



**YÜKSEK DÖNÜŞÜM ORANINA SAHİP
METAMALZEME POLARİZASYON
DÖNÜŞTÜRÜCÜLER**

Kübra DÖNMEZ

Danışman: Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**YÜKSEK DÖNÜŞÜM ORANINA SAHİP METAMALZEME GENİŞ
POLARİZASYON DÖNÜŞTÜRÜCÜLER**

(Meta-Material Polarization Converters With High Conversion Efficiency)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kübra DÖNMEZ

Danışman: Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK

Erzurum
Ağustos, 2025

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Kübra DÖNMEZ tarafından hazırlanan “Yüksek Dönüşüm Oranına Sahip Metamalzeme Polarizasyon Dönüştürücüler” başlıklı çalışması 02 / 09 / 2025 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Doç. Dr. Yunus KAYA <i>Bayburt Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. M. Fatih ÇORAPSIZ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim Kurulunun
.../.../.... tarih ve sayılı
kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Alper NUHOĞLU

Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK danışmanlığında sunulan “Metamalzeme Geniş Bant Polarizasyon Dönüştürücü” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	12	30
Kuramsal Temeller	7	30
Materyal ve Yöntem	5	35
Bulgular ve Tartışma	4	20
Tartışma	4	20
Tezin Geneli	11	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Kübra DÖNMEZ	Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK
6.8.2025	6.8.2025
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince benimle bilgi birikimini paylaşan, bana akademik önderlik yapan kıymetli hocam Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK'e, değerli eşim Uzm. Dr. Orhun DÖNMEZ'e, hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen annem ve kardeşlerime, varlıklarıyla bana güç veren, mutluluk veren çocuklarım Doğa DÖNMEZ ve Gökalp DÖNMEZ'e teşekkür ederim.

Kübra DÖNMEZ



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜKSEK DÖNÜŞÜM ORANINA SAHİP METAMALZEME POLARİZASYON DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

Kübra DÖNMEZ

Danışman: Doç. Dr. Gökhan ÖZTÜRK

Amaç: Bu tez çalışmasının amacı, geleneksel mikrodalga polarizasyon dönüştürücülerin hantal, verimsiz ve maliyetli yapılarının yerine bu dezavantajları ortadan kaldıracak metayüzey yapıları ile geliştirilen geniş bant polarizasyon dönüştürücü tasarlamaktır.

Yöntem: Geniş bant metayüzey polarizasyon dönüştürücü mikrodalga soğurum programı CST Microwave Studio benzetim programında simüle edilmiştir. Bu simülasyon programından elde edilen benzetim S-parametreleri sonuçları Matlab programında işlenerek lineer PCR (Polarizasyon Dönüşürme Oranı) performansı düz ve eğik açılı elektromanyetik dalga geliş için elde edilmiştir. Ayrıca sağ ve sol elli polarizasyon dönüştürme oranları, yüzey akım dağılımları performansı da bu program aracılığı ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar eşdeğer devre modeli ile ve PCB üretim teknikleri ile elde edilen gerçek zamanlı numunenin VNA (vektör ağ alalizatörü) ile ölçümü ile doğrulanmıştır.

Bulgular: Önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücü 10.3-19 GHz aralığında 8.7 GHz bant genişliğinde %90 üzerinede lineer polarizasyon dönüşümü sağlamaktadır. Ayrıca eğik açılı elektromanyetik dalga gelimi için polarizasyon dönüştürücü 45° eğik açığa kadar %80 üzerinde lineer PCR sağlamaktadır. Dairesel polarizasyon dönüşümü için dar frekanslar için 9.6-10 GHz aralığında sol elli dairese polarizasyon, 20-20.4 GHz aralığında sağ elli dairese polarizasyon dönüşümü sağlamaktadır.

Sonuç: Bu tez çalışmasında metayüzey lineer ve dairese polarizasyon dönüştürücü geniş bir mikrodalga bant aralığı için gerçekleştirilmiştir. Literatürde yer alan diğer genişbant metayüzey polarizasyon dönüştürücülere kıyasla elektronik boyut olarak daha fazla geniş banta sahip, ince, uygun ve kolay elde edilebilir metaryeller kullanılarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Metayüzey, Polarizasyon, Geniş Bant, RCS

Ağustos 2025, 54 sayfa

ABSTRACT

MASTER DISSERTATION

META-MATERIAL POLARIZATION CONVERTERS WITH HIGH CONVERSION EFFICIENCY

Kübra DÖNMEZ

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Gökhan ÖZTÜRK

Purpose: The aim of this thesis study is to design a broadband polarization converter developed with metasurface structures that eliminate the disadvantages of traditional microwave polarization converters, which are bulky, inefficient, and costly.

Method: The broadband metasurface polarization converter microwave absorber was simulated using the CST Microwave Studio simulation software. The simulated S-parameter results obtained from this software were processed in MATLAB to evaluate the linear Polarization Conversion Ratio (PCR) performance for both normal and oblique incidence of electromagnetic waves. Additionally, the right- and left-handed polarization conversion ratios, as well as surface current distributions, were also analyzed using this program. The obtained results were validated through both an equivalent circuit model and real-time measurements of a fabricated sample using PCB manufacturing techniques and a Vector Network Analyzer (VNA).

Findings: The proposed metasurface polarization converter achieves linear polarization conversion with over 90% efficiency across a wide bandwidth of 8.7 GHz within the 10.3–19 GHz frequency range. Moreover, for oblique incidence of electromagnetic waves, the converter maintains a linear Polarization Conversion Ratio (PCR) above 80% up to an incident angle of 45°. For circular polarization conversion, it enables left-handed circular polarization in the narrow frequency range of 9.6–10 GHz and right-handed circular polarization in the range of 20–20.4 GHz.

Results: In this thesis study, a metasurface-based linear and circular polarization converter has been realized for a wide microwave frequency band. Compared to other broadband metasurface polarization converters in the literature, the proposed design offers a broader bandwidth in terms of electrical size and is fabricated using thin, cost-effective, and readily available materials.

Keywords: Metasurface, Polarization, Broadband, RCS (Radar Cross Section)

August 2025, 40 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	x
GİRİŞ.....	xiii
KURAMSAL TEMELLER.....	17
Metamalzemeler.....	17
Veselago metamalzemeleri	18
Sol el kuralına sahip metamalzemeler.....	18
Negatif Kırılma Açısı ve Snell Yasası	19
Faz ve grup hızı	20
Dalga denklemi ve dispersiyon özellikleri	20
Literatürde Genişlemeler.....	21
Negatif Geçirgenlik	21
İnce tel yapılar negatif elektriksel geçirgenliğin elde edilmesi.....	21
Split-Ring Resonatör (SRR) yapıları ile negatif manyetik geçirgenlik elde edilmesi ...	23
Çift Negatif (DNG) Metamalzemeler	25
Teller ile SRR'nin birleşimi (sol eli metamalzeme üretimi).....	25
Mükemmel mercek.....	26
Metamalzeme kullanım alanları	27
MATERYAL ve YÖNTEM	31
Materyaller	31
CST mikrodalga studio programı.....	31
FR-4 materyali	32
Yöntem.....	32
Üretilen metayüzey polarizasyon dönüştürücü	32

Lineer polarizasyon dönüştürme oranı	33
Dairesel polarizasyon dönüştürme oranı	34
Serbest uzay ölçüm teknikleri	35
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	37
Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücü Yansım Katsayıları	37
Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücü Lineer Polarizasyon Dönüşüm Oranı	39
Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücü Dairesel Polarizasyon Dönüşüm Oranı	40
Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücünün u-v eksenleri üzerinden Polarizasyon Dönüşüm Kapasitesinin İncelenmesi	41
Yüzey Akım Dağılımlarının İncelenmesi	42
Eşdeğer Devre Modeli.....	43
Deneysel Sonuçlar.....	45
Performans Analizi.....	45
SONUÇLAR.....	47
KAYNAKÇA	48
ÖZGEÇMİŞ.....	52

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Önerilen Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücü Birim Hücre İçin Boyutlar.....	32
Tablo 2. Önerilen Yansıtıcı Tip Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücü İle Literatürde Yer Alan Çalışmaların Kıyaslaması.....	46



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. a) Sağ elli metamalzeme b) Sol elli metamalzeme	19
Şekil 2. Periyodik ince tel yapılardan oluşan plazma ortamı	23
Şekil 3. SRR yapısı.....	24
Şekil 4. SRR'nin periyodik yapıları	25
Şekil 5. İnce metal tellerle beraber SRR yapılarıyla oluşturulan birim sol elli metamalzeme.	26
Şekil 6. (a) Önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün ön ve perspektif görünüşünün ölçekli hali, (b) 'de CST Mikrodalga programında benzetimi yapılan önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücü için boyutlar aşağıdaki tabloda verilmiştir.	32
Şekil 7. Polarizasyon dönüştürücüye gelen ve yansıyan dalgaların u-v eksenlerinde ayrıştırılmış hali	34
Şekil 8. TRL kalibrasyon prosedürü	35
Şekil 9. (a) Yansımaya katsayıları dB genlikte (b) eğik açı altında yansımaya katsayıları 45° ye kadar (c) yansımaya katsayıların genlikte (d) yansımaya katsayıları fazda	38
Şekil 10. (a) Metayüzey polarizasyon dönüştürücünün (a) normal geliş için (b) 45° ye kadar eğik açı altında geliş için PCR değişimi	39
Şekil 11. (a) Önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün TE ve TM modda eliptiklik değerinin değişimi (b) eğik açı altında 45° ye kadar eliptiklik değerinin değişimi	40
Şekil 12. Metayüzey polarizasyon 8-25 GHz frekans aralığındaki dönüştürücünün eksenel oran değişimi	41
Şekil 13. (a) metayüzey polarizasyon dönüştürücünün u-v eksenlerindeki yansımaya katsayılarının genlikleri ve polarizasyon verimlilik değerinin değişimi (b) metayüzey polarizasyon dönüştürücünün u-v eksenleri boyunca yansımaya katsayılarının fazlarının değişimi.	41
Şekil 14. 11.309 GHz ve 16.174 GHz rezonans frekansında polarizasyon dönüştürücünün metayüzey (üst) tabakasında ve metal sonlandırma (alt) tabakasındaki yüzey akım değişimleri.....	43
Şekil 15. ADS programında tasarlanan eşdeğer devre modeli	44
Şekil 16. ADS programı ve benzetim programı ile elde edilen yansımaya katsayıları.....	44
Şekil 17. (a) 67x67 birim hücre ile üretilen metayüzey polarizasyon dönüştürücü (b) polarizasyon dönüştürücünün yansımaya katsayılarının simülasyon ve ölçüm sonuçları	45

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

(E_i^u)	: u Ekseninde Polarize Elektrik Alan Şiddeti
(E_r^u)	: u Ekseninde Yansıyan Eektirk Alan Şiddeti
$\vec{E}_i$	: Gelen Elektromanyetik Dalganın Elektrik Alan Şiddeti Vektörü
$\vec{E}_i$	: Gelen Dalganın Elektrik Alan Şiddeti
r_{vv}	: v Yönünde Yansıma Katsayısı
$\vec{B}$	: Manyetik Akı Yoğunluğu
$\vec{D}$	: Elektrik Akı Yoğunluğu
$\vec{E}$	: Elektrik Alan Vektörü
$\vec{H}$	: Manyetik Alan vektörü
$\vec{k}$	: Dalga Vektörü
$\mu_{\text{eff}}(\omega)$	: Efektif Manyetik Geçirgenlik
E_{iu}	: Gelen Dalganın u Ekseninde Genliği
E_{iv}	: Gelen Dalganın v Ekseninde Genliği
E_{ix}	: Gelen Elektromanyetik Dalganın Genliği
E_{rx}	: Yansıyan Dalganın x Ekseninde Genliği
E_{ry}	: Yansıyan Dalganın y Ekseninde Genliği
(N)	: Halka Sayısı
R_{xx}	: Eş Yansıma Katsayısı
R_{yx}	: Çapraz Yansıma Katsayısı
a	: Halkalar Arası Periyodik Uzaklık (kafes sabiti)
r	:SRR Halkalarının Yarı Çapı
r_{uu}	: u Yönünde Yansıma Katsayısı
v_g	: Grup Hızı
v_p	: Faz Hızı
ϕ	: Gelen Dalganın Fazı
ϕ_{iu}	: Gelen Dalganın u Ekseninde Fazı
ϕ_{iv}	: Gelen Dalganın v Ekseninde Fazı
$\Delta\phi$	: Yansıma Katsayıları Arasındaki Faz Farkı

a	: Tel Dizisinin Kafes Sabiti (teller arası mesafe)
A	: Soğurma Gücü
ADS	: Advance Design System
AR	: Axial Ratio
c_0	: Boşluktaki Işık Hızı
CP	: Circular Polarization
CRR	: Kapalı Halka Rezonatör
CST	: Computer Simulation Technology Microwave Studio
dB	: Desibel
DNG	: Çift Negatif Metamalzemeler
F	: Geometriğe Bağlı Yoğunluk Faktörü
f	: Frekans
F4-B	: Alttaş
FDTD	: Finite Difference Time Domain
FEM	: Finite Element Method
FR-4	: Alttaş
GHz	: gigahertz
İEEE	: İnstitute of Electrical and Electronics Engineering
LHCP	: Left Handed Circular Polarization
LP – RHCP	: Linear Polarization to Right Hand Circulary Polarize
LP	: Linear Polarization
LP-CP	: Linear Polarization to Circular Polarization
LP-LP	: Linear Polarization to Linear Polarization
m_{eff}	: Efektif Elektron Kütlesi
MHz	: megahertz
n	: Kırılma İndisi
n	: Kırılma İndisi
n_1	: Gelen Ortamın Kırılma İndisi
n_2	: Geçilen Ortamın Kırılma İndisi
n_{eff}	: Efektif Taşıyıcı Yoğunluğu
PCB	: Printed Circuit Board
PCR	: Polarization Conversion Ratio
r	: Tellerin Yarıçapı
RHCP	: Right-Hand Circular Polarization
RLC	: Resistor,İnductor,Capacitor

r_{uu}	: Genlik Oranı
r_{vv}	: Yansıyan Elektrik Alan Şiddetinin Genlik Oranı
S_{ij}	: i ve j Sayılarına Karşılık Gelen Kapılara Ait S-Parametresi
SRR	: Split-Ring Resonatör
S-SRR	: Bölünmüş Halka Resonatör
T	: İletim Katsayısı
TE	: Transverse Electric
THz	: terahertz
TM	: Transverse Magnetic
TRL	: Thru-Reflect-Line
VNA	: Vektör Ağ Analizörü
VO2	: vanadium dioksit
Γ	: Rezonans Sönüm Katsayısı
Γ	: Yansıma Katsayısı
$\epsilon(\omega)$	: Frekansa Bağlı Geçirgenlik Fonksiyonu
θ_1	: Gelme Açısı
θ_2	: Kırılma açısı
λ	: Dalga Boyu
μ	: Manyetik Geçirgenlik
μ	: Mikro (10^{-6})
μr	: Manyetik Geçirgenlik
v	: Dalganın Hızı
ρ	: İletkenlik Nedeniyle Oluşan Ohmik Direnç
ω	: Açısal frekans
ω_0	: SRR'nin Rezonans Frekansı
ω_p	: Plazma frekansı
R	: Genelleştirilmiş Yansıma Katsayısı Matrisi
S	: Poynting's Vektörü
c_0	: Vakumda Işık Hızı
$j k_z$	: Elektromanyetik Dalganın Yönü
$y^{\wedge}$	: Elektrik Alan Şiddetinin +y Yönünde Polarize Edildiği
ϵ	: Dielektrik Geçirgenlik

GİRİŞ

Metamalzemeler doğada bulunmayan, yapay olarak elde edilen ve geleneksel malzemelere göre negatif kırılma indisi gibi üstün özellikler gösteren malzemelerdir. Bu malzemeler geleneksel malzemelerin aksine hem negatif elektriksel geçirgenlik (permittivity) hem negatif manyetik geçirgenliği (permeability) aynı anda sağlayabilirler. Bu durum bu malzemelerin negatif kırılma indisi (refractive index) sağlaması ile sonuçlanmaktadır. İlk defa Veselego tarafından matematiksel olarak ortaya negatif elektriksel ve manyetik geçirgenlik kavramı ortaya atılmıştır (Veselego, 1967). Veselego, eğer hem negatif elektriksel geçirgenlik hemde negatif geçirgenliği bir malzemenin sağlaması durumunda elektromanyetik dalga ile güç vektörünün (Pointing Vector) zıt yönde akacağını teorik olarak ispatlamıştı. Bilim dünyasında ilgi çeken bu gerçeklik üzerine bilim insanları sol elli malzeme olarak adlandırılan bu malzemelerin yapay olarak üretilebileceği üzerine deneysel çalışmalar başlattı. İlk kez Pendry sadece negatif elektriksel geçirgenlik sağlayabilecek bir malzeme üretimi gerçekleştirmiştir. Pendry'nin bu çalışması, aslında tıpkı gazların plazma frekanslarında olan davranışını modelleyen Drude modeli üzerinden bir yaklaşımdı. Oldukça uzun ve ince iyi iletkenlerin elektrik alana maruz kalmasıyla, iletkende sürüklenen elektronların tıpkı gazlar gibi davranacağını ön gören çalışma ile plazma frekansından büyük frekanslar için negatif bir dielektrik malzeme elde edilmesi sağlanabilirdi. Deneysel çalışmalarına devam eden Pendry, yarık halka rezonatörlerini (SRR-Splring Ring Resenator) kullanarak negatif kırılma indisi sağlayabilen manyetik geçirgenliğe sahip bir malzeme üretimi de gerçekleştirmişti. Bu çalışmaların bir malzeme üzerinde birleştirilip hem negatif elektriksel geçirgenlik hemde negatif manyetik geçirgenlik sağlayabilen bir malzeme olarak metamalzeme kavramı deneysel olarak Smith tarafından çok geçmeden elde edilmişti.

