Diyotlara uygulanan farklı gerilim değerleri ile yapının emilim değerlerinin değişimini gözlemlemişlerdir. Fakat emilim değerleri istenilen düzeye ulaşamamıştır (Zhu ve ark. 2010a). Ayrıca Zhu ve ark., başka bir metamalzeme tabanlı absorber çalışmalarında gelen açı (TE , TM) bağımsız mikrodalga frekansında çalışan geniş bant absorber çalışmasını nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Yalnız, açı değişimlerini 0° , 30° , 40° , 50° ve 60° için incelemişlerdir. Bu durum yüksek ihtimalle diğer açılarda absorpsiyon değerinin açı bağımlı olduğunu gösterebilir. Bu, çalışmanın dezavantajını oluşturmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre %97'nin üzerinde emilim değerine ulaşılmıştır (Zhu ve ark. 2010b).

Bir sonraki yıl, 2011'de Lee ve Lim, mikrodalga frekans bölgesinde iki farklı rezonans frekansında emilim sağlayabilen geniş bant metamalzeme sinyal emici tasarlamışlardır. Tasarladıkları yapıyı farklı polarizasyon açıları için de nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Fakat, TE - TM dalgalarında geliş açısının etkisi analiz edilmemiştir (Lee ve Lim 2011). Aynı yıl Sun ve ark., geniş bant aralığında metamalzemeli sinyal emici çalışması gerçekleştirmişlerdir. Geniş bant aralığında sinyal emilimi sağlamak için çoklu SRR yapısı kullanmışlardır (Sun ve ark. 2011). Farklı araştırmacılar da aynı yıl metamalzemelerin absorber uygulamaları üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalardan birisi; Huang ve Chen'in yaptığı polarizasyon bağımsız çok bantlı metamalzeme sinyal emici çalışmasıdır. Fakat emilim değeri %93 civarlarında kalmıştır (Huang ve Chen 2011c).

Daha sonraları 2013 yılında Park ve ark. ise nümerik ve deneysel olarak mikrodalga frekanslarında çalışan çoklu bantlı bir metamalzemeli sinyal emici çalışması gerçekleştirmişlerdir. Nümerik ve deneysel sonuçlarda çoklu bantta sinyal emilimi yakalamışlardır. Tasarladıkları yapı; hassas olarak düzenlenmiş simit şekline benzer

farklı büyüklükteki rezonatörlerden, arka metal tabakasından ve dielektrik malzemesinden oluşmaktadır. Çalışmanın polarizasyon ve gelen açıdan bağımsız olduğu belirtilse de bu durum nümerik ve deneysel olarak sadece 0^0 ve 45^0 için gösterilmiştir. Horn anten farklı açılarda döndürüldüğünde açıdan bağımsız sonuç alınabileceği bu çalışmada, net olarak belirtilmemiştir (Park ve ark. 2013).

Diğer taraftan; metamalzemelerin farklı bir uygulaması olan sensörlere entegre edilerek algılama hassasiyetinin ve kazancın artırılmasına yönelik de araştırmacılar son yıllarda çeşitli çalışmalar yapmışlar ve yapmaya devam etmektedirler. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda sunulmuştur.

2009 yılında Melik ve ark., metamalzeme tabanlı ayırık halka tipi rezonatör-esnek kabloşuz gerilme ölçümü yapabilen bir sensör tasarımı ve üretimi gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca Melik ve ark.'nın (2009 ve 2010) bazı sensör uygulama çalışmaları mevcuttur. Fakat çalışmalarının ortak özelliği ayırık halka tipi rezonatör yapılarını kullanmasıdır. Yeni sensör çalışmalarında ise SRR tipi yapıların dışında da geliştirilen farklı rezonatör yapılarıyla da sensör uygulamalarının yapılabileceği anlaşılmıştır (Melik ve ark. 2009).

Withayachumnankul ve ark., metamalzeme tabanlı ayırık halka tipi rezonatör ile mikroakışkan ölçümü yapabilen bir sensör tasarımı ve üretimi gerçekleştirmişlerdir (Withayachumnankul ve ark. 2013). Aynı yıl, Ekmekci ve Sayan, çok fonksiyonlu, elektriksel büyüklüğü geleneksel metamalzeme sensörlerine göre azaltılmış ve hassaslığı artırılmış ayırık halka tipi rezonatör bir sensör yapısı tasarlamış ve üretmişlerdir. Fakat sadece belirli bir uygulama için deneysel çalışma gerçekleştirmiş olup diğer uygulamalar nümerik olarak yapılmıştır (Ekmekci ve Sayan 2013).

3. MATERİYAL VE YÖNTEM

3.1. MATERİYAL

Bu çalışmada kullanılan yapılar aşağıda listelenmiştir. Bu yapılar, FIT tabanlı CST simülatör kullanılarak analiz edilmiş olup; deneysel çalışmalar için üretimleri farklı dielektrik alt taşı malzemeler kullanılarak gerçekleştirilmiş ve ölçümleri vektör network analizörler kullanılarak yapılmıştır.

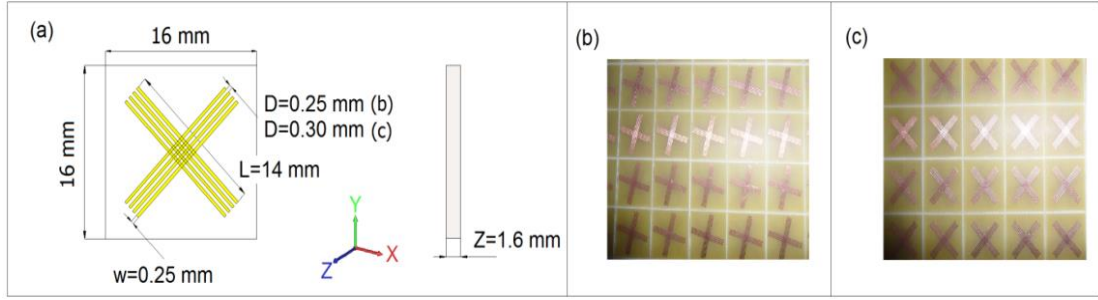
- Çift Tabakalı Süreksiz Çapraz Yıldız Şekil Rezonatör
- Çift Tabakalı Aralıklı Kare Şekil Rezonatör
- Çift Tabakalı Gammadion Çapraz Yıldız Şekil Rezonatör
- Daire Şekil Ayırık Halka Rezonatör
- Dikdörtgen Şekil Ayırık Halka Rezonatör
- Omega Şekil Ayırık Halka Rezonatör
- Omega Rezonatör ve Sekizgen Yıldız
- Süreksiz Çapraz Yıldız Şekil Rezonatör
- Aralıklı Halka ve Sekizgen Yıldız Şekil Rezonatör
- Asimetrik Dikdörtgen Şekil Rezonatör
- Halka ve Çapraz Yıldız Şekil Rezonatör
- Omega, Kare, Dikdörtgen, Çapraz Yıldız

Aşağıda bu çalışmada kullanılan yapıların özellikleri, boyutları ve üretim teknikleri ayrı ayrı belirtilmiştir.

3.1.1. Çift Tabakalı Süreksiz Çapraz Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı Yapı

Amaçlanan bakışsız metalmalzeme tasarımı ayırık çift tabakalı çapraz şekil tabanlı rezonatörler içermektedir. Ön ve arka taraftaki rezonatörler dielektrik alttaşı ile birbirinden ayrılmıştır (Şekil 3.1). Dielektrik olarak FR4 cinsi alttaşı, metal tabakalar için ise 5.8001×10^7 S/m elektrik iletkenliğine ve 0.035 mm kalınlığa sahip bakır cinsi metal seçilmiştir. FR4-dielektriğin kalınlığı, kayıp tanjant ve dielektrik geçirgenlik değerleri sırasıyla 1.6 mm, 0.02, ve 4.2 şeklindedir. Amaçlanan rezonatörün birim hücresinin ölçüleri ise ilk yapı için $w = 0.25$ mm (şeritin kalınlığı), $L = 14$ mm (şeritin uzunluğu) ve $D = 0.25$ mm (şeritler arasındaki mesafe) değerlerini temsil ederken ikinci yapı için ise $D = 0.30$ mm'dir (Şekil 3.1(a)). Ön tarafa doğru bakan şerit rezonatörler orijine göre

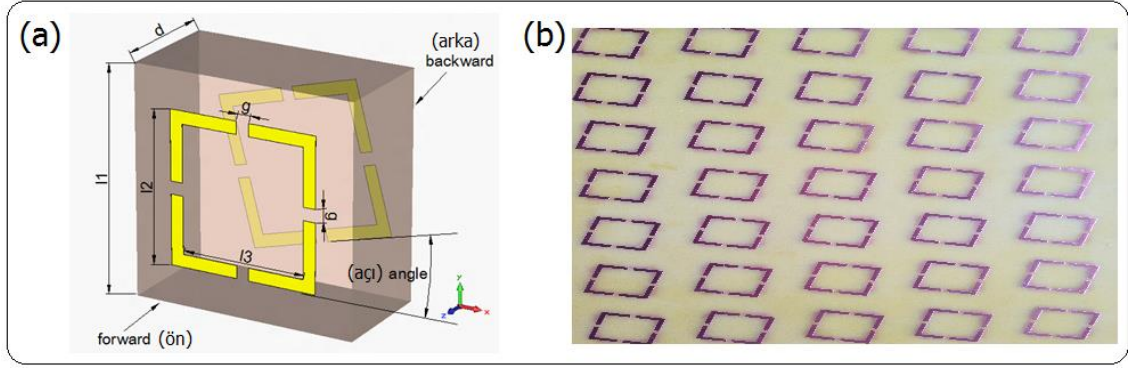
45° , yapının arkasındaki şerit rezonantörler ise 75° döndürülmüştür. FIT tabanlı CST Microwave Studio programında tasarlanan birinci ve ikinci yapı klasik lazer baskı devre yöntemleriyle üretilmiştir. Şekil 3.1(b) $D = 0.25 \text{ mm}$ olan yapının üretimini temsil ederken Şekil 3.1(c) de $D = 0.30 \text{ mm}$ olan yapının üretimini göstermektedir. Üretilen yapılarının her birinin toplam büyüklüğü 576 cm^2 'dir.



Şekil 3.1. (a) Birim hücrenin ölçülerinin şematik gösterimi, (b) ve (c) üretilen yapılar

3.1.2. Çift Tabakalı Aralıklı Kare Şekil Rezonatör Tabanlı Yapı

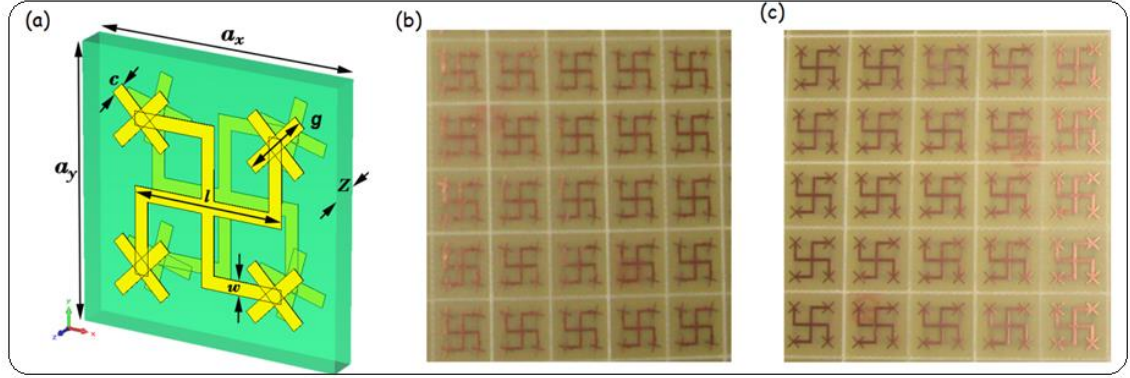
Amaçlanan bakışsız metamalzeme yapısı aralıklı kare şeklinde bir rezonatör ve dielektrik ile ayrılmış 15° döndürülmüş ikinci bir aralıklı rezonatör yapısından oluşmaktadır. Yapının her iki yüzünde de aynı rezonatör şekli olup arka taraftaki rezonatör döndürülmüştür. Tasarlanan metamalzeme yapısının birim hücre ölçüleri Şekil 3.2(a)'da gösterilmektedir ($l_1 = 40 \text{ mm}$, $l_2 = 24 \text{ mm}$, $l_3 = 20 \text{ mm}$, $g = 2 \text{ mm}$, $d = 1.6 \text{ mm}$, $angle = 15^\circ$). FIT tabanlı CST Microwave Studio programında tasarlanan yapı daha sonra klasik lazer baskı devre yöntemleri ile üretilmiştir. Üretilen yapının boyutu $280 \times 280 \text{ mm}^2$ 'dir. Kullanılan dielektrik FR4 cinsi malzeme olup 1.6 mm kalınlık, 0.02 kayıp tanjant açısı ve 4.2 dielektrik geçirgenlik katsayı değerine sahiptir. Rezonatörler bakır cinsi metalden yapılmış olup $5.8001 \times 10^7 \text{ S/m}$ elektriksel iletkenlik ve 0.036 mm kalınlığa sahiptirler. Üretilen bakışsız metamalzeme Şekil 3.2(b)'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Amaçlanan bakışsımsız metamalzeme yapısı, (a) birim hücrenin ölçü değerleri, (b) üretilen yapı

3.1.3. Çift Tabakalı Gammadion Çapraz Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı Yapı

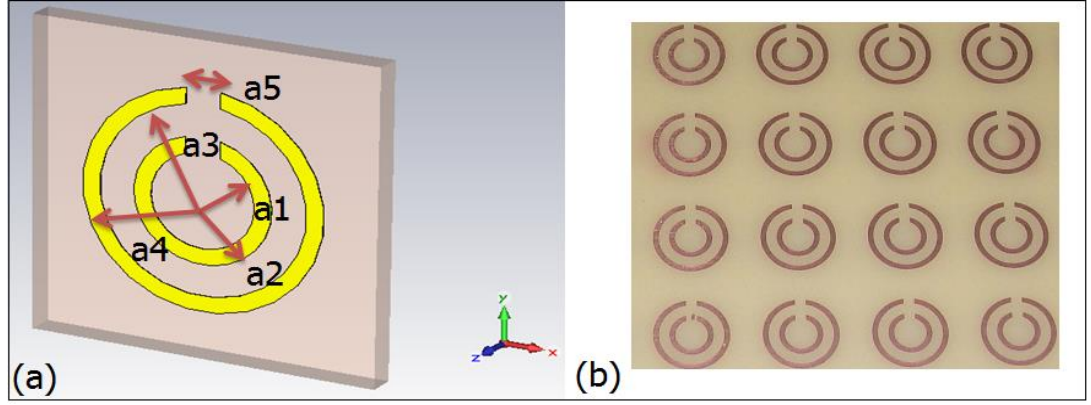
Amaçlanan bakışsımsız metamalzeme yapısı haç ve çapraz yıldız şeklinde bir rezonatör ve dielektrik ile ayrılmış ve çapraz yıldızlar 15° döndürülmüş ikinci bir rezonatör yapısından oluşmaktadır. Yapının her iki yüzünde de aynı rezonatör şekli olup arka taraftaki çapraz yıldız rezonatörler döndürülmüştür. Tasarlanan metamalzeme yapısının birim hücre ölçüleri Şekil 3.3(a)'da gösterilmektedir. Burada iki farklı metamalzeme üretimi yapılmıştır. Bunlar arasındaki tek fark çapraz yıldız şeritlerin kalınlığıdır. FIT tabanlı CST Microwave Studio programında tasarlanan yapı daha sonra klasik lazer baskı devre yöntemleri ile üretilmiştir. Üretilen yapının boyutu $210 \times 210 \text{ mm}^2$ 'dir. Kullanılan dielektrik FR4 cinsi malzeme olup 1.6 mm kalınlık, 0.02 kayıp tanjant açısı ve 4.2 dielektrik geçirgenlik katsayı değerine sahiptir. Rezonatörler bakır cinsi metalden yapılmış olup $5.8001 \times 10^7 \text{ S/m}$ elektriksel iletkenlik ve 0.036 mm kalınlığa sahiptirler. Rezonatörün birim hücreleri; ($w = 0.7 \text{ mm}$), genişlik ($l = 8.1 \text{ mm}$), şerit uzunluğu ($g = 3.7 \text{ mm}$) ve çapraz yıldız şeritlerinin kalınlığı $c = 0.20 \text{ mm}$ -(Şekil 1(b)), $c = 0.35 \text{ mm}$ (Şekil 1(c)). Üretilen bakışsımsız metamalzemeler Şekil 3.2(b) ve (c)'de gösterilmektedir.



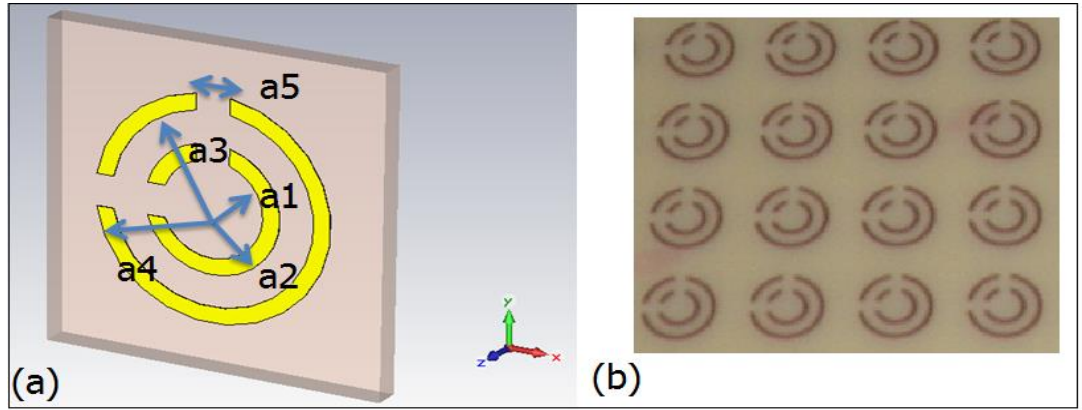
Şekil 3.3. Amaçlanan bakışimsız metamalzeme, (a) birim hücrenin ölçü değerleri, (b) üretilen yapı- $c = 0.20 \text{ mm}$, (c) üretilen yapı- $c = 0.35 \text{ mm}$

3.1.4. Daire Şekil Ayırık Halka Rezonatör Tabanlı Yapı

Amaçlanan çalışma için ayırık halka tipi rezonatör tabanlı iki farklı bakışimsız metamalzeme yapısı üretilmiştir. Dielektrik alttaşı ve onun üzerine yerleştirilmiş rezonatörden oluşan yapılardır. Rezonatörler bakır cinsi metalden yapılmış olup $5.8001 \times 10^7 \text{ S/m}$ elektriksel iletkenliğe ve 0.036 mm kalınlık değerine sahiptirler. Dielektrik malzemesi için FR4 cinsi alttaşı tercih edilmiştir. Çünkü FR4 yüksek frekanslarda kolaylıkla çalışabilen bir malzeme olup 1.6 mm kalınlığa ve 4.2 dielektrik değerine sahiptir. Ek olarak düşük dielektrik kayıp değerine, 0.02, sahiptir. Amaçlanan yapılardan birincisi Şekil 3.4'te gösterilmektedir. Şekil 3.4(a)'da tasarlanan birinci yapı için birim hücreye ait ölçü değerleri ($a_1 = 3 \text{ mm}$, $a_2 = 4 \text{ mm}$, $a_3 = 6 \text{ mm}$, $a_4 = 7 \text{ mm}$, $a_5 = 2 \text{ mm}$), Şekil 3.4(b)'de ise klasik lazer baskı devre yöntemleri ile üretilmiş bakışimsız metamalzeme yapısı gösterilmektedir. Üretilen yapılar 15×15 birim hücreden oluşmakta olup $300 \times 300 \text{ mm}$ boyuta sahiptirler. Şekil 3.5'te de ikinci yapı için aynı şematik gösterimler olup üretilen yapının boyutları aynıdır ($a_1 = 3 \text{ mm}$, $a_2 = 4 \text{ mm}$, $a_3 = 6 \text{ mm}$, $a_4 = 7 \text{ mm}$, $a_5 = 2 \text{ mm}$). Yapılar arasındaki tek fark kapasitans değerleridir. Çünkü ikinci yapıda aralık sayısı artırılarak rezonatörler arasındaki kapasitans değeri arttırılmıştır. Oluşturulan aralıklar kapasitif etki meydana getirmiştir.



Şekil 3.4. (a) Birim hücre ölçü değerleri, (b) Üretilen yapı

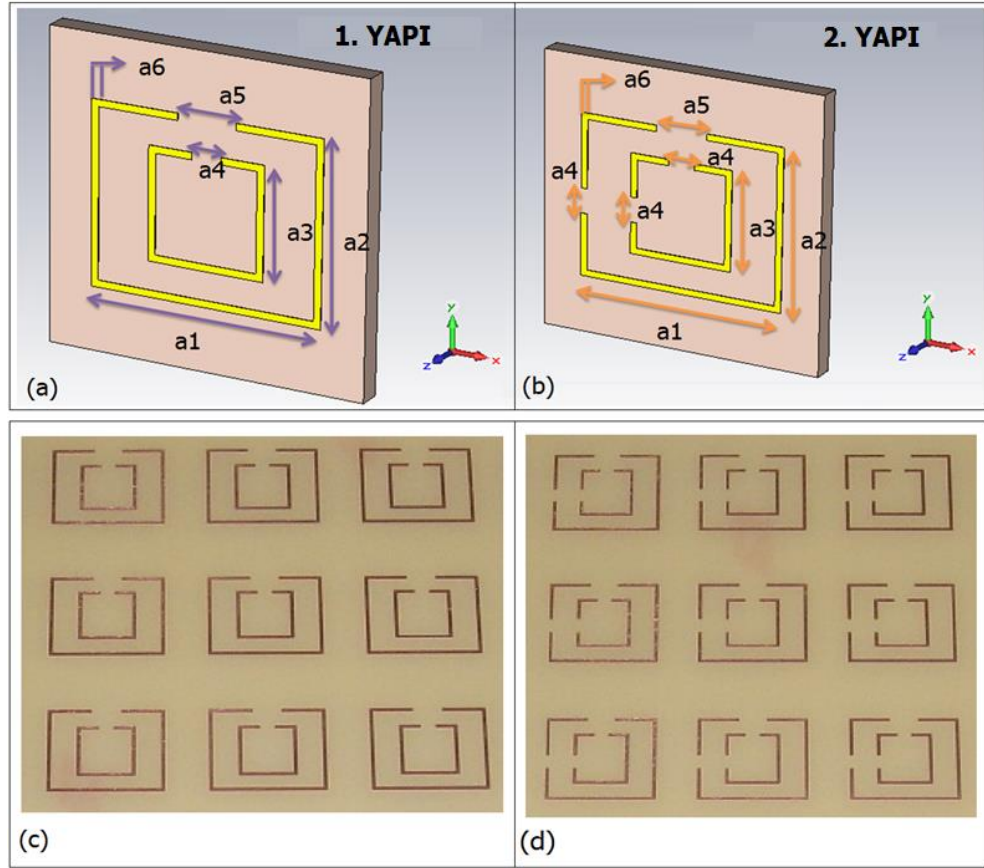


Şekil 3.5. (a) Birim hücre ölçü değerleri, (b) Üretilen yapı

3.1.5. Dikdörtgen Şekil Ayırık Halka Rezonatör Tabanlı Yapı

Küçük bakışimsızlık değeri elde etmek için ayırık halka tipi rezonatör tabanlı yeni jenerasyon iki farklı bakışimsız metamalzeme tasarlanmıştır. Dielektrik alttaşı ve onun üzerine yerleştirilmiş rezonatörden oluşan yapılardır. Rezonatörler bakır cinsi metalden yapılmış olup $5.8001 \times 10^7 \text{ S/m}$ elektriksel iletkenliğe ve 0.036 mm kalınlık değerine sahiptirler. Dielektrik malzemesi için FR4 tercih edilmiştir. Çünkü FR4 yüksek frekanslarda kolaylıkla çalışabilen bir malzeme olup 1.6 mm kalınlığa ve 4.2 dielektrik değerine sahiptir. Ek olarak düşük dielektrik kayıp değerine, 0.02, sahiptir. Amaçlanan yapıların ölçü değerleri Şekil 3.6(a) ve 3.6(b)'de gösterilmektedir. İki yapı da dikdörtgen tabanlı ayırık halka tipi rezonatörler olarak tasarlanmıştır. İkinci yapının kapasitif değeri aralıkların sayısının arttırılması ile birinci yapıya göre daha fazladır. Yapıların ölçü değerleri $a_1 = 16 \text{ mm}$, $a_2 = 13 \text{ mm}$, $a_3 = 8 \text{ mm}$, $a_4 = 2 \text{ mm}$, $a_5 = 4 \text{ mm}$, $a_6 =$

0.5 mm şeklindedir. Tasarlanan yapılar 13x13 birim hücre ve 286x286 mm boyutunda olacak şekilde üretilmiştir. Üretilen yapılar Şekil 3.6(c) ve 3.6(d)'de gösterilmiştir.

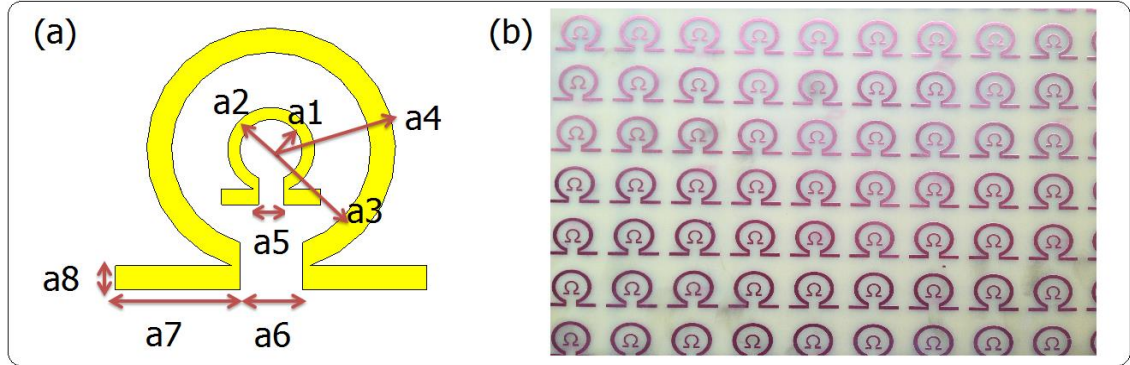


Şekil 3.6. (a) Birinci yapı için birim hücre ölçü değerleri, (b) İkinci yapı için birim hücre ölçü değerleri, (c) üretilen birinci yapı, (d) üretilen ikinci yapı

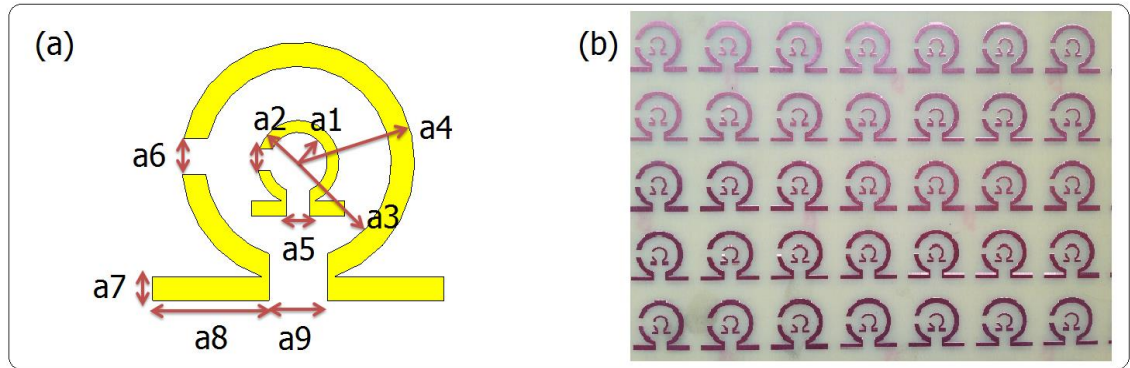
3.1.6. Omega Şekil Ayrık Halka Rezonatör Tabanlı Yapı

Yeni nesil iki farklı bakışsımsız metamatizeme tasarlanmıştır. Bu malzemeler küçük bakışsımsızlık değeri sağlamaktadır. Dielektrik alttaşı ve onun üzerine yerleştirilmiş rezonatörden oluşan yapılardır. Rezonatörler bakır cinsi metalden yapılmış olup $5.8001 \times 10^7 S/m$ elektriksel iletkenliğe ve 0.036 mm kalınlık değerine sahiptirler. Dielektrik malzemesi için FR4 tercih edilmiştir. Çünkü FR4 yüksek frekanslarda çalışabilen bir malzeme olup 1.6 mm kalınlığa ve 4.2 dielektrik değerine sahiptir. Ek olarak düşük dielektrik kayıp değerine, 0.02, sahiptir. Amaçlanan yapıların ölçü değerleri Şekil 3.7(a) ve 3.8(a)'da gösterilmektedir. İki yapı da omega tabanlı ayrık halka tipi rezonatörler olarak tasarlanmıştır. İkinci yapının kapasitif değeri aralıkların sayısının

arttırılması ile birinci yapıya göre daha fazladır. Yapıların ölçü değerleri $a1 = 2.5 \text{ mm}$, $a2 = 3.5 \text{ mm}$, $a3 = 8 \text{ mm}$, $a4 = 10 \text{ mm}$, $a5 = 2 \text{ mm}$, $a6 = 5 \text{ mm}$, $a7 = 10 \text{ mm}$, $a8 = 2 \text{ mm}$, $a9 = 3 \text{ mm}$ şeklindedir. Tasarlana yapılar 13×13 birim hücre ve $286 \times 286 \text{ mm}$ boyutunda olacak şekilde üretilmiştir. Üretilen yapılar Şekil 3.7(b) ve 3.8(b)'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. (a) Birim hücre ölçü değerleri, (b) Üretilen yapı

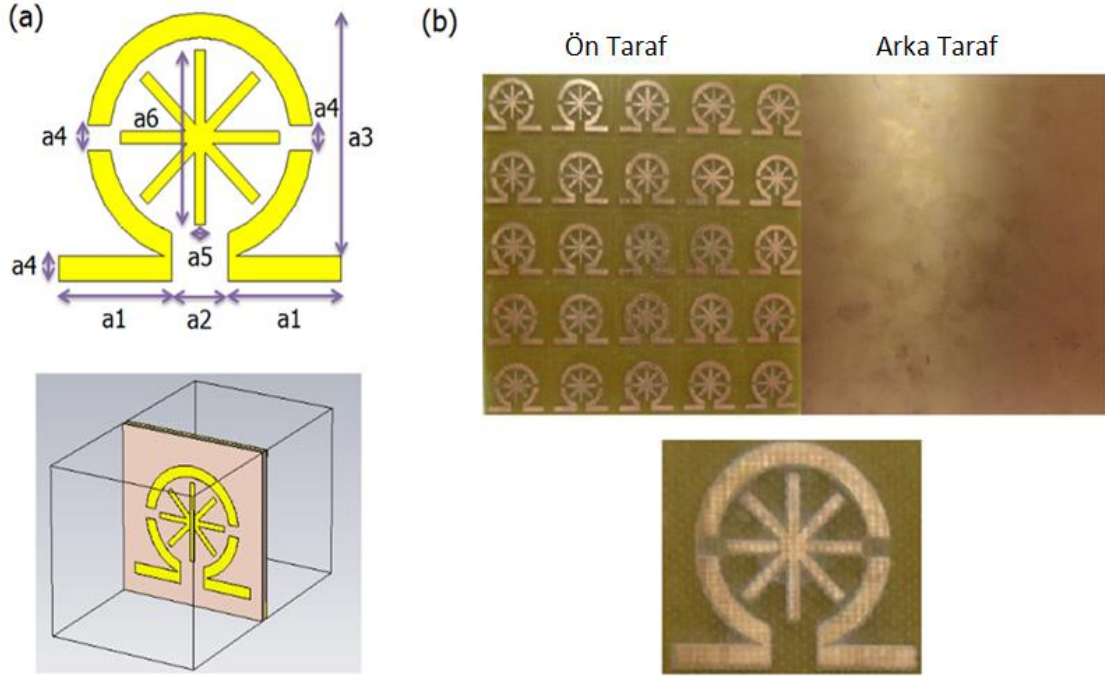


Şekil 3.8. (a) Birim hücre ölçü değerleri, (b) Üretilen yapı

3.1.7. Omega Rezonatör ve Sekizgen Yıldız Şekil Tabanlı Yapı

Amaçlanan tasarım dıştan aralıklı Ω rezonatör tabanlı olup içte sekizgen yıldız şekil tabanlıdır. Birim hücre Şekil 3.9'da gösterilmektedir. Rezonatörler bakır cinsi metalden yapılmış olup $5.8001 \times 10^7 \text{ S/m}$ elektriksel iletkenliğe ve 0.036 mm kalınlık değerine sahiptirler. Dielektrik malzemesi için FR4 tercih edilmiştir. Çünkü FR4 yüksek frekanslarda çalışabilen bir malzeme olup 1.6 mm kalınlığa ve 4.2 dielektrik değerine sahiptir. Ek olarak düşük dielektrik kayıp değerine, 0.02, sahiptir. Şekil 3.9(a)'da yapının ölçü değerleri gösterilmektedir. Tasarımdan sonra, yapı 225 cm^2 boyutunda üretilmiştir

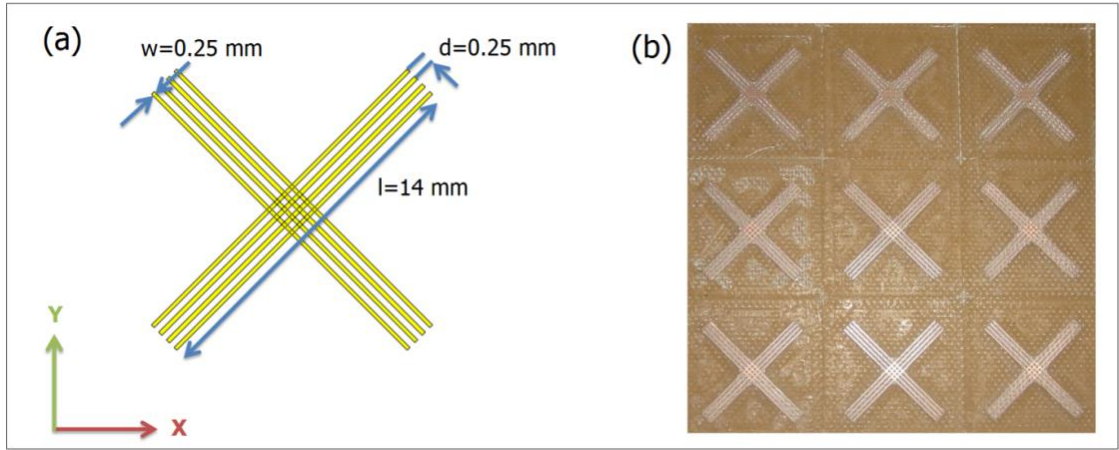
(Şekil 3.9(b)). Birim hücre ölçüleri $a1 = 10\text{ mm}$, $a2 = 5\text{ mm}$, $a3 = 20\text{ mm}$, $a4 = 2\text{ mm}$, $a5 = 1\text{ mm}$, and $a6 = 14\text{ mm}$ şeklindedir.



Şekil 3.9. Tasarlanan ve üretilen sinyal emici yapısı , (a) birim hücre ölçü değerleri, (b) üretilen yapı

3.1.8. Süreksiz Çapraz Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı Yapı

Tasarlanan metamalzeme sinyal emici yapısı ayırık halka rezonatör, dielektrik ve metal tabakadan oluşmaktadır. Dielektrik plakasının ön yüzünde çapraz yıldız şeklinde rezoantörler varken arka kısmında ise sıfır iletim sağlayan metal plaka bulunmaktadır. Metal rezonatör ve tabaka bakır cinsi metal olup $5.8001 \times 10^7\text{ S/m}$ elektriksel iletkenliğe ve 0.035 mm kalınlığa sahiptir. Bu çalışmada seçilen dielektrik FR4 cinsi malzemedir. FR4 dielektrik malzemesi 1.6 mm kalınlık, 4.2 dielektrik geçirgenlik, 1 manyetik geçirgenlik ve 0.02 kayıp tanjant değerlerine sahiptir. Şekil 3.10(a)'da birim hücreye ait ölçü değerleri gösterilmektedir. Şekil 3.10(b)'de ise klasik baskı devre yöntemleri ile üretilmiş metamalzeme sinyal emici yapısı sunulmuştur. Üretilen yapının boyutu $240 \times 240\text{ mm}^2$ 'dir.



Şekil 3.10. (a) Birim hücre ölçü değerleri, (b) üretilen yapı

3.1.9. Aralıklı Halka ve Sekizgen Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı Yapı

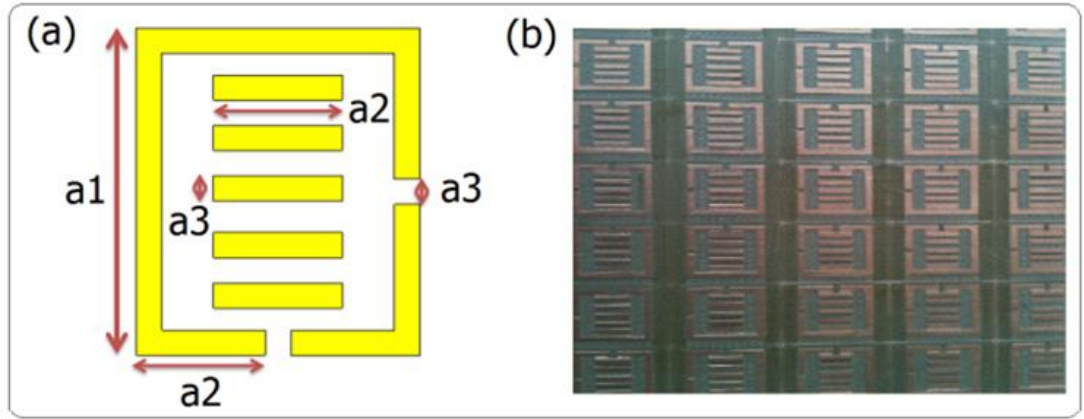
Amaçlanan çift bantlı sinyal emici yapısı aralıklı halka rezonatör ve sekizgen yıldız şekil tabanlı rezonatör içermektedir. Yapı rezonatörler, dielektrik malzemesi ve metal tabakadan oluşmaktadır. Metal tabakada bakır cins metalden oluşmaktadır. Metal cinsi $5.8001 \times 10^7 S/m$ elektriksel iletkenliğe ve $0.036 mm$ kalınlığa sahiptir. Seçilen dielektrik FR4 cinsi malzeme olup $1.6 mm$ kalınlık, 4.2 dielektrik geçirgenlik, 1 manyetik geçirgenlik ve 0.02 kayıp tanjant değeri özelliklerindedir. Şekil 3.11(a)'da birim hücre gösterilmektedir. Bu değerler $a = 19.90 mm$, $b = 14 mm$, $c = 15.87 mm$, $d = 2 mm$, $e = 1 mm$ şeklindedir. Şekil 3.11(b)'de ise klasik baskı devre yöntemleri ile üretilmiş metamatizeme sinyal emici yapısı sunulmuştur. Üretilen yapının boyutu $225 cm^2$ 'dir.



Şekil 3.11. Amaçlanan çift bantlı metamatizeme sinyal emici yapısı, (a) birim hücre ölçü değerleri, (b) üretilen yapı

3.1.10. Asimetrik Dikdörtgen Şekil Rezonatör Tabanlı Yapı

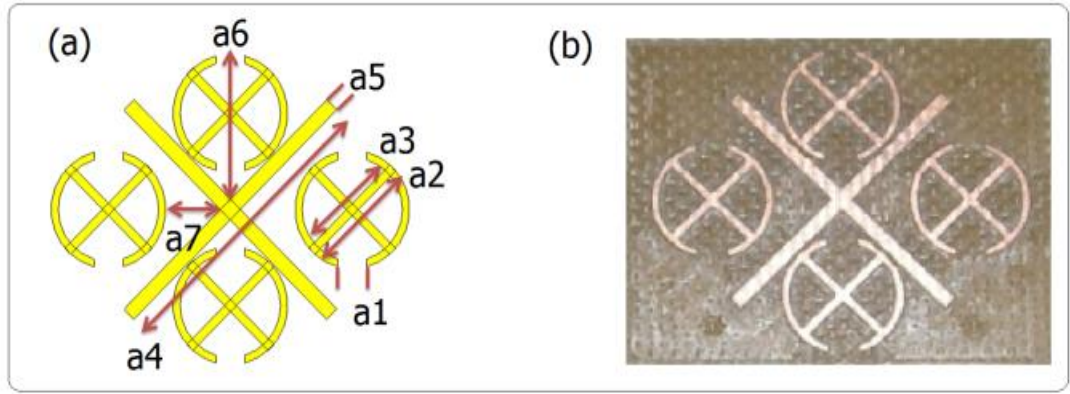
Amaçlanan çok bantlı sinyal emici yapısı dikdörtgen şekil tabanlı rezonatörler içermektedir. Yapı rezonatörler, dielektrik malzemesi ve metal tabakadan oluşmaktadır. Metal tabakada bakır cins metalden oluşmaktadır. Metal cinsi $5.8001 \times 10^7 S/m$ elektriksel iletkenliğe ve $0.036 mm$ kalınlığa sahiptir. Seçilen dielektrik FR4 cinsi malzeme olup $1.6 mm$ kalınlık, 4.2 dielektrik geçirgenlik, 1 manyetik geçirgenlik ve 0.02 kayıp tanjant değeri özelliklerindedir. Şekil 3.12(a)'da birim hücre ölçü değerleri gösterilmektedir ($a1 = 13 mm$, $a2 = 5 mm$, $a3 = 2 mm$). Şekil 3.12(b)'de ise klasik baskı devre yöntemleri ile üretilmiş metamatizeme sinyal emici yapısı sunulmuştur. Üretilen yapının boyutu $70 \times 55 mm^2$ 'dir.



Şekil 3.12. Çok bantlı metamatizeme sinyal emici, (a) birim hücre ölçü değerleri, (b) üretilen yapı

3.1.11. Halka ve Çapraz Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı Yapı

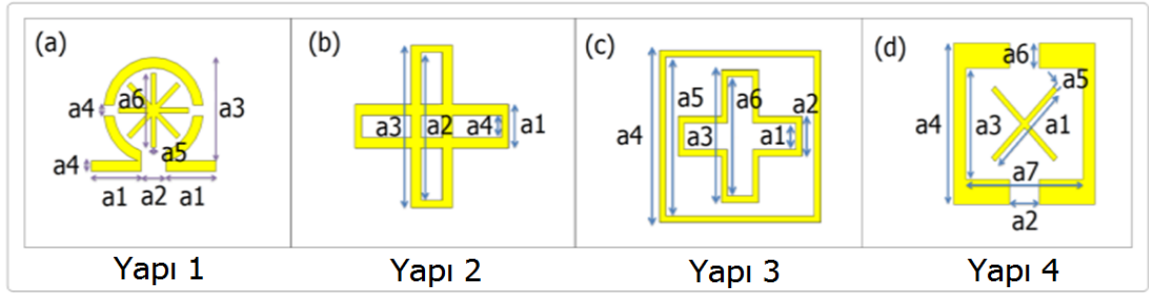
Amaçlanan metamatizeme sinyal emici yapısı halka ve çapraz yıldız şekil şerit tabanlı rezonatörler ve metalik tabaka içermektedir. Rezonatör ve metalik tabaka FR4 cinsi dielektrik malzeme ile ayrılmıştır. Metal cinsi $5.8001 \times 10^7 S/m$ elektriksel iletkenliğe ve $0.036 mm$ kalınlığa sahiptir. Seçilen dielektrik FR4 cinsi malzeme olup $1.6 mm$ kalınlık, 4.2 dielektrik geçirgenlik, 1 manyetik geçirgenlik ve 0.02 kayıp tanjant değerlerine sahiptir. Şekil 3.13(a)'da birim hücre ölçü değerleri gösterilmektedir ($a1 = 2 mm$, $a2 = 8 mm$, $a3 = 7 mm$, $a4 = 20 mm$, $a5 = 1 mm$, $a6 = 10 mm$, $a7 = 3,5 mm$). Şekil 3.13(b)'de ise klasik baskı devre yöntemleri ile üretilmiş metamatizeme sinyal emici yapısı sunulmuştur. Üretilen yapının boyutu $70 \times 55 mm^2$ 'dir.



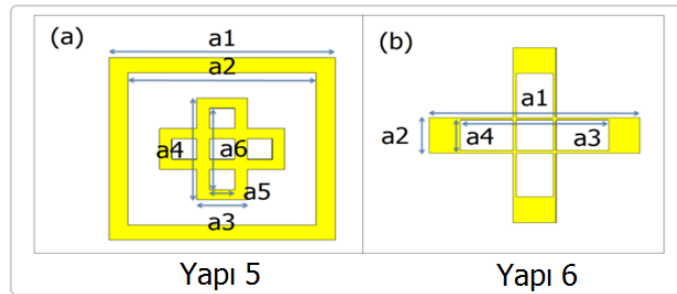
Şekil 3.13. (a) Birim hücre ölçü değerleri, (b) üretilen yapı

3.1.12. Omega, Kare, Dikdörtgen, Çapraz Yıldız Şekil Tabanlı Yapı

Bu çalışmada altı farklı FSS tabanlı metamalzeme sinyal emici yapısı tasarlanmıştır. Bunlardan ilk dört yapı (Şekil 3.14) mikrodalga frekanslarında mükemmel emilim sağlarken diğer iki yapı da (Şekil 3.15) THz frekanslarında mükemmel emilim vermektedir. GHz frekans bölgesinde çalışan yapılarda rezonatör bakır cinsi metal olup $5.8001 \times 10^7 S/m$ elektriksel iletkenliğe ve $0.036 mm$ kalınlığa sahiptir. Seçilen dielektrik FR4 cinsi malzeme olup $1.6 mm$ kalınlık, 4.2 dielektrik geçirgenlik, 1 manyetik geçirgenlik ve 0.02 kayıp tanjant değerlerine sahiptir. THz frekans bölgesinde çalışan dördüncü ve beşinci yapılarda ise metal olarak gümüş seçilmiş olup $6.3 \times 10^7 S/m$ iletkenlik ve $1 \mu m$ kalınlık değerine sahiptir. Dielektrik malzemesi olarak da Quartz (Fused) kullanılmış olup $100 \mu m$ kalınlık, 0.0004 kayıp tanjant değeri, 3.75 dielektrik geçirgenlik değeri ve 1 manyetik geçirgenlik değerlerine sahiptir.



Şekil 3.14. Amaçlanan mikrodalga FSS metamalzeme sinyal emicilerin birim hücre ölçü değerleri, (a) yapı-1, $a_1 = 10 \text{ mm}$, $a_2 = 5 \text{ mm}$, $a_3 = 20 \text{ mm}$, $a_4 = 2 \text{ mm}$, $a_5 = 1 \text{ mm}$, $a_6 = 14 \text{ mm}$, (b) yapı- 2, $a_1 = 5.909 \text{ mm}$, $a_2 = 20 \text{ mm}$, $a_3 = 22 \text{ mm}$, $a_4 = 3 \text{ mm}$, yapı-3, $a_1 = 4 \text{ mm}$, $a_2 = 6 \text{ mm}$, $a_3 = 20 \text{ mm}$, $a_4 = 3 \text{ mm}$, $a_5 = 24 \text{ mm}$, $a_6 = 18 \text{ mm}$, (d) yapı-4, $a_1 = 18 \text{ mm}$, $a_2 = 6 \text{ mm}$, $a_3 = 20 \text{ mm}$, $a_4 = 29 \text{ mm}$, $a_5 = 1 \text{ mm}$, $a_6 = 4.5 \text{ mm}$, $a_7 = 24 \text{ mm}$



Şekil 3.15. Amaçlanan THz FSS metamalzeme sinyal emicilerin birim hücre ölçü değerleri, yapı-5, $a_1 = 360 \text{ um}$, $a_2 = 300 \text{ um}$, $a_3 = 80$, $a_4 = 200 \text{ um}$, $a_5 = 40 \text{ um}$, $a_6 = 160 \text{ um}$, (b) yapı-6, $a_1 = 340 \text{ um}$, $a_2 = 70 \text{ um}$, $a_3 = 240 \text{ um}$, $a_4 = 60 \text{ um}$

3.2. YÖNTEM

Malzemelerin dielektrik özelliklerinin ölçülmesi ile ilgili zaman domeni, frekans domeni, tek port veya çift port gibi çok sayıda metot geliştirilmiştir. Geliştirilen her metot kendi içerisinde sınırlandırmalara veya spesifik kısıtlamalar barındırmaktadır. Bu metotlar kullanılarak, vektör Network Analizör yardımıyla kompleks iletim ve yansıma (s) parametrelerinin ölçümleri gerçekleştirilir. Daha sonra, elde edilen s-parametreleri kullanılarak uygun dönüşüm metodları ile efektif dielektrik permitivite ve manyetik geçirgenlik hesaplanır.

Kompleks iletim ve yansıma (s) parametrelerinin ölçülmesi için en çok kullanılan metotlar aşağıda listelenmiştir (Rohde & Schwarz 2012).

- İletim/yansıma hat metodu
- Açık/kapalı koaksiyel probu metodu
- Serbest uzay metodu
- Rezonans metodu

Burada da direkt olarak s-parametrelerinden kırılma indisi, efektif dielektrik permitivite, efektif manyetik geçirgenlik ve bakışimsızlık parametresi gibi parametrelerin geri elde edilmesi için en avantajlı yöntemler; iletim/yansıma hat metodu ile serbest uzay metodudur. Çünkü iletim ve yansıma s-parametrelerinin direkt olarak kullanılıp kırılma indisi, efektif dielektrik permitivite, efektif manyetik geçirgenlik ve bakışimsızlık parametresi gibi parametrelerin elde edildiği tek yöntemler bunlardır.

Bu çalışmada üretilen malzemeler, üretim ve ölçüm şartları açısından en uygun olarak serbest uzay metodu seçilmiş ve ölçümler buna göre yapılmıştır.

Yeni teknolojilerin gelişmesi ile birlikte yukarıda bahsedilen metotlar kullanılarak ölçülen kompleks iletim ve yansıma parametreleri kullanılarak kırılma indisi, efektif dielektrik permitivite, efektif manyetik geçirgenlik ve bakışimsızlık parametresi gibi parametreler kolaylıkla geri elde edilebilmektedir. Bu parametrelerin elde edilmesi ile ilgili dört ana farklı yöntem bulunmaktadır. Bunlar (Rohde & Schwarz 2012, Nicolson ve Ross 1970);

- Nicolson Ross Wevir (NRW) metodu
- NIST Iterative metodu

- Yeni non-iterative metodu
- Kısa devre hat metodu

Çizelge 3.1’de dielektrik permitivite ve mağnetik geçirgenlik parametrelerin geri elde edilmesi için kullanılan metotların karşılaştırılması ve dielektrik özellikleri açısından kısıtlamaları görülmektedir.

Çizelge 3.1. Dönüşüm metotları ile ilgili karşılaştırma

Dönüşüm Teknikleri	S-parametreleri	Dielektrik Özellikleri
NRW	S11, S21, S12, S22 veya S11, S21	ϵ_r, μ_r
NIST iterative	S11, S21, S12, S22 veya S11, S21	$\epsilon_r, \mu_r = 1$
New non-iterative	S11, S21, S12, S22 veya S11, S21	$\epsilon_r, \mu_r = 1$
SCL	S11	ϵ_r

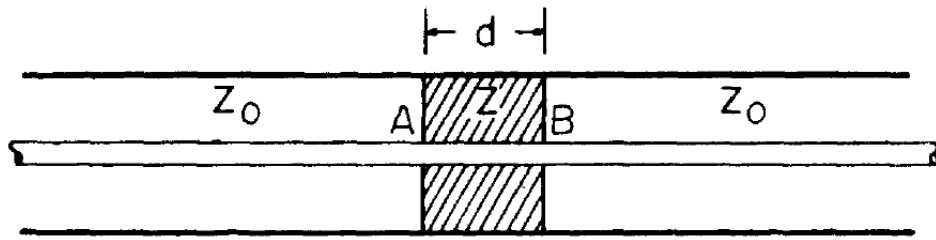
Çizelge 3.1’de verilen her metotun kendi içerisinde çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Fakat, NRW metodu ölçülen s-parametrelerinden kırılma indisi, efektif dielektrik permitivite, efektif mağnetik geçirgenlik ve bakışimsızlık parametresi gibi parametreleri direkt olarak elde edebilmesi ve özellikle bunu gerçekleştirirken efektif mağnetik geçirgenlik değerini de hesaplayabilmesi açısından en avantajlı yöntem olarak sunulmakta ve literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bundan dolayı bu çalışmada elde edilen kırılma indisi, efektif dielektrik permitivite, efektif mağnetik geçirgenlik ve bakışimsızlık parametresi gibi parametreler NRW metodu kullanılarak elde edilmiştir.

3.2.1. Metamalzemelerde Parametrelerin Geri Elde Edilmesi

Metamalzemelerde, parametrelerin elde edilmesi yöntemi ortamın EM özelliklerinin karakterize edilmesinde önemli bir tekniktir. Metamalzemelerin negatif kırılma davranışlarının tanımlanması ve yeni metamalzemelerin tasarlanmasında, nümerik ve deneysel sonuçların doğrulanmasında yaygın olarak araştırmacılar tarafından

kullanılmaktadır. Araştırmacılar, parametrelerin elde edilme metodu sayesinde tasarladıkları yapılar için simülasyon programı ile elde ettiği nümerik sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırabilmektedir (Nicolson ve Ross 1970, Luukkonen ve ark. 2011, Wang ve ark. 2009c, Li ve ark. 2009, Dincer ve ark. 2014g).

Simüle edilen yapıların EM özelliklerinin karakteristiklerinin incelenebilmesi için NRW metodu ile mikrodalga frekansında S parametrelerinden malzemenin kompleks μ ve ε değerleri elde edilmektedir. Nicolson ve Ross Şekil 3.16'daki gibi bir konfigürasyon oluşturarak ölçüm yapmışlardır (Nicolson ve Ross 1970, Luukkonen ve ark. 2011).



Şekil 3.16. Dalga kılavuzu içerisinde S parametrelerinin ölçüm konfigürasyonu

Burada $\mu = \mu_0 \mu_r$ magnetik geçirgenli, $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$, dielekrik geçirgenliği, d kalınlığını, $Z = \sqrt{\mu_r / \varepsilon_r} Z_0$ empedansı ifade etmektedir. d kalınlığı sonsuz olarak varsayılırsa ve daha sonra taralı kısım için gelen dalga için yansıma katsayısı (3.1) numaralı denklemden yazılabilir (Nicolson ve Ross 1970).

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} = \frac{\sqrt{\mu_r / \varepsilon_r} - 1}{\sqrt{\mu_r / \varepsilon_r} + 1} \quad (3.1)$$

Sonsuz d kalınlığı için tabakanın A ve B yüzleri arasındaki S_{11} ve S_{21} katsayıları için (Nicolson ve Ross 1970, Luukkonen ve ark. 2011);

$$z = \exp -j\omega\sqrt{\mu\varepsilon}d = \exp[-j(\omega/c)\sqrt{\mu_r\varepsilon_r}d] \quad (3.2)$$

$$S_{21}(\omega) = \frac{(1+\Gamma)(1-\Gamma)z}{1-\Gamma^2 z^2} = \frac{(1-\Gamma^2)z}{1-\Gamma^2 z^2} \quad (3.3)$$

$$S_{11}(\omega) = \frac{(1-z^2)\Gamma}{1-\Gamma^2 z^2} \quad (3.4)$$

$$Z = \pm \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (3.5)$$

empedans değeri hesaplanabilir. İletim ve yansıma katsayılarının toplamları ve çıkarımları ele alınırsa;

$$V_1 = S_{21} + S_{11} \quad (3.6)$$

$$V_2 = S_{21} - S_{11} \quad (3.7)$$

$$X = \frac{1+V_1 V_2}{V_1+V_2} = \frac{1+Z^2}{2Z} \quad (3.8)$$

$$Y = \frac{1-V_1 V_2}{V_1-V_2} = \frac{1+\Gamma^2}{2\Gamma} \quad (3.9)$$

Buradan iletim ve yansıma parametreleri için;

$$Z = \frac{V_1 - \Gamma}{1 - \Gamma V_1} \quad (3.10)$$

$$\Gamma = \frac{Z - V_2}{1 - Z V_2} \quad (3.11)$$

olarak bulunur. Metamalzemenin elektriksel kalınlığının çok büyük olmadığı varsayılırsa $k_{real}d \leq 1$ ve bilinen kompleks dalga numarası $k = \omega\sqrt{\epsilon_r\mu_r}/c = k_0\sqrt{\epsilon_r\mu_r}$, burada dalga empedans değeri, dielektrik geçirgenlik ve manyetik geçirgenliği elde etmek için yaklaşık olarak $Z \sim 1 - jkd$ yazılırsa;

$$k \sim \frac{1}{jd} \frac{(1-V_1)(1+\Gamma)}{1-\Gamma V_1} \quad (3.12)$$

$$\mu_r \sim \left(\frac{2}{jk_0 d}\right) \frac{1-V_2}{1+V_2} \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_r \sim \left(\frac{2}{jk_0 d}\right) \frac{1-V_1}{1+V_1} \quad (3.14)$$

etkin ortam parametre değerleri hesaplanabilir. NRW metodu Matlab programında yazılmış ve başka yapılarda rahatlıkla esnek olarak kullanılabilmesi için tasarlanmıştır. Böylece yapılan tasarım ile nümerik çalışması gerçekleştirilen metamalzeme yapılarının etkin ortam için parametre değerlerinin hesaplanması gerçekleştirilmiştir.

Metamalzemelerin diğer bir çeşidi olan bakışsız metamalzemelerde ise parametrelerin geri elde edilmesi yöntemi ele alınırsa; bir bakışsız ortam, ortamın asimetric özelliğinden dolayı sol dairesel polarizasyon ve sağ dairesel polarizasyon için farklı özellikler göstermektedir.

Bakışsız ortam içerisinde elektrik alan ve mağnetik alan arasında çapraz etkileşim etkisi meydana gelir. Bakışsız ortam, geniş bir ortam aralığında çift yönlü izotropik ortam özelliği gösterir. Çift yönlü izotropik ortam, (3.15) ve (3.16) numaralı denklemler ile karakterize edilebilir (Wang ve ark. 2009b, Wang ve ark. 2009c, Fu ve ark. 2011).

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E + (\chi + i\kappa) \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} H \quad (3.15)$$

$$B = \mu_0 \mu_r H + (\chi - i\kappa) \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} E \quad (3.16)$$

Burada ε_r ortamın dielektrik sabitini, ε_0 boşluğun dielektrik sabitini, μ_r ortamın mağnetik geçirgenliğini, μ_0 boşluğun mağnetik geçirgenliğini, χ elektrik-mağnetik hassasiyetini ve κ malzemenin bakışsızlık parametresini ifade etmektedir. İzotropik bakışsız bir ortam içerisinde bir düzlem dalga yayılımı göz önüne alınırsa elektrik alan (3.17) numaralı dalga denkleminde elde edilebilir (Wang ve ark. 2009b).

$$kx(kxE) = -k_0^2(\varepsilon\mu - \kappa^2)E - 2i\kappa k_0(kxE) \quad (3.17)$$

Burada, $k_0 = \omega/c$ serbest uzaydaki dalga vektörünü ve $c = \sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ boşluktaki ışık hızını ifade etmektedir. Bakışimsız ortamda E (3.19) numaralı denklemdeki gibi ifade edilebilir (Wang ve ark. 2009b).

$$k_{\pm} = k_0(n \pm \kappa) \quad (3.18)$$

$$\frac{E_{0y}}{E_{0x}} = \frac{k_0^2(n^2 - \kappa^2) - k_{\pm}^2}{2ik_0\kappa k_{\pm}} = \pm i \quad (3.19)$$

Burada k_+ sağ eli dairesel polarizasyonun dalga vektörünü, k_- sol eli dairesel polarizasyonun dalga vektörünü ifade etmektedir (Wang ve ark. 2009b). Denklem (3.18) den anlaşıldığı kadarıyla sağ el ve sol el dairesel polarize dalgalar için dalga vektörleri birbirinden farklıdır. Dalga vektörlerinin farklı olması, bakışimsız ortamda ilerleyen sağ el ve sol el dairesel polarize dalgaların faz hızlarının da birbirinden farklı olduğu ve dolayısıyla bakışimsız ortamın dispersive olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca, Denklem (3.19)'da görülmektedir ki; elektrik alanının transvers bileşenlerinin mutlak değerleri birbirine eşit ve aralarına 90 derece faz farkı bulunmaktadır; bu durum bakışimsız ortamda ilerleyen dalganın dairesel polarize dalga olduğunu gösterir. Bu durumda, bakışimsız ortam içerisinde lineer polarize olmuş dalganın polarizasyon düzlemi değişecek ve dönecektir. Bu polarizasyon etkisi optik aktivite olarak adlandırılmakta ve eliptik polarize dalganın polarizasyon dönme açısı olarak ifade edilmektedir (Li ve ark. 2010a, Li ve ark. 2010b, Cheng ve ark. 2013);

$$\theta = 0.5[\arg(T^+) - \arg(T^-)] \quad (3.20)$$

Buradaki T^+ ve T^- sırasıyla sağ eli dairesel polarizasyon ve sol eli dairesel polarizasyon dalganın iletim katsayılarını ifade etmektedir. Ortamın bakışimsız özelliğinden dolayı sol eli dairesel polarize ve sağ eli dairesel polarize dalgalar ortam ile farklı etkileşimlerde bulunurlar. Bu durum emilim ve zayıflamaya neden olur. Buna dairesel dichroism denilmektedir. Dairesel döndürme, (3.21) no'lu denklem ile ifade edilir (Wang ve ark. 2009b, Wang ve ark. 2009c, Dincer ve ark. 2014g).

$$\eta = 0.5 \tan^{-1}(|T^+|^2 - |T^-|^2)/(|T^+|^2 + |T^-|^2) \quad (3.21)$$

Bakışsız metamateryallerde parametrelerin geri elde edilme yöntemi efektif ortamın EM özelliklerinin karakterize edilmesi açısından önem arz etmektedir. Ayrıca nümerik sonuçların doğrulanması için de araştırmacılar tarafından sıkça kullanılmak istenmektedir. İletim ve yansıma katsayıları (S-parametreleri) tabanlı bir ortamın makroskobik parametrelerinin elde edilmesi prosedürü olarak da tanımlanabilir (Wang ve ark. 2009b, Wang ve ark. 2009c).

$$T_{\pm} = \frac{4ze^{ik_{\pm}d}}{(1+z)^2 - (1-z)^2 e^{2ink_0d}} \quad (3.22)$$

$$R_{\pm} = \frac{(1-z^2)(e^{2ink_0d} - 1)}{(1+z)^2 - (1-z)^2 e^{2ink_0d}} \quad (3.23)$$

Burada R_+ ve R_- sağ elli ve sol elli dairesel polarizasyonlu EM dalgalarda birbirine eşittir. Dolayısı ile ortamın bakışsızlık parametresi sıfır değerine eşit varsayılırsa;

$$R_{\pm} = R \quad (3.24)$$

$$T_{\pm} = Te^{\pm ikk_0d} \quad (3.25)$$

olarak yazılabilir. Yansıma ve iletim parametreleri kullanılarak empedans ve kırılma indisi parametreleri (3.26) ve (3.27) no'lu denklemlerdeki gibi yazılabilir. Denklem (3.26)'da görüldüğü gibi bakışsız ortamın empedansı her iki polarizasyon durumunda aynıdır.

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1+R)^2 - T_+T_-}{(1-R)^2 - T_+T_-}} \quad (3.26)$$

$$n_{\pm} = \frac{i}{k_0d} \left\{ \log \left[\frac{1}{T_{\pm}} \left(1 - \frac{z-1}{z+1} R \right) \right] \pm 2m\pi \right\} \quad (3.27)$$

Burada m tamsayıyı ifade etmekte olup düğüm sayısı değeridir. Bakışimsız metamatizemeler için empedans ve sağ-sol elli kırılma indisi değerleri bulunduğundan sonra diğer parametreler de bu değerlere bağılı olarak rahatlıkla bulunabilir. Bakışimsızlık parametresi, negatif kırılma indisi, mağnetik ve dielektrik geçirgenlik değerleri için (Wang ve ark. 2009b, Wang ve ark. 2009c);

$$\kappa = \frac{n_+ - n_-}{2} \quad (3.28)$$

$$n = \frac{n_+ + n_-}{2} \quad (3.29)$$

$$\mu = nz \quad (3.30)$$

$$\varepsilon = \frac{n}{z} \quad (3.31)$$

olarak hesaplanır.

3.2.2. Bakışimsız Metamatizemelerde Asimetrik İletim Hesaplamaları

Bakışimsız metamatizemelerin sağladığı en önemli özelliklerden biri de optiksel aktivitedir. Bu optiksel aktivite, gelen EM dalganın elektrik ve mağnetik alanının yapı ile etkileşiminden meydana gelir. Bu çapraz etkileşim ile polarizasyon dönüşümünün bakışimsız metamatizemeler ile birlikte meydana gelmesi genellikle belirli frekans aralığında dairesel polarizasyona sahip EM dalganın ileri ve geri yayılımı için asimetrik iletim sonucuna neden olur. Bu asimetrik iletim, her iki yöne uygulanan sinyalin polarizasyon durumu arasında belirli bir farklılık sağlar. Asimetrik iletim, teorik olarak incelendiğinde, gelen düzlem dalganın $+z$ yönünde yayıldığı durumda elektrik alan (Huang ve ark. 2012);

$$\mathbf{E}_i(\mathbf{r}, t) = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} e^{ikz} \quad (3.32)$$

olarak bulunur. Burada ω açısal frekansı, k dalga vektörünü, E_x ve E_y ise kompleks genlikleri ifade etmektedir. Bakışimsız metamatizemelerde polarizasyon dönüşümünü

anlamak için, iletim matrisi, elektrik alan için aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Huang ve ark. 2012);

$$\mathbf{E}_t(\mathbf{r}, t) = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \end{pmatrix} e^{ikz} \quad (3.33)$$

Burada ortamın simetrik olarak dielektrik ortam (vakum vb.) içerisinde gömülü olduğu varsayılmıştır. T-matris, iletilen alan için gelen alanın kompleks genlikleri olarak ifade edilmek istenirse;

$$\begin{pmatrix} T_x \\ T_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \hat{T}_{lin}^f \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

Burada f ve lin indisleri, ileri yöndeki EM dalganın yayılımını ve koordinat eksenlerine paralel gelen dalganın x ve y polarizasyon komponentlerine ayrışması gibi özel lineer temel vektörleri ifade eder. x ve y yönlerindeki iletilen dalga sırasıyla T_{xx} and T_{yx} olarak ifade edilebilir. Dairesel polarizasyonlu iletilen dalgalar, T_{xx} and T_{yx} için lineer iletim katsayılarından türetilirse, $T_{\pm} = T_{xx} \pm iT_{yx}$ olarak yazılabilir (Huang ve ark. 2012, Plum ve ark. 2011).

