



**METAMALZEME EMİCİ TABANLI MİKRO DALGA VE OPTİK  
FREKANSLARDA ENERJİ HASADI BENZETİMLERİ VE  
UYGULAMALARI**

**Mehmet BAĞMANCI**

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

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

**HAZİRAN 2018**

Mehmet BAĞMANCI tarafından hazırlanan “METAMALZEME EMİCİ TABANLI MİKRO DALGA VE OPTİK FREKANSLARDA ENERJİ HASADI BENZETİMLERİ VE UYGULAMALARI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Doç.Dr. Muharrem KARAASLAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İskenderun Teknik Üniversitesi

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



**Başkan:** Doç.Dr. Muharrem KARAASLAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İskenderun Teknik Üniversitesi

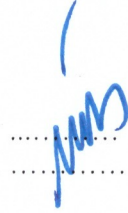
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



**Üye:** Doç.Dr. Emin ÜNAL

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İskenderun Teknik Üniversitesi

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



**Üye:** Prof. Dr. Faruk KARADAĞ

Katı Hal Fiziği, Çukurova Üniversitesi

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



Tez Savunma Tarihi: 05/06/2018

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

Doç. Dr. Tolga DEPCI  
Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü v.



## ETİK BEYAN

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

- Yükseköğretim Kuruluna gönderilen kopya ile tarafından Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü'ne verilen basılı ve/veya elektronik kopyaların birebir aynı olduğunu,
- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

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

  
Mehmet BAĞMANCI

05/06/2018

METAMALZEME EMİCİ TABANLI MİKRO DALGA VE OPTİK FREKANSLARDA  
ENERJİ HASADI BENZETİMLERİ VE UYGULAMALARI  
(Yüksek Lisans Tezi)

Mehmet BAĞMANCI

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
Mayıs 2018

ÖZET

Bu tez çalışmasında, metamazeme tabanlı mikrodalga frekansında ve optik frekansta çalışan sinyal emici yapıları tasarlanmıştır. Literatürde bulunan mikrodalga frekansında çalışan metamazeme tabanlı sinyal emici yapılarından farklı olarak bu çalışmada tasarlanan mikrodalga sinyal emici yapıları özellikle WI-FI, WIMAX ve uydu haberleşmesi frekanslarında kullanım için tasarlanmıştır. Mikrodalga frekans bandında tasarlanan MTM tabanlı yapıların bazılarının sinyal emici özelliklerinin yanında enerji hasatlama özellikleri de araştırılmıştır. Bahsedilen bu yapılara dirençler yerleştirilerek sinyal emici tarafından hapsedilen EM enerji elektrik enerjisine çevrilmiştir. Ayrıca mikrodalga frekans bandında çalışan sinyal emici yapılarının üretimleri yapılarak KEYSIGHT marka PNA-L N5234A Network Analyzer ile deneysel ölçümleri yapılmış ve nümerik ve deneysel sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Optik frekansında çalışan sinyal emici yapıları ise güneş pili uygulamalarına öncülük edebilecek niteliktedir. Çünkü bu yapılar görünür ışık bölgesinin yanında kızılötesi ve ultraviyole frekans bölgelerinde mükemmel emilim değerlerine sahiptirler. Mikrodalga ve optik frekanslarda çalışan sinyal emici yapılarının nümerik çalışmaları sonlu integrasyon tekniği (FIT) tabanlı benzetim programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Metamazeme, metamazeme tabanlı sinyal emici, enerji hasatlama

Sayfa Adedi : 129

Danışman : Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN

METAMATERIAL ABSORBER BASED ENERGY HARVESTING SIMULATIONS AND  
APPLICATIONS AT MICROWAVE AND OPTIC FREQUENCIES  
(M. Sc. Thesis)

Mehmet BAĞMANCI

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

May 2018

ABSTRACT

In this thesis, metamaterial absorber based structures operating on microwave frequency and optical frequency are designed. Unlike the metamaterial based signal absorber structures that operate in the microwave frequency range found in the literature, the microwave signal absorber structures designed in this work are specifically designed for use in WI-FI, WIMAX and satellite communication frequencies. The energy harvesting characteristics of some of the MTM-based structures designed in the microwave frequency band, as well as the signal absorptive properties, have been investigated. By placing these built-in resistors mentioned above, the EM energy trapped by the signal absorber is turned into electrical energy. In addition, signal absorber structures operating in the microwave frequency band were fabricated and experimental measurements were made with KEYSIGHT brand PNA-L N5234A Network Analyzer and the numerical and experimental results were compared with each other. Signal absorber structures operating at the optical frequency can lead to solar cell applications. Because these structures have excellent absorption values in the infrared and ultraviolet frequency regions besides the visible light region. Numerical studies of signal absorber structures operating in microwave and optical frequencies have been carried out using a finite integration technique (FIT) based simulation program.

Key Words : Metamaterial, metamaterial based absorber, energy harvesting  
Page Number : 129  
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Muharrem KARAASLAN

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleőtirilmesinde, iki buçuk yıl boyunca değerli bilgilerini bizlerle paylaőan saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. Muharrem KARAASLAN'a ve maddi manevi desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Emin ÜNAL ve Yrd. Doç. Dr. Oęuzhan AKGÖL hocalarıma saygı ve teőekkürlerimi sunarım. Diğer taraftan çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen değerli eőim Halime BAĞMANCI'ya ve bu yola çıktığımda yanımda olan kardeőim Mustafa BÜYÜKNACAR'a teőekkürlerimi sunarım.



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	7
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	10
3.1. Sayısal Yöntemler.....	10
3.1.1. Zaman Domeninde Sonlu Farklar Metodu (FDTD).....	10
3.1.2. Sonlu Elemanlar Metodu (FEM).....	10
3.1.3. Sonlu İntegrasyon Tekniği (FIT).....	11
3.1.4. İletim ve Yansıma Parametrelerinden Emilim Değerinin Elde Edilmesi.....	12
3.2. FIT Tabanlı Analiz Programı.....	12
3.3. Ölçüm Metodu ve Ölçüm Düzenegi.....	13
4. ARAŞTIRMA BULGULAR VE TARTIŞMA.....	15
4.1. Mikrodalga Frekans Bandında Çalışan Sinyal Emici Yapıları.....	15
4.1.1. Çok katmanlı Ayrık Kare Halkalı Yapılı Sinyal Emici.....	15
4.1.2. Üç Tip Ayrık Halka Rezonatöre Sahip Dirençli Sinyal Emici.....	25
4.1.2.1. Tek ve İki Tip Ayrık Halka Rezonatöre Sahip Sinyal Emici ve Enerji Hasatçısı.....	25
4.1.2.2. Üç Tip Ayrık Halka Rezonatörlü Sinyal Emici ve Enerji Hasatçısı.....	30
4.1.3. Daire Halkalı Rezonatörlere Sahip Dirençli Sinyal Emici.....	38
4.1.4. Çok katmanlı Koni Şekilli Rezonatörlü Sinyal Emici.....	50

**Sayfa**

4.2. Optik Frekans Bandında Çalışan Sinyal Emici Yapıları.....	65
4.2.1. Yıldız Şekilli Rezonatörlü Sinyal Emici.....	65
4.2.2. Artı ve Çapraz Şekilli Rezonatörlü Sinyal Emici .....	74
4.2.3. Piramit Şekilli Rezonatörlü Sinyal Emici .....	83
4.2.4. Artı Şekilli Rezonatörlü Sinyal Emici .....	94
4.2.5. Kare Yama Rezonatörlü Sinyal Emici.....	106
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	118
KAYNAKLAR .....	120
ÖZGEÇMİŞ .....	126
DİZİN.....	128



**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4.1. Dirençli ve dirençsiz tek tip SCR'li yapının emilim büyüklükleri .....	28
Çizelge 4.2. Dirençli ve dirençsiz iki tip SCR'li yapının emilim büyüklüğünün.....	29
Çizelge 4.3. Üç tip SCR'ye sahip yapının ölçüleri .....	31
Çizelge 4.4. Daire halkalı rezonatörlere sahip yapının birim hücresinin ölçüleri .....	39
Çizelge 4.5. Deneysel ölçüm için üretilen yapının birim hücresinin ölçüleri .....	47
Çizelge 4.6. Önerilen geniş bantlı sinyal emici yapısının birim hücresinin ölçüleri .....	51
Çizelge 4.7. Enerji hasatçısı yapısının emilim seviyeleri .....	62
Çizelge 4.8. Önerilen yapının birim hücresinin ölçüleri .....	75
Çizelge 4.9. Önerilen yapının birim hücresinin ölçüleri .....	84
Çizelge 4.10. Önerilen PMA yapısının ölçüleri .....	95
Çizelge 4.11. Önerilen yapıda farklı metaller kullanılması.....	104
Çizelge 4.12. Önerilen yapının birim hücresinin ölçüleri.....	107

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Farklı elektriksel geçirgenlik ( $\epsilon$ ) ve manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ) değerlerine sahip malzeme sınıfları.....	3
Şekil 1.2. Metamalzemelerden elde edilen negatif kırınımın gerçekleştirilmesi (a) periyodik metamalzeme yapısı ve (b) metamalzemelerin negatif kırılması...	5
Şekil 3.1. FIT tabanlı analiz programında tasarlanan yapı sınırları koşulları.....	13
Şekil 3.2. Ölçümlerde kullanılan (a) Network Analizör Cihazı ve (b) horn anten .....	13
Şekil 3.3. Ölçüm düzeneği .....	14
Şekil 4.1. Çok katmanlı kare ayırık halka yapının birim hücresi.....	15
Şekil 4.2. Ayırık kare halka rezonatörlerin tek dielektrik katman üzerinde bireysel ve birlikte sinyal emilim değerleri .....	16
Şekil 4.3. Üç ayırık kare halka rezonatörün ikili kombinasyonlarının emilim tepkileri..	17
Şekil 4.4. Üç dielektrik katmanlı-üç ayırık kare halka rezonatörlü ve tek dielektrik katmanlı üç ayırık halka rezonatörlü yapıların sinyal emilim değerleri.....	18
Şekil 4.5. Üç katmanlı ve dört Katmanlı yapının için sinyal emilim oranlarının karşılaştırılması. ....	19
Şekil 4.6. Üç katmanlı yapının, farklı polarizasyon açalarına göre emilim tepkisi.....	20
Şekil 4.7. Boşluk genişliğinin rezonans frekansı ve emilim değerleri üzerine etkileri...	21
Şekil 4.8. Ayırık kare halka rezonatörlerin farklı hat genişlik değerleri için rezonans frekansları ve emilim tepkileri .....	22
Şekil 4.9. Üç katmanlı ayırık kare halka rezonatöre dirençlerin yerleştirilmesi.....	22
Şekil 4.10. Sinyal emici tabanlı yapının sinyal emilim tepkisi ve kabul edilen güç oranı .....	23
Şekil 4.11. Üretilen en alt ve en üst katmanın üstten görünüşü.....	24
Şekil 4.12. Yankısız odada (a) bir horn anteni, (b) iki horn anteni ile yapılan ölçüm düzeneği .....	24
Şekil 4.13. Üç katmanlı yapının ölçüm ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması.....	25
Şekil 4.14. SCR' lere sahip sinyal emici yapısının yandan görünüşü .....	26

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.15. Tek tip SCR'li (a) sinyal emici yapısı, (b) enerji hasatçı yapısı, (c) yapının sınır koşulları, iki tip SCR'li (d) sinyal emici yapısı, (e) enerji hasatçı yapısı .....	27
Şekil 4.16. Dirençli ve dirençsiz tek tip SCR'ye sahip sinyal emici yapısının emilim tepkisi .....	28
Şekil 4.17. Dirençli ve dirençsiz iki tip SCR'ye sahip yapının emilim karakteristiği.....	29
Şekil 4.18. Dirençlere sahip tek tip SCR'li ve iki tip SCR'li sinyal emici yapılarının sinyal emilim karakteristiklerinin karşılaştırılması.....	30
Şekil 4.19. Üç tip SCR'li (a) dirençsiz (b) dirençlere sahip sinyal emici yapısı .....	30
Şekil 4.20. Dirençli ve dirençsiz üç tip SCR'ye sahip yapının emilim tepkisi .....	31
Şekil 4.21. İki tip SCR'ye ve üç tip SCR'ye sahip yapının emilim değerlerinin karşılaştırılması .....	32
Şekil 4.22. Farklı açılarda gelen EM sinyali için yapının emilme tepkisi .....	32
Şekil 4.23. (a) Sadece küçük, orta ve büyük SCR'lere sahip yapının birim hücreleri, (b) her bir SCR grubunun ve önerilen yapının bireysel emilim tepkisi .....	33
Şekil 4.24. Üç tip SCR'li dirençlere sahip yapı tarafından kabul edilen güç, SCR'lerde bulunan dirençlerde kullanılan güç ve yapıya uygulanan EM sinyalin gücü	34
Şekil 4.25. Üç tip SCR'li dirençlere sahip yapının emilim verimliliği, hasat verimliliği ve dönüşüm verimliliği .....	36
Şekil 4.26. Üretilen üç tip SCR'li sinyal emici yapısı .....	37
Şekil 4.27. Üç tip SCR'li sinyal emici yapısının nümerik ve deneysel ölçümlerle emilim oranlarının karşılaştırılması .....	38
Şekil 4.28. Daire halkalı rezonatörlere sahip yapının birim hücrelerini ölçüleri ve (a) önden görünüşü, (b) üç boyutlu görünüşü ve (c) yandan görünüşü.....	38
Şekil 4.29. CRR rezonatörlere sahip dirençli yapının gelen dalganın TE durumu için nümerik çözümlerde yansıma katsayısı (S11), iletim katsayısı (S21) ve emilim değerleri .....	39
Şekil 4.30. Önerilen yapının eşdeğer ortam modeli.....	40
Şekil 4.31. Gelen dalganın TE ve TM durumları için önerilen yapının emilim değerleri	40

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.32. Önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısının farklı polarizasyon açıları için emilim tepkisi (a) TE polarizasyonu için phi açısı (b) TM polarizasyonu için phi açısı.....	41
Şekil 4.33. Önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısının EM dalganın farklı geliş açıları için emilim tepkisi (a) TE polarizasyonu için theta açısı (b) TM polarizasyonu için theta açısı .....	41
Şekil 4.34. Önerilen MTM tabanlı sinyal emicinin farklı CRR yarıçapları için emilim tepkisi.....	42
Şekil 4.35. Önerilen MTM tabanlı sinyal emicinin CRR'lerin farklı çizgi genişlikleri için emilim tepkisi.....	43
Şekil 4.36. Önerilen MTM tabanlı sinyal emicinin farklı dielektrik kalınlıkları için emilim tepkisi.....	43
Şekil 4.37. Önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısının 9.25, 14.42 ve 16.05 GHz frekanslardaki (a) elektrik alan dağılımı, (b) manyetik alan dağılım ve (c) yüzey akımı dağılımı .....	45
Şekil 4.38. Sadece içteki ve dıştaki CRR'lere sahip MTM yapılarının ve önerilen MTM yapısının emilim değerleri.....	46
Şekil 4.39. Önerilen yapının dirençli ve dirençsiz emilim tepkileri .....	46
Şekil 4.40. (a) Çizelge 4.5'teki ölçülere göre üretilen dirençsiz MTM yapısı, (b) ölçüm düzeneği.....	47
Şekil 4.41. Çizelge 4.5'te verilen ölçülere göre üretilen yapının nümerik ve deneysel ölçümlerle elde edilen S11 parametrelerinin karşılaştırılması.....	48
Şekil 4.42. Önerilen MTM yapısının güç karakteristikleri .....	49
Şekil 4.43. Önerilen MTM yapısının elektriksel dağılımı .....	50
Şekil 4.44. Önerilen sinyal emici yapısının (a) 3 boyutlu görünümü, (b) yandan görünümü ve (c) nümerik analiz kurulumu.....	50
Şekil 4.45. Önerilen yapının emilim ve yansıma katsayısı değerleri.....	52
Şekil 4.46. Önerilen yapının belirtilen rezonans frekanslarında (a) Elektrik alan dağılımları ve (b) manyetik alan dağılımları.....	53
Şekil 4.47. TE ve TM polarize gelen dalga için önerilen konik yapının emilim tepkisi	54

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.48. Önerilen yapının $\varphi$ açısına göre emilim tepkisi (a) TE polarize dalga (b) TM polarize dalga için .....	55
Şekil 4.49. Önerilen yapının $\theta$ açısına göre emilim tepkisi (a) TE polarize dalga (b) TM polarize dalga için .....	56
Şekil 4.50. Önerilen kesik koni sinyal emici yapısı ve kesik piramit sinyal emici yapısının emilim karakteristikleri .....	57
Şekil 4.51. (a) Önerilen kesik koni sinyal emici yapısı ve (b) kesik piramit sinyal emici yapısının gelen dalğanın TE-TM polarizasyonu ve TEM durumu için emilim karakteristikleri .....	58
Şekil 4.52. Önerilen kesik koni şekilli sinyal emici yapısına dirençler yerleştirilerek oluşturulan enerji hasatçısının (a) birim hücresi, (b) nümerik analizlerde atanan sınır koşulları .....	59
Şekil 4.53. Enerji hasatçısı yapısına gelen EM dalğanın gücü, yapı tarafından kabul edilen güç ve dirençlerde harcanan güç .....	60
Şekil 4.54. Enerjisi hasatçısı yapısının hasat verimliliği, emilim verimliliği ve dönüştürme verimliliği .....	61
Şekil 4.55. X-bant sinyal emici yapısının gelen dalğanın TE ve TM polarize olması durumundaki emilim değerleri .....	63
Şekil 4.56. (a) Önerilen yapının üretilen örneği ve (b) deneysel ölçüm düzeneği .....	64
Şekil 4.57. Önerilen sinyal emici yapısının emilim değerinin nümerik analiz ve ölçüm sonuçları .....	65
Şekil 4.58. Önerilen yapının birim hücresinin ölçüleri, (a) önden görünüş, (b) yan görünüş ve (c) sınır koşulları .....	66
Şekil 4.59. Önerilen yapının emilim-yansıtma karakteristiği ve eşdeğer empedansın gerçek ve sanal değerleri .....	67
Şekil 4.60. Güneş ışığı frekans spektrumunda önerilen yapının emilim oranı .....	67
Şekil 4.61. Önerilen sinyal emicinin yapının TE ve TM polarizasyonu ve TEM modu soğurma karakteristiği .....	68
Şekil 4.62. Önerilen yapının gelen EM dalğanın TEM durumunda ve TE-TM polarizasyonlarında farklı polarizasyon açıları için emilim tepkisi .....	69
Şekil 4.63. (a) Artı şekilli, çapraz şekilli ve yıldız şekilli rezonatörlere sahip yapıların emilim değerleri (b) şeklin yakınlaştırılmış hali .....	70

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.64. Önerilen yapının farklı dielektrik katman kalınlıkları için emilim tepkisi...	71
Şekil 4.65. Önerilen yapının farklı rezonatör kalınlıkları için emilim tepkisi.....	71
Şekil 4.66. Önerilen yapıdaki rezonatörün farklı şerit genişlikleri için yapının emilim tepkisi .....	72
Şekil 4.67. Farklı dielektrik malzemelere sahip yıldız şekilli rezonatörlü yapının görünür ışıktaki emilim değerleri.....	73
Şekil 4.68. Önerilen yapının (a) Elektrik alan dağılımlarının büyüklüğü, (b) manyetik alan dağılımlarının y-bileşeni ve (c) önerilen MA'nın yüzey akım dağılımları .....	74
Şekil 4.69. Önerilen yapının birim hücrelerinin (a) önden görünümü, (b) yandan görünümü ve (c) üç boyutlu görünümü ve sınır koşulları.....	75
Şekil 4.70. Önerilen sinyal emici yapısının görünür ışık frekans spektrumunda emilim ve yansıma oranları .....	76
Şekil 4.71. Önerilen sinyal emici yapısının emilim oranı ve etkin empedansının gerçek kısmı .....	77
Şekil 4.72. Önerilen sinyal emici yapısının güneş ışığının tüm frekans spektrumlarındaki emilim oranları.....	77
Şekil 4.73. Önerilen sinyal emici yapısının gelen ışığın TE ve TM polarizasyonları için emilim tepkisi.....	78
Şekil 4.74. Önerilen sinyal emici yapısının gelen EM dalganın (a) TEM, (b) TE ve (c) TM polarize olduğu durumlarında farklı polarizasyon açıları için emilim değerleri .....	79
Şekil 4.75. Önerilen sinyal emicinin 500 THz, 621.76 THz ve 700 THz'de (a) elektrik alan dağılımları ve (b) manyetik alan dağılımları.....	80
Şekil 4.76. Sadece artı şekilli rezonatör, sadece çapraz yama rezonatör ve önerilen yapının emilim değerleri .....	81
Şekil 4.77. Önerilen yapının farklı (a) dielektrik kalınlıklarına ve (b) rezonatör kalınlıklarına göre emilim tepkisi .....	82
Şekil 4.78. Farklı metaller kullanılan yapının emilim oranının .....	83
Şekil 4.79. Önerilen yapının (a) Üstten görünümü, (b) yandan görünümü, (c) Kesit görünümü, (d) Sınır koşulları.....	84

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.80. Önerilen yapıda kullanılan maddelerin 100 THz–1000 THz frekans aralığında elektriksel dağılımları (a) Tungsten (wolfram), (b) ZnO.....	84
Şekil 4.81. Önerilen MTM tabanlı mükemmel sinyal emicinin emilim oranı ve yansıtma katsayısı oranı .....	86
Şekil 4.82. Önerilen yapının çalışma frekansında yansıma katsayısı ve efektif empedansının gerçek kısmı .....	87
Şekil 4.83. Önerilen mükemmel sinyal emici yapısının TE ve TM polarizasyonları ve TEM durumu için sinyal emilim oranları.....	88
Şekil 4.84. Önerilen MTM tabanlı mükemmel sinyal emicinin, gelen dalganın farklı polarizasyon açıları için emilim tepkisi (a) TEM durumu, (b) TE polarizasyonu için $\phi$ açısı, (c) TM polarizasyonu için $\phi$ açısı .....	89
Şekil 4.85. Önerilen MTM tabanlı mükemmel sinyal emicinin, gelen dalganın farklı geliş açıları için emilim tepkisi (a) TE polarizasyonu için $\theta$ açısı, (b) TM polarizasyonu için $\theta$ açısı.....	90
Şekil 4.86. Kesik piramidinin üst kenarının farklı değerleri için önerilen yapının emilim yanıtı .....	91
Şekil 4.87. Kesik piramidinin alt kenarının farklı değerleri için önerilen yapının emilim yanıtı .....	91
Şekil 4.88. Farklı dielektrik katman kalınlık değerleri için önerilen yapının emilim yanıtı.....	92
Şekil 4.89. Farklı arka metal kalınlık değerleri için önerilen yapının emilim yanıtı .....	92
Şekil 4.90. Kesik piramidinin metalik kaplamasının farklı kalınlık değerleri için önerilen yapının emilim yanıt .....	93
Şekil 4.91. Önerilen yapının rezonans frekanslarındaki (a) elektrik alan dağılımları, (b) manyetik alan dağılımları .....	94
Şekil 4.92. Önerilen PMA yapısının birim hücresinin ölçüleri ve (a) önden görünüş, (b) yandan görünüş, (c) sınır şartları.....	95
Şekil 4.93. Yapının emilim tepkisi, yansıma katsayısı (S11) ve etkin empedansının gerçek ve sanal kısmı .....	97
Şekil 4.94. Önerilen PMA yapısının güneş ışığının tüm frekans bandındaki emilim tepkisi.....	97
Şekil 4.95. Gelen dalganın TE-TM polarizasyonları ve TEM durumu için önerilen	

Şekil	Sayfa
yapının emicilik grafiği .....	98
Şekil 4.96. Önerilen PMA yapısının (a) TEM durumu ve (b) TE-TM polarizasyonları için farklı polarizasyon açılarında emilim değerleri .....	99
Şekil 4.97. Önerilen PMA yapısının (a) TE ve (b) TM polarizasyonu için $\theta$ açısına bağlı frekans tepkisi .....	100
Şekil 4.98. Önerilen PMA yapısının farklı $\theta$ açıları için, (a) TE polarizasyonu, (b) TM polarizasyonu için toplam elektrik alanı yoğunluğu ( $ E $ ) ve (c) TE polarizasyonu (d) TM polarizasyonu için toplam manyetik yoğunluğu ( $ H $ ) .....	101
Şekil 4.99. Önerilen yapıdaki rezonatörün parçalarının ayrı ayrı ve bileşik emilim oranları .....	102
Şekil 4.100. Rezonatör ve alt metal olarak farklı metaller kullanılan önerilen yapının emilim tepkisi .....	103
Şekil 4.101. Önerilen PMA yapısının (a) şerit uzunluğu ve (b) şerit genişliği değişimine bağlı emilim tepkisi.....	105
Şekil 4.102. Önerilen PMA yapısındaki köşe yama rezonatörlerin (a) uzunluğunun ve (b) genişliğinin farklı değerlerinde yapının emilim tepkisi .....	106
Şekil 4.103. Önerilen yapının birim hücrenin (a) önden görünümü (b) yandan görünümü ve (c) sınır şartları .....	107
Şekil 4.104. Önerilen yapının görünür ışık frekansında emilim oranı ve yansıtma katsayısı .....	108
Şekil 4.105. Tüm güneş ışığı rejiminde önerilen yapının emilim karakteristiği.....	109
Şekil 4.106. Önerilen yapının gelen dalganın TE, TM polarizasyonu ve TEM durumu için (a) emilim karakteristiği ve (b) emilim bantlarının yakın görünümü	110
Şekil 4.107. Önerilen yapının gelen EM dalganın farklı polarizasyon açıları için emilim karakteristiği (a) TE ve TM polarizasyonu ve (b) TEM durumu ..	110
Şekil 4.108. Önerilen MTM yapısında farklı metal kullanılması durumunda oluşan emilim karakteristikleri.....	111
Şekil 4.109. Çapraz kare yamaların bireysel ve birleşik emilim tepkileri.....	112
Şekil 4.110. Çapraz kare yama rezonatörün, dikey-yatay kare rezonatörün ve önerilen yapının emilim özelliği.....	113
Şekil 4.111. Rezonatör katmanının farklı kalınlık değerlerine göre yapının emilim değerleri .....	114



<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.112. Dielektrik katmanının farklı kalınlık değerlerine göre yapının emilim değerleri .....	115
Şekil 4.113. Önerilen PMA yapısının (a) elektrik alan dağılımlarının x-bileşeni, (b) elektrik alan dağılımlarının büyüklüğü (c) manyetik alan dağılımlarının y-bileşeni ve (d) yüzey akım dağılımı .....	116
Şekil 4.114. 40 nm'den az dielektrik kalınlığına sahip MTM yapısının farklı dielektrik kalınlıkları için doğrusal emilim değerleri .....	117



## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
$\sigma$	Elektrik İletkenliği
$\delta$	Kayıp Tanjantı
$\epsilon$	Elektriksel Geçirgenlik
$\epsilon_0$	Boş Uzayın Elektriksel Geçirgenliği
$\epsilon_r$	Bağlı Elektriksel Geçirgenlik
$\epsilon''$	İkinci Dereceden Dielektrik Sabiti
$\mu$	Manyetik Geçirgenlik
$\mu_0$	Boş Uzayın Manyetik Geçirgenliği
$\mu_r$	Bağlı Manyetik Geçirgenlik
$\nu''$	İkinci Dereceden Manyetik Direnç Sabiti
$k$	Dalga Yayılımı
$E$	Elektrik Alan Şiddeti
$H$	Manyetik Alan Şiddeti
$S$	Poynting Vektörü
$n$	Kırılma İndisi
$J_e$	Elektrik Akım Yoğunluk Vektörü
$J_m$	Manyetik Akım Yoğunluk Vektörü
$R$	Pozisyon Vektörü

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>AE</b>	Emilim verimliliği
<b>CE</b>	Dönüştürme verimliliği
<b>FIT</b>	Sonlu İntegrasyon Tekniği
<b>HE</b>	Hasatlama verimliliği
<b>MTM</b>	Metamalzeme
<b>PA</b>	Kabul edilen güç
<b>PEC</b>	Mükemmel elektrik iletken
<b>PMA</b>	Mükemmel metamalzeme emici
<b>PMC</b>	Mükemmel manyetik iletken
<b>PR</b>	Gerçek güç
<b>PS</b>	Gelen güç
<b>RAB</b>	Bağıl emilim bant genişliği
<b>TE</b>	Dik elektrik alan
<b>TEM</b>	Enine elektromanyetik alan
<b>TM</b>	Dik manyetik alan
<b>WPT</b>	Kablosuz Güç İletimi

## 1. GİRİŞ

Metamalzemeler, doğada bulunmayan sıra dışı yapılara sahip periyodik yapı birimlerinden oluşan yapay malzemelerdir[1]. Genel olarak, metamalzemeler, kendilerine özgü özellikleri bileşimlerden ve mikro yapılardan ziyade yapısal dizilerinden oluşurlar. Farklı fiziksel özelliklerine göre, metamalzemeler akustik, termal, fotonik ve elektromanyetik (EM) metamalzemeler vb. olarak sınıflandırılabilir. Son zamanlarda, alt dalga boyu yapı birimleri tarafından oluşturulan EM metamalzemelerine, tersine çevrilmiş Doppler etkisi [2], tersine Vavilov-Cherenkov radyasyonu [3], negatif yansıma indeksi [1] ve çift negatif özellik [4] gibi egzotik özelliklerinden dolayı yoğun ilgi gösterilmiştir. EM metamalzemeler eşzamanlı olarak negatif elektriksel geçirgenliğe ve negatif manyetik geçirgenliğe (yani,  $\epsilon < 0, \mu < 0$ ) sahiptir ve doğada bulunan malzemelerden farklı olan sol el kurallara uymaktadır. Bu nedenle, EM metamalzemeleri, egzotik elektromanyetik özelliklerinden dolayı çift negatif materyaller veya solak malzemeler olarak da adlandırılmaktadır.

Yapay EM metamalzemelerdeki negatif elektriksel geçirgenlik ve negatif manyetik geçirgenlik davranışını teoriden uygulamaya dönüştürmek uzun zaman almıştır. 1968'de Veselago[5] başlangıçta kuramsal bir çalışma yapmış ve çift negatif materyal hipotezini önermiştir. Veselago'dan sonra, bilim ve teknolojiye bazı kısıtlamalar nedeniyle çift negatif metamalzemelerde önemli bir ilerleme kaydedilmemiştir. 1990'ların sonunda, Pendry[6] teorik olarak negatif kırılma indisinin uygulanabilirliğini kanıtlamış ve kırılma sınırının ötesinde negatif kırılma indeksi  $n = -1$  (yani,  $\epsilon = -1$  ve  $\mu = -1$ ) olan bir "mükemmel merceğe" yapmıştır. Pendry'nin teorik araştırmasına dayanarak, Smith ve ark.[7], periyodik bölünmüş halka rezonatörleri (SRR) ve bakır teller ile EM metamalzemeleri yapay olarak üreterek, 2001 yılında mikrodalga frekanslarında negatif elektriksel geçirgenlik ve negatif manyetik geçirgenliği elde etmiştir. Pendry negatif manyetik geçirgenliğin, SRR tarafından üretilen LC rezonansına ve iletken bakır tellerden kaynaklanan negatif elektriksel geçirgenliğe bağlı olduğunu gösterilmiştir. O zamandan beri, EM metamalzemeler ile ilgili araştırmaların sayısı hızla artmış ve mikrodalga[8-10], kızılötesi[11-13] ve görünür frekans bölgelerinde[14-16] metamalzemeler ile ilgili çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Periyodik birim hücrenin farklı boyutlara ve yapılara sahip olduğu çeşitli EM metamalzemeler üretilmiştir[17-20]. EM metamalzemeler, yapay yapı birimlerinin bir düzenlemesidir ve doğal malzemelerde gözlenemeyen olağandışı

elektromanyetik özelliklere ulaşmak için tasarlanmıştır. Bununla birlikte, EM metamalzemeler sadece özgül özelliklere sahip yeni bir malzeme değil, aynı zamanda ayarlanabilir malzemeler ile gelişmiş malzemelerin üretilmesi için yenilikçi bir tasarım kavramıdır.

Son yıllarda, metamalzemelere dayalı artan araştırmalar, kendine özgü elektromanyetik özelliklerinden dolayı enerji hasadı [21, 22], görünmez pelerin [23, 24], süper lensler [1, 25] ve manyetik rezonans görüntüleme [26, 27], metamalzemelere dayalı kablosuz güç aktarımı üzerinde [28-31] odaklanmıştır.

Elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik, malzemelerin elektromanyetik özelliklerini karakterize eden iki yapısal parametredir [32, 33]. Farklı elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik değerlerine göre, Şekil 1.1'de gösterildiği gibi malzemeler dört kategoriye ayrılabilir. Doğal malzemelerde hem elektriksel geçirgenlik hem de manyetik geçirgenlik pozitiftir. Elektriksel geçirgenlik veya manyetik geçirgenlik negatif olduğunda (yani,  $\epsilon < 0$ ,  $\mu > 0$  veya  $\epsilon > 0$ ,  $\mu < 0$ ), malzemeler epsilon-negatif (örneğin metaller [34], plazmalar [35]) veya mü-negatif (örneğin, dönел manyetik malzemeler[36]) olarak adlandırılır Elektriksel geçirgenlik veya manyetik geçirgenlik aynı anda negatif olduğunda, malzemeler çift negatif malzeme olarak tanımlanır.

Aslında, çift negatif özellik başlangıçta metamalzemelerde gözlenmiştir.  $\epsilon$  ve  $\mu$  değerleri aynı anda pozitif veya negatif olduğunda, EM dalgalar ortamda yayılabilir. Geleneksel malzemeler için ( $\epsilon > 0$ ,  $\mu > 0$ ), elektrik vektörü  $E$ , manyetik vektör  $H$  ve dalga vektörü  $K$  sağ elle verilen kurala karşılık gelir. Enerji akışı yoğunluğunu temsil eden poynting vektörü  $S$ , dalga yayılımı ile aynı yönüne sahiptir, yani yayılma ile birlikte dalganın enerjisinin azaldığı, zayıfladığı anlamına gelir. Çift negatif özellikli ( $\epsilon < 0$ ,  $\mu < 0$ ) metamalzemelerde elektromanyetik dalgalar ortamda yayılabilir ve aşağıda gösterilen Maxwell denklemlerini[37] sağlarlar.

