



**C, X, Ku VE K MİKRODALGA FREKANS
BANTLARINDA ÇALIŞAN METAMALZEME
TEMELLİ POLARİZASYON DÖNÜŞTÜRÜCÜ
UYGULAMALARI**

Fatih TUTAR

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ÖZTÜRK
Yüksek Lisans Tezi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2021
(Her hakkı saklıdır.)**

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

**C,X,Ku VE K MİKRODALGA FREKANS BANTLARINDA ÇALIŞAN
METAMALZEME TEMELLİ POLARİZASYON DÖNÜŞTÜRÜCÜ
UYGULAMALARI**

(Metamaterial Based Polarization Converter Applications Working In C,X,Ku And K
Microwave Frequency Band)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih TUTAR

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ÖZTÜRK

Erzurum
Temmuz, 2021

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Fatih TATAR tarafından hazırlanan “C, X, Ku VE K MİKRODALGA FREKANS BANTLARINDA ÇALIŞAN METAMALZEME TEMELLİ POLARİZASYON DÖNÜŞTÜRÜCÜ UYGULAMALARI” başlıklı çalışması 12/07/2021 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği Bilim Dalında Yüksel Lisans tezi olarak **oybirliği (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL
Atatürk Üniversitesi
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ÖZTÜRK
Atatürk Üniversitesi
Jüri Üyesi: Prof. Dr. Uğur Cem HASAR
Gaziantep Üniversitesi

Aslı ıslak imzalıdır

Aslı ıslak imzalıdır

Aslı ıslak imzalıdır

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. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır

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

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak *Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ÖZTÜRK* danışmanlığında sunulan “C,X,Ku VE K MİKRODALGA FREKANS BANTLARINDA ÇALIŞAN METAMALZEME TEMELLİ POLARİZASYON DÖNÜŞTÜRÜCÜ UYGULAMALARI” 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	6	30
Kuramsal Temeller	0	30
Materyal ve Yöntem	7	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	0	20
Sonuçlar	0	20
Tezin Geneli	4	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
Fatih TUTAR	Dr Öğr Üyesi Gökhan ÖZTÜRK
2.8.2021	2.8.2021
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

Yüksek Lisans tez çalışma sürecim boyunca bana tecrübe ve fikirleriyle yol gösteren ve desteklerini esirgemeyen danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ÖZTÜRK'e emeklerinden dolayı teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen Atatürk Üniversitesi öğretim üyesi başta Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL, Prof. Dr. Tevhit KARACALI ve Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU olmak üzere Atatürk Üniversitesi öğretim üyeleri ve Öğretim elemanlarına teşekkür ederim

Destek ve fikirleriyle yanımda olan Arş. Gör. Burak HÜLAGÜ'ye, Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Numan ÖZAKIN'a ve Elektrik-Elektronik Mühendisi Muhammed Murad TOP'a ve İnşaat Mühendisi Tuğba KESKİN'e, Ayrıca beni bugünlere getiren Annem ve Babam'a teşekkür ederim.

Fatih TUTAR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

C, X, Ku VE K MİKRODALGA FREKANS BANTLARINDA ÇALIŞAN METAMALZEME TEMELLİ POLARİZASYON DÖNÜŞTÜRÜCÜ UYGULAMALARI

Fatih TUTAR

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ÖZTÜRK

Amaç: Bu çalışmada mikrodalga ve milimetredalga aralığında çok yollu zayıflama ve polarizasyon uyumsuzluğu gibi kanal performansını düşüren sorunların üstesinden gelmek için polarizasyon dönüştürücü tasarımları gerçekleştirmek amaçlanmıştır.

Yöntem: Tez kapsamında gerçekleştirilen polarizasyon dönüştürücü uygulamaları Elektromanyetik benzetim programı (CST Microwave Studio) ve Matlab programı vasıtası ile eş ve çapraz polarizasyon katsayıları, Stoke's parametreleri, eliptiklik değeri ve polarizasyon dönüşüm oranı gibi parametreler hesaplanarak gerçekleştirilmiştir.

Bulgular: Tez kapsamında gerçekleştirilen polarizasyon dönüştürücü uygulamalarından elde edilen bulguların her biri literatürdeki farklı çalışmalar ile çeşitli parametreler açısından kıyaslanmış ve bu çalışmalar tablolar halinde sunulmuştur. Karşılaştırma sonuçlarına göre tez kapsamında gerçekleştirilen uygulamalar polarizasyon dönüşüm oranı, birim hücre kalınlığı ve genişliği, bant genişliği, bant sayısı, eliptiklik değeri ve katman sayısı gibi parametreler göz önüne alındığında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Sonuç: Tez kapsamında gerçekleştirilen üç adet polarizasyon dönüştürücü uygulaması IEEE 521 radar frekans bantları standartlarında belirtilen C, X, Ku ve K mikrodalga frekans bantlarında hem lineer polarizasyondan lineer polarizasyona hem de lineer polarizasyondan dairesel polarizasyona dönüşüm işlemi gerçekleştirmiş ve literatürde bulunan diğer çalışmalarla kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: PCR, polarizasyon dönüştürücü, polarizasyon dönüşüm oranı, metamalzeme, lineer polarizasyon, dairesel polarizasyon, çembersel polarizasyon

Temmuz 2021, 70 Sayfa

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

METAMATERIAL BASED POLARIZATION CONVERTER APPLICATIONS WORKING IN C, X, KU AND K MICROWAVE FREQUENCY BAND

Fatih TUTAR

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ÖZTÜRK

Purpose: In this study, it is aimed to realize polarization converter designs to overcome the problems that reduce channel performance such as multipath fading and polarization mismatch in the microwave and millimeter wave range.

Method: Polarization converter applications carried out within the scope of the thesis were carried out by calculating parameters such as co- and cross-polarization coefficients, Stoke's parameters, ellipticity value and polarization conversion ratio via to Electromagnetic simulation program (CST Microwave Studio) and Matlab program.

Findings: Each of the findings obtained from the polarization converter applications carried out within the scope of the thesis were compared with different studies in the literature in terms of various parameters and these studies were presented in tables. According to the comparison results, better results were obtained when the parameters such as polarization conversion ratio, bandwidth, band number, ellipticity value, unit cell thickness and width, number of layers are taken into account.

Results: Three polarization converter applications within the scope of the thesis performed both linear polarization to linear polarization and linear polarization to circular polarization conversion processes in the C, X, Ku and K microwave frequency bands specified in the IEEE 521 radar frequency band standards and compared with other studies in the literature.

Keywords: PCR, polarization converter, polarization conversion ratio, metamaterial, linear polarization, circular polarization

July 2021, 70 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	10
Malzeme Ortamında Elektromanyetik Dalga Yayılımı	10
Metamalzeme Ortamında Elektromanyetik Dalga Yayılımı.....	11
Negatif Kırılma İndisi	13
Polarizasyon	14
Lineer Polarizasyon.....	15
Dairesel Polarizasyon.....	15
Eliptik Polarizasyon	16
MATERYAL ve YÖNTEM	17
Saçılma Parametreleri	17
Stoke's Parametreleri	18
Eliptiklik Değeri.....	24
Polarizasyon Dönüşüm Oranı	24
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	26
C, X, Ku ve K Bant Polarizasyon Dönüştürücü Uygulaması	26
X, Ku Bant Polarizasyon Dönüştürücü Uygulaması.....	26
C, X Bant Polarizasyon Dönüştürücü Uygulaması	35
SONUÇLAR.....	41
KAYNAKLAR.....	42
ÖZGEÇMİŞ.....	56

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. X, C, K, Ku bant polarizasyon dönüştürücünün referans alınan diğer çalışmalarla karşılaştırılması	30
Tablo 2. X, Ku bant polarizasyon dönüştürücünün referans alınan diğer çalışmalarla karşılaştırılması	35
Tablo 3. C, X bant polarizasyon dönüştürücünün referans alınan diğer çalışmalarla karşılaştırılması	40



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Periyodik ince tel yapılardan oluşan plazma ortamı	2
Şekil 2. SRR yapısı.....	3
Şekil 3. Smith ve arkadaşlarının çalışmalarında kullandığı yapı	4
Şekil 4. Malzeme ortamında elektromanyetik alan yayılımı.....	11
Şekil 5. Malzeme ortamında elektromanyetik dalga yayılımının sağ el kuralı ile gösterilmesi	11
Şekil 6. Malzemelerin sınıflandırılması	12
Şekil 7. Metamalzeme ortamında elektromanyetik dalga yayılımı	13
Şekil 8. Metamalzeme ortamında elektromanyetik dalga yayılımının sol el kuralı ile gösterilmesi	13
Şekil 9. Lineer Polarizasyonu	15
Şekil 10. a) Sol eli dairesel polarizasyon b) Sağ eli dairesel polarizasyon	16
Şekil 11. Eliptik Polarizasyon	16
Şekil 12. İki kapılı devre modeli	17
Şekil 13. Polarizasyon elipsi	20
Şekil 14. Poincare küresi	22
Şekil 15. Poincare küresi üzerinde Stoke's parametrelerinin gösterilmesi	24
Şekil 16. Önerilen C, X, Ku, K bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü	26
Şekil 17. C, X, Ku ve K bant polarizasyon dönüştürücü birim hücre ölçüleri.....	26
Şekil 18. C, X, Ku, K bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü R_{xx} ve R_{xy} grafikleri.....	27
Şekil 19. C, X, Ku, K bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü eliptiklik ve PCR grafikleri.....	27
Şekil 20. C, X, Ku, K bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü u-v eksenleri.....	28
Şekil 21. C, X, Ku, K bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü u-v eksenleri genlikleri.....	29
Şekil 22. C, X, Ku, K bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü u-v eksenleri arasındaki faz farkı	29
Şekil 23. Önerilen X, Ku bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü	30
Şekil 24. X, Ku bant polarizasyon dönüştürücü birim hücre ölçüleri	31
Şekil 25. X, Ku bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü R_{xx} ve R_{xy} grafikleri	31
Şekil 26. X, Ku bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü eliptiklik ve PCR grafikleri	32
Şekil 27. X, Ku bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü u-v eksenleri	33
Şekil 28. X, Ku bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü u-v eksenleri genlikleri.....	33

Şekil 29. X, Ku bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü u-v eksenleri arasındaki faz farkı	34
Şekil 30. Önerilen C, X bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü	36
Şekil 31. C, X bant polarizasyon dönüştürücü birim hücre ölçüleri	36
Şekil 32. C, X bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü R_{xx} ve R_{xy} grafikleri.....	37
Şekil 33. C, X bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü eliptiklik ve PCR grafikleri	37
Şekil 34. C, X bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü u-v eksenleri	38
Şekil 35. C, X bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü u-v eksenleri genlikleri	39
Şekil 36. C, X bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü u-v eksenleri arasındaki faz farkı	39



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

$\vec{E}$	Elektrik alan şiddeti vektörü
$\vec{H}$	Manyetik alan şiddeti vektörü
$\vec{k}$	Dalga yayılım vektörü
$\vec{S}$	Poynting vektör
S_{11}	1.ortamdan yansıma parametresi
S_{12}	2.ortamdan 1.ortama iletim parametresi
S_{21}	1.ortamdan 2.ortama iletim parametresi
S_{22}	2.ortamdan yansıma parametresi
ϵ_0	Boş uzayın elektriksel geçirgenliği
ϵ_r	Malzemenin bağıl elektriksel geçirgenliği
ϵ	Elektriksel geçirgenlik katsayısı
ϵ_{metal}	Metal elektriksel geçirgenlik
μ_0	Boş uzayın manyetik geçirgenliği
μ_r	Malzemenin bağıl manyetik geçirgenliği
μ	Manyetik geçirgenlik katsayısı
c	Işık hızı
n	Kırılma indisi
ω	Açısal frekans
ω_p	Plazma frekansı
$\epsilon_r(\omega)$	Frekansa bağımlı malzeme bağıl elektriksel geçirgenlik
$\mu_r(\omega)$	Frekansa bağımlı malzeme bağıl manyetik geçirgenlik
$n(\omega)$	Frekansa bağımlı kırılma indisi
k	Dalga Numarası
∇^2	Laplasyan Operatörü
φ_x	Elektrik alanın x yönü bileşenin fazı
φ_y	Elektrik alanın y yönü bileşenin fazı
χ	Eliptiklik açısı
ψ	Yönelme açısı
E_1	Elektrik alanın x yönü bileşeninin genliği

E_2	Elektrik alanın y yönü bileşeninin genliği
S_0	Toplam yayılma alanı yoğunluğu
S_1	Lineer yatay polarizasyon baskınlığı
S_2	Lineer dikey polarizasyon baskınlığı
S_3	Sağ ve sol elli dairesel polarizasyon baskınlığı
R_{xx}	x'den x'e eş polarizasyon yansıma katsayısı
R_{xy}	y'den x'e çapraz polarizasyon yansıma katsayısı
R_{yx}	x'den y'ye çapraz polarizasyon yansıma katsayısı
R_{yy}	y'den y'ye eş polarizasyon yansıma katsayısı
r_{uu}	u birim vektörü yansıma katsayısı
r_{vv}	v birim vektörü yansıma katsayısı
φ_{uu}	u birim vektör faz açısı
φ_{vv}	v birim vektör faz açısı

Kısaltmalar

CST	Computer Simulation Technology(Bilgisayar Simülasyon Teknoloji)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NIM	Negative Index Materials (Negatif İndeks Malzeme)
DNG	Double Negative (Çift Negatif)
LH	Left Handed (Sol Elli)
BW	Back-Ward (Geri)
SRR	Splt Ring Resonatör (Yarık Halka Rezonatör)
SAR	Specific Absorption Rate (Özgül Emilim Oranı)
ITO	Indium Tin Oxide
PET	Polyethylene Terephthalate
TM	Enine Manyetik alan
TE	Enine Elektrik alan
LP-LP	Lineer Polarizasyondan Lineer Polarizasyona Dönüşüm
LP-CP	Lineer Polarizasyondan Dairesel Polarizasyona Dönüşüm
RHCP	Sağ Elli Dairesel Polarizasyon
LHCP	Sol Elli Dairesel Polarizasyon
LDP	Lineer Dikey Polarizasyon
L+45	Lineer +45° Polarizasyon
L-45	Lineer -45° Polarizasyon

THz	Terahertz
GHz	Gigahertz
PCR	Polarizasyon Dönüşüm Oranı
CRR	Closed Ring Resonator (Kapalı Halka Resonator)
ERR	Electric Ring Resonator (Elektrik Halka Rezonator)
PTFE	Poly Tetra Fluoroethylene

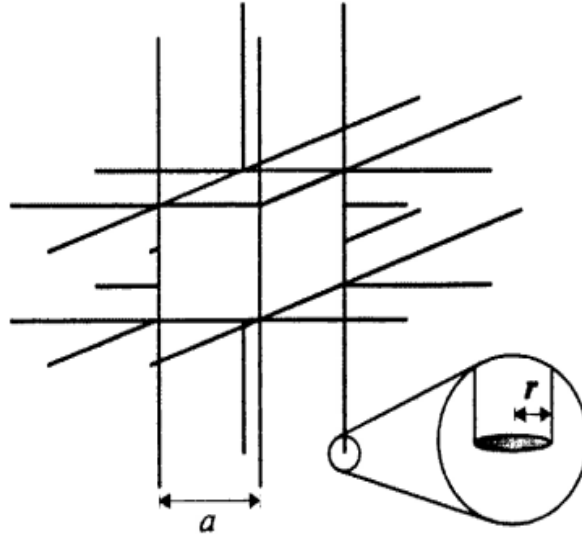


GİRİŞ

Polarizasyon elektromanyetik dalganın önemli parametrelerinden biridir ve elektrik alanının yönelimini ve değişimini tanımlar. Elektromanyetik dalganın polarizasyon durumlarının kontrol edilmesi çalışmaları polarizasyon hassasiyetli cihazlar nedeniyle giderek daha fazla ilgi çekmektedir. Polarizasyon dönüşüm işlemi anten kazancı geliştirilmesi, girişim ve radar kesit alanı azaltılması, uydu haberleşmesi, elektromanyetik kalkanlama gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılır (Fahad *et al.* 2020; Nguyen *et al.* 2021). Mikrodalga ve Milimetredalga aralığında polarizasyon uyumsuzluğu ve çok yollu zayıflama kanalın performansını düşürür, böyle bir durumda çok yollu zayıflamaya karşı daha düşük hassasiyetleri nedeniyle lineer polarizasyonlu dalgalar yerine dairesel polarizasyonlu dalgalar tercih edilir. Dairesel polarizasyonlu dalga ise iki şekilde üretilebilir birincisi elektromanyetik dalganın yayıldığı antenin dalgayı dairesel polarizasyonla yayması ikinci yol ise lineer polarizasyondan dairesel polarizasyona dönüştürücü (LP-CP) kullanarak dairesel polarizasyon elde etmektir (Fahad *et al.* 2020). Geleneksel polarizasyon dönüştürücüler olan faraday etkisi ve optik kristaller dar bant genişliği, büyük hacim ve elektromanyetik dalganın geliş açısına bağıllığı sebebiyle gerçek zamanlı uygulamalarla uyumsuzdur. Bu yüzden polarizasyon dönüştürücünün dizaynında basit bir yapı, uygun boyut, iyi bir bant genişliği ve geniş geliş açısı değişmezliği parametreleri önemli hale gelmiştir. Son zamanlarda birçok polarizasyon dönüştürücü yapay, iki boyutlu ve düzlemsel metamalzeme temelli metayüzey olarak da adlandırılan bir yapı geliştirilmiştir. Malzeme parametrelerini ayarlayarak, boyutlarını ve geometrisini değiştirerek elektromanyetik dalganın polarizasyon durumunu manipüle etmek için potansiyel bir yaklaşım sunmuştur. Metamalzeme temelli bu yapı iletim ve yansıma modlarında mikrodalga, terahertz, infrared ve görünür bölge gibi elektromanyetik spektrumdaki farklı frekans aralıklarında polarizasyon dönüştürme yeteneklerini göstermiştir. Ancak sunulan çalışmalar sadece yüksek polarizasyon dönüşüm performansını ya lineer polarizasyondan lineer polarizasyona (LP-LP) yada lineer polarizasyondan dairesel polarizasyona (LP-CP) tek katman veya çok katmanlı olan çalışmalardır. Yakın zamanda hem LP-LP hem de LP-CP dönüşümünü gösteren çok fonksiyonlu bir polarizasyon dönüştürücü çalışmaları yapılmıştır (Nguyen *et al.* 2021).

Metamalzemeler doğada bulunmayan ve normal malzemelerin aksine farklı elektromanyetik özellikler gösteren yapay malzemelerdir. Doğadaki tüm malzemeler pozitif bağıl elektrik geçirgenlik (ϵ_r), bağıl manyetik geçirgenlik (μ_r) ve kırılma indisi (n) özelliği

gösterirken bu yapay malzemelerin ϵ_r ve μ_r değerleri negatiftir. Bu nedenle NIM (Negative Index Materials), DNG (Double Negative), LH (Left Handed) veya BW (Back-Ward) gibi isimlerle adlandırılır (Kshetrimayum 2005). Literatüre ilk olarak sol elli metamalzeme kavramı Victor G. Veselago tarafından kazandırılmıştır (Veselago 1968). Veselago teorik çalışmalar ile elektirksel geçirgenlik (ϵ) ve manyetik geçirgenliği (μ) eşzamanlı olarak negatif olması durumunda Maxwell denklemlerini yeniden güncellemiştir. Böylesi bir durum için dalga yayılım vektörü $\vec{k}$ ile güç vektörü $\vec{S}$ (Pointng vektör) zıt yönlü olarak hareket ettiğini göstermiştir. Sonuç olarak $\vec{E}, \vec{H}, \vec{k}$ dalga üçlüsü geleneksel malzemenin aksine $\vec{E}, \vec{H}, -\vec{k}$ olarak davrandığını göstermiştir. Bu çalışma ile sol elli malzemeler ilk kez teorik olarak tanımlanmıştır. Bu çalışma aynı zamanda negatif kırılma indisinin hem ϵ hem de μ nün eşzamanlı olarak negatif olması ile sağlanacağını ispatlamıştır. Bu çalışmalardan ilham alan Pendry 1998 yılında $-\epsilon$ için tıpkı plazma frekansında gazların davranışı gibi elektrik alan içerisinde bulunan iletkenin içinde bulunan elektron bulutunu Drude ve Lorentz modellerini uygulayarak, sonsuz uzunluktaki ince tellerin elektrik alan etkisi altında belirli frekans aralığında ϵ değerinin negatif olduğunu göstermiştir.



Şekil 1. Periyodik ince tel yapılardan oluşan plazma ortamı (Pendry 1998)

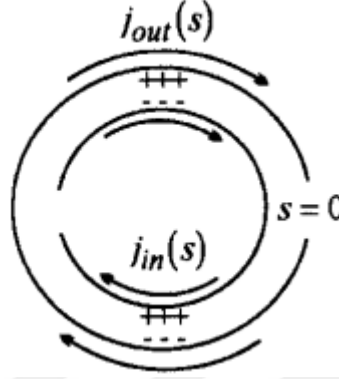
Şekil 1’de Pendry ve arkadaşları tarafından kullanılan yapı gösterilmektedir. Burada a mm seviyesinde her bir telin uzunluğu ve r mikron seviyesindeki tellerin yarıçaplarını göstermektedir. Bu yapı için dielektrik sabiti denklem (1)’de verilmiştir.

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

denklem (1)’de ω_p ifadesi plazma frekansı ifadesidir ve denklem (2)’de olduğu gibi ifade edilir.

$$\omega_p = \frac{ne^2}{\varepsilon_0 m} \quad (2)$$

Denklem (2)'deki n ifadesi elektron sayısını, ε_0 ifadesi boşluğun dielektrik sabitini, m elektron kütlesini, ve e ise yükü ifade etmektedir. Denklem (1)'de görüleceği üzere plazma frekansından düşük frekanslarda ε negatif değerini almaktadır (Pendry 1998). Pendry bir yıl sonra Split Ring Resenator (SRR) kullanarak yine belli frekanslar altında $-\mu$ olabileceğini ispatlamıştır.

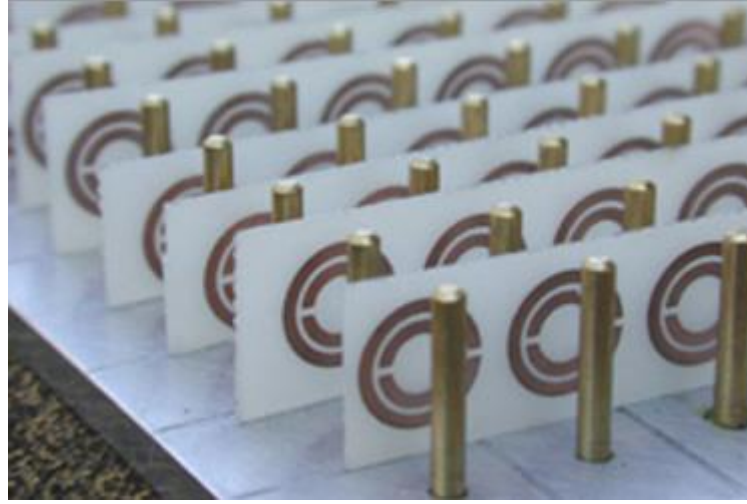


Şekil 2. SRR yapısı (Pendry 1999)

Şekil 2'de Pendry'nin çalışmada kullandığı SRR yapısı gösterilmiştir. Bu yapıdaki önemli nokta halkalardaki boşlukların halkaların etrafından akmasının önlenmesidir fakat bu iki halka arasında akımın akmasını sağlayan bir kapasitans oluşur (Pendry 1999). Bu yapı için manyetik geçirgenlik denklem (3)'te verilmiştir.

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{\frac{\pi r^2}{a^2}}{1 - \frac{dc^2}{2\pi^2(N-1)\omega^2 + i\frac{2\rho}{\mu_0 r \omega(N-1)}}} \quad (3)$$

Denklem (3)'te N halka sayısını, ω açısal frekansı, μ_0 ifadesi boşluğun manyetik geçirgenliğini, r SRR yapısının yarıçapını ve a ise periyodik SRR yapıları arasındaki uzaklığı ifade etmektedir (Pendry 1999). Bu deneysel çalışmaları birleştirerek eş zamanlı olarak hem negatif ε hem de negatif μ bir malzeme için tanımlanarak negatif kırılma indisi sağlanılmıştır. Şekil 3'te yapılan bu çalışmanın görseli verilmiştir (Smith 2000).