İletim katsayıları, T_{++} , T_{-+} , T_{+-} , ve T_{--} , lineer polarize olmuş olmuş EM dalganın yansıma ve iletim katsayılarından $\pm z$ yön için aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Menzerl ve ark. 2010, Kang ve ark. 2011).

$$T_{circ}^f = \begin{pmatrix} T_{++} & T_{+-} \\ T_{-+} & T_{--} \end{pmatrix} \quad T_{circ}^b = \begin{pmatrix} T_{++} & T_{-+} \\ T_{+-} & T_{--} \end{pmatrix} \quad (3.35)$$

Eğer yayılım yönü $-z$ yön boyunca olursa (Menzerl ve ark. 2010);

$$\begin{pmatrix} T_{++} & T_{+-} \\ T_{-+} & T_{--} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} T_{xx} + T_{yy} + i(T_{xy} - T_{yx}) & T_{xx} - T_{yy} + i(T_{xy} + T_{yx}) \\ T_{xx} - T_{yy} - i(T_{xy} + T_{yx}) & T_{xx} + T_{yy} - i(T_{xy} - T_{yx}) \end{pmatrix} \quad (3.36)$$

Lineer ve dairese polarizasyona sahip EM dalgaların asimetric iletimi Δ parametresi ile karakterize edilir. Bu parametre $+z$ ve $-z$ yönlerinde iletimler arasındaki

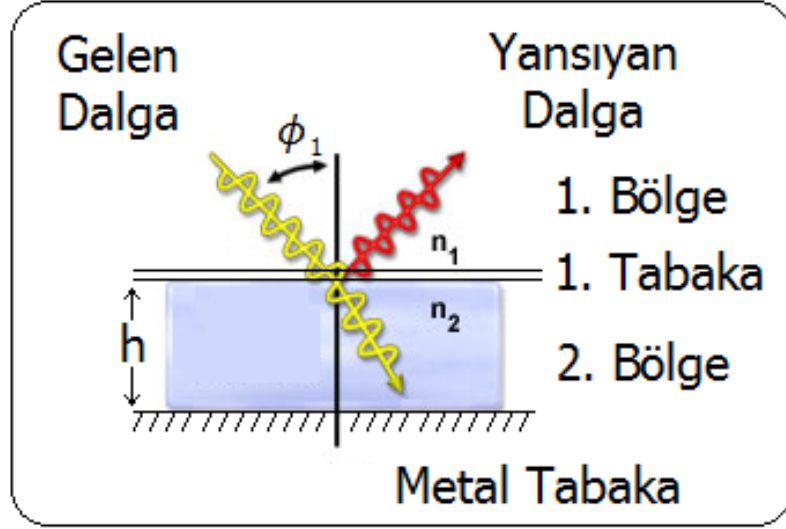
farklılık olarak tanımlanır. Bu tanımlama, asimetric iletimin açısının temsili için kullanılabilir. Lineer ve dairesel polarizasyonlu EM dalgalar için, asimetric iletim parametresi Δ , as $\Delta_{lin}^{(x)} = |T_{yx}|^2 - |T_{xy}|^2 = -\Delta_{lin}^{(y)}$, $\Delta_{circ}^{(+)} = |T_{-+}|^2 - |T_{+-}|^2 = -\Delta_{circ}^{(y)}$ olarak tanımlanabilir (Menzerl ve ark. 2010, Plum ve ark. 2011, Huang ve ark. 2012, Dincer ve ark. 2013a). Denklem (3.34)-(3.36) için, lineer polarizasyon için asimetric iletim sadece $|T_{yx}| \neq |T_{xy}| \cap T_{xx} = T_{yy}$ koşulu gerçekleştiğinde sağlanabilir (Kang ve ark. 2011, Dincer ve ark. 2013a).

Düzlemsel metamalzemeler her zaman yayılım yönünde ayna simetrisi sağlarlar. Bundan dolayı, iletim matris komponentleri her zaman $T_{xy} = T_{yx}$ kaidesini destekler. Fakat hibrid edilmiş metamalzemeler her zaman yayılım yönünde metamalzeme yapılarının ayna simetrisinin kırılmasına neden olur (Torres-Silva 2008, Plum ve ark. 2011, Dincer ve ark. 2013a).

Bakışimsız metamalzemelerin polarizasyon döndürme özellikleri bir yapı içerisinde ilerleyen EM dalga yayılımının polarizasyon durumunun değişmesine neden olur. Lineer polarize olmuş EM dalga bakışimsız ortama geldiğinde polarizasyon düzleminin azimutu, malzemenin ellilik durumuna bağlı olarak saat yönünde yada saat yönü tersinde döner. Bu gerçekleşme optiksel aktiviteyi sağlar. Bunlar bakışimsız metamalzeme yapılarının sağladığı ekstra özelliklerdir.

3.2.3. Sinyal Emicilerin Analitik Hesabı

Metamalzemeli sinyal emici yapılarının çalışma prensibinin anlaşılması ve doğrulanması için teorik çalışmaların nümerik ve deneysel çalışmalar ile de doğrulanması gerekmektedir. Bundan dolayı metamalzemeli sinyal emici yapıları için nümerik ve deneysel çalışmanın yanında teorik çalışma da yapılmıştır. Amaçlanan yapılarda geleneksel yapı şeklinde ve metal plakasız sadece metamalzeme yapı şeklinde normal gelen EM dalga için modeller oluşturulmuştur. Yalnız malzeme üzerine gelecek farklı polarizasyon açıları için de genişletilmiş girişim teorisi modeli geliştirilmiştir.



Şekil 3.17. Emilim teorisi için EM dalganın şematik gösterimi

Şekil 3.17 için $S_{11} = |s_{11}|e^{j\theta_{11}}$, 1. bölgeden 1. Bölgeye 1. Tabakanın yansıma katsayısını, $S_{21} = |s_{21}|e^{j\theta_{21}}$, 1. bölgeden 2. bölgeye 1. tabakanın iletim katsayısını, $S_{12} = |s_{12}|e^{j\theta_{12}}$, 2. bölgeden 1. bölgeye 1. tabakanın iletim katsayısını, $S_{22} = |s_{22}|e^{j\theta_{22}}$, 2. bölgeden 2. bölgeye 1. Tabakanın yansıma katsayısını ifade etmektedir. Elde edilen yansıma ve iletim katsayıları değerlendirilip model için 1. Bölgeden 1. bölgeye 1. tabakanın tüm yansıma değerleri genişletilmiş girişim teorisi için hesaplanırsa (Dincer ve ark. 2014e);

$$\sum S_{11} = S_{11} + S_{12}e^{-j(2\beta+\pi)}S_{21} + S_{12}e^{-j(2\beta+\pi)}(S_{22}e^{-j(2\beta+\pi)})^1S_{21} \quad (3.37)$$

$$+ S_{12}e^{-j(2\beta+\pi)}(S_{22}e^{-j(2\beta+\pi)})^2 + \dots$$

$$\sum S_{11} = S_{11} + S_{12}e^{-j(2\beta+\pi)}S_{21} \sum_{n=0}^{\infty} (S_{22}e^{-j(2\beta+\pi)})^n \quad (3.38)$$

$$\sum S_{11} = S_{11} + \frac{S_{12}e^{-j(2\beta+\pi)}S_{21}}{1-S_{22}e^{-j(2\beta+\pi)}} \quad (3.39)$$

$$\sum S_{11} = |s_{11}|e^{j\theta_{11}} + \frac{|s_{12}||s_{21}|e^{j(\theta_{12}+\theta_{21}-2\beta-\pi)}}{1-|s_{22}|e^{j(\theta_{22}-2\beta-\pi)}} \quad (3.40)$$

Burada $\beta = kd$, faz sabitini ifade eder ve k , ikinci bölgedeki dalga numarasını, d ise birinci tabakadan metal tabakaya iletilen dalganın yayılım mesafesini ve d Snell kırılma yasasından hesaplanırsa (Dincer ve ark. 2014e);

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (3.41)$$

$$\sin \phi_2 = \frac{n_1 \sin \phi_1}{n_2} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1 \mu_1} \sin \phi_1}{\sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} \sin \phi_1 \quad (\mu_1 = \mu_2) \quad (3.42)$$

$$\phi_2 = \arcsin \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}} \sin \phi_1 \right) \quad (3.43)$$

$$d = h \cos(\phi_2) \quad (3.44)$$

Burada, ε_1 ve ε_2 , sırasıyla birinci ve ikinci bölgenin dielektrik permitivite ve ϕ EM dalganın geliş açısını ve h ise birinci tabakadan metal tabakaya olan dik uzaklığı temsil etmektedir. Böylece emilim, $A(\omega) = 1 - |\sum S_{11}|^2 - T(\omega)$ formülü ile hesaplanabilir. Burada $A(\omega)$, $R(\omega) = |S_{11}|^2$ ve $T(\omega) = |S_{21}|^2$ sırasıyla emilim, yansımaya ve iletim katsayılarını ifade etmektedir. Rezonans frekansında empedans eşleşmesi durumunda genellikle $A(\omega)$ 'nin maksimum, $R(\omega)$ ve $T(\omega)$ değerlerinin ise minimum olması beklenir. Metamalzeme sinyal emilimi çalışmalarında metamalzemenin arka plakasının metal plaka ile kaplı olmasından dolayı malzeme iletim yapmayacaktır. Bundan dolayı, emilim değeri için iletim ihmal edilerek $A(\omega) = 1 - R(\omega)$ şeklinde de hesaplama yapılabilir. Zaten emilim çalışmalarının da ana amacı yansımaya değerinin neredeyse sıfıra indirilerek mükemmel emilim elde etmektir. Hava ile ortamın empedans değerlerinin eşleşmesinden dolayı etkin dielektrik $\varepsilon(\omega)$, ve manyetik geçirgenlik, $\mu(\omega)$, aynı veya benzer değere sahip olduğunda yansımaya sıfıra yakın bir değere azaltılabilir. Dolayısıyla $\varepsilon(\omega)$ ve $\mu(\omega)$ değerleri istenilen bir şekilde ayarlandığında her iki gelen elektrik ve manyetik alanın emilmesi mümkün olabilir. Bu makroskobik parametreler yüksek emilim elde etmek için yönlendirilebilir. Rezonans durumu için efektif empedans değeri, $Z(\omega) = \sqrt{\mu(\omega)/\varepsilon(\omega)} = z_1 + iz_2$, serbest uzay empedansı, $Z(\omega) = Z_0(\omega) = 120\pi$, ile eşleşir ve yansımaya minimize edilir. Böylece mükemmel emilim elde edilir (Dincer ve ark. 2014d, Dincer ve ark. 2014e).

3.2.4. EM Dalga Problemleri için Nümerik Metotlar

Nümerik metotlarla yapılan simülasyon çalışmalarında elektrik ve mağnetik alanı belirlemek için Maxwell denklemleri kullanılır. İzotropik ve lineer bir ortam için Maxwell denklemleri kısmi hiperbolik diferansiyel denklemlere set edilirse aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Taflove ve Hagness, 2000);

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}_e \quad (3.45)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \vec{J}_m \quad (3.46)$$

Burada $\vec{D}$, elektrik akı yoğunluğunu, $\vec{B}$, mağnetik akı yoğunluğunu, $\vec{E}$, elektrik alan vektörünü, $\vec{H}$, mağnetik alan vektörünü, $\vec{J}_e$, elektrik akım yoğunluğunu ve $\vec{J}_m$, mağnetik akım yoğunluğunu ifade etmektedir.

Hesaplamalı EM, EM alanların fiziksel nesneler ve çevre ile etkileşimini modelleyen çözümleri ifade eder. Hesaplamalı EM’de bilinen temelde Maxwell denklemleri yaklaşımları kullanılır ve günümüzde çok sayıda diferansiyel denklem çözümü için farklı metotlar kullanılmaktadır. Bunlar; sonlu farklar zaman domenı (Finite Difference Time Domain-FDTD), Çoklu zaman domenı (Multiresolution Time Domain-MRTD), Sonlu elemanlar metodu (Finite Element Method-FEM), Sonlu Toplamlar Metodu (Finite Integration Technique-FIT), Sözde spektral zaman domenı (Pseudo Spectral Time Domain-PSTD), Sözde spektral uzay domenı (Pseudo Spectral Spatial Domain-PSSD) ve Bir boyutlu yerel FDTD (Locally one dimensional FDTD).

FDTD metodu, yaygın olarak kullanılan hesaplamalı EM tekniklerinden biridir. Anlaşılması ve kullanımı kolay olup tam dalga çözümler için son derece basit şekilde uygulama alanına sahiptir. FDTD, bir kişinin kendi başına reel olarak uygulayabileceği bir teknik olup spesifik problemler için oldukça uygulanabilir. FDTD, farklı zaman domenı nümerik modelleme metotları sistemi tabanlıdır. Bu metodu kullanan tam dalga EM çözüm programlarında Maxwell denklemleri (kısmi diferansiyel formda) farklar denklemleri modife edilerek ayrıştırılır ve uygulanır. Periyodik bir şekilde çözülen denklemlerde belirlenen zaman sabitinde elektrik alan çözülür ve daha sonra da gelecek

sabit zaman içerisinde de mağnetik alan özölür (Weiland 1996, Rokhlin 1985, Mohammadian ve ark. 1991, Davidson 2010).

MRTD metodu, yaygın olarak kullanılmamakla beraber dalgacık analizi FDTD metoduna adaptif bir alternatiftir (Greengard ve Rokhlin 1987, Mohammadian ve ark. 1991).

FEM metodu, kısmi diferansiyel ve integral denklemlerini yaklaşım özölmlerini bulmak için kullanılır. özölüm yaklaşımında sıralı farklı denklemler içerisinde her iki zaman türevi (sabit durumlu hallerde) ve kısmi denklemlerini kullanır ve daha sonra da sonlu farklar vb. standart teknikleri kullanarak özölüm yapar. eşıitli avantaj ve dezavantajları olmakla beraber FEM metodu çok karmaşıık denklemler veya zaman domeninde istenen hassas kısmi farklar denklemlerin özölümünde iyi bir seçimdir (Rokhlin 1985, Greengard ve Rokhlin 1987, Manzanares-Martinez ve Gaspar-Armenta 2007).

PSTD metodu, her iki ayrıık Fourier veya Chebyshec dönüşıömlerini kullanan Maxwell denklemleri için elektrik alan ve mağnetik alan vektör komponentlerinin her iki 2 boyutlu veya 3 boyutlu birim hücre düzlemlerinde uzay koordinatlarına bağlı türevlerini hesaplamak için uygun zaman domeni hesaplamalı teknikler sınıfından biridir. PSTD, FDTD için nümerik faz sabiti anizotropi göreceli hatalarının ihmal edilmesine de neden olur ve bu yüzden modelleme için elektriksel olarak daha büyük geometriler için özölümüne izin verir (Mohammadian ve ark. 1991).

PSSD metodu, seçilen uzay koordinatlarına bağlı yönde yayılımı Maxwell denklemlerini kullanarak çözer. Elektrik ve mağnetik alan böylece zamanın bir fonksiyonu olarak tutulur. Metot sözde spektraldir çünkü FFT'nin ait olduğu frekans domeninde geçici türev hesaplamaları yapar.

FIT metodu, uzay koordinatlarına bağlı ayrıık tabanlı bir metot olup zaman ve frekans domeninde EM alan problemlerini nümerik olarak çözmekte kullanılır. Bu metot, enerji ve yükün korunumu gibi sürekli denklemlerin temel topolojik özellikleri korur. FIT, 1977 yılında Thomas Weiland tarafından amaçlandı ve yıllardır süren çalışmalar sonucunda araşıırmacılar tarafından geliştirilmiştir (Weiland 1977, Bartsch ve ark. 1992, Weiland 1996, Clemens ve ark. 1999, Clemens ve ark. 2000). Bu metot tam dalga EM özölümü yapar ve istenen frekans bölgesinde çalışır. Bu yaklaşımın temel motodu integral formda sistemi set ederek Maxwell denklemlerini uygulamaktır. FIT metodu, her

malzeme dağılımları ve anizotropi, lineer olmayan ve dağılım gibi malzeme özelliklerinin birleştirilmesi için yapılan geometrik modelleme ve sınır koşullarında yüksek esnekliğinden dolayı yaygın olarak kullanılır (Weiland 1977, Rokhlin 1985, Greengard ve Rokhlin 1987, Mohammadian ve ark. 1991, Thoma ve Weiland 1995).

FIT metodunu oluşturan denklemler, ilişkili eşitlikler ve sınır koşulları baz alınarak temel bağıntılar çıkartılmıştır. Kartezyen koordinatlarda pozisyon vektörü olarak $\underline{\mathbf{R}} = x_1 \underline{\mathbf{e}}_1 + x_2 \underline{\mathbf{e}}_2 + x_3 \underline{\mathbf{e}}_3 = x_i \underline{\mathbf{e}}_{-i}$ olarak alınır. Burada x_i , $i = 1,2,3$ kartezyen koordinatlarını, $\underline{\mathbf{e}}_i$, $i = 1,2,3$ üç ortonormal birim vektörlerini, $\mathbb{R}^3$ üç boyutlu öklit uzayını ve t zamanı ifade eder. Belirlenen sınır koşulları için (Miklowitz 1980, Ben-Menahem ve Singh 1981, Chen 1983, Achenbach, 1984).

$$\nabla_x \underline{\mathbf{E}}(\underline{\mathbf{R}}, t) = -\frac{\partial}{\partial t} \underline{\mathbf{B}}(\underline{\mathbf{R}}, t) - \underline{\mathbf{J}}_m(\underline{\mathbf{R}}, t) \quad (3.47)$$

$$\nabla_x \underline{\mathbf{H}}(\underline{\mathbf{R}}, t) = \frac{\partial}{\partial t} \underline{\mathbf{D}}(\underline{\mathbf{R}}, t) + \underline{\mathbf{J}}_e(\underline{\mathbf{R}}, t) \quad (3.48)$$

olarak yazılır. Burada $\underline{\mathbf{E}}$, elektrik alan güç vektörünü, $\underline{\mathbf{D}}$, elektrik akı yoğunluk vektörünü, $\underline{\mathbf{H}}$, manyetik alan güç vektörünü, $\underline{\mathbf{B}}$, manyetik akı yoğunluk vektörünü, $\underline{\mathbf{J}}_m$, manyetik akım yoğunluk vektörünü, $\underline{\mathbf{J}}_e$, elektrik akım yoğunluk vektörünü tanımlar. ∇ gradient operatörü olarak adlandırılır. Malzemelerin özelliklerini karakterize eden temel denklemler çıkartılırsa;

$$\underline{\mathbf{D}}(\underline{\mathbf{R}}, t) = \underline{\underline{\boldsymbol{\varepsilon}}}(\underline{\mathbf{R}}) \cdot \underline{\mathbf{E}}(\underline{\mathbf{R}}, t) \quad (3.49)$$

$$\underline{\mathbf{H}}(\underline{\mathbf{R}}, t) = \underline{\underline{\boldsymbol{\mu}}}(\underline{\mathbf{R}}) \cdot \underline{\mathbf{B}}(\underline{\mathbf{R}}, t) \quad (3.50)$$

olarak yazılır. Burada $\underline{\underline{\boldsymbol{\varepsilon}}}$, ikinci rank tensör dielektrik permitiviteyi, $\underline{\underline{\boldsymbol{\mu}}}$, ikinci rank tensör manyetik geçirgenliği ifade eder. Bu çalışmadaki nümerik bulgular FIT metodu tabanlı CST Microwave Studio programı ile elde edilmiştir. Daha sonra nümerik sonuçları doğrulamak için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Böylece tasarlanan yapıların

üretilmesi ile birlikte deneysel çalışmalar sayesinde yansıma ve iletim katsayıları da belirlenmiş olacaktır.

3.2.5. Ölçüm Düzeneği

Deneysel çalışmalarda Agilent E5071B ENA RF, AGILENT E8362B PNA ve R&S ZVL6 Vektör Network Analizörleri ve bunlara bağlı mikrodalga horn antenler iletim ve yansıma katsayılarını ölçmek için kullanılmıştır. Şekil 3.18’de deneysel ölçümler için kullanılan bu analizörlere ait resimler gösterilmektedir.

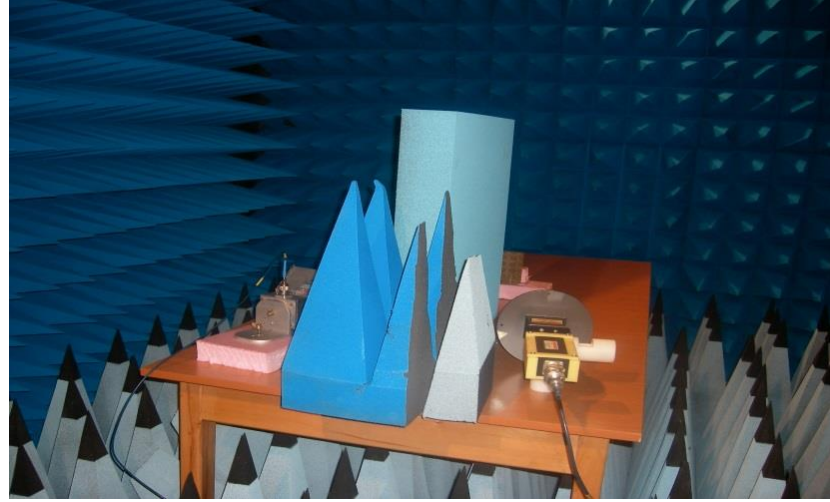


Şekil 3.18. Vektör network analizörleri

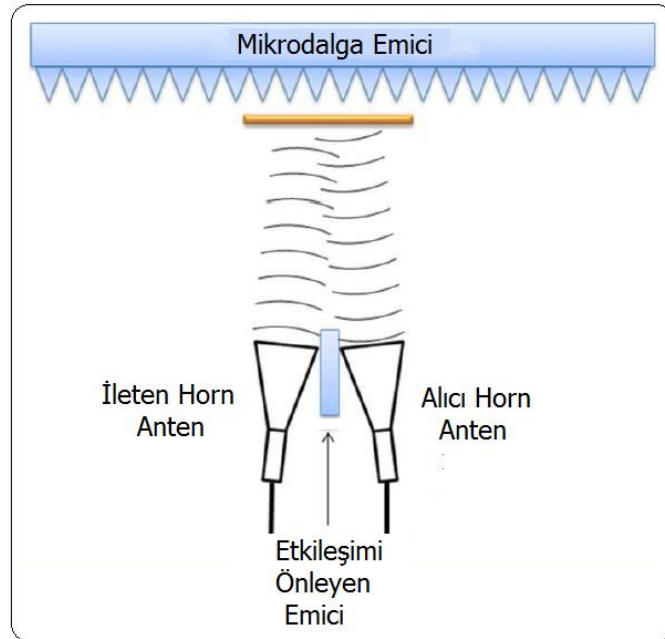
Şekil 3.19-3.23’te, T- iletim matrisi T_{xx} , T_{xy} , T_{yy} , T_{yx} ve R- yansıma katsayı değerlerinin deneysel olarak ölçülmesi için şematik deneysel kurulumları gösterilmektedir. Her ölçüm metodunda ilk olarak metamalzeme yapısı olmadan serbest uzay ölçümleri uygulanmış ve bu ölçümler network analizöründe kalibrasyon datası olarak kullanılmıştır. Yani antenler arasına metamalzeme yapısı yerleştirilmeden önce analizörlerin kalibre edilmesi sağlanmıştır.

Sinyal emilim çalışmalarında amaçlanan modelde alttaşı arkasında metalik bir tabaka, ön yüzde ise rezonatör bulunmaktadır. Metalik katmandan dolayı EM dalganın iletim, de sıfır olacaktır. Yansıma değeri ölçümleri için, iki horn anten arasındaki açı çok küçük olacak şekilde birbirine yakın yerleştirilmiştir. Çapraz etkileşimden meydana gelebilecek etkileri önleme için antenler arasına mikrodalga emici tabakası koyulmuştur (Şekil 3.19). Böylece yansıma değeri ölçülürken antenler arasında bir girişim meydana gelmez. Bu duruma ait şematik gösterim Şekil 3.20’de ve gerçekleştirilen yanksız oda ölçümü ise Şekil 3.21’de verilmiştir. Kalibrasyon amaçlı olarak bakır plaka öncelikle

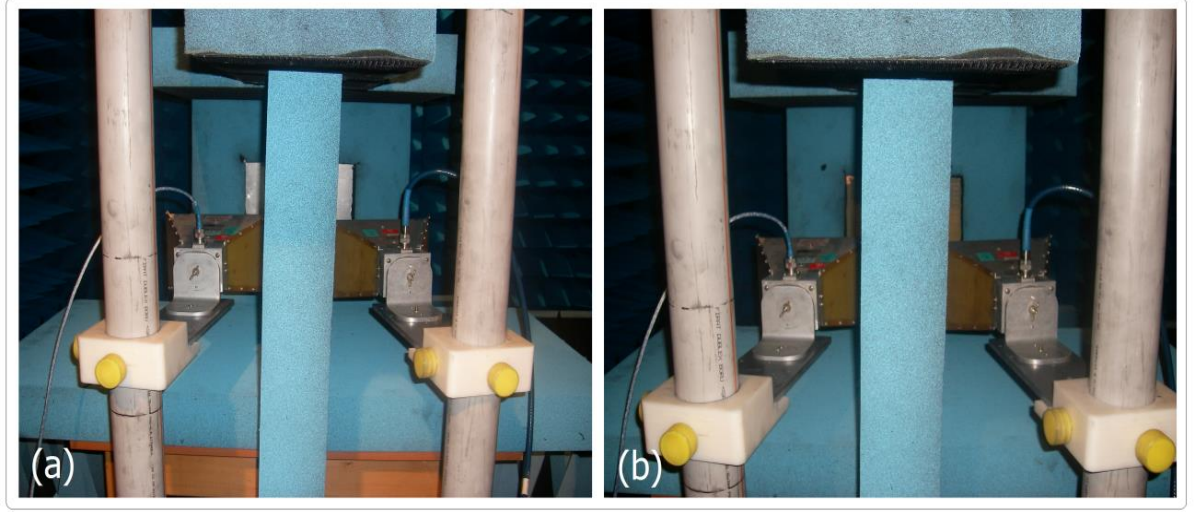
yerleştirilmiştir (Şekil 3.21(a)). Daha sonra bakır plaka çıkartılıp kalibrasyon sonrası üretilen metamalzeme yapısı koyulmuştur (Şekil 3.21(b)). Metamalzeme sinyal emici yapısı bakır plaka ile aynı pozisyonda yer almıştır. İleten horn anten yapının yüzeyine EM dalga gönderir ve alıcı horn anten yansıyan EM dalganın genlik değerini ölçer. Ek olarak ölçümler için horn antenler arasındaki mesafe yakın alan etkilerini elimine etmek için frekans değerine bağlı olmakla birlikte yeterli düzeyde tutulmalıdır.



Şekil 3.19. Çapraz etkileşimden meydana gelebilecek etkileri önleme için antenler arasına mikrodalga emici tabakasının yerleştirilmesi

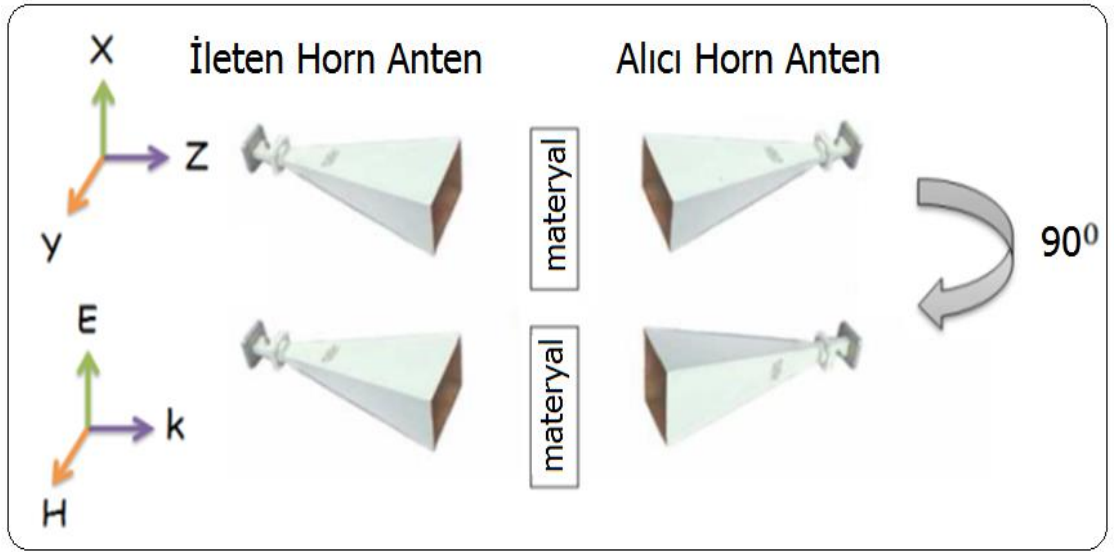


Şekil 3.20. Şematik sinyal emici ölçüm gösterimi (Lee ve ark. 2012)

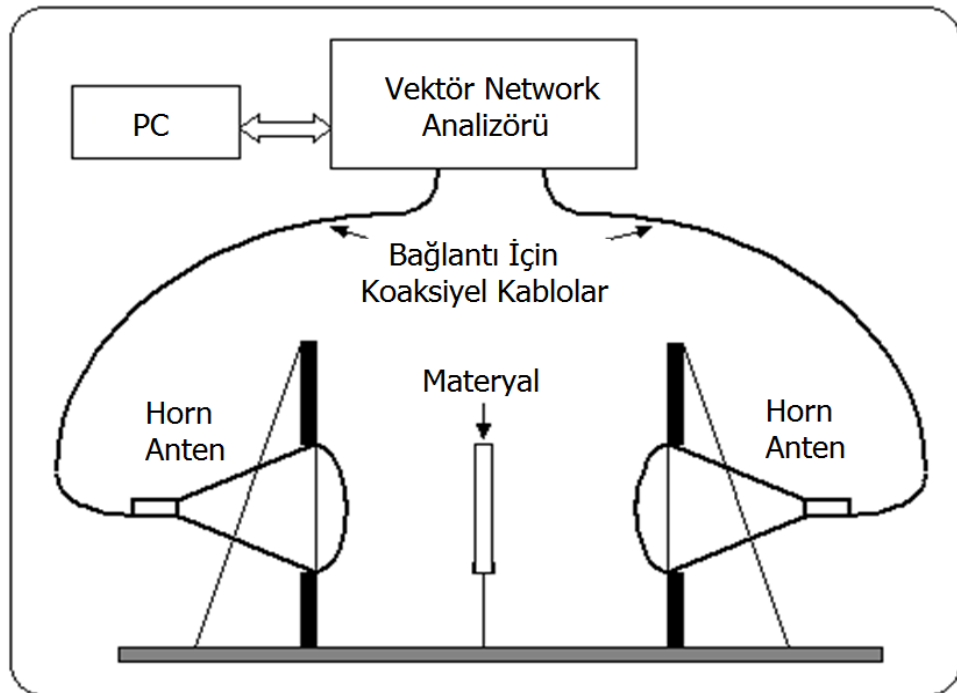


Şekil 3.21. Sinyal emilim çalışmalarına atı ölçüm şekli, (a) kalibrasyon, (b) yapı ölçümü

Bakışimsız metamalzeme ile yapılan ölçüm çalışmalarında da benzer metotlar uygulanmıştır. Deneysel kurulum bir network analizörü ve buna bağlı iki mikrodalga horn anten içermektedir. Bu antenler network analizörüne S – parametrelerini ölçmek için bağlanmıştır. İlk olarak, bakışimsız metamalzeme olmadan serbest uzay ölçümleri uygulanmış ve bu ölçümler network analizöründe kalibrasyon datası olarak kullanılmıştır. İkinci olarak; üretilen yapı, ölçümler için deneysel kurulum içerisine yerleştirilmiş ve S – parametre ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Horn antenler ve bakışimsız plaka arasındaki uzaklık, yakın alan etkilerini elimine etmek için yeterince uzak tutulmuştur. Şekil 3.22 ve Şekil 3.23 ölçümler için şematik gösterimler verilmiştir. Şekil 3.22’de antenlerin 90° açı ile döndürülmesinin nedeni T_{xx} , T_{xy} , T_{yy} , T_{yx} (co-polar, cross-polar) ölçümlerini gerçekleştirmek içindir. Yansıma için ise bu değerler eşittir.



Şekil 3.22. Bakışsız metamatlamze için deney metodunun şematik gösterimi (Li ve ark. 2013)



Şekil 3.23. Metamatlamzeler için deney metodunun şematik gösterimi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

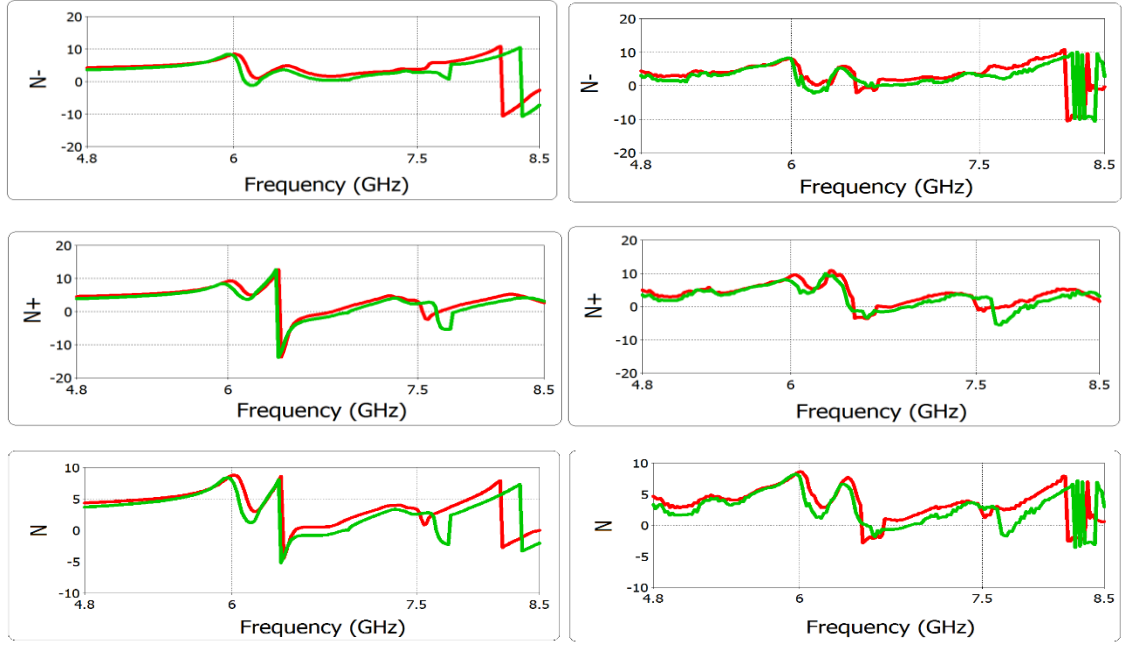
Bu çalışmada kullanılan farklı özelliklerdeki metamalzeme yapılar ve bu yapıların; yansıma, iletim, kırılma ve bakışimsızlık gibi EM özellikleri aşağıda ayrıntılı bir şekilde sayısal ve deneysel olarak analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlara ait grafikler çizilerek tartışılmıştır.

4.1. Optiksel Aktivitesi ve Negatif Kırılma İndisi Büyük Bakışimsız Metamalzemeler İle S- Parametrelerinin Geri Elde Edilmesi

4.1.1. Çift Tabakalı Süreksiz Çapraz Yıldız Şekil Tabanlı Rezonatör

Bu çalışmada parametrelerin geri elde edilme metodunu uygulamak için Şekil 3.1'deki bakışimsız metamalzeme materyalleri kullanılmıştır. Parametrelerin geri elde edilmesi araştırmacılar tarafından efektif ortamın EM özelliklerini karakterize etmek için genellikle kullanılan önemli bir metottur. Metamalzemelerin EM özelliklerinin belirlenebilmesi için literatürde bazı metotlar mevcuttur (Wang ve ark. 2009b). Fakat bu metotlardan bazıları nümerik çalışma için uygun olurken diğerleri de analitik çalışma için uygun olmaktadır. Bu metotlar arasında S-parametrelerinin geri elde edilme metodu hem deneysel hem de nümerik çalışmalar için daha uygundur.

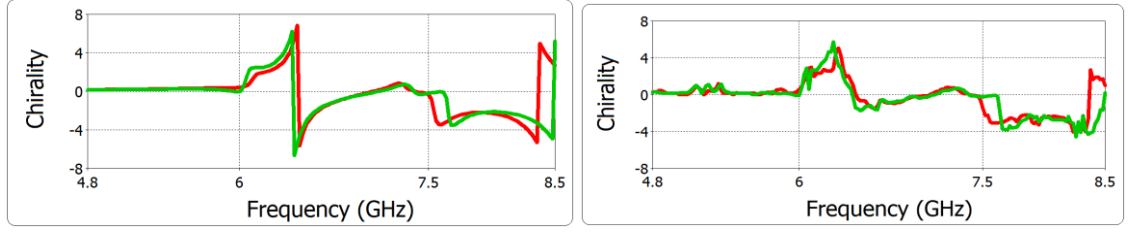
Şekil 4.1(a)-(c) ve 4.1(d)-(f), kırılma indislerinin (n_- , n_+ ve n) frekansa bağlı olarak sonuçlarını nümerik ve deneysel olarak göstermektedir. Her iki yapı, yüksek negatif kırılma indisi ve bakışimsızlık parametresi değerine sahiptir. Dolayısı ile 6.6 GHz ve 8.3 GHz rezonans frekanslarında hedeflenen yüksek bakışimsızlık parametresi ile yüksek negatif kırılma indisinin elde edilebileceği de gösterilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere deneysel sonuçlar, nümerik sonuçlar ile çok iyi örtüşmektedir.



Şekil 4.1. Parametrelerin geri elde edilmesi ile negatif kırılma indisi sonuçları.

Sol taraf nümerik sonuçları ifade ederken, sağ taraf deneysel sonuçları temsil etmektedir. Kırımızı düz çizgi $D = 0.25 \text{ mm}$ değeri için temsil edilirken, yeşil düz çizgi $D = 0.30 \text{ mm}$ değeri için ifade edilmektedir.

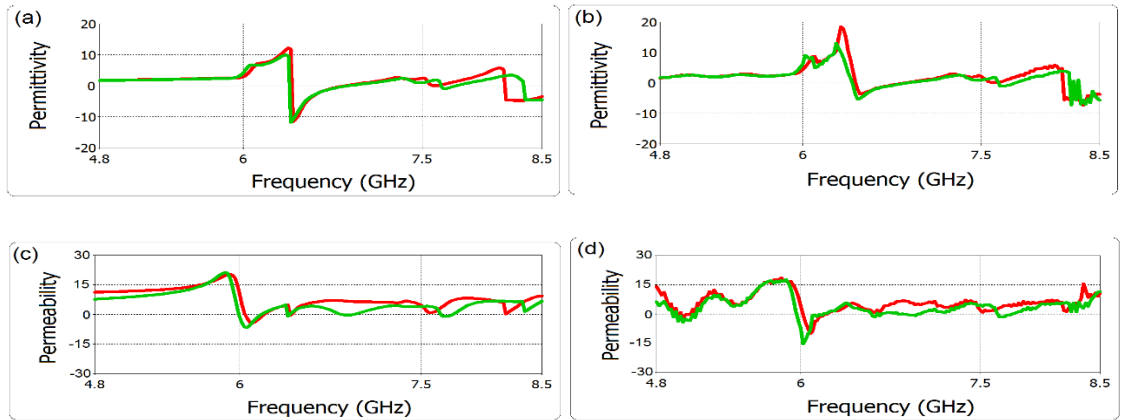
Bakışimsızlık parametresi, κ , iletim katsayısından, $Re(\xi) = [\arg(T_+) - \arg(T_-) + 2m\pi]/(2k_0d)$ formülü ile doğrudan elde edilmektedir. Burada k_0 , boşluktaki dalga vektörünü, d yapının kalınlığını (burada 1.6 mm olarak alınmıştır) ve m ise sabit bir tam sayıdır. Ayrıca T_+ ve T_- değerleri $-\pi < \arg(T_+) - \arg(T_-) + 2m\pi < \pi$ ile sınırlandırılmıştır (Smith ve ark. 2002, Zhao ve ark. 2011). Yapı bakışimsızlıktan dolayı yayılım yönünde simetrik bir geometriye sahiptir (Şekil 4.2). İlk yapı (kırmızı renkli olan- $d = 0.25 \text{ mm}$), iletim spektrumunda iki rezonansa sahiptir. İlk simülasyon ve deneysel çalışma için sırasıyla $6.48 - 6.32 \text{ GHz}$ frekans değerlerinde $\kappa = 6.8 - 5.1$ bakışimsızlık değerlerine sahiptir. İkincisi de 8.38 GHz 'tir. İlk rezonans ikinci rezonansa göre daha keskindir. İkinci yapı (yeşil renkli olan), iletim spektrumunda iki rezonansa sahiptir. Simülasyon ve deneysel çalışma için sırasıyla $6.44 - 6.28 \text{ GHz}$ frekans değerlerinde $\kappa = 6.2 - 5.7$ bakışimsızlık değerlerine sahiptir. İkincisi de 8.49 GHz 'tir. Tasarlanan yapıdan dolayı rezonanslar geniş bantta elde edilmiştir. Bu özellik negatif indisli kırılma değeri, büyük optiksel aktivite ve büyük bakışimsızlık değerinden dolayı da polarizasyon döndürme sağlamaktadır.



Şekil 4.2. Bakışimsızlık parametresi nümerik (sol taraf) ve deneysel (sağ taraf) sonuçları. Kırmızı renkli çizgi $D = 0.25 \text{ mm}$ değerini temsil ederken, yeşil renkli çizgi de $D = 0.30 \text{ mm}$ değerini temsil etmektedir.

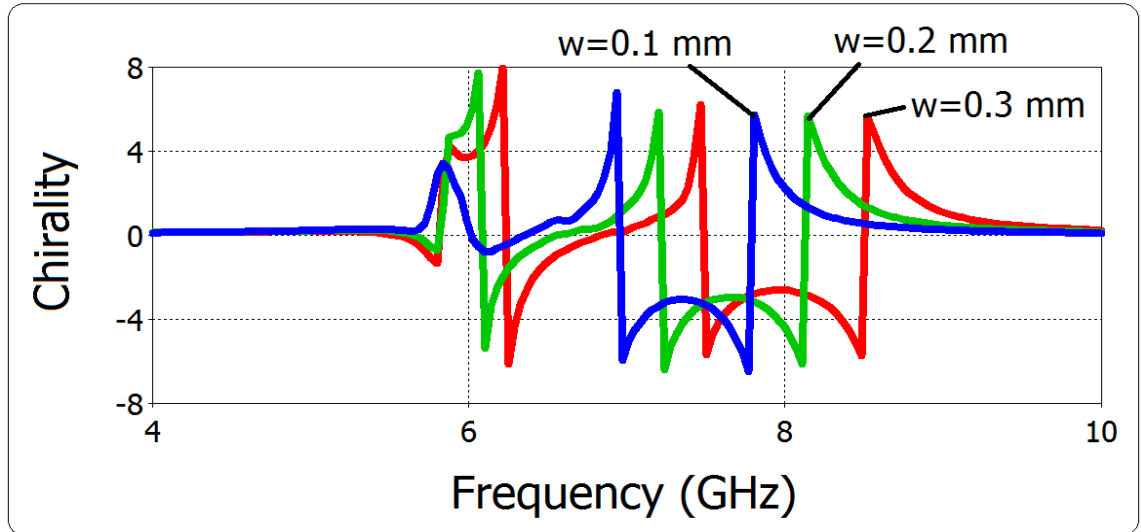
Şekil 4.2'ten de anlaşılacağı üzere sağ ve sol dairesel polarizasyonlar arasında geniş bir bant vardır. Bu özellik sayesinde polarizasyon dönüşümü kolaylıkla sağlanabilmektedir. Böylece rezonans değerinde negatif değerli kırılma indisi elde edilmektedir ($n_{\pm} = n \pm \kappa$). Bu durum dairesel döndürme olarak da ifade edilmektedir. Dairesel döndürme ellipticity ile ifade edilir ve iletilen dalga için $\eta = 1/2 \tan^{-1} \left(\frac{|T_{++}|^2 - |T_{--}|^2}{|T_{++}|^2 + |T_{--}|^2} \right)$ formülü ile bulunur (Wang ve ark. 2009b, Wang ve ark. 2009c, Li ve ark. 2009).

Sağ ve sol dairesel polarizasyonlu dalganın kırılma indisi değerinin ortalaması, $n = (n_L + n_R)/2$, ve empedans, z , değerlerinden parametrelerin geri elde edilme yöntemi kullanılarak dielektrik ($\epsilon = n/z$) ve manyetik geçirgenlik ($\mu = nz$) katsayısı değerleri de hesaplanır (Şekil 4.3).

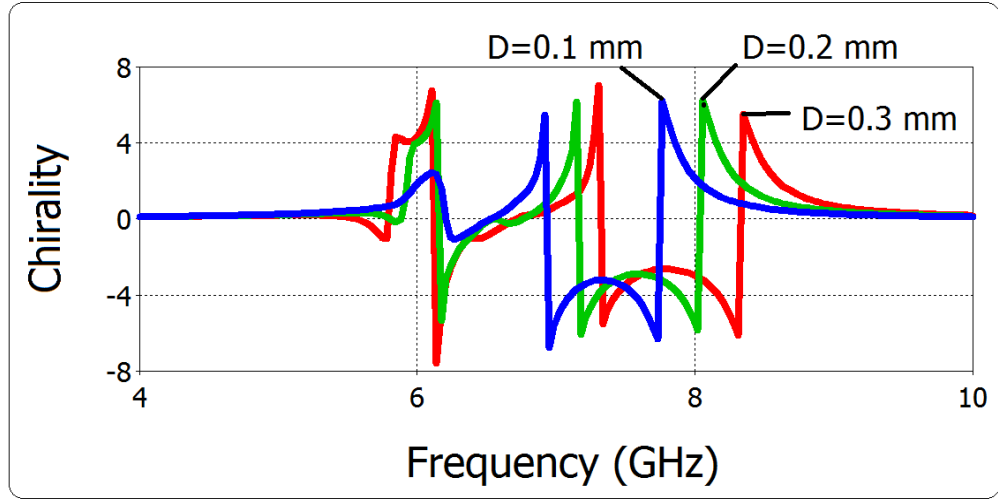


Şekil 4.3. Nümerik (sol taraf) ve deneysel (sağ taraf) dielektrik ve manyetik geçirgenlik değerleri. Kırmızı renkli çizgi $D = 0.25 \text{ mm}$ değerini temsil ederken, yeşil renkli çizgi de $D = 0.30 \text{ mm}$ değerini temsil etmektedir.

Bu bakışimsız metamalzeme tasarımı basit, esnek ve kolay konfigüre edilebilir bir yapıya sahiptir. Bundan dolayı, diğer bakışimsız metamalzeme tasarımları ile karşılaştırıldığında diğer frekans bölgeleri için de verimli olarak kullanılabilir. Ek olarak, mekanik ayarlanabilirlik ve kolay konfigürasyon özelliklerini göstermek için parametrik çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Onlardan biri çapraz şeritlerin kalınlıkları ve diğeri de şeritler arasındaki mesafedir. Şerit kalınlıkları ve şeritler arasındaki mesafe değerleri 0.30 mm değerinden 0.10 mm değerine kadar azaltılmıştır. Şekil 4.4 ve 4.5'te parametrik değerlere karşın bakışimsızlık sonuçları sunulmuştur. Şekillerden de anlaşılacağı üzere mekanik ayarlanabilirlik ile birlikte değişken optiksel aktivasyon ve dairesel polarizasyon sağlanabilmektedir.



Şekil 4.4. Çapraz şeritlerin farklı kalınlık değerleri için nümerik bakışimsızlık değerleri



Şekil 4.5. Çapraz şeritler arasındaki mesafe değerleri için nümerik bakışimsızlık Değerleri

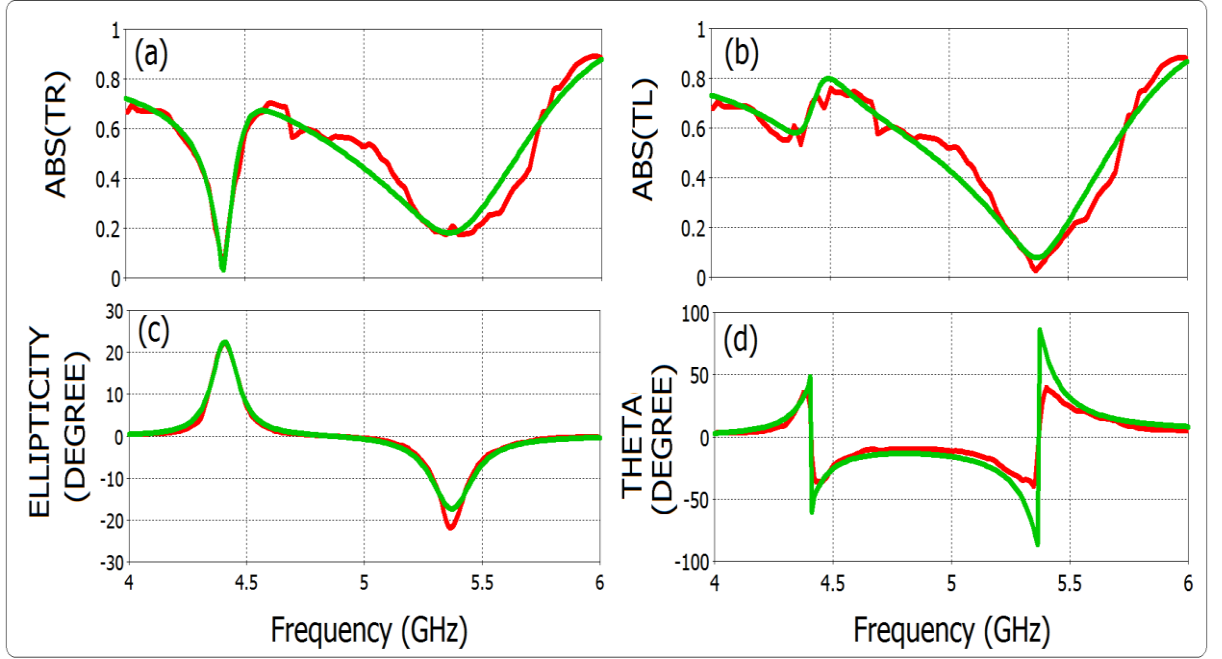
Çalışmanın bu bölümünde, amaçlanan bakışimsız metamalzemenin EM özellikleri nümerik ve deneysel olarak ayrıntılı şekilde incelenmiş ve analiz edilmiştir. Amaçlanan tasarım basit, kolay konfigüre edilebilir ve esnek özelliklere sahiptir. Mikrodalga frekans bölgesinde geniş optiksel aktivasyon ve dairesel döndürme sağladığı gibi diğer frekans bölgelerinde de verimli olarak çalışabilir. Elde edilen deneysel sonuçlar nümerik sonuçlar ile çok iyi örtüşmektedir. Ayrıca amaçlanan yapı, dairesel döndürme ve optiksel aktivasyonun önemli olduğu polarizasyon döndürücü ve EM filtreler için uygulama potansiyeli teşkil etmektedir.

4.1.2. Çift Tabakalı Aralıklı Kare Şekil Tabanlı Rezonatör

Bu çalışmada Şekil 3.2'deki bakışimsız metamalzeme materyali kullanılmıştır. Şekil 4.6(a-e)'de $Abs(T_L)$, $Abs(T_R)$, dairesel döndürme ve teta katsayıları için nümerik ve deneysel sonuçlar gösterilmektedir. Sonuçlardan da anlaşıldığı üzere deneysel sonuçlar nümerik sonuçlar ile çok iyi örtüşmektedir. İletim spektrumunda iki rezonans vardır. İlk rezonans değeri 4.41 GHz , ikinci rezonans değeri ise 5.36 GHz frekansındadır. İlk rezonans değeri ikincisine göre biraz daha küçüktür.

Rezonans değerlerinde, sağ ve sol elli dairesel polarize olmuş dalgalar arasında önemli fark görülmektedir. Bu durum dairesel döndürme olarak adlandırılmaktadır ve

iletileen dalgalar için $\eta = 1/2 \tan^{-1} \left(\frac{|T_{++}|^2 - |T_{--}|^2}{|T_{++}|^2 + |T_{--}|^2} \right)$ formülü ile hesaplanır. Ek olarak fazlar arasındaki fark da teta açısı ile ifade ediliyor olup $\theta = \frac{1}{2} \delta = \frac{1}{2} [\arg(T_{++}) - \arg(T_{--})]$ formülü ile hesaplanır (Wang ve ark. 2009b, Wang ve ark. 2009c, Li ve ark. 2009).

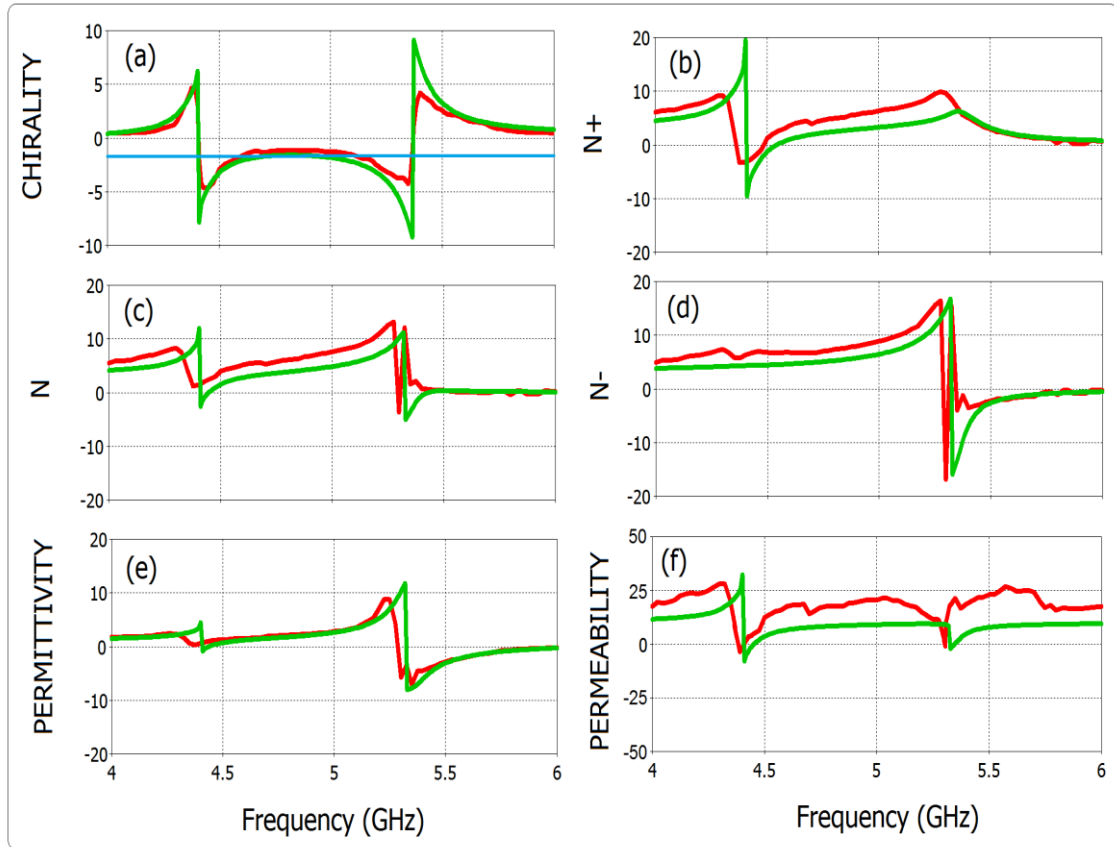


Şekil 4.6. (a) ve (b) nümerik ve deneysel $Abs(T_L)$ ve $Abs(T_R)$ sonuçları, (c) ve (d) dairesel döndürme ve teta açısı değeri sonuçları olup kırmızı renkli çizgi ölçüm değerini ifade ederken yeşil renkli çizgi de nümerik sonuç değerini temsil etmektedir.

Bu çalışmada, etkin ortam parametreleri, iletim ve yansıma katsayıları kullanılarak (retrieval) elde edilmiştir. Bakışsızlık parametresi de, κ , aynı yolla elde edilmekte olup iletim parametrelerinden doğrudan $Re(\xi) = [\arg(T_+) - \arg(T_-) + 2m\pi]/(2k_0d)$ formülü ile hesaplanabilir. Burada k_0 , boşluktaki dalga vektörünü ifade ederken d , yapının kalınlığını ve m sabir bir tam sayıyı ifade etmektedir. Bu çalışmada dielektrik yapı kalınlığı 1.6 mm olarak ele alınmıştır. T_+ ve T_- değerleri $-\pi < \arg(T_+) - \arg(T_-) + 2m\pi < \pi$ aralığında sınırlandırılmıştır. Bakışsızlık değeri simülasyon ve deneysel sonuçları sırasıyla $f = 4.41 \text{ GHz}$ rezonans frekans değeri için $\kappa = 7.84 - 4.68$ olarak bulunmuştur. Diğer rezonans frekansı $f = 5.36 \text{ GHz}$ için ise

simülasyon ve deneysel sonuçları sırasıyla $\kappa = 9.24 - 4.25$ olarak bulunmuştur. Nümerik ve deneysel sonuçlar arasındaki küçük farklılıklar deneysel şartlardan kaynaklanmaktadır. Ölçüm ve üretim şartlarının iyileştirilmesi ile bu farklılık giderilebilir ve ihmal edilebilir durumdadır.

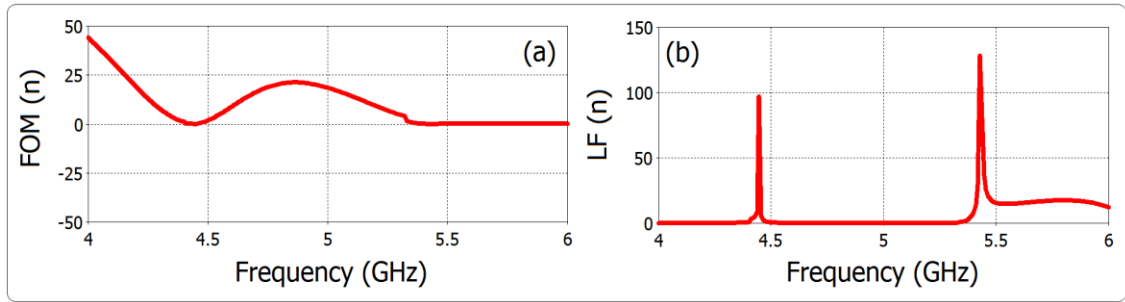
Şekil 4.7(a)'da bakışimsızlık değeri, 4.7(c)'de ise 4.7(b) ve 4.7(d)'den elde edilen ortalama negatif kırılma indis değeri, $n = (n_L + n_R)/2$ gösterilmektedir. Geleneksel parametrelerin elde edilme metodu kullanılarak da empedans, z , kolayca elde edilebilir. Daha sonra da diğer dielektrik, $\epsilon = n/z$, ve magnetik geçirgenlik, $\mu = nz$, parametre değerleri bulunur (Şekil 4.7(e) ve Şekil 4.7(f)).



Şekil 4.7. (a) chirality (κ), (b) n_+ , (c) n , (d) n_- , (e) ϵ , and (f) μ değerleri için nümerik ve ölçüm değerleri. Kırmızı çizgiler ölçüm değerlerini temsil ederken yeşil çizgiler de nümerik sonuçlarını temsil etmektedir.

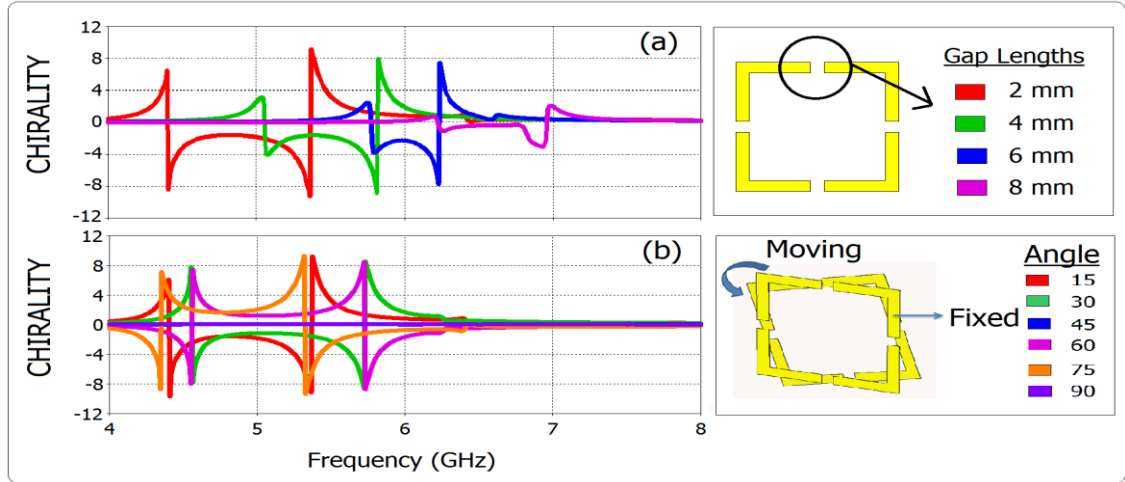
Dielektrik ve magnetik ortamdaki kayıplar dielektrik ve magnetik geçirgenlik katsayılarının sanal partlarının reel partlara bölümü olarak ifade edilmektedir. Bundan

dolayı herhangi bir ortam göz önünde bulundurulduğunda kayıp hesaplamaları için her iki malzeme parametresi de hesaba katılmalıdır. Bakışsız metalmalzemeler ile kayıp faktörlerinin iletim özellikleri ayrıntılı olarak ele alınmıştır (Panpradit ve ark. 2012). Kayıp faktörü $LF = |n''/n'|$ formülü ile hesaplanabilir. Burada n' kırılma indisinin reel partını, n'' ise imajinary partını temsil etmektedir. Ek olarak, FR4-dielektrikte meydana gelen kayıplardan dolayı FOM hesabı da yapılmıştır. FOM, $-Re(n)/Im(n)$ formülü ile hesaplanabilir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde çok küçük FOM değeri elde edilmiş olup kayıp değeri çok düşüktür (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Ortamın (a), $FOM(n)$ ve (b), $LF(n)$ için nümerik değerleri

Diğer bir araştırma da, amaçlanan rezonatörün ölçü değerlerinin değişiminin etkilerinin bakışsızlık değeri üstündeki değişimi ayrıntılı olarak analiz edilmiştir (Şekil 4.9). Elde edilen sonuçlar amaçlanan bakışsız metalmalzemenin mekanik ayarlanabilirlik, kolay konfigüre edilebilir ve esnek özelliklere sahip olduğunun göstergesidir. Amaçlanan yapı aralıklı kare şeklinde rezonatör ve FR4-dielektriğin arkasında aynı rezonatörün 15° döndürülmesinden oluşmaktadır. Bu esnek yapı rezonans frekansının kaymasını ve büyük bakışsızlık değerinin elde edilmesini sağlamıştır. Bu parametrik çalışma için aralık mesafesi 2 mm 'den 8 mm 'ye kadar arttırılmış ve arkadaki rezonatör 15 dereceden 90 dereceye kadar döndürülmüştür. Elde edilen sonuçlardan da anlaşılacağı üzere amaçlanan esnek yapı mekanik ayarlanabilirlik özelliklerine sahiptir. Yapının bu özelliği sayesinde frekans değeri istenildiği şekilde kaydırılabilmektedir.

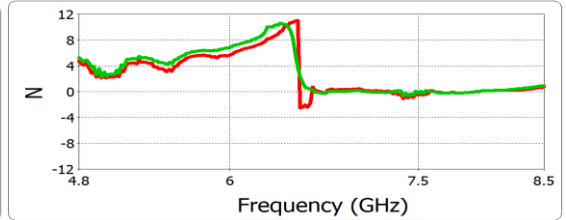
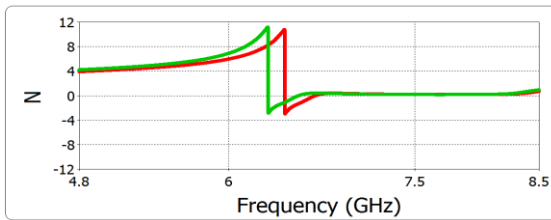
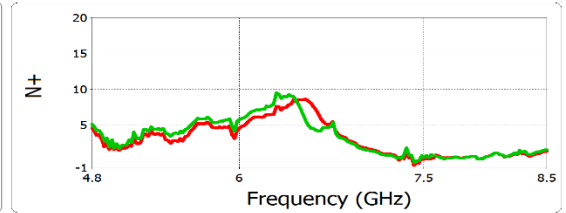
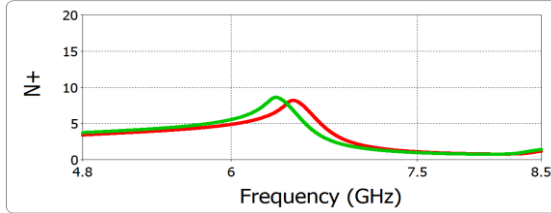
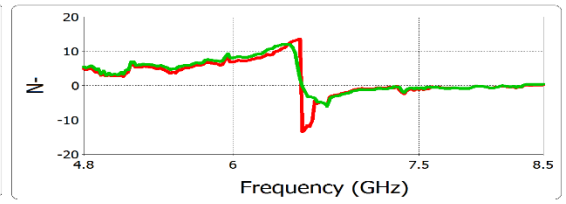
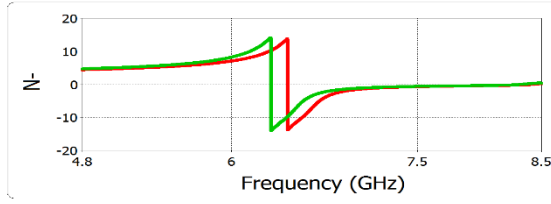


Şekil 4.9. Bakışimsızlık değeri için parametrik çalışma, (a) aralık uzunluğuna göre, (b) arka rezonatörün açısına göre

Çalışmanın bu bölümünde, amaçlanan bakışsız metamatzemenin EM özellikleri nümerik ve deneysel olarak ayrıntılı şekilde incelenmiş ve analiz edilmiştir. Amaçlanan tasarım basit, kolay konfigüre edilebilir ve esnek özelliklere sahiptir. Yapılan parametrik çalışma ile de yapının bu özelliği açıkça gösterilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar nümerik sonuçlar ile çok iyi örtüşmektedir. Ayrıca amaçlanan yapı dairesel döndürme ve optiksel aktivasyonun önemli olduğu polarizasyon döndürücü ve EM filtreler için uygulama potansiyeli teşkil etmektedir.