Metamalzemelerin deneysel olarak üretiminin akabinde birçok mikrodalga aygıtın bu malzemelerle daha yüksek performans ve uygun maliyetle elde edilebileceği aşıkardı. Metamalzemeler hızlı bir şekilde optik, sensor, görünmezlik pelerini, antenler, mikrodalga filtreler, emiciler ve polarizasyon dönüştürücüler gibi birçok alanda kullanılmaya başlandı. Bir çok alanda çığır açan bu çalışmalardan biri de kuşkusuz polarizasyon dönüştürücü aygıtlarının yerine de kullanılmasıydı.

Elektromanyetik dalganın kontrolü, manüple edinimi ve polarizasyon dönüşümü mikrodalga aygıtların performansı için kilit rol oynamaktadır. Mikrodalga polarizasyon dönüştürücüler sensor, optik haberleşme, anten, radar teknolojisi gibi birçok alanda etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Faraday etkisi, foto-elastik modülatörler, optik fraksiyon gibi

geleneksel yöntemlerle üretilen polarizasyon dönüştürücülerin büyük hacimli ve hantal olması, düşük dar bant ve eğik açılı çalışamama dezavantajları gibi sınırlı performansları sebebiyle metayüzey polarizasyon dönüştürücülere olan ilgi son yıllarda giderek artmaktadır. GHz bölgelerde eğik açı performansı oldukça yüksek, polarizasyon hassasiyetsiz, dalga boyu cinsinden oldukça ince, çeşitli dielektrik alttaşlarla yapılan yansıma ve iletim tipli polarizasyon dönüştürücülerle beraber THz bölgesinde de altın, grafen, VO₂ (vanadium dioksit) gibi malzemeler kullanılarak çeşitli metayüzey polarizasyon dönüştürücüler tasarlanmaktadır. GHz bölgesinde yapılan çalışmaların bazıları sadece lineer polarizasyon dönüşümü yaparken hem lineer hemde dairesel polarizasyon dönüşümü yapan çalışmalar da giderek artmaktadır. Kullanılan alttaşlar FR-4, F4-B ve rogers gibi epoksi dielektrik malzemeler ile yüksek basınç ve ateş dayanımı sağlanmaktadır. Literatürde S,C,X,Ku ve K bantlarını kapsayan GHz bölgesi bir çok çalışma yer almaktadır. Metamalzemelerin elektromanyetik dalgalarla etkileşimde sağladığı üstün kontrol yetenekleri, onları sadece absorpsiyon, anten ve görünmezlik uygulamalarında değil, aynı zamanda **polarizasyon dönüştürücü** sistemlerde de önemli bir araştırma konusu hâline getirmiştir. Polarizasyon dönüştürücüler, gelen elektromanyetik dalganın polarizasyon tipini (örneğin lineer–lineer (LP–LP) veya lineer–dairese (LP–CP)) dönüştürmeyi amaçlayan yapılar olup, radar sistemleri, görüntüleme teknolojileri ve iletişim sistemlerinde geniş uygulama alanına sahiptir.

Gao ve arkadaşları, V şekilli metayüzey yapıları kullanarak 1.6 mm kalınlığında FR-4 alttaş ile 12.4-27.96 GHz arasında %90 üzerinde lineer polarizasyon sağlayan 0.066 λ kalınlığında bir dönüştürücü tasarladı. Önerilen dönüştürücünün birim hücre uzunluğu 6.6 mm, ilgili bant genişliği %77 ve eğik açı performansı 40° ye kadar %80 üzerinde olup tüm bandın %60 ını kapsamaktaydı. (Gao, X., Han, X., Cao, W. P., Li, H. O., Ma, H. F., & Cui, T. J. (2015). Ultrawideband and high-efficiency linear polarization converter based on double V-shaped metasurface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(8), 3522-3530.)

Zhu ve arkadaşları, yüzey integrasyonlu dalga kılavuzları kullanarak 33.3-36.7 GHz arasında çalışan bir lineer polarizasyon dönüştürücü sunmuştur. Önerilen dönüştürücü birim hücresi 5.4 mm genişliğinde, 1.57 mm kalınlığında Rogers 5880 ($\epsilon_r = 2.2$ ve $\delta = 0.02$) ile gerçekleştirilmiştir. (Zhu, X. C., Hong, W., Wu, K., Tang, H. J., Hao, Z. C., Chen, J. X., & Yang, G. Q. (2013). A novel reflective surface with polarization rotation characteristic. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12, 968-971.)

Zhang ve arkadaşları, içi boş eliptik şekilli metayüzey yapıları ile 8-18 GHz arasında %90 üzerinde lineer polarizasyon dönüşümü sağlayan bir tasarım sundular. Önerdikleri dönüştürücü 30° ye kadar %80 üzerinde bir lineer dönüşüm sağlamakta olup, 2 mm lik FR-4

alttaşı seçilerek gerçekleştirilmiştir. (Zhang, L., Zhou, P., Lu, H., Chen, H., Xie, J., & Deng, L. (2015). Ultra-thin reflective metamaterial polarization rotator based on multiple pla)

Bu kapsamda Shi ve arkadaşları (2014), tabanı ve yama kısmı bakır olan, orta kısmı ise $\epsilon_r = 3,5$, $\tan\delta = 0,003$ dielektrik sabite sahip bir alttaş kullanarak içi boş halka yapısında bir rezonatör geliştirmişlerdir. Bu yapı 9,65–14,16 GHz aralığında LP–LP polarizasyon dönüşümünü mümkün kılarken, Stokes parametreleri üzerinden yapılan analizlerde 9,25 GHz ve 14,35 GHz’de LP–CP dönüşümünün de başarıyla gerçekleştiği gösterilmiştir.

Chen ve arkadaşları (2017), grafen ve gümüşten oluşan bir yapı ile THz bölgesinde çalışan bir polarizasyon dönüştürücü tasarlamışlardır. H şeklinde oyulmuş yapısı sayesinde, 34,39–36,92 THz frekans aralığında %90’ın üzerinde polarizasyon dönüşüm oranı elde edilmiştir. Benzer şekilde, Guo ve arkadaşları (2018), metal–yalıtkan–metal sandviç yapı kullanarak 14,2–36 GHz bandında %90 üzerinde PCR (Polarization Conversion Ratio) oranıyla LP–LP dönüşüm gerçekleştirmiştir.

Khan ve Tahir (2018), iki bakır tabaka arasına 2,4 mm kalınlığında FR-4 alttaş yerleştirerek gerçekleştirdikleri çalışmada, 5–15 GHz aralığındaki tüm bantta %100 PCR oranı ile LP–LP dönüşüm sağlamışlardır. Loncar ve arkadaşları (2018) ise üç katmanlı bakır ve iki katmanlı RO4003 alttaş olan çok katmanlı bir yapı ile X bandında 9,2–10,5 GHz frekans aralığında %99,4 oranında polarizasyon dönüşümü elde etmiştir.

Xu ve arkadaşları (2018), 2,65 dielektrik sabitli F4B-2 alttaş kullandıkları çalışmalarında 6,67–17,1 GHz frekans aralığında %90 PCR oranı ve %87,7 bağıl bant genişliği ile yüksek verimli bir LP–LP dönüştürücü tasarlamışlardır. Fu ve arkadaşları (2019) ise 9,38–13,36 GHz ve 14,84–20,36 GHz bantlarında sırasıyla %98,21 ve %99,32 PCR oranlarıyla çalışan iki bantlı bir dönüştürücü geliştirmiştir.

Huang ve arkadaşları (2019), FR-4 alttaş üzerinde metal–yalıtkan–metal yapı ile hem LP–LP (4,40–5,30 GHz ve 9,45–13,60 GHz) hem de LP–CP (4,47–5,35 GHz ve 9,57–13,57 GHz) dönüşümü sağlamıştır. Khan ve arkadaşları (2019), ultra ince, tek tabaka yapısıyla X bandında LP–LP (8–11 GHz) ve LP–CP (7,5–7,7 GHz ve 11,5–11,9 GHz) dönüşümü gerçekleştirmiş; yapı 0° – 45° arası geliş açılarında hem TE hem TM modda kararlılığını korumuştur.

Bilal ve arkadaşları (2020), THz bölgesinde üç frekansta (1,10, 2,13, 3,46 THz) LP–LP ve üç farklı bantta (1,2–1,83 THz, 2,52–3,10 THz ve 3,78–3,90 THz) LP–CP dönüşüm gerçekleştiren bir yapı geliştirmiştir. Du ve arkadaşları (2020), 2,1 dielektrik sabitli ve 3,175

mm kalınlığında alttaşı kullandıkları çalışmada 6,82 GHz, 9,4 GHz ve 12,04 GHz frekanslarında %100'e yakın PCR oranı ile LP-LP dönüşüm elde etmişlerdir.

Dutta ve arkadaşları (2020), diyot içeren çok katmanlı yapıda 15–17 GHz aralığında hem mikrodalga soğurucu hem de LP-LP polarizasyon dönüştürücü işlevi gösteren bir sistem geliştirmiştir. Wang ve Zhai (2020), geniş açılı bir LP-CP dönüştürücü tasarlamış ve 8,18–13,98 GHz bandında %90 PCR oranı ile dönüşüm sağlamıştır.

Fahad ve arkadaşları (2020), X ve Ka bantlarını kapsayan üç bantlı (7,3–9,6 GHz, 25,4–31,4 GHz ve 35,4–42,2 GHz) LP-CP polarizasyon dönüştürücü yapmışlardır. Khan ve arkadaşları (2020), Rogers marka 1,6 mm kalınlığında 2,33 yalıtkan sabitli alttaşı kullanarak çok bantlı hem LP-LP hem de LP-CP dönüşüm gerçekleştiren bir yapı geliştirmiştir. Aynı yıl yaptıkları başka bir çalışmada ise FR-4 alttaşı üzerinde 6,3–6,6 GHz, 9–10,8 GHz ve 15,2–18,7 GHz bantlarında LP-LP; 6–6,1 GHz, 6,9–7 GHz, 7,1–7,2 GHz, 8–8,7 GHz, 11,3–13,4 GHz ve 13,5–14,5 GHz bantlarında LP-CP dönüşüm sağlamışlardır.

Zou ve arkadaşları (2020), PTFE alttaşı ile THz bölgesinde 1,21–2,83 THz aralığında %93 verimlilikle LP-LP polarizasyon dönüştürücü tasarlamış ve bu performansı 0° – 45° geliş açılarında korumuştur. Ahmed ve arkadaşları (2021), FR-4 tabanlı yapılarında hem LP-LP (5,3–5,4 GHz, 7,2–8 GHz, 12,3–13,76 GHz) hem de LP-CP (5,1–5,2 GHz, 5,6–6,85 GHz, 8,8–11,2 GHz, 14,9–20,2 GHz) dönüşüm işlevi elde etmiştir.

Nguyen ve arkadaşları (2021) tarafından yürütülen iki ayrı çalışmada ise, birinde 8–12 GHz arasında LP-LP ve 7,42–7,6 GHz ile 13–13,56 GHz arasında LP-CP dönüşüm sağlanmış; diğer çalışmada ise Ku bandını kapsayan 6 GHz frekans bandında %90 verimlilikle LP-LP dönüşüm gerçekleştirilmiştir. Bu yapıların her ikisi de FR-4 alttaşı üzerinde inşa edilmiş ve 0° – 45° geliş açılarında hem TE hem TM modlarında yüksek kararlılık sergilemiştir.

Bu çalışmaların tümü, metamateryale tabanlı yapıların yalnızca geniş bantta ve yüksek dönüşüm oranlarında çalışabildiğini değil, aynı zamanda geliş açısı ve polarizasyon moduna karşı yüksek kararlılık gösterdiğini de ortaya koymaktadır. Bu tez çalışmasında da literatürde yer alan lineer ve dairesel polarizasyon dönüştürücülerin aksine daha geniş bantta çalışan, maliyet uygun alttaşlar kullanılarak, oldukça ince kalınlık ve hacme sahip, tatmin edici eğik açılı performansına sahip lineer ve dairesel polarizasyon dönüştürücü tasarımı hedeflenmiştir.

KURAMSAL TEMELLER

Metamalzemeler

Gelişen malzeme bilimi ve mühendislik uygulamaları ile birlikte, doğada bulunmayan fiziksel özelliklere sahip yapay malzemelerin tasarımı mümkün hâle gelmiştir. Bu bağlamda öne çıkan metamalzemeler (*metamaterials*), sahip oldukları elektromanyetik, akustik ve mekanik özelliklerle geleneksel malzemelerin ilerisinde bir performans sunmakta ve yeni nesil teknolojilere kapı aralamaktadır (Caloz & Itoh, 2005; Engheta & Ziolkowski, 2006).

“Meta” kelimesi, Yunanca kökenli olup “ötesi” anlamına gelmektedir. Bu terimden türetilen “metamalzeme” ifadesi, geleneksel malzeme özelliklerinin ötesine geçebilen yapay olarak tasarlanmış malzeme yapılarını tanımlar. Bu malzemelerin fiziksel özellikleri, doğrudan bileşen malzemenin kendisinden değil, mikro veya nano ölçekte düzenlenmiş geometrik yapılarından kaynaklanmaktadır (Smith *et al.* 2004). Bu yönüyle metamalzemeler, elektromanyetik dalgaların iletimini kontrol etme, yönlendirme ve manipüle etme gibi işlevleri yerine getirebilmektedir.

Metamalzemelerin en dikkat çekici özelliklerinden biri, belirli frekans aralıklarında negatif bağıl elektrik geçirgenlik ($\epsilon_r < 0$) ve negatif bağıl manyetik geçirgenlik ($\mu_r < 0$) sergileyebilmeleridir. Bu özellikler, negatif kırılma indisine ($n < 0$) sahip malzeme davranışıyla sonuçlanmakta ve doğada doğal olarak gözlemlenemeyen optik ve elektromanyetik olaylara imkân tanımaktadır (Veselago, 1968; Shelby, Smith & Schultz, 2001). Bu sıra dışı davranışlar, özellikle görünmezlik pelerinleri, süper mercekler, elektromanyetik soğurucular ve ileri düzey iletişim sistemleri gibi yenilikçi teknolojilerde kullanılmaktadır (Pendry, Schurig & Smith, 2006).

Metamalzemelerin bağıl elektrik ve manyetik geçirgenlik özelliklerinin negatif olması, moleküler ya da kristal yapıdan ziyade, yapay olarak tasarlanmış mikro yapıların geometrik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle metamalzemeler, elektromanyetik dalga-malzeme etkileşimlerinin kontrol altına alınmasında büyük bir potansiyele sahiptir ve bu özellikleriyle hem temel bilim araştırmalarında hem de uygulamalı mühendislik alanlarında yoğun ilgi görmektedir.

Veselago metamalzemeleri

Metamalzeme literatürünün kuramsal temelleri, Sovyet fizikçi Viktor Georgiyeviç Veselago tarafından 1968 yılında yayımlanan öncü çalışmayla atılmıştır. Veselago, aynı anda negatif dielektrik geçirgenlik ($\epsilon < 0$) ve negatif manyetik geçirgenlik ($\mu < 0$) özelliklerine sahip hipotetik malzemelerin elektromanyetik davranışlarını inceleyerek, bu tür ortamların klasik elektromanyetik kuramlardan önemli ölçüde sapmalar gösterdiğini ortaya koymuştur (Veselago, 1968).

Söz konusu çalışmada Veselago, negatif permittivite ve permeabiliteye sahip ortamların sahip olabileceği fiziksel sonuçları teorik olarak analiz etmiş; özellikle negatif kırılma indisi, ters Doppler etkisi ve ters Cherenkov ışıması gibi geleneksel elektromanyetik anlayışa ters düşen olguların bu tür malzemelerde mümkün olabileceğini öne sürmüştür. Bu kuramsal yaklaşım, daha sonraki yıllarda “metamalzeme” olarak adlandırılan ve doğal ortamlarda gözlemlenmeyen elektromanyetik özelliklerin yapay olarak tasarlanabildiği yeni bir malzeme sınıfının ortaya çıkmasına öncülük etmiştir.