Şekil 3. Smith ve arkadaşlarının çalışmalarında kullandığı yapı (Shadrivov *et al.* 2003)

Metamalzemelerin yüksek rezonans özellikleri sebebiyle; Sensör (Jordi Naqui 2015; Hasanul Karim 2017; Park *et al.* 2017), Anten(Zani *et al.* 2010; Labidi and Choubani 2018; Devapriya and Robinson 2019), Görünmezlik Pelerini(Islam *et al.* 2018; Xu and Huang 2019), Enerji Hasadı(Bagmanci *et al.* 2019; Costanzo and Venneri 2020; Elwi *et al.* 2020), Elektromanyetik Kalkanlama(Ashraf *et al.* 2018; Yin and Tian 2021) Mikrodalga Soğurucu(Sen *et al.* 2019; Yu *et al.* 2019; Du *et al.* 2020; Nguyen *et al.* 2020; Jain *et al.* 2021; Wang *et al.* 2021) ve Polarizasyon Dönüştürücü(Shi *et al.* 2014; Chen *et al.* 2017; Guo *et al.* 2018; Khan and Tahir 2018; Loncar *et al.* 2018; Xu *et al.* 2018; Fu *et al.* 2019; Huang *et al.* 2019; Khan *et al.* 2019; Bilal *et al.* 2020; Du *et al.* 2020; Dutta *et al.* 2020; Fahad *et al.* 2020; Khan *et al.* 2020; Khan *et al.* 2020; Wang and Zhai 2020; Zou *et al.* 2020; Ahmed *et al.* 2021; Nguyen *et al.* 2021; Nguyen *et al.* 2021) gibi bir çok çalışma yapılmıştır. Malzemelerin mikrodalga frekanslarında iletim rezonans frekans özelliklerine bakılarak metamalzeme tabanlı birçok sensör çalışması yapılmıştır. Jordi ve arkadaşları metamalzeme bölünmüş halka rezonatörleri kullanarak (S-SRR) açısal yer değiştirme ve hız sensörü gerçekleştirmişler. Bu sensörlerde lineerlik, ölçme aralığı, hassasiyet ve doğruluk gibi parametrelerde gelişmeler sağlamışlardır(Jordi Naqui 2015). Hasanul ve arkadaşları Kapalı Halka Rezonatör (CRR) metamalzeme temelli pasif kablosuz sıcaklık sensörü geliştirmişler, oda sıcaklığından 200°C'ye kadar test edilmiş ve rezonans frekanslarının düşük frekans bölgelerinde sıcaklığın artmasıyla rezonans frekansının kaydığını gözlemişlerdir. Rezonans bölgeleri oda sıcaklığında 11,93 GHz 200 °C de ise 11,85 GHz olmuş 0,462MHz °C hassasiyet sağlanmıştır (Hasanul Karim 2017). Park ve arkadaşları PRD1 ve MS2 virüsleri SRR yapılı metamalzeme kullanarak THz bölgesinde tespit etmişlerdir (Park *et al.* 2017). Metamalzeme yapıları kullanılarak mikroşerit antenlerin kazançları, bant genişlikleri gibi çeşitli parametreleri geliştirilmiştir. Labidi ve arkadaşları THz uygulamalar için bir döngü antenin yönlülük, kazanç, geri dönüş kaybı ve ısıma

verimliliği parametrelerini iyileştirmek için TZ ismini verdikleri TZ şeklinde metamalzeme kullanmışlar ve bahsedilen parametrelerde iyileşme sağlamışlardır (Labidi and Choubani 2018). Zani ve arkadaşları dairesel yama anten geliştirmişler ve alttaşı olarak FR-4 ve metamalzeme kullanarak sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Metamalzeme kullanılan antende de geri dönüş kaybı parametresinde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir (Zani *et al.* 2010). Devapriya ve arkadaşları SRR yapılı metamalzeme kullanarak mikroşerit yama anten gerçekleştirmişler ve geleneksek mikroşerit yama antenle karşılaştırmışlardır. Bu karşılaştırma sonucunda metamalzeme temelli anten boyutu küçülmüş ve anten parametreleri iyileşmiştir ve bu parametreleri SRR yapısındaki boşluğun genişliği ve SRR yapısındaki kalınlığın etkilediği gözlemlenmiştir (Devapriya and Robinson 2019). Metamalzeme yapıları kullanarak görünmezlik pelerini yapıları geliştirilmiştir. Islam ve arkadaşları metamalzeme temelli dikdörtgen görünmezlik pelerin geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri bu pelerin yapısı C ve X bandında 4 GHz bant genişliğinde pelerin özelliği göstermiştir (Islam *et al.* 2018). Xu ve arkadaşları yaptığı çalışmada metamalzeme kullanarak termal olarak görünmezlik pelerini teorik olarak gerçekleştirmişlerdir (Xu and Huang 2019). Metamalzeme yapıları kullanarak enerji hasadı uygulaması yapılmıştır. Bagmancı ve arkadaşlar metamalzeme kullanarak solar soğurucuyu teorik olarak geliştirmişler ve bir enerji hasadı uygulamasını literatüre kazandırmışlardır, buradaki yapı $Ni-SiO_2$ den oluşmuştur (Bagmanci *et al.* 2019). Costanzo ve arkadaşları enerji hasadı için bir metamalzeme birim hücre önermişler ve yüksek soğurum yüzdesi, iyi bir açısal stabilite ve yüksek polarizasyon bağımsızlığı gibi parametreleri 2,45 GHz WiFi frekans bandında elde etmişlerdir (Costanzo and Venneri 2020). Elwi ve arkadaşları IoT alanında radyo frekansında çalışan Enerji hasadı uygulaması için UWB silindirik metamalzeme temelli anten geliştirmişlerdir, yaptıkları ölçümlerde 5,8 GHz de 4,5 milivolt hasat etmişlerdir (Elwi *et al.* 2020). Metamalzeme yapıları kullanarak elektromanyetik kalkanlama uygulaması yapılmıştır. Ashraf ve arkadaşları E-SRR yapılı metamalzeme kullanarak kafa fantomunda özgül emilim oranı (SAR) ölçümü gerçekleştirmiş ve 2100Mhz de %35,93 oranında SAR değerini azaltmışlardır (Ashraf *et al.* 2018). Yin ve arkadaşları metamalzeme kompozit kullanarak soğurum ve kalkanlama işlemini bir arada gerçekleştirmişlerdir. Kompozit yapıdaki soğurum bant genişliği 32 GHz (4,5-14,5 GHz, 17-39 GHz) ve kalkanlama verimliliği ise 63 dB'den büyüktür (Yin and Tian 2021). Metamalzeme yapıları kullanarak mikrodalga soğurucu uygulaması yapılmıştır. Sen ve arkadaşları tabanı ve yama kısmı bakır orta kısmında ise düşük maliyetli FR-4 alttaşı kullanarak soğurucu geliştirmişlerdir. Bu geliştirdikleri soğurucu X ve Ku bandında %90 dan fazla soğurum göstermiştir. 9,46 GHz ve 13,9 GHz noktalarında ise %99 dan fazla soğurum göstermiştir (Sen *et al.* 2019). Yu ve arkadaşları rezistif transparan ince film olan ITO(Indium tin Oxide) kullanarak soğurucu geliştirmişler ve deneysel olarak polarizasyon

ve geliş açısından etkilenmeden 1,6-3,67 GHz aralığında %90 dan daha fazla soğurum elde etmişlerdir (Yu *et al.* 2019). Du ve arkadaşları ERR (Elektrik halka rezonatörü) kullanarak çok tabakalı THz bölgesinden çalışan soğurucu gerçekleştirmişler ve yaptıkları simülasyon sonucunda 8,02 THz bant genişliğinde %90 dan fazla soğurum sağlamışlardır (Du *et al.* 2020). Nguyen ve arkadaşları tabanı ve yama kısmı bakır orta kısmında ise düşük maliyetli FR-4 alttaşı kullanarak soğurucu gerçekleştirmişlerdir, soğurucu tasarımında SRR yapılı metamalzeme kullanmışlar ve bölünmüş halka rezonatörlerini bölündüğü kısmında lumped resistor kullanmışlardır. Bu çalışma sonucunda 6,8-11,8 GHz aralığında 0° den 30°ye kadar geliş açısında hem TM hem TE modunda %70 in üstünde soğurum sağlamışlardır (Nguyen *et al.* 2020). Jain ve arkadaşları tabanı ve yama kısmı bakır orta kısmında ise FR-4 alttaşı kullanarak ultra ince (0,018λ) 3,36-3,95 GHz ve 10,48 GHz noktalarında S ve X bandı kapsayan soğurucu gerçekleştirmişlerdir (Jain *et al.* 2021). Wang ve arkadaşları PET (Polyethylene Terephthalate) kullanarak % 99,5, % 86,4 ve % 98,4 oranlarında sırasıyla 0,337, 0,496 ve 0,718 THz rezonans frekanslarında soğurum sağlayan 0° den 60° geliş açısına kadar TE Modda 0° dan 70° ye kadar TM Modda soğurum özellikleri sürdüren 3 bant soğurucu gerçekleştirmişlerdir. Metamalzeme yapıları kullanarak polarizasyon dönüştürücü uygulaması yapılmıştır. Shi ve arkadaşları tabanı ve yama kısmı bakır orta kısmında ise $\epsilon_r=3,5$, $\tan\delta=0,003$ özelliğinde dielektrik alttaşı yama kısmında ise içi boş halka içinde elips şeklinde rezonatör kullanarak 9,65-14,16 GHz bant genişliğinde lineer polarizasyon dönüştürücü (LP-LP) ve aynı zamanda Stoke's parametrelerini de hesaplayarak 9,25 GHz'de ve 14,35 GHz'de lineer polarizasyondan dairesel polarizasyona dönüşüm (LP-CP) elde etmişlerdir (Shi *et al.* 2014). Chen ve arkadaşları H şeklinde oyulmuş grafen ve gümüş tabaka arasında dielektrik katman olan bir yapı ile THz bölgesinde bir polarizasyon dönüştürücü yapmışlardır. Yaptıkları bu çalışma 34,39-36,92 THz arasında % 90 üzerinde polarizasyon dönüşüm oranıyla sonuçlanmıştır(Chen *et al.* 2017). Guo ve arkadaşları alttaşı kısmı 1,6 mm kalınlığında 2,65 dielektrik sabitli bir alttaşı olmak üzere metal yalıtkan metal sandvic yapı kullanarak % 90 üzerinde PCR oranıyla 14,2-36 GHz aralığında LP-LP polarizasyon dönüşümü gerçekleştirmiştir (Guo *et al.* 2018). Khan ve Tahir iki bakır tabaka arasına 2,4 mm kalınlığında FR-4 alttaşı kullanarak yaptıkları çalışmada 5-15 GHz bandının tamamını %100 PCR oranıyla LP-LP polarizasyon dönüşümü elde etmişlerdir (Khan and Tahir 2018). Loncar ve arkadaşları X bandında çalışan üç katmanlı bakır iki katmanlı RO4003 alttaşı ve RO4450F yapıştırma filmi kullanarak çok tabakalı bir yapı kullanarak 9,2-10,5 GHz arasında %99,4 PCR ile LP-LP polarizasyon dönüşümü gerçekleştirmişlerdir (Loncar *et al.* 2018). Xu ve arkadaşları metal yalıtkan metal sandvic yapısı kullanarak 6,67-17,1 GHz arasında % 90 oranında PCR ve %87,7 oranında bağıl bant genişliği değeri ile LP-LP polarizasyon dönüştürücü gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada 2,65 dielektrik sabitli F4B-2 alttaşı

kullanmışlardır (Xu *et al.* 2018). Fu ve arkadaşları metal yalıtkan metal sandvic yapısı kullanarak 9,38-13,36 GHz ve 14,84-20,36 GHz bantlarında sırasıyla %98,21 ve % 99,32 PCR oranlarında LP-LP polarizasyon dönüşümü yapmışlardır, altaş olarak 2,65 dielektrik sabitli 3,0 mm kalınlığında F4B-2 altaşı kullanılmıştır (Fu *et al.* 2019). Huang ve arkadaşları 3,0 mm kalınlığında FR-4 altaşı kullanarak metal yalıtkan metal sandvic yapısıyla 4,40-5,30 GHz ve 9,45-13,60 GHz bantlarında LP-LP 4,47-5,35 GHz ve 9,57-13,57 GHz bantlarında LP-CP polarizasyon dönüşümü elde etmişlerdir (Huang *et al.* 2019). Khan ve arkadaşları ultra ince tek tabaka polarizasyon dönüştürücü geliştirmişler X bandında hem LP-LP hem de LP-CP yaptıkları bu çalışmanın LP-LP 8-11 GHz aralığında ve LP-CP 7,5-7,7 GHz ve 11,5-11,9 GHz bantlarındadır. Bu çalışma 0° den 45° ye kadar hem TE hem TM modunda özelliklerini korumuştur (Khan *et al.* 2019). Bilal ve arkadaşları THz bandında, hem LP-LP hem de LP-CP polarizasyon dönüştürücü olarak çalışan bir aygıt gerçekleştirmişlerdir yaptıkları bu çalışmada elde edilen sonuçlar 1,10 THz 2,13 THz ve 3,46 THz noktalarında LP-LP polarizasyon dönüşümü 1,2 THz -1,83 THz, 2,52 THz -3,10 THz ve 3,78 THz-3,90 THz noktalarında LP-CP polarizasyon dönüştürücü olarak çalıştığını göstermiştir (Bilal *et al.* 2020). Du ve arkadaşları üç dar bantda 6,82 GHz, 9,4 GHz ve 12,04 GHz noktalarında %100 e yakın PCR oranıyla LP-LP polarizasyon dönüşümü yapmışlardır, yaptıkları bu çalışmada 2,1 dielektrik sabitli 3,175 mm kalınlığında altaşı kullanmışlardır (Du *et al.* 2020). Dutta ve arkadaşları diyot pasif elemanı kullanarak çok katmanlı bir yapıyla 15-17 GHz arasında soğurucu ve LP-LP polarizasyon dönüştürücü yapmışlardır (Dutta *et al.* 2020). Wang ve arkadaşları tabanı ve yama kısmı bakır orta kısmında ise FR-4 altaşı kullandıkları geniş açılı LP-CP dönüştürücü tasarlamışlardır, yaptıkları bu çalışma sonucunda geliş açılarına bakılmaksızın 8,18-13,988 GHz aralığında %90 PCR oranında polarizasyon dönüştürücü elde etmişlerdir(Wang and Zhai 2020). Fahad ve arkadaşları X ve Ka bantlarını kapsayan 3 bant LP-CP polarizasyon dönüştürücü yapmışlardır, yaptıkları bu çalışmada metalik tabakalar arasına, metalik tabaklardan biri beş kareden oluşmak üzere 0,3 mm kalınlığında FR-4 altaşı kullanarak 7,3-9,6 GHz, 25,4-31,4 GHz, 35,4-42,2 GHz bant aralıklarında LP-CP polarizasyon dönüşümü gerçekleştirmişlerdir (Fahad *et al.* 2020). Khan ve arkadaşları yalıtkan kısmı 1,6 mm kalınlığında 2,33 yalıtkan sabitli Rogers marka altaşı kullanarak metal yalıtkan metal sandvic yapı ile hem LP-LP hem de LP-CP polarizasyon dönüştürücü yapmışlardır, yaptıkları bu çalışmada %100 PCR oranıyla 6,3–6,5 GHz, 9,1–15,4 GHz, 25,3–29 GHz, 31–31,8 GHz, 35,7–35,9 GHz bantlarında LP-LP 6,60–6,67 GHz, 8,70–8,95 GHz, 15,69–16,25 GHz, 21,35–21,55 GHz, 24,15–24,97 GHz, 29,52–30,63 GHz, 32,00–32,07 GHz, 35,47–35,56 GHz bantlarında ise LP-CP polarizasyon dönüşümü elde etmişlerdir (Khan *et al.* 2020). Khan ve arkadaşları metal yalıtkan metal sandvic yapısı kullanarak hem LP-LP hem de LP-CP polarizasyon

dönüşümü yapan yalıtkan olarak 1,6 mm kalınlığında FR-4 alttaşı ile 6,3-6,6 GHz, 9-10,8 GHz ve 15,2-18,7 GHz bantlarında LP-LP polarizasyon dönüşümü 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 ise LP-CP polarizasyon dönüşümü yapmaktadır (Khan *et al.* 2020). Zou ve arkadaşları tabanı ve yama kısmı bakır orta kısmında ise PTFE (Poly Tetra Fluoroethylene) alttaşı kullandıkları THz bölgesinde çalışan LP-LP polarizasyon dönüştürücü tasarlamışlardır ve bu çalışma sonucunda 1,21 THz-2,83 THz aralığında geliş açısı 0° den 45° ye kadar %93 verimlilikle lineer polarizasyon dönüştürücü elde etmişlerdir (Zou *et al.* 2020). Ahmed ve arkadaşları tabanı ve yama kısmı bakır orta kısmında ise FR-4 alttaşı kullanarak hem LP-LP hem de LP-CP dönüştürücü özelliği gösteren polarizasyon dönüştürücü tasarlamışlardır. Yaptıkları benzeşim ve ölçüm sonuçlarında 5,3-5,4 GHz, 7,2-8 GHz ve 12,3-13,76 GHz aralığında LP-LP 5,1-5,2 GHz, 5,6-6,85 GHz ve 8,8-11,2 GHz, 14,9-20,2 GHz aralığında ise LP-CP dönüştürücü olarak çalıştığını göstermişlerdir (Ahmed *et al.* 2021). Nguyen ve arkadaşları hem LP-LP hem de LP-CP polarizasyon dönüştürücü işlemi gerçekleştiren bir çalışma yapmışlardır, % 90 üzeri PCR oranı ile 8-12 GHz arası LP-LP polarizasyon dönüştürücü 7,42-7,6 GHz ve 13-13,56 GHz arasında 2 bantda ise LP-CP polarizasyon dönüştürücü işlemi gerçekleşmiştir, yaptıkları çalışmada metal yalıtkan metal sandvic yapısı ve 1,6 mm kalınlığında FR-4 alttaşı kullanmışlardır (Nguyen *et al.* 2021). Nguyen ve arkadaşları tabanı ve yama kısmı bakır orta kısmında ise FR-4 alttaşı kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmada 6 Ghz bandında Tüm Ku bandını kapsayan %90 verimlilikle lineer polarizasyon gerçekleştirmişlerdir, yaptıkları bu çalışma bu özelliklerini 0° dan 45° ye kadar hem TE hem TM modda korumuştur (Nguyen *et al.* 2021).

Bu tez kapsamında IEEE-521 standartlarında belirtilen C, X, Ku, K mikrodalga frekans bantlarında hem LP-LP hem de LP-CP polarizasyon dönüşümlerini içeren metamlazeme temelli üç adet farklı aygıt tasarımı sunulacaktır. Yapılan çalışmalar CST benzetim programı ile benzetim yapılmış elde edilen eş ve çapraz polarizasyon katsayıları Matlab R2020a programı ile işlenerek gerekli sonuçlar ve grafikler elde edilip sunulmuştur. Tasarımı yapılan üç aygıtın her biri farklı frekans aralıklarında LP-LP ve LP-CP polarizasyon dönüşüm türlerinden her ikisini de içermektedir. Tezin araştırma bulguları bölümünde detayları verilen bu aygıtlardan C, X, Ku, ve K bant polarizasyon dönüştürücü uygulamasında C frekans bandında 7,09-7,32 GHz aralığında RHCP polarizasyon dönüşümü K frekans bandında 18,91-19,03 GHz aralığında LHCP polarizasyon dönüşümü işlemi yapılmıştır. Ayrıca bu tasarım X, K, Ku frekans bantlarında >%97 PCR oranıyla 8,4-17,93 GHz frekans aralığında LP-LP polarizasyon dönüşüm işlemi gerçekleştirmiştir. X, Ku bant polarizasyon dönüştürücü uygulamasında X frekans bandında 8,68-11,48 GHz frekans aralığında >%96 PCR oranıyla LP-

LP polarizasyon dönüşümü, X ve Ku frekans bandında 7,9-7,96 GHz ve 12,84-13,16 GHz frekans aralıklarında RHCP polarizasyon dönüşüm işlemi gerçekleştirmiştir. C, X bant polarizasyon dönüştürücü uygulamasında C frekans bandında 4,61-4,85 GHz ve 6,86-7,78 GHz frekans aralıklarında $>90\%$ PCR oranıyla LP-LP ve 5,35-5,94 GHz frekans aralığında RHCP polarizasyon dönüşüm işlemi, X frekans bandını kapsayan 8,88-12,03 GHz frekans aralığında ise LHCP polarizasyon dönüşüm işlemi gerçekleştirilmiştir.



KURAMSAL TEMELLER

Malzeme Ortamında Elektromanyetik Dalga Yayılımı

Elektromanyetik dalganın yayılımı temel olarak $\varepsilon \mu$ parametrelerine bağlıdır ve bu yayılımı modelleyen helmholtz denklemi ifadesi denklem (4)'de verilmiştir.

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (4)$$

Burada ki k dalga numarasını ifade eder ve denklem (5)'de belirtildiği gibi ifade edilir.

$$k = \omega \sqrt{\varepsilon \mu} \quad (5)$$

Burada ω ifadesi açısal frekansı, ε ifadesi elektiriksel geçirgenliği, ε_0 ifadesi boşluğun elektrik geçirgenlik sabitini, ε_r yayılma ortamındaki malzemenin bağlı elektrik geçirgenliğini, μ manyetik geçirgenliği, μ_0 boşluğun manyetik geçirgenlik sabitini, μ_r yayılma ortamının bağlı manyetik geçirgenliği ve c ışık hızı ifadeleri olmak üzere denklemler (6), (7) ve (8) 'de verilmiştir. Ayrıca ε_0 ve μ_0 değerleri sırasıyla $\varepsilon_0 = 8,854187 \cdot 10^{-12}$, $\mu_0 = 1,256637 \cdot 10^{-6}$ 'dır.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (6)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (7)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \quad (8)$$

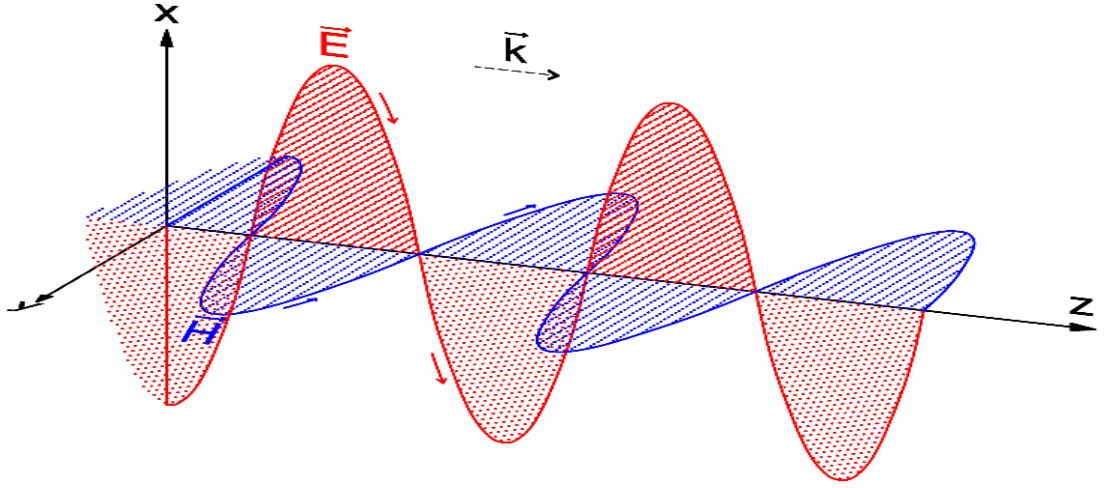
(5),(6), (7) ve (8) nolu denklemlerden yola çıkarak denklem (9)

$$k = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \quad (9)$$

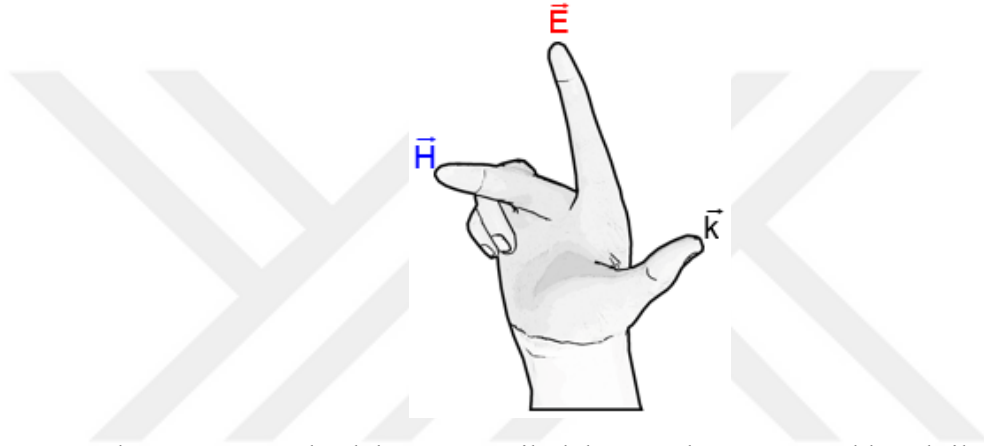
olarak elde edilir.

$$n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \quad (10)$$

Denklem (10)'da belirtilen n kırılma indisidir ve elektromanyetik dalga veya ışığın boşluktaki yayılma hızının bir ortam içindeki yayılma hızına oranını ifade eder.