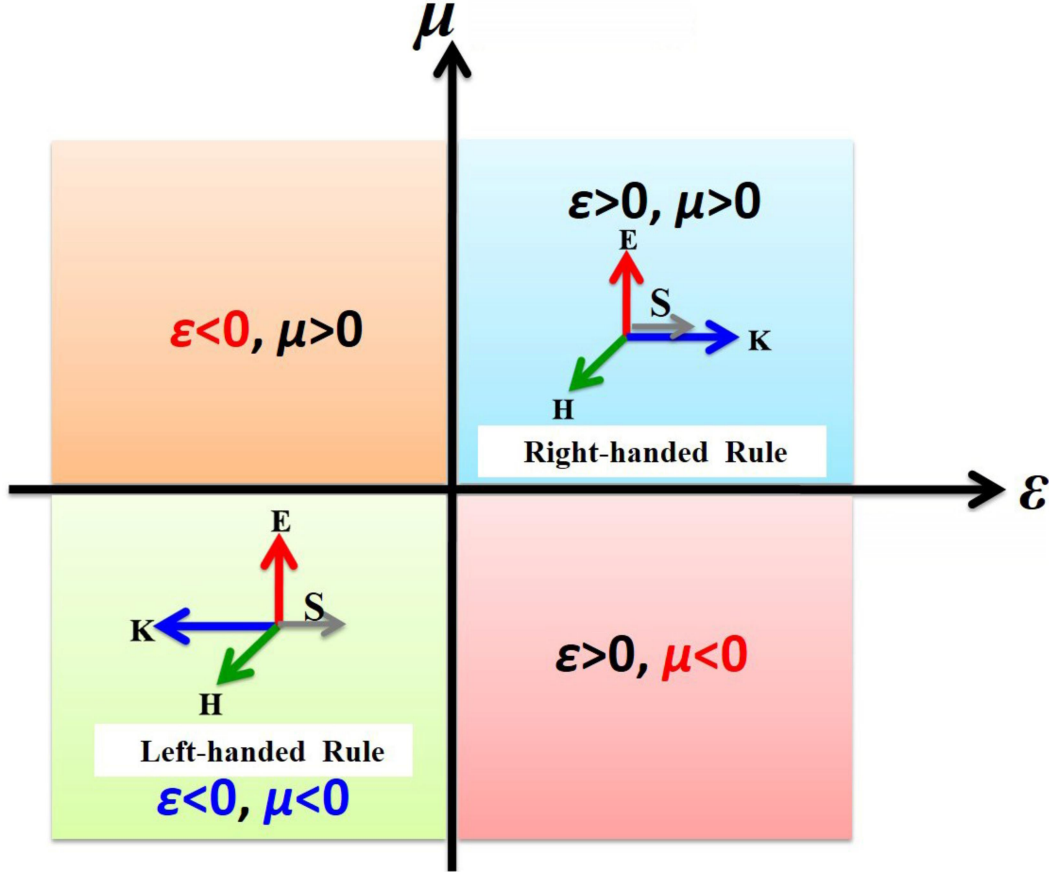
$$k \times E = \omega\mu H \quad (1.1)$$

$$k \times H = -\omega\epsilon E \quad (1.2)$$

$$k \cdot E = 0 \quad (1.3)$$

$$k \cdot H = 0$$

(1.4)



Şekil 1.1. Farklı elektriksel geçirgenlik ( $\epsilon$ ) ve manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ) değerlerine sahip malzeme sınıfları[38]

Şekil 1.1’de E, H, K ve S sırasıyla elektrik alan, manyetik alan, dalga yayılımı ve poynting vektörleridir. Elektriksel ve manyetik geçirgenliğin her ikisi de negatif olduğunda, çift-negatif malzemelerin E, H ve K vektörleri, sol-el kuralına uymaktadır [3] ve Poynting vektörü, kaynağa doğru olan dalga vektörü yönünün tersidir. Bu durumda, elektromanyetik dalgaların enerji akışının, kaynağın pozitif faz yönünün tersi olur. Bu nedenle, metamalzemeler geriye dönük dalga davranışı olarak da adlandırılabilir [37]. Yukarıda tartışıldığı gibi, çift negatif özelliğe sahip metamalzemeler herhangi bir temel yasayı ihlal etmemektedir; bu nedenle, Snell’in yasasına göre,

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.5)$$

$n_1$  ve  $n_2$ , sırasıyla, 1. ve 2. ortamın kırılma indisidir.  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  ise ışının geliş ve kırılma açısıdır. Negatif elektriksel geçirgenliğe ve negatif manyetik geçirgenliğe sahip

metamalzemelerde gelen ışın ve kırılan ışını normalin aynı tarafındadır. Buda Metamalzemelerin kırılma indeksinin negatif değer olduğunu gösterir. Yani metamalzemelerin kırılma indisi aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$n = -\sqrt{\epsilon\mu} \quad (1.6)$$

Ayrıca metamalzemeler yukarıdaki önemli elektromanyetik eşitliklerden türetilen ters çevrilmiş Doppler etkisi, tersine çevrilmiş Vavilov-Cherenkov radyasyonu ve tersine çevrilmiş Goos-Hanchen kaymasını içeren diğer benzersiz özelliklere sahiptir. Spesifik elektromanyetik özelliklerine sahip olduklarından, görünmezlik pelerini, süper lensler, elektromanyetik dalga emilimi ve mikro-şerit antenler alanında metamalzemeler büyük potansiyel uygulamalara sahiptir [39]. Son yıllarda, negatif geçirgenliğe sahip olan malzemelerin, radyo frekanslı manyetik alan çizgilerine odaklanma yetenekleri nedeniyle manyetik rezonans (MR) görüntülemenin çözünürlüğünü arttırabileceği bildirilmiştir [26]. Metamalzemelerin, özellikle genliği azalan dalgaları arttırma özelliklerine sahip olmaları enerji hasat uygulamaları ve kablosuz güç aktarımı (WPT) için büyük bir öneme sahiptir, çünkü rezonans eşleşmesi genliği azalan dalgaların birleşmesinden oluşur [40]. Aşağıda, negatif geçirgenlik ve negatif geçirgenlik davranış mekanizmaları araştırılmış ve ortaya çıkarılmıştır.

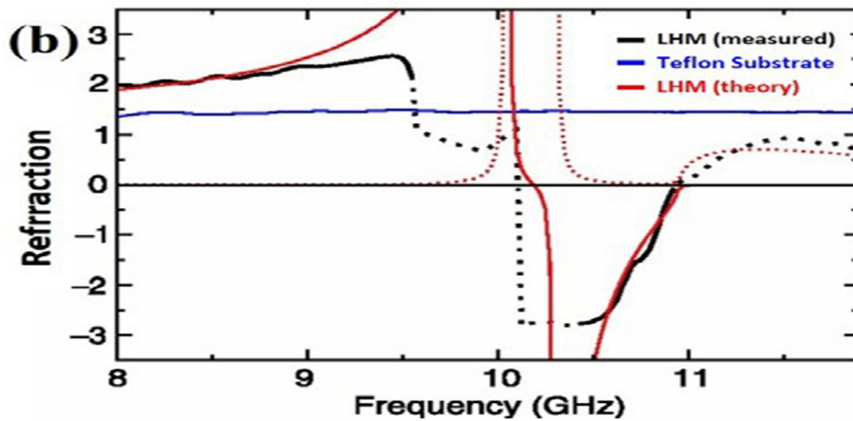
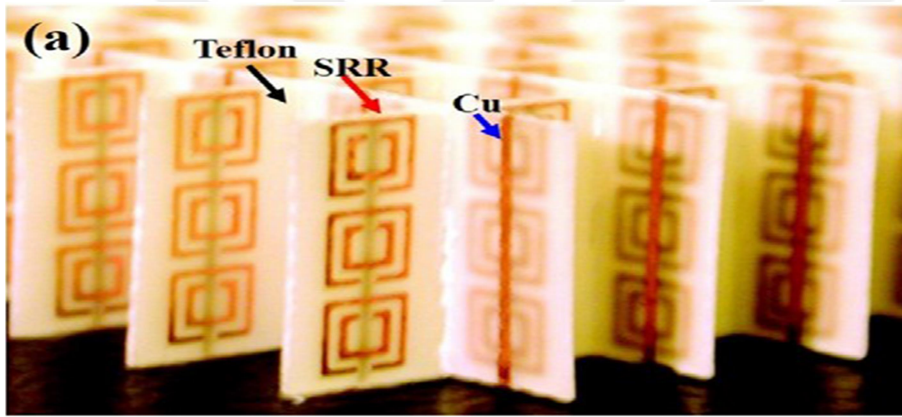
Smith ve ark.[7] ilk olarak mikro dalga frekans bölgesinde periyodik yapı blokları ve deneysel olarak gözlenen negatif kırılma indisli metamalzemeler üretmiştir. Şekil 1.2’de ayırık bakır halka rezonatörler (SRR) ve bakır teller, teflon dielektrik malzemenin her iki tarafında delikli maske/aşındırma tekniği ile dağıtılmıştır. Daha sonra SRR blokları, Şekil 1.2. (a)’da gösterildiği gibi birleştirilerek metamalzeme yapısı elde edilmiştir. Saf teflon ile kıyaslandığında, iletken bakır bileşenli bu metamalzemeler periyodik yapı dizilerinden yararlanılarak negatif kırılma indisi elde etmiştir. Eşitlik (1.7) ve (1.8) periyodik dizilere sahip metamalzemelerin için etkin elektriksel geçirgenliğin ve etkin manyetik geçirgenliğin genel formülleridir[7, 41],

$$\epsilon = \epsilon_0 \left( 1 - \frac{\omega_{pe}^2 - \omega_{0e}^2}{\omega^2 - \omega_{0e}^2 + i\omega\gamma_e} \right) \quad (1.7)$$

$$\mu = \mu_0 \left( 1 - \frac{\omega_{pm}^2 - \omega_{0m}^2}{\omega^2 - \omega_{0m}^2 + i\omega\gamma_m} \right) \quad (1.8)$$

Burada  $\omega_{0e}$  ve  $\omega_{0m}$  elektronik ve manyetik rezonans frekansı,  $\omega_{pe}$  ve  $\omega_{pm}$  elektronik ve manyetik plazma frekansı  $\gamma_e$  ve  $\gamma_m$  ise elektrik ve manyetik yayılımı temsil eden sönümlenme terimidir. Metamalzemelerde iletken teller elektriksel sürekliliği sağlayamadığında,  $\omega_{0e}$  0'dan büyüktür. Teller iletken bir ağ oluşturduğunda ise eşitlik (1.9)'da ifade edilen Drude modeli [42] ile uyumaktadır,

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left( 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + i\omega\gamma_e} \right) \quad (1.9)$$



Şekil 1.2. Metamalzemelerden elde edilen negatif kırınımın gerçekleştirilmesi (a) periyodik metamalzeme yapısı ve (b) metamalzemelerin negatif kırılması [38]

Negatif geçirgenlik davranışının, elektronların metalden birlikte salınımına bağlanmıştır ve plazma frekansının altında, metallerin dielektrik sabiti negatif değerlere sahiptir. Genel olarak, yığın metallerin plazma frekansı genellikle ultraviyole veya görünür bölgelerde



bulunur, bu da yığın metallerdeki negatif elektriksel geçirgenliğinin mutlak değerlerinin çok büyük olduğunu ve pratik uygulamaları sınırladığını gösterir. Bu nedenle, zayıf negatif elektriksel geçirgenliği elde etmek ve manyetik geçirgenliği eşleştirmek gerekir. Metal teller periyodik olarak tabana yerleştirildiğinde, ortalama elektron yoğunluğu seyreltilmiş ve öz indüktansı nedeniyle etkili elektron kütlesi artmıştır [42]. Bu nedenle, ince metal tellere sahip metamalzemelerin plazma frekansı uç kızılötesi hatta GHz bandına indirgenebilir [43]. Ek olarak, negatif geçirgenlik metamalzemeye harici bir elektrik veya ısıl alan uygulanarak ayarlanabilir [44, 45].

Metamalzemeler için negatif geçirgenlik, LC rezonansa [46] veya periyodik yapıdan kaynaklanan Mie rezonansa dayandırılmıştır [47]. Birim yapılar metal tellerden ve SSR'den oluştuğunda, elde edilen malzemeler kapasitansı (C) ve indüktansı (L) içeren bir devreye eşdeğer olabilir. Eşdeğer devredeki indüktans metal tellerden, kapasitans ise yapıdaki boşluklardan kaynaklanmaktadır. Elektromanyetik dalganın frekansı, metamalzemelerin rezonans frekansına eşit olduğunda, LC rezonansı meydana gelir ve negatif geçirgenlik davranışına neden olur. Daha sonra sadece metalik parçalardan oluşan metamalzemeler yerine, enerji kaybını azaltmak için dielektrik metamalzemeler üretilmiştir ve Mie rezonansının dielektrik metamalzemelerde de negatif geçirgenliğe yol açtığı gösterilmiştir [48]. EM dalga frekansı, malzemelerin bant aralığı frekansına yakın olduğunda, sırasıyla birinci Mie rezonansı ve ikinci Mie rezonansı manyetik ve elektrik dipol rezonanslarına yol açabilir. Bu Mie rezonanslarına, lineer tepki rejiminde karakteristik bir rezonans dağılımı eşlik eder, böylece küreler veya bir dizi disk veya küp (meta-yüzey), elektrik rezonansında etkili bir negatif dielektrik geçirgenlik ve manyetik rezonansında etkili bir negatif manyetik geçirgenlik tarafından tarif edilebilir [31]. Radyo frekans bölgesinde ise manyetik geçirgenlik frekans dağılımının bölgecik duvarı rezonansına karşılık geldiği ve yüksek frekanslı rejimde dönele manyetik rezonansının önemli bir rol oynadığı öne sürülmektedir [49].

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Kırılma indisi, kayıpları açıklamak için kompleks bir ifade şeklinde belirtilmiştir. Fakat işaretinin negatif olabileceği hiç sorgulanmamıştır. 1968 yılında, Veselago, elektriksel ve manyetik geçirgenliğin belirli bir frekans aralığında negatif olması durumunda, ortamın negatif kırılma indisine sahip olabileceğini teorik olarak ortaya koymuştur [5]. Veselago bu teorisi terslenmiş kırılma Snell kanununu, ters Doppler etkisini ve zıt Cerenkov yayılımlarını ortaya koymasına rağmen, doğada böyle bir ortam olmadığından yaptığı bu çalışma uzun yıllar ilgi görmemiştir. Fakat 2000'li yıllarda, ortamın EM özelliklerini negatif olarak elde etmek için ortaya konulan teorik çalışmalar deneysel olarak gerçekleştirilmiş [6,7,41,42] ve tüm bu çalışmalarda Veselago'nun teorik bir ortam için ortaya koyduğu sonuçlar hayata geçirilmiş, doğrulanmış ve üretilen bu malzemelere metamalzeme adı verilmiştir.

Negatif kırılma indisli metamalzemeler negatif elektriksel geçirgenlik ( $\epsilon$ ) özelliğine sahip bir yapı ile ve bir negatif manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ) özelliğine sahip bir yapının birleşmesiyle oluşmaktadır. Bu malzemelerin negatif özelliklerinden dolayı bu ortam içerisine giren EM dalgaların faz ve grup hızları zıt yönde ilerlemektedir. Çünkü metamalzemeler doğada bulunmayan, negatif kırılma gibi ayrıcalıklı ve çok özel özelliklere sahip periyodik yapıda tasarlanmış EM malzemelerdir [6,7,41,42]. Metamalzemeler; görünmezlik pelerini [50,51], radara yakalanmama [52], mükemmel lens[6], sensör [53] vs. gibi birçok önemli uygulama alanlarına sahiptirler. Metamalzemeler doğada bulunmayan yani insan yapımı olduklarından dolayı birçok frekans aralığında tasarlanabilmektedirler.

Pendry, negatif kırılma indisli olan bir metamalzeme yapısı ile bir nesnenin hem uzak hem de yakın alan yayılım dalgalarının tekrarlı olarak oluşturulabileceğine yani sınırsız çözünürlüklü bir süper lens yapısının oluşturulabileceğini ortaya koymuştur [6].

Metamalzemeler sahip oldukları bu ayrıcalıklı elektromanyetik özellikler ile birçok alana uygulanmış ve önemli kazançlar elde edilmiştir. Metamalzemelerin uygulamalarının yakın bir geçmişe sahip olması ve son yıllarda yapılan çalışmalar ile savunma sanayi için önemli çalışmaların yapılması bu malzemeye olan ilgiyi gün geçtikçe arttırmıştır.

Literatürdeki çalışmalar bakıldığında metamalzemelerin mikrodalga ve optik frekans bandında EM enerji hasatlama uygulamaları ile ilgili son yıllara ait birçok çalışma bulunmaktadır[54-60]. Ayrıca kablosuz enerji transferinde de metamalzemelerin, aktarım performansını arttırdığı çalışmalarla kanıtlanmıştır.

Ramahi ve ark. 5.8 GHz çalışma frekansında bir ayırık halka rezonatör (SRR) tasarlamış ve 19 dBi'lik bir horn antenden gelen EM enerjiyi metamalzemeler aracılığıyla toplama çalışması gerçekleştirmişlerdir [22]. Bunun için SRR'in aralık kısmına 2.7 K $\Omega$ 'luk direnç yerleştirmişlerdir. Horn antenden gelen EM dalga ile direnç üzerinden 613 mV gerilim elde edilmiştir.

Almoneef ve Ramahi ise, birden fazla SRR'den oluşan dizi şeklindeki metamalzeme yapılarını üst üste belirli aralıklar ile yerleştirmiş ve horn anten vasıtası ile gönderilen EM enerjinin hasatlanması üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [61]. Önceki çalışmalarında yaptıkları gibi metamalzeme üzerindeki SRR rezonatörlerin aralıklarına dirençler yerleştirilmiştir. Önceki çalışmalarından farklı olarak aynı SRR dizilerinden birden fazla artarda konulmuştur.

Hawkes ve ark. ise SRR rezonatöre sahip tipi metamalzeme yapısı tasarlamışlardır [21]. Deneysel olarak 900 MHz frekansında gelen EM enerjinin % 36,8'ini elektriksel enerjiye dönüştürmüşlerdir. Bunun için diğer enerji hasatlama çalışmalarında olduğu gibi SRR üzerindeki aralığa 70  $\Omega$  değerinde direnç yerleştirilmiştir. Direnç üzerindeki oluşan gerilimin değerini arttırmak için birim hücresi bir SRR'den oluşan metamalzeme yapıları arka arkaya belirli aralıklarla yerleştirilmiştir. Deneysel çalışmaları için TEM dalga kılavuzu kullanmışlardır.

Bingnan Wang ve ark. metamalzeme temelli kablosuz güç iletimi (WPT) üzerine çalışmışlardır. Dizi şeklindeki metamalzeme levhası kullanarak iki bobin arasındaki kablosuz enerji gönderimi veriminin yükseltilebileceğini göstermişlerdir. Metamalzeme levhası sayesinde bir bobinden diğerine aktarılan enerji yaklaşık olarak 3 katına çıkmıştır[62].

Lee ve Lim mikrodalga frekansında çift rezonans frekansına sahip bant genişliği artırılmış metamalzeme tabanlı bir sinyal emici sunmuşlardır [63]. Çift rezonansın elde edilmesi ile

önceki yapılan metamalzeme tabanlı sinyal emici çalışmalarına göre bant genişliğinin daha fazla olmasını sağlamıştır. Tasarlanan metamalzeme tabanlı sinyal emici yapısı, gelen EM dalganın farklı polarizasyon açılarına karşı duyarsız bir özelliğe sahiptir. Ölçüm yapılan horn anten 0°'dan 90 dereceye kadar 10 derecelik adımlar ile döndürülmüş ve 9,75 GHz'te ve 10,3 GHz'te %98'in üzerinde bir emilim değerine ulaşmışlardır.

Dinçer ve ark., nümerik ve deneysel olarak omega ve sekizgen yıldız şekilli rezontöre sahip metamalzeme yapısı ile 0-90 arasında, istenilen polarizasyon açısı değerinde aynı emilim tepkisini veren polarizasyondan bağımsız çift bantta sinyal emilimi gerçekleştirebilen metamalzeme tabanlı sinyal emici tasarımı gerçekleştirmişlerdir [64]. Tasarladıkları metamalzeme yapısının dielektrik ve rezonatör katmanı esnek bir özelliğe sahip olduğundan yapı farklı şekillerde ayarlanarak kapasitif özelliği değiştirilebilir ve farklı frekanslarda da sinyal emilimi yapabilir.

Wang ve ark. ise nümerik ve deneysel olarak bakışimsız metamalzeme tabanlı sinyal emici çalışması gerçekleştirmişlerdir [65]. Yapılan bakışimsız MTM tabanlı yapı polarizasyon açıları durumlarından bağımsız çok iyi bir sinyal emici yapısıdır. Nümerik çalışmalarda farklı açı değerleri için 0°'dan 70 dereceye kadar, 10 derecelik açı aralıkları ile sonuçlar elde etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre yapı 60°'de %98 ve 70°'de ise %90 oranında emilim değerlerine sahiptir. Tasarlanan yapı ile diğer açı değerlerinde de benzer emilim değerlerini yakalamışlardır.

Ayrıca Zhu ve ark. başka bir MTM tabanlı sinyal emici çalışmalarında gelen açı bağımsız mikrodalga frekansında çalışan geniş bantta sahip sinyal emici çalışması nümerik ve deneysel olarak ortaya koymuşlardır [66]. Tasarladıkları yapının emilim değerleri sadece 0°, 30°, 40°, 50° ve 60° için incelemişlerdir. Diğer açı değerleri için yapının emilim oranları verilmemiştir. Elde edilen sonuçlara göre %97'nin üzerinde emilim değerine ulaşılmıştır.

Sabah ve ark. ise nümerik ve deneysel olarak halka ve çapraz yıldız şekil tabanlı mükemmel sinyal emilimi yapabilen bir sinyal emici uygulaması gerçekleştirmişlerdir [67]. Tasarlanan yapı deneysel olarak 2,82 GHz frekansında % 99,4, nümerik olarak 2,76 GHz frekansında %99,9 oranlarında sinyal emilimi gerçekleştirmiştir. Ayrıca aynı yapı ile sinyal emicilerin uygulamasını yanında sensör uygulaması da gerçekleştirilmiştir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Sayısal Yöntemler

Elektromanyetik problemlerin çözümlerinde birçok sayısal yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin her biri farklı ortamlarda kullanılmakta, sadece bir yöntem tüm ortamlarda doğru sonuç vermemektedir. Bu yüzden ortama uygun sayısal yöntem seçilmelidir. Elektromanyetik problem çözümlerinde en çok kullanılan sayısal yöntemler; Zaman Domeninde Sonlu Farklar Metodu (FDTD), Sonlu Elemanlar Metodu (FEM), Sonlu İntegrasyon Tekniğidir (FIT).

##### 3.1.1. Zaman Domeninde Sonlu Farklar Metodu (FDTD)

Kane Yee tarafından 1996 yılında uzayın farklı noktalarında elektrik alan ve manyetik alan bileşeninin üç bileşeninin hesaplanması için ortaya atılmıştır [68]. Diferansiyel formdaki Maxwell denklemlerinin çözümü için kullanılan bir yöntemdir. Yee tarafından ortaya atılan bu metotta birim hücre küçük hücrelere ayrılmış ve bu küçük hücreler için ayrı ayrı E ve H alanlarının x, y ve z bileşenleri bulunur. Bu yöntem birçok problemin çözümünde kullanılmaktadır. FDTD yöntemi aslında eşitlik 3.1 ve 3.2'de gösterildiği gibi Maxwell denklemlerinin doğrudan zaman bölgesinde çözümünü sağlar.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times E \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times H - \frac{\sigma}{\varepsilon} E \quad (3.2)$$

##### 3.1.2. Sonlu Elemanlar Metodu (FEM)

Sonlu elemanlar metodu ilk olarak 1943 yılında Courent tarafından ortaya atılmıştır [69]. Birçok farklı çalışmalarda bu yöntem yıllardır kullanılmaktadır. Bu yöntem Maxwell denklemlerinin ayrıştırılması için kullanılan bir yöntemdir. FEM dalga kılavuzlarında, mikro şeritlerde antenlerde, EM dalgaların biyolojik nesnelere tarafından emiliminin hesaplanmasında, elektrik makinelerinde, yarı iletken teknolojisinde ve bir çok uygulama alanında kullanılmaktadır.

FEM'in çözümlene prensibi, bilinmeyen fonksiyonun temel ara değer fonksiyonları ile sunulduğu yerlerde sürekli domeninin bir takım alt domenler ile yer değiştirilmesine dayanmaktadır. Cebirsel denklemler sistemi değişen bir formülleştirme işlemiyle elde edilir. Daha sonra, sınır-değer problemlerinin çözümü doğrudan veya tekrarlamalı bir çözücü kullanılarak lineer sistem denklemlerinin çözümüyle gerçekleştirilir.

### 3.1.3. Sonlu İntegrasyon Tekniği (FIT)

Sonlu integrasyon tekniği, ilk olarak 1977 yılında Thomas Weiland tarafından ortaya atılmıştır [70]. Günümüze kadar bir çok alanda bu yöntem kullanılmıştır. FIT frekans domeninde elektromanyetik alan problemlerini nümerik olarak çözmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu teknik Maxwell denklemlerinin integral formlarını kullanarak çözümler yapmaktadır. FIT lineer olan ya da lineer olmayan malzeme dağılımlarının birleştirilmesi uygulanan geometrik bir çözüm yöntemidir. FIT sınır koşullarında geniş bir esnekliğe sahiptir. Bundan dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır [70,71]. FIT, Maxwell denklemlerinin integral formlarını kullandığı için ızgara hücre kenarları boyunca gerilimleri ve ızgara yüzeyleri içinden akıları kullanarak Maxwell denklemlerini frekans veya zaman uzayında direkt olarak herhangi bir türde ızgara üzerinde tanımlar.

FIT metodu aşağıdaki eşitliklerde verilen formüllerden oluşmaktadır. Eşitliklerde gösterilen  $R, t, J_e$  ve  $J_m$  sırasıyla pozisyon vektörü, zaman, elektrik akım yoğunluk vektörü ve manyetik akım yoğunluk vektörünü ifade etmektedir. Eşitlik 3.5'te gösterilen  $\varepsilon''$  ifadesi ikinci dereceden dielektrik sabiti ve  $v''$  ifadesi ise ikinci dereceden manyetik direnç sabitidir. Sonlu integrasyon tekniği bu tez çalışmasında kullanılan FIT tabanlı analiz programının tabanını oluşturmaktadır. Bu tezde yapılan tüm benzetimlerin hepsi FIT ile yapılmıştır.

$$\frac{\partial}{\partial t} B(R, t) = -\nabla \times E(R, t) - J_m(R, t) \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} D(R, t) = -\nabla \times H(R, t) - J_e(R, t) \quad (3.4)$$

$$D(R, t) = \varepsilon''(R) \cdot E(R, t) \quad (3.5)$$

$$H(R, t) = v''(R) \cdot B(R, t) \quad (3.6)$$

### 3.1.4. İletim ve Yansıma Parametrelerinden Emilim Değerinin Elde Edilmesi

Etkili ortam yaklaşımlarına göre, metalmalzemeler etkin elektriksel geçirgenlik ( $\epsilon(\omega)$ ) ve etkin manyetik geçirgenlik ( $\mu(\omega)$ ) ile karakterize edilirler. Bir metalmalzeme tabanlı sinyal emici için asıl önemli olan şey gelen EM dalganın yapıya maksimum nüfuzunu sağlamak için bakır rezonatör ile ortamın empedans uyumu ve sinyal emici yapısına nüfuz eden EM dalganın yapının içinden geçmesinin engellemek için arka tarafı kaplayan metal plakadır. Göreceli elektriksel geçirgenlik ve göreceli manyetik geçirgenliğin kontrollü değişimleri, arzu edilen özelliklere sahip metalmalzeme yapıları tasarlamak için sıklıkla kullanılır. Pratikte kayıp, yapı tarafından emilen elektromanyetik güç miktarıyla hesaplanabilir. Emilen güç, emilim değeri ( $A(\omega)$ ) ile karakterize elde edilir. Emilim değeri aşağıdaki eşitliklerden elde edilir;

$$A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega) \quad (3.7)$$

$$R(\omega) = |S_{11}|^2 \quad (3.8)$$

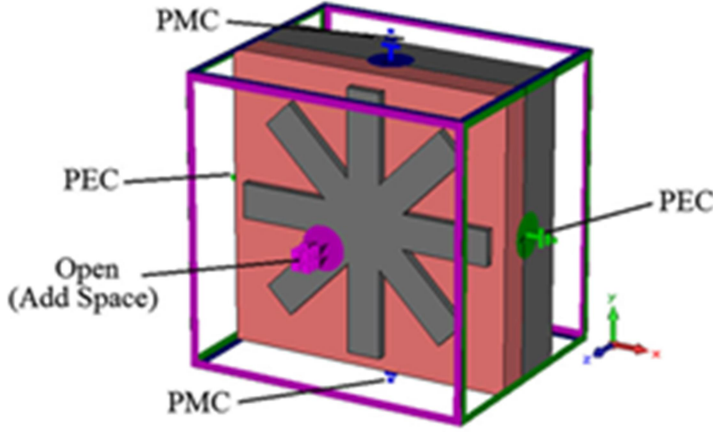
$$T(\omega) = |S_{21}|^2 \quad (3.9)$$

Burada  $R(\omega)$  ve  $T(\omega)$  frekansın bir fonksiyon olarak ( $\omega$ ) sırasıyla yansıma ve iletim katsayılarıdır. Frekans bağımlı S parametreleri simüle veya ölçülen sonuçlardan çıkarılır. Yukarıdaki eşitliklerden de görülebileceği gibi, eğer yansıma ve iletim katsayıları sıfırsa, teorik olarak % 100 emilim elde edilebilir.

## 3.2. FIT Tabanlı Analiz Programı

FIT tabanlı analiz programı frekans ve zaman domeninde elektromanyetik problemlerin çözümünde kullanılan, sonlu integrasyon tekniği (FIT) tabanlı bir simülasyon programıdır. Program antenler, filtreler, küpler, düzlemsel ve çok katmanlı yapılar ve SI ve EMC etkileri gibi yüksek frekanslı (HF) cihazların analizlerinin de yapılmasına olanak verir. Program zaman domeni çözücüsünün yanında frekans domeni çözücüsünde özellikle yüksek salınımlı yapılar için tasarlanmış S-parametreleri ve alan hesabı gerçekleştiren hegzahedral ve tetrahedral iki çözücü içermektedir

Araştırma bulguları ve tartışma kısmında önerilen yapıların hemen hemen tümünün FIT tabanlı analiz programında yapılan nümerik analizlerinde sınır koşulları Şekil 3.1’de örnek olarak gösterildiği gibi x-yönünde PEC, y-yönünde PMC ve z- yönünde boşluklu açık olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.1. FIT tabanlı analiz programında tasarlanan yapı sınırları koşulları

### 3.3. Ölçüm Metodu ve Ölçüm Düzeneği

Araştırma bulgular ve Tartışma kısmında tasarlanan yapıların ölçümleri İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Açık alan ölçümleri Agilent N5234A PNA-L Network Analizör cihazı ve ölçüm yapılacak MTM yapısının frekans bandına uygun horn antenler kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Bkz. Şekil 3.2.)



PNA-L AGILENT

(a)



(b)

Şekil 3.2. Ölçümlerde kullanılan (a) Network Analizör Cihazı ve (b) horn anten



Ölçüm düzeneğindeki network analizör cihazında 2 adet port bulunmaktadır. Yapılan ölçümlerde doğru sonuçları elde etmek için ölçüm yapmadan önce network analizör cihazı kalibrasyon kiti ile kalibre edilir. Kalibrasyon yapılırken her iki porta açık (open), kısa (short) ve yük (50 ohm load) uçları sırasıyla bağlanarak portlar kalibre edilir.

Ölçümlerde kullanılan Agilent PNA-L Network Analizör cihazı 10 MHz - 43.5 GHz arasında ölçüm yapabilmektedir. Açık alan ölçümlerinde yansıma etkilerini azaltmak için horn antenler ve tasarlanan MTM yapısı arasında belirli bir mesafe bırakılmıştır ve ölçümü düzeneğinin doğru ölçümü yapabilmesi için tasarlanan MTM yapısı numune tutucusu ile sabitlenmiştir(Bkz. Şekil 3.3.). Numune tutucusunun EM parametreleri havaya çok yakındır. Yani numune tutucusu ölçüm değerlerini etkilememektedir. Sadece yansıma katsayısı ( $S_{11}$ ) ölçülecekse ölçüm bir horn anten ile yapılır. Yansıma katsayısının yanında iletim katsayısı( $S_{21}$ )'nın da elde edilmesi isteniyorsa ölçüm iki horn anten kullanılarak yapılır. Ölçüm yapmadan önce tek horn anten ile ölçüm yapılacaksa karşısına iki horn antenle ölçüm yapılacaksa bu horn antenlerin aralarına MTM yapısı konulmadan bir ölçüm yapılır ve bu network analizörde kalibrasyon datası olarak kullanılır. Daha sonra MTM yapısı konularak, yapının iletim veya yansıma katsayısı değerleri ölçülür. Ölçüm sonuçları Network Analizör cihazı tarafından kalibrasyon datası ile normalize ederek elde edilir. Daha önce de belirtildiği gibi ölçümlerde yansıma etkilerini azaltmak için Şekil 3.3'teki ölçüm düzeneğinden görüleceği üzere MTM yapısı ile horn anten arasına belirli bir mesafe bırakılmalıdır. Network Analizör cihazının ölçüm mantığı ise şöyledir; tek horn anten ile ölçüm yapılacaksa horn anten MTM yapısına EM daga gönderir ve MTM yapısından yansıyan dalganın genliğini belirlenen frekans aralığında ekrana verir. İki horn anten ile ölçüm yapıldığı durumda ise yansıyan dalganın yanında bir horn antenden gönderilip diğer horn anten ile alınan iletilen dalganın genliğini de ölçer.



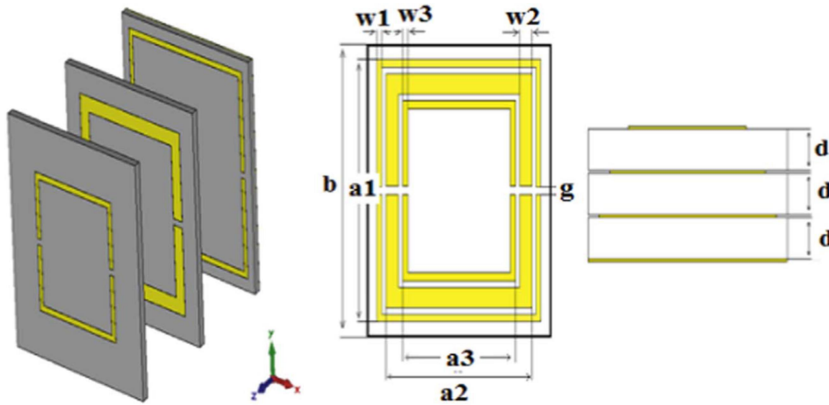
Şekil 3.3. Ölçüm düzeneği

## 4. ARAŞTIRMA BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Mikrodalga Frekans Bandında Çalışan Sinyal Emici Yapıları

#### 4.1.1. Çok katmanlı Ayrık Kare Halkalı Yapılı Sinyal Emici

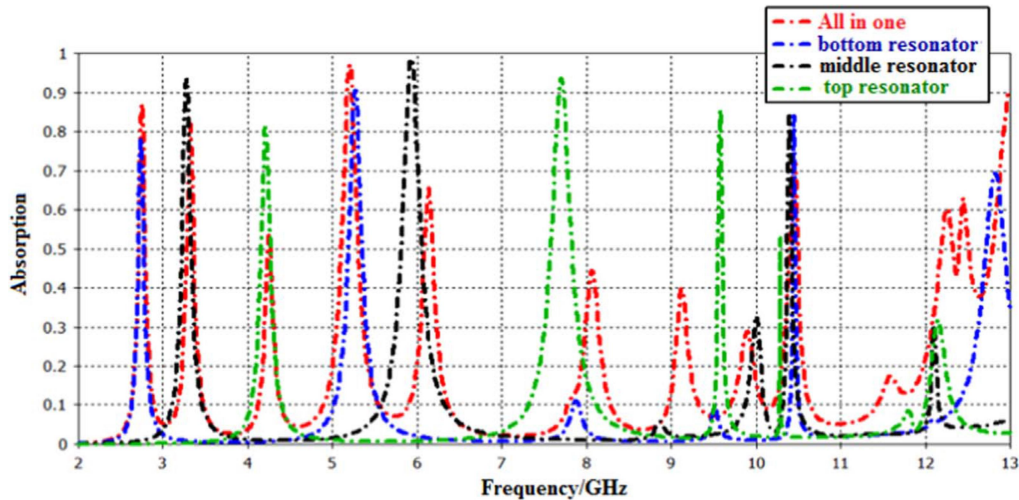
Önerilen metamalzeme yapısının birim hücresi üç rezonatör katmanına sahiptir; birim hücreyi oluşturan her katman, bir dielektrik alt tabakaya yerleştirilen bir metal rezonatörden oluşur. En arkadaki-en büyük rezonatörü içeren-katmanın arkası iletimi engellemek amacıyla bir metal plaka ile kaplanmıştır. Böyle bir yapının tasarlanmasıyla farklı frekans bantlarında sinyal emilimi yapmak amaçlanmıştır. Yapı 5x5, 25 birim hücreden oluşmaktadır. Tasarlanan yapının birim hücresi Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Sarı alanlar bakır metal rezonatör tabakayı ve beyaz alanlar FR4 yalıtkan malzemesini temsil etmektedir. Bakır rezonatörlerin elektrik iletkenliği  $\sigma = 5 \times 10^7$  s/m ve FR4 yalıtkan malzemesinin kalınlık, kayıp tanjant ve bağıl dielektrik sabiti sırasıyla, 1.6 mm (d), 0.025 ve 4.3’ tür. En alttaki, ortadaki ve en üstteki ayrık kare halka rezonatörlerin uzunlukları ve hat genişlikleri sırasıyla 33 mm (a1), 1 mm (w1), 29 mm (a2), 2.5 mm (w2), 22 mm (a3) ve 1 mm (w3)’ dir. Tüm katmanlardaki FR4 yalıtkanın en ve boyu 37 mm (b)’ dir. Ayrık kare halka rezonatörlerin yatayda bulunan boşluk genişliği 1 mm (g) ve bakır katmanın kalınlığı 0.035 mm’ dir.



