

ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇOK FONKSİYONLU METAYÜZEYLER:
POLARİZASYON DÖNÜŞÜMÜ VE YÖNLÜ İLETİM

Nuriye Çiğdem ÇEKİÇ ÖTENEL

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2024

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇOK FONKSİYONLU METAYÜZEYLER: POLARİZASYON DÖNÜŞÜMÜ VE YÖNLÜ İLETİM

Nuriye Çiğdem ÇEKİÇ ÖTENEL

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi İlyas Evrim ÇOLAK

Metamalzemeler, doğada kendiliğinden bulunmayan elektromanyetik dalgaların davranışını özelleştirmek için tasarlanmış özel malzemelerdir. Metamalzemelerin; anten teknolojisi, savunma sanayi teknolojileri, uzay teknolojileri, görünmezlik teknolojisi, radyo frekansı ve mikrodalga cihazları, tıbbi görüntüleme, lensler ve optik cihazlar gibi geniş kullanım alanları bulunmaktadır. Metamalzemelerin kullanımı; yüksek kayıplar, rezonans tepkileriyle bağlantılı güçlü saçılım ve nano ölçekli üç boyutlu yapıların üretimindeki güçlükler nedeni ile zorlu hale gelmiştir. Meta yüzeyler, geçmişten bu yana alışlagelmiş metamalzemelerin kısıtlamalarına karşı çözüm sunan ve aynı zamanda bu malzemelerin bütün özelliklerini içeren iki boyutlu metamalzemeler olarak tanımlanmaktadır. Son birkaç yıl içerisinde meta yüzeyler; alışlagelmiş kırınımlı optik öğelerin icraatını aşan özelliklere sahip optik sistemlerin tasarımı ve üretilmesinde kullanılmaktadır. Bir elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşen yönü yayının polarizasyon yönünü belirler. Antenler kendi tasarımlarından farklı polarizasyona sahip elektromanyetik dalgaları aldıkları zaman alınan sinyalin gücünde kayıplar yaşanır. Antenlere entegre metamalzeme yapıları tasarlanıp antenlerin daha verimli çalışmaları sağlanabilmektedir. Elektronik harp alanında kullanılan Elektronik Destek (ED) sistemlerinin, tehdit radarlardan yayılan sinyalleri en doğru biçimde algılaması ve kimliklendirmesi beklenmektedir. Polarizasyondan kaynaklı sinyal gücü kayıpları yaşandığı zaman; tehdit radarlardan yayılan sinyaller ED sistemleri tarafından hiç algılanamayabilir ya da tehdit radarlardan yayılan sinyal darbeleri kayıplı olarak algılanabilir ve sonrasında tehdit radarlar ED sistemleri tarafından doğru olarak kimliklendirilemeyebilir. Bu önemli bir problemdir ve elektronik harp üzerindeki etkisi dramatik olabilir. Bu tez çalışmasındaki amaç; polarizasyon kaybını azaltarak tek yönlü polarizasyon geçişi sağlayan ve antenlerle beraber çalışabilen, dolayısıyla ED sistemlerinde kullanılacak örnek bir tasarım yapmaktır. Çalışmada; CST Studio Suite programı kullanılarak, lineer elektromanyetik dalga polarizasyonunu 90 derece değiştirebilen kiral yapı ve sonrasında lineer yatay polarizasyonu geçiren fakat lineer dikey polarizasyonu durduran Jerusalem meta yüzey filtre yapısı tasarlanıp ayrı ayrı benzetimleri yapılmıştır. Daha sonra bu iki yapının birlikte kullanıldığı ve diyot özelliği gösteren tek yönlü elektromanyetik dalga iletiminin sağlandığı bütünleşik yapının benzetimi yapılmıştır. İlk yapılan benzetim sonuçlarını daha verimli hale getiren başarımlı iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiş olup yapının daha verimli çalışması sağlanmıştır. Benzetim sonuçları tezin içerisinde yer almaktadır.

Ekim 2024, 55 sayfa

Anahtar Kelimeler: Metamalzeme, Meta yüzeyler, Kiral yapı, Polarizasyon kaybı, Polarizasyon filtresi, Polarizasyon dönüşümü, Lineer Polarizasyon, Elektronik Harp

ABSTRACT

Master Thesis

MULTIFUNCTIONAL METASURFACES: POLARIZATION TRANSFORMATION AND DIRECTIONAL TRANSMISSION

Nuriye ıgdem EKI OTENEL

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Science
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. İlyas Evrim OLAK

Metamaterials are special materials designed to customize the behavior of electromagnetic waves that do not occur spontaneously in nature. Metamaterials are widely used in antenna technology, defense industry technologies, space technologies, stealth technology, radio frequency and microwave devices, medical imaging, lenses and optical devices. The use of metamaterials has become challenging due to high losses, strong scattering associated with resonant responses and difficulties in fabricating nanoscale three-dimensional structures. Metasurfaces have historically been defined as two-dimensional metamaterials that offer a solution to the limitations of conventional metamaterials while at the same time incorporating all the properties of these materials. In the last few years, metasurfaces have been used to design and fabricate optical systems with properties that exceed the performance of conventional diffractive optical elements. The polarization direction of an electromagnetic wave is dictated by the orientation of its electric field component. When antennas receive electromagnetic waves with polarization different from their design, there is a loss of received signal power. Metamaterial structures integrated into antennas can be designed to make antennas work more efficiently. Electronic Support (ES) systems used in the field of electronic warfare are expected to accurately detect and identify signals emitted from threat radars. When there are signal power losses due to polarization, the signals emitted by threat radars may not be detected at all by ES systems, or the signal pulses emitted by threat radars may be detected lossy and then the threat radars may not be correctly identified by ES systems. This is a significant problem and its impact on electronic warfare can be dramatic. The aim of this thesis is to make a sample design that provides unidirectional polarization transition by reducing polarization loss and can work with antennas, and therefore can be used in ED systems. In the study; Using the CST Studio Suite program, a chiral structure that can change linear electromagnetic wave polarization by 90 degrees and then a Jerusalem metasurface filter structure that passes linear horizontal polarization but stops linear vertical polarization were designed and their simulations were made separately. Then, the integrated structure where these two structures are used together and unidirectional electromagnetic wave transmission is provided, showing diode properties, was simulated. Performance improvement works that made the first simulation results more efficient were carried out and the structure was made to work more efficiently. The simulation results are included in the thesis.

October 2024, 55 pages

Keywords: Metamaterial, Metasurfaces, Chiral Structure, Polarization loss, Polarization filter, Polarization transformation, Linear Polarization, Electronic Warfare

TEŞEKKÜR

Bu alıőmanın yürütölmesinde benden bilgisini, tecrübesini ve desteğini esirgemeyen saygıdeğer danıőmanım Dr. Öğr. Üyesi İlyas Evrim ÇOLAK ve saygıdeğer eő danıőmanım Asst. Prof. Dr. Atilla Özgür ÇAKMAK'a,

Bu çalıőmanın amacının oluşumunda katkısı olan çalıőtığım kurum TÜBİTAK BİLGEM İLTAREN'e,

Hayatta var olmamı sağlayan ve hayatım boyunca beni her konuda destekleyen annem Güllü ÇEKİÇ ve babam Ömer ÇEKİÇ'e,

Hayatım boyunca yan yana olduğumuz büyük destekçilerimden kardeşlerim Burak ÇEKİÇ ve Ayőe BALCI ASLAN'a,

Bu alıőma dahil hayatımın her alanında beni destekleyen ve yardımlarını esirgemeyen sevgili eőim Mert ÖTENEL'e,

Son olarak, varlığıyla hayatımı güzelleőtiren sevgili oğlum Marsel ÖTENEL'e,

Sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Nuriye ığdem ÇEKİÇ ÖTENEL
Ankara, Ekim 2024

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI	
ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAVRAMSAL MODELLER	3
2.1 Elektromanyetik Metamalzemelerin Teorisi.....	3
2.2 Metamalzemeler ve Diğer Yapay Malzemeler	6
2.2.1 Doğal olmayan dielektrikler.....	6
2.2.2 Fotonik bant aralığı malzemeleri.....	8
2.2.3 Yapay kiral malzemeler.....	9
2.3 Meta Yüzeyler.....	12
2.4 Elektromanyetik Dalga Polarizasyonu.....	13
2.5 Elektronik Harpte Polarizasyonun Önemi	18
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	21
3.1 Çalışmada Kullanılan Kiral Yapı.....	22
3.2 Çalışmada Kullanılan Jerusalem Metamalzeme Filtre Yapısı	25
4. TEK YÖNLÜ ELEKTROMANYETİK DALGA İLETİMİNİ SAĞLAYAN BÜTÜNLEŞİK YAPI VE ELEMANLARININ TASARIMI	28
4.1 Kiral Yapı Tasarımı.....	28
4.2 Jerusalem Filtre Yapısı.....	34
4.3 Tek Yönlü Elektromanyetik Dalga İletimini Sağlayan Bütünleşik Yapının Tasarımı	38
5. BAŞARIM İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARI.....	40
5.1 Kiral Yapı Üzerinde Yapılan Başarım İyileştirme Çalışmaları	40
5.2 Jerusalem Filtre Yapısı Üzerinde Yapılan Başarım İyileştirme Çalışmaları....	42
5.3 Başarım İyileştirme Çalışması Yapılan Tek Yönlü Elektromanyetik Dalga İletimini Sağlayan Bütünleşik Yapı Sonuçları.....	45
6. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	51
KAYNAKLAR	52
ÖZGEÇMİŞ.....	55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ϵ	Elektrik geçirgenlik
μ	Manyetik geçirgenlik
\vec{E}	Elektrik alan vektörü
\vec{H}	Manyetik alan vektörü
\vec{k}	Dalga yayılma vektörü
\vec{P}	Poynting vektörü
ω	Açısal frekans
\vec{D}	Elektrik yer değiştirme vektörü
B	Manyetik akı yoğunluğu
K	Kiralite parametresi
η	Kırılma indisi
c_0	Vakumdaki ışık hızı
Z	Ortamin dalga empedansıdır
λ	Dalga boyu
δ	Faz açısı
L	Endüktans
C	Kapasitans
β	Faz sabiti
η	Ortamin içsel empedansı

Kısaltmalar

CST	Computer Simulation Technology
ED	Elektronik Destek
ES	Electronic Support
EM	Elektromanyetik
LH	Left-Handed
RH	Right-Handed
LHM	Left-Handed Material
RHM	Right-Handed Material
LCP	Left-Hand Circular Polarization
RHP	Right-Hand Circular Polarization
RWR	Radar Warning Receiver
GVD	Görev Veri Dosyası
PBG	Photonic Band Gap
EBG	Electromagnetic Band Gap
ORD	Optical Rotational Dispersion
CD	Circular Dichroism

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 (a) Sağ elli malzemede (RHM) ve (b) Sol elli malzemede (LHM) E, H ve K vektör üçlüsü.....	4
Şekil 2.2 Doğal malzeme ile metamalzemenin karşılaştırılması: (a) Doğal malzeme ve (b) Metamalzeme	5
Şekil 2.3 Hareket halindeki bir elektromanyetik dalgaya ait elektrik alan ve manyetik alan vektörleri (Verhoeven, 2017)	13
Şekil 2.4 Durağan bir zaman anında düzlemsel bir dalgaya ait, elektrik ve manyetik alanların uzaysal davranışı ve Z eksenindeki hareketi ($n = z$) (Stutzman, 2018)	15
Şekil 2.5 Elektrik alana ait yatay ve dikey bileşenlerin izafi genlik ve fazı polarizasyon elipsinin biçim ve yönelme durumları	16
Şekil 2.6 Sabit bir zaman anında sol el dairesel polarize dalganın perspektif görünümü. Hareket yönü +z ekseninde ve buna dik sabit bir düzlemde dönen elektrik alan vektörünün zamanla değişimi (Stutzman, 2018)	17
Şekil 2.7 Aynı polarizasyona sahip sistemlerdeki durum (Electronic Warfare Fundamentals, 2000).....	20
Şekil 2.8 Farklı polarizasyona sahip sistemlerdeki durum (Electronic Warfare Fundamentals, 2000).....	20
Şekil 3.1 Tez çalışmasındaki yapının mantığı	21
Şekil 3.2 Tek katmanlı kiral materyalin birim hücresi (Li vd, 2010)	23
Şekil 3.3 Çift katmanlı kiral yapının polarizasyon dönüşüm şeması (Li vd, 2010).....	23
Şekil 3.4 Sağ ve sol el dairesel polarize dalgaların tek tabakalı kiral materyaldeki iletim tayfları (Li Vd, 2010)	23
Şekil 3.5 Benzetim sonuçları: (a) Dört farklı yapılandırma için sağ el ve sol el polarize dalgaların iki kiral tabaka beraberince transfer tayfları ve bunların referans vaziyetleri (b) Çift katmanlı materyalin kiral polarizasyon dönüş açısı ve tek katmanlı kiral.....	25
Şekil 3.6 THz frekans mertebesinde çalışan jerusalem metamalzeme filtre Yapısı (Kim vd, 2020).....	26
Şekil 3.7 jerusalem filtre yapısının thz mertebesindeki iletim spektrumu (Kim vd, 2020)	26
Şekil 3.8 Jerusalem filtre yapısının thz mertebesindeki faz değişimi (Kim vd, 2020).....	27
Şekil 4.1 Tasarımdaki tek katmanlı kiral yapı görüntüsü	28
Şekil 4.2 Sağ el ve sol el polarize dalgalarının tasarımıdaki tek tabakalı kiral boyunca transform tayfi	31

Şekil 4.3 Tasarımdaki tek katmanlı kiral yapının polarizasyon dönüş açısı	31
Şekil 4.4 RCP ve LCP dalgalarının tasarımdaki 1 mm mesafeli çift katmanlı kiral yapı boyunca iletim spektrumu	32
Şekil 4.5 RCP ve LCP dalgalarının tasarımdaki 4 mm mesafeli çift katmanlı kiral yapı boyunca iletim spektrumu	32
Şekil 4.6 RCP ve LCP dalgalarının tasarımdaki 9 mm mesafeli çift katmanlı kiral yapı boyunca iletim spektrumu	33
Şekil 4.7 RCP ve LCP dalgalarının tasarımdaki 14 mm mesafeli çift katmanlı kiral yapı boyunca iletim spektrumu	33
Şekil 4.8 Tasarımdaki çift katmanlı kiral yapının polarizasyon dönüş açısı.....	34
Şekil 4.9 Tasarımdaki jerusalem filtre yapısı.....	35
Şekil 4.10 Ön görünümünden yatay polarize dalga için meta yüzeyin eşdeğer devresi	35
Şekil 4.11 Ön görünümünden dikey polarize dalga için meta yüzeyin eşdeğer devresi	36
Şekil 4.12 Tasarımdaki Jerusalem filtre yapısının iletim spektrumu	37
Şekil 4.13 Tasarımdaki Jerusalem filtre yapısının faz değişimi	37
Şekil 4.14 Tek yönlü elektromanyetik dalga iletimini sağlayan bütünleşik yapı.....	38
Şekil 4.15 Önce kiral yapı daha sonra filtreden geçen elektromanyetik dalganın iletim spektrumu	39
Şekil 4.16 Önce filtre daha sonra kiral yapıdan geçen elektromanyetik dalganın iletim spektrumu	39
Şekil 5.1 İyileştirilmiş tek katmanlı kiral yapının iletim spektrumu (T _{xy} : Dikey polarize dalga gönderildi, yatay polarizede ölçüm alındı. T _{yy} : Dikey polarize dalga gönderildi, dikey polarizede ölçüm alındı.).....	41
Şekil 5.2 İyileştirilmiş tek katmanlı kiral yapının iletim spektrumu II (T _{xy} : Dikey polarize dalga gönderildi, yatay polarizede ölçüm alındı. T _{yy} : Dikey polarize dalga gönderildi, dikey polarizede ölçüm alındı.).....	42
Şekil 5.3 İyileştirilmiş Jerusalem filtre görseli	43
Şekil 5.4 İyileştirilmiş Jerusalem filtre yapısının iletim spektrumu (T _{xx} : Yatay polarize dalga gönderildi, yatay polarizede ölçüm alındı. T _{yy} : Dikey polarize dalga gönderildi, dikey polarizede ölçüm alındı.).....	44
Şekil 5.5 İyileştirilmiş Jerusalem filtre yapısının iletim spektrumu II (T _{xx} : Yatay polarize dalga gönderildi, yatay polarizede ölçüm alındı. T _{yy} : Dikey polarize dalga gönderildi, dikey polarizede ölçüm alındı.).....	45
Şekil 5.6 Tek yönlü elektromanyetik dalga iletimini sağlayan bütünleşik yapıda dalga gönderim yönü.....	46

Şekil 5.7 Soldan ve sağdan dikey polarize yayın gönderilen tek yönlü elektromanyetik dalga iletimini sağlayan bütünleşik yapıdaki iletim spektrumu (Txy: Yatay polarize dalga gönderildi, yatay polarizede ölçüm alındı. Tyy: Dikey polarize dalga gönderildi, dikey polarizede ölçüm alındı.)	47
Şekil 5.8 Soldan ve sağdan yatay polarize yayın gönderilen tek yönlü elektromanyetik dalga iletimini sağlayan bütünleşik yapıdaki iletim spektrumu (Txx: Yatay polarize dalga gönderildi, yatay polarizede ölçüm alındı. Tyx: Dikey polarize dalga gönderildi, dikey polarizede ölçüm alındı.)	48
Şekil 5.9 Soldan ve sağdan dikey polarize yayın gönderilen tek yönlü elektromanyetik dalga iletimini sağlayan bütünleşik yapıdaki iletim spektrumu II (Txy: Yatay polarize dalga gönderildi, yatay polarizede ölçüm alındı. Tyy: Dikey polarize dalga gönderildi, dikey polarizede ölçüm alındı.)	49
Şekil 5.10 Soldan ve sağdan yatay polarize yayın gönderilen tek yönlü elektromanyetik dalga iletimini sağlayan bütünleşik yapıdaki iletim spektrumu II (Txx: Yatay polarize dalga gönderildi, yatay polarizede ölçüm alındı. Tyx: Dikey polarize dalga gönderildi, dikey polarizede ölçüm alındı.)	50

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Anten polarizasyon kaybı yüzdeleri (Electronic Warfare Fundamentals, 2000). 19	19
Çizelge 3.1 Referans alınan kiral geometrik boyutları materyalin..... 22	22
Çizelge 5.1 İyileştirilmiş kiral yapının geometrik boyutları 40	40



1. GİRİŞ

Son 10 senede metamateryallere olan ilgi ve çalışmalar giderek artmaktadır. Metamateryaller zaman zaman bu alanda çalışan çoğu kişiler tarafından negatif indeksli materyaller olarak benimsenmektedir. Gerçekten de bu ilgi çekici çalışma alanındaki hızlı gelişimler, gelecekteki nanoteknoloji ve malzeme bilimindeki gelişmelerde kilit bir rol oynamakla birlikte daha önce mümkün olmayan teknolojik çözümlerin geliştirilmesine zemin hazırlayabilir. Metamateryal konsepti 2000 senesinden önce Austin şehrinde bulunan Texas Üniversitesi'nde tasarlanmıştır. Bu tasarımın öncüsü Rodger M. Walser olmuştur. Walser metamateryal'in belli dürtüye birden çok cevabın çevrede var olmayan ve en iyi verimliliğe ulaştırılmış bir çeşitlenimi sağlamak amacıyla dizayn edilmiş yapay bileşim malzemesi olduğunu söyleyip bu malzemenin 3D yapıya sahip olduğunu ve tasarımının tekrar eden bölmelerden oluştuğunu, boyutunun ise makroskobik düzeyde olduğunu belirtmiştir. Online kaynaklarda ve çeşitli literatür çalışmalarında metamateryalin spesifikasyonları hakkında bahsedilirken bunun büyük ölçüde yapısından kaynaklı olduğu belirtilmektedir. Dahası metamateryali oluşturan kompozit bileşenlerin, metamateryalin spesifikasyonlarını daha az etkilediğinden bahsedilmektedir. Yukarıda bahsedilen ifadeleri özetlemek gerekirse; metamateryaller fonsiyonu ya da görevi öncelikli olarak yapısal tasarımıyla ilişkili olacak şekilde tekrar eden veya etmeyen bölmeli konstrüksiyonlara ve kimyevi bileşenlerine bağlıdır.

Metamateryal içerisine nüfus eden EM dalganın özelliklerinin değiştirilebilmesi için dalga boyu önemli bir husustur. Bu yüzden metamateryal taneciğinin en fazla dalga boyunda olması gerekmektedir (Cui vd. 2009).

Genel olarak anten tasarımı yaparken verimini yükseltmek amacıyla birçok yöntem önerisi yapılmış olup, metamalzemelerin kullanılması da bu yöntemler arasında bulunmaktadır. Bu malzemelerin benzersiz özellikleri, geleneksel antenler kullanılarak elde edilemeyen yüksek performanslı antenlerin tasarlanabilmesidir (Kumar vd. 2021).

Anten tasarımındaki en önemli faktörlerden biri polarizasyondur. EM dalga; frekans, dalganın hareket yönü, yoğunluk ve polarize olma durumu olmak üzere dört temel ve

önemli fenomenle ilişkilendirilebilmektedir. Bu fenomenler arasında polarizasyon genellikle göz ardı edilmektedir. Bunun sebebi polarizasyonun sistem tasarımları açısından önemiyetinin yeterince anlaşılammış olmasıdır. Polarizasyonun önemi; anten üretiminden sonraki test aşamasında ya da en önemlisi anten üretimi yapılmadan önce tasarımı yapan yazılımlar ile elde edilen performans sonuçlarına göre değerlendirilmektedir. Bunun sonucunda anten ve kullanıldığı sistem açısından en yüksek verim elde edilebilmektedir (Stutzman, 2018).

Elektronik harp alanında kullanılan Elektronik Destek (ED) sistemlerinin, tehdit radarlardan yayılan sinyalleri en doğru biçimde algılaması ve kimliklendirmesi beklenmektedir. Polarizasyondan kaynaklı sinyal gücü kayıpları yaşandığı zaman; tehdit radarlardan yayılan sinyaller ED sistemleri tarafından hiç algılanamayabilir ya da tehdit radarlardan yayılan sinyal darbeleri kayıplı olarak algılanabilir ve sonrasında tehdit radarlar ED sistemleri tarafından doğru olarak kimliklendirilemeyebilir. Bu önemli bir problemdir ve elektronik harp üzerindeki etkisi dramatik olabilir.