Şekil 4. Malzeme ortamında elektromanyetik alan yayılımı

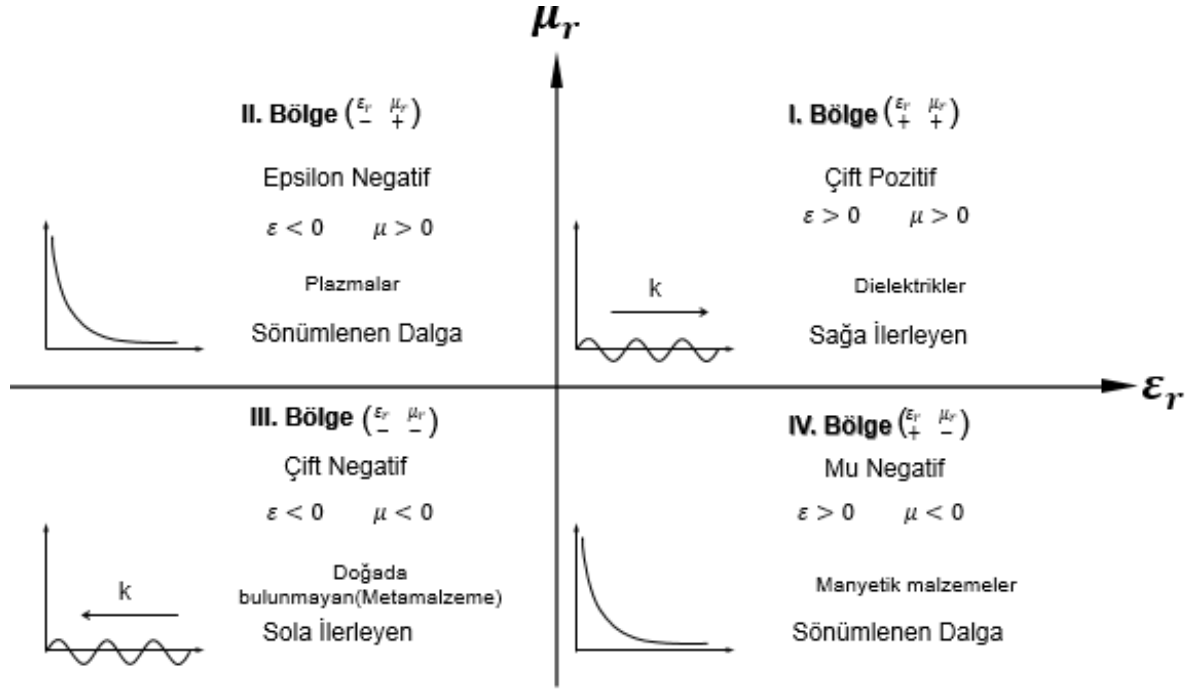


Şekil 5. Malzeme ortamında elektromanyetik dalga yayılımının sağ el kuralı ile gösterilmesi

Buradaki elektromanyetik dalga dispersiyon ilişkisini veren denklemlerden hareketle malzeme ortamında elektromanyetik dalga yayılımı Şekil 4 ve Şekil 5’te gösterildiği üzere sağ el kuralına uygun hareket etmektedir.

Metamalzeme Ortamında Elektromanyetik Dalga Yayılımı

Malzeme ortamında dalga yayılımının aksine metamalzeme ortamında elektromanyetik dalga yayılımı $\epsilon_r < 0$ ve $\mu_r < 0$ olması sebebiyle malzeme ortamında olduğundan farklıdır.



Şekil 6. Malzemelerin sınıflandırılması

Şekil 6’da ϵ_r ve μ_r işaretlerine göre malzemeler bölgesel olarak sınıflandırılmıştır. I. Bölge ϵ_r ve μ_r pozitif olduğu Şekil 4 ve Şekil 5’te ifade edilen sağ el kuralına uygun hareket eden geleneksel malzemelerdir ve çift pozitif ortam olarak da adlandırılır. II. bölge ϵ_r ifadesinin negatif olmasından dolayı epsilon negatif olarak adlandırılır. III. bölgedeki malzeme tipi doğada bulunmayan fakat fiziksel olarak sentezlenebilen, ϵ_r ve μ_r ’nin negatif olduğu bölgedir. Bu bölgeye ϵ_r ve μ_r nin her ikisinde negatif olmasından dolayı çift negatif bölge denir ve sola doğru ilerleyen dalga yapısına sahiptir bu malzemelere bu yüzden sol elli malzeme olarak adlandırılır. IV. bölge ise μ_r negatif olduğu için Mu Negatif bölge olarak adlandırılır.

Metamalzeme ortamında elektromanyetik dalga yayılımını nasıl davrandığını anlamak için Düzlem dalga için Maxwell denklemleri denklem (11) ve denklem (12) ‘ de ifade edilmiştir.

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega \mu \vec{H} \quad (11)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega \epsilon \vec{E} \quad (12)$$

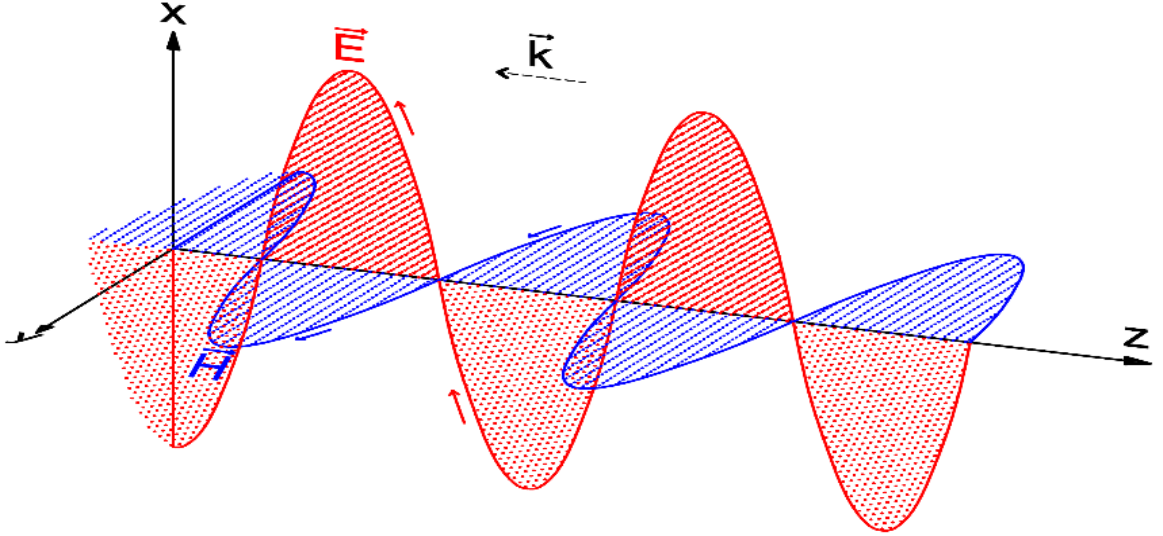
$\vec{E}$, $\vec{H}$ ve $\vec{k}$ üçlünün Şekil 4 ve Şekil 5’te olduğu gibi sağ el kuralına uygun hareket ettiğini görürüz.

Maxwell denklemlerini ϵ_r ve μ_r ’nin negatif olduğu Çift Negatif bölge için tekrar yazarsak

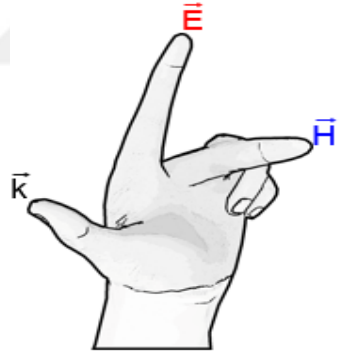
$$\vec{k} \times \vec{E} = -\omega|\mu|\vec{H} \quad (13)$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = \omega|\varepsilon|\vec{E} \quad (14)$$

$\vec{E}$, $\vec{H}$ ve $-\vec{k}$ üçlüsünün Şekil 7 ve Şekil 8’de olduğu gibi sol eli hareket yaptığı görülmektedir.



Şekil 7. Metamalzeme ortamında elektromanyetik dalga yayılımı



Şekil 8. Metamalzeme ortamında elektromanyetik dalga yayılımının sol el kuralı ile gösterilmesi

Şekil 7’de $\vec{E}$ ifadesi kırmızı renk ile $\vec{H}$ ise mavi renk ile gösterilmiştir. Şekil 4’ün aksine burada dalga sağa doğru değil sola doğru ilerlemektedir. Şekil 8’de $\vec{E}$, $\vec{H}$ ve $-\vec{k}$ üçlüsünün metamalzeme ortamında nasıl yayıldığı sol el ile gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 7 ve Şekil 8 III. Bölgede tanımlanan malzemenin neden sol elli malzeme olarak adlandırıldığını açıklamaktadır.

Negatif Kırılma İndisi

Kırılma indisi dispersif olmayan ortamlar için denklem (10)’da ifade edilmiştir denklem (15)’de ise dispersif bir ortamın kırılma indisi denklemi verilmiştir.

$$n(\omega) = \sqrt{\mu_r(\omega)\varepsilon_r(\omega)} \quad (15)$$

Denklem (15)'de verilen $\varepsilon_r(\omega)$ ve $\mu_r(\omega)$ ifadeleri sırasıyla belirli frekans bölgelerinde negatif olan frekansa bağlı elektriksel geçirgenlik ve frekansa bağlı manyetik geçirgenlik olup bu ifadelerin kutupsal gösterimi denklem (16) ve denklem (17)'de verilmiştir.

$$\varepsilon_r(\omega) = |\varepsilon_r(\omega)| \cdot e^{j\pi} \quad (16)$$

$$\mu_r(\omega) = |\mu_r(\omega)| \cdot e^{j\pi} \quad (17)$$

Denklem (16) ve denklem(17)'yi denklem (15)' de uygun yerlere yazarsak;

$$n(\omega) = \sqrt{\varepsilon_r(\omega)e^{j\pi}\mu_r(\omega)e^{j\pi}} \quad (18)$$

$$n(\omega) = e^{j\pi}\sqrt{|\varepsilon_r(\omega)\mu_r(\omega)|} \quad (19)$$

$$n(\omega) = -\sqrt{|\varepsilon_r(\omega)\mu_r(\omega)|} \quad (20)$$

elde edilir.

Denklem (20)'de bulunan $-$ işareti Şekil 7 ve Şekil 8'deki sol el ile dalga yayılımını temsil etmektedir.

Polarizasyon

Polarizasyonun elektromanyetik dalganın en önemli parametrelerinden biridir ve elektrik alanının yönelimini ve değişimini tanımlar ve polarizasyon türlerini açıklarken kullanılan grafiklerde görülebileceği gibi $\vec{E}$ ifadesi salınırken yani z yönünde yayılırken karşıdan bakan gözlemciye göre oluşan şekildir(Özbay and Özkazanç 2018). Ayrıca belirli bir noktada zamanın fonksiyonu olarak düzlemde yayılma yönüne dik olan $\vec{E}$ ve $\vec{H}$ 'ın izlediği yol olarak da tanımlanabilir (Sadiku 2014). Bir elektromanyetik dalganın polarizasyonu antene veya kaynağa bağlıdır. Lineer, eliptik ve dairesel olmak üzere üç tip polarizasyon vardır. $\vec{E}$ ve $\vec{H}$ izlediği yol yani daha önce bahsedilen gözlemciye göre oluşan şekil lineer polarizasyonda düz çizgilerle, eliptik polarizasyonda elips şeklinde, dairesel polarizasyonda ise daire şeklindedir. Ayrıca dairesel polarizasyonda kendi içinde sağ elli ve sol elli olmak üzere ikiye ayrılır. Polarizasyon tiplerinin özelliklerini göstermek için elektromanyetik dalga yayılımını modelleyen $\vec{E}$ 'nin zaman uzayı ifadesi denklem (21) ve denklem(22)'de verilmiştir.

$$E_x(t) = E_1 \cos(\omega t - \beta z) \quad (21)$$

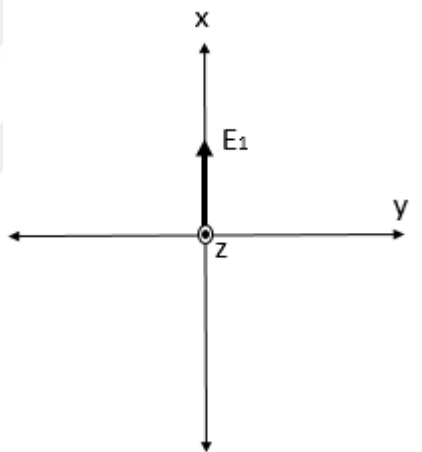
$$E_y(t) = E_2 \cos(\omega t - \beta z + \delta) \quad (22)$$

$$\delta = \varphi_x - \varphi_y \quad (23)$$

Denklem (21) ve (22) yayılma yönü z olan x ve y bileşenlerine sahip elektrik alan bileşenlerini ifade eder. Burada E_1 x yönünde lineer olarak polarize olmuş olan dalganın genliğidir. E_2 y yönünde lineer olarak polarize olmuş olan dalganın genliği, denklem (23)'de bulunan δ ise E_x ve E_y nin faz farkını ifade eder (Kraus and Carver 1973; Popovic and Popovic 1999).

Lineer Polarizasyon

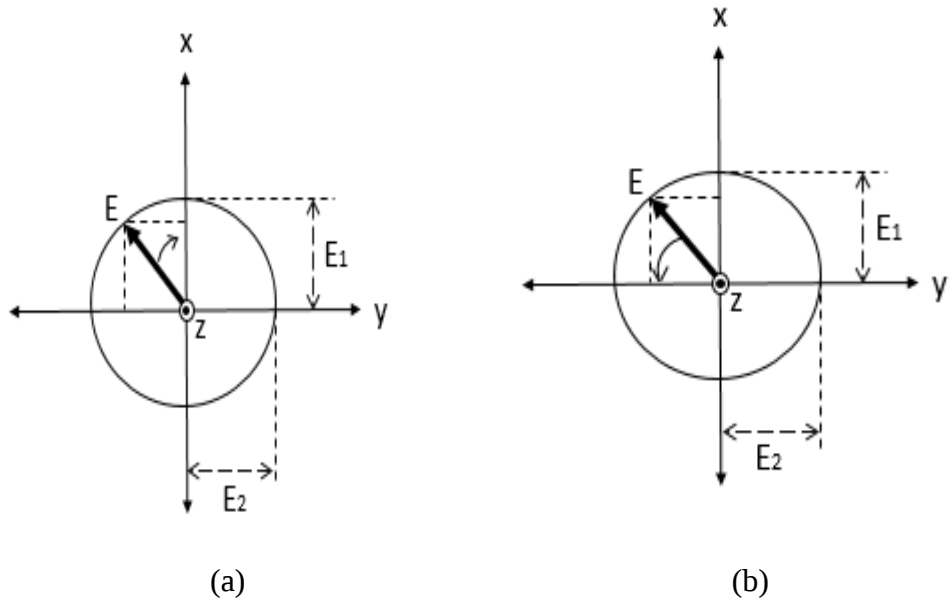
Şekil 9'da gösterildiği gibi lineer Polarizasyon $m=0,1,2,3\dots$ olmak üzere $\delta = \pm m\pi$ durumunda gerçekleşir, $E_2 = 0$ durumunda x yönünde lineer polarizasyon, $E_1 = 0$ durumunda ise y yönünde lineer polarizasyon oluşur (Kraus and Carver 1973).



Şekil 9. Lineer Polarizasyonu (Popovic and Popovic 1999)

Dairesel Polarizasyon

Dairesel polarizasyon sağ elli ve sol elli olmak üzere 2 çeşit olup $E_1 = E_2$ ve $m=1,3,5,7\dots$ olmak üzere $\delta = \pm m\frac{\pi}{2}$ durumlarında geçerlidir. Dairesel polarizasyonun sağ elli dairesel polarizasyon ve sol elli dairesel polarizasyon olmak üzere iki çeşidi vardır. Sağ ve sol elli olması δ parametresi ile ilgilidir $\delta = +m\frac{\pi}{2}$ durumunda sol elli dairesel polarizasyon olup $\vec{E}$ saat yönünde, $\delta = -m\frac{\pi}{2}$ durumunda ise sağ elli dairesel polarizasyon olup $\vec{E}$ ifadesinin saat yönünün tersi yönde oluşur. Her iki çeşit dairesel polarizasyon Şekil 10 a) ve Şekil 10 b)'de gösterilmiştir (Kraus and Carver 1973).

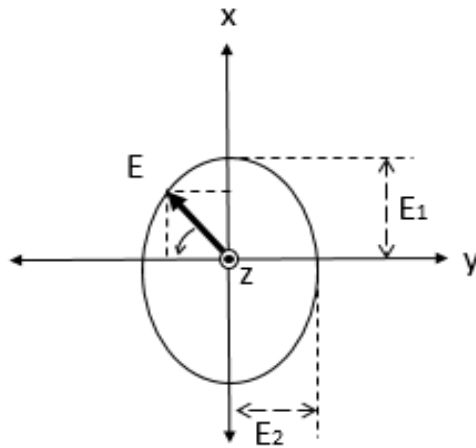


Şekil 10. a) Sol elli dairesel polarizasyon b) Sağ elli dairesel polarizasyon

Şekil 10 a)'da sol elli dairesel polarizasyon Şekil 10 b)'de sağ elli dairesel polarizasyon gösterilmiştir (Popovic and Popovic 1999).

Eliptik Polarizasyon

Eliptik polarizasyon $E_1 \neq E_2$ ve m tek tamsayıları ifade etmek üzere $m=1,3,5,7..$ olmak üzere $\delta = \pm m \frac{\pi}{2}$ durumlarında meydana gelir. Eliptik polarizasyonda Sağ elli ve sol elli şeklinde δ açısına bağlı olarak oluşabilir. Eliptik polarizasyon Şekil 11'de gösterilmiştir (Kraus and Carver 1973; Sadiku 2014)

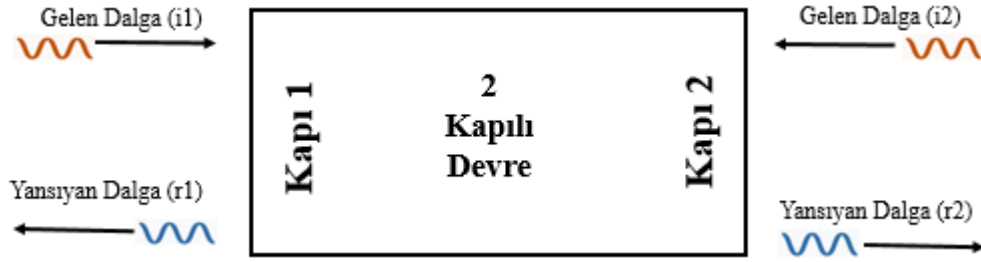


Şekil 11. Eliptik Polarizasyon (Popovic and Popovic 1999)

MATERYAL ve YÖNTEM

Saçılma Parametreleri

Saçılma parametreleri (S-Parametreleri) mikrodalga devrelerin analizinde kullanılır ve devre portlarındaki gelen ve yansıyan dalgaların arasında bir bağlantı kurar.(Sevgi 1999)



Şekil 12. İki kapılı devre modeli

Şekil 12’de iki Kapılı bir devrenin kapılarındaki gelen ve yansıyan dalgalar gösterilmiştir. Burada i1 ve i2 sırasıyla kapı 1 ve kapı 2 ye gelen dalgaları r1 ve r2 ise kapı 1 ve kapı 2 den yansıyan dalgaları temsil eder ve i1, i2, r1, r2 arasındaki oranlar kullanılarak saçılma matrisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} r1 \\ r2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i1 \\ i2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$r1 = S_{11} \cdot i1 + S_{12} \cdot i2 \quad (25)$$

$$r2 = S_{21} \cdot i1 + S_{22} \cdot i2 \quad (26)$$

Denklem (25) ve Denklem (26)’yı açarsak

$$S_{11} = \left. \frac{r1}{i1} \right|_{i2=0} \quad (27a)$$

$$S_{21} = \left. \frac{r2}{i1} \right|_{i2=0} \quad (27b)$$

$$S_{12} = \left. \frac{r1}{i2} \right|_{i1=0} \quad (27c)$$

$$S_{22} = \left. \frac{r2}{i2} \right|_{i1=0} \quad (27d)$$

elde edilir.

Denklem (27(a))’da verilen S_{11} ifadesi kapı 1’den yansıyan dalgaları, Denklem (27(b))’de verilen S_{21} ifadesi kapı 1’den kapı 2’ye iletilen dalgaları, Denklem (27(c))’de verilen S_{12} ifadesi kapı 2’den kapı 1’e iletilen dalgaları, Denklem (27(d))’de verilen S_{22} ifadesi kapı 2’den yansıyan dalgaları temsil eder.

Stoke’s Parametreleri

1852 yılında George Gabriel Stokes ışığın polarizasyon durumlarının dört yoğunluk parametresiyle karakterize edilebileceğini gösterdi. Polarize olan ışın demetinin bir genlikle tanımlanması ve doğrudan ölçülememesi gibi sorunlarla başa çıkmak için Stoke’s parametreleri bir ışın demetinin polarizasyon davranışları tanımlamada sıklıkla kullanılır. Stoke’s parametreleri sadece polarize olmuş ışığı değil aynı zamanda polarize olmamış ve kısmen polarize olmuş ışığı da tanımlar (Schaefer *et al.* 2007). Işığın elektromanyetik dalga özelliği ile tanımlanabildiği ve bundan dolayı $\vec{E}$ ve $\vec{H}$ den oluşmasında dolayı Stoke’s parametreleri elektromanyetik dalga yayılımında polarizasyon durumlarını incelemeye kullanılabilir (Özbay and Özkazanç 2018). Bu bölümde Stoke’s parametreleri $\vec{E}$ ifadelerinden başlanarak polarizasyon bilgilerini içeren polarizasyon elipsi olarak adlandırılan elips denklemi çıkarılacak ve bu denklem gerekli matematiksel işlemler yapılarak Stoke’s parametrelerine ulaşılabacaktır.

$$E_x(t) = E_1 \cos(\omega t) \quad (28)$$

$$E_y(t) = E_2 \cos(\omega t - \varphi) \quad (29)$$

Denklem (28) ve denklem (29)’da verilmiş olan elektrik alan ifadelerinde $\beta z=0$ ve φ faz sabiti ifadesi olmak üzere

$$\frac{E_x(t)}{E_1(t)} = \cos \omega t \quad (30)$$

$$\frac{E_y(t)}{E_2} = \cos(\omega t - \varphi) \quad (31)$$

elde edilir.

$\cos(A - B) = \cos A \cos B + \sin A \sin B$ eşitliği denklem (31)’e uygulanırsa

$$\frac{E_y(t)}{E_2} = \cos(\omega t - \varphi) = \cos \omega t \cos \varphi + \sin \omega t \sin \varphi \quad (32)$$

$$\frac{E_y(t)}{E_2} = \frac{E_x(t)}{E_1} \cos \varphi + \sqrt{1 - \cos^2 \omega t} \sin \varphi \quad (33)$$

$$\frac{E_y(t)}{E_2} = \frac{E_x(t)}{E_1} \cos \varphi + \sqrt{1 - \cos^2 \omega t} \sin \varphi \quad (34)$$

$$\frac{E_y(t)}{E_2} = \frac{E_x(t)}{E_1} \cos \varphi + \sqrt{1 - \frac{E_x^2}{E_1^2}} \sin \varphi \quad (35)$$

$$\frac{E_y(t)}{E_2} - \frac{E_x(t)}{E_1} \cos \varphi = \sqrt{1 - \frac{E_x^2}{E_1^2}} \sin \varphi \quad (36)$$

elde edilir.