Sol el kuralına sahip metamalzemeler

Veselago, elektromanyetik düzlem dalgalarının yayılımını incelerken, dalga vektörü $\vec{k}$, elektrik alanı $\vec{E}$ ve manyetik alanı $\vec{H}$ vektörlerinin yönlerine özel olarak odaklanmıştır. Klasik sağ-el ortamında bu vektörler sağ-el kuralına uygun şekilde yönlendirilirken yani ϵ ve μ pozitif olursa $\vec{k}$ dalga vektörü olmak üzere $\vec{k}$, $\vec{E}$ ve $\vec{H}$ üçlüsü sağ eli bir üçlü yapı oluşturur bu tür malzemelere sağ eli metamalzeme denir. Bu malzemelerde $\vec{k} \perp \vec{E} \perp \vec{H}$ şeklinde tanımlanır. Fakat negatif elektriksel geçirgenlik ($\epsilon < 0$) ve manyetik geçirgenlik ($\mu < 0$) durumunda vektörel ilişki tersine döner ve dalga vektörü şu şekilde ifade edilir:

$$\vec{k} = -(\vec{E} \times \vec{H}) \quad (1)$$

Bu durumda $\vec{k} \perp \vec{E} \perp \vec{H}$ denklemi - $\vec{k} \perp \vec{E} \perp \vec{H}$ denklemine dönüşecektir, işte bu malzemeler sol eli metamalzemeleri oluşturmaktadır. (Veselego 1967) Bu durumda ortalama güç vektörü de aşağıdaki gibi yazılır (Balanis 2012).

$$\vec{S} = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}) \quad (2)$$

şeklinde tanımlanır ve

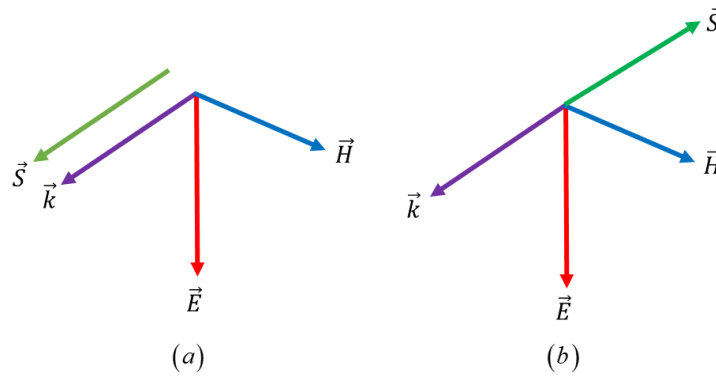
$$\vec{S} \cdot \vec{k} < 0 \quad (3)$$

eşitsizliği, Poynting vektörü ile dalga vektörünün ters yönlü olduğunu ortaya koyar. Böylece elektromanyetik enerji akışı, fazın yayılım yönüne zıt yönde ilerler (Veselago, 1968).

Ayrıca, sol el kuralına uyan metamalzemelerde dalga vektörü ile güç vektörünün yöneliminin zıt yönde değiştiği teorik olarak gösterilmiştir. Bu durum, malzemenin negatif ϵ_r özelliği göstermesi fikriyle ilişkilendirilmiş ve plazmaların da negatif indeksli malzeme davranışı sergileyebileceği öngörülmüştür (Veselago, 1968).

Burada $\vec{S}$ ort (ortalama güç vektörü) yalnızca $\vec{E}$ ve $\vec{H}$ alanlarına bağlıdır; dolayısıyla ortamın elektromanyetik parametreleri olan ϵ ve μ değerlerinden bağımsızdır. Bu bağlamda, güç vektörü ile dalga vektörü ters yönlüdür.

Başka bir ifadeyle, elektromanyetik enerji dağılımı ile dalganın faz yönü zıt yönlerde hareket eder. Sol elli malzemelerde faz hızı, güç akışıyla aynı yöndeyken; grup hızı, bu yönün tersine hareket etmektedir. Bu durum, sol elli ortamların sağ elli ortamlardan temel farkını oluşturmaktadır. Sağ elli ve sol elli malzemelerde dalga vektörü ($\vec{k}$) ile güç vektörünün ($\vec{S}$) yönleri arasındaki fark şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. a) Sağ elli metamalzeme b) Sol elli metamalzeme (Ozturk, 2018)

Negatif Kırılma Açısı ve Snell Yasası

Veselago, negatif kırılma indisli ortamların elektromanyetik dalgalar üzerindeki etkilerini inceleyerek, bu tür ortamlarda ışığın alışılmışın dışında bir şekilde kırıldığını ortaya koymuştur. Geleneksel Snell yasasına göre kırılma şu şekilde ifade edilir:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (4)$$

Burada:

n_1 : Gelen ortamın kırılma indisi

n_2 : Geçilen ortamın kırılma indisi

θ_1 : Gelme açısı

θ_2 : Kırılma açısı

Normalde, hem n_1 hem de n_2 pozitifdir, dolayısıyla θ_2 de pozitif olur. yani ışık, normalin diğer tarafına kırılır. Ancak, geçilen ortamın kırılma indisi negatif olduğunda ($n_2 < 0$), Snell yasası şu biçimde yeniden yazılır:

$$\sin\theta_2 = n_1/n_2(\sin\theta_1) \quad (5)$$

Bu durumda $\sin\theta_2$ negatif bir değer alır ve buna karşılık gelen kırılma açısı da negatif olur. Bu, kırılan ışının normalin diğer tarafında değil, giriş yüzeyinin aynı tarafında yer aldığını ve ışığın ters yönde kırıldığını gösterir. Bu olgu, "negatif kırılma" olarak adlandırılmakta olup, negatif indisli (solak) ortamların en ayırt edici optik özelliklerinden biridir (Veselago, 1968).

Faz ve grup hızı

Veselago'nun analizinde önemli bir diğer kavram ise faz ve grup hızları arasındaki yön farkıdır. Elektromanyetik dalgaların yayılımı bu iki hız bileşeniyle tanımlanır. Faz hızı, dalganın sabit faz noktalarının hareket hızını gösterirken, grup hızı enerji ve bilgi taşınım yönünü belirler. Bu hızlar sırasıyla aşağıdaki şekilde ifade edilir:

Faz hızı:

$$\vec{v}_p = \frac{\omega}{|\vec{k}|} \hat{k} \quad (6)$$

Grup hızı:

$$\vec{v}_g = \nabla_{\vec{k}} \omega \quad (7)$$

Negatif indeksli ortamlarda, bu iki vektör ters yönlüdür:

$$\vec{v}_g \cdot \vec{v}_p < 0 \quad (8)$$

Bu ifade, dalganın fazının bir yönde ilerlemesine rağmen, enerjinin yani grup hızının zıt yönde hareket ettiğini göstermektedir (Veselago, 1968). Bu yön ayrışması, negatif indisli ortamların karakteristik özelliklerinden biridir ve bu ortamların elektromanyetik dalga iletimi açısından klasik ortamlardan köklü biçimde farklılaştığını ortaya koyar.

Dalga denklemi ve dispersiyon özellikleri

Veselago'nun çalışmasında kullanılan elektromanyetik dalga denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (9)$$

Bu denklem, düzlem dalga çözümleri için geçerlidir ve ortamın elektriksel geçirgenliği (ϵ) ile manyetik geçirgenliğinin (μ) işaretleri, dalganın yayılma yönünü belirleyici rol oynar. Her iki parametre de negatif olduğunda, dalga sayısı ifadesi:

$$k = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \quad (10)$$

şeklinde kalmakla birlikte, dalga vektörünün yönü ters olur. Ayrıca, dispersif ortamlarda bu ifade karmaşık bir değere sahip olabilir ve bu durumda evanesan (sönümlenen) modlar oluşabilir. Bu sonuçlar, negatif kırılma indisli ortamların kendilerine özgü dispersiyon ve dalga yayılımı özelliklerini ortaya koyar (Veselago, 1968).

Literatürde Genişlemeler

Veselago'nun bu temel denklemleri ve kavramsal analizleri, daha sonra metamalzeme alanında gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmalara temel teşkil etmiştir. Smith ve arkadaşları tarafından geliştirilen ilk solak metamalzeme yapıları, bu teorik çerçevenin deneysel doğrulaması niteliğindedir (Smith *et al.* 2004).

Efros ve Pokrovsky, iki boyutlu fotonik kristallerde Veselago'nun öngördüğü gibi hem ϵ hem de μ 'nun negatif olabileceğini ve bunun sayısal ve analitik yöntemlerle doğrulanabileceğini göstermiştir (Efros & Pokrovsky, 2004).

Farhi ve Bergman tarafından yapılan çalışma, Veselago lensinin kuasistatik koşullardaki davranışını analiz etmiş ve maksimum odaklanmanın klasik geometrik odak yerine, negatif permittiviteye sahip tabaka yüzeylerinde oluştuğunu göstermiştir (Farhi & Bergman, 2014).

Iyer ve Eleftheriades ise, Veselago-Pendry süperlens yapısı üzerinden gerçekleştirdikleri çalışmada, serbest uzayda difraksiyon sınırının ötesinde görüntüleme elde edilmesini mümkün kılan evanesan dalga restorasyonunu teorik olarak hesaplamışlardır (Iyer & Eleftheriades, 2008).

Negatif Geçirgenlik

İnce tel yapılar negatif elektriksel geçirgenliğin elde edilmesi

Doğal metaller, özellikle optik bölgede, serbest elektron plazması özelliği göstererek belirli bir eşik frekansının altında negatif elektriksel geçirgenlik ($\epsilon < 0$) sergilerler. Bu özellik, klasik plazma modeli kapsamında ifade edilen frekansa bağlı geçirgenlik fonksiyonu ile açıklanabilir:

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (11)$$

Burada ω_p , plazma frekansını temsil etmekte olup, ortamın serbest taşıyıcı yoğunluğu ve kütlesine bağlıdır. Bu frekansın altındaki bölgelerde $\epsilon(\omega) < 0$ olur ve ortam elektromanyetik dalgalar için yansıtıcı bir özellik kazanır (Pendry *et al.* 1996; Pendry *et al.* 1998; Smith *et al.* 2000a; Pendry *et al.* 2001).

Mikrodalga frekanslarında doğal metallerin plazma frekansı çok yüksek kaldığından, bu frekans bandında negatif geçirgenlik elde edilemez. Bu sınırlamayı aşmak amacıyla Pendry ve çalışma arkadaşları, serbest elektron yoğunluğunu yapay olarak azaltmak ve efektif kütleyi artırmak yoluyla plazma frekansını mikrodalga bölgesine çekebilecek yapay yapılar önermiştir. Bu bağlamda, periyodik olarak düzenlenmiş ince metalik tel dizileri aracılığıyla, istenilen frekans aralığında negatif geçirgenlik üretilebileceği gösterilmiştir (Pendry *et al.* 1996; Pendry *et al.* 1998).

Bu yapılarda elektronların hareketi tel geometrisi tarafından kısıtlandığı için efektif elektron kütlesi (m_{eff}) artmakta, aynı zamanda teller arası boşluklar nedeniyle efektif taşıyıcı yoğunluğu (n_{eff}) azalmaktadır. Bu değişim, ortamın plazma frekansını düşürerek, mikrodalga bölgesinde aşağıdaki formülle ifade edilen yeni bir plazma frekansı elde edilmesine olanak tanır:

$$\omega_p^2 = \frac{n_{\text{eff}} e^2}{\epsilon_0 m_{\text{eff}}} \quad (12)$$

Bu genel ifade, özel olarak tel dizileri için aşağıdaki gibi yaklaşık bir formülle de modellenebilir:

$$\omega_p^2 = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln(a/r)} \quad (13)$$

Burada:

- c_0 : boşluktaki ışık hızı,
- a : tel dizisinin kafes sabiti (teller arası mesafe),
- r : tellerin yarıçapıdır.

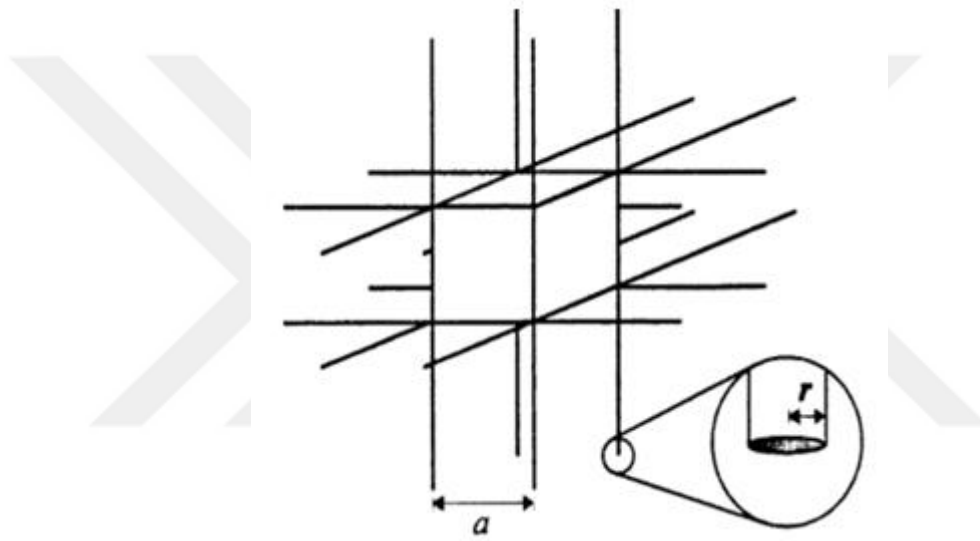
Bu denklem, plazma frekansının tel yarıçapı ve örgü aralığı gibi geometrik parametrelere bağlı olarak hassas biçimde ayarlanabileceğini ortaya koyar. Bu şekilde tasarlanan ortamlar, belirlenen plazma frekansının altındaki frekanslarda negatif geçirgenlik sergiler. Bu davranış, mikrodalga metamalzemelerin temelini oluşturur (Smith *et al.* 2000a; Shelby *et al.* 2001).

Ayrıca, gerçek metallerin içsel direnci ve sönüm etkileri de hesaba katıldığında, elektriksel geçirgenlik ifadesine karmaşık bir sönümlenme terimi eklenir:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + j\gamma)} \quad (14)$$

Bu ifade, iletkenlik kayıplarının ve frekansa bağılı yayılma sönümünün geçirgenlik spektrumuna etkisini yansıtır (Pendry *et al.* 1998). Sönüm parametresi γ , sistemin elektriksel kayıplarını karakterize eder.

Sonuç olarak, ince tel dizilerine dayalı bu yapay ortamlar, klasik metallerde doğal olarak görülemeyen frekans aralıklarında negatif elektriksel geçirgenlik sağlayarak, metamalzeme mühendisliğinde önemli bir yapı taşı hâline gelmiştir. Bu yapıların uygun biçimde tasarlanmasıyla, elektromanyetik dalgaların kontrolü noktasında geniş bir uygulama yelpazesi elde edilmiştir.



Şekil 2. Periyodik ince tel yapılardan oluşan plazma ortamı (Pendry 1998)

Split-Ring Resonatör (SRR) yapıları ile negatif manyetik geçirgenlik elde edilmesi

Pendry'nin metalik ince tel dizileriyle negatif elektriksel geçirgenlik ($\varepsilon < 0$) sağlayan öncü çalışmasının ardından, negatif manyetik geçirgenlik ($\mu < 0$) elde etmek amacıyla geliştirdiği bir diğer önemli yapı, split-ring resonator (SRR) olarak adlandırılan kesikli metal halka sistemidir (Pendry *et al.* 1999). Bu yapı, rezonans etkisiyle elektromanyetik dalgalara karşı negatif manyetik tepki verebilen yapay bir ortam oluşturur.

SRR, birbirine yakın yerleştirilmiş iki kesikli ve konsantrik metal halkadan oluşur. Bu halkalar üzerindeki kesikler sayesinde yapıya alternatif manyetik alan uygulandığında, halkalar arasında bir kapasitif etkileşim doğar ve bu etkileşim sonucunda yapının içinde rezonansla indüklenen bir akım meydana gelir. Bu akım, yapay bir manyetik rezonans oluşturur ve bu sayede ortam, belirli frekanslarda negatif etkili manyetik geçirgenlik sergileyebilir (Pendry *et al.* 1999).

Rezonans çevresinde bu yapının efektif manyetik geçirgenliği aşağıdaki şekilde modellenebilir:

$$\mu_{\text{eff}}(\omega) = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\Gamma\omega} \quad (15)$$

Burada:

- F: geometriğe bağlı yoğunluk faktörü,
- ω_0 , SRR'nin rezonans frekansı,
- Γ , rezonans sönüm katsayısıdır.