4.1.3. Çift Tabakalı Gammadion Çapraz Yıldız Şekil Tabanlı Rezonatör

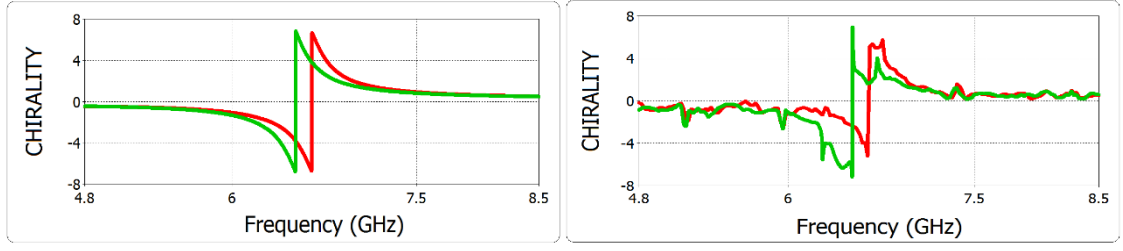
Bu çalışmada Şekil 3.3'teki bakışsız metamatzeme materyalleri kullanılmıştır. Negatif kırılma indisini göstermek için parametrelerin geri elde edilmesi metodu kullanılarak elde edilen nümerik (Şekil 4.10) ve deneysel sonuçlar (Şekil 4.11) elde edilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla sağ elli ve sol elli dairesel polarizasyon için kırılma indisleri ve toplam ortalama kırılma indisi değerleri üretilen her iki yapı için sunulmuştur. Sağ taraf nümerik çalışma ile elde sonuçları karşılaştırmak için deneysel sonuçları göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere kırılma indisi değeri rezonans frekansında sağ elli ve sol elli dalgalar için hassas bir cevap değerine sahiptir. Elde edilen deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlar birbiri ile çok iyi örtüşmektedir.



Şekil 4.10. Kırılma indisi değerleri, nümerik sonuçlar. Kırmızı çizgi $d = 0.40 \text{ mm}$ olan yapıyı temsil ederken, yeşil çizgiler $d = 0.70 \text{ mm}$ olan yapıyı ifade etmektedir.

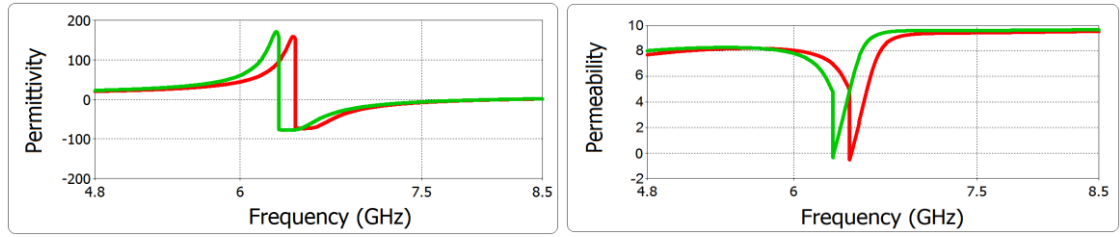
Şekil 4.11. Kırılma indisi değerleri, deneysel sonuçlar. Kırmızı çizgi $d = 0.40 \text{ mm}$ olan yapıyı temsil ederken, yeşil çizgiler $d = 0.70 \text{ mm}$ olan yapıyı ifade etmektedir.

Etkin ortam parametrelerin geri elde edilmesi iletim ve yansıma katsayısı parametrelerinden elde edilmiştir. Bakışimsızlık parametresi de, κ , aynı yolla elde edilmekte olup iletim parametrelerinden direkt olarak $Re(\xi) = [\arg(T_+) - \arg(T_-) + 2m\pi]/(2k_0d)$ formülü ile hesaplanabilir (Şekil 4.12). Burada k_0 , boşluğun dalga vektörünü ifade ederken d , yapının kalınlığını ve m bir tam sayı değerini ifade etmektedir. Bu çalışmada dielektrik yapı kalınlığı 1.6 mm olarak ele alınmıştır. T_+ ve T_- değerleri $-\pi < \arg(T_+) - \arg(T_-) + 2m\pi < \pi$ aralığında sınırlandırılmıştır.

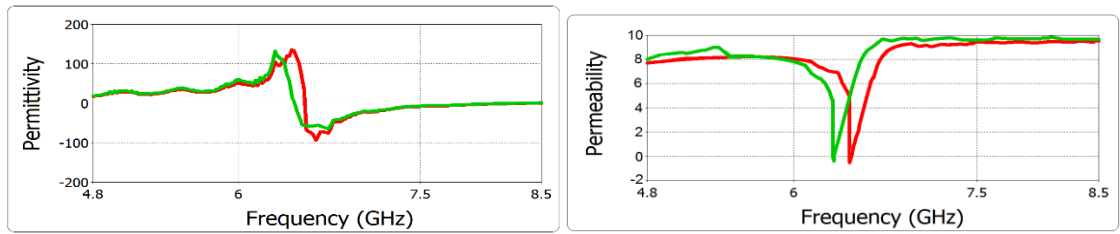


Şekil 4.12. Bakışimsızlık değerleri, nümerik ve deneysel sonuçlar. Kırmızı çizgi $d = 0.40 \text{ mm}$ olan yapıyı temsil ederken, yeşil çizgiler $d = 0.70 \text{ mm}$ olan yapıyı ifade etmektedir.

Geleneksel parametrelerin elde edilme metodu kullanılarak da empedans, z , kolayca elde edilebilir. Daha sonra da diğer dielektrik, $\varepsilon = n/z$, ve mağnetik geçirgenlik, $\mu = nz$, parametre değerleri elde edilebilir (Şekil 4.13 ve 4.14).



Şekil 4.13. Elektriksel ve mağnetik geçirgenlik değerleri. Nümerik sonuçlar. Kırmızı çizgi $d = 0.40 \text{ mm}$ olan yapıyı temsil ederken, yeşil çizgiler $d = 0.70 \text{ mm}$ olan yapıyı ifade etmektedir.



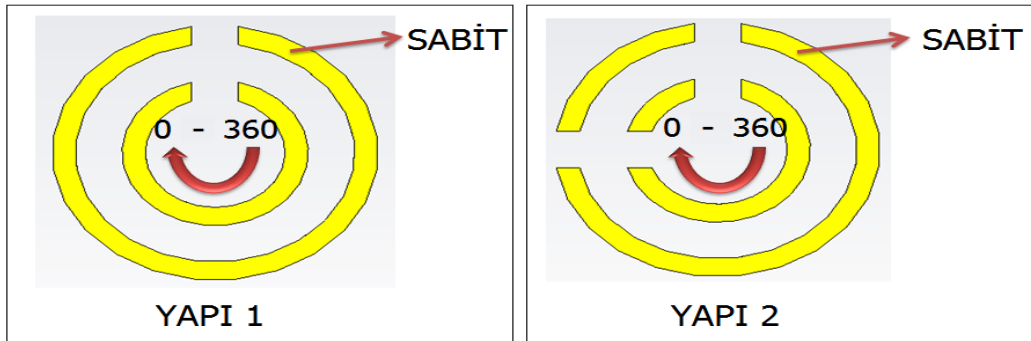
Şekil 4.14. Elektriksel ve mağnetik geçirgenlik değerleri. Deneysel sonuçlar. Kırmızı çizgi $d = 0.40 \text{ mm}$ olan yapıyı temsil ederken, yeşil çizgiler $d = 0.70 \text{ mm}$ olan yapıyı ifade etmektedir.

4.2. Küçük Bakışsızlık Parametre Değerine Sahip Yeni Jenerasyon Bakışsız Metamalzemeler

4.2.1. Daire Şekil Tabanlı Ayrık Halka Rezonatör

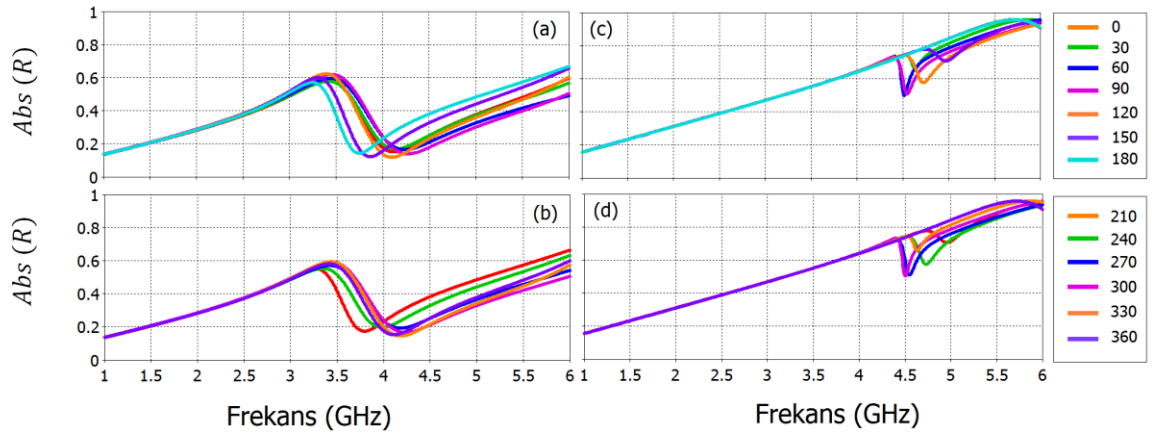
Bu çalışmada Şekil 3.4 ve 3.5'teki bakışsız metamalzeme yapıları kullanılarak küçük bakışsızlık parametre değerine sahip yeni jenerasyon bakışsız metamalzeme elde etmek için nümerik olarak tasarım ve uygulama yapılmıştır. Daha sonra, S-parametrelerinden iletim ve yansıma katsayıları bulunmuştur. Benzer hesaplamalar deneysel çalışma için de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Deneysel olarak kompleks S-parametrelerinin ölçülmesi ile yeni jenerasyon bakışsız metamalzemelerin davranışları ve karakterizasyonları doğrulanmıştır.

Tasarlanan rezoantörler dielektrik alttaşı malzemesi üzerine yerleştirilmiştir. Yapı daire şekil tabanlı çift ayrık halka rezonatör içermektedir. Bu rezonatör şekiller küçük bakışsızlık parametre değerine sahip yeni jenerasyon bakışsız metamalzeme elde edebilmek için tasarlanmış ve oluşturulmuştur. Çünkü ayrık halka rezonatörler metamalzemelerin özelliklerinin gösterilmesinde önemli rol oynamaktadır. Farklı yarıçap değerlerine sahip iç içe geçmiş iki farklı ayrık halka rezonatör vardır. Aslında, yapı 2, aralıklarının sayısının artırılması ile yapı 1'den uyarlanmış ve oluşturulmuştur. Böylece devrenin kapasitif etkisi arttırılmıştır. Bu etki rezonans genliklerinin arttırılması ile sağlanmıştır. Ek olarak, her iki tasarlanan geometride içteki daireler 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmüştür. İletim ve yansıma katsayıları üzerindeki bu değişimlerin etkileri ayrı ayrı değerlendirilmiş ve incelenmiştir. Tasarlanan çift ayrık halka rezonatörlerin şematik gösterimi Şekil 4.15 ve 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.15. Tasarlanan çift ayrık halka Şekil 4.16. Tasarlanan çift ayrık halka rezonatörlerin şematik gösterimi-yapı 1 rezonatörlerin şematik gösterimi-yapı 2

İki farklı ayırık halka rezonatörlü bakışimsız metamatzemelerin yansıma katsayılarının nümerik sonuçları Şekil 4.17’de sunulmuştur. İkinci geometri için periyodik olarak düzenlenen yapılar 4 GHz frekans civarlarında tam olarak yansıma göstermemektedir (Şekil. 4.17(a, b)). Elde edilen bu sonuç bu frekans değerinde yapının frekans seçici yüzeyler (Tennant ve Chambers 2004) gibi davranmadığını göstermektedir. Hâlbuki birinci ve ikinci geometri için içteki ayırık halka rezonatörlerin dönmesi ile minimum ve maksimum yansıma değerlerinin frekanslarının sola doğru kaymalarına rağmen, yansımanın genlik değeri belirgin bir şekilde değişmemektedir. Bununla beraber, birinci yapının yansıma genlik ve frekans değeri açının döndürülmesi ile 4,5 GHz’e kadar hızlı yükselmektedir (Şekil 4.17(c, d)). Bunun anlamı, yansıma genlik ve frekans değeri arasındaki lineer bağımlılık bu tip ile sağlanabilmektedir. Ayrıca, ilk geometri için EM dalga 5,5 GHz ve 6 GHz arasında tam olarak yansımaya uğramaktadır. Fakat ikinci geometrinin yansıma genlik değeri, ilk geometriye göre bu frekans aralığında daha düşüktür.

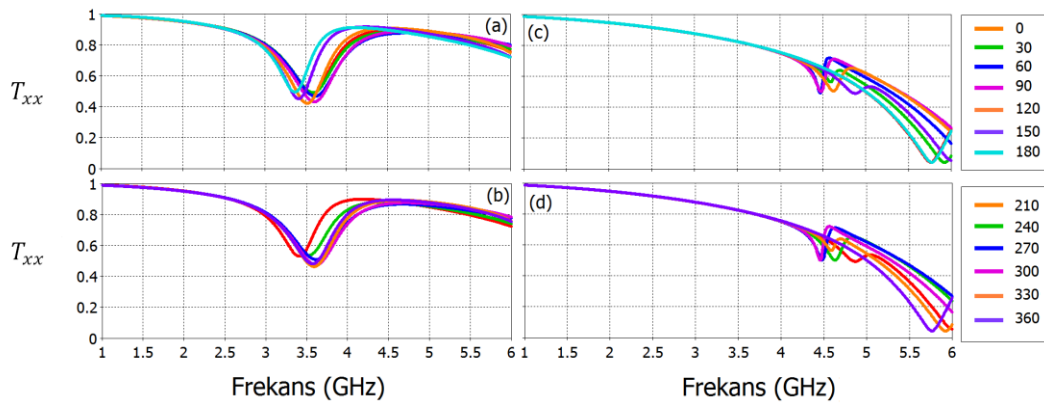


Şekil 4.17. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamatzemenin içteki rezonatörün 0^0 ’den 360^0 ’ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon yansıma katsayıları. Sol taraf geometri 2’yi, sağ taraf ise geometri 1’i temsil etmektedir.

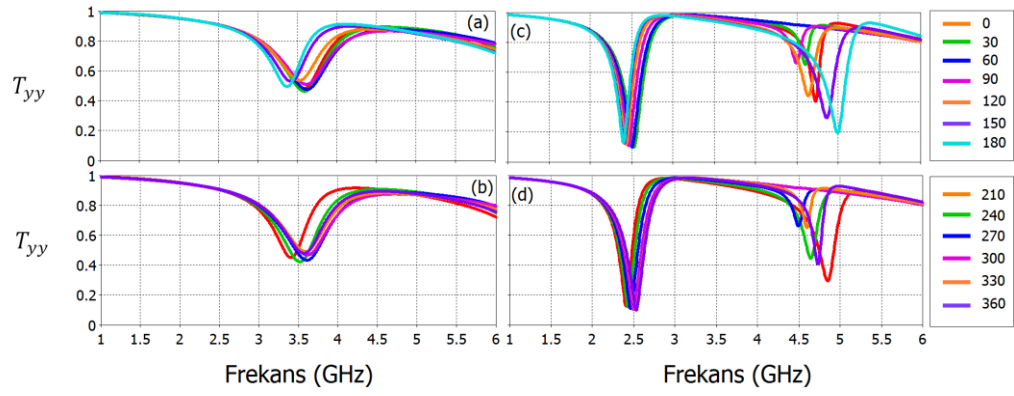
Ayrık halka rezonatörlü metamatzemelerin iki farklı geometrisi için nümerik copolar ve crosspolar iletim katsayıları (T_{xx} , T_{yy} , T_{xy} and T_{yx}) Şekil 4.18 – 4.21’de gösterilmektedir. T_{xx} ve T_{yy} copolarized iletimleri temsil ederken, T_{xy} ve T_{yx} crosspolar iletimleri ifade etmektedir. Bu değerler $t_{ij} = E_j^{out}/E_i^{in}$ formülü ile elde edilmiştir.

Burada E_i^{in} ve E_j^{out} sırasıyla gelen ve iletilen dalgaları ifade eder. Örneğin; $T_{xy} = E_y^{out}/E_x^{in}$ 'tir. Burada E_x^{in} , x- yönünde polarize olmuş elektrik alan girişini, E_y^{out} y- yönünde polarize olmuş elektrik alan iletimini tanımlar. Elektrik alanın iletilen dalgası her iki copolarized ve cross-polarized iletimler için $\mathbf{E}^{out}(\mathbf{r}, t) = [|\mathbf{E}_x^{out}| \cos(kz - \omega t), |\mathbf{E}_y^{out}| \cos(kz - \omega t + \phi)]$ olarak yazılabilir (Ye ve He 2010, Wu ve ark. 2010).

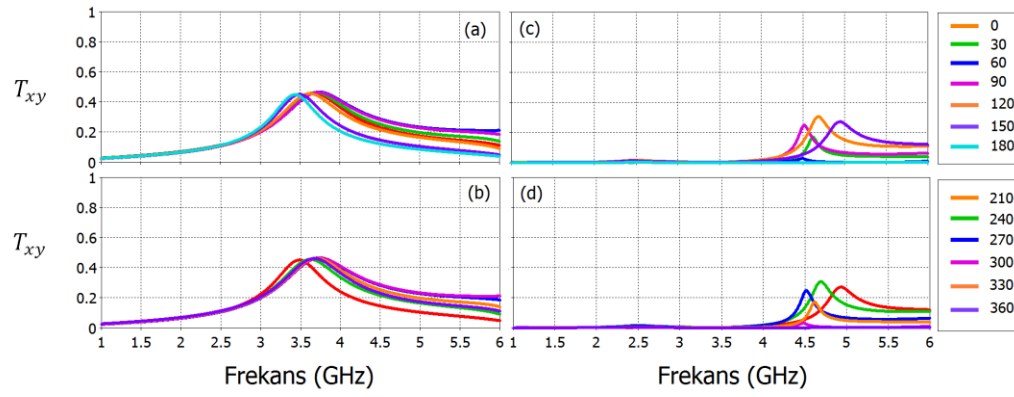
Bunlara ek olarak, elde edilen sonuçlardan anlaşılmaktadır ki; gelen dalga ikinci geometri için x- ve y- yönünde polarize olmuş her iki elektrik alanın gelen durumunda copolar ve crosspolar iletimler arasında 3,5 GHz frekans değerinde yaklaşık eşit olarak paylaşılmaktadır (Şekil. 4.18(a, b) – 4.21(a, b)). Halbuki ilk geometri tasarımındaki ayırık halka rezonatör metamalzeme 2,5 GHz frekans değerinde gelen açı bağımsız frekans seçici yüzey gibi hareket eder. EM dalga y- yönünde polarize olmuş elektrik alan için 3 GHz ve 4,5 GHz frekans değerleri arasında tam olarak iletilmektedir (Şekil 4.19(c, d)). Ayrıca 4,5 GHz ve 5 GHz frekans değerleri arasında y- yönünde polarize olmuş elektrik alan için düşük crosspolar iletim gözlemlenmektedir. Fakat, 1 GHz ve 4,3 GHz frekans değerleri arasında crosspolar iletimler yaklaşık olarak sıfıra yakın değerdedir (Şekil 4.20(c, d), 4.21(c, d)). Her geometride x- ve y- yönünde polarize olmuş elektrik alan durumları için rezonans frekans değerlerinde içteki ayırık halka rezonatörlerin açı değerleri değiştikçe (döndürüldükçe) küçük düzenli olmayan bir frekans kayması meydana gelmektedir.



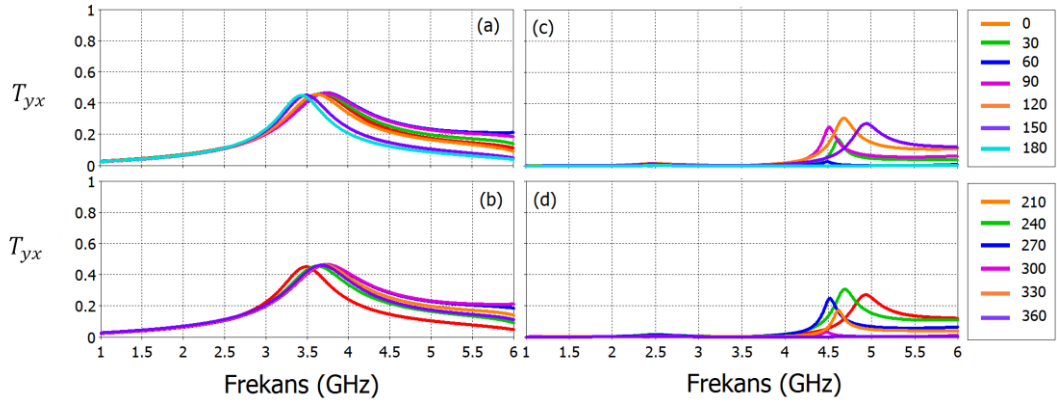
Şekil 4.18. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon T_{xx} iletim katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.



Şekil 4.19. Daire ayrık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamatzemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon T_{yy} iletim katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.



Şekil 4.20. Daire ayrık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamatzemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon T_{xy} iletim katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.



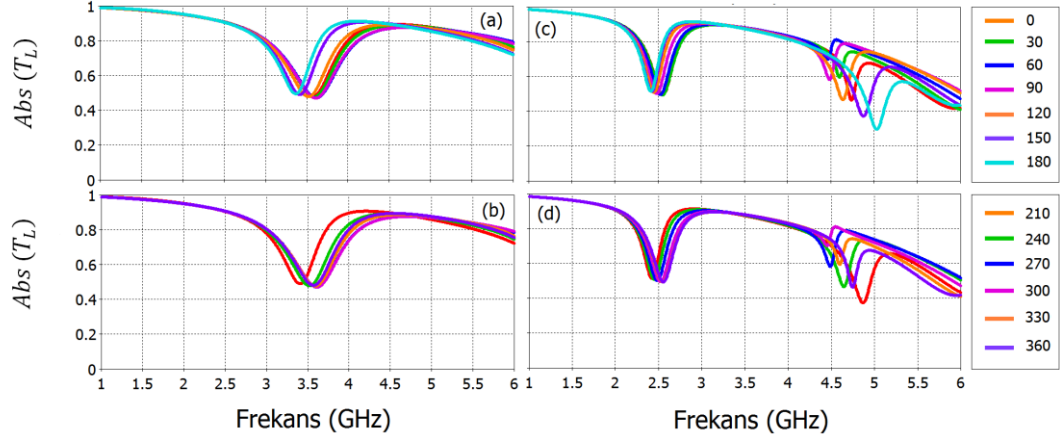
Şekil 4.21. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon T_{yx} iletim katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.

Bakışimsız metamalzemeler, bakışimsız ortam içerisinde yayılan elektrik alan ve manyetik alan arasındaki çapraz etkileşimden dolayı sol ve sağ dairesel polarizasyona sahip EM dalgalar için farklı tepkiler sağlarlar (Wang ve ark. 2009a, Wang ve ark. 2009b). İki farklı ayırık halka rezonatörlü bakışimsız metamalzemelerin dairesel iletim katsayıları RCP (T_R) ve LCP (T_L), ve yansımaları, R_R ve R_L , lineer polarizasyonlu iletim ve yansıma katsayılarından (T_{xx} , T_{yy} , T_{xy} , T_{yx} ve R) elde edilebilmektedir ($T_R = T_{II} - iT_{\perp}$, $T_L = T_{II} + iT_{\perp}$, $R_R = R_L = R$).

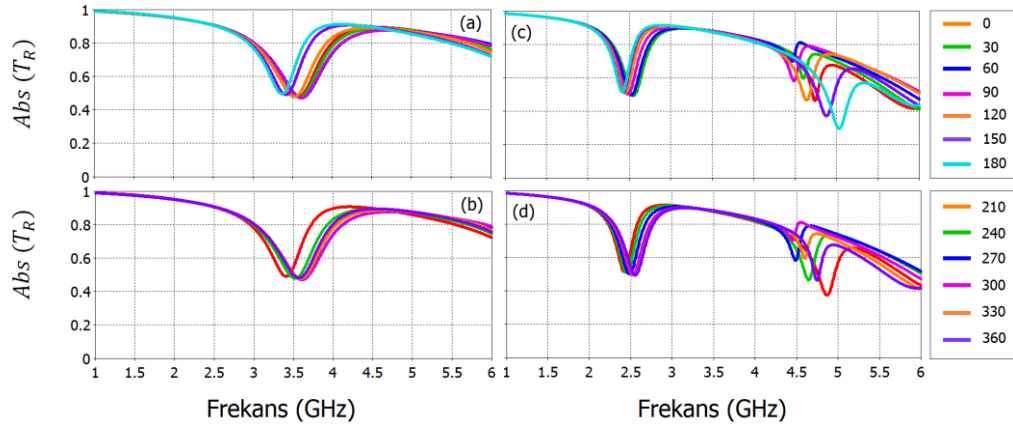
Şekil 4.22 ve 4.23'te farklı döndürme açıları için elektrik alanın dairesel polarize olmuş iletim dalgalarının simülasyon mutlak değerleri ($Abs(T_L)$ ve $Abs(T_R)$) gösterilmektedir. İletilen dalgalar ayırık halka rezonatörler sayesinde bakışimsız metamalzemelerde eigenwave fonksiyonlarıyla dairesel olarak polarize olmuşlardır. Bu arada dairesel olmayan çapraz polarize olmuş iletim komponentleri gözlemlenmiştir (LCP'den RCP'ye ve RCP'den LCP'ye).

Ayrıca ikinci geometride 3,5 GHz frekans değeri civarlarında $Abs(T_L)$ ve $Abs(T_R)$ için rezonans gözlemlenmiştir. (Şekil 4.22(a, b) ve 4.23(a, b)). Halbuki, ilk geometrideki ayırık halka rezonatörlü metamalzeme 2,5 GHz ve 4,7 GHz iki farklı frekansta rezonans vermektedir (Şekil 4.22(c, d) ve 4.23(c, d)). Çünkü crosspolar iletimler çok düşüktür, y- polarizasyonlu dalgalar rezonans gösterir ve x- polarizasyonlu dalgalar ilk geometri için 2,5 GHz ve 4,7 GHz frekans değerlerinde tam olarak iletilmektedir. Bu

küçük farklılık ilk geometri için iki farklı noktada dairesel polarizasyonun oluşmasını sağlamaktadır.



Şekil 4.22. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışsız metamatzemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon $Abs(T_L)$ iletim katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.



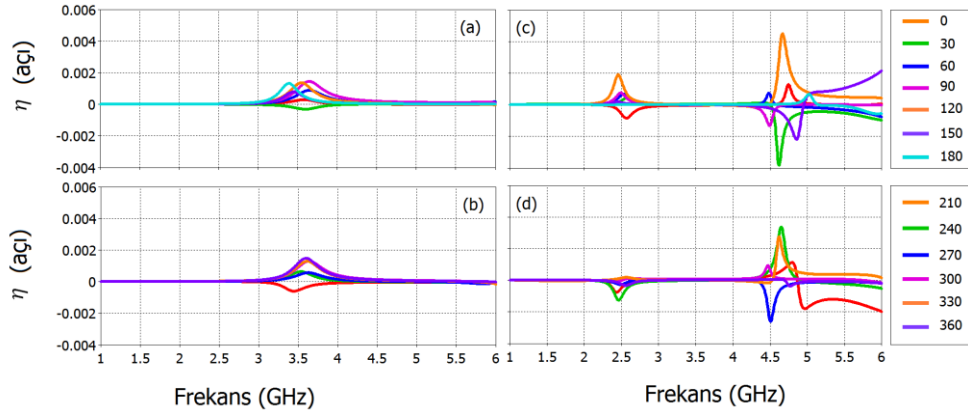
Şekil 4.23. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışsız metamatzemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon $Abs(T_R)$ iletim katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.

Rezonans değerlerinde, iletilen dalgaların RCP ve LCP komponentleri arasında çok küçük farklılıklar vardır. Bu küçük farklılık ikinci geometri için metamalzemenin küçük bakışimsızlığından dolayı TR ve TL sonuçları arasında küçük bir dairesel dichroism oluşmasını sağlamıştır. Bu mekanizma 4,75 GHz frekans değeri civarlarında ilk geometri için ihmal edilebilir durumdadır. 2,5 GHz frekans değerinde T_R ve T_L mutlak değerleri arasındaki bu küçük farklılıklar ilk geometri için doğal bakışimsız ortam gibi küçük bakışimsızlık sonucunu sağlamıştır. Böylece aynı frekans değerine küçük dairesel dichroism gözlemlenmiştir.

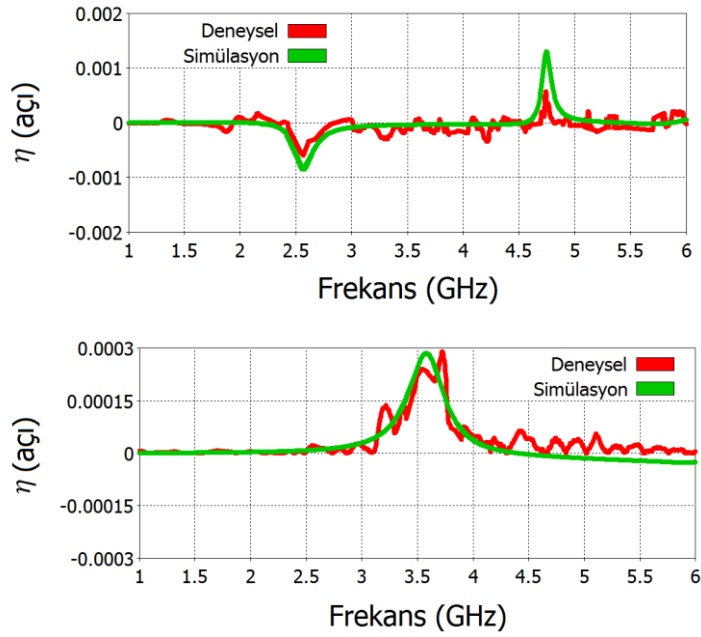
Parametrelerin geri elde edilmesi ile bakışimsız metamalzemeler için iki önemli özellik vardır. Bunlardan biri bir ortam içerisindeki yayılan polarizasyonun emilim ve distorsiyonu içerisindeki RCP ve LCP dalgalar arasındaki farklılık olarak tanımlanan dairesel dichroismdir (Wang ve ark. 2009b, Zarifi ve ark. 2012a).

Diğer ise bir ortam içerisinde yayılan lineer polarizasyonlu dalganın polarizasyon düzlemini döndürmeye yarayan optiksel aktivitedir. Bir lineer polarizasyonlu dalga, bir bakışimsız ortam içerisindeki dalgayı döndürecektir. Bu döndürme optiksel aktivite olarak adlandırılır ve eliptik polarizasyonlu dalgaların polarizasyon azimuth döndürme açısı ile karakterize edilir. Polarizasyon azimuth döndürme bakışimsız metamalzemelerde polarizasyon değişimini gösterir. Azimuth döndürme birleşik polarizasyon ve çapraz polarizasyon iletim dataları ile hesaplanır (Wang ve ark. 2009c, Zarifi ve ark. 2012a);

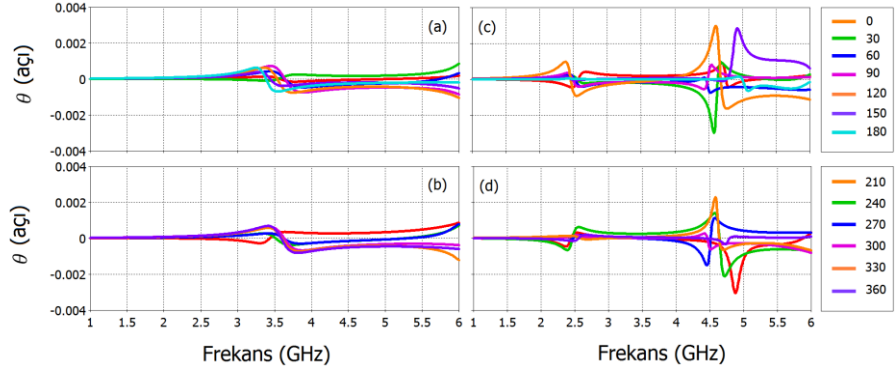
Parametrelerin geri elde edilmesi yöntemi ile elde edilen bu değerlerin nümerik ve deneysel sonuçları Şekil 4.24 – 4.27’de gösterilmektedir. Sonuçlardan görüleceği üzere simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar birbiri ile iyi derecede örtüşmektedir. İkinci geometri için 3,5 GHz rezonans frekans değerinde maksimum azimuth döndürme değeri yalnızca 0,002’dir ve eliptik değer 0,001’den daha azdır. Bunun anlamı; bir lineer polarize olmuş EM dalga zayıf bir şekilde distorsiyona uğrar ve bu rezonans frekansında dairesel polarizasyon gözlemlenir. Maksimum azimuth döndürme ve eliptik değeri ilk geometri ve ikinci geometri için sırasıyla 2,5 GHz ilk rezonans frekans değerinde 0,002 ve 0,001’dir ve 4,5 GHz rezonans frekans değeri civarlarında 0,004 ve 0,003’tür. Elde edilen tüm bu değerler doğal bakışimsız ortamın etkileri ile benzerdir. Merkezdeki halkanın döndürülmesi ile her iki azimuth ve eliptik değer lineer olmayan özellik gösterir. Hâlbuki en yüksek azimuth döndürme ve eliptik değerleri ilk geometri için 0^0 ’de gözlemlenirken, ikinci geometri için ise 90^0 ’de gözlemlenmektedir (Şekil 4.24 – 4.27).



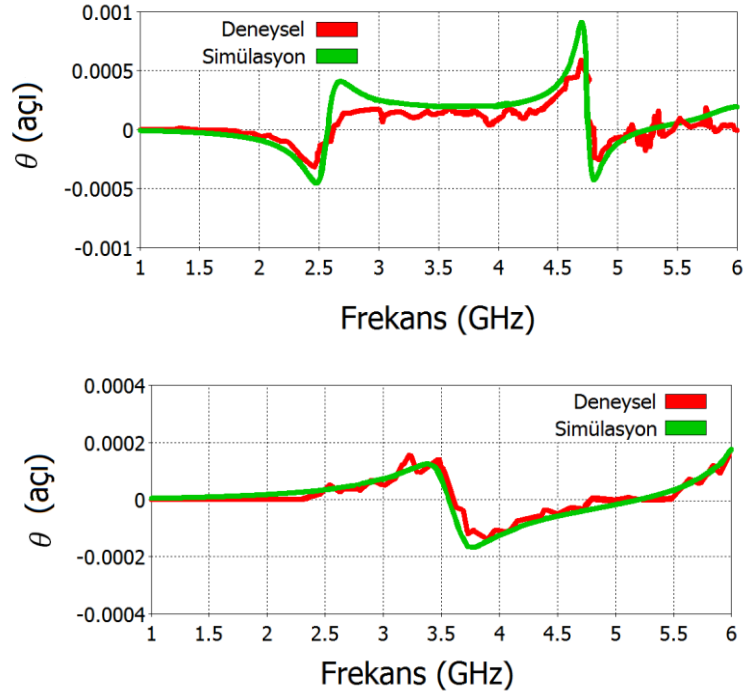
Şekil 4.24. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışsız metalmalzemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon dairesel dichroism değeri. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.



Şekil 4.25. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışsız metalmalzemenin deneysel dairesel dichroism değeri. Yukarı taraf geometri 1'i, aşağı taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.



Şekil 4.26. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışsız metamatrazemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon teta açısı değeri. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.



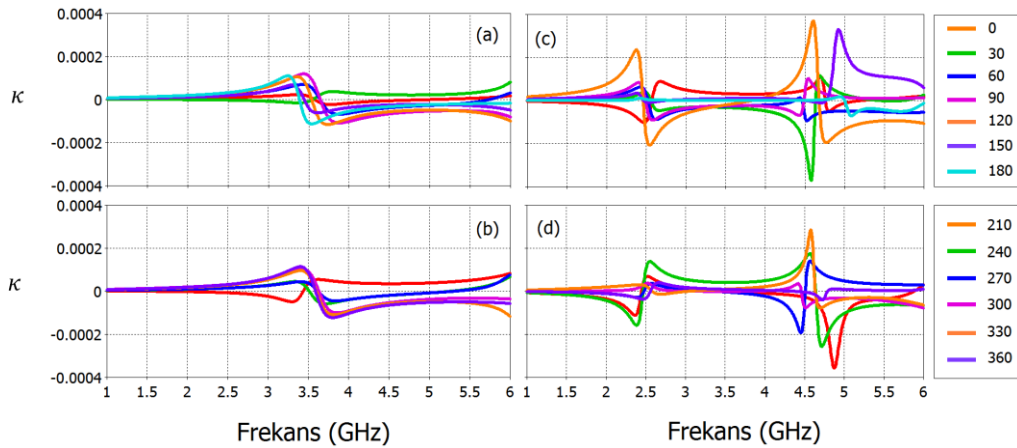
Şekil 4.27. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışsız metamatrazemenin deneysel teta açısı değeri. Yukarı taraf geometri 1'i, aşağı taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.

Parametrelerin geri elde edilmesi metodu kullanılarak bakışsızlık parametresi değerleri hesaplanmıştır. $1 - 6 \text{ GHz}$ frekans aralığında her iki ayırık halka rezonatör geometrisi için birleşik polarizasyon ve çapraz polarizasyon iletim datalarından elde

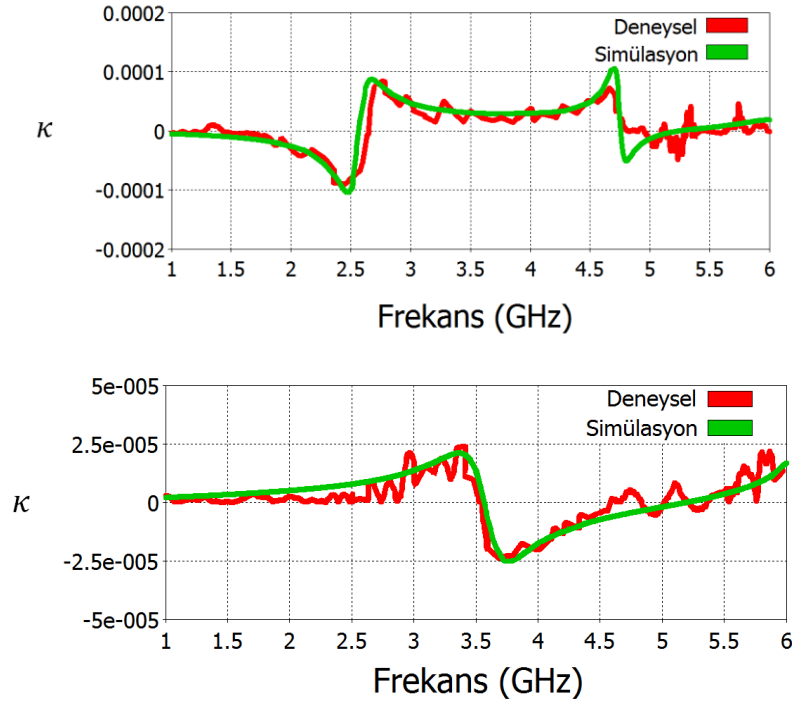
edilen nümerik ve deneysel bakışimsızlık değerleri Şekil 4.28 ve 4.29'da gösterilmektedir. Nümerik ve deneysel sonuçlar birbiri ile çok iyi örtüşmektedir.

Yaklaşık 3 GHz frekans değerine kadar ikinci yapı bakışimsız metamalzeme özelliği göstermemekte, bakışimsızlık değeri çok düşük ve sıfıra yakındır fakat yapı 3 GHz ve 4 GHz frekans aralığında bakışimsız metamalzeme özelliği gösterir ve ikinci geometri için 3,45 GHz frekans değerinde 0,00017 civarlarındadır. İçteki ayırık halka rezonatör 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürüldüğünde, bakışimsızlık değeri sola doğru kaymaktadır (Şekil 4.29(a, b)). İçteki ayırık halka rezonatörün açısının değişimi ile rezonans frekansı düzenli olmayan bir şekilde sola doğru kayar. Bu özellik yapının esnekliğinden kaynaklanmaktadır. İçteki ayırık halka rezonatörün açı değişimi ikinci geometride nonlinear bir etki göstermektedir. İlk geometri için yapıdaki aralıkların sayısı arttıkça 2,45 GHz ve 4,6 GHz iki farklı rezonans frekans değerinde bakışimsızlık değerleri elde edilir. İlk geometri için bakışimsızlık değerleri 2,45 GHz'te 0,00022 ve 4,6 GHz'te 0,00038 olarak gözlemlenmektedir (Şekil 4.29(c, d)).

İçteki ayırık halka rezonatörün açı değişimi ile rezonans frekansı nonlinear olarak değişmektedir. Bu nonlinear değişime yapının kapasitif etkisi neden olmaktadır. Bunun nedeni ilk geometri ile yapıdaki aralıkların sayısının artması kapasitif etkinin de artmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.28. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon bakışimsızlık değeri. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.



Şekil 4.29. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin deneysel bakışimsızlık değeri. Yukarı taraf geometri 1’i, aşağı taraf ise geometri 2’yi temsil etmektedir.

Özetçe çalışmanın bu bölümünde, bakışimsız metamalzemeler ile ilgili literatürdeki önceki yapılmış çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Yeni tasarımlar nümerik hesaplamalar ve deneysel ölçümler ile birlikte sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki; amaçlanan yeni jenerasyon bakışimsız metamalzemeler ile doğal bakışimsız metamalzeme elde edilmiş ve bakışimsız metamalzemeler gibi optiksel aktivite, dairesel dichroizm ve bakışimsızlık gösterdiği gözlemlenmiştir.

Ayrıca, elde edilen bakışimsız değerleri doğal bakışimsız malzemelere yakındır. Bundan dolayı bu çalışma, doğal bakışimsızlık değerleri ile elde edilen bakışimsız metamalzemeler üzerine literatürde ilk çalışmadır. Çoğu bakışimsız metamalzeme çalışması yüksek bakışimsızlık değerleri elde etmeyi amaçlamış ve göstermiştir (Baena ve ark. 2007, Wang ve ark. 2009a, Wang ve ark. 2009b, Plum ve ark. 2009a, Plum ve ark. 2009b, Li ve ark. 2011).

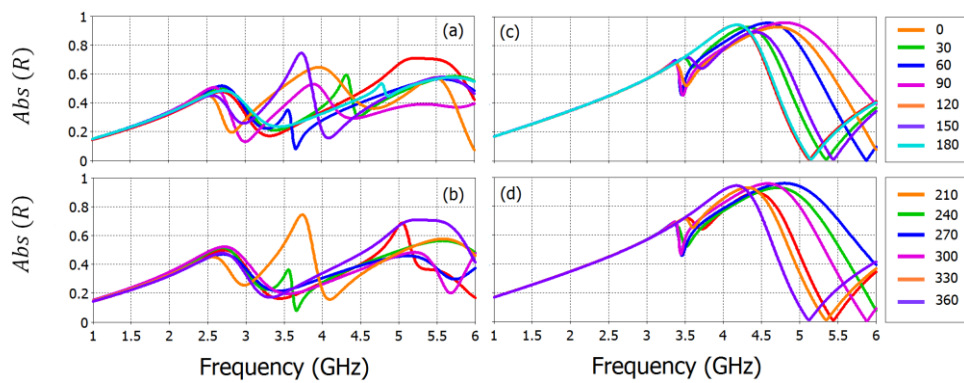
Fakat bununla beraber, bu çalışma küçük bakışimsızlık değerine sahip yeni jenerasyon bakışimsız metamalzemeler üzerine odaklanmıştır. EM dalga etkileşimi, bakışimsız metamalzeme ayırık halka rezonatörleri içerisindeki aralıklarda yapı ile

meydana gelmiştir. Çünkü yapıdaki aralıklar malzemenin kapasitans değerinin artmasını sağlamıştır.

Sonuç olarak, yeni jenerasyon bakışimsız metamalzemenin mekanizmasını göstermek için rezonans frekans değerlerindeki EM dalga etkileşimi analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki; amaçlanan yapı polarizasyon döndürme ve iletim filtresi için endüstriyel uygulamalarda kullanılmak üzere uygundur.

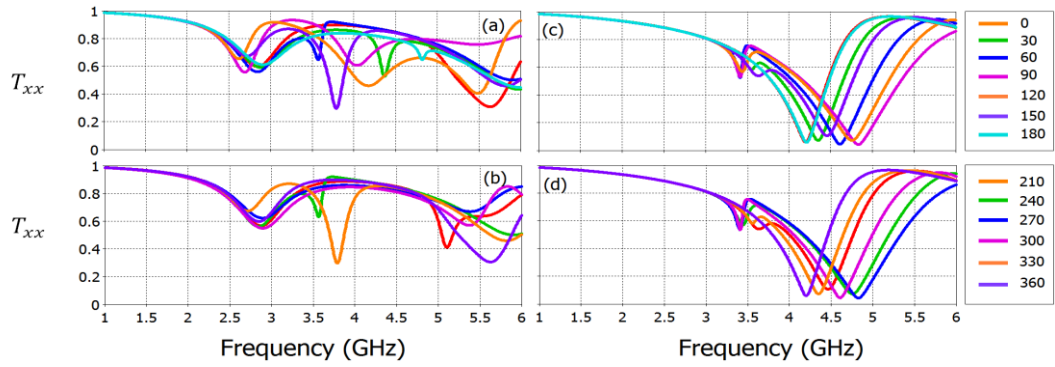
4.2.2. Dikdörtgen Şekil Tabanlı Ayrık Halka Rezonatör

Bu çalışmada Şekil 3.6'daki bakışimsız metamalzeme materyalleri kullanılmıştır. Yaygın olarak kullanılan ve üretimi kolay olan dikdörtgen şeklinde tasarlanan SRR yapısı için nümerik ve deneysel sonuçlar iki farklı yapı için elde edilmiştir (Dincer ve ark. 2014g). Yapılar küçük bakışimsızlık parametresi elde etmek için tasarlanmıştır. S-parametreleri kullanılarak, iletim ve yansıma katsayıları belirlenmiş ve üretilen yapı için kompleks S parametrelerinin ölçülmesi ile deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılar birbirinden farklı olarak iki dikdörtgen şeklinde geometri içermektedir. İçteki dikdörtgen şeklindeki yapılar 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmüştür. İki yapının birbirinden farkı; kapasitans etkisini arttırmak için aralık sayısının artırılmasıdır. Farklı geometrik yapılardaki kapasitans etkisini ve içteki dikdörtgen rezonatörün döndürülmesinin yansıma katsayı değerlerine olan etkisi Şekil 4.30'da gösterilmektedir.

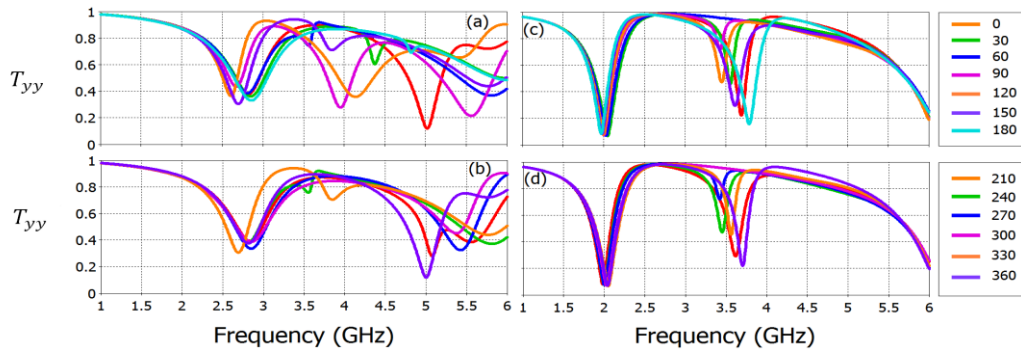


Şekil 4.30. Dikdörtgen ayrık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon yansıma katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.

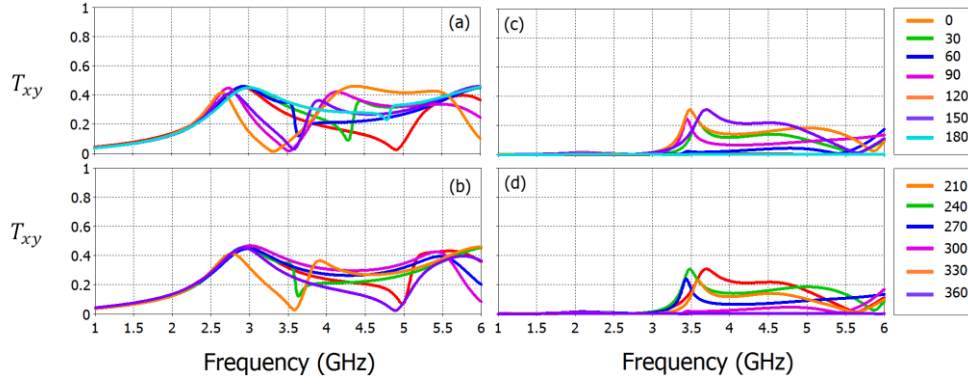
Ayrık halka rezonatörlü metamatzemelerin iki farklı geometrisi için elektrik alanın nümerik copolar ve crosspolar iletim katsayıları (T_{xx} , T_{yy} , T_{xy} and T_{yx}) Şekil 4.31 – 4.33'te gösterilmektedir. T_{xx} ve T_{yy} copolarized iletimleri temsil ederken, T_{xy} ve T_{yx} crosspolar iletimleri ifade etmektedir. Bu değerler $t_{ij} = E_j^{out}/E_i^{in}$ formülü ile elde edilmiştir. Burada E_i^{in} ve E_j^{out} sırasıyla gelen ve iletilen dalgaları ifade eder. Örneğin; $T_{xy} = E_y^{out}/E_x^{in}$ 'tir. Burada E_x^{in} , x- yönünde polarize olmuş elektrik alan girişini, E_y^{out} y- yönünde polarize olmuş elektrik alan iletimini tanımlar. Elektrik alanın iletilen dalgası her iki copolarized ve cross-polarized iletimler için $\mathbf{E}^{out}(\mathbf{r}, t) = [|\mathbf{E}_x^{out}| \cos(kz - \omega t), |\mathbf{E}_y^{out}| \cos(kz - \omega t + \phi)]$ olarak yazılabilir (Ye ve He 2010, Wu ve ark. 2010).



Şekil 4.31. Dikdörtgen ayrık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamatzemenin içteki rezonatörün 0° 'den 360° 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon T_{xx} iletim katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.

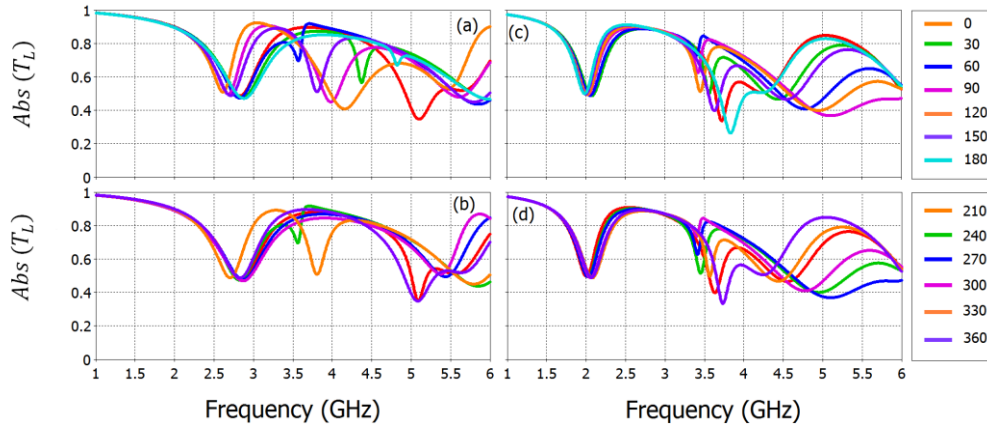


Şekil 4.32. Dikdörtgen ayrık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamatzemenin içteki rezonatörün 0° 'den 360° 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon T_{yy} iletim katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.

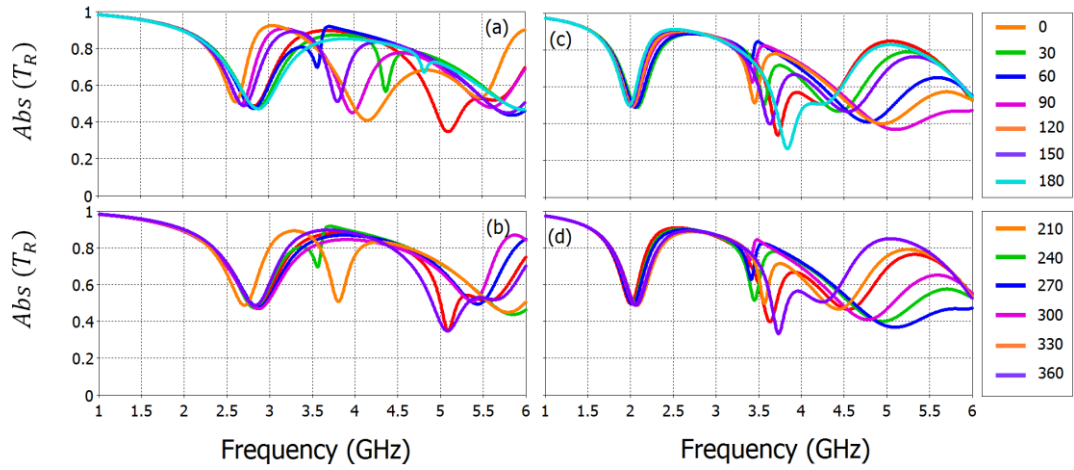


Şekil 4.33. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metalmalzemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon T_{xy} iletim katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.

Bakışimsız metalmalzemesler, bakışimsız ortam içerisinde yayılan elektrik alan ve manyetik alan arasındaki çapraz etkileşimden dolayı sol dairesel polarizasyon ve sağ dairesel polarizasyona sahip EM dalgalar için farklı tepkiler sağlar. Bu davranışları incelemek için iki bakışimsız metalmalzeme yapılarının dairesel iletim katsayıları RCP (T_R) ve LCP (T_L) detaylı olarak incelenmiştir. Bu parametreler, R_R ve R_L , lineer polarizasyonlu iletim ve yansımaya katsayılarından (T_{xx} , T_{yy} , T_{xy} , T_{yx} ve R) elde edilmektedir. Şekil 4.34 ve 4.35'te RCP (T_R) ve LCP (T_L) sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 4.34. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metalmalzemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon $Abs(T_L)$ iletim katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.

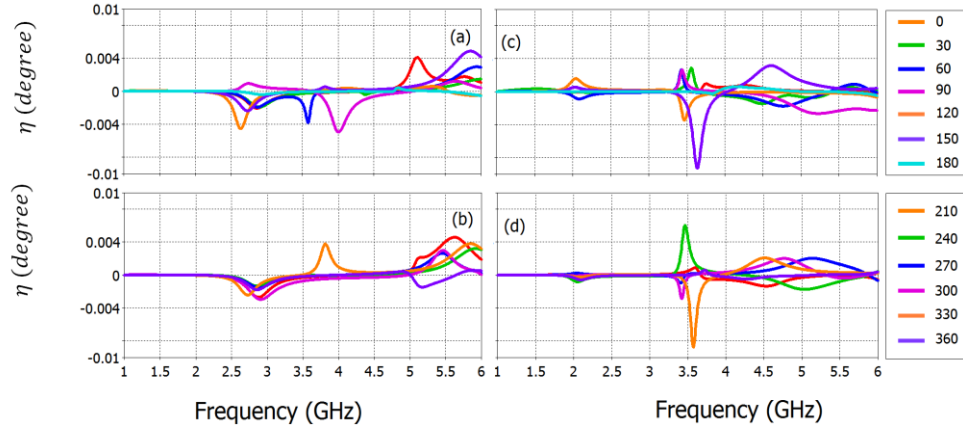


Şekil 4.35. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon $Abs(T_R)$ iletim katsayıları. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.

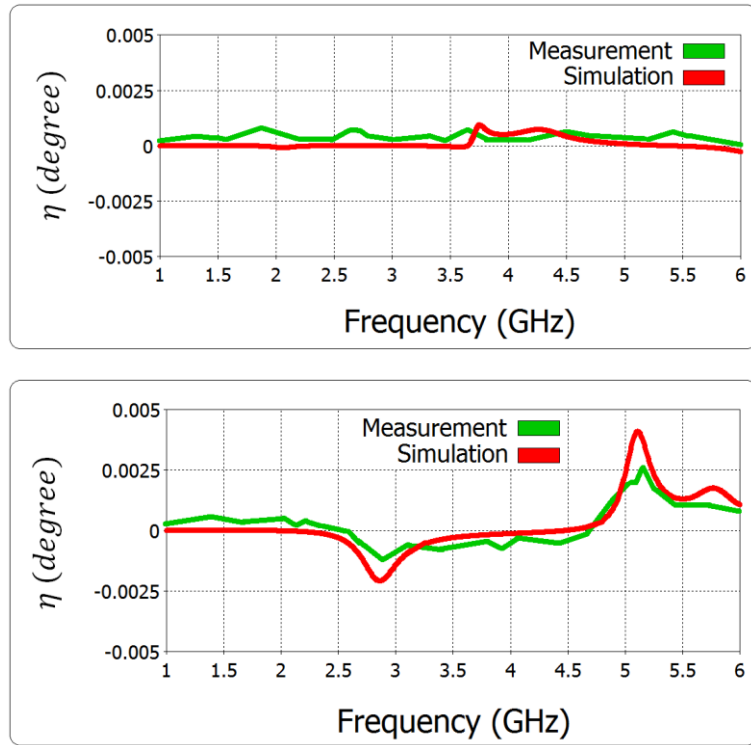
Bakışimsız metamalzeme dairesel döndürme ve optiksel aktivite olan iki diğer önemli özelliğe daha sahiptir. Dairesel döndürme genel itibariyle ortam içerisindeki RCP and LCP dalgaların emilim ve dağılım arasındaki fark olarak ifade edilir.

Optiksel aktivite için ise lineer polarize olmuş dalgaların polarizasyon düzleminin döndürme yeteneği olarak ifade edilebilir. Bu eliptik olarak polarize olmuş dalgalar için polarizasyon azimut döndürme açısı olarak incelenebilir. Döndürme açısı co-polarizasyon ve cross-polarizasyon iletim parametreleri kullanılarak hesaplanır.

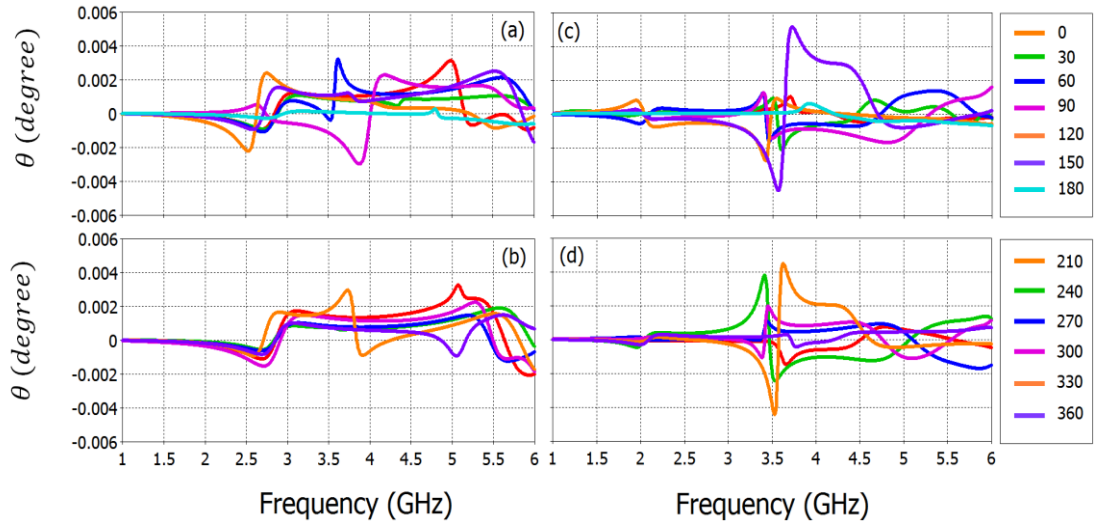
Elde edilen nümerik ve deneysel sonuçlar Şekil 4.36-4.39'da gösterilmektedir. Şekillerden de görüleceği üzere nümerik ve deneysel sonuçlar birbiri ile çok iyi uyumludur.



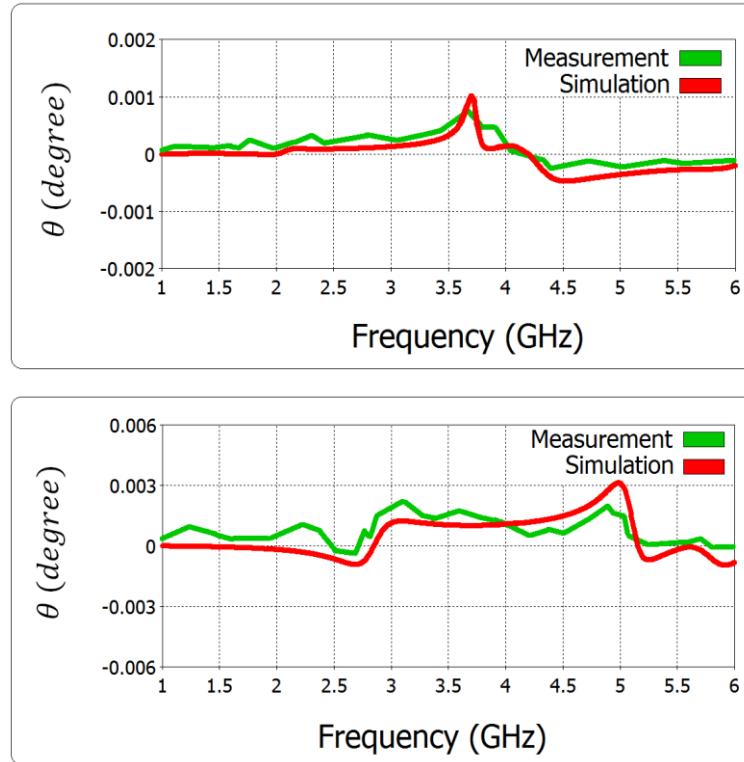
Şekil 4.36. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metalmalzemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon dairesel dichroism değeri. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.



Şekil 4.37. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metalmalzemenin deneysel dairesel dichroism değeri. Yukarı taraf geometri 1'i, aşağı taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.

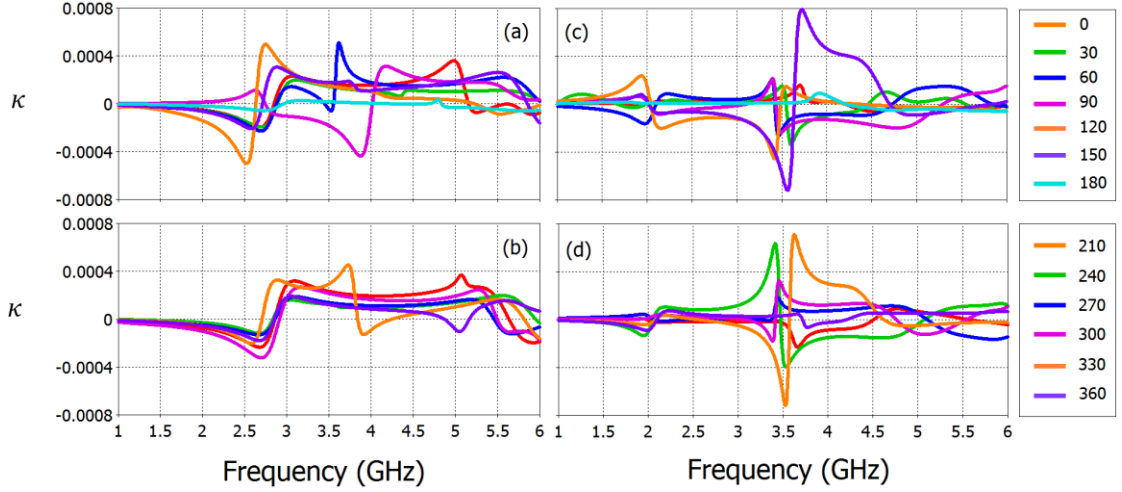


Şekil 4.38. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamatlamzemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon teta açısı değeri. Sol taraf geometri 2'yi, sağ taraf ise geometri 1'i temsil etmektedir.

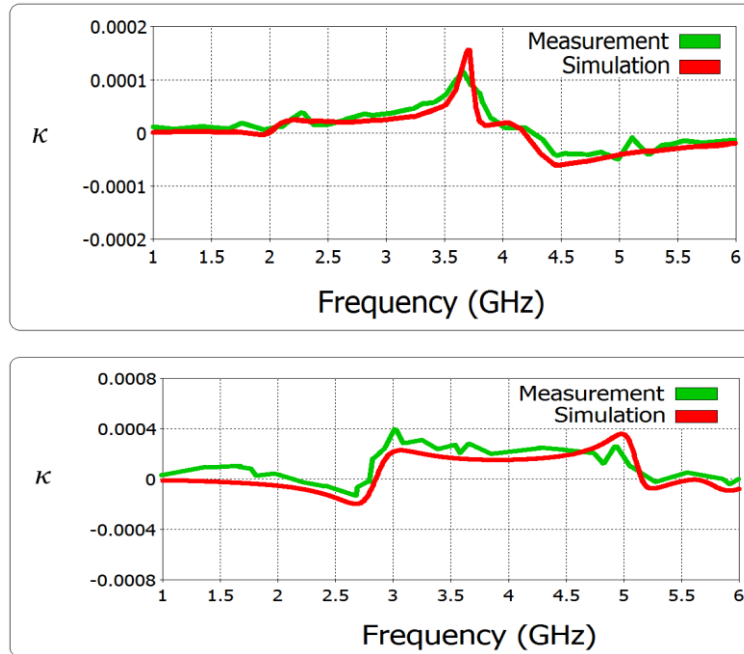


Şekil 4.39. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamatlamzemenin deneysel teta açısı değeri. Yukarı taraf geometri 1'i, aşağı taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.