Denklem (36)'nın karesi alınır ve gerekli işlemler yapılırsa denklem (37) aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\left(\frac{E_y(t)}{E_2} - \frac{E_x(t)}{E_1} \cos \varphi \right)^2 = \left(1 - \frac{E_x(t)^2}{E_1^2} \right) \sin^2 \varphi \quad (37)$$

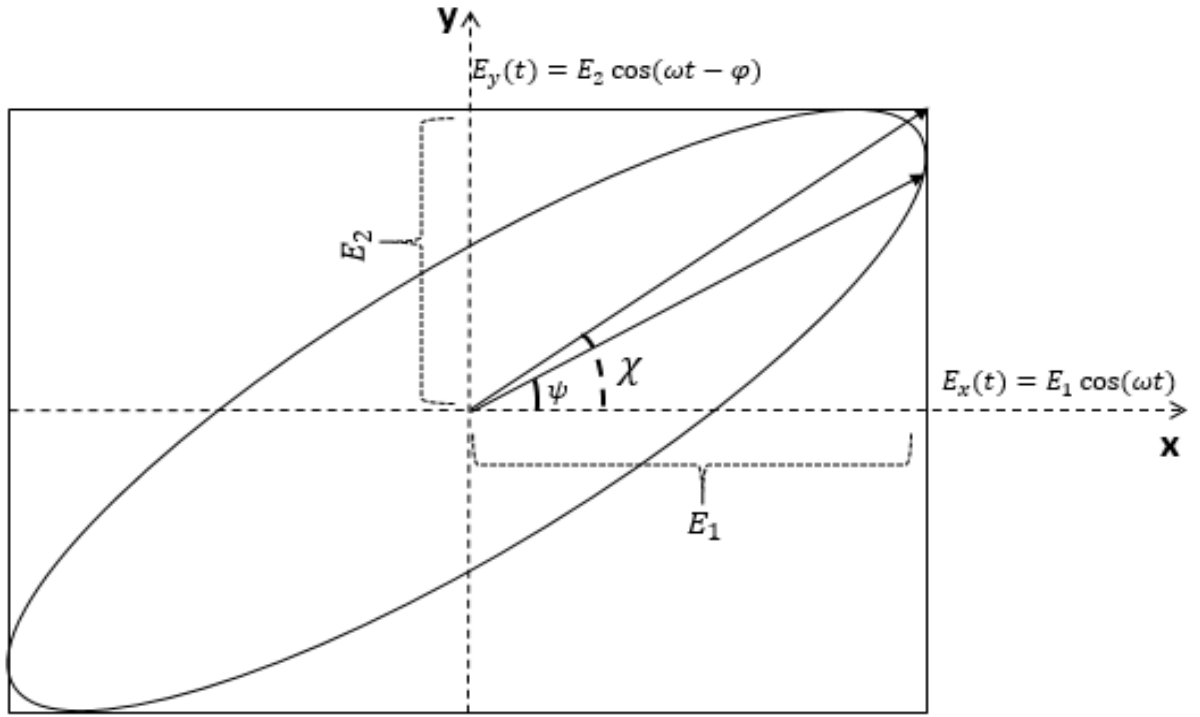
$$\frac{E_y(t)^2}{E_2^2} + \frac{E_x(t)^2}{E_1^2} \cos^2 \varphi - 2 \frac{E_y(t)}{E_2} \frac{E_x(t)}{E_1} \cos \varphi = \sin^2 \varphi - \frac{E_x(t)^2}{E_1^2} \sin^2 \varphi \quad (38)$$

$$\left(\frac{E_y(t)}{E_2} \right)^2 - 2 \left(\frac{E_x(t)}{E_1} \frac{E_y(t)}{E_2} \right) \cos \varphi + \left(\frac{E_x(t)}{E_1} \right)^2 = \sin^2 \varphi \quad (39)$$

$\sin^2 x + \cos^2 x = 1$ eşitliği göz önüne alarak gerekli düzenlemeler yapılırsa denklem (39) elde edilir. Denklem (39) polarizasyon elipsi olarak da bilinir ve matematiksel olarak bir elipsi ifade eder. Şekil 13'te bu denklemin ifade ettiği grafik verilmiştir. Polarizasyon durumları tanımlamasında kullanılan bu grafikte Şekil 13'te görüleceği üzere iki açı değeri vardır. Bunlar ($\chi, -45 \leq \chi \leq 45^\circ$) ve ($\psi, 0 \leq \psi \leq 90^\circ$) açı değerleridir sırasıyla χ ise eliptiklik derecesini, ψ açısı yönelme açısı gösterir ve aşağıdaki gibi ifade edilir (Özbay and Özkazanç 2018; Marti 2019).

$$\tan 2\psi = \frac{2E_1 E_2}{E_1^2 - E_2^2} \cos \varphi \quad (40)$$

$$\sin 2\chi = \frac{2E_1 E_2}{E_1^2 + E_2^2} \sin \varphi \quad (41)$$



Şekil 13. Polarizasyon elipsi

Denklem (39) polarizasyon bilgilerini içerir ancak dolaylı olarak zamana bağlı ifadeler barındırdığı için ölçülemez ve gözlemlenemez. Denklem (39) zaman ortalama ifadesi cinsinden tekrar düzenleyip zamana bağlı ifadeleri $\langle \dots \rangle$ işareti ile gösterilirse denklem (42) elde edilir. Denklem (42)'yi ölçülebilir ve gözlemlenebilir hale getirmek için elektromanyetik dalga yayılım ifadesinin bir periyodundaki ortalama zamanı ifade eden denklem (43) kullanılır (Collett 1968).

$$\left(\frac{\langle E_y(t) \rangle}{E_2} \right)^2 - 2 \left(\frac{\langle E_x(t) \rangle}{E_1} \frac{\langle E_y(t) \rangle}{E_2} \right) \cos \varphi + \left(\frac{\langle E_x(t) \rangle}{E_1} \right)^2 = \sin^2 \varphi \quad (42)$$

$$\langle E_i(t) \rangle \langle E_j(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T E_i(t) E_j(t) \quad i, j = x, y. \quad (43)$$

Denklem (43)'da bulunan T ifadesi toplam ortalama zaman ifadesi olmak üzere denklem (42)'yi $4E_1^2 E_2^2$ ifadesi ile çarparsak denklem (44) aşağıdaki gibi elde edilir.

$$4E_2^2 \langle E_x(t)^2 \rangle + 4E_1^2 \langle E_y(t)^2 \rangle - 8E_1 E_2 \langle E_x(t) E_y(t) \rangle \cos \varphi = (2E_1 E_2 \sin \varphi)^2 \quad (44)$$

Denklem (44)'deki zaman ortalama ifadeleri denklem (43)'den yola çıkarak aşağıdaki gibi bulunur.

$$\langle E_x(t)^2 \rangle = \frac{1}{2} E_1^2 \quad (45)$$

$$\langle E_y(t)^2 \rangle = \frac{1}{2} E_2^2 \quad (46)$$

$$\langle E_x(t)E_y(t) \rangle = \frac{1}{2} E_1 E_2 \cos \varphi \quad (47)$$

Denklemler (45) (46) ve (47) 'yi denklem (44)'te yerlerine yazılarak denklem (48) aşağıdaki gibi elde edilir.

$$(2E_1^2 E_2^2) + (2E_1^2 E_2^2) - (2E_1 E_2 \cos \varphi)^2 = (2E_1 E_2 \sin \varphi)^2 \quad (48)$$

Denklem (48)'de $(a \pm b)^2$ özdeşliklerine benzetmek için $E_1^4 + E_2^4$ ifadesi $(2E_1^2 E_2^2) + (2E_1^2 E_2^2)$ kısımlarına eklenip çıkartılırsa

$$E_1^4 + 2E_1^2 E_2^2 + E_2^4 = (E_1^2 + E_2^2)^2 \quad (49)$$

$$-E_1^4 + 2E_1^2 E_2^2 - E_2^4 = -(E_1^2 - E_2^2)^2 \quad (50)$$

denklem (49) ve denklem (50) $(a \pm b)^2 = a^2 \pm 2ab + b^2$ özdeşlikleri şeklinde elde edilir.

Denklem (49) ve denklem (50) 'yi denklem (48)'de yerine yazılırsa;

$$(E_1^2 + E_2^2)^2 - (E_1^2 - E_2^2)^2 - (2E_1 E_2 \cos \varphi)^2 = (2E_1 E_2 \sin \varphi)^2 \quad (51)$$

Denklem (51) elde edilir (Collett 1968). Denklem (51) Stoke's parametrelerinin elde edileceği son adımdır. Bu denklemde yer alan ifadeler sınıflandırılırsa

$$S_0 = E_1^2 + E_2^2 \quad (52)$$

$$S_1 = E_1^2 - E_2^2 \quad (53)$$

$$S_2 = 2E_1 E_2 \cos \varphi \quad (54)$$

$$S_3 = 2E_1 E_2 \sin \varphi \quad (55)$$

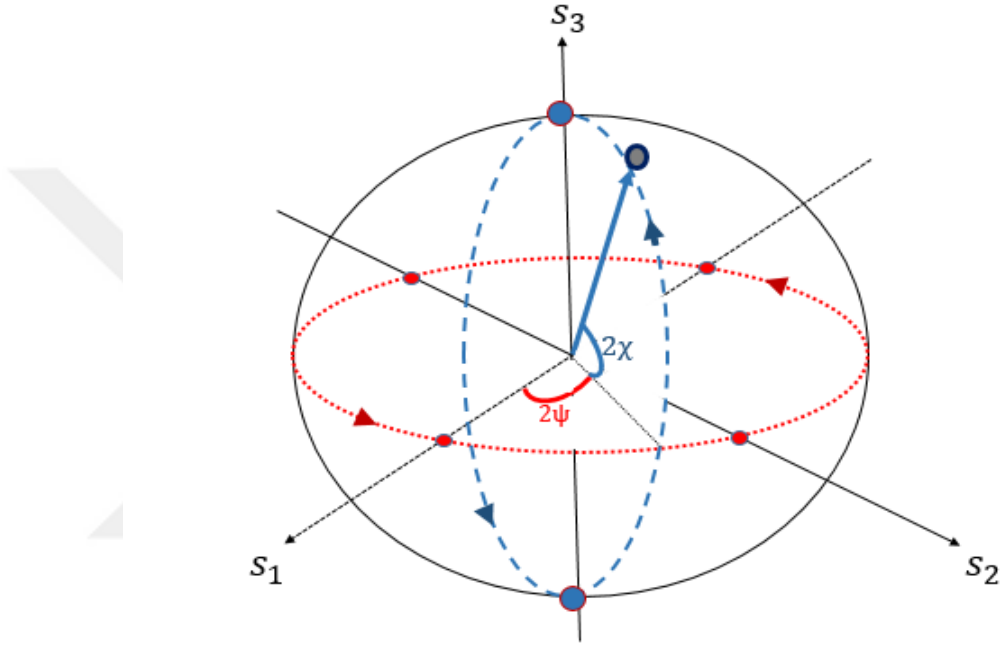
olarak elde edilir.

Denklemler (52),(53),(54) ve (55) Stoke's parametreleridir.

Denklem (51)'de Stoke's parametreleri uygun yerlere yerleştirilirse denklem (56) aşağıdaki gibi

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (56)$$

elde edilir. Birinci Stoke's parametresi olan S_0 toplam yayılma alanının yoğunluğunu, S_1 Lineer yatay polarizasyon ve lineer dikey polarizasyon baskınlığını, S_2 lineer $+45^\circ$ polarizasyonu ve lineer -45° baskınlığını, S_3 ise sağ ve sol eli dairesel polarizasyonu ifade eder (Schaefer *et al.* 2007).



Şekil 14. Poincare küresi

Şekil 14'te gösterilen küre poincare küresi olarak adlandırılır. Şekil 13 'te bulunan Polarizasyon elipsini küreye yerleştirilmiş denklem (40) ve denklem (41) 'de bahsi geçen χ ve ψ açıları görselleştirilmiş ve Stoke's parametrelerinin konumları gösterilmiştir.

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1^2 + E_2^2 \\ E_1^2 - E_2^2 \\ 2E_1E_2 \cos \varphi \\ 2E_1E_2 \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (57)$$

Stoke's parametrelerinin matris formu olarak denklem (57)' de ifade edilmiştir.

$$S_{LYP} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (58a)$$

$$S_{LDP} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (58b)$$

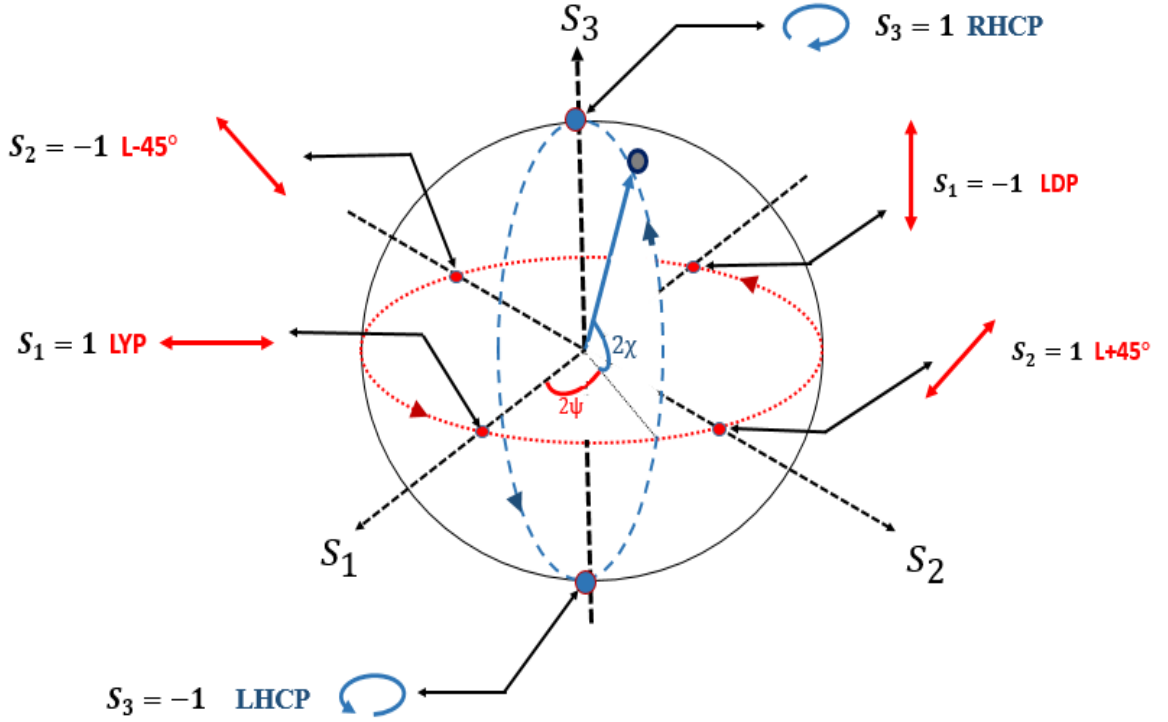
$$S_{L+45} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (58c)$$

$$S_{L-45^\circ} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (58d)$$

$$S_{RHCP} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (58e)$$

$$S_{LHCP} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \quad (58f)$$

Denklem 58’de elektromanyetik dalganın polarizasyon durumları denklem (57)’de ifade edilen S_0 , S_1 , S_2 ve S_3 Stoke’s parametreleri cinsinden polarizasyon türlerine göre matris olarak ifade edilmiştir. Denklem (58(a))’da lineer yatay polarizasyonu (LYP), Denklem (58(b)) lineer dikey polarizasyonu (LDP), Denklem (58(c)) lineer +45° polarizasyonu (L+45), Denklem (58(d)) lineer -45° polarizasyonu (L-45), Denklem (58(e)) sağ elli dairesel polarizasyonu (RHCP), Denklem (58(f)) sol elli dairesel polarizasyonu (LHCP)’u ifade etmektedir. Şekil 15’te denklem (58)’de verilmiş olan ve S_0, S_1, S_2 ve S_3 Stoke’s parametreleri vasıtasıyla hesaplanan polarizasyon türleri poincare küresi üzerinde gösterilmiştir (Papap 1988; Collett 2005; Schaefer *et al.* 2007).



Şekil 15. Poincare küresi üzerinde Stoke's parametrelerinin gösterilmesi

Eliptiklik Değeri

Eliptiklik değeri Stoke's parametrelerinden elde edilen ve elektromanyetik dalganın dairesel polarizasyonu hakkında bilgi veren parametredir. Denklem 58(e) ve denklem 58(f)'de matris formu verilen bu parametrenin hesaplanmasında Stoke's Parametrelerinden S_3 ve S_0 kullanılır. Şekil 15'te görüldüğü üzere χ eliptiklik açısıyla bağlantılı olduğu için eliptiklik değeri ismini almıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda kullanılan bu parametre elektromanyetik dalganın sağ elli veya sol elli dairesel polarizasyon olduğunu belirtir. Elde edilen grafikte +1 e ulaşan eğri sağ elli dairesel polarizasyonu -1 e ulaşan eğri ise sol elli dairesel polarizasyon anlamına gelir. Denklem (59)'da olduğu gibi ifade edilir (Khan *et al.* 2019)

$$Eliptiklik = \frac{S_3}{S_0} \quad (59)$$

Polarizasyon Dönüşüm Oranı

Polarizasyon dönüşüm oranı (PCR), LP-LP polarizasyon dönüşümünün verimlilik oranını ifade eder. LP-LP polarizasyon dönüşümü x veya y polarize olarak gelen dalganın y veya x polarize olarak yansıdığı yada iletiği polarizasyon dönüşümdür (Khan and Tahir 2018). PCR parametresi eş polarizasyon katsayısı (R_{xx}) ve çapraz polarizasyon katsayısı (R_{xy}) ile hesaplanır. R_{xx} gelen dalga ile yansıyan dalganın polarizasyon yönünün aynı olduğu R_{xy} ise

gelen dalga ile yansıyan dalganın polarizasyon yönünün farklı olduğu parametredir(Fu *et al.* 2019).

$$R = \begin{pmatrix} R_{xx} & R_{xy} \\ R_{yx} & R_{yy} \end{pmatrix} \quad (60)$$

$$R_{xx} = \frac{E_{rx}}{E_{ix}} \quad (61)$$

$$R_{xy} = \frac{E_{rx}}{E_{iy}} \quad (62)$$

$$R_{yx} = \frac{E_{ry}}{E_{ix}} \quad (63)$$

$$R_{yy} = \frac{E_{ry}}{E_{iy}} \quad (64)$$

Deklem (60)'da eş ve çapraz polarizasyon katsayılarını tanımlamak için yansıma matrisi verilmiştir. R_{xx} ve R_{yy} ifadeleri eş polarizasyon, R_{xy} ve R_{yx} ise çapraz polarizasyon katsayılarını ifade eder (Chen *et al.* 2017). Denklemler (61), (62), (63) ve (64)'de indis i gelen dalgayı r yansıyan dalgayı, x ve y polarizasyon yönünü temsil eder. Denklem (61) x polarizeli gelen dalganın x polarizeli yansıma katsayısını, denklem (62) y polarizeli gelen dalganın x polarizeli yansıma katsayısını, denklem (63) x polarizeli gelen dalganın y polarizeli yansıma katsayısını, denklem (64) y polarizeli gelen dalganın y polarizeli yansıma katsayısını ifade eder.

$$PCR = \frac{R_{xy}^2}{R_{xy}^2 + R_{yy}^2} = \frac{R_{yx}^2}{R_{yx}^2 + R_{xx}^2} \quad (65)$$

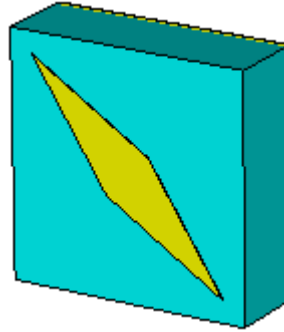
Eş ve çapraz polarizasyon katsayıları kullanılarak polarizasyon dönüşüm oranı verimliliğini ifade eden PCR değeri denklem (65)'de verilen formülle hesaplanır (Ahmed *et al.* 2021).

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

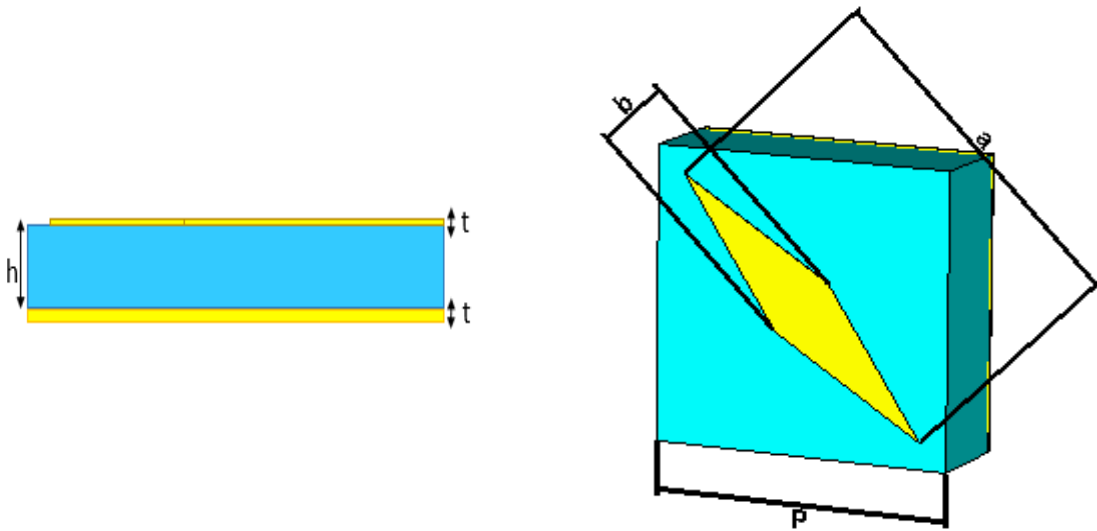
Bu bölümde tez kapsamında yapılan polarizasyon dönüştürücü uygulamalarının CST Benzetim programı ile yapılan benzetim sonuçları ve Matlab programı ile eliptiklik ve PCR değerleri, u-v eksenleri genlik ve faz değerleri hesaplanmış ve grafikleri sunulmuştur. CST benzetim programında sınır şartları olarak “Unitcell” ve “Frequency Domain Solver” kullanılmıştır. Doğruluğun yüksek tutlması için “Sperical Frequnecy Domain Solver Parameters” kısmında hassasiyet olarak $1e - 12$ seçilmiş ve “Solver Order” kısmı “High Accuracy” olarak seçilmiştir.

C, X, Ku ve K Bant Polarizasyon Dönüştürücü Uygulaması

Tez kapsamından yapılan polarizasyon dönüştürücü uygulamalarından biri C, X, Ku, K mikrodalga frekans bandında çalışan polarizasyon dönüştürücüdür. $5,8 \times 10^7$ iletkenlikli iki bakır tabaka arasına 2,65 dielektrik sabitine sahip alttaşı ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

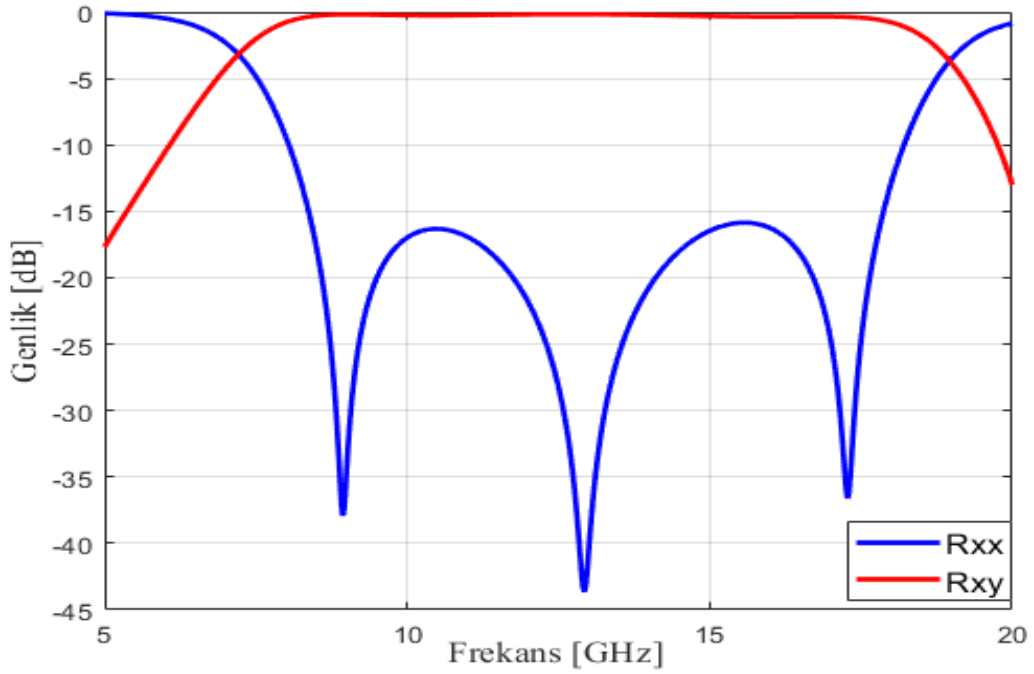


Şekil 16. Önerilen C, X, Ku, K bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü

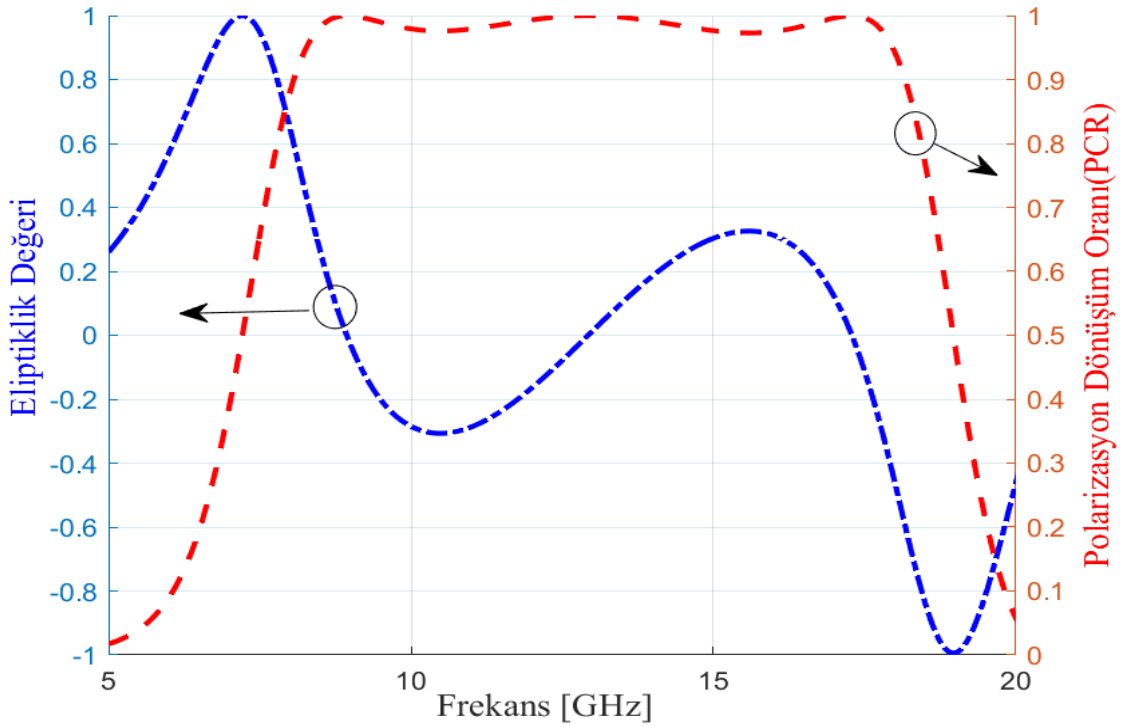


Şekil 17. C, X, Ku ve K bant polarizasyon dönüştürücü birim hücre ölçüleri

Şekil 16 ve Şekil 17’de önerilen polarizasyon dönüştürücünün yapısı ve ölçüleri $t=0,035\text{mm}$, $h=3,4\text{mm}$, $a=11,80\text{mm}$, $b=2,60\text{mm}$, $P=10,20\text{mm}$ olarak verilmiştir.