Şekil 4.1. Çok katmanlı kare ayrık halka yapının birim hücresi

Yapının nümerik sonuçları sonlu integrasyon tekniği (FIT) tabanlı üç boyutlu ticari tam dalga elektromanyetik çözücü simülasyon programından elde edilmiştir.

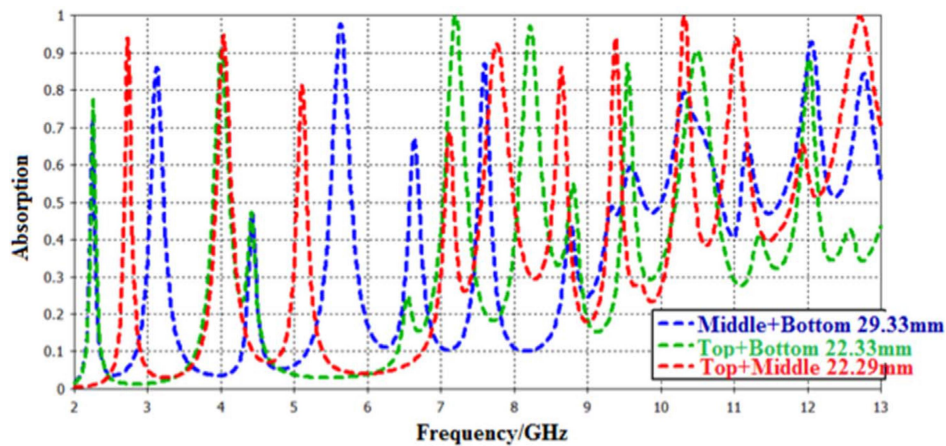
İlk olarak ayırık kare halka rezonatörlerin bireysel olarak ve birlikte tek dielektrik yalıtkan üzerindeki sinyal emilim seviyesi ve bant genişliği mikrodalga frekans bandında araştırılmıştır. Şekil 4.2’de ayırık kare halka rezonatörlerin ayrı ayrı ve birlikte yaptığı sinyal emilim seviyeleri gösterilmektedir. En büyük ayırık kare halka rezonatörün 2.8 GHz, 5.4 GHz ve 10.5 GHz 'de sinyal emilim değerleri sırasıyla % 80,% 90 ve% 85'dir. Bu frekanslar, GSM, WIMAX ve uydu iletişimi gibi kablosuz iletişimde kullanılan frekans bantlarının içindedir. Bu nedenle, üç tabakadan oluşan emici, yaşadığımız çevrede mikrodalga enerjisi hasat etme potansiyeline sahiptir. Şekil 4.2’de görüleceği üzere, en büyük boyuta sahip bir rezonatörü olan alt tabaka, daha düşük rezonans frekanslarından sorumludur. Boyutunun etkisi nedeniyle, en küçük boyuta sahip üst katmandaki rezonatörün ilk rezonans frekansı orta katmandaki rezonatörünkinden daha yüksek olan 4.2 GHz'dir. Tek dielektrik katman üzerindeki üç rezonatörün birlikte yapmış olduğu bazı rezonans pikleri, rezonatörler arasındaki endüktif ve/veya kapasitif etki nedeniyle diğerlerinden daha düşüktür. Bu nedenle, üç ayırık kare halka rezonatörün aynı katmanda bulunduğu yapının emilme tepkisi, her bir rezonatörün emme tepkilerini bir araya getirerek rezonatörler arasındaki karşılıklı birleşmeden etkilenir. Dolayısıyla, yukarıda belirtilen özelliklere sahip olan bir tabakadaki (hepsi bir arada) üç ayırık kare halka rezonatör yapısı, GSM, WIMAX ve uydu iletişim bantları dâhil olmak üzere mikrodalga frekans bölgesinde hasat uygulamaları için bir adaydır.



Şekil 4.2. Ayırık kare halka rezonatörlerin tek dielektrik katman üzerinde bireysel ve birlikte sinyal emilim değerleri

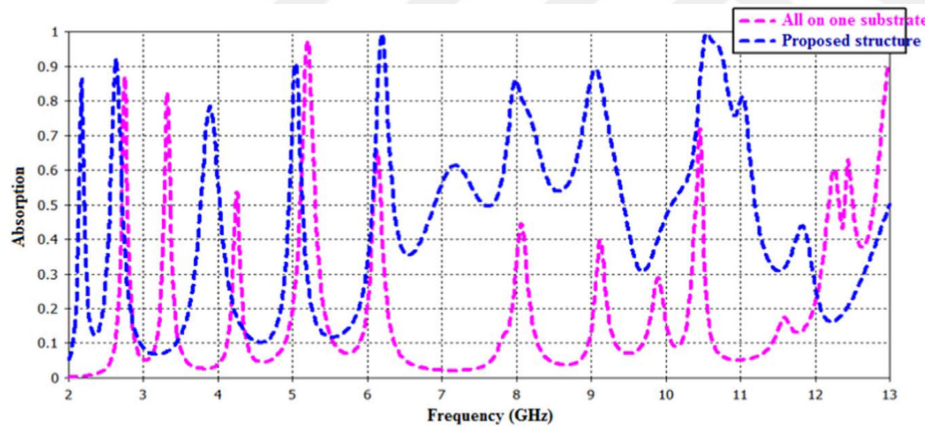
İkinci olarak üç rezonatör ve dielektrik katmanın ikili birleşimlerinin sinyal emilim tepkileri, Şekil 4.3’te gösterildiği gibi analiz edilmiştir. Üst ve alt rezonatör ve dielektrik

katmanların ikili bileşimi, çalışma bandında yedi rezonans oluşturur. Ayrık kare halka rezonatörlerin ikili birleşimlerinin emilim değerleri, her bir rezonatörün bu parametre tepkilerini birleştirerek elde edilebilir. Üst ve alt tabakalardaki rezonatörlerin ikili bileşiminin ilk rezonans frekansı yaklaşık 2.45 GHz olup emilim seviyesi % 78' dir ve buna büyük boyutlu ayrık kare halka rezonatör neden olur. Bu ikili kombinasyonun en son mikro dalga frekans bandındaki sahip olduğu en yüksek rezonans frekansı 12 GHz olup buradaki emilim seviyesi % 89' dur ve buna da küçük boyutlu olan ayrık kare halka rezonatör neden olur. Orta ve alt rezonatör ve dielektrik katmanların ikili birleşimi mikrodalga frekans bandında altı rezonans frekansına sahiptir. Bu ikili birleşimin sahip olduğu ilk emilim oranı kablosuz iletişim bandında bulunan 3.1 GHz' de %87'dir. Aynı çiftin uydu iletişimi için sinyal emilim oranları 10.4 GHz ve 12 GHz' de sırasıyla %80 ve %93 tür. Bu ikilinin 12.8 GHz 'deki rezonansı, iki rezonatör arasındaki kublaj etkisinden dolayı meydana gelmektedir. Üç rezonatörün her çiftli birleşimi, GSM ve uydu iletişim frekansları gibi farklı mikrodalga frekans aralıklarında rezonansa neden olur. Öte yandan, üst ve orta rezonatörlerin birleşimi, 2-13 GHz frekans aralığı içinde % 80 ve üzeri emilim seviyesine sahip dokuz rezonansa neden olur. Dolayısıyla yapı, yaygın olarak kullanılan tüm iletişim frekansları için bir sinyal emici olarak kullanılabilir. Şekil 4.2'de görüldüğü gibi, iki rezonatörlü dielektrik tabakalı yapılar, tek bir rezonatörlü yapıdan daha iyi frekans tepkileri ve emilim seviyelerine sahiptir, Emilim seviyesi ve bant genişliği iki dielektrik katmanın birleşimi ile önemli ölçüde arttırılmıştır. İki katmanlı yapının emilim oranının ve bant genişliğinin tek katmanlı yapıya göre daha iyi olmasından dolayı çok katmanlı bir sinyal emici yapısı tasarlanmıştır.



Şekil 4.3. Üç ayrık kare halka rezonatörün ikili kombinasyonlarının emilim tepkileri.

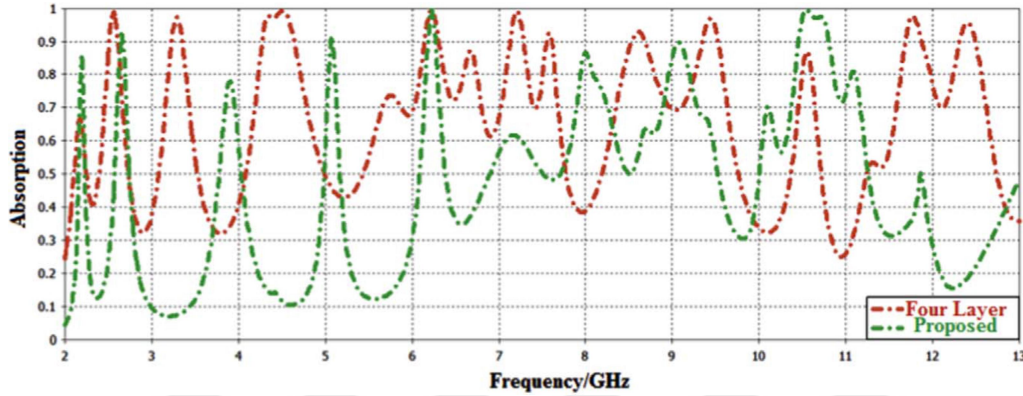
Çok katmanlı yapı olarak üç ayrı kare halka rezonatör ve dielektrik katmandan oluşan bir yapı tasarlanmıştır. Yapının GSM, WIMAX ve uydu iletişim bandı dahil olmak üzere mikro dalga frekansının birçok bölgesinde sinyal emilimi yapması istendiğinden dolayı birim hücreyi oluşturan dielektrik katmanın ve ayrı kare halka rezonatörlerin ölçüleri önemlidir. Ayrıca çok katmanlı absorber yapısının sinyal emilim seviyesi aynı ölçülerde ayrı kare halka rezonatörlere sahip tek katmanlı absorber yapısının sinyal emilim seviyesi ile kıyaslanmıştır. Şekil 4.4'te çok katmanlı rezonatörleri içeren absorber yapısının tek katmanlı rezonatörleri içeren yapıya göre daha iyi emilim seviyesine ve bant genişliğine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.4'ten görüleceği üzere üç katmanlı ayrı kare halka rezonatörlü yapının sinyal emilim seviyesi mikrodalga enerji hasadı için uygundur. Tasarlanan yapı, WIMAX frekans aralığında EM enerjisinin 2.62 GHz'de %92.36 ve 2.14 GHz'de %86.14'lük emilim seviyelerine sahiptir. Tasarlanan yapının Wi-Fi frekans aralığındaki emilim seviyesi 5.03 GHz' de %90.90'dır. Ayrıca, uydu yayını hizmetlerinin çalıştığı frekanslarda emilim seviyesi, 10.54 GHz' de % 99.41 ve üstündedir.



Şekil 4.4. Üç dielektrik katmanlı-üç ayrı kare halka rezonatörlü ve tek dielektrik katmanlı üç ayrı halka rezonatörlü yapıların sinyal emilim değerleri

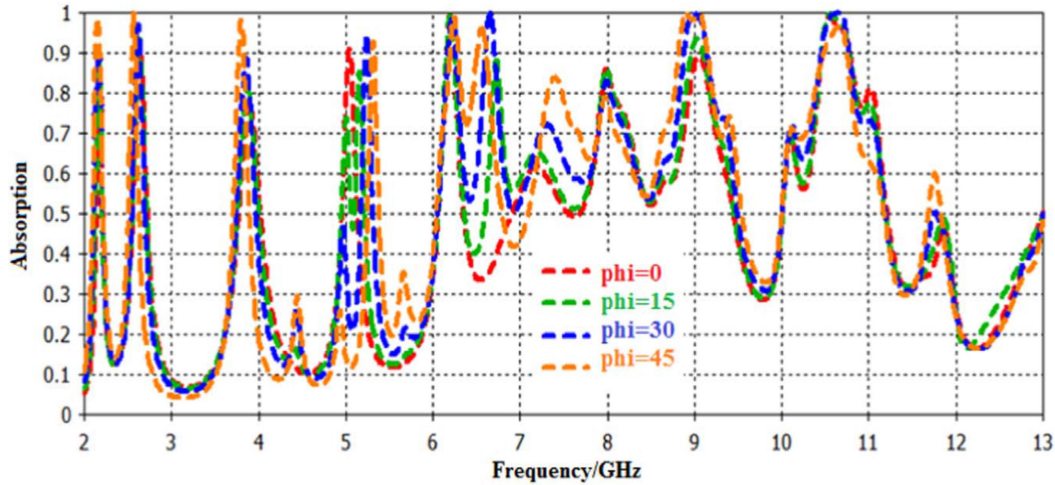
Dielektrik katman ve rezotör sayının emilim seviyesi ve bant genişliği üzerindeki etkilerini araştırmak için üç dielektrik katmanlı ve ayrı kare halka rezonatörlü yapı dört dielektrik katmanlı ve ayrı kare halka rezonatörlü yapının yukarıda belirtilen mikrodalga frekans bandındaki emilim seviyeleri ve bant genişlikleri Şekil 4.5'de karşılaştırılmıştır. Önerilen üç katmanlı yapının % 90'ın üzerinde altı rezonans emilim değeri olmasına rağmen dört katmanlı yapının aynı frekans aralığında daha yüksek bant genişliğe sahip sekiz rezonans emilim değeri vardır. Bu nedenle rezonans tepe noktalarının ve rezonans bantlarının sayısının doğrudan katman sayısı ile ilişkili olduğu sonucuna varılabilir. Önerilen yapının

dört değil de üç katmanlı olarak seçilmesinin sebebi ise üç katmanlı yapının GSM, WIMAX ve uydu iletişim bandında istenilen değerde emilim yapabilmesi ve yeterince geniş bant genişliğine sahip olmasıdır. Üretim kolaylığı ve maliyeti göz önünde bulundurulduğunda üç katmanlı yapı tercih edilmiştir.



Şekil 4.5. Üç katmanlı ve dört katmanlı yapının için sinyal emilim oranlarının karşılaştırılması.

Şekil 4.6'da üç katmanlı sinyal emiciye farklı polarizasyon açılarında gelen EM sinyalinin yapının sinyal emilim seviyesi üzerindeki etkilerini gösterilmiştir. Üç katmanlı ayırık kare halka rezonatör yapısının  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  'lik açılarla gelen EM sinyal karşısındaki sinyal emilim seviyesi Şekil 4.6'da görülmektedir. Şekil 4.6'da görüldüğü üzere sinyal emici yapısının sinyal emilim seviyesi EM sinyalin polarizasyon açısından neredeyse bağımsızdır. Sinyal emici yapısının polarizasyon açısından bağımsız olma özelliği bu yapıyı literatürdeki diğer çok bantta emilim yapan sinyal emici yapılarından ayırır. Bu özelliği göz önünde bulundurularak, önerilen yapı, yaşadığımız çevrede GSM, WIMAX ve uydu iletişim bandında gelen EM sinyallerinin hasat edilmesi için literatürde bildirilen diğer yapılardan daha uygundur.



Şekil 4.6. Üç katmanlı yapının, farklı polarizasyon açlarına göre emilim tepkisi

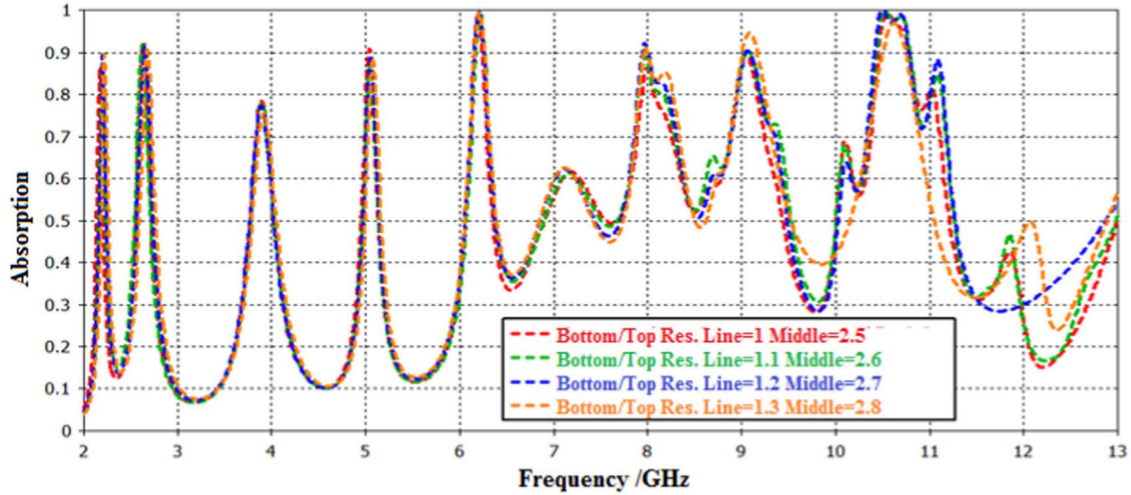
Şekil 4.7’de sinyal emici yapısındaki ayrık kare halka rezonatörlerin yatayda bulunan boşluk genişliğindeki ( $g$ ) değişimin sinyal emilim seviyesi ve frekans tepkisi üzerine etkileri incelenmiştir. Nümerik çözümler, kare halka rezonatörde bulunan simetrik iki boşluk genişliği 0.3 mm ‘lik adımlarla 0,4 ila 1,6 mm arasında değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7’de boşluk genişliğinin artmasıyla çalışma frekans aralığının biraz yukarı kaydığı görülmektedir. Bu kaymadan rezonatörün parçaları arasındaki boşlukta oluşan kapasitenin etkisi büyüktür. Çünkü rezonatörün uçları arasındaki kapasitif etki boşluk genişliği ile ters orantılıdır. Boşluk genişliğinin değişimine göre rezonans frekanslarındaki değişimin az olması boşluk genişliğinin hem rezistör hem de indüktif özelliklere sahip olan rezonatörün metalik kısmına göre çok daha küçük boyutlara sahip olmasından dolayıdır. Diğer taraftan emilim seviyesinin çok yüksek olduğu frekanslardaki bant genişliği boşluk genişliğinin değişiminden hemen hemen etkilenmemektedir. Bu nedenle sinyal emici yapısının rezonans frekansları emilim seviyelerini etkilemeden boşluk genişliği değiştirilerek ayarlanabilir.



Şekil 4.7. Boşluk genişliğinin rezonans frekansı ve emilim değerleri üzerine etkileri

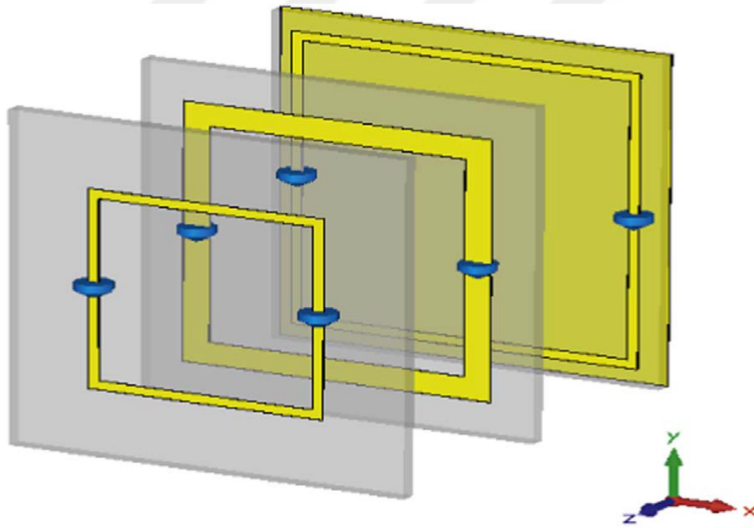
Şekil 4.8’de ise ayırık kare halka rezonatörlerin hat genişliğindeki değişimin yapının emilim özelliği üzerine etkisi araştırılmıştır. Nümerik çözümlerde alt ve üst dielektrik katmanlarda bulunan ayırık kare halka rezonatörlerin hat genişliği( $w_1, w_3$ ) 0.1 mm ‘lik adımlarda 1 mm’ den 1.3 mm’ye kadar, orta dielektrik katmanda bulunan rezonatörün hat genişliği ( $w_2$ ) ise 0.1 mm ‘lik adımlarla 2.5 mm’den 2.8 mm’ye kadar artırılmıştır. Şekil 4.8’de, çizgi genişlikleri arttıkça, çalışma frekansı aralığının biraz yukarı doğru kaydığı, ancak emilim seviyesinde hafif bir azalmanın gözlemlendiği görülebilir. Bununla birlikte, ayırık kare halka rezonatörlerin değişen rezonatör hat genişliğinin etkisi dikkate alınacak kadar önemli değildir. Emilim seviyesindeki bu küçük kayma, hat genişliğinin rezonatörlerin kapasitif ve indüktif özellikleri üzerindeki düşük etkisinden kaynaklanmaktadır. Hat genişliğindeki değişim, kapasitansı değiştirirse de, boşluk genişliği değişikliklerinde olduğu gibi dikkate değer değişiklikler göstermez. Başka bir deyişle, yapının genel kapasitansı, endüktans değerine göre çok daha küçüktür. Ayrıca, emilim seviyesindeki ihmal edilebilir değişimi de, hat genişliğinin rezonatörlerin indüktans kapasitesini çok fazla etkilemediğini kanıtlamaktadır.





Şekil 4.8. Ayrık kare halka rezonatörlerin farklı hat genişlik değerleri için rezonans frekansları ve emilim tepkileri

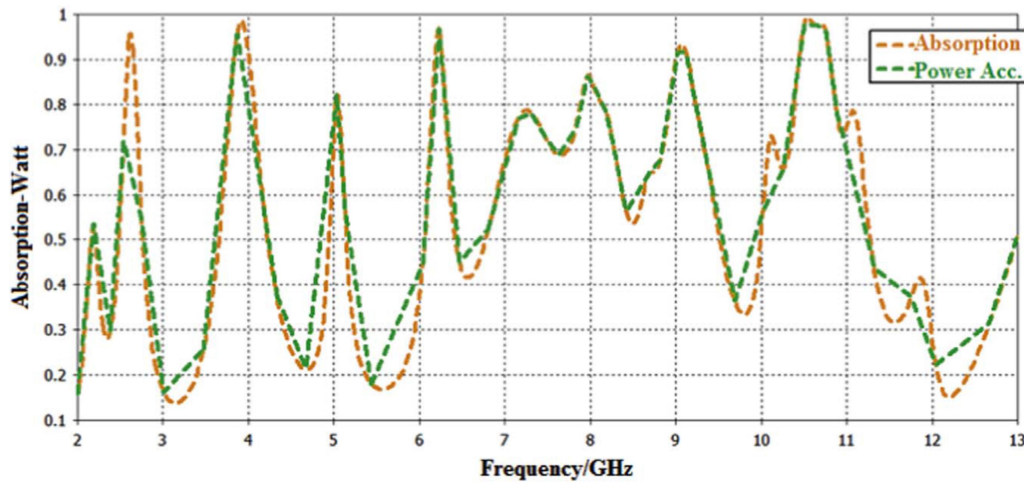
Ayrık kare halka rezonatör yapısının enerji hasatlama özelliği de araştırılmıştır. Şekil 4.9’da gösterildiği gibi rezonatörün yatayda bulunan boşluklarına  $2000\Omega$  değerindeki dirençler bağlanmıştır. Rezonatör boşluklarına bağlanan dirençlerin değerleri empendans eşleşmesi ve dolayısı ile maksimum güç aktarımının sağlanması için çok önemlidir.



Şekil 4.9. Üç katmanlı ayırık kare halka rezonatöre dirençlerin yerleştirilmesi

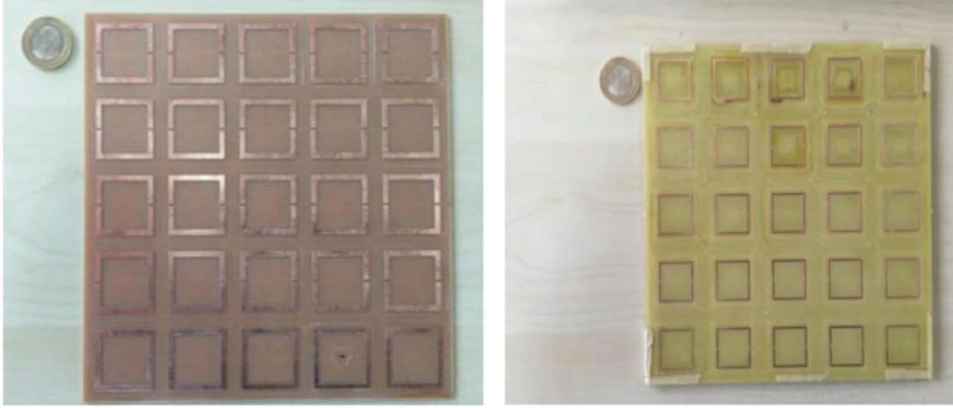
Şekil 4.10’da dirençler bağlanan üç katmanlı ayırık kare halka rezonatör yapısının emilim seviyesi ve yapı tarafından hasatlanan güç gösterilmektedir. Şekil 4.10’da görüleceği üzere yapı tarafından emilen gücün hemen hemen hepsi dirençlere transfer edilmiştir. Bu nedenle yapı GSM, WIMAX ve uydu iletişim bantları dahil olmak üzere mikrodalga frekans bölgesinde enerji hasatlama uygulamalarında kullanılabilir. Emici tabanlı

hasatlayıcı VLAN frekans bandında bulunan 2.7 GHz'de % 70'lik bir rezonansa ve kabul edilen güç oranlarına sahiptir. Ayrıca, yapı, WIMAX aralığında sırasıyla 5 GHz ve 6.2 GHz' de % 80 ve % 97'lik bir kabul edilen güç oranlarına ve rezonansa sahiptir. Uydu iletişim aralığındaki rezonans frekansları sırasıyla% 92 ve% 99 kabul edilen güç oranları ile 9 GHz ve 10.8 GHz dir. Sinyal emici tabanlı enerji hasatçı yapısının her bir tabakadaki rezonatörleri yukarıda belirtilen her bir iletişim bandındaki rezonanslardan sorumludur.



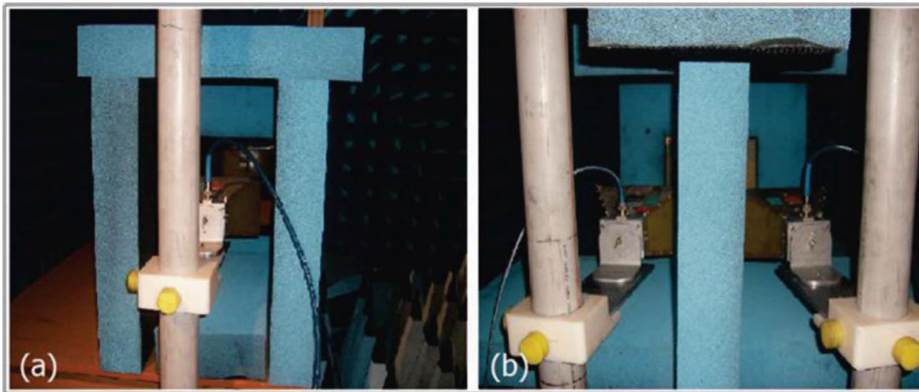
Şekil 4.10. Sinyal emici tabanlı yapının sinyal emilim tepkisi ve kabul edilen güç oranı

Nümerik çalışmaları desteklemek adına üç katmanlı ayırık kare halka rezonatörün deneysel ölçümleri de yapılmıştır. Şekil 4.11'de 5x5 , 25 birim hücreden oluşan yapının alttaki ve üsteki katmanları görülmektedir. Yapının birim hücresinin üç adet rezonatör katmanı vardır; birim hücreyi oluşturan her katman, bir dielektrik malzeme üzerine yerleştirilmiş bir metal rezonatörden oluşur. Her tabaka, LPKF S33 Protomat Cihazı kullanılarak yukarıda verilen boyutlarda sadık kalınarak üretilmiştir. Daha sonra katmanlar üst üste yerleştirilerek üç katmanlı yapı oluşturulmuştur. En büyük rezonatöre sahip katmanın arka tarafı iletimi engellemek amacı ile metal bir plaka ile kaplıdır.



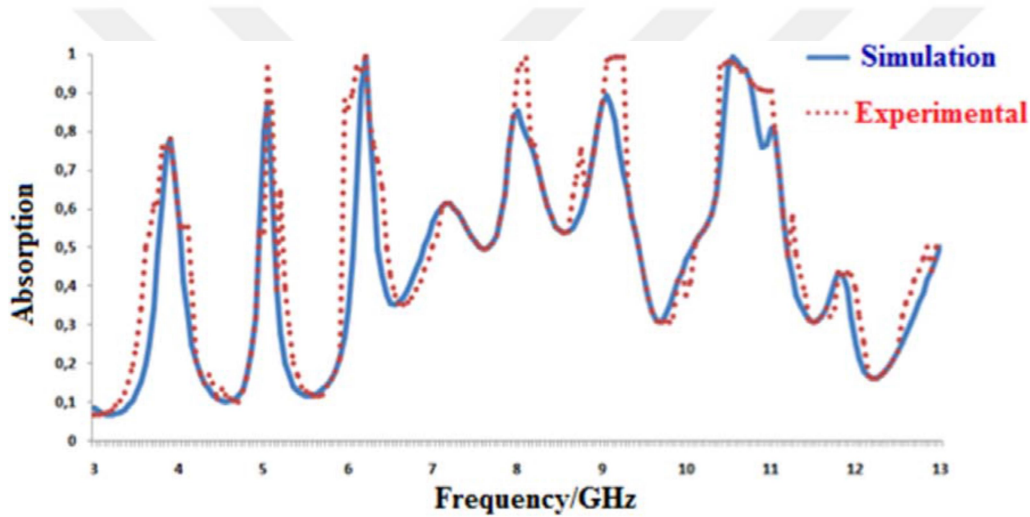
Şekil 4.11. Üretilen en alt ve en üst katmanın üstten görünüşü

Açık alan ölçümleri Şekil 4.12’de gösterilen iki horn anten kullanılarak yankısız bir odada yapılmıştır. Antenler, uzak alan koşulları sağlamak için birbirinden yeterince uzağa yerleştirilmiştir. Üç katmanlı ayırık kare halka rezonatörlü yapının arka tarafı metal plaka ile kaplandığında, yapının arkasına hiçbir EM sinayali iletimi olmayacaktır. Bu nedenle emilim katsayısını değerlendirmek için sadece yansıma katsayısının bilinmesi yeterli olacaktır. Ölçümler, AGILENT E8362B PNA Network analizörü (VNA) ve iki lineer polarize yüksek kazançlı mikrodalga horn anteni kullanılarak üç katmanlı ayırık kare halka rezonatörlü sinyal emici yapısına dirençler bağlanmadan gerçekleştirilmiştir. VNA, 3 ila 13 GHz arasında bir frekans aralığında mikrodalgalar sağlar. Yansıma ve iletim katsayılarını elde etmek için kullanılan deney düzeneği, Şekil 4.12. (b)’de gösterilmiştir. Yansıma değeri, verici antenine göre  $15^\circ$  'lik bir açıyla ölçülür. Yansıyan dalganın normalleşmesi, bakır tabakanın, yapının aynı boyutlarıyla ve antenle aynı mesafeyle yansımaya dayanarak gerçekleştirilir.



Şekil 4.12. Yankısız odada (a) bir horn anteni, (b) iki horn anteni ile yapılan ölçüm düzeneği

Emilim katsayısı, emilim denklemi kullanılarak yansıma katsayısından elde edilmiştir. Şekil 4.13'te yapının emilim katsayısının nümerik ve ölçüm sonuçları gösterilmektedir. Frekans aralığı, kablodaki küçük kalite ve uzunluk değişikliklerinden ve çevresel laboratuvar koşullarından etkilenecek kadar yüksek olmasına rağmen deneysel sonuçlar nümerik çözümlerle uyumludur. Bu nedenle yüksek emilim seviyesine sahip ve gelen EM sinyalinin polarizasyon açısından bağımsız olmasından dolayı üç katmanlı ayırık kare halka rezonatörlü sinyal emici yapısı yaşadığımız ortamda yaygın olarak kullanılan kablosuz iletişim bantlarındaki yayılan elektromanyetik enerjinin emilimini, yüksek emilim seviyelerinde ve bant genişliğinde yapmasından dolayı enerji hasadı uygulamaları için iyi bir adaydır.



Şekil 4.13. Üç katmanlı yapının ölçüm ve sayısal sonuçlarının karşılaştırılması

#### 4.1.2. Üç Tip Ayırık Halka Rezonatöre Sahip Dirençli Sinyal Emici

Bu bölüm başlıca tek / iki / üç tip SCR yapıları ve simülasyon sonuçlarından oluşmaktadır. İlk olarak, önerilen yapı açılı bağımlılıklarına ve SCR'lerin etkisine göre incelenmiştir. Daha sonra bu yapıların elektrik alanı ve yüzey akımı dağılımları elde edilmiş ve parametrik çalışmalar yapılmıştır. Son olarak, önerilen yapının enerji hasatı uygulaması ve üretimi gerçekleştirilmiştir.