Her iki yapıda bakışimsızlık parametresi için nümerik ve deneysel sonuçlar Şekil 4.40 ve 4.41’de gösterilmiştir.



Şekil 4.40. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamatizemenin içteki rezonatörün 0^0 ’den 360^0 ’ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon bakışimsızlık değeri. Sol taraf geometri 2’yi, sağ taraf ise geometri 1’i temsil etmektedir.



Şekil 4.41. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamatizemenin deneysel bakışimsızlık değeri. Yukarı taraf geometri 1’i, aşağı taraf ise geometri 2’yi temsil etmektedir.

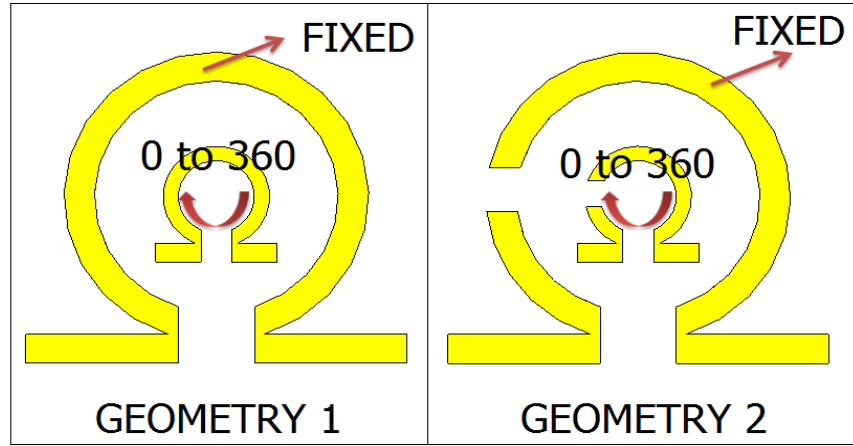
Bu çalışmada, yeni dikdörtgen bakışsız metamatizeme yapıları tasarlanmıştır. Nümerik ve deneysel sonuçlar elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Görüleceği üzere, bir doğal bakışsız metamatizeme elde edilmiş ve optiksel aktivite, dairesel döndürme ve bakışsızlık gibi çoğu parametrik değerler incelenmiştir. Amaçlanan yapı kolay konfigüre edilebilir bir özelliğe sahip olduğundan dolayı istenilen potansiyel uygulamalar için parametreleri değiştirilerek ayarlanabilir. Sonuç olarak sunulan yapı polarizasyon dönüşümü ve iletim filtresi gibi çeşitli uygulamalar için verimli olarak kullanılabilir.

4.2.3. Omega Şekil Tabanlı Ayrık Halka Rezonatör

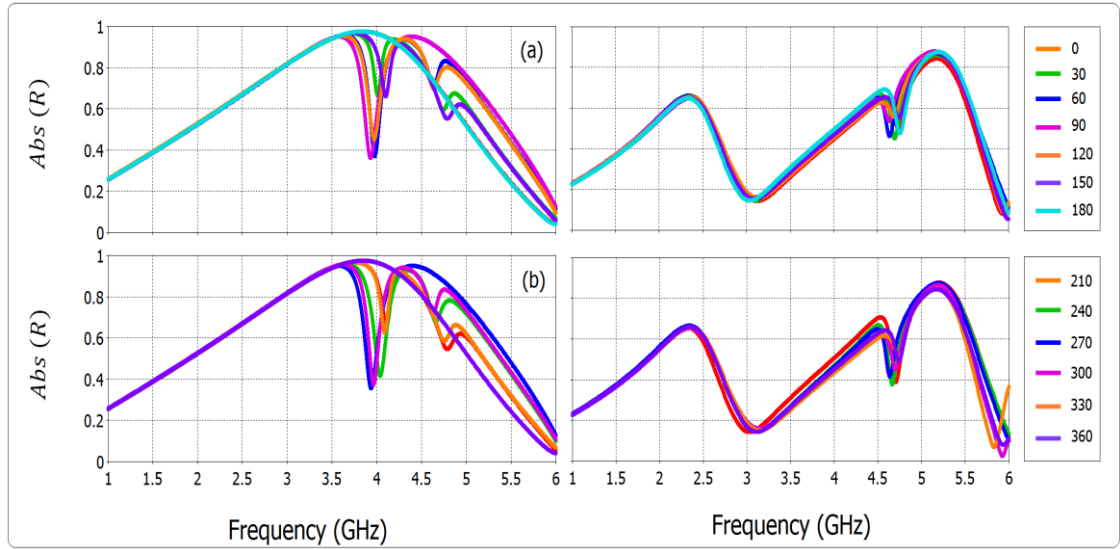
Bu çalışmada Şekil 3.7 ve 3.8'deki bakışsız metamatizeme yapıları kullanılarak küçük bakışsızlık parametre değerine sahip yeni jenerasyon bakışsız metamatizeme elde etmek için nümerik olarak tasarım ve uygulama yapılmıştır. İkinci aşama olarak, iletim ve yansıma katsayıları nümerik olarak elde edilmiştir ve deneysel olarak da kompleks S- parametrelerinin ölçülmesi ile yeni jenerasyon bakışsız metamatizemelerin davranışları ve karakterizasyonları doğrulanmıştır. Nümerik sonuçlar deneysel bulgular ile çok iyi uyum halindedir.

Şekil 4.42'deki tasarlanan yapılar dielektrik alttaşı malzemesi üzerine yerleştirilmiştir. Yapı omega şekil tabanlı çift ayrık halka rezonatör içermektedir ve küçük bakışsızlık parametresi vermesi amacı ile tasarlanmıştır. İki rezonatörün birbirinden farkı aralık sayılarıdır. Aralıkların sayısının artırılması ile böylece devrenin kapasitif etkisi artırılmıştır. Bu etki rezonans genliklerinin artırılması ile sağlanmıştır. Ek olarak, her iki tasarlanan geometride içindeki rezonatörler 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmüştür. İletim ve yansıma katsayıları üzerindeki bu değişimlerin etkileri ayrı ayrı değerlendirilmiş ve incelenmiştir. Tasarlanan rezonatörlerin şematik gösterimi Şekil 4.42'de verilmiştir. Nümerik sonuçlar elde edilen iki farklı omega şekil rezonatör tabanlı bakışsız metamatizemelerin dairesel iletim katsayıları $RCP(T_R)$ ve $LCP(T_L)$, ve yansımaları, R_R ve R_L , lineer polarizasyonlu iletim ve yansıma katsayılarından (T_{xx} , T_{yy} , T_{xy} , T_{yx} ve R) elde edilmektedir;

Şekil 4.43-4.45'te bu iletim ve yansıma katsayılarından elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.



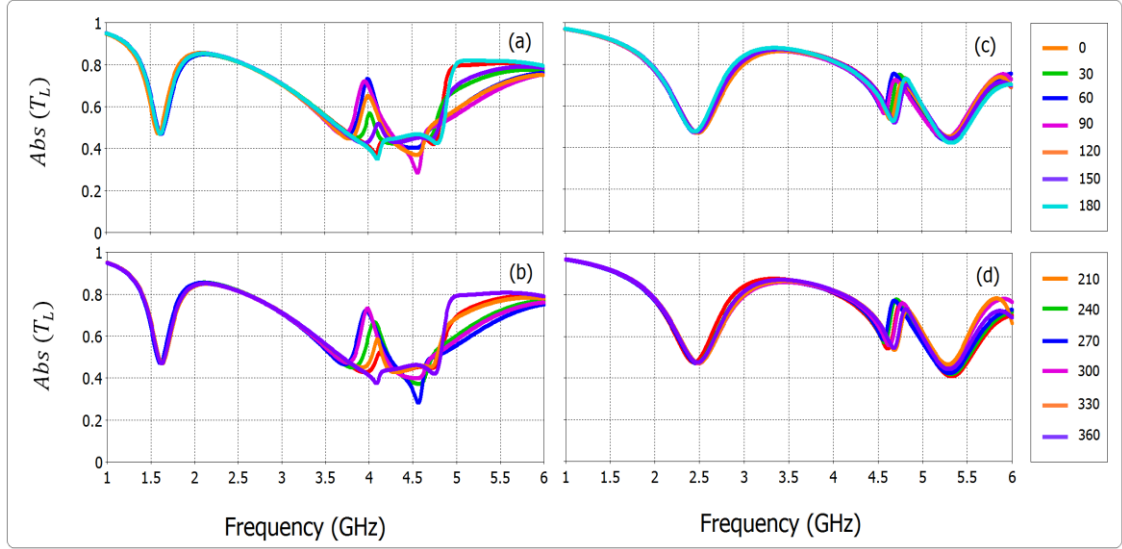
Şekil 4.42 Tasarlanan omega şekil tabanlı rezonatörlerin şematik gösterimleri



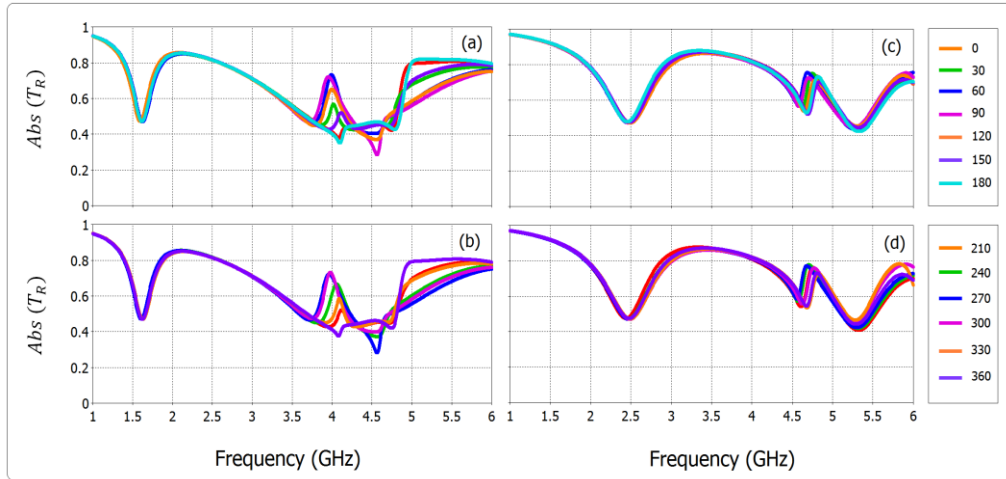
Şekil 4.43. Omega ayrık halka rezonatör şeklindeki bakışsız metamatzemenin içteki rezonatörün 0° 'den 360° 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon yansıma katsayıları. Sol taraf geometri 1'i, sağ taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.

Bakışsız metamatzemelerin diğer özelliklerinden biri de dalgaları, sol el dairesel ve sağ el dairesel polarizasyonlu dalgalar ayırıştırmasıdır. Bunun ana nedeni; bu ortam içerisinde ilerleyen EM dalgaının elektrik ve manyetik alanları arasındaki çapraz etkileşimdir. Bunu gözlemlemenin en iyi yolu; dairesel iletim katsayılarının incelenmesidir.

Birim hücre içerisindeki küçük rezonatörün döndürülmesine bağlı olarak elde edilen iletim katsayıları Şekil 4.44 ve 4.45’te sunulmuştur.



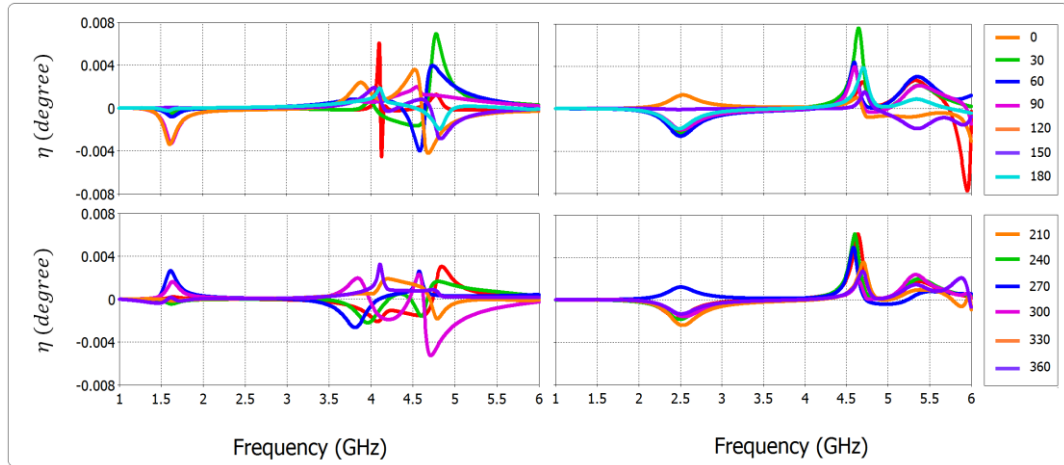
Şekil 4.44. Omega ayrık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metalmalzemenin içteki rezonatörün 0^0 ’den 360^0 ’ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon $Abs(T_L)$ iletim katsayıları. Sol taraf geometri 1’i, sağ taraf ise geometri 2’yi temsil etmektedir.



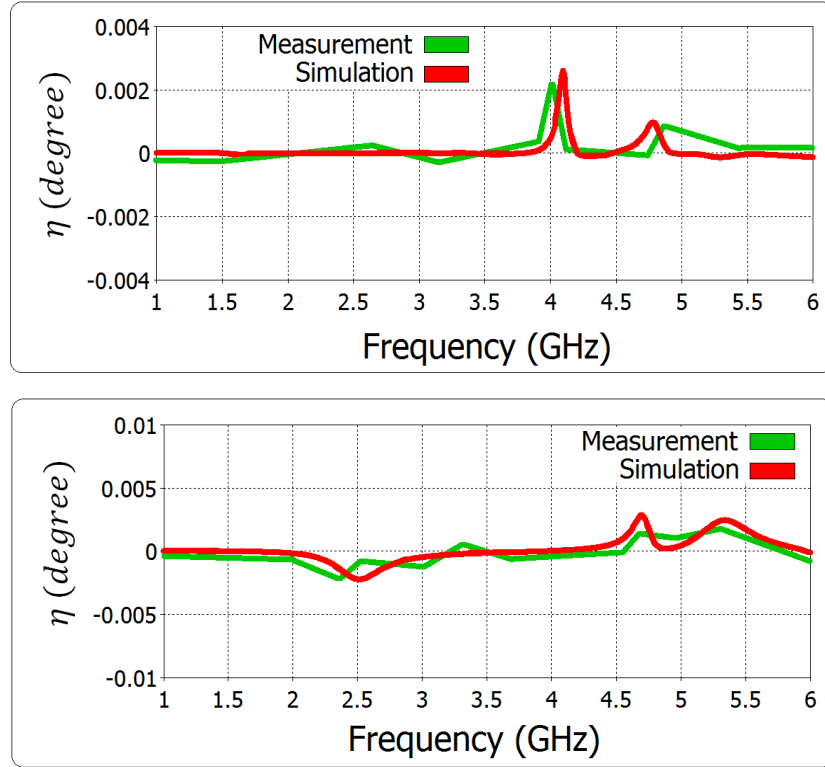
Şekil 4.45. Daire ayrık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metalmalzemenin içteki rezonatörün 0^0 ’den 360^0 ’ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon $Abs(T_R)$ iletim katsayıları. Sol taraf geometri 1’i, sağ taraf ise geometri 2’yi temsil etmektedir.

Bakışimsız metamalzemeler için iki önemli özellik dolayısıyla parametrelerin geri elde edilmesi yöntemi kullanılır. Bunlardan biri; bir ortam içerisindeki yayılan iki polarizasyonun emilim ve distorsiyonu içerisindeki RCP ve LCP dalgalar arasındaki farklılık olarak tanımlanan dairesel dichroizmdir. Dairesel dichroizm teorik olarak eliptiklik ile karakterize edilir (Wang ve ark. 2009a, Zarifi ve ark. 2012b). Diğer bir özellik ise; gelen lineer polarizasyonlu EM dalganın; bu ortam içerisinde polarizasyon düzlemini döndürür. Bu dönderme; optiksel aktivite olarak adlandırılır ve eliptik polarizasyonlu dalgaların polarizasyon azimuth döndürme açısı ile karakterize edilir. Azimuth döndürme copolar ve crosspolar iletim dataları ile hesaplanabilir (Wang ve ark. 2009c, Zarifi ve ark. 2012c);

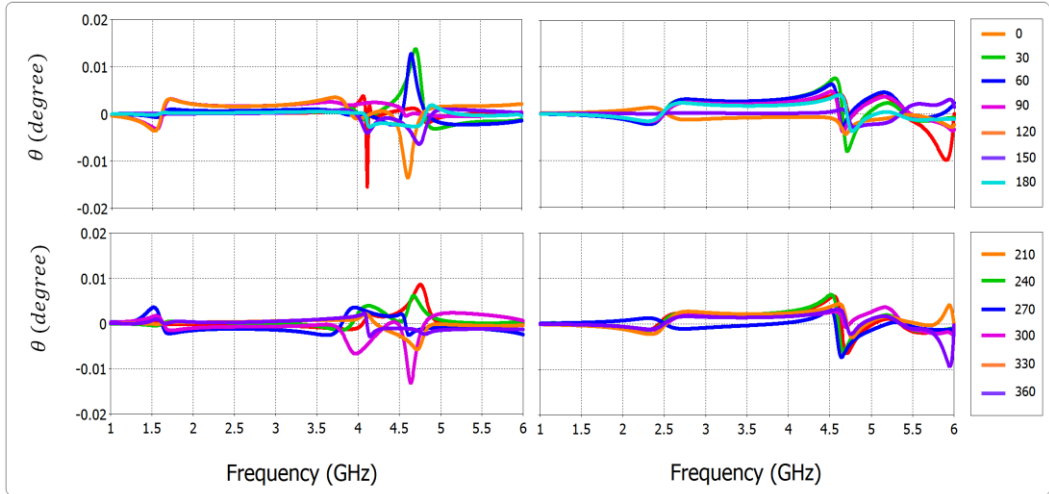
Elde edilen nümerik ve deneysel sonuçlar Şekil 4.46-4.49’da gösterilmektedir. Şekillerden anlaşılacağı üzere deneysel sonuçlar nümerik sonuçlar ile çok iyi uyumludur.



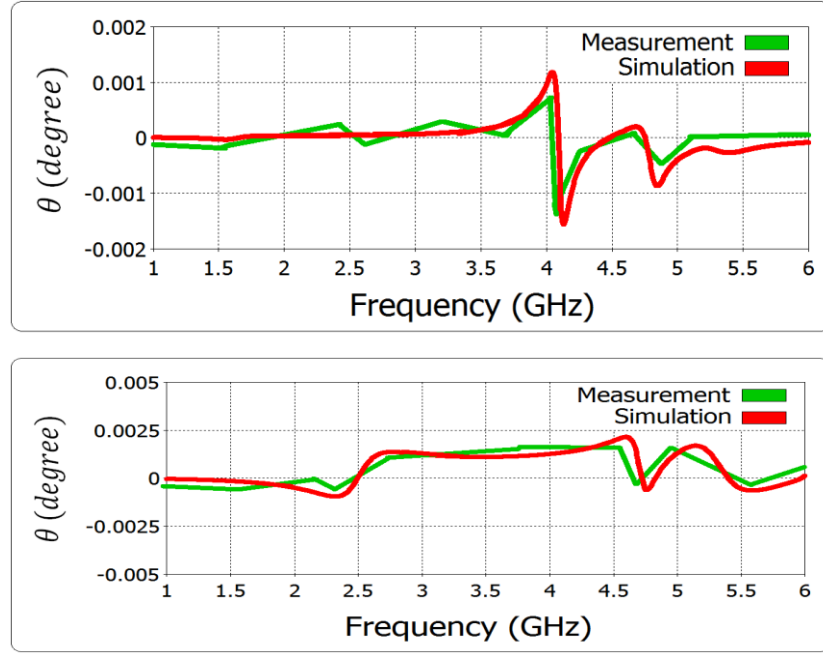
Şekil 4.46. Omega ayrık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin içteki rezonatörün 0^0 ’den 360^0 ’ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon dairesel dichroizm değeri. Sol taraf geometri 1’i, sağ taraf ise geometri 2’yi temsil etmektedir.



Şekil 4.47. Daire ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışsız metamatzemenin deneysel dairesel dichroism değeri. Yukarı taraf geometri 1'i, aşağı taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.

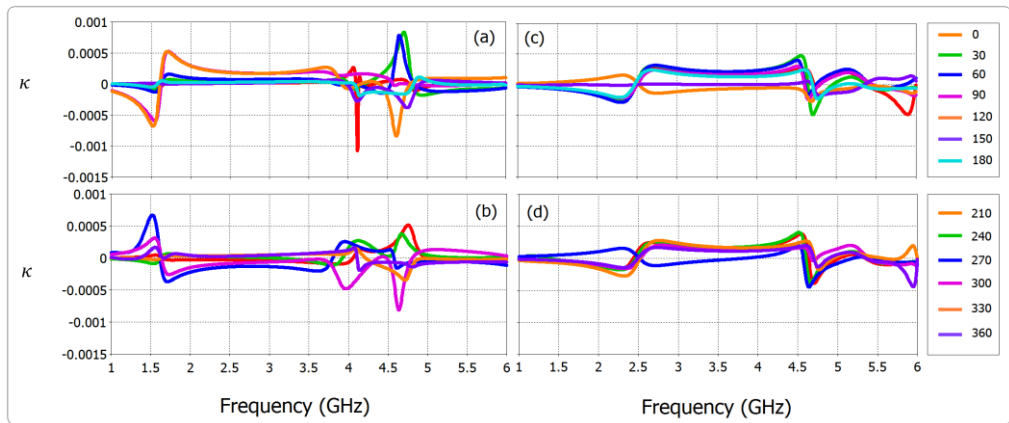


Şekil 4.48. Omega ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışsız metamatzemenin içteki rezonatörün 0^0 'den 360^0 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon teta açısı değeri. Sol taraf geometri 1'i, sağ taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.

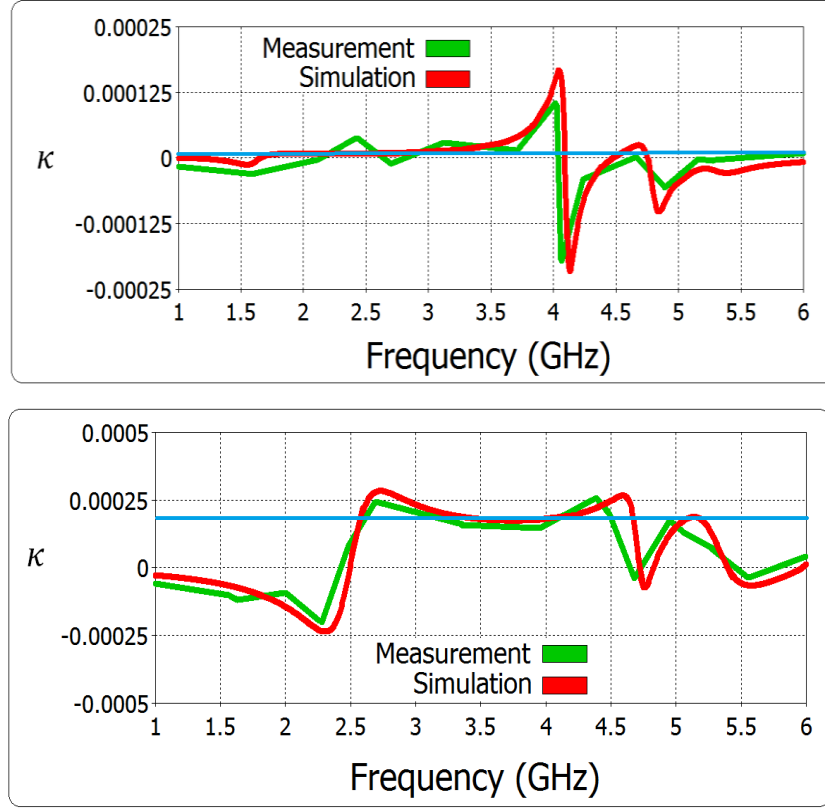


Şekil 4.49. Omega ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin deneysel teta açısı değeri. Yukarı taraf geometri 1'i, aşağı taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir

Bir diğer önemli parametre ise; bakışimsızlık parametresidir. Bu çalışmada, devam eden eşitlikler kullanılarak tasarlanan yapılar için bakışimsızlık parametre değerleri de hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler deneysel için de geçerli olan 1-6 GHz frekans aralığındadır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.50 ve 4.51'de sunulmuştur.



Şekil 4.50. Dikdörtgen ayırık halka rezonatör şeklindeki bakışimsız metamalzemenin içteki rezonatörün 0° 'den 360° 'ye kadar döndürülmesi ile elde edilen simülasyon bakışimsızlık değeri. Sol taraf geometri 1'yi, sağ taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.



Şekil 4.51. Daire ayrık halka rezonatör şeklindeki bakışsız metamatrazemenin deneysel bakışsızlık değeri. Yukarı taraf geometri 1'i, aşağı taraf ise geometri 2'yi temsil etmektedir.

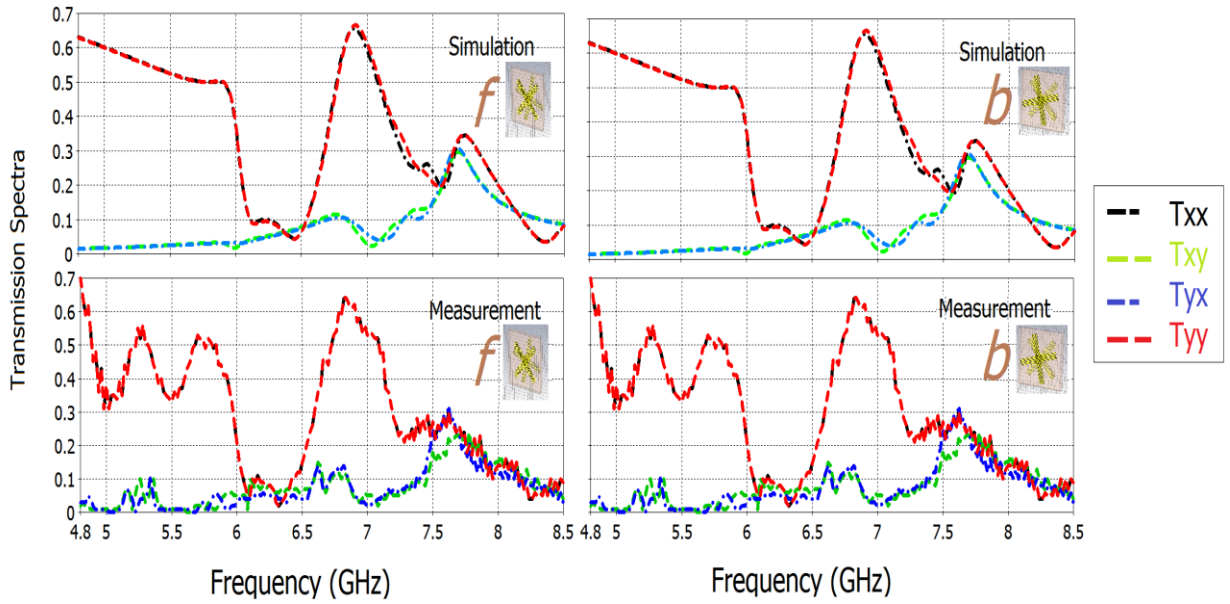
Bu çalışmada özet olarak, omega ayrık halka rezonatör tabanlı iki benzer yeni jenerasyon bakışsız metamatrazemeler detaylı olarak incelenmiştir. Optiksel aktivite, dairesel döndürme, yansıma ve iletim katsayıları gibi tasarlanan yapı için önemli parametreler teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Önceki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada küçük bakışsızlık parametresi üzerinde durulmuştur. Geleneksel bakışsız metamatrazeme çalışmaları büyük bakışsızlık değerleri üzerinde dururken, aslında küçük bakışsızlık parametresine sahip bu yapılar doğal malzeme gibi hareket etmekte ve aynı zamanda polarizasyon döndürmesi sağlamaktadır. Bundan dolayı, yeni jenerasyon bakışsız metamatrazemeler polarizasyon kontrolü, döndürme ve iletim filtresi tasarımı gibi örnekler için önemli potansiyel uygulama alanlarına sahiptirler.

4.3. Bakışsız Metamalzemeler ile Lineer Polarize Dalgaların Asimetrik İletimi ve Dinamik Polarizasyon Dönüştürümü

4.3.1. Çift Tabakalı Süreksiz Çapraz Yıldız Şekil Tabanlı Rezonatör

Bu çalışmada Şekil 3.1'deki bakışsız metamalzeme yapısı kullanılmıştır. Bakışsız metamalzemenin frekans cevabını araştırmak için amaçlanan yapı (+z) ve (-z) düzlem dalgaların yönleri tasarlanmış ve simüle edilmiştir. Daha sonra, bakışsız plakanın lineer dört iletim matris katsayılarını elde etmek için, ilk olarak T_{xx} ve T_{yx} için gelen dalga x – yönünde polarize olduğu durumdaki nümerik ve deneysel sonuçları elde edilmiştir. İkinci olarak benzer bir şekilde y – yönünde polarize olmuş gelen dalga için lineer iletim katsayıları T_{xy} ve T_{yy} elde edilmiştir.

Her iki ileri ve geri yöndeki iletim katsayıları ölçülmüştür. Şekil 4.52, bakışsız plakanın (+z) ve (-z) yayılım yönleri için dört iletim matris elemanlarının ($T_{xx}, T_{xy}, T_{yx}, T_{yy}$) nümerik ve deneysel sonuçlarını göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere deneysel sonuçlar, nümerik sonuçlar ile çok iyi uyumludur.



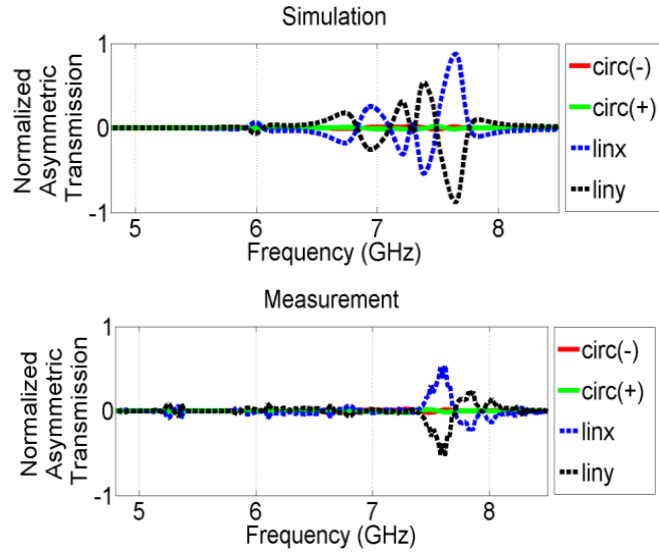
Şekil 4.52. +z ve -z yayılım yönleri için bakışsız plakaya ait dört matris elemanının ($T_{xx}, T_{xy}, T_{yx}, T_{yy}$) ölçüm ve simülasyon iletim spektrumları

Şekil 4.52'den anlaşılacağı üzere co-polarizasyon iletim parametresi T_{yy} bir rezonans pik değerine sahiptir ve $f = 6.91 \text{ GHz}$ frekans değerinde maksimum olarak 0.66 değerlerine ulaşır. Ek olarak; simülasyon ve deneysel sonuçlar gösterir ki; T_{xx} ve

T_{yy} yaklaşık olarak birbirlerine eşittir. Cross-polarizasyon sabitlerinden T_{xy} ve T_{yx} iletim değerleri $f = 4.8 \text{ GHz}$ frekans değerinde minimum olarak 0.01 değerlerine kadar azalır.

Simülasyon ve deneysel çalışmalara göre, lineer polarizasyon için iletimdeki asimetri yayılım yönü ters çevrildiğinde de ayarlanabilir. Bu değişim $|T_{+-}| \neq |T_{-+}|$, yani, dairesel döndürmenin var olduğunu doğrular. Ek olarak; düzlemsel bakışsımsız metamalzemelerin ve onların ayna simetrisinin yer alması dairesel iletimin asimetrisini ters çevirir. Bundan dolayı polarizasyon durumunun ellilik durumu değiştiğinde, iletim asimetrisinin de işareti asimetrik düzlemsel bakışsımsız metamalzemeler için değişecektir. Ayrıca, Şekil 4.52'den de anlaşılacağı üzere cross-polarizasyon elemanları T_{xy} ve T_{yx} birbiri ile yer değişir. Asimetrik iletim materyal ve metot kısmındaki teorik analiz göz önünde bulundurulduğunda T_{xx} ve T_{yy} her iki nümerik ve deneysel sonuçlardan görüleceği üzere bakışsımsız metamalzemeler için dairesel polarizasyona sahip dalgaların sıfır asimetrisinin tam olarak birbirine eşit olmasını sağlar (Zhao ve ark. 2011, Menzerl ve ark. 2010, Plum ve ark. 2011).

Asimetrik iletim parametresi, Δ , her iki lineer ve dairesel polarizasyonlar kullanılarak hesaplanmış ve normalize edilmiştir (Şekil 4.53). Şekil 4.53'ten de anlaşılacağı üzere amaçlanan yapı lineer polarizasyon için 6.94 GHz ve 7.64 GHz her iki farklı frekanslarda asimetrik iletim göstermektedir. Frekans arttıkça Δ parametresi yavaş yavaş 6.94 GHz frekansında 0.25 değerine kadar artar.

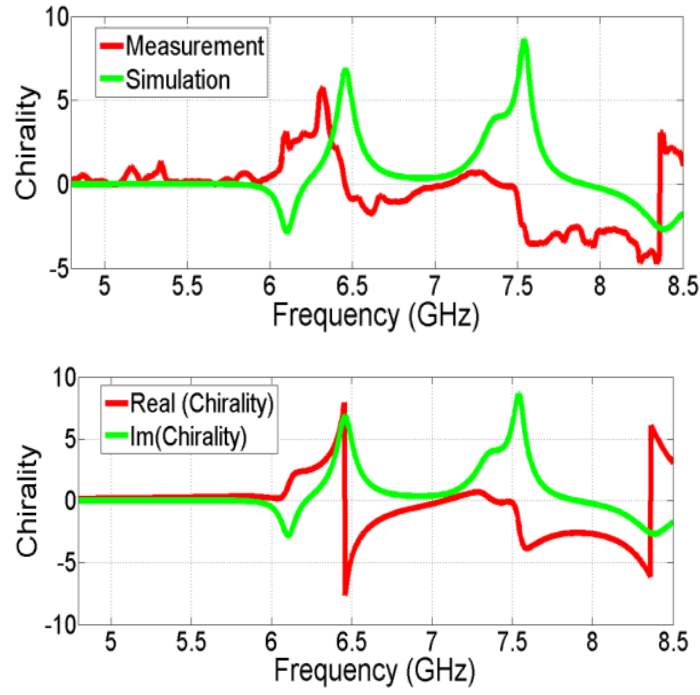


Şekil 4.53. Lineer ve dairesel polarizasyon için asimetrik iletim Δ parametresinin nümerik ve deneysel sonuçları

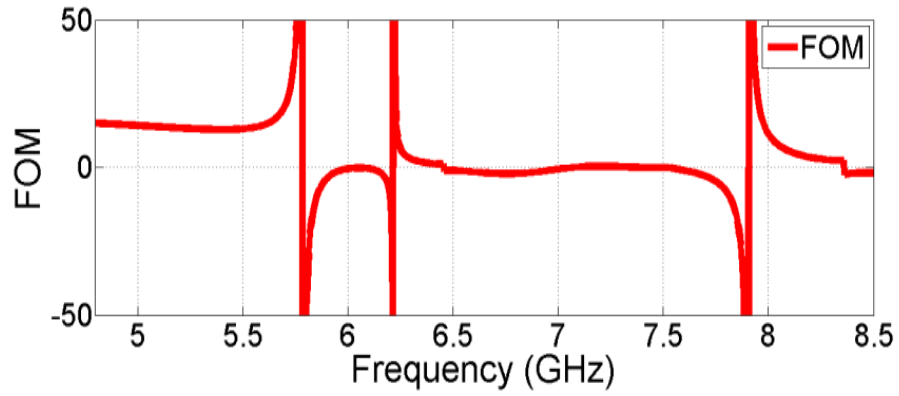
Şekil 4.53'ten de görüleceği üzere, amaçlanan bakışimsız metamalzeme yapısı lineer polarizasyonda her iki zıt yönde yayılım için büyük asimetrik iletim parametresine sahiptir. Ek olarak; bu özellik farklı frekans aralıkları için elde edilmiştir. Özellikle, asimetrik iletim $f = 7.64$ GHz frekansında her iki simülasyon ve deneysel çalışma için yaklaşık olarak 0.875 değerindedir.

İletim ve yansıma katsayıları dataları elde edildikten sonra bakışimsızlık parametresini κ elde etmek için retrieval çalışması uygulanmıştır. Bakışimsızlık parametresi doğrudan iletim parametrelerinden $Re(\kappa) = \frac{[\arg(T+) - \arg(T-) + 2m\pi]}{2k_0d}$, $Im(\kappa) = \frac{\ln|T_L| - \ln|T_R|}{2k_0d}$ şeklinde elde edilebilir. Burada k_0 , boşlupundalga vektörünü, d ise yapının kalınlığını (burada retrieved edilen FR-4 yapının kalınlığı 1.6 mm olarak seçilmiştir) ve m bir tam sayıyı ifade etmektedir (Li ve ark. 2010a, Zhao ve ark. 2011).

Şekil 4.54, bakışimsızlık parametresinin nümerik ve deneysel sonuçlarını göstermektedir. Bakışimsızlık parametresi $f = 8.36$ GHz frekans değerinde nümerik ve deneysel sonuçlar için sırasıyla $\kappa = \pm 6.1$ (4.7) değerindedir. Ek olarak; bakışimsız parametresi nümerik çalışma için $f = 6.46$ GHz frekans değerinde $\kappa = \pm 7.7$ değerindedir. 6.1 GHz ve 6.5 GHz frekans aralığında pozitif bakışimsızlık değeri deneysel sonuçlar için yaklaşık olarak 6'dır. Fakat, negatif değer simülasyon ile karşılaştırıldığında küçüktür ve deneysel sonuçlar için -2 değerine ulaşır. Ayrıca, Şekil 6'dan da görüleceği üzere Figure of Merit (FOM) $FOM = Re(\kappa)/Im(\kappa)$ değeri de hesaplanmıştır. Çünkü amaçlanan model birçok bakışimsız metamalzeme yapılarına göre çok düşük kayıp değeri sunmaktadır. Şekil 4.55 bu durumu doğrulamaktadır.



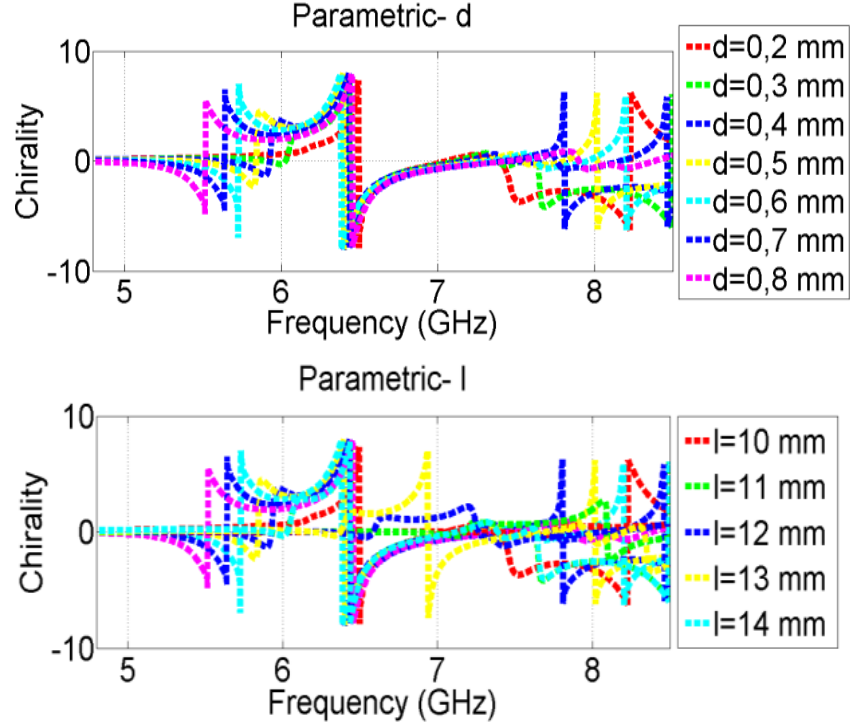
Şekil 4.54. Üretilen bakışimsız metamalzeme yapısı için bakışimsızlık parametresinin nümerik ve deneysel sonucu



Şekil 4.55. Amaçlanan model için Figure of Merit sonucu

Yapılan bu çalışmalara ek olarak çapraz yıldız şekil tabalı şeritlerin ölçülerinin bakışimsızlık parametresi üzerindeki değişim etkisi araştırılmıştır ve sonuçlar Şekil 4.56’da sunulmuştur. Şeritler arasındaki aralık 0.20 mm ’den 0.80 mm ’ye ve şeritlerin uzunluğu 10 mm ’den 14 mm ’ye kadar arttırıldığında tekrar konfigüre edilebilir bakışimsızlık elde edilebilmektedir. Şekil 4.56’dan de anlaşılacağı üzere ölçüler değiştirildiğinde bakışimsızlık parametresi istenildiği gibi ayarlanabilmektedir. Bu

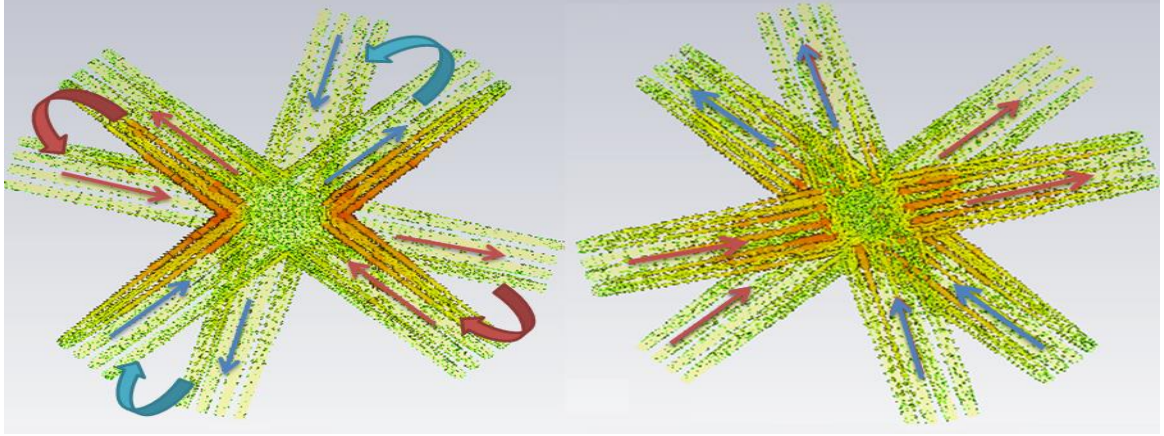
özellik bakışimsızlık parametresi için dinamik olmayan mekanik ayarlama imkanı sağlamaktadır.



Şekil 4.56. Çapraz yıldız şekil tabanlı bakışimsız metamalzeme için farklı ölçülerdeki bakışimsızlık parametresi için simülasyon sonuçları (a) şeritler arasındaki aralık değişiminin sonuçları (b) şerit uzunluklarının değişimlerinin sonuçları

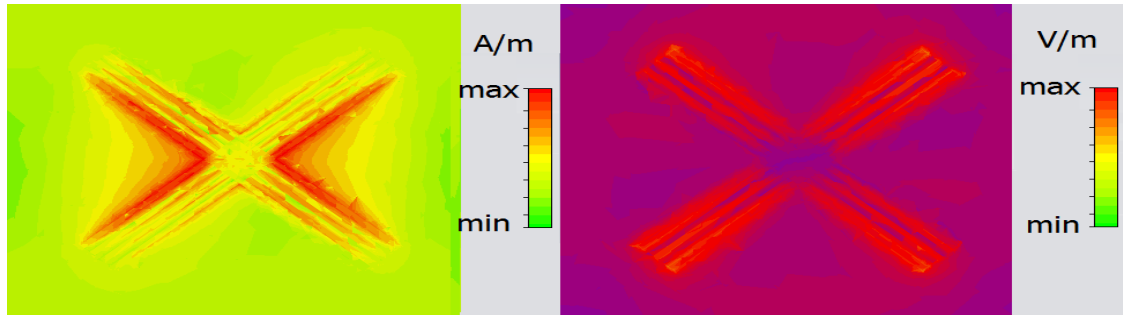
Amaçlanan tasarımların rezonans karakteristiklerini doğrulamak ve göstermek için yüzey akım dağılımları çıkartılmıştır (Şekil 4.57). Görüleceği üzere 8.36 GHz rezonans frekansında, çapraz yıldız şekil tabanlı şeritlerin üstünde ve altında paralel olmayan asimetric rezonansa neden olan ve direkt olarak mağnetik rezonansı sağlayan akım dağılımları mevcuttur (Dincer ve ark. 2013a). Bunun anlamı, bu frekanstaki rezonans mağnetik alanın indüklemesinden kaynaklanan rezonans çeşididir. Diğer taraftan, yapı 6.46 GHz rezonans frekansında da iki tabakada da simetrik rezonansı sağlayan ve elektrik alanın uyartımından meydana gelen paralel akım dağılımı oluşturur. Amaçlanan geometri iki farklı frekansta bakışimsız metamalzemenin yapısını tanımlamak için gösterilen paralel ve paralel olmayan akım dağılımları (simetrik ve

asimetrik rezonans modları) sağlar (Wang ve ark. 2009a, Li ve ark. 2010b, Zhao ve ark. 2011).



Şekil 4.57. 8.36 GHz mağnetik rezonans frekansında (sol –taraf) ve 6.46 GHz elektrik rezonans frekansında yüzey akım dağılımları

Elden edilen bu bulgulara ek olarak, mağnetik (8.36 GHz) ve elektrik alan (6.46 GHz) dağılımları da Şekil 4.58’de gösterildiği üzere analiz edildi. 8.36 GHz frekansında akım dağılımı ve mağnetik alan Şekil 4.57 ve 4.58’de karşılaştırılabilir bir durumdadır. Çapraz yıldız şeritler üzerinde mağnetik alanının belirgin bir yoğunluğu mağnetik dipoller tarafından meydana gelen asimetrik rezonansı doğrular niteliktedir. Ayrıca, 6.46 GHz için rezonans modunun fiziksel mekanizması 8.36 GHz’deki rezonans değerinden daha farklıdır. 6.46 GHz rezonans frekansındaki elektrik alan dağılımı elektrik dipoller tarafından meydana gelen simetrik akımı doğrular durumdadır (Zhou ve ark. 2009, Li ve ark. 2008, Zarifi ve ark. 2012a).



Şekil 4.58. 8.36 GHz rezonans frekansında yapıdaki mağnetik alan dağılımı (sol-taraf) ve 6.46 GHz rezonans frekansındaki yapıdaki elektrik alan dağılımı (sağ-taraf)

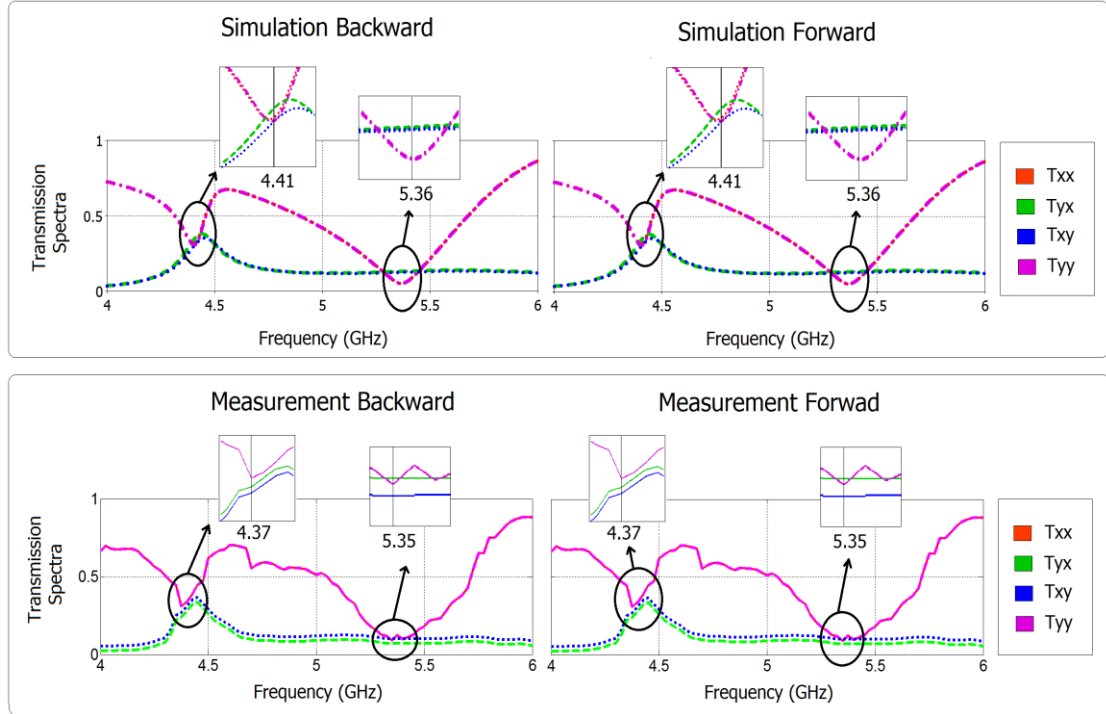
Asimetrik iletim için dielektrik alttaşı ve çift tabakalı süreksiz çapraz yıldız şeritlerden oluşan bakışsız metamalzeme yapısının teorik ve deneysel analizi detaylı olarak araştırılmış ve incelenmiştir. Amaçlanan yapı lineer polarizasyon için bir asimetrik EM dalga üretebilir. Ek olarak, yapı esnek, ayarlanabilir ve kolay fabrikasyon özelliklerine de sahiptir. Şeritlerin açısı, uzunluğu, genişliği ve aralarındaki mesafe istenilen EM sonuç için ayarlanabilir. Örneğin; bahsedilen asimetrik iletim gibi, farklı bakışsız parametreleri vb. Bu kontrol edilebilir özellikler ayrıca önemli derecede bakışsız metamalzemenin optiksel aktivitesini de sağlayabilmektedir. Ayrıca, yapının polarizasyon ayarlanabilirliği yeni mikrodalga döndürücü veya polarizasyon kontrol cihazlarının elde edilmesinde etkili olan güçlü optiksel aktivitede polarizasyon kontrolü için ek derecelerin istenilen şekilde elde edilmesini sağlar. Yapı ile elde edilen bu önemli özellik hem deneysel hem de simülasyon sonuçları ile uyushmaktadır. Ayrıca elde edilen bu sonuçlar yapının esnek ayarlanabilir özelliği ile diğer frekans aralıkları için de oluşturulabilir.

Böylece, çift tabakalı ve süreksiz çapraz yıldız şekil tabanlı bu topoloji bilinen bakışsız metamalzeme yapıları ile asimetrik iletim sağlayan ve yüksek bakışsızlık istenilen yeni cihazların tasarlanmasında yararlı bir alternatif olacaktır. Özellikle yapı, daha verimli ve konfigüre edilebilir polarizasyon döndürücü ve sensör gibi uygulamalar için rahatlıkla kullanılabilir.

4.3.2. Çift Tabakalı Aralıklı Kare Şekil Rezonatör Tabanlı

Bu çalışmada Şekil 3.2'deki bakışsız metamalzeme yapısı kullanılmıştır. Amaçlanan bakışsız metamalzeme yapısının frekans cevabını araştırmak ve asimetrik iletim performansını göstermek için elde edilen numerik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Bu bakışsız geometri +z ve -z yönlerindeki ilerleyen düzlem dalgada asimetrik iletim sağlayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Daha sonra x- yönünde polarize olmuş dalga için dört iletim matrislerinden olan T_{xx} ve T_{yx} değerleri elde edilmiştir. Ardından y- yönünde polarize olmuş dalga için dört iletim matrislerinden olan T_{xy} ve T_{yy} değerleri bulunmuştur. Şekil 4.59'da dört iletim matrisi

$(T_{xx}, T_{xy}, T_{yx}, T_{yy})$ için gelen dalganın $+z$ ve $-z$ yönlerindeki nümerik ve deneysel sonuçları yer almaktadır. Nümerik sonuçlar deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır.



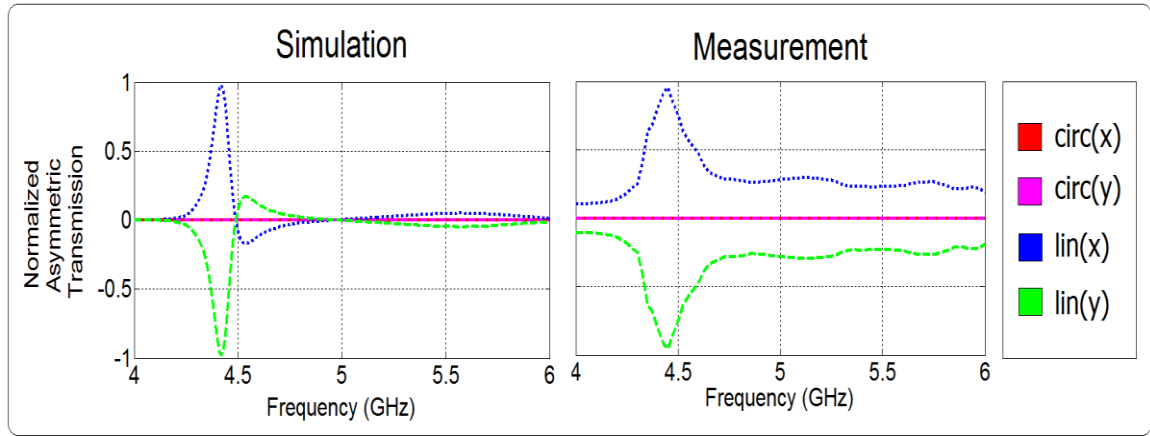
Şekil 4.59. $+z$ ve $-z$ yönlerindeki yayılımlar için yapının T_{xx} , T_{xy} , T_{yx} , T_{yy} matris elementlerinin nümerik ve deneysel değerleri

T_{xx} iletim katsayısının co-polarizasyon parametresinden görüleceği üzere 5.99 GHz frekans değerinde rezonans değerine sahip olup bu frekanstaki rezonans değeri yaklaşık olarak 0.86'dır. Bunun yanında nümerik ve deneysel sonuçlarda T_{xx} ve T_{yy} parametreleri hemen hemen birbirine eşittir. Croos-polarizasyon parametreleri T_{xy} ve T_{yx} ise 4.43 GHz frekansında rezonans değerlerine sahip olup yaklaşık olarak 0.38 civarlarındadır.

Lineer polarizasyondaki asimetrik iletim yayılım yönü ters olarak değiştirildiğinde de elde edilebilmektedir. Bununla ilgili literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu değişim dairesel döndürmeyi, $|T_{+-}| \neq |T_{-+}|$, doğrulamaktadır. Benzer olarak düzlem bakışsız metalmalzemelerin simetrik görüntüsü asimetrik dairesel iletimi sağlamaktadır. Bu yüzden, polarizasyon durumunun ellilik durumu değiştiğinde, asimetrik iletimin işareti de değişecektir. Teorik analizde gösterildiği üzere T_{xx} ve T_{yy} yaklaşık olarak birbirine eşittir ve bakışsız metalmalzemeler için dairesel polarize

olmuş dalgaların asimetrik iletimi sifıra yakındır. Bu nümerik bulgu deneysel çalışma ile de doğrulanmıştır (Plum ve ark. 2011, Dincer ve ark. 2013a).

Asimetrik iletim parametresi Δ teorik analizde gösterildiği gibi hesaplanmış ve her iki lineer ve dairesel polarizasyonlar için normalize edilmiştir (Şekil 4.60). Şekilden de anlaşılacağı üzere amaçlanan yapı lineer polarizasyon için 4.42 GHz frekansında asimetrik iletim göstermektedir. Frekansın artması ile birlikte Δ parametresi yavaşça azalmaktadır. Deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlar arasındaki küçük farklılıklar deneysel çalışma koşullarından dolayı ihmal edilebilir düzeydedir. Bu ufak farklılıklar fabrikasyon ve ölçüm şartlarından kaynaklanabilmektedir (Sabah ve Urbani 2013b).

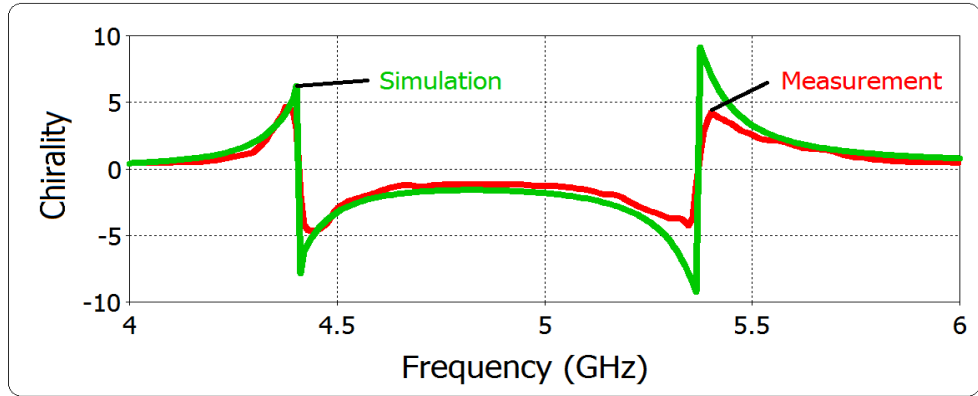


Şekil 4.60. Lineer ve dairesel polarizasyon için asimetrik iletimin nümerik ve deneysel sonuçları

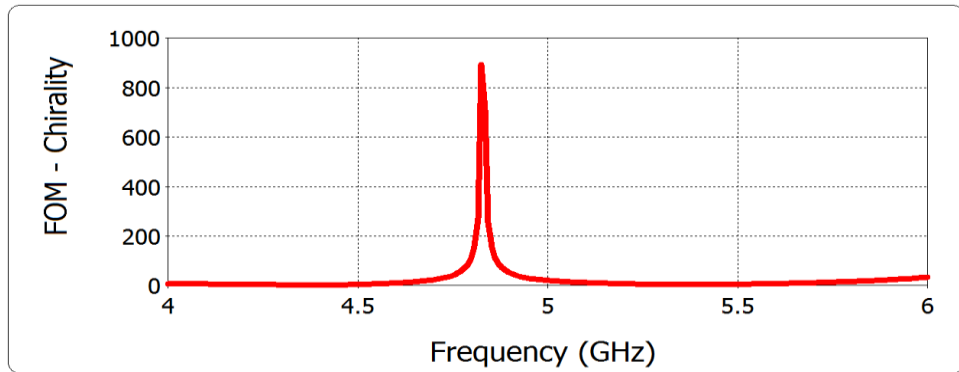
Şekil 4.60'tan da anlaşılacağı üzere, amaçlanan yapı lineer polarizasyonda her iki yön için büyük asimetrik iletime sahiptir. Özellikle, 4.42 GHz frekans değerinde asimetrik iletim yaklaşık olarak 0.767 civarlarındadır.

Amaçlanan yapının bakışsızlık parametresi, κ , değerini elde etmek için iletim ve yansıma katsayıları için parametrelerin geri elde edilmesi yöntemi kullanılmıştır. Bakışsızlık, iletim katsayısından doğrudan, $Re(\kappa) = \frac{[\arg(T_+) - \arg(T_-) + 2m\pi]}{2k_0d}$, $Im(\kappa) = \frac{\ln|T_L| - \ln|T_R|}{2k_0d}$ formülleri ile hesaplanabilir. Burada k_0 , boşluğun dalga vektörü, d ise yapının kalınlığını ifade etmektedir. Burada dielektrik yapı kalınlığı 1.6 mm olarak alınmıştır ve m bir tam sayı değerini ifade etmektedir (Wang ve ark. 2009c, Zhou ve ark. 2009).

Şekil 4.61 ve 4.62 bakışimsızlık parametresi için nümerik ve deneysel sonuçları göstermektedir. Bakışimsızlık nümerik ve deneysel sonuçlarda 4.41 GHz frekansında $\kappa = \pm 7.81$ (0.0) olarak elde edilmiştir. Ek olarak, 5.36 GHz frekansında ise $\kappa = \pm 9.24$ (0.0) olarak elde edilmiştir. Ayrıca yapının performans kalitesini göstermek amacı ile $FOM = Re(\kappa)/Im(\kappa)$ hesaplamaları da yapılmıştır (Şekil 4.62). Elde edilen sonuçlara göre yapı çok düşük kayıp değerine sahip olup verimli bir performans sunmaktadır.



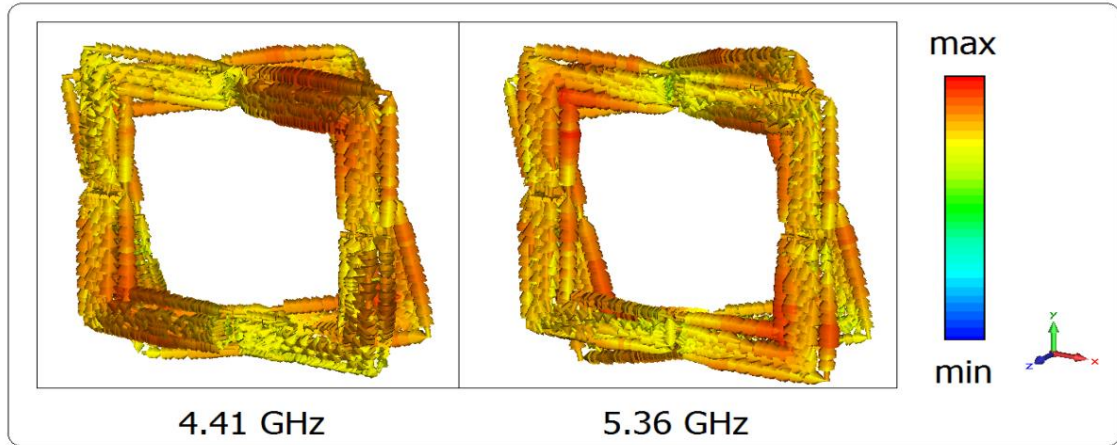
Şekil 4.61. Üretilen bakışimsız tasarım için nümerik ve deneysel bakışimsızlık parametresi



Şekil 4.62. Önerilen yapı için FOM gösterimi

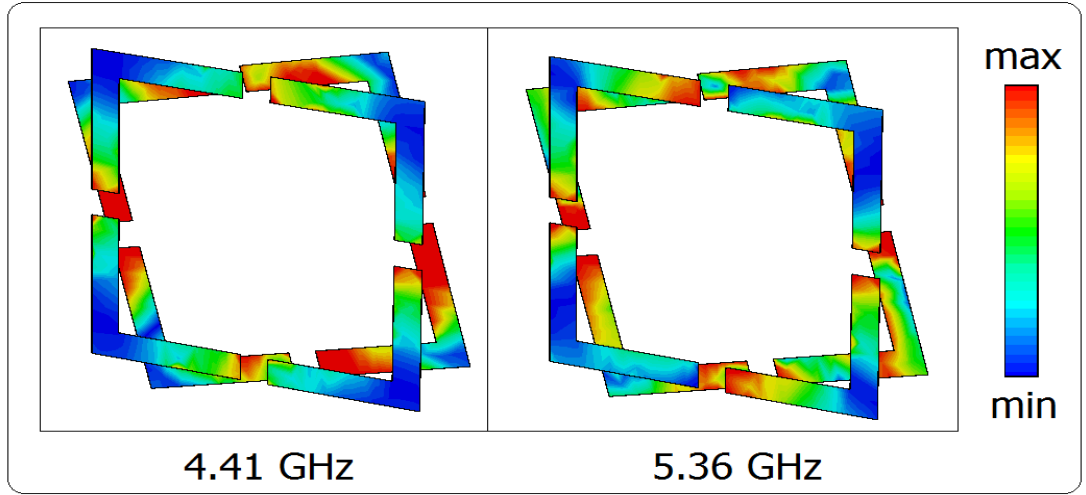
Önerilen bakışimsız metamatizme yapısının fiziksel mekanizmasını açıklamak ve çalışma prensibini göstermek amacı ile 4.41 GHz ve 5.36 GHz rezonans frekans değerlerinde elektrik alan ve yüzey akım dağılımları çıkarılmıştır (Şekil 4.63 ve 4.64). Şekil 4.63'ten görüleceği üzere, rezonatörün üst ve alt yerlerinde paralel ve paralel

olmayan akım dağılımı bulunmaktadır. Bilindiği üzere, paralel olmayan akımlar asimetrik rezonans modu ile doğrudan ilişkili olarak mağnetik rezonanstan kaynaklanırken, paralel olan akım dağılımları ise simetrik rezonans modu ile alakalı olup elektrik alan tarafından uyarılan elektrik rezonanstan kaynaklanmaktadır (Wang ve ark. 2009b, Wang ve ark. 2009c, Zhou ve ark. 2009, Dincer ve ark. 2013a).



Şekil 4.63. 4.41 GHz ve 5.36 GHz rezonans frekansları için yüzey akım dağılımları

Buna ek olarak Şekil 4.64'te gösterildiği üzere rezonans frekansları için elektrik alan dağılımları da analiz edilmiştir. Elektrik alanın rezonatör aralıkları üzerinde doğru yoğunlaşması mağnetik dipoller tarafından oluşturulan asimetrik rezonans modunu doğrulamaktadır. Ek olarak, 5.36 GHz rezonans frekansındaki çalışma modu 4.41 GHz rezonans frekansındaki moddan farklıdır. 4.41 GHz rezonans frekansındaki elektrik alan dağılımı elektrik dipoller tarafından etkileşim ile oluşturulan simetrik akımları doğrulamaktadır (Wang ve ark. 2009b, Zhou ve ark. 2009, Dincer ve ark. 2013a).