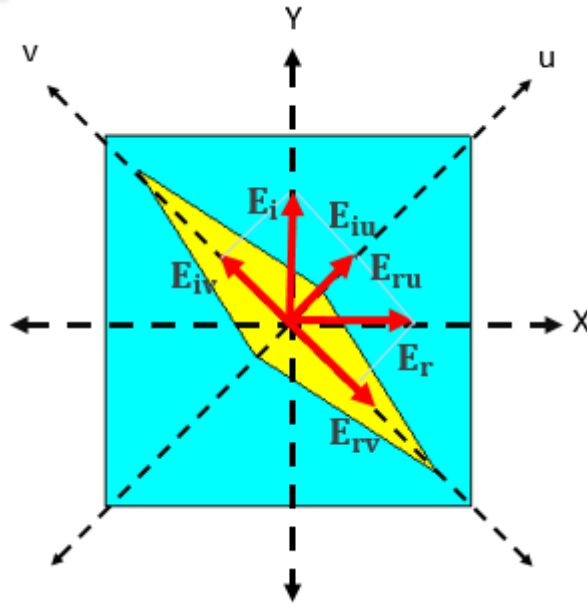
Şekil 18. C, X, Ku, K bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü R_{xx} ve R_{xy} grafikleri



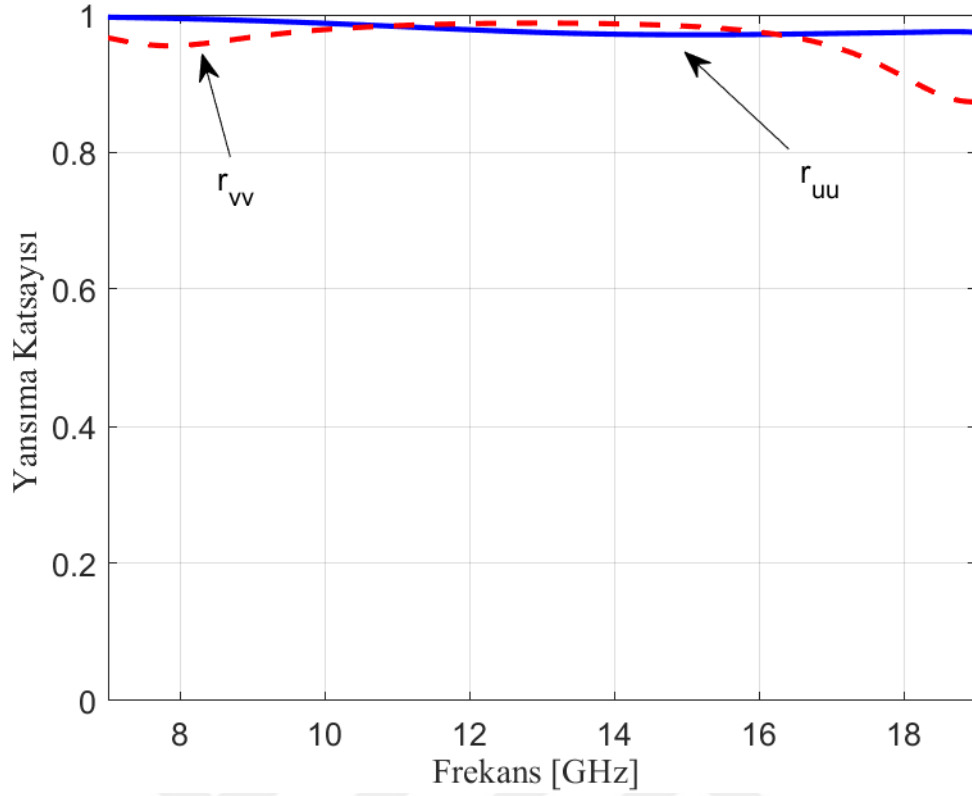
Şekil 19. C, X, Ku, K bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü eliptiklik ve PCR grafikleri

Şekil 18’de C, X, Ku, K bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü uygulamasının R_{xx} ve R_{xy} grafikleri verilmiştir, R_{xx} grafiğinde görüleceği üzere -37,92 dB, -43,64 dB, -36,62 dB değerlerinde sırasıyla 8,94 GHz, 12,94 GHz ve 17,28 GHz frekanslarında üç adet rezonans noktası görülmektedir. R_{xy} grafiğinde ise 8-18 GHz frekans aralığında ise -0,7716 dB olarak en düşük değerini almıştır. Şekil 18’de R_{xx} grafiğinde görülen 8,94 GHz, 12,94 GHz ve 17,28 GHz noktalarında %100 oranında LP-LP polarizasyon dönüşüm işlemi gerçekleşmiştir. R_{xx} grafiği üç rezonans noktasından başka bu noktalar arasındaki tepelerde en düşük değer olarak -15,86 dB değerini almıştır.

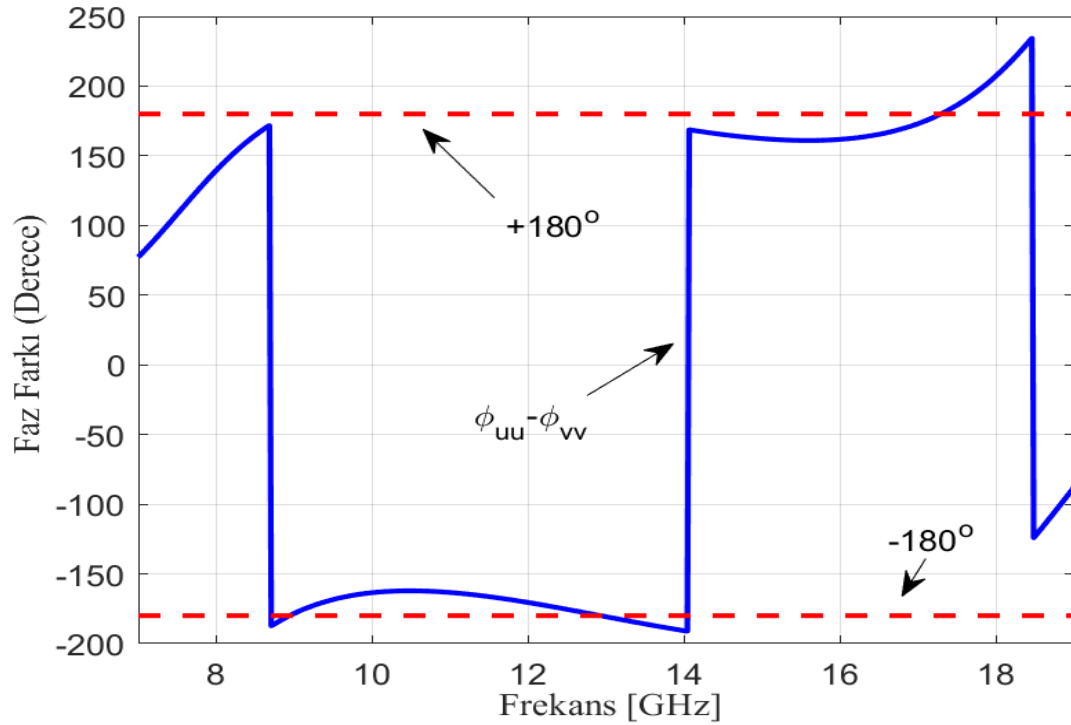
Şekil 19’da ise Şekil 18’de verilen R_{xx} ve R_{xy} grafiğindeki verilerden yola çıkarak hesaplanan C, X, Ku, K bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü uygulamasının eliptiklik değeri ve polarizasyon dönüşüm oranı grafikleri gösterilmiştir. Bu grafiğin sol y eksen eliptiklik değeri sağ y eksen ise polarizasyon dönüşüm oranını göstermektedir. Eliptiklik grafiğinden de görüleceği üzere 7,09-7,32 GHz bant aralığında LP-CP polarizasyonun bir türü olan RHCP polarizasyon dönüşümü 18,91-19,03 GHz bant aralığında ise LP-CP polarizasyonun bir türü olan LHCP polarizasyon dönüşüm işlemi gerçekleşmiştir. Polarizasyon dönüşüm oranı grafiği ise 8,4-17,83 GHz bant aralığında %97 oranında PCR verimliliği ile LP-LP polarizasyon dönüşüm işlemi sağlanmıştır.



Şekil 20. C, X, Ku, K bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü u-v eksenleri



Şekil 21. C, X, Ku, K bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü u-v eksenli genlikleri



Şekil 22. C, X, Ku, K bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü u-v eksenleri arasındaki faz farkı

C, X, Ku, K bandında çalışan polarizasyon dönüştürücünün çalışmasının daha iyi anlaşılması için Şekil 20’de görüldüğü gibi u-v eksenlerine ayrılmıştır. u ve v birim vektörleri

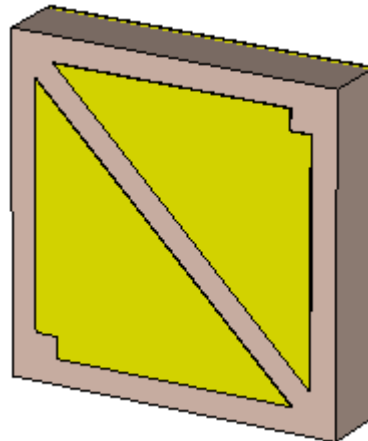
polarizasyon dönüşümü işleminin incelenmesi için kullanılacaktır. Şekil 21’de r_{uu} ve r_{vv} ifadeleri sırasıyla u ve v yönlerinde yansıyan dalgaların genliklerini Şekil 22’de $\varphi_{uu} - \varphi_{vv}$ ifadesi ise u ve v yansıyan dalgalar arasındaki faz farkını ifade etmektedir. Şekil 21’de görüleceği üzere r_{uu} ve r_{vv} ifadeleri neredeyse tam 1’e eşittir ve Şekil 22’de de LP-LP polarizasyon dönüşümünün yapıldığı frekans aralığında ise 180° ye yaklaşık olarak eşittir. Bu analiz LP-LP polarizasyon dönüşümü işleminin doğrulanması için kullanılır. Şekil 18’de verilen R_{xx} ve R_{xy} grafiklerinde üç adet rezonans frekansı noktasında y polarizasyonlu dalganın tamamen x polarizasyona dönüştüğü görülmektedir. Şekil 22’de faz grafiğinde; Şekil 18’de görülen rezonans frekansları olan 8,94 GHz, 12,94 GHz ve 17,28 GHz frekanslarında neredeyse tam 180° olduğunu görülmektedir. Sonuç olarak bu frekans noktalarında tamamen LP-LP polarizasyon dönüşümünün gerçekleştiğinin bir başka göstergesidir.

Tablo 1. X, C, K, Ku bant polarizasyon dönüştürücünün referans alınan diğer çalışmalarla karşılaştırılması

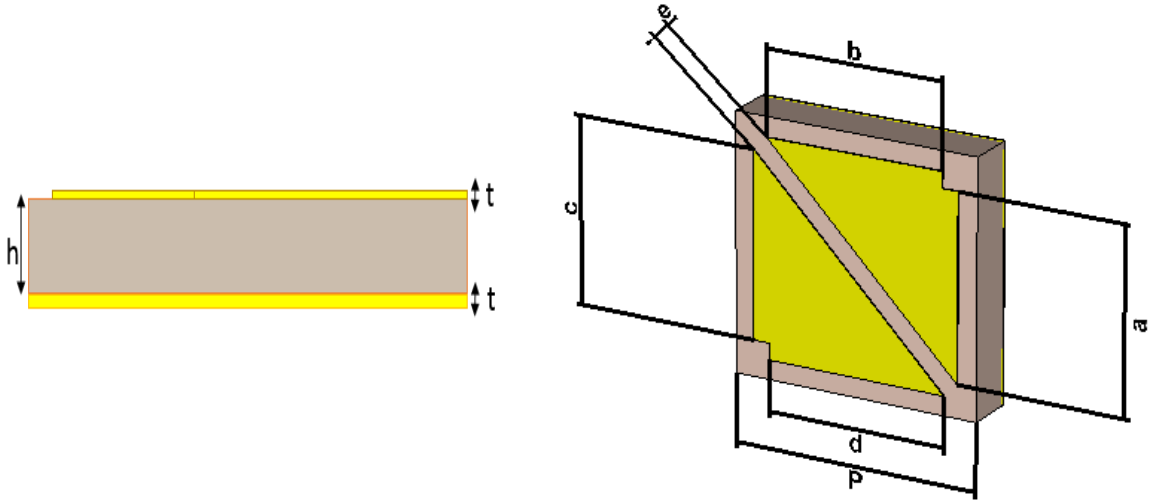
Referans	Bant Genişliği	%PCR
(Karamirad <i>et al.</i> 2021)	10,2-20,5 GHz	>%90
(Nguyen <i>et al.</i> 2021)	12-18 GHz	>%90
(Kamal <i>et al.</i> 2021)	8,6-22 GHz	>%90
(Deng <i>et al.</i> 2020)	9,8-18,9 GHz	>%85
(Xu <i>et al.</i> 2018)	6,67-17,1 GHz	>%90
Tez Kapsamında yapılan Çalışma	8,4-17,83 GHz	>%97

Tablo 1’de C, X, Ku, ve K bant polarizasyon dönüştürücü uygulamasının literatürdeki diğer çalışmalarla bant genişliği ve PCR parametreleri ile karşılaştırılması verilmiştir. Görüleceği üzere önerilen tasarım referans alınan diğer çalışmalara göre daha yüksek PCR oranı sağlamıştır.

X, Ku Bant Polarizasyon Dönüştürücü Uygulaması

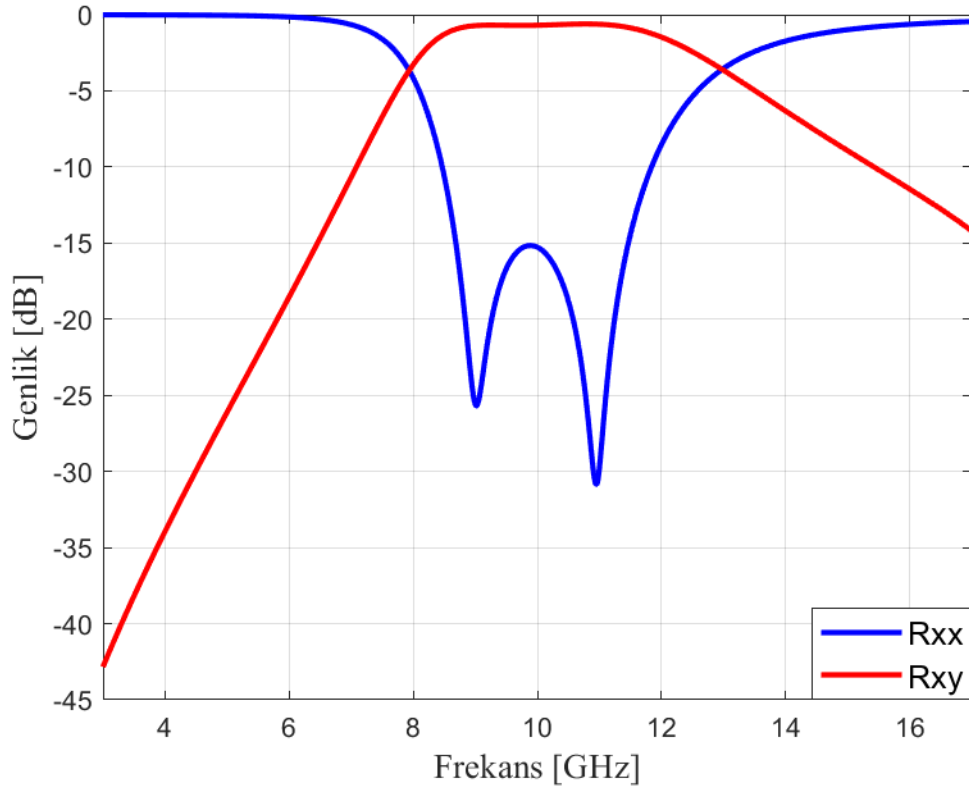


Şekil 23. Önerilen X, Ku bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü

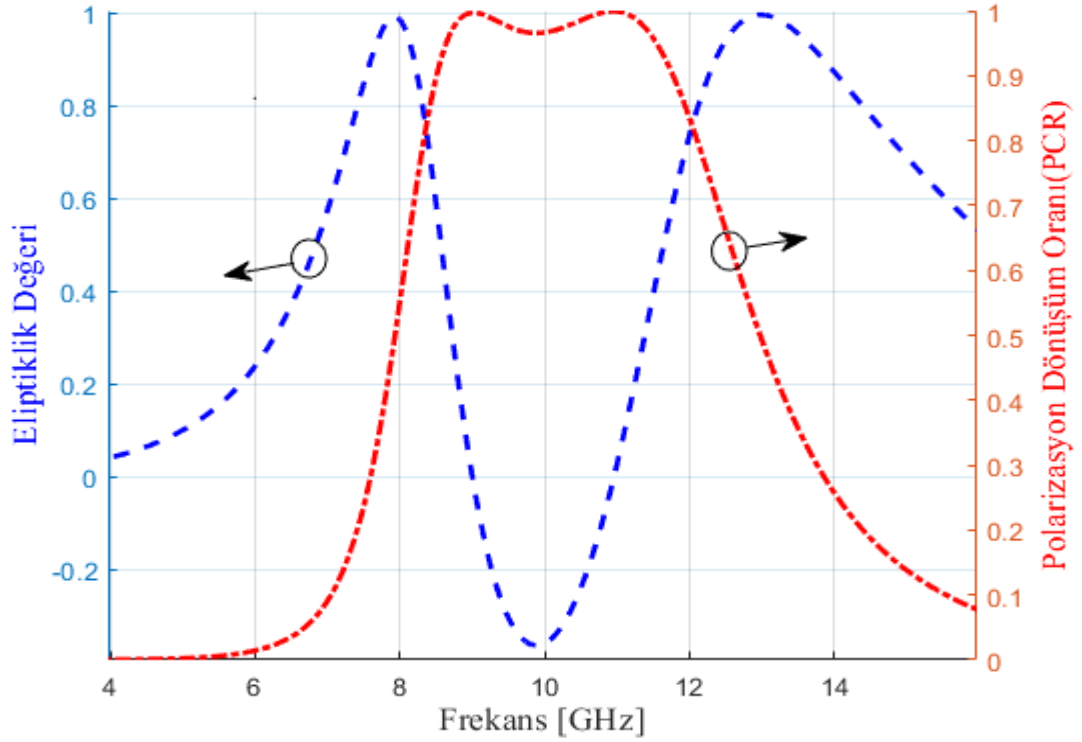


Şekil 24. X, Ku bant polarizasyon dönüştürücü birim hücre ölçüleri

Tez kapsamından yapılan polarizasyon dönüştürücü uygulamalarından bir diğeri X, Ku mikrodalga frekans bandında çalışan metamalzeme temelli polarizasyon dönüştürücüdür. $5,8 \times 10^7$ iletkenliğe sahip iki bakır tabaka arasına 4,3 dielektrik sabitine sahip FR-4 alttaşı kullanılmıştır. Şekil 23 ve Şekil 24'te önerilen polarizasyon dönüştürücünün yapısı ve ölçüleri $t=0,035\text{mm}$, $h=1,6\text{mm}$, $a=b=c=d=5,55\text{mm}$, $e=0,5\text{mm}$, $P=7,8\text{mm}$ olarak verilmiştir.



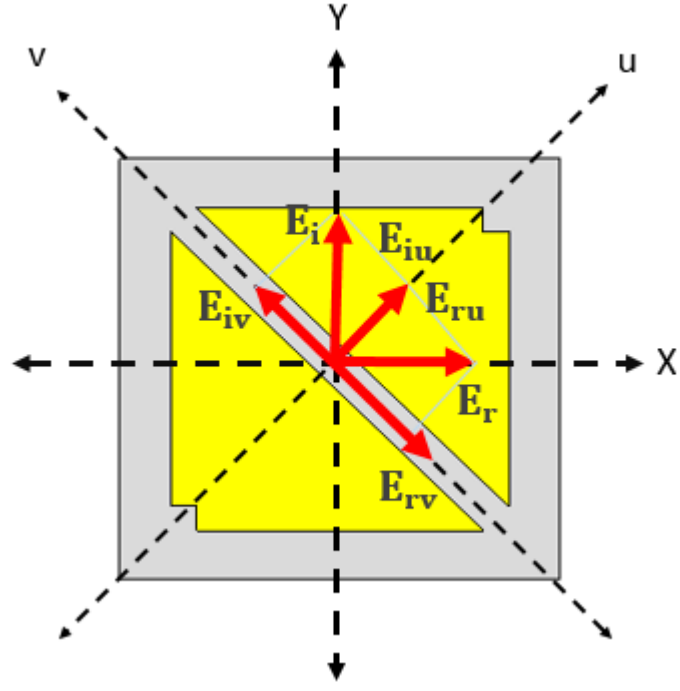
Şekil 25. X, Ku bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü R_{xx} ve R_{xy} grafikleri



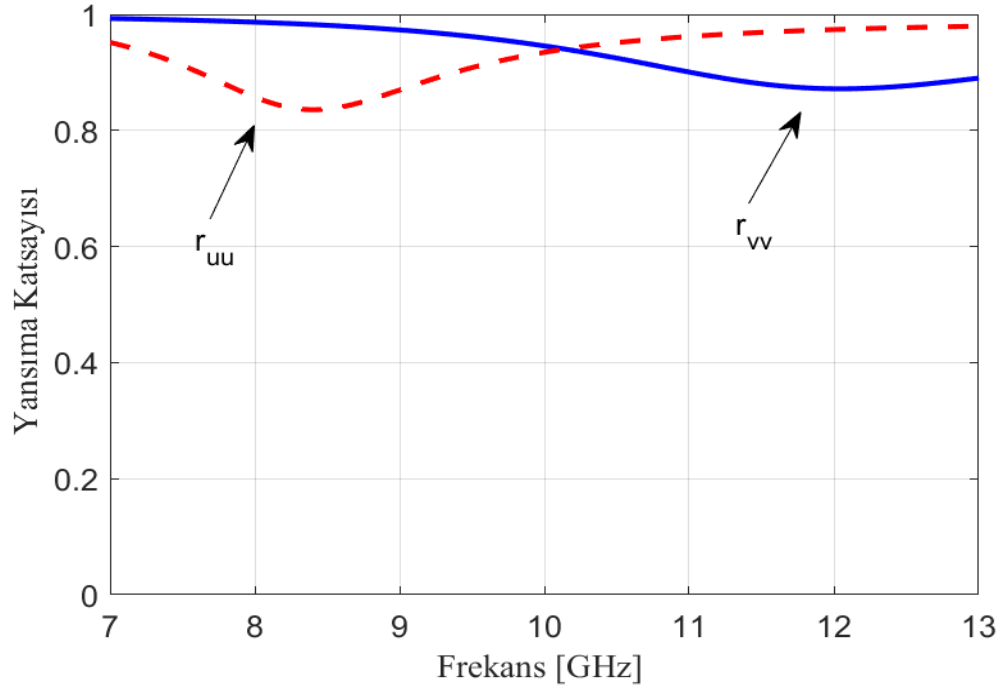
Şekil 26. X, Ku bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü eliptiklik ve PCR grafikleri

Şekil 25'te X, Ku bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü uygulamasının R_{xx} ve R_{xy} parametrelerinin grafikleri verilmiştir. R_{xx} grafiğinde görüleceği üzere -25.7 dB ve -30,84 dB'de sırasıyla 9,02 GHz ve 10,96 GHz iki adet rezonans noktası görülmektedir. R_{xy} grafiğinde 8,64-11,62 GHz frekans aralığında en düşük -1dB değeri görülmektedir. R_{xx} grafiğinde bulunan 9,02 GHz ve 10,96 GHz rezonans frekans noktalarında %100 oranında LP-LP polarizasyon dönüşüm işlemi gerçekleşmiştir. R_{xx} değeri en düşük değer olarak -15.16 dB değerini almıştır.