##### 4.1.2.1. Tek ve İki Tip Ayırık Halka Rezonatöre Sahip Sinyal Emici ve Enerji

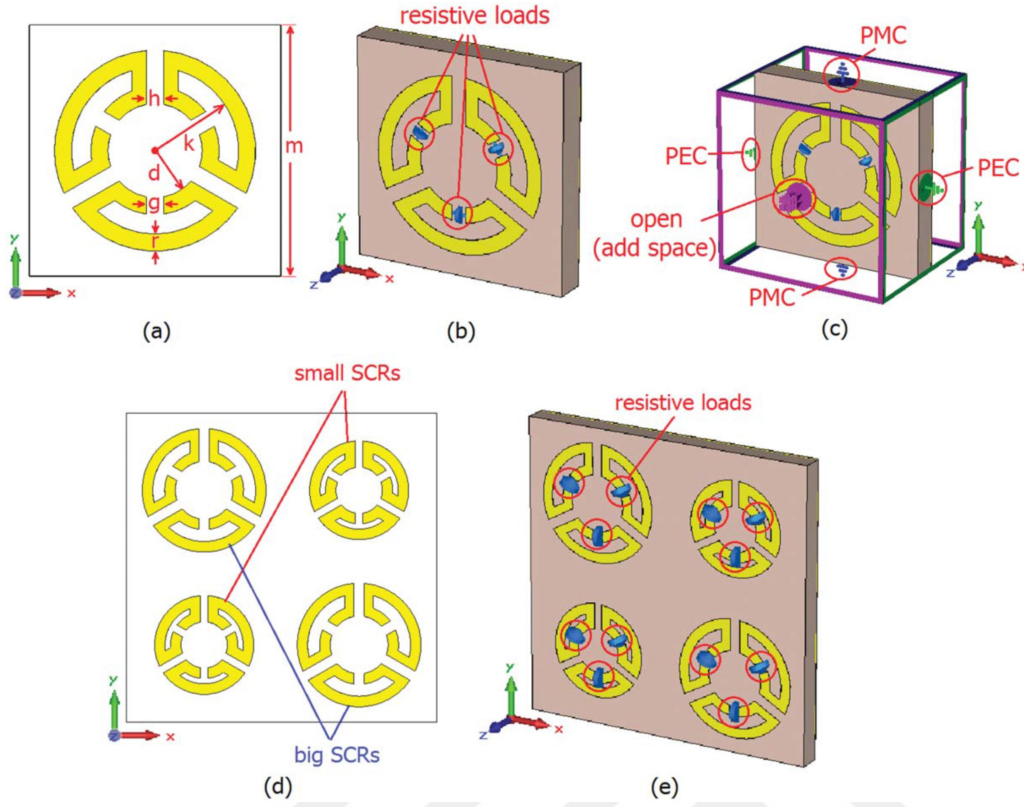
###### Hasatçısı

Tek ve iki tip SCR' ye sahip olan sinyal emici yapısı üstte SCR, altta düz metal plaka ve bu ikisinin arasında bulunan dielektrik katmandan oluşur. Tek ve iki tip SCR' ye sahip olan

sinyal emici yapısının birim hücresi Şekil 4.14'te ve Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Her iki yapı için üstteki SCR ve alttaki metal plaka olarak elektrik iletkenliği  $\sigma = 5 \times 10^7$  s/m olan bakır kullanılmıştır. Ortadaki dielektrik katmanın bağıl dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı sırasıyla  $\epsilon_r=4.7$  ve  $\delta=0.016$ 'dır. Şekil 4.15. (a)'da gösterilen tek tip SCR'li sinyal emici yapısında dıştaki halkanın yarıçapı 13.3 mm (k), içteki halkasının yarıçapı 7.5 mm (d), SCR'nin hat genişliği 2.7 mm (r), rezonatör parçaları arasındaki boşluk 2 mm (h), içteki halkada bulunan boşluk 2 mm (g) ve rezonatörün ve arkadaki bakır levhanın kalınlığı 0.035 mm'dir. Ayrıca dielektrik ve altta bulunan bakır plakanın eni ve boyu 40 mm (m), dielektrik katmanın kalınlığı 6 mm'dir. Şekil 4.15. (d)'de gösterilen iki tip SCR'ye sahip sinyal emicideki küçük SCR'lerin dış halkalarının yarıçapı, iç halkalarının yarıçapı, SCR'nin hat genişliği, rezonatör parçaları arasındaki boşluk, içteki halkada bulunan boşluk sırasıyla 10.1 mm, 6 mm, 2.7 mm, 2 mm, 2 mm'dir. Aynı uzunluklar büyük SCR için 13.3 mm, 7.5 mm, 2.7 mm, 2 mm, 2 mm'dir. Küçük ve büyük rezonatörlerin ve arkadaki bakır plakanın kalınlığı 0.035mm, dielektrik katmanın kalınlığı 6 mm ve dielektrik katmanın ve arkadaki bakır plakanın en ve boy uzunlukları 80 mm'dir. Geniş frekans bandı ve yüksek emilim elde etmek için tek ve iki tip SCR'li sinyal emicilerin boyutları parametrik çalışmalar ile bulundu. Yapının nümerik sonuçları TEM dalgası için sonlu integrasyon tekniği (FIT) tabanlı üç boyutlu ticari tam dalga elektromanyetik çözücü simülasyon programından elde edilmiştir. Nümerik çözümlerde, elektrik ve manyetik alanlar sırasıyla x ve y eksenine paralel olarak seçildi ve dalga vektörü Şekil 4.15. (c)'de gösterilen SCR'li sinyal emici yapısına dik olarak seçildi. Bu koşulları sağlamak için simülasyon programında sınır koşulları x, y ve z eksenlerinde sırasıyla PEC, PMC ve boşluk olarak ayarlandı. PEC ve PMC sınır koşulları sinyal emicinin birim hücresinin sonsuz boyutlarıyla periyodik olmasını sağlar. İki tip SCR'li sinyal emici yapısının sınır koşulları tek tip SCR'li sinyal emici yapısı ile aynıdır.



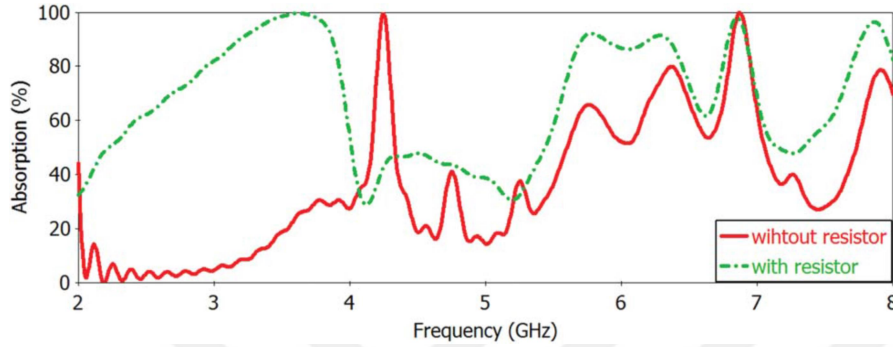
Şekil 4.14. SCR' lere sahip sinyal emici yapısının yandan görünüşü



Şekil 4.15. Tek tip SCR'li (a) sinyal emici yapısı, (b) enerji hasatçı yapısı, (c) yapının sınır koşulları, iki tip SCR'li (d) sinyal emici yapısı, (e) enerji hasatçı yapısı

Şekil 4.16'da, Şekil 4.15. (a) ve (b)'de gösterilen tek tip SCR'ye sahip yapının dirençli ve dirençsiz sinyal emici karakteristiği araştırılmıştır. Yapıya yerleştirilen dirençlerin değerleri  $250\Omega$ 'dur. Dirençsiz tek tip SCR'li yapının rezonans frekanslarındaki EM sinyali emme seviyesi 4.24 GHz ve 6,87 GHz'de sırasıyla 99.45 ve 99.92'dir. Bu yapının rezonans frekanslarındaki bu emilim değerleri bu sinyal emici yapısını mükemmel sinyal emici yapar. Fakat dirençsiz tek tip SCR'li yapı rezonans frekanslarında yüksek emilim değerlerine sahip olmasına rağmen, rezonans frekanslarında dar bir bant genişliğine sahiptir. Çizelge 4.1'de tek tip SCR'li dirençli ve dirençsiz sinyal emici yapısının %80'nin üzerinde emilim değerine sahip rezonans frekans aralıkları ve bu rezonans frekanslarındaki bant genişlikleri gösterilmektedir. Şekil 4.16'dan ve Çizelge 4.1'den de görüleceği üzere tek tip SCR'li sinyal emici yapısına dirençlerin yerleştirilmesi, yapının sinyal emilim değerini özellikle düşük frekanslarda (2-4GHz) oldukça arttırmıştır. Ayrıca dirençli tek tip SCR'li yapı 3.62 GHz, 6.85 GHz ve 7.82 GHz'de sırasıyla %99.71, %97.95 ve %96.47 gibi yüksek sinyal emilim oranlarına sahiptir. Şekil 4.16'da  $250\Omega$  değerindeki dirençli yüklere sahip tek tip SCR'li sinyal emici yapısının yüksek sinyal emilim oranlarına ve daha geniş bantlara sahip olduğu görülebilir. Yani yapıya yerleştirilen dirençler yapının

emilim verimliliğini önemli ölçüde arttırmıştır. Dirençsiz tek tip SCR'li yapının emilim büyüklüğünün % 80'in üzerinde olduğu bant genişliği toplamda 0.25 GHz iken, dirençli tek tip SCR'li yapıda bu değer 2.34 GHz'dir. Yani tek tip SCR'li yapıya yerleştirilen dirençli yükler yapının emilim büyüklüğünün % 80'in üzerinde olduğu bant genişliğini 9,36 katına çıkarmıştır.



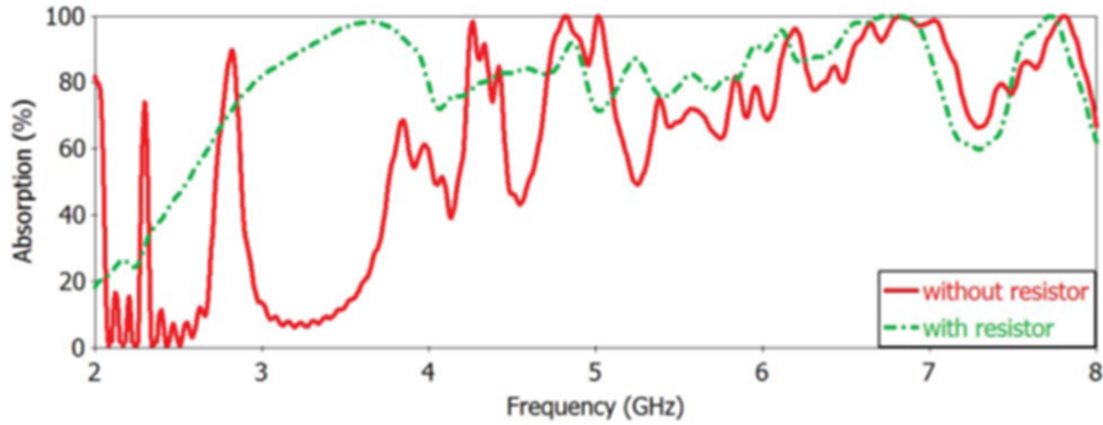
Şekil 4.16. Dirençli ve dirençsiz tek tip SCR'ye sahip sinyal emici yapısının emilim tepkisi

Çizelge 4.1. Dirençli ve dirençsiz tek tip SCR'li yapının emilim büyüklükleri

		1.	2.	3.	4.	Toplam
Dirençsiz Yapı	Frekans Aralığı (GHz)	4,2–4,29	6,79–6,95			
	Bant genişliği (GHz)	0,09	0,16			0,25
Dirençli Yapı	Frekans Aralığı (GHz)	2,94–3,94	5,62–6,44	6,74–6,95	7,69–8	
	Bant genişliği (GHz)	1	0,82	0,21	0,31	2,34

Dirençli tek tip SCR'ye sahip olan yapı, 2,94 ve 3,91 GHz arasında yüksek emme büyüklüğüne sahip olmasına rağmen, 4 ve 5.6 GHz arasında düşük emiciliğe sahiptir. Bu frekans aralığındaki emiciliğin artırılması için, farklı boyutlara sahip iki tip SCR'den oluşan bir yapı tasarlanmıştır. Şekil 4.17'de Şekil 4.15. (d) ve (e)'de gösterilen iki tip SCR'ye sahip yapının dirençsiz ve dirençli sinyal emilim karakteristiği araştırılmıştır. Şekil 4.15. (e)'de gösterilen dirençli SCR yapısında kullanılan dirençlerin büyüklükleri 250  $\Omega$ 'dur. Tek tip SCR'li sinyal emici yapısında olduğu gibi, iki tip SCR'li sinyal emici yapısında daha geniş frekans bandında yüksek emilim oranları elde etmek için en iyi ölçüleri bulmak amacıyla, SCR'lerin boyutları parametrik bir çalışma ile bulunmuştur. Şekil 4.17'de dirençli yüklerle sahip iki tip SCR'li yapının, dirençli yüklerle sahip olmayan

iki tip SCR'li yapıdan daha yüksek emiciliğe ve daha geniş bant genişliğine sahip olduğu görülebilir. Çizelge 4.2'de iki tip SCR'li dirençli ve dirençsiz sinyal emici yapısının %80'nin üzerinde emilim değerine sahip rezonans frekans aralıkları ve bu rezonans frekanslarındaki bant genişlikleri gösterilmektedir. Çizelge 4.2'ye baktığımızda dirençlere sahip iki tip SCR'li yapının 1., 2. ve 5. rezonans frekanslarında geniş bir banda sahip olduğunu fakat dirençsiz iki tip SCR'li yapının yalnızca 3. ve 5. rezonans frekanslarında geniş bir banda sahip olduğunu görebiliriz. Dirençli yüke sahip olan iki tip SCR'li yapının, en az % 80 emilime sahip toplam bant genişliği açısından, dirençsiz iki tip SCR'li yapınınkinden daha büyüktür.



Şekil 4.17. Dirençli ve dirençsiz iki tip SCR'ye sahip yapının emilim karakteristiği

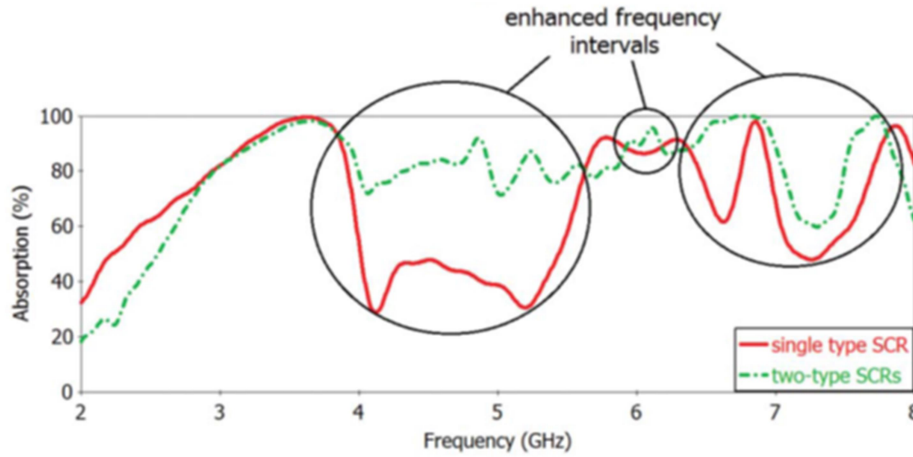
Çizelge 4.2. Dirençli ve dirençsiz iki tip SCR'li yapının emilim büyüklüğünün

		1	2	3	4	5	6	Toplam
Dirençsiz Yapı	Frekans Aralığı (GHz)	2,78-2,84	4,3-4,36	4,7-5,8	6,09-6,28	6,36-7,17	7,5-7,9	
	Bant genişliği (GHz)	0,06	0,06	1,1	0,19	0,81	0,4	2,62
Dirençli Yapı	Frekans Aralığı (GHz)	2,95-3,99	4,32-4,94	5,14-5,32	5,5-5,63	5,74-7,05	7,49-7,89	
	Bant genişliği (GHz)	1,04	0,62	0,18	0,13	1,31	0,4	3,68

Şekil 4.18'de ise dirençlere sahip tek tip ve iki tip SCR'li yapının emilim tepkisi karşılaştırılmıştır. Şekil 4.18'den de görüleceği üzere dirençlere sahip iki tip SCR'li sinyal emici yapısı 4 GHz ile 5,6 GHz arasında, 5,91 GHz ile 6,17 GHz arasında ve 6,37 GHz ile 8 GHz arasında emiciliği geliştirmiştir. Ayrıca iki tip SCR'li dirençlere sahip yapının



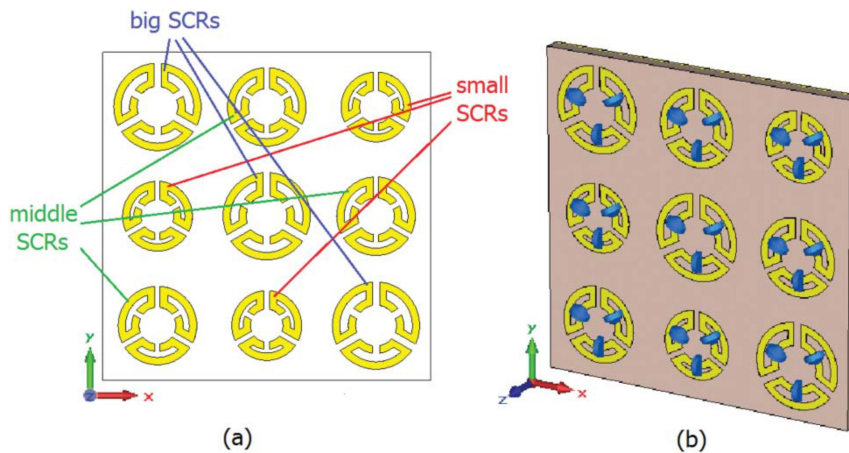
toplam bant genişliği(3,68 GHz) tek tip SCR'li dirençlere sahip yapının toplam bant genişliğinden (2,34 GHz) büyüktür. Bundan dolayı yeni tasarlanan sinyal emici yapısı (iki tip SCR'li dirençlere sahip yapı) yaygın olarak kullanılan Wi-MAX frekans bandında enerji hasadı için iyi bir aday olabilir.



Şekil 4.18. Dirençlere sahip tek tip SCR'li ve iki tip SCR'li sinyal emici yapılarının sinyal emilim karakteristiklerinin karşılaştırılması

#### 4.1.2.2. Üç Tip Ayrık Halka Rezonatörlü Sinyal Emici ve Enerji Hasatçısı

İki tip SCR'li dirence sahip sinyal emici yapısı çalışma frekansında(2-8 GHz) yüksek emiciliğe sahiptir. Ancak bazı frekans aralıklarında iki tip SCR'li sinyal emici yapısının sinyal emilim seviyesi %80'nin altındadır. İki tip SCR'li yapının bu eksikliğini gidermek için üç tip SCR'ye sahip bir sinyal emici yapısı tasarlanmıştır. Şekil 4.19'da üç tip SCR'li dirençsiz ve direnç yerleştirilmiş sinyal emici yapısı gösterilmiştir. Yapının ölçüleri Çizelge 4.3'te gösterilmektedir.



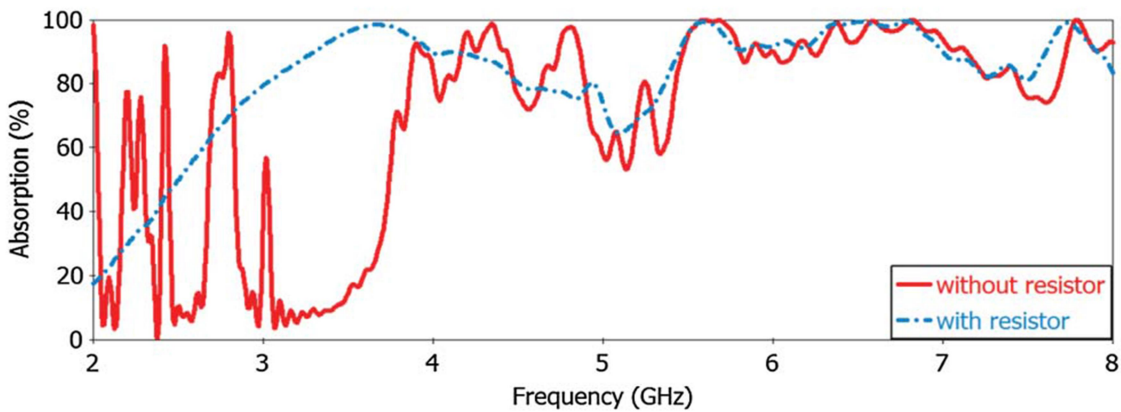
Şekil 4.19. Üç tip SCR'li (a) dirençsiz (b) dirençlere sahip sinyal emici yapısı

Çizelge 4.3. Üç tip SCR'ye sahip yapının ölçüleri

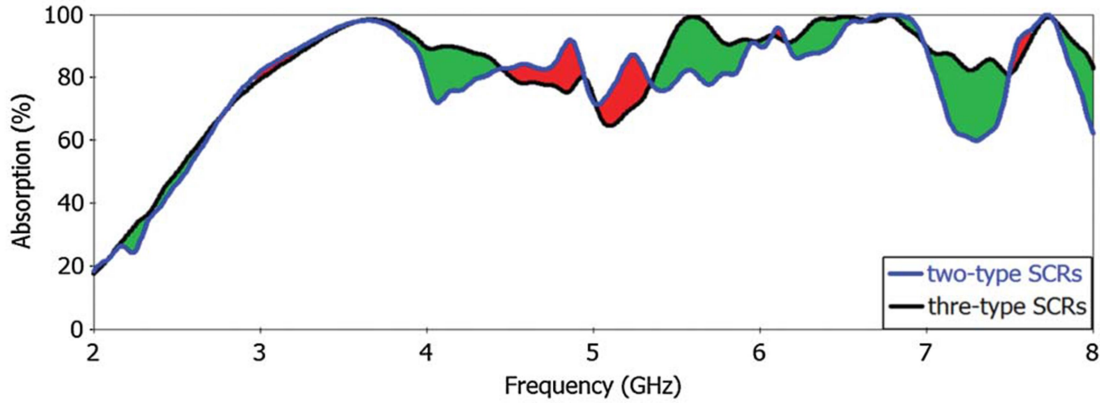
Ölçüler (mm)	k	d	m	r	h	g
Büyük SCR	13,3	7,5		2,7	2	2
Ortanca SCR	11,7	6,75	120	2,7	2	2
Küçük SCR	10,1	6		2,7	2	2

Şekil 4.20'de dirençsiz ve direnç yerleştirilmiş üç tip SCR'li yapının belirtilen frekans aralığında sinyal emilim karakteristiği gösterilmiştir. Tek tip SCR'li ve iki tip SCR'li sinyal emici yapısıyla karşılaştırıldığında üç tip SCR'li sinyal emici yapısına dirençler yerleştirildiğinde yapı, mükemmel bir emilim özelliği göstermektedir.

Şekil 4.21'de ise belirtilen çalışma frekansında direnç yerleştirilmiş iki tipli SCR'ye sahip sinyal emici yapısıyla üç tip SCR'ye sahip sinyal emici yapısının sinyal emilim özellikleri karşılaştırılmıştır. Şekilde yeşil boyalı olan yerler üç tip SCR'li yapının sinyal emilim değerlerinin iki tip SCR'li yapıya göre daha iyi olduğu yerleri belirtmektedir. Küçük bir frekans aralığında (4,5- 5,5 GHz) iki tip SCR'li yapının sinyal emilim değerleri üç tip SCR'li yapının sinyal emilim değerlerinden daha iyidir. Tüm bu sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, üç tip SCR'li yapı geniş frekans aralığına ve mükemmel emilim değerlerine sahip olduğundan dolayı çalışmalar için üç tip SCR'li yapı seçilmiştir.

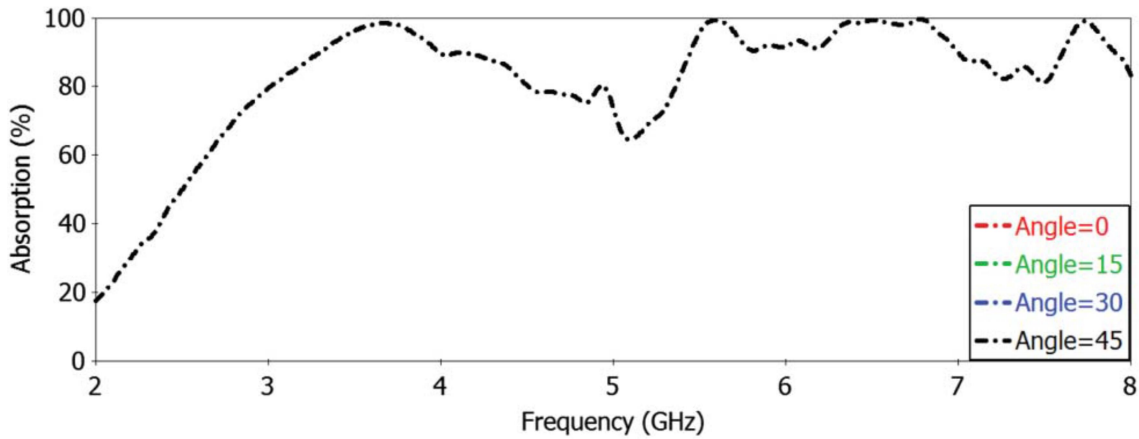


Şekil 4.20. Dirençli ve dirençsiz üç tip SCR'ye sahip yapının emilim tepkisi



Şekil 4.21. İki tip SCR'ye ve üç tip SCR'ye sahip yapının emilim değerlerinin karşılaştırılması

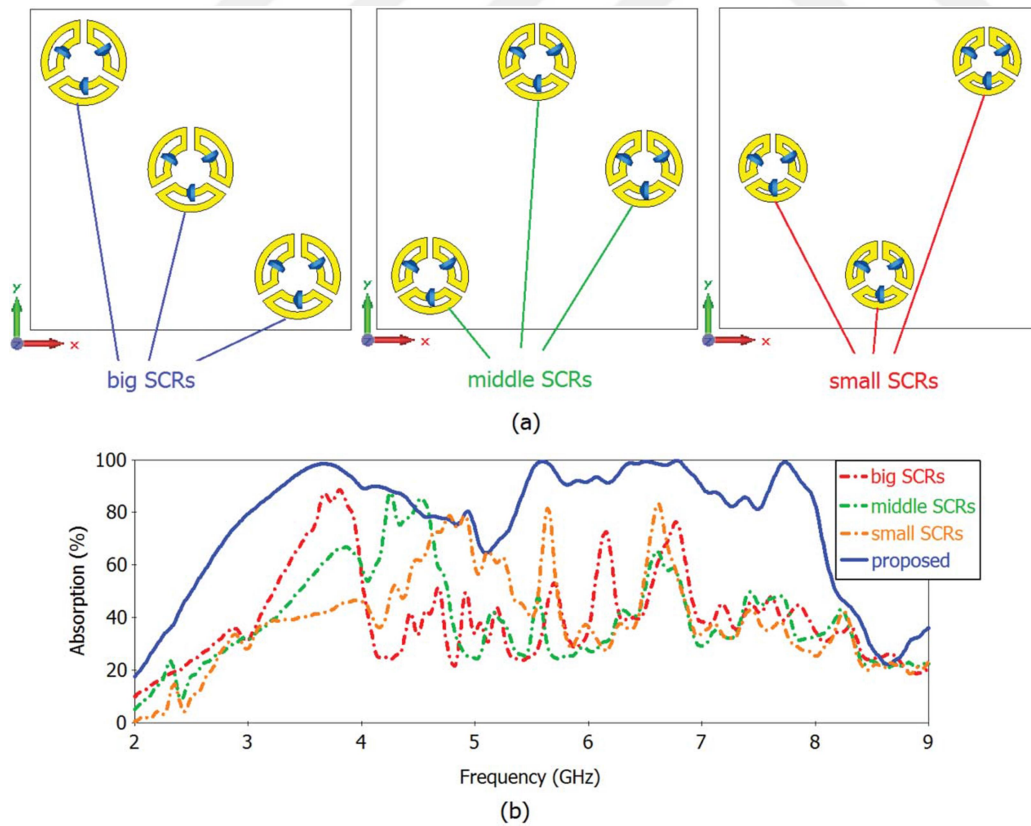
Şekil 4.22'de üç tip SCR'li dirençlere sahip sinyal emici yapısının EM sinyalinin farklı polarizasyon açılarına göre emilim tepkisinin nümerik çözümleri gösterilmiştir. Nümerik çözümler gelen EM sinyalinin TEM dalga olduğu durumlar için yapılmıştır. Üç tip SCR'li dirençlere sahip yapısında üç farklı çeşit SCR olmasına ve rezonatörlerin yerleşimleri asimetric olmasına rağmen yapısal olarak merkezi simetri özelliği sayesinde, sinyal emici yapısının sinyal emilim tepkisi gelen EM dalganın geliş açısından bağımsızdır. Önerilen yapının açısal duyarsız özelliği sayesinde, mikrodalga frekans bölgesinde EM sinyalin polarizasyon açısı bağımsızlığı ile mükemmel bir sinyal emici olarak kullanılabilir.



Şekil 4.22. Farklı açılarda gelen EM sinyali için yapının emilme tepkisi

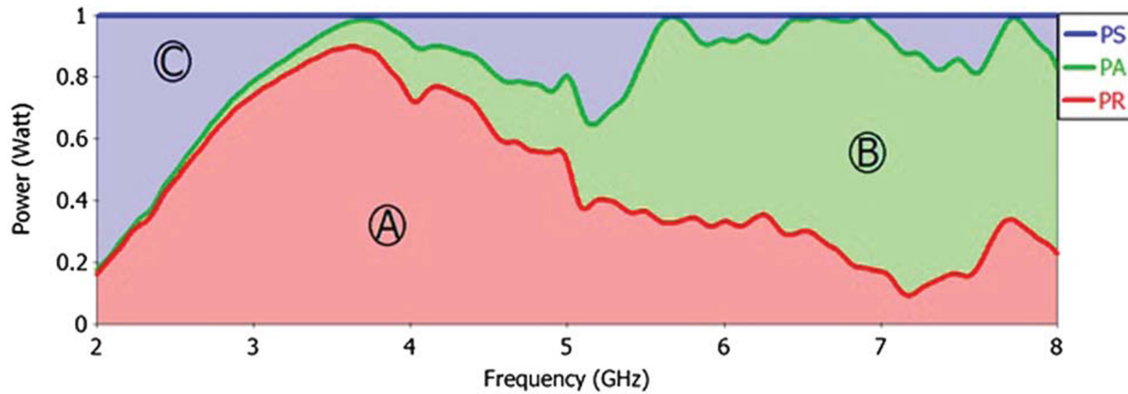
Şekil 4.23'te ise üç tip SCR'li dirençlere sahip sinyal emici yapısında bulunan SCR çeşitlerinin bireysel olarak sinyal emilim tepkileri ve önerilen sinyal emici yapısının emilim tepkileri gösterilmektedir. Nümerik çözümler gelen EM sinyalinin TEM durumu için yapılmıştır. Şekil 4.23. (a)'da sadece büyük, orta ve küçük SCR'lere sahip sinyal emici yapıları gösterilmektedir. Şekil 4.23. (b)'den de görüleceği üzere önerilen üç tip SCR'li

sinyal emici yapısının emilim değerleri çalışma frekansının neredeyse tümünde sadece küçük, orta ve büyük SCR'lere sahip sinyal emicilerin emilim değerlerinden daha yüksektir. SCR çeşitlerinin bireysel emilim tepkileri yeterli seviyede olmamasına rağmen bu SCR çeşitlerinin birleşmesiyle oluşan üç tip SCR'li sinyal emici yapısının emilim tepkisi tüm çalışma frekansında çok iyi seviyelerdedir. Yani her bir SCR grubu çalışma frekansının büyük bir bölümünde birbirlerinin düşük seviyeli emilim oranlarını telafi eder. Örneğin yalnızca büyük SCR'lere sahip sinyal emici yapısı 4 ile 6 GHz arasında mükemmel bir emiciliğe sahip olmasa da küçük ve orta boydaki SCR'lerin yardımıyla önerilen sinyal emici yapısı bu frekans aralığında mükemmel bir emiciliğe sahiptir. Benzer şekilde küçük ve orta boy SCR'lere sahip sinyal emici yapıları 3 ile 4 GHz arasında iyi emilim değerlerine sahip değildir. Fakat büyük boyutlu SCR'lerin desteği sayesinde önerilen sinyal emici yapısı bu frekans aralığında %80 üzerinde emilim yüzdesine sahiptir. Bu nümerik çözümler ile SCR'lerin boyutlarının rezonans frekansları üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. Yani büyük SCR'ler düşük frekanslarda rezonanslara sebep olurken, küçük SCR'ler yüksek frekanslarda rezonansa sebep olurlar.



Şekil 4.23. (a) Sadece küçük, orta ve büyük SCR'lere sahip yapının birim hücreleri, (b) her bir SCR grubunun ve önerilen yapının bireysel emilim tepkisi

Şekil 4.24'te ise üç tip SCR'li dirençlere sahip sinyal emici yapısının enerji hasadı çalışmaları yapılmıştır. Yapıda bulunan dirençler yapının emilimini artırması yapının enerji hasatçısı olarak kullanılabilceği fikrini ortaya çıkarmıştır. Şekil 4.24'te yeşil çizgi SCR'ler ve dirençlerden oluşan rezonatör tarafından kabul edilen ve dielektrikte hapsolan güç (PA), kırmızı çizgi kabul edilen gücün dirençler de kullanılan bölümü yani tüketilen güç(PR) ve yeşil çizgi ise EM sinyal tarafından yapıya uygulanan gücü (PS) temsil etmektedir. Şekil 4.24'te PA ve PR 'nin 2 ile 3.5 GHz arasında benzer frekans tepkisi gösterdiği görülmektedir. Bu da belirtilen frekans aralığında yapı tarafından kabul edilen gücün büyük bir bölümünün dirençlere aktarıldığı anlamına gelir ve dirençlere aktarılan bu güç gerçek güç olarak tüketilirler. Dirençler tarafından kullanılan PR dirençlerde bulunan potansiyel gücü temsil eder ve bu da enerji hasadı uygulamalarında önemli bir parametredir. Ayrıca Şekil 4.24'e bakıldığında dirençler tarafından kullanılan gücün Wi-Fi bandının büyük bir kısmına karşılık gelen 3 ile 4 GHz arasında %70 üzerinde olduğu görülmektedir. Uygun mikrodalga devreleri kullanılarak dirençlerde kullanılan güç elektrik enerjisi dönüştürülebilir. Ayrıca 4 ile 5 GHz frekans aralığında da kabul edilen güç %50'nin üzerindedir. Bu da bu yapının V-MAX frekans bandında da enerji hasatçısı olarak kullanılabilceğini göstermektedir.



Şekil 4.24. Üç tip SCR'li dirençlere sahip yapı tarafından kabul edilen güç, SCR'lerde bulunan dirençlerde kullanılan güç ve yapıya uygulanan EM sinyalin gücü

Şekil 4.25'te üç tip SCR'li ve dirençlere sahip yapının güç çevrimi verimlilikleri gösterilmiştir. Enerji hasatçı uygulamalarında üç tip güç verimliliğinden bahsetmek mümkündür. Bunlar emilim verimliliği (AE), dönüşüm verimliliği (CE) ve hasat verimliliğidir (HE) [72].

Emilim verimliliği gelen EM dalgadan başarılı bir şekilde emilen gücün yüzdesi olarak ifade edilir ve aşağıdaki gibi elde edilir;

$$AE = \frac{PA}{PS} \times 100 \quad (4.1)$$

Dönüşüm verimliliği, kabul edilen gücün (PA) başarılı bir şekilde dirençlerde kullanılan bölümünün yüzdesi olarak ifade edilir.

$$CE = \frac{PR}{PA} \times 100 \quad (4.2)$$

Hasat verimliliği ise dirençlere başarıyla aktarılan (PR) gelen EM dalganın gücün (PS) yüzdesi olarak ifade edilir.