Şekil 4.64. 4.41 GHz ve 5.36 GHz rezonans frekansları için elektrik alan dağılımları

Dielektrik alttaşı ve aralıklı kare rezonatör yapısından oluşan bakışimsız metamalzeme yapısı teorik ve deneysel olarak analiz edilmiştir. Yapının en önemli özelliklerinden birisi lineer polarizasyonlu EM dalgalar için asimetrik iletim sağlamasıdır. Ek olarak, yapının kolay konfigüre edilebilir ve esnek özelliğinden dolayı istenilen frekans bölgelerinde ve aralıklarda asimetrik iletim gerçekleştirilebilir. Ayrıca yapının sunmuş olduğu bu özellik ile polarizasyon kontrolü için de istenilen açı değerinde asimetrik iletim sağlanabilmektedir. Polarizasyon kontrolü istenilen şekilde ayarlandığında yeni mikrodalga dalga döndürücü veya polarizasyon kontrol cihazları tasarlanabilir. Nümerik sonuçlar ile deneysel sonuçlar birbiri ile çok iyi örtüşmektedir. Önerilen bakışimsız metamalzeme yapısı sonuç olarak büyük bakışimsızlık parametresinin istendiği çeşitli birçok potansiyel polarizasyon döndürücü ve kontrolü uygulamalarında verimli olarak kullanılabilir.

4.4. Metamalzeme Tabanlı Mükemmel Sinyal Emilim Uygulamaları

4.4.1. Omega Rezonatör ve Sekizgen Yıldız Şekil Tabanlı Çift Bantlı Polarizasyon Bağımsız Sinyal Emici

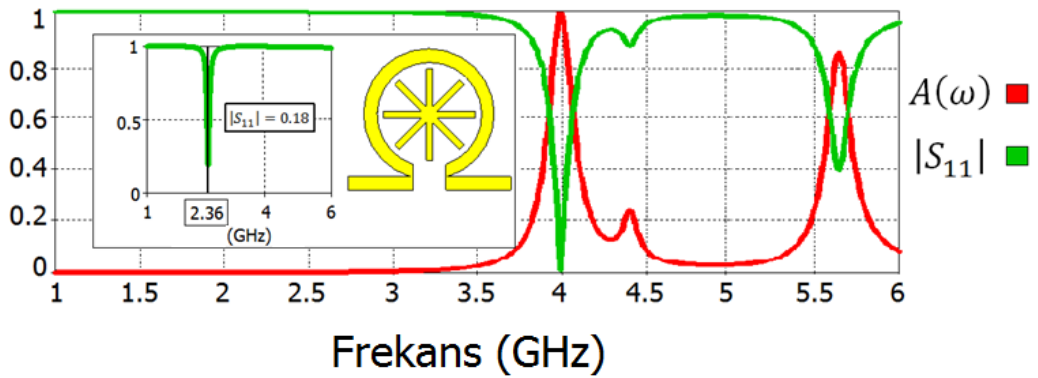
Bu çalışmada Şekil 3.9'daki materyal kullanılarak metamalzeme sinyal emici yapısı için numerik ve deneysel çalışma yapılmıştır. Daha sonra elde edilen sonuçlar S-parametrelerinin ölçülmesi ile doğrulanmıştır. Bilindiği üzere, amaçlanan yapının arka

tarafına metal tabaka yerleştirildiğinden iletim olmayacaktır. Seçilen geometri, belirli bir frekans aralığında yapısal özelliklerinden dolayı uygulanan gelen EM dalga için yansımayı minimize ettiğinden dolayı güçlü bir emilim sağlamaktadır ve mükemmel emilim gerektiren çok sayıda uygulamada kullanılabilir uygunluğa sahiptir. Ek olarak, ikinci emilim bandında da yansıma minimum olacaktır. Emilimin frekans karakteristiği $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$ formülü ile hesaplanabilir. Maksimum emilim, $A(\omega)$, her iki yansıma, $R(\omega) = |S_{11}|^2$, ve iletim, $T(\omega) = |S_{21}|^2$, parametrelerinin rezonans frekansında minimum olması ile sağlanabilmektedir (Meng ve ark. 2012). Daha önce bahsedildiği gibi sunulan çalışmada yapının arkasındaki sürekli metal tabakadan dolayı iletim olmayacaktır. Bundan dolayı emilim sadece yansıma, S_{11} , ile direkt ilişkili olacaktır. Sonuç olarak, emilim, $A(\omega) = 1 - R(\omega)$, formülü ile hesaplanabilir. Ayrıntılı bilgiler Yöntem bölümünde verilmiştir.

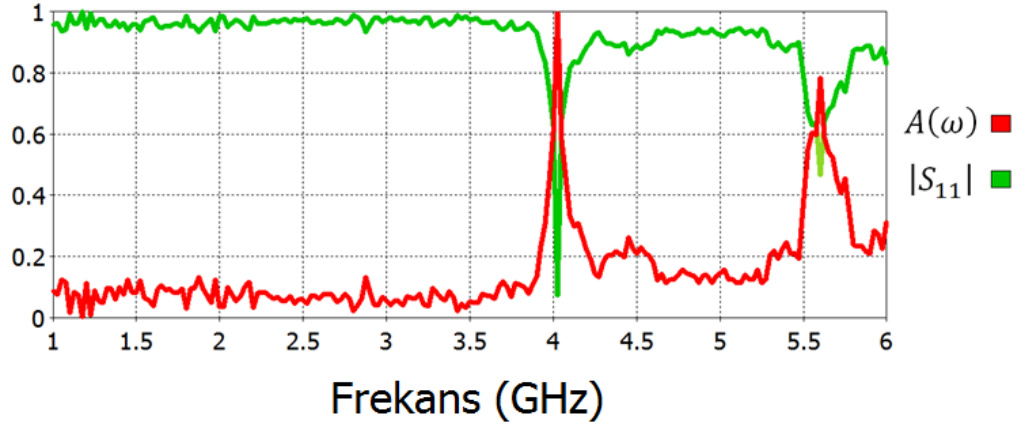
Şekil 4.64 ve 4.66 yansıma ve emilim için nümerik ve ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Yansıma spektrumunda 4.0 GHz ve 5.6 GHz frekanslarında iki farklı rezonans meydana gelmektedir. Böylece emilimde iki farklı maksimum rezonans sağlanmaktadır. İlk rezonans, simülasyon ve deneysel çalışma için yaklaşık %99, ikinci rezonans için ise simülasyonda %84, deneysel çalışmada %79 oranında emilim sağlanmıştır. Simülasyon sonuçları deneysel çalışma ile iyi olarak örtüşmektedir.

Şekil 4.65'in içerisinde ise Ω şeklindeki rezoantörün içerisinde yapının aralıksız şeklindeki hali için yansıma cevabı ek bir şekil olarak verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, yansıma bu durumda sadece 2.36 GHz frekansında 0.18 genlik değerindedir. Bunun anlamı, Ω şeklindeki rezonatördeki aralıklar daha küçük yansıma yapar ve ikinci emilim bandını sağlar. Aralıksız yapı için rezonanstaki kayma orijinal yapıdaki kapasitans ve indüktans değerlerinin değişmesi ile açıklanabilir. Ek olarak, ilk rezonans için yansıma ortamın efektif empedansı, $Z(\omega) = \sqrt{\mu(\omega)/\varepsilon(\omega)}$, serbest uzay empedansı, $Z(\omega) = Z_0(\omega) = 120\pi$, ile rezonans frekansında eşleştiğinden sıfıra çok yakındır. Bu yüzden, yansıma minimize olur (Li ve ark. 2010c, Lin ve ark. 2011, Huang ve ark. 2013). Bu konsept rezonans frekansında üretilen yapının sıfıra çok yakın yansımaya sahip olması ile hem nümerik olarak hem de deneysel olarak sağlanmıştır. İkinci bant için, mükemmel emilim tam olarak sağlanmamıştır. Böylece yapı iki farklı rezonans frekansında ilki mükemmel ve ikincisi için oldukça iyi bir emilim sağlamaktadır. Bu yüzden, amaçlanan model literatürde aynı frekans bölgesinde çalışanların arasında pratik olarak iyi bir

adaydır. Ek olarak bant genişliği hesaplamaları amaçlanan sinyal emici yapısının kalitesini göstermek için yapılmıştır. Bundan dolayı emilim bölgesinin kademeli bant genişliği (FBW) hesaplanmıştır. FBW , sinyal emicinin bant genişliğinin merkez frekansına bölünmesiyle bulunabilir. $FBW = \Delta f / f_0$ formülü ile hesaplanabilir. Burada Δf yarım güçteki bant genişliğini ve f_0 merkez frekansını ifade eder. İlk rezonansta, bu parametreler simülasyon için $\Delta f = 0.19$ GHz, $f_0 = 4.0$ GHz ve $FBW \approx 4.76$ %, deneysel çalışma için $\Delta f = 0.25$, $f_0 = 4.02$ GHz, ve $FBW \approx 6.21$ % elde edilmiştir. İkinci rezonansta bahsedilen bu parametreler simülasyon için $\Delta f = 0.182$, $f_0 = 5.64$ GHz, ve $FBW \approx 3.23$ %, deneysel çalışma için $\Delta f = 0.31$, $f_0 = 5.6$ GHz, ve $FBW \approx 5.53$ % elde edilmiştir. Bu hesaplanan değerler amaçlanan yapının kaliteli bir sinyal emici karakteristiği gösterdiğini doğrulamaktadır (Alici ve Ozbay 2010, Yilmaz ve Sabah 2013, Sabah 2013c).



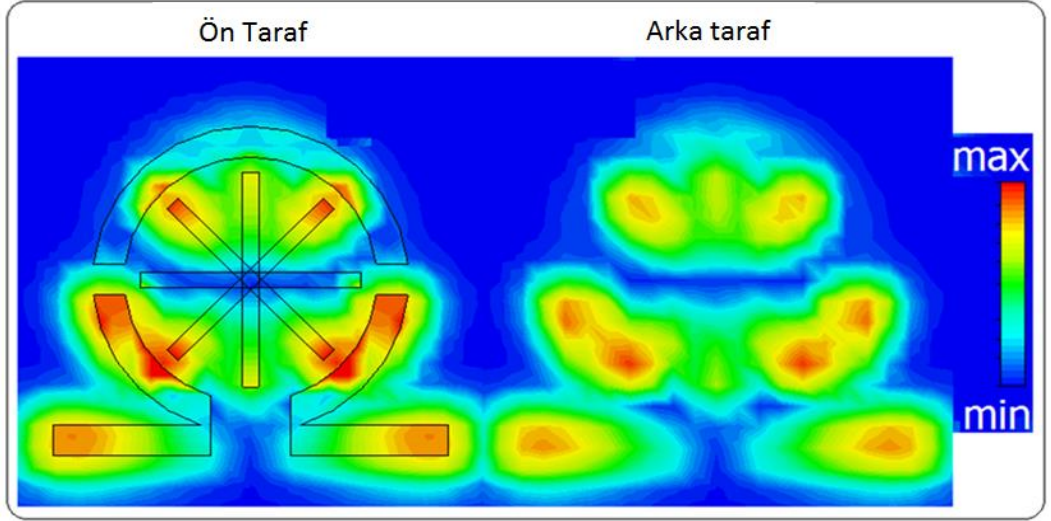
Şekil 4.65. Amaçlanan mikrodalga sinyal emici için yansıma ve emilim nümerik değerleri. İçteki şekil: Ω rezonatör için aralıksız metamalzeme sinyal emicinin yansıma karakteristiği



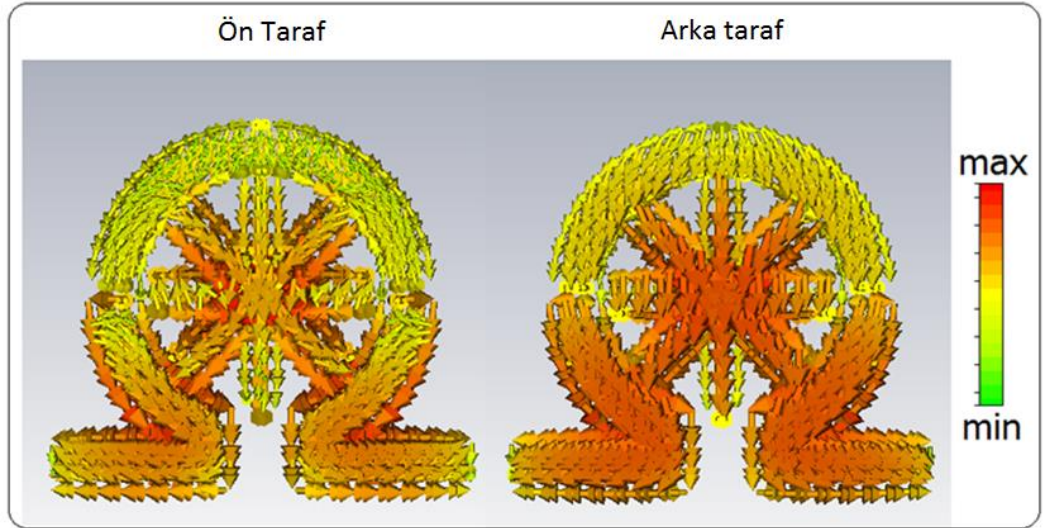
Şekil 4.66. Amaçlanan mikrodalga sinyal emici için ölçülen yansıma ve emilim değerleri

Rezonans frekanslarında yapının çalışma prensibinin fiziksel mekanizmasını daha iyi anlamak için, elektrik alan ve yüzey akım dağılımları 4.0 GHz rezonans frekansında incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 4.67 ve 4.68’te gösterilmektedir. Sırasıyla, sekizgen yıldız şeritlerin köşelerinde, Ω rezonatörün uçları, ve aralıklarda yüksek elektrik alan yoğunluğu gözlemlenmiştir. Elektrik alan, yıldız şeritler ile baskın olarak etkileşime girmiştir ve tüm polarizasyonlarda dipol gibi çalışan bağımsız elektrik cevabı sağlar. Sonuç olarak, yüzey elektrik alandan hariç olarak salınımla yüklenir. Böylece, bir manyetik dipol uyartıldı, manyetik bir cevap indükledi ve emilim rezonansı sağlandı. Şekillerden anlaşılacağı üzere, rezonatör üzerinde dairesel, paralel ve paralel olmayan akımlar gözlemlenmiştir. Dairesel ve paralel olmayan akımlar manyetik etkileşimden dolayı kaynaklanırken, paralel akımlar elektriksel etkileşimin oluşturduğu yükler tarafından kaynaklanmaktadır. Böylece, bahsedilen akımlar güçlü manyetik ve/veya elektrik etkileşimi tarafından meydana gelmiştir. Onlar gelen EM dalgaya uygun alan ile güçlü bir manyetik ve elektrik alan etkileşimini indükler. Böylece rezonans frekansında güçlü bir elektrik alanın oluşması sağlanır. Bu durum rezonans frekansında elektrik ve manyetik rezonansların görülmesiyle EM dalganın hemen hemen tamamen ($Z(\omega) = Z_0(\omega)$) eşleşmesini sağlayarak emilmesini sağlar (Li ve ark. 2013a). Böylece, EM enerji neredeyse sıfıra yakın yansıma ve maksimum emilim ile yapı içerisinde hapsedilmiş olur. Ek olarak, benzer gözlemler ayrıca 5.6 GHz diğer rezonans frekansında da görülmüştür (Şekil 4.69 ve 4.70). Şekilden anlaşılacağı üzere elektrik alan Ω rezonatörün üst taraflarına doğru

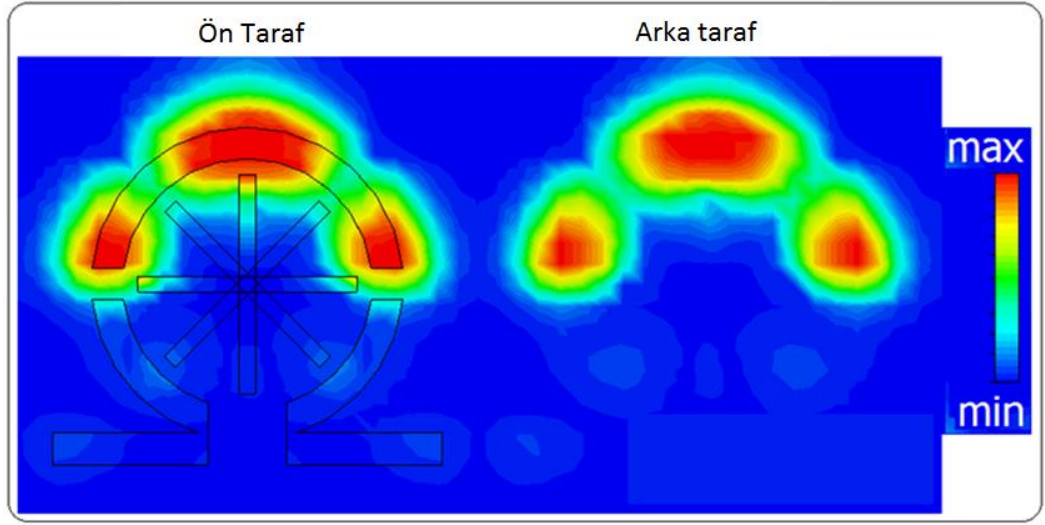
yoğunlaşmıştır. Aynı akım dağılımı ayrıca gözlemlenmiştir. Daha önce bahsedildiği üzere bu rezonans frekasında da elektrik ve manyetik rezonanslar görülmüştür. Fakat, bu rezonans modu öncekine göre karşılaştırıldığında daha güçlü değildir. İlk rezonansa göre daha düşük ve ortalama %80 emilim sağlandığı görülmüştür.



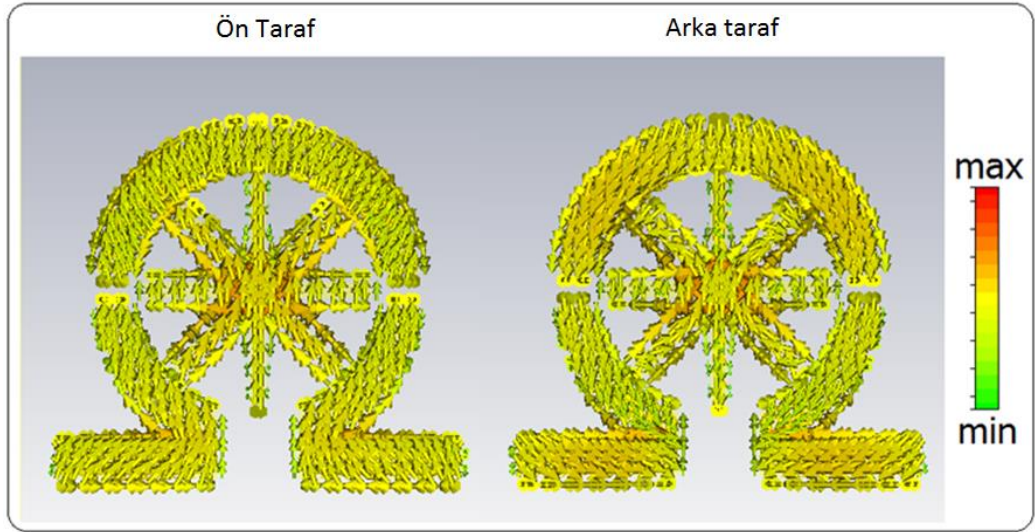
Şekil 4.67. Birim hücrenin 4.0 GHz rezonans frekansında ön ve arka kısmının elektrik alan dağılımının görünüşü



Şekil 4.68. Birim hücrenin 4.0 GHz rezonans frekansında ön ve arka kısmının yüzey akım dağılımının görünüşü



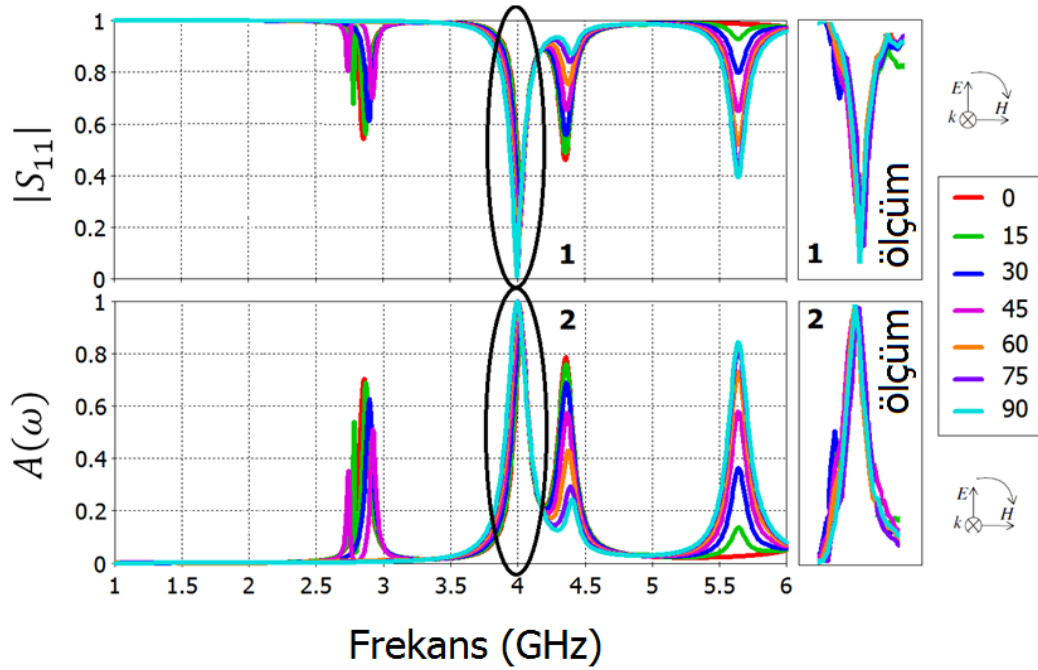
Şekil 4.69. Birim hücrenin 5.6 GHz rezonans frekansında ön ve arka kısmının elektrik alan dağılımının görünüşü



Şekil 4.70. Birim hücrenin 5.6 GHz rezonans frekansında ön ve arka kısmının yüzey akım dağılımının görünüşü

Bu araştırmalara ek olarak, sinyal emicinin gelen açı değişimi karşısında gösterdiği davranışlar incelenmiştir. Şekil 4.71 bahsedilen etki için yansıma ve emilimin frekans cevabını göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere amaçlanan sinyal emici gelen tüm açılı EM sinyallerde çok iyi emilim sağlanmaktadır. Özellikle, ilk rezonans için (4.0 GHz), frekans ile birlikte emilim değerinin değişimi çok küçük olmakta ve emilim

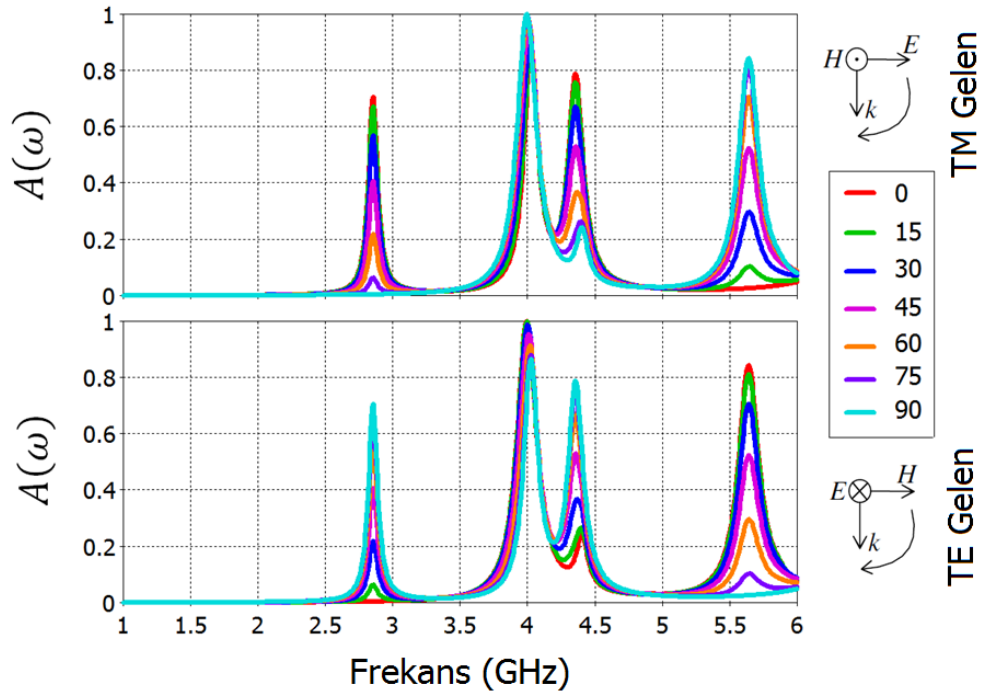
%99 oranlarında sağlanmaktadır. Bu çalışma ayrıca Şekil 4.71'in sağ panelinde görüleceği üzere deneysel olarak da gerçekleştirilmiştir. İkinci rezonans gelen açı ile birlikte azalmakta ve artmaktadır. Ayrıca görüleceği üzere frekans spektrumunda ek rezonanslar meydana gelmektedir. Bunlar gelen dalganın açılı gelmesi ile ilişkilendirilmektedir. Bu durumda, yansıyan dalganın ekleri şekillerden de anlaşılacağı üzere gelen EM dalganın dik ve/veya paralele komponentlerinin sıfır olmayan komponentlerinden dolayı ayrıca dönüştürülebilir.



Şekil 4.71. Farklı gelen açılar için yansıma ve emilim değerleri

Bir sonraki araştırmada ise sinyal emicinin frekans cevabı üzerindeki polarizasyon açısının etkisi analizi incelenmiştir. Polarize olmuş gelen EM dalganın *TE* ve *TM* durumunda farklı açılardaki emilim karakteristikleri nümerik olarak elde edilmiştir (Şekil 4.72). Şekilden görüleceği üzere normal gelende *TE* ve *TM* durumları için ~99 % oranında bir emilim sağlanmıştır. Ana rezonans frekansında gelen açı değiştiğinde *TE* durum için emilim ~%90 oranlarında olup azalma meydana gelirken, *TM* durum için emilim korunmuştur. Rezonans frekansındaki kayma önceki duruma göre çok küçük olmuştur. İkinci ve ek rezonanslar polarizasyon ve gelen açı durumuna bağlı olmakla birlikte artmış ve azalmıştır. Elde edilen nümerik sonuçlar göstermektedir ki; amaçlanan sinyal emici ana rezonans için polarizasyona ve gelen açının farklı durumları için de

hemen hemen bağılı değildir. Diğer rezonansların genlikleri bahsedildiği gibi polarizasyon ve gelen açıya bağılı olarak değişmektedir. Sonuç olarak, amaçlanan tasarım medikal görüntü işleme gibi önemli medikal uygulamalarında geniş bir aralıkta polarizasyondan ve gelen açıdan bağımsız olarak mükemmel sinyal emiliminde kullanılabilir. Çünkü farklı polarizasyonlarda ve farklı açılarda neredeyse mükemmel oranda emilim gerçekleşmektedir.



Şekil 4.72. *TE* ve *TM* polarizasyonlar için emilimin açısal bağımlılığının nümerik sonuçları

Çalışmanın bu bölümünde, Ω rezonatör ve çapraz yıldız şeritlerden oluşan metamalzeme sinyal emicinin emilim özellikleri detaylı olarak incelenmiş ve deneysel-nümerik sonuçları tartışılmıştır. Amaçlanan sinyal emici çok kolay konfigüre edilebilir bir geometriye sahip olup çalışan mikrodalga aralık için çok verimli sonuçlar göstermektedir. Deneysel sonuçlar, nümerik sonuçlar ile iyi olarak örtüşmektedir. 3.99 GHz rezonans frekansında elde edilen nümerik ve deneysel sonuçlar $\sim 99\%$ oranında emilim yapıldığını göstermektedir. Sinyal emicinin bant genişliği ve kalite faktörü performansı da bu sonuçları doğrulamaktadır. Ek olarak; yapı gelen EM dalganın

farklı polarizasyon ve gelen açı durumlarında gösterdiği emilim davranışları için de analiz edilmiştir. Elde edilen nümerik ve deneysel çalışmalar göstermektedir ki; bahsedilen farklı varyasyonlar için de tüm değişimlerde amaçlanan sinyal emici yapısı ~%99 % emilim göstermektedir. Ek olarak, elektrik alan ve yüzey akım dağılımları rezonansın çalışma mekanizmasını analiz etmek ve anlamak için sunulmuştur. Sonuç olarak, amaçlanan sinyal emici yapısı yüksek frekanslı yeni sinyal emici tasarımları için bir model rehber olarak sunulabilir ve medikal görüntü işleme, sensör, uzaktan haberleşme vb. birçok uygulamada potansiyel olarak kullanılabilir.

4.4.2. Süreksiz Çapraz Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı Gelen Açı Bağımsız Mükemmel GHz-THz Sinyal Emici

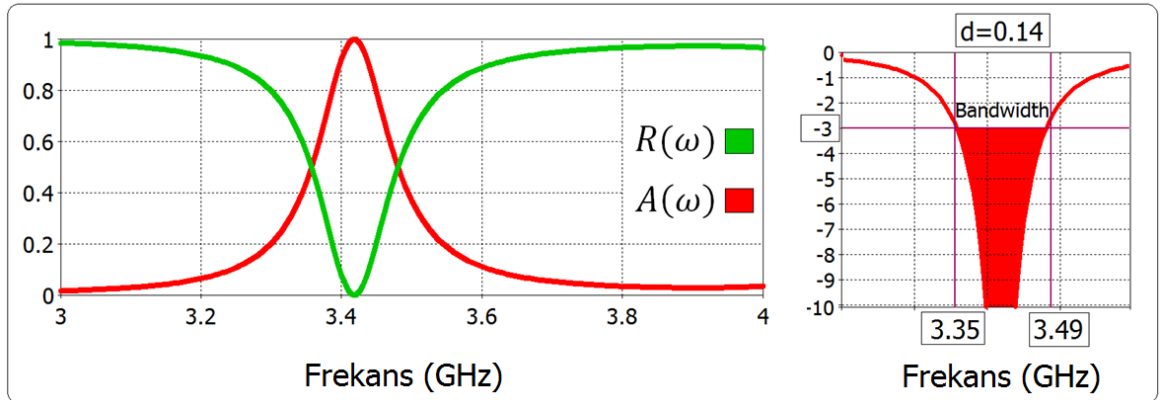
Bu çalışmada Şekil 3.10'daki materyal kullanılarak metamalzeme sinyal emici yapısı için nümerik ve deneysel çalışma yapılmıştır. Amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısı için EM nümerik çalışmalar yapılmıştır. Daha sonra, nümerik sonuçları doğrulamak için deneysel sonuçlar ile karşılaştırma yapılmış ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Deneysel çalışma için kompleks S- parametreleri ölçülüş ve metamalzeme sinyal emicinin karakteristiği deneysel olarak doğrulanmıştır.

Tasarlanan metamalzeme sinyal emici süreksiz çapraz yıldız şeklinde şeritler ve sıfıra çok yakın iletim gerçekleşmesi için metal tabaka içermektedir. Bu geometri dielektrik alttaşı üzerine monte edilmiş olup metal tabaka ise alttaşı arkasına yerleştirilmiştir.

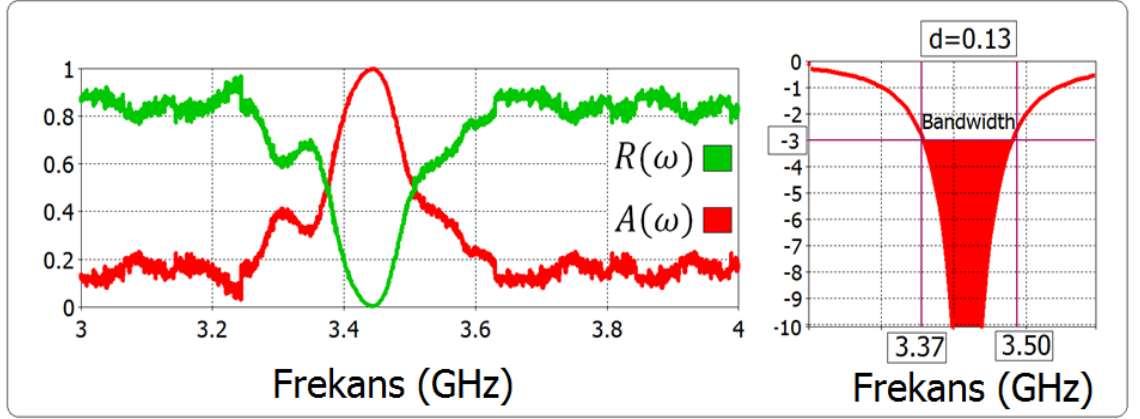
Yapının arkasındaki metal toprak tabakadan dolayı 3.42 GHz rezonans frekansında iletim, S_{21} , neredeyse sıfıra çok yakın bir değere sahiptir. Ek olarak amaçlanan metamalzeme sinyal emici için minimum yansıma, $R(\omega) = |S_{11}|^2$, ve maksimum emilim, $A(\omega)$ sağlanmıştır. Şekil 4.73 ve 4.74'te nümerik ve deneysel olarak amaçlanan metamalzeme sinyal emici için yansıma ve emilim değerleri sunulmuştur. Şekillerden de anlaşılacağı üzere nümerik sonuçlar ile deneysel sonuçlar birbiri ile iyi derece örtüşmektedir. 3.42 GHz rezonans frekansı için nümerik olarak 99.79% oranında emilim sağlanırken bu durum deneysel olarak 3.83 GHz frekansında 99.72% oranında elde edilmiştir. Aynı frekanslarda yansıma yaklaşık olarak sıfıra doğru gitmektedir. Deneysel ile nümerik sonuçlar arasındaki küçük farklılık üretim ve dielektrikteki

dağılmadan kaynaklanmaktadır. Alttaşının dielektrik dağılımı ve üretimdeki aksaklıklar deneysel çalışmada ihmal edilebilir. Daha iyi bir deney ortamında daha da iyi sonucun alınacağı aşikârdır.

Ek olarak amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısı için *FBW* hesaplamaları uygulanmıştır. Bu hesaplamalar amaçlanan yapının emilim kalitesini göstermektedir (Şekil 4.73 ve 4.74). Örneğin haberleşme sistemlerinde bant genişliği önemli rol oynamaktadır. Düşük ve yüksek frekanslar arasındaki aralık değeri onun merkez frekansına bölümü -3dB noktasında yapının *FBW* değerini vermektedir. Böylece *FBW*, $\Delta f/f_0$ formülü ile hesaplanabilir. Burada Δf yarım güçteki bant genişliği değerini, f_0 ise merkez frekans değerini ifade etmektedir. Bu parametreler nümerik çalışma için rezonansta $\Delta f = 0.14 \text{ GHz}$, $f_0 = 3.42 \text{ GHz}$ ve $FBW \approx 4.09\%$ olarak elde edilmiştir. Deneysel çalışma için aynı hesaplamalar yapılmış olup rezonansta elde edilen değerler; $\Delta f = 0.13 \text{ GHz}$, $f_0 = 3.44 \text{ GHz}$ ve $FBW \approx 3.77\%$ şeklindedir. Bu hesaplamalar amaçlanan modelin iyi kalitede bant genişliğine sahip olduğunu göstermektedir.

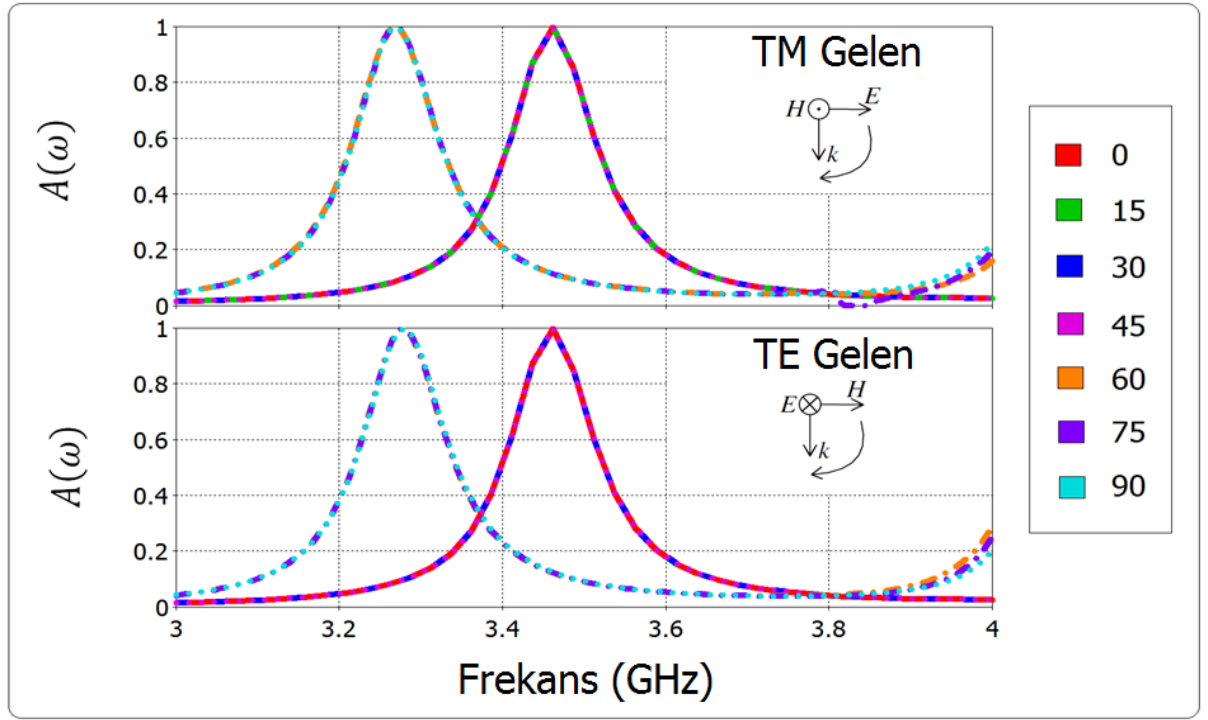


Şekil 4.73. Amaçlanan metamalzeme sinyal emici için nümerik yansım-emilim değerleri ve *FBW* hesaplamaları



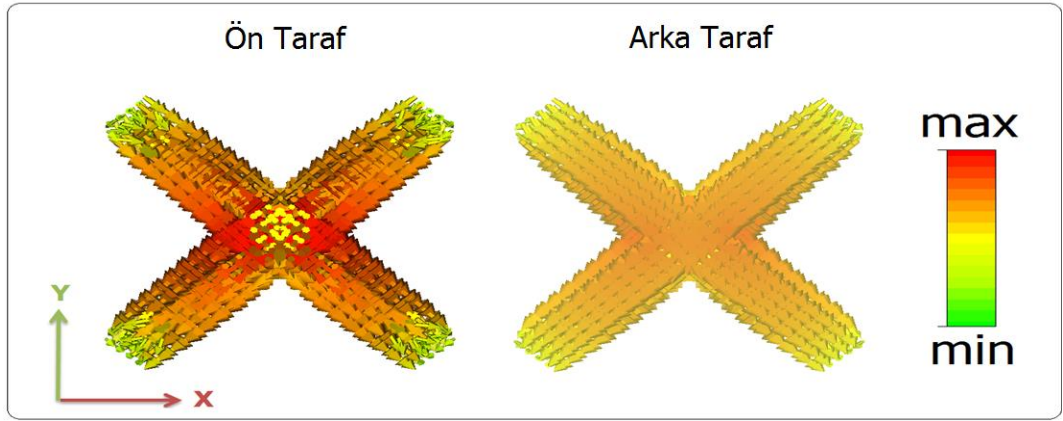
Şekil 4.74. Amaçlanan metamalzeme sinyal emici için deneysel yansım-emilim değerleri ve FBW hesaplamaları

Ek olarak, metamalzeme sinyal emici için farklı polarizasyon açılarının emilim üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 4.75 TE ve TM gelen dalga için polarize olmuş farklı açılardaki EM dalganın emilim değerlerini göstermektedir. Gelen açı değerleri 0° 'den 90° 'ye kadar değiştirildi. Şekilden de anlaşılabacağı üzere TE ve TM gelen dalga için 99.9% oranında emilim gerçekleştirilmiştir. Elde edilen nümerik sonuçlar göstermektedir ki, tüm polarizasyon açıları için geniş bir aralıkta metamalzeme sinyal emici yapısı çalışabilmektedir.

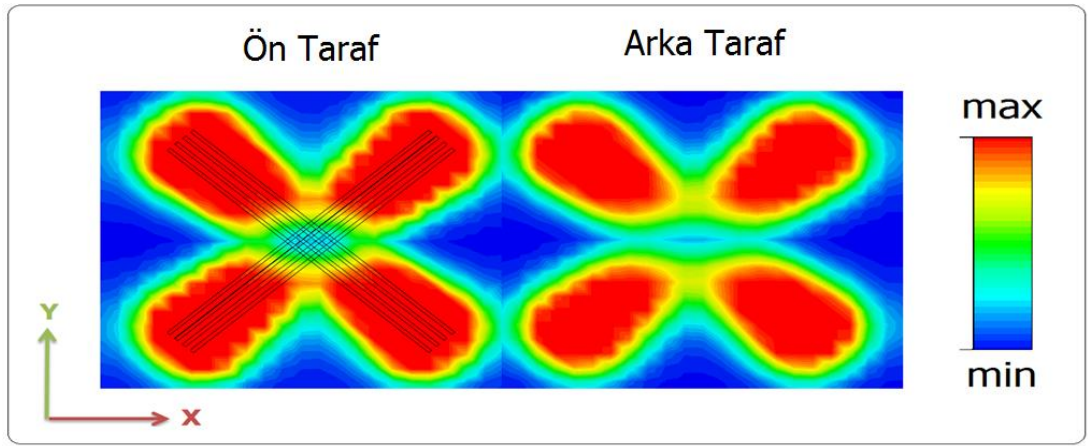


Şekil 4.75. Farklı açı değerlerinde *TE* ve *TM* gelen dalga için nümerik emilim değerleri

Bununla beraber, amaçlanan modelin çalışma prensibinin fiziksel mekanizmasını göstermek için, 3.42 GHz rezonans frekansında elektrik alan ve yüzey akım dağılımları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.76 ve 4.77’de gösterilmektedir. Çapraz yıldız şeklindeki şeritlerin köşelerinde elektrik alanın yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Elektrik alan güçlü olarak şeritler ile etkileşime girmiş olmakta ve tüm polarizasyonlar için dipol gibi çalışarak bağımsız elektrik alan cevabı sağlamaktadır. Görüleceği üzere rezonatör üzerinde paralel ve paralel olmayan akım dağılımları bulunmaktadır. Paralel olmayan akım dağılımları yapının gösterdiği magnetik tepkiden kaynaklanırken, paralel akımlar ile elektrik tepkiden kaynaklanmaktadır. Böylece bahsedilen akımlar güçlü magnetik ve/veya elektrik alan etkileşimi ile kontrol edilebilir.



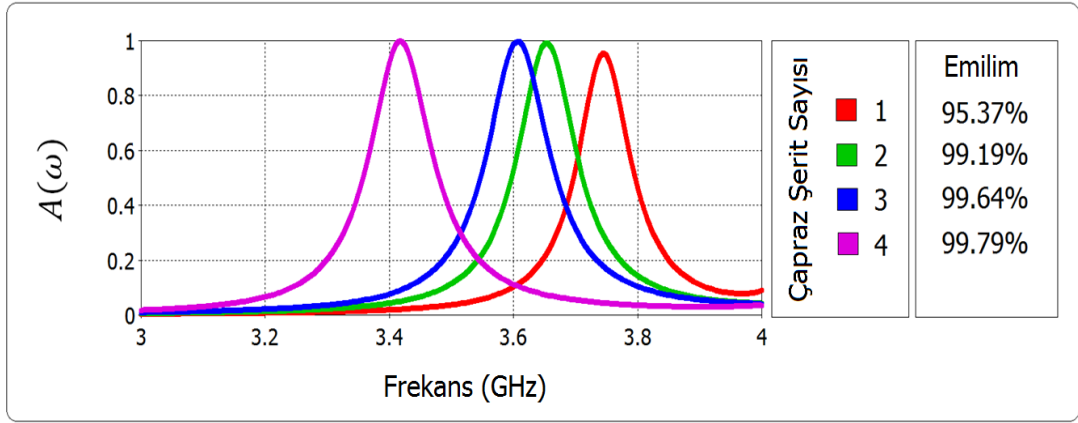
Şekil 4.76. 3.42 GHz rezonans frekansında yüzey akım dağılımlarının görünüşü



Şekil 4.77. 3.42 GHz rezonans frekansında elektrik alan dağılımlarının görünüşü

Amaçlanan yapının emilim performansını izlemek için, şeritlerin etkileri ayrıca gözlemlenmiştir. Bu ayrı çalışma, amaçlanan metamatlamaya sinyal emici yapısının çalışma mekanizmasını anlamak için daha da yararlı bir sonuç göstermektedir. Bu çalışmada şeritlerin etkilerini incelemek ve göstermek için şeritler ayrı ayrı ele alınmış ve gösterdikleri emilim değerleri çıkarılmıştır. Sonuçlar Şekil 4.78’de gösterilmektedir. Elde edilen frekans spektrumuna bakıldığında dört farklı konfigürasyon da birer rezonans değerine sahiptir. İlk konfigürasyon (tek çapraz yıldızlı, kırmızı) 3.74 GHz rezonans frekansında $S_{11} = 0.21$ genlik değerine sahip bir rezonans göstermektedir. İkinci konfigürasyon (iki çapraz yıldızlı, yeşil) 3.65 GHz rezonans frekansında $S_{11} = 0.089$ genlik değerine sahip bir rezonans göstermektedir. Emilim değeri ise yaklaşık olarak 99.19%’dur. Ek olarak, üçüncü konfigürasyon (üç çapraz yıldızlı, mavi) 3.61 GHz

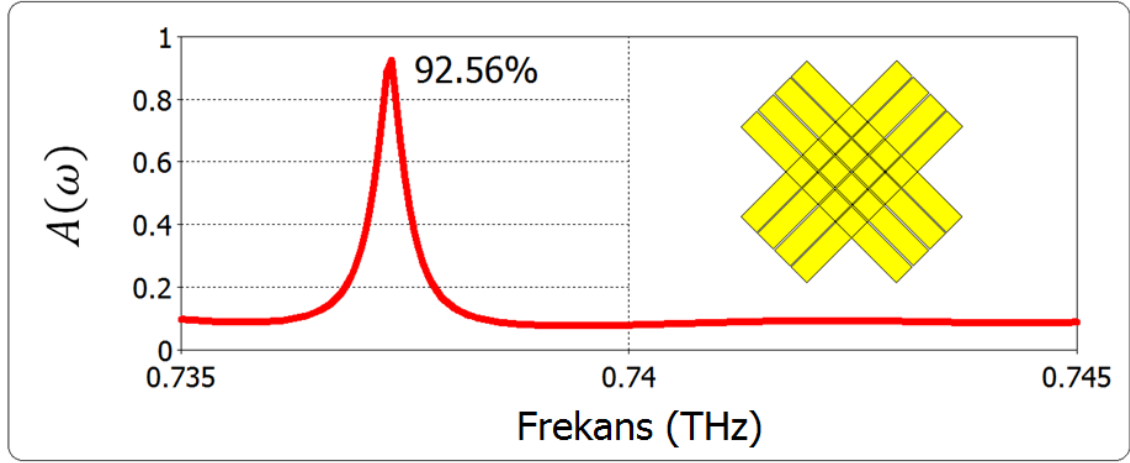
rezonans frekansında $S_{11} = 0.059$ genlik değerine sahip bir rezonans göstermektedir. Emilim değeri ise 99.64% değerindedir. Bunun anlamı bu farklı çapraz yıldız şeklindeki şeritler farklı frekanslarda mükemmel emilim göstermektedir. EM dalgadaki yansımanın azalması çapraz yıldız şeklindeki şeritlerin sayısına bağlı olarak değişmektedir. Sonuç olarak, çapraz yıldız şeklindeki şeritlerin sayısı üretilen metamalzeme sinyal emici yapısındaki gibi dörde çıkarıldığında, en yüksek oran emilim elde edilmektedir. Bu durum, çapraz yıldız sayılarının birbiri ile etkileşiminden dolayı kaynaklandığını göstermektedir. Ayrıca bir frekans kayması da meydana gelmiştir. Bu değişim yapının ölçülerinin ayarlanmasıyla ve optimizasyon ile minimize edilebilir.



Şekil 4.78. Amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısının motife edilmiş nümerik emilim değerleri

Bu bölümde ise, amaçlanan model için yüksek frekanslarda da mükemmel emilim yaptığı gösterilmiştir. Amaçlanan metamalzeme sinyal emici modeli çok basit bir konfigürasyona sahip olup böylece istenilen şekilde metamalzeme özellikleri de değiştirilebilmektedir. Böylece istenilen frekansta mükemmel olarak emilim sağlanabilir. Yapının metal ve dielektrik tabakaları için sırasıyla altın ve quartz (fused) kullanılmıştır. Tekrar ayarlanan yapı ölçüleri $l = 650 \text{ } \mu\text{m}$, $w = 65 \text{ } \mu\text{m}$, $d = 5 \text{ } \mu\text{m}$ (Şekil 4.79). Nümerik emilim değerleri gösterilmektedir. Yüksek frekanslı yapı 0.737 THz frekans değerinde 92.56% oranında emilim göstermektedir. Bu sonuç amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapı için rezonans frekansının istenilen şekilde ayarlanabileceğini göstermektedir. Ayrıca termal görüntü işleme, güneş hücresi ve daha birçok uygulama

alanları için farklı frekans bölgelerinde de metamalzeme sinyal emici olarak kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.79. Amaçlanan geometri için yüksek frekanstaki emilim karakteristiği

Bu çalışmada, metamalzeme sinyal emicinin emilim davranışı ve onun varyasyonları detaylı olarak incelenmiştir. Metamalzeme sinyal emici yapısı bakır tabaka ile topraklanmış ve farklı tipteki gelen açı ve polarizasyon açı durumları için bağımsızlıkları incelenmiştir.

Ek olarak, metamalzeme sinyal emici yapısı ve gösterdiği EM özellikleri analiz edilmiştir. Fiziksel olarak, terahertz frekans aralığı için ölçüleri ayarlanarak ayrıca uygulama gerçekleştirilmiştir. Rezonans durumunda, efektif empedans, $Z(\omega) = \sqrt{\mu(\omega)/\varepsilon(\omega)} = z_1 + iz_2$, serbest uzay empedansı, $Z(\omega) = Z_0(\omega) = 120\pi$, ile eşleşmiştir ve böylece yansıma minimize edilmiştir ve $A(\omega) = 1 - R(\omega)$ formülü kullanılarak emilim değerleri hesaplanmıştır. Mükemmel emilim yansımanın minimize edilmesi ile sağlanmaktadır. Bu, çalışmanın ana amacıdır. Sonuç olarak, amaçlanan model için emilim özelliklerinin hesaplamaları ve onun varyasyonları geliştirilen simülasyon çalışmaları ile deneysel ve nümerik olarak gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlardan da anlaşılacağı üzere, amaçlanan gelen açı bağımsız metamalzeme sinyal emici yapısı rezonans frekansında sağlık, sensör, medikal görüntü işleme gibi birçok önemli potansiyel uygulama alanına sahiptir.

Özellikle, metamalzeme sinyal emici yapısının farklı çeşitleri istenilen özel uygulamalar için de tasarlanabilir. Bu esneklik yapının mekanik ayarlanabilir

özelliğinden ileri gelmektedir. Ek olarak, yapı gelen EM dalganın önemli bir kısmını geniş bir frekans aralığında iletmez. Çünkü emilim gücü özellikle rezonans frekansında baskındır. Böylece geniş bir aralıkta emilim filtresi olarak da kullanılabilir.

Bu çalışmanın avantajları şu şekilde sıralanabilir: çalışılan metamalzeme sinyal emici rezonans frekansı ve farklı gelen açı değerlerinde mükemmel bir emilime sahiptir. Yapının mükemmel emiliminin yanında mekanik olarak kolay konfigüre edilebilir özelliği vardır. Bu özellikler optiksel/fiziksel kalınlık; çalışma frekansı; gelen açı; bakır toprak plaka ve empedans eşleşmesi olarak sıralanabilir.

Metamalzeme sinyal emici yapısının karakteristik davranışları ayrıca bu özelliklerin kontrol edilebilmesi ile istenilen şekilde ayarlanabilir. Fakat geleneksel sistemlerde bu özelliklerin kontrol edilebilmesi mümkün olmayabilmektedir. Bu özellikler efektif olarak istenilen özellikte yapıların inşasını da sağlamaktadır. Ek olarak, bu çalışma yukarıda bahsedilen uygulamaların yanında farklı uygulamalar için de konfigüre edilebilir.

Amaçlanan metamalzeme sinyal emici modeli 0^0 'den 90^0 'ye kadar farklı gelen açı ve durumlarda da mükemmel ve hassas emilim sağlamaktadır. Literatürdeki çoğu çalışma mükemmel oranda hassas olamamakta veya tüm gelen açı ve/veya polarizasyon açıları için hassasiyet gösterememektedir (Zhu ve ark. 2010b, Huang ve ark. 2013, Park ve ark. 2013).

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde nümerik sonuçların doğrulanması için deneysel çalışma da gerçekleştirilmiştir. 3.42 GHz rezonans frekansında 99.79% oranında deneysel olarak emilim sağlanmıştır. Bu emilim değeri nümerik olarak yakalanan değere çok yakındır.

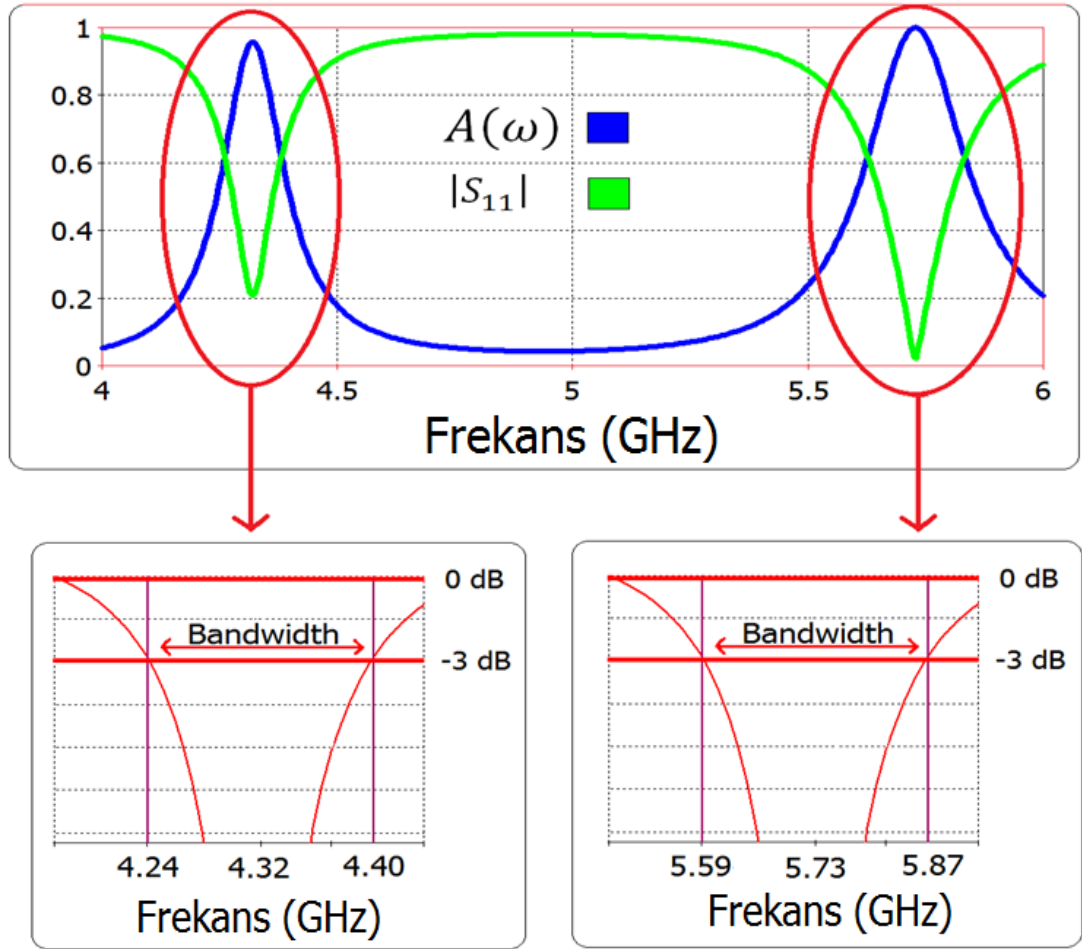
Ek olarak, gelen açı bağımsız ve mükemmel emilim sağlayan bu yeni tasarım metamalzeme sinyal emici literatürdeki birçok çalışmaya göre de daha kolay konfigüre edilebilir bir yapıya sahiptir (Wang ve ark. 2009a). Amaçlanan model sadece çapraz yıldız şeklinde şeritlerden oluşmaktadır ve sonuç olarak kolay konfigüre edilebilmesi, tüm gelen açılarda bağımsız olması, birçok önemli potansiyel uygulamalara entegre olabilir olması gibi daha birçok özellikten ötürü literatürdeki çalışmalara göre çok avantajlıdır.

Sunulan bu çalışma ayrıca istenilen diğer frekans bölgeleri için de kolay konfigüre edilebilir yapısından ötürü ayarlanabilir ve sağlık, sensör, medikal görüntü işleme vb. birçok uygulama için potansiyel teşkil etmektedir.

4.4.3. Aralıklı Halka ve Sekizgen Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı Çift Bantlı Gelen Açık ve Polarizasyon Bağımsız Sinyal Emici

Bu çalışmada Şekil 3.11'deki materyal kullanılarak metamalzeme sinyal emici yapısı için numerik ve deneysel çalışma yapılmıştır. Amaçlanan metamalzemeli sinyal emicinin performansını göstermek için deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlar iyi olarak örtüşmektedir. Şekil 4.80 ve 4.81'de yansıma ve emilim için nümerik ve deneysel sonuçlar gösterilmektedir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere 4.32 GHz ve 5.73 GHz rezonans frekansları için sırasıyla 95.6% ve 99.9% oranlarında emilim sağlanmıştır. Buna bağlı olarak ilk rezonans (4.32 GHz) için 0.21 ve ikinci rezonans (5.73 GHz) için 0.02 yansıma genlik değeri elde edilmiştir. Emilimdeki bu iki rezonans deneysel olarak 4.42 GHz ve 5.62 GHz için 90 % ve 99.7 % civarlarında gözlemlenmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere amaçlanan model ikinci rezonansa da emilim göstererek çift bantlı sinyal emici özelliği göstermektedir.

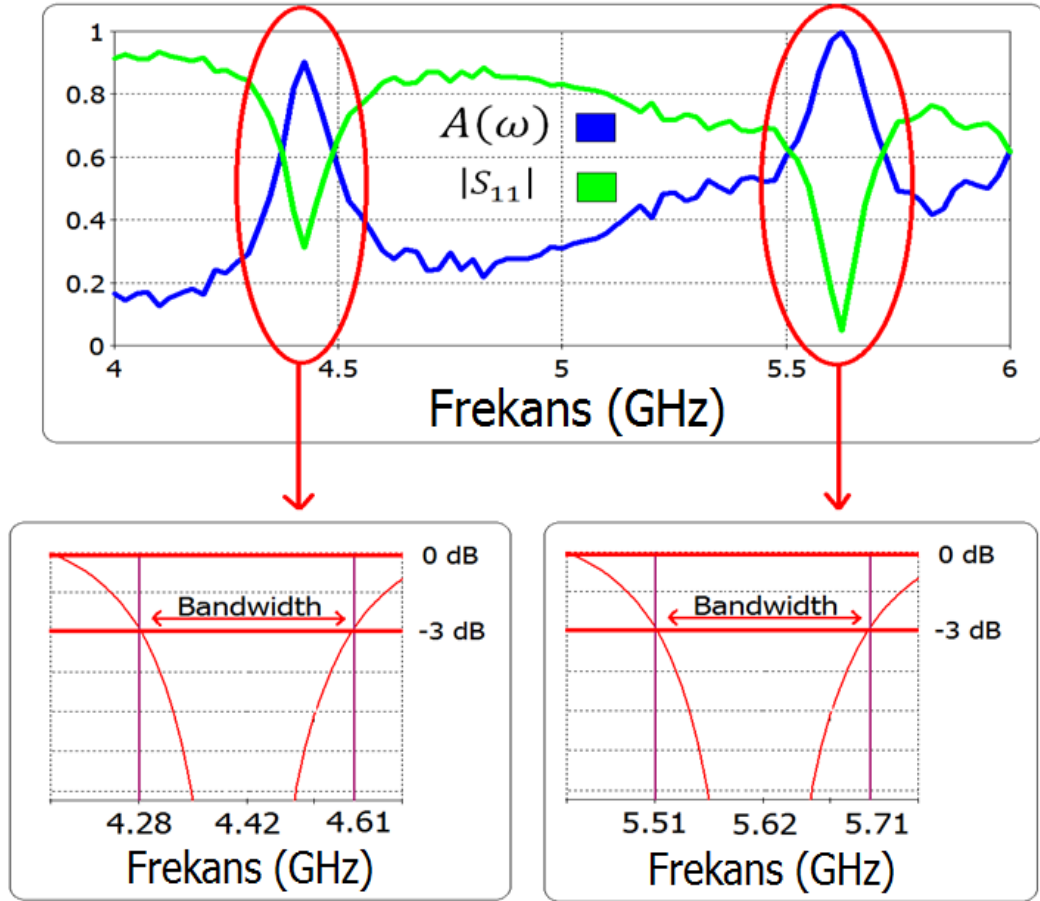
Şu not edilmelidir ki; elde edilen bulgulardaki nümerik ve deneysel sonuçlar arasındaki küçük farklılıklar fabrikasyon ve dielektrik dağılımından kaynaklanmaktadır. Bu durum deneysel aşamadan ötürü ihmal edilebilir bir ölçektir. Deneysel şartlar iyileştirildiği takdirde nümerik ve deneysel sonuçlar daha iyi bir oranda örtüşecektir (Sabah ve Urbani 2013). Literatürdeki birçok çalışmaya göre çok iyi oranda iki farklı frekans değerinde emilim sağlanmıştır literature (Zhu ve ark. 2010a, Huang ve Chen, 2011, Dincer ve ark. 2013b).



Şekil 4.80. Amaçlanan çift bantlı metamalzeme sinyal emicinin nümerik yansıma ve emilim değerleri

Elde edilen bulgulara ek olarak bant genişliği hesaplamaları da yapılmıştır. Çünkü bant genişliği hesaplamaları amaçlanan çift bantlı metamalzeme sinyal emicinin kalitesini de göstermektedir. Bu hesaplamalar özellikle haberleşme sistemi gibi uygulamalarda büyük önem teşkil etmektedir. Bundan dolayı FBW hesaplamaları amaçlanan yapı için de yapılmıştır (Şekil 4.80 ve 4.81). $FBW = \Delta f / f_0$ formülü ile hesaplanır. Burada Δf , yarı güçteki bant genişliğini ve f_0 ise merkez frekans değerini ifade etmektedir. Amaçlanan model için bu parametreler; nümerik çalışmada ilk ve ikinci rezonans için sırasıyla $\Delta f = 0.16 \text{ GHz} \& 0.28 \text{ GHz}$, $f_0 = 4.32 \text{ GHz} \& 5.73 \text{ GHz}$ and $FBW \approx 3.70\% \& 4.88\%$ olarak elde edilmiştir. Deneysel çalışma bulguları ise ilk ve ikinci rezonans için sırasıyla $\Delta f = 0.33 \text{ GHz} \& 0.20 \text{ GHz}$, $f_0 = 4.42 \text{ GHz} \& 5.62 \text{ GHz}$ and

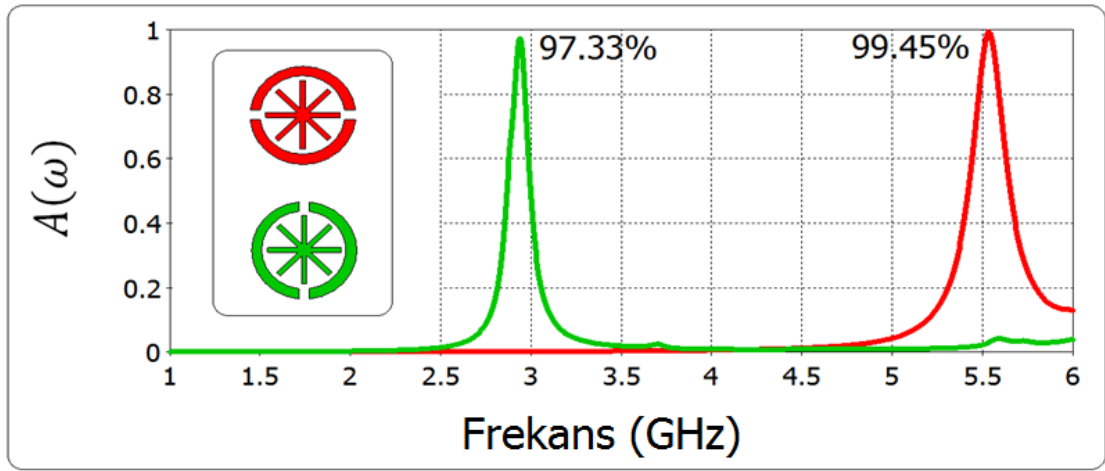
$FBW \approx 7.46\% \& 3.55\%$ şeklindedir. Bu hesaplamalar amaçlanan metamalzeme sinyal emici modelinin bant genişliği açısından iyi bir kaliteye sahip olduğunun göstergesidir.