Bu tez çalışmasındaki amaç; polarizasyon kaybını azaltarak tek yönlü polarizasyon geçişi sağlayan ve antenlerle beraber çalışabilen, dolayısıyla ED sistemlerinde kullanılacak örnek bir tasarım yapmaktır. Çalışmada; CST Studio Suite programı kullanılarak, lineer elektromanyetik dalga polarizasyonunu 90 derece değiştirebilen kiral yapı ve sonrasında lineer yatay polarizasyonu geçiren fakat lineer dikey polarizasyonu durduran Jerusalem meta yüzey filtre yapısı tasarlanıp ayrı ayrı benzetimleri yapılmıştır. Daha sonra bu iki yapının birlikte kullanıldığı ve diyot özelliği gösteren tek yönlü elektromanyetik dalga iletiminin sağlandığı bütünleşik yapının benzetimi yapılmıştır. İlk yapılan benzetim sonuçlarını daha verimli hale getiren başarımlı iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiş olup yapının daha verimli çalışması sağlanmıştır. Benzetim sonuçları tezin içerisinde yer almaktadır.

2. KAVRAMSAL MODELLER

2.1 Elektromanyetik Metamalzemelerin Teorisi

Metamalzemeler, doğada mevcut olmayan ve olağandışı elektromanyetik (EM) özellikler sergileyen yapay olarak tasarlanmış homojen malzemelerdir. Bu malzemeler; doğada var olan döküm malzemelerin ötesinde, gelen EM dalgaları birçok şekilde değiştirebilme davranışı sergileyebilmektedir. Yunanca "meta" kelimesi "ötesinde" anlamı taşır ve "metamalzeme" terimi, mevcut malzemelerin ötesinde özelliklere sahip olan bu tür malzemeleri sınıflandırma amacıyla kullanılır (Singh vd, 2021).

1960'ların sonunda önerilen, optik özelliklere sahip kompozit malzemeler, mükemmel mercekleme yeteneği olduğu söylemleri ile dikkat çekmiştir. 1968 yılında ise Rus fizikçi Victor Veselago metamalzemelerin çalışmalarda artık kullanılabileceğinden bahsetmiştir. Aynı anda negatif dielektrik geçirgenlik (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) değerlerine sahip birçok maddeyi teorik olarak detaylıca araştırmış; bununla birlikte elektrik alanının (\vec{E}), manyetik alanının (\vec{H}) ve dalga yayılma vektörünün (\vec{k}) sol eli ortogonal bir küme oluşturduğu bir ortamın var olduğunu öngörmüştür (Veselago, 1968).

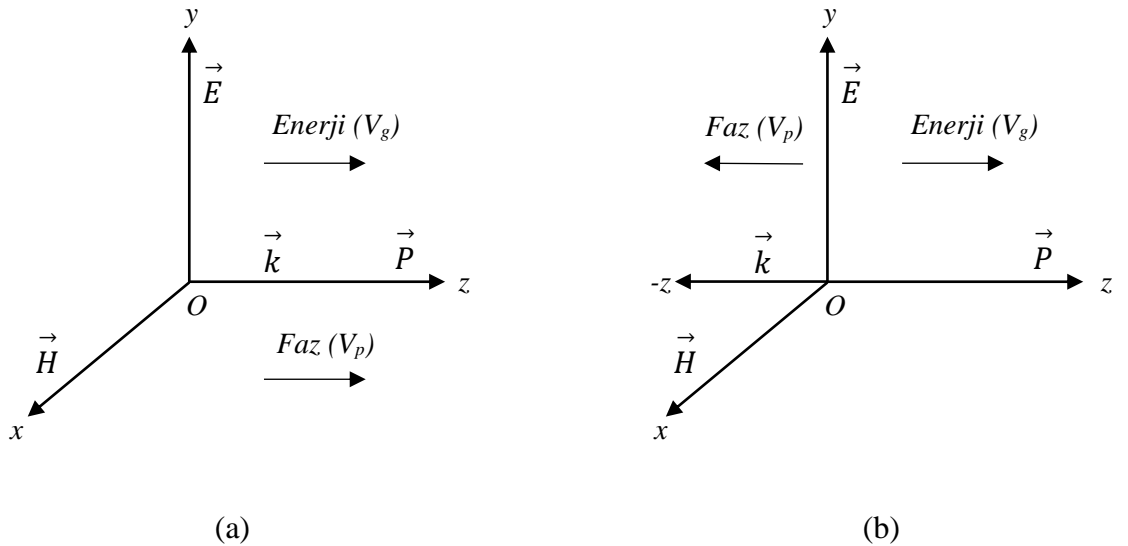
Metamalzemeler, elektriksel olarak küçük rezonatörlerin çeşitli şekillerde tasarlanıp birleştirilmesi ile oluşturulur (Pendry vd, 1999). Negatif geçirgenlik ve negatif kırılma indisi davranışı gösterebilmesi sonucunda metamalzemelerin kırılma ve yansıma özellikleri ortaya çıkmaktadır (Pendry, 2000).

Snell'in kırılma yasası göz önünde bulundurulur ise; gelen bir elektromanyetik dalga RH (sağ eli) ortamı olarak adlandırılan az yoğun ortamdan daha yoğun bir RH ortama girdiğinde, dalga normalden $+\theta_r$ açı kadar kırılarak yüzeye döner. LH ortamının negatif kırılma indisine sahip olması sebebi ile; dalga az yoğun olan RH ortamından daha yoğun olan LH (sol el) ortamına doğru ilerlediğinde $-\theta_r$ açısı kadar kırılarak bükülür. Yayılan bir dalganın \vec{k}_{LH} ile gösterilen bir dalga kümesindeki kendi dalga alanlarının yayılımını betimleyen faz hızının (V_p), Poynting vektörü (\vec{P}_{LH}) ile temsil edilen dalganın enerji

akısının hareketine ters olması negatif kırılma indisi olarak tanımlanabilmektedir (Kar, 2023).

Negatif kırılma; süper lensler veya mükemmel lensler için son derece önemli bir çalışma alanı yaratmıştır. Örneklendirecek olur isek; hava gibi $n = +1$ kırılma indisli RH malzemeler ışınları kırılmaz, dolayısı ile mercek gibi davranamaz. Bunun aksine $n = -1$ olan kavisli ya da düzlem LH malzemeler ışınları kırabilme yeteneğine sahiptir ve mercek gibi davranabilmektedir. Metamalzemeler ile mümkün olabilen negatif indeksli malzemeler son yirmi yıl boyunca çeşitli alanlarda kullanılarak zengin bir çalışma alanı oluşturmuştur. Yayılan dalgalar için RH ortamında normal Doppler etkisi gözlenir iken, LH ortamında ters Doppler etkisi gözlenmektedir. Elektron ve proton gibi temel parçacıklar; RH ortamında hareket ettiğinde parçacık ve Čerenkov radyasyonu $+z$ yönünde, LH ortamında hareket ettiğinde ise Čerenkov radyasyonu $-z$ yönünde hareket edecektir (Kar, 2023).

Hem negatif ϵ ve hem de negatif μ değerlerine sahip doğal malzeme ya da bileşik gösterilmiş değildir. Veselago aynı anda negatif ϵ ve μ değerlerine sahip olan metamalzemelere “sol elli malzemeler” olarak adlandırmıştır (Veselago, 1968).



Şekil 2.1 (a) Sağ elli malzemede (RHM) ve (b) Sol elli malzemede (LHM) E, H ve K vektör üçlüsü

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi RH malzemede elektromanyetik dalga ile k vektörü Poynting vektör yönü (+ z) ile aynı olur iken, LH malzemede k vektörü Poynting vektör yönünün (-z) tersinde kalacaktır (Kar, 2023).

RH ve LH malzemede E, H ve k vektör üçlü oluşumlarının Maxwell denklemlerinden kaynaklandığı ifade edilebilir. 2.1 ve 2.2’de görüldüğü gibi Maxwell’in düzlem monokromatik dalga denklemi baz alındığında; ϵ ve μ ’nün her ikisi de pozitif olan RH malzeme için \vec{E} , \vec{H} ve \vec{k} bir RH üçlüsü oluşturur, ancak LH malzeme için ϵ ve μ aynı anda negatif olduğundan \vec{E} , \vec{H} ve \vec{k} bir LH üçlüsü oluşturacaktır (Kar, 2023).

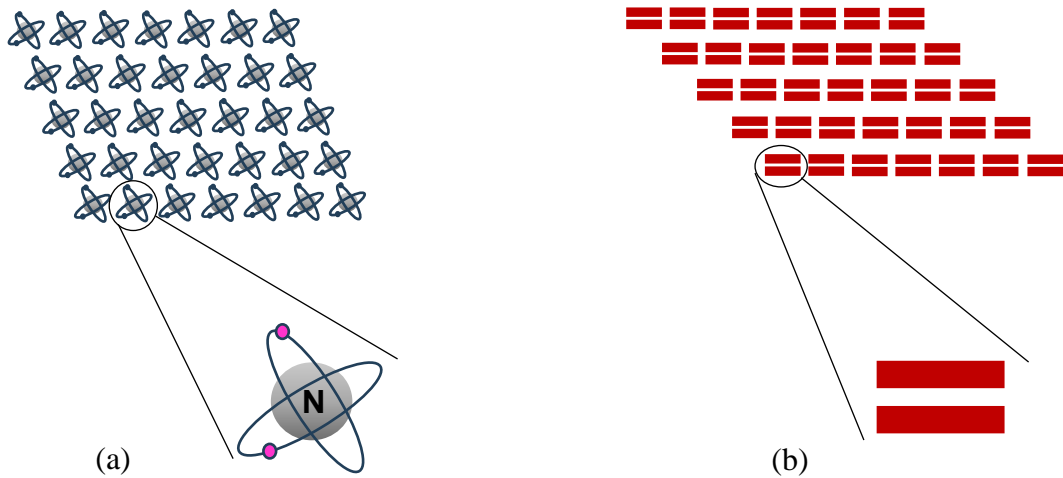
$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega\mu\vec{H} \quad 2.1$$

$$\vec{k} \times \vec{H} = -\omega\epsilon\vec{E} \quad 2.2$$

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} \quad 2.3$$

Ancak, 2.3’te Poynting vektörü tarafından verilen enerji akış yönü ortamın geçirgenlik parametreleri ϵ ve μ ’ye bağlı değildir ve bu nedenle hem RH malzeme hem de LH malzeme için aynı +z yönünde kalır (Kar, 2023).

Metamalzemeler diğer adıyla LH malzemeler, Şekil 2.2’de görüleceği üzere, doğal malzemeyi taklit eden, mikro ve nano ölçekte tekrarlayan desene sahip yeni ve işlevsel bir malzemedir (Kar, 2023)



Şekil 2.2 Doğal malzeme ile metamalzemenin karşılaştırılması: (a) Doğal malzeme ve (b) Metamalzeme

Yapay olarak tasarlanmış bu kompozit malzemeler, özelliklerini yapıldıkları doğal malzemelerin kimyasal bileşiminden ziyade, içlerindeki mikro ve nano yapılardan almaktadır. Atom ve moleküller, bunların dizilimi, doğal malzemelerin elektromanyetik özelliklerini belirlerken, metamalzeme ya da insan yapımı bu yapay malzemelerdeki tekrarlı yapılar, doğal kristallerdeki atomların, “elektrik atom” ya da “manyetik atom” özelliklerini taklit ederek yeni işlevleri mümkün kılar (Kar, 2023). Bu özellikleri bazıları şöyle sıralanabilir: “görünmezlik pelerini”, “teorik sınırın üstündeki çözünürlükte görüntüleme” v.b.

2.2 Metamalzemeler ve Diğer Yapay Malzemeler

Yapay malzemelerin başlangıcı, 1898 yılında bulunan radyo dalgalarının kutuplaşma düzleminin insan yapımı bükülmüş jüt yapılar tarafından döndürülmesine (günümüz tanımlamasıyla, yapay kiral yapılara) ilişkin çalışmasını yayınlayan, Kalküta Üniversitesi Başkanlık Koleji'nden Jagadish Chandra Bose'nin çalışmalarına kadar uzanmaktadır (Bose, 1898). Bunu, rastgele yönlendirilmiş küçük tel sarmalların bir araya gelmesiyle oluşan yapay kiral ortamlara dair Karl Ferdinand Lindman'ın çalışması izlemiştir (Lindman, 1920). Bir ortamın etkin kırılma indisi, yapay malzemeleri taklit etmek üzere disk, küre ve şeritlerin periyodik olarak yerleştirilmesiyle değiştirilebilmiştir (Kock, 1946). Daha sonra yirminci yüzyılın ilk yarısında çeşitli insan yapımı malzemeleri inceleyen başka araştırmacılar da olmuştur. Bunun sonrasında, 1950-1960 yıllarında minyatür mikrodalga anten mercekleri için doğal olmayan yalıtkanlar üzerine araştırmalar yapılmıştır. Bunu 1980'lerde fotonik bant aralığı (PBG)/elektromanyetik bant aralığı (EBG) malzemeleri olarak bilinen başka bir yapay malzeme türünün geliştirilmesi izlemiştir. 1980-1990 yıllarından itibaren doğal olmayan kiral materyaller, EM dalga emiciler ve dalga polarizasyonları ilgi çekici çalışma alanları doğurmuştur (Kar, 2023).

2.2.1 Doğal olmayan dielektrikler

Doğal olmayan yalıtkanlar, doğada kendiliğinden var olan dielektrik alemlerin spesiyalitetlerini örnek alan bununla birlikte gerçekte var olmayan fakat malzemenin

özelliğini farklı amaçlarla modellemek suretiyle araştırmacılar tarafından üretilen yapılardır. Örneğin, iyi bilinen bir dielektrik özellik olan ve genellikle birliğe eşit veya daha büyük bir değere sahip olan kırılma indisi, yapay bir dielektrikte birlikten daha düşük bir değere sahip olabilir. Bahsedilen düşünce 50 yıldan önce dillendirilmiş ve EM ile ilgilenen bilim insanları aracılığıyla anlatılmıştır (Brown, 1953). Yapay dielektrikler, genellikle iletken olmayan bir destek matrisindeki iletken şerit veya parçacık dizilerinden oluşan, doğal dielektriklerle gerçekleştirilebilenlere ve ötesine benzeyen belirli elektromanyetik özelliklere sahip olacak şekilde tasarlanmış kompozit malzemelerdir.

Winston E. Kock, Bell laboratuvarının araştırmacısı olarak 1948'te doğal olmayan yalıtkan dielektrik etkiyi incelemiştir. Kock'un önerdiği bu etki, ağır ve hacimli yalıtkanların alternatifi arayışında ortaya çıkmıştır. Doğal dielektriklerde veya doğal malzemelere gelen elektromanyetik dalgaya atomik/moleküler düzeyde verilen tepki, makroskopik boyutta elektrik geçirgenliği (ϵ) ve manyetik geçirgenlik (μ) ile tanımlanır. Bununla birlikte, makroskopik tepki elde edebilmek için elektromanyetik dalga boyunun (λ) kafes aralığından (p) daha büyük olması gerekir. Yapay dielektrikler için 1940'larda, saçıcı içeren yapay kafes yapılarında $p < \lambda$ koşulunu sağlayan RF ve mikrodalga frekansları kullanılmıştır. İnsan yapımı saçıcılar, elektromanyetik dalgaların doğal malzemelerdeki atom/moleküllerle etkileşimine benzer şekilde yanıt vererek ve ortamın etkin ϵ ve μ yapısal parametrelerini tanımlamaya imkan vererek doğal dielektrikleri taklit etmişlerdir. Tasarım parametreleri sağlayacak şekilde küre, disk, iletken şeritler kullanılmıştır. Günümüzde nanofabrikasyon teknolojisi yapay dielektriklerin THz ve daha yüksek frekanslarda çalışacak şekilde üretilmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca, iki boyutlu yapay malzemenin bir formu olan yapay empedans yüzeyleri veya yüksek empedans yüzeyleri, elektromanyetik soğurucular, empedans dalga kılavuzları ve düzlemsel yansıtma dizileri ve sızdıran dalga antenleri dahil olmak üzere elektromanyetik bant aralığı yapılarının tasarımında birçok uygulama alanı bulmaktadır. Yapay empedans yüzeylerinin, yapının elektriksel kalınlığının azaltılmasına yardımcı olarak geleneksel soğuruculara kıyasla avantajlı olmaktadır (Jones ve Brown, 1949).

2.2.2 Fotonik bant aralığı malzemeleri

Fotonik kristaller, periyodik dielektrik veya metalo-dielektrik yapılardan oluşturulabilir. Elektromanyetik dalgalar için enerji band yapıları olarak da tanımlanabilecek fotonik kristaller, fotonların iletiildiği ve iletilmediği frekans aralıkları sunar. Foton iletimine izin verilmeyen frekans aralığı, fotonik bant boşluğu (PBG) olarak adlandırılır. PBG veya daha genel olarak EBG (elektromanyetik bant aralığı) olarak adlandırılan malzeme, yarı iletken malzemelerin enerji bandı yapılarıyla elektronların özelliklerini etkilediği gibi fotonların özelliklerini de etkiler. Dolayısıyla fotonik kristallerin ışığın iletimi, yarı iletken malzemede, örneğin silikonda, elektrik akımının yönündeki seçiciliğe benzer şekilde yönlendirebilir (Notomi, 2000).

Fotonik kristallerin benzersiz özellikleri üzerine çalışmalar, 1987 yılında Eli Yablonovitch ve Sajeev John'un öncü çalışmasından bu yana yaygın şekilde yapılmıştır. İleriye dönük devam eden çalışmalar, şu anda veri işleme, yansıtıcı düz ekranlar, optik filtrelerin tasarımı, mürekkepsiz baskı da dahil olmak üzere lazer cerrahisi kullanımına yönelik dalga kılavuzlarında devam etmektedir. Ayrıca kuş tüyü ve bukalemun derisinde de fotonik kristal etkileri keşfedilmiştir (Kar, 2023).

Fotonik kristaller, görünür ışık ve diğer frekanslardaki elektromanyetik dalgalarının üretilmesi, yayılmasının kontrolü alanında çok etkili olmuştur. Fotonik bant boşluğu, belirli frekans aralıklarında, ışığın muhtemel her yönde hareket etmesine mâni olan bir fenomen olarak bilinmektedir. Bundan yola çıkarak, yalnızca optik dalga hareketinin olağan kuralını değiştirmekle kalmayıp, bunun yanında gerçekleştirilmesi kolay olan araçlar üretmek amacıyla değerlendirilebilecek optik materyallerin en önemli parçası konseptine de öncülük etmiştir. Belirli frekans içerisinde kasti şekilde uygulanan ve düz olmayan mimari, dalganın hareketini yönlendiren ve onu dizginleyen daha önce yapılmamış bir yapı ortaya koymaktadır. En iyi performansta optik dalga transferi sağlamak amacıyla oluşturulan birçok kanal, optik dalgayı sivri kenarlardan yön verebilen hat hataları tarafından inşa edilir. Ayrıca, levha dalga kılavuzlarının indeks kılavuzlama mekanizmasını iki boyutlu fotonik bant aralığı etkileriyle birleştirerek, ışığın tam üç boyutta kontrolü ve manipülasyonu mevcut düzlemsel litografik tekniklerle

gerçekleştirilebilir. Burada sağlanan ilerlemeler, geçmişteki yarı iletken teknolojisindeki belirli frekans bölgesi ile örtüşmekte ve foton kristallerinin optik dalga spesifikasyonlarını yansıtmaktadır (Kar, 2023).

Fotonik kristal ve metamalzeme ile süperlensing olarak adlandırılan görüntü oluşumunun ince bir farkı bulunmaktadır. Ortak noktaları ise şöyle sıralanabilir: düzlem levha ile görüntü oluşturabilmek, optik eksenin bulunmaması nedeniyle hizalamanın gerekmemesi. Öte yandan, metamalzeme tabanlı süperlens ve fotonik kristal tabanlı süperlens, paralel bir ışını odaklamadıkları için geleneksel anlamda bir mercek olarak değerlendirilemezler. Her halükârda her iki tip süperlens de elektromanyetik sinyalin dalga boyları mertebesindeki mesafelerde çalışır ve küçük ölçekli entegrasyon için ideal bir adaydır (Martínez ve J. Martí, 2005).

2.2.3 Yapay kiral malzemeler

'Kiral' terimi Yunanca'da insan eli anlamına gelmektedir ve hepimiz biliyoruz ki eller (sol ve sağ) üst üste bindirilememektedir. Parmakların ve başparmakların karşıtlığı nedeniyle, iki el nasıl yönlendirilirse yönlendirilsin (katlanmış eller hariç), her iki elin de tam olarak çakışması imkansızdır. Kiralite, bir yapıya ile ayna görüntüsünün ya da bir yapıya yönelik cevap ile bu yapının ayna görüntüsüne yönelik cevapların farklılığını tanımlamaktadır. Lord Kelvin'in de belirttiği gibi, kiral ortam ve sistemler her yerde bulunmaktadır. Örneğin; ellerimiz, vidalar, salyangoz kabukları kiral olarak adlandırılır. Ek olarak, amino asitler ve şekerler gibi çeşitli kiral moleküller vardır. Akiral bir nesne ayna görüntüsü ile özdeştir (üst üste bindirilebilir) (Kishk, 2011).

Kuvars, amino asitler, şeker ve benzerleri gibi doğal olarak bulunan kiral malzemeler küçük bir kiralite parametresi κ 'ya sahiptir. Mikrodalga/milimetre dalga ve optik frekanslarda birbirinden farklılık gösteren özellikler, doğal kiral bir malzemeye kıyasla önemli ölçüde yüksek kiralite parametresi κ 'ya sahip yapay kiral malzemeler gerektirmektedir. Bu tür yapay kiral malzemelerde, sağ ve sol el dairesel polarize dalgalar farklı faz hızları ile yayılırken, ortamın kayıplı olması durumunda soğurma oranları farklı olacaktır.

Kiral malzeme ile etkileşime giren EM dalga, olağan hareti ve özelliği dışında aşağıda belirtilen farklı şekillerde davranabilir (Lindell, 1994):

1. Optik (elektromanyetik) rotasyonel dağılım (ORD), polarizasyonun dönmesine neden olur;

2. Dairesel dikroizm (CD) şu şekilde açıklanabilir: Sağ ve sol el dairesel polarize dalgaların farklı absorpsiyon katsayıları sebebiyle, alan polarizasyonunun doğal yapısı farklılaşır ve bir dalganın lineer polarizasyonunun eliptik polarizasyona dönüşmesine sebep olur.

Bu özellikler kiral ortamlara önemli ölçüde dikkat çekmiştir ve mikrodalga ve milimetre dalga teknolojisinde yeni potansiyel uygulamalar açabilir.