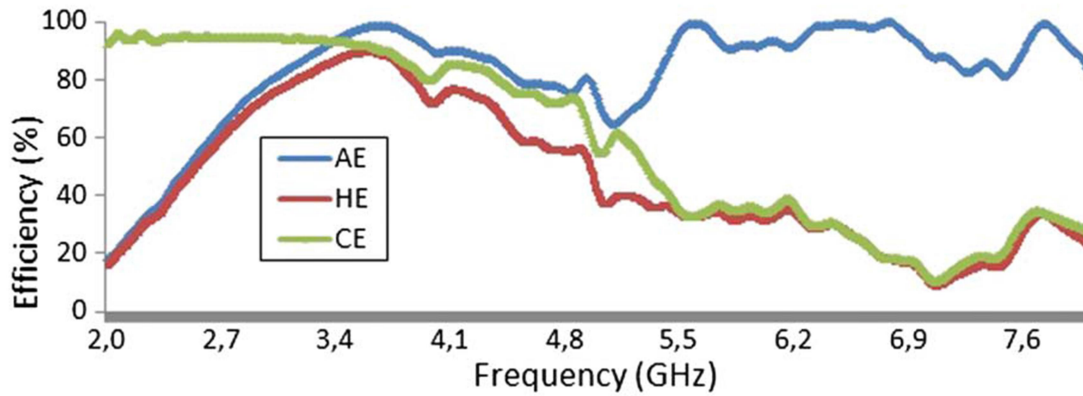
$$HE = \frac{PR}{PS} \times 100 \quad (4.3)$$

Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak üç tip SCR'li dirençlere sahip yapının Şekil 4.25'te gösterilen AE, CE ve HE değerleri çalışma frekansı aralıklarında hesaplandı. Şekil 4.25'e bakıldığında AE ve HE'nin (4.1) ve (4.3) eşitliklerinden dolayı PA ve PR ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. CE ise eşitlik (4.2) 'de PR'nin PA'ya oranı olarak verildiğinden bunların birbirine yakın olması daha iyi bir dönüştürme verimliliği(CE) sağlar. Örneğin 2 ile 4 GHz arasında PA ve PR birbirlerine çok yakın olduklarından bu frekans aralığında CE %80 üzerindedir. Ayrıca Şekil 4.24'te grafiğin altında kalan alanlardan toplam kabul edilen gücü, dirençlerde kullanılan gücü ve gelen EM dalganın gücü yeniden hesaplanabilir. Şekil 4.24'te A (kırmızı ile boyalı) , B (yeşil ile boyalı) ve C (mavi ile boyalı) olan üç boyalı alandan oluşur. PR, PA ve PS'nin alanlar cinsinden sırasıyla A, A+B ve A+B+C'ye eşit olduğu görülmektedir. Eşitlik (4.1), (4.2) ve (4.3)' te açıklanan AE, CE ve HE yukarıda belirtilen alanlar cinsinden yazıldığında aşağıdaki şu eşitlikler elde edilir.

$$AE = \frac{A + B}{A + B + C} \quad (4.4)$$

$$CE = \frac{A}{A + B} \quad (4.5)$$

$$HE = \frac{A}{A + B + C} \quad (4.6)$$



Şekil 4.25. Üç tip SCR'li dirençlere sahip yapının emilim verimliliği, hasat verimliliği ve dönüşüm verimliliği

Eşitlik (4.4), (4.5) ve (4.6) kullanılarak AE, HE ve CE'nin toplam değerlerinin sırasıyla % 82.21, % 46.07 ve % 59.33 olarak bulunur. Yani önerilen yapı gelen EM dalganın gücünün % 82.21'ini emebilir, ilgili dalganın gücünün % 46.07'sini uygun mikrodalga devresi ile elektrik enerjisine çevirebilir ve önerilen yapının toplam dönüşüm verimi % 59.33'tür.

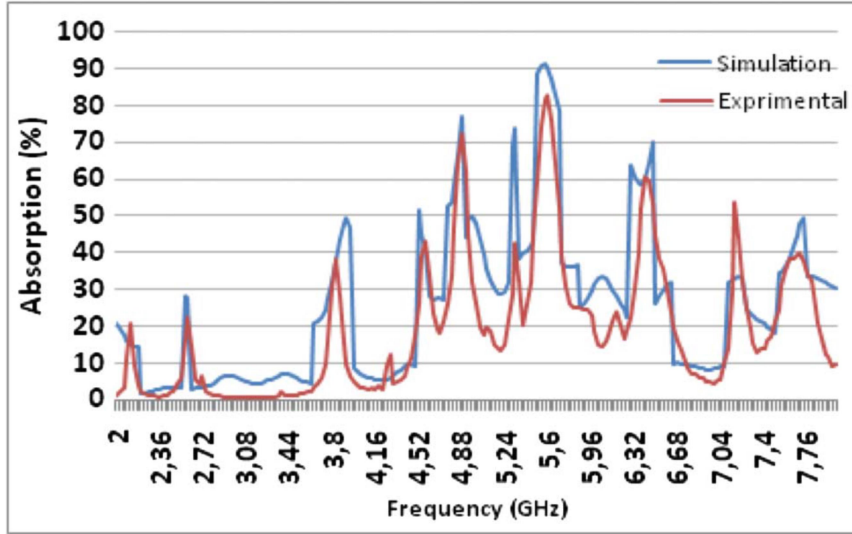
Nümerik çalışmaları desteklemek adına üç tip SCR'li sinyal emici yapısının deneysel ölçümleri de yapılmıştır. Önerilen yapının üretimi baskı devre kartı tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen üç tip SCR'li yapı Şekil 4.26'da gösterilmektedir. Dielektrik katmanın kalınlığının haricinde yapıda bulunan SCR'lerin ve yapının tüm ölçüleri Çizelge 4.3'te verilen ve nümerik çözümlerde kullanılan ölçülerle aynıdır. Laboratuvar imkânlarından dolayı yapıda kullanılan dielektrik katmanın kalınlığı 1.6 mm'dir. Ayrıca üç tip SCR'li yapıya dirençler lehimlenmiş ve yapının dirençsiz yani sinyal emici olarak emilim değerleri ölçülmüştür.



Şekil 4.26. Üretilen üç tip SCR'li sinyal emici yapısı

Dielektrik kalınlığının değişmesinden dolayı, ölçüm sonuçları ile karşılaştırmak için nümerik analiz 1.6mm dielektrik kalınlığına göre tekrar yapılmıştır. Ölçümler, Agilent-E5071B ENA RF vektör ağ analizörü (VNA) ve verici ve alıcı olarak iki horn anteni kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Antenler ve önerilen yapı arasındaki mesafe, yakın alan etkilerini önlemek için yeterince büyüktür. Yansıma parametreleri (S-parametreleri), 2–8 GHz frekans aralığında VNA'ya bağlı bir horn anteni ile ölçülmüştür. Üretilen yapı daha sonra yansıma değerini ölçmek için horn antenine yeterince uzak bir mesafeye yerleştirilmiştir. Nümerik ve deneysel analizlerin emilim değerleri, Şekil 4.27'de görüldüğü gibi birbirleriyle uyumludur. Emilim seviyesi, % 72, % 82 ve % 60'lık emilim oranları ile sırasıyla 4.88 GHz, 5.6 GHz ve 6.68 GHz frekanslarında % 60'dan daha yüksektir. Şekil 4.27'den de görülebileceği üzere 3–8 GHz frekans aralığında % 60'ın üzerinde emilim oranına sahip üç farklı SCR'li sinyal emici yapısı tasarlanmış ve ölçüm sonuçları nümerik analizlerle uyum içerisindedir.

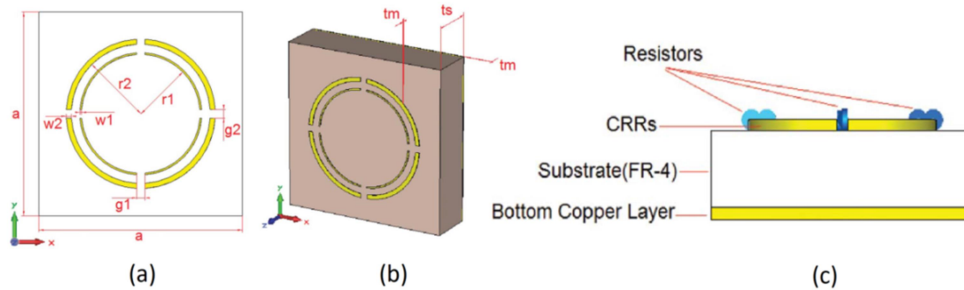




Şekil 4.27. Üç tip SCR'li sinyal emici yapısının nümerik ve deneysel ölçümlerle emilim oranlarının karşılaştırılması

#### 4.1.3. Daire Halkalı Rezonatörlere Sahip Dirençli Sinyal Emici

Önerilen metamalzeme yapısı önde daire halkalı rezonatörlerden (CRR) arkada düz metal plaka ve bu iki metalin arasında bulunan dielektrik malzemeden oluşur. Şekil 4.28. (a)'da önerilen yapının önden görünüşü verilmiştir. Önde bulunan bakır rezonatör iç içe geçmiş iki tane CRR'den ve bu CRR'lerin boşluklarına yerleştirilmiş çip dirençlerden oluşur. Yapıda dielektrik malzeme olarak FR-4 kullanılmıştır. Şekil 4.28. (b) ve (c) 'de CRR rezonatörlü sinyal emici yapısının üç boyutlu ve yandan görünüşü gösterilmektedir. Şekil 4.28'de gösterilen yapının ölçüleri, FR-4'ün dielektrik sabiti( $\epsilon_{FR-4}$ ) ve kayıp tanjantı( $\delta_{FR-4}$ ), bakır rezonatörlerin ve arkadaki bakır plakanın iletkenliği( $\sigma_{copper}$ ), rezonatöre yerleştirilen çip dirençlerin değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

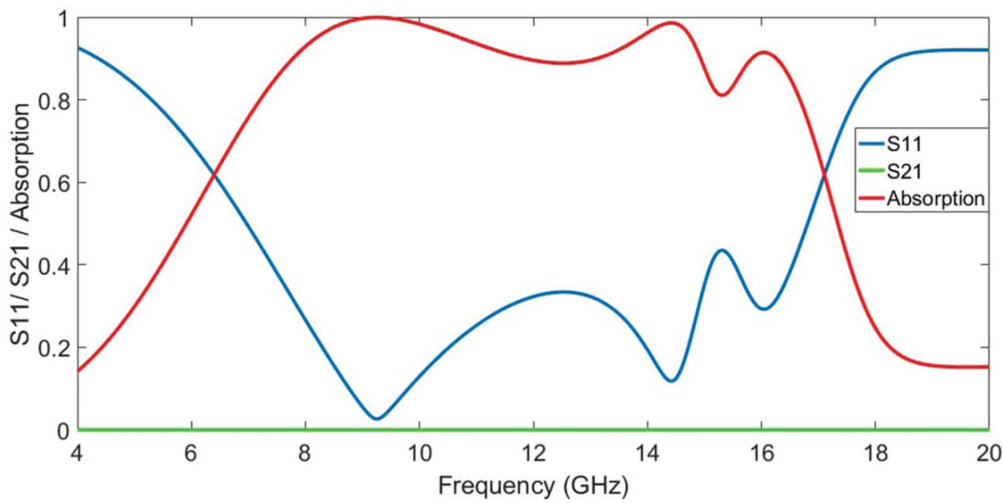


Şekil 4.28. Daire halkalı rezonatörlere sahip yapının birim hücreni ölçüleri ve (a) önden görünüşü, (b) üç boyutlu görünüşü ve (c) yandan görünüşü

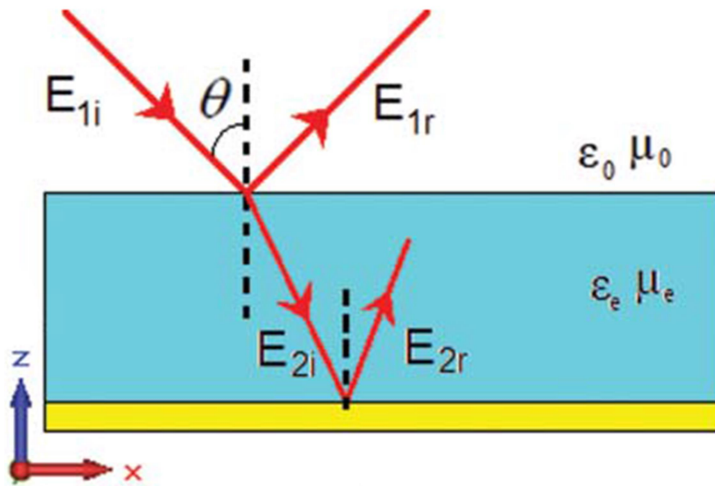
Çizelge 4.4. Daire halkalı rezonatörlere sahip yapının birim hücresinin ölçüleri

	a	r1	r2	w1	w2	g1	g2	tm	ts
Ölçüler (mm)	12	3,5	4,1	0,1	0,3	0,5	0,5	0,035	3,25
Diğer ölçüler	$\epsilon_{FR-4}=4,3$		$\delta_{FR-4}=0,025$		$\sigma_{copper}=5,8 \times 10^7$ s/m			R=500 $\Omega$	

Nümerik çözümler FIT tabanlı analiz programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm nümerik çözümlerde gelen EM dalganın TE ve TM durumları için sınır koşulları x ve y eksenlerinde birim hücre, z ekseninde boşluk olarak tanımlanmıştır. Şekil 4.29'da 4 ile 20 GHz arasında gelen dalganın TE olması durumunda CRR rezonatörlere sahip dirençli MTM yapısının yansıma katsayısı (S11), iletim katsayısı (S21) ve emilim değerleri gösterilmiştir. Yapının 7.2 ile 16.6 GHz arasında emilim yüzdesi %80'nin üstündeyken, 5,9 GHz ile 17,3 GHz arasında %50'nin üstündedir. Ayrıca önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısı rezonans frekansları olan 9.25, 14.42 ve 16.05 GHz'de % 99.92, % 98.6 ve % 91.45 emilim oranlarına sahiptir. Şekil 4.29'dan görüleceği üzere sinyal emici yapısının iletim katsayısı belirtilen frekans aralığında sıfırdır. Bunun sebebi ise yapının arka tarafında kullanılan bakır plakadır. Arka yüzde kullanılan bakır plaka sayesinde CRR'lerden geçen EM dalganın yapının arkasına geçişi engellenmiş ve böylece EM dalga rezonatörle arka bakır plaka arasında bulunan dielektrik içerisinde hapsedilmiştir. Şekil 4.30'da önerilen yapının eşdeğer ortam modeli ve yapıya gelen ve yapı tarafından emilen EM dalganın izlediği yol gösterilmektedir.

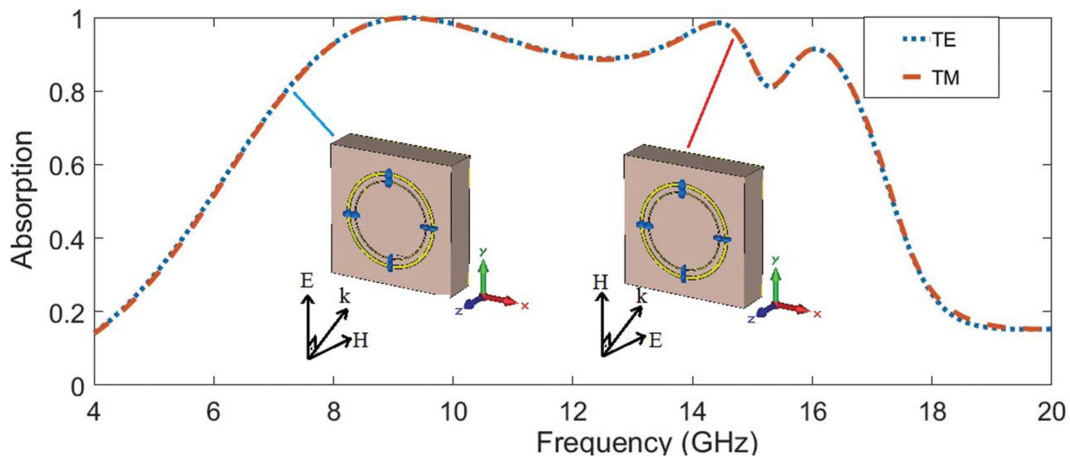


Şekil 4.29. CRR rezonatörlere sahip dirençli yapının gelen dalganın TE durumu için nümerik çözümlerde yansıma katsayısı (S11), iletim katsayısı (S21) ve emilim değerleri



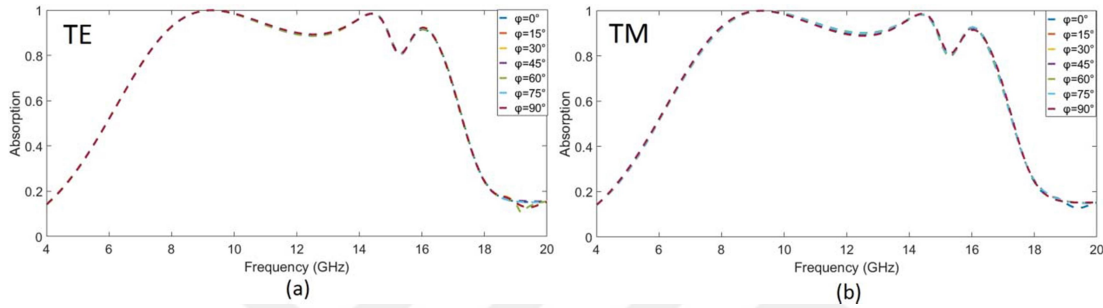
Şekil 4.30. Önerilen yapının eşdeğer ortam modeli

İlk olarak önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısının polarizasyon ve açı bağımsızlığı araştırılmıştır. Nümerik çözümlerde gelen dalganın TE ve TM polarizasyonları için sınır koşulları olarak x ve y eksenleri birim hücre z eksenine göre boşluklu olarak seçilmiştir. Şekil 4.31’de gelen dalganın TE ve TM polarizasyonuna göre yapının çalışma frekansında emilim tepkisi gösterilmektedir. Şekil 4.31’den de görüleceği üzere önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısı gelen dalganın TE ve TM polarizasyonundan bağımsızdır. Önceki paragrafta bahsedildiği gibi yapı 7.2 GHz ile 16.6 GHz arasında %80’nin üzerinde emilim değerlerine sahiptir. Ayrıca önerilen yapı 7.8 GHz–11.7GHz, 13.2 GHz-14.9 GHz ve 15.85 GHz–16.2 GHz frekans aralıklarında ise %90’ın üzerinde emilim değerlerine sahiptir. Önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısı toplamda 5.95, 9.4 ve 11.4 GHz’lik bant genişlikleriyle gelen EM dalganın TE ve TM polarizasyonlarında % 90,% 80 ve % 50’ni emer.



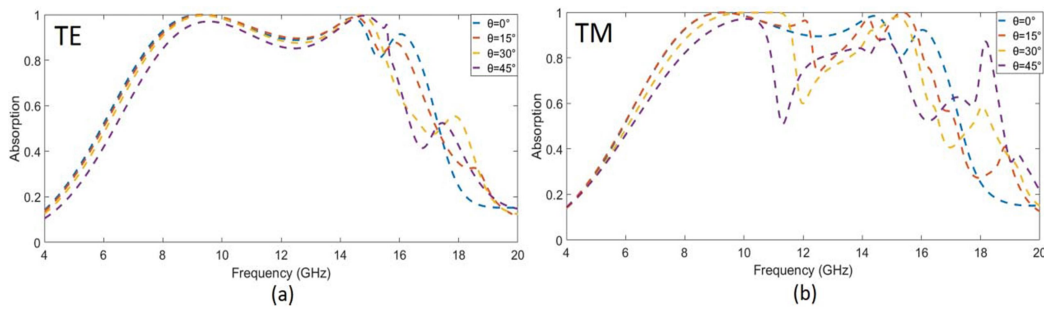
Şekil 4.31. Gelen dalganın TE ve TM durumları için önerilen yapının emilim değerleri

Şekil 4.32’de ise önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısının gelen EM dalganın TE ve TM polarizasyonlarındaki farklı polarizasyon açılarındaki emilim değerleri gösterilmiştir. Şekil 4.32’de görüldüğü gibi polarizasyon açısındaki değişim önerilen yapının emilim değerlerini etkilememiştir. TE ve TM durumlarında polarizasyon açısı değişse bile belirtilen frekans bandında yapının emilim seviyesi %80’nin üzerinde olmaktadır. Nümerik çözümler belirtilen çalışma frekansında CRR’lere sahip direnç yerleştirilmiş sinyal emici yapısının TE ve TM polarizasyon uygulamalarında emilim özelliklerini büyük ölçüde koruduğunu göstermiştir.



Şekil 4.32. Önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısının farklı polarizasyon açıları için emilim tepkisi (a) TE polarizasyonu için phi açısı (b) TM polarizasyonu için phi açısı

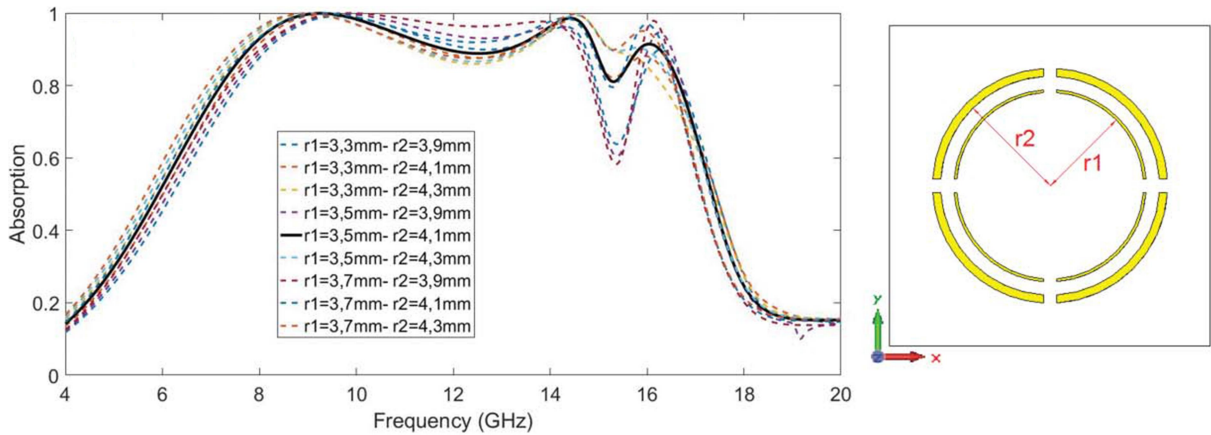
Şekil 4.33’te ise EM dalganın TE ve TM polarizasyonlarındaki farklı geliş açılına göre önerilen yapının emilim değerleri gösterilmiştir. Gelen EM dalganın geliş açısı  $0^\circ$  ile  $45^\circ$  arasında  $15^\circ$ ’lik açılarla değiştirilmiştir. Şekil 4.33. (a)’da gösterilen gelen EM dalganın TE polarizasyonunda,  $\theta$  açısı arttıkça yapının emilim değerleri yüksek frekanslarda düşer fakat 7.7 GHz ile 15.7 GHz frekans aralığında yapının emilim değeri yine de %80’nin üzerindedir. Şekil 4.33. (b)’de gösterilen gelen EM dalganın TM polarizasyon durumunda ise, geliş açısı arttıkça yapının emilim değerleri düşer. Fakat geliş açısının  $45^\circ$  olduğu durumda bile önerilen yapının emilim değeri %50’nin üzerindedir.



Şekil 4.33. Önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısının EM dalganın farklı geliş açıları için emilim tepkisi (a) TE polarizasyonu için theta açısı (b) TM polarizasyonu için theta açısı

Bu bölümde önerilen yapının ölçülerindeki değişimin yapının emilim tepkisi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. FIT tabanlı analiz programının parametrik çözümleme fonksiyonu kullanılarak CRR'lere sahip yapının Çizelge 4.4'te verilen bazı ölçüleri değiştirilerek bunların emilim tepkisi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu parametrik çalışmalarda gelen EM dalganın TE modu seçilmiş ve bundan dolayı nümerik çözümlerde sınır koşulları yukarıdaki paragraflarda belirtildiği gibi x, y eksenlerinde birim hücre ve z ekseninde ise boşluklu açık olarak seçilmiştir.

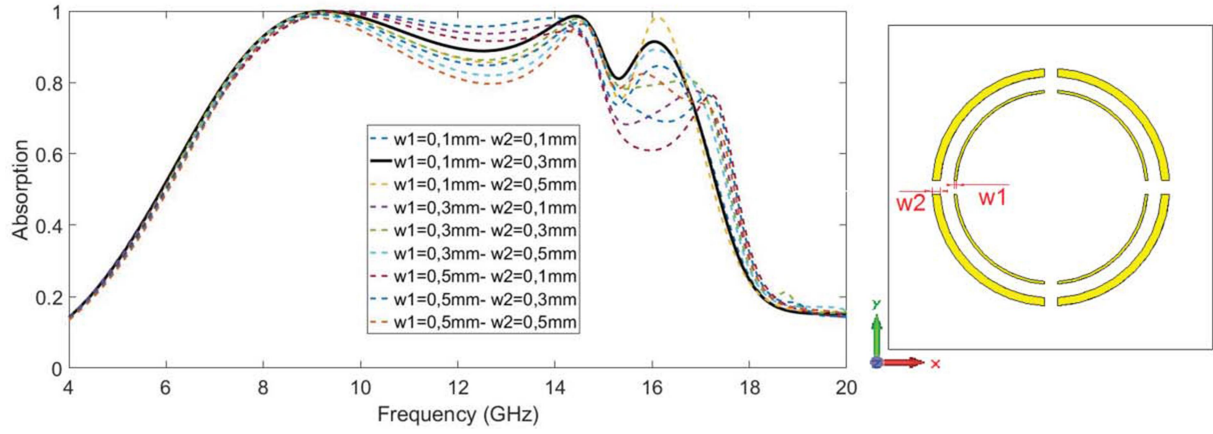
İlk olarak Şekil 4.28. (a)'da gösterilen CRR'lerin yarıçapları değiştirilmiştir. Şekil 4.34'te içteki CRR'nin yarıçapı ( $r_1$ ) 3,3 mm ile 3,7 mm ve dıştaki CRR'nin yarıçapı ( $r_2$ ) ise 3,9 mm ile 4,3 mm arasında 0,2 mm'lik artışlarla değiştirilmiştir. Parametrik çalışmanın daha doğru olması için iç ve dış CRR'lerin yarıçaplarının biri değişirken diğeri sabit tutulmuştur.  $r_2$  sabit tutularak  $r_1$ 'deki artış önerilen yapının emilim yüzdesini düşük frekanslarda (4-14 GHz) arttırırken, yüksek frekanslarda (14-20 GHz) ise %58'lere kadar düşürür.  $r_1$  sabit tutularak  $r_2$  değeri arttırıldığında ise 4-14 GHz arasında emilim değerini arttırırken, 14-20 GHz arasında ise azaltır. Şekil 4.34'te görüldüğü gibi  $r_1$  ve  $r_2$  değiştirilirken frekans bandının tamamında iyi sonuç veren  $r_1=3.5$  mm ve  $r_2=4.1$  mm seçilmiştir ve diğer emilim değerleri kesik çizgi ile gösterilirken en iyi emilim değeri siyah-kalın çizgi ile gösterilmiştir.



Şekil 4.34. Önerilen MTM tabanlı sinyal emicinin farklı CRR yarıçapları için emilim tepkisi

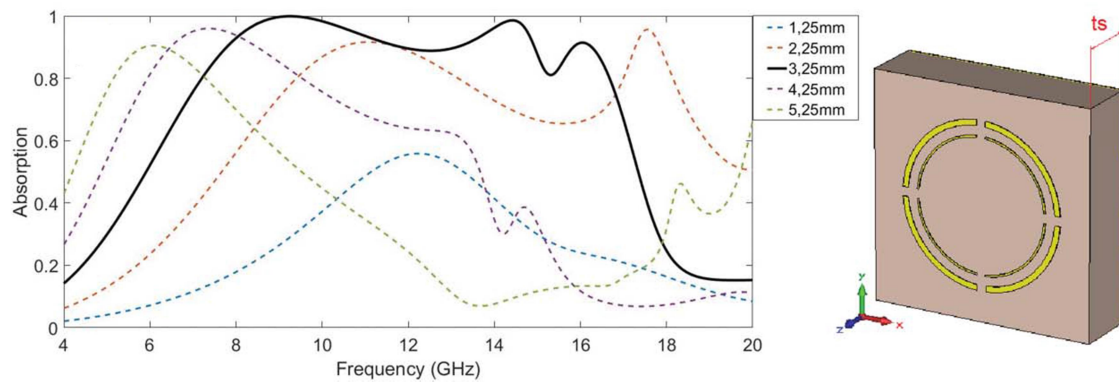
Şekil 4.35'te ise CRR'lerin hat genişliği olan  $w_1$  ve  $w_2$  değerlerindeki değişimin önerilen MTM tabanlı sinyal emicinin emilim tepkisi üzerindeki etkileri gösterilmiştir.  $w_1$  ve  $w_2$  ölçüleri biri sabit kalırken diğeri 0,2 mm'lik artışla 0,1 mm'den 0,5 mm'ye kadar arttırılmıştır. İçteki CRR'nin hat genişliği ( $w_1$ ) sabitken dıştaki CRR'nin hat genişliğindeki ( $w_2$ ) artış yapının emilim tepkisini düşük frekanslardaki (4-14 GHz) emilim değerlerini

azaltırken yüksek frekanslardaki (14-20 GHz) emilim değerlerini arttırır. En iyi sonuçlara sahip olan ve önerilen yapıda kullanılan değerler şekilde siyah-kalın çizgi ile gösterilmiştir.



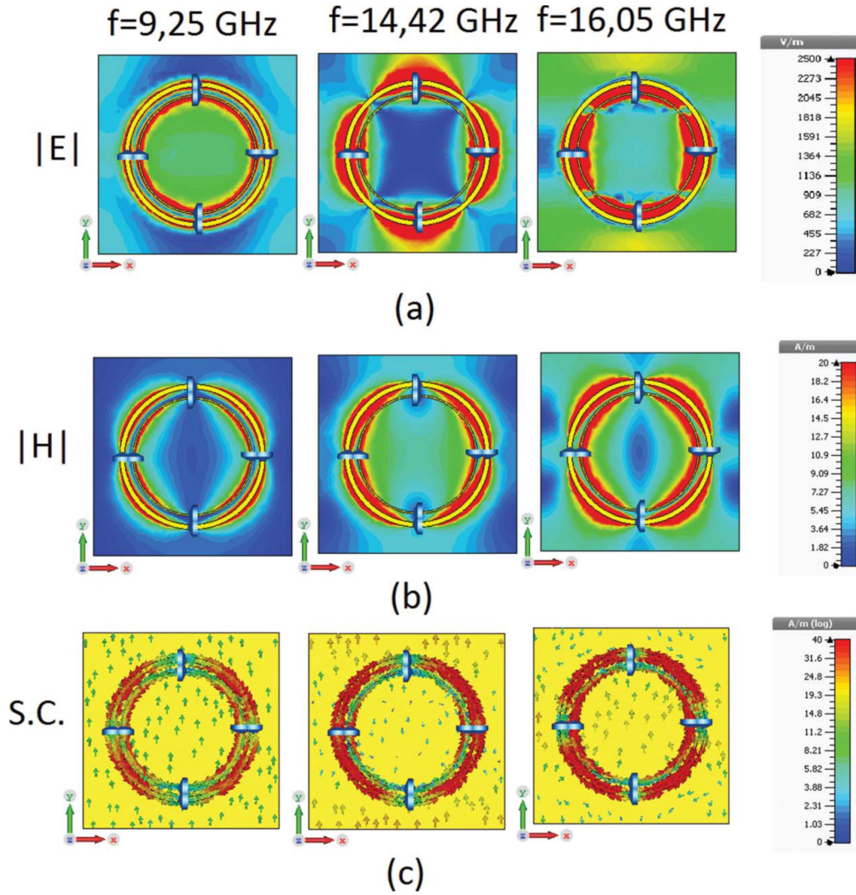
Şekil 4.35. Önerilen MTM tabanlı sinyal emicinin CRR'lerin farklı çizgi genişlikleri için emilim tepkisi

Şekil 4.36'da ise rezonatör ve arkadaki metal plaka arasında kullanılan dielektrik malzemenin kalınlığındaki ( $t_s$ ) değişimin emilim değerlerine etkisi gösterilmiştir. Önerilen yapıda dielektrik olarak kullanılan FR-4'ün kalınlığı 1,25 mm'den 5,25 mm'ye kadar 1 mm ile arttırılmıştır. FR-4'ün kalınlığındaki artış yapının emilim değerlerini belirtilen frekans aralığında arttırır. Fakat  $t_s$ 'nin 3.25 mm geçmesi durumunda yapının emilim değerleri tekrar azalmaktadır. Bundan dolayıdır ki CRR'lerin yarı çapları ve hat genişlikleri ile kıyaslandığında, önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısında kullanılan dielektriğin kalınlığı önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 4.36'da en iyi emilim tepkisine sahip olan sonuç siyah-kalın çizgi ile gösterilmiştir.



Şekil 4.36. Önerilen MTM tabanlı sinyal emicinin farklı dielektrik kalınlıkları için emilim tepkisi

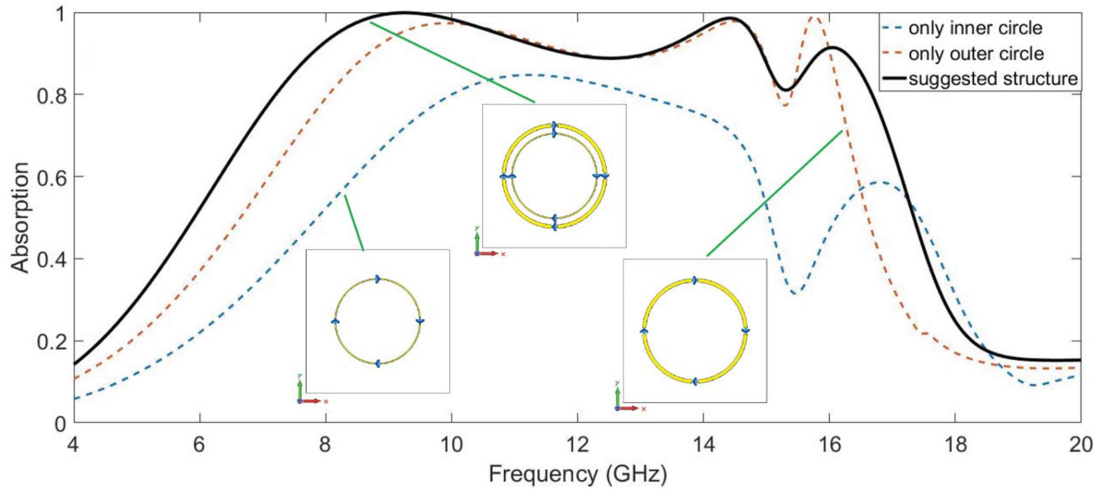
Şekil 4.37’de SCR’lere sahip dirençli MTM tabanlı sinyal emici yapısının gelen EM dalgaya karşı fiziksel davranışını açıklamak için rezonans frekanslarındaki elektrik alan, manyetik alan ve yüzey akımı dağılımları araştırılmıştır. Şekil 4.37’de incelenen rezonans frekansları 9.25 GHz, 14.42 GHz, 16.05 GHz ve bu rezonans frekanslarında önerilen yapının emilim yüzdeleri sırasıyla % 99.92, % 98.6 ve % 91.45’tir. Rezonans frekanslarında yapı maksimum emilime sahip olduğundan dolayı elektrik, manyetik ve yüzey akım dağılımları bu frekans değerlerinde incelenmiştir. Şekil 4.37. (a)’da görüldüğü gibi 9,25 GHz’de elektrik alan daha çok içteki CRR’nin iç taraflarında yoğunlaşırken, ikinci ve üçüncü rezonans frekansları olan 14.42 GHz ve 16.05 GHz’de elektrik alan daha çok hem içteki hem de dıştaki CRR’lerde bulunan dirençlerin üzerinde yoğunlaşmaktadır. Şekil 4.37. (a)’ya bakılarak içteki CRR’ye yerleştirilen dirençlerin ikinci rezonans frekansına, aynı şekilde dıştaki CRR’ye yerleştirilen dirençlerin üçüncü rezonans frekansına etkilerinin büyük olduğunu söylenebilir. Şekil 4.37. (b)’de ise önerilen yapının manyetik alan dağılımları yukarıda belirtilen üç rezonans frekansında araştırılmıştır. Manyetik alana dağılımının elektrik alan dağılımı ile uyumlu olduğu gözlenmektedir. Bunun nedeni CRR’lerde bulunan dirençlerdir. CRR’lere düşeyde yerleştirilen dirençler elektrik alan dağılımını etkilerken yatayda yerleştirilen dirençler manyetik alan dağılımını etkiler. Son olarak Şekil 4.37. (c)’de yapının yüzey akımı dağılımı gösterilmektedir. Elektrik ve manyetik alan dağılımlarında olduğu gibi yüzey akımı dağılımlarında da ikinci rezonans frekansında yüzey akımları iç CRR’nin etrafında ve üçüncü rezonans frekansında ise dış CRR’nin dirençleri etrafında yoğunlaşmıştır.