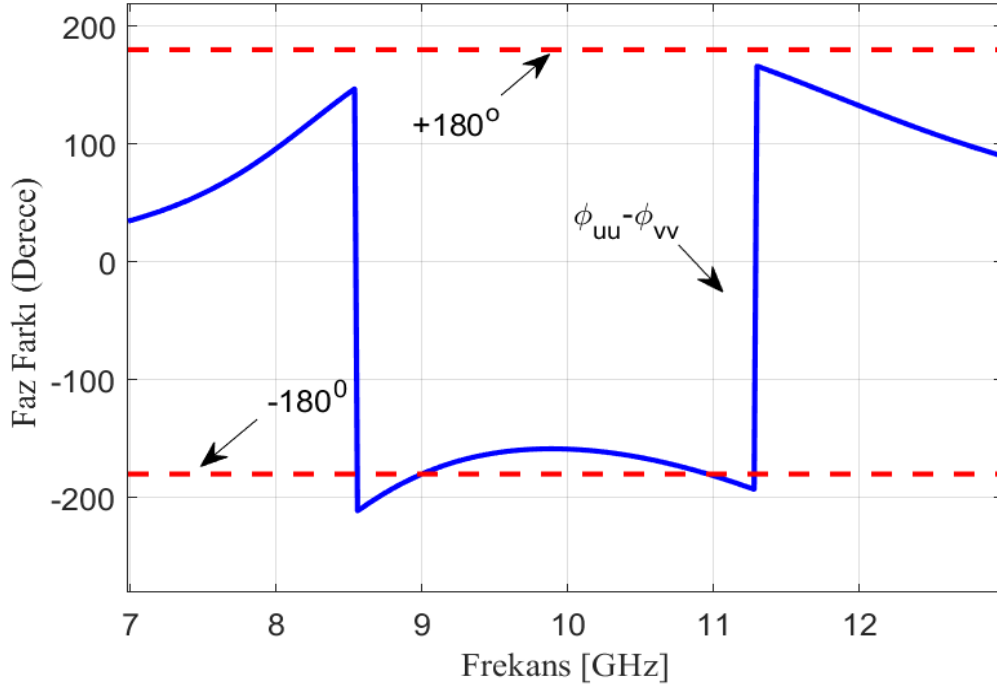
Şekil 26'da Şekil 25'te bulunan R_{xx} ve R_{xy} grafiklerindeki verilerden yola çıkarak hesaplanan eliptiklik ve PCR değerlerinin frekansa karşılık gelen grafikleri verilmiştir. Şekil 26'da eliptiklik değeri grafiği sol y ekseninde mavi renk ile gösterilmiş 7,9-7,96 GHz ve 12,84-13,16 GHz aralığında sırasıyla X ve Ku bantlarında LP-CP polarizasyonun bir türü olan RHCP polarizasyon dönüşümü işleminin sağlandığı görülmektedir. Şekil 26'da PCR grafiği sağ y eksenini kırmızı renk ile gösterilmiş ve 8,68-11,48 GHz aralığında % 96 üzeri PCR oranıyla LP-LP polarizasyon dönüşümü sağlamıştır.



Şekil 27. X, Ku bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü u-v eksenleri



Şekil 28. X, Ku bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü u-v eksenleri genlikleri



Şekil 29. X, Ku bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü u-v eksenleri arasındaki faz farkı

X, Ku bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü çalışmasının daha iyi anlaşılması için Şekil 27’de görüldüğü gibi u-v eksenlerine ayrılmıştır. u ve v birim vektörleri polarizasyon dönüşümü işleminin incelenmesi için kullanılacaktır. Şekil 28’de r_{uu} ve r_{vv} ifadeleri sırasıyla u ve v yönlerinde yansıyan dalgaların genliklerini Şekil 29’da $\phi_{uu} - \phi_{vv}$ ifadesi ise u ve v yönlerinde yansıyan dalgaların arasındaki faz farkını ifade etmektedir. Şekil 28’de görüleceği üzere r_{uu} ve r_{vv} ifadeleri yaklaşık 1 e eşittir ve Şekil 29’da de LP-LP polarizasyon dönüşümünün yapıldığı frekans aralığında ise 180° ye yaklaşık olarak eşittir. Bu analiz LP-LP polarizasyon dönüşümü işleminin doğrulaması için kullanılır. Şekil 25’te verilen R_{xx} ve R_{xy} grafiklerinde gördüğümüz iki adet rezonans frekansı noktasında y polarizasyonlu dalganın tamamen x polarizasyona dönüştüğü bilinmektedir. Şekil 29’da bulunan faz farkı grafiğinde ; Şekil 25’te görülen rezonans frekansları olan 9,02 GHz, 10,96 GHz frekanslarında faz farkının 180° olduğunu görülmektedir. Sonuç olarak bu frekans noktalarında tamamen LP-LP polarizasyon dönüşümünün gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca bu çalışmadaki LP-CP polarizasyon dönüşümünün gerçekleştiği nokta Şekil 26’da eliptiklik değeri ile gösterilmiştir. Şekil 29’da faz farkı grafiğine bakıldığında 7,9-7,96 GHz ve 12,84-13,16 GHz bantlarında yaklaşık 90° faz farkının olduğu görülmektedir. Bu 90° lik faz farkı LP-CP dönüşümü işleminin gerçekleştiğinin bir başka göstergesidir.

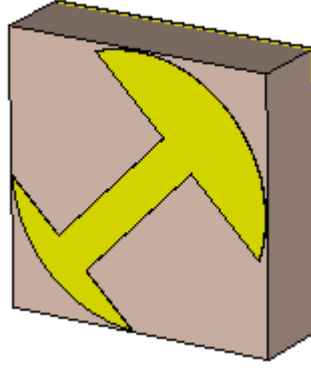
Tablo 2. X, Ku bant polarizasyon dönüştürücünün referans alınan diğer çalışmalarla karşılaştırılması

Referans	Çalışma Bandı	% PCR Değeri	LP-LPLP-CP özelliği	Kalınlık	Birim Hücre Genişliği	Katman Sayısı
(Nguyen <i>et al.</i> 2021)	8-12 GHz	>%90	LP-LP	1,6 mm (0.053λ)	6,92 mm	Tek
	7,42-7,6 GHz		LP-CP			
	13-13,56 GHz					
(Khan <i>et al.</i> 2019)	8-11 GHz	>%95	LP-LP	1,6 mm (0.050λ)	7 mm	Tek
	7,5-7,7 GHz		LP-CP			
	11.5-11.9 GHz					
(Loncar <i>et al.</i> 2018)	8.9-11,1 GHz	>%96	LP-LP	1,27 mm(0.042λ)	5.7 mm	Çoklu
(Ur Rahman <i>et al.</i> 2021)	8.36-10.87 GHz	>%80	LP-LP	1.6mm(0,051λ)	10 mm	Tek
Tez Kapsamında yapılan Çalışma	8,68-11,48 GHz	>%96	LP-LP	1,6 mm(0,053λ)	7,8 mm	Tek
	7.9-7.96 GHz		LP-CP			
	12,84-13,16 GHz					

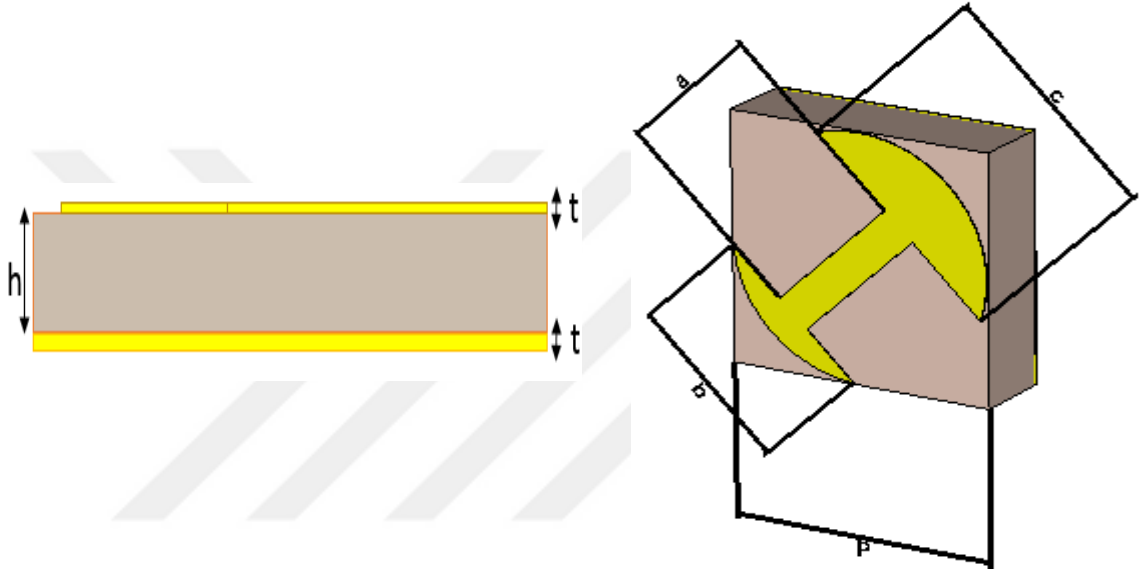
Elde edilen sonuçların literatürdeki diğer çalışmalar ile LP-LP ve LP-CP polarizasyona dönüştürme frekans aralıkları, dönüştürme yüzdesi, kalınlıkları, katman sayıları gibi parametrelerle kıyaslaması Tablo 2’de verilmiştir. Tablo 2’de görüldüğü gibi tez kapsamında yapılan çalışma diğer referanslara (Loncar *et al.* 2018, Ur Rahman *et al.* 2021) göre hem LP-LP hem de LP-CP polarizasyon dönüştürücü üstünlüğü ile çalışmaktadır. Ayrıca Tablo 2’de referans alınan diğer çalışmalara (Nguyen *et al.* 2021, Khan *et al.* 2019) göre daha yüksek PCR oranıyla çalışmaktadır. Önerilen bu tasarım Loncar *et al.* 2018’a göre tek katman parametresiyle daha basit bir yapıya sahiptir.

C, X Bant Polarizasyon Dönüştürücü Uygulaması

Tez kapsamından yapılan polarizasyon dönüştürücü uygulamalarından bir diğeri C, X, mikrodalga frekans bandında çalışan metamalzeme temelli polarizasyon dönüştürücüdür. dönüştürücü $5,8 \times 10^7$ iletkenlik değerine sahip iki bakır tabaka arasına 4.3 dielektrik sabitine sahip FR-4 alttaşı kullanılmıştır.

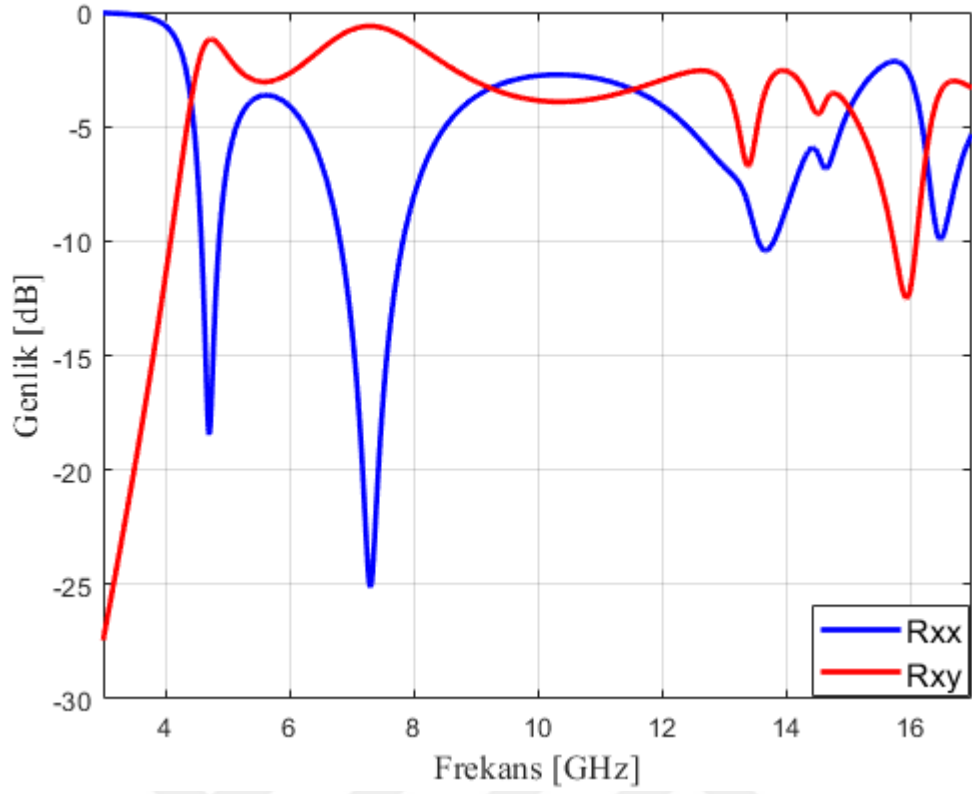


Şekil 30. Önerilen C, X bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü

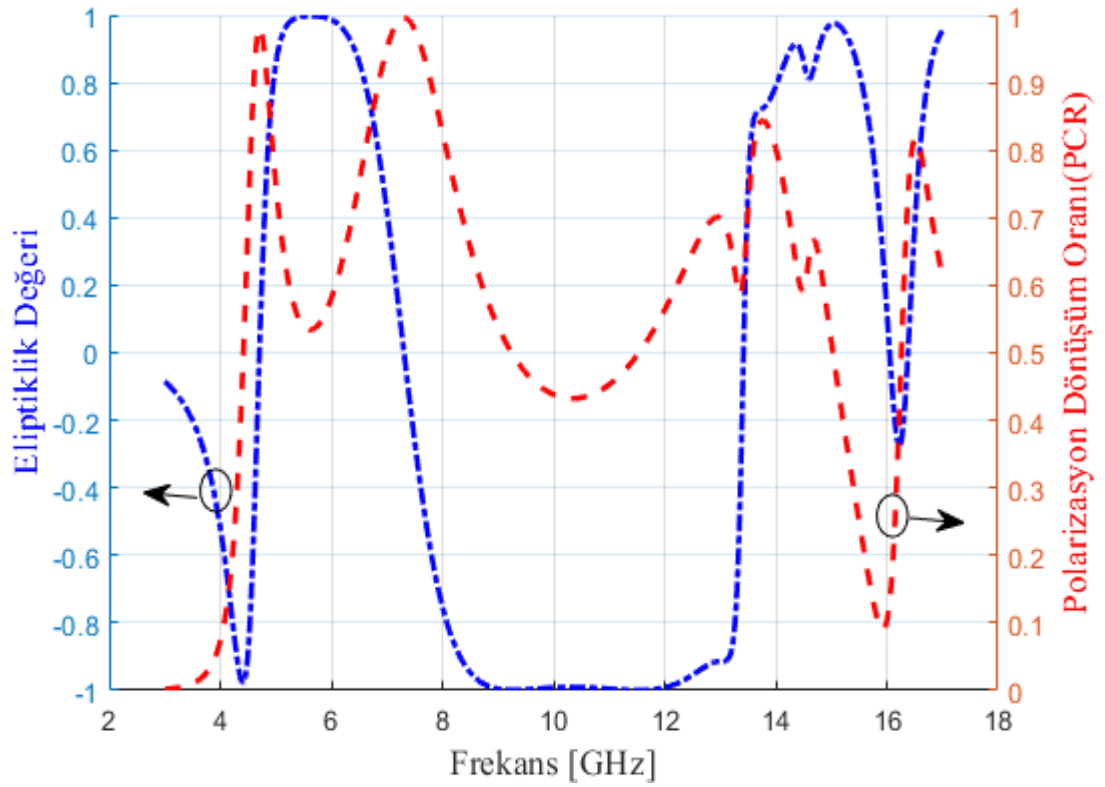


Şekil 31. C, X bant polarizasyon dönüştürücü birim hücre ölçüleri

Şekil 30 ve Şekil 31’de Önerilen C, X polarizasyon dönüştürücünün yapısı ve ölçüleri $t=0,035\text{mm}$ $h=2,8\text{mm}$ $P=10\text{mm}$ $a=5,9\text{mm}$ $b=6,58$ $c=8,87$ olarak verilmiştir.



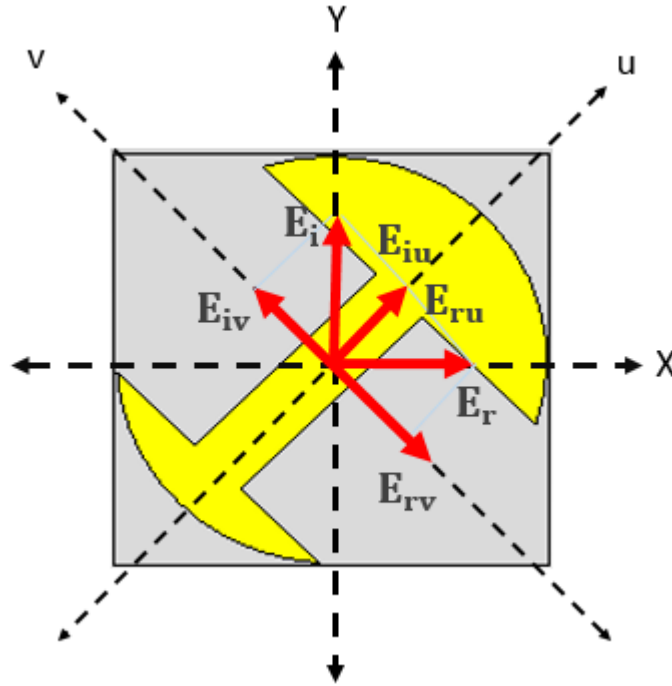
Şekil 32. C, X bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü R_{xx} ve R_{xy} grafikleri



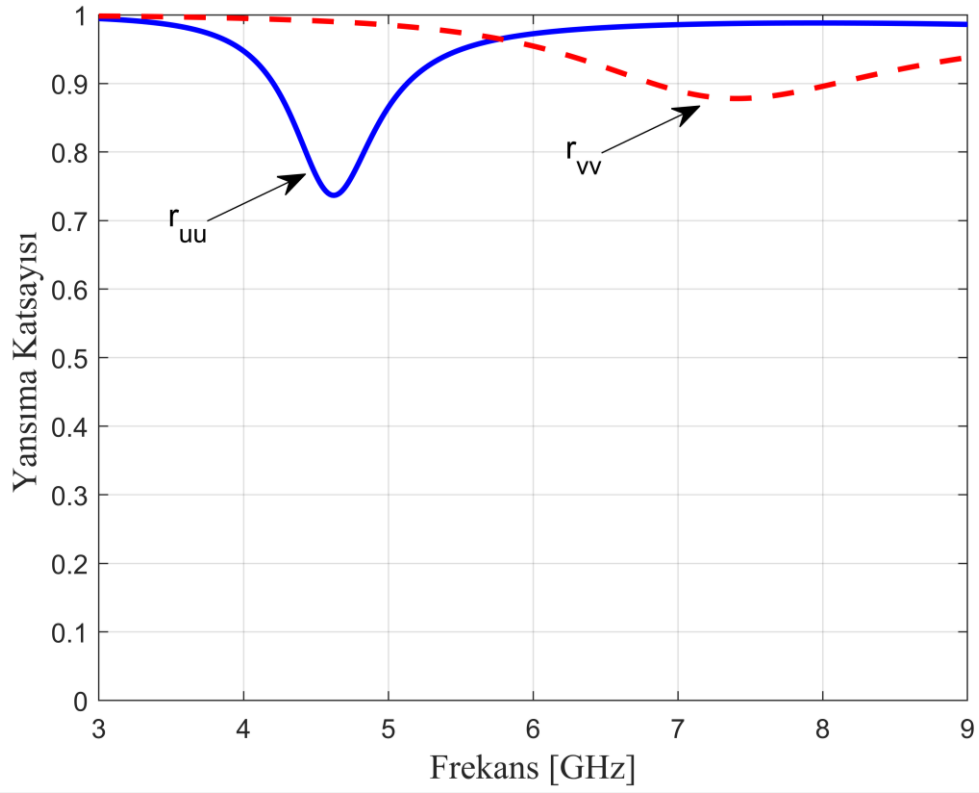
Şekil 33. C, X bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü eliptiklik ve PCR grafikleri

Şekil 32’de C, X bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü uygulamasının R_{xx} ve R_{xy} grafikleri verilmiştir, R_{xx} grafiğinde görüleceği üzere -18.47 dB ve -25.12 dB değerlerinde sırasıyla 4,70 GHz ve 7,31 GHz iki adet rezonans frekans noktası görülmektedir. Şekil 32’de R_{xy} grafiğinde ise R_{xx} grafiğinde bulunan iki adet rezonans noktasında maksimum değerini almıştır. Şekil 32’de R_{xx} grafiğinde bulunan 4,70 GHz ve 7,31 GHz noktalarında %100 oranında LP-LP polarizasyon dönüşüm işlemi gerçekleşmiştir.

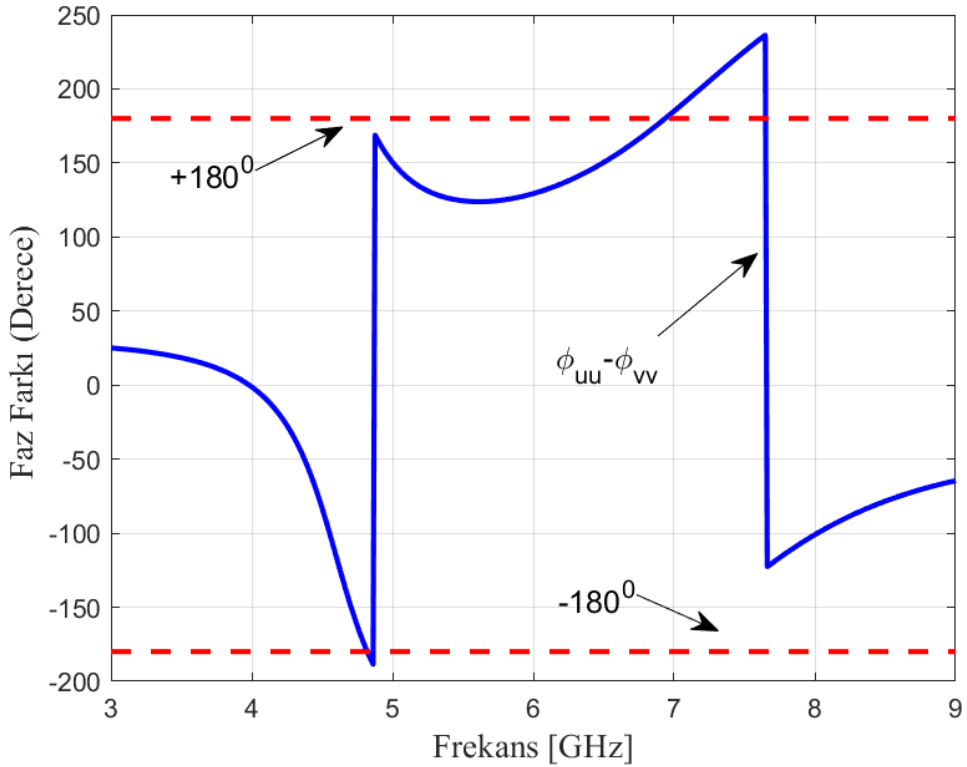
Şekil 33’te ise Şekil 32’de bulunan R_{xx} ve R_{xy} parametrelerinden yola çıkarak hesaplanan C, X frekans bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü uygulamasının eliptiklik ve polarizasyon dönüşüm değerleri gösterilmiştir. Bu grafiğin sol y eksenini eliptiklik değerini sağ y eksenini ise polarizasyon dönüşüm oranını göstermektedir. Eliptiklik grafiğinden görüleceği üzere 5,35-5,94 GHz frekans bant aralığında LP-CP polarizasyonun bir türü olan RHCP polarizasyon dönüşümü 8,88-12,03 GHz bant aralığında ise LP-CP polarizasyonun bir türü olan LHCP polarizasyon dönüşüm işlemi gerçekleşmiştir. Şekil 33’te PCR değeri grafiği ise 4,61-4,85 GHz ve 6,86-7,78 GHz bant aralıklarında %90 ve üstünde PCR verimliliği ile LP-LP polarizasyon dönüşüm işlemi sağlanmıştır.



Şekil 34. C, X bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü u-v eksenleri



Şekil 35. C, X bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü u-v eksenleri genlikleri



Şekil 36. C, X bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü u-v eksenleri arasındaki faz farkı

Şekil 34'te ise C, X bandında çalışan polarizasyon dönüştürücü çalışmasının daha iyi anlaşılması için Şekil 34'te görüldüğü gibi u-v eksenlerine ayrılmıştır. u ve v birim vektörleri polarizasyon dönüşümü işleminin incelenmesi için kullanılacaktır. Şekil 35'te r_{uu} ve r_{vv}

ifadeleri sırasıyla u ve v yönlerinde yansıyan dalgaların genliklerini Şekil 36’da $\phi_{uu} - \phi_{vv}$ ifadesi ise u ve v yönlerinde yansıyan dalgaların arasındaki faz farkını ifade etmektedir. Şekil 35’te görüleceği üzere r_{uu} ve r_{vv} ifadeleri yaklaşık 1’e eşittir ve Şekil 36’da ise LP-LP polarizasyon dönüşümünün yapıldığı frekans aralığında ise 180° ye yaklaşık olarak eşittir. Bu analiz LP-LP polarizasyon dönüşümü işleminin doğrulaması için kullanılır. Şekil 35’te verilen R_{xx} ve R_{xy} parametrelerinin grafiklerinde görülen iki adet rezonans frekansı noktasında y polarizasyonlu dalgaın tamamen x polarizasyona dönüşmüştür. Şekil 36’da bulunan faz grafiğinde ; Şekil 32’de görülen rezonans frekansları olan 4,70 GHz ve 7,31 GHz frekanslarında tam 180° olduğu görülmektedir. Sonuç olarak bu frekans noktalarında tamamen LP-LP polarizasyon dönüşümünün gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca bu çalışmadaki LP-CP polarizasyon dönüşümünün gerçekleştiği nokta Şekil 36’da eliptiklik değeri ile gösterilmiştir. Şekil 36’da faz farkı grafiğinde 5,35-5,94 GHz ve 8,88-12,03 GHz bantlarına yaklaşık 90° faz farkının olduğu görülmektedir bu 90° lik faz farkı belirtilen frekans bantlarında LP-CP dönüşümü işleminin gerçekleştiğinin bir başka göstergesidir.