Geleneksel olarak geometrik bir özellik olan kiralite, mikrodalga frekanslarında iletken sarmalların tekrarlı dizilimi ile üretilebilir.

Zerelerin sarmal ya da krank şeklinde gelişigüzel dağıldığı kiral ortamlarda çeşitli problemler bulunmaktadır. Bu problemlerin temel sebebi inhomojenlik olup bunun üstesinden gelmek için periyodik örgüler tasarlanmaktadır. Metalik krankların uygun bir dağılımı ile mikrodalga aralığında homojen, izotropik ve karşılıklı davranışa sahip kiral ortamlar oluşturmak mümkündür (Kishk, 2011).

İzotropik malzemelerin aksine, geçirgenlik ve geçirgenlikleri ile karakterize edilen bi-izotropik malzemeler, elektrik ve manyetik alanlar arasında çapraz bir bağlantı gösterirler (Kishk, 2011):

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \epsilon\vec{E} + \eta\vec{H} \\ \vec{B} &= \zeta\vec{E} + \mu\vec{H}\end{aligned}\tag{2.4}$$

Burada dört skaler ϵ , μ , η , ζ ; ω frekansının fonksiyonudur. 2.5'teki koşul sağlandığında:

$$\zeta = -\eta = \frac{j\kappa}{c_0} \quad 2.5$$

c_0 vakumdaki ışık hızı olmak üzere, ortamın "kiral" olduğu söylenir. κ parametresi "kiralite" veya "Pasteur" parametresidir (Lindell, 1994). Frekans alanında bu, 2.6'daki kurucu ilişkilere yol açar (Kishk, 2011):

$$\begin{aligned} \vec{D}(\omega) &= \varepsilon \vec{E}(\omega) - \frac{j\kappa(\omega)}{c_0} \vec{H}(\omega) \\ \vec{B}(\omega) &= \mu \vec{H}(\omega) + \frac{j\kappa(\omega)}{c_0} \vec{E}(\omega) \end{aligned} \quad 2.6$$

Kiralite parametresinin reel kısmı, 2.7 aracılığıyla bir d mesafesindeki polarizasyon düzleminin (ORD) dönüş açısı ile ilişkilidir (Kishk, 2011):

$$\theta = 2d\omega \frac{\kappa'}{c_0} \quad 2.7$$

Homojen kiral bir ortam boyunca elektromanyetik alan yayılımı göz önüne alındığında, elektrik ve manyetik alanların 2.8'deki doğrusal kombinasyonları olan yeni alan değişkenleri, \vec{E}_+ ve \vec{H}_+ ("dalga alanı vektörleri") tanıtmak uygundur (Kishk, 2011):

$$\vec{E}_\pm = \frac{1}{2}(\vec{E} \mp jZ\vec{H}), \vec{H}_\pm = \frac{1}{2}(\vec{H} \pm \frac{j}{Z}\vec{E}) \quad 2.8$$

Burada Z ortamın dalga empedansıdır, $Z = \sqrt{\mu/\varepsilon}$. Bununla birlikte; elektrik ve manyetik alan (\vec{E}_+, \vec{H}_+) bileşenleri sağ el dairesel polarize dalgayı temsil ederken, (\vec{E}_-, \vec{H}_-) bileşenleri sol el dairesel polarize dalgayı temsil etmektedir. Burada bulunan dört alan vektörünü kullanmak Maxwell denklemlerini izotropik ortamlar için uygun hale getirecektir. Bunun sonucunda izotropik ve kiral malzeme içerisinde hareket eden dalganın nasıl davranacağını hesaplama imkanına erişmiş olmaktadır (Lindell ve ark., 1994). Bu dalga alanı vektörleri, eşdeğer parametrelere sahip eşdeğer basit izotropik ortamı görecektir (Kishk, 2011):

$$\varepsilon_{\pm} = \varepsilon(1 \pm \frac{\kappa}{\sqrt{\varepsilon\mu}}), \mu_{\pm} = \mu(1 \pm \frac{\kappa}{\sqrt{\varepsilon\mu}}) \quad 2.9$$

Eğer κ yeterince yüksekse, dalga alanı vektörlerinden birinin geriye doğru bir dalgaya karşılık geldiği açıktır. Böylece kiral mertebesi ileri seviyede olan bir materyalde hareket eden 2 muhtemel dairesel polarize EM dalgadan bir tanesi için bu materyalin sol el polarize (Veselago) bir metamalzeme şeklinde tavır sergilediği söylenebilir (Kishk, 2011).

2.3 Meta Yüzeyler

Son yirmi yılda, metamalzemeler sadece teorik bir kavram olmaktan çıkıp araştırma ve geliştirme alanında gelişen bir alan haline gelmiş ve antenler, pasif-aktif bileşenler ve benzeri alanlarda pazarlanan uygulamalara yol açmıştır.

Metamalzemeler ile yapılan çalışmalarda kendi doğasından gelen çeşitli dezavantajlardan bahsedilmiştir. Bunlar arasında:

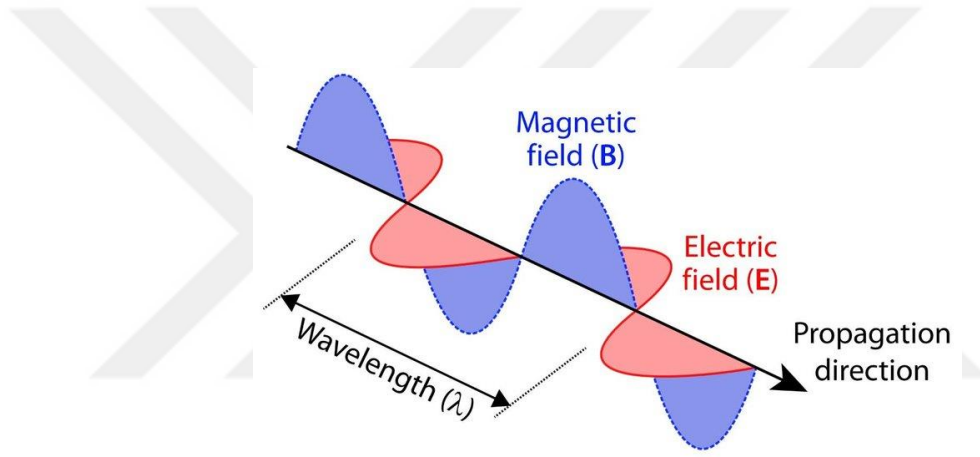
- Yüksek kayıplara sebebiyet vermesi,
- Doğal frekansına ulaşıldığında ortaya çıkan rezonans tepkisinin güçlü dağılımlara sebebiyet vermesi,
- Küçük (nano) ölçekli 3D zerrelere üretiminin kolay olmaması ve maliyetli olması olarak sayılabilir.

Meta yüzeyler, klasik metamalzemelerin limitlerini aşmada kullanılır. Bunun yanında metamalzemelerin bütün spesifikasyonlarını içeren 2D yapay malzeme olarak tanımlanır. Literatüre yeni giren meta yüzeyler, klasik ve olağan kırıcılık indisine sahip optik malzemelerin başarısını ve verimini aşip yenilikçi bir bakış kazandırarak optik çalışmalar için imal edilmeye başlanmıştır. Meta yüzeylerin metamalzemelere üstünlük kurduğu diğer bir husus ise imalatının daha basit olmasıdır. Bu üstünlüğü klasik litografi ve nano pres teknolojisi ile kazanmıştır. Olağan şartlarda meta yüzeyler imal aşamasından önce belli optik görevleri yerine getirmek üzere tasarlanırlar. Bu olağanlık atomik düzeydeki

değişmeyen hizalanmadan dolayı olmaktadır. Fakat bilim insanları bu olağanlığın dışına çıkıp atomik düzeyde dinamik olarak hizalanan, ölçüleri değişebilen, çevik yapıda ve dışardan bir etki ile uyarılabilen meta yüzeyleri imal etmenin peşindedir (Hu vd, 2021).

2.4 Elektromanyetik Dalga Polarizasyonu

Bir anten tarafından yayınlanan elektromanyetik dalgada elektrik alan vektörü manyetik alan vektörüne diktir. Her iki alan bileşenleri antenin yer yüzeyine göre olan konumuna bağlıdır. Şekil 2.3'te görüldüğü gibi, bir elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşeninin yönü ise dalganın polarizasyon yönünü belirler (Wolff, 2023).



Şekil 2.3 Hareket halinde bir elektromanyetik dalgaya ait elektrik alan ve manyetik alan vektörleri (Verhoeven, 2017)

Bir düzlem dalgada, dalga cepheleri paralel enine düzlemlerdir ve kutuplaşma elipsleri her yerde aynıdır. Ancak alan vektörlerinin herhangi bir zamanda paralel olması gerekmemektedir. Bu nedenle bir düzlem dalga tek bir elips ile tanımlanır ve eliptik olarak polarize olduğu söylenebilmektedir. Polarizasyon elipsinin yönü ve elipsliği düzlem dalganın polarizasyon durumunu belirlerken, boyutu optik yoğunluk tarafından belirlenir. Elips düz bir çizgiye indirildiğinde dalganın doğrusal polarize ve bir daire haline geldiğinde, dalganın dairesel polarize olduğu söylenebilmektedir (Bahaa E A Saleh, 2019).

Denklem 2.10'da pozitif (+) z yönünde ilerleyen düzlem dalga tanımlanmıştır. Böylece elektrik alan vektörünün (veya elektrik alanının) zaman ve uzaydaki değişimi aşağıdaki gibi olacaktır (Stutzman, 2018).

$$\vec{E}(t, z) = E_o \cos(\omega t - \beta z) \hat{x} \quad [\text{V/m}] \quad 2.10$$

Pozitif (+) z yönünde hareket eden bir düzlem dalganın elektrik alan bileşeninin yönü yayılma yönünün enlemesine olmalıdır. Haliyle düzlem dalganın elektrik alanın yönü pozitif (+) x olarak tanımlanmıştır. Denklem 2.10 incelendiğinde + x yönünde bileşeni bulunan elektrik alan dışında bir bileşen bulunmadığı için bu dalganın lineer polarize bir dalga olduğu aşikârdır. Manyetik alan vektörünü ise denklem 2.11'de olduğu gibi ifade edebiliriz (Stutzman, 2018).

$$\vec{H}(t, z) = \frac{E_o}{\eta} \cos(\omega t - \beta z) \hat{y} \quad [\text{A/m}] \quad 2.11$$

Serbest uzay ortamı için içsel empedans 2.12'deki gibidir.

$$\eta_o = \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon_o}} = \sqrt{\frac{4\pi \times 10^{-7}}{10^{-7}/36\pi}} = 377\Omega \quad 2.12$$

Manyetik alan ifadesinin, y-yönlü olması ve içsel empedans tarafından azaltılması dışında elektrik alan ifadesine tam olarak benzediğine dikkat edin, çünkü bir düzlem dalganın elektrik ve manyetik alanları 2.13'teki gibi ilişkilidir (Stutzman, 2018).

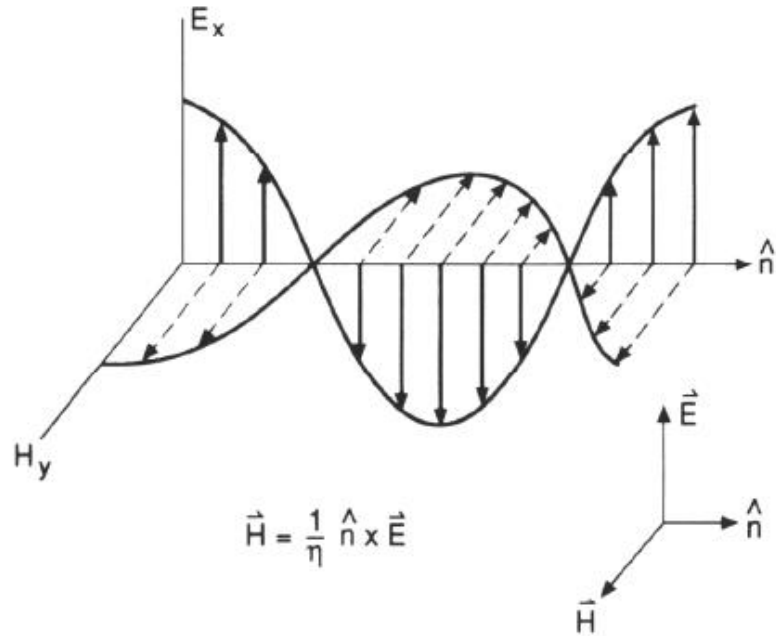
$$H_y(t, z) = \frac{E_x(t, z)}{\eta} \quad 2.13$$

Bu, dalgalar için Ohm yasasıdır, çünkü metre başına akım, metre başına voltajın dirence bölünmesine eşittir. Bu sonuç koordinatlardan bağımsız olacak şekilde 2.14'teki gibi genelleştirilebilir (Stutzman, 2018).

$$\vec{H}(t, z) = \frac{1}{\eta} \hat{n} \times \vec{E}(t, z) \quad 2.14$$

\hat{n} = saçılma yönündeki birim vektördür. Örnek cisimimiz için $\hat{n} = \hat{z}$, bu nedenle manyetik alan yönü $\hat{y} = \hat{z} \times \hat{x}$ olacaktır (Stutzman, 2018).

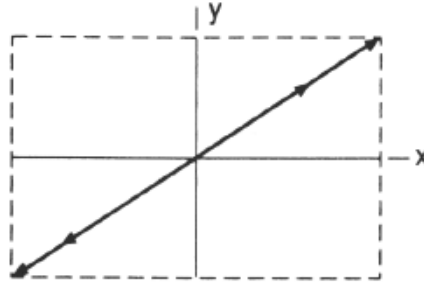
Doğrusal polarizasyon dikey, yatay, -45° eğik ve $+45^\circ$ eğik olarak sınıflandırılmaktadır. Doğrusal olarak kutuplanmış bir dalganın elektrik alanının yönelimi Dünya yüzeyine referanslanır ise, yatay olarak kutuplanmış bir dalgayı elektrik alan vektörü Dünya'ya paralel (yani yatay) bir çizgi boyunca salınan bir dalga olarak tanımlarız. Aynı biçimde, dikey polarize dalganın Şekil 2.4'te görüldüğü gibi elektrik alanı dikey (Dünya yüzeyine göre dik) bir hat boyunca hareket eden dalgadır (Stutzman, 2018).



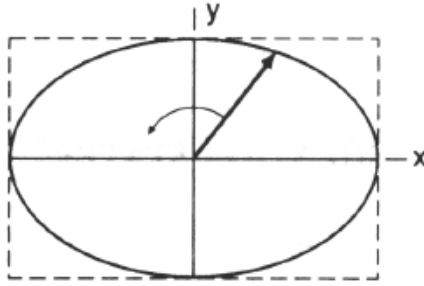
Şekil 2.4 Durağan bir zaman anında düzlemsel bir dalgaya ait, elektrik ve manyetik alanların uzaysal davranışı ve Z eksenindeki hareketi ($n = z$) (Stutzman, 2018)

Genel olarak, yatay ve dikey bileşenler belirli bir genlik değeri ile temsil edilir, bu bileşenler E1 ve E2 olarak adlandırılabilir. Ayrıca, bu bileşenler herhangi bir bağlı faza

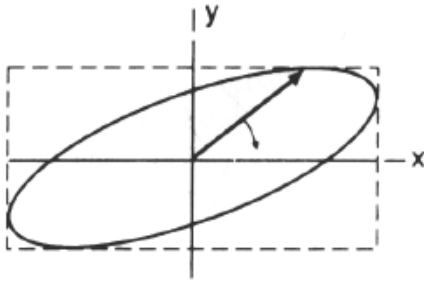
δ 'ye sahip olabilir. δ , y bileşeninin x bileşenini yönlendirdiği fazı ifade eder. Elektrik alan vektörünün uçlarının sonuçta oluşturduğu konum bir elipsi temsil eder (Stutzman, 2018).



(a) LP, $\delta = 0^\circ$



(b) RHEP, $\delta = -90^\circ$



(c) LHEP

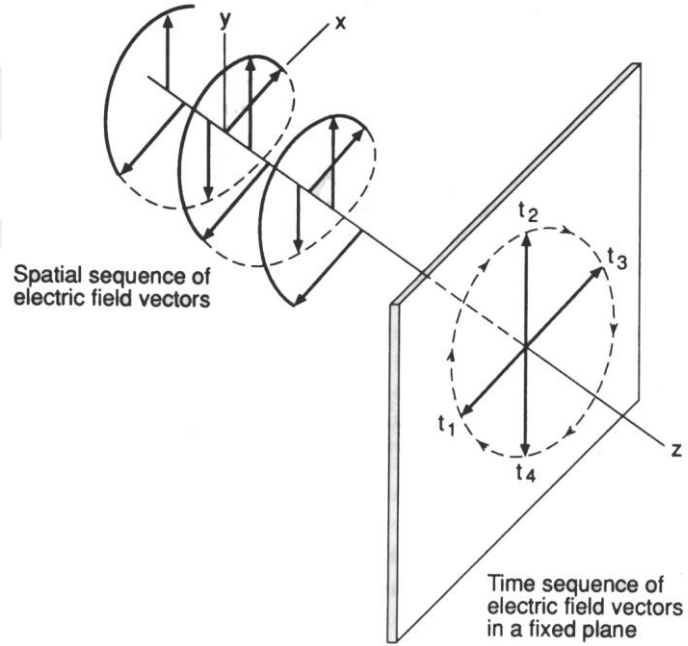
Şekil 2.5 Elektrik alana ait yatay ve dikey bileşenlerin izafi genlik ve fazı polarizasyon elipsinin biçim ve yönelme durumları

Şekil 2.5'te polarizasyon elipsinin şeklinin ve yönünün bileşenlerin göreceli genliği ve fazı tarafından nasıl kontrol edildiği gösterilmektedir. (a)'da x ve y bileşenleri aynı fazdadır ($\delta = 0$). (b)'de y bileşeni x bileşeninden 90° geride kalmaktadır ($\delta = -90^\circ$). (c)

genel bir polarizasyon elipsini göstermektedir. Elipsin biçimi 2.15'te verilen denklemdeki gibi hesaplanmaktadır (Stutzman, 2018).

$$\text{Eksenel oran, } |R| = (\text{major eksen uzunluğu} / \text{minör eksen uzunluğu}) \quad 2.15$$

R'nin işareti, sağ el duyusu için pozitif ve sol el duyusu için negatiftir. Eksenel oran sembolü RCP için pozitif, LCP için negatif olarak belirlenmiştir. Elipsin yönelimi, elipsin ana ekseninin x eksenine göre eğim açısı τ ile verilir. Doğrusal polarizasyonun eksenel oranı sonsuzdur çünkü küçük eksen sıfır uzunluktadır. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi yarıçapın dolayısı ile eksenel oranının 1 olduğu vaziyet dairesel polarizasyon olarak adlandırılmaktadır (Stutzman, 2018).



Şekil 2.6 Sabit bir zaman anında sol el dairesel polarize dalganın perspektif görünümü. Hareket yönü +z ekseninde ve buna dik sabit bir düzlemde dönen elektrik alan vektörünün zamanla değişimi (Stutzman, 2018)

Şu ana kadar anlatılan polarizasyon çeşitlerine ait tanımlar şu şekilde özetlenebilmektedir:

Eğer y bileşeni yoksa dalga x eksenini boyunca doğrusal olarak polarize olur ve yatay olarak tanımlanır. Eğer x bileşeni yoksa y eksenini boyunca doğrusal olarak polarize olur ve dikey olarak tanımlanır. Eğer x ve y bileşenlerinin her ikisi de eşit genlikte ve eşit fazda ise, sonuç 45° eğim açısına sahip doğrusal polarizasyondur. Genlikler eşitse ancak bileşenler dördü fazdaysa ($\delta = \pm 90^\circ$) dairesel polarizasyon ortaya çıkar. $\delta = +90^\circ$ olduğunda dalga sol-el dairesel polarize ve $\delta = -90^\circ$ olduğunda dalga sağ-el dairesel polarize olarak tanımlanır. Son olarak genlikler ve fazlar eşit değil ise eliptik polarizasyon olarak tanımlanmaktadır (Stutzman, 2018).

2.5 Elektronik Harpte Polarizasyonun Önemi

Üstün silahlar ve taktikler, savaşların kazanılmasında daima avantaj sağlamışlardır. Tarih boyunca bu silah ve taktiklere karşı, karşı tedbirler uygulanmıştır. Elektronik harp de bunlardan bir tanesidir. Elektronik harp (EH) ülkeler arasında, ülkelerin sahip olduğu teknoloji ve elde ettiği istihbarat bilgisine göre sürdürülen elektromanyetik spektrumun kontrolünü ele geçirme savaşıdır. Bu sayede, çeşitli tekniklerin kullanılmasıyla elektromanyetik tayfin düşman güçlerince kullanımını tamamen engellerken, dost güçlerce kullanımını askeri amaçlar doğrultusunda en faydalı hale getirmeyi hedefler. Elektronik harp; elektronik atak, elektronik korunma ve elektronik destek olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. Elektronik atak, elektronik savunma ve elektronik desteği etkili bir şekilde yapabilmek için öncelikli olarak sistemler tehditlerden gelen sinyalleri doğru algılamalıdır. Bu sebeple elektromanyetik dalgaların polarizasyonu büyük önem taşımaktadır (Yaylacı, 2023).

Polarizasyonun seçilen verici ve alıcı anten kombinasyonları üzerindeki etkisi Çizelge 2.1’de sunulmuş olup, güçte ne kadar önemli kayıplar olduğu görülmektedir.