Bu model, SRR yapısının rezonans çevresinde ($\omega \approx \omega_0$) negatif manyetik geçirgenlik oluşturduğunu açıkça göstermektedir. (Pendry *et al.* 1999).

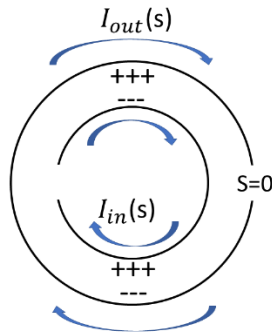
Daha ayrıntılı bir modelleme ise halkaların yarıçapı, dizilim aralığı ve halka sayısını dikkate alır. Bu durumda manyetik geçirgenlik şu şekilde ifade edilir:

$$\mu_{\text{eff}} = 1 - \frac{\pi r^2}{a^2} \left(\frac{1 - dc^2}{2\pi^2(N-1)\omega^2 + i\frac{2\rho}{\mu_0\tau\omega(N-1)}} \right) \quad (16)$$

Bu ifadede:

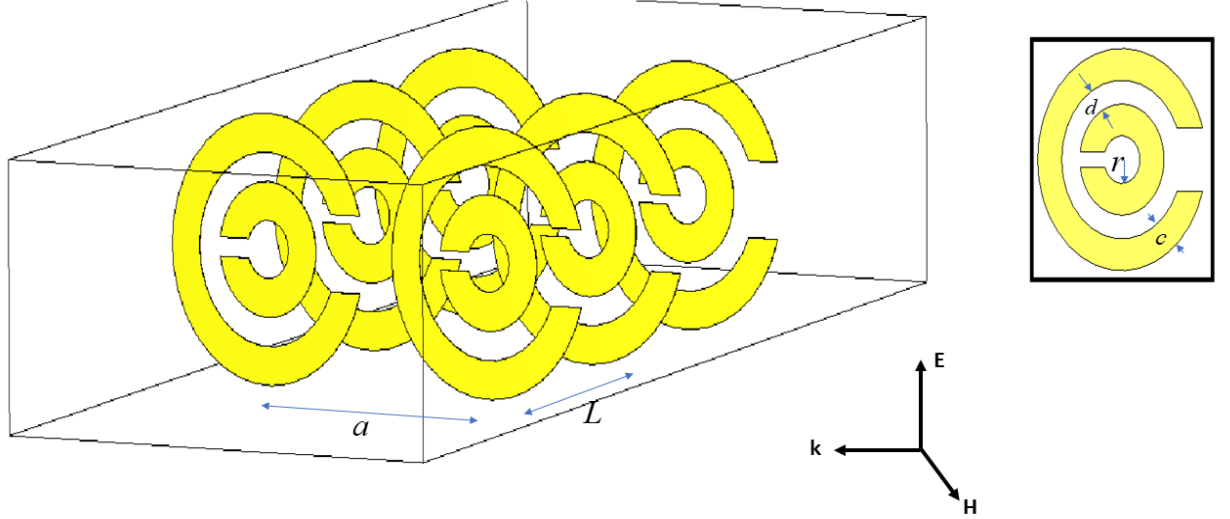
- r: SRR halkalarının yarıçapı,
- a: halkalar arası periyodik uzaklık (kafes sabiti),
- N: halka sayısı
- ρ : iletkenlik nedeniyle oluşan ohmik direnç,
- μ_0 : boşluğun manyetik geçirgenliği olarak tanımlanır (Pendry, 1999).

Önemli bir nokta, SRR halkalarındaki boşlukların, akımın halkanın çevresinde tam döngü yapmasını engellemesidir. Ancak halkalar arası kapasitif bağ sayesinde sistemde alternatif akım dolaşımı oluşur ve bu durum yapının rezonansla manyetik dipol davranışı göstermesine neden olur (Pendry, 1999).



Şekil 3. SRR yapısı (Pendry 1999)

Bu gelişmelerin ardından Pendry ve çalışma arkadaşları, ince tel dizileri (negatif ϵ) ile SRR yapılarını (negatif μ) birleştirerek, aynı frekans aralığında hem negatif elektriksel hem de manyetik geçirgenlik özelliklerine sahip çift negatif (DNG) malzemelerin ilk deneysel örneklerini oluşturmuşlardır (Smith *et al.* 2000).



Şekil 4. SRR'nin periyodik yapıları (Smith ve ark., 2000)

Çift Negatif (DNG) Metamalzemeler

Teller ile SRR'nin birleşimi (sol eli metamalzeme üretimi)

Pendry'nin önerdiği negatif elektriksel geçirgenlik ($\epsilon < 0$) sağlayan ince tel dizileri ile negatif manyetik geçirgenlik ($\mu < 0$) elde etmek üzere tasarlanan split-ring resonator (SRR) yapıları, David R. Smith ve çalışma arkadaşları tarafından bir araya getirilerek, belirli bir frekans bandında eşzamanlı olarak çift negatif özellik gösteren birleşik bir metamalzeme sistemi geliştirilmiştir (Smith *et al.* 2000; Shelby *et al.* 2001). Bu iki yapının kombinasyonu, elektromanyetik dalgaların olağan dışı davranışlar sergilediği, sol eli (left-handed) bir ortamın fiziksel olarak gerçekleştirilmesini mümkün kılmıştır.

Bu yapıda, sürekli tel dizileri $\epsilon < 0$ davranışı üretirken, SRR dizileri ise aynı frekans bölgesinde $\mu < 0$ özellik sergilemiştir. Bu koşullar altında ortamın etkin kırılma indisi aşağıdaki gibi tanımlanır

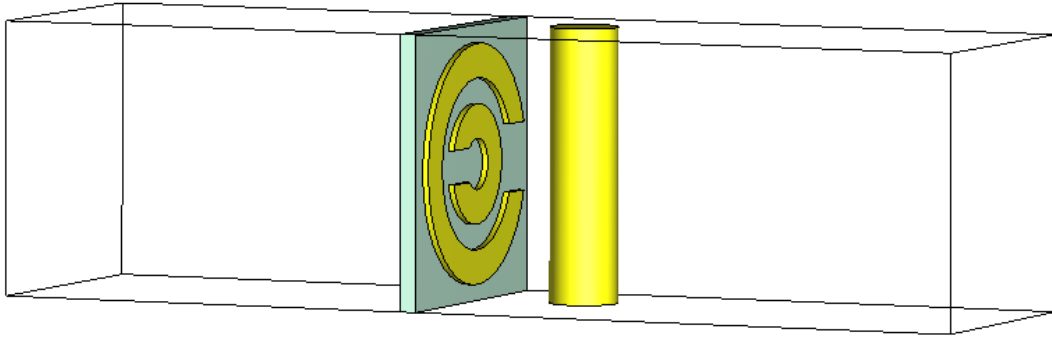
$$n = \sqrt{\epsilon_{\text{eff}} \mu_{\text{eff}}} \quad (17)$$

Burada hem $\epsilon_{\text{eff}} < 0$ hem de $\mu_{\text{eff}} < 0$ olduğu durumda, n ifadesi reel ve negatif bir değer alır. Bu durum, elektromanyetik dalgaların negatif kırılma gösterdiği anlamına gelir ve çift negatif

(double-negative) malzeme kavramının deneysel olarak doğrulanmasını sağlar (Smith *et al.* 2000; Shelby *et al.* 2001)

Smith ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bu çalışmada, **SRR düzlemine dik bir manyetik alan** uygulanarak yapıda manyetik rezonans, **SRR düzlemine paralel bir elektrik alan** uygulanarak ise elektriksel rezonans oluşturulmuştur. Böylece yapı, belirli bir frekans aralığında hem negatif elektriksel geçirgenlik hem de negatif manyetik geçirgenlik sergilemiştir. Yapının elektromanyetik tepkisi, nümerik simülasyonlar ile analiz edilmiş ve sonsuz periyodik sınır koşulları altında birçok birim hücreyi temsil edecek biçimde modellenmiştir (Smith *et al.* 2000).

Bu yapısal konfigürasyon, literatürde ilk kez **negatif kırılma indisi** ($n < 0$) gözlemlenen ve **sol elli metamalzeme** olarak adlandırılan bir ortamın deneysel üretimine olanak tanımıştır. Geliştirilen yapı, birim hücre olarak SRR ve ince metal telin birlikte kullanıldığı ve periyodik olarak dizildiği kompleks bir sistemdir. Böylece, hem teorik hem de deneysel açıdan elektromanyetik dalgaların yönsel ve faz davranışlarının alışılmışın dışında kontrol edilmesi sağlanmıştır (Smith *et al.* 2000; Shelby *et al.* 2001; Buldu, 2017).



Şekil 5. İnce metal tellerle beraber SRR yapılarıyla oluşturulan birim sol elli metamalzeme (Buldu 2017)

Mükemmel mercek

Pendry, 2000 yılında yayımladığı çalışmasında, teorik olarak hem elektriksel geçirgenliği hem de manyetik geçirgenliği aynı anda negatif birim değere sahip olan ($\epsilon_r(\omega) = \mu_r(\omega) = -1$) bir çift negatif (DNG) metamalzemenin, geleneksel optik sistemlerin karşılaştığı **difraksiyon limiti** engelini aşabileceğini öne sürmüştür. Bu özel koşul altında ortamın kırılma indisi:

$$n = \sqrt{\epsilon_r(\omega)\mu_r(\omega)} = -1 \quad (18)$$

şeklinde tanımlanır ve bu değer, olağanüstü görüntüleme özelliklerinin teorik temelini oluşturur (Pendry, 2000).

Bu yapıdaki mercek, yalnızca yayılan (propagating) bileşenleri değil, aynı zamanda klasik optikte hızlıca sönümlendiği için görüntüye katkıda bulunamayan evanesan (sönümlenen) dalga bileşenlerini de güçlendirerek yeniden odaklayabilir. Dolayısıyla, bir nesneden yayılan tüm Fourier bileşenleri — hem uzak alan hem de yakın alan bileşenleri — bu DNG mercek tarafından yeniden yapılandırılır ve bu sayede alt-dalga boyu çözünürlük ile görüntüleme mümkün hale gelir.

Bu teorik çerçeve, klasik mercek sistemlerinin fiziksel sınırlarının ötesine geçerek, metamateryal tabanlı optik cihazlarla süper çözünürlüklü görüntüleme yapılabileceğini göstermiştir. Bu nedenle, Pendry'nin öne sürdüğü bu özel DNG malzeme, literatürde "mükemmel mercek" (perfect lens) olarak tanımlanmış ve metamateryal araştırmalarında devrim niteliğinde bir dönüm noktası olarak kabul edilmiştir (Pendry, 2000)

Koordinat dönüşümü ve farklı geometride lense genişletme (2003)

2003 yılında Pendry ve Ramakrishna, koordinat dönüşümü (coordinate transformation) yöntemini kullanarak çift negatif (DNG) ortamların yalnızca doğrusal slab merceklerle sınırlı kalmadığını, aynı zamanda silindirik ve küresel gibi farklı geometrik yapılara da uygulanabileceğini ortaya koymuşlardır. Bu çalışma, negatif kırılma olgusunun yalnızca düzlemsel yapılarla değil, çeşitli geometrik konfigürasyonlarla da genişletilebileceğini göstermiş ve bu alandaki uygulama olanaklarını önemli ölçüde artırmıştır (Pendry & Ramakrishna, 2003). (Pendry & Ramakrishna, 2003)

Metamateryal kullanım alanları

Sensör teknolojisi uygulamaları

Metamateryallerin en dikkat çekici uygulama alanlarından biri, yüksek hassasiyet gerektiren **sensör** teknolojileridir. Bu alanda yapılan çalışmalar, metamateryal yapıların gelişmiş ölçüm doğruluğu, hassasiyet ve işlevsellik sunduğunu ortaya koymaktadır. Örneğin, Naqui (2015), bölünmüş halka rezonatör (S-SRR) temelli bir yapı kullanarak açısal yer değiştirme ve hız ölçümüne olanak tanıyan bir sensör geliştirmiş; bu sensörde lineerlik, ölçüm aralığı, doğruluk ve hassasiyet gibi temel parametrelerde önemli iyileşmeler sağlandığını göstermiştir (Naqui, 2015). Benzer şekilde, Hasanul Karim ve arkadaşları (2017), kapalı halka rezonatör (CRR) tabanlı pasif ve kablosuz bir sıcaklık sensörü tasarlamış; bu yapı, mikrodalga frekanslarında iletim rezonans karakteristikleri incelenerek oda sıcaklığından 200 °C'ye kadar test edilmiş ve artan sıcaklıkla birlikte rezonans frekansında düşük frekans bölgesinde belirgin

kaymalar gözlemlenmiştir (Hasanul Karim *et al.* 2017). Ayrıca, Park ve arkadaşları (2017), PRD1 ve MS2 virüslerinin algılanmasına yönelik bir biyosensör tasarımı gerçekleştirmiş; bu çalışmada SRR tabanlı yapılar kullanılarak THz frekans bölgesinde etkili bir virüs tanılama platformu geliştirilmiştir (Park *et al.* 2017). Bu örnekler, metamalzeme tabanlı sensörlerin, hem elektromanyetik hem de biyomedikal uygulamalar açısından geniş ve yenilikçi bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Anten teknolojisinde uygulamaları

Metamalzemeler anten sistemlerinin performansını geliştirmek amacıyla da yoğun olarak kullanılmaktadır. Metamalzeme temelli yapılar sayesinde antenlerin kazanç, bant genişliği, yönlülük ve boyut parametrelerinde iyileştirmeler sağlanmıştır. Zani ve arkadaşları (2010), metamalzeme alttaş kullanarak tasarladıkları dairesel yama antenin geri dönüş kaybını azaltmıştır. Labidi ve Choubani (2018) ise THz bölgesinde çalışan döngü antenlerde yönlülük ve verimlilik iyileştirmeleri elde etmiştir. SRR yapısını kullanan Devapriya ve Robinson (2019), mikroşerit yama anten tasarımında boyut küçültme ve performans artışı sağlamıştır.

Görünmezlik pelerini uygulamaları

Öne çıkan bir diğer uygulama alanı olan görünmezlik pelerinlerinde, metamalzemelerin elektromanyetik dalgaları bükme ve yönlendirme kabiliyeti sayesinde dalga yayılımı manipüle edilerek nesnelerin görünmez hale getirilmesi mümkündür (Pendry *et al.* 2006). Bu kapsamda geliştirilen çeşitli çalışmalar, bu teknolojinin farklı bant aralıkları ve fiziksel koşullarda uygulanabilirliğini göstermektedir.

Islam ve arkadaşları (2018), C- ve X-bantlarında yaklaşık 4 GHz bant genişliğinde çalışan dikdörtgen bir görünmezlik pelerini tasarlamış; bu yapının, yaklaşık sıfır kırılma indisi (NZRI) özellikli metamalzeme birim hücrelerine dayandığını ve nesne etrafındaki saçınımı önemli ölçüde azaltarak görünmezlik sağladığını göstermiştir (Islam *et al.* 2018).

Xu ve Huang (2019) tarafından yürütülen teorik çalışmada ise görünmezlik kavramı termal alana taşınmış; ısı akısının yönlendirilmesini sağlayarak, nesnelerin termal algılayıcılardan gizlenebileceği bir ‘termal görünmezlik pelerini’ önerilmiştir (Xu & Huang, 2019).

Buna ek olarak, Hu ve arkadaşları (2024), dönüşüm optiği prensiplerine dayalı olarak 5 GHz ve 10 GHz frekanslarında çalışabilen, çok bantlı ve yönsüz (omnidirectional) bir görünmezlik pelerini tasarlamış; bu yapı ile empedans uyumu sağlanarak geniş bantlı görünmezlik elde edilmiştir (Hu *et al.* 2024).

Bu çalışmalar, görünmezlik pelerinlerinin yalnızca tek frekanslı elektromanyetik alanlarla sınırlı olmadığını; aksine geniş frekans aralıklarında, çoklu bantlı, yönsüz ve termal görünmezlik gibi farklı fiziksel ortamlarda da etkili biçimde uygulanabileceğini ortaya koymaktadır (Cai & Shalaev, 2010).

Enerji hasadı uygulamaları

Metamalzemeler enerji hasadı (energy harvesting) teknolojilerinde de kritik bir rol oynamaktadır. Örneğin, Bağmancı ve arkadaşları (2019), Ni-SiO₂ tabanlı teorik bir güneş enerjisi soğurucu yapı tasarlamış ve bu yapının ultra-geniş bantlı emici özelliklerle güneş enerjisini etkin biçimde toplama potansiyelini ortaya koymuştur (Bağmancı et al., 2019). Costanzo ve Venneri (2020), Wi-Fi frekans bandı (2,45 GHz) üzerinde yüksek soğurma oranı ve açısal stabiliteye sahip bir fractal metamalzeme hücre yapısını geliştirmiş; bu yapı, ortam enerjisini daha verimli toplamak için avantaj sağlamaktadır (Costanzo & Venneri, 2020). IoT uygulamaları doğrultusunda Elwi ve arkadaşları (2020), 5,8 GHz frekansında çalışan, UWB metamalzeme tabanlı miniaturize bir anten ile RF enerji hasadı gerçekleştirmiş olup; bu sayede kablosuz ve kendinden beslemeli sistemler için önemli bir adım atılmıştır (Elwi et al., 2020).