Tablo 3. C, X bant polarizasyon dönüştürücünün referans alınan diğer çalışmalarla karşılaştırılması

Referans	Bant Sayısı		Çalışma Frekansları		Kalınlık
	LP-LP	LP-CP	LP-LP	LP-CP	
(Dutta <i>et al.</i> 2020)	2	-	15 GHz,17Ghz		2,0 mm
(Huang <i>et al.</i> 2019)	2	2	4,40-5,30 GHz 9,45-13,60GHz	4,47-5,35 GHz 9,57-13,57GHz	3,0 mm
(Wang and Zhai 2020)		1		8,18-13,98GHz	-
(Takashi Noishiki 2020)	1	-	6,8-9,7 GHz		3,2 mm
(Xu <i>et al.</i> 2017)	1	-	2,65 GHz		2,0 mm
Tez Kapsamında yapılan Çalışma	2	2	4,61-4,85 GHz 6,86-7,78 GHz	5,35-5,94 GHz 8,88-12,03 GHz	2,8 mm

Elde edilen sonuçların literatürdeki diğer çalışmalar ile LP-LP ve LP-CP polarizasyon bant sayıları çalışma frekans aralıkları, kalınlıkları gibi parametrelerle kıyaslaması Tablo 3’te gösterilmiştir. Tablo 3’te görüleceği üzere tez kapsamında yapılan çalışma diğer referanslara (Dutta *et al.* 2020, Wang and Zhai 2020, Takashi Noishiki 2020, Xu *et al.* 2017) göre LP-LP ve LP-CP bant sayısı olarak daha fazla sayıda bant aralığı için polarizasyon dönüşümü gerçekleştirir. Önerilen bu çalışma tablo 3’te bulunan referanslara (Xu *et al.* 2017, Takashi Noishiki 2020, Dutta *et al.* 2020) göre LP-LP polarizasyon dönüşümünün yanı sıra LP-CP polarizasyon dönüşüm işlemi de gerçekleştirmektedir. Ayrıca tez kapsamında yapılan tasarım referanslara (Takashi Noishiki 2020, Huang *et al.* 2019) göre daha ince yapıdadır.

SONUÇLAR

Bu çalışmada çeşitli mikrodalga frekans bant aralıkları için, metamalzeme temelli LP-LP ve LP-CP polarizasyon dönüştürücü aygıt tasarımları gerçekleştirilmiştir. Çalışma üç farklı aygıt tasarımından oluşmaktadır. İlk olarak C, X, Ku ve K bantlarında çalışan hem LP-LP hem de LP-CP polarizasyon dönüştürücü yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 8,4-17,83 GHz aralığında %97 üstünde LP-LP polarizasyon dönüşümü yapılmıştır, ayrıca 7,09-7,32 GHz aralığında RHCP 18,91-19,03 GHz aralığında LHCP polarizasyon dönüşümü yapılmıştır. Yapılan tasarım CST benzetim programı ile gerçekleştirilmiştir ve elde edilen sonular Tablo 1’de referans alınan diğer çalışmalar ile karşılaştırılmış ve tez kapsamında yapılan çalışma %97 PCR oranı ile diğer referans çalışmalara göre daha iyi sonuç elde edilmiştir. İkinci olarak X ve Ku bandında hem LP-LP hem de LP-CP polarizasyon dönüşümü yapan mikrodalga aygıt tasarımı amaçlanmıştır. Tasarım sonucunda 8,68 – 11,48 GHz aralığında %96 üzerinde PCR oranı ile LP-LP polarizasyon dönüşümü gerçekleştiren metamalzeme tabanlı aygıt, aynı zamanda 7,9-7,96 GHz ve 12,84-13,16 GHz aralıklarında ise RHCP dairesel polarizasyon dönüştürücü olarak çalışmaktadır. Yapılan tasarım, CST benzetim programı ile gerçekleştirilmiştir sonuçlar referans alınan diğer çalışmalar ile Tablo 2’de kıyaslanmıştır. Amaçlanan metamalzeme temelli polarizasyon dönüştürücü literatürde yer alan diğer çalışmalara göre lineer polarizasyon dönüşüm verimi daha yüksek olarak (>%96) elde edilmiştir. Son olarak C ve X bantlarında çalışan polarizasyon dönüştürücü tasarımı amaçlanmıştır. Yapılan tasarım sonuçlarına göre 5,35-5,94 GHz aralıklarında RHCP 8,88-12,03 GHz aralıklarında LHCP dairesel polarizasyon dönüşümü gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu çalışmada 4,61-4,85 GHz ve 6,86-7,78 GHz aralıklarında %90 üzerinde PCR oranı ile LP-LP polarizasyon dönüşümü gerçekleştirilmiştir. Yapılan tasarım, CST benzetim programı ile gerçekleştirilmiştir ve elde edilen sonuçlar Tablo 3’te referans alınan diğer çalışmalarla kıyaslanmıştır. Tez kapsamında yapılan bu çalışmada referans alınan çalışmalara göre bir tanesi haricinde dönüştürücü bant sayısı ve dönüştürücü tipi bakımından daha üstün bant sayıları ve LP-CP dönüşüm yapabilme yeteneği ile daha yüksek performans göstermiştir. Ayrıca bazı çalışmalara göre daha düşük alttaşı kalınlığı ile daha uygulanabilir bir tasarım sunmuştur.

KAYNAKLAR

- Afzal Ahmed, F.A.T., 2020. An efficient anisotropic metasurface for linear and circular-polarization conversion applications. 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen.
- Ahmed, F., Hassan, T. and Shoaib, N., 2020. Comments on “an ultrawideband ultrathin metamaterial absorber based on circular split rings”. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 19(3), 512-514.
- Ahmed, F., Khan, M.I. and Tahir, F.A., 2021. A multi-functional polarization transforming metasurface for c, x and k band applications. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. doi: 10.1109/LAWP.2021.3065717.
- Akçelik, H., 2016. Geniş bantlı metamatizeme tabanlı mikroşerit anten yapıların tasarım, optimizasyon, fabrikasyon ve ölçümleri. Yüksek Lisans Tezi , In: Savunma Bilimleri Enstitüsü Teknoloji Yönetimi Ana Bilim Dalı. Kara harp okulu Ankara.
- Akçeçili, E., 2018. Mikrodalga bölgesi metamatizeme soğurucu tasarımı: çift kapalı halka rezonatörü tabanlı iki katmanlı yapı ve mekanik kaydırma ile soğurma spektrumlarının açık/kapalı anahtarlanması . Yüksek Lisans Tezi , In: Fen Bilimleri Enstitüsü. Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Ako, R.T., Lee, W.S.L., Atakaramians, S., Bhaskaran, M., Sriram, S. and Withayachumnankul, W., 2020. Ultra-wideband Tri-layer Transmissive Linear Polarization Converter for Terahertz Waves. APL Photonics, 5(4).
- Al- Badrı, K.S.L., 2016. Microwave region electromagnetic absorber design and applications. In: Graduate School of Applied and Natural Sciences. M.Sc Thesis , Süleyman Demirel University, Isparta.
- Alıcı, K.B., 2010. The left hand of electromagnetism: Metamaterials. In: Institute Of Engineering And Sciences. Ph.D. Thesis, Bilkent University, Ankara.
- Altıntaş, O., 2015. Polarizasyon dönüştürücü metamatizeme yüzeyler. In: Fen Bilimleri. Yüksek Lisans Tezi , Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay.
- Altıntaş, O., 2020. Industrial applications of metamaterial based sensors. In: Institute Of Natural And Applied Sciences. Ph.D. Thesis Çukurova University, Adana.
- Amiri, M., Tofigh, F., Shariati, N., Lipman, J. and Abolhasan, M., 2020. Wide-angle metamaterial absorber with highly insensitive absorption for te and tm modes. Sci Rep, 10(1), 13638.
- Ashraf, F.B., Alam, T., Kibria, S. and Islam, M.T., 2018. A compact meander line elliptic split ring resonator based metamaterial for electromagnetic shielding. Materials Express, 8(2), 133-140.
- Averitt, R.D., Introduction to metamaterials. Boston University, Boston.
- Bağmancı, M., Karaaslan, M., Unal, E., Akgol, O., Bakır, M. and Sabah, C., 2019. Solar energy harvesting with ultra-broadband metamaterial absorber. International Journal of Modern Physics B, 33(08), 1950056.
- Bağmancı, M., 2018. Metamatizeme emici tabanlı mikro dalga ve optik frekanslarda enerji hasadı benzetimleri ve uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, In: Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü. İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay.
- Bhattacharyya, S., Ghosh, S. and Srivastava, K.V., 2017. A wideband cross polarization conversion using metasurface. Radio Science, 52(11), 1395-1404.

- Bilal, R., Baqir, M., Choudhury, P., Ali, M.M. and Rahim, A.A., 2020. On the specially designed fractal metasurface-based dual-polarization converter in the thz regime. *Results in Physics*, 19, 103358.
- Bilal, R.M.H., Baqir, M.A., Choudhury, P.K., Ali, M.M. and Rahim, A.A., 2020. On the specially designed fractal metasurface-based dual-polarization converter in the thz regime. *Results in Physics*, 19.
- Bilal, R.M.H. and Naveed, M.A., 2021. A comment: A set square design metamaterial absorber for x-band applications. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 1-5.
- Bilotti, F. and Sevgi, L., 2012. Metamaterials: Definitions, properties, applications, and fdtd-based modeling and simulation (invited paper). *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 22(4), 422-438.
- Boerner, W.-M., Basic concepts in radar polarimetry. UIC-ECE Communications, Sensing & Navigation Laboratory, Chicago, USA.
- Borgese, M., Costa, F., Genovesi, S. and Manara, G., 2021. Depolarizing chipless tags with polarization insensitive capabilities. *Electronics*, 10(4).
- Buldu, G., 2017. Microwave calibration-independent measurement methods for determination of electromagnetic properties of isotropic metamaterials. M.Sc Thesis , In: Natural And Applied Sciences. University Of Gaziantep, Gaziantep.
- Buriak, I.A., Zhurba, V.O., Vorobjov, G.S., Kulizhko, V.R., Kononov, O.K. and Rybalko, O., 2016. Metamaterials: Theory, classification and application strategies (review). *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 8(4(2)), 04088-04081-04088-04011.
- Bute, M., 2013. Investigation of propagation characteristics of a composite material composed of a bianisotropic metamaterial and an isotropic conventional material. In: Natural & Applied Sciences. M.Sc. Thesis , University Of Gaziantep, Gaziantep.
- Bute, M., 2018. Investigation of near field effects on retrieval of electromagnetic properties of chiral metamaterials and coupling effects of nearby metamaterials. Ph.D. Thesis In: Natural & Applied Sciences. Gaziantep University, Gaziantep.
- Caloz, C. and Itoh, T., 2006. *Electromagnetic metamaterials_ transmission line theory and microwave applications* New Jersey, USA: A John Wiley & Sons, Inc., Publication.
- Can, K., 2020. Polarizasyondan bağımsız ince tek katmanlı frekans seçici yüzey kullanarak elektromanyetik soğurucu tasarımı. Doktora Tezi In: Hezârfen Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü. Millî Savunma Üniversitesi, İstanbul.
- Cen, C., Zhang, Y., Chen, X., Yang, H., Yi, Z., Yao, W., Tang, Y., Yi, Y., Wang, J. and Wu, P., 2020. A dual-band metamaterial absorber for graphene surface plasmon resonance at terahertz frequency. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 117, 113840.
- Chen, H.-T., Taylor, A.J. and Yu, N., 2016. A review of metasurfaces: Physics and applications. *Reports on Progress in Physics*, 79(7).
- Chen, H.-Y., Wang, J.-F., Ma, H., Qu, S.-B., Zhang, J.-Q., Xu, Z. and Zhang, A.-X., 2015. Broadband perfect polarization conversion metasurfaces. *Chinese Physics B*, 24(1).
- Chen, M., Chang, L., Gao, X., Chen, H., Wang, C., Xiao, X. and Zhao, D., 2017. Wideband tunable cross polarization converter based on a graphene metasurface with a hollow-carved “h” array. *IEEE Photonics Journal*, 9(5), 1-11.

- Cheng, Y., Nie, Y., Wang, X. and Gong, R., 2013. An ultrathin transparent metamaterial polarization transformer based on a twist-split-ring resonator. *Applied Physics A*, 111(1), 209-215.
- Cheng, Y., Zhao², J., Mao¹, X. and Gong, R., 2017. Ultrabroadband diode-like asymmetric transmission and high-efficiency cross-polarization conversion based on composite chiral metamaterial. *Progress In Electromagnetics Research*, 160(89–101, 2017).
- Chipman, R.A., 1987. Polarization aberrations. The University Of Arizona.
- Collett, E., 1968. The description of polarization in classical physics. *American Journal of Physics*, 36(8), 713-725.
- Collett, E., 2005. Polarization. SPIE Field Guides, 11 s, 14 s, Washington USA.
- Cong, L., Cao, W., Zhang, X., Tian, Z., Gu, J., Singh, R., Han, J. and Zhang, W., 2013. A perfect metamaterial polarization rotator. *Applied Physics Letters*, 103(17).
- Costanzo, S. and Venneri, F., 2020. Polarization-insensitive fractal metamaterial surface for energy harvesting in iot applications. *Electronics*, 9(6), 959.
- Creech-Eakman, M., Polarization. In: *Radiation and Optics*. New Mexico Institute of Mining and Technology, New Mexico
- Cui, J., Huang, C., Pan, W., Pu, M., Guo, Y. and Luo, X., 2016. Dynamical manipulation of electromagnetic polarization using anisotropic meta-mirror. *Sci Rep*, 6, 30771.
- Dai, H., Zhao, Y., Sun, H., Chen, J., Ge, Y. and Li, Z., 2018. An ultra-wideband linear polarization conversion metasurface. *Japanese Journal of Applied Physics*, 57(9).
- Darweesh, A.F., 2019. Bandwidth and gain enhancement of microstrip antenna using metamaterials. M.Sc. Thesis In: Graduate School Of Natural & Applied Sciences. Gaziantep University, Gaziantep.
- David Sandwell, H.F., 2016. Electromagnetic Radiation And Polarization. In: *Satellite Remote Sensing SIO 135/SIO 236*. University of California San Diego, California,USA.
- Degl'Innocenti, E.L., 2014. The physics of polarization. University of Florence, Department of Physics and Astronomy, University of Florence, ITALY.
- Delihanlar, E., 2020. Farklı Konfigürasyonlarda Tekstil Esaslı Metamalzeme Soğurucu Tasarımı Ve X-Bant Uygulamaları. Doktora Tezi, In: Lisansüstü Eğitim Enstitüsü. Karabük Üniversitesi, Karabük.
- Deng, G., Sun, H., Lv, K., Yang, J., Yin, Z. and Chi, B., 2020. An efficient wideband cross-polarization converter manufactured by stacking metal/dielectric multilayers via 3d printing. *Journal of Applied Physics*, 127(9).
- Deng, R., Li, M., Muneer, B., Zhu, Q., Shi, Z., Song, L. and Zhang, T., 2018. Theoretical analysis and design of ultrathin broadband optically transparent microwave metamaterial absorbers. *Materials (Basel)*, 11(1).
- Dengke Zhang, X.F., * Kaiyu Cui, Fang Liu, and Yidong Huang, 2018. Identifying orbital angular momentum of vectorial vortices with pancharatnam phase and stokes parameters. *Scientific reports*, 5(11982 (2015)).
- Devapriya, A.T. and Robinson, S., 2019. Investigation on metamaterial antenna for terahertz applications. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 18(3), 377-389.
- Diğer, F., 2015. Metamalzemeler, bakışsız ortam ve mikrodalga uygulamaları. Doktora Tezi , In: Fen Bilimleri Enstitüsü. Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay.

- Ding, J., Arigong, B., Ren, H., Zhou, M., Shao, J., Lin, Y. and Zhang, H., 2014. Efficient Multiband And Broadband Cross Polarization Converters Based On Slotted L-Shaped Nanoantennas. *Opt Express*, 22(23), 29143-29151.
- Dirlik, T., 2020. Metamalzeme Kullanılarak Eş Benzetim İle Mikroşerit Anten Tasarımı Ve Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi , In: Fen Bilimleri Enstitüsü. Başkent Üniversitesi, Ankara.
- Dişken, G., 2014. Metamalzeme Tabanlı İki Modlu Anten Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi , In: Fen Bilimleri Enstitüsü. Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Du, C., Zhou, D., Guo, H.-H., Pang, Y.-Q., Shi, H.-Y., Liu, W.-F., Su, J.-Z., Singh, C., Trukhanov, S. and Trukhanov, A., 2020. An Ultra-Broadband Terahertz Metamaterial Coherent Absorber Using Multilayer Electric Ring Resonator Structures Based On Anti-Reflection Coating. *Nanoscale*, 12(17), 9769-9775.
- Du, X., Lin, H., Shi, X., Mao, Y. and Wu, Y., 2020. Triple-Band Metamaterial Polarization Converter Based On Substrate Integrated Waveguide Technology. In: 2020 Cross Strait Radio Science & Wireless Technology Conference (CSRSWTC). IEEE: pp: 1-3.
- Dutta, R., Mitra, D. and Ghosh, J., 2020. Dual- Band Multifunctional Metasurface For Absorption And Polarization Conversion. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 30(7).
- Elwi, T.A., Jassim, D.A. and Mohammed, H.H., 2020. Novel Miniaturized Folded Uwb Microstrip Antenna-Based Metamaterial For Rf Energy Harvesting. *International Journal of Communication Systems*, 33(6).
- Fahad, Ruan and Chen, 2019. A Wideband Terahertz Transmissive Polarization Manipulator Based On Metasurfaces. *Electronics*, 8(10).
- Fahad, A.K., Ruan, C., Ali, S., Nazir, R., Haq, T.U., Ullah, S. and He, W., 2020. Triple-Wide-Band Ultra-Thin Metasheet For Transmission Polarization Conversion. *Sci Rep*, 10(1), 8810.
- Faniayeu, I., Asadchy, V. and Fanyaev, I., 2020. Polarization Control With Helical Metasurfaces. *Crystals*, 10(9).
- Feng, M., Wang, J., Ma, H., Mo, W., Ye, H. and Qu, S., 2013. Broadband Polarization Rotator Based On Multi-Order Plasmon Resonances And High Impedance Surfaces. *Journal of Applied Physics*, 114(7).
- Fu, C., Sun, Z., Han, L., Liu, C., Sun, T. and Chu, P.K., 2019. High-Efficiency Dual-Frequency Reflective Linear Polarization Converter Based On Metasurface For Microwave Bands. *Applied Sciences*, 9(9).
- Gao, J., Zhang, Y., Sun, Y. and Wu, Q., 2019. Ultra-Wide Band And Multifunctional Polarization Converter Based On Dielectric Metamaterial. *Materials (Basel)*, 12(23).
- Gao, X., Han, X., Cao, W.-P., Li, H.O., Ma, H.F. and 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.
- Gao, X., Singh, L., Yang, W., Zheng, J., Li, H. and Zhang, W., 2017. Bandwidth Broadening Of A Linear Polarization Converter By Near-Field Metasurface Coupling. *Sci Rep*, 7(1), 6817.
- Gao, X., Yang, W.L., Ma, H.F., Cheng, Q., Yu, X.H. and Cui, T.J., 2018. A Reconfigurable Broadband Polarization Converter Based On An Active Metasurface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(11), 6086-6095.

- Gao, X., Yu, X.-Y., Cao, W.-P., Jiang, Y.-N. and Yu, X.-H., 2016. Ultra-Wideband Circular-Polarization Converter With Micro-Split Jerusalem-Cross Metasurfaces. *Chinese Physics B*, 25(12).
- Ghosh, S., Bhattacharyya, S. and Srivastava, K.V., 2016. Design And Analysis Of A Broadband Single Layer Circuit Analog Absorber. *Proceedings of the 46th European Microwave Conference*, London.
- Ghosh, S. and Srivastava, K.V., 2015. An equivalent circuit model of fss-based metamaterial absorber using coupled line theory. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, 511-514.
- Grady, N.K., Heyes, J.E., Chowdhury, D.R., Zeng, Y., Reiten, M.T., Azad, A.K., Taylor, A.J., Dalvit, D.A.R. and Chen, H.-T., 2013. Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction. *Science*, 340(3138).
- Guo, L., Li, S., Jiang, X., Peng, L. and Li, X., 2018. Ultra-wideband polarization rotation reflective metasurface based on monolayer rhombus hollow structure. *AIP Advances*, 8(9).
- Guo, T. and Argyropoulos, C., 2016. Broadband polarizers based on graphene metasurfaces. *Opt Lett*, 41(23), 5592-5595.
- Guo, Y., Xu, J., Lan, C. and Bi, K., 2020. Broadband and high-efficiency linear polarization converter based on reflective metasurface. *Engineered Science*. 14, 39–45
- Hannan, S., Islam, M.T., Sahar, N.M., Mat, K., Chowdhury, M.E.H. and Rmili, H., 2020. Modified-segmented split-ring based polarization and angle-insensitive multi-band metamaterial absorber for x, ku and k band applications. *IEEE Access*, 8, 144051-144063.
- Hao, J., Ren, Q., An, Z., Huang, X., Chen, Z., Qiu, M. and Zhou, L., 2009. Optical metamaterial for polarization control. *Physical Review A*, 80(2).
- Hao, J., Yuan, Y., Ran, L., Jiang, T., Kong, J.A., Chan, C.T. and Zhou, L., 2007. Manipulating electromagnetic wave polarizations by anisotropic metamaterials. *Phys Rev Lett*, 99(6), 063908.
- Hasanul Karim, D.D., Luis A. Chavez, Luis Delfin, Ricardo Martinez, Jose Avila, Carlos Rodriguez, Raymond C. Rumpf, Norman Love and Yirong Lin, 2017. Metamaterial based passive wireless temperature sensor. *Advanced Engineering Materials*, 19(5, 1600741).
- Hoa, N.T.Q., Lam, P.H., Tung, P.D., Tuan, T.S. and Nguyen, H., 2019. Numerical study of a wide-angle and polarization-insensitive ultrabroadband metamaterial absorber in visible and near-infrared region. *IEEE Photonics Journal*, 11(1), 1-8.
- Hoa, N.T.Q., Tuan, T.S., Hieu, L.T. and Giang, B.L., 2019. Facile design of an ultra-thin broadband metamaterial absorber for c-band applications. *Sci Rep*, 9(1), 468.
- Huang, X., Xiao, B., Guo, L., Yu, S. and Yang, H., 2014. Triple-band linear and circular reflective polarizer based on e-shaped metamaterial. *Journal of Optics*, 16(12).
- Huang, X., Yang, D. and Yang, H., 2014. Multiple-band reflective polarization converter using u-shaped metamaterial. *Journal of Applied Physics*, 115(10).
- Huang, X., Yang, H., Zhang, D. and Luo, Y., 2019. Ultrathin dual-band metasurface polarization converter. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 67(7), 4636-4641.

- Intaravanne, Y. and Chen, X., 2020. Recent advances in optical metasurfaces for polarization detection and engineered polarization profiles. *Nanophotonics*, 9(5), 1003-1014.
- Islam, S., Hasan, M. and Faruque, M., 2018. A new metamaterial-based wideband rectangular invisibility cloak. *Applied Physics A*, 124(2), 1-6.
- Jain, P., Singh, A.K., Pandey, J.K., Bansal, S., Sardana, N., Kumar, S., Gupta, N. and Singh, A.K., 2021. An ultrathin compact polarization-sensitive triple-band microwave metamaterial absorber. *Journal of Electronic Materials*, 50(3), 1506-1513.
- Jia, Y., Liu, Y., Guo, Y.J., Li, K. and Gong, S.-X., 2016. Broadband polarization rotation reflective surfaces and their applications to rcs reduction. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64(1), 179-188.
- Jiang, Y., Zhao, H., Wang, L., Wang, J., Cao, W. and Wang, Y., 2019. Broadband linear-to-circular polarization converter based on phosphorene metamaterial. *Optical Materials Express*, 9(5).
- Joardar, S., -. Polarimetry. Physics, University of Kalyani, India.
- Jordi Naqui, J.C., Ali Karami-Horestani, Christophe Fumeaux, Ferran Martín, 2015. Angular displacement and velocity sensors based on coplanar waveguides (cpws) loaded with s-shaped split ring resonators (s-srr). *Sensors*, 15(9628-9650).
- Kalender, G., 2015. Design and implementation of dielectric resonator based metamaterials. In: Graduate School Of Natural And Applied Sciences. M.Sc Thesis, Dokuz Eylül University, İZMİR.
- Kamal, B., Chen, J., Yingzeng, Y., Ren, J., Ullah, S. and Khan, W.U.R., 2021. High efficiency and ultra-wideband polarization converter based on an l-shaped metasurface. *Optical Materials Express*, 11(5).
- Karaaslan, M., 2009. Negatif Kirilma İndisli Meta-Malzemelerin Elde Edilmesi. Doktora Tezi, In: Fen Bilimleri Enstitüsü. Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Karakaya, E.U., 2019. Metamalzemeler İle Enerji Hasatlama. Yüksek Lisans Tezi , In: Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara Üniversitesi, Ankara.
- Karamirad, M., Ghobadi, C. and Nourinia, J., 2021. Metasurfaces for wideband and efficient polarization rotation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 69(3), 1799-1804.
- Kaya, Y., 2013. Bianizotropik Metamalzemelerin Elektromanyetik Özelliklerinin Yeni Bir Mikrodalga Tekniği İle Belirlenmesi. In: Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi , Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Khajeh, A., Hamzavi-Zarghani, Z., Yahaghi, A. and Farmani, A., 2021. Tunable broadband polarization converters based on coded graphene metasurfaces. *Sci Rep*, 11(1), 1296.
- Khan, B., Kamal, B., Ullah, S., Khan, I., Shah, J.A. and Chen, J., 2020. Design and experimental analysis of dual-band polarization converting metasurface for microwave applications. *Sci Rep*, 10(1), 15393.
- Khan, M.I., Chen, Y., Hu, B., Ullah, N., Bukhari, S.H.R. and Iqbal, S., 2020. Multiband linear and circular polarization rotating metasurface based on multiple plasmonic resonances for c, x and k band applications. *Sci Rep*, 10(1), 17981.
- Khan, M.I., Khalid, Z. and Tahir, F.A., 2019. Linear and circular-polarization conversion in x-band using anisotropic metasurface. *Scientific reports*, 9(1), 1-11.