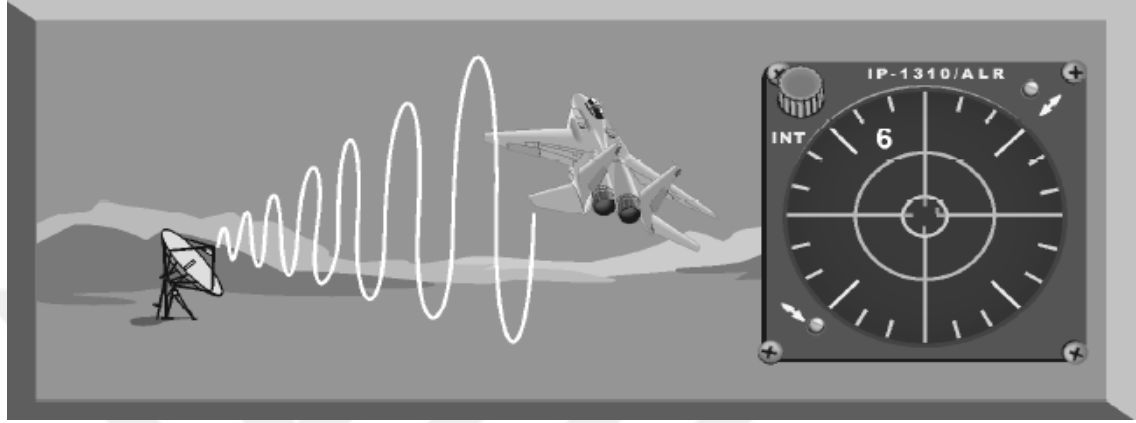
Çizelge 2.1 Anten polarizasyon kaybı yüzdeleri (Electronic Warfare Fundamentals, 2000)

Gönderici Anten Polarizasyonu	Alıcı Anten Polarizasyonu	Polarizasyon Kaybı %
Dikey	Dikey	0
Dikey	Eğik (-45, +45)	50
Dikey ya da Yatay	Yatay ya da Dikey	75
Dikey	Dairesel (Sağ el ya da Sol el)	50
Yatay	Yatay	0
Yatay	Eğik (-45, +45)	50
Yatay	Dairesel (Sağ el ya da Sol el)	50
Sağ El Dairesel	Sağ El Dairesel	0
Sağ El Dairesel	Sol El Dairesel	94
Dairesel (Sağ el ya da Sol el)	Eğik (-45, +45)	50

Her radar; kendisini diğer tüm sinyallerden ayıran, yeteneklerini ve sınırlamalarını tanımlayan belirli özelliklere sahip bir radyo frekansı sinyali üretir. Radar vericisi; darbe genişliğini, darbe tekrarlama aralığını, darbe tekrarlama frekansını ve gücünü belirler. Bu bileşenler radar sinyalinin özellikleridir. Polarizasyon farklılığından dolayı kendi sistemimize gelen yayının gücü düştüğünde, sistemimiz tehdit radarın gönderdiği darbeleri düzenli olarak alamayabilir ve sonrasında tehdidi doğru kimliklendiremeyebilir (Electronic Warfare Fundamentals, 2000).

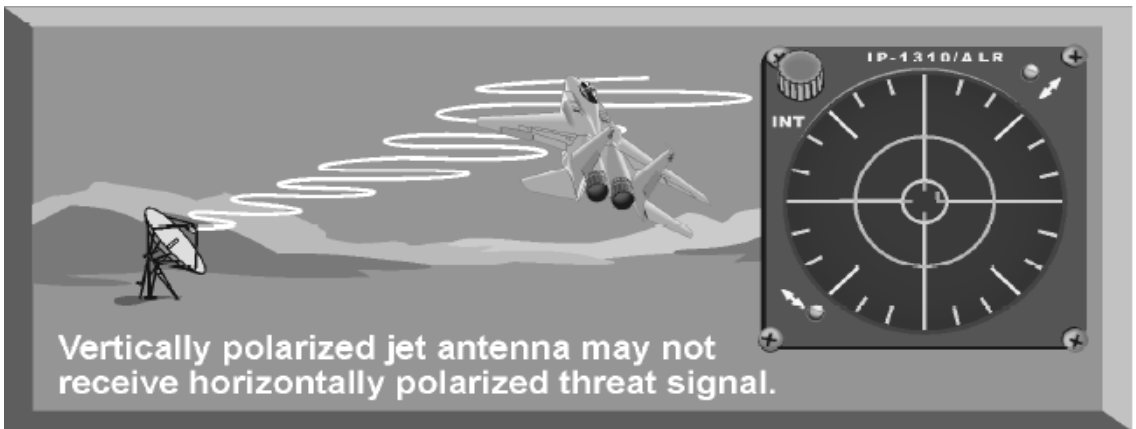
Bir RWR anteni ile tehdit sistemine ait olan radar anteni aynı polarizasyona sahip olduğunda, sinyal gücünde kaybın az yaşanmasından ötürü RWR ekranında tehdidin

varlığı görülebilecektir. Örneğin; RWR anteni dikey polarizasyonlu sinyalleri alacak şekilde tasarlanır ve tehdit sistemine ait olan radar anteni de dikey polarizasyonlu sinyaller yayar ise, Şekil 2.7’de görüldüğü gibi RWR ekranında tehdidin varlığı görülebilecektir (Electronic Warfare Fundamentals, 2000).



Şekil 2.7 Aynı polarizasyona sahip sistemlerdeki durum (Electronic Warfare Fundamentals, 2000)

Bir RWR anteni ile tehdit sistemine ait olan radar anteni farklı polarizasyona sahip olduğunda, sinyal gücünde kayıpların yaşanmasından ötürü RWR ekranında tehdidin varlığı görülemeyebilir. Örneğin; RWR anteni dikey polarizasyonlu sinyalleri alacak şekilde tasarlanır ve tehdit sistemine ait olan radar anteni de yatay polarizasyonlu sinyal yayımlar ise Şekil 2.8’de görüldüğü gibi RWR anteni ekranında tehdidin varlığı görülemeyebilir (Electronic Warfare Fundamentals, 2000).



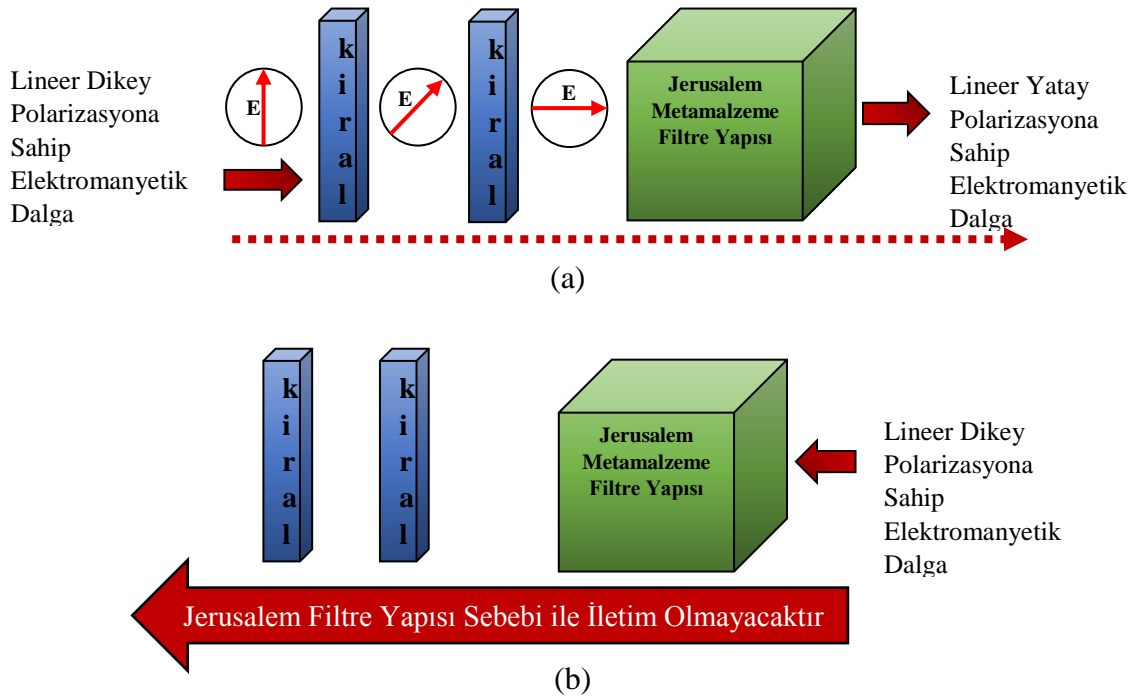
Şekil 2.8 Farklı polarizasyona sahip sistemlerdeki durum (Electronic Warfare Fundamentals, 2000)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez kapsamında elektromanyetik dalganın polarizasyonunu 90° değiştirebilen iki katmanlı kiral yapı ile birlikte sadece lineer yatay polarizasyonu geçirerek bir filtre görevi gören Jerusalem meta yüzey yapısı CST Studio Suite program ile tasarlanıp sonuçları elde edilmiştir.

Şekil 3.1a'da görüldüğü gibi; lineer dikey polarizasyona sahip elektromanyetik dalga çift katmanlı kiral yapının önünden gönderildiğinde her katmanda 45° 'lik polarizasyon değişimine uğramaktadır. Jerusalem filtre yapısına girmeden önceden 90° 'lik değişime uğrayıp lineer yatay polarizasyona dönüşen elektromanyetik dalga filtrenin içerisinde geçebilmektedir. Şekil 3.1b'de görüldüğü gibi aynı dalga zıt yönden yani önce filtre yapısından geçecek şekilde gönderildiğinde, filtrenin lineer dikey polarizasyonu bastırma özelliği sebebi ile yapı boyunca elektromanyetik dalga iletimi sağlanamayacaktır.

Tek yönlü elektromanyetik dalga iletimini sağlayan bütünleşik bir yapı tasarlanıp elde edilen sonuçlar dördüncü bölüme eklenmiştir.



Şekil 3.1 Tez çalışmasındaki yapının mantığı

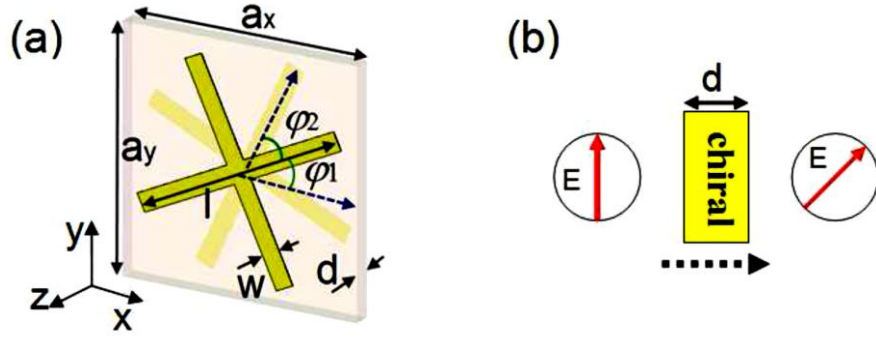
3.1 Çalışmada Kullanılan Kiral Yapı

Çalışmada; İ. Evrim Çolak, Zhaofeng Li ve diğerlerinin kıymetli emeği ile hazırlanan “Coupling Effect Between Two Adjacent Chiral Structure Layers” makalesinde yer alan ve yaklaşık olarak 10.8 GHz frekansta çalışan kiral yapı örnek alınmış olup CST Studio Suite programında benzetimi yapılmıştır.

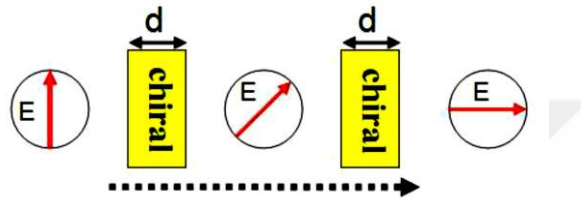
Makalede tek katmanlı ve aralarında farklı mesafeler olan bir dizi iki katmanlı düzlemsel kiral yapıların iletim özellikleri sayısal olarak incelenmiştir. Şekil 3.2a’da görüldüğü gibi kiralmateryal bir teflon dielektrik plakanın zıt taraflarına tasarlanmış iki bakır çapraz telden meydana gelmektedir. Referans alınan kiral materyale ait geometri parametreleri Çizelge 3.1’de sunulmuştur (Li vd, 2010).

Çizelge 3.1 Referans alınan kiral geometrik boyutları materyalin

Dielektrik Sabiti ϵ_r	2.08
Dielektrik Kayıp Tanjantı	0.0004
a_x	13 mm
a_y	13 mm
l	12 mm
w	1 mm
d	1 mm
φ_1	25°
φ_2	40°
Bakır Kalınlığı	30 μm



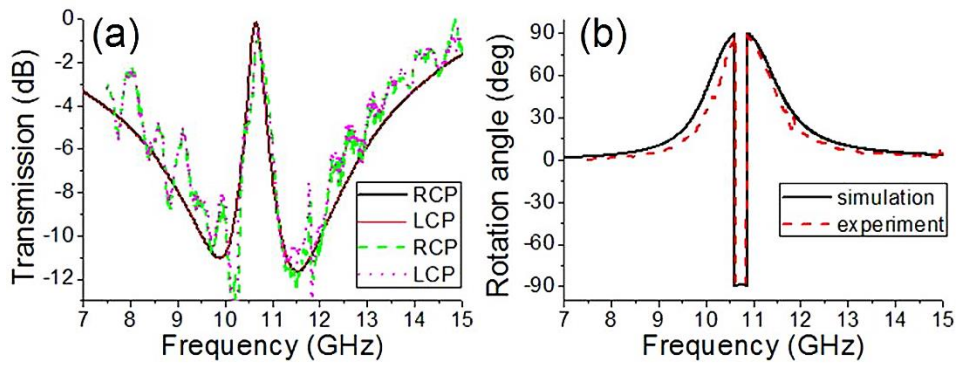
Şekil 3.2 Tek katmanlı kiral materyalin birim hücresi (Li vd, 2010)



Şekil 3.3 Çift katmanlı kiral yapının polarizasyon dönüşüm şeması (Li vd, 2010)

Kiral yapıların davranışlarını incelemek için CST Studio Suite programı kullanılarak sayısal benzetimler gerçekleştirilmiştir ve sonlu integrasyon tekniği kullanılmıştır. Periyodik sınır koşulları (PSK; x ve y yönü) ve soğurucu sınır koşulları (SKS; z yönü) benzetim ortamında çalışılmıştır.

Yaklaşık olarak 10.8 GHz’de çalışan tek katmanlı kiral yapıya ait RCP ve LCP dalgalarının iletim spektrumları Şekil 3.4a ve polarizasyon dönüş açısı θ_1 Şekil 3.4b’de sunulmuştur.



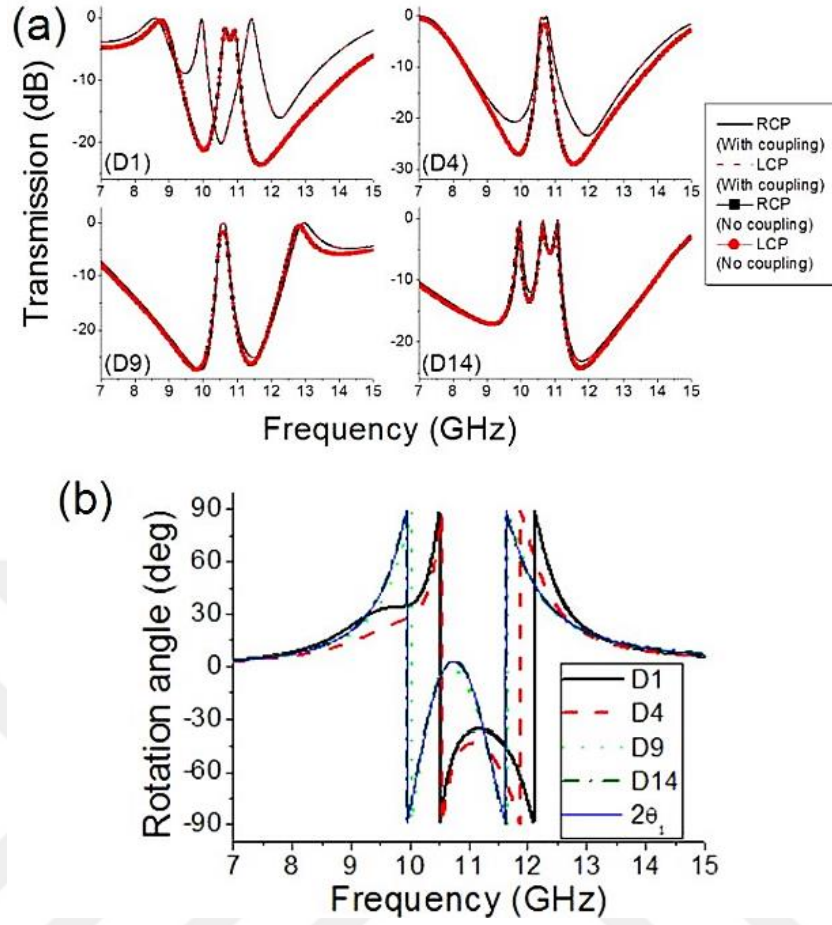
Şekil 3.4 Sağ ve sol el dairesel polarize dalgaların tek tabakalı kiral materyaldeki iletim tayfları (Li Vd, 2010)

İki katmanlı kiral yapıda iki katman arasındaki mesafe 1, 4, 9 ve 14 mm olarak ayarlanarak mesafenin kuplaj üzerindeki etkisi incelenmiştir (D1, D4, D9 ve D14 konfigürasyonları). RCP ve LCP dalgalarının iletim grafikleri, bu dört farklı durum için CST Microwave Studio™ kullanılarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.5'te iletim matrisi tekniği ile hesaplanan bir dizi örnek kiral materyal için transfer olguları da sunulmaktadır. Bu örnek materyaller iki etkin kiral tabakadan oluşup aralarındaki tüm kuplaj etkisi göz ardı edilmiştir.

Dönüş açıları -90° ile $+90^\circ$ aralığına uyumlandırılarak dört farklı durum için Şekil 3.5b'de gösterilmiştir. Gözlem amacıyla, referans yapının (tek tabakalı kiral yapı) polarizasyon dönüş açısı, iki ile çarpılarak 'ye dahil edilmiştir.

İki kiral tabaka arasındaki uzaklığın artarken iki tabakalı kiral materyalin transfer tayfı, örnekleri ile daha uyumlu hale gelmektedir. Bu doğrultuda, örnek yapısı ile en uyumlu olan D14 için elde edilen transfer tayfıdır (referans yapı ile en fazla uyumlu durum). Diğer üç durum düşünüldüğünde kiral tabakalar arası mesafe azaldıkça uyumun azaldığı söylenebilir.



Şekil 3.5 Benzetim sonuçları: (a) Dört farklı yapılandırma için sağ el ve sol el polarize dalgaların iki kiral tabaka beraberince transfer tayfları ve bunların referans vaziyetleri (b) Çift katmanlı materyalin kiral polarizasyon dönüş açısı ve tek katmanlı kiral

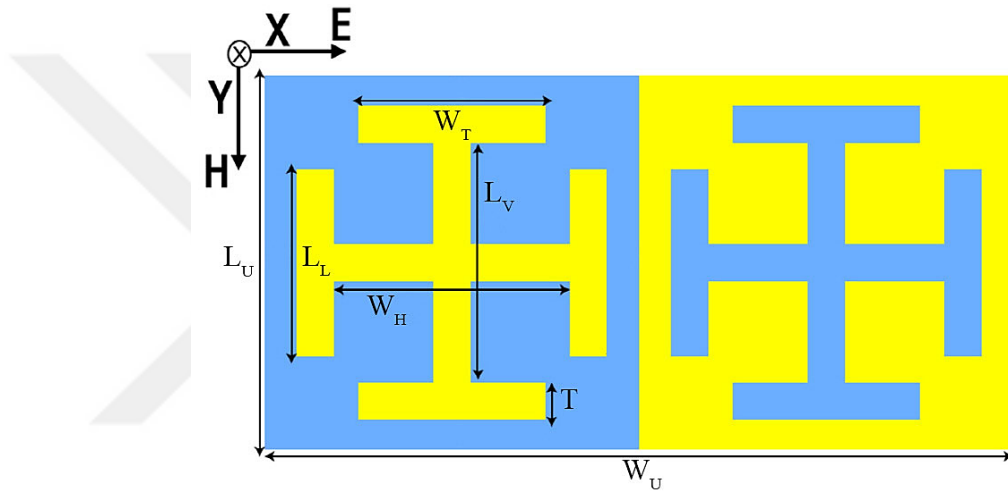
3.2 Çalışmada Kullanılan Jerusalem Metamalzeme Filtre Yapısı

Çalışmada; Se-Mi Kim ve diğerlerinin kıymetli emeği ile hazırlanan “Multiband Terahertz Self-Complementary Metasurface” makalesinde yer alan ve yaklaşık olarak 0.5 - 1.5 THz frekans aralığında çalışan Jerusalem meta yüzey filtre yapısı bir önceki altbaşlıkta anlatılan kiral yapı ile aynı frekansta (yaklaşık olarak 10.8 GHz) çalışabilecek şekilde malzemesi ve boyutları CST Studio Suite programında tekrardan tasarlanmıştır.

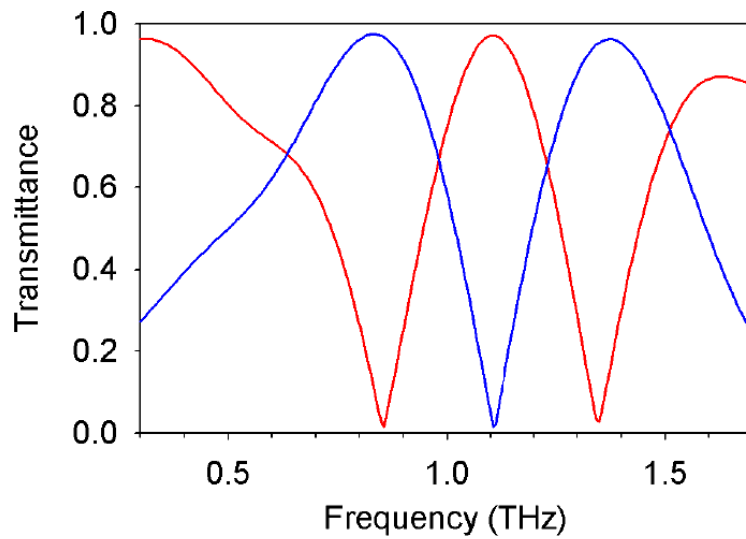
Dizayn edilen meta yüzey, gelen dalganın polarizasyonuna bağlı olarak bir filtre görevi görmektedir. Seçici bir bant durdurucu ya da bant geçiren filtre olarak görev yapan meta

yüzey, işlevselliği ile tek yönlü EM dalga iletimi için güzel bir fikir olarak karşımıza çıkmaktadır.

