



**T.C.
MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI TİP BAKIŞIMSIZ METAMALZEMELERİN
ELEKTROMANYETİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Selva BAL

ENFORMATİK ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HATAY
OCAK-2015**



T.C.
MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FARKLI TİP BAKIŞIMSIZ METAMALZEMELERİN
ELEKTROMANYETİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Selva BAL

ENFORMATİK ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HATAY
OCAK-2015**

T.C.
MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI TİP BAKIŞIMSIZ METAMALZEMELERİN ELEKTROMANYETİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

SELVA BAL

ENFORMATİK ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yrd. Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN danışmanlığında hazırlanan bu tez **19/01/2015** tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **OYBİRLİĞİ** ile kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN
Başkan

Yrd. Doç. Dr. Emin ÜNAL
Üye

Doç. Dr. Fatih ÜNEŞ
Üye

Kod No: 796

Prof. Dr. İsmail Hakkı KARAHAN
Enstitü Müdürü

Bu çalışma tarafından desteklenmiştir.

Proje No:

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

19/01/2015

TEZ BİLDİRİMİ

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

Selva BAL

ÖZET

FARKLI TİP BAKIŞIMSIZ METAMALZEMELERİN ELEKTROMANYETİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Metamalzemeler, yapay olarak inşa edilen ve günümüzde yaygın olarak kullanılan elektromanyetik yapılardır. Bu çalışmada özgün geometrilere sahip BDAM (Beş-Dallı Ağaç Metamalzeme), ÇYM (Çift-Y Metamalzeme) ve ÇZM (Çift-Zimba Metamalzeme) yapıları tasarlanmıştır. Bu üç bakışimsız metamalzeme yapısının tasarlanmasındaki amaç, literatürde yer almayan yeni bakışimsız metamalzeme yapılarının frekans cevabı, bakışimsızlık değeri, yapısal parametreleri gibi değerleri analiz etmektir. Bunun için tasarlanan yapılarda metal şerit kalınlığı, ön ve arka rezonatör arasındaki açı farkı parametrik olarak değiştirilmiştir. Tasarlanan yapılar CST Mikrodalga Stüdyo programı ile simüle edilmiştir.

2015, 58 sayfa

Anahtar Kelimeler: Bakışimsız metamalzeme, Beş Dallı Ağaç Metamalzeme, Çift Y Metamalzeme, Çift Zimba Metamalzeme

ABSTRACT

INVESTIGATION OF DIFFERENT TYPE CHIRAL METAMATERIALS' ELECTROMAGNETIC PROPERTIES

Metamaterials are electromagnetic structures, are builded artificially and used widely in recent days. In this work, Five-Branch Tree Metamaterial, Double-Y Metamaterial and Double-Punch Metamaterial structures are designed, which have unique geometry. The aim of designing these three chiral metamaterials is to analyze the frequency response, chirality values and effective parameters of which are not present in the literature. So, thickness of metal strips and the angle difference between the front and back resonator are changed parametrically at designed structures. The designed structures are simulated by CST Microwave Studio Program.

2015, 58 pages

Keywords: Chiral metamaterial, Five-Branch Tree Metamaterial, Double-Y Metamaterial and Double-Punch Metamaterial

TEŐEKKÖR

Yüksek lisans çalışmamın tüm aşamalarında, sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübesi ile çalışmayı yönlendiren ve her türlü yardımı esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN'a sonsuz saygı ve teőekkürlerimi sunarım. Tez konusunun belirlenmesi ve çalışmaların takip edilmesinde her türlü yardımı esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Emin ÜNAL'a teőekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım sırasında desteklerini esirgemeyen çalışma arkadaşım Öğr. Gör. Furkan DİNÇER'e çok teşekkür ederim. Ayrıca bugüne kadar bana her konuda destek olan annem ve babama sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ	X
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XI
1. GİRİŞ	1
1.1. Metamalzeme	1
1.2. Bakışsızlık.....	2
1.3. Bakışsız Metamalzeme	2
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM	7
3.1. Yöntem.....	7
3.1.1. FIT (Sonlu İntegrasyon Tekniği)	7
3.1.2. CST MWS (Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi Mikrodalga Stüdyosu).....	12
3.1.2.1. CST MWS	12
3.1.2.2. Frekans Domeni Çözücüsü	12
3.2. Materyal	14
3.2.1. Materyal	14
3.2.2. Çeşitli özgün bakışsız metamalzemeler	15
3.2.2.1. BDAM (Beş-Dallı Ağaç Metamalzeme) Yapısı	15
3.2.2.2. ÇYM (Çift-Y Metamalzeme) Yapısı	16
3.2.2.3. ÇZM (Çift-Zımba Metamalzeme) Yapısı	17
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	18
4.1. BDAM Yapısı	19
4.1.1. Kalınlığın parametrik değişimi	19
4.1.1.1. 5-15 Ghz Frekans aralığı için.....	19
4.1.1.2. 4-6 Ghz Frekans aralığı için.....	22
4.1.2. Açının parametrik değişimi.....	24
4.1.2.1. 5-15 Ghz Frekans aralığı için.....	24

4.1.2.2. 4-6 Ghz Frekans aralığı için.....	27
4.2. ÇYM Yapısı	29
4.2.1. Kalınlığın parametrik değişimi	29
4.2.1.1. 5-15 Ghz Frekans aralığı için.....	29
4.2.1.2. 4-6 Ghz Frekans aralığı için.....	32
4.2.2. Açının parametrik değişimi.....	34
4.2.2.1. 5-15 Ghz Frekans aralığı için.....	34
4.2.2.2. 4-6 Ghz Frekans aralığı için.....	37
4.3. ÇZM Yapısı.....	39
4.3.1. Kalınlığın parametrik değişimi	39
4.3.1.1. 5-15 Ghz Frekans aralığı için.....	39
4.3.1.2. 4-6 Ghz Frekans aralığı için.....	41
4.3.2. Açının parametrik değişimi.....	44
4.3.2.1. 5-15 Ghz Frekans aralığı için.....	44
4.3.2.2. 4-6 Ghz Frekans aralığı için.....	46
SONUÇ VE ÖNERİLER	50
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	58

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Döngüdeki gerilim ve akı bileşenlerinin bölüştürülmesi (Weiland, 2003).....	8
Şekil 3.2. Bir helezon antenin aynı çözüm doğruluğu için döngü hücrelerinin sayısının 6 boğumlu azaltılmasına yol açan uyumlu alt şebekelenmesi ...	10
Şekil 3.3. Bir sirkülatör yapısının (ortasında jiroskopik ferrit malzemedен yapılmış silindir içeren) içindeki elektrik alan (Weiland, 2003).....	11
Şekil 3.4. CST MWS, kullanıcıya aynı simülasyon modeli üzerinde zaman domeni ya da frekans domeni çözücüsünü alternatif olarak sunar.....	13
Şekil 3.5. Tasarlanan yapılardan temsili BDAM (Beş Dallı Ağaç Metamalzeme) ...	14
Şekil 3.6. BDAM	15
Şekil 3.7. ÇYM	16
Şekil 3.8. ÇZM.....	17
Şekil 4.1. BDAM Yapısı	19
Şekil 4.2. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan BDAM yapısının κ (bakışsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları	20
Şekil 4.3. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı kalınlıklarda tasarlanan BDAM yapısının n^+ ve n^- kırılma indislerinin gerçel ve sanal kısımları	20
Şekil 4.4. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan BDAM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları	21
Şekil 4.5. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan BDAM yapısında R, T+, T-'nin gerçel kısmı	22
Şekil 4.6. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan BDAM yapısının κ (bakışsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları	22
Şekil 4.7. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı kalınlıklarda tasarlanan BDAM yapısının n^+ ve n^- kırılma indislerinin gerçel ve sanal kısımları	23
Şekil 4.8. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan BDAM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları	23
Şekil 4.9. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan BDAM yapısında R, T+, T-'nin gerçel kısmı	24

Şekil 4.10. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan BDAM yapısının κ (bakışimsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları	25
Şekil 4.11 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan BDAM yapısının n^+ ve n^- kırılma indislerinin gerçel ve sanal kısımları.....	25
Şekil 4.12. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan BDAM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları.....	26
Şekil 4.13. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan BDAM yapısında R, T+, T-'nin gerçel kısmı.....	26
Şekil 4.14 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan BDAM yapısının κ (bakışimsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları	27
Şekil 4.15. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan BDAM yapısının n^+ ve n^- kırılma indislerinin gerçel ve sanal kısımları.....	28
Şekil 4.16. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan BDAM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları.....	28
Şekil 4.17. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan BDAM yapısında R, T+, T-'nin gerçel kısmı.....	28
Şekil 4.18. ÇYM yapısı.....	29
Şekil 4.19. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇYM yapısının κ (bakışimsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları	30
Şekil 4.20. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇYM yapısının n^+ ve n^- kırılma indislerinin gerçel ve sanal kısımları ..	30
Şekil 4.21. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇYM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları.....	31
Şekil 4.22. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇYM yapısında R, T+, T-'nin gerçel kısmı.....	31
Şekil 4.23. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇYM yapısının κ (bakışimsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları.....	32
Şekil 4.24. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇYM yapısının n^+ ve n^- kırılma indislerinin gerçel ve sanal kısımları ..	32

Şekil 4.25. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇYM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları	33
Şekil 4.26. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇYM yapısında R, T+, T-'nin gerçel kısmı	34
Şekil 4.27. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇYM yapısının κ (bakışimsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları	34
Şekil 4.28. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇYM yapısının n+ ve n- kırılma indislerinin gerçel ve sanal kısımları ..	35
Şekil 4.29. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇYM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları	36
Şekil 4.30. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇYM yapısında R, T+, T-'nin gerçel kısmı	36
Şekil 4.31. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇYM yapısının κ (bakışimsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları	37
Şekil 4.32. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇYM yapısının n+ ve n- kırılma indislerinin gerçel ve sanal kısımları ..	37
Şekil 4.33. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇYM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları	38
Şekil 4.34. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇYM yapısında R, T+, T-'nin gerçel kısmı	38
Şekil 4.35. ÇZM Yapısı	39
Şekil 4.36. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇZM yapısının κ (bakışimsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları	40
Şekil 4.37. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇZM yapısının n+ ve n- kırılma indislerinin gerçel ve sanal kısımları ..	40
Şekil 4.38. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇZM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları	40
Şekil 4.39. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇZM yapısında R, T+, T-'nin gerçel kısmı	41

Şekil 4.40. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇZM yapısının κ (bakışsımsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları	42
Şekil 4.41. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇZM yapısının n^+ ve n^- değerlerinin gerçel ve sanal kısımları.....	43
Şekil 4.42. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇZM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları	43
Şekil 4.43. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇZM yapısında R , T^+ , T^- 'nin gerçel kısmı	43
Şekil 4.44. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇZM yapısının κ (bakışsımsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları	44
Şekil 4.45. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇZM yapısının n^+ ve n^- değerlerinin gerçel ve sanal kısımları.....	45
Şekil 4.46. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇZM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları	45
Şekil 4.47. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇZM yapısında R , T^+ , T^- 'nin gerçel kısmı	46
Şekil 4.48. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇZM yapısının κ (bakışsımsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları	46
Şekil 4.49. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇZM yapısının n^+ ve n^- değerlerinin gerçel ve sanal kısımları.....	47
Şekil 4.50. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇZM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları	47
Şekil 4.51. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇZM yapısında R , T^+ , T^- 'nin gerçel kısmı	48
Şekil 4.52 Şeritlerden oluşan bakışsımsız Metamalzeme ve Bakışsımsızlık Sonuçları (Dinçer ve ark., 2013a)	48
Şekil 4.53. Çiftkatmanlı BDAM bakışsımsız metamalzeme yapısı ve κ (bakışsımsızlık) değerleri.....	49

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1. BDAM yapısı için elde edilen önemli sonuçlar	53
Çizelge 5.2. ÇYM ve ÇZM yapıları için elde edilen önemli sonuçlar.....	54

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

f	: Frekans
ϵ	: Elektrik geçirgenliği
μ	: Manyetik geçirgenlik
κ	: Bakışimsızlık (kappa)
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik geçirgenliği
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
λ	: Dalgaboyu
n	: Kırılma indisi
n+	: Sağ el kutuplanmış dalganın kırılma indisi
n-	: Sol el kutuplanmış dalganın kırılma indisi
ω	: Açısal frekans
R	: Yansıma katsayısı
T+	: Sağ el kutuplanmış dalganın iletim katsayısı
T-	: Sol el kutuplanmış dalganın iletim katsayısı
κ -KK	: K-K işlemi uygulanmış bakışimsızlık
(n+)-KK	: K-K işlemi uygulanmış, sağ el kutuplanmış dalganın kırılma indisi
(n-)-KK	: K-K işlemi uygulanmış, sol el kutuplanmış dalganın kırılma indisi
w	: Metal şerit kalınlığı
θ	: Ön ve arka rezonatör arasındaki açı
Z	: Karakteristik empedans

KISALTMALAR

FIT	: Sonlu İntegrasyon Tekniği
CST MWS	: Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi Mikrodalga Stüdyosu
BDAM	: Beş-Dallı Ağaç Metamalzeme
ÇYM	: Çift-Y Metamalzeme
ÇZM	: Çift-Zimba Metamalzeme
K-K	: Kramers-Kroning ilişkileri
Re	: Bir karmaşık sayının gerçel kısmı
İm	: Bir karmaşık sayının sanal (imajiner) kısmı
SRR	: Ayrık Halka Rezonatörü
PBA	: Mükemmel Sınır Yaklaşımı
FDTD	: Zamanda Sonlu Farklar Yöntemi
CFL	: Courante-Friedrich-Levy şartı
THT	: İnce şerit tekniği
DC	: Doğru akım
Thz	: Terahertz
SPICE	: Entegre devre tabanlı Simülasyon programı
FSS	: Frekans Seçici Yüzey
FR-4	: Flame retardant-4 (yanmayı geciktiren)

1. GİRİŞ

1.1. Metamalzeme

Elektromanyetik metamalzemeler doğal malzemelerde bulunmayan, negatif kırınım gibi özgün elektromanyetik özelliklere sahip olan, periyodik olarak sıralanmış yapay yapılardır (Wang ve ark., 2009; Dinçer ve ark., (2013a); Li ve ark., 2010). Metamalzemelerin temel yapıları uyartımın gerçekleştiği dalgaboyuna göre genellikle daha küçüktür (homojen olarak görülecek kadar) (Wang ve ark., 2009).

Elektrik geçirgenliği ϵ ve manyetik geçirgenlik μ gibi makroskopik parametreler, metamalzemelerin elektromanyetik özelliklerini tanımlamada kullanılabilir. Metamalzemelerin doğal malzemelere göre en büyük avantajı makroskopik parametrelerin istenen değerlerde tasarlanabilmesidir (Wang ve ark., 2009). Metamalzemeler birim hücrenin ve bileşen malzemelerin geometrisiyle kontrol edilen, efektif ya da ortalama parametreler cinsinden tanımlanabilirler. Alt dalgaboyu periyodikliği sayesinde metamalzemeler ışığı kırarak dağıtmazlar. Böylece gelen dalgaya homojen görünebilirler (Plum, 2010).

Metamalzeme araştırmasının ilk amacı olan negatif kırınım, hem ϵ hem de μ 'nün negatif olmasıyla elde edilebilir. Metamalzemeler dielektrik elementlerden ya da biçimlendirilmiş metalik bileşenlerden oluşabilirler (Li ve ark., 2010). Elektrik ve manyetik rezonanslı yapılar bu amacı yerine getirmek için kullanılır. Önerilen metamalzemelerin çoğu, metalik rezonanslı yapılar olduğu ve güçlü rezonanslara dayandığı için kayıplar kaçınılmazdır. Kayıpların varlığı süperlens gibi aygıtların performansını bozar. Kayıpları azaltmak için, düşük kayıplı malzemelerin kullanımı, tasarımların optimizasyonu ve kayıpları dengelemek için kazançlı malzemelerin kullanımı gibi farklı yollar çalışılmıştır (Wang ve ark., 2009a).

Negatif kırınım, ışık saçma olayı, görüntüleme veri depolama ve litografi için süperlens, görünmezlik pelerini, minyatür anten metamalzemelerin yaygın uygulamalarından bazılarıdır (Wang ve ark., (2009a); Wang ve ark., (2009b); Li ve ark., 2010).

1.2. Bakışimsızlık

Bir bakışimsız metamalzeme, rezonans durumundayken elektrik ve manyetik alanlar arasında çapraz bağlaşım olması için, ayna simetrisi göstermez. İki dairesel kutuplanmış dalganın bozulması kesilmiştir. Yani sağ ve sol el dairesel kutuplanmış dalgalar farklı kırılma indislerine sahiptir. Bakışimsızlık parametresi, ters bağlaşım olayının gücünü tanımlar. Bakışimsız bir ortam için yapısal ilişkiler şöyledir:

$$\begin{pmatrix} D \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_0 \epsilon & -i\kappa/c \\ i\kappa/c & \mu_0 \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E \\ H \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

Sağ ve sol el kutuplanmış dalgalar için;

$$E^\pm = 1/2 E_0 (\hat{x} \mp i\hat{y}) e^{-i\omega t} \quad (1.2)$$

$$n_\pm = n \pm \kappa, \quad (n = \sqrt{\epsilon\mu}) \quad (1.3)$$

n_+ : sağ el kutuplanmış dalganın kırılma indisi, n_- : sağ el kutuplanmış dalganın kırılma indisi

κ yeteri kadar büyük olduğunda, n_+ ya da n_- den biri negatif olur (Li ve ark., 2010).

Bakışimsız metamalzemeler bakışimsızlık büyüklüğü ile tanımlanırlar:

$$\kappa = (n_+ - n_-)/2 \quad (1.4)$$

(Plum, 2010)

1.3. Bakışimsız Metamalzeme

Doğal bakışimsız malzemelerde bakışimsızlık çok düşüktür (Örneğin $\lambda=400\text{nm}$ iken kuartz için $\kappa = 5 \times 10^{-5}$). Alt dalgaboyu rezonatörlerle yapılan bakışimsız metamalzemelerle 5 kat fazla bakışimsızlık elde edilebilir (Zhao ve ark., 2011).

Bakışimsız metamalzemeler, simetri düzlemleri olmayan birim hücrelerden oluşurlar. Bakışimsız ortamda geriye giden dalgaların varolduğu görülmüştür. Bakışimsız malzemeli levha, gelen elektromanyetik dalganın ışınlarına odaklanabilir ve süperlens olarak kullanılabilir (Zhou ve ark., 2009).

Bakışimsız metamalzemeler, elektromanyetik dalgaların polarizasyon düzlemlerini döndürmek için güçlü kabiliyete sahiptir. Bu kabiliyet optik etkinlik olarak

bilinir. Son zamanlarda, yeteri kadar güçlü optik etkinliğin negatif kırılma ya da negatif yansımayla sonuçlanabileceği tahmin edilmiştir (Zhao ve ark., 2010).

Bakışimsız metamalzemelerin çok büyük optik etkinlik ve dairesel dikroizm (optik olarak aktif taneciklerle etkileşim) gibi sıradışı özellikleri de vardır (Li ve ark., 2011).

Bakışimsız metamalzemenin efektif ϵ ve μ değerlerinin her ikisi de pozitif olsa bile, güçlü bakışimsızlık sayesinde, tek elli dairesel kutuplanmış dalga için negatif kırılma indisi elde etmek uygulanabilir (Ye ve ark., 2011).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Wang ve ark., (2009), tarafından bildirildiğine göre, Veselago (1968) aynı anda negatif ϵ ve μ 'ye sahip bir ortamın negatif kırılma indisine sahip olacağını öngörmüştür.

Pendry ve ark., (1996), plazma frekansının uzak kızılötesi hatta Ghz bandına düşürülmesi için, çok ince tellerden oluşan periyodik yapılar önermişlerdir. Pendry ve ark., (1999), manyetik olmayan ince metal şeritli malzemeden yapılmış, ayırık halka rezonatörü (SRR) yapısını önermişlerdir.

Plum, (2010), tarafından bildirildiğine göre, Pendry ve ark. (2000) kırılma indisi (-1) olan bir levhanın, kırılma ile sınırlanmayan ve rastgele küçük bir noktaya odaklanabilen mükemmel lens özelliği göstereceği sonucuna varmışlardır.

Smith ve ark., (2000), aralıklı iletken-manyetik olmayan ayırık halka rezonatörü ve sürekli tellerin periyodik dizisine dayalı, aynı anda etkin ϵ ve μ 'nün negatif değerleriyle mikrodalga alanında frekans domeni gösteren bileşik bir yapıyı göstermişlerdir.

Shelby ve ark., (2001), bakır şerit ve ayırık halka rezonatörlerinin periyodik olarak iki boyutlu tekrarlanmasından oluşan ve negatif kırılma özelliği gösteren bir metamalzemenin mikrodalga frekanslarındaki saçılma verilerini deneysel olarak sunmuşlardır.

T.Q. Li ve ark., (2008), mikrodalgaların manyetik dimer tabanlı bakışsız metamalzemenin yayılımı konusunu araştırmışlardır.

Dinçer ve ark., (2013b), tarafından bildirildiğine göre, Tretyakov ve ark. (2009) bakışsız yokluk ortam kavramını ortaya atmış ve sıradışı özellikteki bir geriye dalgayı bu ortamda sunmuşlardır.