Buna ek olarak, Karakaya ve arkadaşları (2019) dört bantta (0,90 GHz, 1,80 GHz, 2,60 GHz ve 5,80 GHz) çalışan bir metamalzeme tabanlı enerji hasadı yapısını hem simülasyon hem de deneysel yöntemlerle tanıtmış; özellikle 2,60 GHz ve 5,80 GHz frekanslarında yüzde 80'in üzerinde verimlilik gözlemlenmiştir (Karakaya et al., 2019). Ayrıca, 2024 yılında yayımlanan bir başka çalışmada, kompakt, çift bantlı bir mükemmel emici (perfect absorber) tasarımı sunulmuş; bu yapı 2,4 GHz ve 4,9 GHz frekanslarında yaklaşık yüzde 99,98 ve 99,99 oranında absorpsiyon sunmakta ve simülasyon/verme testlerinde yüzde 95'in üzerinde enerji hasadı verimliliği sağlamaktadır (Design and Experimental Validation..., 2024).

Son olarak, kapsamlı bir derleme çalışması metamaterial tabanlı enerji hasadı sistemlerinin düşük frekansta (low-frequency) enerji derlemede potansiyelini vurgulamış; metamalzeme yapılarının enerji dönüşüm verimliliğini artırabildiği, hasat frekans aralığını genişletebildiği ve çevresel enerjiyi daha etkin biçimde yakalayabildiği belirtilmiştir (Ye et al., 2025)

Elektromanyetik kalkanlama ve mikrodalga soğurucu uygulamaları

Metamalzemelerin elektromanyetik dalgaları soğurma ve yansıtma kapasiteleri sayesinde, elektromanyetik kalkanlama ve mikrodalga soğurucu uygulamaları da oldukça yaygındır. Ashraf ve arkadaşları (2018), E-SRR yapısı ile insan başı fantomunda %35,93 oranında SAR azaltımı sağlamıştır. Yin ve Tian (2021), 4,5–39 GHz aralığında 32 GHz geniş

bandta yüksek soğurum ve 63 dB'den büyük kalkanlama verimliliği gösteren bir yapı geliştirmiştir. Mikrodalga soğuruculara yönelik birçok çalışma da mevcuttur (Sen *et al.* 2019; Yu *et al.* 2019; Du *et al.* 2020; Nguyen *et al.* 2020; Jain *et al.* 2021; Wang *et al.* 2021).



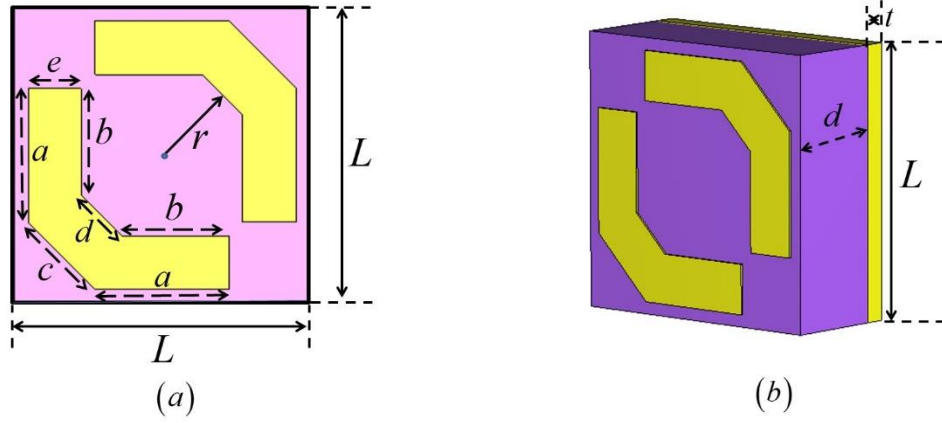
MATERYAL ve YÖNTEM

CST Mikrodalga Studio programı önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün benzetimi için kullanılmıştır. Benzetim programında metayüzey polarizasyon dönüştürücünün saçılım parametreleri elde edilerek MATLAB programında işlenmiş ve polarizasyon dönüşümü performans testi açısından anlamlı hale getirilmiştir. Tezde amaçlanan metayüzey polarizasyon dönüştürücü için en alt tabakası bakır metal sonlandırılma, orta tabakası FR-4 epoksi malzeme ve en üst tabakası da bakır malzemeden oluşturulmuş metayüzeyle gerçekleştirilmiştir. Üretim için litografi baskı devre yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen metayüzey numunenin ölçümü için VNA ağ analizörü ile serbest zamanlı ölçümleri sağlanmıştır. Ayrıca önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün eşdeğer devresi programı ile gerçekleştirilmiştir.

Materyaller

CST mikrodalga studio programı

Elektromanyetik alan, RF mikrodalga deney ortamlarının benzetim yapılabilirdiği üç boyutlu modelleme yapılabilen simülasyon programıdır. Hem zaman uzayı hemde frekans uzayında FDTD (Finite Difference Time Domain – Zamanda sonlu farklar) ve FEM (Finite Element Method -Sonlu Elemanlar Metodu) gibi nümerik metodları alt planda çalıştırarak hızlı sonuçlar vermektedir. Önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücü frekans uzayında 8-25 GHz aralığında sonsuz sınır şartları (unitcell boundary) seçilerek gerçekleştirildi. Metal kısma denk gelen port elektrik alan şartları sıfır olarak, metayüzeye denk gelen port ise open (açık) seçildi. Hassas benzetim için her birim hücre için tetrahedral (dört yüzlü) mehs (eşleme) seçimi yapılarak birim hücre başına 10 eşleme seçildi. Ayrıca hassas benzetim sonucu için sensivity (hassasiyet) 10^{-4} seçildi. CST mikrodalga programında önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün görüntüsü şekil de verilmiştir.



Şekil 6. (a) Önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün ön ve perspektif görünüşünün ölçekli hali, (b) 'de CST Mikrodalga programında benzetimi yapılan önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücü için boyutlar aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 1. Önerilen Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücü Birim Hücre İçin Boyutlar

a	b	c	e	L	d	t	r
2mm	1.6mm	1.41mm	0.8mm	4.4mm	1.6mm	0.035mm	1.275mm

Tablo 1’de verilen parametreler CST Mikrodalga Studio programında yer alan parametre süpürme seçeneği, geniş bant, eğik açı performansı ve uygun maliyet durumlarının elde edilmesi için kullanılmıştır.

FR-4 materyali

Şekil de fabrikasyonu yapılan pasif metayüzey polarizasyon dönüştürücü için iki tarafı da bakır kaplı 1.6 mm kalınlığında FR-4 malzemesi kullanılmıştır. FR-4 malzemesinin dielektrik katsayısı 4.3 ve kayıp tanjantı 0.025 tir. Ayrıca kullanılan bakırın iletkenliği 5.8×10^7 S/m dir. Bu malzeme epoksi reçine bazlı kompozit malzeme olup, ısı dayanımı yaklaşık 130° - 180° C arasında olup sert ve mekanik dayanımı oldukça yüksektir.

Yöntem

Üretilen metayüzey polarizasyon dönüştürücü

CST Mikrodalga programında benzetimi yapılan metayüzey polarizasyon dönüştürücü litografi yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen metayüzey polarizasyon dönüştürücü şekil de gösterilmiştir. Üretim için kullanılan litografi yönteminde önce iki tarafı bakır olan FR-4 malzemesini yüzeyi ince bir zımpara ile su ile temas ettirilerek temizlendi. Daha sonra bakır levhanın iki yüzeyide pozitif 20 malzemesi ile kaplandı. Aşınması istenen (metayüzey kısmı) yüzey a 70° sıcaklığa sahip fırın ile 15-20 dk fırınladı. Metayüzey desenlere sahip şekillerden oluşan çıktı aydınlatma kağıda alındı ve ışıkla fırınlanan FR-4 ün bir yüzeyi ile ışıkla

pozlandırıldı. Daha sonra pozlanan FR-4 malzemesi hidroklorik asit, hidrojen peroksit ve saf sudan oluşan kimyasala atılarak metayüzey polarizasyon dönüştürücü elde edildi.

Lineer polarizasyon dönüştürme oranı

Polarizasyonun elektromanyetik dalganın elektrik alan şiddetinin salınımının sabit bir düzlem üzerindeki bıraktığı iz ile alakalı olduğu kuramsal temeller kısmında bahsedilmişti. Düzgün düzlemsel dalganın +z yönünde ilerlediği ve elektrik alan şiddetinin +y yönünde polarize edildiği kabul edilirse; bir metayüzeye gelen elektromanyetik dalga aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\vec{E}_i = \hat{y}E_{ix}e^{-jkz} \quad (19)$$

Burada $\vec{E}_i$ gelen elektromanyetik dalganın elektrik alan şiddeti vektörünü, E_{ix} genliğini göstermektedir. Gelen dalga yansıtıcı metayüzey polarizasyon dönüştürücüye çarpıp yansıdığında yansıyan dalganın elektrik alan şiddeti aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\vec{E}_i = \hat{x}E_{rx}e^{jkz} + \hat{y}E_{ry}e^{jkz} \quad (20)$$

Burada E_{rx} ve E_{ry} , x ve y yönündeki yansıyan dalgaların elektrik alan ifadeleridir. Gelen ve yansıyan dalgaların oranı ile yansıma katsayıları $R_{xx}=E_{rx}/E_{ix}$, $R_{yx}=E_{ry}/E_{ix}$ ile ifade edilirse aynı yönlü yansıma katsayısı R_{xx} eş yansıma katsayısı (co-reflexive index), 90° faz farkı ile y yönünde olan yansıma katsayısı R_{yx} ise çapraz yansıma katsayısı (cross-reflective index) olarak adlandırılır. Yansıma katsayıları y yönünde polarize gelen dalga için de benzer şekilde yazılırsa genelleştirilmiş yansıma katsayıları aşağıdaki gibi yazılabilir.

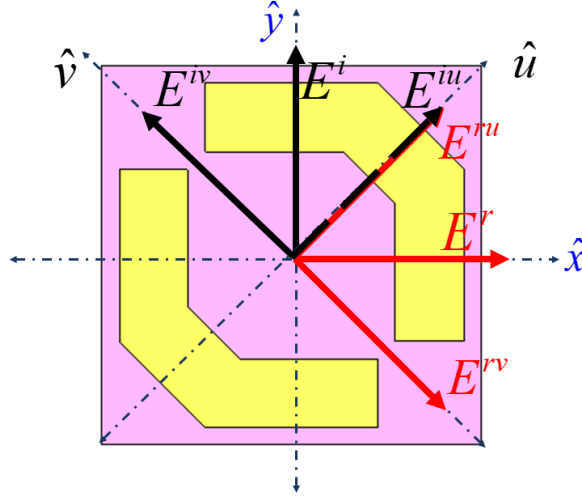
$$R = \begin{bmatrix} R_{xx} & R_{xy} \\ R_{yx} & R_{yy} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Yansıma katsayıları kullanılarak lineer polarizasyon dönüşüm oranı PCR (Polarization Conversion Ratio) aşağıdaki gibi hesap edilir.

$$PCR = \frac{R_{yx}^2}{R_{yx}^2 + R_{xx}^2} = \frac{R_{xy}^2}{R_{xy}^2 + R_{yy}^2} \quad (22)$$

Yansıtıcı tip metayüzey polarizasyon dönüştürücünün fiziksel mekanizmasının daya iyi anlaşılması için gelen dalga şekil de verildiği gibi u-v eksenleri boyunca ayrıştırılırsa gelen dalga bu eksenlerde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\vec{E}_i = \hat{u}E_{iu}e^{-j\phi_{iu}} + \hat{v}E_{iv}e^{-j\phi_{iv}} \quad (23)$$



Şekil 7. Polarizasyon dönüştürücüye gelen ve yansıyan dalgaların u-v eksenlerinde ayrıştırılmış hali

Burada E_{iu} ve E_{iv} gelen dalganın u ve v eksenlerindeki genliklerini, ϕ_{iu} ve ϕ_{iv} ise fazlarını göstermektedir. Yansıyan dalga u ve v eksenlerine göre ayrıştırılırsa aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\vec{E}_i = \hat{u}r_{uu}E_{ru}e^{-j\phi_{ru}} + \hat{v}r_{vv}E_{rv}e^{-j\phi_{rv}} \quad (24)$$

Burada $r_{uu}=E_{ru}/E_{iu}$, $r_{vv}=E_{rv}/E_{iv}$ olmak üzere sırasıyla u ve v yönlerindeki yansıma katsayılarını göstermektedir. Gelen dalganın y polarize elektrik alan şiddetinin x polarize olarak yansıması için yani lineer polarizasyon dönüşümü için +u yönündeki elektrik alanın aynı genlikte yine +u yönünde, fakat +v yönünde gelen elektrik alan bile şenin aynı genlikte -v yönünde yansıması gerekmektedir. Bu durumda u ve v yönlerindeki yansıma katsayılarının genliği $|r_{uu}| \cong |r_{vv}| \cong 1$, u ve v yönlerindeki yansıma katsayılarının fazları arasında ise $\Delta\phi = \phi_{iv} - \phi_{iu} \cong 90^\circ$ olması gerekmektedir.

Dairesel polarizasyon dönüştürme oranı

Önerilen yansıma tipli metayüzey polarizasyon dönüştürücünün dairesel polarizasyon dönüşüm kapasitesi Stokes Parametreleri üzerinden eliptiklik değeri hesap edilerek aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\text{Eliptiklik Değeri} = \frac{S_3}{S_0} \quad (25)$$

Burada $S_3 = 2|R_{xx}||R_{yx}|\sin\phi$ ve $S_3 = |R_{xx}|^2 + |R_{yx}|^2$ (25) olarak değerlendirilir. Eliptiklik değerinin -1 e ulaştığı frekans bantlarında sol eli dairesel dönüşüm (LHCP-left handed circular polarization), +1 e ulaştığı frekans bantları için ise sağ eli dairesel dönüşüm (RHCP-right handed circular polarization) gerçekleşir. Dairesel dönüşüm kapasitesinin

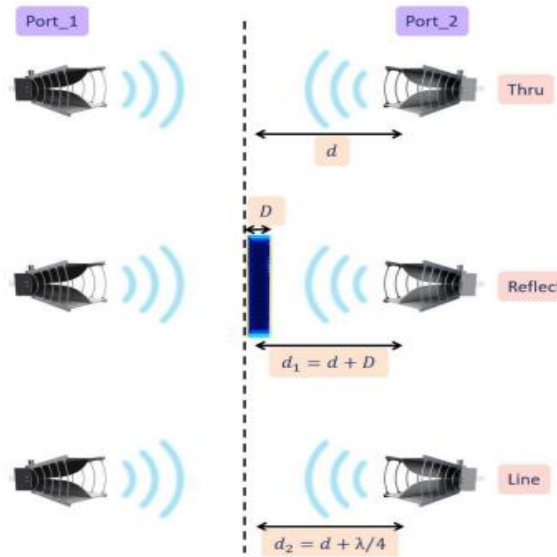
ölçülmesi için ayrıca eksenlere düşen elektrik alan şiddetinin genlikleri üzerinden Axial Ratio (Eksenel Oran) analizi yapılmaktadır. Eksenel Orana aşağıdaki gibi elde edilir.

$$Eksenel\ Oran\ (AR) = \sqrt{\frac{|R_{xy}|^2 + |R_{yy}|^2 + \sqrt{d}}{|R_{xy}|^2 + |R_{yy}|^2 - \sqrt{d}}} \quad (26)$$

Burada $d = |R_{xy}|^4 + |R_{yy}|^4 + 2|R_{xy}|^2|R_{yy}|^2\cos(2\Delta\phi)$ (27)'dir. AR değerinin sonucu dB cinsinden olup bu değer 1dB altında iken neredeyse tam dairesel polarizasyon gerçekleşirken, bazen 3dB altında kalan frekans bandı için de kabul edilebilir dairesel dönüşümden bahsedilmektedir.

Serbest uzay ölçüm teknikleri

Üretimi yapılan 67x67 birim hücreye sahip yansıma tipli metayüzey polarizasyon dönüştürücünün gerçek zamanlı bir uygulaması için serbest uzay ölçümler (Free Space) ile simülasyon sonuçları doğrulanması beklenmektedir. CST Mikrodalga Studio programında frekans uzayında unitcell boundary (sonsuz sınır şartları) uygulanarak gerçekleştirilen benzetimlerin doğrulanması için benzer şekilde sonsuz sınır şartlarına yaklaşacak şekilde birim hücrelerin yanyana konularak üretilmesi gerçekleştirilmiştir. Üretilen metayüzey polarizasyon dönüştürücü Keysight N9923 A marka ağ analizörü ile 1-18 GHz iki horn antenin karşılıklı bir iletim hattı oluşturacağı serbest uzay bir deneysel düzenek ile gerçekleştirildi. Bu deneysel düzeneğin kalibrasyonu için TRL (Thru-Reflect-Line) kalibrasyonu şekilde verildiği gibi hazırlandı.