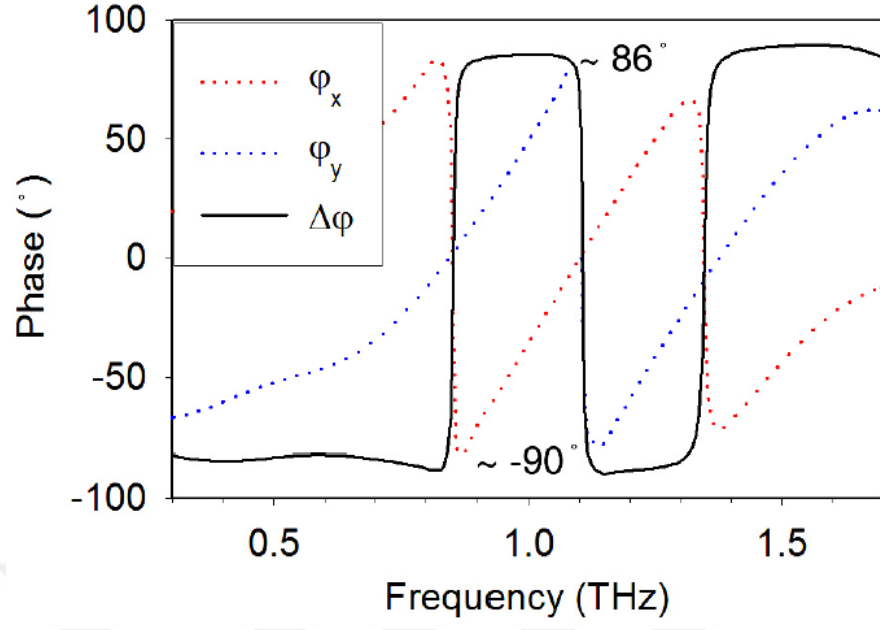
Şekil 3.6'da makalede bahsi geçen THz mertebesinde çalışan Jerusalem meta yüzey yapısının birim hücresi sunulmuştur. Sarı renkli alanlar iletken Ti/Au (20/300 nm) ve mavi renkli alanlar dielektrik kuvars alt tabaka olarak tasarlanmıştır. Birim hücreye ait geometrik boyutlar ise; $W_T = L_L = 25 \mu\text{m}$, $W_H = L_V = 35 \mu\text{m}$, $T = 5 \mu\text{m}$, $L_U = 50 \mu\text{m}$, $W_U = 100 \mu\text{m}$ ve birim hücrenin z yönündeki kalınlığı $300 \mu\text{m}$ 'dir (Kim vd, 2020).



Şekil 3.6 THz frekans mertebesinde çalışan jerusalem metamalzeme filtre Yapısı (Kim vd, 2020)



Şekil 3.7 jerusalem filtre yapısının THz mertebesindeki iletim spektrumu (Kim vd, 2020)



Şekil 3.8 Jerusalem filtre yapısının thz mertebesindeki faz değişimi (Kim vd, 2020)

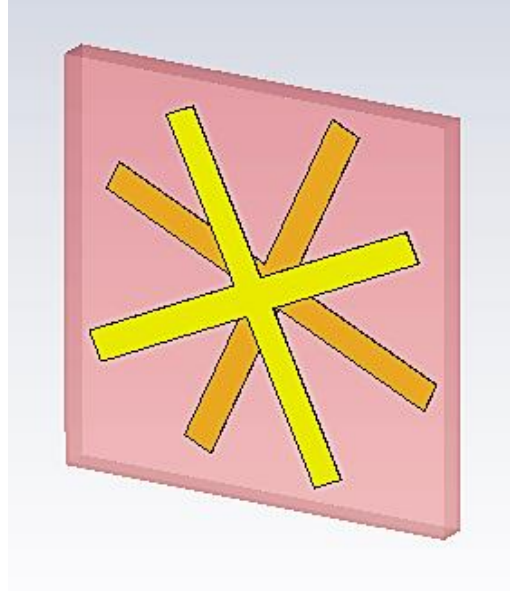
Şekil 3.7’de tasarlanan Jerusalem filtre yapısına ait bant geçiren ve bant durduran filtre davranışının görüldüğü iletim spektrumu yer almaktadır. Şekil 3.8’de ilgili iletim spektrumuna ait faz değişimi grafiği yer almaktadır.

4. TEK YÖNLÜ ELEKTROMANYETİK DALGA İLETİMİNİ SAĞLAYAN BÜTÜNLEŞİK YAPI VE ELEMANLARININ TASARIMI

Tek yönlü elektromanyetik dalga iletimini sağlayan bütünleşik yapının elemanları (kiral yapı ve Jerusalem filtre yapısı) CST Studio Suite programı ile tasarlanıp benzetimi yapılmıştır. Benzetimler için sonlu integrasyon yöntemi (FIT) kullanılmıştır. Benzetimler sırasında, periyodik sınır koşulları x ve y yönlerindedir. Z yönünde ise soğurucu sınır koşulları uygulanmıştır. Bütünleşik yapının çalışma frekansı kiral yapının çalışma frekansı ile aynı tutulmuştur. Kiral yapı ve Jerusalem filtre yapısının tasarımında iletken madde bakır ve dielektrik madde teflon olarak belirlenmiştir. Teflon plakanın dielektrik sabiti $\epsilon_r = 2.08$ ve dielektrik kayıp tanjantı 0.0004'tür. Sinyal kaynağı olarak düzlem dalga kullanılmıştır.

4.1 Kiral Yapı Tasarımı

Tasarlanan yapının boyutları başlık 3.1'de bahsi geçen yapının boyutları ile birebir aynıdır. Şekil 4.1'de tasarlanan tek katmanlı kiral yapının görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 4.1 Tasarımdaki tek katmanlı kiral yapı görüntüsü

Elektromanyetik bir dalga düzlemsel yapı üzerine +z eksenini yönünde geldiğinde, böyle bir kiral yapıdaki dalga yayılımı 4.1'deki kurucu bağıntılara uymaktadır (Li vd, 2010).

$$\begin{pmatrix} D \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_0 \epsilon_r & -i\kappa/c \\ i\kappa/c & \mu_0 \mu_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E \\ H \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

$e^{-i\omega t}$ 'nin zaman bağımlı olduğunu düşünürsek RCP (+) dalga ve LCP (-) dalga 4.2'deki gibi (John David Jackson ve Wiley, 2011) ve kırılma indisi 4.3'teki gibi (Jin Au Kong, 2008) tanımlanacaktır.

$$E^\pm = \frac{1}{2} E_0 (\hat{x} \mp i\hat{y}) \quad (4.2)$$

$$n^\pm = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \pm \kappa \quad (4.3)$$

Aynı zamanda hem RCP hem de LCP dalgaları denklemdeki (aynı) empedansa sahiptir, burada Z_0 vakumun empedansıdır (Li vd, 2010).

$$\frac{z}{z_0} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (4.4)$$

Kiral materyallerin iletim davranışlarını incelemek için, kiral yapı üzerine doğrusal polarize bir EM dalganın (x yönünde E alanı) geldiği benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Materyalin ters bölgesinden x ve y yönlerinde gönderilen dalgalar T_{xx} ve T_{yx} olarak ölçülmüştür. Dört kat dönme simetrisi nedeniyle dairesel polarizasyon dönüşümü yoktur. Dairesel polarizasyona sahip EM dalgaların transferi denklem 4.5'teki gibidir. Burada T_{xx} ve T_{yx} lineer transfer katsayılarından evrilebilmektedir (Kwon vd, 2008).

$$T^\pm = T_{xx} \pm iT_{yx} \quad (4.5)$$

İletilen EM dalgası için polarizasyon dönüş açısı θ 4.6'daki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\theta = \frac{[\arg(T^+) - \arg(T^-)]}{2} \quad (4.6)$$

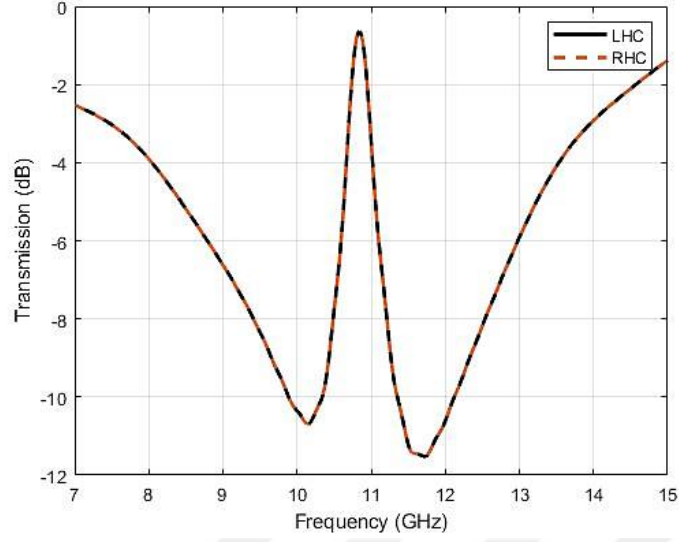
Şekil 3.2b'de gelen dalganın doğrusal olarak polarize olduğu tek bir kiral malzeme katmanından yayılan bir elektromanyetik dalganın şeması gösterilmektedir. Sağ ve Sol el polarize dalga iletimi 4.7'de gösterilmektedir. Denklemdaki T , $\kappa = 0$ durumundaki iletim katsayısıdır. k_0 , EM dalganın boş uzaydaki dalga sayısı, d kiral materyalinin kalınlığı ve $\theta_I = k_0 \kappa d$ dönme açısıdır (Menzel vd, 2008).

$$T^\pm = T e^{\pm i k_0 \kappa d} \quad (4.7)$$

Şekil 3.3'te gelen dalganın lineer olarak polarize olduğu iki kiral materyal tabakasından hareket eden bir EM dalganın görseli sunulmuştur. İki kiral materyal tabaka arasında herhangi bir kuplaj etkisi yoksa, kiral materyal tabakasının kiralitesi κ şeklinde ifade edilecektir. Böylece iki kiral materyal tabakası arasındaki boşluk kiraliteye sahip olmayacaktır. Buna göre, Sağ ve Sol el polarize dalga transferi 4.8'deki gibi hesaplanabilmekte olup simülasyon sonucu Şekil 4.2'de sunulmuştur (Li vd, 2010).

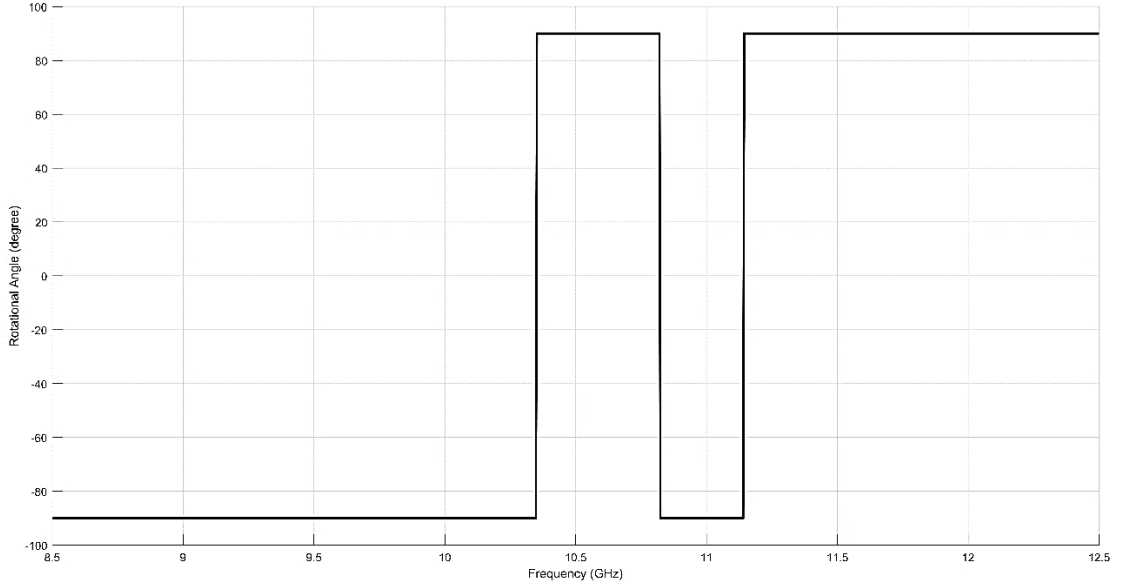
$$T^\pm = T e^{\pm i 2 k_0 \kappa d} \quad (4.8)$$

İki kiral materyal tabakasıyla, polarizasyon dönüş açısı $\theta_I = 2 k_0 \kappa d$ ifade edilmektedir. Burada θ_I iki ayrı kiral tabakanın dönüş açılarının toplamına eşittir. Dönüş açısı iki kiral materyal tabakası arasındaki mesafe ile ilişkisizdir. Eğer iki kiral tabakanın polarizasyon dönme açısı tek bir kiral tabakanın dönme açısının iki katına eşitse, bu kiral tabakaların kiralitesinin ve tabakalar arasındaki boşluğun iki tabakalı kiral yapıda değişmeden kaldığı anlamına gelmektedir. Başka türlü, tabakaların kiralitesi veya tabakalar arasındaki boşluk iki kiral tabaka arasındaki kuplaj etkisi nedeniyle değişmiştir (Li vd, 2010).



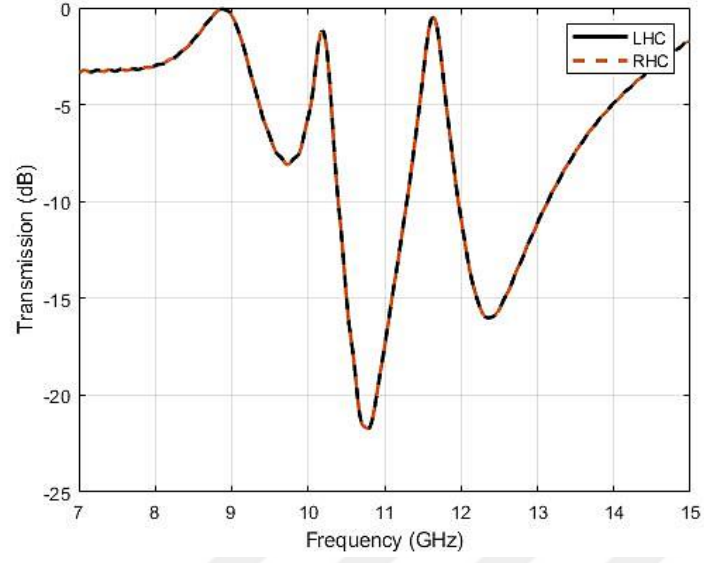
Şekil 4.2 Sağ el ve sol el polarize dalgalarının tasarımdaki tek tabakalı kiral boyunca transform tayfi

Tasarımdaki tek katmanlı kiral yapının polarizasyon dönüş açısı 4.6'daki formül kullanılarak hesaplanmış olup Şekil 4.3'te sunulmuştur.

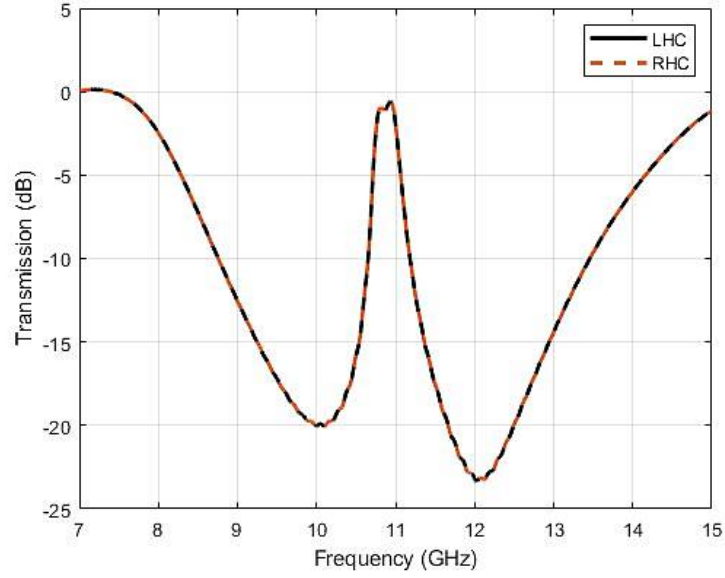


Şekil 4.3 Tasarımdaki tek katmanlı kiral yapının polarizasyon dönüş açısı

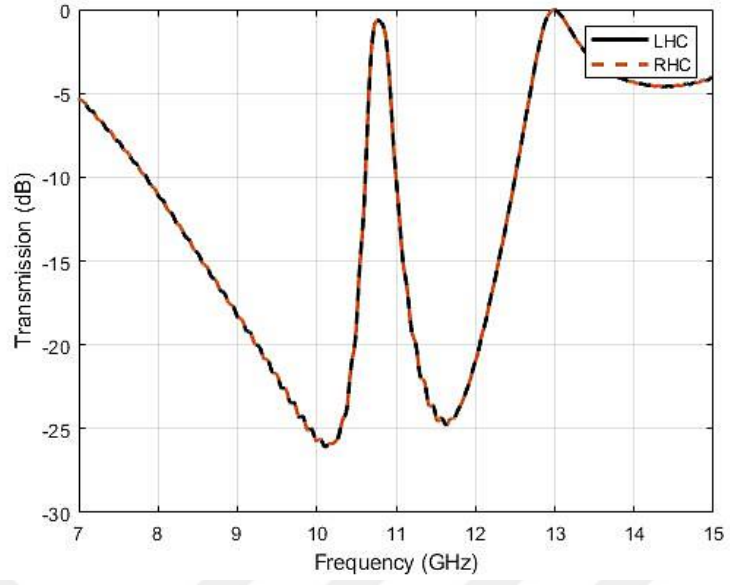
Aralarında 1 mm, 4 mm, 9 mm ve 14 mm mesafeler ile kuplaj etkisinin gözlemlendiği çift katmanlı kral yapının iletim spektrumları sırasıyla Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de sunulmuştur.



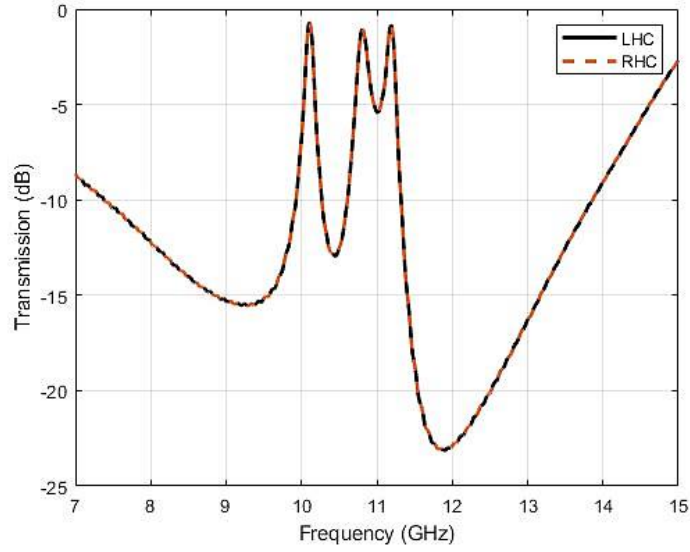
Şekil 4.4 RCP ve LCP dalgalarının tasarımdaki 1 mm mesafeli çift katmanlı kiral yapı boyunca iletim spektrumu



Şekil 4.5 RCP ve LCP dalgalarının tasarımdaki 4 mm mesafeli çift katmanlı kiral yapı boyunca iletim spektrumu

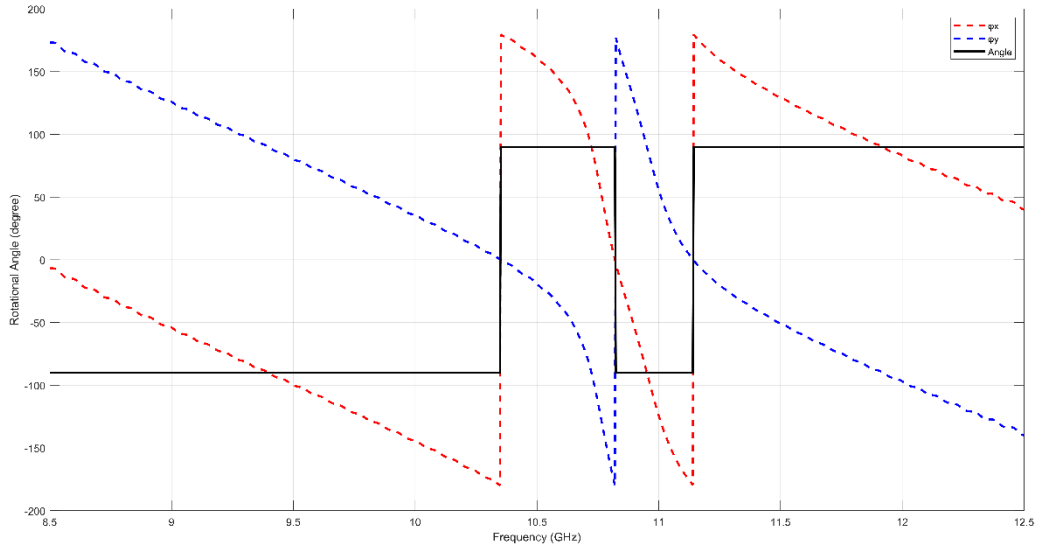


Şekil 4.6 RCP ve LCP dalgalarının tasarımdaki 9 mm mesafeli çift katmanlı kiral yapı boyunca iletim spektrumu



Şekil 4.7 RCP ve LCP dalgalarının tasarımdaki 14 mm mesafeli çift katmanlı kiral yapı boyunca iletim spektrumu

Tasarımdaki çift katmanlı kiral yapının polarizasyon dönüş açısı 4.6'daki formül kullanılarak hesaplanmış olup Şekil 4.8'te sunulmuştur.