- Khan, M.I., Khalid, Z., Tanoli, S.A.K., Tahir, F.A. and Hu, B., 2020. Multiband linear and circular polarization converting anisotropic metasurface for wide incidence angles. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53(9).
- Khan, M.I. and Tahir, F.A., 2017. An angularly stable dual-broadband anisotropic cross polarization conversion metasurface. *Journal of Applied Physics*, 122(5).
- Khan, M.I. and Tahir, F.A., 2017. A compact half and quarter-wave plate based on bi-layer anisotropic metasurface. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(43).
- Khan, M.I. and Tahir, F.A., 2018. A broadband cross-polarization conversion anisotropic metasurface based on multiple plasmon resonances. *Chinese Physics B*, 27(1).
- Koçer, H.K., Yücedağ, O.M.Y., Özer, A.Ö. and Özden, K.Ö., 2016. Metamalzeme tabanlı geniş bant ışıma emici yapılar kullanılarak radar kesit alanının azaltılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(4).
- Kong, S.a., 2011. Reflection & transmission of em waves. MIT - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA USA.
- Kotsuka, Y., 2019. Electromagnetic wave absorbers detailed theories and applications. New Jersey, USA: Wiley.
- Kraus, J.D. and Carver, K.R., 1973. Electromagnetics second edition. JAPAN: McGraw-Hill Kogakusha.
- Kshetrimayum, R.S., 2005. A brief intro to metamaterials. *IEEE Potentials*, 23(5).
- Kukhareenko, A.S., Shaymardanov, R.V. and Yelizarov, A.A., 2017. A methodology of metamaterial effective permittivity and permeability value measurement. *Journal of Materials Science and Engineering A*, 7(4).
- Kun Song, Y.L., Quanhong Fu, Xiaopeng Zhao, Chunrong Luo, Weiren Zhu, 2013. 90° polarization rotator with rotation angle independent of substrate permittivity and incident angles using a composite chiral metamaterial. *Opt Express*, 25;21(6).
- Kwok, D.R., The plane electromagnetic waves. In: *Plane Electromagnetic Waves*. San Jose.
- Labidi, M. and Choubani, F., 2018. Performances enhancement of metamaterial loop antenna for terahertz applications. *Optical Materials*, 82, 116-122.
- Landy, N.I., Sajuyigbe, S., Mock, J.J., Smith, D.R. and Padilla, W.J., 2008. Perfect metamaterial absorber. *Physical Review Letters*, 100(20), 207402.
- Lerner, D.S., 1964. A wave polarization converter for circular polarization. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 13(1).
- Li, L., Dong, S., Dong, X., Yu, X. and Han, B., 2020. Electromagnetic wave shielding/absorption performances of cementitious composites incorporating carbon nanotube metamaterial with helical chirality. *Journal of Composite Materials*, 54(25), 3857-3870.
- Li, S.-J., Cao, X.-Y., Gao, J., Liu, T., Zheng, Y.-J. and Zhang, Z., 2015. Analysis and design of three-layer perfect metamaterial-inspired absorber based on double split-serration-rings structure. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(11), 5155-5160.
- Li, Z., Liu, W., Cheng, H., Chen, S. and Tian, J., 2015. Realizing broadband and invertible linear-to-circular polarization converter with ultrathin single-layer metasurface. *Sci Rep*, 5, 18106.

- Lin, B., Guo, J., Ma, Y., Wu, W., Duan, X., Wang, Z. and Li, Y., 2018. Design of a wideband transmissive linear-to-circular polarization converter based on a metasurface. *Applied Physics A*, 124(10).
- Lin, B., Lv, L., Guo, J., Liu, Z., Ji, X. and Wu, J., 2020. An ultra-wideband reflective linear-to-circular polarization converter based on anisotropic metasurface. *IEEE Access*, 8, 82732-82740.
- Lin, B., Wang, B., Meng, W., Da, X., Li, W., Fang, Y. and Zhu, Z., 2016. Dual-band high-efficiency polarization converter using an anisotropic metasurface. *Journal of Applied Physics*, 119(18).
- Lin, B.-Q., Da, X.-Y., Wu, J.-L., Li, W., Fang, Y.-W. and Zhu, Z.-H., 2016. Ultra-wideband and high-efficiency cross polarization converter based on anisotropic metasurface. *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(10), 2402-2405.
- Lin, B.-Q., Guo, J.-X., Chu, P., Huo, W.-J., Xing, Z., Huang, B.-G. and Wu, L., 2018. Multiple-band linear-polarization conversion and circular polarization in reflection mode using a symmetric anisotropic metasurface. *Physical Review Applied*, 9(2).
- Loncar, J., Grbic, A. and Hrabar, S., 2018. A reflective polarization converting metasurface at x-band frequencies. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(6), 3213-3218.
- Luo, F. and Lan, F., 2016. Multiband terahertz reflective polarizer based on asymmetric l-shaped srr metasurface. 2016 11th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). Guilin.
- Luo, X., 2015. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 58(9).
- Ma, H.F., Wang, G.Z., Kong, G.S. and Cui, T.J., 2014. Broadband circular and linear polarization conversions realized by thin birefringent reflective metasurfaces. *Optical Materials Express*, 4(8).
- Marti, O., 2019. Vorlesungsskript. In: *PHYS2000.0 Optik Bachelor Physik*. Universität Ulm Institut für Experimentelle Physik, Ulm, Germany.
- Mei, Z.L., Ma, X.M., Lu, C. and Zhao, Y.D., 2017. High-efficiency and wide-bandwidth linear polarization converter based on double u-shaped metasurface. *AIP Advances*, 7(12).
- Moghadam, M.J., Akbari, M. and Sebak, A.R., 2018. Broad-band efficient linearly polarization conversion ratio (pcr) metasurfaces. 12th European Conference on Antennas and Propagation, London.
- Morin, D., Electromagnetic waves. In: *Waves (draft)* D. Morin, (Ed.). Harvard University, Harvard University.
- Mustafa, M.E., Amin, M., Siddiqui, O. and Tahir, F.A., 2018. Quasi-crystal metasurface for simultaneous half- and quarter-wave plate operation. *Sci Rep*, 8(1), 15743.
- Mustafa, M.-E., Tahir, F.A. and Amin, M., 2019. Broadband waveplate operation by orthotropic metasurface reflector. *Journal of Applied Physics*, 126(18).
- Navruz, I., 2018. Polarization optics. In: *Lecture Notes*. Department of Electrical and Electronics Engineering, Ankara University, ANKARA.
- Nguyen, T.K.T., Nguyen, T.M., Nguyen, H.Q., Cao, T.N., Le, D.T., Bui, X.K., Bui, S.T., Truong, C.L., Vu, D.L. and Nguyen, T.Q.H., 2021. Simple design of efficient broadband multifunctional polarization converter for x-band applications. *Sci Rep*, 11(1), 2032.

- Nguyen, T.Q.H., Nguyen, T.K.T., Cao, T.N., Nguyen, H. and Bach, L.G., 2020. Numerical study of a broadband metamaterial absorber using a single split circle ring and lumped resistors for x-band applications. *AIP Advances*, 10(3), 035326.
- Nguyen, T.Q.H., Nguyen, T.K.T., Nguyen, T.Q.M., Cao, T.N., Phan, H.L., Luong, N.M., Le, D.T., Bui, X.K., Truong, C.L. and Vu, D.L., 2021. Simple design of a wideband and wide-angle reflective linear polarization converter based on crescent-shaped metamaterial for ku-band applications. *Optics Communications*, 486, 126773.
- Nguyen, T.Q.M., Nguyen, T.K.T., Le, D.T., Truong, C.L., Vu, D.L. and Nguyen, T.Q.H., 2021. Numerical study of an ultra-broadband and wide-angle insensitive perfect metamaterial absorber in the uv–nir region. *Plasmonics*.<https://doi.org/10.1007/s11468-021-01424-7>
- Nimbolkar, A., Kumar, H. and Kumar, G., 2021. Alternatives to metamaterial based antennas for gain and bandwidth enhancement. *IETE Journal of Research*, 1-7.
- Ongun, E., 2012. Şekli İnce filmlerin optik ve metamatizme davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi , In: Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Özbay, M. and Özkazanç, Y., 2018. Decomposition of optical reflections via polarization techniques. In: 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). pp: 1-4.
- Özbay, M. and Özkazanç, Y., 2018. Polarizasyon teknikleri ile optik yansımaların ayrıştırılması decomposition of optical reflections via polarization techniques. 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) . İzmir.
- Özden, K., 2016. Radara karşı görünmezlik sağlamak maksadıyla mikrodalga frekanslarda geniş bantlı metamatizme tabanlı elektromanyetik ışıma emici yapıların tasarım, optimizasyon, fabrikasyon ve ölçümleri. Yüksek Lisans Tezi , In: Savunma Bilimleri Enstitüsü. Kara Harp Okulu, Ankara.
- Özer, A.Z., 2018. Geniş bantlı yeni bir radar soğurucu yapı tasarımı. In: Fen Bilimleri Enstitüsü. Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Öztürk, G., 2018. Homojen ve homojen olmayan bianizotropik metamatizmelerin elektromanyetik özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi , In: Fen Bilimleri Enstitüsü. Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Öztürk, Y., 2014. Düzlemsel metamatizmeler ve uygulamaları. Doktora Tezi , In: Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara Üniversitesi, Ankara.
- Papas, C.H., 1988. Theory of electromagnetic wave propagation. New York: Dover Publications, Inc.
- Park, S.J., Cha, S.H., Shin, G.A. and Ahn, Y.H., 2017. Sensing viruses using terahertz nano-gap metamaterials. *Biomedical Optics Express*, 8(8), 3551-3558.
- Pekmezci, A. and Sevgi, L., 2019. Properties of metamaterial based electromagnetic absorbers and shields. 2019 5. International Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkiye) .İstanbul.
- Pendry, J.B., Holden, A.J., Robbins, D.J. and Stewart, W.J., 1998. Low frequency plasmons in thin-wire structures. *J. Phys.: Condens. Matter*, 10, 4785–4809.
- Pendry, J.B., Holden, A.J., Robbins, D.J. and Stewart, W.J., 1999. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47(11), 2075-2084.

- Peng, L., Jiang, X. and Li, S.M., 2018. Multi-functional device with switchable functions of absorption and polarization conversion at terahertz range. *Nanoscale Res Lett*, 13(1), 385.
- Peng, L., Li, X.-f., Gao, X., Jiang, X. and Li, S.-m., 2019. Methodology for the design of a multi-functional device with switchable absorption and polarization conversion modes by graphene and metallic metasurfaces. *Optical Materials Express*, 9(2).
- Popovic, Z. and Popovic, B.D., 1999. *Introductory electromagnetics*. New Jersey: Prentice Hall.
- Prasad, N.V.K., Babu, T.A., Phanidhar, S., Singampalli, R.S., Naik, B.R., Sarma, M. and Ramesh, S., 2021. Potential applications of metamaterials in antenna design, cloaking devices, sensors and solar cells: A comprehensive review. *Journal of Optoelectronic and Biomedical Materials*, 13(2), 23-32.
- Qi, Y., Zhang, B., Liu, C. and Deng, X., 2020. Ultra-broadband polarization conversion metasurface and its application in polarization converter and rcs reduction. *IEEE Access*, 8, 116675-116684.
- Qin, F., Ding, L., Zhang, L., Monticone, F., Chum, C.C., Deng, J., Mei, S., Li, Y., Teng, J., Hong, M., Zhang, S., Alù, A. and Qiu, C.-W., 2016. Hybrid bilayer plasmonic metasurface efficiently manipulates visible light. *Science Advances*, 2(1), e1501168.
- Rahman, S.U., Ullah, H., Sajjad, M., khan, M.I. and Cao, Q., 2020. Comment on “design and characterization of an ultrabroadband metamaterial microwave absorber”. *IEEE Photonics Journal*, 12(2), 1-4.
- Ramya, S. and Srinivasa Rao, I., 2019. An ultra-thin, bandwidth enhanced metamaterial absorber for x-band applications. *Wireless Personal Communications*, 105(4), 1617-1627.
- Ranjan, P., Choubey, A., Mahto, S.K., Sinha, R. and Barde, C., 2019. A novel ultrathin wideband metamaterial absorber for x-band applications. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 33(17), 2341-2353.
- Rumpf, D.R.C., *Empossible.Net*. (02.01.2021)
- Saçan, E.E.D., 2017. *Metamalzeme sinyal emici tabanlı mikrodalga sensörler*. Yüksek Lisans Tezi , In: *Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü. İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay*.
- Sadiku, M., 2014. *Elements of electromagnetics*. New York, Usa: Oxford University Press.
- Salman, M.S., Khan, M.I., Tahir, F.A. and Rmili, H., 2020. Multifunctional single layer metasurface based on hexagonal split ring resonator. *IEEE Access*, 8, 28054-28063.
- Santos, A.G., Quirino M. Sugon, J. and McNamara, D.J., 2012. Polarization ellipse and stokes parameters in geometric algebra. *J. Opt. Soc. Am. A*, 29.
- Schaefer, B., Collett, E., Smyth, R., Barrett, D. and Fraher, B., 2007. Measuring the stokes polarization parameters. *American Journal of Physics*, 75(2), 163-168.
- Schussler, M., Mandel, C., Puentes, M. and Jakoby, R., 2012. Metamaterial inspired microwave sensors. *Ieee Microwave Magazine*, 13(2), 57-68.
- Sen, G., Kumar, M., Islam, S.N. and Das, S., 2019. Broadband metamaterial absorber on a single-layer ultrathin substrate. *Waves in Random and Complex Media*, 29(1), 153-161.
- Sevgi, L., 1999. *Elektromagnetik problemler ve sayısal yöntemler*. Birsen Yayınları . Istanbul
- Shadrivov, I.V., Kivshar, Y.S., Sukhorukov, A.A. and Neshev, D., 2003. *Wave propagation in structures with left-handed materials*. Australian National University, Australia.

- Shah, S., Shoaib, N., Ahmed, F., Alomainy, A., Quddious, A., Nikolaou, S., Imran, M.A. and Abbasi, Q.H., 2021. A multiband circular polarization selective metasurface for microwave applications. *Sci Rep*, 11(1), 1774.
- Sharma, K.K., 2006. *Optics*. California, USA: Elsevier.
- Shi, H., Li, J., Zhang, A., Wang, J. and Xu, Z., 2014. Broadband cross polarization converter using plasmon hybridizations in a ring/disk cavity. *Optics Express*, 22(17), 20973-20981.
- Singh, A.K., Abegaonkar, M.P. and Koul, S.K., 2017. A negative index metamaterial lens for antenna gain enhancement. In: 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). IEEE: pp: 1-2.
- Smith, D.R., 2000. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Physical Review Letters*, 84(18), 4184-4187.
- Solymar, L. and Shamonina, E., 2009. *Waves in metamaterials*. New York, Usa: Oxford University Press.
- Sood, D. and Tripathi, C.C., 2015. A wideband ultrathin low profile metamaterial microwave absorber. *Microwave and Optical Technology Letters*, 57(12), 2723-2728.
- Soydan, M.C., 2019. Design and analysis of metamaterial based perfect absorbers. M.Sc. , In: Graduate School of Engineering and Science. Bilkent University, Ankara.
- Stokes, G.G., 2009. On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources. In: *Mathematical and physical papers*, G. G. Stokes, (Ed.). Cambridge University Press, Cambridge: pp: 233-258.
- Su, P., Zhao, Y., Jia, S., Shi, W. and Wang, H., 2016. An ultra-wideband and polarization-independent metasurface for rcs reduction. *Sci Rep*, 6, 20387.
- Sy Tuan, T. and Thi Quynh Hoa, N., 2019. Defect induced co-polarization broadband metamaterial absorber. *AIP Advances*, 9(5).
- Takashi Noishiki, R.K., Takeshi Fukusako, 2020. Wideband metasurface polarization converter with double-square-shaped patch elements. *Progress In Electromagnetics Research C*, 105, 47–58.
- Tang, J., Xiao, Z., Xu, K., Ma, X., Liu, D. and Wang, Z., 2016. Cross polarization conversion based on a new chiral spiral slot structure in thz region. *Optical and Quantum Electronics*, 48(2).
- Taravati, S. and Eleftheriades, G.V., 2021. Pure and linear frequency converter temporal metasurface. *Phys. Rev. Applied* 15, 064011
- Tayde, Y., Chaudhary, K., Singh, G., Dhupal, A., Saikia, M., Srivastava, K.V., Ramkumar, J. and Ramakrishna, S.A., 2020. An optically transparent and flexible microwave absorber for x and ku bands application. *Microwave and Optical Technology Letters*, 62(5), 1850-1859.
- Anonymous, 2021 Using the poincare sphere to represent the polarization state. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=14200 (05.05.2021).
- Tiwari, P., Pathak, S.K., V. p, A., Siju, V. and Sinha, A., 2020. X-band γ -shaped anisotropic metasurface-based perfect cross-polarizer for rcs reduction. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 34(7), 894-906.
- Tuan, T.S. and Hoa, N.T.Q., 2019. Numerical study of an efficient broadband metamaterial absorber in visible light region. *IEEE Photonics Journal*, 11(3), 1-10.

- Tuan, T.S., Lam, V.D. and Hoa, N.T.Q., 2019. Simple design of a copolarization wideband metamaterial absorber for c-band applications. *Journal of Electronic Materials*, 48(8), 5018-5027.
- Ur Rahman, S., Ullah, H., Cao, Q., Kabir Khan, M. and Ullah, N., 2021. Comments on “a set square design metamaterial absorber for x band applications”. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 35(8), 1020-1024.
- Ülgü, M., 2017. Anten parametrelerinin İyileştirilmesinde omega şekilli metamatizeme uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi , In: Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü. İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay.
- Veselago, V.G., 1968. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi*, 509-514.
- Wang, J., Lang, T., Hong, Z., Xiao, M. and Yu, J., 2021. Design and fabrication of a triple-band terahertz metamaterial absorber. *Nanomaterials*, 11(5), 1110.
- Wang, J. and Wu, W., 2017. Cavity-based linear-to-circular polarization converter. *Opt Express*, 25(4), 3805-3810.
- Wang, M. and Zhai, Z., 2020. Wide-angle circular polarization converter based on a metasurface of z-shaped unit cells. *Frontiers in Physics*, 8, 425.
- Wheeler, N. and College, R., 1999. Ellipsometry.
- Wilson, T.L., Rohlf, K. and Hüttemeister, S., 2009. Electromagnetic wave propagation fundamentals. In: *Tools of radio astronomy*. pp: 19-37.
- Wu, P.C., Zhu, W., Shen, Z.X., Chong, P.H.J., Ser, W., Tsai, D.P. and Liu, A.-Q., 2017. Broadband wide-angle multifunctional polarization converter via liquid-metal-based metasurface. *Advanced Optical Materials*, 5(7).
- Wu, W., Ren, M.X., Pi, B.A., Cai, W. and Xu, J.J., 2016. Displacement sensor based on plasmonic slot metamaterials. *Applied Physics Letters*, 108(7).
- Xiao, Z., Zou, H., Zheng, X., Ling, X. and Wang, L., 2017. A tunable reflective polarization converter based on hybrid metamaterial. *Optical and Quantum Electronics*, 49(12).
- Xiao, Z.Y., Liu, D.J., Ma, X.L. and Wang, Z.H., 2015. Multi-band transmissions of chiral metamaterials based on fabry-perot like resonators. *Opt Express*, 23(6), 7053-7061.
- Xu, H.-X., Wang, G.-M., Qi, M.-Q. and Cai, T., 2013. Dual-band circular polarizer and asymmetric spectrum filter using ultrathin compact chiral metamaterial. *Progress In Electromagnetics Research*, 143, 243-261.
- Xu, J., Li, R., Qin, J., Wang, S. and Han, T., 2018. Ultra-broadband wide-angle linear polarization converter based on h-shaped metasurface. *Opt Express*, 26(16), 20913-20919.
- Xu, J., Li, R., Wang, S. and Han, T., 2018. Ultra-broadband linear polarization converter based on anisotropic metasurface. *Opt Express*, 26(20), 26235-26241.
- Xu, K.-k., Xiao, Z.-y. and Tang, J.-y., 2016. Linearly polarized converters for reflected and transmitted waves based on double-split ring resonator. *Plasmonics*, 12(6), 1869-1874.
- Xu, L. and Huang, J., 2019. Metamaterials for manipulating thermal radiation: Transparency, cloak, and expander. *Physical Review Applied*, 12(4), 044048.
- Xu, P., Wang, S.-Y. and Geyi, W., 2017. A linear polarization converter with near unity efficiency in microwave regime. *Journal of Applied Physics*, 121(14).

- Yadav, V.S., Ghosh, S.K., Das, S. and Bhattacharyya, S., 2018. Wideband tunable mid-infrared cross- polarisation converter using monolayered graphene- based metasurface over a wide angle of incidence. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 13(1), 82-87.
- Yalduz, H., 2020. Kablosuz vücut alan ağ uygulamaları İçin metamalzeme destekli mikroşerit antenlerin tasarım ve üretimi. Doktora Tezi , In: Fen Bilimleri Enstitüsü. Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Yılmaz, İ., 2018. Bİlanizotropik metamalzemelerin eşdeğer lc devresi modellemesi. Yüksek Lisans Tezi ,In: Fen Bilimleri Enstitüsü. Ataturk Üniversitesi, Erzurum.
- Yin, L. and Tian, X., 2021. 3d printing and characterization of metamaterial composite structures for absorbing and shielding electromagnetic waves. In: *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing: pp: 012026.
- Yu, B., Zhao, Y., Chen, J., Ge, Y. and Chen, X., 2019. Broadband transparent metamaterial absorber in wireless communication band based on indium tin oxide film. *International Journal of RF and Microwave Computer- Aided Engineering*, 29(12), e21955.
- Yüksel, K.G., 2019. Yönden bağımsız metamalzeme soğurucu. Yüksek Lisans , In: Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara Üniversitesi, Ankara.
- Z.Hafdi, S.Zemouli and A.Chaabi, 2013. Retrieval of effective parameters of left handed materials by using different approaches. 2013 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO) , Bursa .
- Zani, M., Jusoh, M., Sulaiman, A., Baba, N., Awang, R. and Ain, M., 2010. Circular patch antenna on metamaterial. In: 2010 International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications. IEEE: pp: 313-316.
- Zhang, L., Zhou, P., Lu, H., Zhang, L., Xie, J. and Deng, L., 2016. Realization of broadband reflective polarization converter using asymmetric cross-shaped resonator. *Optical Materials Express*, 6(4).
- Zhang, Z., Cao, X., Gao, J. and Li, S., 2016. Broadband metamaterial reflectors for polarization manipulation based on cross/ring resonators. *Radioengineering*, 25(3), 436-441.
- Zhang, Z., Wang, J., Fu, X., Jia, Y., Chen, H., Feng, M., Zhu, R. and Qu, S., 2021. Single-layer metasurface for ultra-wideband polarization conversion: Bandwidth extension via fano resonance. *Sci Rep*, 11(1), 585.
- Zhao, J. and Cheng, Y., 2016. A high-efficiency and broadband reflective 90° linear polarization rotator based on anisotropic metamaterial. *Applied Physics B*, 122(10).
- Zheng, Q., Guo, C. and Ding, J., 2018. Wideband metasurface-based reflective polarization converter for linear-to-linear and linear-to-circular polarization conversion. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17(8), 1459-1463.
- Zheng, Q., Guo, C., Yuan, P., Ren, Y.-H. and Ding, J., 2018. Wideband and high-efficiency reflective polarization conversion metasurface based on anisotropic metamaterials. *Journal of Electronic Materials*, 47(5), 2658-2666.
- Zhou, Q., Yin, X., Ye, F., Mo, R., Tang, Z., Fan, X., Cheng, L. and Zhang, L., 2019. Optically transparent and flexible broadband microwave metamaterial absorber with sandwich structure. *Applied Physics A*, 125(2), 131.
- Zhu, R., Wang, J., Xu, C., Feng, M., Sui, S., Wang, J., Qiu, T., Zhang, L., Jia, Y., Zhang, Z. and Qu, S., 2020. Integrated design of single-layer multispectral metasurface with broadband microwave polarization rotation and low infrared emissivity. *Infrared Physics & Technology*, 111.

- Zhu, W., 2018. 7. Electromagnetic metamaterial absorbers: From narrowband to broadband. In: *Metamaterials and metasurfaces*, J. Canet-Ferrer, (Ed.).
- Zou, M., Su, M. and Yu, H., 2020. Ultra-broadband and wide-angle terahertz polarization converter based on symmetrical anchor-shaped metamaterial. *Optical Materials*, 107, 110062.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Fatih TUTAR
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Erbil Koru Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	