Şekil 8. TRL kalibrasyon prosedürü

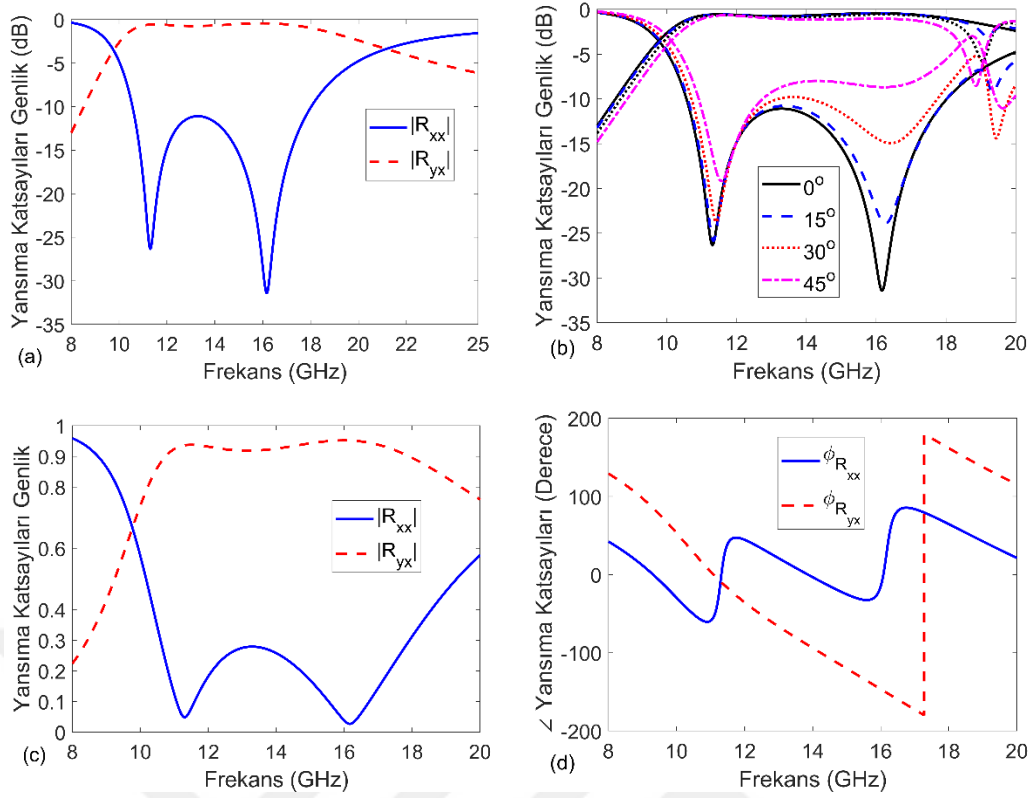
Şekil de üretimi yapılan numunenin serbest uzay ölçümleri için ağ analizatörünün TRL kalibrasyonu aşamaları verilmiştir. TRL kalibrasyon prosedüründe öncelikle antenlerin ikisi de de iyi bir metal ile sonlandırılarak yansıma ölçümleri yapılır. Daha sonra D mesafesi kadar numune kalınlığına sahip mesafe de eklenere iki antenlerin karşılıklı olarak aralarında hiçbir cisim olmaksızın boyuna ölçümü alınır. Daha sonra D kadar kaydırılan anten merkez frekansına göre $\lambda/4$ kadar daha kaydırılarak tekrar boyuna ölçüm yapılır. Kalibrasyon prosedüründe antenler arasındaki mesafenin uzak alan etkisinden (far field effect) olumsuz etkilenmeyeceği şekilde $d \geq 2L^3/\lambda$ kadar mesafe olmalıdır. Burada L ölçüm yapan boynuz antenlerin en büyük açıklık mesafesi (köşegen uzunluğu)'dir. Kalibrasyonu yapılan ağ analizatörü ile eş yansıma katsayılarının ölçümü için antenler yanyana getirilerek ve aralarında birkaç derece olacak şekilde önce aynı eksen boyunca konulur. Çapraz yansıma katsayılarının elde edilmesi için antenlerden biri eksenel olarak 90° çevrilir.

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

CST Mikrodalga Studio programında soğurumu yapılan metayüzey polarizasyon dönüştürücünün soğurum sonuçları MATLAB programında işlenerek yansıma katsayıları (genlik ve fazda), eğik açı performansı, polarizasyon dönüşüm oranı (PCR), lineer ve dairesel polarizasyon dönüşüm performansı elde edildi. Elde edilen bulguların gerçek zamanlı doğrulaması için önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücü PCB litografi teknikleri ile üretimi sağlandı. Üretilen numunenin gerçek zamanlı ölçümleri VNA ağ analizörü ile gerçekleştirilerek simülasyon sonuçları doğrulandı. Aynı zamanda ek bir doğrulama için ADS (Advanced Design System) üzerinden toplu parametrelili (RLC) elemanlar ile iletim hattı eşdeğer devresi oluşturuldu ve simülasyon sonuçları doğrulandı.

Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücü Yansıma Katsayıları

CST Mikrodalga Studio programında parametre süpürme seçeneği ile $a=[1-3]$ mm, $b=[1,2.5]$ mm, $c=[1.3-1.5]$ mm, $e=[0.6-0.9]$ mm ve $L=[4-6]$ mm arasında değiştirilerek en optimum benzetim sonuçları elde edildi. Önerilen yansıma tipli metayüzey polarizasyon dönüştürücü için; $a=2$ mm, $b=1.6$ mm, $c=1.41$ mm, $e=0.8$ mm, $L=4.4$ mm ve $d=1.6$ mm seçilerek eş ve çapraz yansıma katsayıları R_{xx} ve R_{yx} parametreleri genlik ve fazda aşağıdaki gibi elde edildi.



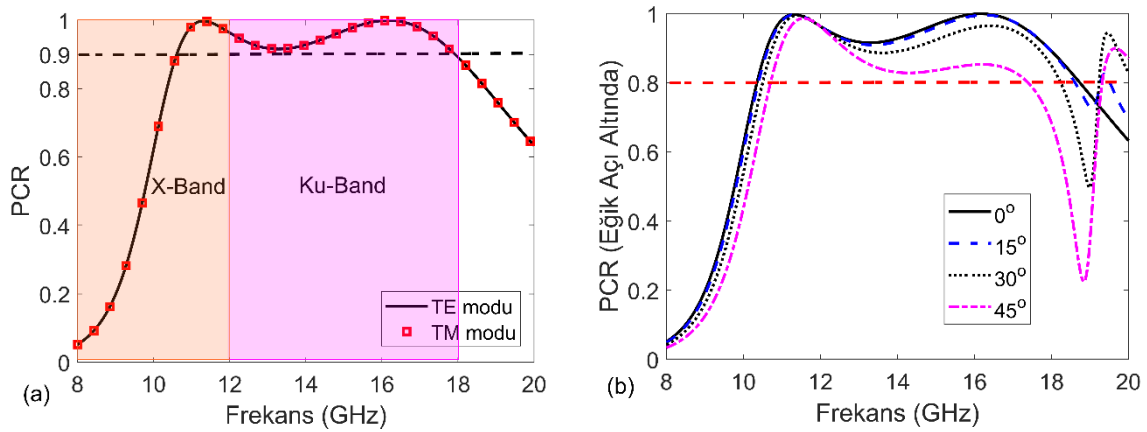
Şekil 9. (a) Yansıma katsayıları dB genlikte (b) eğik açı altında yansıma katsayıları 45° ye kadar (c) yansıma katsayıların genlikte (d) yansıma katsayıları fazda

Şekil de görüldüğü gibi x polarize olarak +z yönünde yansıma tipli metayüzey polarizasyon dönüştürücüye gelen düzgün düzlemsel dalganın x ve y yönünde yansıyan kısımları için genlik ve faz bilgileri verilmiştir. Şekil (a) da x polarize ve normal geliş gelen dalganın x ve y yönünde yansıyan kısımlarının dB genlik'te değişimi 8-20 GHz aralığı için verilmiştir. Şekil (a) da 10.517 GHz-18.061 GHz bant genişliğinde R_{xx} yansıma katsayısı -10 dB altında, R_{xy} yansıma katsayısı ise -0.72 dB üzerinde seyretmektedir. 11.309 GHz ve 16.174 GHz rezonans frekanslarında R_{xx} eş yansıma katsayıları sırasıyla -26.149 dB ve -31.6 dB genlik değerlerine ulaşmıştır. R_{yx} çapraz yansıma katsayıları ise bu rezonans frekanslarında -0.55 dB ve -0.43 dB genliklerinde seyretmektedir. Bu durumda x polarize gelen elektromanyetik dalganın %99.62 ve %99.91 PCR ile büyük bir kısmının bu rezonans frekanslarında y polarize olarak yansıdığını göstermektedir. Şekil (b) eğik açı altında 45° ye kadar x polarize olarak yansıtıcı metayüzey polarizasyon dönüştürücüye gelen dalganın eş ve çapraz yansıma katsayılarını 8-20 GHz bant aralığı için göstermektedir. Şekil (b) de görüldüğü gibi 45° ye kadar eş yansıma katsayıları sırasıyla -8.28 dB altında ve -1.15 dB üzerinde seyretmektedir. Eş ve çapraz yansıma katsayılarının genlik olarak 8-20 GHz aralığındaki değişimi şekil (c) de verilmiştir. Şekil (c) ye göre eş yansıma katsayıları 0.27 değerinin üzerinde, çapraz yansıma katsayılarının genlik değeri ise 0.91 değerinin altında seyretmektedir. Şekil (d)'de ise eş ve çapraz yansıma katsayılarının faz değerlerinin değişimini 8-20 GHz frekans bandı için derece

cinsinden verilmiştir. Şekil (d) de görüldüğü gibi eş ve çapraz yansıma katsayıları lineer polarizasyon dönüşümünün gerçekleştiği 10.517-18.061 GHz bant aralığında 90° faz farkına sahiptir.

Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücü Lineer Polarizasyon Dönüşüm Oranı

Eş ve çapraz yansıma katsayıları denklem (x) de kullanılarak yansıtıcı tip metayüzey polarizasyon dönüştürücünün lineer polarizasyon dönüşüm kapasitesi hesaplanıldı. Şekil (a) de yansıtıcı tip metayüzey polarizasyon dönüştürücüye TE (x polarize gelen dalga) ve TM (y polarize gelen dalga) modlar için gelen dalga durumunda polarizasyon dönüşüm oranlarının (PCR) değişimi 8-20 GHz bant genişliği için sunuldu. Şekil 10(a) da görüldüğü gibi önerilen yansıma tipli metayüzey dönüştürücü 10.517-18.061 GHz aralığında PCR değeri %90 üzerinde seyretmektedir. Şekil (b) de eğik açı altında x polarize gelen dalga için 45° ye kadar eğik açı altında PCR'nin değişim grafiği sunuldu.

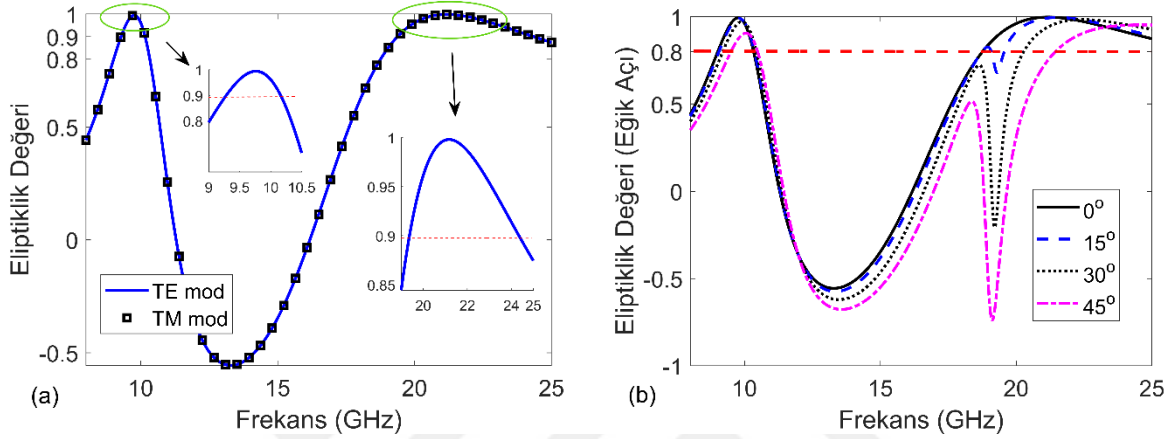


Şekil 10. (a) Metayüzey polarizasyon dönüştürücünün (a) normal geliş için (b) 45° ye kadar eğik açı altında geliş için PCR değişimi

Bu frekans aralığında elektrik alanı x (veya y polarize) gelen dalganın y (veya x) polarize olarak yansıdığı yani lineerden lineere polarizasyon dönüşümü (LP to LP) polarizasyon dönüşümü sağladığı görülmektedir. Dalganın hem TE hemde TM modda aynı lineer polarizasyon dönüşümü sağlaması önerilen yansıma tipli metayüzey polarizasyon dönüştürücünün polarizasyon bağımsız olarak çalıştığını kanıtlamaktadır. Şekil (b) de önerilen yansıma tipli metayüzey polarizasyon dönüştürücünün eğik açılı elektromanyetik dalganın gelmesi halinde lineer polarizasyon dönüşüm kararlılığını göstermektedir. Şekil (b) de görüldüğü üzere 45° ye kadar eğik açı altında gelen dalga için %80 üzerinde lineer polarizasyon dönüşümü desteklenmektedir. Bu durum eğik açılı veya polarizasyon bağımsız geliş gerektiren elektromanyetik dalgalar için büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücü Dairesel Polarizasyon Dönüşüm Oranı

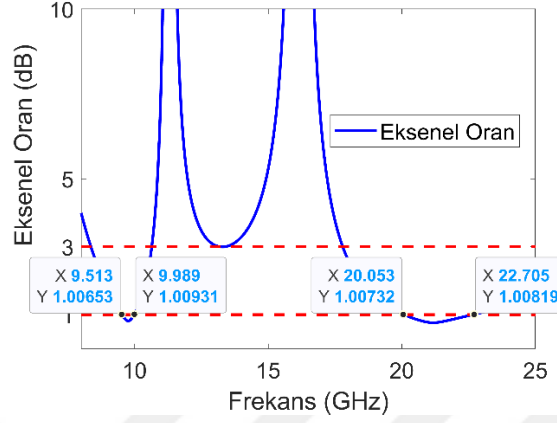
Önerilen yansıma tipli metayüzey polarizasyon dönüştürücünün 8-25 GHz frekans bandında dairesel polarizasyon dönüşümü kapasitesi incelendi. Denklem (25) kullanılarak Stokes parametreleri üzerinde dairesel polarizasyon dönüşüm kapasitesi eliptiklik değeri (ellipticity value) değeri üzerinden şekil 11(a-b) deki gibi verilmiştir. Şekil 11 (a-b) önerilen yansıma tipli metayüzey polarizasyon dönüştürücünün dairesel polarizasyon kapasitesinin 8-25 GHz aralığında incelenmesi için eliptiklik değerini göstermektedir.



Şekil 11. (a) Önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün TE ve TM modda eliptiklik değerinin değişimi (b) eğik açı altında 45° ye kadar eliptiklik değerinin değişimi

Stokes parametreleri üzerinden yapılan bu analize göre eliptiklik değerinin +1 değerine ulaştığı bölgelerde sağ elli, -1 değerine ulaştığı bölgelerde ise sol elli polarizasyon dönüşümünden bahsedilebilir. Şekil (a) da görüldüğü gibi hem TE (x-polarize) hemde TM (y-polarize) geliş için metayüzey polarizasyon dönüştürücünün eliptiklik değeri değişmemiş yani polarizasyon bağımsız davranış sergilemiştir. Özellikle 9.27- 10.159 GHz ve 19.39-24.35 GHz frekans bant genişliklerinde eliptiklik değeri 0.9 üzerinde seyretmektedir. Bu bant genişlikleri için %90 üzerinde sağ elli dairesel polarizasyon dönüşümü sağlanmaktadır. Özellikle 9.68-9.83 GHz bant aralığında ve 20.61-22.82 GHz bant genişliklerinde eliptiklik değeri neredeyse +1 değerine ulaşmıştır. Bu bant genişlikleri için lineer polarize (x-polarize) olarak metayüzeye gelen elektromanyetik dalganın neredeyse tam bir dairesel polarizasyon dönüşümü sağlanarak yansıdığı yani lineerden sağ elli dairesel polarizasyon dönüşümü (LP to RHCP) sağladığı gözlemlenmektedir. Şekil (b) de 45° ye kadar eğik açı altında eliptiklik değerinin değişimi 8-25 GHz bant aralığı için gösterilmektedir. Şekil (b) de görüldüğü gibi 9.51-10.48 GHz ve 21.4-25 GHz bant aralığı için eliptiklik değeri +0.8 değerinin üzerinde seyretmektedir. Bu frekans bant genişliği için 45° ye kadar eğik açı altında %80 üzerinde lineerden sağ elli dairesel polarizasyon dönüşümü gerçekleştiği gözlemlenmektedir.