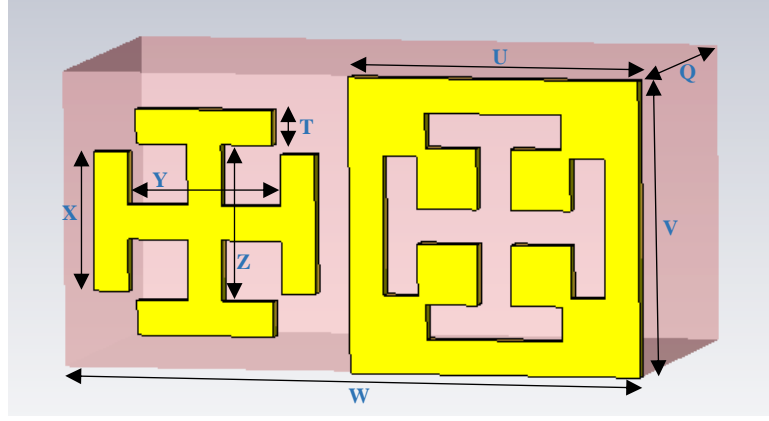


Şekil 4.8 Tasarımdaki çift katmanlı kiral yapının polarizasyon dönüş açısı

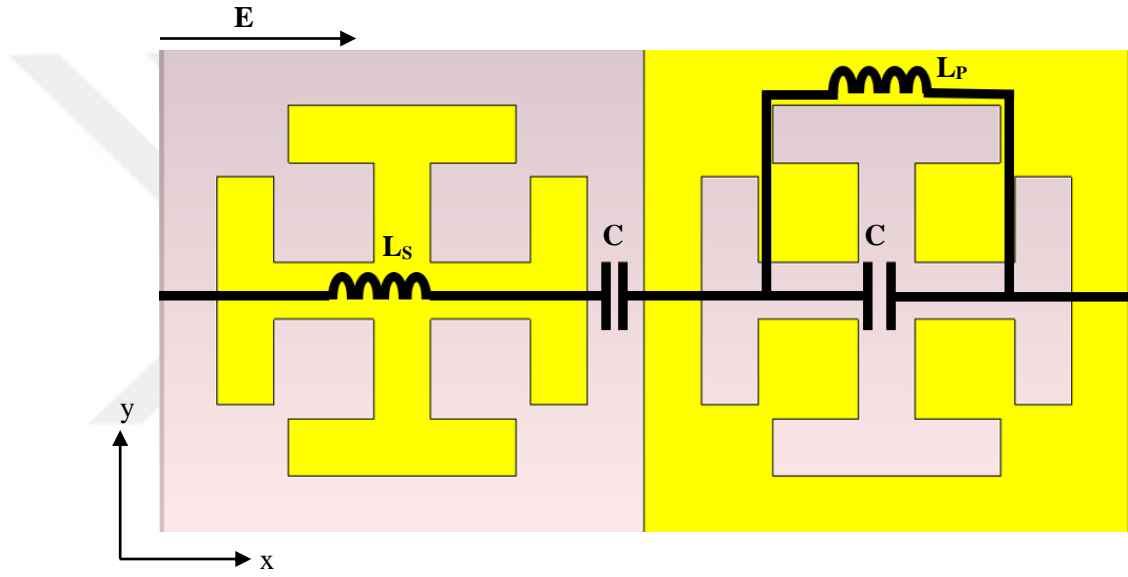
Sonuçlar, kiralitenin bükülmüş çift çapraz telli bir yapıda etkili bir şekilde elde edilebileceğini doğrulamıştır. Bu çift çapraz telli yapıların yoğun bir şekilde istiflenmesiyle yığın kiral metamalzemeler oluşturulmaya çalışıldığında, farklı birim hücrelere ait bitişik çapraz teller arasında güçlü bir bağlantı bulunmaktadır. Kuplaj etkileri, istiflenmiş metamalzemenin kiral özelliklerini tek kiral katmanlardan farklı kılar. Bu nedenle, bir yığın kiral metamateriyalin kiral davranışları, oluşturan tek kiral katmanlardan doğrudan tahmin edilemez (Li vd, 2010).

4.2 Jerusalem Filtre Yapısı

Kiral yapı ile aynı çalışma frekansta tasarlanan Jerusalem filtre yapısının geometrik boyutları Şekil 4.9'da sunulmuştur ve şu şekildedir: $T=1$ mm, $X=4$ mm, $Y=Z=4.5$ mm, $U=V=8.5$ mm, $W=17$ mm, $Q=10$ mm ve bakır yüzeyin kalınlığı 0.5 mm'dir.

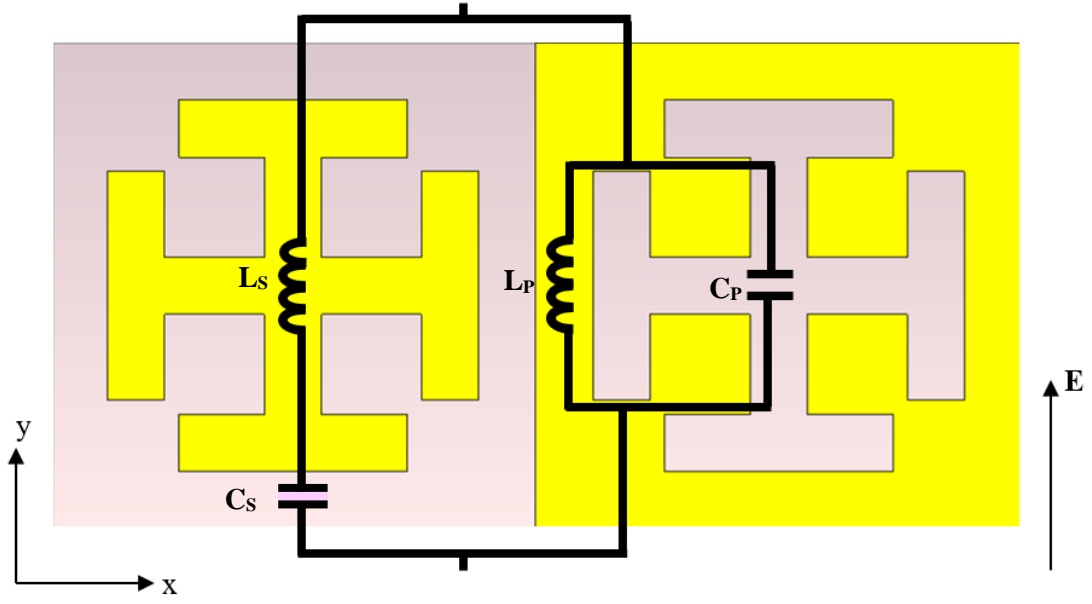


Şekil 4.9 Tasarımdaki jerusalem filtre yapısı



Şekil 4.10 Ön görünümünden yatay polarize dalga için meta yüzeyin eşdeğer devresi

Şekil 4.10 Ön görünümünden yatay polarize dalga için meta yüzeyin eşdeğer devresi ve Şekil 4.9'de sırasıyla yatay ve dikey polarizasyon için metamalzemenin basitleştirilmiş eşdeğer devreleri gösterilmektedir. Alt tabaka etkisi, reaktansın analitik bir ifadesini elde etmek ve rezonans frekanslarını kapalı formda belirlemek için eşdeğer devrelerde ihmal edilmiştir. Yükleme uçları arasındaki boşluk bir kapasitör gibi davranır ve çaprazın metal hattı bir indüktör gibi davranır. Seri bağlı LS ve CS sıradan meta yüzeyin eşdeğer devresinden, paralel bağlı LP ve CP ise tamamlayıcı meta yüzeyin eşdeğer devresinden alınmıştır (Ghosh ve Srivastava, 2015) (Kim vd, 2020).

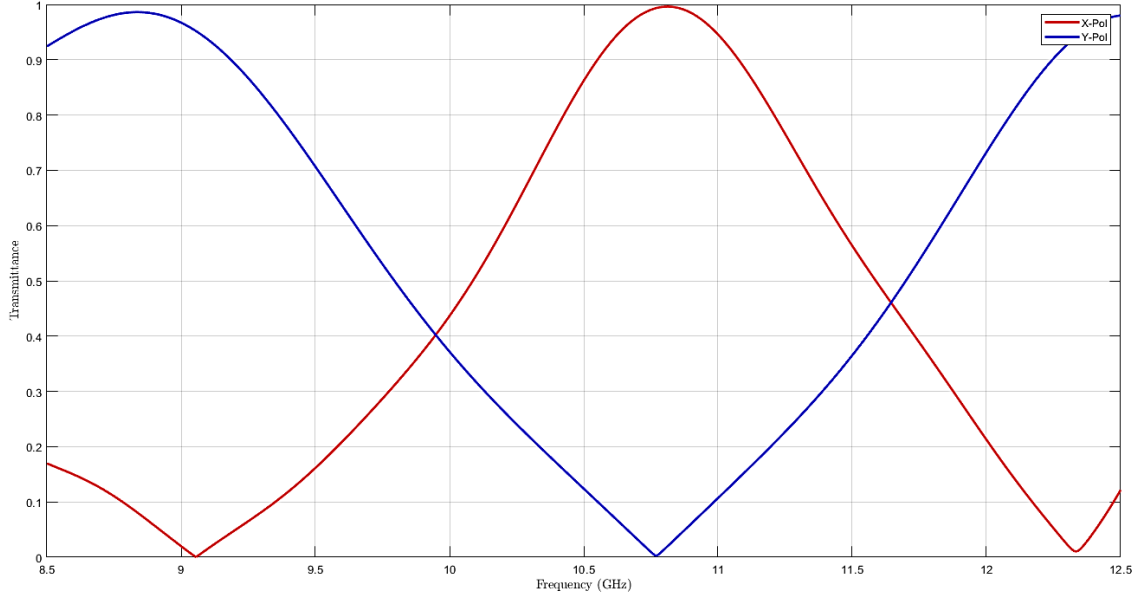


Şekil 4.9 Ön görünümünden dikey polarize dalga için meta yüzeyin eşdeğer devresi

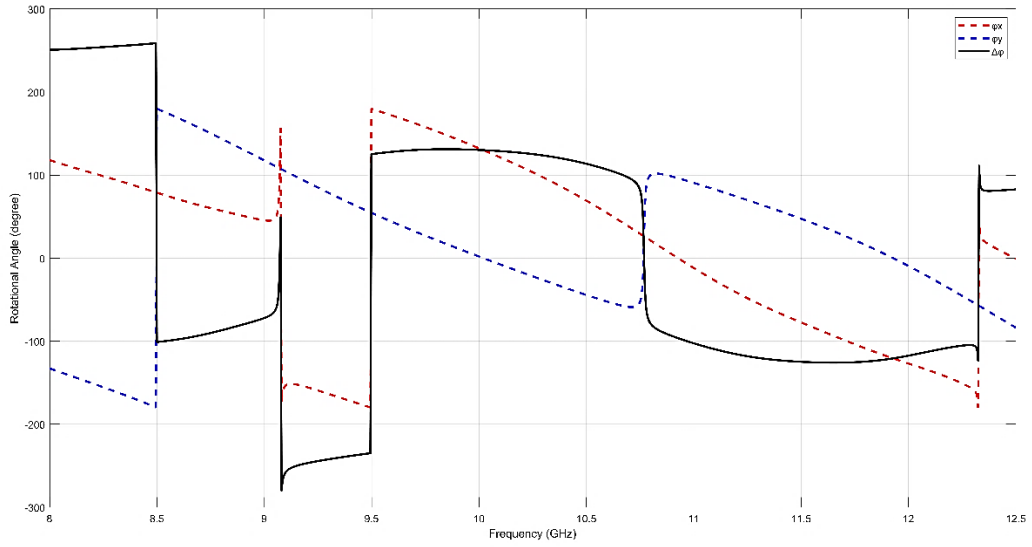
Dönel simetrik meta yüzeyler, gelen yatay ve dikey polarizasyonlar için aynı frekans tepkisini sergiler, bu nedenle her iki gelen polarizasyon için aynı eşdeğer devre ile tanımlanabilmektedir. Metaller arasındaki boşluk bir kapasitör gibi ve metal hat bir indüktör gibi davranmaktadır. Periyodik olarak düzenlenmiş izole metalik rezonatörlerden oluşan sıradan bir meta yüzey, alt tabaka üzerindeki bir ışık alanı metal maskesine benzer ve bant durdurucu frekans tepkisine sahip bir seri LC rezonatörü ile analiz edilebilmektedir. Öte yandan, sıradan meta yüzeyin negatif bir görüntüsüne sahip olan tamamlayıcı bir meta yüzey, bant geçiren bir frekans tepkisi ile paralel bir LC rezonatörü gibi çalışmaktadır. Kendini tamamlayan bir meta yüzey izotropik bir yapı sergiler ve yanıtı gelen dalganın polarizasyonuna bağlıdır. Bu nedenle, polarizasyona bağlı bir spektral yanıtı sahiptir ve gelen polarizasyonlara bağlı olarak iki farklı eşdeğer devre ile temsil edilmektedir (Costa vd, 2014) (Costa vd, 2012) (Xiao-Dong Hu vd, 2009).

Şekil 4.10'de tasarlanan Jerusalem filtre yapısının mavi ile gösterilen yatay ve bordo ile gösterilen dikey polarizasyon olmak üzere iletim spektrumu sunulmuştur. Çalışma frekansı ve yakın frekansların bulunduğu noktalar incelendiğinde, yapının yatay polarizasyon için bant geçiren filtre ve dikey polarizasyon için bant durdurucu filtre olarak

çalıştığı, bununla birlikte iletimin iyi bir seviyede olduğu görülmektedir. Jerusalem filtre yapısına ait faz değişim grafiği ise Şekil 4.11’te sunulmuştur.



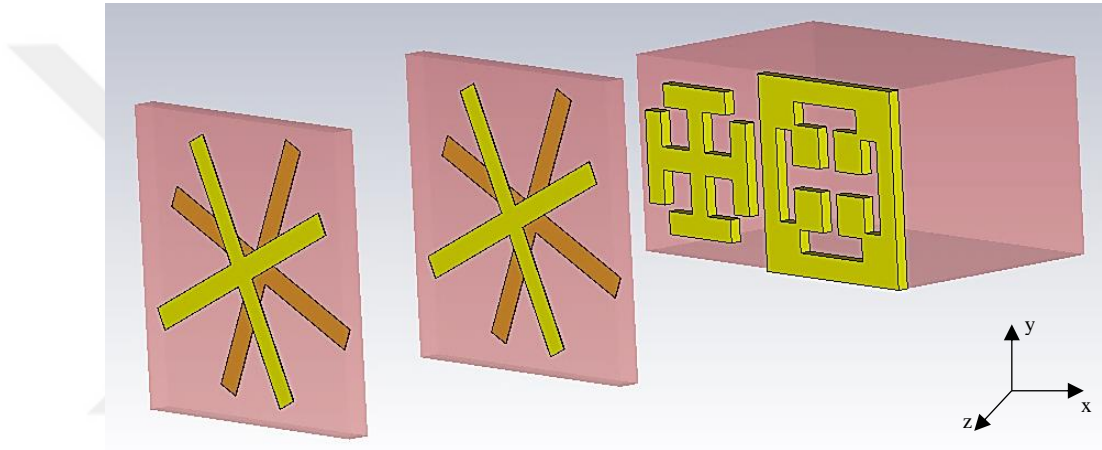
Şekil 4.10 Tasarımdaki Jerusalem filtre yapısının iletim spektrumu



Şekil 4.11 Tasarımdaki Jerusalem filtre yapısının faz değişimi

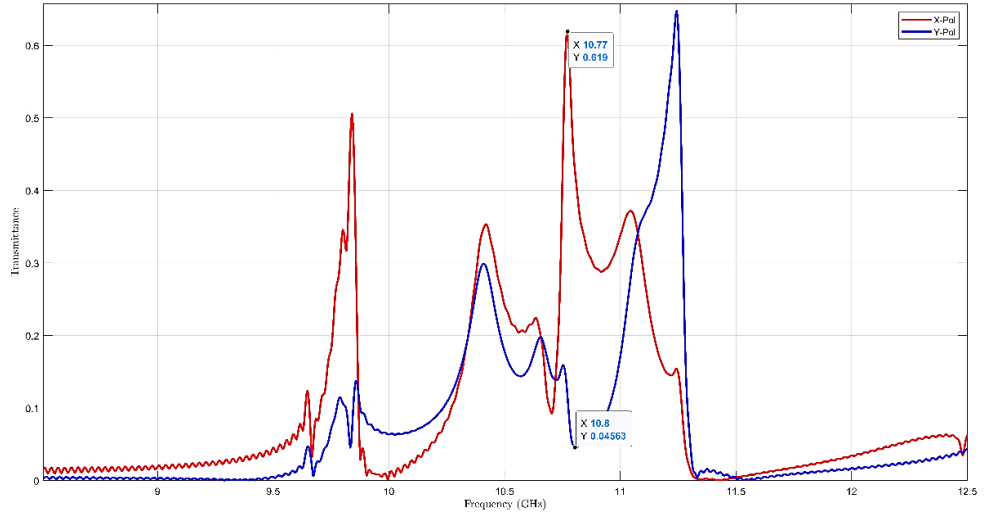
4.3 Tek Yönlü Elektromanyetik Dalga İletimini Sağlayan Bütünleşik Yapının Tasarımı

Çift katmanlı kiral yapıda en iyi kuplaj etkisinin olduğu 14 mm'lik mesafe kullanılmıştır. Şekil 4.12'te görüldüğü gibi; kiral yapının hemen ardına yerleştirilen Jerusalem filtre yapısı ile arasındaki mesafe ise, en iyi sonuçların elde edildiği, 3 cm olarak belirlenmiştir. Bütünleşik yapının iki tarafından da yatay ve dikey polarizasyona sahip düzlem dalga gönderilmiş olup en iyi sonuçların elde edildiği mesafe olan 3 cm uzaklıktan prob ile ölçümleri yapılmıştır.



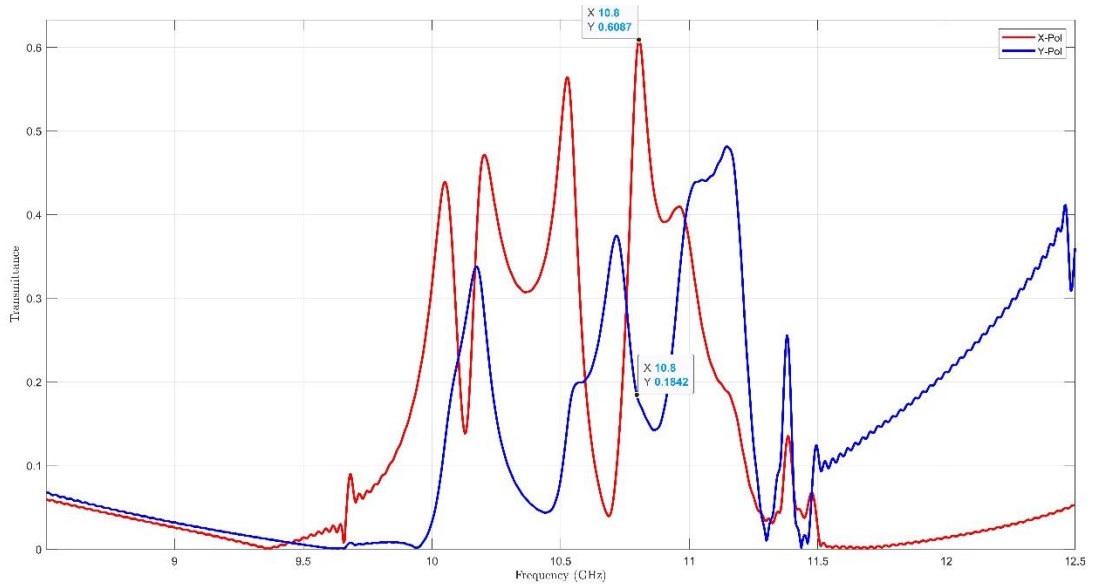
Şekil 4.12 Tek yönlü elektromanyetik dalga iletimini sağlayan bütünleşik yapı

Düzlem dalga önce $-z$ yönünde, daha sonra $+z$ yönünde gönderilmiştir. Şekil 4.13'te $-z$ yönünde gönderilen, lineer dikey ve yatay polarizasyona sahip elektromanyetik dalganın bütünleşik yapıdan ilerlemesi neticesinde alınan ölçüm sonuçları yer almaktadır. Grafikte çalışma frekansına yakın frekanstaki iletim incelendiğinde; gönderilen lineer dikey polarizasyonun lineer yatay polarizasyona döndürülmesi sonucunda, dalganın filtreden geçip probdan ölçümünün alınabildiği görülmüştür. Bununla birlikte lineer yatay polarizasyonun lineer dikey polarizasyona döndürülmesi sonucunda, dalganın filtredeki iletiminin çok zayıf olduğu görülmüştür.



Şekil 4.13 Önce kiral yapı daha sonra filtreden geçen elektromanyetik dalganın iletim spektrumu

Şekil 4.14'da +z yönünde gönderilen, lineer dikey ve yatay polarizasyona sahip elektromanyetik dalganın bütünleşik yapıdan ilerlemesi neticesinde alınan ölçüm sonuçları yer almaktadır. Grafikte çalışma frekansına yakın frekanstaki iletim incelendiğinde; gönderilen lineer dikey polarizasyona sahip dalganın filtreden geçemediği ve lineer yatay polarizasyona sahip dalganın filtreden geçebildiği ve probdan ölçümünün alınabildiği görülmüştür.



Şekil 4.14 Önce filtre daha sonra kiral yapıdan geçen elektromanyetik dalganın iletim spektrumu

5. BAŞARIM İYİLEŞTİRME ÇALIŞMALARI

Tek yönlü elektromanyetik dalga iletimi sağlayan bütünleşik yapı üzerinde başarımlı iyileştirme çalışmaları yapılmış olup çalışmaların olumlu sonuçlandığı gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar alt başlıklar halinde aşağıda sunulmuştur.

5.1 Kiral Yapı Üzerinde Yapılan Başarım İyileştirme Çalışmaları

Kiral yapı üzerinde yapılan başarımlı iyileştirme çalışmaları sonucunda, lineer polarizasyona sahip bir elektromanyetik dalganın ikinci katmanla eşleşmeye ihtiyaç olmadan tek katmanlı yapı ile 90 derecelik bir polarizasyon değişiminin sağlandığı gözlenmiştir. İlk çalışmada zamansal çözümler aranırken frekans tabanlı bir çözüme geçilerek benzetmelerin ciddi şekilde hızlandırılması ve toplanan bilgilerin Floquet Port'lar üzerinden kolayca işlenmesi sağlanmıştır. Benzetim neticesinde S parametre sonuçları kullanılmış olup, grafiklerin y ekseninde bu değer $|t|$ (elektrik alan geçirgenliği) olarak ifade edilmiştir. Elektrik alan geçirgenliği kullanılarak denklem 5.1'deki gibi iletim hesaplanabilmektedir.

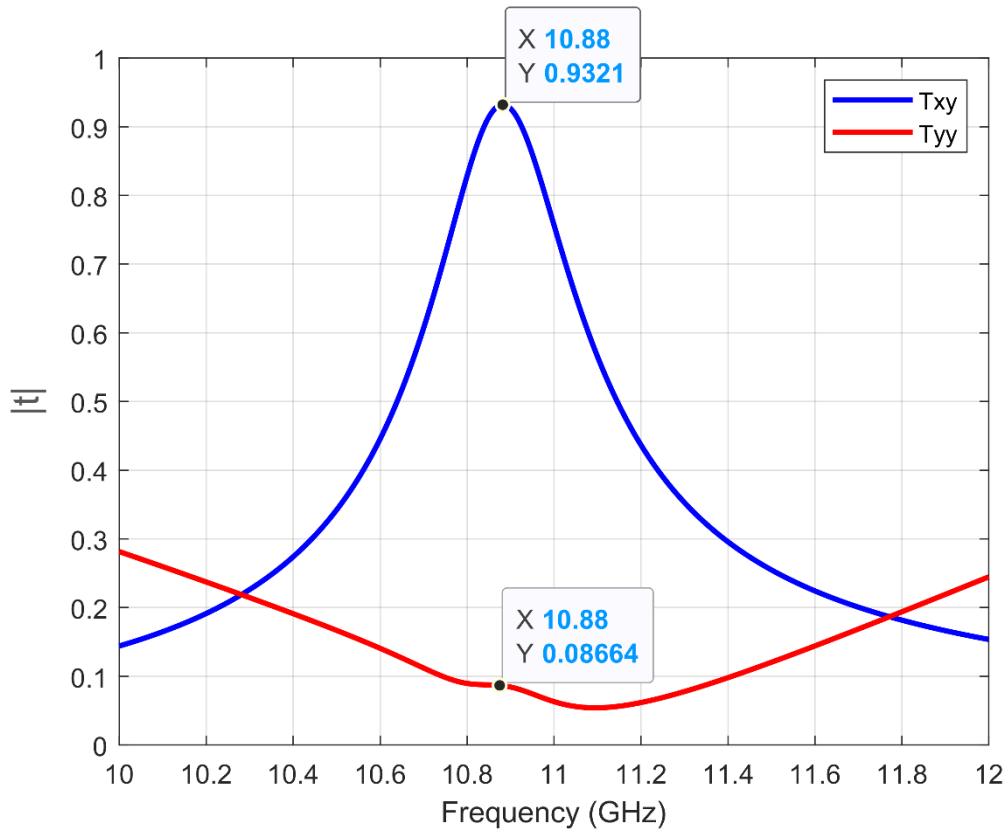
$$T=(|t|)^2 \quad (5.1)$$

Tasarımdaki yapının geometrik boyutunda yapılan değişiklikler Çizelge 5.1'de sunulmuştur.

Çizelge 5. 1 İyileştirilmiş kiral yapının geometrik boyutları

Dielektrik Sabiti ϵ_r	2.08
Dielektrik Kayıp Tanjantı	0.0004
a_x	13 mm
a_y	13 mm
l	12 mm
w	1 mm
d	1 mm
φ_1	25°
φ_2	45°
Bakır Kalınlığı	50 μm

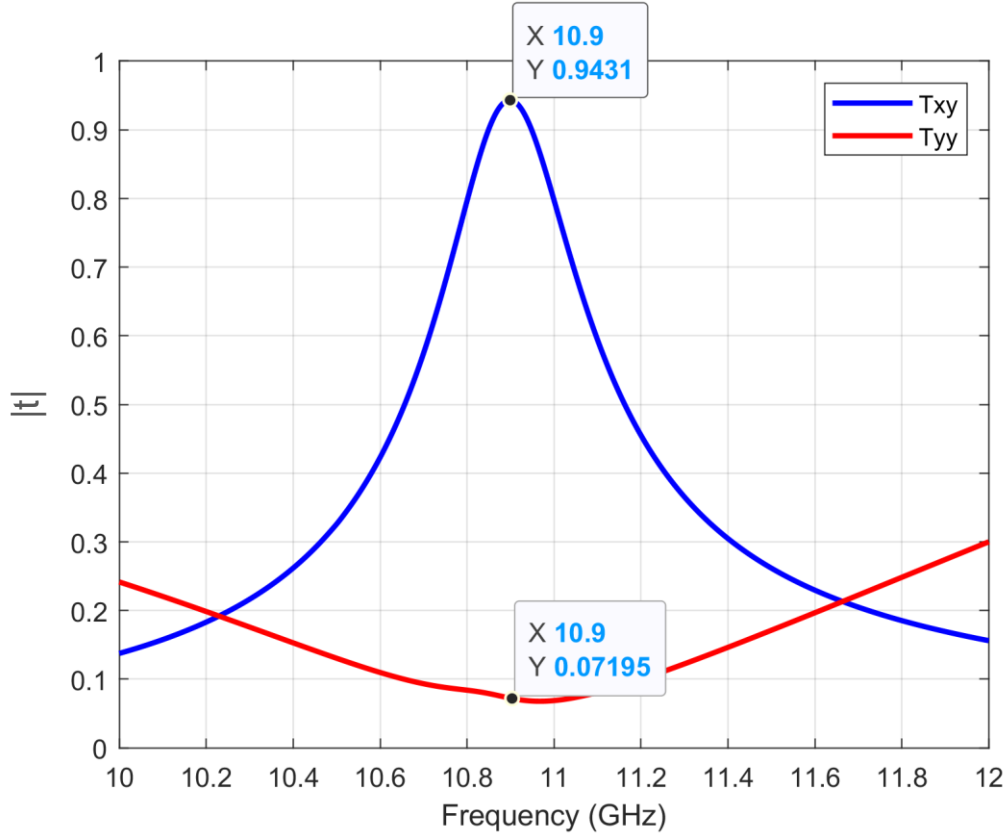
Aynı malzemelerle yapılan benzetim sonucunda, elektromanyetik dalganın yüksek oranda 90° dönüştüğü Şekil 5.1’de görülmektedir. Benzetimde lineer dikey polarizasyona sahip elektromanyetik dalga gönderilip yatay (mavi renk) ve dikey (kırmızı renk) polarize durumlarda ölçümler alınmıştır. Şekil 5.1’de dalganın yaklaşık olarak %93 oranında yatay polarizasyona dönüştüğü ve yaklaşık olarak %8 oranında ise dikey polarize olarak kaldığı görülmektedir. Büyük ölçüde polarizasyon değişiminin sağlanması, tek yönlü elektromanyetik dalga iletimini sağlayan bütünleşik yapının verimliliğini artırmaktadır.



Şekil 5.1 İyileştirilmiş tek katmanlı kiral yapının iletim spektrumu (Txy: Dikey polarize dalga gönderildi, yatay polarizasyonda ölçüm alındı. Tyy: Dikey polarize dalga gönderildi, dikey polarizasyonda ölçüm alındı.)

Kullanılan malzemelerde teflon yerine kayıpsız yalıtkan pcb kullanılarak benzetim yapıldığında, elektromanyetik dalganın yüksek oranda 90° dönüştüğü Şekil 5.2’de görülmektedir. Benzetimde lineer dikey polarizasyona sahip elektromanyetik dalga gönderilip yatay (mavi renk) ve dikey (kırmızı renk) polarize durumlarda ölçümler alınmıştır. Şekil 5.2’de dalganın yaklaşık olarak %94 oranında yatay polarizasyona

dönüştüğü ve yaklaşık olarak %7 oranında ise dikey polarize olarak kaldığı görülmektedir. Büyük ölçüde polarizasyon değişiminin sağlanması, tek yönlü elektromanyetik dalga iletimini sağlayan bütünleşik yapının verimliliği artırmaktadır.

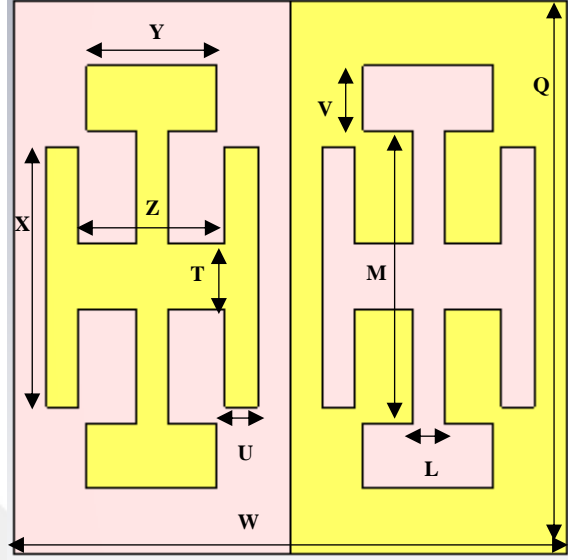


Şekil 5.2 İyileştirilmiş tek katmanlı kiral yapının iletim spektrumu II (Txy: Dikey polarize dalga gönderildi, yatay polarizelerde ölçüm alındı. Tyy: Dikey polarize dalga gönderildi, dikey polarizelerde ölçüm alındı.)

5.2 Jerusalem Filtre Yapısı Üzerinde Yapılan Başarım İyileştirme Çalışmaları

Jerusalem filtre yapısı üzerinde yapılan başarım iyileştirme çalışmaları sonucunda, sadece yatay polarizasyona sahip elektromanyetik dalga iletimi yüksek verimlilikte sağlanmıştır. Şekil 5.3'te görülen yapının boyutları şu şekilde değiştirilmiştir: X=5.5 mm, Y=2.8 mm, Z=3.15 mm, T=V=1.4 mm, U=L=0.7 mm, M=6.3 mm, W=Q=13 mm, bakır yüzeyin kalınlığı 0.05 mm ve teflon kalınlığı 0.5 mm'dir. Önceki çalışmada bakır ve teflonun kalın olması frekansta küçültücü etki ve sinyal kaybına sebebiyet vermekteydi. Bununla birlikte genel üretim boyut standartlarına uymamaktaydı. Bu sebeple Jerusalem filtre

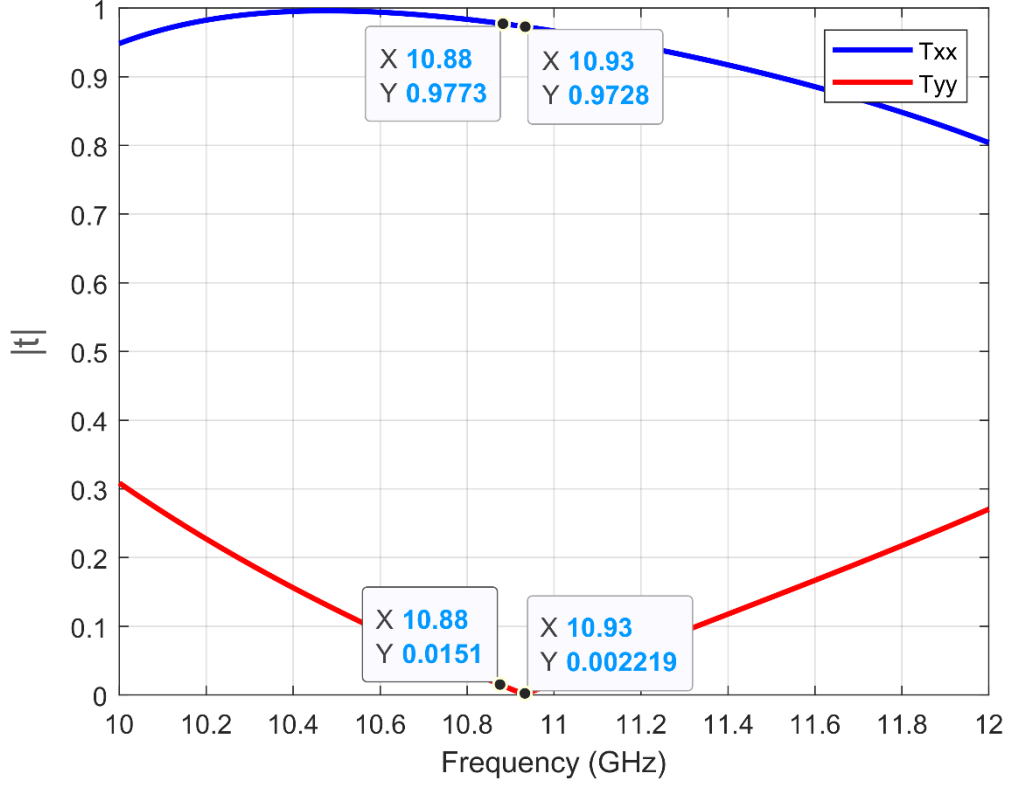
yapısında, kalınlıkları başta olmak üzere boyutsal iyileştirmeler yapılmış olup standart pcb üreticilerinde üretilebilir hale getirilmiştir.



Şekil 5.3 İyileştirilmiş Jerusalem filtre görseli

İlk çalışmada zamansal çözümler aranırken frekans tabanlı bir çözüme geçilerek benzetmelerin ciddi şekilde hızlandırılması ve toplanan bilgilerin Floquet Port'lar üzerinden kolayca işlenmesi sağlanmıştır. Benzetim neticesinde S parametre sonuçları kullanılmış olup, grafiklerin y ekseninde bu değer $|t|$ (elektrik alan geçirgenliği) olarak ifade edilmiştir. Elektrik alan geçirgenliği kullanılarak denklem 5.1'deki gibi iletim hesaplanabilmektedir.

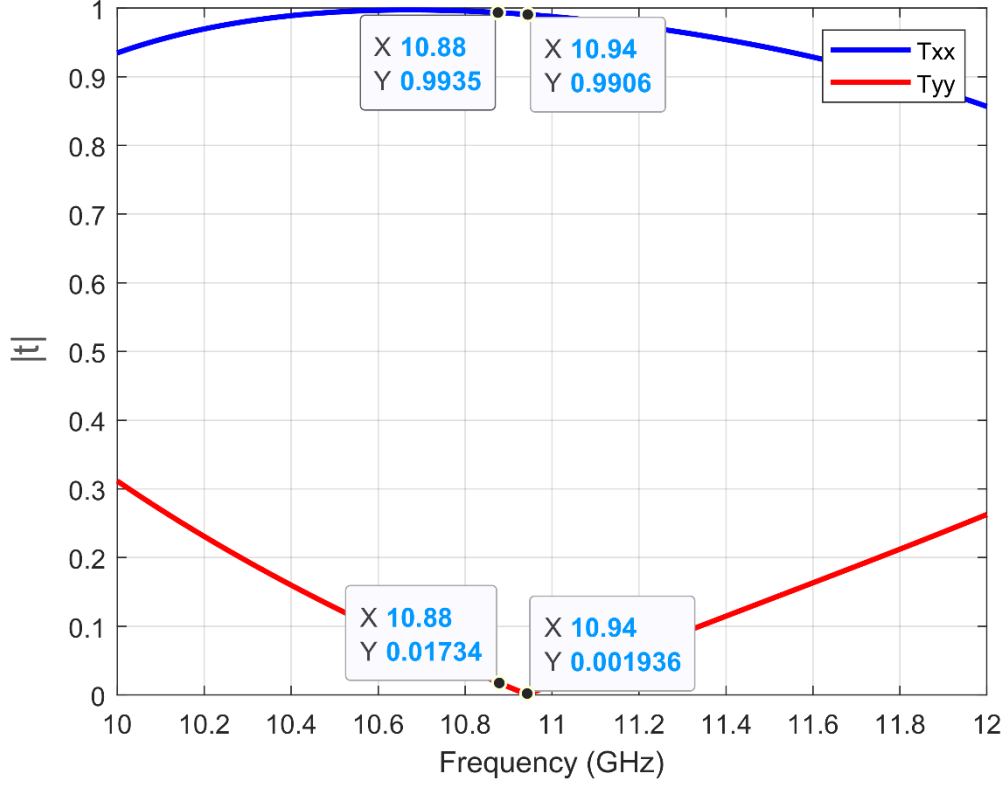
Aynı malzemelerle yapılan benzetimde; lineer yatay polarizasyona sahip elektromanyetik dalga gönderilip yatay (mavi renk) polarize durumda ve lineer dikey polarizasyona sahip elektromanyetik dalga gönderilip dikey (kırmızı renk) polarize durumda ölçümler alınmıştır. Yaklaşık olarak %97 oranında yatay polarize dalga iletiminin sağlandığı ve yaklaşık olarak %1 oranında dikey polarize dalganın geçtiği Şekil 5.4'te görülmektedir. Büyük ölçüde yatay polarize dalga iletiminin sağlanması, tek yönlü elektromanyetik dalga iletimini sağlayan bütünlük yapının verimliliğini artırmaktadır.



Şekil 5.4 İyileştirilmiş Jerusalem filtre yapısının iletim spektrumu (Txx: Yatay polarize dalga gönderildi, yatay polarizelerde ölçüm alındı. Tyy: Dikey polarize dalga gönderildi, dikey polarizelerde ölçüm alındı.)

Kullanılan malzemelerde değişiklik yapılmayan benzetim sonucunda, yüksek oranda yatay polarizasyona sahip elektromanyetik dalga iletiminin sağlandığı ve dikey polarizasyona sahip elektromanyetik dalga iletiminin ihmal edilebilir seviyede düşük olduğu gözlenmiştir.

Malzemelerde teflon yerine kayıpsız yalıtkan pcb kullanılan benzetimde; lineer yatay polarizasyona sahip elektromanyetik dalga gönderilip yatay (mavi renk) polarize durumda ve lineer dikey polarizasyona sahip elektromanyetik dalga gönderilip dikey (kırmızı renk) polarize durumda ölçümler alınmıştır. Şekil 5.5'te yaklaşık olarak %99 oranında yatay polarize dalga iletiminin sağlandığı ve yaklaşık olarak %1 oranında dikey polarize dalganın geçtiği görülmektedir. Büyük ölçüde yatay polarize dalga iletiminin sağlanması, tek yönlü elektromanyetik dalga iletimini sağlayan bütünleşik yapının verimini artırmaktadır.



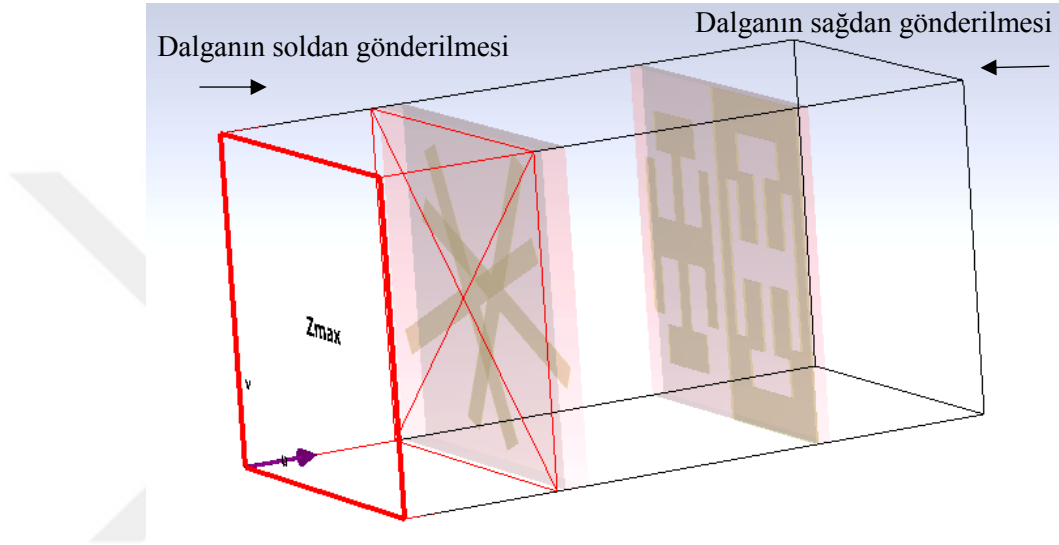
Şekil 5.5 İyileştirilmiş Jerusalem filtre yapısının iletim spektrumu II (Txx: Yatay polarize dalga gönderildi, yatay polarizelerde ölçüm alındı. Tyy: Dikey polarize dalga gönderildi, dikey polarizelerde ölçüm alındı.)

Kullanılan malzemelerde teflon yerine kayıpsız yalıtkan pcb kullanılarak benzetim yapıldığında, yüksek oranda yatay polarizasyona sahip elektromanyetik dalganın iletiminin sağlandığı ve dikey polarizasyona sahip elektromanyetik dalganın iletiminin ihmal edilebilir seviyede düşük olduğu gözlenmiştir.

5.3 Başarım İyileştirme Çalışması Yapılan Tek Yönlü Elektromanyetik Dalga İletimini Sağlayan Bütünleşik Yapı Sonuçları

Tek yönlü elektromanyetik dalga iletimini sağlayan bütünleşik yapıda, başarıyı iyileştirilmiş ve önceki alt başlıklarda anlatılmış olan kiral ve Jerusalem filtre yapıları kullanılmıştır. Yapılar yaklaşık olarak 10 mm'lik mesafe ile art arda konularak birlikte benzetimi yapılmış olup en optimum iletim bu mesafeden sağlanmıştır. İlk çalışmada zamansal çözümler aranırken frekans tabanlı bir çözücüye geçilerek benzetmelerin ciddi

şekilde hızlandırılması ve toplanan bilgilerin Floquet Port'lar üzerinden kolayca işlenmesi sağlanmıştır. Şekil 5.6'da bütünleşik yapıya elektromanyetik dalganın hangi yönlerden gönderildiği görülmektedir. Benzetim neticesinde S parametre sonuçları kullanılmış olup, grafiklerin y ekseninde bu değer $|t|$ (elektrik alan geçirgenliği) olarak ifade edilmiştir. Elektrik alan geçirgenliği kullanılarak iletim denklem 5.1'deki gibi hesaplanabilmektedir.