Şekil 4.37. Önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısının 9.25, 14.42 ve 16.05 GHz frekanslardaki (a) elektrik alan dağılımı, (b) manyetik alan dağılımı ve (c) yüzey akımı dağılımı

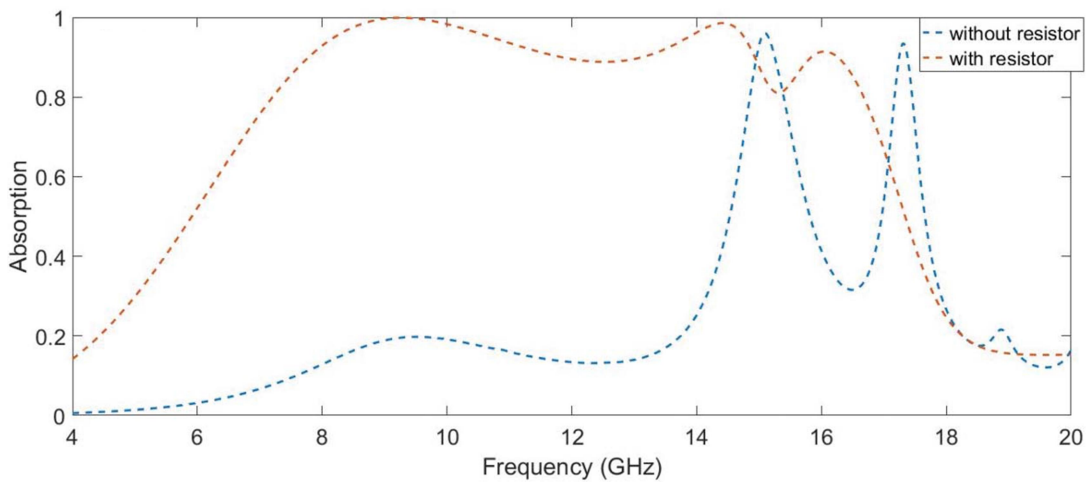
Bu bölümde önerilen geniş bantlı MTM tabanlı sinyal emicide bulunan CRR'lerin bireysel emilim değerleri etkileri araştırılmıştır. Şekil 4.38'de sadece içteki CRR'nin, sadece dıştaki CRR'nin ve önerilen yapının sinyal emilim değerleri gösterilmiştir. nümerik analizler gelen EM dalganın TE polarizasyonuna göre yapılmıştır ve sınır koşulları önceki nümerik analizlerde belirtildiği gibi ayarlanmıştır. Şekil 4.38'den görüleceği üzere sadece içteki ve sadece dıştaki CRR'lere sahip olan MTM yapılarının emilim değerleri önerilen MTM yapısının emilim değerlerinde düşüktür. Sadece dıştaki CRR'nin bulunduğu CRR'e sahip MTM yapısının emilim değeri önerilen MTM yapısının emilim değerine yakındır. Bundan dolayı dıştaki CRR'nin, önerilen yapının emilim değerlerinde önemli bir rol oynadığı söylenebilir.





Şekil 4.38. Sadece içteki ve dıştaki CRR'lere sahip MTM yapılarının ve önerilen MTM yapısının emilim değerleri

Şekil 4.39'da ise CRR'lere yerleştirilen dirençlerin yapının emilim değerlerine etkisi gösterilmiştir. Önerilen yapının dirençli ve dirençsiz emilim tepkisi Şekil 4.39'da gösterilmiştir. Nümerik çözümler, önceki nümerik çözümlerde olduğu gibi gelen dalganın TE polarizasyonuna göre yapılmıştır. Şekil 4.39'da açıkça görüldüğü gibi CRR'lere yerleştirilen dirençler önerilen MTM yapısının emilim karakteristiğini doğrudan etkilemektedir. Dirençsiz MTM yapısı 14.5 GHz'de yalnızca 200 MHz bant genişliğine ve 18 GHz'de ihmal edilebilecek kadar küçük bir bant genişliğine sahiptir. Önerilen MTM yapısı geniş banda sahip bir sinyal emici yapısı olduğundan, önerilen yapının geniş banda sahip olmasında dirençlerin etkisinin çok büyük olduğu söylenebilir.

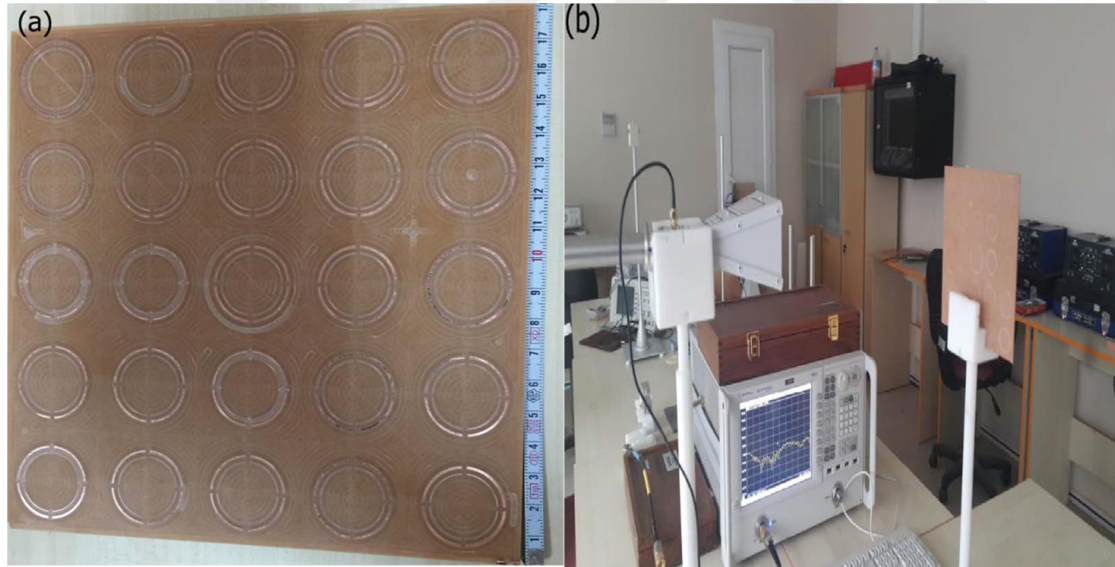


Şekil 4.39. Önerilen yapının dirençli ve dirençsiz emilim tepkileri

Bu bölümde nümerik çözümlerin desteklenmesi amacıyla önerilen yapının üretilip deneysel ölçümleri de yapılmıştır. Önerilen yapıdaki CRR'lerin ölçülerinin çok küçük olması, laboratuvar imkânlarında önerilen yapının üretilmemesine neden olmuştur. Bu yüzden bakır ve dielektrik katmanın kalınlıkları sabit kalmak şartıyla üretim Çizelge 4.4'te verilen ölçülerin 3 katı alınarak yapılmıştır. Üretilecek yeni yapının ölçüleri Çizelge 4.5'te verilmiştir. Nümerik ölçümler ile deneysel ölçümlerin kıyaslanması için Çizelge 4.5'te verilen ölçülerdeki yapı benzetim programında tasarlanmış ve nümerik çözümleri yapılmış. Üretilen yeni ölçülerdeki yapı ve laboratuvardaki ölçüm düzeneği Şekil 4.40'ta gösterilmektedir.

Çizelge 4.5. Deneysel ölçüm için üretilen yapının birim hücrenin ölçüleri

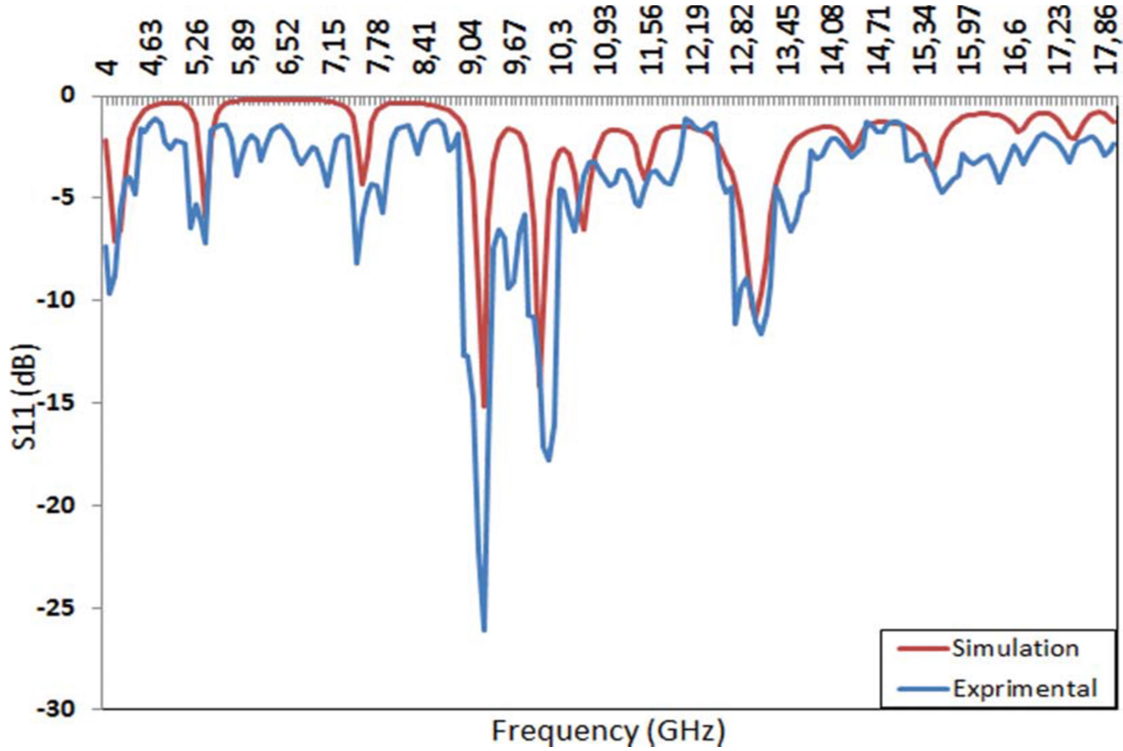
	a	r1	r2	w1	w2	g1	g2	tm	ts
Ölçüler (mm)	36	10,5	12,3	0,3	0,9	1,5	1,5	0,035	3,25
Diğer ölçüler	$\epsilon_{FR-4}=4,3$		$\delta_{FR-4}=0,025$		$\sigma_{copper}=5,8 \times 10^7$ s/m		R=500 $\Omega$		



Şekil 4.40. (a) Çizelge 4.5'teki ölçülere göre üretilen dirençsiz MTM yapısı, (b) ölçüm düzeneği

Deneysel ölçümlerde bir horn anten kullanılarak yapının yansımaya katsayısı ( $S_{11}$ ) ölçülmüştür.  $S_{11}$  parametresinin ölçümü, hasat edilen enerji miktarının yapı içindeki emilen enerji ile doğrudan ilişkili olması nedeniyle önemlidir. Şekil 4.41'de  $S_{11}$  parametresinin nümerik ve deneysel ölçüm sonucundaki değerleri gösterilmiştir. Yapının boyutları

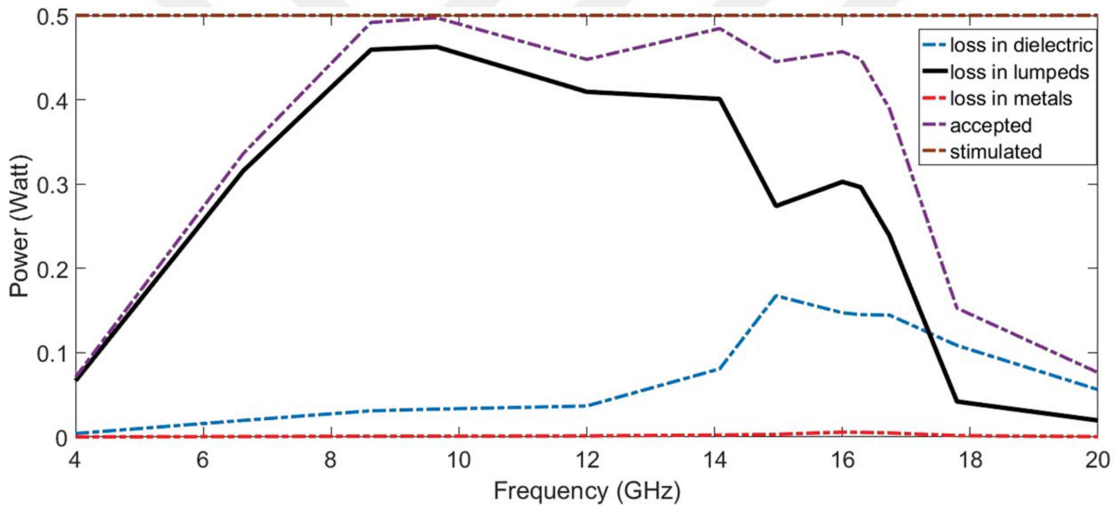
değiştirildiği için  $S_{11}$  parametresi doğrudan etkilenmiş ve deneysel ve nümerik ölçüm sonuçlarında 9, 10 ve 13 GHz'de çoklu rezonans noktaları gözlemlenmiştir. Şekil 4.41'de nümerik ve deneysel ölçümlerin birbiri ile uyumlu olduğu açıkça görülmektedir. Kalibrasyon ve üretim hataları nedeniyle rezonans noktalarında küçük farklılıklar meydana gelmiştir.



Şekil 4.41. Çizelge 4.5'te verilen ölçülere göre üretilen yapının nümerik ve deneysel ölçümlerle elde edilen  $S_{11}$  parametrelerinin karşılaştırılması

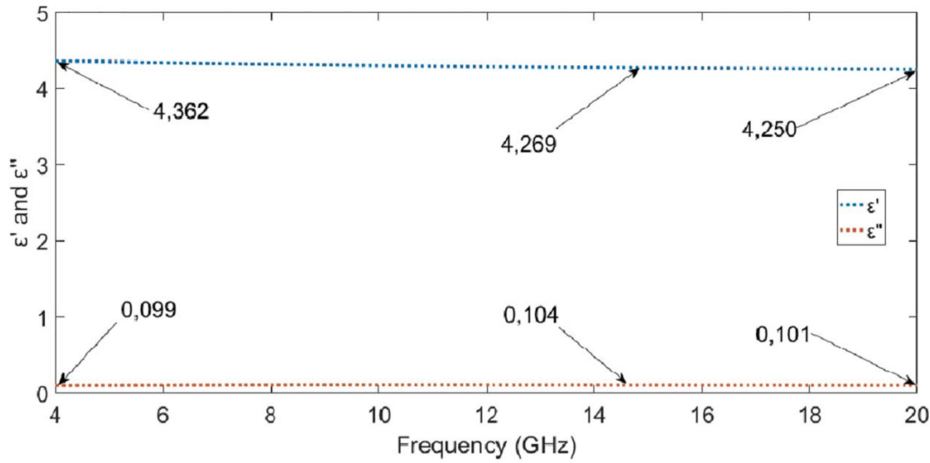
Çizelge 4.5'te ölçüleri verilen önerilen MTM yapısının enerji hasatlama karakteristiği araştırılmıştır. Nümerik çözümler gelen EM dalganın TE polarizasyonuna göre yapılmıştır. Yapıda bulunan dirençlerin, yapının emilim değerlerine büyük etkisinin olduğu önceki paragraflarda bahsedilmiştir. Ayrıca dirençler yapının emilim değerlerini arttırmanın yanında emilen EM sinyalin gücünü toplayarak bu gücü elektriksel olarak kullanmamıza olanak tanır. Şekil 4.42'de MTM tabanlı sinyal emici yapısına EM dalga tarafından gelen güç, önerilen yapı tarafından emilen güç ve MTM yapısında kaybedilen güç (dielektrik katmanda oluşan kayıp güç, dirençlerde ısıya dönüşen kayıp güç ve öndeki SCR'lerde ve arkadaki bakır plakada meydana gelen kayıp) gösterilmiştir. Şekil 4.42'de MTM yapısına gelen EM dalganın gücü 0.5W'tır. Bakır iyi bir iletkenliğe ( $\sigma_{\text{copper}}=5,8 \times 10^7$  s/m) sahip olduğundan dolayı CRR'ler ve arkadaki metal plakada kaybolan güç ihmal

edilecek kadar azdır. Şekil 4.42’de yapı tarafından kabul edilen güce bakıldığında önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısının 7.45 GHz ile 16.65 GHz arasında gelen dalganın gücünün %80’ine karşılık gelen 0.4W’lık bir gücü emdiği görülebilir. Ayrıca önerilen yapının enerji hasatlama karakteristiğini açıklamak için yapıda bulunan dirençlerde ve dielektrik katmanda meydana gelen güç kaybına bakılması gerekir. Şekil 4.42’de dirençlerde kaybolan güç siyah ve düz çizgi, dielektrik katmanda kaybolan güç işse mavi ve kesikli çizgi ile çizilmiştir. Dirençlerde kaybolan güç aktif güç olarak adlandırılır ve bu güç uygun doğrultucu devreler ile kullanılabilir. Önerilen MTM yapısı 7.8 ile 14 GHz arasında gelen EM dalganın gücünün %80’ni karşılık gelen 0,4W’lık gücü ve 5.72 ile 16.65 GHz arasında gelen EM dalganın gücünün %50’sine karşılık gelen 0.25W’lık gücü aktif güce çevirir.



Şekil 4.42. Önerilen MTM yapısının güç karakteristikleri

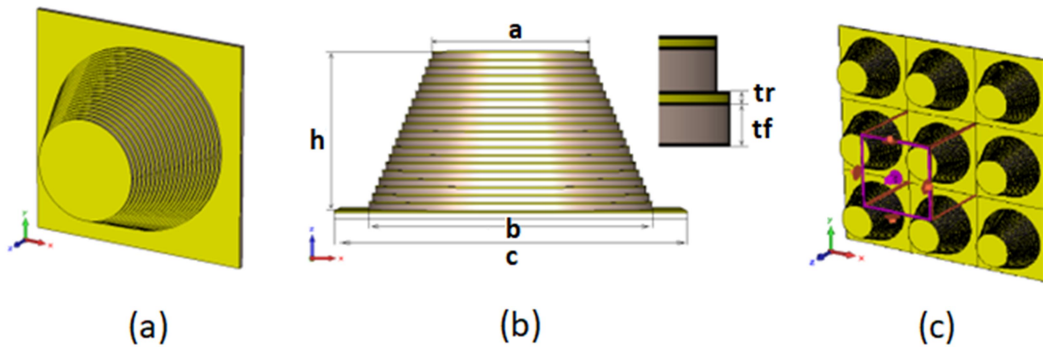
Şekil 4.42’ye bakıldığında 14 GHz’den sonra hasat edilen gücün azaldığı görülmektedir. Bu azalmanın temel nedeni dielektrik katmanda oluşan güç kaybının artmasıdır. Dielektrik katman olan FR-4’ün dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı Çizelge 4.4’te verilmiştir. Fakat bu değerler ortalama değerlerdir. Dielektrikte oluşan güç kaybı artışını daha iyi incelemek için belirtilen frekans aralığında (4 GHz- 20 GHz) FR-4’ün  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  değerleri Şekil 4.43’te frekansa bağlı olarak gösterilmiştir. Şekil 4.43’ten görüleceği üzere  $\epsilon'$  değeri 4,25 ila 4,632 arasında değişirken,  $\epsilon''$  değeri 0,099 ile 0,104 arasında değişir. Kayıp tanjantı  $\epsilon''$  nin  $\epsilon'$  e bölümüdür. Yüksek frekanslarda  $\epsilon''$  artması ve  $\epsilon'$  azalmasından dolayı FR-4’ün yüksek frekanslarda kaybı artmaktadır. Bundan dolayı yüksek frekanslarda FR-4 içerisinde daha fazla güç kaybı olmaktadır.



Şekil 4.43. Önerilen MTM yapısının elektriksel dağılımı

#### 4.1.4. Çok katmanlı Koni Şekilli Rezonatörlü Sinyal Emici

Önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısı çok katmanlı metalik-dielektrik basamaklı konilerden oluşmaktadır. Farklı yarıçaplı dairesel tabakalardan oluşan önerilen yapının 3 boyutlu görünümü, Şekil 4.44. (a)'da gösterilmiştir. Farklı yarıçaplara sahip dairesel her tabaka, bir dielektrik dairesel katman ve üzerine yerleştirilmiş bir metal dairesel katmandan oluşur. Şekil 4.44. (b)'de birim hücrenin yandan görünümü verilen önerilen yapının en alttaki dairesel dielektrik katmanın arka tarafı, iletimi engellemek için bir metal plaka ile kaplıdır. Önerilen sinyal emici yapısının koni şeklinde seçilmesinin sebebi, yapının merkezi simetriye bağlı azimut açısından bağımsız olmasını sağlamak içindir. Önerilen yapıdaki metalik katmanlar iletkenliği  $\sigma = 5 \times 10^7 \text{ s/m}$  olan bakır iletkeninden ve dielektrik katmanlar göreceli geçirgenliği  $\epsilon_r = 4.3$ , kayıp tanjantı  $\delta = 0.025$  olan FR4 dielektrik malzemeden oluşmaktadır. Geniş bantta emilimi yapabilmesi için Çizelge 4.6'da verilen önerilen yapının ölçüleri parametrik çalışmalar ile elde edilmiştir.



Şekil 4.44. Önerilen sinyal emici yapısının (a) 3 boyutlu görünümü, (b) yandan görünümü ve (c) nümerik analiz kuruluşu

Çizelge 4.6. Önerilen geniş bantlı sinyal emici yapısının birim hücresinin ölçüleri

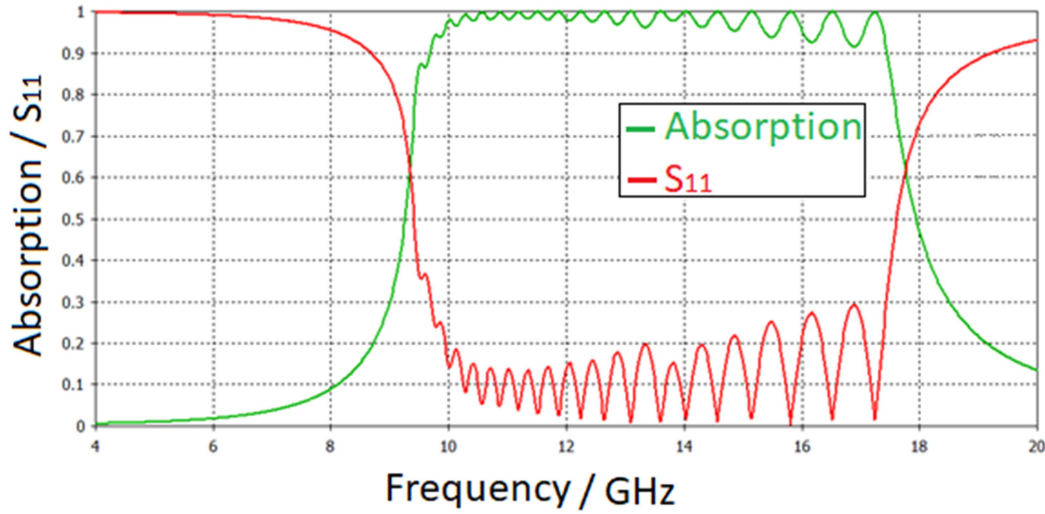
	a	b	c	h	tr	tf
Ölçüler (mm)	5	8,99	11	5	0,05	0.2

Bu çalışmada nümerik analizler, sonlu entegrasyon tekniğine dayalı bilgisayar benzetim mikrodalga stüdyosu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nümerik analizlerde geniş bir bant genişliğine, en az yansıma ve en çok emme gibi özellikleri elde etmek için, Çizelge 4.6’da verilen parametrik çalışmalardan elde edilen en iyi ölçüler kullanılır. Nümerik analizlerde gelen dalga TE ve TM polarize olduğu için sınır koşulları x ve y yönlerinde periyodik sınır koşulları ve z yönünde boşluklu açık düzlem olarak ayarlanmıştır. TE polarizasyonda gelen EM dalga elektrik alan bileşeni (E) y-yönünde, TM polarizasyonunda ise gelen EM dalganın manyetik alan bileşeni (H) y-yönündedir.

Önerilen yapıların emilim değeri ve yansıtma katsayısı Şekil 4.45’te gösterilmiştir. Şekil 4.45’ten görülebileceği üzere, bir FR4 ve bakır katmandan oluşan her bir tabaka, 10 GHz-17.5GHz frekans aralığında % 98’in üzerinde bir emilim tepe noktası yaratır. Ayrıca son derece geniş bir emilim ve yansıma bant genişliğine sahip olan önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısı, geniş bir bağıl emilim bant genişliğine ( $W_{RAB}$ ) de sahiptir. Bağıl emilim bant genişliği aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

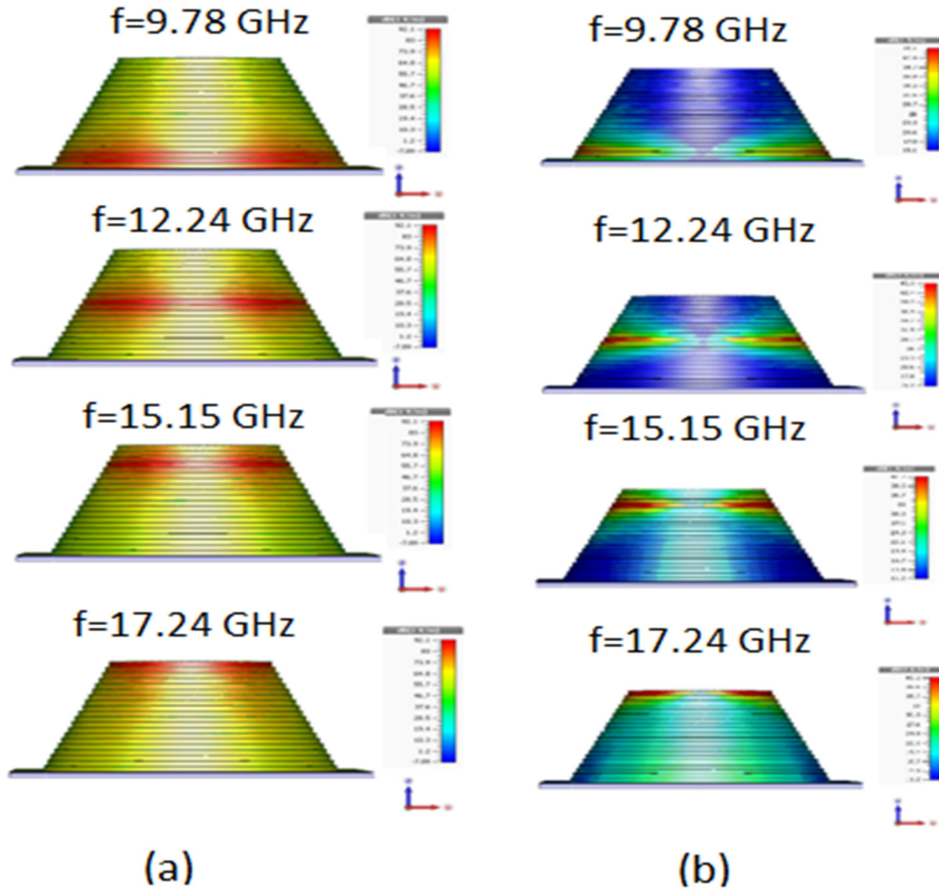
$$W_{RAB} = 2 \left( \frac{f_{max} - f_{min}}{f_{max} + f_{min}} \right) \quad (4.7)$$

Eşitlik (4.7) kullanılarak göreceli emilim bant genişliği (RAB) [73] hesaplanabilir. Önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısı % 57.27’lik emilim oranı ile geniş bir RAB değerine sahiptir. Önerilen yapının en yüksek emilim değerlerine sahip olduğu frekans aralığı X bandının bir kısmını içerir, bu da önerilen yapının görünmezlik teknolojisi için kullanılabilceğini gösterir. Önerilen yapının belirtilen frekans aralığında yüksek emilim değerine sahip olması gelen EM dalganın yapıdan yansıyan bileşenin ve yapının içinden geçen bileşenin en az indirgenmesi ile olur. İletilen dalga önerilen yapıda en arkada bulunan metal katman tarafından en aza indirilir. Yansıyan dalga ise önerilen sinyal emici yapısının efektif empedansının boşluğun empedansına yakın olması ile en aza indirilir.



Şekil 4.45. Önerilen yapının emilim ve yansımaya katsayısı değerleri

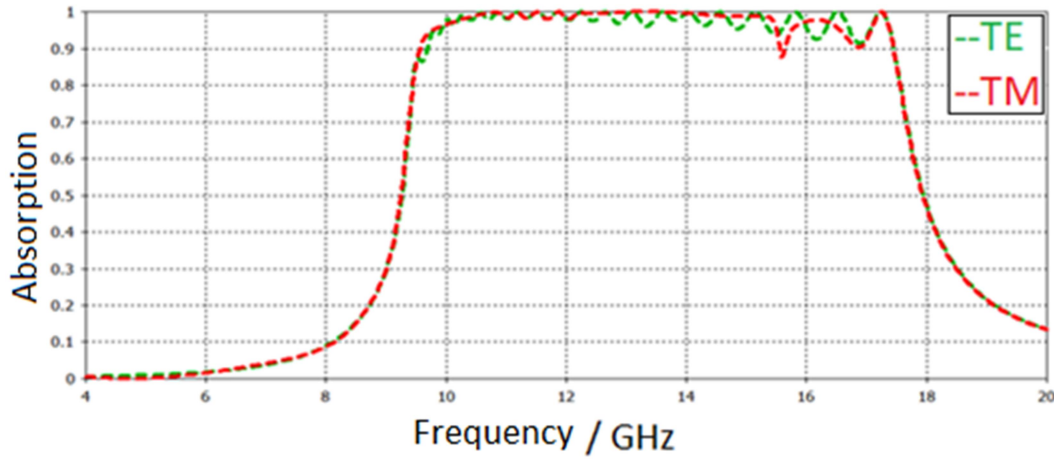
Şekil 4.46. (a) ve (b)'de önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısının sırasıyla elektrik ve manyetik alan dağılımları gösterilmiştir. Bilindiği gibi, bir nesnenin rezonans frekansı yapısına bağlıdır. Önerilen yapıda bulunan silindirik katmanların boyutları farklı olduğu için, birim hücreyi oluşturan her katman birbirine yakın farklı frekanslarda rezonansa girer. Yapının genel tepkisi, daha sonra, her bir tabakaya karşılık gelen tüm örtüşen frekans tepkilerinin toplanmasıyla elde edilebilir. Belirli bir frekansta, yapıda oluşan elektrik ve manyetik alan belirtilen frekansta rezonansa sebep olan silindirik katman veya katmanlar üzerinde yoğunlaşır. Nümerik analizler ile önerilen yapının 9.78 GHz, 12.24 GHz, 15.15 GHz ve 17.24 GHz frekans değerlerinde elektrik ve manyetik alan büyüklükleri elde edilmiştir. 9.78 GHz önerilen yapının rezonansa girdiği en düşük frekans olduğu için, elektrik ve manyetik alanlar en büyük katmana sahip yapının alt tarafında yoğunlaşmaktadır. Rezonans frekansı arttıkça, elektrik ve manyetik alanlar daha küçük bir boyuta sahip olan bir katmanda yoğunlaşır. Rezonatörün boyutu ve gelen EM dalganın dalga boyu birbiri ile ilişkili olduğu için, uzun dalga boyları (düşük frekanslar) daha büyük boyutlara ihtiyaç duyar. Yapının 10 GHz ila 17.5 GHz arasında %90'nın üzerinde emilim değerlerine sahip olduğu toplam bant genişliği yaklaşık 7.5 GHz'dir. Yani, önerilen yapıda bulunan her bir silindirik katman yaklaşık 375 MHz'lik bant genişliğine sahiptir.



Şekil 4.46. Önerilen yapının belirtilen rezonans frekanslarında (a) Elektrik alan dağılımları ve (b) manyetik alan dağılımları.

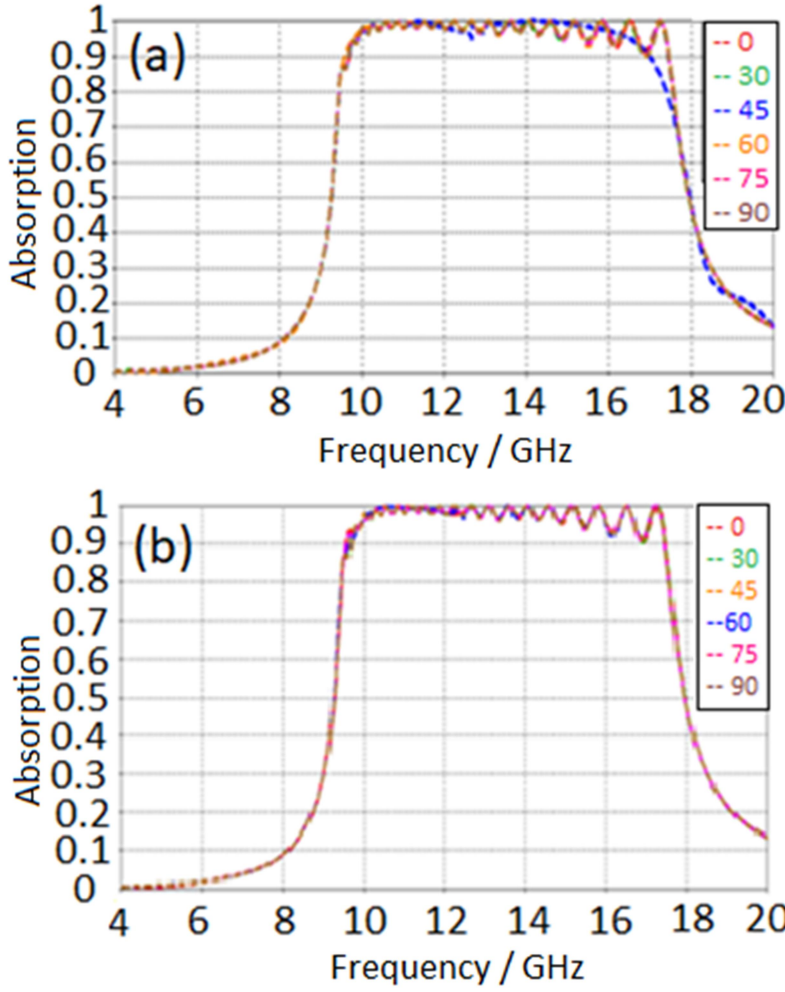
Gelen EM dalganın TE ve TM polarizasyonunda önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısının emilim karakteristiği Şekil 4.47’de gösterilmiştir. Şekil 4.47’ye bakıldığında önerilen konik yapının frekans cevabı gelen EM dalganın polarizasyon değişimlerine karşı neredeyse duyarsızdır. Ayrıca, gelen dalganın TEM olması durumunda konik yapının rezonans frekansında emilim değeri % 90’dan fazladır. Önerilen konik sinyal emici yapısı merkezi simetriye sahip olduğu için, yapı gelen dalganın polarizasyonundan bağımsızdır. Yüksek emilim değerlerine ve yansıma bant genişliğinin % 90’ın üzerinde olması nedeniyle, önerilen yapı görünmezlik ve enerji hasadı gibi birçok uygulama alanında kullanılabilir.