Şekil 4.81. Amaçlanan çift bantlı metamalzeme sinyal emicinin ölçülen yansımaya ve emilim değerleri

Amaçlanan metamalzeme sinyal emicinin emilim performansının izlenmesi için ayrıca rezonatör üzerinde yatay ve dikey aralıkların etkileri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu ek çalışma rezonatör üzerinde kombine olan şekillerin emilim çalışma mekanizması hakkında önemli bilgi vermektedir. Elde edilen sonuçlar Şekil 5'te gösterilmektedir. Çalışılan spektrum için iki farklı konfigürasyon tek bir rezonansa sahiptir. İlk konfigürasyon (yatay aralıklı, kırmızı, dikey aralık kapalı) 5.54 GHz frekansında $S_{11} = 0.093$ genlikli bir rezonansa sahiptir. Emilim değeri ise 99.13%'tür. Ek olarak ikinci konfigürasyonda (dikey aralıklı, yeşil, yatay aralık kapalı) 2.94 GHz

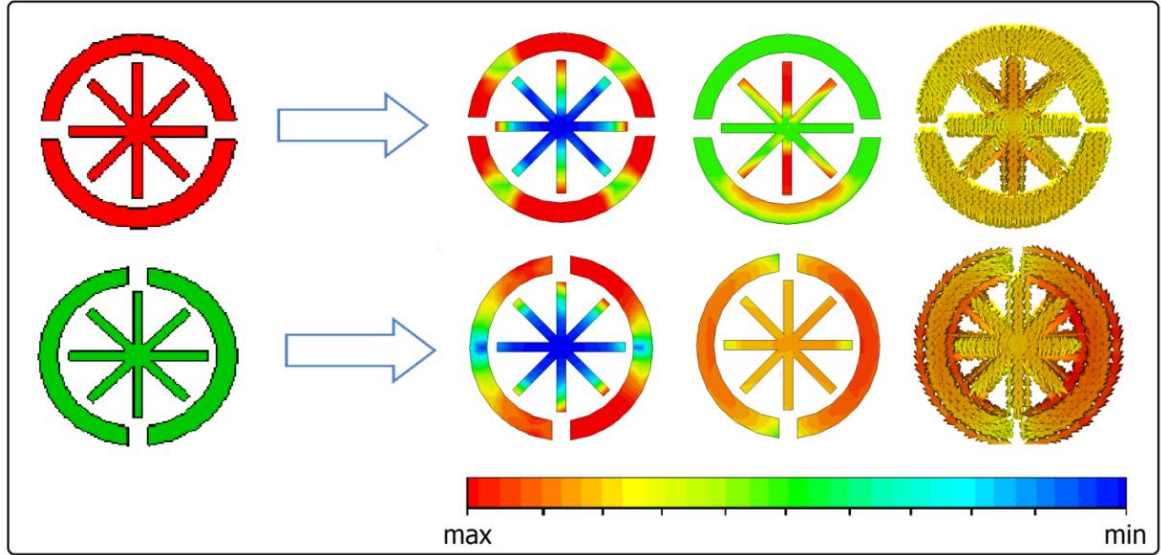
frekansında $S_{11} = 0.16$ genlikli bir rezonansa sahiptir. Emilim değeri ise 97.44%'tür. Bunun anlamı, birleşik bir yapıdan oluşan bu iki farklı yapı iki farklı frekansta rezonans sağlamaktadır. Ayrı ayrı değerlendirildiğinde ikisi de mükemmel emilime yakın değerde çalışmaktadır. Şekil 4.80 ve Şekil 4.82 incelendiğinde de görülecek ki; şekiller birleştiğinde ilk bantta göreceli bir azalma meydana gelmektedir. Bu durum rezonatörler tarafından oluşturulan alanların birbiri ile olan etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Bu azalma yapının ölçülerinin optimize edilmesi ile minimize edilebilir.



Şekil 4.82. Amaçlanan çift bantlı modife edilmiş metamalzeme sinyal emicinin nümerik emilim

Diğer bir araştırma ise, yatay ve dikey aralıklı bu rezonatörlerin çalışma ve emilim mekanizmalarını anlamak için elektrik alan, manyetik alan ve yüzeyel akım dağılımlarının incelenmesi üzerinedir (Şekil 4.83). Alan dağılımlarından da görüleceği üzere her bir rezonans modu birbiri arasında farklıdır. Ek olarak yatay aralıklar elektrik rezonanstan sorumlu iken, dikey aralıklar da manyetik rezonanstan sorumlu olduğu görülmektedir. Yani bu rezonatörler rezonans frekansında baskın olarak elektrik yada manyetik özelliği göstermektedirler. Baskın durum rezonatörün karakteristiğini belirlemektedir. Bu yüzey akım dağılımından da görülmektedir. Simetrik akımlar elektrik rezonansı meydana getirirken, dairesel ve simetrik olmayan akımlar ise manyetik rezonansı meydana getirmektedir. Elektrik ve manyetik rezonanstaki bu simetrik, simetrik olmayan ve dairesel akımlar gelen EM dalga ile güçlü olarak etkileşimde olurlar.

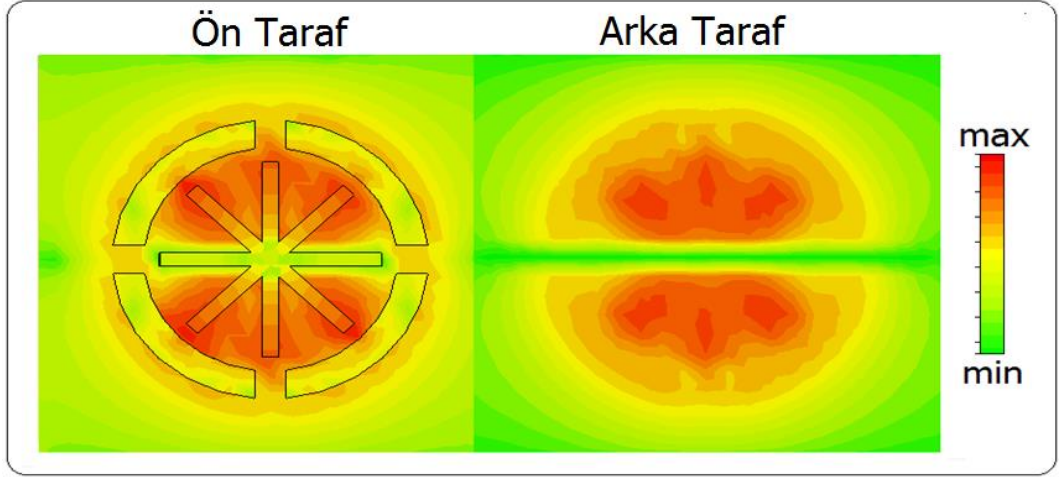
Gözlemlenen elektrik ve mağnetik rezonanslar tamama yakın bir derecede metamalzeme ile hava arasında empedans eşleşmesini ($Z(\omega) = Z_0(\omega)$) sağlarlar. Yani diğler bir deyişler EM enerjinin sınırlandırılmasından dolayı mükemmel emilim gerçekleştirilmiş olur.



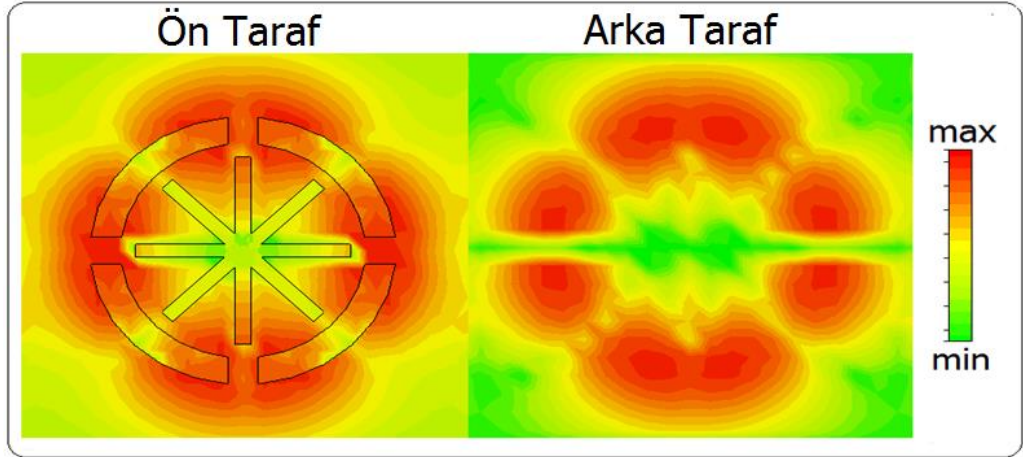
Şekil 4.83. Yatay ve dikey aralıklı rezonatörler için elektrik alan, mağnetik alan ve yüzey akım dağılımlarının nümerik gösterimi

Rezonans frekanslarında amaçlanan metamalzeme sinyal emicinin çalışma prensibinin fiziksel mekanizmasını anlamak için, elektrik alan ve yüzey akım dağılımları detaylı olarak Şekil 4.84-4.87’de gösterilmiştir. 4.32 GHz ve 5.73 GHz rezonans frekansları için ayrı ayrı elektrik alan ve yüzey akım dağılımları elde edilmiştir. Şekil 4.84 ve 4.85 ilk rezoans frekansı 4.32 GHz ve ikinci rezonans frekansı 5.73 GHz için elektrik alan dağılımlarını göstermektedir. Şekillerden de görüleceği üzere ilk rezonans için yatay şeritler hariç, rezonatörün köşelerinde elektrik alan yoğunluğunun yüksek olduğu görülürken ikinci rezonansta ise aralıklar ve halka üzerinde elektrik alanın yoğunluğunun daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Bunun nedeni daha önce anlatıldığı gibi rezonatörün her bir farklı modu farklı karakteristiğe sahip olmasındandır. İlk rezonans 4.32 GHz frekansında, elektrik alan yatay şeritlere nazaran yarım düzlemin üst ve alt tarafında daha çok yoğunlaşmıştır. Bu yüzden yapı uygulanan polarizasyon için elektrik dipol gibi hareket eder. İkinci rezonans için ise elektrik alanın daha çok aralıklar

çevresinde yoğunlaştığı gözlemlenmektedir. Dikkat edilmelidir ki; bu durum birleşen yapı içerisinde ilkinde göre daha iyi görünmektedir ve ilk rezonans için daha yüksek bir emilim (99.9%) sağlamaktadır. Bu, birleşen yapı içerisinde alanların pozitif olarak etkileşimine katkıda bulunduğunu gösterir.



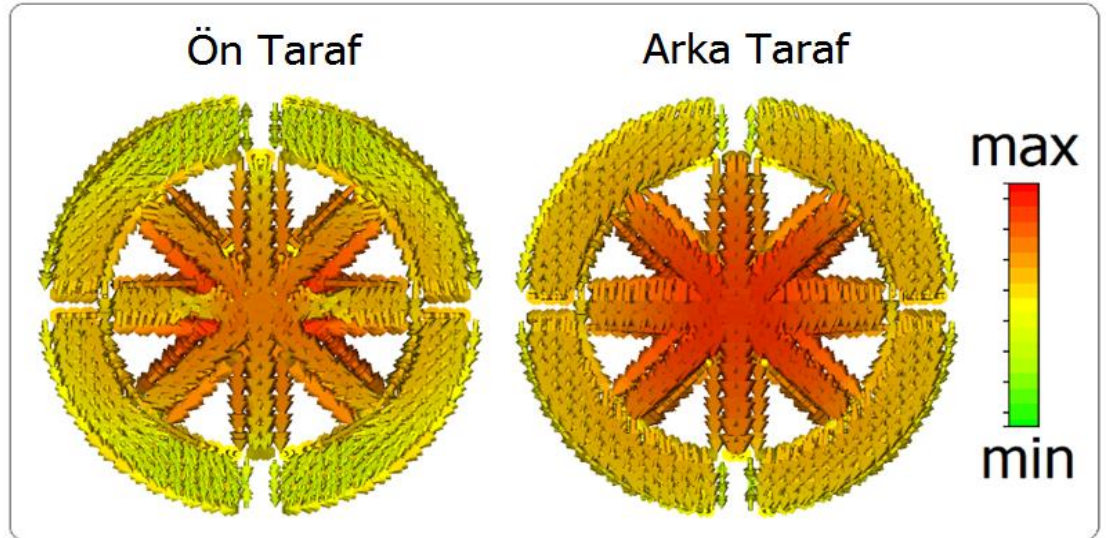
Şekil 4.84. 4.32 GHz ilk rezonans frekansı için elektrik alan dağılımı



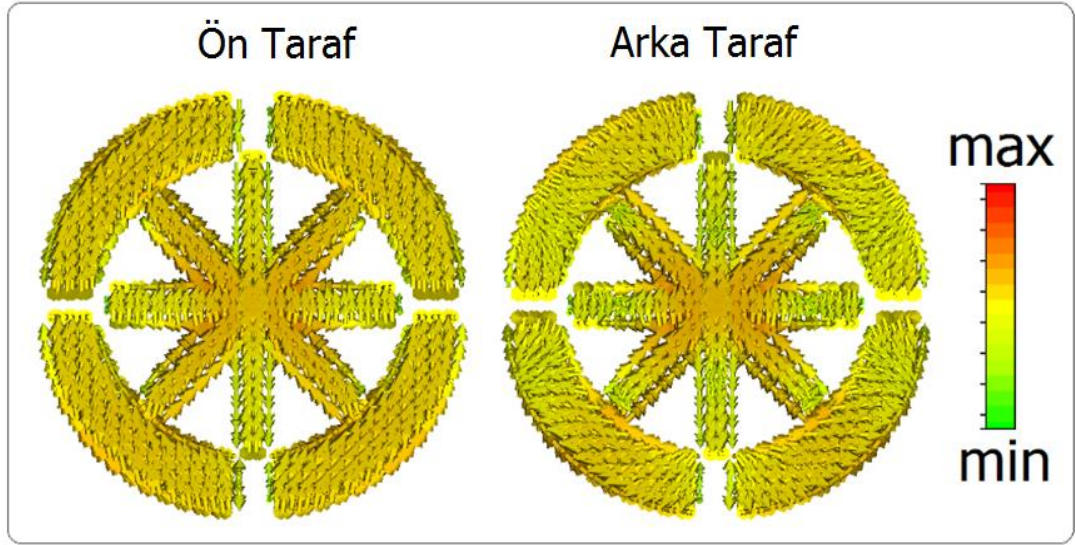
Şekil 4.85. 5.73 GHz ikinci rezonans frekansı için elektrik alan dağılımı

Şekil 4.86 ve 4.87, 4.32 GHz ve 5.73 GHz rezonans frekansları için sırasıyla yüzey akım dağılımlarını göstermektedir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere farklı karakterli rezonanslara sahip olduklarından farklı yüzey akım dağılımlarına sahiptirler. İlk rezonanstaki şeritler üzerindeki yüksek akım yoğunluğu elektrik rezonansının baskın

olduğunu gösterir. Şeritlerin polarizasyonu yüzey yüklerini ve akım dağılımı oluşturmaktadır. Akım dağılımı ve dolaşımı mağnetik uyartımı meydana gelmesini sağlar ve bu durum sonucu emilim yükselir. Akım dağılımı dairesel, simetrik ve simetrik olmayan akımlar içermektedir (Şekil 4.86). Akımlar, halkadan çok şeritler üzerinde daha yoğundur. Şeritler üzerindeki güçlü simetrik akımlar elektrik uyartımdan dolayı ve halka civarında paralel olmayan akımlar ise mağnetik etkiden dolayı kaynaklanmaktadır. Benzer gözlemler ikinci rezonans için de gözlemlenebilir. Tüm sistemin elektrik ve mağnetik uyartımları gelen dalganın elektrik ve mağnetik komponentleri ile eşleşir. Bu rezonanslar rezonans frekansında EM dalganın iyi derece empedans eşleşmesi sağlayarak emilim yapılmasını sağlar. Bundan dolayı metamalzeme sinyal emici içerisindeki gelen dalga sınırlanır ve yansımanın minimum, emilimin ise maksimum olması sağlanır. İkinci durumun akım şekli ise ilk rezonanstakine benzer şekildedir ve onun yoğunluğu daha oransaldır. Yapı önceki ek alan etkileşimlerine benzer nitelikte her iki elektrik ve mağnetik rezonansı meydana getirirler. Bu yüzden, ikinci emilim modu, ilkinin göre daha iyidir.

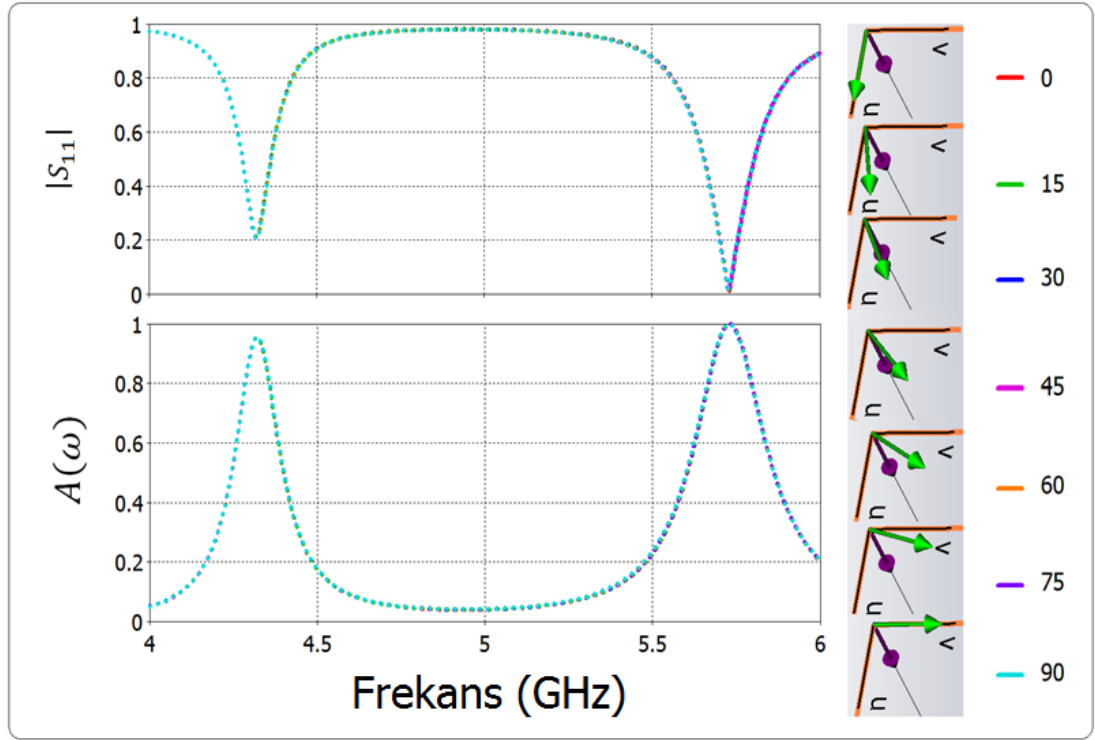


Şekil 4.86. 4.32 GHz ilk rezonans frekansı için yüzey akım dağılımı



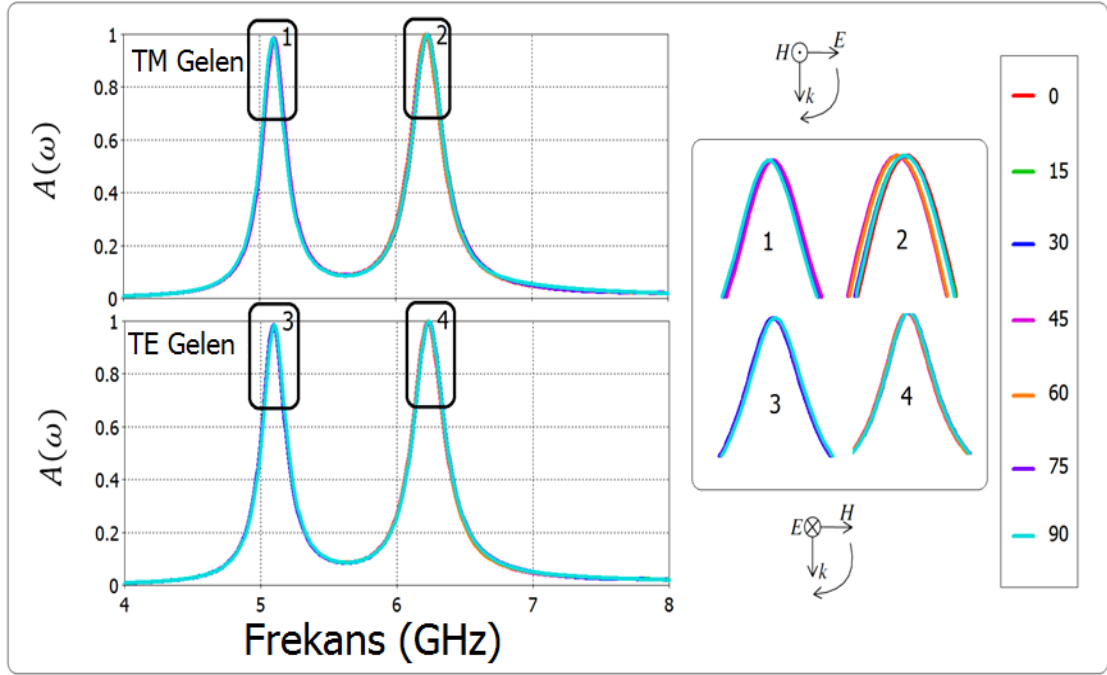
Şekil 4.87. 5.73 GHz ikinci rezonans frekansı için yüzey akım dağılımı

Ek olarak, çift bantlı metamalzeme sinyal emici için gelen ve polarizasyon açılarının etkisi gözlemlenmiştir. Gelen açı 15° adımlar ile 0° 'den 90° 'ye kadar döndürülmüştür. Şekil 4.88 farklı gelen açı değerleri için amaçlanan metamalzeme sinyal emicinin emilim performansını göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere amaçlanan model tüm gelen açılar için çok iyi emilim sağlamaktadır. Gelen açı değiştiğinde sadece çok küçük farklılıklar meydana gelmektedir. Bu durum amaçlanan modelin gelen açı değerinden bağımsız olarak mükemmel emilim yaptığını göstermektedir.



Şekil 4.88. Farklı gelen açılar için 0^0 'den 90^0 'ye kadar nümerik yansıma ve emilim değerlerinin karakteristiği

Bu çalışmalara ek olarak TE ve TM polarize olmuş EM dalgalar için frekansın bir fonksiyonu olarak dalga 0^0 'den 90^0 'ye kadar döndürülmüş ve emilim bağımlılığı incelenmiştir (Şekil 4.89). Emilim değerleri Çizelge 4.1'de detaylı olarak gösterilmektedir. İlk rezonans ve ikinci rezonans sırasıyla 5.10 GHz ve 6.23 GHz civarlarında meydana gelmektedir. Frekans kayması, polarizasyon durumunun değişmesi ile açıklanabilir. Şekilden de görüleceği üzere TE ve TM polarize olmuş dalgalar arasında polarizasyon açısı değiştiğinde çok küçük ihmal edilebilecek düzeyde farklılıklar meydana gelmektedir. Çünkü amaçlanan model çok yönlü ve polarizasyondan bağımsız esnek bir yapıya sahiptir. Elde edilen nümerik sonuçlar göstermektedir ki; çift bantlı metamalzeme sinyal emici geniş bir aralıkta polarizasyondan ve gelen açıdan farklı olarak bağımsız mükemmel emilim sağlamaktadır.



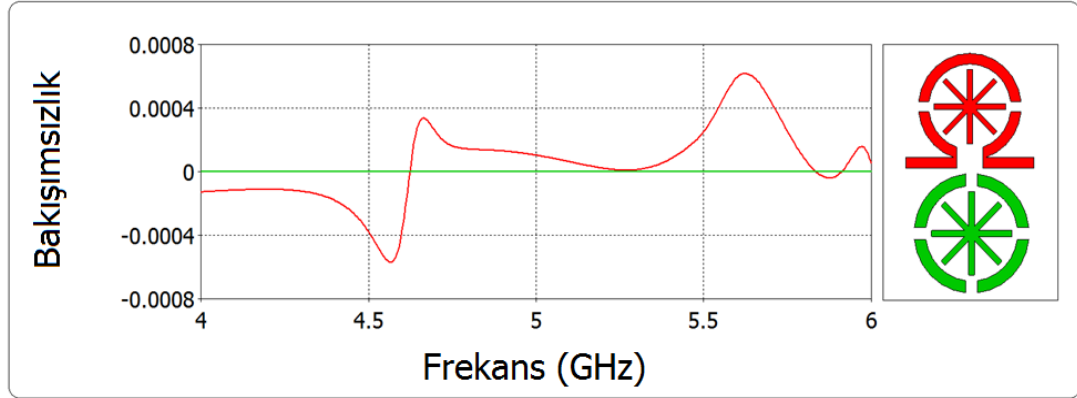
Şekil 4.89. *TE* ve *TM* polarize olmuş dalgalar için nümerik açısal bağımlılık özellikleri

Çizelge 4.1. *TE* ve *TM* polarize olmuş dalgalar için nümerik açısal emilim değerleri

Açı (dereceler)	TE Dalga		TM Dalga	
	İlk Rezonans	İkinci Rezonans	İlk Rezonans	İkinci Rezonans
0°	98,46 %	99,91 %	98,46 %	99,89 %
15°	98,49 %	99,81 %	98,58 %	99,88 %
30°	98,56 %	99,93 %	98,52 %	99,65 %
45°	98,51 %	99,96 %	98,50 %	99,93 %
60°	98,45 %	99,97 %	98,53 %	99,94 %
75°	98,47 %	99,72 %	98,56 %	99,90 %
90°	98,37 %	99,91 %	98,41 %	99,94 %

Amaçlana çift bantlı sinyal emici model, 0^0 ve 90^0 arasında mükemmel hassasiyet ile polarizasyondan ve gelen açıdan bağımsız emilim sağlamaktadır. Literatürdeki çoğu çalışma sadece bazı açılarda polarizasyondan ve gelen açıdan bağımsız veya düşük hassasiyette bağımsız olabilmektedir (Zhu ve ark. 2010a, Huang ve ark. 2013). Ek olarak, bu yeni çift bantlı polarizasyondan ve gelen açıdan bağımsız metamalzeme sinyal emici, literatürdeki birçok çalışmadan da daha kolay konfigüre edilebilir bir yapıya sahiptir. Bu durum aynı zamanda mekanik ayarlanabilirliği de sağlamaktadır. Bundan dolayı amaçlanan metamalzeme sinyal emici çok sayıda avantaja sahip olup, çift bantlı olarak literatürdeki birçok çalışmadan daha hassas şekilde polarizasyondan ve gelen açıdan bağımsız olarak sinyali emebilmektedir.

Yapılan bu çalışmalar ek olarak ayrıca, aralıklı halka rezonatörlü ve sekizgen yıldız şekil tabanlı metamalzeme sinyal emicinin bakışimsızlık değerleri de elde edilmiştir (Şekil 4.90). Şekilden de görüldüğü üzere ilk yapı tüm frekans aralıkları için izotropik iken, ikinci yapı doğal malzemeler gibi optiksel aktiviteye sahiptir. Tabii ki her iki izotropik ve izotropik olmayan yapılar ile mükemmel emilim sağlamak mümkündür.



Şekil 4.90. Amaçlanan model ve referans [41] çalışması için nümerik bakışimsızlık değerleri

Metal tabaka ile topraklanmış metamalzemenin karakteristiğini belirlemek için tüm sistemin gelen ve polarizasyon açı bağımlılığı emilim özellikleri incelenmiştir. Genel itibariyle yapısal simetriden dolayı ve her iki elektrik ve manyetik rezonansın etkileşiminden ötürü sinyal metamalzeme emici gelen açıdan bağımsızlık özelliği göstermektedir. Tüm sistemin fiziksel davranışı bir diğer önemli noktadır. Emilim ve

havanın empedans eşleşmesi ve elektrik rezonansa karşılık mağnetik rezonansın etkileşimi bu tip yapılardaki çok yüksek emilimi getirmiştir. Bununla beraber, emilimin genliğini, rezonans sayısını ve polarizasyon bağımlılığını ayarlamak doğru yapısal geometrinin seçimi ile mümkündür (Zhu ve ark. 2010a). Örneğin, bir birim hücredeki değişken ölçüler ve yapısal simetrik geometri gelen açıdan ve polarizasyondan bağımsız olarak bir rezonatörün seçimi ile iki veya daha fazla bantta emilim elde edilebilir (Park ve ark. 2013, Li ve ark. 2010c). Ek olarak, amaçlanan mekanizma terahertz gibi farklı frekans bölgeleri için de adapte edilebilir.

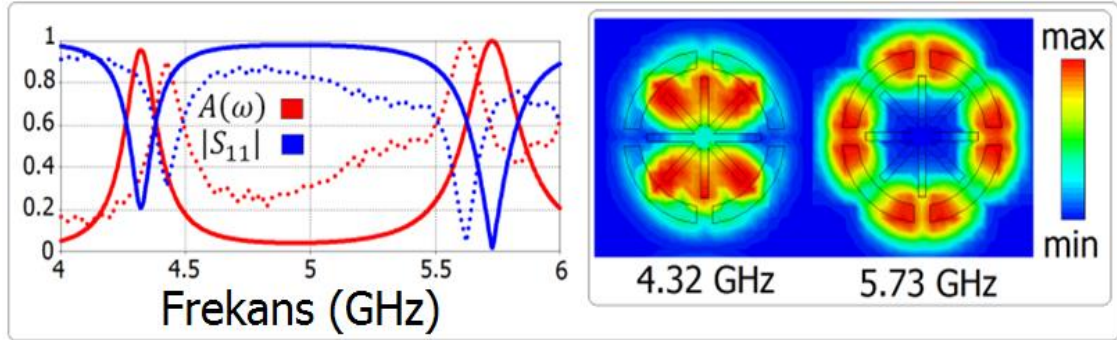
Çift bantlı polarizasyon ve gelen açı bağımsız sinyal emici nümerik ve deneysel olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel olarak iyi örtüşür düzeyde doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, araştırılan metamalzeme sinyal emici rezonans frekanslarında gelen açıdan ve polarizasyondan bağımsız olarak gelen sinyali mükemmel olarak emmekte ve yansımayı minimize etmektedir. Polarizasyon ve gelen açı durumlarından ötürü bazı hallerde, emilim değeri yükselebilmektedir. Doğrulan ve detaylı olarak araştırılan metamalzeme sinyal emici yapısı sağlık, sensör, medikal, görüntü işleme vb. uygulamalar için iyi bir potansiyel teşkil etmektedir.

4.4.4. Aralıklı Halka ve Sekizgen Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı Multi Bantlı Ayarlanabilir Mükemmel Mikrodalga Sinyal Emici

Bu çalışmada Şekil 3.11'deki materyal kullanılarak metamalzeme sinyal emici yapısı için nümerik ve deneysel çalışma yapılmıştır. Şekil 4.91'de (sol taraf) nümerik ve deneysel yansıma-emilim değerleri sunulmaktadır. 4.42 GHz ve 5.62 GHz rezonans frekanslarında olmak üzere deneysel olarak sırasıyla 90 % ve 99.7 % oranlarında emilim sağlanmıştır. Buna karşılık simülasyon çalışmasında ise 4.32 GHz ve 5.73 GHz olmak üzere sırasıyla 95.6 % ve 99.9 % emilim değerleri elde edilmiştir. Şu not edilmelidir ki; elde edilen bulgulardaki nümerik ve deneysel sonuçlar arasındaki küçük farklılıklar fabrikasyon ve dielektrik dağılımından kaynaklanmaktadır. Bu durum deneysel aşamadan ötürü ihmal edilebilir bir ölçekte dir. Deneysel şartlar iyileştirildiği takdirde nümerik ve deneysel sonuçlar daha iyi bir oranda örtüşecektir. Ek olarak, amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısı için *FBW* hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalar özellikle haberleşme sistemi uygulamalarında yapının performans kalitesi açısından büyük önem arz etmektedir. $FBW = \Delta f / f_0$ formülü ile hesaplanır. Burada, Δf yarı güçteki bant

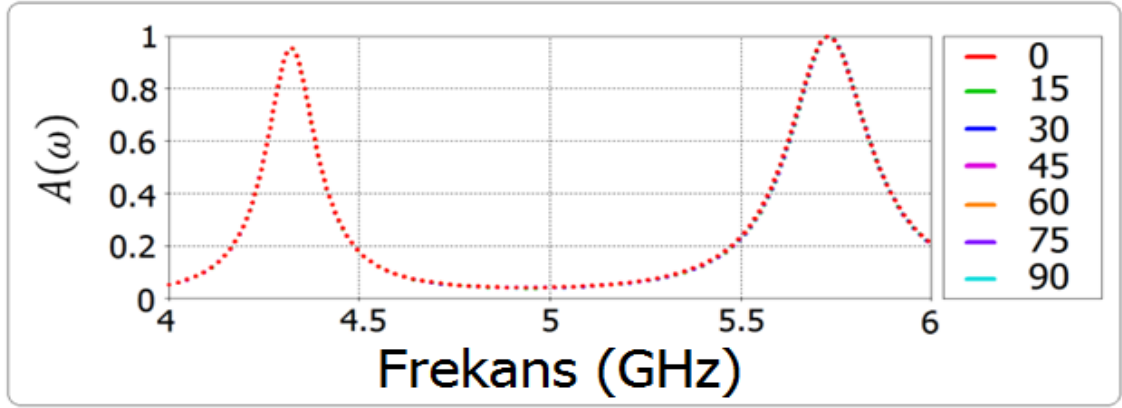
genişliğini, f_0 ise merkez frekansı ifade etmektedir. Bu parametreler nümerik çalışmada sırasıyla ilk ve ikinci rezonans frekansları için; $\Delta f = 0.16 \text{ GHz} \& 0.28 \text{ GHz}$, $f_0 = 4.32 \text{ GHz} \& 5.73 \text{ GHz}$ and $FBW \approx 3.70\% \& 4.88\%$ olarak, deneysel çalışmada ise : $\Delta f = 0.33 \text{ GHz} \& 0.20 \text{ GHz}$, $f_0 = 4.42 \text{ GHz} \& 5.62 \text{ GHz}$ and $FBW \approx 7.46\% \& 3.55\%$ olarak elde edilmiştir (Dincer ve ark. 2013b).

Ek olarak, amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısının fiziksel mekanizmasını anlamak için, rezonans frekanslarındaki elektrik alan dağılımları elde edilmiştir (Şekil 4.91 (sağ taraf)). İlk rezonans için yatay şeritler dışındaki rezonatör üzerinde elektrik alan dağılımı yoğunlaşırken, ikinci rezonans için daha çok halka üzerinde yoğunlaşma meydana gelir. Bunun anlamı rezonansların karakterlerinin birbirinden farklı olmasındandır. Yapının elektrik alan ile etkileşime girmesi her bir durum için dipol veya osilatör gibi farklı moda bağlı olarak farklılık göstermektedir.



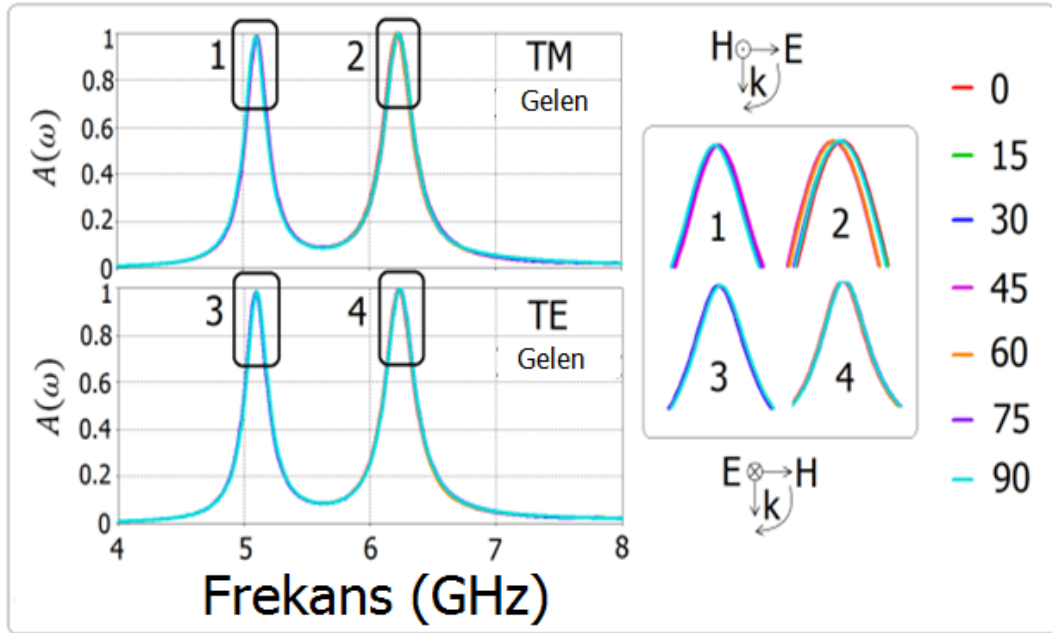
Şekil 4.91. Amaçlanan çift bantlı metamalzeme sinyal emici için nümerik (devamlı çizgi) ve ölçülen (noktasal çizgi) yansıma-emilim değerleri

Ek olarak, emilim üzerinde polarizasyon açısının etkileri de ayrıca incelenmiştir (Şekil 4.92). Gelen EM dalganın polarizasyon açısı 0° 'den 90° 'ye kadar değiştirildiğinde, emilim de değişmemektedir. Böylece gelen polarizasyon açısından bağımsız olarak yapı mükemmel oranda emilim gerçekleştirmektedir. Bu amaçlanan metamalzeme sinyal emici için ek bir avantaj sunmaktadır.



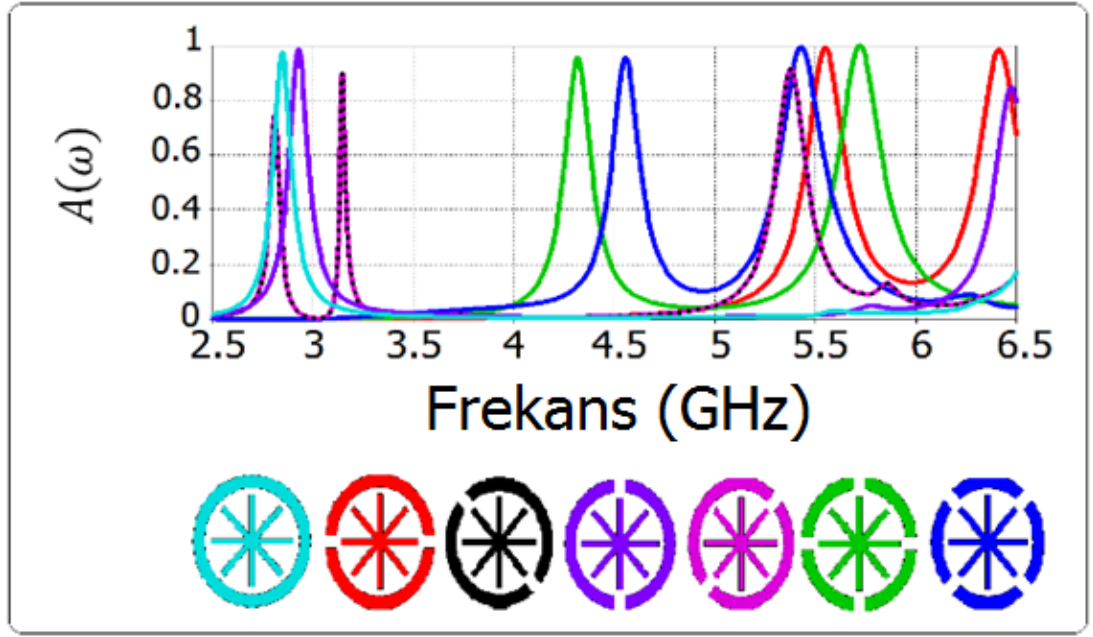
Şekil 4.92. Farklı polarizasyon açılarında nümerik emilim değerleri

Bu kapsamda diğer yapılan bir çalışma da amaçlanan metamalzeme sinyal emici için TE ve TM gelen dalga durumları için farklı açı değerlerindeki bağımlılığı incelenmiştir (Şekil 4.93). Aynı şekilde dalganın her iki durumu için gelen açı 0° 'den 90° 'ye kadar değiştirildiğinde yapı üzerinde emilim neredeyse değişime uğramaksızın mükemmel oranda sağlanmaktadır. Yapının sunmuş olduğu polarizasyon ve gelen açı bağımsızlığı ek avantajları yapının simetrik özelliğinden ve tasarımından kaynaklanmaktadır.



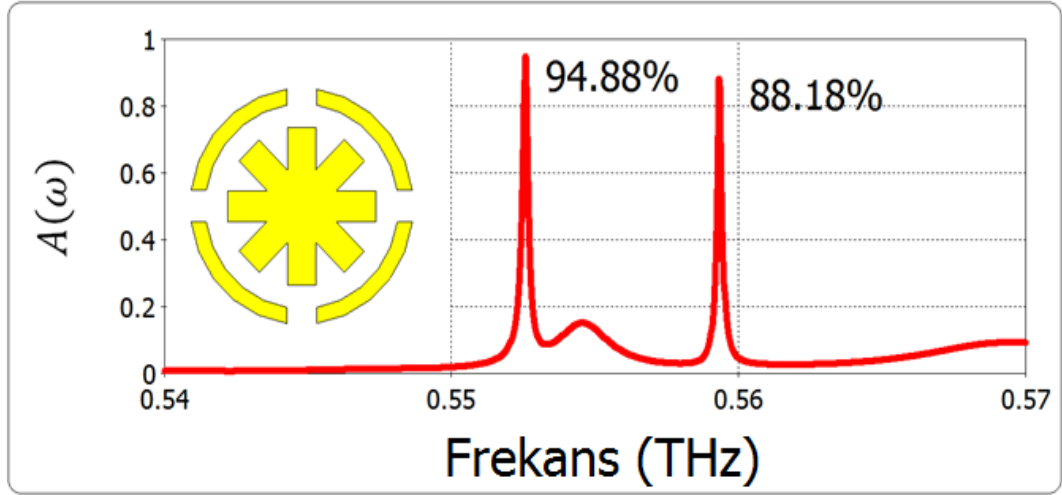
Şekil 4.93. TE ve TM gelen dalga durumları için farklı açı değerlerindeki nümerik emilim değerleri

Yapılan bu araştırmalara ek olarak; amaçlanan metamalzeme sinyal emicinin esnek ve kolay konfigüre edilebilir yapısını göstermek için mekanik ayarlanabilirlik özelliği incelenmiştir. Rezonatör üzerindeki aralıkların pozisyonların ayarlanması ile birlikte çok sayıda bantta rezonans sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar şekil 4.94'te gösterilmektedir. Her bir konfigürasyon ayrı bir renk ile işaretlenmiştir. alışan frekans spektrumu için, tüm konfigürasyonlar en az bir rezonans değeri sahtir. Konfigürasyonlar uygulanan EM dalgaya göre simetrik ve simetrik olmayan diye kategorize edilebilir. Simetrik olanlar içerisindeki kapalı halka (açık mavi) bir rezonans değeri sahtirken, diğerleri iki rezonans değeri sahtir. Simetrik olmayan konfigürasyonlarda ise (siyah ve pembe) üç ayrı rezonans değeri sahtirler. Rezonansların spektral durumlarına bağlı olarak aralıkların pozisyonları da değişmektedir. Her bir konfigürasyon şekilden de anlaşılacağı üzere en az 99.9 % emilim değeri sahtir. Simetrik olmayan konfigürasyonlardaki çok bantlı karakterli rezonansların nedeni aralıklarda elektrik alan etkileşiminin kaybolmasından kaynaklanıyor olabilir. Ek olarak; ayarlanabilirlik rezonans frekans değeriindeki kapasitans ve endüktans değeriinin değiştirilmesi ile açıklanabilir. Sonuç olarak; amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısı polarizasyondan ve gelen açıdan bağımsız olarak mükemmel oranda emilim sağlarken aynı zamanda mekanik olarak ayarlanabilirlik özelliğine sahtir. Böylece yapı konfigürasyonu modifiye edilerek istenilen frekansta ve bantta rezonans sağlanabilmektedir.



Şekil 4.94 Modifiye versiyonları için nümerik emilim değerleri

Son olarak; amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısı için diğer frekans bölgelerinde de mükemmel oranda emilim sağladığını göstermek için terahertz uygulaması gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.95). Bu amaçla, metamalzeme sinyal emici yapısının ölçüleri yüksek frekans için modellenmiştir. Bu yol ile, metal olarak gümüş, dielektrik olarak da Quartz (fused) kullanılmıştır. Tekrar revize edilen ölçüler (Şekil 4.91 için); $a = 750 \text{ um}$, $b = 500 \text{ um}$, $c = 650 \text{ um}$, $d = 100 \text{ um}$, $e = 96 \text{ um}$ şeklindedir. Şekil 6’da THz uygulaması için elde edilen mümerik emilim değerleri gösterilmektedir. Sırasıyla 0.552 THz ve 0.559 THz rezonans frekansları için 94.88 % ve 88.18 % oranlarında emilim elde edilmiştir. Bu çalışma önerilen metamalzeme sinyal emici yapısının istenilen frekans bölgesinde de ayrıca çalışabileceğini göstermiştir.



Şekil 4.95 Yüksek frekans tasarımı için nümerik emilim değerleri

Bu çalışmada polarizasyondan ve gelen açıdan bağımsız olarak mükemmel emilim sağlayabilen metamalzeme sinyal emici yapısından mekanik ayarlanabilirlik özelliği ile nasıl çok sayıda bantta rezonans elde edilebileceği gösterilmiştir. İlk olarak amaçlanan çift bantlı metamalzeme sinyal emici yapısı deneysel ve nümerik olarak araştırılmış ve onun performansı gösterilmiştir. Daha sonra bu yapıdan modifiye edilen diğer tasarımlar mekanik ayarlanabilirlik ve çoklu bant özellikleri için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Her biri için ayrı nümerik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre amaçlanan konfigürasyonlar; sağlık, sensör, haberleşme vb. birçok uygulama için mükemmel emilime ihtiyaç olan alanlarda kullanılabilir.

Ayrıca mükemmel emilim, gelen açı ve polarizasyon açı bağımsızlığı yapının sunmuş olduğu diğer avantajlardır. Gelen EM dalga ve sinyal emici arasındaki yapının bu özellikleri elektriksel kalınlığı, dielektrik ortamı, bakır topraklaması, empedan eşleşmesi ve EM rezonanstan kaynaklanmaktadır. İyi düzeyde empedans eşleşmesi ve yapının sunduğu elektrik veya manyetik etkileşimden ötürü mükemmel emilim elde edilmiştir.

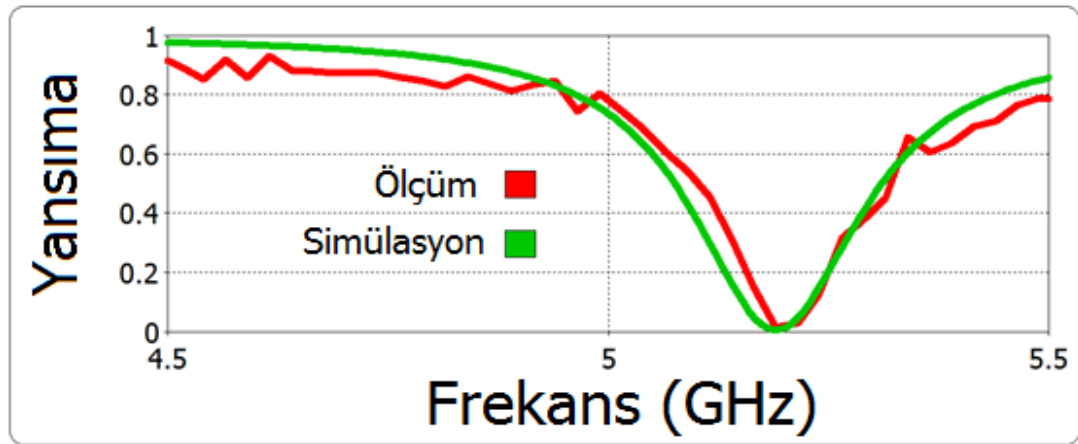
Ek olarak, amaçlanan metamalzeme sinyal emici 0° 'den 90° 'ye kadar polarizasyondan ve gelen açıdan bağımsız olarak mükemmel emilim sağlamaktadır. Literatürde, çok sayıdaki sinyal emici çalışması incelendiğinde çok daha iyi sonuçların elde edildiği rahatlıkla görülebilecektir (Zhu ve ark. 2010a, Wang ve ark. 2009a). Bunun yanında, bu yeni tasarım literatürdeki çoğu çalışmaya göre kolay konfigürasyona sahiptir

(Wang ve ark. 2009a, Dincer ve ark. 2013b). Amaçlanan model sadece çapraz şeritlere ve halka rezonatöre sahiptir. Dolayısıyla literatürdeki çalışmalara göre birçok farklı açıdan çok sayıda avantaj sunulmuştur.

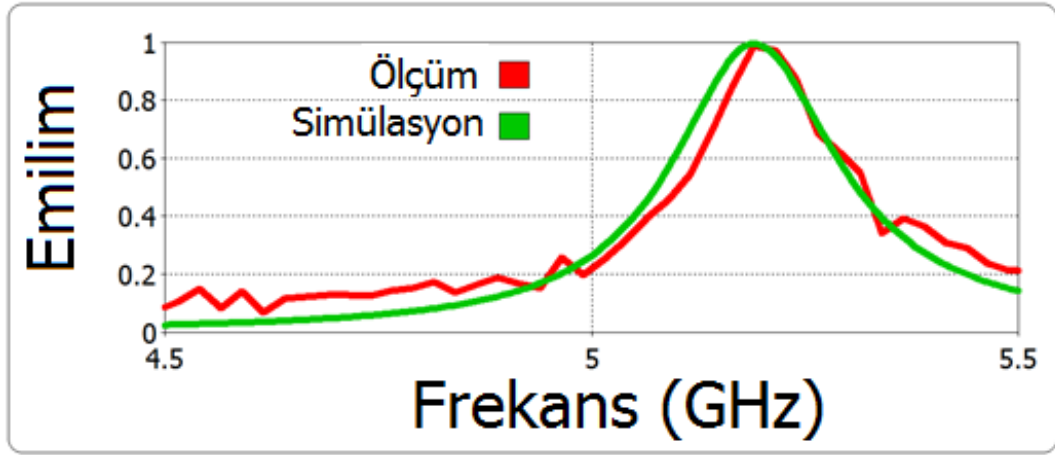
4.4.5. Asimetrik Dikdörtgen Şekil Rezonatör Tabanlı Multi Bantlı Sinyal Emici

Bu çalışmada Şekil 3.12'deki materyal kullanılarak metamalzeme sinyal emici yapısı için numerik ve deneysel çalışma yapılmıştır. Nümerik ve deneysel yansımam emilim sonuçları sırasıyla Şekil 4.96 ve 4.97'de gösterilmektedir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere simülasyon ve deneysel sonuçlar sırasıyla 5.19 GHz rezonans frekansı için 99.43% ve 98.67% olarak elde edilmiştir. Ek olarak, amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısının performans kalitesi göstermek için FBW hesaplamaları yapılmıştır. $FBW = \Delta f / f_0$ formülü ile hesaplanır. Burada Δf , yarı güçteki bant genişliğini ve f_0 ise merkez frekans değerini ifade etmektedir. Amaçlanan model için bu parametreler; $\Delta f = 0.24$ GHz, $f_0 = 5.19$ GHz and $FBW \approx 4.62\%$ olarak elde edilmiştir.

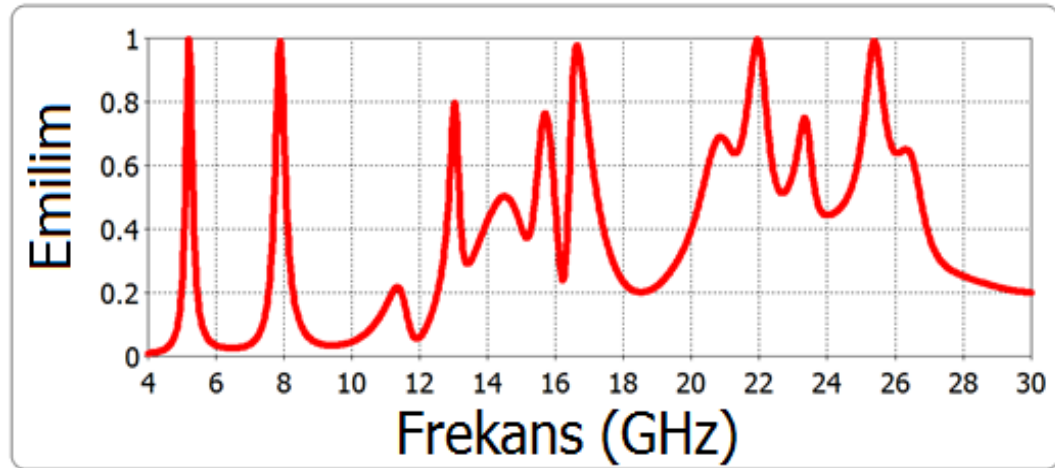
Yapılan bu deneysel ve nümerik çalışma sonrası amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısının çok bantlı olduğunu göstermek amacıyla yüksek frekansta bir simülasyon çalışması da gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.98). Şekilden de anlaşılacağı üzere yapılan tasarım birden fazla farklı noktalarda rezonans göstermektedir.



Şekil 4.96. Frekansın bir fonksiyonu olarak amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısı için nümerik ve deneysel yansımam sonuçları

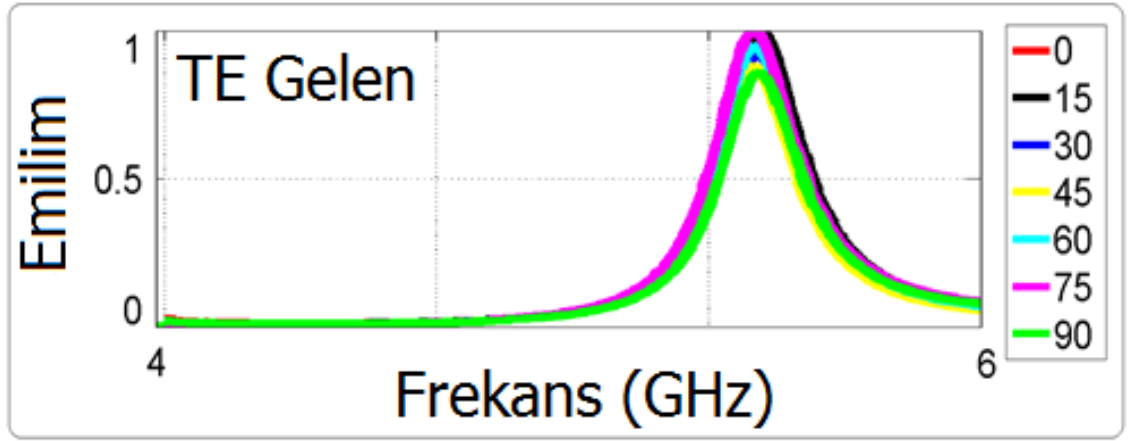


Şekil 4.97. Frekansın bir fonksiyonu olarak amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısı için nümerik ve deneysel emilim sonuçları



Şekil 4.98. Amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısının nümerik yüksek frekans çözümü

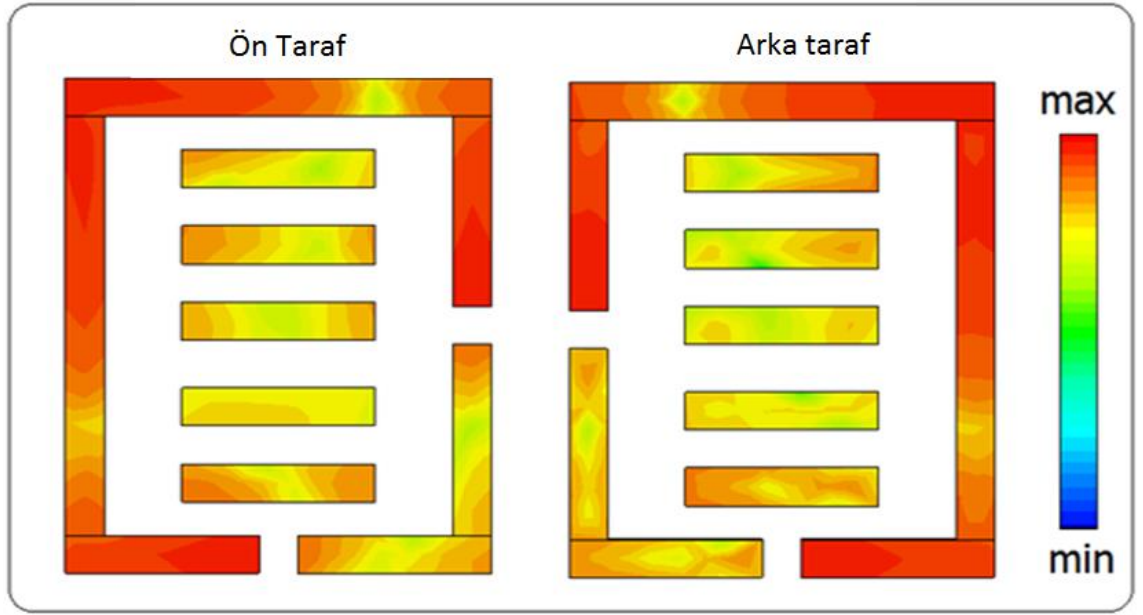
Ek olarak, çok bantlı metamalzeme sinyal emici yapısında TE gelen açının etkileri gözlemlenmiştir (Şekil 4.99). Bundan dolayı, TE gelen durum için açı nümerik olarak 0° 'den 90° 'ye kadar 15° adımlar ile döndürülmüştür. TE gelen durum için açı 0° 'den 60° 'ye kadar döndürüldüğünde emilim seviyesi çok az düzeyde artmaktadır. Bunun yanında açı değeri 90° 'ye ulaştığında emilim seviyesi en düşük değerde 85.56% olarak elde edilmiştir. Emilim seviyesi genel itibari ile çok değişikliğe uğramadan bağımsız olarak hareket etmektedir. Bununla beraber rezonans frekansı tüm TE gelen açı değerleri için 5.19 GHz civarında olmaktadır.



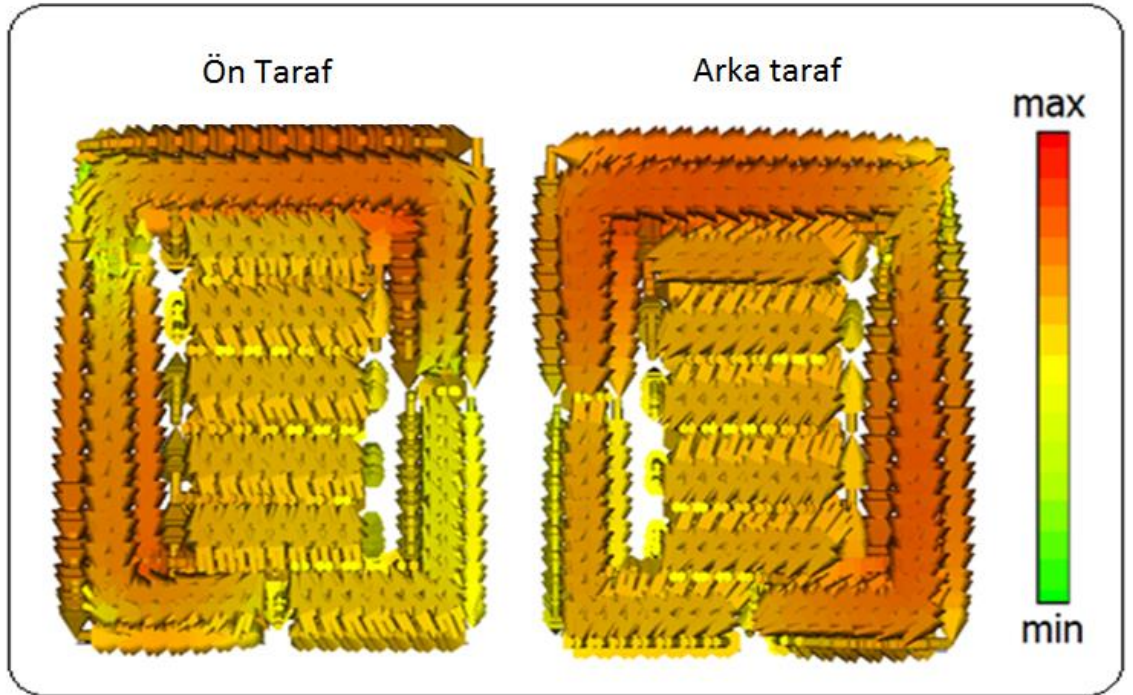
Şekil. 4.99. TE gelen açı için emilim değerlerinin açısal değişimi

Bu araştırmaların yanında ek olarak amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısının fiziksel çalışma mekanizmasını göstermek için 5.19 GHz rezonans frekansında elektrik alan ve yüzey akım dağılımları incelenmiştir (Şekil 4.100 ve 4.101). Dikdörtgen rezonatörler çevresinde (aralıklar hariç) elektrik alanın yüksek yoğunlukta ve şeritler içerisi çevresinde ise düşük yoğunlukta elektrik alanının olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.100). Çünkü elektrik alan dikdörtgen rezonatörleri üzerinde güçlü şekilde etkileşime girmiş ve rezonans frekansında elektrik cevabı göstermektedir.

Ek olarak, yüzey yüklerindeki indüklenmeden dolayı yapı üzerinde manyetik rezonans da meydana gelmiştir (Şekil 4.101). Akım dağılımından görüleceği üzere, elektrik alan etkileşiminden dolayı paralel akımlar meydana gelirken, manyetik etkileşimin tetiklediği dairesel akım dağılımından ötürü de paralel olmayan akımlar meydana gelmiştir. Rezonatörler içerisindeki aralıkların önemi şimdi daha açık bir şekilde anlaşılabilir. Paralel, paralel olmayan ve dairesel akım dağılımlarının ve rezonans frekansında elektrik-manyetik etkileşimi hepsini tek bir yapıda meydana getirmek adına böyle bir tasarım amaçlanmıştır. Bunun anlamı rezonans frekansında elektrik alan ve manyetik alan birbiri ile etkileşim haline girmiştir. Rezonans frekansında güçlü olarak etkileşime giren bu alanlar iyi düzeyde empedans eşleşmesine neden olmakta ve maksimum emilim sağlanmaktadır.



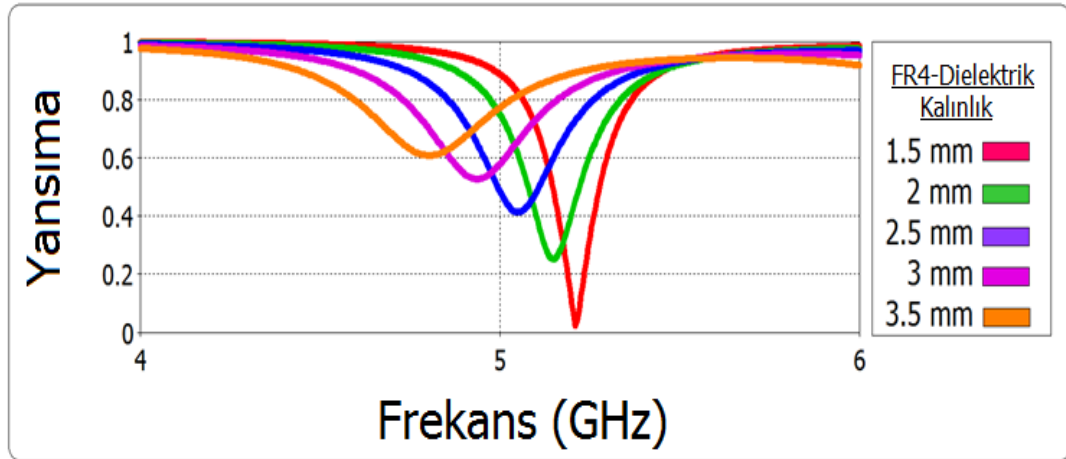
Şekil. 4.100. 5.19 GHz rezonans frekansı için elektrik alan dağılımı



Şekil. 4.101. 5.19 GHz rezonans frekansı için yüzey akım dağılımı

Amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısı için sensör uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısının kolay konfigürasyona ve geniş uygulama potansiyel alanlarına sahip olduğunu bir göstergesidir.

Uygulanan sensör çalışması için amaçlanan yapının dielektrik kalınlığı değiştirilmiştir. Burada dielektrik kalınlığı değiştirilerek basınç sensörü uygulaması için vurgu yapılmıştır. Çünkü amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısının dielektrik kalınlığı değiştikçe yansımada değeri de lineer olarak değişmiştir. Böylece yapı değişen basınç değeri için lineer tepki göstermiştir. Dielektrik kalınlığı (sabit kayıp değeri, 0.02, sabit dielektrik geçirgenliği, 4.2, ve sabit manyetik geçirgenlik, 1) 1.5 mm'den 3.5 mm'ye kadar 0.5 mm adımlar ile değiştirilmiştir. Elde edilen yansımada değeri sonuçları Şekil 4.102'de gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere 1.5 mm için S_{11} -0.02 olurken 3.5 mm için S_{11} -0.60 olmaktadır. Kalınlık değeri arttıkça tüm yapı üzerindeki yansımada değerinin artması yapının basınca karşı gösterdiği tepkiden kaynaklanmaktadır. Dielektrik kalınlık değeri arttıkça yansımada değeri de artmıştır.



Şekil 4.102. Amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısı için sensör uygulaması

Sonuç olarak, amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısının emilim özellikleri nümerik ve deneysel olarak incelenmiş ve analiz edilmiştir. Amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısı birden fazla farklı frekans değerinde rezonans göstermekte olup kolay konfigüre edilebilir bir yapıya sahiptir. Elde edilen sonuçlar mikrodalga frekans aralığında olup yapının konfigüre edilmesi ile birlikte THz, optik gibi yüksek frekans değerlerinde de çalışabilir. Ayrıca amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısı TE gelen durum için gelen açıdan bağımsız olarak emilim göstermektedir. Ek olarak yapının sinyal emici özelliklerinin dışında geniş uygulama potansiyel alanlarda da kullanılabileceğini

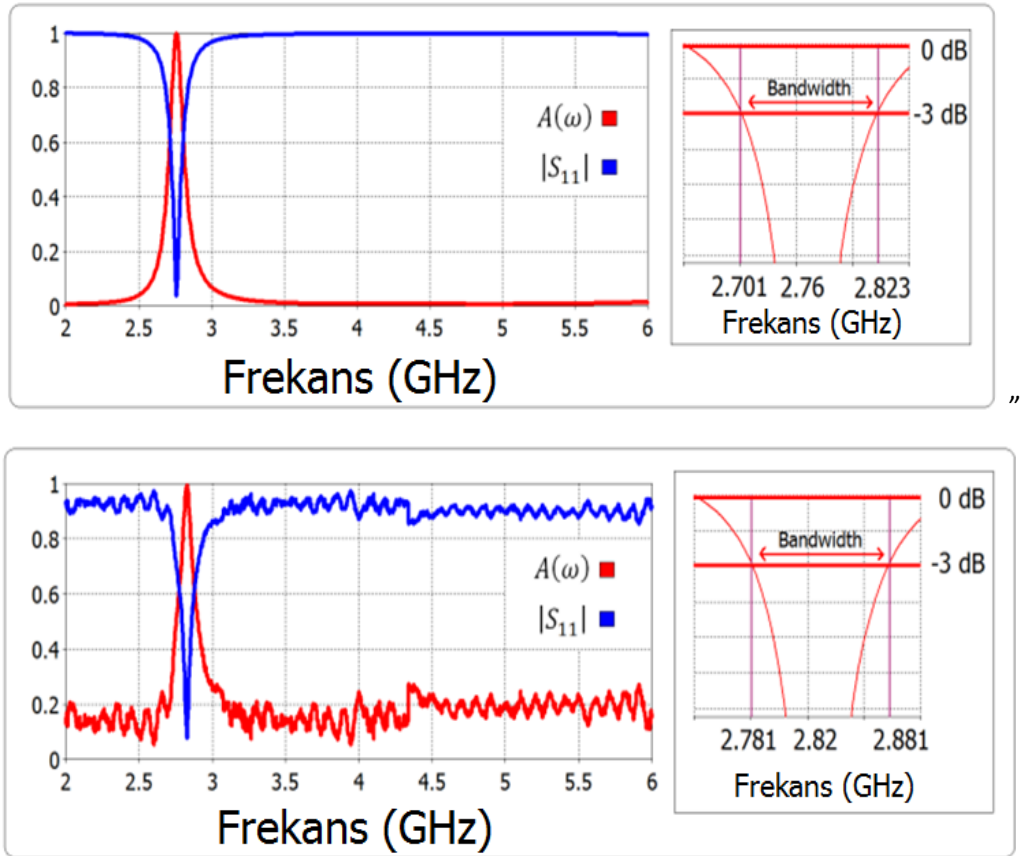
göstermek için dielektrik kalınlığı değiştirilerek basınç sensörü uygulaması da gerçekleştirilmiştir. Amaçlanan bu model uydu haberleşmesi, bazı Wi-fi cihazlarında, radar sistemleri gibi birçok uygulamada kullanılabilir.