Lineerden dairesel polarizasyon dönüşüm kapasitesinin ölçümünün bir başka yolu olan aksel oran (Axial Ratio) değişimi de aynı zamanda incelendi. Şekil 8-25 GHz bant genişliği boyunca önerilen yansıma tipli metayüzey polarizasyon dönüştürücünün aksel oran değişimini dB olarak göstermektedir. Şekilde görüleceği üzere aksel oran 9.51-9.98 GHz ve 20.05-22.7 GHz aralığında 1 dB altında seyretmektedir

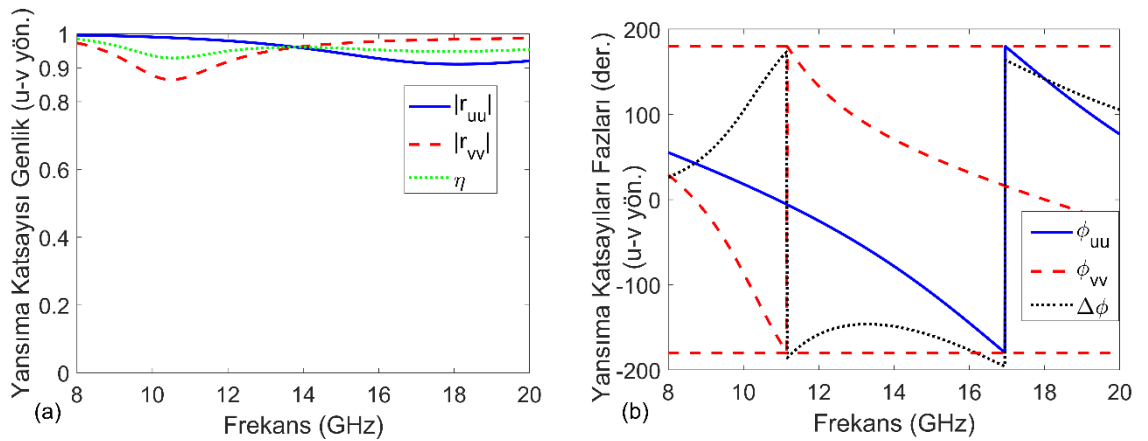


Şekil 12. Metayüzey polarizasyon 8-25 GHz frekans aralığındaki dönüştürücünün aksel oran değişimi

Bu durum önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün bu frekans bant genişlikleri arasında neredeyse tam bir dairesel polarizasyon gerçekleştirdiğini kanıtlamaktadır.

Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücünün u-v eksenleri üzerinden Polarizasyon Dönüşüm Kapasitesinin İncelenmesi

Önerilen yansıma tipli metayüzey polarizasyon dönüştürücünün lineer polarizasyon dönüşüm kapasitesinin doğrulanması ve dönüştürücünün fiziksel mekanizmasının iyi anlaşılması için materyal ve yöntem kısmında u-v eksenlerine ayrılan yansıma katsayılarının u ve v eksenleri üzerindeki ayrıştırıldı. Şekil 12 (a-b) yansıma katsayılarının u ve v eksenlerindeki $|r_{uu}|$, $|r_{vv}|$ genlik ve ϕ_{uu} , ϕ_{vv} ve $\Delta\phi$ faz farkları değişimini 8-20 GHz bant aralığı için göstermektedir.

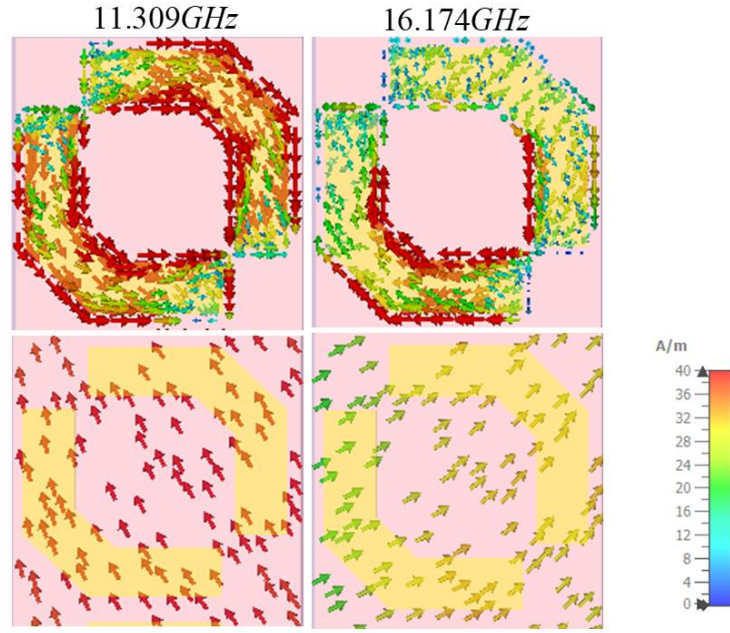


Şekil 13. (a) metayüzey polarizasyon dönüştürücünün u-v eksenlerindeki yansıma katsayılarının genlikleri ve polarizasyon verimlilik değerinin değişimi (b) metayüzey polarizasyon dönüştürücünün u-v eksenleri boyuncaki yansıma katsayılarının fazlarının değişimi

Yansıtıcı tip metayüzey polarizasyon dönüştürücüye gelen dalganın +u ekseninde polarize elektrik alan şiddeti (E_i^u) nin aynı yönde yansıyan elektrik alan şiddeti (E_r^u) 'ne genlik oranı $|r_{uu}|$ $(r_{uu} = E_r^u / E_i^u)$, benzer şekilde gelen dalganın +v yönündeki elektrik alan şiddetinin (E_i^v) ve -v yönünde yansıyan elektrik alan şiddetine genlik oranı r_{vv} $(r_{vv} = E_r^v / E_i^v)$ 'dir. Lineer polarizasyon dönüşümü için u yönünde gelen dalganın elektrik alan bileşenin aynı yönde, v yönünde gelen dalganın ise -v yönünde yansması beklendiği göz önünde tutularak genliklerinin mutlak değerleri yaklaşık olarak +1 civarında seyretmesi beklenmektedir. Şekil (a) da görüldüğü gibi $|r_{uu}|$ ve $|r_{vv}|$ değerleri yaklaşık olarak +1 civarında seyretmektedir. Şekil deki +x yönünde gelen dalganın u-v eksenine ayrıştırılmış durumu için r_{uu} ve r_{vv} yansımaya katsayıları arasında $\pm 90^\circ$ lik bir faz farkı gözlemlenmesi gerekmektedir. Şekil (b) de ϕ_{uu} ve ϕ_{vv} arasındaki faz farkı $\Delta\phi$ olmak üzere, bu değer yaklaşık olarak $\pm 90^\circ$ lik bir açı değişimi gerçekleştirdiği gözlemlenmektedir. Bu durum önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün lineer polarizasyon dönüşümünü sağladığını gösteren bir kanıttır.

Yüzey Akım Dağılımlarının İncelenmesi

Önerilen yansıtıcı tip metayüzey polarizasyon dönüştürücünün rezonans frekanslarında yüzey akım davranışları incelenerek dönüştürücünün fiziksel mekanizmasının daha iyi anlaşılması tartışıldı. Bu amaçla rezonans frekanslarında hem metayüzey hemde metal sonlandırmalardaki yüzey akımlarının yönleri incelenerek elektriksel veya manyetik dipollerin davranışları incelendi. Şekil önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün 11.309 GHz ve 16.174 GHz rezonans frekanslarındaki yüzey akım dağılımlarını göstermektedir. Önerilen yansımaya tipli metayüzey polarizasyon dönüştürücünün 11.309 GHz ve 16.174 GHz rezonans frekanslarında üst yüzey (metayüzey) ve alt yüzey (metal sonlandırma) kısımlarındaki yüzey akım dağılımları alt alta verilmiştir

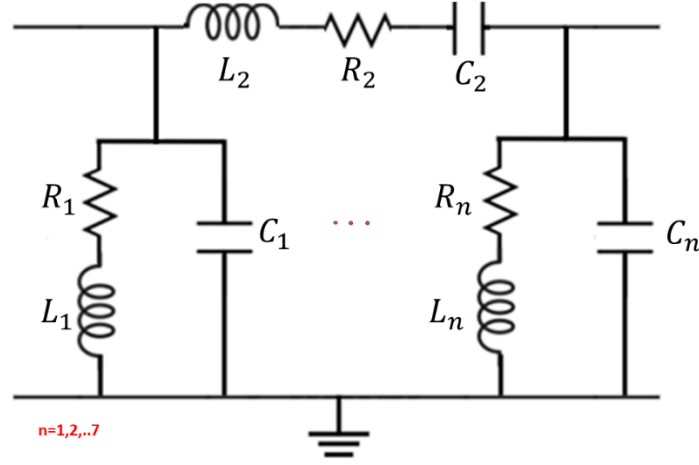


Şekil 14. 11.309 GHz ve 16.174 GHz rezonans frekansında polarizasyon dönüştürücünün metayüzey (üst) tabakasında ve metal sonlandırma (alt) tabakasındaki yüzey akım değişimleri

İlk rezonans frekansı olan 11.309 GHz de metayüzey tabakasında ve metal sonlandırma tabakasında yüzey akımları birbirlerine zıt olarak oluşmuştur. Ayrıca metayüzeyde birim hücrenin en iç ve en dış kısımlarında akım yoğunluğu daha şiddetlidir. Zıt yüzey akımları metayüzey polarizasyon dönüştürücüde manyetik dipollerin oluşumunu sağlamaktadır. İkinci rezonans frekansı olan 16.174 GHz de yüzey akımları nispeten daha düşük şiddette ve bazı bölgelerde metayüzey ile metal sonlandırma yüzey akımları aynı yönde, bazı bölgelerde ise zıt yönlerde akmaktadır. Bu rezonans frekansında hem elektriksel hemde manyetik dipol momentlerinin varlığını göstermektedir. Hem elektrik hemde manyetik dipollerin oluşumu geniş bir bant genişliği için polarizasyon dönüşüm oranı sağlanmasına katkı sağlamıştır.

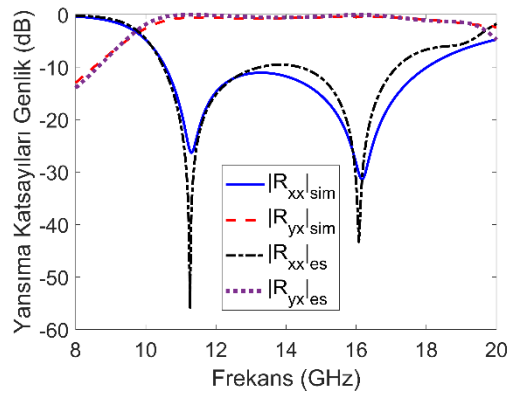
Eşdeğer Devre Modeli

Önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücünün doğruluğunun kanıtlanması için ADS (Advanced Design System) devre benzetim programı kullanıldı. Önerilen dizaynın R_{xx} ve R_{yx} yansıma katsayılarını modelleyecek eşdeğer devre modeli aşağıdaki gibi verilmiştir. Eşdeğer devre modeli birbirine şekil 15 de verilen aynı yapı ile seri kaskat bağlı bobin, direnç ve kapasitans elemanlarından oluşmaktadır.



Şekil 15. ADS programında tasarlanan eşdeğer devre modeli

Eşdeğer devre modelinde toplu parametrelili elemanların değerleri $R_1 = 2.0210^8 \text{ m}\Omega$, $R_2 = 20.84 \text{ m}\Omega$, $R_3 = 6.91 \text{ m}\Omega$, $R_4 = 32.52 \text{ m}\Omega$, $R_5 = 7.27 \text{ m}\Omega$, $R_6 = 16.3 \text{ m}\Omega$, $R_7 = 16.3 \text{ m}\Omega$, $R_8 = 16.3 \text{ m}\Omega$, $R_9 = 16.3 \text{ m}\Omega$, $R_{10} = 7.28 \cdot 10^7 \text{ m}\Omega$, $R_{11} = 165.31 \text{ m}\Omega$, $R_{12} = 2.22 \cdot 10^8 \text{ m}\Omega$, $L_1 = 0.156 \text{ nH}$, $L_2 = 3.66 \text{ nH}$, $L_3 = 28.65 \text{ nH}$, $L_4 = 11.33 \text{ nH}$, $L_5 = 12.64 \text{ nH}$, $L_6 = 4.8 \text{ nH}$, $L_7 = 3.72 \text{ nH}$, $L_8 = 3.22 \text{ nH}$, $L_9 = 7.65 \text{ nH}$, $L_{10} = 30.68 \text{ nH}$, $L_{11} = 6.27 \text{ nH}$, $L_{12} = 25.69 \text{ nH}$, $C_1 = 0.0055 \text{ pF}$, $C_2 = 0.93 \text{ pF}$, $C_3 = 0.00016 \text{ pF}$, $C_4 = 0.0351 \text{ pF}$, $C_5 = 0.0137 \text{ pF}$, $C_6 = 0.048 \text{ pF}$, $C_7 = 0.049 \text{ pF}$, $C_8 = 0.019 \text{ pF}$, $C_9 = 0.0194 \text{ pF}$, $C_{10} = 0.027 \text{ pF}$, $C_{11} = 0.07 \text{ pF}$ ve $C_{12} = 0.007 \text{ pF}$ olarak elde edildi. Eşdeğer devre modeli ile elde edilen yansıma katsayılarının benzetim sonuçları ile kıyaslaması şekil 16 da verildi.

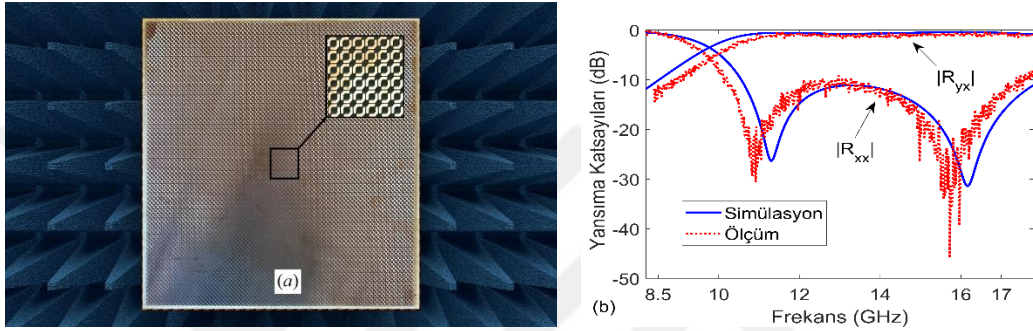


Şekil 16. ADS programı ve benzetim programı ile elde edilen yansıma katsayıları

Şekil 16 da ADS programı ile elde edilen R_{xx} ve R_{yx} yansıma katsayılarının ve benzetim programı ile elde edilen R_{xx} ve R_{yx} yansıma katsayılarının değişimini 8-20 GHz aralığında göstermektedir. Şekil 16 da görüldüğü gibi yansıma katsayıları büyük bir uyum içindedir.

Deneysel Sonuçlar

CST Mikrodalga Studio programında benzetimi yapılan yansıma tipli metayüzey polarizasyon dönüştürücü, gerçek zamanlı bir doğrulama için 67x67 birim hücre yanyana dizilerek sonsuz sınır şartı oluşturacak durumda şekil 17(a) daki gibi metayüzey üretildi. Üretilen numune benzetim yapılan programda kullanılan unitcell (sonsuz) sınır şartına uygun şekilde yanyana bir yüzey şeklinde gerçekleştirildi. Şekil de verilen üretimi yapılan numune 2 adet 1-18 GHz boynuz (horn) antene sahip VNA Ağ analizötörü kullanılarak eş ve çapraz yansıma katsayıları elde edildi. Deneyisel ve benzetim sonuçları ile elde edilen eş ve çapraz yansıma katsayıları şekil 17 (b) de verilmiştir.



Şekil 17. (a) 67x67 birim hücre ile üretilen metayüzey polarizasyon dönüştürücü (b) polarizasyon dönüştürücünün yansıma katsayılarının simülasyon ve ölçüm sonuçları

Verilen eş ve çapraz yansıma katsayılarının benzetim (simülasyon) sonuçları ile deneysel sonuçların birebir örtüşmemesi, üretim hataları, deneysel ölçüm hataları, yankısız oda şartları gibi etmenler sebebi ile faz ve genliklerde küçük sapmalar gerçekleşmiştir.