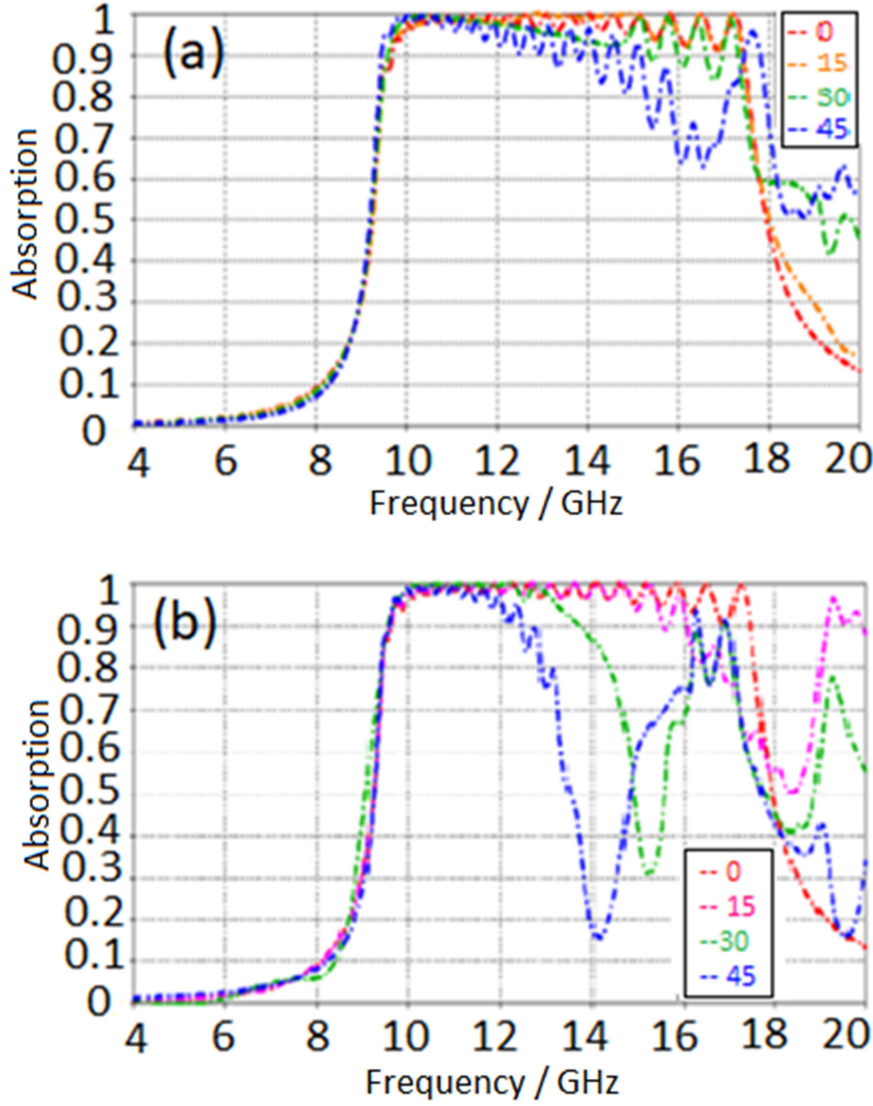
Şekil 4.47. TE ve TM polarize gelen dalga için önerilen konik yapının emilim tepkisi

Bu bölümde önerilen kesik koni yapılı sinyal emici yapısının gelen dalganın TE ve TM polarizasyonları için hem dalganın farklı polarizasyon açılarına göre ( $\varphi$ ) hem de dalganın farklı geliş açılarına ( $\theta$ ) göre sinyal emilim karakteristiği araştırılmıştır. Önerilen sinyal emici yapısının farklı  $\varphi$  açılarıyla gelen TE ve TM polarize dalgalara göre emilim karakteristiği sırasıyla, Şekil 4.48. (a), (b)'de gösterilmiştir. Şekil 4.48. (a)'da TE polarize dalganın farklı polarizasyon açıları için önerilen yapının emilim tepkilerinin birbirinden çok az farklı olduğu görülmektedir. Şekil 4.48. (b)'de ise, TM polarize dalganın farklı  $\varphi$  açıları için önerilen yapının emilim karakteristiği birbirleriyle benzerdir. Şekil 4.48. (a) ve (b)'de görüldüğü gibi, önerilen sinyal emici yapısının frekans tepkileri, TE ve TM polarize dalgalar için  $0^\circ$  ve  $90^\circ$  arasında değişen  $\varphi$  açısından neredeyse tamamen bağımsızdır. Önerilen yapının emilim karakteristiği TE ve TM polarize dalga için  $\varphi$  açısından bağımsız olması, yapının  $\varphi$  açısına göre bakışlımlı olmasından dolayıdır. Yapının emilim değeri, Şekil 4.48. (a) ve (b)'de gösterildiği gibi, 10 GHz ila 17.5 GHz arasında neredeyse % 90'ın üzerindedir.



Şekil 4.48. Önerilen yapının  $\varphi$  açısına göre emilim tepkisi (a) TE polarize dalga (b) TM polarize dalga için

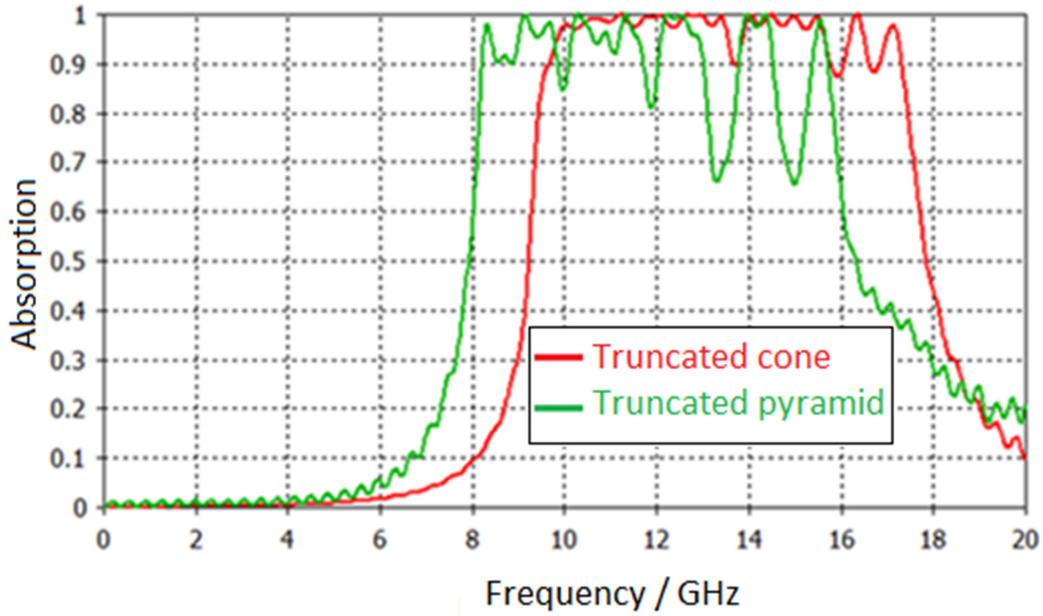
Şekil 4.49'da ise önerilen yapının farklı geliş açılarıyla ( $\theta$ ) yapıya gelen TE ve TM polarize dalgaları için emilim tepkisi gösterilmiştir. Şekil 4.49. (a)'dan görüleceği üzere TE polarize gelen dalganın farklı  $\theta$  açıları için önerilen yapının emilim değerler birbirlerine çok yakındır. Ancak Şekil 4.49. (b)'ye bakıldığında ise TM polarize gelen dalga için  $\theta$  açısındaki değişim önerilen yapının emilim değerlerinde büyük sapmalara neden olmuştur. Önerilen sinyal emici yapısının bant genişliği  $\theta$  açısı artışıyla azalmasına rağmen, buna rağmen önerilen yapı X-bandinin yarısı olan 10 - 12 GHz arasında yüksek emilim değerlerine sahiptir.



Şekil 4.49. Önerilen yapının  $\theta$  açısına göre emilim tepkisi (a) TE polarize dalga (b) TM polarize dalga için

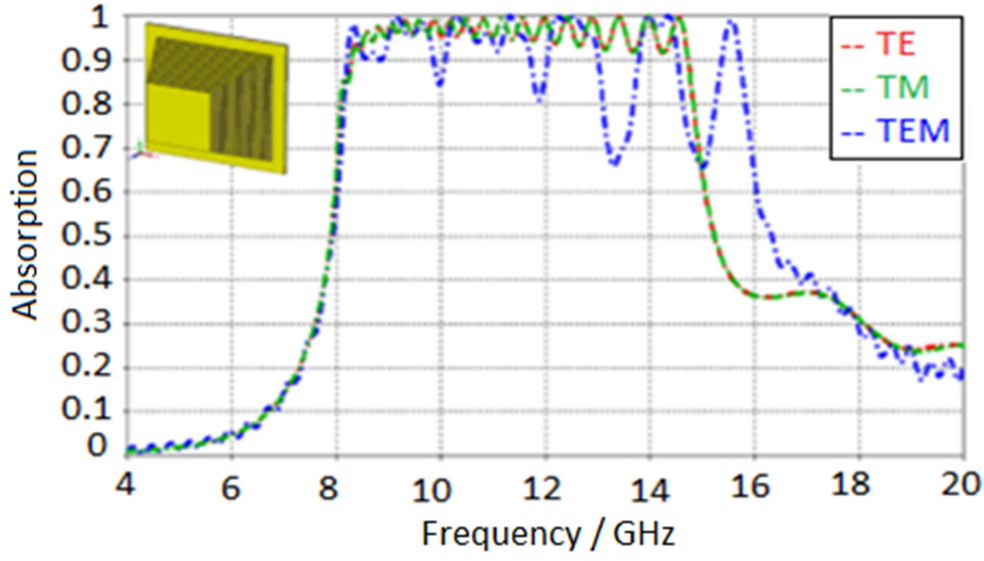
Bu bölümde çok katmanlı kesik koni şekilli önerilen yapının emilim değerleri benzer çok katmanlı bir yapının emilim değerleri ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yapı ile karşılaştırılan çok katmanlı yapı Şekil 4.50'den görüleceği üzere kesik piramit şekilli farklı boyutlarda yirmi katmana sahip bir yapıdır. Her tabaka bir dielektrik katman üzerine yerleştirilmiş bir metal katmandan oluşur. En alttaki en geniş tabakanın arka tarafı önerilen yapıda olduğu gibi emilimi engellemek için bir metal bir katman ile kaplıdır. Şekil 4.50'de önerilen kesik koni şekilli sinyal emici yapısı ile kesik piramit şekilli yapının emilim karakteristikleri gösterilmiştir. Piramidi oluşturan kare levhaların kenarlarının ölçüleri kesik koni şekilli önerilen yapıdaki dairesel levhaların çaplarına eşit olarak alınmıştır. Şekil 4.50'den görülebileceği gibi, her iki yapıya karşılık gelen bant genişlikleri yaklaşık olarak

birbirine eşit olmakla birlikte, kesik koni şekilli yapının emilim değerleri, kesik piramit şekilli yapısının emilim değerlerinden daha yüksektir. Kesik piramit şekilli yapının rezonans frekansının 2 GHz kayması, piramit şekilli yapıyı oluşturan kare levhaların kenarlarından kaynaklanmaktadır.

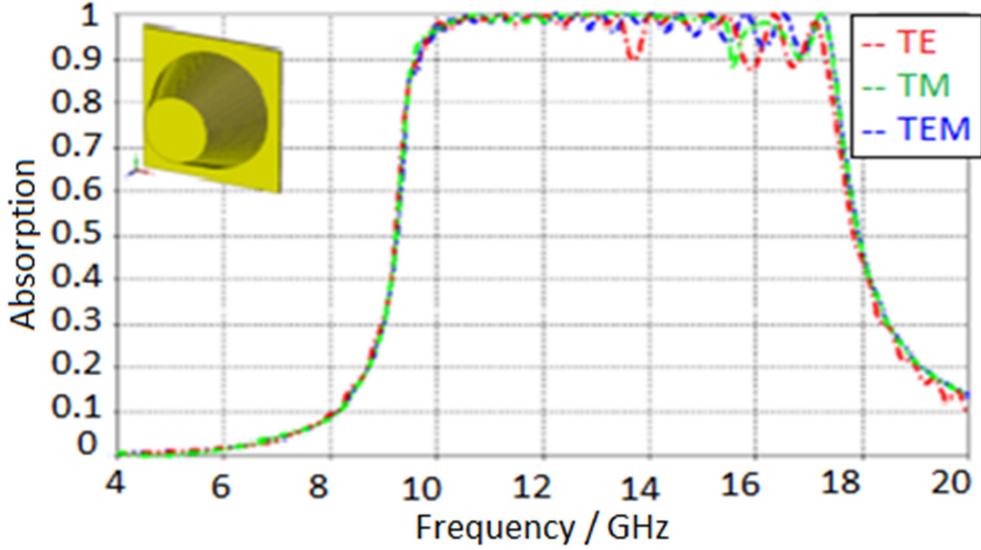


Şekil 4.50. Önerilen kesik koni sinyal emici yapısı ve kesik piramit sinyal emici yapısının emilim karakteristikleri

Şekil 4.51’de kesik piramit yapısının ve önerilen kesik koni yapısının emilim karakteristiği gelen dalganın TE ve TM polarizasyonu göre ve TEM durumu için gösterilmiştir. Şekil 4.51. (a) ve (b)’den görüleceği üzere, önerilen kesik koni şekilli sinyal emici yapısı merkezi simetri ve dairesel katmanlarından dolayı gelen dalganın TE-TM polarizasyonlarından ve TEM durumundan nerdeyse bağımsız bir emilim karakteristiğine sahiptir. Kesik piramit şekilli sinyal emici yapısı ise katmanlarında bulunan kare levhaların köşelerinden dolayı farklı polarizasyonlarda gelen dalga için farklı emilim tepkileri göstermektedir.



(a)

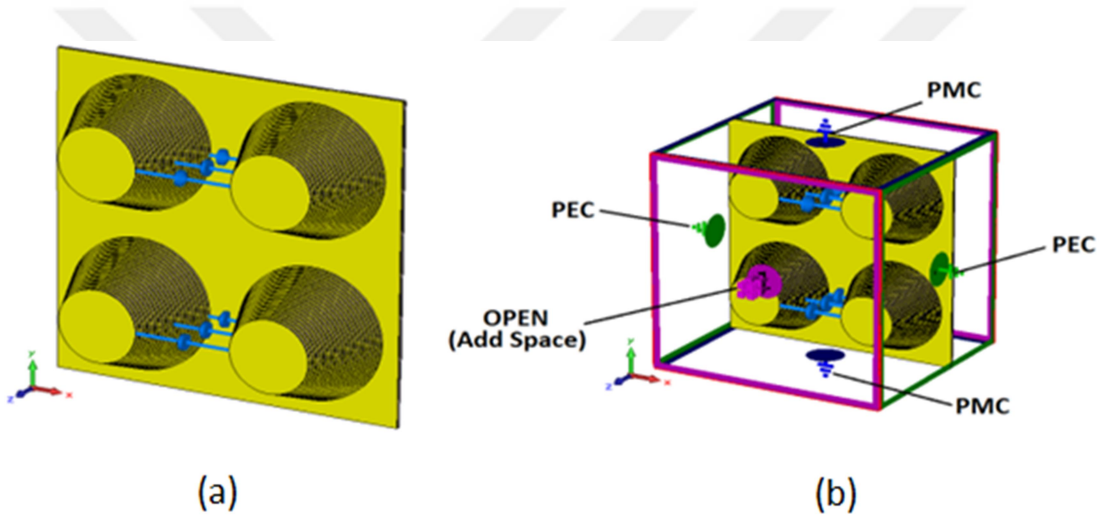


(b)

Şekil 4.51. (a) Önerilen kesik koni sinyal emici yapısı ve (b) kesik piramit sinyal emici yapısının gelen dalganın TE-TM polarizasyonu ve TEM durumu için emilim karakteristikleri

Önerilen kesik koni şekilli önerilen yapı aynı zamanda geniş bir frekans aralığında neredeyse tüm gelen enerjiyi emme potansiyeline sahip olmasından dolayı enerji hasadı uygulamalarında da kullanılabilir. Enerji hasadı için yapılan nümerik çalışmalarda gelen EM dalga TEM olarak seçilmiştir. Bunun için benzetim programında yapının koşulları x ve y yönlerinde sırasıyla PEC ve PMC olarak ayarlanmıştır. Dalganın yapıya geldiği z yönü ise boşluklu açık olarak ayarlanmıştır. Enerji hasadı uygulaması için yapılan nümerik analizlerde kesik koni yapısı Çizelge 4.6'daki verilen ölçüler kullanılarak oluşturulmuştur.

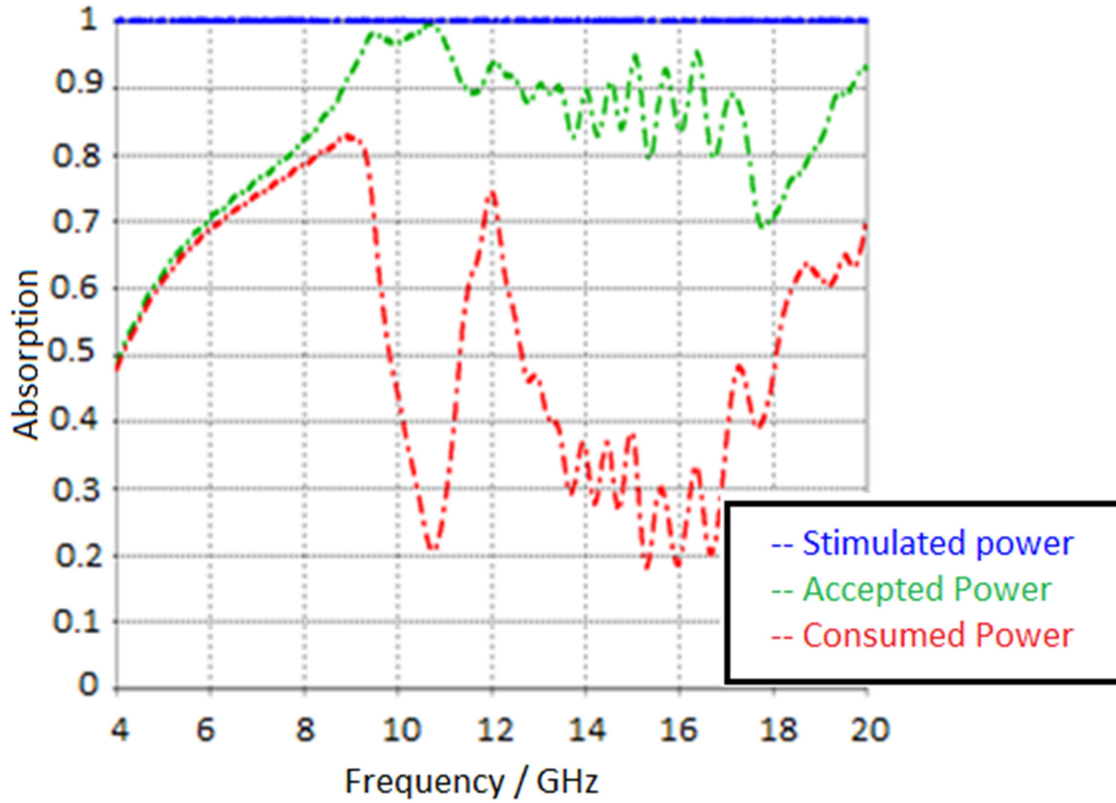
Enerji hasadı uygulaması için oluşturulan yapının birim hücresi dört kesik koniden oluşmaktadır. Şekil 4.52. (a)'da koniler arasında dirençler yerleştirilerek oluşturulan enerji hasatçısı yapısının birim hücresi ve Şekil 4.52. (b)'de nümerik analizler için ayarlanan enerji hasatçısının sınır koşulları gösterilmektedir. Şekil 4.52.(a)'dan görüleceği üzere enerji hasatçısı yapısı dört adet rezonatörden ve bu rezonatörlerin arasında yatayda üçer direnç yani toplamda altı adet direnç yerleştirilerek oluşturulmuştur. İki kesik koni yapısını birbirine bağlayan dirençlerden birincisi kesik koni yapılarının en alt katmanlarının, ikincisi ortadaki katmanlarının(10. katman) ve üçüncüsü ise en üstte bulunan dairesel katmanlarının kenarlarına yerleştirilmiştir. Bu dirençler sayesinde kesik koni şekilli sinyal emici yapısı tarafından emilen enerji kullanılabilir ve elektrik enerjisine dönüştürülebilir.



Şekil 4.52. Önerilen kesik koni şekilli sinyal emici yapısına dirençler yerleştirilerek oluşturulan enerji hasatçısının (a) birim hücresi, (b) nümerik analizlerde atanan sınır koşulları

Enerji hasatçısı yapısına yerleştirilen dirençlerin değerleri nümerik analizler ile yapılan parametrik çalışmalar ile bulunmuştur ve empedans eşleştirme koşulunu sağlaması için  $250 \Omega$  olarak seçilmiştir. Yapının potansiyel kullanımını daha iyi analiz etmek için enerji hasatçısı yapısına EM dalga ile gelen güç, rezonatörler tarafından kabul edilen güç ve dirençlerde harcanan güç 4 ila 20 GHz arasında hesaplanmıştır ve sonuçlar Şekil 4.53'te gösterilmiştir. Şekil 4.53'ten görüleceği üzere yapı tarafından kabul edilen güç ve dirençlerde harcanan gücünün 4 GHz ve 8,5 GHz frekans aralığında % 50 ile % 83 arasında bir orana sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.53'te enerji hasatçısı yapısının düşük frekanslarda gelen EM dalgadan emdiği gücü çok az kayıpla dirençlere aktardığı görülmektedir. Yapının 4 GHz ile 8.5 GHz arasında dönüşüm verimliliği % 90'nın

üzerindedir. Bu frekans aralığında önerilen yapı mükemmel enerji hasat etme özelliğine sahiptir. Fakat 8.5 GHz ile 11.5 GHz arasında enerji hasatçısının kabul edilen güç oranı % 90 olmasına rağmen, dirençlerde harcanan güç yani elektrik enerjisine dönüştürülebilir güç fazla değildir.



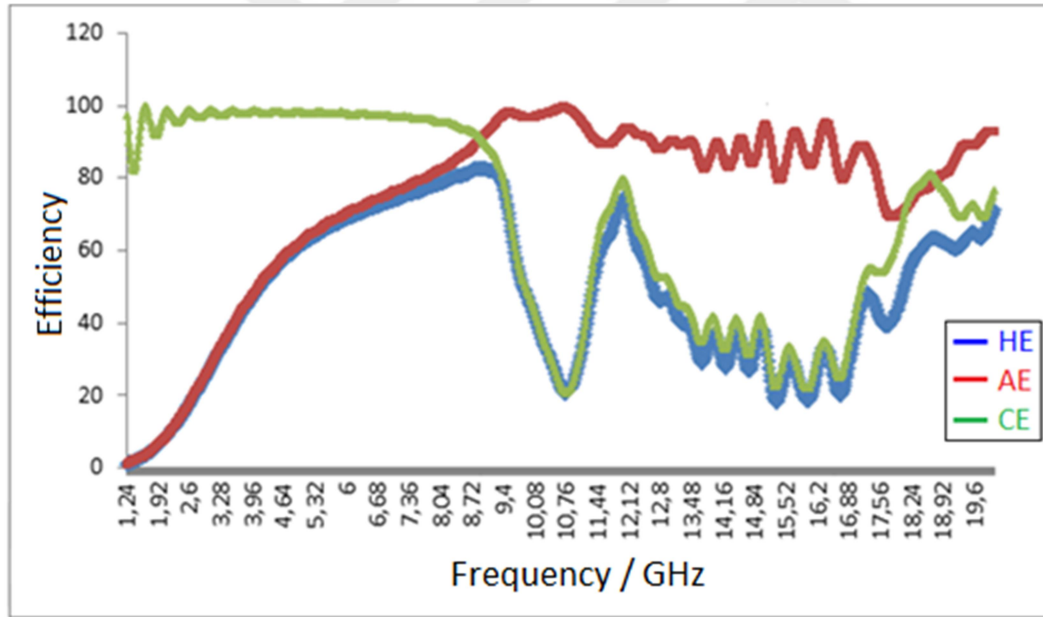
Şekil 4.53. Enerji hasatçısına gelen EM dalganın gücü, yapı tarafından kabul edilen güç ve dirençlerde harcanan güç

Şekil 4.52'de verilen enerji hasatçısının çalışma prensibini daha iyi anlamak için yapının emilim verimliliği (AE), dönüşüm verimliliği (CE) ve hasat verimliliği (HE) (4.1), (4.2) ve (4.3) eşitlikleri kullanılarak hesaplanmıştır.

Belirtilen eşitliklerdeki denklemler kullanılarak, yapının hasat potansiyelinin gösteren CE, HE ve AE hesaplanıp Şekil 4.54'te çizilmiştir. Şekil 4.54'ten görüleceği üzere, bir önceki paragrafta belirtildiği gibi 4 GHz ile 8 GHz arasında CE yaklaşık % 90'ın üzerindedir. 8.5 GHz ile 10.74 GHz arasında ise emilim verimliliğinde (AE) artma ve hasatlama verimliliğinde (HE) azalma olmuştur. Dönüştürme oranı CE eşitlik (4.1), (4.2) ve (4.3) kullanılarak AE ve HE cinsinden ifade edilirse aşağıdaki eşitlik elde edilir;

$$CE = \frac{HE}{AE} \times 100 \quad (4.8)$$

Şekil 4.54'te yapının CE'sinin azalarak 10.74 GHz'de en az değeri olan % 20,85'e düştüğü görülmektedir. Ayrıca 10.74 GHz ile 11.62 GHz arasında önerilen yapının emilim verimliliği yaklaşık olarak sabit kalmasına rağmen, yapının hasat verimliliği artar. Yukarıda verilen eşitlik (4.8)'den bu frekans aralıklarında dönüşüm verimliliğinin artması gerektiği bulunur. Dönüşüm verimi, en yüksek değere olan % 79.74 orana 11.92 GHz'de ulaşmaktadır, çünkü bu frekans değerinde hasat verimliliği yüksek emilim verimliliği düşük değere sahiptir. Yapının AE değerlerinde bazı küçük dalgalanmalar olsa da, hasat ve dönüşüm verimliliği 11.98 GHz ile 16.2 GHz arasında azalır ve daha sonra tekrar 16.2 GHz ile 20 GHz arasında artar. Dönüşüm verimliliği ise 18,62 GHz değerinde maksimum değeri olan % 81.27 oranına ulaşmaktadır.



Şekil 4.54. Enerjisi hasatçısı yapısının hasat verimliliği, emilim verimliliği ve dönüştürme verimliliği

Önerilen enerji hasatçısı yapısının emilim, hasat ve dönüştürme verimliliklerini daha iyi anlamak için, yapının bazı frekans değerlerindeki emilim, hasat ve dönüştürme verimlilikleri Çizelge 4.7'de gösterilmiştir. Çizelge 4.7'deki 1. frekans değerinde bakıldığında, yapının emilim ve hasatlama seviyesi yeterince yüksek olduğunda, dönüşüm verimliliğinin yüksek olduğu görülmektedir. 2. Frekans değerinde ise, emilim verimliliği yüksek ve hasat verimliliği düşük olduğunda, dönüşüm verimliliği de eşitlik (4.8)



kullanılarak düşük bulunur. 3. frekans değerinde ise emilim seviyesi yüksek ve hasatlama seviyesi orta ise dönüştürme seviyesi orta olur. Yani eşitlik (4.8)'den görüleceği üzere dönüştürme verimliliği hasatlama seviyesi ile emilim seviyesinin oranıdır. Diğer olasılıklar eşitlik (4.8)'in düzenlenmesi ile oluşan eşitlik (4.9) ile bulunabilir;

$$\text{Emilim Seviyesi} = \frac{\text{Hasatlama Seviyesi}}{\text{Emilim Seviyesi}} \quad (4.9)$$

Örneğin, AE = Yüksek, HE = Orta → CE = Orta / Yüksek = Orta (4. frekans) ve  
AE = Orta, HE = Orta → CE = Orta / Orta = Yüksek (5. frekans)

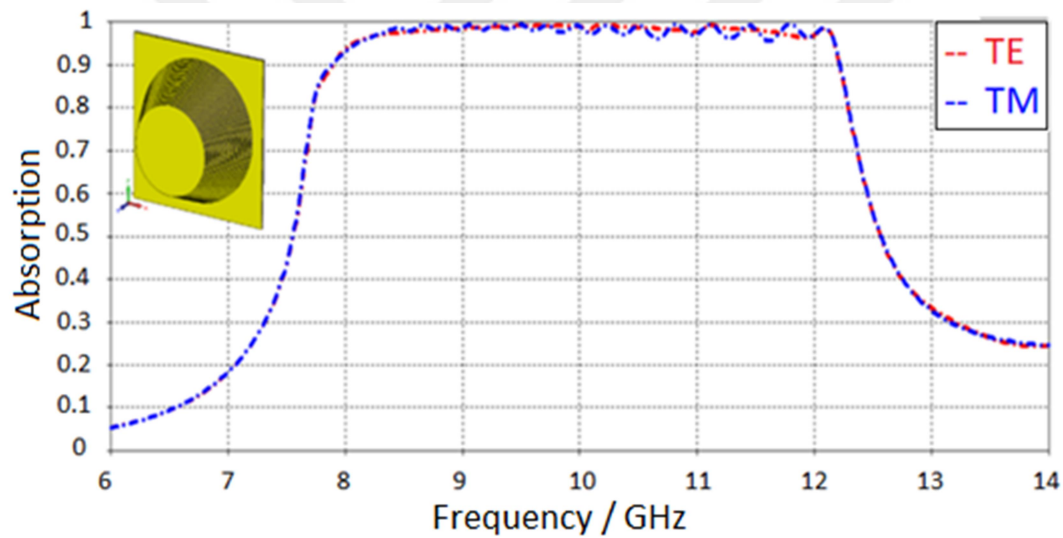
Bu örnekler göz önüne alındığında, önerilen yapı, yüksek emilim, hasatlama ve dönüştürme seviyelerine sahip olduğundan, enerji hasatı uygulamaları için uygun bir yapıdır.

Çizelge 4.7. Enerji hasatçısı yapısının emilim seviyeleri

Örnekler	Frekans (GHz)	Emilim Verimliliği (%)	Hasat Verimliliği (%)	Dönüştürme Verimliliği (%)	Emilim Seviyesi	Hasatlama Seviyesi	Dönüştürme Seviyesi
1	8,86	90,51	82,74	91,41	Yüksek	Yüksek	Yüksek
2	10,74	99,52	20,75	20,85	Yüksek	Düşük	Düşük
3	11,62	89,24	62,94	70,54	Yüksek	Orta	Orta
4	11,98	93,36	74,44	79,74	Yüksek	Orta	Orta
5	18,62	77,61	63,08	81,28	Orta	Orta	Yüksek
6	20	93,04	71,16	76,49	Yüksek	Orta	Orta
		80-100 : Yüksek		60-80 : Orta		0-60 : Düşük	

Önerilen kesik koni şekilli sinyal emici yapısı ayrıca tıbbi görüntüleme, uydu iletişimi, sensör uygulaması gibi birçok alanda kullanılabilir. Ek olarak, önerilen sinyal emici yapısı daha küçük boyutlarda üretilerek optik frekanslarında ve kızılötesi frekansında uygulama alanı bulabilir. Bu bölümde, X bandında askeri radarlar için önerilen yapının görünmezlik teknolojisi uygulaması (Kısa menzilli izleme, füze güdümü, haritalama, deniz radarı, havadan müdahale) incelenmiştir. Önerilen sinyal emici yapısı, yüksek emilim değerlerine ve gelen dalganın polarizasyonundan bağımsız özelliklere sahip olduğundan, çalışma

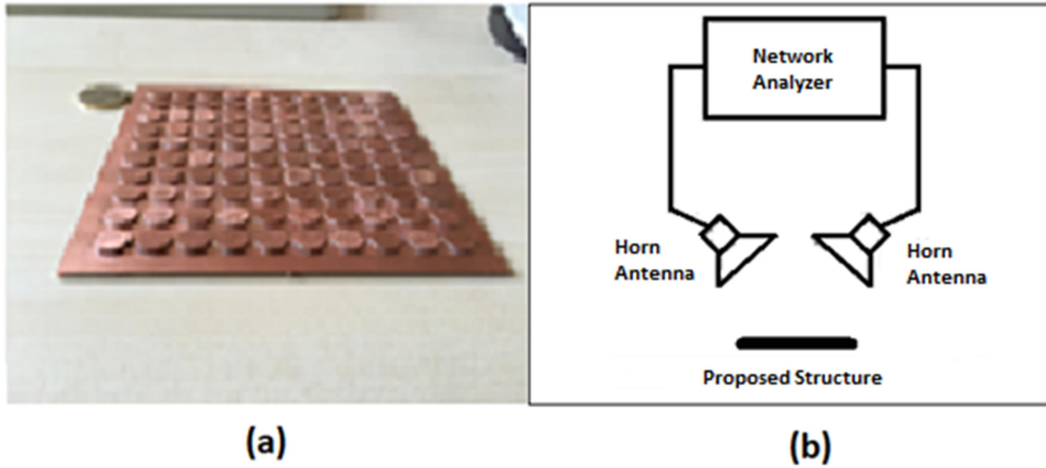
frekansı 8 ile 12 GHz arasında değişen X-bant radarlardan gizlenmek için kullanılabilir. Önerilen sinyal emici yapısının X bantta sinyal emilimi yapabilmesi için, Şekil 4.44. (b)'de gösterilen önerilen yapı yeniden boyutlandırılmıştır. Yeni sinyal emici yapısında  $a = 7$  mm,  $b = 10.99$  mm ve  $c = 13$  mm olarak ayarlanmıştır. Yapıda bulunan diğer ölçüler aynıdır. X-bant sinyal emicisinin bu ölçüleri parametrik çalışma kullanılarak belirlenmiştir. X-bant radar uygulamaları için oluşturulan yapının emilim değerleri Şekil 4.55'te gösterilmiştir. Şekil 4.55'ten görülebileceği gibi, değiştirilmiş yapı, gelen dalganın hem TE hem de TM polarizasyonları için 8 ile 12 GHz arasında yüksek emiciliğe sahiptir. Bazı frekanslarda emilim seviyesi oranı % 93 olmasına rağmen 8-12 GHz frekans aralığında yapının emilim oranı % 95'in üzerindedir. X- bant sinyal emici yapısı yüksek performans ve polarizasyon bağımsız özellikleri ile radar görünmezlik uygulamalarında kullanılabilir.