4.4.6. Halka ve Çapraz Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı Gelen Açık ve Polarizasyon Bağımsız Mükemmel Sinyal Emici

Bu çalışmada Şekil 3.13'teki materyal kullanılarak metamalzeme sinyal emici yapısı için numerik ve deneysel çalışma yapılmıştır. Metamalzeme sinyal emici yapısının tasarımından sonra istenilen emilim özelliklerinin elde edilebilmesi için nümerik hesaplamalar yapılmıştır. Elde edilen nümerik sonuçların doğrulanması için deneysel çalışma gerçekleştirilerek S parametrelerinin VNA ve iki horn anten ile ölçülmesi sağlanmıştır. Elde edilen nümerik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve metamalzeme sinyal emici yapısının karakteristiği doğrulanmıştır.

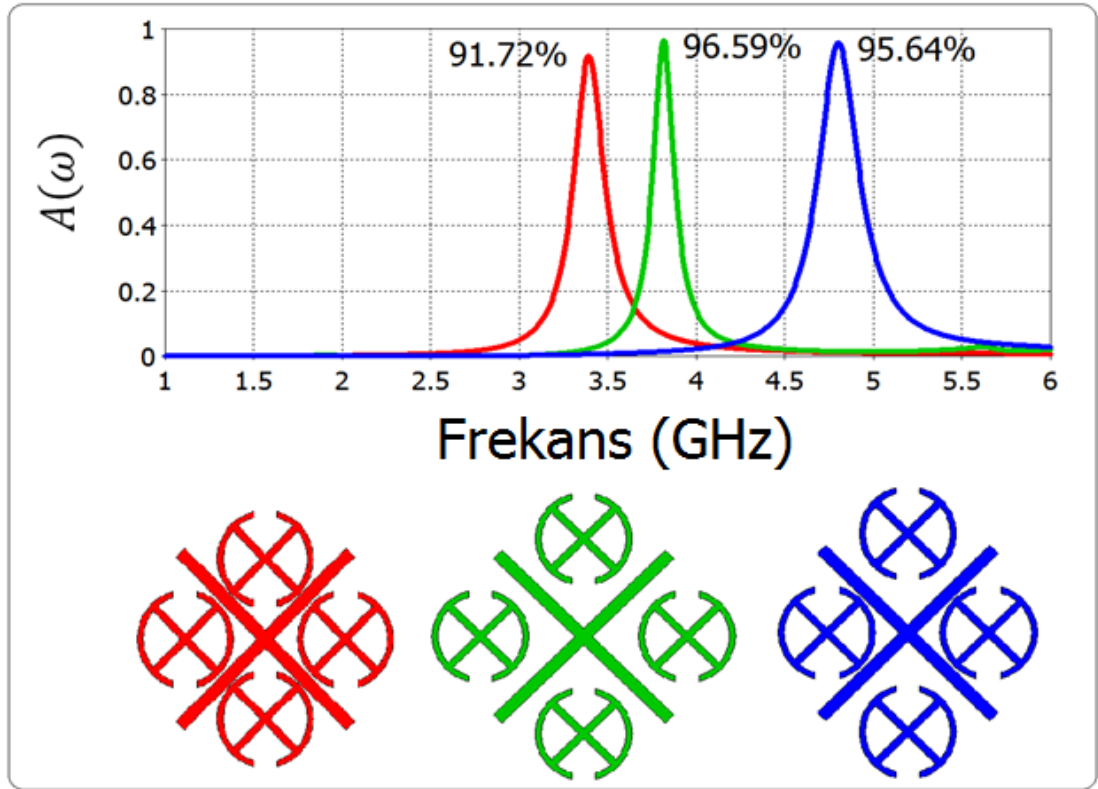
Amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısı halka şeklinde çapraz yıldız şekillerinden oluşan bir rezonatör, sıfır iletim için metal tabaka ve bunların arasına yerleştirilmiş FR4-dielektrik malzemesinden oluşmaktadır. Sonuçlar amaçlanan yapının mükemmel emilim uygulamalarında kullanılabileceğini göstermiştir.

Amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısının nümerik ve deneysel sonuçları Şekil 4.103'te sunulmuştur. Simülasyon ve deneysel sonuçlar sırasıyla 2.76 GHz için 99.9% ve 2.82 GHz için 99.4% olarak elde edilmiştir. Elde edilen bulgulara ek olarak bant genişliği hesaplamaları da yapılmıştır. Çünkü bant genişliği hesaplamaları amaçlanan metamalzeme sinyal emicinin kalitesini de göstermektedir. Bu hesaplamalar özellikle haberleşme sistemi gibi uygulamalarda büyük önem teşkil etmektedir. Bundan dolayı FBW hesaplamaları amaçlanan yapı için de yapılmıştır. $FBW = \Delta f / f_0$ formülü ile hesaplanır. Burada Δf , yarı güçteki bant genişliğini ve f_0 ise merkez frekans değerini ifade etmektedir. Amaçlanan model için bu parametreler; nümerik çalışmada ve deneysel çalışmada sırasıyla $\Delta f = 0.122 \text{ GHz}$, $f_0 = 2.76 \text{ GHz}$, $FBW \approx 4.42\%$ ve $\Delta f = 0.1 \text{ GHz}$, $f_0 = 2.82 \text{ GHz}$, $FBW \approx 3.54\%$ olarak elde edilmiştir (Dincer ve ark. 2013a, Dincer ve ark. 2013b, Yilmaz ve Sabah 2013).



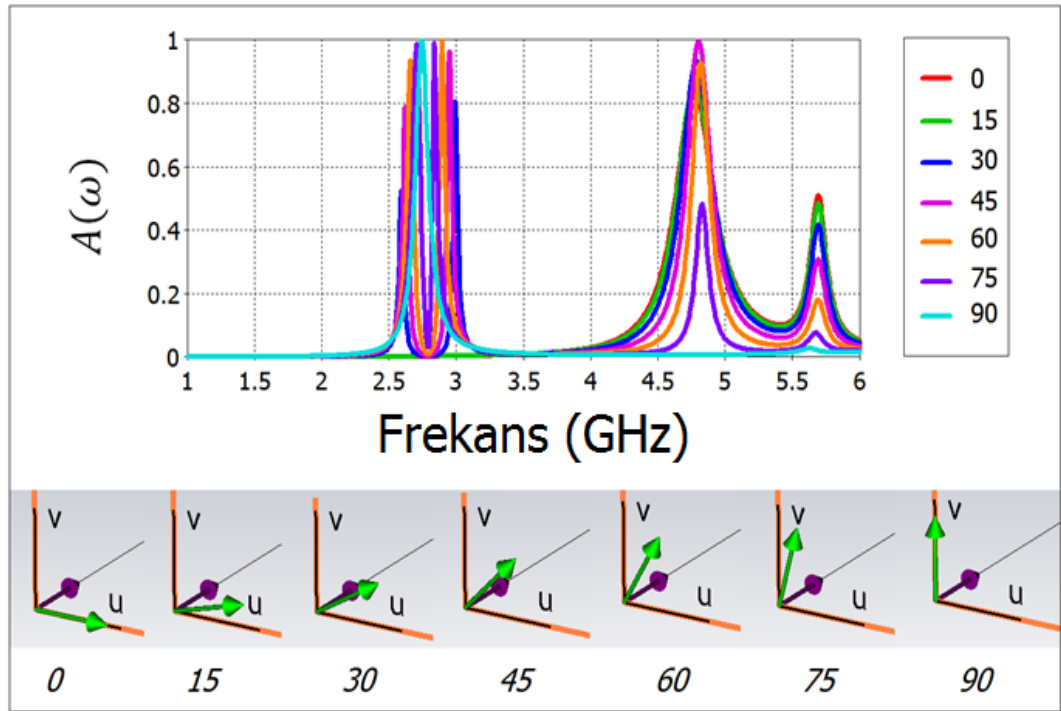
Şekil 4.103. Amaçlanan mikrodalga sinyal emici için nümerik (üst-taraf) ve deneysel (alt-taraf) yansımaya-emilim ve FBW sonuçları

Amaçlanan yapının emilim performansını gözlemlemek için, çapraz şeritler ve halkalar arasındaki mesafe değerlerinin etkisi de ayrıca incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu incelemeler birleştirildiğinde sinyal emicinin çalışma mekanizması daha iyi anlaşılıyor olacaktır. Sonuçlar Şekil 4.104'te gösterilmiştir. Çalışılan spektrum için, üç farklı konfigürasyon da tek bir rezonans değerine sahiptir. İlk konfigürasyon için (kırmızı), çapraz şeritler ve halkalar arasındaki mesafe senkronize olmuş ve kapatılmıştır. Yapı, 3.4 GHz rezonans frekansında $A(\omega) = 91.72\%$ değerinde emilim sağlamıştır. Bunun yanında ikinci konfigürasyon için (yeşil), çapraz şeritler ve halkalar arasındaki mesafe senkronize olmuş ve açılmıştır. Yapı, 3.8 GHz rezonans frekansında $A(\omega) = 96.59\%$ değerinde emilim sağlamıştır. Ek olarak, üçüncü düzenlemede (mavi olan), çapraz şeritler ve halkalar arasındaki mesafe senkronize olmayacak şekilde ayarlanmış ve 4.8 GHz rezonans frekansında $A(\omega) = 95.64\%$ değerinde emilim sağlamıştır. Bu çalışma ile üç farklı frekans değerinde rezonans sağlandığı gösterilmiştir.



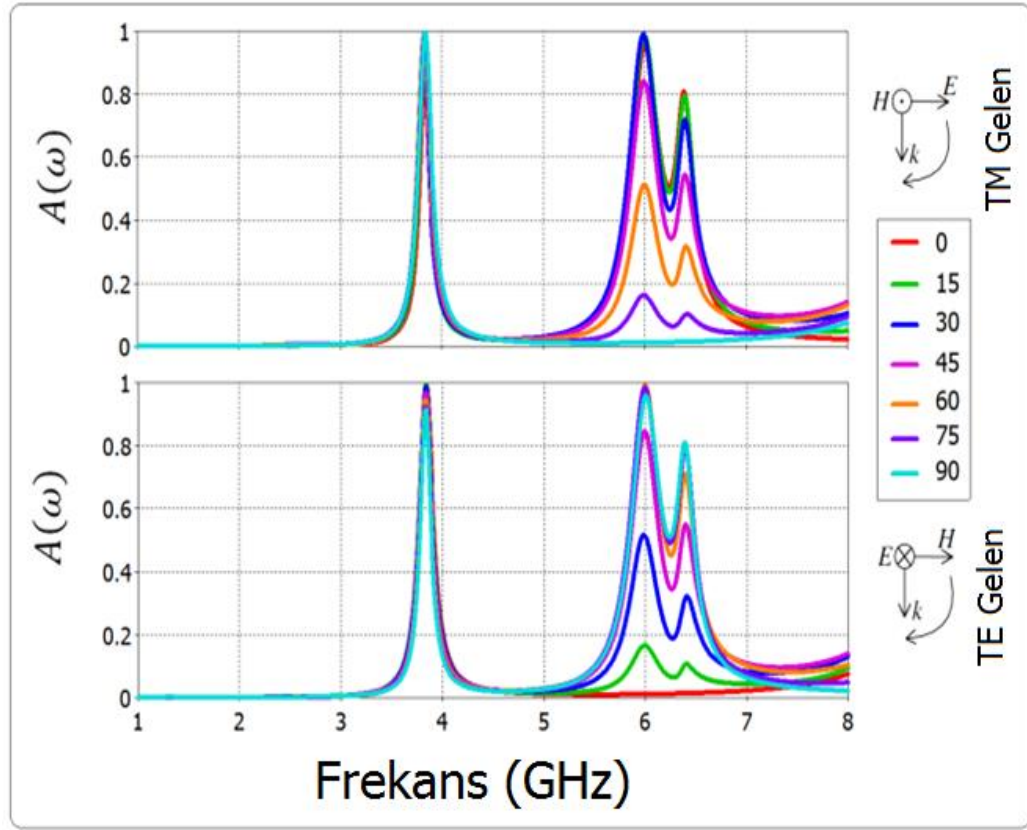
Şekil 4.104. Amaçlanan metamalzeme sinyal emicinin modifiye versiyonlar için nümerik emilim değerleri

Bu araştırmalara ek olarak, amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısı için farklı polarizasyon açılarının yapı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bundan dolayı, amaçlanan tasarım nümerik olarak Şekil 4.105'ten de anlaşılacağı üzere 15° adımlar ile 0° 'den 90° 'ye kadar döndürülmüştür. Şekilden de görülebileceği üzere yapının simetrik özelliğinden dolayı yapı tüm polarizasyon açılarında çok iyi derece emilim sağlamıştır. Ayrıca yapıya gelen sinyalin polarizasyon açısı değiştikçe $2.5 - 3 \text{ GHz}$ ve $4.5 - 5 \text{ GHz}$ değerlerinde de çift bantlı emilim sağlanmıştır. Rezonans frekansındaki kayma önceki duruma göre çok küçük değerdedir.



Şekil. 4.105. Farklı polarizasyon açısı değerleri için nümerik emilim değerleri

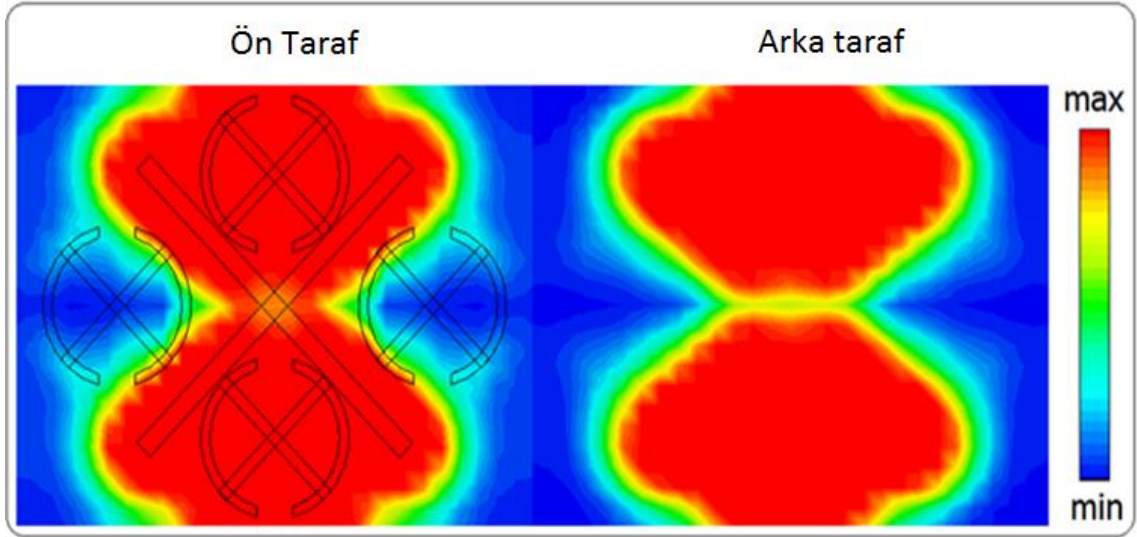
Şekil 4.106’da TE ve TM polarize olmuş dalganın farklı gelen açısı değerlerindeki emilim karakteristiği incelenmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere her iki durum için 99.9% oranında emilim sağlanmıştır. Geniş bir polarizasyon açısı değerinde amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısı için mükemmel emilim sağlanmıştır.



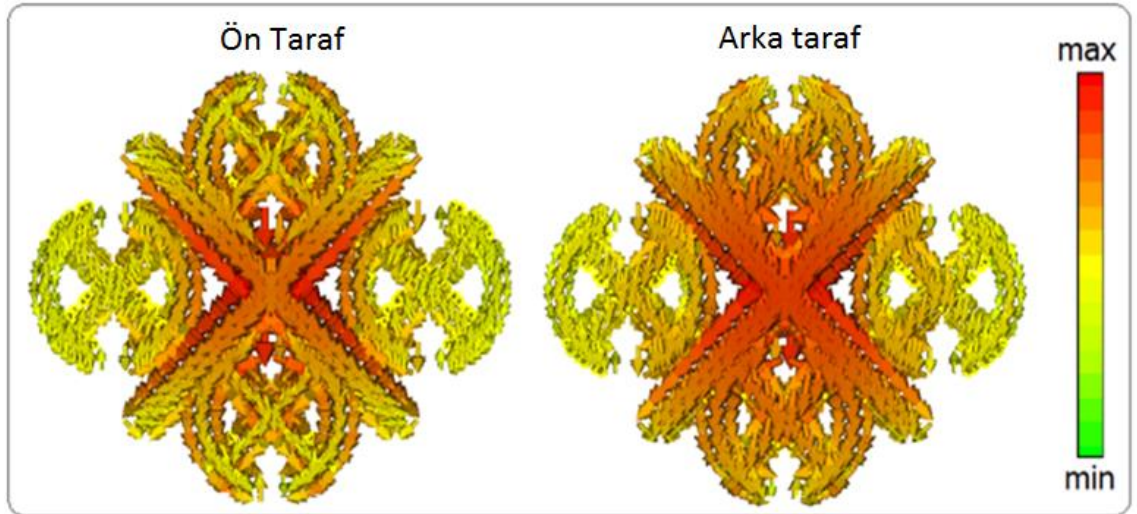
Şekil 4.106. *TE* ve *TM* polarize olmuş dalga'nın farklı gelen açı değerlerindeki nümerik emilim karakteristiği

Rezonans değerlerinin davranışını incelemek için 2.76 GHz frekans değerine elektrik alan ve yüzeysel akım dağılımları Şekil 4.107 ve 4.108'de sırasıyla incelenmiştir. Özellikle, elektrik alanın üstteki ve alttaki halka rezonatörler üzerinde ve çapraz şeritler arasında yoğun olduğu gözlemlenmiş ve bu etkinin elektrik alanın güçlü bir şekilde etkileşiminden kaynaklandığı doğrulanmıştır (Şekil 4.107). Bu elektrik alan uygulanan polarizasyon için dipol gibi çalışan bağımsız elektrik etkileşimi sağlamıştır. Bu etki, aynı yol ile yüzey yüklerinin her tarafta uyarılmasına neden olmuştur. Yüzey yüklerinden dolayı manyetik dipol momenti manyetik cevabı indükler ve rezonansa emilime neden olur. Bunun yanında dairesel paralel olmayan akımlar manyetik etkileşimi indüklerken (Şekil 4.108), akım dağılımındaki paralel akımlar da elektrik etkileşimine neden olur. Gelen dalga'nın *E* ve *H* bileşenleri güçlü olarak etkileşime girer ve rezonans frekansında güçlü bir EM alanının oluşmasını sağlarlar. Bunun anlamı, rezonans değerinde her iki elektrik ve manyetik rezonansların oluşmasını sağlar. Böylece empedans eşleşmesi

$(Z(\omega) = Z_0(\omega))$ ile birlikte minimum yansıma ve maksimum emilimin sağlanması gerçekleştirilmiş olur.



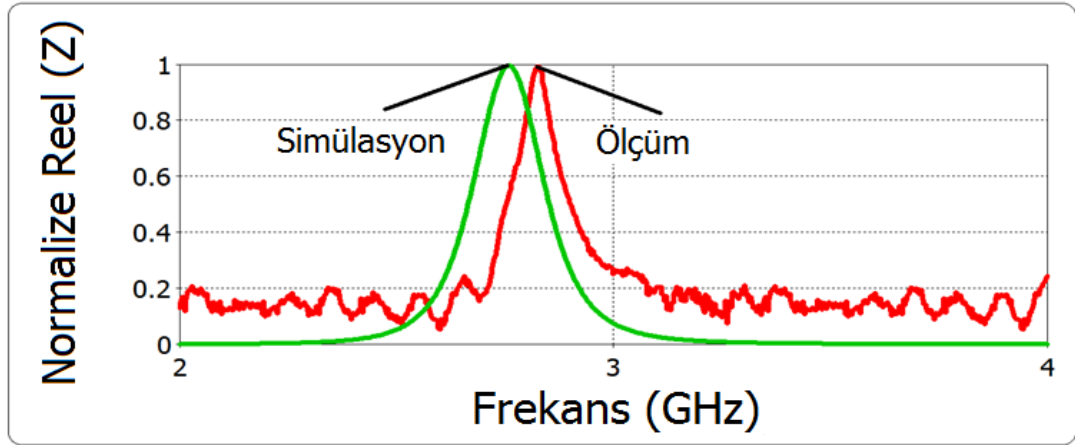
Şekil 4.107. 2.76 GHz rezonans frekansında elektrik alan dağılımı



Şekil 4.108. 2.76 GHz rezonans frekansında yüzey akım dağılımı

Gelen EM dalga ile birlikte metamalzeme sinyal emici yapısının rezonans frekansında emilim davranışı ve çalışma mekanizmasını göstermek için S parametrelerinden reel empedans, $\text{reel}(z)$, değeri $z(\omega) = \sqrt{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2} / (1 - S_{11})^2 - S_{21}^2$ formülü ile hesaplanmıştır (Şekil 4.109).

Simülasyon ve deneysel çalışma için sırasıyla 2.76 GHz ve 2.82 GHz frekans değerlerinde tüm sistem empedansının serbest uzay empedansı ile birlikte tam olarak eşleştiği ($Z(\omega) = Z_0(\omega)$) gözlemlenmiştir. Bu durum neredeyse sıfıra yakın yansıma durumunu sağlar (He ve ark. 2011).



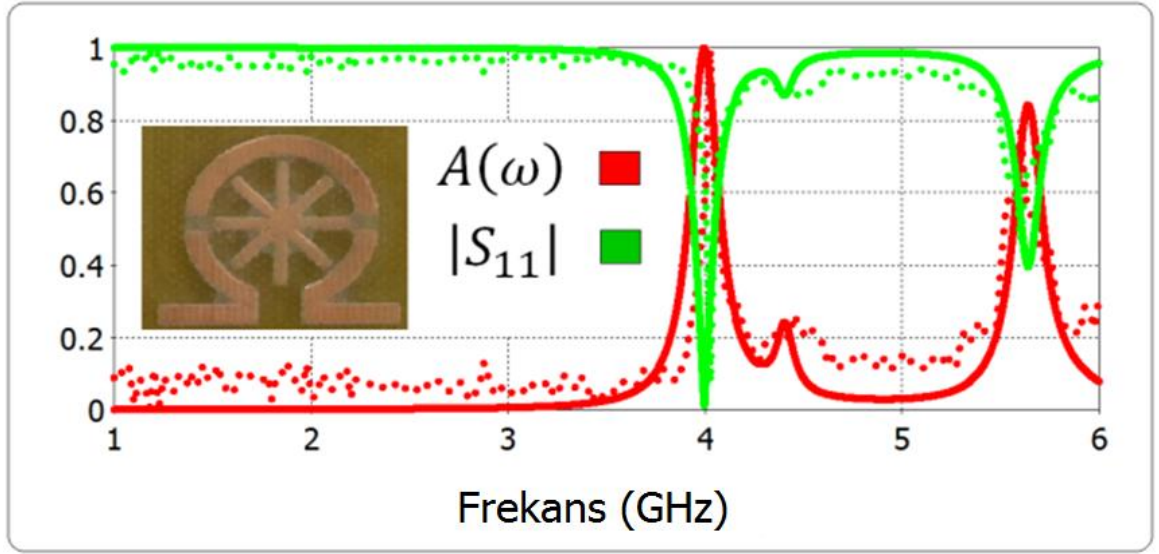
Şekil 4.109. Frekansın fonksiyonu olarak normalize edilmiş empedans eğrisi

Halka ve çapraz yıldız şeritlerden oluşan rezonatör tasarlanmış ve sunmuş olduğu EM özellikler araştırılmıştır. Bunun yanında, nümerik ve deneysel olarak amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısı için yansıma ve emilim değerleri elde edilmiştir. Periyodik ölçüleri çalışma dalga boyuna göre ayarlanmıştır. Amaçlanan tasarım ayrıca gelen açı ve polarizasyon açısından bağımsız olarak tüm açı değerlerinde mükemmel emilim sağlamıştır. Çalışılan mikrodalga S bandında yansıma minimize edilmiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlar birbiri ile iyi olarak örtüşmektedir. Ayrıca amaçlanan tasarım ayarlanabilir ve kolay konfigüre edilebilir bir özelliğe de sahiptir. Bunu göstermek için rezonatörler için ayrı bir çalışma da sunularak rezonatörlerin sağladığı rezonans değerleri çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki; amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısı çok sayıda farklı sağlık ve savunma teknolojilerinde rahatlıkla kullanılabilir. Literatürdeki yapılan metamalzeme sinyal çalışmalarına göre de avantajlar sunulmuştur. Literatürdeki bazı çalışmalar polarizasyon ve gelen açı için sadece bazı açı değerlerinde bağımsızlık yada düşük hassasiyet emilim değerlerine sahip olabilmektedir (Lee ve Lim 2011). Ayrıca önerilen yapı literatürdeki bazı çalışmalara göre de daha kolay konfigüre edilebilir bir tasarıma sahiptir (Huang ve ark. 2013).

4.4.7. GHz ve THz Frekanslarında Frekans Seçici Yüzeyler ile Polarizasyon Bağımsız Mükemmel Sinyal Emiciler

Bu çalışmada Şekil 3.14 ve 3.15'teki materyaller kullanılarak metamalzeme sinyal emici yapıları için numerik ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Amaçlanan metamalzeme sinyal emicinin performansını göstermek için nümerik ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldı ve değerlendirilmiştir. Şekil 4.110'da nümerik ve deneysel emilim-yansıma sonuçları sunulmuştur. Elde edilen nümerik sonuçlara göre 4.0 GHz ve 5.6 GHz rezonans frekanslarında sırasıyla 99 % ve 84 % oranlarında, deneysel sonuçlara göre ise 99 % ve 79 % oranlarında emilim sağlanmıştır (Dincer ve ark. 2013b).

Elde edilen bulgulara ek olarak bant genişliği hesaplamaları da yapılmıştır. Çünkü bant genişliği hesaplamaları amaçlanan çift bantlı metamalzeme sinyal emicinin kalitesini de göstermektedir. Bu hesaplamalar özellikle haberleşme sistemi gibi uygulamalarda büyük önem teşkil etmektedir. Bundan dolayı FBW hesaplamaları amaçlanan yapı için de yapılmıştır (Şekil 4.110). $FBW = \Delta f / f_0$ formülü ile hesaplanır. Burada Δf , yarı güçteki bant genişliğini ve f_0 ise merkez frekans değerini ifade etmektedir. Amaçlanan model için bu parametreler; nümerik çalışmada ilk ve ikinci rezonans için sırasıyla $\Delta f = 0.16 \text{ GHz} \& 0.28 \text{ GHz}$, $f_0 = 4.32 \text{ GHz} \& 5.73 \text{ GHz}$ and $FBW \approx 3.70\% \& 4.88\%$ olarak elde edilmiştir. Deneysel çalışma bulguları ise ilk ve ikinci rezonans için sırasıyla $\Delta f = 0.33 \text{ GHz} \& 0.20 \text{ GHz}$, $f_0 = 4.42 \text{ GHz} \& 5.62 \text{ GHz}$ and $FBW \approx 7.46\% \& 3.55\%$ şeklindedir. Bu hesaplamalar amaçlanan metamalzeme sinyal emici modelinin bant genişliği açısından iyi bir kaliteye sahip olduğunun göstergesidir (Dincer ve ark. 2013b).



Şekil 4.110. Amaçlanan FSS metamalzeme sinyal emici yapısı için nümerik-deneysel yansıma-emilim değerleri

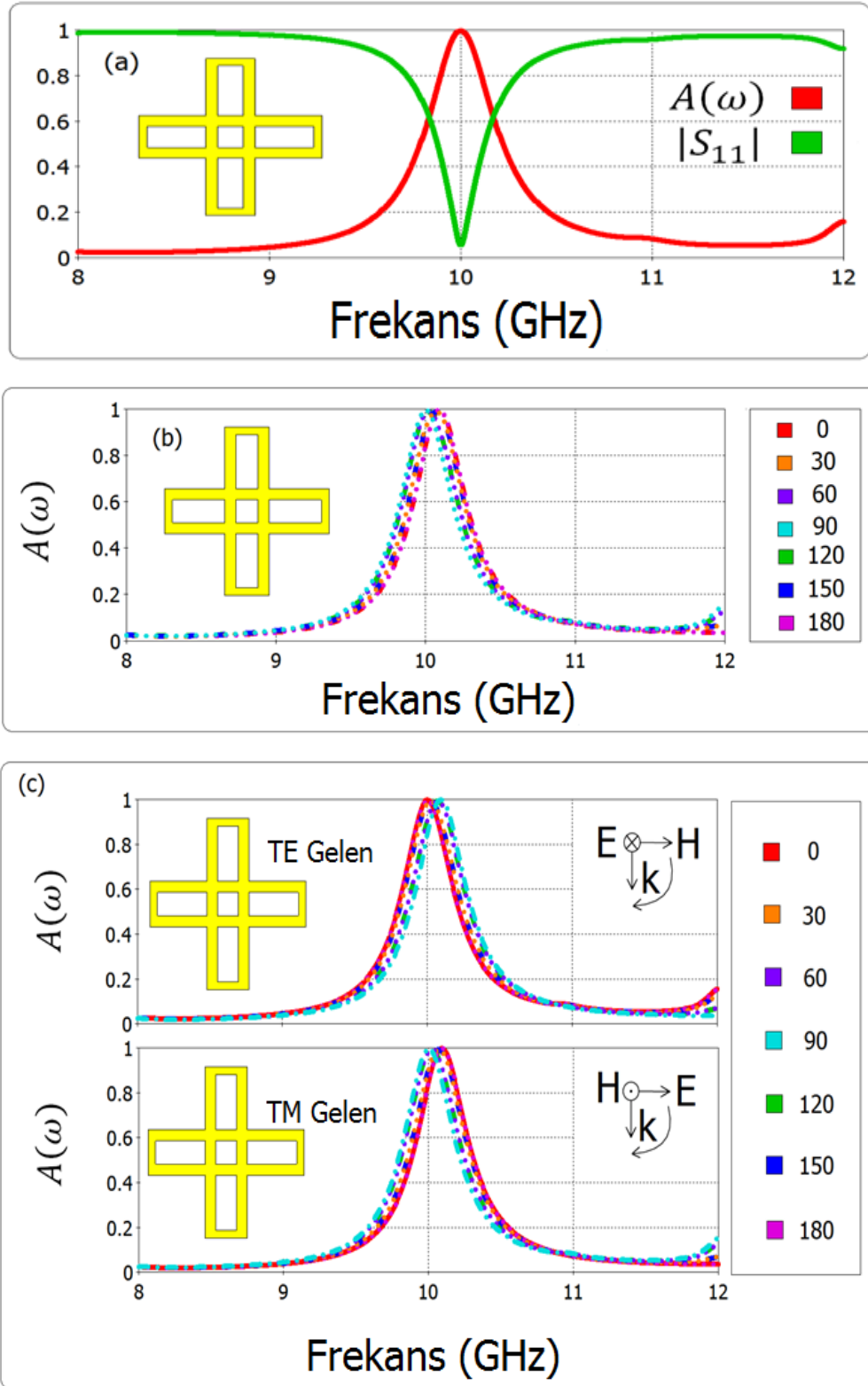
Periyodik yapının nümerik sonuçları FIT tabanlı EM çözüm programı ile elde edilmiştir. Simülasyon için periyodik sınır koşulları uygulanmıştır. Ek olarak FSS metamalzeme sinyal emici yapısının karakteristiğini belirlemek için diğer yapılardan elde edilen nümerik sonuçlar da karşılaştırılmış ve analiz edilmiştir.

Amaçlanan FSS metamalzeme sinyal emici yansıma spektrumunda 10 GHz frekansında mükemmel bir emilim sağlamaktadır (Şekil 4.111(a)). Nümerik sonuçlarda rezonans 99.69 % oranındadır. Şekilden de görüleceği üzere bu frekans değerinde yansımanın değeri çok minimum olmakla beraber 0.05 değerine eşittir.

Bu araştırmaya ek olarak, amaçlanan yapı için polarizasyon açısının emilim değeri üzerindeki etkileri de gözlemlenmiştir. Şekil 4.111(b) belirtilen çalışma için tüm polarizasyon açı değerlerinden bağımsız olarak elde edilen mükemmel emilim değerlerini göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere amaçlanan yapı tüm polarizasyon açı değerlerinde 10 GHz rezonans frekansı için 99 % civarlarında mükemmel emilim sağlamaktadır. Bu avantaj yapının simetrik özelliğinden kaynaklanmaktadır.

Ayrıca, amaçlanan yapı için *TE* ve *TM* ayrı ayrı olmak üzere gelen açının emilim değeri üzerindeki etkileri de gözlemlenmiştir. Şekil 4.111(c) belirtilen çalışma için gelen tüm açı değerlerinden bağımsız olarak elde edilen mükemmel emilim değerlerini göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere amaçlanan yapı tüm gelen açı değerlerinde

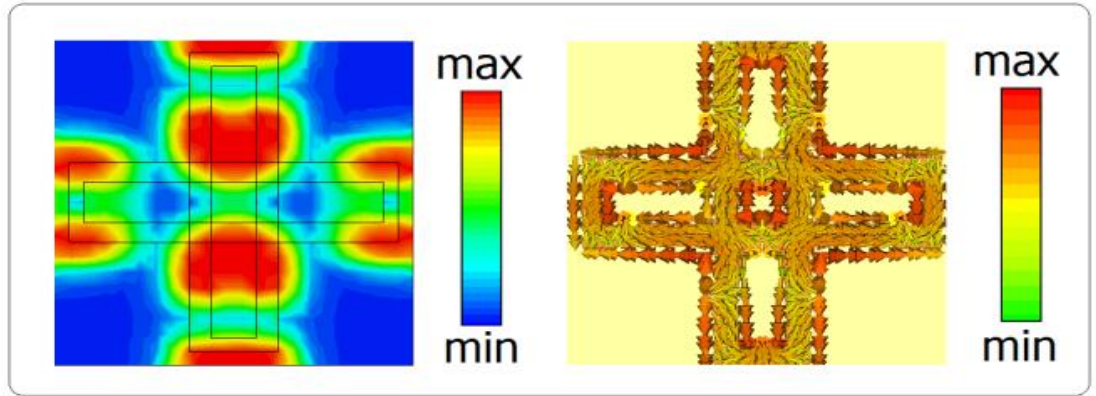
10 GHz rezonans frekansı civarları için 99 % civarlarında mükemmel emilim sağlamaktadır. Rezonansta ise çok ufak bir kayma meydana gelmiştir.



Şekil 4.111 Amaçlanan mikrodalga FSS metamalzeme yapısı-2, a) nümerik yansıma ve emilim değerleri, (b) farklı polarizasyon açıları için nümerik emilim

performansı değerleri, (c) TE ve TM gelen dalga durumunda farklı açılardaki nümerik emilim değerleri

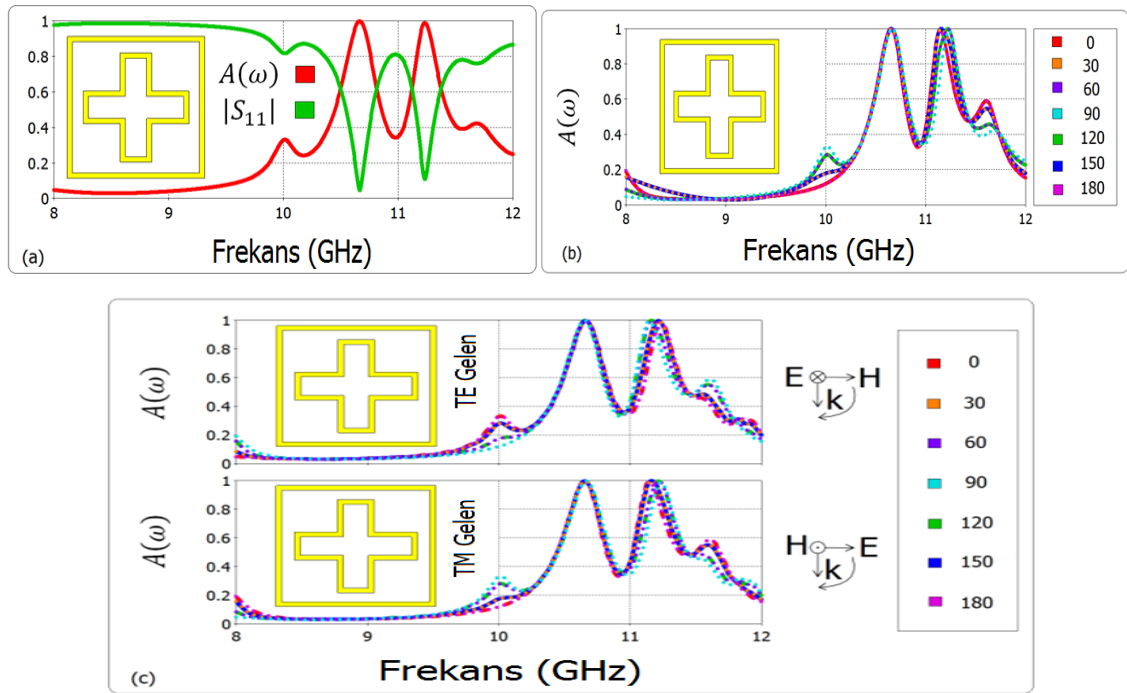
10 GHz rezonans frekansında yapının emilim karakteristiğini doğrulamak ve performansını göstermek için rezonans frekansındaki elektrik alan ve yüzey akım dağılımları elde edilmiş ve Şekil 4.112’de gösterilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere, amaçlanan yapı üzerinde dairesel, paralel ve paralel olmayan (simetrik ve asimetrik rezonans modları) gözlemlenmiştir. Yapı üzerindeki dairesel ve paralel olmayan akımlar manyetik rezonans modundan kaynaklanırken, paralel akım dağılımları ise elektrik rezonans durumundan kaynaklanmaktadır. Böylece, güçlü manyetik ve elektrik alan bahsedilen akımları oluşturmuştur. Köşelerdeki elektrik alan yoğunluğu elektrik dipollerin etkileşimi ile birlikte oluşan simetrik akımları doğrulamaktadır. Bu durum bağımsız elektrik etkileşimini sağlamaktadır. Bu yüzden, rezonans frekansında güçlü bir elektrik alan oluşumu sağlanmıştır.



Şekil 4.112. 10 GHz rezonans frekansı için elektrik alan ve yüzey akım dağılımları

Nümerik sonuçlar amaçlanan metamalzeme sinyal emici performansının gösterilmesi için değerlendirilmiş ve doğrulanmıştır. Nümerik yansıma ve emilim sonuçları Şekil 4.113’te sunulmuştur. Şekilden de anlaşılacağı üzere 10.66 GHz ve 11.23 GHz rezonans frekanslarında sırasıyla 99.78 % ve 98.80 % oranlarında emilim sağlanmıştır. Buna bağlı olarak yansıma değerleri de sırasıyla ilk ve ikinci rezonans 0.04 ve 0.10 olarak elde edilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere amaçlanan yapı çift bantta mükemmel emilim sağlamıştır. (Şekil 4.113(a)).

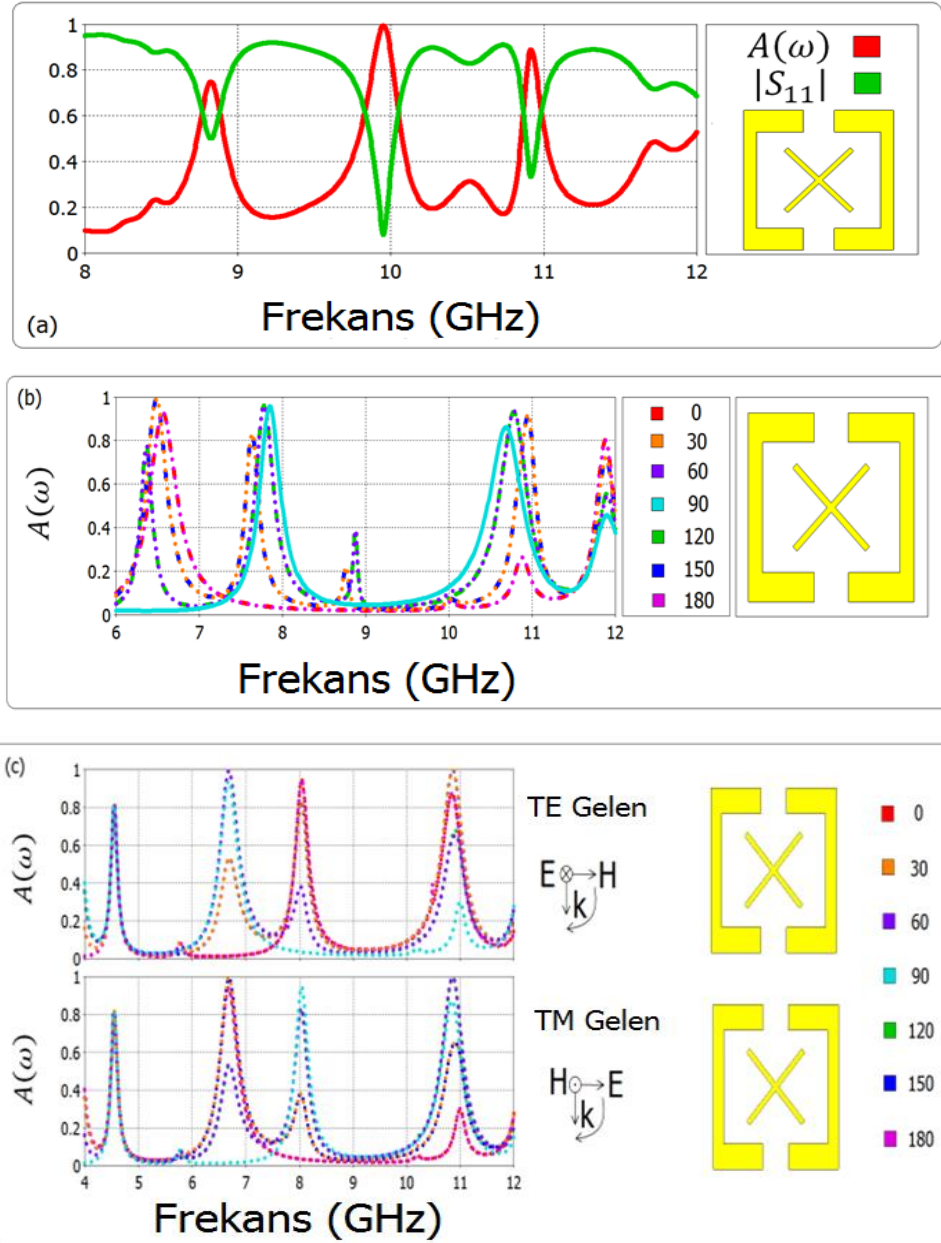
Ek olarak, çift bantlı FSS metamalzeme sinyal emici yapısı için gelen ve polarizasyon açısı değerlerinin etkileri incelenmiştir. Polarizasyon açısı 30° adımlar ile 0° 'den 180° 'ye kadar döndürülmüş ve her bir açı değeri için emilim performans değerleri gösterilmiştir (Şekil 4.113(b)). Şekilden de anlaşılacağı üzere polarizasyon açısından bağımsız olarak çift bantta da mükemmel emilim sağlanmıştır. Gelen açı değiştiğinde sadece emilimde ufak değişiklikler olmuştur. Bu sonuçlar yapının tüm polarizasyon açı değerleri için bağımsız olarak mükemmel emilim yaptığını göstermektedir. Ayrıca aynı incelemeler *TE* ve *TM* gelen dalga durum için de uygulanmış ve açı değerleri periyodik olarak değiştirilmiştir (Şekil 4.113(c)). Şekilden de anlaşılacağı üzere tüm gelen açı değerlerinde her iki durum için yapı mükemmel emilim göstermiştir. Emilim rezonans frekansları yaklaşık olarak 10.65 GHz ve 11.16 GHz civarlarındadır. Küçük frekans kayması polarizasyon durumunun değişimi ile açıklanabilir ve ihmal edilebilir durumdadır. Elde edilen bu sonuçlar yapının tüm gelen açı ve polarizasyon açı değerleri durumları için mükemmel emilim yapıldığını göstermektedir.



Şekil 4.113. Amaçlanan mikrodalga FSS metamalzeme yapısı-3, a) nümerik yansıma ve emilim değerleri, (b) farklı polarizasyon açıları için nümerik emilim performans değeri, (c) *TE* ve *TM* gelen dalga durumunda farklı açılardaki nümerik emilim değeri

Nümerik sonuçlar amaçlanan metamalzeme sinyal emici performansının gösterilmesi için değerlendirilmiş ve doğrulanmıştır. Nümerik yansıma ve emilim sonuçları Şekil 4.114(a)'de sunulmuştur. Şekilden de anlaşılacağı üzere üç farklı frekans değerinde de 8.82 GHz, 9.95 GHz and 10.91 GHz rezonans frekanslarında sırasıyla 74.86 %, 99.34 % ve 88.86 % oranlarında emilim sağlanmıştır. Buna bağlı olarak yansıma değerleri de sırasıyla ilk, ikinci ve üçüncü rezonans için 0.50, 0.08 ve 0.33 olarak elde edilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere amaçlanan yapı birden fazla bantta mükemmel emilim sağlamıştır. (Şekil 4.114(a)).

Ek olarak, çok bantlı FSS metamalzeme sinyal emici yapısı için gelen ve polarizasyon açısı değerlerinin etkileri incelenmiştir. Polarizasyon açısı 30° adımlar ile 0° 'den 180° 'ye kadar döndürülmüş ve her bir açı değeri için emilim performans değerleri gösterilmiştir (Şekil 4.114(b)). Şekilden de anlaşılacağı üzere polarizasyon açısından bağımsız olarak çift bantta da mükemmel emilim sağlanmıştır. Gelen açı değiştiğinde sadece emilimde ufak değişiklikler olmuştur. Ortalama emilim değeri 80 % civarlarında elde edilebilmiştir. Bu sonuçlar yapının tüm polarizasyon açısı değerleri için bağımsız olarak mükemmel emilim yaptığını göstermektedir. Ayrıca aynı incelemeler *TE* ve *TM* gelen dalga durum için de uygulanmış ve açı değerleri periyodik olarak değiştirilmiştir (Şekil 4.114(c)). Şekilden de anlaşılacağı üzere tüm gelen açı değerlerinde her iki durum için yapı mükemmel emilim göstermiştir.

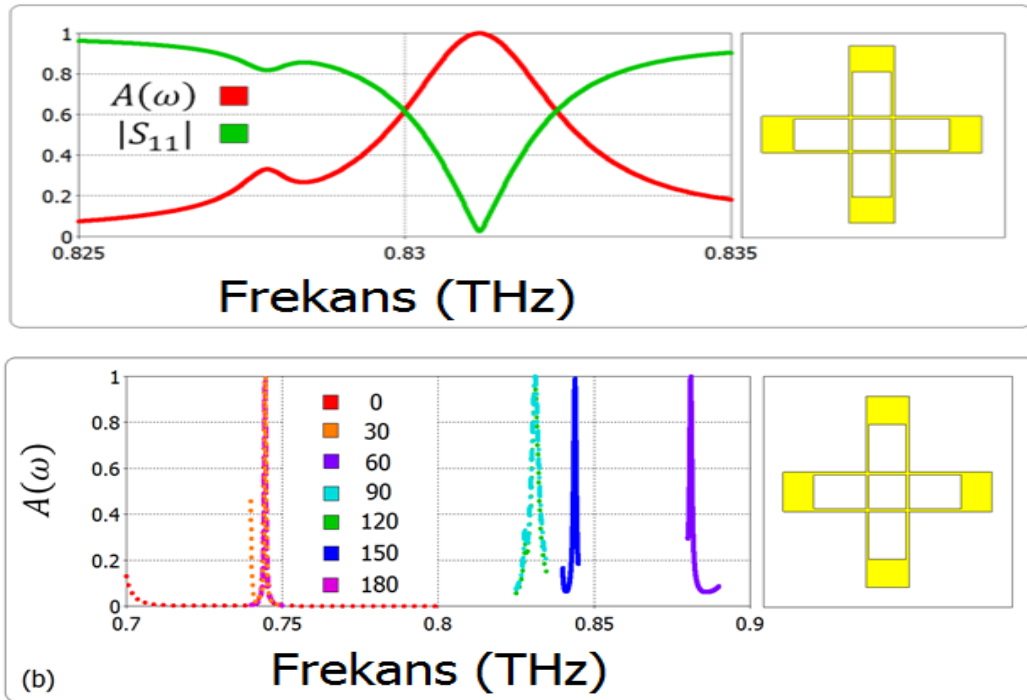


Şekil 4.114. Amaçlanan mikrodalga FSS metamalzeme yapısı-4, a) nümerik yansıma ve emilim değerleri, (b) farklı polarizasyon açıları için nümerik emilim performansı değerleri, (c) *TE* ve *TM* gelen dalga durumunda farklı açılardaki nümerik emilim değerleri

Nümerik sonuçlar amaçlanan metamalzeme sinyal emici performansının gösterilmesi için değerlendirilmiş ve doğrulanmıştır. Nümerik yansıma ve emilim sonuçları Şekil 4.115(a)'de sunulmuştur. Şekilden de anlaşılacağı üzere 0.83 THz rezonans frekansında 99.92 % oranında mükemmel emilim sağlanmıştır. Buna bağlı

olarak yansıma değeri de 0.02 olarak elde edilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere amaçlanan yapı rezonans frekansında mükemmel emilim sağlamıştır.

İkinci araştırma olarak, amaçlanan FSS metamalzeme sinyal emici yapısının polarizasyon açısı bağımlılıkları ayrıntılı olarak incelenmiştir (Şekil 4.115(b)). Elde edilen sonuçlardan da görüleceği üzere yapı tüm polarizasyon açısı değerlerinde mükemmel emilim sağlamıştır. En düşük emilim değeri 120° polarizasyon açısında 0.83 THz rezonans frekans değerinde 97.14 % olarak elde edilirken, en yüksek emilim değeri de 60° polarizasyon açısı için 0.88 THz rezonans frekans değerinde 99.98 % oranında elde edilmiştir. Polarizasyon açısı değişimi şekilden de anlaşılacağı üzere rezonans frekansında kayma da meydana getirmiştir. Bu durum yapının tasarım özelliğinden kaynaklanmaktadır.

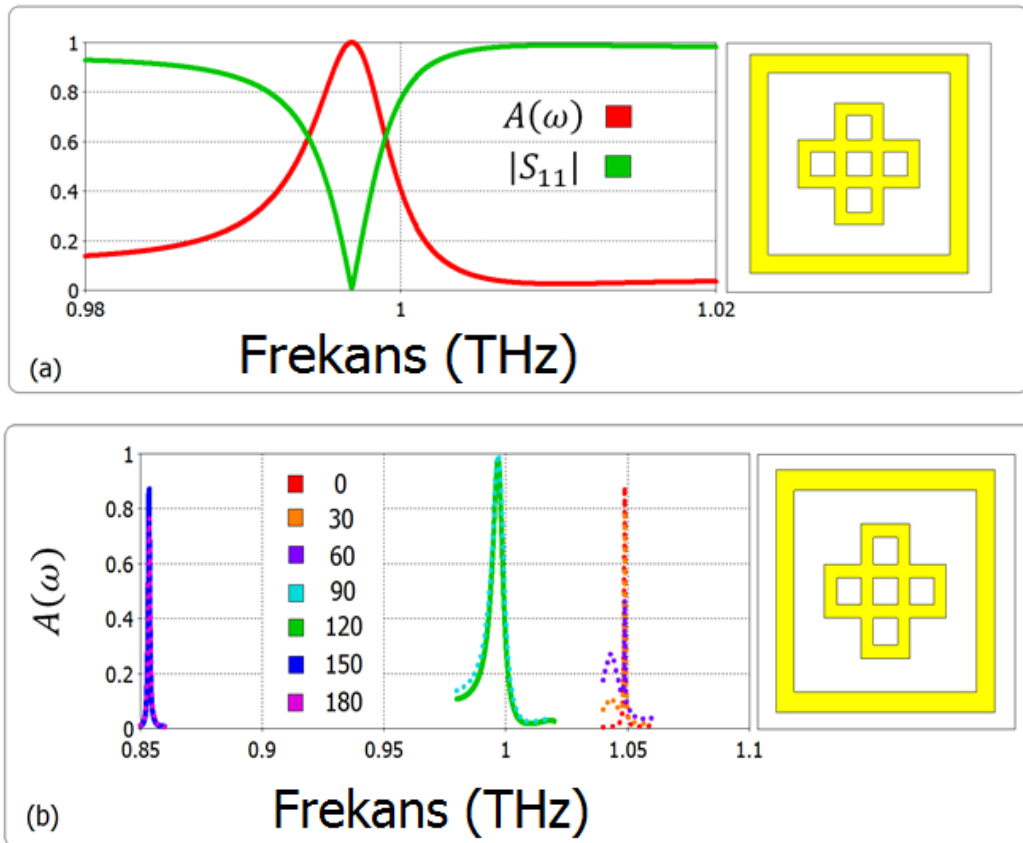


Şekil 4.115. Amaçlanan mikrodalga FSS metamalzeme yapısı-5, a) nümerik yansıma ve emilim değerleri, (b) farklı polarizasyon açıları için nümerik emilim performansı değerleri

Nümerik sonuçlar amaçlanan metamalzeme sinyal emici performansının gösterilmesi için değerlendirilmiş ve doğrulanmıştır. Nümerik yansıma ve emilim sonuçları Şekil 4.116(a)'de sunulmuştur. Şekilden de anlaşılacağı üzere 0.99 THz

rezonans frekansında 99.98 % oranında mükemmel emilim sağlanmıştır. Buna bağlı olarak yansıma değeri de 0.01 olarak elde edilmiştir. Şekilden de anlaşılabacağı üzere amaçlanan yapı rezonans frekansında mükemmel emilim sağlamıştır.

Ek olarak, amaçlanan FSS metamalzeme sinyal emici yapısı için polarizasyon açısı değişiminin etkisi incelenmiştir (Şekil 4.116(b)). Sonuçlardan da görüleceği üzere bazı polarizasyon açısı değerlerinde mükemmel emilim sağlanırken rezonans frekanslarında kayma meydana gelmiştir. 0° , 120° , 150° ve 90° polarizasyon açıları için sırasıyla 88.11 %, 98.07 %, 87.22 % ve 99.98 % oranlarında emilim sağlanmıştır. En yüksek emilim değeri 90° polarizasyon açısı değeri için 0.99 THz rezonans frekansında 99.98 % oranında emilim sağlanırken, en düşük emilim 60° polarizasyon açısı değeri için 1.05 THz rezonans frekansı için 46.95 % oranında emilim sağlanmıştır. 60° polarizasyon açısı dışındaki tüm polarizasyon açısı değerlerinde mükemmel emilim sağlanmıştır.



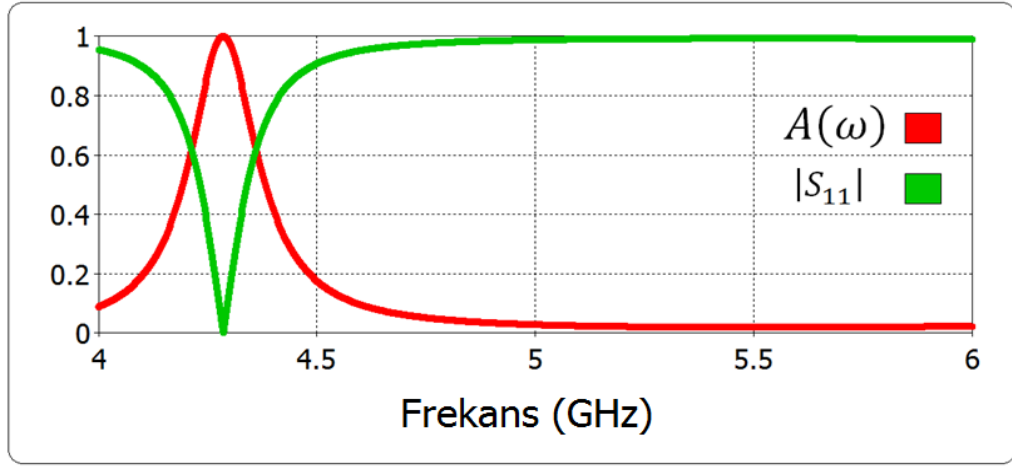
Şekil 4.116. Amaçlanan mikrodalga FSS metamalzeme yapısı-6, a) nümerik yansıma ve emilim değerleri, (b) farklı polarizasyon açıları için nümerik emilim performansı değerleri

Sonuç olarak, bu çalışmada mikrodalga ve terahertz frekanslarında mükemmel emilim sağlayabilen FSS metamalzeme sinyal emici yapıları sunulmuştur. Sunulan tüm yapıların ölçüleri ayarlanarak istenilen frekanslarda emilim gerçekleştirmeleri rahatlıkla sağlanabilir. Bu durum sunulan yapıların simetrik ve kolay konfigüre edilebilir olmalarından kaynaklanmaktadır. Ayrıca mikrodalga frekansında çalışan yapılar için gelen açı ve polarizasyon açı bağımlılığı testleri de yapılırken, terahertz frekansında çalışan yapılar için de polarizasyon açı bağımlılıkları incelenmiştir. Sunulan tüm yapılar sağlık, sensör, medikal görüntü işleme vb. birçok uygulama için mükemmel emilim sağlayan potansiyel uygulama teşkil etmektedir.

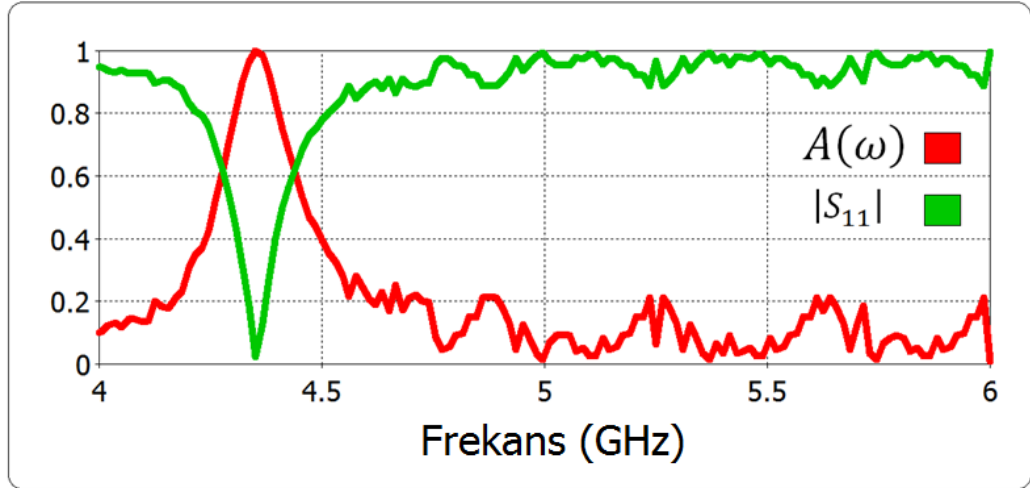
4.5. Güneş Hücresi Uygulamaları İçin Mikrodalga, Kızılötesi ve Görünür Bölgede Polarizasyon Bağımsız Sinyal Emici

4.5.1. Aralıklı Kare Şekil Rezonatör Tabanlı

Bu çalışmada Şekil 3.2'deki rezonatör tipi kullanılmıştır. Amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısının performansını göstermek için mikrodalga frekanslarında numerik ve deneysel sonuçlar elde edilmiş ve doğrulanmıştır (Şekil 4.117 ve 4.118). Ölçüm düzeneğinde elde edilen sonuçlar ile numerik sonuçlar doğrulanmıştır. Şekillerden de anlaşılacağı üzere 4.28 *GHz* rezonans frekansında 99.9% oranında emilim sağlanmıştır. Buna karşılık yansıma değeri de 0.002 olarak elde edilmiştir. Aynı çalışma deneysel olarak da uygulanmış da 4.35 *GHz* rezonans frekansında 99% civarlarında emilim sağlanabilmiştir. Elde edilen sonuçlardan da anlaşılacağı üzere amaçlanan yapı mükemmel emilim sağlamaktadır. Deneysel ve nümerik sonuçlar arasındaki frekans kayması ihmal edilebilir bir düzeydedir. Ölçüm düzeneğinin iyileştirilmesi ve fabrikasyonda gerekli düzeltmeler yapılırsa nümerik sonuçlar ile aynı sonuçlar rahatlıkla yakalanabilir. Gene de elde edilen sonuçlar birbiri ile iyi olarak örtüşmektedir.



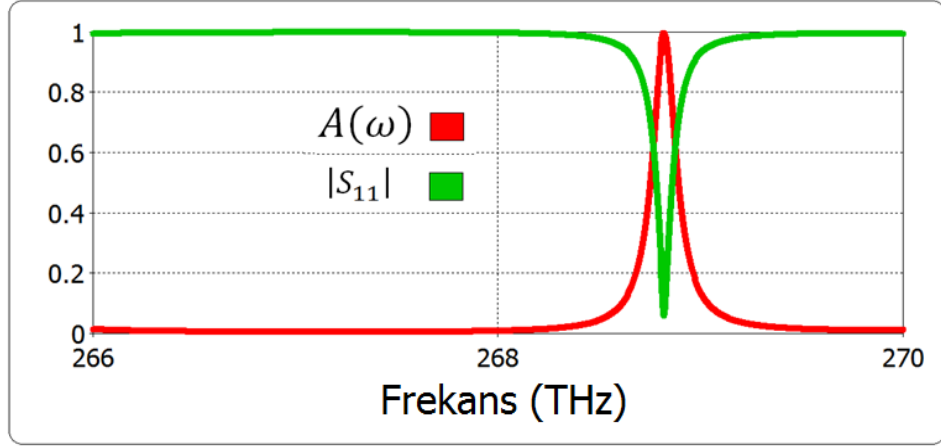
Şekil 4.117. Mikrodalga frekans aralığı için amaçlanan yapının nümerik yansıma-emilim değerleri



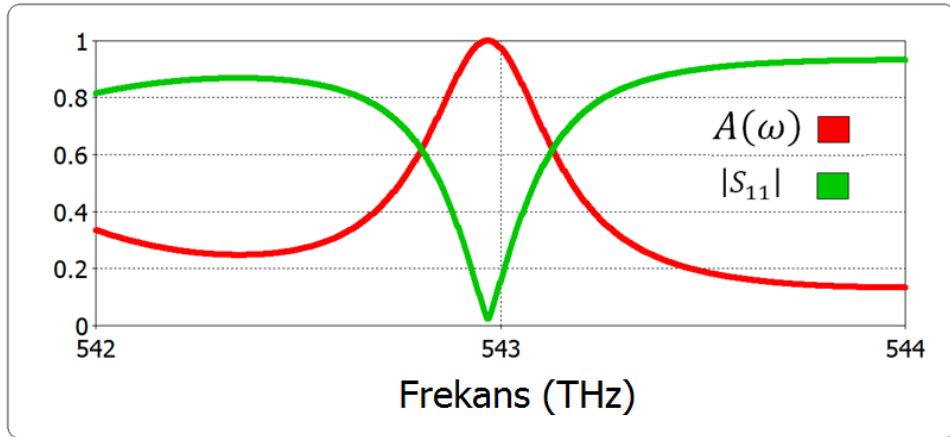
Şekil 4.118 Mikrodalga frekans aralığı için amaçlanan yapının deneysel yansıma-emilim değerleri

Ek olarak, kızılötesi ve görünür bölge için de amaçlanan yapının emilim performansı incelenmiştir. Yapının simetrik ve kolay konfigüre edilebilir bir özelliğe sahip olmasını bunu rahatlıkla mümkün kılmaktadır. Ayrıca solar sistemler için kızılötesi ve görünür bölgede de mükemmel emilim sağlanması solar sistemlerin verimliliği açısından büyük önem arz etmektedir (Elwi ve Al-Rizzo 2011, Liu ve ark. 2012, Aslam ve ark. 2013). Nümerik olarak yapılan bu çalışmada $268.82 THz$ ve $542.97 THz$ rezonans frekanslarında sırasıyla 99.66 % ve 99.9 % oranlarında emilim sağlanmıştır.

Solar sistem uygulamaları için bu değerler çok önem teşkil etmektedir (Şekil 4.119 ve 4.120).