Performans Analizi

Önerilen yansıtıcı tip metayüzey polarizasyon dönüştürücü benzer özelliklere sahip literatürde yer alan diğer yansıtıcı tip metayüzey polarizasyon dönüştürücüler ile bant genişliği, eğik açı performansı, ilgili bant genişliği, kullanılan alttaşı ve dalga boyu cinsinden kalınlık, ilgili hacim büyüklüğü gibi etmenler cinsinden tablo 2 de gösterildiği gibi kıyaslandı.

Tablo 2. Önerilen Yansıtıcı Tip Metayüzey Polarizasyon Dönüştürücü İle Literatürde Yer Alan Çalışmaların Kıyaslaması

Çalışma	Bant Genişliği (GHz) ve Dönüşüm Cinsi	İlgili Bant Genişliği	Kalınlık	Altaş	Eğik Açık Perf.
Lin ve arkadaşları	10-18.4 LP-LP	%59.15	3 mm(0.140)	F4-B	40
Zhang ve arkadaşları	10.3-20.5 LP-LP	%66.23	3 mm(0.154)	F4-B	-
Huang ve arkadaşları	8.16-15.32 LP-LP	%61	3 mm(0.117)	FR-4	45
Zheng ve arkadaşları	7.74-14.44 LP-LP 14.95-17.35 LP-CP	%60.4	3 mm(0.155)	FR-4	30
Ozturk ve Corapsiz	11.3-11.5 LP-CP 12.05-17.9 LP-LP 12.05-17.9 CP-CP	%39	1.2 mm (0.06)	FR-4	45
Yang ve arkadaşları	11.9-18.05 LP-LP	%41	1.5 mm (0.059)	FR-4	45
Zheng ve arkadaşları	9.24-17.64 LP-LP	%63.9	2 mm (0.089)	FR-4	30
Bu çalışma	10.517-18.061 LP-LP 9.27-10.159 LP-CP 19.39-24.35 LP-CP	%52.7	1.2 mm (0.06)	FR-4	45

Tablo 2 de de görüleceği gibi literatürde ilgili çalışmalara bakıldığında bazıları sadece lineer dönüşüm sağlayabilmektedir. Bazı çalışmaların eğik açı performansları oldukça düşüktür. Bazı çalışmaların ilgili bant genişliği oldukça dar, bazılarının ise kullandığı altaş oldukça maliyetli ve kalındır. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak için oldukça ince, uygun maliyet, geniş bant ve tatmin edici kalınlığa sahip lineer ve dairesel metayüzey polarizasyon dönüştürücü önerilmiştir.

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında mikrodalga X ve Ku bantlarında lineer, yine X ve K bantlarında dairesel polarizasyon dönüşümü sağlayan metayüzey polarizasyon dönüştürücü sunuldu. Sunulan metayüzey polarizasyon dönüştürücü 10.517-18.061 GHz bant genişliğinde %90 üzerinde lineer polarizasyon dönüşümü sağlamaktadır. Yine önerilen metayüzey polarizasyon dönüştürücü X bandında 9.27-10.159 GHz bant genişliğinde ve K bandında 19.39-24.35 GHz bant genişliğinde sağ elli dairesel polarizasyon dönüşümü sağlamıştır. Tezde sunulan pasit metayüzey polarizasyon dönüştürücünün alttaşı, piyasa koşullarında kolayca uygun maliyet ile erişilebilir 1.6 mm kalınlığında FR-4 malzemesi ile gerçekleştirilmiştir. Önerilen mikrodalga aygıtın eğik açı performansı 45° ye kadar %80 üzerinde lineer polarizasyon dönüşümü sağlamaktadır. Ayrıca tezde sunulan metayüzey polarizasyon dönüştürücünün 11.309 GHz ve 16.174 GHz rezonans frekanslarında metal yüzeylerdeki yüzey akımlarının davranışı incelenmiş ve geniş bant polarizasyon dönüşümüne katkısı açıklanmıştır. Sunulan metayüzey polarizasyon dönüştürücü hem TE modda hemde TM modda gele dalga için benzer polarizasyon dönüşümü sağladığı için polarizasyon bağımsız bir aygıt olarak karşımıza çıkmaktadır.

Tezde sunulan metayüzey polarizasyon dönüştürücünün toplu parametrelili elemanlarla eşdeğer devresi oluşturularak doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca simülasyonu yapılan metayüzey polarizasyon dönüştürücünün gerçek zamanlı bir doğrulaması için litografi yöntemiyle üretimi yapılmış ve serbest uzay ölçümleri ile simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

Tezde elde edilen bulgular literatürde yer alan diğer çalışmalarla kıyaslanılmış ve oldukça geniş bantta hem lineer hemde dairesel dönüşüm gerçekleştirdiği, oldukça ince yapısı ile uygun maliyetli olarak elde edildiği ispatlanılmıştır.

KAYNAKÇA

- Ahmed, M., Younis, M. I., Riaz, M. Z., & Hussain, M. (2021). Dual-band polarization converter based on metamaterial structure. *IEEE Access*, 9, 45300–45309. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3066864>
- Ashraf, M. U., Ullah, H., Tahir, F. A., & Siddiqui, O. F. (2018). SAR reduction in human head using E-SRR metamaterial based EM absorber. *Progress In Electromagnetics Research C*, 86, 91–103.
- Ashraf, M., et al. (2018). *SAR reduction using E-SRR metamaterial*.
- B.Q. Lin, X.Y. Da, J.L. Wu, W. Li, Y.W. Fang, Z.H. Zhu, Ultrawideband and highefficiency cross polarization converter based on anisotropic metasurface, *Microw. Opt. Technol. Lett.* 58 (10) (2016) 2402–2405
- Bagmanci, M., Altun, A., & Akyüz, M. (2019). A solar absorber design using metamaterials for energy harvesting. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 194, 163058.
- Bağmancı, M., Karaaslan, M., Ünal, E., Akgöl, O., Bakır, M., & Sabah, C. (2019). Extremely-broad band metamaterial absorber for solar energy harvesting based on star shaped resonator. *International Journal of Modern Physics B*, 33, 1950056.
- Bilal, M., Memon, S., & Baloch, H. (2020). A multi-band THz polarization converter based on metamaterial. *Optik*, 208, 164078.
- Caloz, C., & Itoh, T. (2005). *Electromagnetic metamaterials: Transmission line theory and microwave applications*. John Wiley & Sons.
- Chen, H., Wu, B., Zhang, L., & Li, Y. (2017). Terahertz polarization converter using graphene-based metasurface. *Optics Communications*, 396, 204–208.
- Costanzo, A., & Venneri, F. (2020). Design of a metamaterial-inspired RF energy harvester for low-power devices. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 68(2), 714–723.
- Costanzo, S., & Venneri, F. (2020). *High-efficiency metamaterial absorber for WiFi energy harvesting*.
- Costanzo, S., & Venneri, F. (2020). Polarization-insensitive fractal metamaterial surface for energy harvesting in IoT applications. *Electronics*, 9(6), 959.
- Design and experimental validation... (2024). *Optical Materials*, 157, 116054; absorption ~99.98% at 2.4 GHz and ~99.99% at 4.9 GHz.
- Devapriya, D., & Robinson, S. (2019). Design and analysis of a metamaterial inspired compact patch antenna. *Microwave and Optical Technology Letters*, 61(2), 531–536.
- Du, H., Li, Y., Li, X., & Liu, L. (2020). Ultra-broadband terahertz absorber based on electric-ring resonator metamaterials. *Journal of Applied Physics*, 127(3), 033103.
- Du, Y., Chen, L., & Yang, J. (2020). A compact multi-band metamaterial-based polarization converter. *Scientific Reports*, 10, 12637.

- Dutta, S., Ghosh, R., & Sarkar, D. (2020). Reconfigurable metamaterial-based absorber and polarization converter using PIN diodes. *Microwave and Optical Technology Letters*, 62(12), 4126–4131.
- Efros, A. L., & Pokrovsky, A. L. (2004). *Dielectric photonic crystal as medium with negative ϵ and μ* . *Solid State Communications*, 129(10), 643–647.
- Elwi, T. A., & Saleh, A. A. (2020). Energy harvesting metamaterial antenna for IoT applications. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 12(4), 337–344.
- Elwi, T. A., Jassim, D. A., & Mohammed, H. H. (2020). Novel miniaturized folded UWB microstrip antenna-based metamaterial for RF energy harvesting. *International Journal of Communication Systems*, 33, e4305.
- Engheta, N., & Ziolkowski, R. W. (Eds.). (2006). *Metamaterials: Physics and engineering explorations*. John Wiley & Sons.
- Fahad, A. A., Khan, M. I., & Naqvi, S. I. (2020). A triple-band circular polarization converter using metamaterials. *Micromachines*, 11(5), 441.
- Farhi, E., & Bergman, D. J. (2014). *Image resolution in a Veselago lens under quasistatic conditions*.
- Fu, Y., Xu, X., & Wang, Y. (2019). Dual-band polarization converter based on metal–insulator–metal structure. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 40(5), 541–553.
- G. Ozturk, M.F. Corapsiz, Ultra-thin reflective linear and circular polarization converter for Ku band applications, *Opt. Commun.* 516 (2022) Art. No. 128268
- Guo, J., Chen, X., & Zhu, Y. (2018). A broadband polarization converter using a sandwich-like structure. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(5), 2546–2554.
- Hasanul Karim, M. (2017). Passive wireless metamaterial-based temperature sensor using CRR. *Sensors and Actuators A: Physical*, 263, 312–318.
- Huang, Y., Xu, X., & Wang, Y. (2019). A dual-band linear-to-circular and linear polarization converter based on a metal–dielectric–metal structure. *IEEE Access*, 7, 113340–113349.
- Islam, M. T., et al. (2018). *Metamaterial-based rectangular cloaking device*.
- Islam, M. T., Samsuzzaman, M., & Misran, N. (2018). Design of metamaterial cloaking structure for C and X band applications. *Materials*, 11(5), 793.
- Iyer, A. K., & Eleftheriades, G. V. (2008). *Free-space imaging beyond the diffraction limit using a Veselago–Pendry transmission-line superlens*.
- J. Zhang, L. Yang, L. Li, T. Zhang, H. Li, Q. Wang, K. Bi, High efficiency polarization conversion phase gradient metasurface for wideband anomalous reflection, *J. Appl. Phys.* 122 (1) (2017) Art. No. 014501.
- Jain, V., Jain, R. K., & Singh, V. K. (2021). An ultra-thin dual-band metamaterial absorber for S and X band applications. *Optik*, 241, 166939.
- Jordi Naqui, F. M. (2015). Angular displacement and velocity sensors based on S-SRR metamaterials. *Sensors*, 15(4), 9628–9641.
- Karakaya, E., Bağcı, F., Yılmaz, A. E., & Akaoglu, B. (2019). Metamaterial-based four-band electromagnetic energy harvesting at commonly used GSM and Wi-Fi frequencies. *Journal of Electronic Materials*, 48, 2307–2316.
- Karim, H., et al. (2017). *Wireless passive temperature sensor based on CRR*.

- Khan, M. I., & Tahir, F. A. (2018). Polarization conversion using ultra-thin metasurface for wideband applications. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 32(12), 1574–1585.
- Khan, M. I., *et al.* (2019). Design and analysis of ultra-thin polarization converter for X-band applications. *IEEE Access*, 7, 34618–34628.
- Khan, M. I., *et al.* (2020). Broadband and multi-band metamaterial-based polarization converter using sandwich structure. *Scientific Reports*, 10, 10453.
- Labidi, M., & Choubani, F. (2018). Enhancement of THz loop antenna characteristics using TZ-shaped metamaterials. *Microwave and Optical Technology Letters*, 60(10), 2425–2430.
- Labidi, M., & Choubani, F. (2018). *Metamaterial loop antenna for THz applications*.
- Loncar, M., Radonic, V., & Micevic, D. (2018). Multilayer polarization converter using RO4003 substrate. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 32(5), 610–620.
- Naqui, J., *et al.* (2015). *Angular displacement and velocity sensor based on split ring resonators*. [Yayın bilgisi].
- Nguyen, T. P., *et al.* (2021). *Dual-band polarization converter using metamaterials*.
- Nguyen, T. T., *et al.* (2021). Broadband linear and circular polarization converter using a single-layer metasurface. *IEEE Access*, 9, 51568–51577.
- Nguyen, T. T., Lee, D., & Park, H. (2020). Design of a wideband metamaterial absorber with polarization insensitivity. *Sensors*, 20(9), 2483.
- Park, *et al.* (2017). *Virus detection using metamaterial-based THz sensors*.
- Park, H., Park, H. R., & Kim, H. (2017). Terahertz metamaterial sensor for virus detection. *Optics Express*, 25(2), 1236–1247.
- Pendry, J. B., Schurig, D., & Smith, D. R. (2006). Controlling electromagnetic fields. *Science*, 312(5781), 1780–1782.
- Q. Zheng, C. Guo, G.A. Vandenbosch, P. Yuan, J. Ding, Dual-broadband highly efficient reflective multi-polarisation converter based on multi-order plasmon resonant metasurface, *IET Microw. Antennas Propag.* 14 (9) (2020) 967–972.
- Q. Zheng, C. Guo, H. Li, J. Ding, Broadband radar cross-section reduction using polarization conversion metasurface, *Int. J. Microw. Wirel. Technol.* 20 (11) (2018) 197–206.
- Sen, S., Mondal, P., & De, S. (2019). Dual-band metamaterial absorber using FR-4 for X and Ku bands. *Microwave and Optical Technology Letters*, 61(9), 2123–2129.
- Shelby, R. A., Smith, D. R., & Schultz, S. (2001). Experimental verification of a negative index of refraction. *Science*, 292(5514), 77–79.
- Shi, H., Zhang, Y., & Wang, L. (2014). A broadband polarization converter with dual-linear and circular polarization characteristics. *Applied Physics Letters*, 104, 074101.
- Smith, D. R., Pendry, J. B., & Wiltshire, M. C. K. (2004). *Metamaterials and negative refractive index*. *Science*, 305(5685), 788–792.
- Smith, D. R., Pendry, J. B., & Wiltshire, M. C. K. (2004). Metamaterials and negative refractive index. *Science*, 305(5685), 788–792.
- Veselago, V. G. (1968). *The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ* . *Soviet Physics Uspekhi*, 10(4), 509–514.

- Veselago, V. G. (1968). The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi*, 10(4), 509–514.
- Wang, C., Liu, Y., & Zhou, J. (2021). Triple-band ultra-thin metamaterial absorber with polarization independence. *Optics Communications*, 491, 126910.
- Wang, H., & Zhai, Y. (2020). A wide-angle polarization converter for LP–CP conversion in X-band. *IEEE Access*, 8, 101011–101019.
- X. Huang, J. Chen, H. Yang, High-efficiency wideband reflection polarization conversion metasurface for circularly polarized waves, *J. Appl. Phys.* 122 (4) (2017) Art. No. 043102.
- X. Yang, Z. Ding, Z. Zhang, Broadband linear polarization conversion across complete Ku band based on ultrathin metasurface, *AEU Int. J. Electron. Commun.* 138 (2021) Art. No. 153884.
- Xu, H., & Huang, J. (2019). *Thermal invisibility using metamaterials*.
- Xu, X., & Huang, Y. (2019). Thermal invisibility cloak based on metamaterials. *Journal of Applied Physics*, 125(4), 045101.
- Xu, X., Fu, Y., & Wang, Y. (2018). High-efficiency polarization converter based on metal–insulator–metal structure. *IEEE Photonics Journal*, 10(5), 1–8.
- Ye, H., Jin, Y., Huang, W., Gu, M., Tian, Y., & Jing, X. (2025). Review for metamaterial-based energy harvester and absorber. *European Physical Journal Applied Physics*, 100, 18.
- Yu, Y., Li, Y., & Zhang, H. (2019). Wide-angle metamaterial absorber based on ITO film. *Journal of Applied Physics*, 126(1), 015105.
- Zani, A., Amari, S., & Trabelsi, S. (2010). Design of patch antenna with metamaterial substrate. *Microwave and Optical Technology Letters*, 52(9), 2060–2063.
- Zani, A., et al. (2010). *Circular patch antenna with metamaterial substrate*.
- Zou, W., Liu, Y., & Zhao, Y. (2020). Wide-angle terahertz polarization converter based on PTFE substrate. *Optics Express*, 28(22), 33081–33092.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler
Adı Soyadı: Kübra Dönmez
Doğum tarihi:
Doğum Yeri:
Uyruğu:
Adres:
Tel:
E-mail:
Eğitim
Lise:
Lisans: Atatürk Üniversitesi
Yüksek lisans: Atatürk Üniversitesi
Doktora:
Yabancı Dil Bilgisi
İngilizce: İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar
Tezden Üretilmiş Yayınlar