Zhou ve ark., (2009), çift katmanlı çapraz tellerle oluşan metamalzemelerin çok büyük optik etkinlik, dairesel dikroizm ve negatif kırılma indisine sahip olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca bakışsız metamalzeme için dairesel kutuplanmış dalgalarda sonuç veren bir parametrelerin geri elde edimi yöntemini uygulamışlardır.

Wang ve ark., (2009a), bakışsız metamalzemeye dayanan rezonant mikrodalga soğurucu önermişlerdir.

Wang ve ark., (2009b), negatif kırılmanın ne ϵ ne de μ negatif olmadan, yüksek bakışimsızlıkta elde edilebileceğini göstermişlerdir. Bakışimsız metamalzemenin n_{\pm} , κ , ϵ and μ değerleri gibi etkin parametrelerini hesaplamak için, tek eksenli bi-izotrop modeli kabul ederek, parametrelerin geri elde edimi ile bir yöntem geliştirmişlerdir.

Zhang ve ark., (2009), terahertz frekanslarında negatif kırılma indisi gösteren bakışimsız metamalzeme konusunda çalışmışlardır.

Zhao ve ark., (2010), bakışimsız metamalzemelerde dalga yayılımını analiz etmiş ve sıradan metamalzemelerde parametrelerin geri elde edimi prosedürünü (transfer matris metoduna dayanan) takip ederek, bakışimsız metamalzeme levhalarda uygulamışlardır. Ghz frekans aralığında tek eksenli eşlenik gamalı haç metamalzeme ile yüksek optik etkinlik ve dairesel dikroizm ve negatif kırılma indisi elde etmişlerdir. Zhao ve arkadaşlarının tasarımları (2011) yayınlanan diğer düzlemsel tasarımlara kıyasla küçük birim hücre boyutu ve büyük bakışimsızlık özellikleri taşımaktadır.

Z. Li ve ark., (2010a), karşılıklı dönmüş metal çapraz tellerden oluşan iki katmanlı bakışimsız metamalzemeleri incelemişler ve yüksek bakışimsızlık elde etmişlerdir.

Z. Li ve ark., (2010b), çift katmanlı karşılıklı olarak 90° döndürülmüş dört "U" ayrı halka rezonatörü ile tek eksenli metamalzeme üretmişlerdir. Bu yapı yüksek seviyede, optik etkinlik, dairesel dikroizm ve negatif kırılma indisi göstermektedir. Z. Li ve ark., (2011), farklı kalınlık ve uzunluklarda çift katmanlı çapraz tellerle oluşan bir metamalzemeyle büyük optik etkinlik, küçük dairesel dikroizm ve sağ el dairesel polarizeli dalgalar için güçlü bakışimsızlık elde etmişlerdir.

Plum, (2010), metamalzemelerin elektromanyetik özellikleri için iki boyutlu ve üç boyutlu bakışimsızlığın sonuçlarını ve büyük simetrik yapılarda dairesel dönüşüm dikroizmi, optik etkinlik ve negatif kırılmayı araştırmıştır.

Ye ve ark., (2010), 90° polarizasyon dönüştürücü elde etmek için, ayna görünümlü desenleriyle metal tel çiftleri arasındaki enine manyetik dipol bağlantısı sayesinde optik etkinliği yüksek olan çift katmanlı metamalzeme önermişlerdir. Araştırmacılar, (2011), iki ayna görünümlü çark deseninden oluşan çift katmanlı bakışimsız metamalzemeyle dayalı homojen dairesel polarizör önermişlerdir.

Wei ve ark., (2011), yüksek verimli genişbantlı polarizasyon dönüşümü için, döndürülmüş ayırık halka rezonatörlerinden oluşan çok ince bir bakışimsız metamalzeme levha önermişlerdir.

Diğer ve ark., (2013a), polarizasyon dönüşümü için çift katmanlı süreksiz çapraz tel şeritlerden oluşan, kayıplı anizotrop bakışimsız metamalzeme kullanmışlardır.

Diğer ve ark., (2013b), güçlü optik etkinlik ve dinamik dairesel dikroizm gösteren, çift katmanlı gamalı haç-çapraz tel yapısını ortaya koymuşlardır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Yöntem

3.1.1. FIT (Sonlu İntegrasyon Tekniği)

Mükemmel Sınır Yaklaşımının (PBA) uygunluğu ile Sonlu İntegrasyon Tekniğinin yenilmez veriminin kombinasyonun CST Mikrodalga Stüdyosunun başarılı çalışmasının temelidir.

Zaman domeninde, FIT'in nümerik çabası problemin büyüklüğüyle ilişkili olarak diğer yaygın kullanılan yöntemlere göre daha yavaş artar. Çok büyük ve karmaşık yapılar uygulanabilir.

PBA gelişigüzel şekillendirilmiş nesnelerin döngüde daha kabaca örneklenmesine müsaade eden uyumlu bir yöntemdir. Bu da, döngüyü dolayısıyla da gereken hafıza boyutu ve çözüm zamanını doğruluktan ödün vermeden azaltır. Sonuç olarak, PBA diğer tüm teknikleri kapsamı için geliştirilmiştir (Anonymus, CST/FIT, 2015).

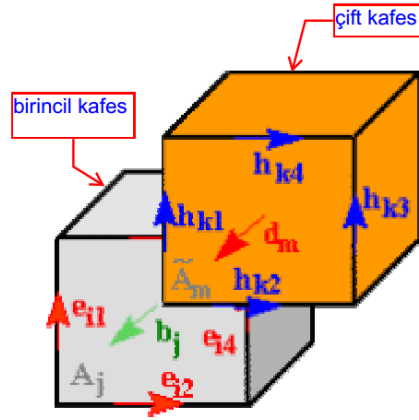
FIT 35 yılı aşkın süredir, elektromanyetik alan problemlerinin çözümünde kullanılan simülasyon programlarındaki en başarılı nümerik yöntemlerden biridir. Sonlu integrasyon tekniğinin arkasındaki kilit fikir, bilgisayarlara uygun şekilde, integral formdaki Maxwell denklemlerinin lineer denklem sistemine dönüştürülerek ayırık formüle edilmesidir (Clemens ve ark., 2001; Weiland ve ark., 2003; Rahimi, 2011).

FIT, alanların fiziksel özelliklerinin ayırık uzayda korunduğunu ve tek bir çözüme gittiğini garantileyen, Maxwell denklemlerine cebirsel olarak tam benzeyen denklemler oluşturur. Bu teknik farklı ortamlar arasındaki arayüzlere daha doğru bir tutum içinde davranır.

FIT, FDTD yönteminin aynı avantajlarının çoğuna sahiptir. Örneğin; basit uygulama, ve verimli paralel hesaplama. FIT, FDTD'nin dezavantajlarının bazılarını dengeler. Maxwell denklemleri için bu sonlu hacim tipi ayrıklaştırma, tüm bölgede ve her ayırık hücrede Faraday Yasası gibi denklemleri sağlar. Bu anlamda, homojen olmayan bir ortamdaki ayırık alanların korunum özelliklerini ispatlamaya olanak sağlar.

FDTD gibi, FIT'in açık formülasyonunun asıl eksikliği, CFL şartına dayanan kafes boyutundaki zaman adımına olan bağımlılıktır (Rahimi, 2011).

Bir kafesin kenarlarına elektrik voltajlarını, buna eş bir kafesin kenarlarına da manyetik voltajları bölüştürerek, Maxwell denklemleri ve ilgili malzeme denklemleri sürekli uzaydan ayrık uzaya dönüştürülür. Kafes üzerindeki gerilim ve akı bileşenlerinin bölüştürülmesi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Döngüdeki gerilim ve akı bileşenlerinin bölüştürülmesi (Weiland, 2003)

İntegral serbestlik derecesinin kullanılması, örneğin alan bileşenlerinin yerine (FDTD'deki gibi) kullanılan gerilim ve akılar, hem (Eşitlik(3.1)-(3.4)) matris denklemlerini güzel bir şekilde yazmaya, hem de önemli algoritmik-teorik ve nümerik sonuçlara imkan verir. Maxwell Kafes Denklemleri olarak bilinen Maxwell denklemlerinin ayrık eşdeğeri Eşitlik(3.1)-(3.4) arasında gösterilmiştir. Bu tanım da tam bir gösterimdir ve herhangi bir yaklaşım hatası içermez.

$$C\bar{e} = -\frac{d}{dt}\bar{b} \quad (3.1)$$

$$\tilde{C}\bar{h} = \frac{d}{dt}\bar{d} + \bar{j} \quad (3.2)$$

$$S\bar{b} = 0 \quad (3.3)$$

$$\tilde{S}\bar{d} = q \quad (3.4)$$

Bu denklemlerde \bar{e} ve \bar{h} birinci kafes ve onun çifti olan kafesin kenarları boyunca elektrik ve manyetik gerilimleri gösterir.

\bar{d} , \bar{b} ve \bar{j} sembolleri, birinci ve çifti olan kafesin yüzlerindeki elektrik, manyetik ve akım yoğunluğu akılarıdır. Topolojik $C, \tilde{C}, S, \tilde{S}$ matrisleri dönel ve ıraksama operatörlerinin ayrık eşdeğerlerini gösterir. Tilda işareti çift kafesi ifade eder.

Malzeme özelliği ilişkilerinin ayrık benzerlikleri, malzeme matrisleri M_ϵ , $M_\mu-1$ ve M_σ üzerinden gerilim ve akılar arasındaki bağıntıyı gösterir.

$$\bar{d} = M_\epsilon \bar{e}; \quad (3.5a)$$

$$\bar{h} = M_\mu-1 \bar{b}; \quad (3.5b)$$

$$\bar{j} = M_\sigma \bar{e} + \bar{j}_A; \quad (3.5c)$$

Bu malzeme matrisleri, köşegen matristir ve herhangi bir nümerik prosedürün kaçınılmaz yaklaşımlarını içerir.

Eşitlik(3.1)-(3.5) arasındaki denklemlerin iyi yanı, ilgili sürekli bağıntıların ayrık birebir kopyasını göstermesidir (ilk dört denklemde C'yi “dönel”, S'yi de “ıraksama” olarak alırsak). Bu şekilde, ayrık uzayda herhangi bir ikinci dereceden denklem türetmek, tıpkı sürekli durumda açıkça olduğu gibi yapılabilir.

Kaynak akımı olmadan kayıpsız malzemelerde harmonik durumu örnek alalım (zaman türevlerinin $j\omega$ ile değiştirildiği). 3.5. Denklemdaki ayrık malzeme özelliği ilişkilerinin, denklem (3.1-3.2)'de kullanılması şu sonucu verir:

$$M_\mu-1 C \bar{e} = -j\omega \bar{h}; \quad (3.6)$$

$$\tilde{C} \bar{h} = j\omega M_\epsilon \bar{e} \quad (3.7)$$

Çift dönel operatörü \tilde{C} 'yi Eşitlik 3.6'ya uygulayıp, Eşitlik 3.7'de sağ tarafta kullanırsak, dalga denkleminin ayrık halini verir:

$$\tilde{C} M_\mu-1 C \bar{e} = \omega^2 M_\epsilon \bar{e}. \quad (3.8)$$

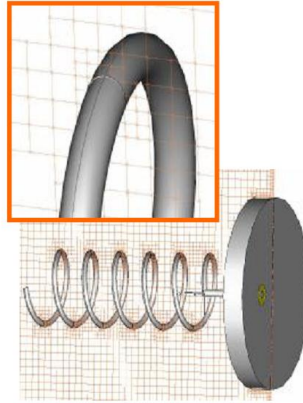
(Weiland, 2003)

FIT ayrık elektromanyetizmanın kanonik bir teorisidir. Korunum yasaları, kararlılık denklemleri gibi matematiksel olarak kusursuz bir altyapıya dayanır. FIT'in

güçlü yönlerinden biri, Maxwell denklemlerinin 2 boyutlu ya da 3 boyutlu herhangi bir döngüye çevrilmesidir.

Bir diğer gelişme de, Kartezyen sistemde yüksek alan çeşitliliğinin ve iyi geometrik detayların olduğu bölgelerde, yerel düzeltmeye izin veren alt şebekeleme tekniğidir. Döngü hücrelerinin toplam sayısı ve toplam hesaplama zamanı böylece önemli ölçüde azaltılır (Şekil 3.2). PBATM ve TSTTM algoritmalarının, iyileştirilmiş her hücrede geometrinin daha kesin tanımına izin verdiği dikkate alınmalıdır.

CST MWS'de kullanılan teknik, olumsuz etkilenmeyen sonuçların doğruluğunu kesinleştirdiği için, en iyi bilinen alt şebekeleme tekniklerinden farklı olarak, kararlılığı garanti altına alır.



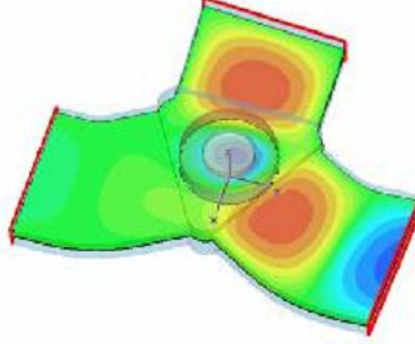
Şekil 3.2. Bir helezon antenin aynı çözüm doğruluğu için döngü hücrelerinin sayısının 6 boğumlu azaltılmasına yol açan uyumlu alt şebekelemesi

Bilinenin aksine, FIT sadece zaman domeni yöntemi değildir, zaman domeni, frekans domeni ve normal mod modüllerini, hücrede parçacık simülasyonu ve bağlaşıklık birkaç problem türünü (elektromanyetik alanı içeren-elektrik devreleri) de sunar.

Otomatik optimizasyon ve tam parameterİndirme ile işbirliği içinde tam verime ulaşılır. Cihazın sadece geometrik değil fiziksel özelliklerini de hesaba katan bir uzman sisteme dayalı otomatik döngü üretimi araştırılmıştır. En son eğilim, uzman sistemle klasik otomatik döngü uyumunu birleştirmektir.

Malzeme modelleri şüphesiz elektromanyetik simülasyonun doğruluğu için temel faktörlerden biridir. Gerçek malzemeler karmaşık ilişkilere çoğu kez uyarlar, anizotropurlar ve frekansla değişen özellikleri vardır.

FIT'te dağıtıcı malzemelerin yanısıra, anizotrop, kayıplı malzemeler de bulunur. FIT plazma cihazları ve sirkülatörler gibi çoğu karmaşık yapıların simülasyonuna izin verir. Şekil 3.3'te bir sirkülatör yapısının (ortasında jiroskopik malzemedeki silindirin yerleştirilmiş) içindeki elektrik alan gösterilmiştir. Sirkülatör etkisi belirgindir.



Şekil 3.3. Bir sirkülatör yapısının (ortasında jiroskopik ferrit malzemedeki yapılmış silindirin içeren) içindeki elektrik alan (Weiland, 2003)

Sonlu integrasyon tekniği, en dinamik gelişimle muhtemelen elektromanyetik alan simülasyonunun nümerik yöntemidir.

FIT, hem zaman hem frekans domenindeki elektromanyetik problemleri çözebilme yeteneği, malzeme özelliklerinin çeşitliliği, ve istisnai nümerik verimlilik ve doğruluk sayesinde, DC'den Thz'e kadar, dünya çapında çok sayıda cihazın simülasyonunda kullanılmaktadır (Weiland, 2003) .

Akustik dalga problemlerinin çözümündeki kullanımına ilaveten, elektromanyetik problemlerde en iyi bilinen uygulamalar, büyük ölçüde saçılma problemlerini, radyo frekansı ve mikrodalga simülasyonunu, manyetik cihazları, dielektrik rezonatörleri, insan vücudundaki elektromanyetik alanı, dağıtıcı ortamı ve güneş pillerini içerir (Rahimi, 2011).

3.1.2. CST MWS (Bilgisayar Simülasyon Teknolojisi Mikrodalga Stüdyosu)

3.1.2.1. CST MWS

CST Mikrodalga Stüdyosu, yüksek frekans bileşenlerinin 3 boyutlu elektromanyetik simülasyonu için uzman bir araçtır. CST MWS'nin eşsiz performansı teknolojiye öncülük eden arge departmanlarında ilk tercih olmasını sağlar.

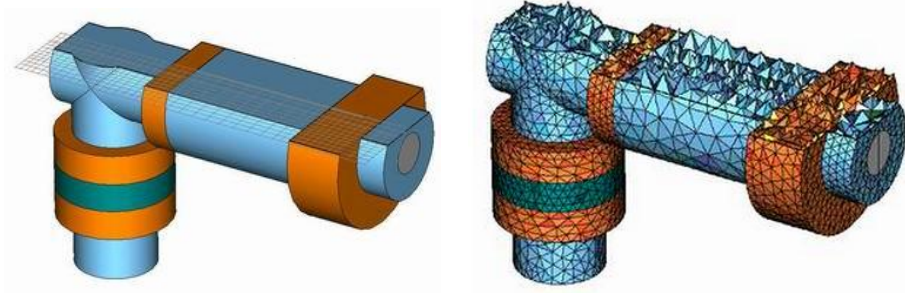
CST MWS, anten, filtre, kaplin, düzlemsel ve çokkatmanlı yapılar gibi yüksek frekanslı cihazların en hızlı ve doğru analizine, sinyal bütünlüğü ve elektromanyetik uyumluluk etkilerine olanak sağlar. Son derece kullanıcı dostu olan CST MWS, yüksek frekanslı tasarımların elektromanyetik davranışına ilişkin hızlıca bilgi verir.

Genel olarak uygulanabilir zaman domeni çözücüsü ve frekans domeni çözücüsü olan en iyi modüle ilaveten, CST MWS özel uygulamalar için daha ileri çözücü modüller sunar. Özel CAD dosyalarının içeri aktarımı ve SPICE parametrelerinin çıkarılması için filtreler, tasarım imkanlarını artırır ve zamandan tasarruf eder (Anonymus, CST MWS, 2015).

3.1.2.2. Frekans Domeni Çözücüsü

CST MWS'nin frekans domeni çözücüsü genel amaçlı bir araçtır. S-parametreleri gibi elektromanyetik yakın ve uzak alanları verir. Eğer elektriksel küçük yapılar ya da yüksek kaliteli cihazlar inceleniyorsa, Frekans Domeni Çözücüsü en iyi tercihtir.

Eşsiz bir özellik olarak, CST MWS'deki frekans domeni çözücüsü kartezyenden dörtyüzlü döngüye değiştirilebilir. Kavisli yüzeylerin bölünmüş gösteriminin yanı sıra, doğruluğu ve hızı artıran gerçek bir yüzey döngüsü aşağıda Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. CST MWS, kullanıcıya aynı simülasyon modeli üzerinde zaman domeni ya da frekans domeni çözücüsünü alternatif olarak sunar (Anonymus,CST/Frequency Domain Solver,2015)

Frekans domeni çözücüsünün klasik dörtyüzlü döngü düzeltmesi, yapının dik kesilmiş ilk gösteriminden daha iyi sonuç veremez. CST'nin Gerçek Geometri Uyumu ([CST's True Geometry Adaptation](#)) daha yüksek doğruluk elde etmek için, düzeltilmiş döngüyü orijinal modele geri yansıtır.

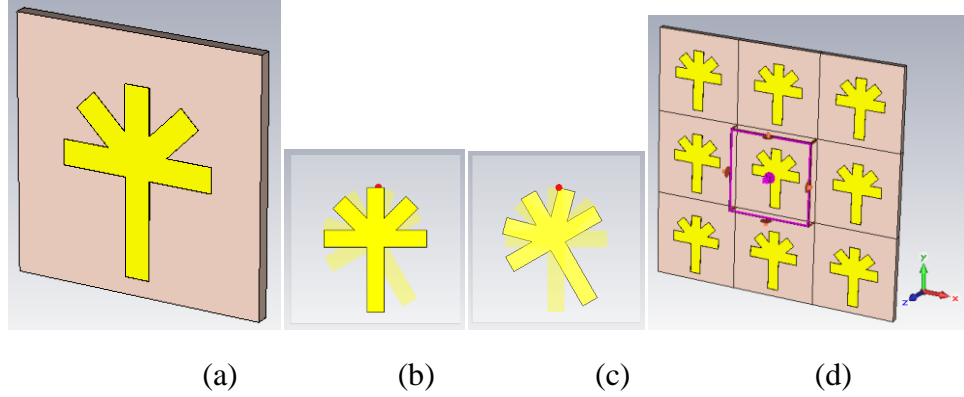
Genişbant sonuçları gömülü uyarlanabilir frekans salınımı ile hızlıca sağlanır. Her iki döngü tipi için, otomatik döngü uyumu tasarıları uygulanır. CST MWS'deki frekans domeni çözücüsü, bir doğrudan ve bir de dolaylı lineer denklem sistemi çözücüsü sunar. Eğer dörtyüz sayısı çok değilse doğrudan olan tercih edilebilir. Bu da, bir yapının çoklu uyarımlarla tam S-matrisi gerektiğindeki esas gücünü gösterir.

Frekans Domeni Çözücüsü için anahtar bir uygulama PBG, FSS ya da fazlı diziler gibi periyodik yapılardır. Rastgele biçimlendirilmiş birim hücrelere otomatik olarak sınır yaratan, özel bir periyodik sınır uygulamasını barındırır. Portlar son derece doğru ve hızlı simülasyon, polarizasyon ve mod türünün kolay analizi için Floquet-mod çözücülerle donatılır.

CST MWS Frekans Domeni Çözücüsü frekans bağımlı, anizotrop ortam için kullanılabilir (Anonymus, CST/Frequency Domain Solver, 2015).

3.2. Materyal

3.2.1. Materyal



Şekil 3.5. Tasarlanan yapılardan temsili BDAM (Beş Dallı Ağaç Metamalzeme) a)Yandan görünüm b) Önden görünüm c)Arkadan görünüm d) Açık (Boşluk eklenmiş) sınır koşullarıyla birim hücre

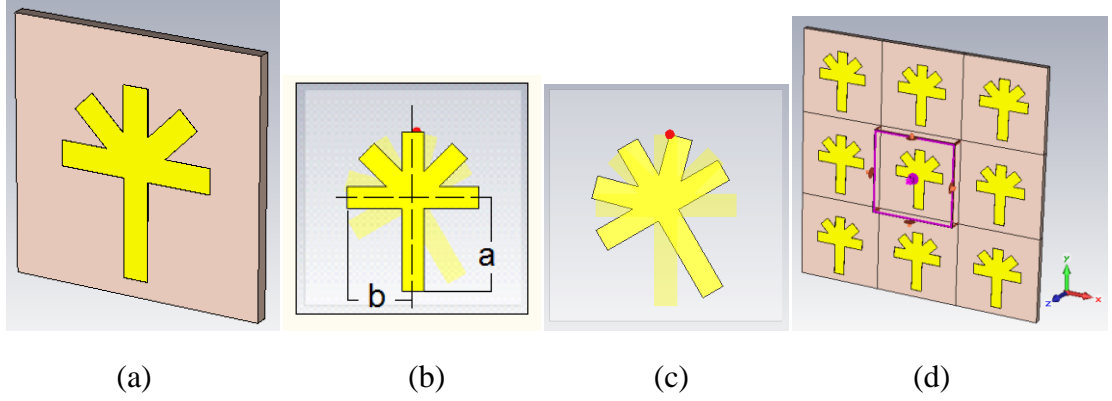
Bu tez çalışmasında 4-6 Ghz ve 5-15 Ghz frekans aralıkları için tasarlanmış, 3 çeşit bakışsımsız metamalzeme önerilmiştir. Şekil 3.5'te temsili olarak BDAM (Beş Dallı Ağaç Metamalzeme) yapısı ele alınmıştır. Dış ortam hava boşluğudur. Yapılar, çift katmanlı ve süreksiz bileşenlerden oluşmaktadır. FR-4 dielektrik alt katmanın her iki yüzüne, bakır malzemeden ön ve arka rezonatörler inşa edilmiştir.

Dielektrik alt katman olarak kalınlığı 1.6 mm, bağıl dielektrik geçirgenliği 4.2, kayıp tanjantı 0.02 olan kayıplı FR-4 seçilmiştir. Alt katmanın FR-4 seçilmesinin nedeni, kayıp tanjantının farklı frekanslarda neredeyse hiç değişmemesidir.(Djordjevic ve ark., 2001). Ön ve arka rezonatörler 0.036 mm kalınlığında ve iletkenliği $5,8 \times 10^7$ S/m olan bakırdan yapılmıştır. Metal rezonatörler, dielektrik alt katmanın ön ve arka yüzüne inşa edilmiştir. (Şekil 3.5-b,c)

Yapılar, sonlu integrasyon tekniğine dayanan CST MWS programı ile simüle edilmiştir. Şekil 3.5.d'de simülasyonda kullanılan birim hücre ve açık (boşluk eklenmiş) sınır koşulları gösterilmiştir. Birim hücrenin x ve y yönlerindeki periyodikliği 16 mm'dir.

3.2.2. Çeşitli özgün bakışimsız metamalzemeler

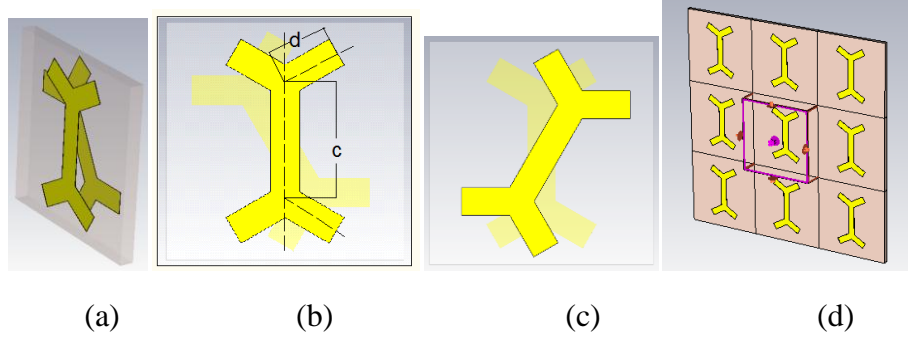
3.2.2.1. BDAM (Beş-Dallı Ağaç Metamalzeme) Yapısı



Şekil 3.6. BDAM a)Yandan görünüm b) Önden görünüm c)Arkadan görünüm d) Açık (Boşluk eklenmiş) sınır koşullarıyla birim hücre

5-15 Ghz için tasarlanan BDAM (Beş Dallı Ağaç Metamalzeme) yapısında, dielektrik alt katmanın boyutları $24 \times 24 \text{ mm}^2$, metal şeritlerden ağacın gövdesini oluşturan şeritin boyu $a=10 \text{ mm}$, dallarını oluşturan şeritin boyu $b=7 \text{ mm}$ olup, genişliği simülasyonda parametrik olarak değiştirilmiştir. 4-6 Ghz için tasarlanan yapıda ise, dielektrik alt katmanın boyutları $30 \times 30 \text{ mm}^2$, ağacın gövdesini oluşturan şeritin boyu $a=13 \text{ mm}$, dallarını oluşturan şeritin boyu $b=9,1 \text{ mm}$ olup, genişliği simülasyonda parametrik olarak değiştirilmiştir. Yapı Şekil.3.6'da gösterilmiştir. Metal şeritlerin genişliği 5-15 Ghz ve 4-6 Ghz frekansları için $w=0,5-3 \text{ mm}$ arasında $0,5 \text{ mm}$ aralıklarla değişmektedir. Ağacın dalları arasında 45° lik açı farkı vardır. Ön ve arka rezonatör arasındaki açı farkı da $\theta=0-90^\circ$ arasında 15° lik aralıklarla değişmektedir. Kalınlığa göre değişim incelenirken $\theta=30^\circ$ alınmıştır. Açıya göre değişim incelenirken $w=1,5 \text{ mm}$ alınmıştır.

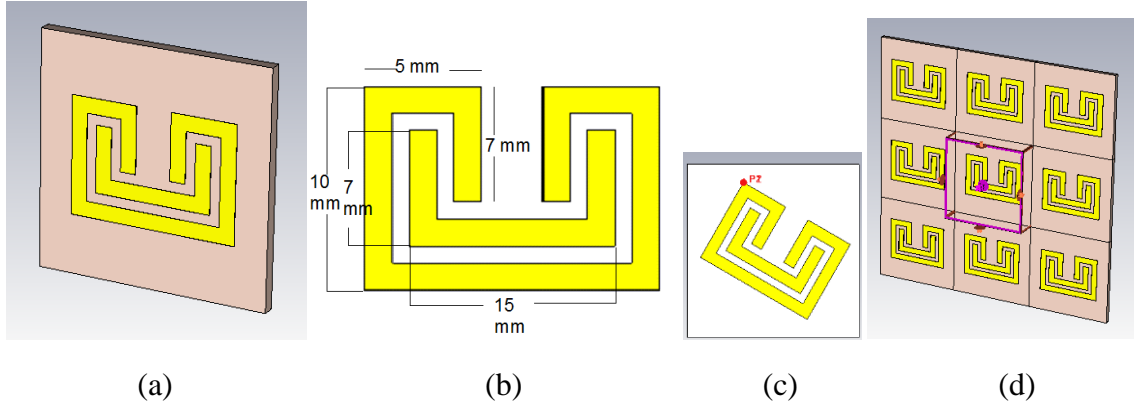
3.2.2.2. ÇYM (Çift-Y Metamalzeme) Yapısı



Şekil 3.7. ÇYM a)Yandan görünüm b) Önden görünüm c)Arkadan görünüm d) Açık (Boşluk eklenmiş) sınır koşullarıyla birim hücre

5-15 Ghz için tasarlanan ÇYM (Çift-Y Metamalzeme) yapısında, dielektrik alt katmanın boyutları $24 \times 24 \text{ mm}^2$, metal şeritlerden Y'nin gövde kısmını oluşturan şeritin boyu $c=15 \text{ mm}$, çatal kısmını oluşturan şeriti dielektrik alt katmanın boyutları $30 \times 30 \text{ mm}^2$, boyu $d=5 \text{ mm}$ olup, genişliği simülasyonda parametrik olarak değiştirilmiştir. 4-6 Ghz için tasarlanan yapıda ise, gövde kısmını oluşturan şeritin boyu $c=19,5 \text{ mm}$, çatal kısmını oluşturan şeritin boyu $d=6,5 \text{ mm}$ olup, genişliği simülasyonda parametrik olarak değiştirilmiştir. Yapı Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Metal şeritlerin genişliği 5-15 Ghz ve 4-6 Ghz frekansları için $w=0,5-3 \text{ mm}$ arasında $0,5 \text{ mm}$ aralıklarla değişmektedir. Y'nin çatal kısmındaki şeritler arasında 120° lik açı farkı vardır. Ön ve arka rezonatör arasındaki açı farkı da $\theta=0-90^\circ$ arasında 15° lik aralıklarla değişmektedir. Kalınlığa göre değişim incelenirken $\theta=30^\circ$ alınmıştır. Açıya göre değişim incelenirken $w=1,5 \text{ mm}$ alınmıştır.

3.2.2.3. ÇZM (Çift-Zımba Metamalzeme) Yapısı



Şekil 3.8. ÇZM a)Yandan görünüm b) Önden görünüm c)Arkadan görünüm d) Açık (Boşluk eklenmiş) sınır koşullarıyla birim hücre

5-15 Ghz için ÇZM (Çift-Zımba Metamalzeme) yapısındaki, dielektrik alt katmanın boyutları $25 \times 25 \text{ mm}^2$, metal şeritlerin boyutu Şekil 3.8.b'de gösterilmiş olup, genişliği simülasyonda parametrik olarak değiştirilmiştir. 4-6 Ghz için tasarlanan yapıda, altkatmanın boyutları $30 \times 30 \text{ mm}^2$ dir. Metal şeritlerin genişliği 5-15 Ghz ve 4-6 Ghz frekansları için $w=0,25-2 \text{ mm}$ arasında $0,25 \text{ mm}$ aralıklarla değişmektedir. İç ve dış zımba arasında $L_a=2,5 \text{ mm}$ boşluk bulunmaktadır. Ön ve arka rezonatör arasındaki açı farkı da $\theta=0-90^\circ$ arasında 15° lik aralıklarla değişmektedir. Kalınlığa göre değişim incelenirken $\theta=30^\circ$ alınmıştır. Açıya göre değişim incelenirken $w=1,5 \text{ mm}$ alınmıştır.

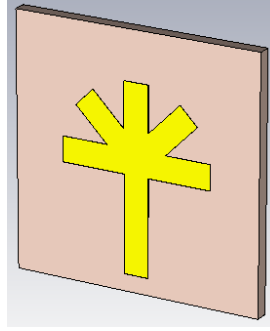
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Öncelikle tasarlanan yapılar CST MWS programı ile simüle edilmiş, elektromanyetik özellikleri incelenmiştir. CST'den elde edilen sonuçlar ve bakışimsız metalmalzemelerin etkin ortam parametrelerinin geri elde edimi yöntemi (Zarifi ve ark., 2012) kullanılarak, tasarlanan yapıların ϵ , μ , κ , n , n_{\pm} , R, T_{\pm} değerleri elde edilmiştir.

Etkin ortam parametrelerinin geri elde edilme yöntemlerinde kol seçme problemi ortaya çıkmıştır. K-K (Kramers-Kroning) ilişkileri kullanılarak bu sorun çözülmüştür (Zarifi ve ark., 2012). Sonuçlarda κ -KK, (n+)-KK ve (n-)-KK olarak görünen parametreler, bu parametrelerin ilgili esas parametrelerinin sanal kısımlarına K-K ilişkilerinin uygulanması sonucu elde edildiğini ifade etmektedir.

4.1. BDAM Yapısı

Şerit kalınlığı ve rezonatör açısı değiştirilerek inşa edilen BDAM yapısı (Şekil 4.1.), 5-15Ghz ve 4-6 Ghz frekans aralıklarında CST MWS ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1. BDAM Yapısı

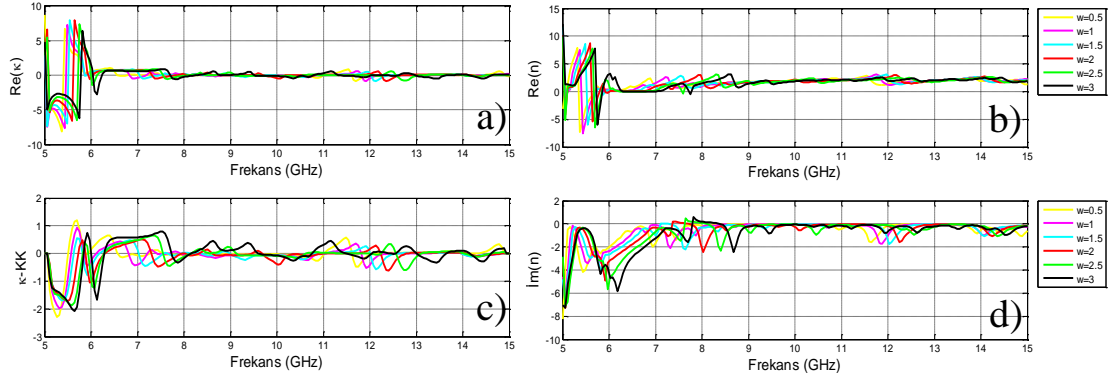
4.1.1. Kalınlığın parametrik değişimi

4.1.1.1. 5-15 Ghz Frekans aralığı için

5-15 Ghz frekans aralığı için tasarlanan BDAM yapısının κ (bakışimsızlık) değerini incelediğimizde, $w=0,5$ mm için, bakışimsızlığın gerçel kısmı 2 defa rezonansa girmiş, ilki $f=5$ Ghz'te $Re(\kappa)=8,69$ değeriyle yüksek bakışimsızlık, diğeri $f=5,38$ Ghz'te $Re(\kappa)= -8,1$ değeriyle negatif bakışimsızlık göstermiştir (Şekil 4.2.a). Aynı kalınlıkta bakışimsızlık değerinin hem gerçel hem de sanal kısmı $f=6-15$ Ghz aralığında 0-1 değeri arasında seyretmiş ve sabit bakışimsızlık özelliği göstermiştir (Şekil 4.2.a,c). $f=6-15$ Ghz aralığında κ , frekanstan bağımsızdır. $w=0,5$ mm için, $f=5,37$ Ghz'teki değerlere bakıldığında, $Re(n)= -7,29$ $Im(n)= -3,32$ minimum olarak negatif kırılma indisine sahiptir. (Şekil 4.2.b,d).

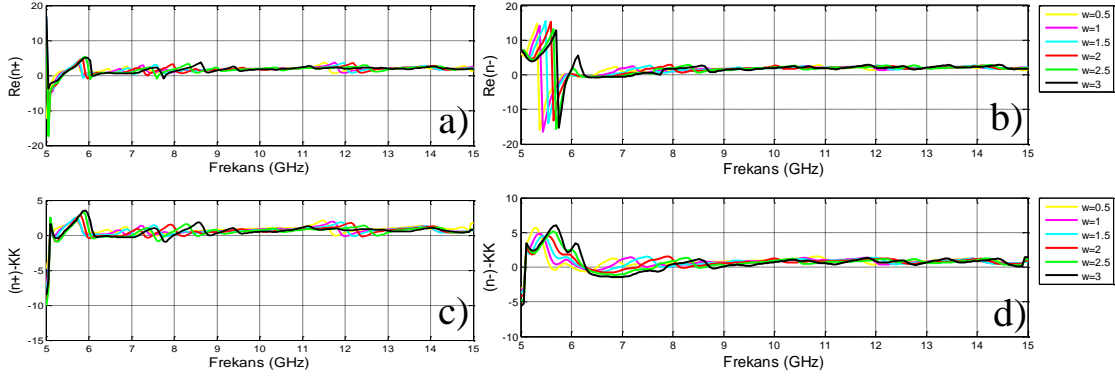
Şerit kalınlığı w arttıkça, κ ve n 'in rezonans frekansı artmaktadır (4.2.a,b,c,d). $w=0,5-3$ mm arasında n de κ ile benzer şekilde rezonansa girmiştir (Şekil 4.2.a,b). Şekil 4.1.b'ye göre, $f=5,3-5,8$ Ghz arasında kırılma indisi negatiftir. κ , $f=5-5,5$ Ghz arasında

negatifken, n pozitiftir. $f=5,5-6$ Ghz arasında ise, κ işaret değiştirip pozitif olurken, n de tam tersine negatif işaret almaktadır.



Şekil 4.2. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan BDAM yapısının κ (bakışsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları

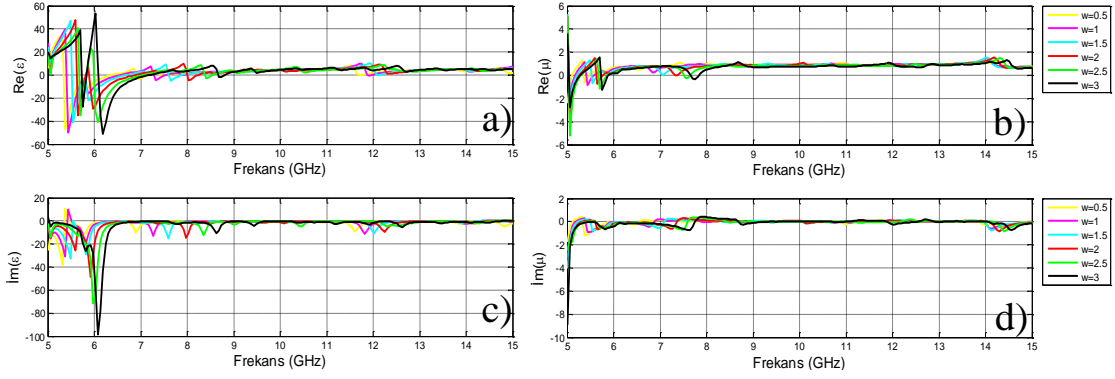
Şekil 4.3'e göre, $f=5,38$ Ghz rezonans frekansında, a'da RCP için kırılma indisinin gerçel kısmı pozitif işaretliyken, b'de LCP için kırılma indisinin gerçel kısmı rezonansa girerek n^+ 'ye benzer şekilde pozitiften negatife geçmiştir. n^+ ve n^- , $f=6-15$ Ghz aralığında pozitif işaretlidir.



Şekil 4.3. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı kalınlıklarda tasarlanan BDAM yapısının n^+ ve n^- kırılma indislerinin gerçel ve sanal kısımları

Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4 incelendiğinde $f= 6,3-15$ Ghz aralığında, κ sıfıra yakın, ϵ ve μ de pozitif olduğu için, n^+ , n^- ve n pozitif olmaktadır. Şekil 4.3.a ve c'de görüldüğü gibi, $w=3\text{mm}$ 'de (n^+) 'nin gerçel ve sanal kısımları $f=5,91$ Ghz'te maksimum $(n^+)-KK=5,11$ değerine ulaşmıştır. $f=11,27-15$ Ghz arası kırılma indisi düşük değerler almıştır. Şekil 4.3.b ve d'de $w=1,5$ mm'de (n^-) 'nin gerçel kısmı $f=5,48$ Ghz'te

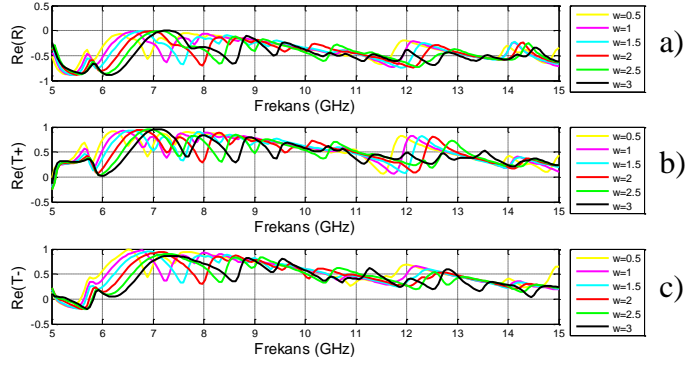
maksimum $\text{Re}(n^-) = 15,53$, $f=5,54$ Ghz'te minimum $-13,92$ değerine ulaşmıştır. (n^-) 'nin sanal kısmı da $f=5\text{Ghz}$ 'te minimum $(n^-)\text{-KK} = -5,64$, $f=5,7\text{Ghz}$ 'te maksimum $6,07$ değerini almıştır.



Şekil 4.4. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan BDAM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları

Şekil 4.4.a ve c'de görüldüğü gibi, tüm kalınlık değerleri için 9-15 Ghz arasında ϵ neredeyse sabittir. Şekil 4.4. b ve d'de, $f=8,5-15$ Ghz arasında μ neredeyse sabit değere sahiptir. Şekil 4.4.b'de $f=5,7$ Ghz'te $\text{Re}(\mu)=1,54$ maksimum $f=5,75$ Ghz'te $\text{Re}(\mu)= -1,28$ minimum değeri almış, a'da $f=6,02\text{Ghz}$ 'te $\text{Re}(\epsilon)=53,62$ ve $f=6,19$ Ghz'te $\text{Re}(\epsilon)= -51$ negatif ϵ özelliği göstermiştir. $\text{Re}(n)$ $f=6,3-7,3$ Ghz aralığında sıfıra çok yakın değerdedir. Şekil 4.4.a ve c'de, w arttıkça, ϵ 'un rezonans frekansı da artmakta, ϵ 'un sanal kısmının dip değeri de daha küçük değer almaktadır.

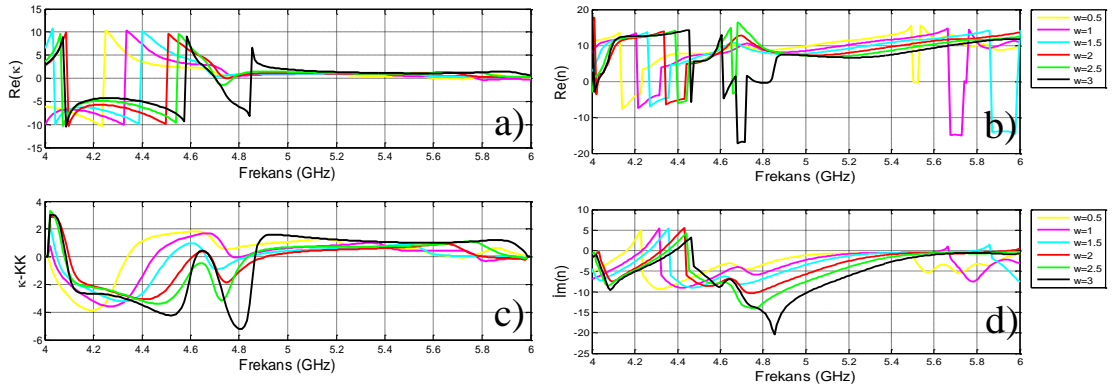
Şekil 4.5'e göre, T^+ ve T^- , 5-15 Ghz frekans aralığında, frekansın bir fonksiyonudur. Rezonans frekansında RCP ve LCP dalgalar için iletim katsayıları önemli derecede farklıdır. $f=5,38$ Ghz rezonans anında, a'da R yansıma katsayısı (-1) 'e çok yakın, b'de RCP iletim katsayısı $0,25$ civarında ve c'de LCP iletim katsayısı da sıfıra yakın değer almıştır. Kalınlığa bağlı olarak R, T^+ ve T^- 'nin çalışma bandı daha yüksek frekanslara kaymaktadır.



Şekil 4.5. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan BDAM yapısında R, T+, T-'nin gerçel kısmı

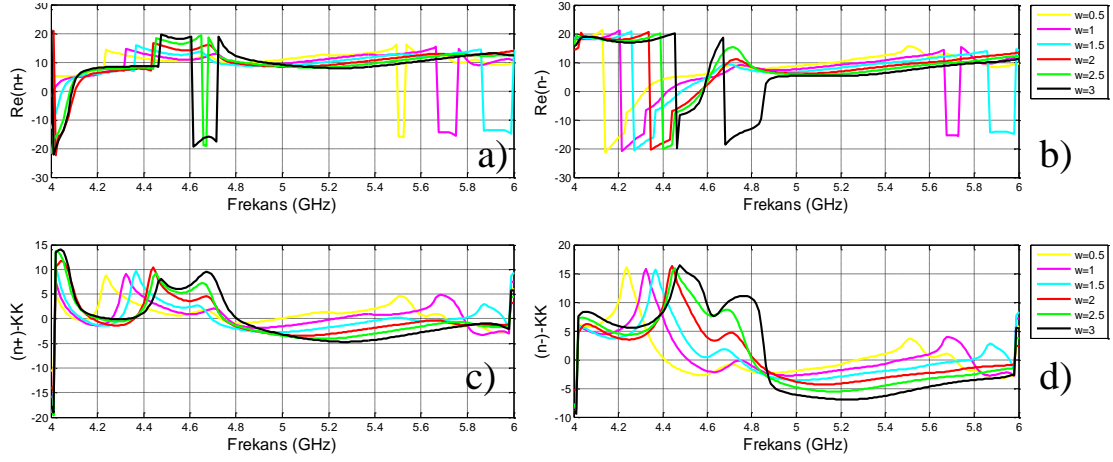
4.1.1.2. 4-6 Ghz Frekans aralığı için

Şekil 4.6.a'da w arttıkça κ ve n 'nin rezonans frekansı artmaktadır. $f=4,1-4,6$ Ghz arasında $w=3$ mm için, κ negatifken, n pozitiftir (Şekil 4.6.a,c). Yine $w=3$ mm için $f=4,85$ Ghz'in üstünde n ve κ pozitiftir. n ve κ , $f=4-4,8$ Ghz arasında, frekansın bir fonksiyonudur (Şekil 4.6.a,b,c,d). 4,85-6 Ghz arasında bakışimsızlık frekanstan bağımsızdır ve 4-6 Ghz arasında κ ve n 'nin işaret değişimi aynı yödedir. $f=4,2-4,5$ Ghz arasında, (4,7), (5,7) ve (5,9) Ghz'te, negatif kırılma indisi görülmektedir. RCP kırılma indisi için rezonans $f=4,65$ Ghz civarında $w=2,5$ ve $w=3$ mm kalınlıklarında oldukça keskindir. $w=0,5$ mm,1mm,1,5mm'de $n+$ için rezonanslar $f=5,5-6$ Ghz arasındadır. ($n+$) ve ($n-$)nin sanal kısımları 4,8-6 Ghz arasında frekanstan bağımsızdır (Şekil 4.6.c,d).



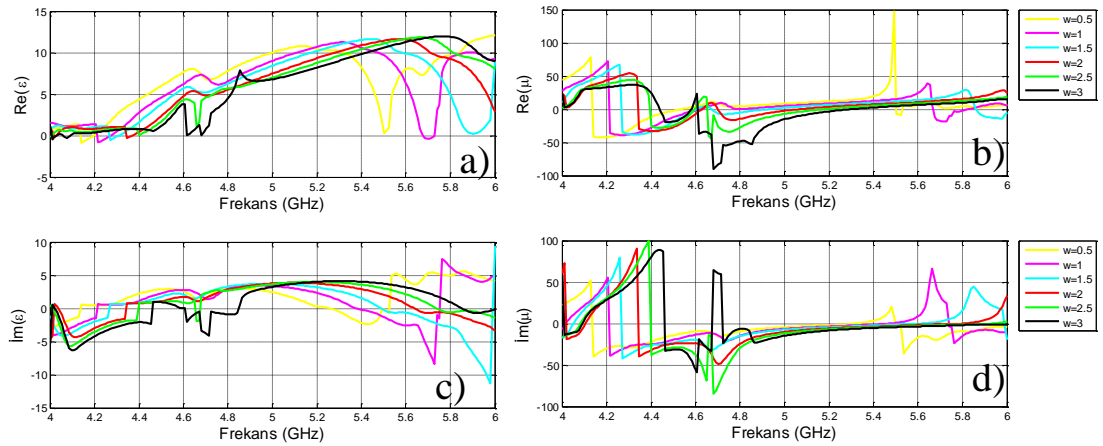
Şekil 4.6. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan BDAM yapısının κ (bakışimsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları

Şekil 4.6.a'da gösterilen $w=3$ mm için, $f=4,68$ Ghz'te $Re(n)=-17,22$ minimum değeriyle negatif kırılma indisi özelliğine sahiptir. Şekil 4.6.b'de görüldüğü gibi, $w=1$ mm için, $f=4,75-6$ Ghz arasında $Re(\kappa)$ düşük ve sabit değere sahiptir.



Şekil 4.7. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı kalınlıklarda tasarlanan BDAM yapısının $n+$ ve $n-$ kırılma indislerinin gerçel ve sanal kısımları

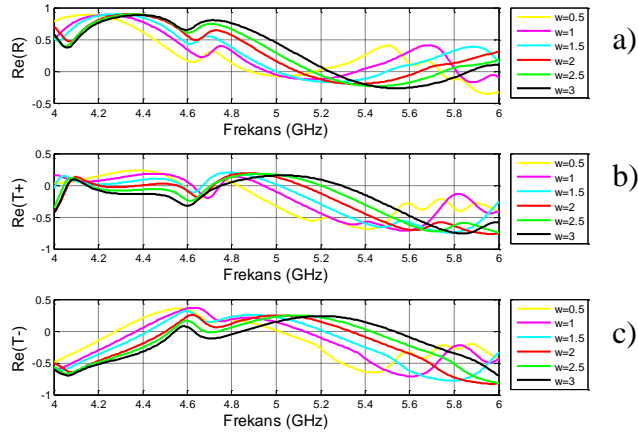
Şekil 4.6.a ve b'de görüldüğü gibi, 4-6 Ghz için tasarlanmış BDAM yapısı tüm kalınlık değerleri için, $f=5,1-6$ Ghz arasında, κ sabit bakışimsızlık özelliği göstermiştir. $w=3$ mm'de, $f=4$ Ghz'te $Re(n+)=-22$ ve $(n+)-KK=-19$ negatif kırılma indisine sahiptir (Şekil 4.7.a,c). Şekil 4.7.a,b'de $w=3$ mm için, $f=4,68$ Ghz'te $Re(n+)=-15,88$ ve $Re(n-)=-18,56$ minimum negatif değerlerini almışlardır.



Şekil 4.8. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan BDAM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları

ϵ 'un gerçel kısmı, 4-6 Ghz arasında hep pozitif değer almış, gerçel ve sanal kısımları κ 'nın rezonans anlarında işaret değiştirmeye yönelmiştir. Şekil 4.8.a'da $f=4,4$ Ghz arasında $Re(\epsilon)$ sabit değer almıştır. Şekil 4.8.d'de $f=4,8-5,4$ Ghz aralığında $Im(\epsilon)$ un sabit değer sonuç verdiği gösterilmiştir. Şekil 4.8.b ve d'de $f=4,68$ Ghz'te aynı anda $Re(\mu)=-90,34$ ve $Im(\mu)=-84,59$ minimum negatif değerlerini almıştır. Şekil 4.8.b ve a'da $f=5,49$ Ghz'te $Re(\mu)=147$ maksimum, $Re(\epsilon)=0,27$ minimum değerlerini almıştır.

Şekil 4.9'a göre, $T+$ ve $T-$, 5-15 Ghz frekans aralığında, frekansın bir fonksiyonudur. Tüm kalınlıklar için benzer yansıma ve iletim katsayıları elde edilmiştir. Tüm w değerleri için RCP iletim katsayısı, LCP iletim katsayısından daha büyüktür (Şekil 4.9).



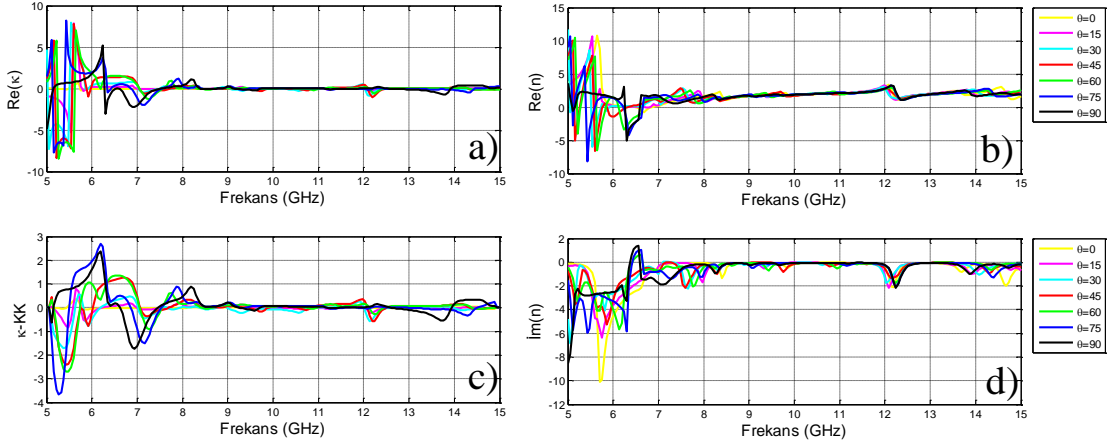
Şekil 4.9. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan BDAM yapısında R, $T+$, $T-$ 'nin gerçel kısmı

4.1.2. Açının parametrik değişimi

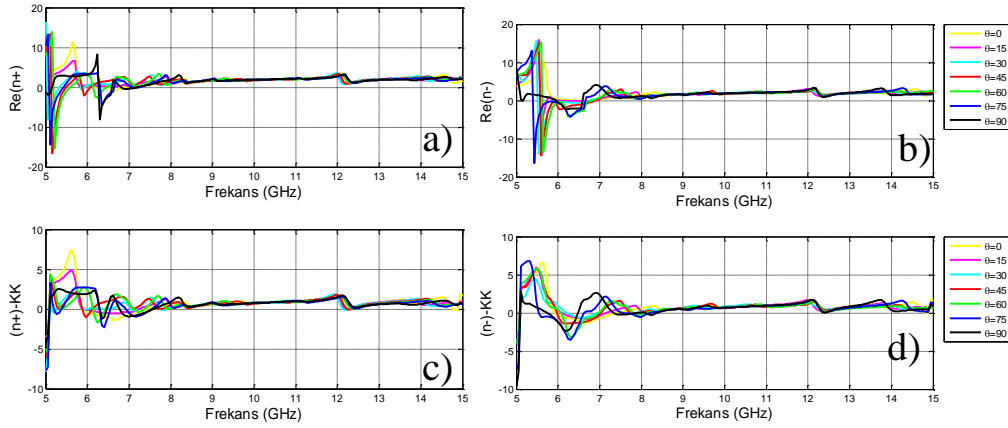
4.1.2.1. 5-15 Ghz Frekans aralığı için

Şekil 4.10.a ve c incelendiğinde, $f=7,2-15$ Ghz aralığında $Re(\kappa)$ ve (κ) -KK sıfıra yakın değeriyle sabit bakışsızlık özelliği göstermektedir. Bu frekans aralığında $n+,n-$ ve n pozitifdir. $f=5-7,2$ Ghz aralığında ise $Re(\kappa)$ ve (κ) -KK işaret değiştirmiştir.

$f=7,3$ Ghz'in üzerinde n - sabit ve sıfıra yakın değer almaktadır. Şekil 4.10.b ve d'de $f=5,43$ Ghz'te $\theta=75^\circ$ 'de $Re(n)=-8,19$ ve $Im(n)=-5,96$ minimum değerleriyle negatif kırılma indisi özelliği gösterir. Şekil 4.11.a ve c'de $f=5,1$ Ghz'te $\theta=75^\circ$ 'de $Re(n+)=-14,46$ ve $(n+)-KK=-7,2$ minimum değerleriyle negatif kırılma indisi özelliği gösterir.



Şekil 4.10. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan BDAM yapısının κ (bakışsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları



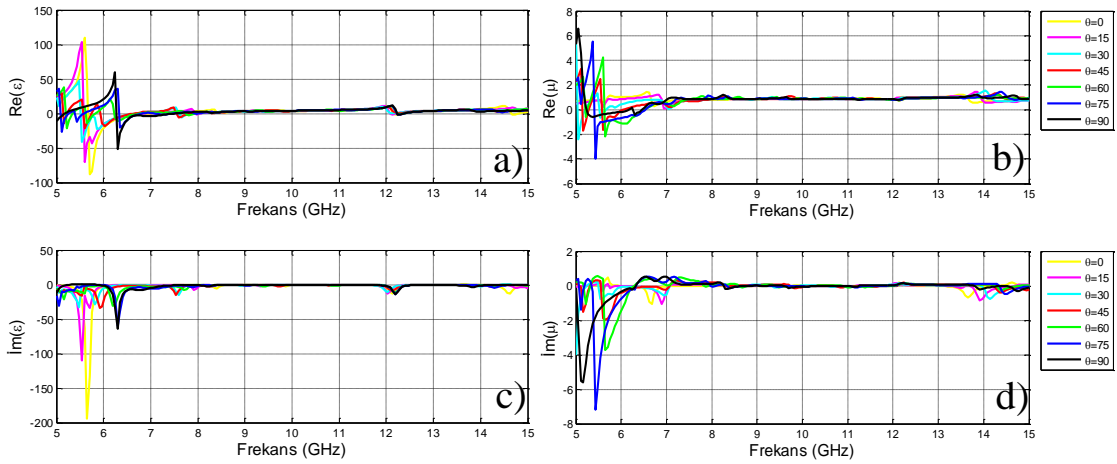
Şekil 4.11. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan BDAM yapısının $n+$ ve $n-$ kırılma indislerinin gerçel ve sanal kısımları

RCP kırılma indisi $f=5,1$ Ghz'te, LCP kırılma indisi $f=5,3$ Ghz'te rezonansa girerken her iki kırılma indisi de pozitiften negatif işarete geçmiştir. κ , n , ϵ ve μ $\theta=75^\circ$ 'de en düşük sonuçları vermiştir. 8,5-15 Ghz arasında $n+$ ve $n-$ frekanstan bağımsızdır. (Şekil 4.11)

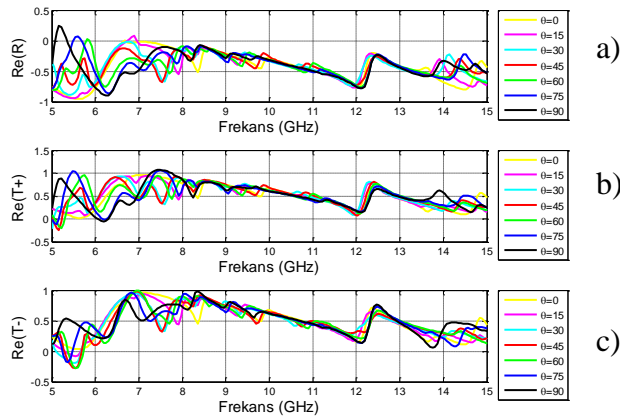
Şekil 4.12.a ve c'de görüldüğü gibi, $\theta=0^\circ$ 'de $f=5,7$ Ghz'te $Re(\epsilon) = -87$ ve $Im(\epsilon) = -194$ minimum değerine ulaşmıştır. Ayrıca $f=7-15$ Ghz arası, $Re(\epsilon)$ ve $Im(\epsilon)$ sabittir. $f=6-15$ Ghz aralığında $\theta=90^\circ$ 'de $Re(\mu)$ ve $Im(\mu)$ sabittir.

Şekil 4.12.a ve b'de görüldüğü gibi, $f=7-15$ Ghz aralığında $Re(\mu)$ ve $Re(\epsilon)$ sabittir, $Re(\mu)$ sıfıra yakındır, $f=7,5$ Ghz'te $Re(\epsilon)$ sıfırdır. Şekil 4.10'da $f=5,43$ Ghz'te $\theta=75^\circ$ 'de $Re(n) = -8,19$ ve $Re(\kappa) = 8,21$ sırasıyla minimum ve maksimum değerlerini almıştır.

Elektrik rezonansı $\theta=15^\circ$ için $f=5,5$ Ghz'te negatif ϵ , manyetik rezonans $\theta=75^\circ$ için $f=5,5$ Ghz'te negatif μ verir. ϵ 'un $\theta=15^\circ$ 'de rezonansı diğer açı değerlerine göre en keskin rezonanstır. ϵ ve μ $f=5-6,5$ Ghz arası negatif değer almaktadır (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan BDAM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları

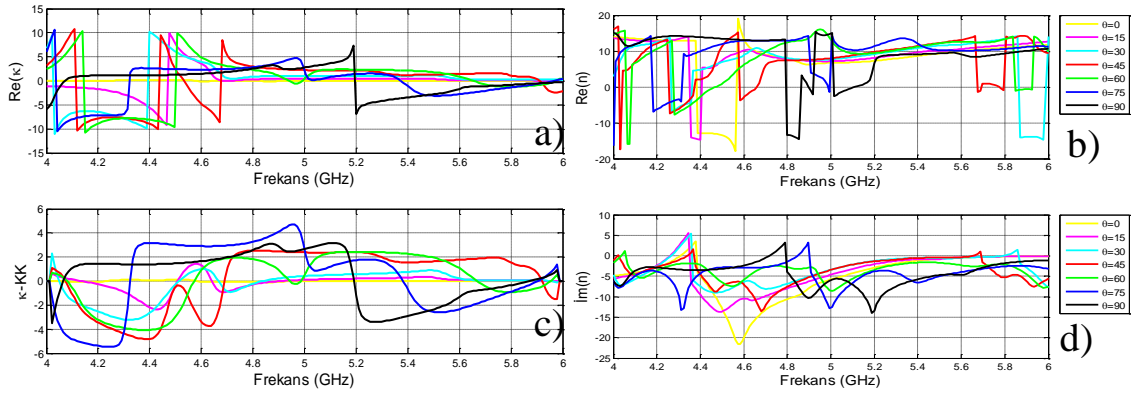


Şekil 4.13. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan BDAM yapısında R, T+, T-'nin gerçel kısmı

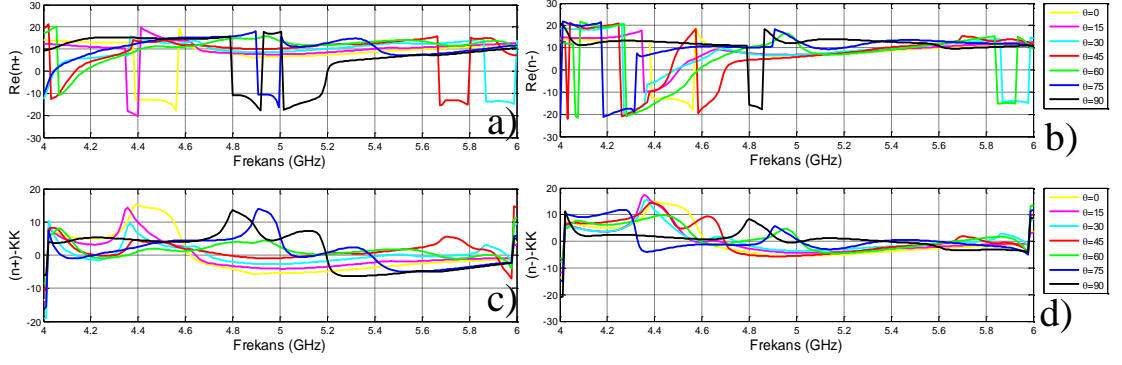
R, T+, T-'nin frekansa göre cevabı değişkendir. Yani R, T+, T- frekansın bir fonksiyonudurlar. RCP iletim katsayısı, LCP iletim katsayısından daha büyüktür (Şekil0.8). $f=9-15$ Ghz frekans aralığında, T+ T-'ye benzerdir (Şekil 4.13).

4.1.2.2. 4-6 Ghz Frekans aralığı için

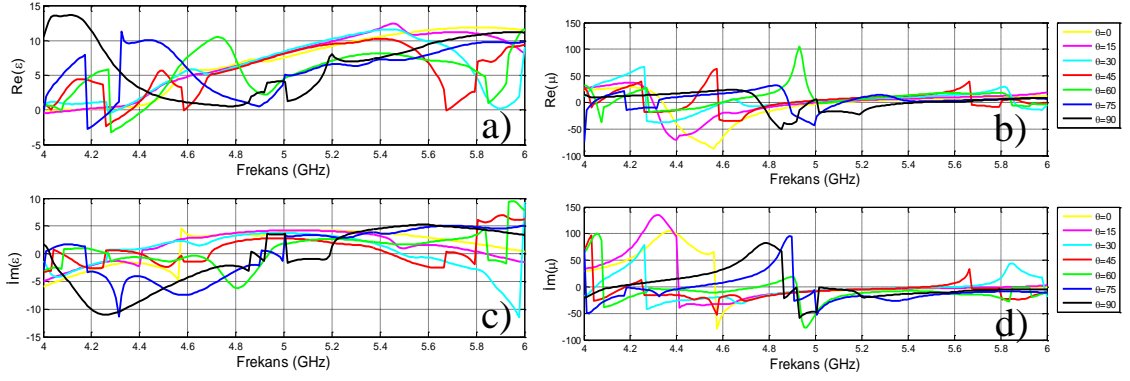
κ , $f=4-4,5$ Ghz arasında rezonansa girmiş ve negatif değer almıştır, bu esnada n de rezonansa girmekte ve negatif değere almaktadır (Şekil 4.14). $f=4,4$ Ghz'te κ rezonansa girmiş ve bu frekansta $n^+ = -20,31$ değerini almıştır (Şekil 4.15, bakışimsızlığa bağlı negatif kırılma indisi). Şekil 4.15'te $\theta=15^\circ$ için, rezonans frekansı $f=4,4$ Ghz'te $n^- = -9,13$, $n^+ = -20,31$ değerindedir. Çoğu açı değeri için negatif kırılma indisi, $f=4-5$ Ghz frekans aralığında elde edilebilir. n^+ 'ya kıyasla n^- 'nin negatif olduğu frekans bölgesi daha çok 4-5Ghz frekanslarına yoğunlaşmıştır. μ , 5 Ghz'ten yukarıda sabit değer izlemiştir. $f=5-6$ Ghz frekans aralığında μ , frekansın bir fonksiyonu değildir. κ 'nın rezonansa girdiği 4,6 Ghz'te μ , ϵ ve n de rezonansa girmiştir (Şekil 4.16). R,T+, ve T- frekansın bir fonksiyonudur (Şekil 4.17).



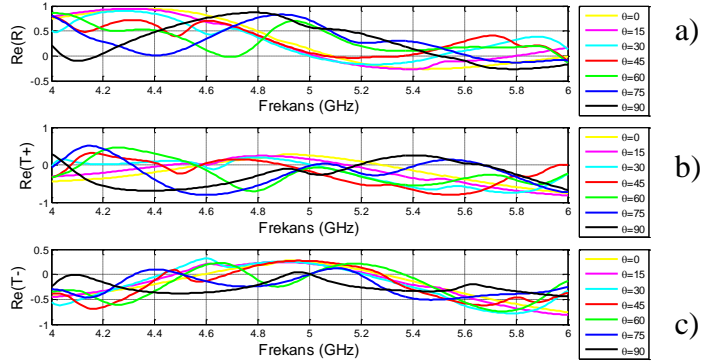
Şekil 4.14. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan BDAM yapısının κ (bakışimsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları



Şekil 4.15. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan BDAM yapısının n^+ ve n^- kırılma indislerinin gerçel ve sanal kısımları



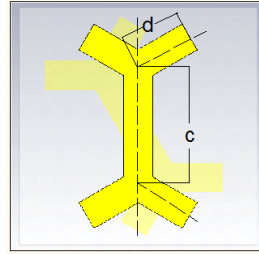
Şekil 4.16. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan BDAM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları



Şekil 4.17. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan BDAM yapısında R , T^+ , T^- 'nin gerçel kısmı

4.2. ÇYM Yapısı

5-15 Ghz ve 4-6 Ghz frekans aralıklarında, şerit kalınlığı ve rezonatör açısı değiştirilerek oluşturulan ÇYM yapısı, CST MWS ile simüle edilmiştir (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. ÇYM yapısı

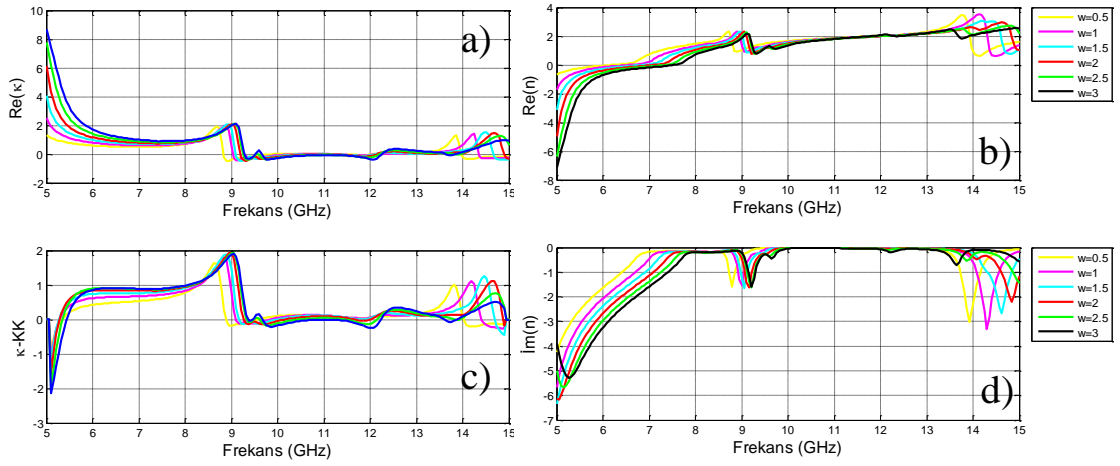
4.2.1. Kalınlığın parametrik değişimi

4.2.1.1. 5-15 Ghz Frekans aralığı için

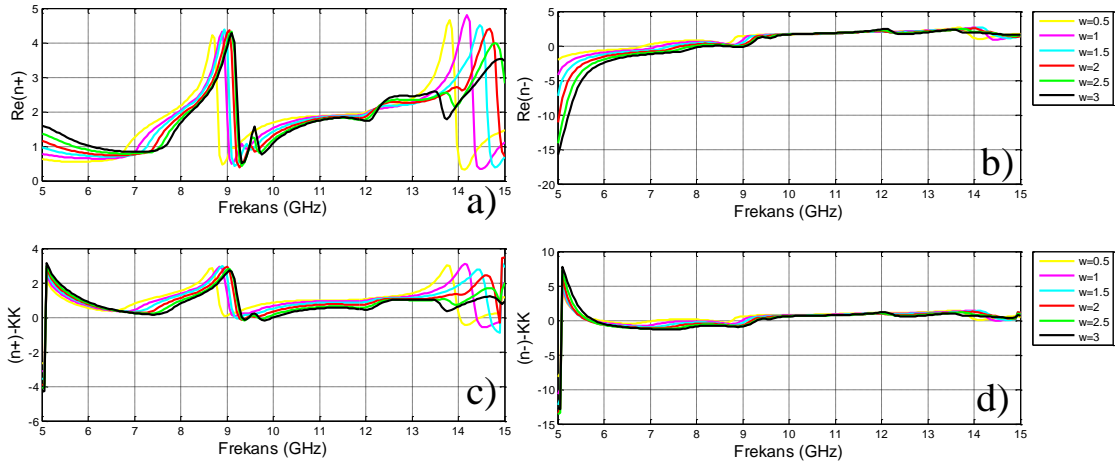
Şekil 4.19'da $w=3$ mm için $f=5$ Ghz'te $\kappa =8$ olup yüksek bakışimsızlık göstermiştir. BDAM yapısı, $f=9,3-12$ Ghz arasında $Re(\kappa)$ ve κ -KK'ya bakıldığında düşük bakışimsızlık özelliği göstermiştir. κ 'nın rezonansa uğradığı $f=9$ Ghz'te $Re(n+)$ ve $(n+)$ -KK'nın da rezonansa girdiği Şekil 4.20'de görülmektedir.

Şekil 4.19 ve 4.20'ye bakıldığında, 9 Ghz'in üstündeki frekanslarda κ sifıra yakındır. $f=5-9$ Ghz'te κ sifirdan farklı, bakışimsızlığa bağlı olarak ta $n+$, $n-$ ve n negatif değerlere sahiptir.

Şekil 4.20'ye baktığımızda $f=5-15$ Ghz aralığında, $Re(n+)$ pozitif değerler almış, $f=5-7$ Ghz arası $Re(n-)$ negatif değerler almıştır. Sonuç olarak ÇYM yapısı için $f=5-15$ Ghz aralığında tüm kalınlıklarda benzer sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.19. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇYM yapısının κ (bakışsımsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları

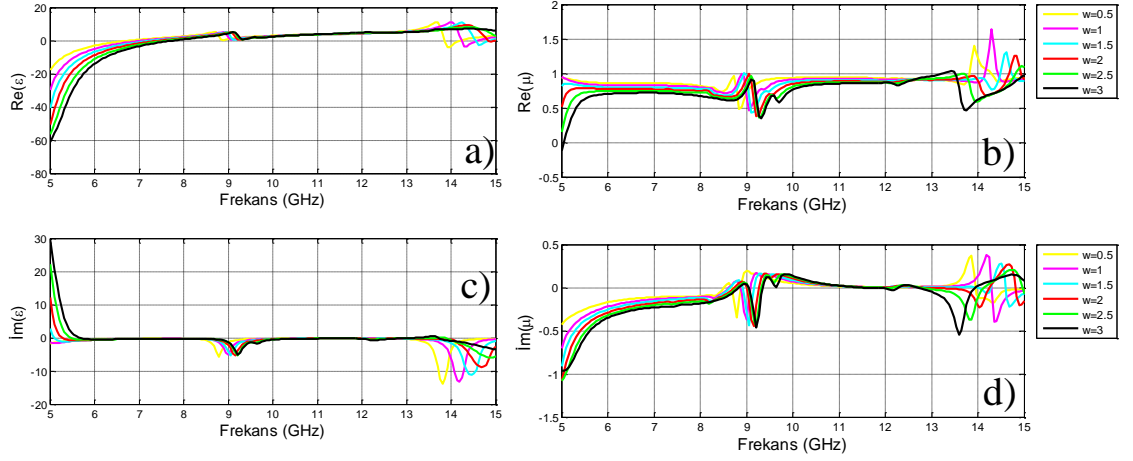


Şekil 4.20. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇYM yapısının n^+ ve n^- kırılma indislerinin gerçel ve sanal kısımları

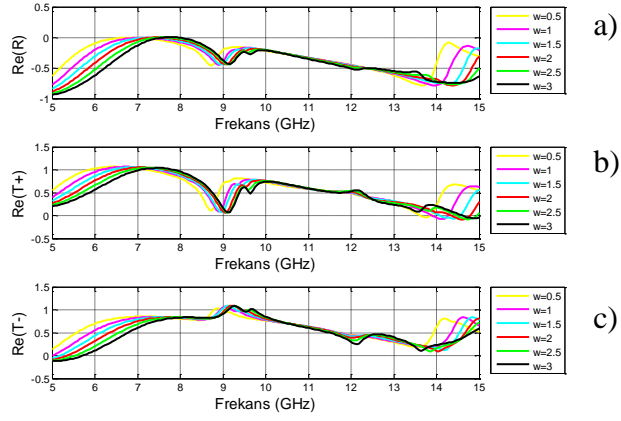
Şekil 4.21.a'da ϵ , $f=5-7,5$ Ghz arasında negatif, $f=7,5-15$ Ghz arasında pozitif değere sahiptir. $Re(\mu)$, $f=5-15$ Ghz arasında her frekansta pozitif değere sahiptir.

Şekil 4.21'de $f=5$ Ghz'te $w=3$ mm için, $Re(\epsilon)=-60$ değerine ulaşmıştır. $f=5-9$ Ghz aralığında $Re(\kappa)$ sıfırdan farklıdır ve $f=5-7$ Ghz aralığında, $Re(\epsilon)$ negatif, $Re(\mu)$ pozitif olup, $Re(n)$ negatiftir (bakışsımsızlığa bağlı negatif kırılma indisi).

Şekil 4.22'ye göre 5-10 Ghz arasında T^+ , T^- 'den daha büyüktür.

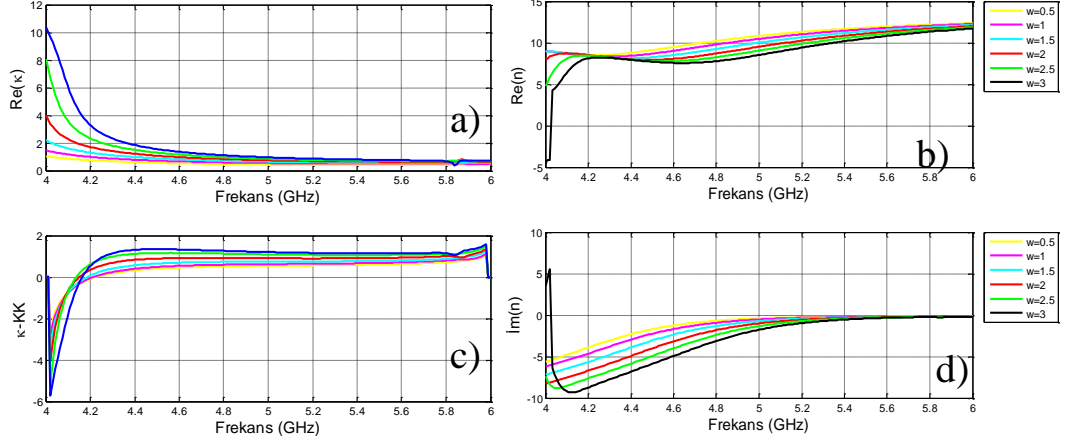


Şekil 4.21. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇYM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları



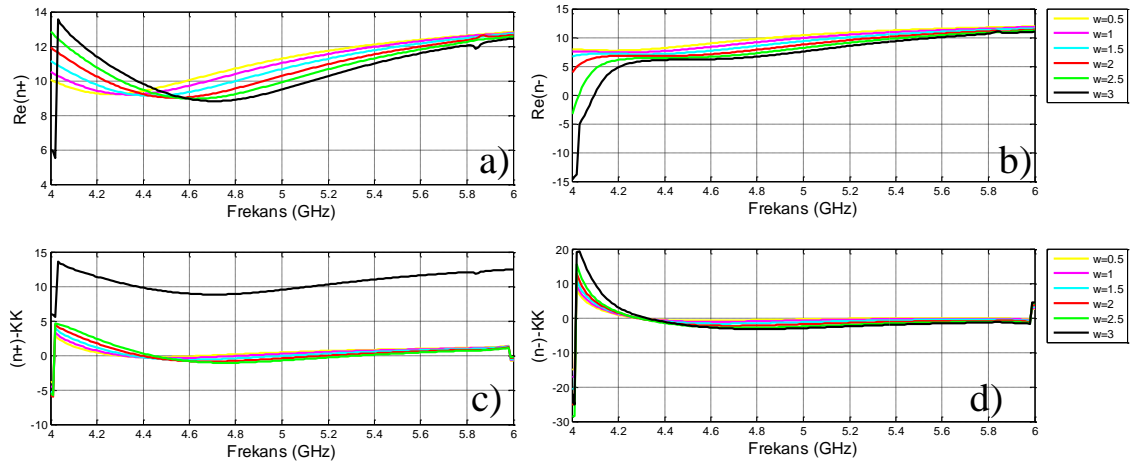
Şekil 4.22. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇYM yapısında R, T+, T-'nin gerçel kısmı

4.2.1.2. 4-6 Ghz Frekans aralığı için



Şekil 4.23. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇYM yapısının κ (bakışsımsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları

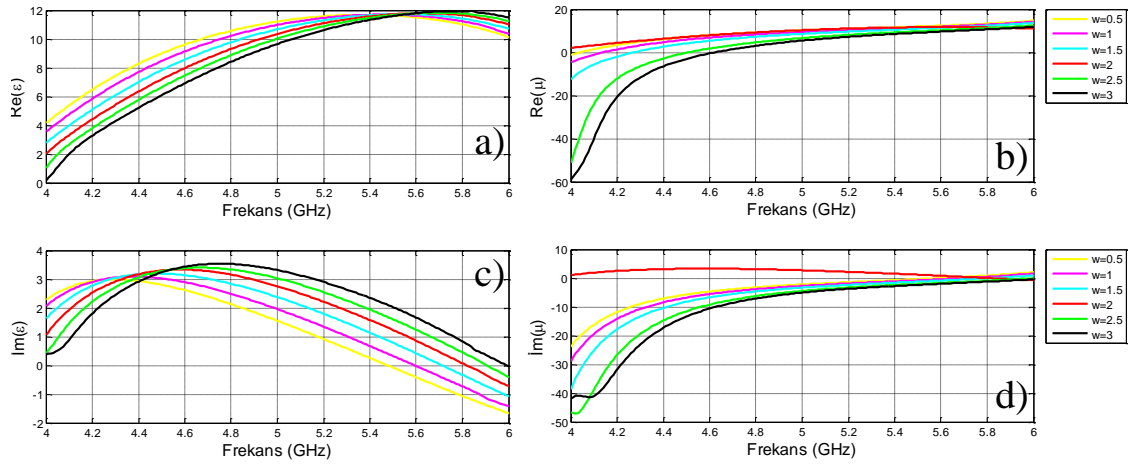
Şekil 4.23'de ÇYM yapısı, $f=4,4-6$ Ghz aralığında sabit bakışsımsızlık özelliği göstermiştir. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24 incelendiğinde, κ 'nın sifira yakın olduğu bölgede, $n+$ ve $n-$ 'nin pozitif değer aldığı görülmektedir.



Şekil 4.24. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇYM yapısının n^+ ve n^- kırılma indislerinin gerçel ve sanal kısımları

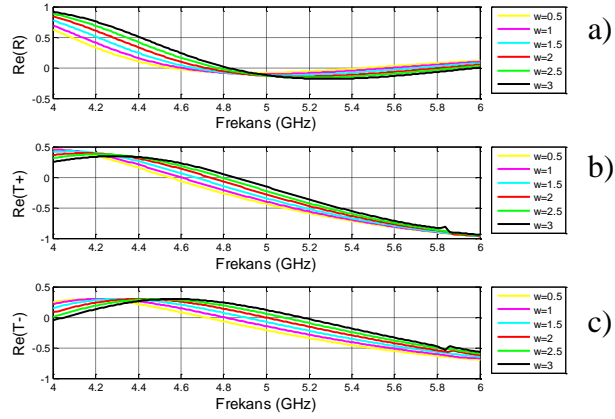
Şekil 4.23 ve 4.24'te görüldüğü gibi, $w=3$ mm için, $f=4$ Ghz'te κ sıfırdan farklıdır, $Re(n)=-14,73$ $Re(n)=-4,35$ olup, bakışimsızlığa bağlı negatif kırılma indisi elde edilmiştir.

Şekil 4.23 ve 4.24'te $Re(n)$ 'nin bütün kalınlıklarda benzer sonuç verdiği, $Im(n)$ 'nin $f=4,1$ Ghz'te minimum -15 değerini aldığı, $Re(n)$ değerlerinin $Re(n)$ değerlerine çok yakın olduğu, $Im(n)$ 'in de $f=4,1$ Ghz'te minimum -10 olduğu görülmektedir.



Şekil 4.25. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇYM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları

Şekil 4.25'te ϵ ve μ 'nün gerçel ve sanal kısımları verilmiştir. $w=2$ mm'de $Re(\mu)$ frekansa bağlı olarak daha yavaş artmıştır. $w=3$ mm için, $f=5.8$ Ghz'te $Re(\epsilon)=11.94$, $f=4.75$ Ghz'te $Im(\epsilon)=3.54$ maksimum değerini almıştır. $f=4-4,6$ Ghz arasında μ negatif değerdedir. $f=4$ Ghz'te $Re(\mu)=-60$ 'tır. Şekil 4.25'te $Re(\epsilon)$ 'un 4-6 Ghz aralığında pozitif olduğu görülmektedir. $f=4$ Ghz'te $w=3$ mm için $\kappa=10,37$ iken $n=-4,35$ 'tir. (Bakışimsızlığa bağlı negatif kırılma indisi)

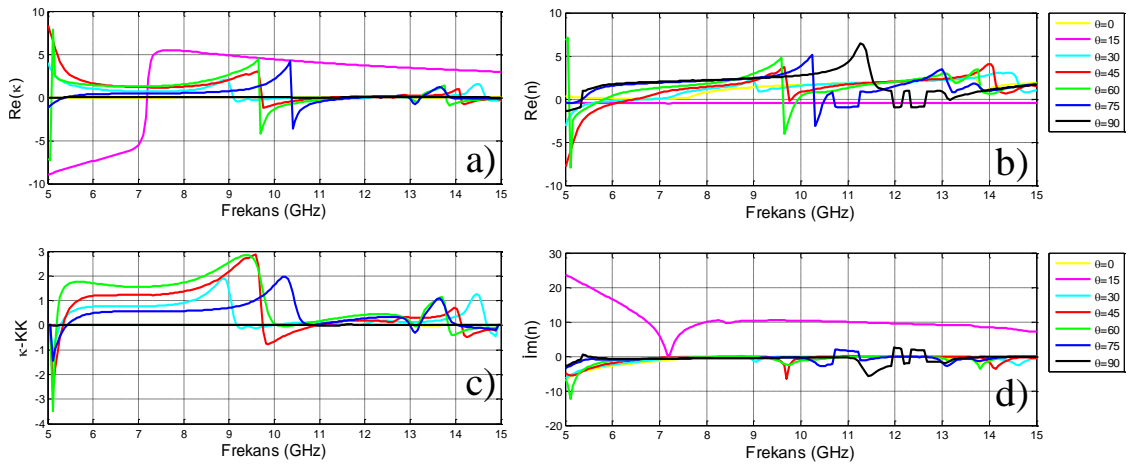


Şekil 4.26. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇYM yapısında R, T+, T-'nin gerçel kısmı

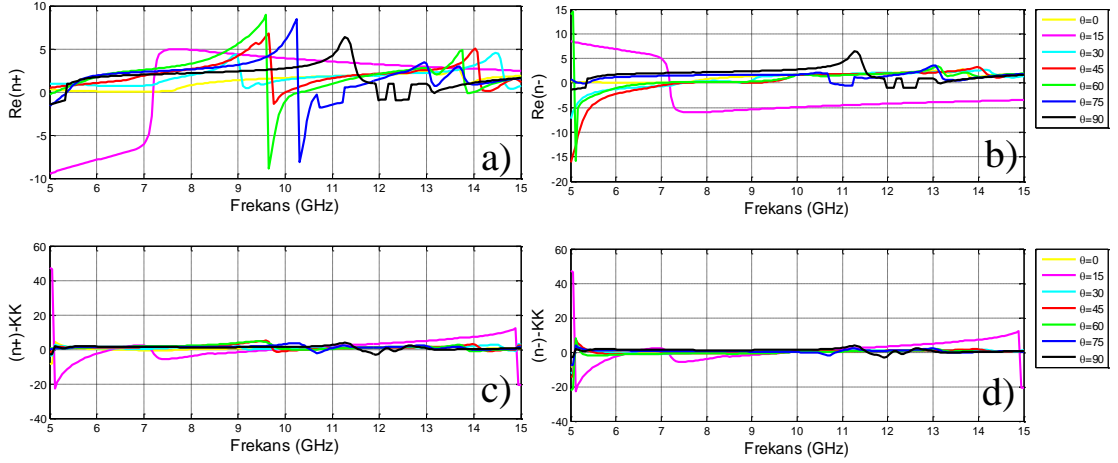
Şekil 4.26'da $f=4-6$ Ghz aralığında $Re(n+)$ pozitif değerli olup, R, T+ ve T- yansıma ve iletim katsayıları herhangi bir rezonans ve bant özelliği dolayısıyla da frekans seçici yüzey özelliği göstermemektedir.

4.2.2. Açının parametrik değişimi

4.2.2.1. 5-15 Ghz Frekans aralığı için



Şekil 4.27. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇYM yapısının κ (bakışsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları

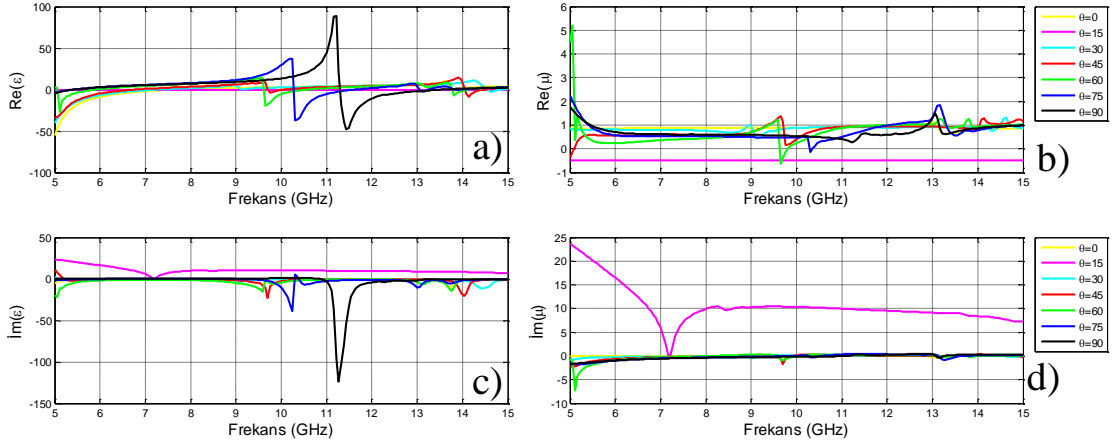


Şekil 4.28. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇYM yapısının n^+ ve n^- kırılma indislerinin gerçel ve sanal kısımları

Şekil 4.27'de ÇYM yapısı, $f=4,4-6$ Ghz aralığında sabit bakışsızlık özelliği göstermiştir. Şekil 4.27ve Şekil 4.28 incelendiğinde, κ 'nın sıfıra yakın olduğu bölgede, n^+ ve n^- 'nin pozitif değer aldığı görülmektedir.

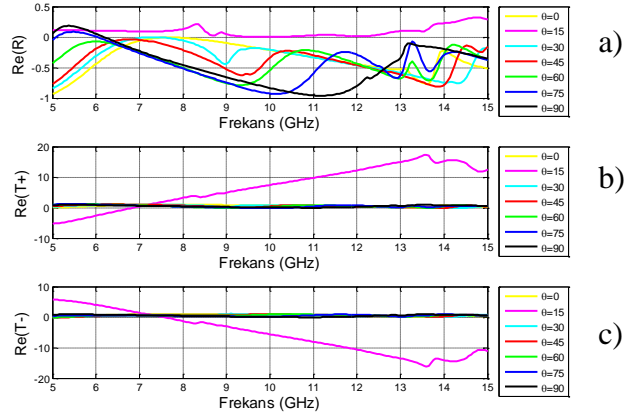
Şekil 4.28'da gösterildiği gibi, $\theta=60^\circ$ için $f=9.64$ Ghz'te κ rezonansa girmiş, κ 'ya bağlı olarak n^+ da $-8,85$ negatif kırılma indisi özelliği taşımıştır. Ayrıca 5-15 Ghz frekans aralığında $\theta=15^\circ$, 45° ve 75° açıları için de rezonans görünmektedir.

Şekil 4.27 ve Şekil 4.28 incelendiğinde, $\theta=15^\circ$ için $f=7,162$ Ghz'te κ , n^+ ve n^- 'nin rezonansa girdiği söylenebilir. Şekil 4.27.a ve c'ye bakıldığında $\theta=75^\circ$ için, $f=10.35$ Ghz'te κ rezonansa girer. Bu frekansta n^+ ve n^- negatif kırılma indisi özelliği taşır. 5-15 Ghz için tasarlanmış ÇYM yapısında $f=10,3$ Ghz'te κ , n^- ve n^+ rezonansa girmiştir. (Şekil 4.28)



Şekil 4.29. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇYM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları

Şekil 4.29'da $\theta=75^\circ$ de $f=10.35$ Ghz 'te $Re(\epsilon)$ da rezonansa girmiştir. ϵ , $f=11,27$ Ghz'te rezonansa girmiş, maksimum 88,64, minimum -48,32 değerini almıştır. $\theta=60^\circ$ için κ 'nın rezonansa girdiği $f=9.64$ Ghz'te, μ de rezonansa girmiştir. $Re(\mu)$, 5-15 Ghz frekans aralığında çok düşük değere sahiptir.

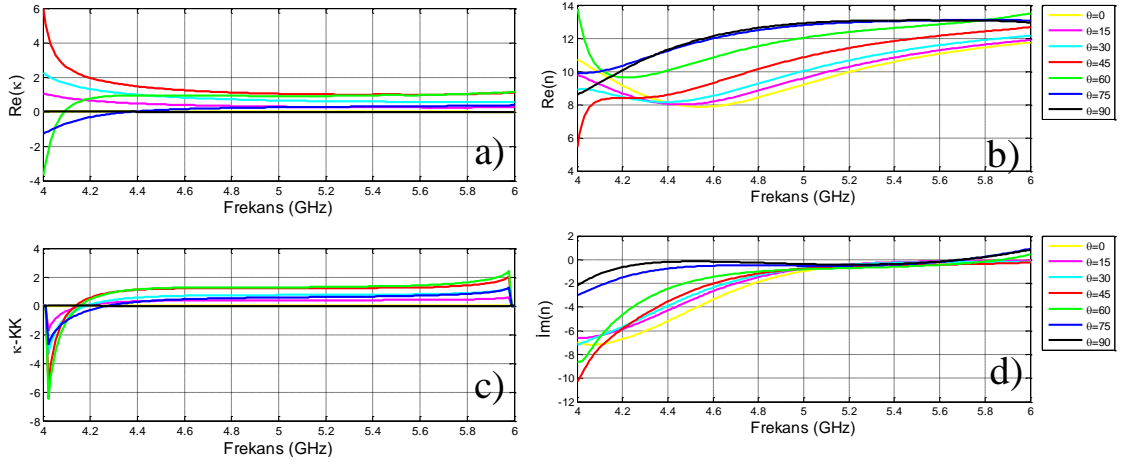


Şekil 4.30. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇYM yapısında R, T+, T-'nin gerçel kısmı

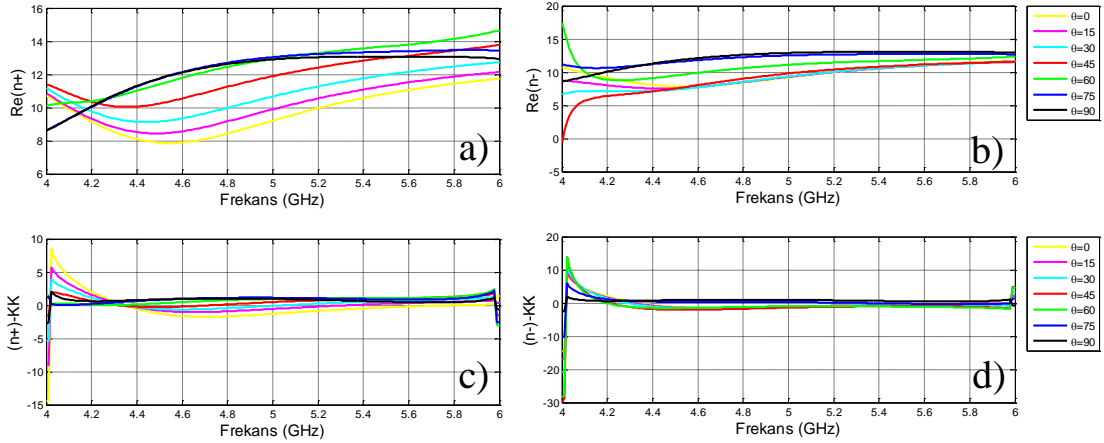
Şekil 4.30'dan görüldüğü gibi, $f=5-13$ Ghz arası $\theta=15^\circ$ için yansımaya çok düşük, iletim ise yüksektir. Diğer açılarda ise, yansımaya sıfırdan farklı, iletim ise sıfıra çok yakındır.

Sonuç olarak ÇYM yapısında, 5-15 Ghz frekans aralığında, $\theta=15^\circ$ açısı diğer açılara göre farklı sonuç vermiştir.

4.2.2.2. 4-6 Ghz Frekans aralığı için



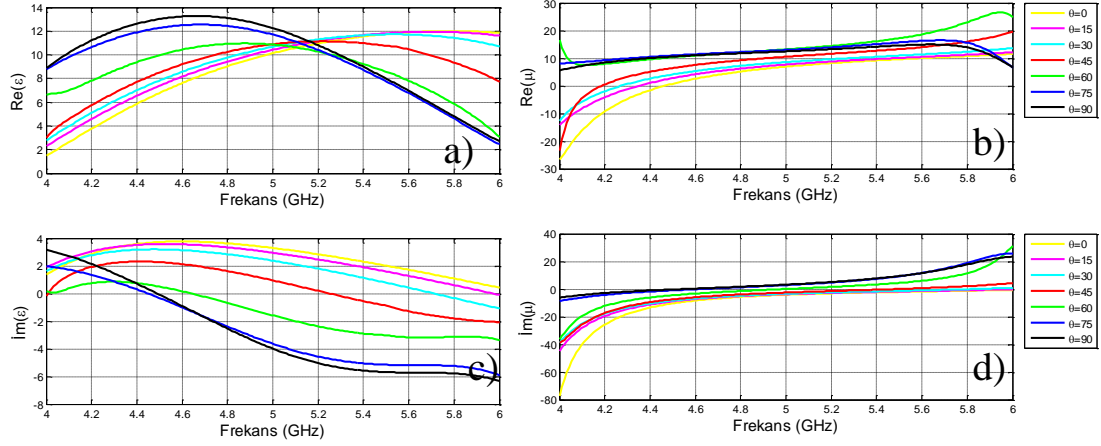
Şekil 4.31. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇYM yapısının κ (bakışsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları



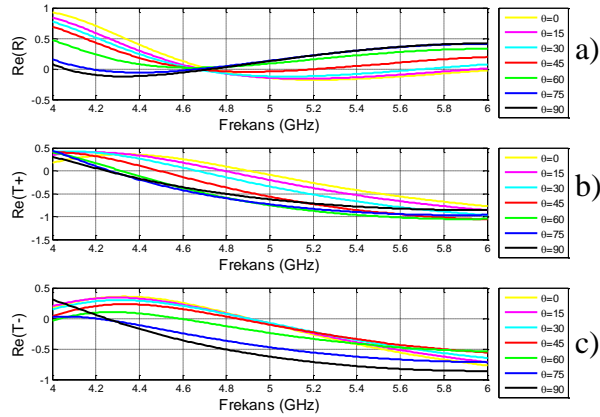
Şekil 4.32. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇYM yapısının n^+ ve n^- kırılma indislerinin gerçel ve sanal kısımları

Şekil 4.31'de ÇYM yapısı, $f=4,4-6$ Ghz aralığında sabit bakışsızlık özelliği göstermiştir. Şekil 4.31 ve Şekil 4.32 incelendiğinde, κ 'nın sifıra yakın olduğu bölgede, n^+ ve n^- 'nin pozitif değer aldığı görülmektedir. 4-6 Ghz frekans bandında düşük κ özelliği görülmektedir. κ düşük değere sahip olduğu için n^+ pozitif değerde seyretmektedir. (Şekil 4.32) Şekil 4.32 incelendiğinde, 4-6 Ghz frekans aralığında, düşük κ 'ya bağlı olarak n^- ve n^+ pozitiftir. Şekil 4.31'de gösterildiği gibi $\theta=45^\circ$ için $f=4\text{Ghz}$ 'te $\text{Re}(\kappa)=4,91$ maksimum, gibi $\theta=60^\circ$ için minimum $\text{Re}(\kappa)= -3,69$ değerini

almaktadır. ÇYM yapısı için 4-6 Ghz'te çalışan ϵ ve μ 'nün gerçel ve sanal kısımları Şekil 4.33'te verilmiştir. Şekil 4.32 ve 4.33'te sabit κ özelliği görülürken, aynı frekans aralığındaki μ , ϵ ve n değerleri gösterilmiştir. 4-6 Ghz için tasarlanan ÇYM yapısında κ 'nın sabit olması durumunda n^+ ve n^- de pozitifdir (Şekil 4.32).



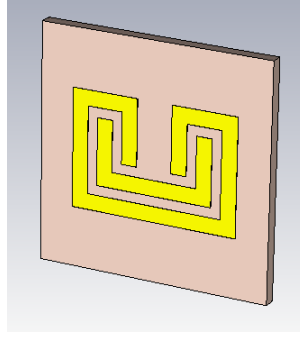
Şekil 4.33. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇYM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları



Şekil 4.34. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇYM yapısında R , T^+ , T^- 'nin gerçel kısmı

4.3. ÇZM Yapısı

Oluşturulan ÇYM yapısının 5-15 Ghz ve 4-6 Ghz frekans aralıklarında simülasyonu, şerit kalınlığı ve rezonatör açısı değiştirilerek, CST MWS ile gerçekleştirilmiştir.

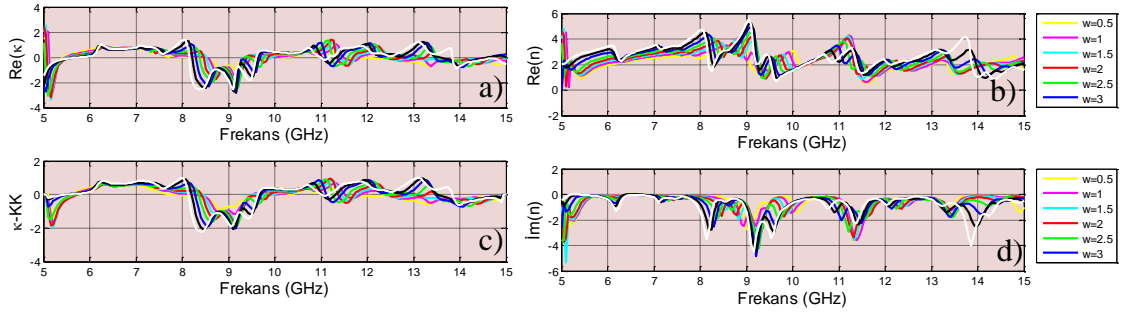


Şekil 4.35. ÇZM Yapısı

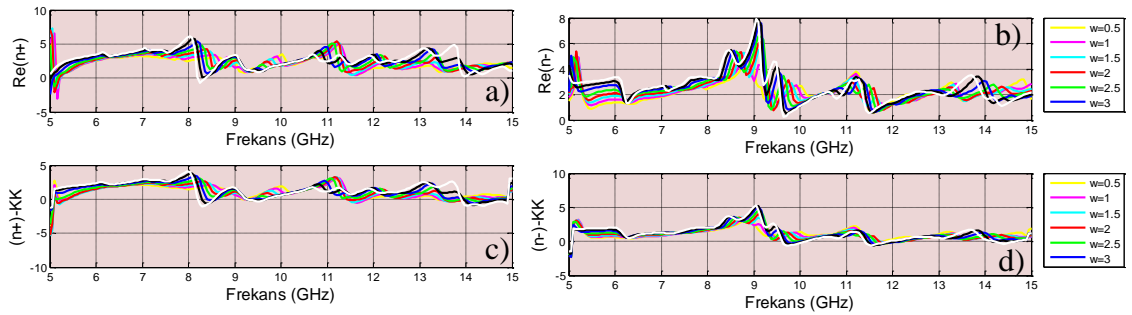
4.3.1. Kalınlığın parametrik değişimi

4.3.1.1. 5-15 Ghz Frekans aralığı için

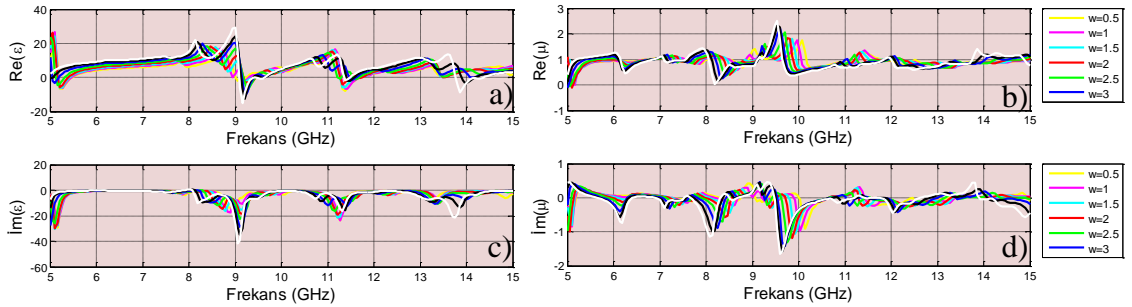
Bakımsızlığın frekansa göre değişimi değişik “w” değerleri için Şekil 4.36'da gösterilmiştir. Tasarlanan ÇZM yapısı düşük değerlikli κ değerini neredeyse sabit bir biçimde 6-7.5 GHz aralıklarında göstermekte ve literatürdeki çalışmalardan bilindiği üzere düşük değerlikli κ değeri özellikle polarizasyon dönüştürücüler için gerekli olmaktadır. 9.75-10.75 GHz civarında bu değer neredeyse sıfıra yakın olmakta ve sıfıra yakın κ değerinin kullanılabilceği alanlar için uygun bir yapı adayı olmaktadır. Bant genişliğinin özellikle bu değer için neredeyse 1 GHz olması tasarım esnekliği sağlayacaktır. RCP ve LCP dalgalar için kırılma indisinin frekansa göre değişimi Şekil 4.37'de görülmektedir.



Şekil 4.36. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇZM yapısının κ (bakışimsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları

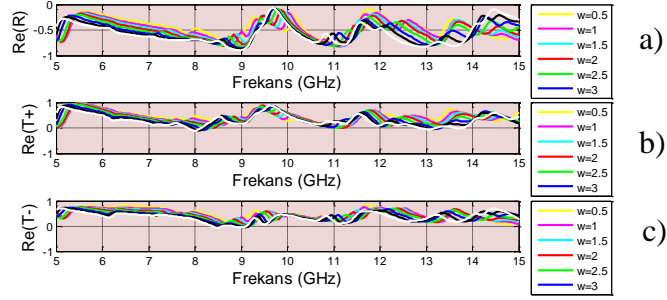


Şekil 4.37. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇZM yapısının n^+ ve n^- kırılma indislerinin gerçel ve sanal kısımları



Şekil 4.38. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇZM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları

ϵ ve μ 'nün frekansa bağlı değişimleri Şekil 4.38'de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi elektrik geçirgenlik değeri üç band aralığında negatif değerleri almakta ve küçük bir bant aralığında negatif olarak devam etmektedir. Bu durum çok bantlı uygulamalarda avantaj sağlayacaktır.



Şekil 4.39. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇZM yapısında R, T+, T-'nin gerçel kısmı

Şekil 4.39'da Yansıma (R) ve İletim (T) parametrelerinin yanında RCP ve LCP kırılma indislerinin 5-15 GHz bant aralığındaki değişimi elektromanyetik emilim özelliğini gösterebilmek açısından verilmiştir.

4.3.1.2. 4-6 Ghz Frekans aralığı için

κ 'nın 4-6 GHz bant aralığında frekansa bağımlı değişimi şekilde verilmiştir. Şekil 4.40'da “w” değerinin 0.25-2 arasında değişimine bağlı olarak, κ farklı renkteki eğrilerle gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere “w” değeri eğrilerin yerini veya genliğini çok fazla etkilememektedir. Ve küçük bakışimsızlık değeri neredeyse tüm bant boyunca elde edilmektedir. Küçük bakışimsızlık değeri özellikle polarizasyon döndürücü uygulamalarında kullanılabilir önemli bir faktördür. Şekilden anlaşılacağı gibi, eğrilerimiz sabit ve küçük değerlikli bakışimsızlık elde etmek için yapımızın uygun bir aday olduğunu desteklemektedir.

Şekil 4.41'de yapımızın negatif kırılma indisinin Sağ Dairesel Polarize (RCP) ve Sol Dairesel Polarize (LCP) dalgalar için $f=4-6$ GHz frekans bandı aralığında değişimi şekilde görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi 4GHz civarında yapımız rezonans sağlamaktadır ve “w” değerleri arttıkça rezonans noktamız sola kaymaktadır.

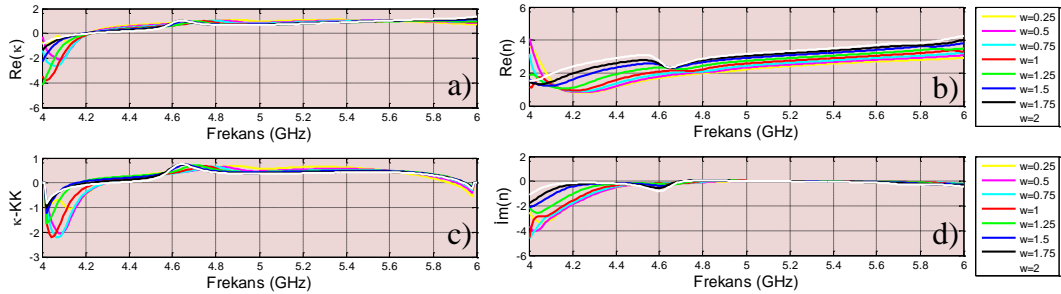
Altteki şekilde yapımızın negatif kırılma indisinin 4-6 GHz frekans aralığı için değişimi verilmektedir.

Şekil 4.40'ta bakışsızlık katsayısının gerçel ve sanal değerlerinin frekansa bağlı değişimleri ve karakteristik empedansın “w” parametresinin değişimiyle f=4-6 GHz bandında nasıl bir değişim gösterdiği görülmektedir.

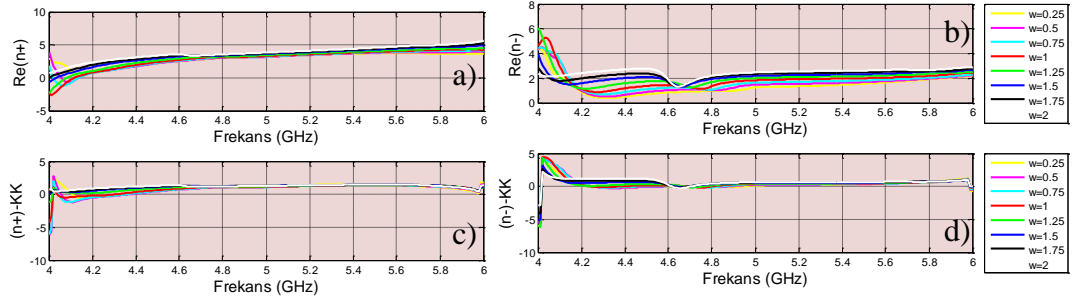
Şekil 4.42, elektriksel geçirgenlik ϵ 'un frekansla değişimini göstermektedir. Şekil 4.42'den görüldüğü gibi rezonans noktasında (4 GHz civarı) ϵ değeri negatif olmakta ve “w” değişimiyle doğrusal sayılabilecek bir tarzda sola doğru kaymaktadır. Manyetik geçirgenlik μ katsayısının değişimi f=4-6 GHz bant aralığı için gösterilmektedir. Şekil 4.42'de hem μ hem de ϵ katsayılarının değişimleri gösterilmektedir.

Şekil 4.42'de görüldüğü gibi rezonans noktamızda hem ϵ hem de μ sıfırdan küçük değerler almaktadır. Bundan yola çıkarak tasarımımızın bu aralıkta Double Negative Metamaterial (DNG) olarak kullanımına imkan sağlayacaktır.

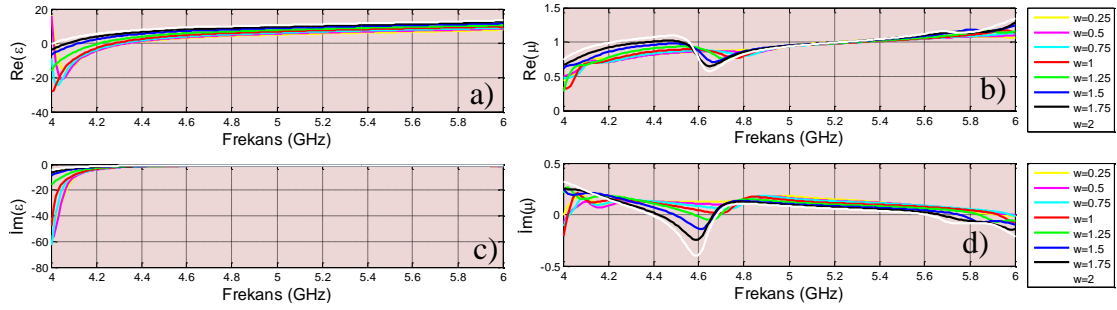
Şekil 4.43'te Yansıma (R-Reflection) ve İletim (T-Transmission) değerlerinin frekansa ve kalınlık değişimine bağlı davranışı görülmektedir. Bu grafiklerde hassasiyetin f=4 GHz civarında yüksek olduğunu gösterip önceki bulgularımızı destekler niteliktedir.



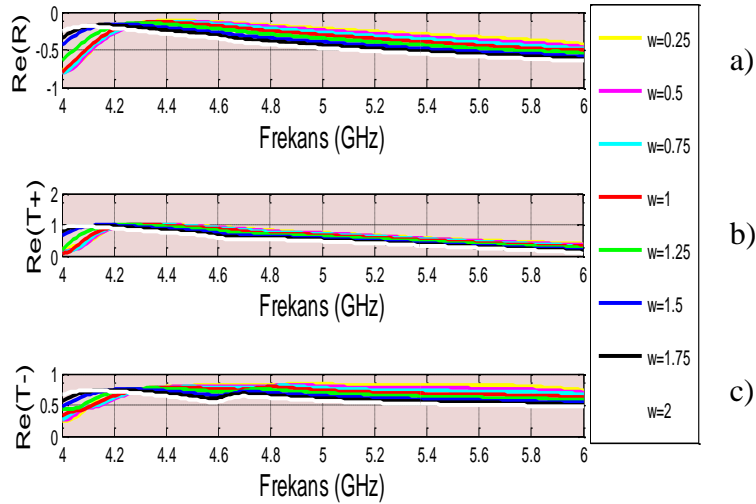
Şekil 4.40. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇZM yapısının κ (bakışsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları



Şekil 4.41. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇZM yapısının n^+ ve n^- değerlerinin gerçel ve sanal kısımları



Şekil 4.42. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇZM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları



Şekil 4.43. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı şerit kalınlıklarıyla tasarlanan ÇZM yapısında R , T^+ , T^- 'nin gerçel kısmı

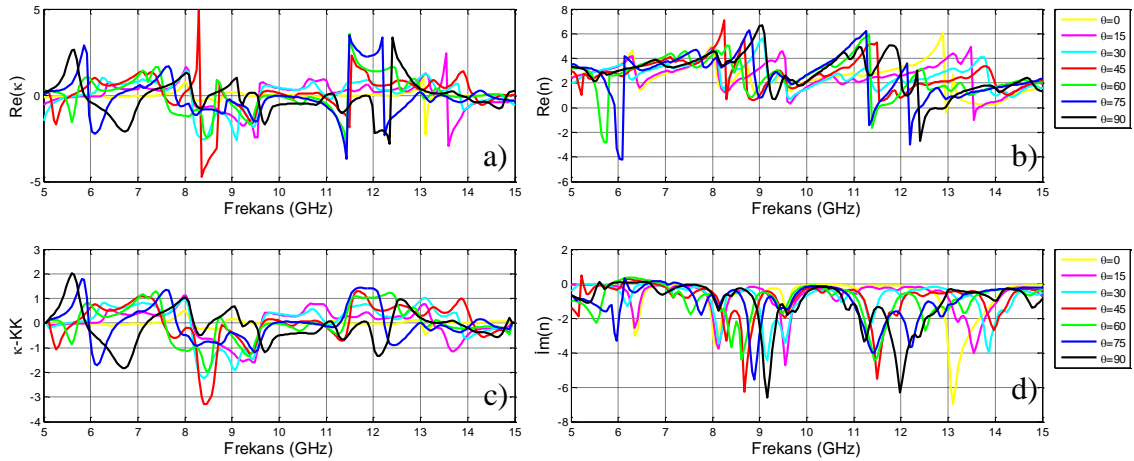
4.3.2. Açının parametrik değişimi

4.3.2.1. 5-15 Ghz Frekans aralığı için

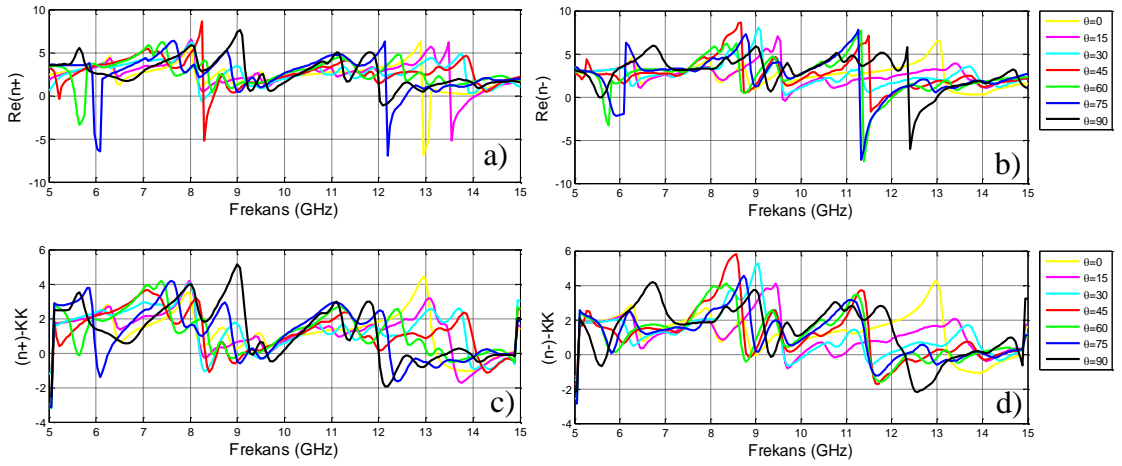
Bakışsızlık katsayısının 5-15 GHz bant aralığında frekansa bağımlı değişimi şekilde verilmiştir. Şekil 4.44'te " θ " açısı değerinin $0-90^0$ arasında 15^0 aralıklarla değişimine bağlı olarak bakışsızlık katsayısı değerlerinin değişimi verilmiştir. Açı değerinin bakışsızlık değerini doğrudan etkilediği beklediğimiz bir sonuçtur ve grafik bunu doğrulamaktadır. Yüksek bakışsızlık değeri aldığımız kısımlar açığa bağlı değişmektedir.

Negatif kırılma indisinin RCP ve LCP dalgalar için 5-15GHz bant aralığında θ açısının değişimine gösterdiği davranış biçimi Şekil 4.45'te görülmektedir.

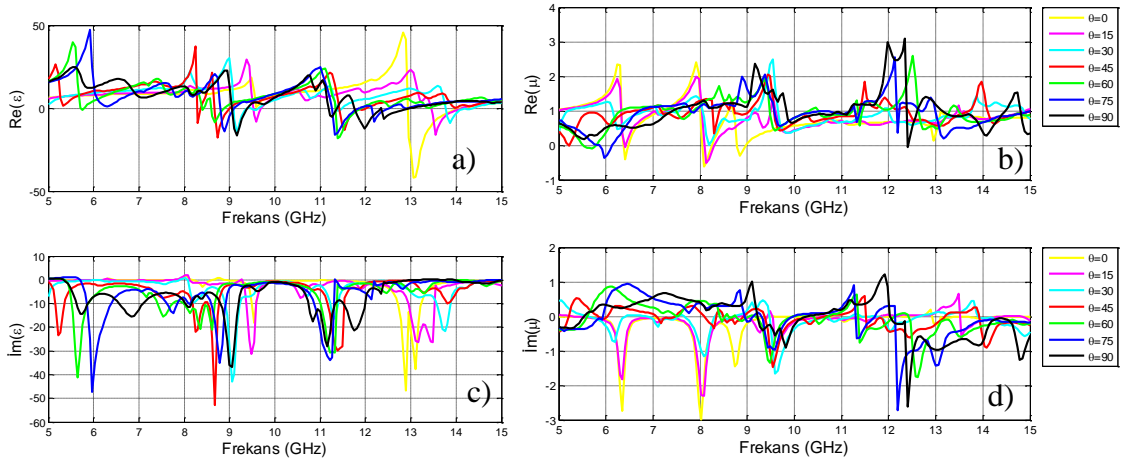
Şekil 4.44'te negatif kırılma indisinin θ açısına bağımlı değişimi şekilde gösterilmektedir. Bakışsızlık katsayısının ve sanal kısımlarının açı ile $f=5-15$ GHz bant aralığında değişimi Şekil 4.44'te görülmektedir.



Şekil 4.44. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇZM yapısının κ (bakışsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları

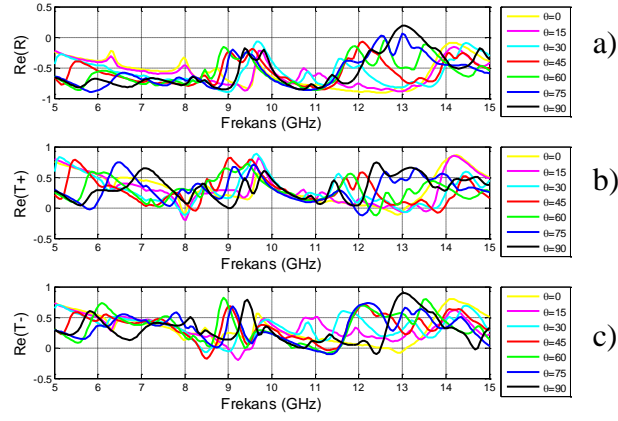


Şekil 4.45. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇZM yapısının n^+ ve n^- değerlerinin gerçel ve sanal kısımları



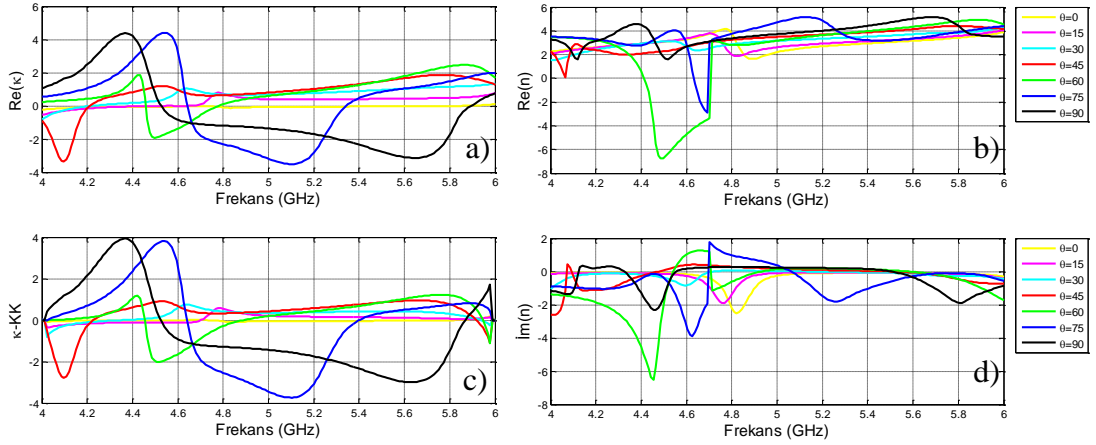
Şekil 4.46. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇZM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları

Şekil 4.46'da görüldüğü gibi, $f=8,3$ Ghz'te κ ile birlikte ϵ ve μ de rezonansa girmektedir. $f=6$ Ghz'te κ rezonansa girmiş, $n = -4,2$, ϵ ve μ de pik değere ulaşmışlardır(Şekil 4.46). Şekil 4.45'te görüldüğü gibi, $\theta=75^\circ$ için $f=12,19$ Ghz'te $n^+ = -6,98$ en düşük negatif kırılma indisi, $f=11,32$ Ghz'te $n^- = -7,28$ en düşük negatif kırılma indisine sahiptir. Yansıma, ileri iletim, geri iletim Şekil 4.47'de verilmiştir. Ayrıca $\theta=30^\circ$ için $f=9,64$ Ghz'te $T^+ = 0,88$ maksimum değeri almıştır.

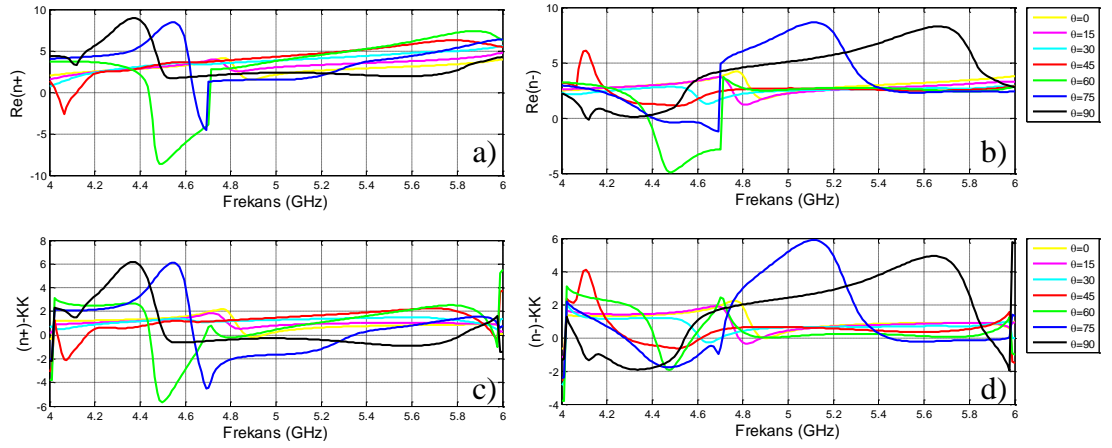


Şekil 4.47. 5-15 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇZM yapısında R, T+, T-'nin gerçel kısmı

4.3.2.2. 4-6 Ghz Frekans aralığı için

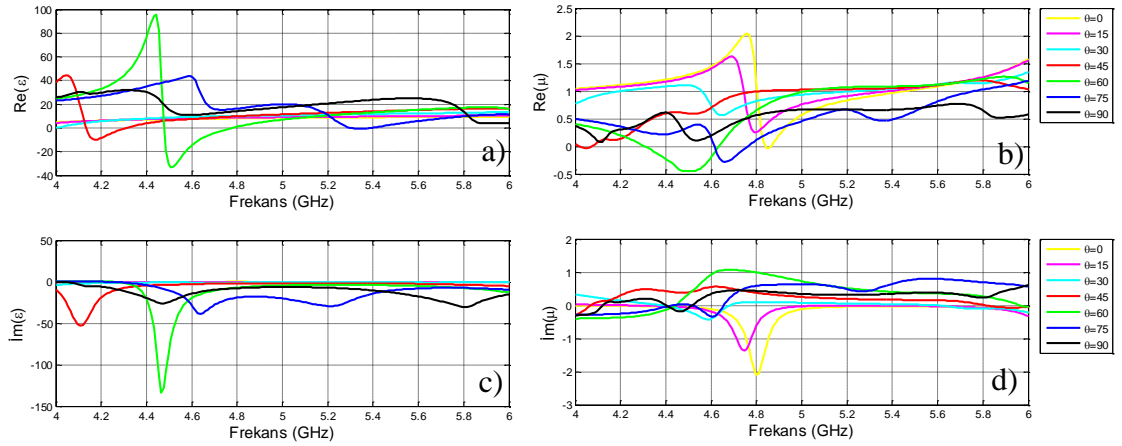


Şekil 4.48. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇZM yapısının κ (bakışimsızlık) ve n (kırılma indisi) değerlerinin gerçel ve sanal kısımları



Şekil 4.49. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇZM yapısının n^+ ve n^- değerlerinin gerçel ve sanal kısımları

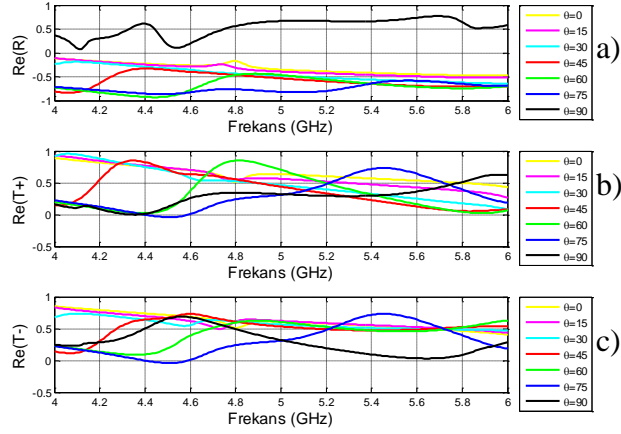
Şekil 4.48 ve 4.49'da $\theta=60^\circ$ için κ , $f=4,45$ Ghz'te rezonansa girmiş, böylece $f=4,48$ Ghz'te $n^+= -8,64$ negatif kırılma indisi görülmüştür. (bakışimsızlığa bağlı negatif kırılma indisi). Aynı rezonans frekansında $f=4,47$ Ghz'te $n^- = -4,9$ negatif kırılma indisi görülmektedir (Şekil 4.49). Şekil 4.48 ve 4.49'da görüldüğü gibi, $f=4,45$ Ghz'te n^- ve n^+ negatif kırılma özelliği göstermiştir.



Şekil 4.50. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇZM yapısında ϵ (elektrik geçirgenlik) ve μ (manyetik geçirgenlik)'nün gerçel ve sanal kısımları

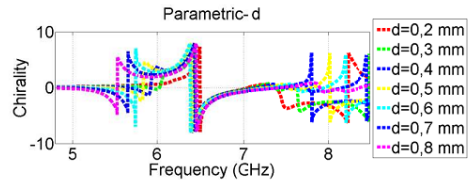
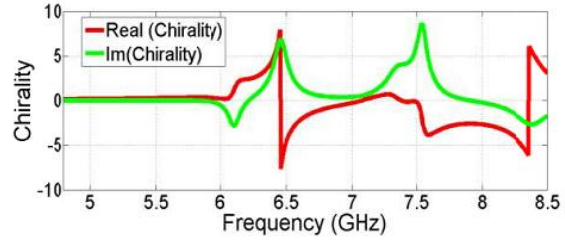
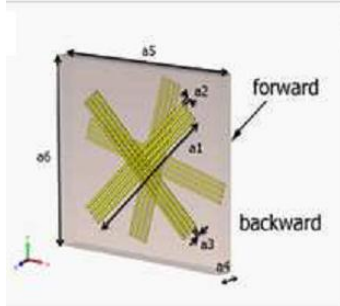
Şekil 4.50'ye göre, $\theta=60^\circ$ için ϵ , κ ile birlikte $f=4,45$ Ghz'te rezonansa girmiştir. $\theta=15^\circ$ için $f=4,73$ Ghz'te μ rezonansa girmiştir. $f=4,45$ Ghz'te κ rezonansa girdiğinde, μ , ϵ ve n^+ 'in değeri negatiftir (Şekil 4.50). Şekil 4.49'da $f=4,45$ Ghz κ 'nın rezonans frekansında hem n^+ hem de n^- negatiftir. (bakışimsızlığa bağlı negatif kırılma

katsayısı). Ayrıca $\theta=45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ için T^+ ve T^- 'nin frekansın bir fonksiyonudur (Şekil 4.51).



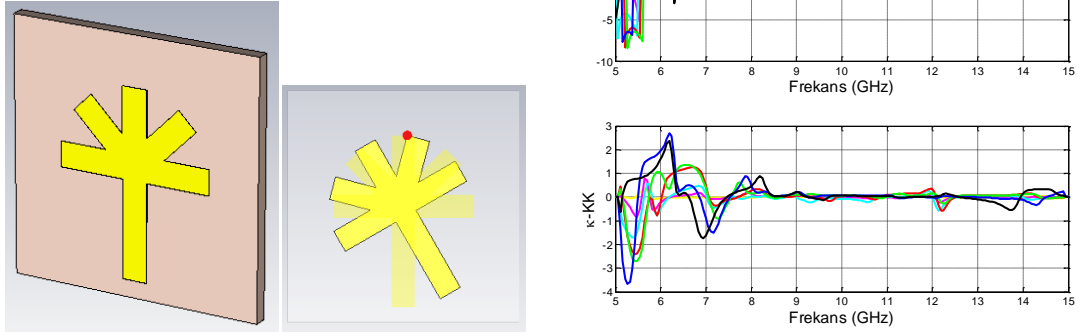
Şekil 4.51. 4-6 Ghz frekans aralığı için farklı rezonatör açılarıyla tasarlanan ÇZM yapısında R, T+, T-'nin gerçel kısmı

Yapılan bu çalışmalar, literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.



(a)

Şekil 4.52. Şeritlerden oluşan bakışimsız Metamalzeme ve Bakışimsızlık Sonuçları (Dinçer ve ark., 2013a)



Şekil 4.53. Çiftkatmanlı BDAM bakışimsız metalmalzeme yapısı ve κ (bakışimsızlık) değerleri

Örneğin yapılan bu çalışma, Dinçer ve arkadaşlarının, (2013a), yapmış olduğu şeritlerden oluşan bakışimsız metalmalzemenin bakışimsızlık sonuçları ile karşılaştırıldığında sonuçların uyum içinde olduğu tespit edilmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Sonuç olarak; bu tez çalışması, tasarlanan yapıların geometrik boyutlarının parametrik tarama yoluyla değiştirilmesi sonucu ortaya konulmuştur. Burada metal şeritlerin kalınlığı ile ön ve arka rezonatörler arasındaki açı farkı, yani geometrik yapı değiştirilerek farklı frekans bantlarında çalışan bakışimsız metamalzeme yapılar tasarlanmıştır.

Yapılan tüm analizlerin sayesinde, elde edilen önemli sonuçlar aşağıda metin halinde ve Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de özet şeklinde belirtilmiş ve ilgili özellikler doğrultusunda önerilmiştir.

5-15 Ghz frekans aralığı için tasarlanan **BDAM** yapısının κ (bakışimsızlık) değerini incelediğimizde, $w=0,5$ mm için, 2 defa rezonansa girmiş, ilki $f=5$ Ghz'te $Re(\kappa)=8,69$ değeriyle yüksek bakışimsızlık, diğeri $f=5,38$ Ghz'te $Re(\kappa)=-8,1$ değeriyle düşük bakışimsızlık göstermiştir. $w=0,5$ mm için, $f=5,37$ Ghz'teki değerlere bakıldığında, $Re(n)=-7,29$ negatif kırılma indisine sahiptir. bakışimsızlığa bağlı negatif kırılma indisi görülmektedir. Aynı kalınlıkta bakışimsızlık değeri $f=6-15$ Ghz aralığında $0-1$ değeri arasında seyretmiş ve düşük bakışimsızlık özelliği göstermiştir. $f=8,5-15$ Ghz arasında μ sabit değere sahiptir. $f=6,19$ Ghz'te $Re(\epsilon)=-51$ negatif ϵ özelliği göstermiştir. $f=5,54$ Ghz'te minimum $Re(n)=-13,92$ değerine ulaşmıştır. **4-6 Ghz** için tasarlanmış BDAM yapısı tüm kalınlık değerleri için, κ $f=5,1-6$ Ghz arasında sabit bakışimsızlık özelliği göstermiştir. $w=3$ mm'de, $f=4$ Ghz'te $Re(n+)=-22$ negatif kırılma indisine sahiptir. $f=4,68$ Ghz'te aynı anda $Re(\mu)=-90,34$ düşük negatif μ özelliği göstermiştir. $w=3$ mm için, $f=4,68$ Ghz'te $Re(n)=-17,22$ minimum değeriyle negatif kırılma indisi özelliğine sahiptir. $w=3$ mm için, $f=4,68$ Ghz'te $Re(n+)= -15,88$ ve $Re(n-) = -18,56$ minimum negatif değerlerini almışlardır.

5-15 Ghz için tasarlanan **BDAM** yapısında açığa bağlı değişime bakıldığında, $f=5,1$ Ghz'te $\theta=75^\circ$ 'de $Re(n+)=-14,46$ negatif kırılma indisi özelliği gösterir. $f=5,43$ Ghz'te $\theta=75^\circ$ 'de $Re(n)=-8,19$ minimum değerleriyle negatif kırılma indisi özelliği gösterir. $f=4,4$ Ghz'te $\theta=15^\circ$ 'de κ rezonansa girmiş ve bu frekansta $n+ = -20,31$ değerini almıştır (bakışimsızlığa bağlı negatif kırılma indisi).

ÇYM yapısı için **5-15Ghz** aralığında kalınlığa göre değişime bakıldığında, $w=3$ mm için $f=5$ Ghz'te $\kappa=8$ olup yüksek bakışimsızlık göstermiştir. BDAM yapısı, $f=9,3-12$ Ghz arasında κ düşük bakışimsızlık özelliği göstermiştir. $f=5-9$ Ghz'te κ sıfırdan farklı, bakışimsızlığa bağlı olarak n^+ , n^- ve n negatif değerlere sahiptir. $f=5$ Ghz'te $w=3$ mm için, $Re(\epsilon)=-60$ değerine ulaşmıştır. **4-6 Ghz** frekans aralığında ise, $w=3$ mm için, $f=4$ Ghz'te κ sıfırdan farklıdır, $Re(n^-)=-14,73$ $Re(n)=-4,35$ bakışimsızlığa bağlı negatif kırılma indisi elde edilmiştir. $f=4$ Ghz'te $Re(\mu)=-60$ 'tır. $f=4$ Ghz 'te $w=3$ mm için $\kappa=10,37$ iken $n=-4,35$ 'tir.(Bakışimsızlığa bağlı negatif kırılma indisi)

ÇYM yapısı için farklı açılardaki durum incelendiğinde **5-15 Ghz** aralığında, $\theta=60^\circ$ için $f=9.64$ Ghz'te κ rezonansa girmiş, κ 'ya bağlı olarak n^+ da $-8,85$ negatif kırılma indisi özelliği taşımıştır. Ayrıca $5-15$ Ghz frekans aralığında $\theta=15^\circ$, 45° ve 75° açıları için de rezonans görünmektedir. $\theta=75^\circ$ de $f=11,27$ Ghz'te rezonansa girmiş, ϵ maksimum $88,64$, minimum $-48,32$ değerini almıştır. **4-6 Ghz** frekans aralığında, düşük ve sabit κ 'ya bağlı olarak n^- ve n^+ pozitifdir.

ÇZM yapısı için **5-15 Ghz** aralığında, $f=6-7.5$ GHz aralıklarında düşük değerlikli κ değeri elde edilmiştir. Küçük bakışimsızlık değeri özellikle polarizasyon döndürücü uygulamalarında kullanılabilir önemli bir faktördür. $f=9.75-10.75$ GHz civarında κ sıfıra yakın olmakta ve sıfıra yakın κ değerinin kullanılabilir alanlar için uygun bir yapı adayı olmaktadır. ϵ , $5-15$ Ghz'te üç band aralığında negatif değerleri almakta ve küçük bir bant aralığında negatif olarak devam etmektedir. Bu durum çok bantlı uygulamalarda avantaj sağlayacaktır. **4-6 Ghz** frekans aralığında ise, $f=4$ GHz civarı olan rezonans noktamızda hem ϵ hem de μ sıfırdan küçük değerler almaktadır. Bundan yola çıkarak tasarımımızın bu aralıkta Double Negative Metamaterial (DNG) olarak kullanımına imkan sağlayacaktır.

ÇZM yapısının açıyla değişimi gözlemlendiğinde **5-15 Ghz** arası frekanslarda, yüksek bakışimsızlık değeri aldığımız kısımlar açıya bağlı değişmektedir. $f=8,3$ Ghz'te κ ile birlikte ϵ ve μ de rezonansa girmektedir. $f=6$ Ghz'te κ rezonansa girmiş, $n=-4,2$, ϵ ve μ de pik değere ulaşmışlardır. $\theta=75^\circ$ için $f=12,19$ Ghz'te $n^+=-6,98$ en düşük negatif kırılma indisi, $f=11,32$ Ghz'te $n^-=-7,28$ en düşük negatif kırılma indisine sahiptir. **4-6 Ghz** aralığında ise $\theta=60^\circ$ için κ , $f=4,45$ Ghz'te rezonansa girmiş, böylece $f=4,48$ Ghz'te $n^+=-8,64$ negatif kırılma indisi görülmüştür.(bakışimsızlığa bağlı negatif kırılma

indisi). Aynı rezonans frekansında $f=4,47\text{Ghz}'te$ $n^- = -4,9$ negatif kırılma indisi görülmektedir. $\theta=60^\circ$ için ϵ , κ ile birlikte $f=4,45\text{ Ghz}'te$ rezonansa girmiştir. $\theta=15^\circ$ için $f=4,73\text{Ghz}'te$ μ rezonansa girmiştir. $f=4,45\text{ Ghz}'te$ κ rezonansa girdiğinde, μ , ϵ , n , n^+ ve n^- 'nin değeri negatiftir. Bakışimsızlığa bağlı negatif kırılma indisi görülmektedir.

Bu tezde yapılan çalışmanın sonuçları, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar literatürle uyum içindedir.

Çizelge 5.1. BDAM yapısı için elde edilen önemli sonuçlar

Giriş parametreleri				Sonuçlar						
Frekans Aralığı (Ghz)	Rezonans Frekansı (Ghz)	w (mm)	θ (°)	κ	n	n+	n-	ϵ	μ	Açıklama
5-15	5	0,5	30	8,69						Yüksek bakışimsızlık
5-15	5,38	0,5	30	-8,1	-7,29					Negatif bakışimsızlık, negatif kırılma indisi, bakışimsızlığa bağlı negatif kırılma indisi
5-15	6-15	0,5	30	0-1						Düşük bakışimsızlık
5-15	6,19							-51		Negatif ϵ
5-15	5,54						-13,92			Negatif kırılma indisi
5-15	5,1-6									sabit bakışimsızlık
4-6	4	3				-22				Negatif kırılma indisi
4-6	4,68	3			-17	-15,88	-18,56		-90	Negatif kırılma indisi
4-6	5,1		75			-14,46				
4-6	5,43				-8,2					
4-6	4,4		15			-20,31				Bakışimsızlığa bağlı negatif kırılma indisi

Çizelge 5.2. ÇYM ve ÇZM yapıları için elde edilen önemli sonuçlar

Yapı	Giriş parametreleri				Sonuçlar						Açıklama
	Frekans Aralığı (Ghz)	Rezonans Frekansı (Ghz)	w (mm)	θ (°)	κ	n	n+	n-	ϵ	μ	
ÇYM		5	3		8						Yüksek bakışimsızlık
		9,3-12									Düşük bakışimsızlık
		5	3						-60		
		4	3		10,37	-4,4		-14,73		-60	Bakışimsızlığa bağlı negatif kırılma indisi
	5 - 15	9,64		60			-8,85				
	5 - 15	11,27		75					-48,62		
ÇZM	5 - 15	9.75-10.75									Düşük bakışimsızlık
	6					-4,2					
	4-6	11,32		75				-7,28			
	4-6	4,48		60	Rezona nsta		-8,64	-4,9	Rezona nsta		Bakışimsızlığa bağlı negatif kırılma indisi

KAYNAKLAR

- Anonymus, 2015. Finite Integration Technique.
<https://www.cst.com/Products/CSTMws/FIT> Erişim Tarihi:05.01.2015
- Anonymus, 2015. CST Microwave Studio <https://www.cst.com/Products/CSTMWS>.
Erişim Tarihi:05.01.2015
- Anonymus, <https://www.cst.com/Products/CSTMWS/FrequencyDomainSolver>. Erişim
Tarihi:05.01.2015
- Clemens, M. ve Weiland., T.2001. Discrete electromagnetism with the finite integration
technique. **Progress In Electromagnetics Research, PIER 32**, 65(87):
- Dincer, F., Sabah, C., Karaaslan, M., Ünal, 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.
- Dincer, F., Karaaslan, M., Unal, E., Bakir, M., Sabah, C., Delihacioglu, K., 2013. Chiral
Metamaterials with Strong and Dynamically Optical Activity. **ICTON**
- Djordjevic, A.R., Biljic, R.M., Likar-Smiljanic, V.D. and Sarkar, T.K., 2001. Wideband
Frequency-Domain Characterization of FR-4 and Time-Domain Causality.
Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on, 43(4): 662-667.
- Li, T.Q., Liu, H., Li, T., Wang, S.M., Wang, F.M., Wu, R.X., Chen, P., Zhu S.N.,
Zhang X., 2008. Magnetic resonance hybridization and optical activity of
microwaves in a chiral metamaterial. **Appl. Phys. Lett.**, 92(131111):1-3.
- Li, Z., Zhao, R., Koschny, T., Kafesaki, M., Alici, K.B., Colak, E., Caglayan, H., Ozbay,
E., Soukoulis, C.M., 2010. Chiral metamaterials with negative refractive
index based on four “U” split ring resonators. **Applied Physics Letters**,
97(081901):1-3.
- Li, Z., Caglayan H., Colak E., Zhou, J., Soukoulis, C.M., Ozbay, E., 2010. Coupling
effect between two adjacent chiral structure layers. **Optics Express**,
8(6):5375.
- Li, Z., Alici, K.B., Colak, E., Ozbay, E., 2011. Complementary chiral metamaterials
with giant optical activity and negative refractive index. **Appl. Phys. Lett.**,
98(161907):1-3.
- 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): 4184-4187.
- Shelby, R.A., Smith, D.R., Schultz, S., 2001. Experimental Verification of a Negative
Index of Refraction. **Science**, 292(5514):77-79.

- Pendry, J.B., Holden, A.J., Stewart, W.J., Youngs, I., 1996. Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures. **Phys. Rev. Lett.**,76:4773-.
- 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.
- Pendry, J.B., 2000. Negative Refraction Makes a Perfect Lens. **Phys. Rev. Lett.**, 85:3966.
- Plum, E., 2010. Chirality and Metamaterials. **University of Southampton, Faculty of Engineering , Science and Mathematics, Opto Electronics Research Centre Phd Thesis.**
- Rahimi,Z., 2011.The Finite Integration Technique (FIT) and the Application in Lithography Simulations, **Der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg zur Erlangung des Grades, Doktor-Ingenieur.**
- Veselago, V.G., 1968. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . **Sov. Phys.-Usp.**, 10(4): 509–514.
- Wang, B., Zhou, J., Koschny, T., Kafesaki, M. , Soukoulis, C.M., 2009. Chiral metamaterials: simulations and experiments. **J. Opt. A: Pure Appl. Opt.** 11(114003):1-10.
- Wang, B., Koschny, T., Soukoulis, C.M. 2009. Wide-angle and polarization-independent chiral metamaterial absorber. **Physical Review B**, 80(033108):1-4.
- 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. **Appl. Phys. Lett.** 99, 221907
- Weiland, T., 2003. RF&Microwave Simulators – From Component to System Design. **33rd European Microwave Conference**
- Ye, Y. ve He, S., 2010. 90° polarization rotator using a bilayered chiral metamaterial with giant optical activity. **Appl. Phys. Lett**, 96(203501):1-3.
- Ye,Y. Li X., Zhuang, F., Chang, S.-W., 2011. Homogeneous circular polarizers using a bilayered chiral metamaterial. **Appl. Phys. Lett.**,99(031111):1-3.
- Zhang, S., Park, Y.S., Lu, X., Zhang,W., Zhang, X, 2009. Negative Refractive Index in Chiral Metamaterials. **Physical Review Letters**,102(023901):1-4.
- 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. **Physical Review B**, 83(035105):1-4.

Zhou, J., Dong, J., Wang, B., Koschny, T., Kafesaki, M., Soukoulis, C.M., 2009. Negative refractive index due to chirality. **Physical Review B**, 79(121104(R)):1-4.

Zarifi, D. Soleimani, M., Nayyeri V., 2012. Parameter Retrieval of Chiral Metamaterials Based on the Causality Principle. **International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering**.

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Karabük'te doğdu. Sonra Hatay'da yaşamaya başladı. İlköğretim öğrenimini İskenderun Demirçelik İlköğretim Okulu'nda, orta öğrenimini 2006 yılında İskenderun Demirçelik Anadolu Lisesi'nde tamamladı. Aynı yıl Çukurova Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliğini kazandı. 2011 yılında Elektrik Elektronik Mühendisi oldu. 2012 yılında Mustafa Kemal Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde yüksek lisansa başlayıp, kısa süre sonra Araştırma Görevlisi oldu. Halen Mustafa Kemal Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.