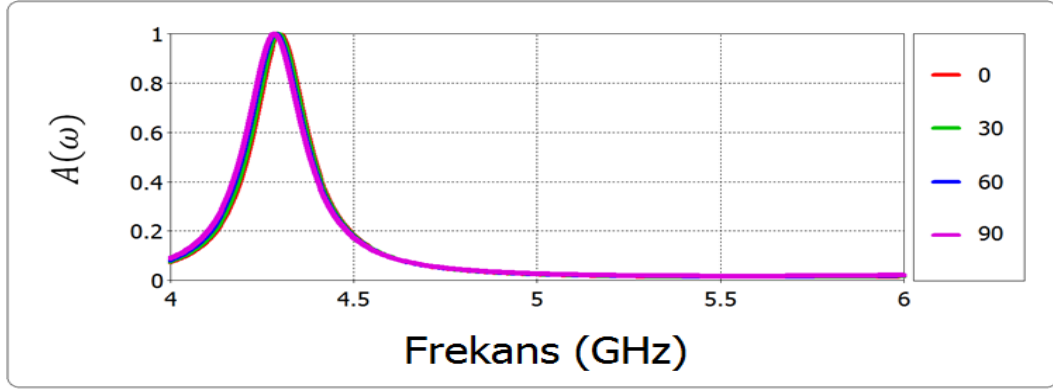
Şekil 4.119. Kızıl ötesi frekans bölgesi için nümerik emilim-yansıma değerleri



Şekil 4.120. Görünür frekans bölgesi için nümerik emilim-yansıma değerleri

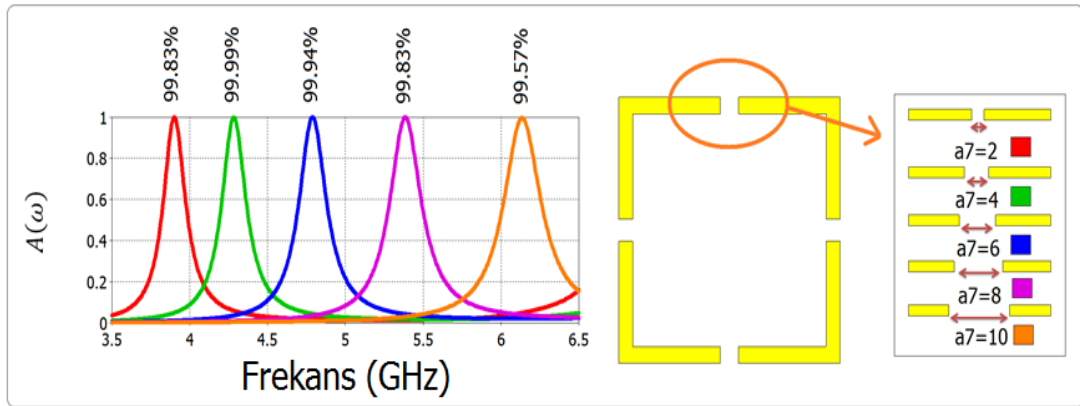
Bu çalışmalara ek olarak amaçlanan solar metamalzeme yapıları için asıl önem teşkil eden polarizasyon açısı bağımlılıkları test edilmiştir. Bilindiği üzere güneş ışınları gün içerisinde dik ve eğimli olarak farklı açılarda gelebilmektedir. Dolayısıyla solar yapıların da farklı açılarda gelen ışınları da emebilmesi istenir. Bundan dolayı önerilen yapılar da bu amaçla test edilmiştir (Şekil 4.121). Şekilden de anlaşılacağı üzere amaçlanan yapı mikrodalga frekans bölgesinde mükemmel olarak emilim sağlamış ve polarizasyon açısı bağımsız olduğunu göstermiştir. Yapının simetrik olmasından kaynaklanan bu avantaj kızıl ötesi ve görünür bölge için de geçerlidir. Yani bunun anlamı

rezonans frekanslarında güneş ışınları hangi açı ile yapı üzerine gelirse gelsin yapı bunu mükemmel oranda emecektir. Elde edilen sonuçlar yapının solar uygulamalar için çok avantajlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.121. Mikrodalga frekans bölgesinde farklı polarizasyon açıları için emilim değerleri

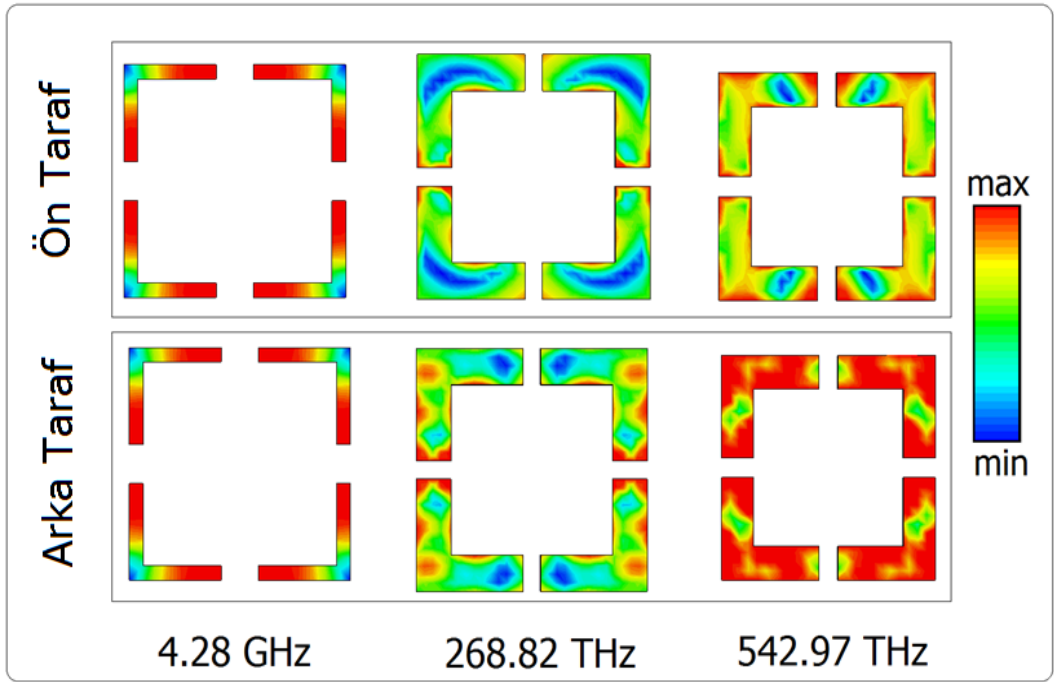
Ek olarak, yapının simetrik ve kolay konfigüre edilebilir özelliğini göstermek için parametrik bir çalışma da gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.122’de sunulmuştur. Bu parametrik çalışmada aralık uzunlukları değiştirilse de mükemmel emilim sağlanmış ve rezonans frekansında kayma meydana gelmiştir. Bu durum yapının mekanik olarak ayarlanabilirlik özelliğine sahip olduğunu da göstermektedir. En iyi emilim değeri aralık uzunluğu $a7 = 4 \text{ mm}$ iken sağlandığından üretilen yapı da bu uzunlukta üretilmiştir.



Şekil 4.122. Yapının aralık uzunlukları için emilim değerleri ($a7 = 2, 4, 6, 8 \text{ ve } 10 \text{ mm}$).

Bilindiği üzere, amaçlanan metamalzeme sinyal emici güneş hücresinin arka kısmına metal tabaka yerleştirildiğinden hiç iletme sahip olmayacaktır. Seçilen geometri üzerine uygulanan gelen EM dalga rezonans frekansında minimum emilim gösterecek ve gelen sinyali maksimum oranda emecektir. Bu güneş hücresi uygulamaları için çok önemli bir özelliktir. Çünkü mükemmel emilim sağlandığında daha fazla güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi sağlanacaktır (Rustemli ve ark. 2013, Kesler ve ark. 2014).

Metamalzeme tabanlı güneş hücresinin çalışma mekanizmasını doğrulamak ve prensibini göstermek için, rezonans frekansındaki elektrik alan dağılımları ve yüzey akım dağılımları elde edilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.123 ve 4.124'te gösterilmektedir. Fiziksel emilim mekanizması rezonans frekansında her iki elektrik ve yüzey akım dağılımının incelenmesiyle daha iyi anlaşılabilir. Şekillerden anlaşılacağı üzere ön ve arka taraftaki her iki rezonatörün aralık uçlarına doğru elektrik alan yoğunlaşmış durumdadır. Tüm yapı üzerinde elektrik alan güçlü olarak etkileşimde bulunmuş olup tüm gelen açı değerlerinde mükemmel emilim gösterdiğinden elektrik alan dağılımı da gelen tüm açı değerlerinde güçlü etkileşimde bulunmaktadır. Elektrik ve manyetik etkileşimlerden dolayı şekil paralel ve paralel olmayan akım dağılımları içermektedir. Bu akımlar uygulanan harici alan ile etkileşime girmiş manyetik ve elektrik cevaplarından dolayı etkileşime girmektedir. Böylece rezonans frekansında empedans eşleşmesi ($Z(\omega) = Z_0(\omega)$) sağlanarak mükemmel emilim elde edilir. Benzer çalışma mekanizması THz uygulamaları için de geçerlidir.



Şekil 4.123. Mikrodalga, kızıl ötesi ve görünür bölge için rezonans frekansındaki elektrik alan dağılımları



Şekil 4.124. Mikrodalga, kızıl ötesi ve görünür bölge için rezonans frekansındaki yüzey akım dağılımları

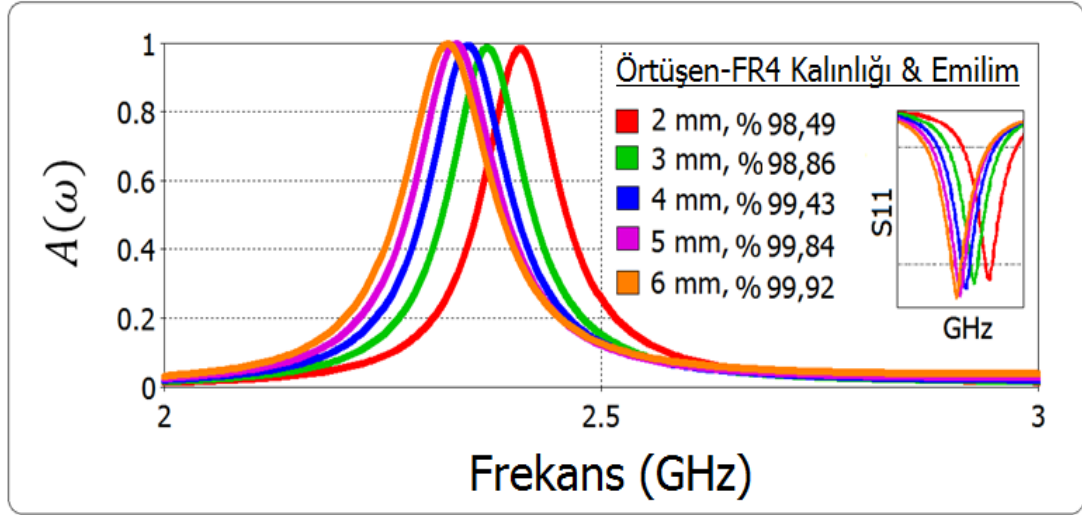
Aralıklı kare şeklinde rezonatörden oluşan metamalzeme sinyal emici tabanlı güneş hücresinin emilim özellikleri nümerik ve deneysel olarak incelenmiştir. Amaçlanan sinyal emici kolay konfigüre edilebilir ve esnek yapı özelliğinden dolayı istenilen frekans bölgesine verimli olarak çalışabilmektedir. Deneysel sonuçlar nümerik sonuçlar ile iyi olarak örtüşmektedir. Tüm rezonans frekanslarında nümerik ve deneysel çalışmada emilim değeri » 99% şeklindedir. Elde edilen sonuçlara göre, amaçlanan yapı güneş hücresi uygulamaları için verimli olarak kullanılabilir. Bunun yanında güneş hücresi uygulamaları için çok önemli bir özellik olan polarizasyon açısı bağımsızlığı da yapı tarafından sağlanmaktadır. Çünkü güneş gün içerisinde yer değiştirdiğinden dolayı gelen güneş ışınları da gün içerisinde açılı olarak gelecektir. Açılı gelen güneş ışınlarından da maksimum düzeyde faydalanmak için yapının açıdan bağımsız olarak mükemmel emilim sağlaması önemli bir avantajdır. Ek olarak rezonatörün çalışma yapısını ve prensibini doğrulamak için elektrik alan ve yüzey akım dağılımları detaylı olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, önerilen metamalzeme sinyal emici tabanlı güneş hücresi yapısı ayrıca uzaktan haberleşme, termal görüntü işleme ve sensör gibi birçok uygulama için de kullanılabilir.

4.6. Metamalzeme Tabanlı Sensör Uygulamaları

4.6.1. Halka ve Çapraz Yıldız Şekil Rezonatör Tabanlı

Bu çalışmada Şekil 3.13'teki materyal kullanılmıştır. Amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısı sensör uygulamaları için de verimli olarak kullanılabilir. Sensör uygulaması için yapının ön yüzüne dielektrik tabakası yerleştirilmiştir. Yerleştirilen dielektrik tabakası ile rezonatör örtüşmektedir (over-layer). Yerleştirilen dielektrik tabakasının kalınlık değişiminin emilim ve yansıma değerlerine olan etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Diğer tüm parametreler karşılaştırma için sabit tutulmuştur. Yerleştirilen dielektrik tabakasının kalınlık değeri 2 mm'den 6 mm'ye kadar arttırılmıştır. Böylece amaçlanan metamalzeme sinyal emici yapısının basınç sensörü olarak da kullanabileceği gösterilmek istenmiştir. Farklı kalınlık değerleri için elde edilen emilim değerleri Şekil 4.125'te gösterilmektedir. Yerleştirilen dielektrik kalınlığı 2 mm olduğu zaman emilim değeri 98.49% olurken kalınlık 6 mm değerine yükseltildiğinde emilim değeri 99.62% olmaktadır. Ek olarak kalınlık arttıkça rezonans frekansı da daha düşük değerlere doğru kayma göstermiştir. Rezonans frekansındaki kayma yapının kapasitans değişiminden

kaynaklanmaktadır. Yerleştirilen ek dielektrik FR-4 yapısının kalınlığının artması kapasitans değerin artmasını ve buna bağı olarak da rezonans frekansının kaymasına neden olmuştur. Böylece amaçlanan yapı sinyal Emilimi yanında basınç sensörü olarak da kullanılabilir.



Şekil 4.125. Yerleştirilen dielektrik tabakasının farklı kalınlıkları için emilim değerleri

4.7. Bakışsız Metamalzeme Tabanlı Mikroşerit Anten Uygulaması

4.7.1. Aralıklı Kare Şekil Rezonatör ve Mikroşerit Anten Tabanlı

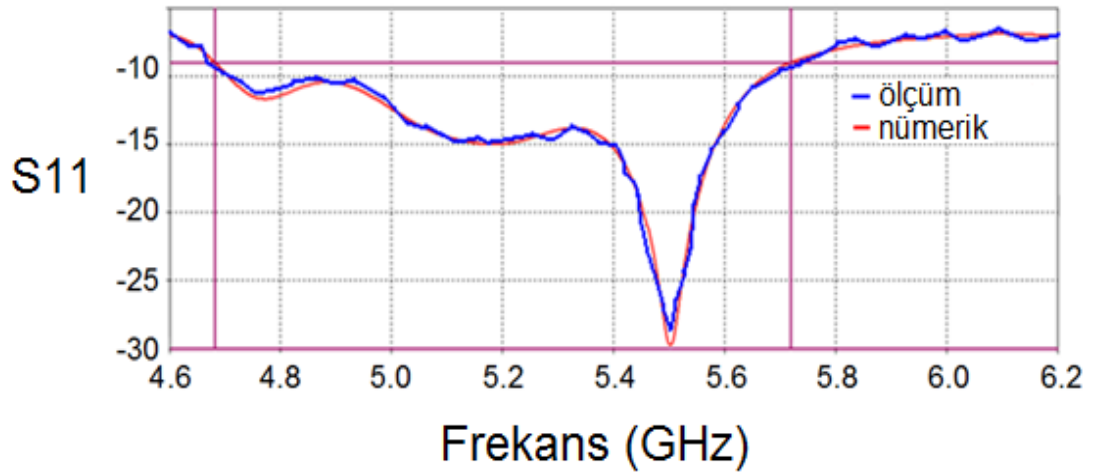
Bu çalışmada Şekil 3.2'deki rezonatör tipi kullanılmıştır. Bakışsızlık gösteren aralıklı kare şeklindeki rezonatörlerin 15° açılı olanı için (Şekil 4.126) katman sayıları değiştirilerek S11 değerleri ve ışıma örüntüsü optimize edilmiştir. Optimizasyon sonucunda 11 katman olması durumunda 5.6 GHz değerini de içine alacak şekilde çok geniş bir iletim bant aralığı-yaklaşık 1 GHz (4.7-5.7 GHz arasında) elde edilmiştir (Şekil 4.127). Minimum yansıma değeri-maksimum iletim değeri- bu yapının maksimum bakışsızlığa sahip olduğu frekans değeri civarında olması, bakışsız metamalzemelerin, antenlerin bant genişliklerini arttırmada önemi ortaya çıkmıştır. 1 GHz'lik iletim bant aralığı literatürde çok az rastlanan bir değerdir. Simülasyon sonuçlarını gerçeklemek amacı ile önerilen yapı üretilmiş ve yama anten üzerine

yerleştirilerek ölçümleri network analiz cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları simülasyon sonuçları ile iyi oranda örtüşmektedir.

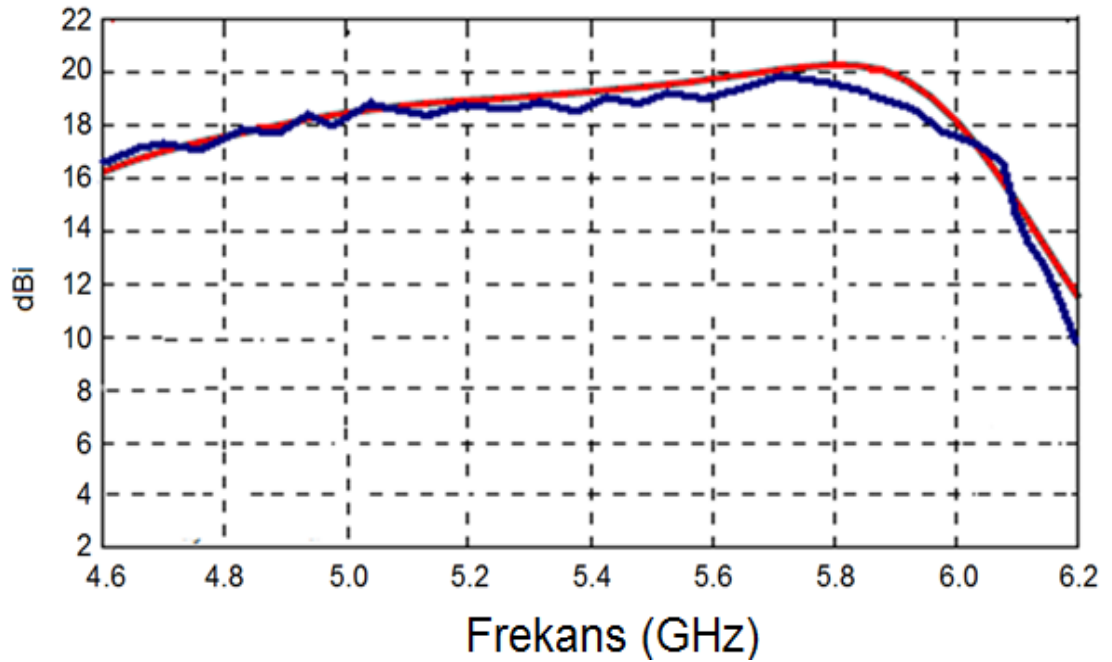
Yansıma değeri tek başına anten sistemlerinin özellikleri hakkında karar vermek için yeterli değildir. Anten sisteminin farklı frekanslarda yönlülüğünde (directivity) dikkate alınması gereken bir parametredir. Bu amaçla bakışimsız metamalzeme blokları eklenmiş yama anten sisteminin yönlülüğü de $\theta=0^0$ ve $\phi=0^0$ için simülasyon ve ölçüm değerleri elde edilerek karşılaştırılmıştır (Şekil 4.128). Ölçümler MATS1000 adlı deney seti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm ve simülasyon sonuçları birbirlerini desteklemektedir. Şekil 4.128’den de görüldüğü gibi ölçüm ve simülasyon gerçekleştirilen frekans aralığının 4.6-6.0 GHz gibi geniş bir bölgesinde, literatürdeki 15 dBi değerinden daha iyidir. Amaçlanan gerçek frekans değeri olan 5.6 GHz değerinde 19 dBi’lik çok iyi bir değer elde edilmiştir. Bir başka önemli nokta iletim bant aralığı olarak ifade edilen 4.7-5.7 GHz arasındaki bütün frekans değerlerinde çok yüksek bir yönlülük gözlenmesidir.



Şekil 4.126. Kare şekilli rezonatör eklenmiş yama anten için (sol-taraf) simülasyon ve (sağ-taraf) deneysel yapı



Şekil 4.127. Kare şekilli rezonatör eklenmiş yama antenin yansıma değeri



Şekil 4.128. Kare şekilli bakışimsız metamalzeme rezonatörler eklenmiş yama antenin yönlülük değerinin simülasyon (kırmızı renkli çizgi) ve ölçüm (mavi renkli çizgi) sonuçları

Burada metamalzemenin elektromagnetik özelliklerinin eş zamanlı olarak negatif olmasından dolayı, yapı, yama antenle ve dış ortam (hava) ile empedans uyumuna daha geniş bir bant aralığında girmesi sağlanarak bant genişliği arttırılmaktadır. Bakışimsız metamalzemelerde aynı şekilde bant genişletmek amacı ile kullanılabilir. Çünkü yeni düzlemsel bakışimsız metamalzemeler eş zamanlı negatif dielektrik sabiti (permittivity)

ve mağnetik geçirgenlik (permeability) değerine sahip olabilmektedir. Bakışımsız yapıların metamalzemelere göre bu konuda üstünlükleri bilinmektedir. Bu alışmada 5.6 GHz alışma frekanslı bir mikrodalga yama antenin bant genişliğinin 1 GHz değerine kadar çıkartılması gerçekleştirilmiştir. Yansıma değerlerine $-S_{11}$ bakılarak bakışımsız metamalzeme tabanlı yama antenin 1 GHzlik bant genişliği görülmektedir. Ek olarak, amaçlanan gerçek frekans değeri olan 5.6 GHz değerinde 19 dBi'lik çok iyi bir değer elde edilmiştir. Bu hem bakışımsız metamalzemelerin bütün frekans aralığı için daha yüksek kazanç sağlaması, hem de yama antenin çalışma bölgesinde ve çevresinde bakışımsız malzemenin empedansını çok düşük değere ayarlanması ile sağlanmıştır.

Simülasyon ve deneysel çalışma sonucunda elde edilen bulgular karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Yapılan lmler neticesinde üretilen antenlerin, literatürdeki mevcut antenlere göre ışıma örüntüsü, bant genişliği, kazancı gibi parametreler için avantajları tespit edilmiştir. Elde edilen somut çıktılar geniş bantta haberleşme amacı ile kullanılabilecek 19dBi değerinde bakışımsız metamalzeme tabanlı yeni nesil antenler olarak belirlenmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada farklı uygulama alanlarına sahip metamalzemeler kullanılarak bu malzemelerin EM özellikleri ayrıntılı olarak analiz edilmiş ve incelenmiştir. Çalışmada kullanılan yapılar; çift tabakalı süreksiz çapraz yıldız şekil rezonatör, çift tabakalı aralıklı kare şekil rezonatör, çift tabakalı gammadion çapraz yıldız şekil rezonatör, daire şekil ayırık halka rezonatör, dikdörtgen şekil ayırık halka rezonatör, omega şekil ayırık halka rezonatör, omega rezonatör ve sekizgen yıldız, süreksiz çapraz yıldız şekil rezonatör, aralıklı halka ve sekizgen yıldız şekil rezonatör, asimetric dikdörtgen şekil rezonatör, halka ve çapraz yıldız şekil rezonatör, omega, kare, dikdörtgen, çapraz yıldız şekil tabanlı yapılarıdır. Bu yapılar, FIT tabanlı CST simülatör kullanılarak analiz edilmiş olup; deneysel çalışmalar için üretimleri farklı dielektrik alt taşı malzemeler kullanılarak gerçekleştirilmiş ve ölçümler için Agilent E5071B ENA RF, Agilent E8362B PNA ve R&S ZVL6 Vektör Network Analizörleri ve bunlara bağlı mikrodalga horn antenler kullanılmıştır.

Farklı geometrik yapılar kullanılarak elde edilen metamalzemeler ile ilgili; optik aktivite, yansıma ve iletim parametreleri, negatif kırılma indisi gibi özellikler nümerik ve deneysel olarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışma ile büyük bakışimsızlık parametresine sahip, geniş band aralığında optik aktivasyon gösterebilen, negatif kırılma indisli malzemeler nümerik ve deneysel olarak analiz edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan yapıların efektif dielektrik permitivite (ϵ), efektif mağnetik geçirgenlik (μ) ve bakışimsızlık parametresi gibi özellikleri Nicolson Ross Weir yöntemi kullanılarak s-parametrelerinden elde edilmiştir. Ayrıca elde edilen bulgular literatür bulguları ile karşılaştırılıp avantajları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Diğer bir çalışmada elde edilen metamalzeme yapıları için sinyal emici özellikleri de ayrıca incelenmiştir. Metamalzemeler ile sinyal Emilimi konusu literatürde güncelliğini koruyan bir konu olup bu konuda geniş bantta, farklı frekans aralıkları ile çoklu (dual, multi) mükemmel sinyal Emilimini polarizasyondan ve gelen açıdan bağımsız olarak sağlayan çalışmalar gerçekleştirilmiş ve avantajlar ayrıntılı olarak sunulmuştur. Burada yapıya gelen sinyali empedansı ile boşluğun empedansının eşit olması kuralı mükemmel sinyal Emilimi için zorunludur ve bu kural uygulanarak mükemmel sinyal Emilimi detaylı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca nümerik ve deneysel

verilerin yanın da, analitik olarak da sinyal emiciler incelenmiş ve verilerin doğrulanması sağlanmıştır.

Ayrıca, bu çalışmada, küçük bakışimsızlık parametresine sahip yeni jenerasyon metamalzemelerle ilgili literatürde ilk çalışma yapılmış ve küçük bakışimsızlık kavramının literatüre girmesi sağlanmıştır. Küçük bakışimsızlık parametresine sahip bu malzemeler, lineer polarize dalgaların asimetrik iletimi ve dinamik polarizasyon dönüşümü ile ilgili uygulamalar da ayrıca yapılmıştır. Geçmişten günümüze kadar bakışimsız metamalzemeler için her zaman büyük bakışimsızlık parametresine sahip bakışimsız metamalzemeler üzerine durulmuştur. Bu durum ile geniş ve dinamik optik aktivite konuları vurgulanmıştır. Fakat küçük bakışimsızlık parametresine sahip bakışimsız metamalzemeler konusu irdelenmemiştir. Bu çalışmada bu konu detaylı bir şekilde analiz edilmiş ve bir ilk olarak literatüre kazandırılmıştır. Küçük bakışimsızlık parametresine sahip bakışimsız metamalzemeler ile de polarizasyon dönüştürücü yapılabileceği ve optik aktivite sağlanabileceği nümerik ve deneysel olarak gösterilmiştir.

Literatürde bir ilk olarak gerçekleştirilen yeni jenerasyon bu malzemeler aslında küçük bakışimsızlık değerine sahip şeker vs. gibi doğal malzemelere alternatif olarak yapay malzemeler ile de bunun üretilebileceği detaylı olarak gösterilmiştir. Küçük bakışimsızlık parametresine sahip doğal olan bu malzemelerin optik aktivitesi yada polarizasyon döndürme özelliği doğal yapılarından dolayı ayarlanabilir değildir. Fakat yeni jenerasyon olarak sunulan bu malzemeler ile istenilen şekilde ayarlanabilir, belirli frekans aralığında sabit bakışimsızlık değerine sahip olabilen, polarizasyon dönüşümü ve optik aktivite gerçekleştirebilen yapay malzemeler gerçekleştirilmiş oldu.

Ayrıca, metamalzeme tabanlı güneş hücresi uygulaması, metamalzeme tabanlı sensör uygulamaları, bakışimsız metamalzeme tabanlı mikroşerit anten uygulaması çalışmaları ayrıntılı olarak incelenmiş, analiz edilmiş ve gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar kullanılarak; listesi EK-A'da verilen 17 adet SCI ve SCI-E indeks kapsamında uluslararası makale, 4 adet uluslararası konferansta sunum (EK-B), 2 adet ulusal konferansta sunum (EK-C) yapılmıştır.

Yapılan bu çalışmalara ek olarak; ileriki zamanlarda gerçekleştirilecek çalışmalar için, bu çalışmalar temel alınarak tekrar konfigüre edilebilir sinyal emici, sensör ve anten çalışmaları yapılarak malzeme yapısı değiştirilmeden aynı yapının farklı frekans

bölgelerinde çalışması sağlanabilir. Böylece yansıma, iletim, bakışimsızlık parametresi, kırılma indisi, band genişliği, ışıma örüntüsü vb. parametreler de ayarlanmış olacaktır.

KAYNAKLAR

- Abdalla, M. A., Hu, Z., 2012. On The Study of Development of x band metamaterial radar absorber. **Advanced Electromagnetics**. 1: 94-98.
- Achenbach, J. D., 1984. Wave Propagation in Elastic Solid, **Amsterdam, North-Holland**.
- Ahmed, S., Naqvi, Q., A., 2010. Electromagnetic scattering from a chiral-coated nihility cylinder. **Progress In Electromagnetics Research Letters**. 18: 41-50.
- Alici, K. B., Ozbay, E., 2007. Electrically small split ring resonator antennas. **J. Appl. Phys.** 101:083104.
- Alici, K. B., Ozbay, E., 2010. Theoretical study and experimental realization of a low-loss metamaterial operating at the millimeter-wave regime: demonstrations of flat- and prism-shaped samples. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**. 16:386-393.
- Alù, A., Engheta, N., 2003. Pairing an epsilon-negative slab with a mu-negative slab: resonance, tunneling and transparency. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**. 51: 2558-71.
- Alù, A., Bilotti, F., Engheta, N., Vegni, L., 2007. Subwavelength, compact, resonant patch antennas loaded with metamaterials. **IEEE Antennas and Wireless Propagation**. 55:13-25.
- Alves F., Grbovic D., Kearney B., Lavrik N. V. and Karunasiri G., 2013. Bi-material terahertz sensors using metamaterial structures. **Optics Express**. 21:13256-13271.
- Aslam, M. I., Güney, D. Ö., 2012. Dual-band, double-negative, polarization-independent metamaterial for the visible spectrum. **J. Opt. Soc. Am. B**. 29: 2839-2847.
- Aslam, M. I., Ali, S. M., 2013. A wideband metamaterial absorber for solar cell applications. **Proceedings of International Conference on Energy and Sustainability**. 113-116, Karachi, Pakistan..
- Aydin, K., Li, Z., Sahin, L., Ozbay, E., 2008. Negative phase advance in polarization independent, multi-layer negative-index metamaterials. **Optics Express**. 16:8835-4.
- Baccarelli, P., Burghignoli, P., Lovat, G., Paulotto, S., 2003. Surface-wave suppression in a double-negative metamaterial grounded slab. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, 2: 269-72.
- Baena, J, Jelinek, L., Marques, R., 2007. Towards a systematic design of isotropic bulk magnetic metamaterials using the cubic point groups of symmetry. **Phys. Rev. B**, 76, 245115-38.
- Barroso, J. J., Hasar, U. C., 2012. Comments on A unique extraction of metamaterial parameters based on kramers-kronig relationship. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**. 60:1743,1744.
- Ben-Menahem, A., Singh, S. J., 1981. Seismic Waves and Sources, **New York, Springer**.
- Borja, A., L., Kelly, J., R., Liu, Q., Hall, P., S., Hu, Z., 2011. Dipole antenna with left-handed loading operating at a zero order mode. **Progress In Electromagnetics Research C**. 19:85-92.
- Bartsch, M., Dehler, M., Dohlus, M., Ebeling, F., Hahne, P., Klatt, R., Krawczyk, F., Marx, M., Min, Z., 1992. Solution of maxwell's equations. **Computer Physics Communications**. 72:22-39.
- Bose J.C. (1898). On the rotation of plane of polarisation of electric waves by a twisted structure. **Proceedings of the Royal Society of London**, 63, 146–152.

- Buell, K., H. Mosallaei, and K. Sarabandi, 2006. A substrate for small patch antennas providing tunable miniaturization factor. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**. 54:135-146.
- Burlak, G., Martinez-Sanchez, E., 2013. Change of structure of the cherenkov emission at modulated source in dispersive metamaterials, **Progress In Electromagnetics Research**. 139, 277-288.
- Chao, G., Bo, Q. S., Bin, P. Z., Zhuo, X., Jia, L., Wei, G., 2011. Multiband terahertz metamaterial absorber. **Chin. Phys. B**. 20: 017801-5.
- Chen, H., 1983. Theory of Electromagnetic Waves, **New York, McGraw-Hill**.
- Cheng, H., Chen, S., Yang, H., Li, J., An, X., Gu, C., Tian, J., 2012. A polarization insensitive and wide-angle dual-band nearly perfect absorber in the infrared regime. **J. Opt.** 14: 0851102-5.
- Cheng, Y., Yang, H., 2010. Design simulation and measurement of metamaterial absorber. **Microwave and Optical Technology Letters**. 52: 877-880.
- Cheng, Y., Yang, H., Cheng, Z., Xiao, B., 2011. A planar polarization-insensitive metamaterial absorber. **Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications**. 9: 8–14.
- Cheng, Y., Nie, Y., Wu, L., Gong, R., Z., 2013. Giant circular dichroism and negative refractive index of chiral metamaterial based on split-ring resonators, **Progress In Electromagnetics Research**. 138, 421-432.
- Choi, J., H., Itoh, T., 2012. Dual-band composite right-left-handed (crlh) phased array antenna. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. 11:732-735.
- Clemens, M., Schuhmann, R., Weiland, T., 1999. Algebraic properties and conservation laws in the discrete electromagnetism. **Frequenz**. 53:219-225.
- Clemens, M., Gjonaj, E., Pinder, P., Weiland, T., 2000. Numerical simulation of coupled transient thermal and electromagnetic fields with the finite integration method. **IEEE Transactions on Magnetics**. 36:1448-1452.
- Davidson, D. B., 2010. Computational electromagnetics for rf and microwave engineering, **Second Edition Cambridge University Press**.
- Delihacioglu, K., 1998. Power reflection and transmission coefficients for a chiral slab and meanderline polarizer with chiral slab. **Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Gaziantep**.
- Delihacioglu, K., Uckun, S., Ege, T., 2007. Bakışimsız levhada bir ve iki döngülü kare helezon frekans seçici yüzeylerin yansıma ve iletim katsayıları. **12. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi ve Fuarı, Eskişehir**.
- Demirel, E., 2011. Manyetik fotonik kristallerde negatif kırılma indisi incelemeleri, (Doktora Tezi). **Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü**.
- Dincer, F., Sabah, C., Karaaslan, M., Unal, E., Bakir, M., Erdiven, U., 2013a. Asymmetric transmission of linearly polarized waves and dynamically wave rotation using chiral mtm. **Progress In Electromagnetics Research**. 140: 227-239.
- Dincer, F., Karaaslan, M., Unal, E., Sabah, C., 2013b. Dual-band polarization independent metamaterial absorber based on omega resonator and octa-star strip configuration, **Progress In Electromagnetics Research**. 141, 219-231.
- Dincer F., Akgol O., Karaaslan M., Unal E., Sabah C., 2014a. Polarization angle independent perfect metamaterial absorbers for solar cell applications in the microwave, infrared, and visible regime, **Progress In Electromagnetics Research**. 144, 93-101.

- Dincer F., Karaaslan M., Unal E., Delihacioglu K., Sabah C., 2014b. Design of polarization and incident angle insensitive dual-band metamaterial absorber based on isotropic resonators, **Progress In Electromagnetics Research**. 144, 123-132.
- Dincer F., Karaaslan M., Unal E., Akgol O., Demirel E., Sabah C., 2014c. Polarization and angle independent perfect metamaterial absorber based on discontinues cross-wire-strips, **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**. 28, 741-751.
- Dincer F., Karaaslan M., Unal E., Akgol O., Sabah C., 2014d. Multi-band metamaterial absorber: design, experiment and physical interpretation, **The Applied Computational Electromagnetics Society**. 29, 197-202.
- Dincer F., Karaaslan M., Unal E., Akgol O., Sabah C., 2014e. Design of polarization- and incident angle-independent perfect metamaterial absorber with interference theory, **Journal of Electronic Materials**. 43, 3949-3953.
- Dincer F., Karaaslan M., Unal E., Akgol O., Sabah C., 2014f. Chiral metamaterial structures with strong optical activity and their applications, **Optical Engineering**. 53, 107101-8.
- Dincer F., Karaaslan M., Unal E., Akgol O., Demirel E., Sabah C., 2014g. New generation chiral metamaterials based on rectangular srrs with small and constant chirality over a certain frequency band, **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**. 10.1109/TAP.2014.2356206.
- Doğan, E., 2012. Metamalzemelerin Anten Uygulaması. (M.Sc.). **Mustafa Kemal Üniversitesi**.
- Dolling, G., Wegener, M., Soukoulis, C.M., Linden, S., 2007. Negative-index metamaterial at 780nm wavelength. **Opt. Letters**. 32:53-55.
- Driscoll T., Andreev G. O., Basov D. N., Palit S., Cho S. Y., Jokerst N. M., Smith D. R., 2007. Tuned permeability in terahertz split-ring resonators for devices and sensors. **Appl. Phys. Lett.** 91:062511.
- Ekmekci E., Sayan, G. T., 2013. Multi-functional metamaterial sensor based on a broad-side coupled SRR topology with a multi-layer substrate. **Appl Phys A**. 110:189–197.
- Elwi, T. A., Al-Rizzo, H. M., 2011. Fresnel lenses based on nano shell-silver coated silica array for solar cells applications. **Progress In Electromagnetics Research B**. 32: 263-282.
- Engheta, N., Ziolkowski, R., W., 2006. Metamaterials — Physics and Engineering Explorations. **IEEE-Wiley Press**, Piscataway, NJ.
- Enoch, S., Tayeb, G., Sabouroux, P., Guerin, N., Vincent, P., 2002. A metamaterial for directive emission. **Physical Review Letters**. 89: 213902–4.
- Fu, Y. H., Liu, A. Q., Zhu, W. M., Zhang, X. M., Tsai, D. P., Zhang, J. B., Mei, T., Tao, J. F., Guo, H. C., Zhang, X. H., Teng, J. H., Zheludev, N. I., Lo, G. Q., Kwon, D. L., 2011. A Micromachined Reconfigurable Metamaterial via Reconfiguration of Asymmetric Split-Ring Resonators. **Adv. Funct. Mater.** 21:3589–3594.
- Gokkavas, M., Guven, K., Bulu, I., Aydin, K., Penciu, R. S., Kafesaki, M., Soukoulis, C. M., Ozbay, E., 2006. Experimental demonstration of a left-handed metamaterial operating at 100GHz. **Phys. Rev. B**. 73:193103-4.
- Grbic, A., Eleftheriades, G., V., 2004. Overcoming the diffraction limit with a planar left-handed transmission-line lens. **Phys. Rev. Lett.** 92:117403.
- Greengard, L., Rokhlin, V., 1987. A fast algorithm for particle simulations. **J. Computational Physcis**. 73:325-348.

- Gu, S., Barrett, J. P., Hand, T. H., Popa, B.-I., Cummer, S. A., 2010. A broadband low-reflection metamaterial absorber. **Journal of Applied Physics**. 108: 064913-6.
- Han, T., C., Rahim, M., K., A., Masri, T., Karim, M., N., A., 2007. Left handed metamaterial design for microstrip antenna application. **Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference**.
- Hand, T., H., 2009. Design and applications of frequency tunable and reconfigurable metamaterials, (Ph.D). **Duke University Department of Electrical and Computer Engineering**.
- Hasar, U., C., Barroso, J., J., Ertugrul, M., Sabah, C., Cavusoglu, B., 2012a. Application of a useful uncertainty analysis as a metric tool for assessing the performance of electromagnetic properties retrieval methods of bianisotropic metamaterials. **Progress In Electromagnetics Research**. 128: 365-380.
- Hasar, U., C., Barroso, J., J., Sabah, C., Kaya, Y., 2012b. Resolving phase ambiguity in the inverse problem of reflection-only measurement methods, **Progress In Electromagnetics Research**. 129, 405-420.
- He X. J., Wang Y., Wang J. M., Gui T. L., 2010. Thin-film sensor based tip-shaped split ring resonator metamaterial for microwave application. **Microsyst. Technol.** 16:1735–1739.
- He, X. J., Wang, Y., Wang, J. M., Gui, T. L., Wu, Q., 2011. Dual-Band Terahertz Metamaterial Absorber With Polarization Insensitivity And Wide Incident Angle. **Progress In Electromagnetics Research**. 115: 381-397.
- Hu, F., Wang, L., Quan, B., Xu, X., Li, Z., Wu, Z., Pan, X., 2013. Design of a polarization insensitive multiband terahertz metamaterial absorber. **J. Phys. D: Appl. Phys.** 46: 195103-8.
- Huang M., Yang J., Sun J., Shi J. and Peng J., 2009. Modelling and analysis of ω -shaped double negative material-assisted microwave sensor. **Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves**. 30:1131–1138.
- Huang, C., Zhao, J., Jiang T., Feng, Y., 2012. Asymmetric transmission of linearly polarized electromagnetic wave through chiral mtm structure. **J. Electromagnet. Wave**. 26:1192-1202.
- Huang, Y., J, Wen, G., J, Li, J., Zhu, W., R., Wang, P., Sun, Y., H., 2013. Wide-angle and polarization independent metamaterial absorber based on snowflake-shaped configuration. **J. Electromagn. Waves Appl**. 27:552-559.
- Iizuka, H., Hall, P., S., 2007. Left-Handed Dipole Antennas and Their Implementations. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**. 55:1246-1253.
- Jeppesen C., Xiao S., Mortensen N. A., Kristensen A., 2010. Metamaterial localized resonance sensors: prospects and limitations. **Optics Express**. 18:25075.
- Jun, H. Y., Jun, W. G., Jian, L., Ping, Z. J., Ping, W., Hua, S. Y., Gordon, O., Ren, Z. W., 2012. Metamaterial absorbers realized in an x-band rectangular waveguide. **Chin. Phys. B**. 21: 117801-5.
- Kang, M., Chen, J., Cui, H. X., Li, Y., Wang, H. T., 2011. Asymmetric transmission for linearly polarized electromagnetic radiation. **Optics Express**. 19: 8347-8356.
- Karaaslan, M., 2009. Negatif kırılma indisli metamatzemelerin elde edilmesi, (Doktora Tezi). **Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**.
- Karaaslan, M., Bakir, M., 2014. Chiral metamaterial based multifunctional sensor applications, **Progress In Electromagnetics Research**, 149, 55-67.
- Karkkainen, M., K., 2003. Numerical study of wave propagation in uniaxially anisotropic Lorentzian backward-wave slabs. **Physical Review E**, 68: 026602–6.

- Kao, T. S., Huang, F. M., Chen, Y., Rogers, E. T. F., Zheludev, N. I., 2010. Metamaterial as a controllable template for nanoscale field localization. **Applied Physics Letters**. 96: 041103-3.
- Kesler S., Kivrak S., Dincer F., Rustemli S., Karaaslan M., Unal E., Erdiven U., 2014. The analysis of pv power potential and system installation in manavgat, turkey-a case study in winter season, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 31, 671-680.
- Kong, S., C., Thomas, Z., M., Chen, X., Wu, B., I., Grzegorzczuk, T., M., Kong, J., A., 2007. Band-stop filter based on a substrate embedded with metamaterials. **Microwave and Optical Technology Letters**, 49: 530–34.
- Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R., Padilla, W. J., 2008. A perfect metamaterial absorber, **Phys. Rev. Lett.** 100:207402-4.
- Lee, J., Yoon, Y. J., Lim, S., 2012. Ultra-thin polarization independent absorber using hexagonal interdigital metamaterial. **ETRI Journal**. 34:126-129.
- Lee, J., Lim, S., 2011. Bandwidth-enhanced and polarization-insensitive metamaterial absorber using double resonance. **Electronics Letters**. 47:8-9.
- Li, L., W., You, D., Leong, M., S., Yeo, T., S., 2000. Electromagnetic scattering by multilayered chiral-media structures:a scattering to radiation transform.**Progress In Electromagnetics Research**. 26: 249–291.
- Li, T., Q., Liu, H., Li, T., Wang, S., M., Wang, F., M., Wu, R., X., Chen, P., Zhu, S., N., Zhang, X., 2008. Magnetic resonance hybridization and optical activity of microwaves in a chiral metamaterial.**Applied Physics Letters**. 92: 131111-3.
- Li, Z., K. Aydin, E. Ozbay, 2009. Determination of the effective constitutive parameters of bianisotropic metamaterials from reflection and transmission coefficients. **Phys. Rev. E**,. 79:026610.
- Li, Z., Caglayan, H., Colak, E., Zhou, J., Soukoulis, C., M., Ozbay, E., 2010a. Coupling effect between two adjacent chiral structure layers. **Opt. Express**. 18:5375-83.
- Li, Z., Zhao, R., Koschny, T., Kafesaki, M., Alici, K., B., Colak, E., Caglayan, H., Ozbay, E., Soukoulis, C., M., 2010b. Chiral metamaterials with negative refractive index based on four “U” split ring resonators. **Applied Physics Letters**. 97:081901-3.
- Li, M., H., Yang, H.-L., Hou, X.-W., Tian, Y., Hou, D.-Y., 2010c. Perfect Metamaterial Absorber With Dual Bands. **Progress In Electromagnetics Research**. 108: 37-49.
- Li, Z., Alici, K., B., Colak, E., Ozbay, E., 2011. Complementary chiral metamaterials with giant optical activity and negative refractive index.**Applied Physics Letters**. 98: 161907-3.
- Li, Z., Mutlu, M., Ozbay, E., 2013a. Chiral metamaterials - from optical activity and negative refractive index to asymmetric transmission. **Journal of Optics**. 15: 023001-13.
- Lin, C. H., Chern, R. L., Lin, H. Y., 2011. Polarization-independent broad-band nearly perfect absorbers in the visible regime. **Optics Express**. 19: 415-424.
- Linden, S., Wegener, M., 2007. Photonic metamaterials.**International Symposium on Signals, Systems and Electronics**: 147–150, Montreal, QC, Canada.
- Liu, Y., Chen, Y., Li, J., Hung, T. C., Li, J., 2012. Study of energy absorption on solar cell using metamaterials. **Solar Energy**. 86: 1586–1599.
- Lu, L., Qu, S., Ma, H., Yu, F., Xia, S., Xu, Z., Bai, P., 2012. A polarization independent wide-angle dual directional absorption metamaterial absorber. **Progress In Electromagnetics Research M**. 27: 191-201.

- Luukkonen, O., Maslovski, S., I., Tretyakov, S., A., 2011. A Stepwise nicolson–ross–weir-based material parameter extraction method. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. 10: 1295-1298.
- Majid, H., A., Rahim, M., K., A., 2007. Investigation of left handed metamaterial in microstrip antenna application, **Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics Proceedings**, Malaysia.
- Majid, H., A., Rahim, M., K., A., Masri, T., 2009. Microstrip antennas gain enhancement using left-handed metamaterial structure. **Progress In Electromagnetics Research M**. 8:235-247.
- Manzanares-Martinez, J., Gaspar-Armenta, J., 2007. Direct integration of the constitutive relations for modeling dispersive metamaterials using the finite difference time-domain technique. **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**. 21: 2297–2310.
- Melik R., Unal E., Perkgoz N. K., Puttlitz C. and Demir H. V., 2009. Flexible metamaterials for wireless strain sensing. **Applied Physics Letters**. 95:181105.
- Melik R. Unal E., Perkgoz N.K., Santoni B., Kamstock D., Puttlitz C. and Demir H. V., 2010. Nested Metamaterials for Wireless Strain Sensing, **IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics**. 16:450-458.
- Meng, L., Zhao, D., Li, Q., Qiu, M., 2012. Polarization-insensitive perfect absorbers at near-infrared wavelengths. **Optics Express**. 21: A111-A122.
- Miklowitz, J., 1980. The Theory of Elastic Wave Guides, **Second Edition, Amsterdam, Nort-Holland**.
- Mohammadian, A. H., Shankar, V., Hall, W. F., 1991. Computation of electromagnetic scattering and radiation using a time-domain finite-volume discretization procedure. **Computer Physics Communications**. 68:175-196.
- Monzon, C, Forester, D., W., 2005. Negative refraction and focusing of circularly polarized waves in optically active media, **Phys. Rev. Lett.** 95, 123904.
- Nicolson, A., M., Ross, G., F., 1970. Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques. **IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement**. 19: 377-382.
- Nikooei Tehrani, K., Abdolali, A., Zarifi, D., Hojjat-Kashani, F., 2013. Application of chiral layers and metamaterials for the reduction of radar cross section, **Progress In Electromagnetics Research**. 137, 759-773.
- Panpradit, W., Sonsilphong, A., Soemphol, C., Wongkasem, N., 2012. High negative refractive index in chiral metamaterials, **J. Optics**. 14, 075101-14.
- Park, J. W., Tuong, P. V., Rhee, J. Y., Kim, K. W., Jang, W. H., Choi, E. H., Chen, L. Y., Lee, Y. P., 2013. Multi-band metamaterial absorber based on the arrangement of donut-type resonators. **Optics Express**. 21: 9691-9702.
- Pendry, J., B., Holden, A., J., Stewart, W., J., Youngs, I., 1996. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. **Physical Review Letters**. 76:4773-4776.
- 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**. 47:2075-2084.
- Pendry, J. B., 2000a. Light runs backwards in time. **Phys. World**. 13: 27.
- Pendry, J. B., 2000b. Negative refraction makes perfect lens. **Phys. Rev. Lett.**, 85: 3966.
- Pendry, J. B., 2004. A chiral route to negative refraction, **Science**. 306, 1353-1355.

- Plum, E., Fedotov, V., A., Zheludev, N., I., 2008. Asymmetric transmission through chiral symmetry breaking in planar metamaterials, **Conference on Quantum Electronics and Laser Science**. 1-2.
- Plum, E., Zhou, J., Dong, J., Fedotov, V., Koschny, T., Soukoulis, C., M., Zheludev, N., 2009a. Metamaterial with negative index due to chirality, **Phys. Rev. B**. 79, 035407.
- Plum, E., Fedotov, V. A., Zheludev, N. I., 2009b. Planar metamaterial with transmission and reflection that depend on the direction of incidence. **Appl. Phys. Lett.** 94: 131901-3.
- Plum, E., 2010. Chirality and metamaterials, **University of Southampton Faculty of Engineering, Science and Mathematics Optoelectronics Research Centre**, PhD. Thesis.
- Plum, E., Fedotov, V. A., Zheludev, N. I., 2011. Asymmetric transmission: a generic property of two-dimensional periodic patterns. **Journal of Optics**. 13: 024006.
- Rohde & Schwarz 2012. Measurement of Dielectric Material Properties Application Note. **Rohde & Schwarz**. 1: 1-36.
- Rokhlin, V., 1985. Rapid solution of integral equations of classic potential theory. **J. Computational Physics**. 60:187-207.
- Rustemli S., Dincer F., Unal E., Karaaslan M., Sabah C., 2013. The analysis on sun tracking and cooling systems for photovoltaic panels, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 22, 598-603.
- Sabah, C., Uckun, S., 2003. Çok katmanlı bakışimsız ortamda yansıma ve geçme güç katsayıları. **Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi**. İstanbul: 364-367.
- Sabah, C., Uckun, S., 2007. Electromagnetic wave propagation through the frequency-dispersive and lossy double-negative slab. **Opto-Electronics Review**. 15: 133-43.
- Sabah, C., 2008a. Characterization and analysis of left-handed chiral materials. **12th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory**, Odesa, Ukraine, 512-514.
- Sabah, C., 2008b. Left-handed chiral metamaterials, **Cent. Eur. J. Phys.** 6, 872-878.
- Sabah, C., 2008c. Effects of loss factor on plane wave propagation through a left-handed material slab. **Acta Physica Polonica A**. 113: 1589-1597.
- Sabah, C., 2008d. Transmission line modelling method for planar boundaries containing positive and negative index media. **12th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory**, Odesa, Ukraine, 521-523.
- Sabah, C., Uckun, S., 2009. Multilayer system of lorentz/drude type metamaterials with dielectric slabs and its application to electromagnetic filters, **Progress In Electromagnetics Research**. 91, 349-364.
- Sabah, C., Roskos, H., G., 2009b. Broadband terahertz metamaterial for negative refraction. **Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings**, Moscow, Russia, 785-788.
- Sabah, C., 2009c. Numerical study of high reflection coatings with negative and positive refractive indexes. **Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications**. 3: 860-864.
- Sabah, C., Cakmak, A., O., Ozbay, E., Uckun, S., 2010. Transmission measurements of a new metamaterial sample with negative refraction index. **Physica B**, 405: 2955-2958.

- Sabah, C., Roskos, H., G., 2011. Numerical and experimental investigation of fishnet-based metamaterial in a X-band waveguide. **Journal of Physics D: Applied Physics**. 44: 255101.
- Sabah, C., 2012. Electric and magnetic excitations in anisotropic broadside-coupled triangular-split-ring resonators. **Applied Physics A**.108: 457-463.
- Sabah C., Roskos H. G., 2012a. Terahertz sensing application by using planar split-ring-resonator structures, **Microsyst Technol**. 18:2071–2076.
- Sabah, C., Roskos, H., G., 2012b. Design of a terahertz polarization rotator based on a periodic sequence of chiral-metamaterial and dielectric slabs, **Progress In Electromagnetics Research**. 124, 301-314.
- Sabah, C., 2012d. Microwave response of octagon-shaped parallel plates Low-loss metamaterial. **Optics Communications**. 285: 4549-4552.
- Sabah, C., Roskos, H., G., 2012e. Dual-band polarization-independent sub-terahertz fishnet metamaterial. **Current Applied Physics**. 12: 443-450.
- Sabah, C., Roskos, H., G., 2012f. Effect of the metallization on the resonances of thz fishnet metamaterials. **J. Europ. Opt. Soc. Rap. Public**. 7: 12005-4.
- Sabah, C., Urbani, F., Uckun, S., 2012g. Bloch Impedance Analysis for a left handed transmission line. **Journal of Electrical Engineering**, 63: 310-315.
- Sabah C., Roskos H. G., 2013a. Broadside-coupled triangular split-ring-resonators for terahertz sensing. **Eur. Phys. J. Appl. Phys**. 61:30402.
- Sabah, C., Urbani, F., 2013b. Experimental analysis of Λ -shaped magnetic resonator for mu-negative MTMs. **Opt.Commun**. 294:409-413.
- Sabah, C., 2013c. Multiband metamaterials based on multiple concentric open-ring resonators topology, **IEEE J. Sel. Top. Quant**. 19, 8500808.
- Sabah C., Dincer F., Karaaslan M., Unal E., Akgol O., 2014a. Polarization-insensitive fss based perfect metamaterial absorbers in ghz and thz frequencies, **Radio Science**. 49, 306-314.
- Sabah C., Dincer F., Karaaslan M., Unal E., Akgol O., Demirel E., 2014b. Perfect metamaterial absorber with polarization and incident angle independencies based on ring and cross-wire resonators for shielding and a sensor application, **Optics Communications**. 322, 137-142.
- Schurig, D., Mock, J., J., Justice, B., J., Cummer, S., A., Pendry, J., B., Starr, A., F., Smith, D., R., 2006. Matematerial electromagnetic cloak at microwave frequencies. **Science**. 314: 977-980.
- Shelby, R., A., Smith, D., R., Schultz, S., 2001. Experimental verification of a negative index of refraction. **Science**. 292:77-79.
- Shen, N., H., Zhang, L., Koschny, T., Dastmalchi, B., Kafesaki, M., Soukoulis, C., M., 2012. Discontinuous design of negative index metamaterials based on mode hybridization. **Applied Physics Letters**. 101: 081913-3.
- Singh, R., Plum, E., Menzel, C., Rockstuhl, C., Azad, A. K., Cheville, R. A., Lederer, F., Zhang, W., Zheludev, N. I., 2009. Terahertz metamaterial with asymmetric transmission. **Physical Review B**. 80: 153104-4.
- Smith, D., R., Kroll, N., 2000. Negative refraction index in left-handed materials. **Phys. Rev. Lett**. 85:2933–2936.
- Smith, D. R., S. Schultz, P. Markos, C. M. Soukoulis, 2002. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients. **Phys. Rev. B**. 65:195104.

- Smith, D. R., D. C. Vier, T. Koschhy, and C. M. Soukoulis, 2005. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials. **Phys. Rev. E.** 71:036617.
- Song, X.-H., Wu, W.-Y., Shen, T.-G., Zhou, Y.-Q., 2011. Investigation of a patch antenna based on I-shaped left-handed material. **Optik.** 122:1426-1429.
- Sun, J., Liu, L., Dong, G., Zhou, J., 2011. An extremely broad band metamaterial absorber based on destructive interference. **Opt. Express.** 19:21155-62.
- Taflove, A., Hagness, S. C., 2000. Computational Electrodynamics: The finite-difference time-domain method. **Artech House, Boston, London**, 2000.
- Tao, H., Landy, N. I., Bingham, C. M., Zhang, X., Averitt, R. D., Padilla, W. J., 2008a. A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization. **Optics Express.** 16: 7181-7188.
- 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., 2008b. Highly flexible wide angle of incidence terahertz metamaterial absorber: Design, fabrication, and characterization. **Physical Review B.** 78: 241103-4.
- Tao, H., Strikwerda A. C., Liu M., Mondia J. P., Ekmekci E., Fan K., Kaplan D. L., Padilla W. J., Zhang X., Averitt R. D., Omenetto F. G., 2010a. Performance enhancement of terahertz metamaterials on ultrathin substrates for sensing applications. **Appl. Phys. Lett.** 97:261909.
- Tao, H., Bingham, C. M., Pilon, D., Fan, K., Strikwerda, C. M., Shrekenhamer, D., Padilla, W. J., Zhang, X., Averitt, R. D., 2010b. A dual band terahertz metamaterial absorber. **J. Phys. D: Appl. Phys.** 43: 225102-5.
- Tennant, A., Chambers, B., 2004. A single-layer tunable microwave absorber using an active-fss. **IEEE Microw. Wirel.Compon.Lett.**,14:46-47.
- Thoma, P., Weiland, T., 1995. A subgridding method in combination with the finite integration technique. Microwave Conference
- Tinoco I.Jr. and Freeman P. (1957). The optical activity of oriented copper helices. I. Experimental. **Journal of Physical Chemistry**, 61, 1196–1200.
- Torres-Silva, H., 2008. Chiral waves in a metamaterial medium ingeniare. **Revista chilena de ingeniería.** 16 número especial: 119-122.
- Tretyakov, S., Nefedov, I., Sihvola, A., Maslovski, S., Simovski, C., 2003. Waves and energy in chiral nihility, **J. Electromagnet. Wave.** 17, 695-706.
- Unal, E., Karaaslan, M., Ozdemir, E., 2010. Optimization of elliptically designed patch mushrooms and investigation of low profile dipole antenna – HIGP interaction, **Optoelectron. Adv. Mat.** 4, 1898-1900.
- Urbani, F., Sabah, C., Uckun, S., 2007. Wave interaction with double-negative and double-positive plates. **Progress In Electromagnetics Research Symposium**, Prague, Czech Republic: 99-102.
- Veselago, V., G., 1967. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . **Soviet Physics Uspekhi.** 10:509–514.
- Wang, M., Y., Xu, J., Wu, J., Wei, B., Li, H., L., Xu, T., Ge, D., B., 2008. FDTD study on wave propagation in layered structures with biaxial anisotropic metamaterials, **Progress In Electromagnetics Research.** 81, 253-265.
- Wang, B., Koschny, T., Soukoulis, C. M., 2009a. Wide-angle and polarization-independent chiral metamaterial absorber. **Physical Review B.** 80: 033108-4.

- Wang, B., Zhou, J., Koschny, T., Kafesaki, M., Soukoulis, C., M., 2009b. Chiral metamaterials: simulations and experiments. **J. Opt. A: Pure Appl. Opt.** 11: 114003-10.
- Wang, B., Zhou, J., Koschny, T., Soukoulis, C., M., 2009c. Nonplanar chiral metamaterials with negative index, **Appl. Phys. Lett.** 94, 151112-5.
- Wei, Z., Cao, Y., Fan, Y., Yu, X., Li, H., 2011. Broadband polarization transformation via enhanced asymmetric transmission through arrays of twisted complementary split-ring resonators. **Applied Physics Letters**. 99:221907-3.
- Weiland, T., 1977. A discretization model for the solution of maxwell's equations for six-component fields. **Electron. Commun.** 31:116-120.
- Weiland, T., 1996. Time domain electromagnetic field computation with finite difference methods. **International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields**. 3:295-319.
- Wiltshire, M. C. K., Pendry, J. B., Young, I. R., Larkman, D. J., Gilderdale, D. J., Hajnal, J. V., 2001. Microstructured magnetic materials for rf flux guides in magnetic resonance imaging. **Science**. 291:849-851.
- Wiltshire, M., C., K., Pendry, J., B., Hajnal, J., V., 2009. Chiral swiss rolls show a negative refractive index. **Journal of Physics: Condensed Matter**. 21:292201-5.
- Withayachumnankul, W., Jaruwongrunsee, K. C., Tuantranont, A., Fumeaux, C., Abbott, D., 2013. Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization, **Sensors and Actuators A**. 189, 233– 237.
- Wu, Z., Zhang, B., Zhong, S., 2010. A double-layer chiral metamaterial with negative index, **J. Electromagn. Waves Appl.** 24, 983–992.
- Wu, B. I., Wang, W., Pacheco, J., Chen, X., Grzegorzczak, T. M., Kong, J. A., 2005. A study of using metamaterials as antenna substrate to enhance gain. **Progress In Electromagnetics Research**. 51, 295-328.
- Xi, S., Chen, H., Wu, B., I., Kong, J., A., 2008. Experimental confirmation of guidance properties using planar anisotropic left-handed metamaterial slabs based on s-ring resonators, **Progress In Electromagnetics Research**. 84, 279-287.
- Yan, S., Vandenbosch, G. A. E., 2012. Increasing the nri bandwidth of dielectric sphere-based metamaterials by coating. **Progress In Electromagnetics Research**. 132: 1-23.
- Yang J. J., Huang M., Xiao Z. & Peng J. H., 2010. Simulation and analysis of asymmetric metamaterial resonator-assisted microwave sensor. **Mod. Phys. Lett. B**. 24:1207–1215.
- Yang J. J., Huang M., Tang H., Zeng J. and Dong L., 2013. Metamaterial sensors, **International Journal of Antennas and Propagation**. 2013:1-16.
- Ye, Y., He, S., 2010. 90° polarization rotator using a bilayered chiral metamaterial with giant optical activity. **Applied Physics Letters**. 96:203501-3.
- Ye, Y., Li, X., Zhuang, F., Chang, S., W., 2011. Homogeneous circular polarizers using a bilayered chiral metamaterial. **Applied Physics Letters**. 99: 031111-3.
- Yen, T. J., Padilla, W. J., Fang, N., Vier, D. C., Smith, D. R., Pendry, J. B., Basov, D. N., Zhang, X., 2004. Terahertz magnetic response from artificial materials. **Science**. 303:1494-1496.
- Yilmaz, A., Sabah, C., 2013. Diamond-shaped hole array in double-layer metal sheets for negative index of refraction. **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**. 27:413-420.

- Zarifi, D., Abdolali, A., Soleimani, M., Nayyeri, V., 2012a. Inhomogeneous planar layered chiral media: analysis of wave propagation and scattering using Taylor's series expansion, **Progress In Electromagnetics Research**. 125, 119-135.
- Zarifi, D., Oraizi, H., Soleimani, M., 2012b. Improved performance of circularly polarized antenna using semi-planar chiral metamaterial Covers. **Progress In Electromagnetics Research**. 123: 337-354.
- Zarifi, D., Soleimani, M., Nayyeri, V., 2012c. A novel dual-band chiral metamaterial structure with giant optical activity and negative refractive index, **J. of Electromagn. Waves and Appl.** 26, 251–263.
- Zhao, R, Koschny, T., Soukoulis, C., M., 2010. Chiral metamaterials: retrieval of the effective parameters with and without substrate, **Opt. Express**. 18, 14553-67.
- Zhao, R, Zhang, L., Zhou, J., Koschny, T., Soukoulis, C., M., 2011. Conjugated gammadion chiral metamaterial with uniaxial optical activity and negative refractive index, **Phys. Rev. B**. 83, 035105-4.
- Zhang, S., Fan, W., Panoiu, N. C., Malloy, K. J., Osgood, R. M., Brueck, S. R. J., 2005. Experimental demonstration of near-infrared negative-index metamaterials. **Phys. Rev. Lett.** 95:137404-4.
- Zhang, S., Park, Y., S., Li, J., Lu, X., Zhang, W., Zhang, X., 2009. Negative refractive index in chiral metamaterials. **Physical Review Letters**. 102: 023901-4.
- Zhang, Y., Fiddy, M., A., 2013. Covered image of super lens, **Progress In Electromagnetics Research**. 136, 225-238.
- Zhou, J., Dong, J., Wang, B., Koschny, T., Kafesaki, M., Soukoulis, C., M., 2009. Negative refractive index due to chirality. **Physical Review B**. 79: 121104-4.
- Zhu, B., Wang, Z., Huang, C., Feng, Y., Zhao, J., Jiang, T., 2010a. Polarization insensitive metamaterial absorber with wide incident angle. **Progress In Electromagnetics Research**. 101: 231-239.
- Zhu, B., Feng, Y., Zhao, J., Huang, C., Wang, Z., Jiang, T., 2010b. Polarization modulation by tunable electromagnetic metamaterial reflector-absorber. **Optics Express**. 18: 23196-23203.

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Kahramanmaraş'ta doğdu. 2002 yılında Kahramanmaraş Süleyman Demirel Fen Lisesi'ni kazandı ve 2005 yılında mezun oldu. Daha sonrasında, 2005 yılında kazandığı Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 2009 yılında onur derecesi ve ikincilikle mezun oldu. Aynı yıl Yüzüncü Yıl Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak akademik kariyerine başlangıç yaptı. Yüzüncü Yıl Üniversitesi'nde Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına başladı ve 2011 yılında mezun oldu. Sonrasında Mustafa Kemal Üniversitesi'nde Öğretim Görevlisi olarak kariyerine devam etti. Aynı üniversitede Enformatik Anabilim Dalı'nda doktora programına başladı ve halen Mustafa Kemal Üniversitesi'nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır.