



**π ŞEKİLLİ METAMALZEMELER KULLANILARAK DOĞAL VE
YÜKSEK DEĞERLİKLİ BAKIŞIMSIZ ORTAM ELDE EDİLMESİ**

Oğuz DERİN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2019

Oğuz DERİN tarafından hazırlanan “ π ŞEKLİLLİ METAMALZEMELER KULLANILARAK DOĞAL VE YÜKSEK DEĞERLİKLİ BAKIŞIMSIZ ORTAM ELDE EDİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan AKGÖL

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet BAKIR

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Bozok Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 22/01/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Tolga DEPCI

Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülediğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Oğuz DERİN

22/01/2019



π ŞEKİLLİ METAMALZEMELER KULLANILARAK DOĞAL VE YÜKSEK
DEĞERLİKLİ BAKIŞIMSIZ ORTAM ELDE EDİLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Oğuz DERİN

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak2019

ÖZET

Bu çalışmada, simetrik olmayan iletim özelliğinden dolayı, bakışsız metamalzemeler (MTM'ler) kullanılarak doğal bakışsızlık olayı ve negatif kırılma indisi benzetimler ile tasarlanmış ve deneysel olarak incelenmiştir. Yapının polarizasyon dönüştürme özelliği incelenmiş ve tartışılmıştır. Önerilen çok işlevli tasarımlar çok basit geometrilerle (π -şekilli), düşük kayıplara ve yüksek optik aktiviteye sahiptir. Ek olarak, bu yeni tasarımlar sayısal ve deneysel olarak kıyaslanmıştır. Önerilen modeller, literatürde simetrik olmayan iletim ve bakışsız MTM çalışmaları ile karşılaştırıldığında birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlar, çok basit geometrilerle (π -şekilli), büyük asimetric iletme, doğal materyaller gibi küçük bir bakışsızlığa ve ayrıca mekanik ayarlanabilme içinde arzu edildiği gibi çok yüksek bir bakışsızlığa sahip olabilmesidir. Ayrıca, önerilen yapılar kullanılarak, yeni tip bakışsız MTM'lerin üretilmesi ve savunma sistemlerinden değişen teknolojilere kadar pek çok farklı uygulamada kullanılmasını mümkün olacaktır.

Anahtar Kelimeler : Metamalzeme, optik aktivite, bakışsızlık

Sayfa Adedi : 56

Danışman : Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN

REALIZATION OF NATURAL LIKE AND STRONG CHIRALITY BY USING π SHAPED
RESONATORS
(M. Sc. Thesis)

Oğuz DERİN

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

January 2019

ABSTRACT

In this thesis, asymmetric transmission, natural chirality phenomena and retrieval study with chiral metamaterials (MTMs) are numerically and experimentally focused, investigated and discussed by examining the polarization conversion effect. Suggested multi-functional designs have very simple geometries (π -shaped), low losses and huge optical activities. In addition, these new designs are numerically and experimentally retrieved. The proposed models have many advantages when compared with the asymmetric transmission and chiral MTM studies in literature. These advantages are having very simple geometries (π -shaped), large asymmetric transmissions, small chirality like natural materials, and also huge chirality as desired in mechanical tunability. Besides, the proposed structures can be easily reconfigured for other frequency regimes to get new chiral MTMs or different application areas varying from defense systems to stealth technology which will be examined in our future studies.

Key Words : Metamaterial, optical activity, chirality
Page Number : 56
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Muharrem KARAASLAN

TEŞEKKÜR

Tez alıőmam sűresince, sahip oldukları űstűn bilgi birikimlerini benimle paylaőan deęerli danıőmanım Doç. Dr. Muharrem Karaaslan'a teőekkűrű bir borç bilirim.

Ayrıca, tez çalıőmam boyunca her tűrlű desteęi veren aileme en içten dileklerle teőekkűr ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	13
3.1.Sayısal Yöntemler	13
3.2. CST Microwave Studio Simülatörü	14
3.3. Sonlu İntegrasyon Tekniği	15
3.4.Çıkartım Metodu	18
3.5.Ölçüm Metotları	23
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	27
4.1. Mikrodalga Frekans Bandında Çalışan Sinyal Emici Yapıları	27
4.1.1. Çok katmanlı Ayrık Kare Halkalı Yapılı Sinyal Emici	27
4.1.2. Geniş Asimetrik Transmisyon Bölgesinde (8-24 GHz Frakans Rejimi) Doğal bakışimsızlık için Nümerik Çalışma	29
4.1.3. Geniş Asimetrik Transmisyon Bölgesinde (4-6 GHz Frakans Rejimi) Doğal Bakışimsızlık için Nümerik Çalışma ve Deneysel Çalışma.....	33
4.1.4. Önerilen Bakışimsız Metamalze Yapının ve Sayısal Değerlerinin (8-24 GHz Frekans Bölgesi için) Değerlendirme çalışması.....	35
4.1.5. Bakışimsız Ortamlar Arası Farklılıklar İçin Sayısal ve Deneysel Çalışma (4-6 GHz Frekans Aralığı).....	42
5. SONUÇLAR.....	46

Sayfa

KAYNAKLAR.....	49
ÖZGEÇMİŞ	53
DİZİN.....	54



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Negatif Kırılma İndisine Sahip olarak üretilmiş ilk MTM.....	1
Şekil 1.2. Metamalzemelerden elde edilen negatif kırınımın gerçekleştirilmesi .	.
(a) periyodik metamalzeme yapısı (b) metamalzemelerin negatif kırılması	2
Şekil 3.1. FIT uygulama adımları.	17
Şekil 3.2. Bakışimsız ortam içersinde ilerleyen dalğanın davranışı	19
Şekil 3.3. Ölçümlerde kullanılan (a) Network Analizör Cihazı ve (b) horn anten	23
Şekil 3.4. Ölçüm düzeneği.....	24
Şekil 3.5. Network Analizör Cihazının yükle kalibrasyon bağlantısı	25
Şekil 3.6. Frekans seçici yüzey tabanlı sensör ve sinyal emici ölçümleri test blok .	.
şeması (Li ve ark. 2013)	26
Şekil.4.1 Önerilen bakışimsız MTM;(a) birim hücrenin şematik görünümü .	.
(b) koordinatları (c) yapının ebatları (d) üretilmiş MTM (e) ölçüm sistemi.	28
Şekil 4.2 Önerilen yapının sırasıyla lineer ve dairesel asimetric transmisyon .	.
parametreleri, bakışimsızlık, FOM ve kayıp faktörü.....	30
Şekil 4.3 Lineer ve dairesel polarizasyon için sırasıyla asimetric transmisyon ve .	.
doğal bakışimsızlık simülasyon ve deney sonuçları.	34
Şekil 4.4 Önerilen bakışimsız MTM'nin; (a) Birim hücre şematik görünümü, .	.
(b) sınır şartları, (c) rezonator.....	36
Şekil 4.5. Önerilen yapının sırasıyla epliptik ve theta derecesi için iletim ve .	.
yansıma değerleri.....	37
Şekil4.6. Önerilen yapıda yansıma, bakışimsızlık, FOM, geçirgenlik ve .	.
dielektrik değerleri.....	41
Şekil 4.7. Arkada bulunan rezontorde farklı açılar için , önerilen yapıdaki epliptik .	.
ve theta derecelerinde iletim ve yansıma değerleri	42
Şekil 4.8. Önerilen yapının 4-6GHz için etkin ortam parametrelerinin benzetim ve .	.
deneysel sonuçları	45

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler Açıklamalar

mm	milimetre
GHz	Gigahertz
MHz	Megahertz

Kısaltmalar Açıklamalar

EM	Elektromanyetik
FIT	Sonlu integrasyon yöntemi
FEM	Sonlu elemanlar yöntemi
MTM	Metamalzeme
SRR	Kesik halka rezonatör
FOM	Performans katsayısı

1. GİRİŞ

Metamalzeme (MTM) fikrinin ilk ortaya atılışında çift negatif özelliği ile vurgu almıştır. Çift negatifden kastedilen ortamın hem dielektrik katsayısı hemde manyetik geçirgenliğinin eş zamanlı olarak negatif olması durumu incelenmiştir. Doğal malzemelerde her ne kadar negatif dielektrik ve negatif manyetik geçirgenlik ayrı ayrı gözlemlense, her ikisinin eş zamanlı negatif olduğu doğal bir ortam bulunmamaktadır. Veselago tarafından yapılan bu çalışmada her iki parametrenin eş zamanlı negatif olması durumunda Vavilov Cherenkov ışınması, doppler etkisi, kırılma indisi gibi önemli fiziksel olayların tersine işleyeceği ispat edilmiştir (Veselago, 1968). Bu tip malzemeler ilgili çalışmada sol elli malzemeler olarak da nitelendirilmiştir.

Milad olarak ifade edilen bu çalışmadan yıllar sonra Pendry ve ark. Smith ve Ark. tarafından ortamın her iki parametresinin eş zamanlı olarak negatif yapılabilmesinin mümkün olduğu yapay malzemeler kullanılarak ispatlanmıştır (Pendry ve Ark, 1999; Smith ve Ark, 2002). Bu çalışmalarda bağıl dielektrik katsayısının negatif olması metalik teller ve manyetik geçirgenliğin negatif yapılması ise ayırık halka rezonatörler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Metalik teller ve ayırık halka rezonatörlerin ayrı ayrı incelenmesinin ardından, her iki yapı birlikte ve periyodik dizilmek sureti ile negatif kırılma indisine sahip yapılar elde edilmiştir.



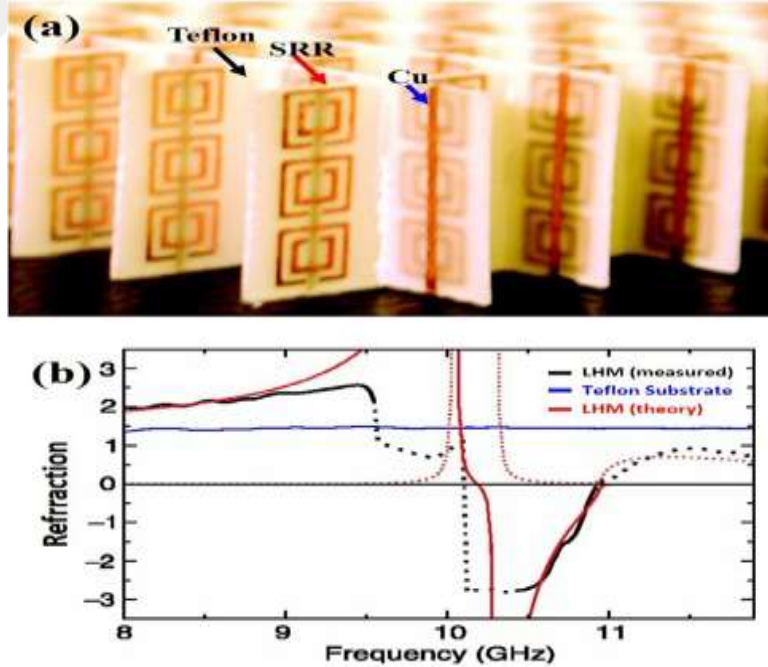
Şekil 1.1. Negatif Kırılma İndisine Sahip olarak üretilmiş ilk MTM (Smith ve ark., 2000)

Smith ve ark., periyodik iki farklı yapıdan oluşan MTM ile negatif kırılma indisine sahip yapay ortam ortaya koymuşlardır. Yüksek frekans değerinde düşük kayıba sahip dielektrik ortam üzerine tasarlanmış ayırık halka şeklindeki rezonatörler ve metalik çubuklar vasıtası ile bu özellik elde edilmiştir (Smith ve Ark, 2002). Her iki yapının dielektrik katsayısı ve manyetik geçirgenlikleri gibi elektromanyetik özellikleri, üretime geçilmeden önce Lorentz ve Drude Modelleri kullanılarak (Grigorenko ve Ark., 2005);

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_{pe}^2 - \omega_{0e}^2}{\omega^2 - \omega_{0e}^2 + i\omega\gamma_e} \right) \quad (1.1)$$

$$\mu = \mu_0 \left(1 - \frac{\omega_{pm}^2 - \omega_{0m}^2}{\omega^2 - \omega_{0m}^2 + i\omega\gamma_m} \right) \quad (1.2)$$

Eşitlikte ω_{0e} ve ω_{0m} elektriksel ve manyetik rezonans frekansı, ω_{pe} ve ω_{pm} elektriksel ve manyetik plazma frekansını, γ_e ve γ_m ise elektrik ve manyetik dalgalar için kayıpları temsil etmektedir. Ortaya konulmuş olan yapı ve elektriksel ve manyetik özellikleri Şekil 1.2 de verilmiştir.



Şekil 1.2. Metamalzemelerden elde edilen negatif kırılmanın gerçekleştirilmesi (a) periyodik metamalzeme yapısı (b) metamalzemelerin negatif kırılması (Shelby ve ark., 2001)

Bir ortamın elektromanyetik özellikleri, genel olarak bağıl dielektrik katsayısı, bağıl manyetik geçirgenliği, elektriksel ve manyetik kayıp tanjantları ile ifade edilebilmektedir. Bütün bu değerler ilgili ortama gönderilen sinyallerin ortamda oluşturduğu mikroskobik elektrik ve manyetik dipol değerlerinin makroskobik ifadeleridir. Sol elli yapılarda, her iki maksorkobik parametre negatiftir. Bu negatiflik değerini birim hücrelerin mikroskobik davranışı büyük ölçüde etkilemektedir. Yapay olarak oluşturulmuş ortam için MTM ifadesi kullanımında gerekli olan, yapıyı oluşturan birim hücre ebatının genel olarak dalga boyuna göre çok daha küçük olmasıdır ($\lambda/10$). Bu durumda, yapay yapı, gönderilen sinyale göre homojen algılanacak ve etkin elektromanyetik değerlerle ifade edilebilecektir (Engheta ve Ziolkowski 2006, Sabah 2012).

Bakışimsızlık el simetrisi manasında kullanılır. Bir başka ifade ile yapının aynadaki görüntüsü ile eşleşmemesidir denilebilir. Bakışimsız ortamların en önemli özelliği, ortam içerisine giren sinyalin polarizasyon yönü, çıkışta dönmüş olmasıdır. Genellikle, bu yapıların bakışimsızlığı oldukça düşüktür. Bu yapılarda elektrik akı yoğunluğu, sadece elektrik alan şiddeti ve dielektrik katsayısı ile bağlantılı olmayıp, yapısal denklemi aynı zamanda manyetik alan şiddeti ile de ilgilidir. Benzer şekilde, manyetik akı yoğunluğu ifadesi de yalnız manyetik alan şiddeti ile ve manyetik geçirgenlik ile bağlantılı olmayıp, aynı zamanda elektrik alan şiddeti ile de bağlıdır. Dolayısı ile bir eşleşme söz konusudur. Bu ilişki;

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} - j\xi \vec{B} \quad (1.3)$$

$$\vec{H} = -j\xi \vec{E} + \frac{1}{\mu} \vec{B} \quad (1.4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada ε permittivity, μ permeability, ξ bakışimsızlık admittansını ifade etmektedir. Bu eşitliklerde de görülüğü üzere, ortam yapısal eşitlikleri bakışimsızlık parametresi ile her iki alan bileşeni ile de ilişkilidir. MTM tanımı öncesinde, bakışimsızlık doğal malzemeler için konuşulmakta ve çok düşük değerlikte olmaktadır. MTM tanımının bakışimsızlığa uygulanması ile bakışimsız özellikli yapay malzemeler de tasarlanmaya başlanılmış ve istenilen bakışimsızlık değerinde yapay ortamlar üretilmeye başlanmıştır. Bu yapılar, bakışimsız MTM olarak adlandırılmıştır. Bu yapıların en dikkat çeken özellikleri sadece yapay ve istenen frekans değerlerinde bakışimsızlığa sahip olmaları

değil, aynı zamanda doğal bakışsız ortamda elde edilmesi mümkün olmayan yüksek bakışsızlık sunmalarıdır. Bu yüksek bakışsızlık değeri ile negatif dielektrik katsayısı ve manyetik geçirgenlik olmaksızın negatif kırılma indisi ortaya koymasındır. Bu sayede, ortam içerisine giren elektromanyetik sinyallerin, istenilen frekans aralığında yönünün, polarizasyonunun değiştirilmesi ve kontrol edilmesi mümkün olmaktadır (Wei ve ark. 2011, Hasar ve ark. 2012).

Bakışsız MTM, pek çok uygulama alanı üzerinde yoğun araştırmalar devam etmektedir. Genel olarak bu uygulama alanları, görünmezlik pelerini, yüksek verimliliğe sahip anten, kayıpsız özelliklere sahip, dış ortamlarla rezonansa girebilen mükemmel lens, biyolojik sensör şeklinde kısaca ifade edilebilir (Aydın ve ark. 2008, Li ve ark. 2010, Nikooei Tehrani ve ark. 2013, Karaaslan ve Bakır 2014).

Bu ortamlarda işleyen fiziksel mekanizmaya göre, sinyal ortama girdiğinde sağ ve sol dairesel polarize sinyal şeklinde ilerlemekte ve bu ikisi arasına çıkışta oluşacak faz hızında ki farklılıktan dolayı polarizasyon yönünde dönme oluşmaktadır. Bu faz hızındaki farklılığın nedeni ise, yukarıda da belirtildiği üzere elektrik ve manyetik alan bileşenleri arasında oluşan çapraz etkiden kaynaklanmaktadır. Bu etkileşimin nedeni ise birim hücredeki simetri bozukluğu ile ilişkilidir. Bakışsızlık kavramı, literatürde optik aktivite olarak tanımlanabilmektedir. Sadece mikrodalga sinyaller için değil, optik frekans aralığında da geniş yer bulmaktadır (Wiltshire 2001, Wiltshire ve ark. 2009, Wei ve ark. 2011).

Bu tez çalışmasında, Pi şekilli rezonatörler kullanılmak sureti ile, bakışsız MTM elde edilecektir. Önerilen yapının mikrodalga frekans aralığında, hem doğala yakın bakışsızlık değerleri, hemde yüksek değerlikli bakışsızlık değerleri incelenecektir. Yapının bağıl dielektrik katsayısı ve manyetik geçirgenlik değerleri ilgili frekans aralığında çıkartılacaktır. Yansıma ve iletim değerlerinin büyüklük ve fazları, çıkartım eşitliklerinde yerleştirilerek ortamın bütün elektromanyetik özellikleri incelenecektir. Ayrıca, yapının açılı bağımlı olup olmadığı araştırılacaktır. Önerilen yapının basit geometriye sahip olması ve hem doğala yakın, hemde yüksek bakışsızlık sunuyor olması büyük avantaj olacaktır. Bunun yanında yüksek bakışsızlık gösterdiği durumda literatürde olduğu gibi negatif kırılma beklentisi de ayrıca incelenecektir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Milimetre ebatlı yapılar kullanarak, 1999 yılında etkin manyetik geçirgenlik değeri elde ederek, ilgili frekans aralığında negatif kırılma indisi elde edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada, metalik şeritler kullanılarak negatif etkin dielektrik katsayısı ve ayırık halka rezonatörler kullanılarak negatif etkin manyetik geçirgenlik eş zamanlı olarak elde edilmiştir. Bu çalışma, aslında negatif kırılma ortamın reel olarak ortaya konulduğu ilk çalışma olmuştur (Pendry ve ark. 1998).

Bu çalışmalar ile eş zamanlı olarak, deneysel çalışmalarla negatif kırılma indisinin gerçekleştirilmesinin mümkün olabileceğini başka gruplarda ortaya koymuştur. Ortaya konulan MTM'lerin ters snell kanunu, ters doppler etkisi ve ters Cerenkov ışınması yapma olasılığı da ayrıca bu çalışmalarda vurgulanmıştır (Smith ve ark. 2002).

Negatif ve pozitif indisli ortamlarda dalgaların hareketi ayrı ayrı Urbani tarafından incelenmiştir (Urbani ve ark 2007). Önerdikleri yapı, N tane tabakadan oluşmaktadır ve her tabaka farklı elektromanyetik özellik ve kalınlığa sahip olup kırılma indisi negatif veya pozitif tanımlanmıştır. Pozitif kırılma indisli ortamlar bilinen malzemelerden üretilmişken, negatif kırılma indisli yapıların özellikleri Lorentz/ Drude modelleri kullanılarak belirlenmiştir. Bu kompozit yapıya yönlendirilen dalga, düzlem dalga olup farklı polarize durumları için monokromatik olarak belirlenmiştir. İletim ve yansıma değerlerini inceleyebilmek için uygun sınır koşulları tanımlandıktan sonra transfer matris metodu uygulanmıştır.

Sonlu elemanlar metodu ile geliştirilmiş HFSS benzetim programı kullanılarak oluşturulan yapıların elektromanyetik özellikleri Karaaslan tarafından iletim ve yansıma değerlerinin büyüklük ve fazları ile Nicolson Ross Weir yöntemi kullanılarak çıkartılmış, elde edilen negatif kırılma indisli yapı, dikdörtgen dalga kılavuzu içerisine yerleştirilmiştir. Yapının negatif kırılma indisi gösterdiği frekans değerlerinde, dikdörtgen dalga kılavuzunun alt dalga boyunda iletim yaptığı tespit edilmiştir. Bu şekilde, negatif kırılma indisli ortamların, dalga kılavuzlarının elektriksel ebatlarının büyütülmesinin mümkün olduğu ispatlanmıştır (Karaaslan ve ark. 2009).

Negatif kırılma indisli malzemelerin üretilerek, anten kazancı, yönlülüğü, ışın demetinin genişletilmesi gibi özellikleri Ziolkowski tarafından incelenmiştir (Ziolkowski ve ark.

2010). Metamalzeme özellikli yapılar ayrıca, dielektrik alttaş üzerine farklı geometrik özellikli metallerin periyodik olarak dizilmesi ile de elde edilmiştir. Metamalzemelerde simetrik olmayan şekilde yerleştirilmiş birim hücre elemanlarının simetrisizliğinin artması, bakışimsızlığa neden olduğu ve bu yüksek bakışimsızlığın negatif kırılmaya sebep olacağı ortaya konulmuştur (Tretyakov ve ark. 2005).

Simetrik olmayan yapıların bakışimsızlığından yola çıkarak, bakışimsız metamalzeme ile yüksek bakışimsızlık ve optik olarak aktif özellikli polarizasyon dönüştürücüler tasarlanmıştır (Ye ve He, 2010). Önerilen yapı çift tabakadan oluşmaktadır. Ön ve arkadaki yapılar birbirlerine açılıdır. Bu çalışmada lineer olarak gelen dalga, belirli frekans aralığında çok yüksek değerlerde dik polarize olarak iletimi gerçekleştirilmiştir.

Bakışimsız ortamın frekans seçici yüzeylerin karakteristiklerine etkileri, bakışimsız ortamın alttaş olarak kullanılması ile de incelenmiştir. Bu çalışmada alttaşın üzerinde tasarlanmış menderes şeklindeki metalik yapılar frekans seçici yüzeyler olarak incelenmiştir. Çalışmada moment metodu kullanılarak akım dağılımları elde edilmiş ve yansıyan/iletelen dalga oranları TE ve TM gelen dalga durumu için incelenmiştir. Ayrıca geliş açısı değişimi, kalınlık farklılaşması, bakışimsızlık ve elektromanyetik değerlerin değişimine bağlı olarak ortamın karakteristiği mikrodalga frekans aralığında ortaya konulmuştur (Delihacıoğlu ve ark. 1998).

Çift negatif kırılmalı ortamın EM sinyal ile etkileşimleri sonucunda yansıma ve iletim oranları da ayrıca incelenmiştir. Bu inceleme TE gelen durumu için, transfer matris metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal yöntemlerle elde edilen sonuçlar geliş açısı değişimine bağlı olarak, iletim ve yansıma değerlerinin TE/TM geliş durumları için ortaya konulmuştur (Sabah ve ark. 2006).

Ayrıca, yine aynı çalışma ekibi, elektromanyetik karakteristikleri farklı yarı sonsuz iki yapı arasına, dispersif özellikli ve negatif kırılma indisli yapının elektromanyetik özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmada Lorent ve Drude yaklaşımları kullanılarak, negatif dielektrik ve manyetik geçirgen ortam araştırılmıştır. Ortama TE ve TM gelen dalgalar uygulanmış ve bu durumlar için iletim ve yansıma değerleri oluşturulmuştur. Bu değerler, geliş açısı, ortam kalınlığı ve polarizasyon değişimine bağımlılığı ortaya konulmuştur (Sabah ve Uckun 2007). Bu çalışmanın yanında, bakışimsız özelliklere sahip negatif kırılma indisli yapılar kullanılarak, THz bandında uygulanan dalganın polarizasyon yönünde ki dönme

incelemişlerdir. Bu çalışmada farklı elektromanyetik özellikli metamalzeme katmanlar oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar, filtre ve polarizasyon dönüştürücü kapsamında incelenmiştir (Sabah ve Roskos, 2012a).

Ayrıca kendi tasarladıkları sekizgen ayırık halka rezonatörler ve çubuk tellerden oluşan MTM yapıları da incelemişlerdir. Bu çalışmada, ayırık halka rezonatörlerin farklı sayıda yerleştirilmesi ile negatif kırılma indisli MTM özelliği incelenmiştir. Hem negatif dielektrik katsayısı hem de negatif manyetik geçirgenlik değeri aynı frekans aralığında gözlemlenmesi durumunda negatif kırılma özelliği saptanmıştır. Bu çalışma, hem nümerik hem de deneysel veriler içermektedir. Birim hücre içerisinde ayırık halka ve metalik çubuk sayısı değişimi durumunun elektromanyetik özelliklere etkisi ortaya konulmuştur. Bu sayının değişiminin, rezonans frekansını ve bant aralığını ayarlamaya yardımcı olabileceği ortaya konmuştur (Sabah ve ark. 2010).

Metamalzeme özelliği gösterebilen yapı, fishnetler ile de gerçekleştirilmiştir. Nümerik olarak ortaya konulan çalışma, çift bantlı, frekans bağımlı ve THz civarında sonuç vermektedir. Ortaya çıkan rezonans frekanslarından ilkinde her iki elektromanyetik özelliğin negatif olduğu, ikincisinde ise sadece bir parametrenin negatif olduğu gözlemlenmiştir. Burada, ikinci rezonans frekansı, alttaşın elektromanyetik özelliklerine bağlı olarak ayarlanabilir olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçların fiziksel uyumu Kramers-Kronig metodu kullanılmak sureti ile reel ve sanal kısımları arasında ortaya konmuştur. Sonuçlar aynı zamanda metal rezonatörler de akım dağılımları ile doğrulanmıştır. Metamalzeme tasarımını, birim hücresi çift sekizgenden oluşan metalik iletkenler kullanılarak da gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada hem dielektrik katsayısı hem de manyetik geçirgenliğin eş zamanlı negatif olabildiği gözlemlenmiş ve ispat edilmiştir. Bu çalışmada sonuçlar sonlu integral ve sonlu elemanlar metodu ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen yapının haberleşme frekanslarında yüksek verimlilikle kullanılabilmesini göstermiştir (Sabah, 2012).

THz frekans aralığında ayırık halka rezonatörler ile de negatif kırılma indisli metamalzeme özelliği sayısal olarak ortaya konulmuştur (Sabah ve Roskos, 2012b). Üçgen yapılardan oluşan ayırık halka rezonatörler kullanılarak oluşturulan MTM ile THz frekans bölgesinde kullanılacak sensör tasarlanmıştır (Sabah ve Roskos 2013). Bu çalışmada, alttaş dielektriğinin kalınlığının, elektriksel özelliğinin ve üçgen geometrilerinin iletim değerlerine etkisi incelenmiştir. Bu etkiler, sensör yapının hassasiyetinin belirlenmesinde

kullanılmıştır. Farklı geometrilerden oluşan ayırık halka rezonatörlerinin de THz bölgesinde hassasiyetleri nümerik olarak incelenmiştir (Sabah ve Roskos, 2012c). Değişik parametrelerle oynanmak sureti ile yapıların hassasiyeti ortaya konulmuştur. Bakışimsız yapıların oluşturduğu yalıtkan diziler kullanılarak oluşturulan yapının dielektrik katsayısı, manyetik geçirgenliği ve bakışimsızlık gibi farklı değişkenlere bağlı olarak, geliş açısı değişimine göre iletim ve yansıma değerleri incelenmiştir. Benzer çalışmada, elektrik alan polarizasyonuna göre iletim ve yansıma değerleri gözlenmiştir. Sayısal olarak ortaya konulan bu çalışmada, ilgili frekans bandında, bakışimsız periyodik yapının polarizasyon döndürmeyi gerçekleştirdiği ve polarizasyona bağlı filtre özelliği gösterdiği görülmüştür. Ayrıca yapının yansıma yapmadan tam iletim sağladığı frekans bölgesi de gözlenmiştir. Bakışimsız MTM yapıların farklı elektromanyetik özelliğine sahip olması ile oluşturulan katmanlı ortamlarda EM dalgaların iletim özellikleri de kalınlık değerlerine bağlı olarak da incelenmiştir (Sabah ve Uckun 2004).

THz üzerine bu çalışmaların öncesinde, negatif kırılma özelliğinin simetrik olmayan yapılar kullanılarak gerçekleştirilmesi deneysel olarak ortaya konmuştur. Bu çalışmada yüksek bakışimsızlık değeri, negatif manyetik geçirgenlik ve dielektrik katsayısı değerlerini aynı frekans değerlerinde sağlamış, ayrıca lineerden dairesel polarize geçişine de müsaade etmiştir (Zhang ve ark. 2008).

MTM emici yaklaşımının THz frekanslarında gerçekleştirildiği de literatürde görülmektedir. THz frekans değerinde gelen enerjinin yüksek değerlikli Emilimi ortaya konulan MTM yapı ile karakterize edilerek, deneysel olarak gerçekleştirilmiştir (Tao ve ark. 2010b).

THz frekansında ortaya konulan yüksek verimli Emilim, mikrodalga frekans aralığı için literatürde pek çok çalışmada gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda yüksek verimlilikte sinyal Emilimi, gelen dalganın bulunduğu ortam ile ortaya konulan MTM yapının giriş empedansının eşitlenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Empedans eşleşmesinin olduğu rezonans frekansı olan 10GHz civarında 95% üstünde Emilim ortaya konulmuştur (Cheng ve ark. 2011).

Birden fazla rezonans frekans değerinde yüksek Emilimin sağlandığı MTM yapılarda ortaya konulmuştur. Önerilen yapı, oldukça ince olup, polarizasyon ve açı bağımlılıkları, sinyal Emilim değerleri ile birlikte incelenmiştir. Yapının yüksek açı değerlerinde iyi

emilim sağladıkları hakkında net veri olmamasına rağmen, düşük açılarda iyi sonuçlar vermektedir (Lee ve Lim 2011).

Bir birim hücre içerisinde birden fazla ayırık halka rezonatör kullanılmak sureti ile de yüksek emilim üzerine çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada ortaya konulan yapı, dört farklı dielektrik değerlikli katman ve bu katmanların her birindeki bir birim hücrede üç farklı ebatlardaki ayırık halka rezonatörden oluşmaktadır. Birden fazla katmanın varlığı, geniş bantı sağlama isteğinden kaynaklanmaktadır. Yapıların en arka kısmı yansıtıcı metalden oluşmaktadır. Bu yapılar 60GHz'de rezonans oluşturmakta ve geniş bant da yüksek verimlilikte emilim vermektedir (Sun ve ark. 2011).

MTM yapılarından oluşan sinyal emiciler kullanım alanı potansiyeline sahip olduklarından literatürde çok çalışmaya rastlanmaktadır. Bu çalışmalar genel olarak yüksek emilim değeri sağlamanın yanında, bu işlevini geniş frekans bandında, açı ve polarizasyon bağımsız gerçekleştirilmesi istenmektedir. MTM tanımının yanında yüksek emilim, bakışimsız MTM ile de çalışılmıştır. Bu çalışmada, bakışimsız MTM sinyal emicinin, mikrodalga frekanslarda, açı ve polarizasyon bağımlılığı incelenmiştir. TE, TM gelen sinyal durumunda da sinyal emilim değeri değişmemiştir. Ayrıca, geliş açısı değişiminde emilimi etkilemediği gözlenmiştir (Wang ve ark. 2009b).

MTM Sinyal emicilerin frekans kaydırma ile ayarlanabilir frekanslarda gerçekleştirilmesi de önemli çalışmalar arasındadır. Bu çalışmada, emilim rezonans frekansı kaydırılması için rezonatörler arasına varikaplar yerleştirilmiştir. Bu sayede, ara elemana uygulanan dış voltaj yardımı ile rezonatörün rezonans frekansı, emilim değeri, açı ve polarizasyon bağımlılığı gibi bütün veriler üzerine etki edilmiştir. Mükemmel emilim sağlandığı da rezonans frekansları için sayısal ve deneysel olarak gözlemlenmiştir (Zhu ve ark. 2010b).

Ayrık halka rezonatörler ve metalik şeritlerden oluşan, yön bağımlı olarak üretilen MTM yapıların elektromanyetik özellikleri, yansıma ve iletim değerlerinin faz ve büyüklükleri çıkartım eşitlikleri kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışmada her iki parametrenin reel değerleri mikrodalga aralıklarında negatif olarak gözlemlenmiştir. Çıkartım eşitliklerinin yanı sıra, Lorentz ve Drude eşitlikleri ile sonuçlar doğrulanmıştır. Analitik hesaplamalar, nümerik tekniklerle de kıyaslanmıştır (Hasar ve ark. 2012).

Tamamlayıcı ayırık halkalardan oluşan ince katmanlı MTM yapılar ortaya konulmuştur. Bu çalışmada, geniş bir frekans aralığında, uygulanan sinyalin polarizasyon yönünün

döndürülmesi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, simetrik olmayan özellikteki bakışimsız MTM yapıların, optik olarak aktif olduğu ortaya konulmuştur (Wei ve ark. 2011).

Bununla birlikte simetrik özellikte olmayan bakışimsız yapay ortamların, reel etkin dielektrik katsayısı ve manyetik geçirgenliğinin de belirli frekans bölgelerinde negatif olduğu gözlemlenmiştir (Wang ve ark. 2009c).

Bakışimsızlık elde edilmesi amacı ile bir birim hücrede dört U şekilli rezonatör kullanılmıştır. Tasarlanan yapı metamalzeme özelliğindedir. Bu tasarımda, yalıtkanın ön ve arka yüzeyinde tasarlanan birim hücreler birbirlerine göre 90^0 açılı yerleştirilmiştir. Sonuçlar sayısal ve deneysel olarak kıyaslanmıştır. Lineer polarize olarak uygulanmış olan EM dalga, iletim esnasında yüksek bakışimsızlık değeri gösteren ortamdan dolayı, optik olarak aktif özellik göstermiş ve dairesel polarize dalga elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir (Li ve ark. 2010a). Aynı çalışma grubu, bakışimsızlık elde edebilmek amacı ile yalıtkanın her iki tarafına metalik çapraz yapılar kullanmıştır. Yapının elektromanyetik özellikleri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bu özellikler iletim ve yansıma parametrelerinden çıkartım yolu ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, yapının yüksek bakışimsızlık değerlerine sahip olduğu gözlenmiş, bu değerden dolayı negatif kırılma indisi ile bağlantı da kurulmuştur. Fakat dairesel olarak kutuplanmış dalgaın büyüklüğünün, yüksek kayıplardan dolayı, düşük kaldığı tespit edilmiştir (Li ve ark. 2011).

Bazı çalışmalarda çok geniş bant aralıklarında negatif kırılma indisine sahip MTM'ler incelenmiştir. Seçilen frekans aralığı mikrodalgadan optik dalga boyuna kadar uzanmaktadır. Bu çalışmada ayrıca, ortaya konulmuş olan yapıların simetrik olmaması ve bakışimsızlık değerleri de ayrıca incelenmiştir. Sonuçlar, hem sayısal yöntemler ve benzetimler, hem de deneysel sonuçlar ile doğrulanmış ve karşılaştırılmıştır (Zhao ve ark. 2010).

Bakışimsız MTM tasarımı amacı ile gamalı haç yapılarda kullanılmıştır. Bu yapının, yüksek optik aktiviteye ve bakışimsızlığa sahip olduğu gözlenmiştir. Bu nedenden dolayı, negatif kırılma ve polarizasyon değişimi de incelendiğinde her birinin beklendiği şekilde var olduğu tespit edilmiştir. Çalışma WIMAX frekans değerlerinde deneysel sonuçlar ile kıyaslandığında simetrisizliğinden dolayı, çok geniş imkanlar sunduğu gözlenmiştir (Zhao ve ark. 2011).

Metamalzemelerin sensör olarak kullanımı da son yıllarda oldukça yayılmaktadır. Ayrık halka MTM yapılar kullanılmak sureti ile mikrodalga temelli gerilim ölçebilen sensörler tasarlanmıştır. Bu çalışmada, numune olarak kullanılan kapton ve silikonun ayrıştırılması mümkün olmuştur. Oluşturulan MTM tabanlı sensör ile bağlı yükten dolayı gerilmeyi %3 hata ile tespiti sağlanmıştır. Mikrodalga MTM yaklaşımı ile çok daha hassas ölçümlerin mümkün olduğu gözlenmiştir (Melik ve ark. 2009a). Aynı grubun MTM tabanlı sensörlerin denendiği, deneysel ve simülasyonlarla doğrulanmış çok sayıda araştırmaları bulunmaktadır. Bütün bu çalışmalarda MTM yapı olarak ayrık halka rezonatörler kullanılmıştır (Melik ve ark. 2009b).

Benzer yaklaşımlarda kullanılan mikrodalga MTM yapılar akışkanlık ölçümü içinde denenmiştir. Bu çalışmada, tasarlanan yapı da oluşturulan mikroebatlardaki kanallardan sıvı akışı bölgesinde elektriksel değişimden dolayı, önerilen MTM sensörün rezonans frekans değişimine bağlı olarak akışkan özelliğinin tespit edilmesi mümkün görülmektedir. Burada, numune olarak kullanılan sıvının değişmesi ile elektriksel özelliğın farklılaşması, rezonans frekans ve bant genişliğinin değişimini sağlamaktadır. Bu akışkan tespitine yardımcı olmaktadır (Withayachumnankul ve ark. 2013). Bu tip çalışmalar, MTM iletim hattı yaklaşımı ile yapılabildiği gibi aynı zamanda dalga kılavuzu içerisinde tasarlanmış birim hücre MTM yapılar kullanılarak da gerçekleştirilmiştir. Dalga kılavuzu içerisinde tasarlanmış olan ayrık halka rezonatörün rezonans frekans değerinin X bant da değişmesine bağlı olarak basınç sensörü de gerçekleştirilmiştir. İlgili çalışmalarda, deneysel ve benzetimler ortaya konularak, kıyaslama yapılmış, sonuçlar karşılaştırılarak uyum değerlendirilmiştir (Ekmekci ve Sayan 2013).

Ayrıca, bu tip yapılar kullanılarak sıcaklık, yoğunluk, nem gibi farklı fiziksel özelliklerin ölçümüne yönelik çalışmalarda artan sıklıkla ortaya konmuştur. MTM sensör tasarımında ayrıca, bakışimsızlık, sinyal emici, MTM iletim hattı, dalga kılavuzu tabanlı, farklı amaçlar için ayrı ayrı veya tek bir yapının çok amaçlı kullanıldığı çalışmalar konusunda Karaaslan ve ekibi literatüre büyük katkılar sağlamıştır. Yaptıkları çalışmalarda, MTM yapıların biyosensör olarak kullanımı, kaçak benzin/mazot ile firma bazında ki ürünlerin birbirlerinin ayrıştırılması da çalışılmıştır (Karaaslan, 2013).

Bakışimsız özellikli MTM'lerin, dairesel EM dalga üreten antenlerin kazancı ve S11 değerleri üzerine etkileri de incelenmiştir. Bu çalışmada arşimet yay ve spiral antenler, dairesel polarize EM dalga üretmek amacı ile kullanılmıştır (Zarifi ve ark. 2012a).

Bakışimsız MTMlerin manyetik dimer kullanılarak gösterilmesi de deneysel olarak çalışılmıştır. Bu çalışmada birden fazla frekans aralığında bakışimsızlığın sağlandığı gözlenmiştir. Bu etkinin nedeninin manyetik rezonans ile bağlantılı olduğu ortaya konmuştur. Oluşturulan yapının, ilgili frekans aralıklarında optik aktiviteye sahip olduğu ve polarizasyon yönünü döndürdüğü ispatlanmıştır (Li ve ark. 2008).



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1.Sayısal Yöntemler

Neredeyse tüm mühendislik alanlarına uygulanmakta olan sayısal teknikler elektromanyetik alanında da uzun zamandır kullanılmaktadır. Bu yöntemler genel olarak sonlu farklar yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi, sonlu integrasyon tekniği, moment metodu, iletim hattı metodu ve varyasyonel teknik olarak sıralanabilir. Bu metotların pek çoğu öncelikle yapısal analizler için kullanılmış olup daha sonra elektromanyetik sistemlere adapte edilmiştir. Elektromanyetik problemlerinde analitik yaklaşımlar oldukça zor ve bazen de imkansızdır. Bu metodlar veya bu metotlar tabanlı yazılmış olan benzetimler kullanılarak analizler oldukça hızlı ve güvenilir olarak yapılabilmektedir. Sayısal tekniklerin herbirinin avantajı ve dezavantajı bulunmakla birlikte, eğer uygun imkan bulunması durumunda en güvenilir olanının sonlu elemanlar tekniği olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni, özellikle karmaşık geometrilerde ve elektromanyetik özellikleri farklı olan homojen yapılarda sonlu farklar metodundan farklı olarak istenen her noktanın potansiyel değerinin hesaplanabilmesidir. Bütün bu metotlarda genel olarak elektrik potansiyel gibi skaler nicelikler öncelikle hesaplanmakta, daha sonra bütün çözüm bölgesinde elektrik alan şiddeti, manyetik alan şiddeti gibi vektörel nicelikler kolaylıkla elde edilebilmektedir. Bu yöntemlerin pek çoğu için işlem sırası şu şekilde ifade edilebilir;

- i. Çözüm istenen bölgenin küçük bölgelere ayrılması
- ii. Küçük çözüm bölgeleri için denklemlerin elde edilmesi
- iii. Bu bölgelerden elde edilen denklemler toplanarak gerçek çözüm bölgesi için denklemlerin elde edilmesi
- iv. Verilen ilk koşullar ve sınır koşulları kullanılarak problemin çözülmesi.

Bu çözümlerin sağlıklı ve doğru sonuç vermesi, sınır koşullarının doğru ifadesi, birim hücre ebatlarının dalga boyuna göre yeterince küçük alınması, özellikle geçiş bölgelerinde ve homojen olmayan bölgelerde birim hücre sayısının olabildiğince artırılması gerekmektedir. Bütün bu ayrıntılar sonuç sürecini etkileyecek ve kullanılmakta olan

bilgisayarın kapasitesini çoğu zaman oldukça zorlayacaktır. Bu tür tekniklerde sınır koşulları sonucu doğrudan etkilediğinden dolayı, sınırın yayılım, mükemmel eşlenmiş katmanlar, mükemmel elektrik iletken, mükemmel manyetik iletken, yayılım yüzeyi şeklinde doğru alınması önem arz etmektedir. Bu teknikler ile uzun analitik hesaplamalardan ve tekrar tekrar üretim maliyetinden de kurtulunmaktadır.

3.2. CST Microwave Studio Simülatörü

CST Microwave Studio programı sonlu integrasyon metodu (FIT) kullanarak çözüm bölgesini birim hücrelere ayırmak sureti ile potansiyel değerleri arasında ilişki kurarak sonuca ulaşmaktadır. Statik elektrik ve manyetik alan değerlerinin hesaplanmasından, optik frekans değerlerine kadar hesaplama yapabilmektedir. Mikrodalga aralığında, antenler, dalga kılavuzları, frekans seçici yüzeyler veya metamateryaller gibi pek çok uygulamada kullanılabilir. Program, frekans ve zaman değişkenine bağlı olarak sonuç üretebilmektedir. Programın en üstün yanı, sınır koşullarının genellikle otomatik olarak atanmasıdır. Bunun yanında, sınır koşulları kullanıcı tarafından da atanabilmektedir. Örneğin, periyodik, birim hücre, mükemmel elektrik iletken ve mükemmel manyetik iletken, serbest uzay şeklinde atanması mümkündür. Sinyal girişi, yüzey ve nokta olarak alınabilmektedir ve istenen her hangi bir nokta için bütün alan değerleri önceden tanımlanması durumunda rahatlıkla hesaplanabilmektedir. Program kullanılarak, daha önce değişken olarak atanan değerlere bağlı olarak parametrik çalışma ve genetik algoritma yaklaşımları kullanılarak istenen sonuç değerine bağlı hesaplamalar kolaylıkla elde edilebilmektedir. Radyasyon ışıması, iletim, yansımaya, anten yönlülüğü gibi değerlerinin yanı sıra, yapay ortamlar için bağıl dielektrik katsayısı, manyetik geçirgenlik ve kayıp faktörleri hesaplanabilmektedir. En küçük hücre ebatları genellikle otomatik olarak atanmakla beraber, istenmesi durumunda dalga boyu ile ilişkilendirilmek sureti ile de kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir. Bütün sonuçlar yansımaya ve iletim değerlerine bağlı olarak noktasal hesaplanmakta, bu değerlere bağlı olarak ortam yapısal değerleri Nicolson-Ross-Weir eşitliklerinden çıkartılmaktadır. Araştırma bulguları ve tartışma kısmında elde edilen tüm yansımaya ve iletim değerleri yukarıda bahsedildiği yöntemlerin uygun olanları seçilerek elde edilmiştir. Elde edilen değerler ilgili eşitliklerde yerleştirilmek sureti ile yapay ortamın elektromanyetik değerleri hesaplanmıştır. Burada amaç, hedeflenen sonuçlara uygun üretim yapılmadan önce doğru geometri ve ebatların tespitinin hızlı ve güvenilir olarak tespitidir. Ayrıca, benzetimler esnasında güvenilirliği

sağlamak için iterasyonda iki sıralı sonuç arasında hata değerlerinin minimuma indirgenmesi ve elde edilmesi durumunda bu hata değerini en az 3 defa sağlması da istenmiştir. Bu sayede, sonucun doğruluğu garanti altına alınmaya çalışılmış, oluşabilecek yakınsamaların doğruluğu test edilmiştir.

3.3. Sonlu İntegrasyon Tekniği

Bu çalışmada benzetimler için kullanılan program sonlu integrasyon tabanlıdır. Sonlu integrasyon tekniği; tipik bir numerik analiz tekniğidir. Genel olarak bilinmektedir ki; diferansiyel, integral ve integrodiferansiyel denklemlerin çözümlerinde kullanılan pek çok sayısal teknik bulunmaktadır. Bu yöntemlerin kullanım amacı, analitik olarak çözülemeyen, çözülmesi çok fazla zaman alan problemlerin cebrik hale dönüştürülerek kolay bir şekilde çözülmesidir. Mühendisliğin pek çok alanında dalga problemlerinin çözülmesi amacı ile farklı sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlere örnek olarak sonlu elemanlar yöntemi, sonlu farklar yöntemi, moment metodu, varyasyonel metod, sonlu integrasyon tekniği verilebilir.

Bu teknikler genel olarak benzer yaklaşımlar sunmaktadır. Öncelikle çözüm bölgesi sınır koşulları içerisinde bir, iki veya üç boyutlu küçük hücrelere bölünür. Boyut belirleme doğrudan çözüm yapılacak bölgenin boyutları ile ilgilidir. Bu hücrelerin ebatları ve dolayısı ile çözüm bölgesinde ki hücre sayısı ne kadar fazla ise sonuç o kadar gerçek değere yaklaşacaktır. Aslında idealde sonsuz sayıda birim hücre istenmektedir. Bu mümkün olmadığından çözümleyici tarafından makul sayıda hücre belirlenir. Bu bazen kullanılan programlar ile otomatik olarak yapılır ve bu durumda da program özellikle ortam özelliklerinin değiştiği, geometrinin bozulduğu ve sınır bölgelerinde hücre sayısını maksimuma çıkarır. Bu arada otomatik belirleme işleminde hücre ebatı dalga boyunun onda birinden küçük olması tercih edilmektedir. Hücre ebatları ve geometrisinin seçilmesi en önemli kırılma noktalarından biridir. Bu işlemin arkasından standart olarak bütün bu teknikler birim hücreler için bir eşitlik ortaya koyar. Bu eşitlikte köşe noktalarından yola çıkarak hücre içerisinde ki bütün noktaların aranan özelliklerinin bulunabileceği eşitlikler kurgulanır. Önerilen sayısal tekniklerden bazıları birim hücre içerisinde ki bütün noktalar hakkında bilgi verebilirken bir kısmı da sadece birim hücrenin köşe noktaları hakkında bilgi ortaya koyabilmektedir. Bu açıdan sonlu elemanlar metodu ve sonlu integrasyon tekniği sonlu farklar yöntemine göre üstünlükler sunmaktadır. Birim hücre eşitliklerinin

ortaya konulmasının arkasından bütün hücreler arasında bağlantı kuran genel eşitlikler elde edilir. Bu eşitliklerde birim hücrelerin köşe noktaları ve birleşme çizgileri arasında denklemler elde edilmektedir. Bu denklemlerin elde edilmesinin ardından sınır koşulları ilk koşullar bilinen değerler olarak kullanılmak sureti ile bilinmeyen değerlerin bulunması işlemine geçilir. Bu işlem içerisinde farklı iterasyon teknikleri kullanılarak bütün ilişki ortaya konulmaktadır. Son olarak istenen herhangi bir noktanın ya da bölgenin değerlerinin çıkartımı yapılabilmektedir. Burada işlemler uzun süreceğinden bilgisayarlar kullanılmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan sonlu integrasyon tekniği elektromanyetik dalga denklemlerinin ortam içerisinde çözümünden mekanik, akışkanlar, sıcaklık dağılımı gibi pek çok fiziksel çalışmalarda kullanılabilir. Elektromanyetik çözümlerinde frekansa ve koordinat sisteminde ki değişkenlere bağlı olarak çözüm yaklaşımlarını geliştirmektedir. Elektrostatik, magnetostatik ve çok geniş frekans aralığında Hz seviyesinden optik bantlara hatta daha üstüne kadar çözüm üretebilmektedir. İlk defa Thomas Weiland tarafından 1977 yılında ortaya konulmuştur. Daha sonra koordinat sistemi ve değişik uygulamalara genişletmek amacı ile sürekli olarak geliştirilmiştir. Bu yöntemde Maxwell integral çözümlerine numerik yaklaşım sağlamaktadır. Maxwell denklemlerinin integral formu aşağıdaki eşitliklerde görülmektedir.

$$\oint_{\partial V} D \cdot dA = \iiint_V \rho \cdot dV \quad (3.1)$$

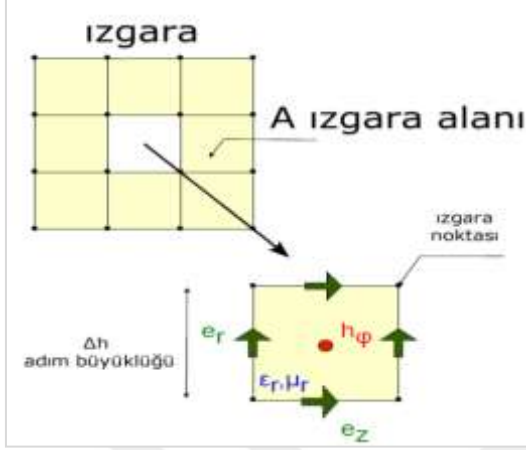
$$\oint_{\partial V} B \cdot dA = 0 \quad (3.2)$$

$$\oint_{\partial A} E \cdot dl = \frac{\partial}{\partial t} \iint_A B \cdot dA \quad (3.3)$$

$$\oint_{\partial A} H \cdot dl = \iint_A \left(\frac{\partial}{\partial t} D + J \right) \cdot dA \quad (3.4)$$

Sonlu integrasyon tekniğinin gerçekleştirilmesi de yukarıda bahsedilen adımlara benzer içerik sergilemektedir. İlk adım olarak yapı birim hücrelere bölünür. Daha sonra yapı içerisindeki birim hücrelerin elektromanyetik özellikleri tanımlanır. Daha sonrada konum zaman bağımlı olarak yaklaşımın gerçekleşmesi ortaya konulur.

Aşağıdaki şekilde sonlu integrasyon tekniğinin iki boyutlu bir yapıda uygulanması adımları ortaya konulmuştur.



Şekil 3.1. FIT uygulama adımları.

Bu teknikte birim hücre ebatları çalışılacak dalga boyu ile genellikle ilişkilendirilirken, zaman değişkeni ise Courant-Friedrichs-Lewy yöntemi ile belirlenir. Bu yöntemle göre zaman aralığı için iki boyutlu birim hücre için ön şart;

$$\Delta t \leq \min \left\{ \frac{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}{\sqrt{\frac{1}{\Delta z^2} + \frac{1}{\Delta y^2}}} \right\} \quad (3.5)$$

şeklindedir. Bu eşitlikte Δz , z yönündeki en küçük hücre boyu, Δy ise y yönündeki hücre boyudur. Ortam eğer boşluk ise bağıl dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik değerleri 1 olarak alınır. Fakat ortam boşluk değilse, ortamın bağıl dielektrik değeri ve manyetik geçirgenlik değeri tanımlanmalıdır. Bu değerlere bağlı olarak Δt olarak tanımladığımız zaman diliminin olabilecek en büyük değeri tespit edilir. Bu değerden ne kadar küçük seçilirse sonuç o kadar gerçek değere yaklaşacaktır. Her bir birim hücre için Maxwell denklemleri integral formundan yola çıkılarak eşitlikler halinde ortaya konulduktan sonra, birim hücrelerin oluşturduğu çözüm bölgesi için toplam eşitlik elde edilecektir. Bu eşitlik, ortam aynı kalması durumunda, hücreler arası bölgede süreklilikten dolayı eşit olması gerektiğinden, hücreler arası verilmemişte olsa sınır koşulları oluşmuş demektir. Ayrıca, verilen sınır koşulları, kaynak değerleri, mükemmel elektrik ve manyetik alan durumları ve

başlangıç değerleri gibi değerler bilinen değerler olarak ortaya konulduğunda, çözüm bölgesi için denklemlerin sonuçlarının elde edilmesi farklı iterasyon yöntemleri kullanılarak mümkün olabilmektedir.

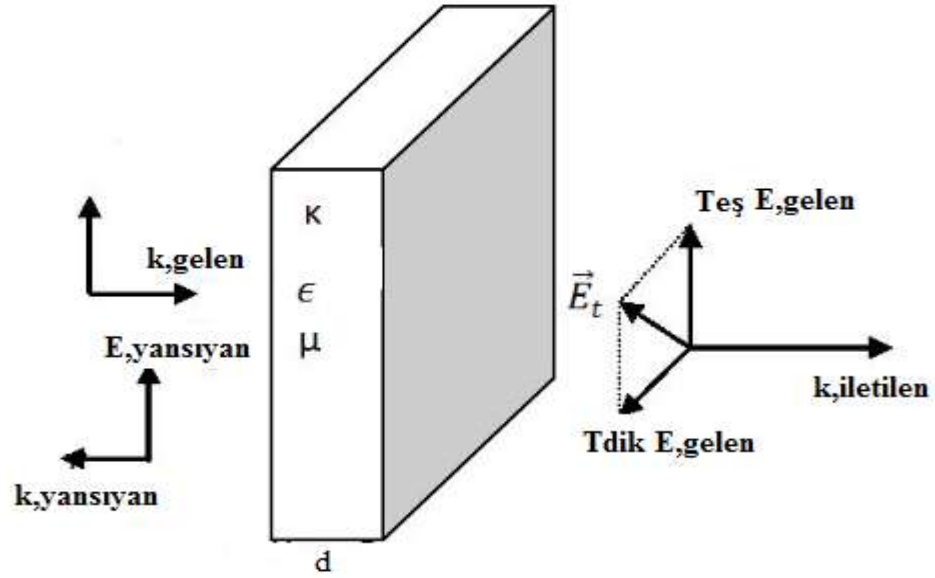
3.4.Çıkartım Metodu

Bakışsız MTM yapılarının etkin dielektrik katsayısı, manyetik geçirgenliği, kırılma indisi gibi elektromanyetik özelliklerinin, iletim ve yansıma değerlerinden elde edilmesi, çıkartım eşitlikleri kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Bakışsız ortam içerisinde ortamın elektrik akı yoğunluğu sadece elektrik alan şiddeti ile değil manyetik alan şiddeti ile de bağlantılıdır. Aynı şekilde, ortamda manyetik akı yoğunluğu da sadece manyetik alan şiddeti ile değil, elektrik alan şiddeti ile de ilişkilidir.

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E + (\chi + i\kappa) \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} H \quad (3.6)$$

$$B = \mu_0 \mu_r H + (\chi - i\kappa) \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} E \quad (3.7)$$

Bu eşitlikte ε_r bağlı dielektrik sabiti, ε_0 boşluğun dielektrik sabiti, μ_r manyetik geçirgenliği, μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği, χ elektro-manyetik hassasiyet ve κ ortamın bakışsızlık değerlerini tanımlamaktadır. Bu ilişkinin sebebi ortamın hem elektrik alan hemde manyetik alan bileşenlerine karşı simetrisiz olmasından kaynaklanmaktadır. Burada ortam özellikleri sabit olarak gösterilmesinin nedeni ortamın izotropik olarak alınmasından kaynaklanmaktadır. Ortamın yön bağımlı olması durumunda bu değerler matris şeklinde ifade edilmesi gerekmektedir. Bakışsız ortam içerisinde, lineer olarak giren dalga, sol ve sağ dairesel polarize bileşenlerine ayrılarak, ortam çıkışında, yeniden birleşip gelen dalganın polarizasyon yönünde dönmeye neden olur. Bakışsız ortamın özelliklerine bağlı olarak çıkan dalga lineer, dairesel veya eliptik olabilir.



Şekil 3.2. Bakışimsız ortam içerisinde ilerleyen dalga'nın davranışı

Her iki ifade Maxwell denklemlerine yerleştirilmek sureti ile ortamda ilerleyen dalga bileşenlerinin her biri için dalga denkleminin elde edilmesi mümkündür;

$$kx(kxP) = -k_0^2(\epsilon\mu - \kappa^2)P - 2i\kappa k_0(kxP) \quad (3.8)$$

Bu eşitlikte P hem elektrik hem de manyetik alan şiddetini temsil edebilmektedir. Serbest uzayda dalga vektörü açısal frekans ve ışık hızına bağlı olarak tanımlanabilmektedir $k_0 = \omega/c$. Bakışimsız ortam içerisine giren EM dalga, sağ ve sol dairesel polarize olarak ilerlemekte olduğundan, her iki dalga bileşeni için iki ayrı dalga vektörünün bulunması gerekmektedir. Dalga vektörü bileşenleri, serbest uzay dalga vektörü, ortamın kırılma indisi ve bakışimsızlığına bağlı olarak yazılabilir;

$$k_{\pm} = k_0(n \pm \kappa) \quad (3.9)$$

Herhangi bir ortamın simetrisizliği, bir diğer ifade ile bakışimsızlığı ile ilgili sabitlerin elde edilmesi için yaklaşımların bir tanesi çıkartım yöntemidir. Bu yöntemde, ortam parametreleri daha öncede bahsedildiği gibi, ortama EM dalgaların uygulanması durumunda iletim ve yansıma değerlerine bağlı olarak ilgili frekanslarda çıkartımdır. İletim ve yansıma değerleri S parametreleri cinsindedir. Çıkartım yönteminin uygulanabilmesi amacı ile öncelikle EM dalgalar ortama uygulanmakta ve iletim ve

yansıma değerlerinin büyüklük ve fazı eş ve dik polarize yöntemleri ile ölçülmektedir. Bu ölçümlerde elde edilen, sağ ve sol dairesel polarize olarak iletilen dalga değerleri;

$$T_{\pm} = \frac{4ze^{ik_{\pm}d}}{(1+z)^2 - (1-z)^2 e^{2ink_0d}} \quad (3.10)$$

şeklindedir. Bu eşitlikte d, ortamın kalınlığını z ise ortamın empedansını ifade etmektedir. Ayrıca, aynı yaklaşımla sağ ve sol dairesel polarize yansıma değerleri ise;

$$R_{\pm} = \frac{(1-z^2)(e^{2ink_0d}-1)}{(1+z)^2 - (1-z)^2 e^{2ink_0d}} \quad (3.11)$$

olarak ifade edilmektedir. Genel kabullenme sağ ve sol dairesel polarize yansıma değerlerinin eşit olduğudur.

$$R_{\pm} = R \quad (3.12)$$

Sağ ve sol dairesel polarize İletim değerleri de ;

$$T_{\pm} = Te^{\pm ikk_0d} \quad (3.13)$$

Bu ifadeler kullanılmak sureti ile ortamın empedans ve sağ-sol dairesel kırılma indisi değerleri, sağ ve sol dairesel iletim ve yansıma değerlerine bağlı olarak ifade edilebilmektedir;

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1+R)^2 - T_+T_-}{(1-R)^2 - T_+T_-}} \quad (3.14)$$

$$n_{\pm} = \frac{i}{k_0d} \left\{ \log \left[\frac{1}{T_{\pm}} \left(1 - \frac{z-1}{z+1} R \right) \right] \pm 2m\pi \right\} \quad (3.15)$$

Bu eşitlikte m bir tamsayıdır. Bu değerın seçimi, sonuçların fiziksel olarak manalı olmasına göre belirlenir. Bu amaçla, ortam parametreleri, reel ve sanal kısımları arasındaki fiziksel uyumluluğu tespit etmek gerekmektedir. Yukarıda elde edilen empedans ve sağ/sol dairesel polarize dalgalar durumu için kırılma indisinin hesaplanması ile, ortamın bakışimsızlığı, kırılma indisi etkin dielektrik katsayısı ve manyetik geçirgenliği aşağıdaki eşitlikler kullanılarak elde edilebilir.

$$\kappa = \frac{n_+ - n_-}{2} \quad (3.16)$$

$$n = \frac{n_+ + n_-}{2} \quad (3.17)$$

$$\mu = nz \quad (3.18)$$

$$\varepsilon = \frac{n}{z} \quad (3.19)$$

Bu yöntemle ele alınan ortamların EM özelliklerinin hesaplanmasının yanında farklı özellikleri hakkında da bilgi sahibi olunabilmektedir. Bu özelliklerinden bir tanesi, ortama giren dalga polarizasyon yönündeki dönmedir. Polarizasyon yönünde dönme lineer gelen EM dalga polarizasyon yönünde de geçerlidir. Bu dönme miktarı, genel olarak optik aktivite olarak isimlendirilir ve sağ ve sol dairesel polarize olarak ilerleme açıları ile bağlı olarak hesaplanabilir;

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

Sağ ve sol el dairesel polarize dalga bileşenlerinin fazlarının farklı olması ortamın simetriden yoksun olması ile ilgilidir. Ortama giren dalga lineer değil dairesel polarize olması durumunda, ortamın dairesel bakışsızlık değerinden söz edilebilecektir, bu değer ortam içerisinde iletilen sağ ve sol el dairesel polarize bileşenlerinin büyüklüğü ile ilişkilidir;

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

Yukarıda da anlatıldığı üzere, bakışsız ortamların ortaya koyduğu en önemli fayda optik aktivite, yani polarizasyon yönünde dönmedir. Bunun nedeni ise, ortamın simetrik olmamasından dolayı hem elektrik hemde manyetik alan bileşenlerine tepki vermesi ve elektrik alanın yönünde değişikliğe manyetik bileşenin, manyetik alan yönünde dönmeye ise elektrik alan bileşeninin katkı sağlamasıdır. Bu katkılar çapraz etkileşim olarak isimlendirilmekte ve genellikle frekans bağımlı olmaktadır ve ortam içerisinde ileri ve geri yönlü ilerleyen dairesel polarize bileşenlerinin simetrik olmayan iletimi ile ilgilidir. Dalga +z yönünde ilerlediği kabul edilir ve elektrik alanın x ve y yönünde bileşenleri olduğu düşünülür ise gelen dalga şu şekilde tanımlanabilir (Huang ve ark. 2012);

$$\mathbf{E}_i = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} e^{ikz} \quad (3.22)$$

Bu eşitlikte , k dalga numarasını tanımlamaktadır. Ortam içerisinde iletilen dalga elektrik alan değeri ise simetrik olmayan iletim katsayılarına bağlı olarak ifade edilebilir (Dincer ve ark. 2013);

$$\mathbf{E}_t = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \end{pmatrix} e^{ikz} \quad (3.23)$$

Bu eşitlikte T ifadesi, ortama giren dalganın farklı yönlerde uygulanması durumunda elektrik alan bileşenleri cinsinden ifade edilebilir.

$$\begin{pmatrix} T_x \\ T_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \hat{T}_{lin}^f \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

x yönünde elektrik alan uygulanması durumunda ortamın iletim katsayısı T_{xx} ve T_{yx} şeklinde, y yönünde elektrik alan uygulanması durumunda ise T_{xy} and T_{yy} olarak tanımlanmıştır. Dalganın dairesel polarize olarak ortam içerisinde hareket ettiği göz önünde bulundurulursa, sağ ve sol dairesel polarize bileşenleri $T_{\pm} = T_{xx} \pm iT_{yx}$ olarak ifade edilebilir. Bu durumda lineer polarize olarak ortam içerisine giren ve ortam içerisinde +z yönünde giden ve -z yönünde dönen dairesel dalga durumu için iletim sabitleri T_{++} , T_{-+} , T_{+-} , ve T_{--} şeklinde tanımlanabilir.

$$T_{dairese}^{+z} = \begin{pmatrix} T_{++} & T_{+-} \\ T_{-+} & T_{--} \end{pmatrix} \quad T_{dairese}^{-z} = \begin{pmatrix} T_{++} & T_{-+} \\ T_{+-} & T_{--} \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

Bu eşitlikteki dairesel iletim sabitleri, lineer iletim sabitleri cinsinden şu şekilde ifade edilebilir (Menzerl ve ark. 2010);

$$\begin{pmatrix} T_{++} & T_{+-} \\ T_{-+} & T_{--} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} T_{xx} + T_{yy} + i(T_{xy} - T_{yx}) & T_{xx} - T_{yy} + i(T_{xy} + T_{yx}) \\ T_{xx} - T_{yy} - i(T_{xy} + T_{yx}) & T_{xx} + T_{yy} - i(T_{xy} - T_{yx}) \end{pmatrix} \quad (3.26)$$

EM dalgalar lineer veya dairesel polarize olarak bir ortama uygulandığında ortam içerisinde simetrik olmayan iletim özelliği bulunması durumunda, bu simetrisizlik her iki durum için Δ ile temsil edilir. Δ parametresi zıt yönlerde lineer veya dairesel polarize olmuş şekilde uygulanan EM dalganın iletim değerleri arasındaki değişiklik şeklinde ifade edilir. EM dalganın lineer polarize olarak uygulanması durumunda simetrik olmayan Δ ifadesi;

$$\Delta_{lin}^{(x)} = |T_{yx}|^2 - |T_{xy}|^2 = -\Delta_{lin}^{(y)} \quad (3.27)$$

şeklinde tanımlanır. Eğer EM dalga dairesel polarize olarak uygulanmış ise simetrisizlik;

$$\Delta_{circ}^{(+)} = |T_{-+}|^2 - |T_{+-}|^2 = -\Delta_{circ}^{(y)} \quad (3.28)$$

olarak ifade edilir (Menzerl ve ark. 2010). Simetrisizlik durumu yalnız $|T_{yx}| \neq |T_{xy}|$ durumu için geçerlidir (Kang ve ark. 2011). Simetrik özellikli yapılarda MTM'lerde dahil olmak üzere, dik polarize iletim değerleri birbirlerine eşittir $T_{xy} = T_{yx}$. Bununla birlikte, bakışimsız MTMler her zaman EM dalgaların polarizasyonunu döndürmektedir. Bu döndürme olayı optik aktivite olarak isimlendirilir.

3.5.Ölçüm Metotları

Araştırma bulgular ve tartışma bölümünde sunulacak sonuçların ölçümleri İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Mikrodalga ve Antenler laboratuvarındayapılmıştır. Ölçümler açık alanda, 10 MHz - 43,5GHz değerleri aralığında ölçüm yapabilen Agilent PNA-L Network Analizör cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde çevre faktörleri azaltmak ve çevreden yansımaları düşürmek amacı ile yankısız elemanlar kullanılmıştır. Agilent PNA-L Network Analizör cihazına, ölçüm frekansına uygun seçilmiş horn antenler bağlanmak sureti ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Her ölçüm sırasında kalibrasyonlar tekrarlanmış ve ölçüm sonuçları serbest uzayda herhangi bir eleman yokken alınmış ölçümlere göre normalize edilmiştir.



PNA-L AGILENT

(a)



(b)

Şekil 3.3. Ölçümlerde kullanılan (a) Network Analizör Cihazı ve (b) horn anten

Ölçüm değerlerinin doğru olabilmesi için yakın alan etkisini azaltabilmek için ölçümlerde kullanılan antenler ile numuneler arasında mesafeye dikkat edilmiştir. Bu mesafeler benzetimde alınan mesafeler ile de uygun seçilmek sureti ile benzetim-üretim-ölçüm sonuçlarının birbirlerini desteklemesi sağlanmıştır. Her bir numune için yapılan ölçümler en az üçer defa tekrarlanarak gerçekleştirilmiştir. Bu sayede ölçümlerde oluşabilecek

hatalar minimuma indirilmeye çalışılmıştır. Ölçümde kullanılan kurulum Şekil 3.4'te görülmektedir.



Şekil 3.4. Ölçüm düzeni

Ölçüm sistemini sistematik olarak şu şekilde ifade etmek mümkündür. Tez kapsamında gerçekleştirilen bütün ölçümler serbest uzay ölçümleri içermekte olduğundan öncelikle Network Analiz cihazını (VNA) ve çevredeki diğer saçılma sebebi olabilecek elemanların etkisini azaltmak için üzerlerine yansıma azaltacak kauçuk yapılar yerleştirilmiştir. Bu sayede saçılma ve kırınımın ölçüm sonuçlarında ki etkisi minimize edilmek sureti ile deneysel ve numerik sonuçlar paralellik göstermesi sağlanmıştır. Ölçümde kullanılan frekans aralıkları yüksek değerde olması ve buna bağlı olarak dalga boyunun düşüklüğü saçılmaları etkili kılmaktadır.

Bu hazırlığın ardından, ölçüm için seçilen frekans aralıklarına uygun anten ayarlamasına geçilmiştir. İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Mikrodalga ve Anten Laboratuvarında bulunan antenler arasında, ilgili frekans aralığını kapsayan en dar bantlı antenler, ölçüm için seçilmiştir. Bunun nedeni geniş bantlı antenlerin her frekans değeri için yakın kazanç değerine sahip olmamasından kaynaklanmaktadır.

Anten seçimininden sonra, yapılması gereken işlem network analiz cihazının kalibrasyonudur. Ölçüm yapılacak frekans aralığı ve örneklem sayısı cihazda seçildikten sonra, VNA'nın her iki portu için bağlı kablunun kısa devre, açık devre ve daha önce

belirlenmiş bir yük değeri için kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Burada aynı işlem her iki port girişi için birer birer gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, kablo etkilerinden arındırılmış ölçümlerin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. VNA'nın yükte kalibrasyon bağlantısı Şekil 3.5 'te gösterilmiştir.

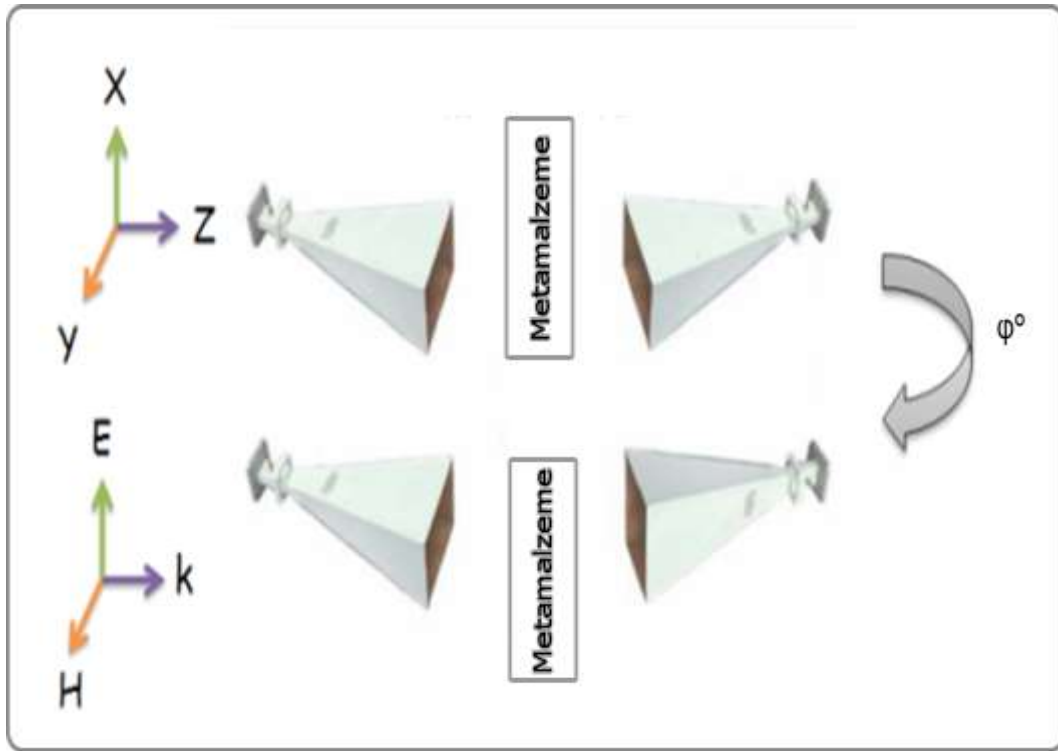


Şekil 3.5. Network Analizör Cihazının yükte kalibrasyon bağlantısı

Bu işlemin ardından, üretilmiş olan bakışsız MTM'lerin iletim ve yansıma değerlerine sıra gelmektedir. Bu işlem için öncelikle, kalibrasyonu yapılan her iki port girişine antenler bağlanmıştır. Bağlanan bu antenler, yakın alan etkilerini azaltmak için gerekli olan mesafeye sabit kalabilecek şekilde konumlandırılmıştır. Bu mesafe, ölçüm yapılan frekans aralığında en düşük frekans değerinin dalga boyuna göre belirlenmiştir. Çünkü, bu en büyük dalga boyuna sahip değerdir. Antenlerin yerleştirilmesinden sonra, serbest alan ölçümleri herhangi bir numune olmaksızın gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümde iletim ve yansıma değerlerinin büyüklük ve fazları kaydedilerek, numune yerleştirilmesi durumu için bu değerler normalize amaçlı olarak kullanılmıştır.

Daha sonra, iki anten arasındaki eşit mesafede olacak şekilde bakışsız MTM yapı yerleştirilmiştir. Bu yapı temel olarak iki boyutlu gibi düşünülürse, ebatları en yüksek dalga boyundan daha büyük değerde üretilmek sureti ile saçılma minimize edilmesi sağlanmıştır. Bu ölçüm esnasında, yerleştirilen her numune için yansıma değerinin fazı, büyüklüğü ve iletilen dalganın faz ve büyüklüğü elde edilir. Aynı zamanda, simetrik

olmayan iletim ve yansıma değerini gözlemlemek için, bir anten sabit tutularak, diğer anten 90^0 dönderilmek sureti ile ölçümler tekrarlanır. Bu şekilde, dairesel iletim değeri bulunur. Aynı zamanda, simetrik olmayan iletim değeri de elde edilmiştir. Bu işlem diğer taraftaki antenin ilk konumuna getirildikten sonra, birinci antenin 90^0 dönderilmesi ile yenilenir. Bu şekilde eş ve dik polar yansıma ve iletim değerlerinin lineer ve dairesel bileşenlerinin büyüklük ve fazları elde edilmiş olur. Yapılan işlemlerde antenlerin konum ayarları şekilde görüldüğü şekildedir.



Şekil 3.6. Frekans seçici yüzey tabanlı sensör ve sinyal emici ölçümleri test blok şeması (Li ve ark. 2013)

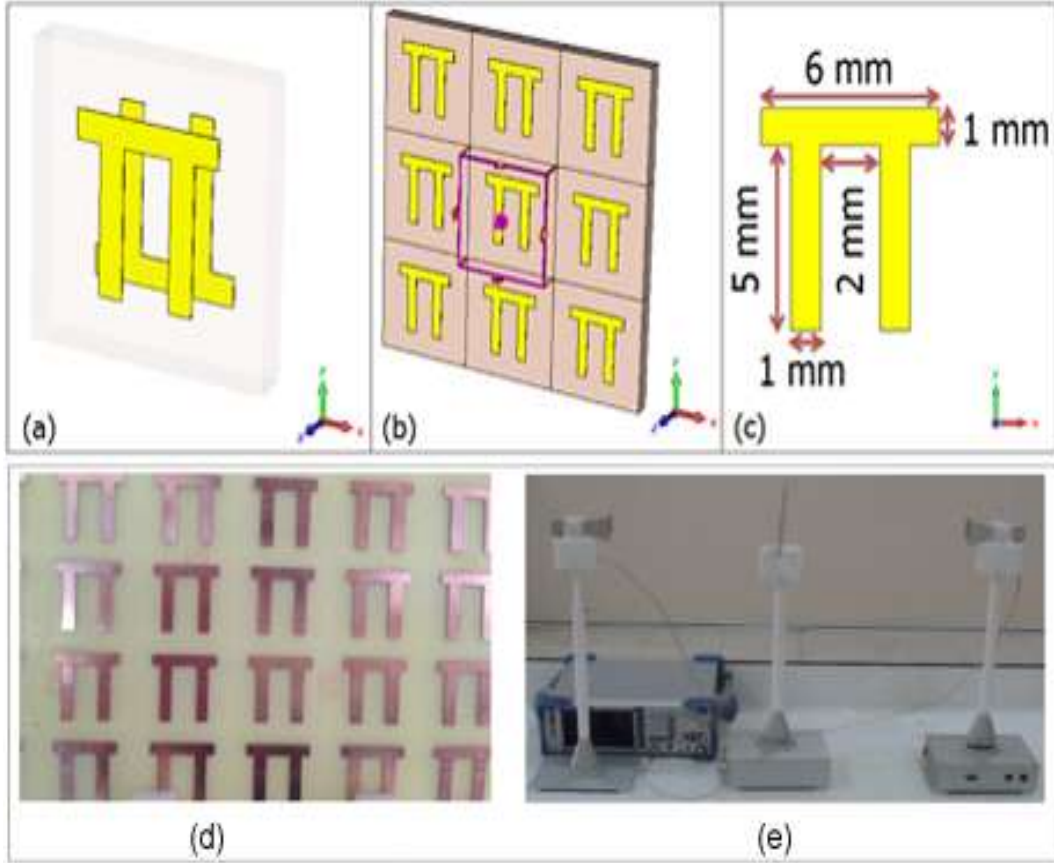
Bütün bu işlem sıraları standart olup, bu işlemlerde elde edilen değerler gerçekte sadece S parametreleridir. Elde edilen S parametreleri kullanılarak, literatürdeki çıkartım eşitliklerinden lineer ve dairesel polarize değerleri için bakışimsızlık, dielektrik katsayısı, manyetik geçirgenlik ve eliptiklik gibi ortam makroskopik değerleri elde edilmiştir. Burada gerçekleştirilen bütün işlemler, frekans aralığı değiştirilme durumunda, kalibrasyondan başlayarak tekrarlanmaktadır. Ölçümlerde kullanılacak bakışimsız MTM en düşük frekans değerine karşılık gelen dalga boyu için olabildiğince büyük ebatlarda üretilerek, karşılaşılabilecek sorunların üstesinden gelinmeye çalışılmıştır. Ölçümler her örneklem için en az 3 defa tekrarlanarak, ortalama değerler üzerinden sonuçlar sunulmuştur.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Mikrodalga Frekans Bandında Çalışan Sinyal Emici Yapıları

4.1.1. Çok katmanlı Ayırık Kare Halkalı Yapılı Sinyal Emici

Önerilen bakışimsız MTM yapı pi şekilli rezonatörler içermektedir. Pi şekilli rezonatörlerin biri FR4 malzemenin ön yüzüne diğeri ise 180 açılı olarak arka yüzeyde tasarlanmıştır. Yapı, sonlu integrasyon tabanlı CST Mikrodalga simülatörü kullanılarak benzetim yapılmıştır. Periyodik olarak tasarlanan malzemeler birim hücreler olarak simülatörde tanımlanmıştır. Birim hücreler, x-y ekseninde tasarlanmış olup, z ekseninde boyunca yapıya elektromanyetik sinyal uygulanmıştır. Birim hücre seçimi ile bir yapının periyodikliği sağlanmıştır. Açılı sinyal gönderilmemesi durumunda, Elektrik alana dik yüzey bileşeni mükemmel elektrik iletken ve manyetik alana dik yüzey bileşeni mükemmel manyetik iletken olarak tasarlanmak sureti ile de periyodiklik TEM sinyal için sağlanabilmektedir. Metalik rezonatörler bakır olarak tasarlanmıştır. Bakırın elektrik iletkenliği $5,8001 \times 10^7$ S/m ve kalınlık değeri 0,035mm olarak tanıtılmıştır. Bu değerler üretimde kullanılacak olan FR4 ile uygun olarak seçilmiş olup, bu sayede ölçüm ve benzetim sonuçları arasında uyumluluk sağlanmaya çalışılmıştır. İki rezonatör arasında 1.6mm kalınlığında yüksek frekans laminantı olarak FR4 dielektrik alt yüzey tanımlanmıştır. FR4'ün bağıl dielektrik katsayısı 4,2 bağıl manyetik geçirgenliği 1 ve kayıp faktörü 0,02 olarak alınmıştır. FR4 seçilme nedeni ucuz ve kolay bulunabilir olmasıdır. Rogers Duroid malzemeler daha az kayıplı olmasına rağmen, zor temininden dolayı tercih edilmemiştir.



Şekil.4.1 Önerilen bakışimsız MTM;(a) birim hücrenin şematik görünümü (b) koordinatları (c) yapının ebatları (d) üretilmiş MTM (e) ölçüm sistemi.

Önerilen yapının bir birim hücresi ve üzerinde bulunduğu koordinat sistemi Şekil.4.1.a ve Şekil.4.1.b'de görülmektedir. Yukarıda bahsedildiği şekilde birim hücre tanımlanması durumunda sistem bunu periyodik yapı olarak algılamakta ve Floquet Modları kullanılarak periyodik sistemin tepkisi sonlu integrasyon tekniği ile hesaplanmaktadır. Burada sinyal açılı gönderilmediğinden dolayı (TEM) periyodik sistemin tepkisi PEC/PMC sınır koşulu tepkisi ile de kıyaslanarak ilk kontrol sağlanmıştır.

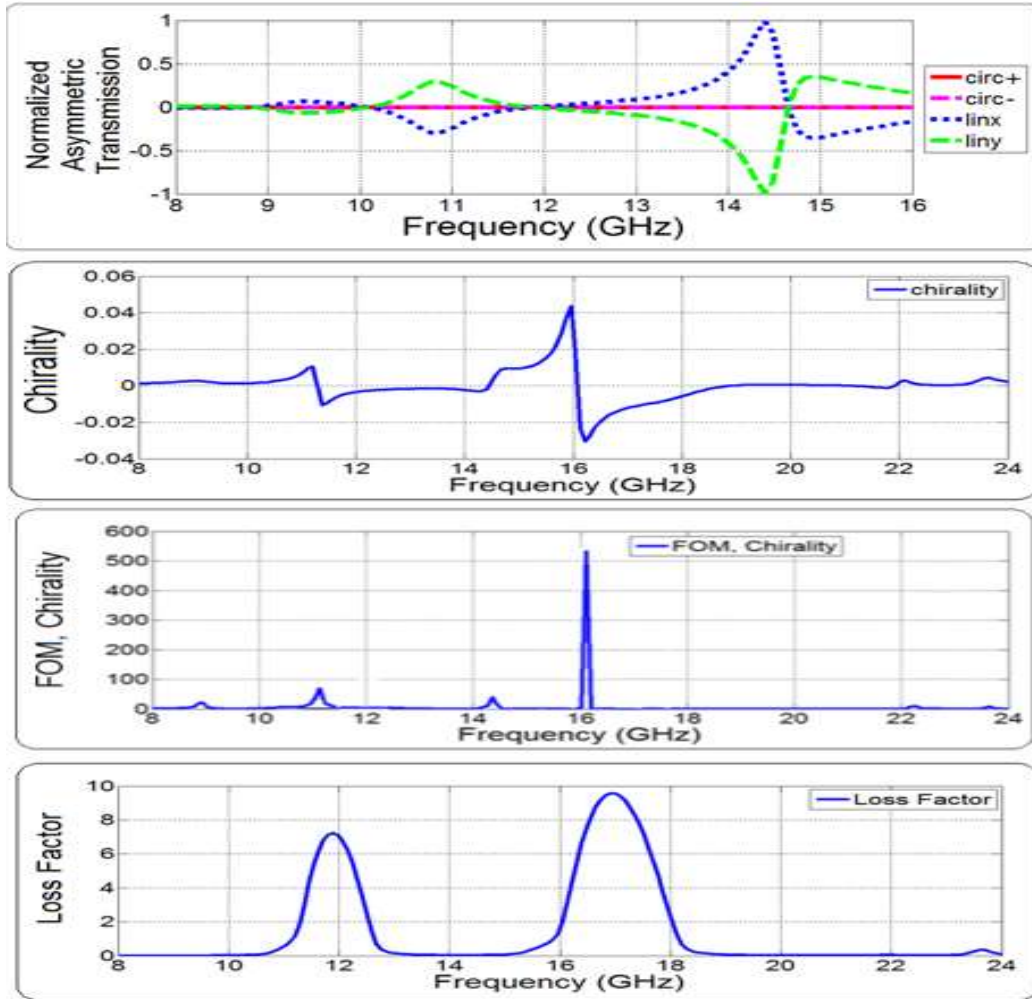
Birim hücredeki yapının ebatları Şekil.4.1.c 'de gözlemlendiği şekilde tanımlanmıştır. Her ne kadar yapının pi şekli asimetri sağlama potansiyelinden dolayı tahmin edilmiş olsada, ebatlar genetik algoritma tekniği ve parametrik çalışmalar ile optimum olarak elde edilmiştir. Burada genetik algoritma da değişken olarak tanımlanmış optimum ebatlar, sağ el polarize ve sol el polarize sinyalin iletim büyüklükleri arasında ki ilgili frekans aralığında farkın yüksek olması için elde edilmiştir. Şekil. 4.1.d'de LPKF protomat S33 kullanılarak, baskı devre kazıma tekniği ile üretilmiş pi şekilli bakışimsız metamalzeme

görülmektedir. Yapı periyodik 20x20 birim hücre içerecek şekilde üretilmiştir. Bu yapının tercih nedeni üretim basitliği ve bu şekilde yapay olarak asimetri elde edilmesi ile bakışsızlık göstermesidir. Önerilen yapı, literatürde aynı amaçlı önerilen yapılar arasında en basit olanıdır. Şekil 4.1.e'de ise ölçüm sisteminin kurulumu gösterilmiştir. Burada horn antenler arasına periyodik yapı yerleştirilerek aynı kutuplu ve dik kutuplu iletim değerleri ile yansıma değerleri birer birer ölçülmek sureti ile sağ ve sol el dairesel iletim değerleri hesaplanmıştır.

4.1.2. Geniş Asimetrik Transmisyon Bölgesinde (8-24 GHz Frekans Rejimi) Doğal Bakışsızlık için Nümerik Çalışma

Bu bölümde, önerilen pi şekilli rezonatörün, yüksek değerlikli simetrik olmayan iletim performansı 8-24 GHz frekans aralığında incelenmiştir. Önerilen bakışsız MTM geometrisi benzetim programında tasarlanıp simüle edilmiştir. Simülasyonda yukarıda bahsedildiği gibi yapı x-y düzlemi boyunca alınmış ve ilgili frekans aralığında EM dalga +z ve -z yönünde uygulanarak yapının çift taraflı simetrik olmayan davranışı incelenmiştir. Uygulanan sinyal +x polarize şeklinde tanımlanmış (elektrik alan yönü), ve bu sinyal uygulanması durumunda bütün periyodik yapının T_{xx} ve T_{yx} lineer iletim Matris sabitleri elde edilmiştir. Bu durum izah edilmesi gerekirse, x polarize olmuş sinyal durumunda x yönünde iletilen elektrik alan bileşeni T_{xx} ve y yönünde iletilen elektrik alan bileşeni T_{yx} elde edilmiştir. Bunlar eş polarize ve dik polarize bileşenleri göstermektedir. Ek olarak, benzer şekilde y yönünde polarize olmuş sinyal gönderilmesi durumunda eş polarize T_{yy} ve dik polarize T_{xy} bileşenlerde elde edilerek simetrik olmayan iletim değerleri hesaplanmıştır. Simetrik olmayan iletim parametreleri (Δ) teorik yaklaşım formülleri kullanılmak sureti ile hem lineer hemde dairesel polarize durumları için Şekil 4.2.'de olduğu gibi hesaplanmıştır. Burada lineer hesaplamalar doğrudan eş ve dik polarize değerlerinden çıkartılırken, simetrik olmayan dairesel polarize iletim miktarı her iki geliş durumu için elde edilen iletim değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 4.2.'de lineer ve dairesel polarize durumları için normalize edilmiş simetrik olmayan iletim değerleri ve bu değerlerden elde edilmiş bakışsızlık görülmektedir. Pi şekilli yapının lineer polarizasyon durumu için 10,85 GHz, 14,49 GHz ve 14,88 GHz rezonans frekans değerlerinde çok bantlı simetrik olmayan iletim sağladığı görülmektedir. Yani, x ve y yönlerinde polarize olmuş EM sinyalleri farklı değerlikli olarak ilettiği görülmüştür. Dolayısı ile simetrik iletim bozulmuştur. Bu sonuca göre yapı frekans bağımlı bakışsızlık özelliğindedir. Lineer

Δ parametresi maksimum değerine 14,49 GHz rezonans frekans değerine ulaşmıştır. Bu simetrik olmayan davranış ayrıca bakışimsızlık admitansında da görülmektedir (Şekil 4.2.b.). Çift izotropik yapıların öz durumları ve elektromanyetik özellikleri (sağ dairesel polarize (RCP) ve sol dairesel polarize (LCP) sinyaller için) S parametrelerinden elde edilen çıkartım eşitlikleri kullanılarak elde edilebilir. Aynı zamanda, bu parametreler anisotropik ve çift anisotropik ortamlar içinde kullanılan standart eşitlikler ile elde edilebilir.



Şekil 4.2 Önerilen yapının sırasıyla lineer ve dairesel asimetrik transmisyon parametreleri, bakışimsızlık, FOM ve kayıp faktörü.

Önerilen pi şekilli periyodik yapı izotropik olmamasına rağmen, bakışimsız MTM için elde edilmiş olan çıkartım eşitlikleri kullanılabilir. Çünkü FR4'ün ön ve arka yüzeyine yerleştirilmiş olan pi şekilli simetrik olmayan metalik geometriler, simetrik olmayan bakışimsız çarpaz tel çubuklara çok benzemektedir. Aynı zamanda, önerilen modelin doğal bakışimsızlık değeri de elde edilmiştir. Gözlenen bakışimsızlık değeri ile yapı,

polarizasyon dönüştürücü, EM filtre ve kaplama uygulamaları için kullanılabilir. Bakışsızlık değeri, doğrudan iletim sabitlerinden ilgili eşitlikler kullanılarak elde edilebilmektedir.

$$\text{Re}(\kappa) = \frac{[\arg(T^+) - \arg(T^-) + 2m\pi]}{2k_0d}, \quad \text{Im}(\kappa) = \frac{\ln|T_L| - \ln|T_R|}{2k_0d} \quad (4.1)$$

Burada k_0 boşluktaki dalga vektörünü, d yapının kalınlığını ifade etmektedir. m herhangi bir doğal sayı olabilecektir. Fakat fiziksel olarak mana ifade edip etmediği Kramers Kroning Eşitliklerinden tespit edilmektedir. Elde edilen bakışsızlık parametresi, Şekil 2'de gösterilerek doğal bakışsızlığa uyduğu ispatlanmıştır. Şekilde görülmektedir ki, önerilen pi şekilli metalik rezonatörler, küçük doğal bakışsızlık değerine sahiptir ve maksimum değerine 16GHz frekansında sahip olmaktadır. Gerçekte, son yapılan bakışsızlık çalışmaları ağırlıklı olarak, büyük bakışsızlık değerlerine odaklanmıştır. Çünkü büyük bakışsızlık değerleri yüksek optik aktivite sağlamaktadır ve kırılma indisini negatif yapma özelliği gösterebilmektedir. Bununla birlikte, küçük bakışsızlık değerli MTM'ler genellikle ihmal edilmiş ve literatürde yer bulmamıştır. Düşük bakışsızlıklı yapılar, iletilmekte olan EM dalganın polarizasyon yönünü ortamda iletim esnasında manipüle etme özelliği göstermektedir. Bakışsızlık değeri geri yüzeydeki pi şeklinin açısı ile doğrudan ilişkilidir. Pi şekilli rezonatörler, 0^0 ve 180^0 açılı olması durumunda doğal bakışsızlık ile sonuçlanmaktadır. Kuvvetli bakışsızlık elde etmek için ise, ön ve arka yüzeye yerleştirilmiş pi şekilleri arasında simetriyi daha fazla bozmak gerekmektedir. Bu çıkartım kısmında elde edilecek ve ispatlanacaktır. Bakışsızlık ile ilgili neden, çalışma frekans değer aralığında EM dalganın iletim ve yansıması arasında farklı yönde geliş durumunda mükemmel simetriyi korumayarak, eş polar ve dik polar arasında enerji paylaşımından kaynaklanmaktadır. Bununla beraber, simetri farklı bakışsızlık değerlerinde kaybolabilmektedir.

Bunun yanında bakışsızlık değerlerinin bulunduğu rezonans frekanslar, aynı zamanda yapının simetrik olmayan davranışını da doğrulamakta ve göstermektedir. FOM değeri;

$$\text{FOM} = \text{Re}(\kappa) / \text{Im}(\kappa) \quad (4.2)$$

şeklinde hesaplanır. Bakışsızlığı gösteren diğer bir parametredir. Bu değer önerilen bakışsız MTM yapının, literatürde sunulan pekçok bakışsız yapıya göre çok daha

düşük kayıp değerlerine sahip olduğunu göstermiştir. FOM değerinin bakışsızlığın yüksek olduğu rezonans frekanslarında ki yüksek değeri, yapının performansının kabul edilebilirliğini göstermektedir. Herhangi bir yalıtkan ve manyetik ortamdaki kayıplar, kayıp faktörü ile ifade edilmektedir. Bu değer, permitivite ve permeabilite değerlerinin sanal ve reel kısımları arasında ki oranlama ile elde edilmektedir. Bundan dolayı, hangi ortam üzerinde araştırma yapılmakta ise, her iki malzeme parametreleri de dikkate alınması gerekmektedir. Hem permitivite hemde permeabilitenin sanal ve reel kısımlarının oranlarının ortamın kayıpları hakkında detaylı bilgi verdiği iyi bilinen bir gerçektir. Bundan dolayı, eğer ortam özellikleri tam olarak bilinmiyorsa, yani elektriksel ve manyetik özellikleri hakkında yeterince bilgi sahibi değilsek, ortamın kayıpları hakkında bilgiyi bu iki parametre kullanılarak hesaplayabiliriz. Bu amaçla en kolay yöntem, permittivite ve permeabilite değerleri içeren kırılma indisinin sanal ve reel kısımlarını oranlamaktır. Bu değerlerden kırılma indisinin reel kısmı yapının gelen sinyali kırma özelliğini gösteren ve snell yasasından bilindik bir değer iken, sanal kısmı yapının emilim ve sinyali zayıflatma özelliğini gösteren kısımdır.

Bundan dolayı, bakışsız ortamın kayıpları;

$$LF(\text{loss factor}) = |n''/n'| \quad (4.3)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Burada n'' yapının kırılma indisinin sanal kısmını ve n' değeri ise reel kısmını göstermektedir. Bu değerler hesaplanırken, yukarıda da bahsedildiği gibi, iletim ve yansıma değerlerinin büyüklük ve faz değerlerinden yola çıkarak ortamın elektriksel ve manyetik özellikleri elde edilmiştir. Bu değerlerde kullanılarak kırılma indisinin reel ve sanal kısımları hesaplanmıştır. Elde edilen kayıp faktörleri, en yüksek bakışsızlık değerleri için kabul edilebilir düzeydedir. Kayıp faktörleri, bakışsızlığın en yüksek olduğu değerlerde 1'den düşüktür ve hem FOM hemde LF değerleri gösterirki, önerilen yapı simetrik olmayan iletici ve polarizasyon dönüştürücü olarak rezonans frekanslardaki düşük kayıpları ile birlikte kullanılabilir.

Elde edilen bakışsızlık değerleri gözlemlendiğinde, yapının doğal bakışsızlık değerlerine sahip olduğu gözlenmektedir. En yüksek bakışsızlık değeri, 0,04 olarak gözlenmiş olup bu değer doğal yapıların sunduğu bakışsızlık değerlerine yakındır. Ayrıca, uygun aktif derve elemanları kullanılarak, yapının ayarlanabilir bakışsızlık göstermesi ve istenen frekans aralığında polarizasyon yönünü döndürmesi mümkün gözlenmektedir. Simetrik

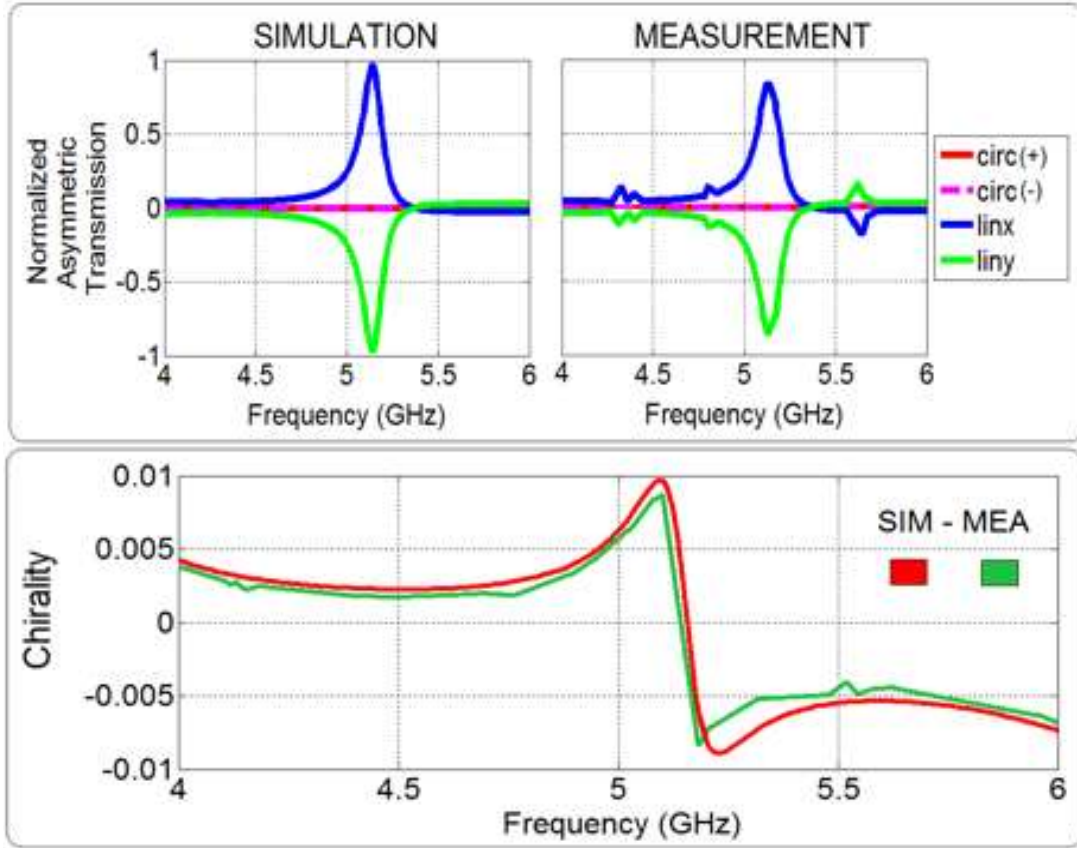
olmayan davranış için ayrıca FOM değeri de kullanılmaktadır. Bakışsımsızlığın yüksek olduğu değerlerde FOM değeri de gözlenebilir oranda elde edilmiştir. Dolayısıyla bakışsımsızlığı, yani simetrik olmayan davranışı birden fazla ifade ile gözlenmiş olmaktadır. Bütün bu değerler, iletim ve yansıma değerlerinin büyüklük ve faz değerleri ilgili eşitliklerde yerine yerleştirilerek elde edilmiştir.

4.1.3. Geniş Asimetrik Transmisyon Bölgesinde (4-6 GHz Frakans Rejimi) Doğal Bakışsımsızlık için Nümerik Çalışma ve Deneysel Çalışma

Bu kısımda, son zamanlarda kablosuz haberleşmede kullanım alanı yaygınlaşan 4-6GHz frekans bandında yapının özellikleri incelenmiştir. Yukarıda kullanılmış olan aynı prosedür bu kısımda da kullanılmıştır. Pi şekilli rezonatörler x-y düzleminde birim hücre olarak tanımlanmış, sınır koşulları periyodik olarak Floquet modları şeklinde tanımlanmıştır. İlgili frekansta, EM dalga periyodik yapıdan yakın alan etkilerini azaltacak mesafede en büyük dalga boyuna göre belirlenmiş (en küçük frekans) ve +z ve -z yönlerinde portlardan uygulanmıştır. Ebatlar, yukarıdaki kısma göre dalga boyu ile uyumlu olması gerektiğinden dolayı daha büyük seçilmiştir. Varolan laboratuvar imkanlarına uygun olarak simüle edilen ve bu benzetimler sonucu elde edilen değerlere uygun olarak üretilen pi şekilli rezonatörlerin benzetim ve ölçüm sonuçları aynı frekans aralığında kıyaslanmıştır. Üretilen yapı ve ölçüm kurulumu ilgili frekans aralığı için Şekil.4.1.d'de görülmektedir. Benzetimler CST Microwave Studio kullanılarak yukarıdaki ile aynı sınır koşulları tanımlanmak sureti ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler x ve y yönünde ana uzunluğu olan ve frekans bandına uygun olan 2 horn anten kullanılarak elde edilmiştir. Her iki antenin aynı yönlü olması durumunda eş polarize elde edilmiş, bir anten 90° döndürülmek sureti ile dik kutuplu polarize olmuş iletim değeri ölçülmüştür. Bu ölçüm işlemi yapının her iki tarafında sırası ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1.d.).

Bu ölçümlerde antenler yapıya, yakın alan değerlerini ihmal edecek düzeydeki uygun mesafeye yerleştirilmiştir. Bu ölçümlerde hem yansıma hemde eş ve dik polarize durumları için iletim değerlerinin büyüklük ve fazları ayrı ayrı vektör network analizör'e kaydedilmiştir. Bütün ölçümler, serbest uzay durumuna göre kalibre edilmiş, elde edilen sonuçlar bu değere göre normalize edilmiştir. Lineer ve dairesel polarize durumu için normalize edilmiş simetrik olmayan iletim ve yansıma değerlerinin ölçüm ve benzetim sonuçları birbirleri ile oldukça uyumlu olduğu Şekil4.3.'de görülmektedir. Tam lineer

simetri olmaması durumu 5,2 GHz frekansında gözlenmiştir. Lineer polarize sinyal uygulanması durumu içinde edilen simetri uyumsuzluğu, yani dik polarize olmuş sinyali gösteren bakışsımsızlık değerinin ilgi rezonans frekanstaki gözlemlenen değeri 0,01 olarak tespit edilmiştir. Lineer simetri bozulması ve bakışsımsızlık değerleri birbirlerine uyumludur ve desteklemektedir.



Şekil 4.3 Lineer ve dairesel polarizasyon için sırasıyla asimetrik transmisyon ve doğal bakışsımsızlık simülasyon ve deney sonuçları

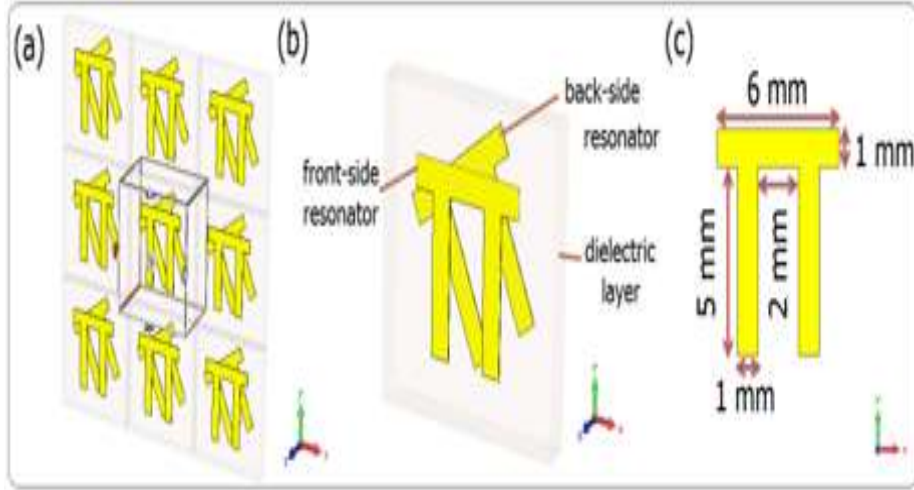
Bunun yanında pi şekilli rezonatörün gözlemlenen bakışsımsızlık değeri ilgili frekans aralığında, doğal bakışsımsız malzemelerin bakışsımsızlık admitans değerleri ile uyumlu olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 4.3). Gözlenen değerlerden en dikkat çekici olanı ise bakışsımsızlık değerinin 4,2-4,8 GHz ve 5,4-5,7 GHz frekans değerleri aralığında hemen hemen sabit kalmasıdır. Pi şekilli rezonatörlerin sunduğu bu özellik araştırmacılara yeni fırsatlar vermektedir. Örneğin, eşit miktarda polarizasyon dönderilmesi ve geniş frekans aralığında sensör uygulamaları gibi. Bu değer aralığında bakışsımsızlık değerinin sabit kalması, sinyal hangi frekansta gelirse gelsin aynı oranda dönüşeceğini sağlamaktadır. Simetrik olmayan geometrik şekillerin dielektrik katmanların her iki tarafına açılı şekilde

yerleştirilerek bakışimsız metamalzeme elde edilmesi en bilinen yöntemlerden bir tanesidir. Pi şekilli metalik geometrilerin simetrisizliğinden dolayı, önerilen yapı bakışimsızlık göstermektedir. Bunun yanı sıra, bakışimsızlık değerinin reel kısmı, sağ dairesel polarize ($\arg(T +)$) ve sol dairesel polarize ($\arg(T -)$) iletim değerlerinin faz farkları ile doğrudan bağlantılıdır. Küçük bakışimsızlık değeri durumu içinse, bu faz değerlerinin geniş frekans bant aralığında düşük derece de ve eşit seviyedeki farkı, aynı frekans spektrumunda sabit bakışimsızlığı ortaya koymaktadır. Ayrıca, benzetim ve ölçüm sonuçlarının birbirleri ile yüksek derece de uyumlu olması, benzetimde alınan sınır koşullarının, birim hücrelerin, atanan mesh ölçüsünün ve hata faktörünün ve hata tekrarlama oranının seçiminin yüksek derecede doğruluğunun göstergesidir.

4.1.4. Önerilen Bakışimsız Metamalze Yapının ve Sayısal Değerlerinin (8-24 GHz Frekans Bölgesi için) Değerlendirme çalışması

Önerilen pi şekilli rezonatörlerden oluşan bakışimsız MTM'nin ön ve arka yüzeyde yerleştirilmiş olan pi şekilleri arasında Şekil 4.4'de görüldüğü gibi 30° açı bulunmaktadır. Arkadaki metalik geometri öndekine göre 30° döndürülmüştür. Ek olarak, numerik hesaplamalar yukarıda bahsedildiği üzere FIT tabanlı CST Microwave Studio ile gerçekleştirilmiştir. Birim hücre, x-y düzleminde tanımlanmış ve açık sınır koşulu her iki z ekseninde uygulanmıştır. Sinyal girişini sağlayacak ve polarizasyon yönünün ayarlanacağı portlar açık sınırlardan gerçekleştirilecektir. Metalik rezonatörler bakır tabaka olarak modellenmiş ve bakırın elektrik iletkenliği ve kalınlığı sırası ile $5,8001 \times 10^7 \text{ S/m}$ ve $0,035 \text{ mm}$ olarak alınmıştır. Bu değerler, kolay elde edilebilen FR4 için piyasada mikrodalga kaybı en düşük olan numunelerdendir.

Yüksek frekans laminantı olan FR4'ün kalınlığı $1,6 \text{ mm}$, bağıl dielektrik katsayısı $4,2$ ve permeability değeri 1 olup kayıp tanjantı $0,02$ olarak seçilmiştir. Şekil 4.4.b ve Şekil 4.4.c önerilen yapının birim hücresinin yan ve ebatlarını göstermektedir. Burada pi şekilli rezonatörün ebatları ve iki rezonatör arasındaki açı değeri daha önce de belirtildiği gibi genetik algoritma mantığı ve parametrik çalışmalar ile tespit edilmiştir. Dielektrik kalınlığı, metal kalınlığı, dielektriğin bağıl değeri ve kayıp faktörü ise üretime uygun seçilerek, sonuçlar arasında kıyaslama imkanı sağlanmıştır.



Şekil 4.4 Önerilen bakışimsız MTM'nin; (a) Birim hücre şematik görünümü, (b) sınır şartları, (c) rezonator.

İletim değerlerinin dairesel polarize bileşenleri T_+/T_- ve yansıma sabitleri, eş kutuplu ve dik kutuplu iletim değerleri kullanılmak sureti ile çıkartım eşitliklerinden elde edilmiştir. Her üç değer hem büyüklük hemde faz değerleri eşitliklerde kullanılmıştır. Hem sağ dairesel hemde sol dairesel polarizasyon durumu için iletim değerleri Şekil 4.5'de görüldüğü gibi 8-24 GHz frekans aralığında elde edilmiştir.

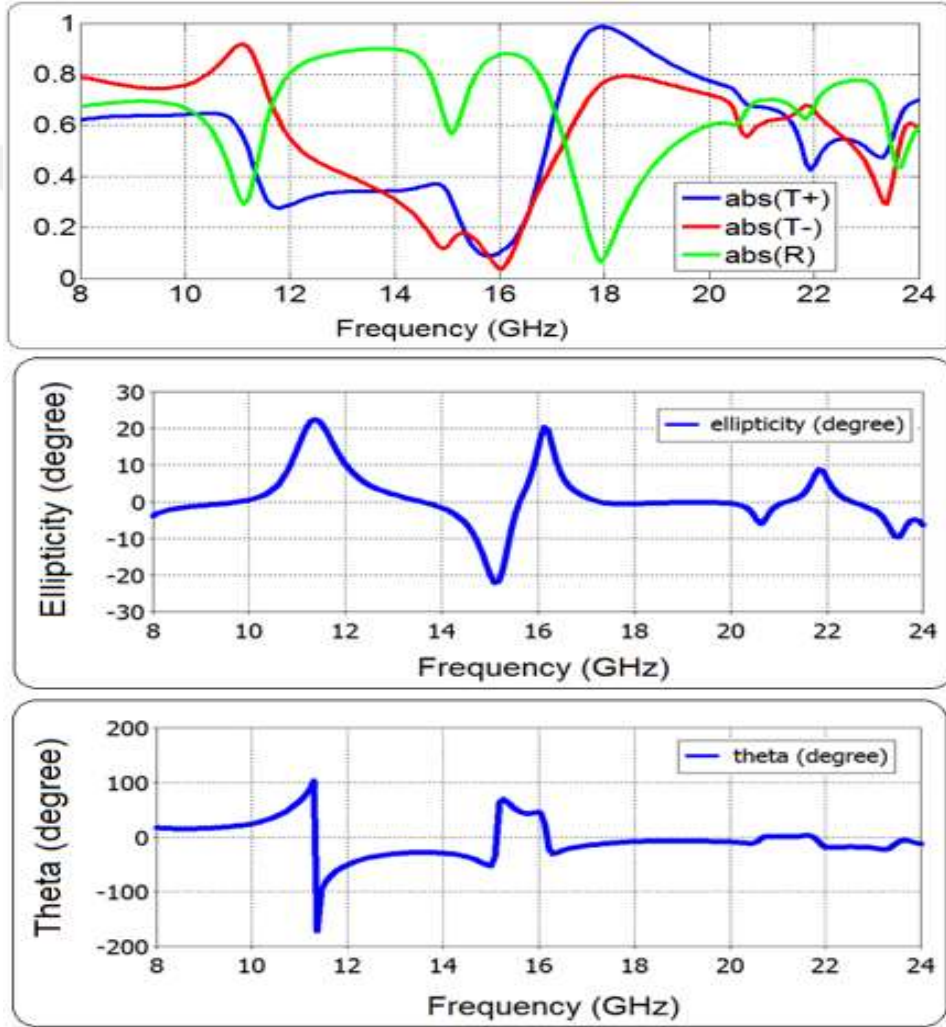
Portlardan veya antenden lineer polarize olarak uygulanmış dalganın iletim durumunda ki polarizasyon yönündeki değişim önerilen simetrisiz pi şekilli modele doğrudan bağlı olmaktadır ve bu dönme miktarı polarizasyon azimuth dönmesi (η) ve eliptiklik değeri (θ) ile ifade edilebilir. Her iki değerde doğrudan dairesel polarize oranlarının büyüklük ve fazı ile ilgilidir;

$$\eta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{|T_+|^2 - |T_-|^2}{|T_+|^2 + |T_-|^2} \right) \quad (4.4)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \delta = \frac{1}{2} \arcsin [\arg(T_+) - \arg(T_-)] \quad (4.5)$$

11,8 GHz, 15 GHz ve 16 GHz rezonans frekans değerlerinde, hem azimuth dönme açısı hemde eliptiklik değerleri tepe noktalarındadır. Bu frekanslara karşılık gelen değerler sırası ile ($\eta = 22^\circ$, $\theta = -180^\circ$), ($\eta = -21^\circ$, $\theta = 80^\circ$), and ($\eta = 20^\circ$, $\theta = 60^\circ$) şeklindedir. Bu değerler, lineer

polarize olarak yapıya uygulanmış EM dalganın, yüksek distorsiyon altında eliptik polarize olmuş dalgaya döndürüldüğünü göstermektedir. Rezonans frekanslardan 13.8GHz değerinde, eliptiklik 0^0 civarında iken, polarizasyon döndürme özelliği $\theta = 30^0$ civarındadır ve dichroism değeri sıfıra yakın gözlemlenmektedir. Pek çok frekans noktasında gözlenmiş olan eliptiklik işaretinde ki değişiklik, geniş frekans bölgesinde lineer polarize olarak gelen EM dalganın, Sağ ve sol dairesel polarize dalgaya dönüşmüş olduğunu göstermektedir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Önerilen yapının sırasıyla epliptik ve theta derecesi için iletim ve yansım değerleri.

(1) İleri ve geri yönlü propagasyon yapan dalgalar için, resiprokal bakışsız özelliğine sahip ortamlar tamamıyla aynı karakteristik göstermektedir. Bakışsız MTM ortam üzerine dairesel polarize düzleminde normal geliş gösteren EM dalga durumu için ortam kalınlığı d , sağ ve sol dairesel polarize dalga için kırılma indisi n_{\mp} ve ortam empedansı

elektromanyetik özelliklerine bağlı olarak $Z = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ şeklinde olsun. Bu durumda, sağ ve sol dairesel polarize dalgalar için iletim ve yansıma bileşenlerinin büyüklük değerleri sırası ile T_{\mp} and R_{\mp} şeklinde ifade edilebilir. EM dalganın ters yönde uygulanması durumunda aynı özellikli değerler T'_{\mp} and R'_{\mp} şeklinde temsil edilebilir. Teğet elektrik ve manyetik alanlarının süreklilik koşulunu başlangıç ve bitiş noktalarında kullanarak ($z = 0$ ve $z = d$),

$$1 + R_{\mp} = T'_{\mp} + R'_{\mp} \quad (4.6)$$

$$1 - R_{\mp} = \frac{T'_{\mp} - R'_{\mp}}{Z} \quad (4.7)$$

$$T'_{\mp} e^{ik_{\mp}d} + R'_{\mp} e^{-ik_{\mp}d} = T_{\mp} \quad (4.8)$$

$$\frac{T'_{\mp} e^{ik_{\mp}d} + R'_{\mp} e^{-ik_{\mp}d}}{Z} = T_{\mp} \quad (4.9)$$

şeklinde eşitlikler elde edilebilir. Bu eşitliklerde $k_{\mp} = k_0(n \mp \kappa)$ ifadesi sağ ve sol dairesel polarize dalga için dalga vektörüdür. Buradan T'_{\mp} ve R'_{\mp} değerleri kaldırılacak şekilde işlem yapılması durumunda, ortamın bir tarafından uygulanmış EM dalga için sağ ve sol dairesel iletim ve yansıma değerleri çekilebilir;

$$T_{\mp} = \frac{4Ze^{ink_0d} e^{\mp ik_0d}}{(1+Z)^2 - (1-Z)^2 e^{2ink_0d}} \quad (4.10)$$

$$R_{\mp} = \frac{(1+Z^2)(e^{2ink_0d} - 1)}{(1+Z)^2 - (1-Z)^2 e^{2ink_0d}} \quad (4.11)$$

Bu eşitlikte, tek bir özelliğe ortam için her iki yansıma değerleri eşit çıkmaktadır. Yukarıdaki eşitlikten ortam empedansı ve sağ ve sol el dairesel polarize dalgalar için kırılma indisi bileşenleri aşağıdaki şekilde çekilebilir;

$$Z = \mp \sqrt{\frac{(1+R)^2 - T_+ T_-}{(1-R)^2 - T_+ T_-}} \quad (4.12)$$

$$n_{\mp} = \frac{i}{k_0 d} \left\{ \ln \left[\frac{1}{T_{\mp}} \left(1 - \frac{Z-1}{Z+1} R \right) \right] \mp 2m\pi \right\} \quad (4.13)$$

(2) Burada m fiziksel olarak mana ifade edebilen kol seçimi için kullanılmaktadır. Bu değerin doğru seçilmesi önemlidir. Ayrıca değerin doğru seçilip seçilmediği Kramers Kroning dönüşümleri kullanılarak kontrol edilmiştir.

Ortam empedansı ve sağ/sol dairesel polarize dalga uygulanması durumu için kırılma indisi bileşenlerinin elde edilmesi ile, kolaylıkla bakışimsız ortamın dielektrik katsayısı ve manyetik geçirgenliği elde edilebilir. Bu çıkartım için $n_{\pm} = n \pm \kappa$, $\epsilon = n/z$ ve $\mu = nz$ eşitlikleri kullanılabilir. Burada, etkin ortam parametreleri çıkartım eşitlikleri kullanılmak sureti ile hesaplanabilecektir. Bunun yanında m tamsayısının değerinin seçilmesi yukarıda da bahsedildiği şekilde Kramers Kroning Eşitliklerini kullanmak sureti ile kırılma indisinin fiziksel olarak doğru değer alınması için önemli bir kriterdir.

Yukarıdaki eşitlikler ve çıkarımlar kullanılarak, önerilen pi şekillerin periyodik olarak dizilmesi ile elde edilen bakışimsız MTM yapının etkin ortam parametreleri Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

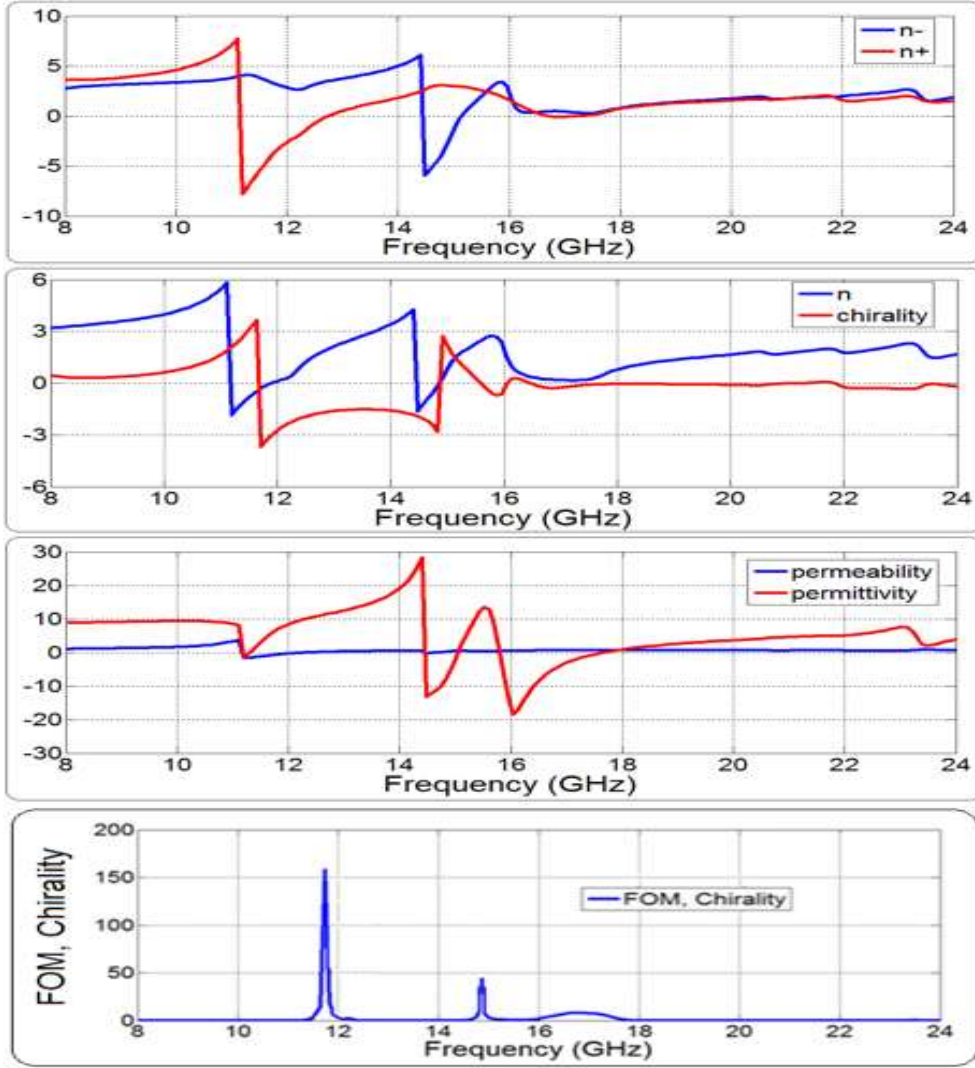
Şekildeki değerler gözlemlenecek olursa, sağ el dairesel polarize dalganın bakışimsız ortam içerisine uygulanması durumunda elde edilen etkin kırılma katsayısı (n^+), ilk rezonans frekans değeri olan 11,8GHz'de yüksek tepki verirken; sol el dairesel polarize dalga uygulanması durumunda etkin ortam kırılma indisi (n^-) dikkat çekici bir şekilde değişmemiştir ve 14,5GHz değerine kadar pozitif olarak kalmıştır.

Etkin kırılma indisi (n^+), sağ el dairesel polarize dalga uygulanması durumunda bir başka rezonans frekans yakınında diğer bir tepe değere sahip görülmektedir; bu frekans değerinde sol el dairesel polarize dalga için kırılma indisi (n^-) sıfıra yakındır.

İlk ve ikinci rezonans frekanslarının aksine, üçüncü rezonans frekans değerinde, sol el dairesel polarize olmuş şekilde uygulanmış olan dalga için kırılma indisi (n^-) tepe değerinde görülmekte iken, sağ el dairesel polarize olarak uygulanmış dalga için ise etkin ortam kırılma indisi değeri (n^+) sıfır değerine yaklaşmaktadır. Buradan kolaylıkla çıkarılabilmektedir ki, ortam kırılma indisinin şekilde görülen ilk negatif değeri, geleneksel negatif kırılma indisli metalmalzemeler ile aynı nedenden kaynaklanmakta iken, ikinci rezonansa gözlenen negatif kırılma indisi pi şekilli yapının kuvvetli bakışimsızlık karakteristiği ile doğrudan alakalıdır.

Burada bakışimsız MTMlerle ilgili bu zamana kadar literatürde değinilmemiş ve vurgulanması önemli olan bir diğer önemli olay, yapının aynı zamanda bakışimsızlık yoksun malzeme özelliği göstermesidir. Bu nokta, önerilen pi şekilli modelin bir diğer önemli ve çok değerli özelliğidir.

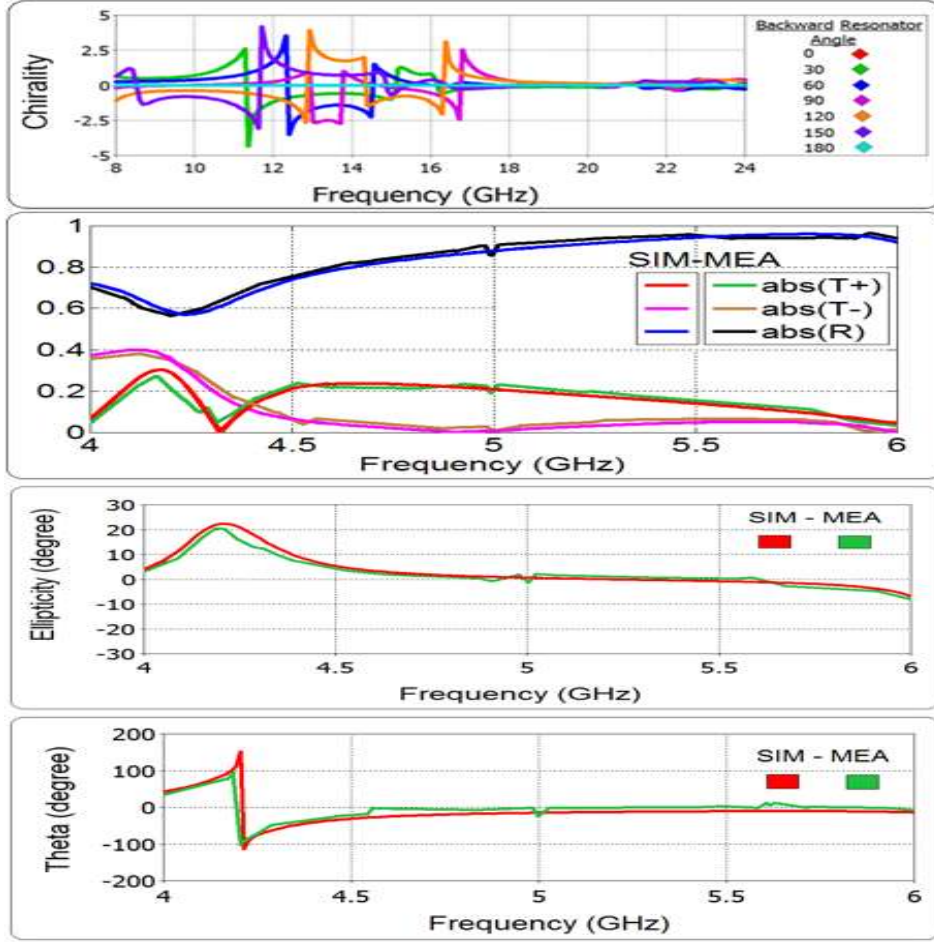
(3) Bakışimsızlık yokluk ifadesi kırılma indisi bileşenleri olan bağıl dielektrik katsayısı ve manyetik geçirgenlik değerinin sıfıra yakın olması durumunda bakışimsızlığın varlığı ile ilgilidir. Bu şekilde az bulunur özellik farklı uygulanalar için kullanım potansiyeline sahiptir. Pi şekilli rezonatörün elektromanyetik özellikleri gözden geçirildiğinde, 15GHz değerinde hem etkin bağıl permittivite hemde permeabilite değeri sıfıra çok yakındır ve bakışimsızlık değeride 3 civarındadır Dolayısı ile, yapı sadece kuvvetli bakışimsızlık, polarizasyon dönderme ve diğer geleneksel MTM'lerde olduğu gibi negatif kırılma indisi gibi özellikler sunmakla beraber, aynı zamanda aynı frekans bandı içerisinde bakışimsızlık yokluk özelliğide ortaya koymaktadır. Dolayısı ile önerilen ve üretimi çok basit olan pi şekilli rezonatörler çok fonksiyonel bir yapıdır.



Şekil 4.6. Önerilen yapıda yansıma, bakışimsızlık, FOM, geçirgenlik ve dielektrik değerleri

(4) Son adım olarak, FOM ve dielektriğin arka tarafındaki rezonatörün önündekine göre açısının etkileri incelenmiştir. Bakışimsızlığın en yüksek olduğu frekanslarda, yapının performansının yeterli ölçüde olduğu sonucu şekillere bakılarak çıkarılabilir. Bundan dolayı, önerilen yapı, özellikle 11.8GHz ve 15GHz aralığında 3,2GHz bant genişlikli bir polarizör olarak kullanılabilir. Yani gelen EM dalga elektrik alan yönünü dönderme etkisine sahiptir (Şekil 4.6). Gerideki rezonatör açısının bakışimsızlık değeri üzerinde ki etkisi Şekil 4.7'de görülmektedir. Bakışimsızlık değerinin 0° ve 180° değerleri için simetrik olmama durumunun kalktığından dolayı sıfıra yakın olduğu gözlemlenmektedir. Bunun yanında, aradaki açı değerleri için optiksel aktivitenin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Farklı geri yapı açısına göre her bir yapının iki tane yüksek bakışimsızlık değerine sahip rezonans frekans aralığı gözlemlenmiştir. Bunlardan ilki, negatif bakışimsızlık

değerine sahiptir ve aradaki açı 90° altı olması durumu için dar bantlıdır. Daha yüksek rezonatör açıları için ise bu değer pozitifdir.



Şekil 4.7. Arkada bulunan rezontorde farklı açılar için , önerilen yapıdaki epliptik ve theta derecelerinde iletim ve yansıma değerleri

4.1.5. Bakışsız Ortamlar Arası Farklılıklar İçin Sayısal ve Deneysel Çalışma (4-6 GHz Frekans Aralığı)

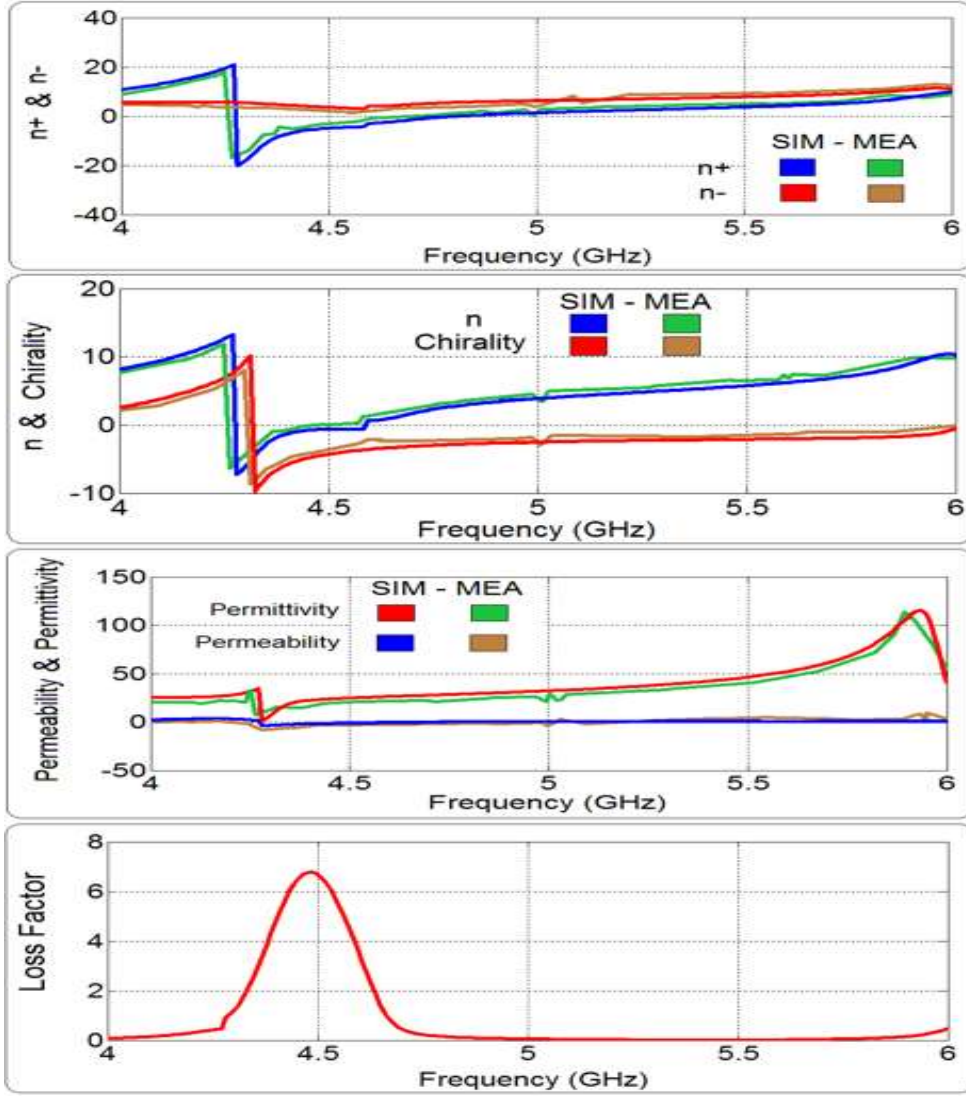
Önerilen simetrik olmayan pi şekilli bakışsız MTM'nin gerçekleşmesi, laboratuvar imkanları ölçüsünde 4-6GHz frekans aralığında hem deneysel hemde benzetim olarak gerçekleştirilmiştir. Dielektriğin, metalin ve ön ve arka yüzeydeki pi şekilli rezonatörlerin ebatları ve ayarlı açıları, malzeme özellikleri 8-24GHz bant aralığında gerçekleştirilen ile aynı özellikli olarak alınmıştır. Önerilen Pi şekilli yapıya sağ ve sol dairesel polarize olarak uygulanmış EM dalga için sağ ve sol dairesel dalga polarize dalga iletimi ve yansıma değerleri Şekil 4.7'de görüldüğü üzere, hem benzetim hemde ölçüm sonuçları oldukça benzer olarak elde edilmiştir. 4,5GHz-5,5GHz frekans bant aralığında eliptiklik değeri

sıfıra yakındır. Bunun nedeni sağ ($\text{abs}(T+)$) ve sol ($\text{abs}(T-)$) dairesel polarize iletim değerlerinin büyüklüğünün yaklaşık eşit değerde olmasıdır. Sadece bir rezonans tepe noktası 4,3GHz değerinde görülmektedir. Bunun nedeni sağ ve sol dairesel polarize dalga iletim bileşeni değerlerinde gözlemlenen farktan kaynaklanmaktadır. Rezonans frekans değerinde, sağ dairesel polarize iletim değeri, sol dairesel polarize iletim değerine göre daha büyük olarak gözlemlenmektedir. Bu gözlemlenen tepe değeri, empedans uyumsuzluğunun da sonucu olarak kabul edilebilir. Bu empedans uyumsuzluğu, sağ ve/veya sol dairesel polarize iletim durumuna karşı kuvvetli elektrik/manyetik tepkiden kaynaklanmaktadır. Daha önce bahsedildiği gibi, sağ ve sol dairesel polarize dalga iletim sabitleri arasında ki fark eliptiklik olarak açıklanmaktadır. Özellikle, sebep, sağ dairesel dalga iletim değeri 0,6 civarında iken sol dairesel dalga iletim değerinin çok düşük olması ve bu iki değer arasında ki yüksek fark değerinin eliptiklik değerinde tepe olmasına, yani yüksek sonuç vermesine ve rezonansa uğramasına neden olur. Daha yüksek iletim değerinin nedeni, EM dalganın uygulandığı ve gönderilmiş olduğu serbest uzay ile pi şekilli bakışimsız MTM'nin oluşturduğu bakışimsız ortam arasında ki empedans uyumundan kaynaklanmaktadır. Bu empedans değeri bakışimsız ortamın giriş empedansı olarak da adlandırılabilir. Buradan şu şekilde sonuç çıkarılabilir; iyi bir eliptiklik elde edilebilmesi için ortamda iletilmekte olan sağ ve sol dairesel polarize dalgalara farklı iletim oranları sağlanmasıdır. Bir başka deyişle, serbest uzay ve bakışimsız ortam arasında ki sağ dairesel polarize ve sol dairesel polarize dalgalar için iyi veya kötü empedans uyumu ortaya koymalıdır. Bu sayede, her iki durumda da iletim değerleri arasında fark oluşacak, eliptikliğe neden olacak, girişte uygulanan sinyalin polarizasyon yönü dönecek ve makroskopik olarak bakışimsızlık doğacaktır. Genel olarak, bakışimsız ortamın elektromanyetik karakteristiği incelenirken, ortama uygulanan dalga lineer polarize de olsa, sağ ve sol dairesel polarize bileşenler cinsinden incelenmesinin altında yatan neden de bu etkinin tam olarak gözlemlenmesi isteğidir.

EM dalganın gönderilmiş olduğu serbest uzay ile bakışimsız ortam arasında ki uyumsuzluğun nedeni, birim hücrelerdeki pi şekilli rezonatörlerin göstermiş olduğu kuvvetli elektrik veya manyetik tepkiden kaynaklanmaktadır. Rezonans frekans değerinde, Şekil 4.7'de de görüldüğü üzere, lineer polarize olarak uygulanmış olan gelen dalga 220° açılı kuvvetli bir zayıflamaya uğramış eliptik polarize dalga şekline çevrilmiştir. Dönme gücünü ifade eden (θ), sağ ve sol dairesel polarize olarak iletilen dalga bileşenleri arasında ki faz farkını ifade etmektedir. Rezonans frekans değerinden çok farklı frekans

değerlerinde, sağ ve sol dairesel polarize olarak iletim değerleri arasında bir fark olmaması gerekmektedir. Bunun yanında, rezonans frekans değerinin yakınında, sağ dairesel polarize ve sol dairesel polarize olarak iletilen dalga bileşenlerinin fazlarında kesin ve gözlemlenebilir bir fark görülmektedir. Bu fark sayesinde, lineer olarak uygulanmış olan ortam üzerine gelendalga, bakışimsız MTM ortam içerisinde -100^0 dönme açısı ile döndürüldüğü gözlemlenmiştir (Şekil 4.8).

Pi şekilli rezonatörlerden oluşan bakışimsız ortamın etkin ortam parametreleri de 4-6GHz aralığında hem deneysel hemde numerik olarak Şekil 4.8'de görüldüğü gibi çıkartımı gerçekleştirilmiştir. 4,3 GHz rezonans frekansı civarında kuvvetli bir tepki gözlenmiştir ve bu tepkiye bağlı olarak kırılma indisinin sağ dairesel polarize sinyal uygulanması durumu için kırılma indisi ($n+$) pozitif olarak elde edilmiştir. Sol dairesel polarize uygulanması durumu için ise kırılma indisinin değeri ($n-$) hemen hemen sabit olarak gözlenmiş ve bütün frekans bandında pozitif elde edilmiştir. Bundan dolayı, etkin ortam parametreleri olan bağıl dielektrik katsayısı ve manyetik geçirgenliğin reel kısımları eş zamanlı negatif olmamıştır. Negatif etkin kırılma indisi ise kuvvetli optik aktivitenin görüldüğü 4,3-4,6GHz frekans aralığında gözlenmiştir. Kuvvetli bakışimsızlık değerinin hemen hemen sabit olarak gözlenmiş olduğu 4,7-5,5 GHz frekans bant aralığı ise çok ilginçtir ve literatüre bu çalışmanın önemli bir katkısıdır. Bundan dolayı, çalışma sadece doğal bakışimsızlık değerine sahip yapay ortam sunmamakta, aynı zamanda sabit değerlikli kuvvetli ve yüksek değerliğe sahip bakışimsızlık olayıda ortaya koymaktadır. Ek olarak, önerilen pi şekilli yapının kayıp faktörü Şekil 4.8'de gözlemlenebileceği üzere, kabul edilebilir sınırlar içerisindedir. Dolayısı ile pi şekilli yapı önerilen özellikleri ile uygulamada kullanım için uygunluk teşkil etmektedir.



Şekil 4.8. Önerilen yapının 4-6GHz için etkin ortam parametrelerinin benzetim ve deneysel sonuçları .

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, ilk olarak sonlu integral metodu tabanlı CST benzetim programı ile, farklı genetik algoritma teknikleri ve parametrik çalışmalar kullanılmak sureti ile yeni ve çok fonksiyonlu bakışsız MTM nümerik metotla optimum ebatlarda ve amaca uygun olarak geometride tasarlandı, üretimi ve ölçümü yapıldı. Düşünülen rezonatörün ebatları optimize edilmek ve değiştirilmek sureti ile çok bantlı simetrik olmayan iletim gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Optimize edilmiş önerilen yapı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Önerilen model pi şekilli rezonatörlerin periyodik olarak dizilmesi ile oluşturulmuştur. Bu modelin en önemli özelliklerinden biri çok basit bir konfigürasyona sahip olması ve üretiminin çok kolay olmasıdır.

İkinci olarak, önerilen model nümerik olarak analiz edilmiş ve ilgili frekans bant aralığında elektromanyetik özellikleri iletim ve yansıma büyüklük ve faz değerlerine bağlı olarak çıkartılmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, önerilen model çok bantlı simetrik olmayan iletim ve küçük bakışsızlık değerleri sunmaktadır. Genellikle, literatürdeki bakışsız MTM çalışmaları yüksek bakışsızlık değerleri elde etme üzerine kurgulanmıştır. Çünkü, yüksek bakışsızlık değerlerine sahip yapay ortamlar etkin negatif kırılma indiside ortaya koymaktadır. Bununla beraber, bu çalışma yeni tip zayıf bakışsızlık değerlikli bakışsız MTM ortaya koymaktadır ve bu özellikleri ile doğal bakışsız ortam özelliği ve bakışsız yokluk MTM özelliği sağlamaktadır. Dahası, önerilen yapı, büyük bir potansiyel olarak yeni tip polarizasyon dönüştürücü cihaz tasarımında da kullanılmasına kılavuzluk edebilecektir. İyi bilinmektedir ki, bakışsız ortamların en önemli özelliklerinden biri polarizasyon yönünü döndürmesidir. Bu döndürme işlemini sağ ve sol dairesel polarize dalga iletiminde gösterdiği farklı iletim değerlikleridir. Yani empedans değerliklerinde gösterdiği farklılıklarıdır. Her ne kadar ortaya konulan yapı, literatürdekilere benzer görülsede, bu çalışmada ilk defa bakışsız MTM'ler bakışsız yokluk elde etmek amacı ile kullanılmıştır. Bu da çalışmada hem deneysel hemde nümerik olarak ispat edilmiştir. Bunun yanında, literatürde doğal bakışsızlığın araştırıldığı metamalzeme tabanlı çalışma çok az sayıdadır.

Çalışmada bahsedildiği ve gösterildiği üzere, önerilen yapı modellerinin her ikisinde hem simetrisiz hemde yüksek bakışsızlık değerine sahiptir. Bunun yanında, yapı aynı zamanda dielektriğin ön ve arka yüzeylerine yerleştirilmiş pi şekilli rezonatörlerin arasında

ki açı değerlerine bağlı olarak doğal bakışimsızlık da ortaya koymaktadır. Bundan dolayı, önerilen yapı, ön ve arka yüzeyde tanımlanmış olan rezonatörlerin açısının değiştirilmesi sureti ile hem yüksek hemde düşük-doğal bakışimsızlık sağlaması mümkündür. Yüksek bakışimsızlık değerinin nedeni, eş ve dik polarize olmuş iletim değerleri arasındaki simetrisizlikten kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı, sağ dairesel polarize iletim değeri $T+$ ile sol dairesel polarize iletim değeri $T-$ arasında artış bakışimsızlık değerini doğal olarak artırmaktadır. Bunun yanında, bakışimsızlığın beklenmeyen değerleri dielektriğin ön ve arka yüzeyine yerleştirilmiş olan rezonatörlerin simetri yokluğundan kaynaklanmaktadır.

Çalışma yukarıda da bahsedildiği gibi hem numerik analizler hemde deneysel gerçekleştirmeler ortaya koymaktadır. Numerik olarak geometrisine ve ebatlarına karar verilen yapıların Şekil 4.1'de görüldüğü üzere üretimi yapılmıştır. Numerik olarak çıkartımı yapılan simetrik olmayan iletim değerleri ve bakışimsızlık admitansı deneysel sonuçlarla da Şekil 4.3'de görülebileceği gibi desteklenmiştir. Bu değerler çalışmanın kritik noktalarını içermektedir. Ek olarak, önerilen yapının iletim ve yansıma değerleri, eliptiklik ve theta açısı hem numerik hemde deneysel olarak karşılaştırılmıştır (Şekil 4.7). Bu sonuçların birbirleri arasında ilişkileri tartışılarak fiziksel bağlamda birbirlerini destekledikleri ifade edilmiştir. Bunun yanında, yapının bağıl etkin dielektrik katsayısı ve manyetik geçirgenlik değerleri, iletim ve yansıma büyüklük ve fazına bağlı olarak çıkartılmış ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.8).

Elde edilen sonuçlara göre, önerilen yapı, lineer polarize olmuş gelen dalga için 10,85GHz, 14,49GHz ve 14,88GHz rezonans frekanslarında çok bantlı simetrik olmayan iletim karakteristiği ortaya koymaktadır. Ek olarak, 16GHz değerinde, çok düşük bakışimsızlığı ile doğal bakışimsızlık özellikli yapay malzeme olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmanın yeniliğide bu düşük bakışimsızlık özelliğidir. Bunun yanında, 5,2GHz frekans değerinde 0,01 bakışimsızlık admitansı ile yapı tam lineer simetrisizlik göstermiş olmasıda önemli bir sonuç olarak gözlenmiştir. Ayrıca, yapı 4,2-4,8 GHz ve 5,4-5,7 GHz frekans aralıklarında frekans bağımsız bakışimsızlık göstermeside önemli bir veridir. Çünkü sabit bakışimsızlık sayesinde, frekans değerine bağlı olmadan eşit miktarda polarizasyon döndürülmesini mümkün kılmaktadır. Pi şekilli rezonatörlerden oluşan sistemin bu özelliği araştırmacılara geniş bir frekans aralığında eşit miktarda polarizasyon dönüştürme ve sensör uygulamalarında yeni fırsatlar sunmaktadır. Bu çalışmada ayrıca, pi şekilli rezonatörlerin lineer polarize olarak gelen EM dalgayı 11,8 GHz, 15 GHz ve 16 GHz rezonans

frekanslarında sırası ile ($\eta = 22^0$, $\theta = -180^0$), ($\eta = -21^0$, $\theta = 80^0$) ve ($\eta = 20^0$, $\theta = 60^0$) azimuth dönme açısı ve eliptikliğe sahip şekilde eliptik dalga haline çevirebildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, önerilen yapı sadece sabit küçük bakışsızlık değeri değil aynı zamanda 4,7-5,5 GHz frekans aralığında sabit yüksek bakışsızlık değeri de ortaya koymuştur. Bu yönü ile çalışma literatürde ilktir. Bundan dolayı, bu çalışma mikrodalga güç ve enerji çalışmalarında yenilik sunar. Çünkü radar uygulamaları gibi pek çok uygulamada yüksek güçte polarizasyon dönüşümü yer alma potansiyeline sahiptir.



KAYNAKLAR

- Aydin, K., Li, Z., Sahin, L., Ozbay, E., (2008). Negative phase advance in polarization independent, multi-layer negative-index metamaterials. *Optics Express*. 16:8835-4.
- Cheng, Y., Yang, H., Cheng, Z., & Wu, N. (2011). Perfect metamaterial absorber based on a split-ring-cross resonator. *Applied Physics A*, 102(1), 99-103.
- Delihacıoğlu, K., (1998). Power reflection and transmission coefficients for a chiral slab and meanderline polarizer with chiral slab. Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Gaziantep.
- Dincer, F., Sabah, C., Karaaslan, M., Unal, E., Bakir, M., & Erdiven, U. (2013). Asymmetric transmission of linearly polarized waves and dynamically wave rotation using chiral metamaterial. *Progress In Electromagnetics Research*, 140, 227-239.
- Ekmekci E., Sayan, G. T., (2013). Multi-functional metamaterial sensor based on a broadside coupled SRR topology with a multi-layer substrate. *Appl Phys A*. 110:189– 197.
- Engheta, N., & Ziolkowski, R. W. (Eds.). (2006). *Metamaterials: physics and engineering explorations*. John Wiley & Sons.
- Grigorenko, A. N., Geim, A. K., Gleeson, H. F., Zhang, Y., Firsov, A. A., Khrushchev, I. Y., & Petrovic, J. (2005). Nanofabricated media with negative permeability at visible frequencies. *Nature*, 438(7066), 335.
- Hasar, U. C., Barroso, J. J., Ertugrul, M., Sabah, C., & Cavusoglu, B. (2012). Application of a useful uncertainty analysis as a metric tool for assessing the performance of electromagnetic properties retrieval methods of bianisotropic metamaterials. *Progress In Electromagnetics Research*, 128, 365-380.
- Huang, C., Zhao, J., Jiang T., Feng, Y., (2012). Asymmetric transmission of linearly polarized electromagnetic wave through chiral mtm structure. *J. Electromagnet. Wave*. 26:1192-1202.
- Karaaslan, M., & Bakir, M. (2014). Chiral metamaterial based multifunctional sensor applications. *Progress In Electromagnetics Research*, 149, 55-67.
- Karaaslan, M., Ünal, E., Tetik, E., Delihacıoğlu, K., Karadağ, F., & Dincer, F. (2013). Low profile antenna radiation enhancement with novel electromagnetic band gap structures. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 7(3), 215-221.
- Karaaslan, M., (2009). Negatif kırılma indisli metamatzemelerin elde edilmesi, (Doktora Tezi). Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Lee, J., & Lim, S. (2011). Bandwidth-enhanced and polarisation-insensitive metamaterial absorber using double resonance. *Electronics Letters*, 47(1), 8-9.

- Li, L., Yang, Y., Liang, C.H., (2011). A wide-angle polarization-insensitive ultra-thin metamaterial absorber with three resonant modes. *J. Appl. Phys.* 110: 063702-063706.
- Li, M., H., Yang, H.-L., Hou, X.-W., Tian, Y., Hou, D.-Y., (2010). Perfect Metamaterial Absorber With Dual Bands. *Progress In Electromagnetics Research.* 108: 37- 4
- Li, T. Q., Liu, H., Li, T., Wang, S. M., Wang, F. M., Wu, R. X., ... & Zhang, X. (2008). Magnetic resonance hybridization and optical activity of microwaves in a chiral metamaterial. *Applied Physics Letters*, 92(13), 131111.
- Li, Z., Zhao, R., Koschny, T., Kafesaki, M., Alici, K. B., Colak, E., ... & Soukoulis, C. M. (2010). Chiral metamaterials with negative refractive index based on four “U” split ring resonators. *Applied Physics Letters*, 97(8), 081901.
- Melik, R., Unal, E., Perkgoz, N. K., Puttlitz, C., & Demir, H. V. (2009). Metamaterial-based wireless strain sensors. *Applied Physics Letters*, 95(1), 011106.
- Melik, R., Unal, E., Kosku Perkgoz, N., Puttlitz, C., & Demir, H. V. (2009). Flexible metamaterials for wireless strain sensing. *Applied Physics Letters*, 95(18), 181105.
- Nicolson, A. M., & Ross, G. F. (1970). Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 19(4), 377-382.
- Nikooei Tehrani, K., Abdolali, A., Zarifi, D., Hojjat-Kashani, F., (2013). Application of chiral layers and metamaterials for the reduction of radar cross section, *Progress In Electromagnetics Research.* 137, 759-773.
- 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.
- Sabah, C. (2004). *Electromagnetic wave propagation through multilayer chiral media* (Doctoral dissertation, MSc Thesis, Gaziantep, Turkey: University of Gaziantep).
- Sabah, C., & Uckun, S. (2006). Reflection and transmission coefficients of multiple chiral layers. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 49(4), 457-467.
- Sabah, C. (2007). Theoretical and numerical analysis of double-negative slab. *Optica Applicata*, 37(1/2), 123.
- Sabah, C, Thomson, M.D, Meng, F., Tzanova, S., Roskos, H.G. (2010). Terahertz propagation properties of free-standing woven-steel-mesh metamaterials: Passbands and signatures of abnormal group velocities. *Journal of Applied Physics.*110: 064902-064902.
- Sabah, C., & Roskos, H. G. (2012.a). Design of a terahertz polarization rotator based on a periodic sequence of chiral-metamaterial and dielectric slabs. *Progress In Electromagnetics Research*, 124, 301-314.

- Sabah, C., & Roskos, H. G. (2012.b). Terahertz sensing application by using planar split-ring-resonator structures. *Microsystem technologies*, 18(12), 2071-2076.
- Sabah, C., & Roskos, H. G. (2012.c). Effect of the metallization on the resonances of THz fishnet metamaterials. *Journal of the European Optical Society-Rapid publications*, 7.
- Sabah, C., & Roskos, H. G. (2013). Broadside-coupled triangular split-ring-resonators for terahertz sensing. *The European Physical Journal-Applied Physics*, 61(3).
- Shelby, R. A., Smith, D. R., & Schultz, S. (2001). Experimental verification of a negative index of refraction. *science*, 292(5514), 77-79.
- Smith, D. R., Schultz, S., Markoš, P., & Soukoulis, C. M. (2002). Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients. *Physical Review B*, 65(19), 195104.
- Smith, D. R., Padilla, W. J., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S. C., & Schultz, S. (2000). Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. *Physical review letters*, 84(18), 4184.
- Sun, J., Liu, L., Dong, G., Zhou, J., (2011). An extremely broad band metamaterial absorber based on destructive interference. *Opt. Express*. 19: 21155-21162.
- Tretyakov, S., Sihvolaand, A., Jylhä, L., 2005. Backward-wave regime and negative refraction in chiral composites. *Photonics and Nanostructures Fundamentals and Applications*, 3: 107-115.
- Tao, H., Bingham, C. M., Pilon, D., Fan, K., Strikwerda, A. C., Shrekenhamer, D., ... & Averitt, R. D. (2010). A dual band terahertz metamaterial absorber. *Journal of physics D: Applied physics*, 43(22), 225102.
- Urbani, F., Sabah, C., & Uckun, S. (2007, September). High-pass filter characteristic of Bloch impedance in a left-handed transmission line. In *Applied Electromagnetics and Communications, 2007. ICECom 2007. 19th International Conference on* (pp. 1-4). IEEE.
- Veselago, V. G. (1968). The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Soviet physics uspekhi*, 10(4), 509.
- Wang, B., Koschny, T., Soukoulis, C. M., (2009a). Wide-angle and polarizationindependent chiral metamaterial absorber. *Physical Review B*. 80: 033108-4
- Wang, B., Zhou, J., Koschny, T., Soukoulis, C., M., (2009c). Nonplanar chiral metamaterials with negative index, *Appl. Phys. Lett.* 94, 151112-5.
- Wei, Z., Cao, Y., Fan, Y., Yu, X., & Li, H. (2011). Broadband polarization transformation via enhanced asymmetric transmission through arrays of twisted complementary split-ring resonators. *Applied Physics Letters*, 99(22), 221907.
- Wiltshire, M. C. K. (2001). Bending light the wrong way. *Science*, 292(5514), 60-61.

- Wiltshire, M. C. K., Pendry, J. B., & Hajnal, J. V. (2009). Chiral Swiss rolls show a negative refractive index. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 21(29), 292201.
- Withayachumnankul, W., Jaruwongrungrsee, K., Tuantranont, A., Fumeaux, C., & Abbott, D. (2013). Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization. *Sensors and Actuators A: Physical*, 189, 233-237.
- Ye, Y., & He, S. (2010). 90° polarization rotator using a bilayered chiral metamaterial with giant optical activity. *Applied Physics Letters*, 96(20), 203501.
- Zarifi, D., Soleimani, M., & Nayyeri, V. (2012). Dual-and multiband chiral metamaterial structures with strong optical activity and negative refraction index. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11, 334-337.
- Zhang, X., & Liu, Z. (2008). Superlenses to overcome the diffraction limit. *Nature materials*, 7(6), 435.
- Zhao, R., Koschny, T., & Soukoulis, C. M. (2010). Chiral metamaterials: retrieval of the effective parameters with and without substrate. *Optics express*, 18(14), 14553-14567.
- Zhao, R, Zhang, L., Zhou, J., Koschny, T., Soukoulis, C., M., (2011). Conjugated gammadion chiral metamaterial with uniaxial optical activity and negative refractive index, *Phys. Rev. B*. 83, 035105-4.
- Zhu, B., Wang, Z., Huang, C., Feng, Y., Zhao, J., Jiang, T. (2010). Polarization insensitive metamaterial absorber with wide incident angle. *Progress In Electromagnetics Research*. 101: 231-239.
- Ziolkowski, W., Jin, P., (2010). Broadband, efficient, electrically small metamaterialinspired antennas facilitated by active near-field resonant parasitic elements. *IEEE Trans. Antennas Propag.*,58: 318-327.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : DERİN, Oğuz
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 05.10.1971, Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (533) 6440434
 Faks : 0 (533) 6440434
 e-mail : oguz.derin@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Fırat Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği	1992
Lise	Acıpayam Lisesi	1988

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1996-Halen	MERSİN ÜNİVERSİTESİ	Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Basketbol, Sinema

DİZİN

A

ABSTRACT · v, vii
anten · 4, 7, 16, 26, 27, 28, 37

B

bakımsız · iv, 4, 7, 8, 10, 11, 23, 25, 28, 29, 30, 32,
34, 35, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 46, 47, 48, 50
bakımsızlık · iv, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 20, 23, 29, 32, 34,
35, 36, 37, 38, 44, 45, 47, 48, 50, 51
Bakımsızlık · iv, 3, 4, 11, 34, 36, 44, 45

C

CST · 16, 30, 37, 39, 50

D

dielektrik · 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 16, 19, 20, 23, 29,
30, 38, 39, 43, 44, 48, 51
dielektrik katsayısı · 2, 8, 30
doppler etkisi · 1, 6

E

elektromanyetik · 2, 3, 4, 5, 6, 7, 11, 15, 17, 18, 19, 20,
30, 33, 42, 44, 47, 50
EM · xi, 7, 11, 13, 21, 22, 23, 24, 25, 32, 34, 36, 41,
42, 45, 46, 47, 52
Empedans · 10

F

FEM · xi
FIT · ix, xi, 16, 19, 39
FOM · ix, xi, 33, 35, 36, 45

G

GHz · xi, 32, 36, 38, 39, 40, 46, 48

H

HFSS · 6

İ

İÇİNDEKİLER · vii

K

kırılma · iv, 1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 17, 20, 21, 22, 34, 35,
42, 43, 44, 48, 50

M

manyetik geçirgenlik · 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 16, 19, 29,
44, 51
Maxwell · 18, 20, 21
metamalzeme · 3, 7, 8, 11, 32, 38, 50
MHz · xi, 25
mm · xi
MTM · iv, v, xi, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 20, 25,
28, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 39, 40, 41, 43, 44, 46, 48,
50

N

negatif kırılma indisi · iv, 4, 6, 11, 44

O

Optik Aktivite · iv

Ö

ÖZET · iv, vii

P

permeability · 3, 39, 53

permittivity · 3, 53

π · iv, v, 30, 31, 32, 34, 36, 38, 39, 43, 44, 46, 47, 48,
50, 51, 52

polarizasyon · iv, 3, 4, 7, 8, 10, 11, 13, 20, 23, 32, 34,
36, 38, 39, 40, 41, 44, 47, 50, 52

propagasyon · 41

R

rezonans · 2, 8, 10, 12, 13, 33, 35, 36, 37, 40, 43, 46,
47, 48, 51

rezonatör · xi, 10, 11, 30, 39, 45

rezonatörler · 1, 2, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 30, 34, 36, 39, 44

S

sensör · 4, 9, 12, 29, 38, 52

serbest uzay · 16, 21, 27, 37, 47

skaler · 15

sol elli malzemeler · 1

Sonlu integrasyon · xi, 17, 19

Ş

Şekil · ix, x, 2, 3, 19, 21, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 34,
37, 38, 39, 40, 41, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 51

T

TE · 7, 10

TEŞEKKÜR · vi, vii

THz · 9

TM · 7, 10

Y

yansıma · 6, 7, 11, 16, 20, 22, 27, 28, 32, 35, 36, 37, 40,
41, 42, 45, 46, 49, 50, 51



TEKNOVERSİTE