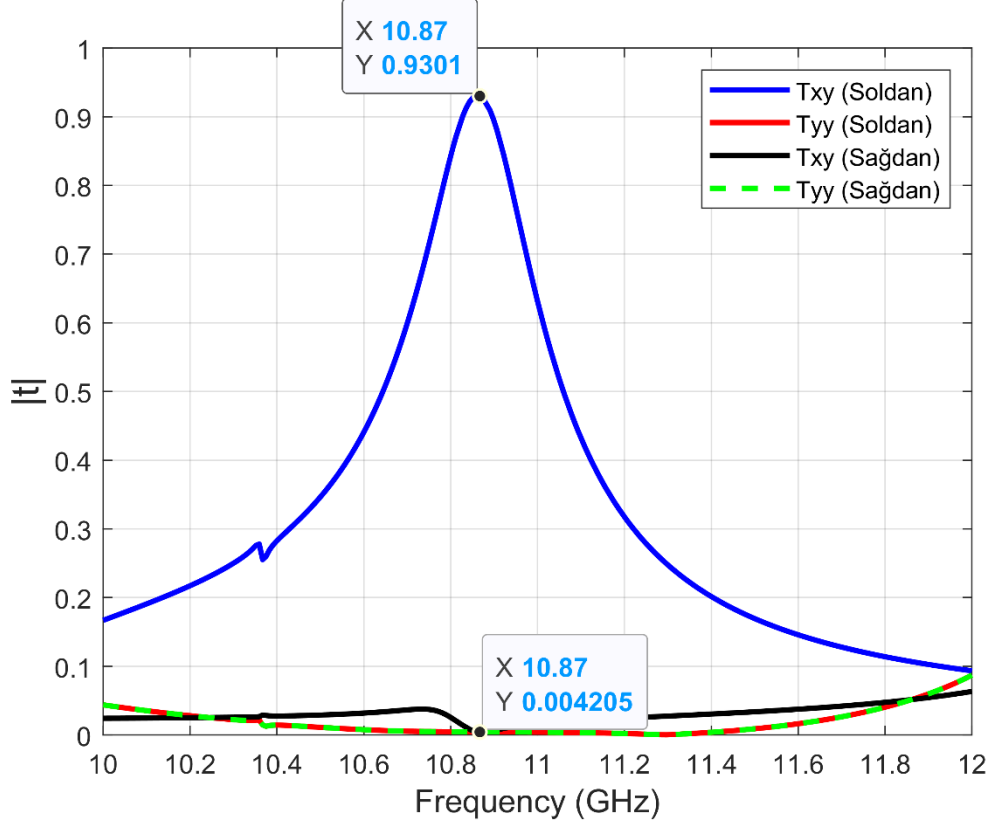


Şekil 5.6 Tek yönlü elektromanyetik dalga iletimini sağlayan bütünleşik yapıda dalga gönderim yönü

Malzeme değişikliği yapılmayan kiral ve Jerusalem filtre yapılarından oluşan bütünleşik yapıya, dikey polarizasyona sahip elektromanyetik dalganın soldan ve sağdan gönderilmesi sonucunda elde edilen grafik Şekil 5.7'de sunulmuştur. Soldan gönderilen dikey polarize dalganın kiral yapıda yatay polarize dalgaya dönüşmesi sonucunda, Jerusalem filtre yapısından geçerek %93'lük büyük oranda iletiminin sağlandığı gözlenmiştir. Sağdan gönderilen dikey polarize dalganın Jerusalem filtre yapısından büyük oranda geçememesi sonucunda iletimin ihmal edilebilir seviyede az olduğu gözlenmiştir.

Başarım iyileştirme çalışmaları sonucunda tek yönlü elektromanyetik dalga iletiminin önceki çalışmaya oranla daha iyi sağlandığı gözlenmiştir. İletim kontrastı denklem 5.2 ile birlikte sunulmuştur.

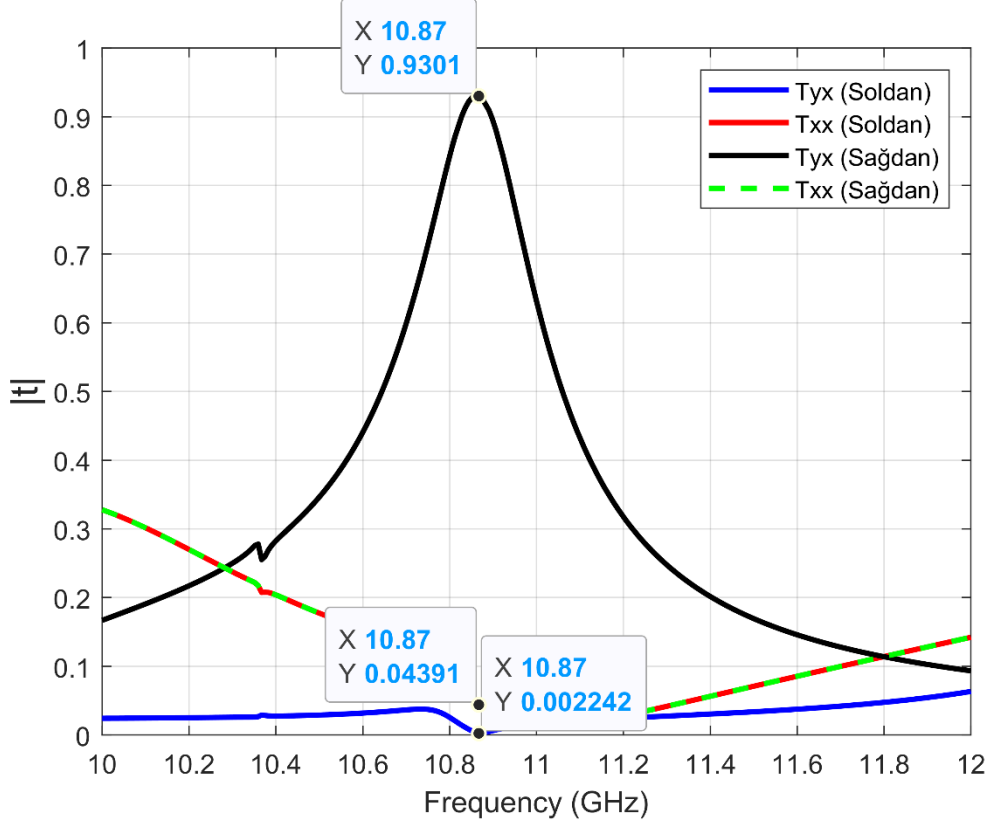
$$\text{İletim kontrastı} = \frac{T_{xy}(\text{soldan})}{T_{xy}(\text{sağdan})} = \frac{(0.9301)^2}{(0.004205)^2} = 48924 \quad (5.2)$$



Şekil 5.7 Soldan ve sağdan dikey polarize yayın gönderilen tek yönlü elektromanyetik dalga iletimini sağlayan bütünleşik yapıdaki iletim spektrumu (Txy: Yatay polarize dalga gönderildi, yatay polarizelerde ölçüm alındı. Tyy: Dikey polarize dalga gönderildi, dikey polarizelerde ölçüm alındı.)

Malzeme değişikliği yapılmayan kiral ve Jerusalem filtre yapılarından oluşan bütünleşik yapıya, yatay polarizasyona sahip elektromanyetik dalganın soldan ve sağdan gönderilmesi sonucunda elde edilen grafik Şekil 5.8’de sunulmuştur. Soldan gönderilen yatay polarize dalganın kiral yapıda dikey polarize dalgaya dönüşmesi ve Jerusalem filtre yapısından büyük oranda geçememesi sonucunda iletimin ihmal edilebilir seviyede az olduğu gözlenmiştir. Sağdan gönderilen yatay polarize dalganın Jerusalem filtre yapısından geçerek kiral malzemede dikey polarize dalgaya dönüşmesi sonucunda %93’lük büyük oranda iletimin sağlandığı gözlenmiştir. İletim kontrastı denklem 5.3 ile birlikte sunulmuştur.

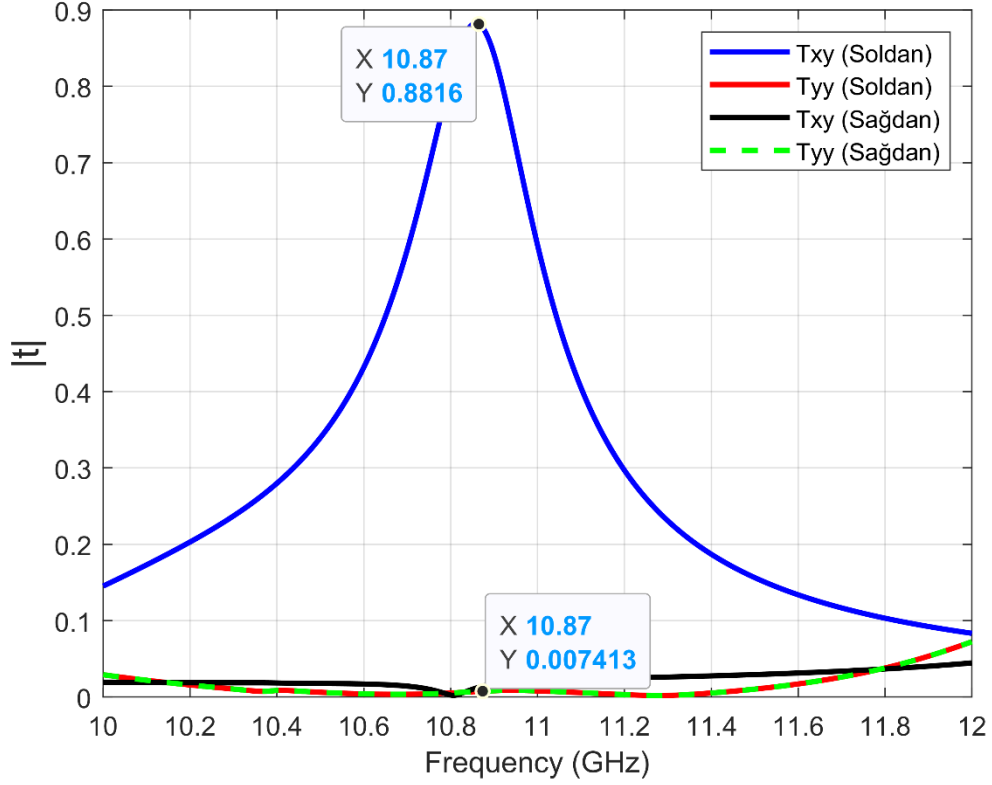
$$\text{İletim kontrastı} = \frac{T_{yx}(\text{soldan})}{T_{yx}(\text{sağdan})} = \frac{(0.9301)^2}{(0.002242)^2} = 172102 \quad (5.3)$$



Şekil 5.8 Soldan ve sağdan yatay polarize yayın gönderilen tek yönlü elektromanyetik dalga iletimini sağlayan bütünleşik yapıdaki iletim spektrumu (Txx: Yatay polarize dalga gönderildi, yatay polarizede ölçüm alındı. Tyx: Dikey polarize dalga gönderildi, dikey polarizede ölçüm alındı.)

Teorik olarak iletilen gücün daha fazla olup olmadığını gözlemlemek üzere fabrikasyon kıstaslarına aldırış etmeden teorik bir pcb filtre yapısı için varsayım yapıldı. Malzemelerde teflon yerine 0.5 mm kalınlığında Dielektrik Sabiti $\epsilon_r = 1.5$ olan pcb kullanıldığında; kiral ve Jerusalem filtre yapılarından oluşan bütünleşik yapıya, dikey polarizasyona sahip elektromanyetik dalganın soldan ve sağdan gönderilmesi sonucunda elde edilen grafik Şekil 5.9'da sunulmuştur. Soldan gönderilen dikey polarize dalganın kiral yapıda yatay polarize dalgaya dönüşmesi sonucunda, Jerusalem filtre yapısından geçerek %88'lik büyük oranda iletimin sağlandığı gözlenmiştir. Sağdan gönderilen dikey polarize dalganın Jerusalem filtre yapısından büyük oranda geçememesi sonucunda iletimin ihmal edilebilir seviyede az olduğu gözlenmiştir.

$$\text{İletim kontrastı} = \frac{T_{xy}(\text{soldan})}{T_{xy}(\text{sağdan})} = \frac{(0.8816)^2}{(0.002242)^2} = 14143 \quad (5.4)$$

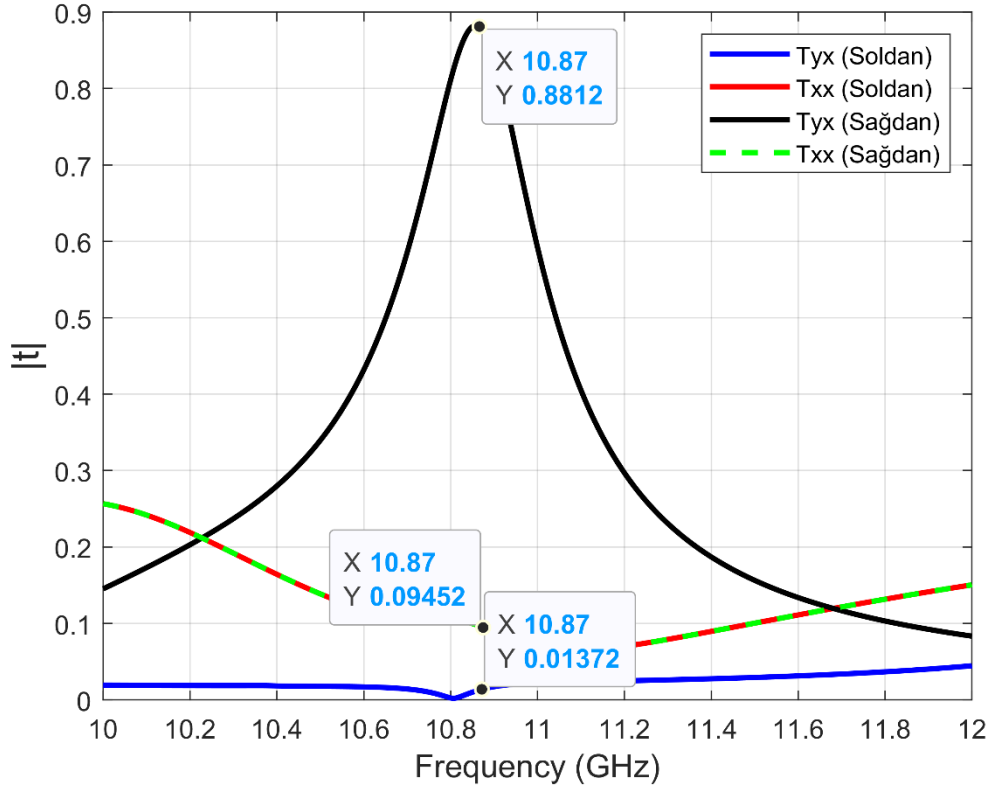


Şekil 5.9 Soldan ve sağdan dikey polarize yayın gönderilen tek yönlü elektromanyetik dalga iletimini sağlayan bütünleşik yapıdaki iletim spektrumu II (Txy: Yatay polarize dalga gönderildi, yatay polarizelerde ölçüm alındı. Tyy: Dikey polarize dalga gönderildi, dikey polarizelerde ölçüm alındı.)

Teorik olarak iletilen gücün daha fazla olup olmadığını gözlemlemek üzere fabrikasyon kıstaslarına aldırış etmeden teorik bir pcb filtre yapısı için varsayım yapıldı. Malzemelerde teflon yerine 0.5 mm kalınlığında Dielektrik Sabiti $\epsilon_r = 1.5$ olan pcb kullanıldığında; kiral ve Jerusalem filtre yapılarından oluşan bütünleşik yapıya, yatay polarizasyona sahip elektromanyetik dalganın soldan ve sağdan gönderilmesi sonucunda elde edilen grafik Şekil 5.10'da sunulmuştur. Soldan gönderilen yatay polarize dalganın kiral yapıda dikey polarize dalgaya dönüşmesi ve Jerusalem filtre yapısından büyük oranda geçememesi sonucunda iletimin ihmal edilebilir seviyede az olduğu gözlenmiştir. Sağdan gönderilen yatay polarize dalganın Jerusalem filtre yapısından geçerek kiral

malzemede dikey polarize dalgaya dönüşmesi sonucunda %88'lik büyük oranda iletimin sağlandığı gözlenmiştir. İletim kontrastı denklem 5.5 ile birlikte sunulmuştur.

$$\text{İletim kontrastı} = \frac{T_{yx}(\text{soldan})}{T_{yx}(\text{sağdan})} = \frac{(0.8812)^2}{(0.01372)^2} = 4125 \quad (5.5)$$



Şekil 5.10 Soldan ve sağdan yatay polarize yayın gönderilen tek yönlü elektromanyetik dalga iletimini sağlayan bütünleşik yapıdaki iletim spektrumu II (Txx: Yatay polarize dalga gönderildi, yatay polarizede ölçüm alındı. Tyx: Dikey polarize dalga gönderildi, dikey polarizede ölçüm alındı.)

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Elektromanyetik dalga polarizasyonuna yön vermeye yönelik literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır ve bu amaç doğrultusunda çeşitli malzemelerle tasarlanan yapılar birçok alanda kullanılabilir. Önemi göz ardı edilemeyecek alanlardan birisi de Elektronik Harp alanıdır. Bu yapıların doğrudan Elektronik Harp alanında tasarlanıp kullanılmasına yönelik çalışmaların eksikliği literatürde tespit edilmiştir.

Elektronik Harp alanında elektromanyetik dalga polarizasyonunun yönlendirebilir olması, tehditlere ait sinyallerin polarizasyon kaybı olmaksızın (ya da minimum seviyede olması) algılanmasında büyük bir rol oynamaktadır. Kayıp olmadan algılanan sinyallerin GVD'den doğru tehditler ile eşleştirilme, dolayısıyla pilotun RWR ekranında doğru tehditleri görme ihtimali artacaktır.

Bu tez çalışmasında ilk aşamadaki yapılar ayrı ayrı incelendiğinde; kiral Yapı ve Jerusalem Filtre Yapısı iletim sonuçlarının gayet iyi seviyede olduğu ancak birlikte kullanıldığı zaman iletimde bir miktar kayıpların olduğu gözlenmiştir. Tespit edilen bu kayıpların giderilmesine yönelik başarımla iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda ayrı ayrı kiral ve Jerusalem filtre yapılarının iletiminde iyileşmeler gözlenmiştir. Dolayısıyla iki yapının birlikte kullanıldığı tek yönlü elektromanyetik dalga iletimini sağlayan bütünleşik yapının da iletiminin ilk çalışmaya oranla artmış olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak diyot özelliği gösteren bu tek yönlü elektromanyetik dalga iletimini sağlayan bütünleşik yapının etkin bir şekilde elektronik harp alanında kullanılabilmesi değerlendirilmektedir.

Elektronik Harp alanı için kullanılması planlanan bu yapıların daha sonraki çalışmalarda tek frekansta değil de belirli bir bant genişliğine sahip olacak şekilde tasarlanması ve bir ürün haline getirilmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Bahaa E A Saleh. (2019). *Fundamentals of photonics*. Wiley.
- Bose, J. C. (1898). On the rotation of plane of polarisation of electric wave by a twisted structure. *Proceedings of the Royal Society of London*, 63(389-400), 146–152. <https://doi.org/10.1098/rspl.1898.0019>
- Costa, F., Agostino Monorchio, & Giuliano Manara. (2014). An Overview of Equivalent Circuit Modeling Techniques of Frequency Selective Surfaces and Metasurfaces. *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 960–976.
- Costa, F., Monorchio, A., & Manara, G. (2012). Efficient Analysis of Frequency-Selective Surfaces by a Simple Equivalent-Circuit Model. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 54(4), 35–48. <https://doi.org/10.1109/map.2012.6309153>
- Cui, T. J., Smith, D. R., & Liu, R. (2010). *Metamaterials: Theory, design and applications*. Springer.
- Ghosh, S., & 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. <https://doi.org/10.1109/lawp.2014.2369732>
- Jin Au Kong. (2008). *Electromagnetic wave theory*. Emw Publishing.
- John David Jackson, & Wiley. (2011). *Classical electrodynamics*. Wiley India.
- Jones, S. S. D., & Brown, J. (1949). Metallic Delay Lenses. *Nature*, 163(4139), 324–325. <https://doi.org/10.1038/163324a0>
- Kar, S. (2023). *Metamaterials and Metasurfaces*.
- Kim, S., Celso Martines Leite, Park, J., Kim, H.-J., & Jang, J. (2020). Multiband Terahertz Self-Complementary Metasurface. *IEEE Access*, 8, 199051–199059. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3034120>
- Kishk, A. (2011). *Electromagnetic Waves*. BoD – Books on Demand.
- Kock, W. E. (1946). Metal-Lens Antennas. *Metal-Lens Antennas*, 34(11), 828–836. <https://doi.org/10.1109/jrproc.1946.232264>
- Kumar, P., Ali, T., & Pai, M. M. M. (2021). Electromagnetic Metamaterials: A New Paradigm of Antenna Design. *IEEE Access*, 9, 18722–18751. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3053100>
- Kwon, D.-H., Werner, D. H., Kildishev, A. V., & Shalaev, V. M. (2008). Material parameter retrieval procedure for general bi-isotropic metamaterials and its application to optical chiral negative-index metamaterial design. *Optics Express*, 16(16), 11822. <https://doi.org/10.1364/oe.16.011822>

- Lindell, I. V. (1994). *Electromagnetic Waves in Chiral and Bi-isotropic Media*. Artech House Publishers.
- Lindman, K. F. (1920). Über eine durch ein isotropes System von spiralförmigen Resonatoren erzeugte Rotationspolarisation der elektromagnetischen Wellen. *Annalen Der Physik*, 368(23), 621–644. <https://doi.org/10.1002/andp.19203682303>
- MartínezA., & J. Martí. (2005). Negative refraction in two-dimensional photonic crystals: Role of lattice orientation and interface termination. *Physical Review B*, 71(23). <https://doi.org/10.1103/physrevb.71.235115>
- Mehmet Yaylacı, 2023. <https://www.savunmasanayist.com/>
- Menzel, C., Carsten Rockstuhl, Paul, T., & Lederer, F. (2008). Retrieving effective parameters for quasiplanar chiral metamaterials. *Applied Physics Letters*, 93(23). <https://doi.org/10.1063/1.3046127>
- Notomi, M. (2000). Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: Refractionlike behavior in the vicinity of the photonic band gap. *Physical Review B*, 62(16), 10696–10705. <https://doi.org/10.1103/physrevb.62.10696>
- Pendry, J. B. (2000). Negative Refraction Makes a Perfect Lens. *Physical Review Letters*, 85(18), 3966–3969. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.85.3966>
- Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., & Stewart, W. J. (1999). Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47(11), 2075–2084. <https://doi.org/10.1109/22.798002>
- Shelby, R. A. (2001). Experimental Verification of a Negative Index of Refraction. *Science*, 292(5514), 77–79. <https://doi.org/10.1126/science.1058847>
- Singh, A. K., Abegaonkar, M. P., & Shibani Kishen Koul. (2021). *Metamaterials for Antenna Applications*. CRC Press.
- Stutzman, W. L. (2018). *Polarization in electromagnetic systems*. Artech House.
- Verhoeven, G. J. (2017). The reflection of two fields – Electromagnetic radiation and its role in (aerial) imaging. *AARGnews*, 55(October), 13–18. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3534245>
- Veselago, V. G. (1968). The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values Of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi*, 10(4), 509–514. <https://doi.org/10.1070/pu1968v010n04abeh003699>
- Wolff, C. (2023). *Polarisation von Antennen - Radar Basics*. www.radartutorial.eu. Retrieved December 17, 2023, from <https://www.radartutorial.eu/06.antennas/Polarisation.de.html>

Xiao-Dong Hu, Xi-Lang Zhou, Lin-Sheng Wu, Liang Zhou, & Wen-Yan Yin. (2009). A Miniaturized Dual-Band Frequency Selective Surface (FSS) With Closed Loop and Its Complementary Pattern. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 8, 1374–1377. <https://doi.org/10.1109/lawp.2009.2039110>