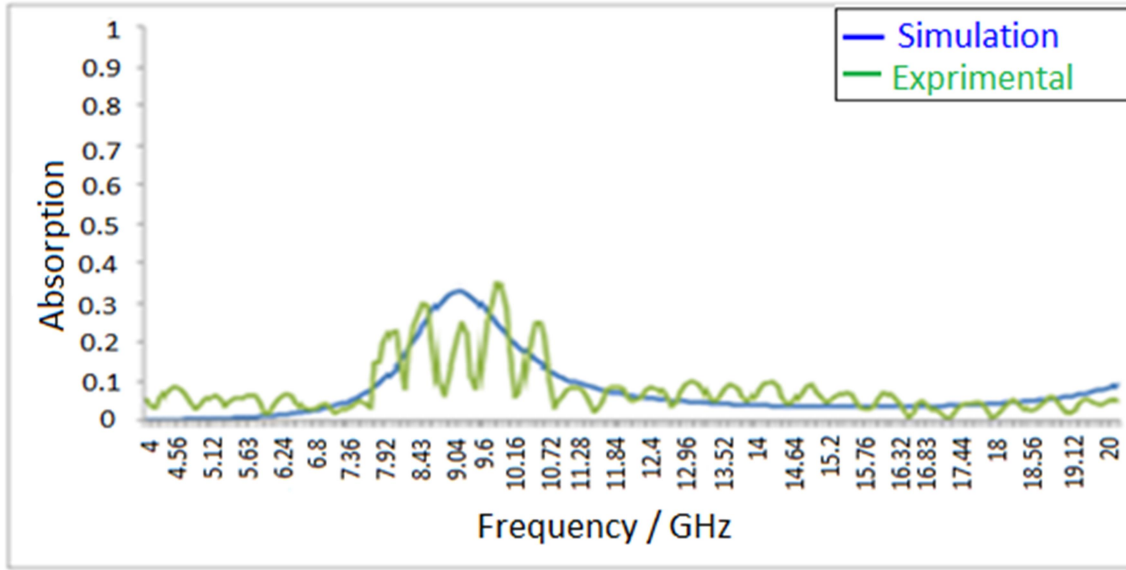
Şekil 4.55. X-bant sinyal emici yapısının gelen dalganın TE ve TM polarize olması durumundaki emilim değerleri

Önerilen sinyal emici yapısının, nümerik analizlerin yanında deneysel ölçümlerinin de yapılması için yapı üretilmiştir. Üretimde kullanılan FR-4 ve bakırın elektriksel parametreleri nümerik analizlerde kullanılanlar ile aynıdır. Fakat malzeme ve tesis sınırlamalarından dolayı üretimde kullanılan FR-4 ve bakırın kalınlıkları sırasıyla 1.6 ve 0.035'tir. 20 adet dielektrik ve metal tabakaların farklı boyutlarda (5 mm'den 8 mm'ye kadar) kesilmesi ve yapıştırılması zorluğundan dolayı, konik şekilli sinyal emici yapısının sadece en alt dairesel katmanı ve en alttaki bakır- FR4 katmanından oluşan 4 katmanlı bir yapı üretilmiştir. Üretilen bu yapı ile karşılaştırılmak üzere bu ölçülere sahip yapının nümerik analizleri de gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.6'da belirtildiği gibi üretilen yapıdaki

en alttaki dairesel katmanın çapı 8,99 mm'dir. Ölçüm, bir vektör network analizörü (VNA) ve iki geniş bant, doğrusal olarak polarize edilmiş ve yüksek kazançlı antenler (Şekil 4.56. (b)) kullanılarak gerçekleştirilir. Ölçüm için kullanılan Agilent marka 2-Portlu PNA-L network analizörü 10 MHz ile 43.5 GHz frekans aralığında ölçümler yapabilmektedir. Ölçümler, mikrodalga laboratuvarımızda 3 GHz ila 20 GHz arasında çalışan iki horn anteni kullanılarak gerçekleştirilir. Şekil 4.57'ye bakıldığında ölçülen maksimum emilim oranı, tek katmanlı bir yapı için 9.5 GHz civarında yaklaşık % 35 civarındadır. Ölçüm sonuçları, bir katmanlı yapının nümerik analizi ile uyum içindedir. Kalibrasyon hataları nedeniyle nümerik analiz ve deney sonuçları arasında çok az farklılıklar bulunmaktadır. Bu nedenle önerilen kesin koni şekilli sinyal emici yapısı nümerik analizlerdeki boyutlarıyla üretilirse 4 GHz ile 20 GHz arasındaki EM dalgaları emebilen bir mükemmel sinyal emici yapısı elde edilmiş olur.



Şekil 4.56. (a) Önerilen yapının üretilen örneği ve (b) deneysel ölçüm düzeneği

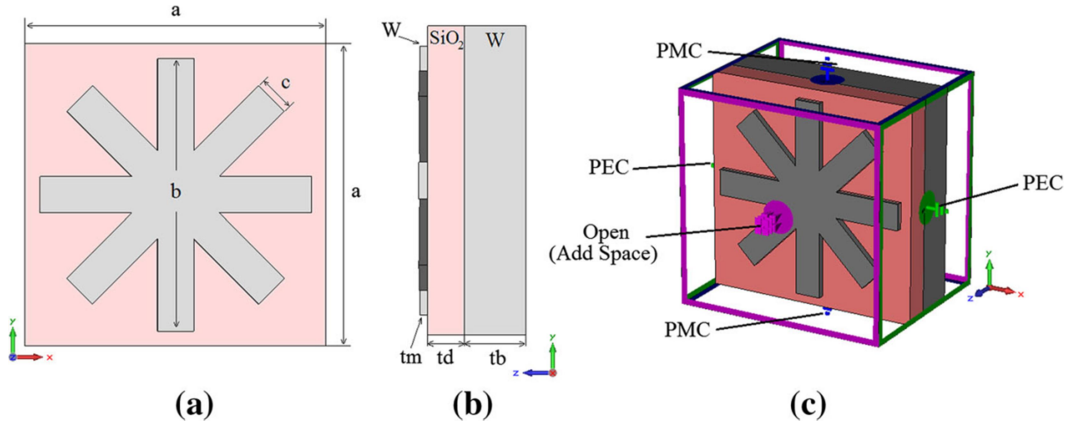


Şekil 4.57. Önerilen sinyal emici yapısının emilim değerinin nümerik analiz ve ölçüm sonuçları

## 4.2. Optik Frekans Bandında Çalışan Sinyal Emici Yapıları

### 4.2.1. Yıldız Şekilli Rezonatörlü Sinyal Emici

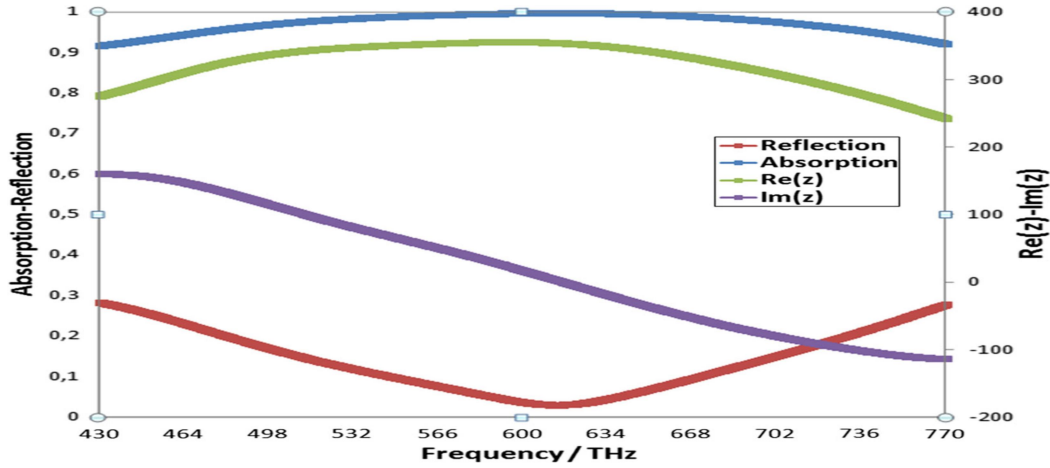
Önerilen MTM tabanlı sinyal emici güneş ışığındaki enerjiyi emmek ve güneş pili uygulamaları için güneş enerjisini toplamak için tasarlanmıştır. Önerilen yapı Şekil 4.58’de gösterilmektedir. Yapıda bulunan rezonatör Şekil 4.58. (a)’da görüleceği üzere yatay ve dikey şeritlerden oluşmaktadır. Şekil 4.58. (b)’de önde bulunan yıldız şekilli rezonatör ve arkadaki metalik plaka tungsten(Wolfram (W)) ve bu iki metal katmanın arasında bulunan dielektrik katman silikon dioksittir ( $\text{SiO}_2$ ). W ve  $\text{SiO}_2$  katmanlarının frekans bağımlı karmaşık dielektrik parametreleri sırasıyla [74,75]’den alınmıştır. Şekil 4.58. (a) ve (b)’de gösterilen önerilen yapıdaki dielektrik ve arkadaki metalik katmanın eni ve boyu (a) 500 nm, yıldız rezonatördeki şeritlerin uzunluğu (b) 450 nm, şeritlerin genişliği (c) 60 nm, öndeki tungsten rezonatörün kalınlığı 15 nm (tm), iki metalik plaka arasında bulunan  $\text{SiO}_2$ ’nin kalınlığı (td) 60 nm ve arkadaki tungsten plakanın kalınlığı (tb) 100 nm’dir.



Şekil 4.58. Önerilen yapının birim hücrenin ölçüleri, (a) önden görünüş, (b) yan görünüş ve (c) sınır koşulları

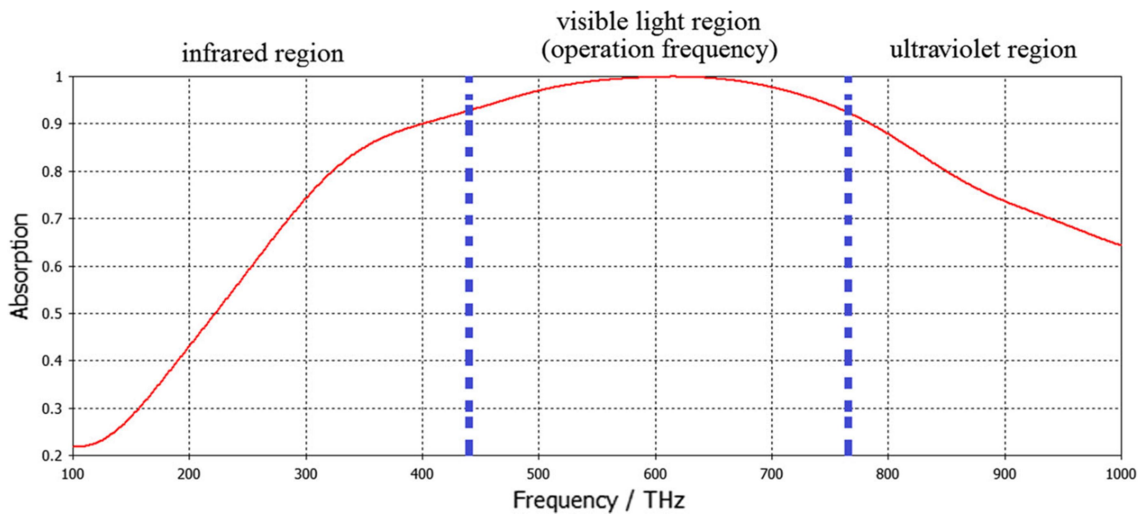
Yıldız rezonatörlü sinyal emici yapısının nümerik çözümleri FIT tabanlı analiz programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nümerik çözümlerde sınır koşulları Şekil 4.58. (c)'de gösterildiği gibi  $y-z$  düzlemleri için mükemmel elektrik iletkeni (PEC) ve  $x-z$  düzlemleri için mükemmel manyetik iletken (PMC) olarak seçilmiştir. PEC ve PMC sınırları sadece enine elektrik-manyetik gelen dalga için periyodiklik sağlar. Gelen dalganın elektrik alan bileşeni PEC'ye ve manyetik alan bileşeni PMC'ye dik olarak atanır. Böylece bir birim hücre kullanılarak periyodiklik elde edilir. Ayrıca yapının ön tarafı olan  $x-y$  eksenini yapıya TEM dalga uygulamak için boşluklu açık olarak tanımlanmıştır. Nümerik çözümler için, gelen EM dalganın elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin sırasıyla  $x$  ve  $y$  yönleri boyunca polarize olduğu ve yayılma yönünün  $z$  yönü boyunca olduğu varsayılır.

Şekil 4.59'da yıldız şekilli rezonatöre sahip sinyal emici yapısının emilim değeri ve yansıtma katsayısı ( $S_{11}$ ) görünür ışık frekansında (430 THz- 770 THz) gösterilmiştir. Şekil 4.59'dan da görüleceği üzere önerilen yapı mükemmel bir emilim karakteristiği göstermektedir. Önerilen yapı görünür ışık frekans aralığında rezonans frekansı olan 613 THz'de % 99,87'lik bir emilim değerine ve 548 THz ile 669 THz arasında 121 THz'lik bir bant genişliği ile %99 emilime sahiptir. Ayrıca önerilen yapının emilim değeri tüm görünür ışık spektrumunda %91'in üzerindedir ve bu da önerilen yapının görünür ışık spektrumunda bir güneş enerjisi emicisi olarak kullanılabilmesi anlamına gelir. Önerilen yapının tüm görünüş ışık spektrumunda % 90'nın üzerinde emiciliğe sahip olması, yapının iç empedansının boşluğun empedansına eşit olmasına, gelen güneş ışınlarının yapının içinden geçmesini önleyen arka tungsten plakaya ve yalıtkan  $\text{SiO}_2$  tabakasına bağlıdır. Önerilen yapıyı mükemmel bir EM sinyal emici yapan bu üç özelliktir. Şekil 4.59'da ayrıca önerilen yapının empedansının gerçek ve sanal kısmı gösterilmektedir.



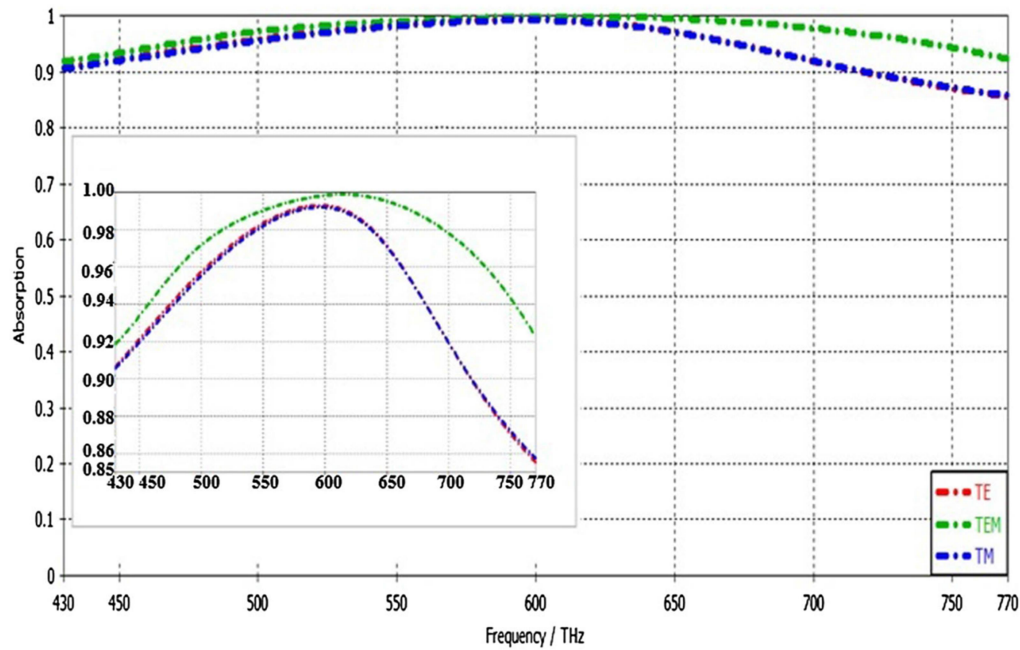
Şekil 4.59. Önerilen yapının emilim-yansıtma karakteristiği ve eşdeğer empedansın gerçek ve sanal değerleri

Şekil 4.60'ta önerilen yapının emilim karakteristiği kızılötesi, görünür ışık ve ultraviyole frekans spektrumlarını kapsayan güneş ışığının tüm frekans spektrumlarında araştırılmıştır. Şekil 4.60'ta kızılötesi bölgede önerilen sinyal emicinin 285 THz ve 430 THz arasında emiciliğinin %70'in üzerinde olduğu görülmektedir. Aynı şekilde önerilen yapı güneş ışığının ultraviyole bölgesinde 770 THz ile 938 THz arasında %70 üzerinde emilim değerlerine sahiptir. Yani önerilen sinyal emici yapısı sadece görünür bölgede değil, aynı zamanda kızılötesi ve ultraviyole bölgelerde de yüksek emiciliğe sahiptir. Söz konusu bölgelerdeki emiciliğin artırılması, foto dedektör yongaları, IR hareket dedektörü, kızılötesi ısı dedektörü, pasif kızılötesi dedektör, kızılötesi ışık dedektörü, kızılötesi alev dedektörü veya herhangi bir başka foto dedektör (kızılötesi dedektör) devresi gibi sensör uygulamalarında daha iyi ölçümler sağlayabilir.



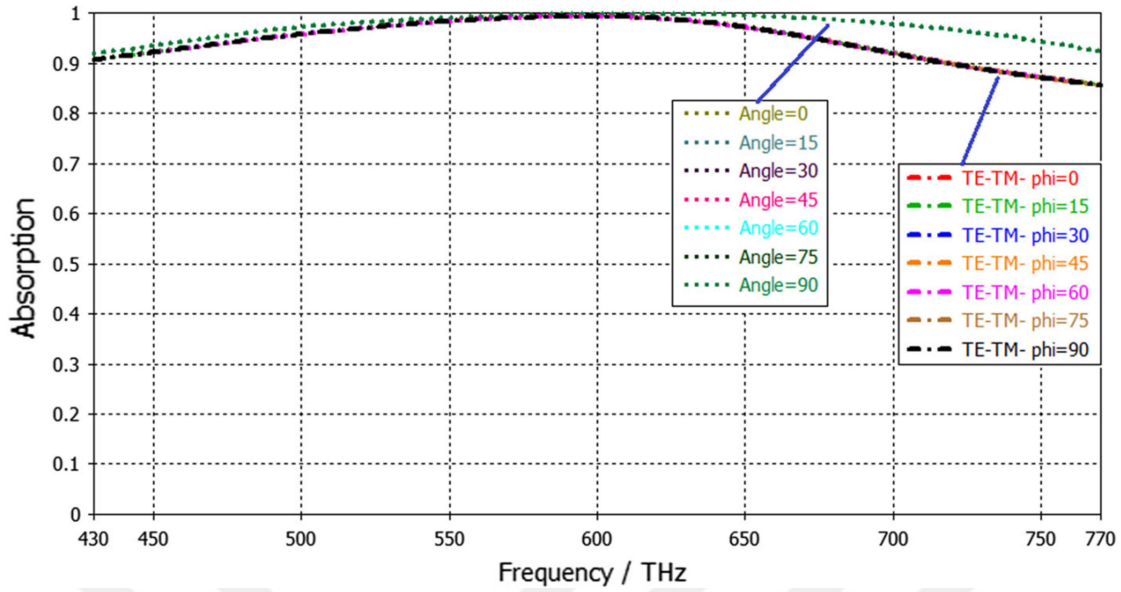
Şekil 4.60. Güneş ışığı frekans spektrumunda önerilen yapının emilim oranı

Şekil 4.61’de ise önerilen MTM tabanlı güneş pilinin neredeyse mükemmel emicilik özelliklerine ek olarak, gelen EM dalganın polarizasyonuna bağımlılığı gösterilmiştir. Gelen EM dalganın TEM durumu, TE ve TM polarizasyonları için önerilen yapının emilim tepkisi gösterilmiştir. Önerilen MTM tabanlı sinyal emici emilim tepkisi gelen dalganın TE ve TM polarizasyonları için aynıdır. Önerilen yapının gelen EM dalganın TEM durumundaki emilim değerler ise TE ve TM polarizasyon durumundaki emilim değerlerine yakındır.



Şekil 4.61. Önerilen sinyal emicinin yapının TE ve TM polarizasyonu ve TEM modu soğurma karakteristiği

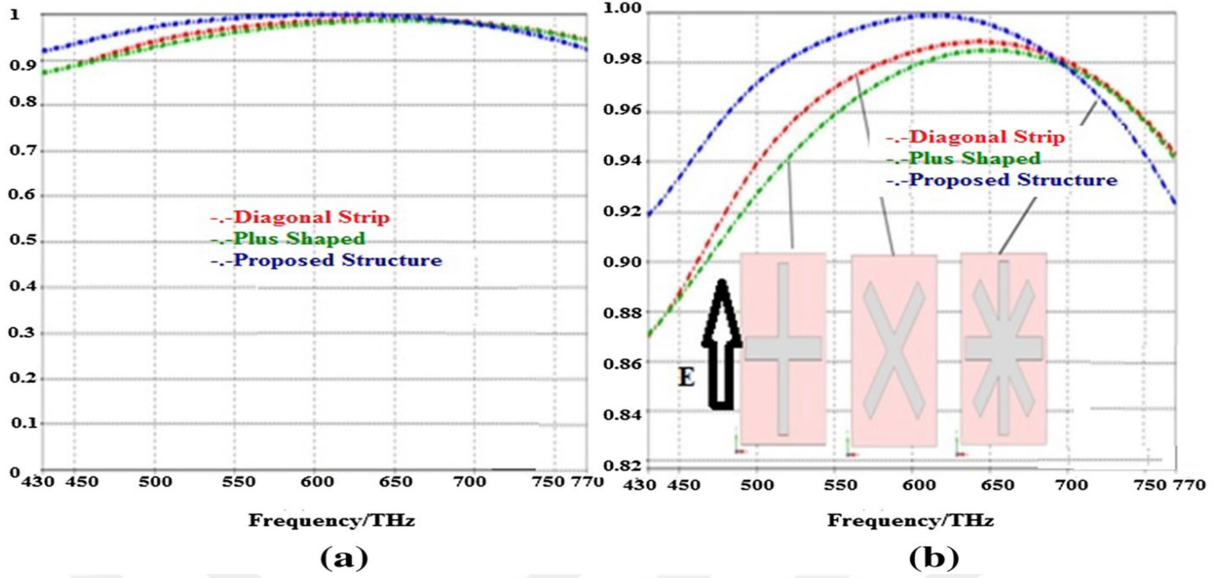
Bu bölümde gelen EM dalganın polarizasyon açısının önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısının emilim karakteristiği üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Nümerik çözümlerde TEM durumu için sınır koşulları PEC ve PMC, TE ve TM polarizasyonları için PML / birim hücre olarak ayarlanmıştır. Şekil 4.62’de gelen dalganın polarizasyon açısı TEM, TE ve TM durumlarında  $0^\circ$  ile  $90^\circ$  arasında  $15^\circ$  artışla önerilen yapının emilim tepkisi her açı için gösterilmiştir. Şekil 4.62’den açıkça görüleceği gibi önerilen sinyal emici yapısı, görünür ışığın tüm çalışma frekansı bandı boyunca hem TE–TM polarizasyonları hem de TEM durumu için açıya karşı duyarsızdır.



Şekil 4.62. Önerilen yapının gelen EM dalganın TEM durumunda ve TE-TM polarizasyonlarında farklı polarizasyon açıları için emilim tepkisi

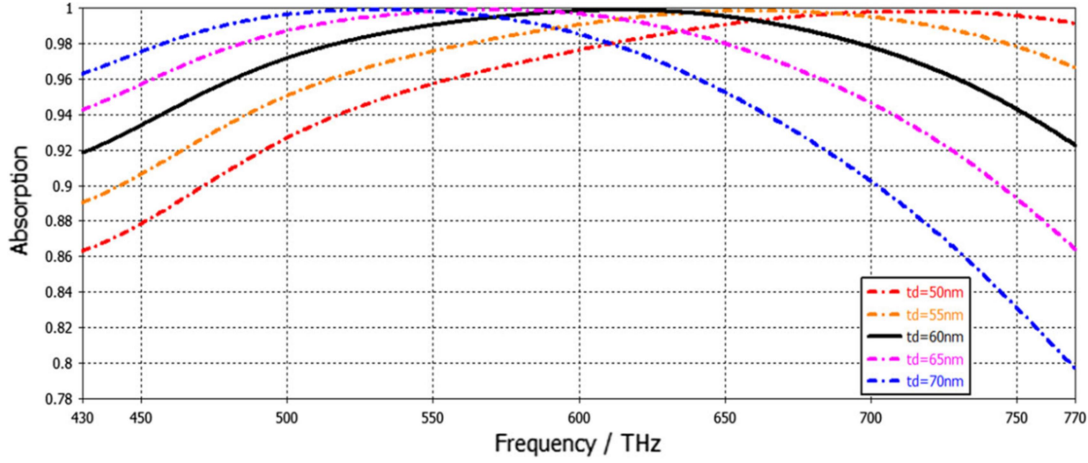
Şekil 4.63'te MTM yapısındaki yıldız şekilli rezonatörün yatay-dikey ve çapraz metalik parçalarının yapının emilim tepkisi üzerine etkisi gösterilmiştir. Şekil 4.63'te yatay-dikey (artı şekilli) ve çapraz şekilli rezonatörlerin bireysel emilim değerleri yıldız şekilli rezonatörün emilim değerleriyle karşılaştırılmıştır. Artı şekilli, çapraz şekilli ve yıldız şekilli rezonatöre sahip yapıların rezonans frekanslarındaki emilim oranları sırasıyla 649 THz'de % 98, 643 THz'de % 98 ve 613'te % 99.9'dur. Şekil 4.63'ten de görülebileceği üzere yıldız şekilli rezonatöre sahip olan yapının yanında artı şekilli ve çapraz şekilli rezonatörlere sahip olan yapılar da belirtilen frekans aralığında (430 THz- 770 THz) yüksek emilim değerlerine ve geniş bantlara sahiptirler. Artı ve çapraz şekilli rezonatörler birbirlerini güçlendirdiklerinden dolayı yıldız şekilli rezonatöre sahip yapının emilim değeri bu rezonatörlerin bireysel emilim değerlerinden büyüktür.





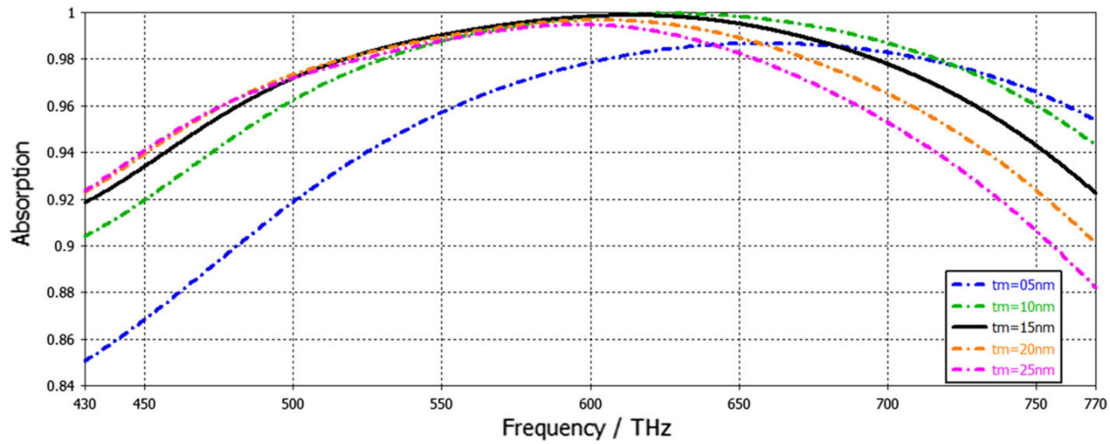
Şekil 4.63. (a) Artı şekilli, çapraz şekilli ve yıldız şekilli rezonatörlere sahip yapıların emilim değerleri (b) şeklin yakınlaştırılmış hali

Bu bölümde önerilen yapının ölçülerinin emilim tepkisi üzerine etkisi araştırılmıştır. Nümerik çözümler gelen dalganın TEM durumuna göre yapılmıştır. Şekil 4.64'te dielektrik tabaka olan SiO<sub>2</sub> katmanın farklı kalınlık (td) değerlerine önerilen yapının emilim değerleri gösterilmiştir. td değeri 50 nm'den 70 nm'ye kadar 5 nm'lik artışlarla değiştirilmiştir. Belirtilen tüm td değerleri için yapının rezonans frekansındaki emilim değeri %99'dur. Şekil 4.64'te görüldüğü üzere siyah ve düz çizgi ile gösterilen 60 nm dielektrik kalınlığa sahip önerilen yapı belirtilen frekans aralığında % 91.8'in üzerinde emilim değerlerine sahiptir. Ayrıca, dielektrik kalınlığı arttıkça, önerilen yapının rezonans frekansı daha düşük frekanslara kaymaktadır. 50, 60 ve 70 nm dielektrik tabaka kalınlıklarına sahip yapıların rezonans frekansları sırasıyla 715 THz, 613 THz ve 530 THz 'dir. Rezonans frekansının değişimi rezonatörün genel kapasitans değişiklikleriyle açıklanabilir. Dielektrik kalınlığının azaltılması, zemin düzlemi ve şeritler arasındaki her bir kapasitans değerinde bir artışa neden olur. Şeritlerin her kapasitansı diğerleriyle seri olduğundan, sistemin eşdeğer kapasiteleri azalır. Eşdeğer kapasitansın azaltılması, rezonans frekansındaki artışın sebebidir. Rezonans frekansının sağa kayması, optik basınç sensörü uygulamalarında kullanılabilir, çünkü kayma, dielektrik kalınlığının artışına göre doğrusaldır. Bu nedenle, bu değişimden hem endüktans hem de kapasitans sorumludur.



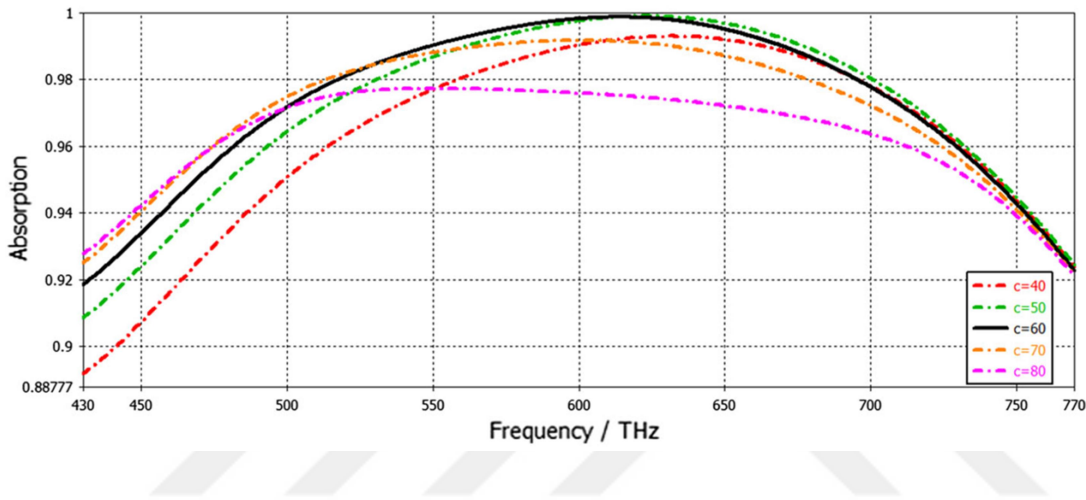
Şekil 4.64. Önerilen yapının farklı dielektrik katman kalınlıkları için emilim tepkisi

Şekil 4.65'te rezonatör katmanının kalınlığındaki ( $t_m$ ) değişimin emilim tepkisi üzerine etkileri gösterilmiştir. Rezonatör katmanının kalınlığı 5 nm ile 25 nm arasında değiştirilmiştir. Elektromanyetik alanın elektrik alan bileşenine maruz bırakılan yıldız rezonatördeki her bir şerit bir indüktansa sahip olduğundan, rezonatör kalınlığı arttıkça dielektrik kalınlık tepkisinin değişiminde olduğu gibi önerilen MTM tabanlı sinyal emicinin rezonans frekansının daha düşük frekanslara kaydığı görülmüştür. Yıldız rezonatör ve arka metalik katman arasında kapasitif bir etki vardır. Rezonatör kalınlığının artırılması yapının endüktansını artırır ve bu da LC devresinin rezonans frekansının azalmasına sebep olur. Ayrıca 5 nm'lik rezonatör kalınlığına sahip yapının haricindeki diğer tüm kalınlıktaki yapıların emme oranı rezonans frekansında yaklaşık% 99'dur.



Şekil 4.65. Önerilen yapının farklı rezonatör kalınlıkları için emilim tepkisi

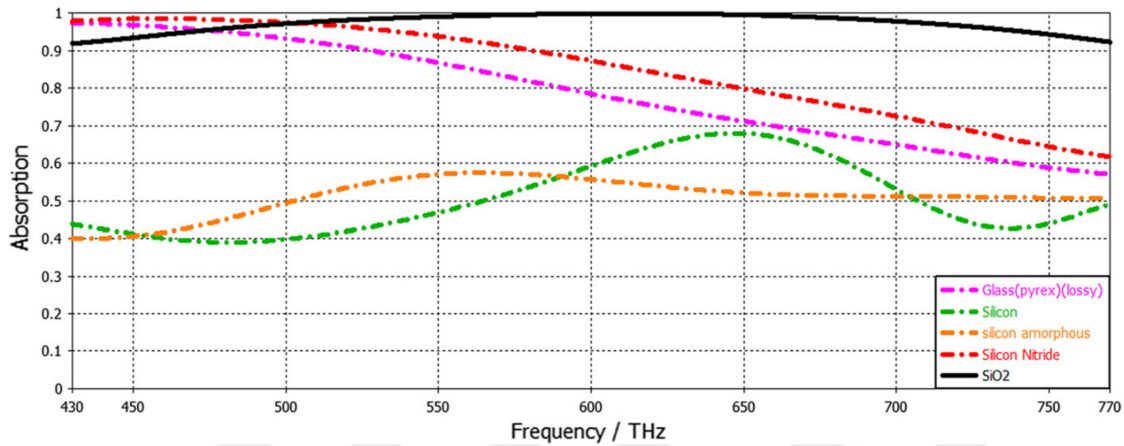
Şekil 4.66’da ise yıldız rezonatörde bulunan şeritlerin genişliğindeki (c) değişimin önerilen yapının emilim değerleri üzerine etkileri gösterilmiştir. Şeritlerin genişlikleri 40 nm’den başlayıp 80 nm’ye kadar arttırılmıştır. 80 nm rezonatör şerit genişliğine sahip yapının haricindeki tüm yapılarda emilim değerleri %98’in üzerindedir. Rezonatör şeridinin genişliğindeki artış, şeridin iç indüktansını azaltır, ancak bitişik yakın şeritler arasındaki karşılıklı indüktansı artırır. Sonuç olarak, rezonans frekansı aşağı doğru kayar. Bir önceki bölümde bu değişimden bu indüktif etkinin sorumlu olduğu belirtilmiştir.



Şekil 4.66. Önerilen yapıdaki rezonatörün farklı şerit genişlikleri için yapının emilim tepkisi

Bu bölümde önerilen yıldız şekilli rezonatörlü sinyal emici yapısında dielektrik olarak kullanılan  $\text{SiO}_2$ 'nin yerine farklı dielektrik malzemelerin kullanılması durumundaki yapının emilim değerleri incelenmiştir. Şekil 4.67’de yıldız şekilli rezonatör yapısında dielektrik olarak silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ), silikon, silisyum nitrür ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), silisyum amorf ve cam (Pyrex-kayıplı) kullanılmış ve bu farklı dielektriklere sahip yapıların emilim tepkileri gösterilmiştir. Şekil 4.67’de siyah ve düz çizgilere sahip yapı önerilen yapı yani dielektrik olarak  $\text{SiO}_2$ 'ye sahip yapıdır. Şekil 4.67’den de görüleceği üzere  $\text{SiO}_2$  dielektrik katmanından oluşan yapı görülebilir spektrumda en yüksek emilim oranına sahiptir.  $\text{SiO}_2$  tabanlı solar emici görünür ışık spektrumunda % 93’ün üzerinde bir emilim oranı ile güneş pili teknolojileri, gerçek görünmezlik araştırmaları ve ışık algılama sensörleri için uygulama alanları sağlayan en önemli çalışmalardan biri olabilir. Dielektrik olarak cam (Pyrex) ve silisyum nitrür ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) kullanan yapılar da düşük frekanslarda yüksek emme oranlarına sahiptir. Ayrıca frekans arttıkça cam (Pyrex) ve silisyum nitrürün ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) emilim oranı, 500 THz ila 750 THz arasında doğrusal olarak azalır. Bu nedenle, silisyum

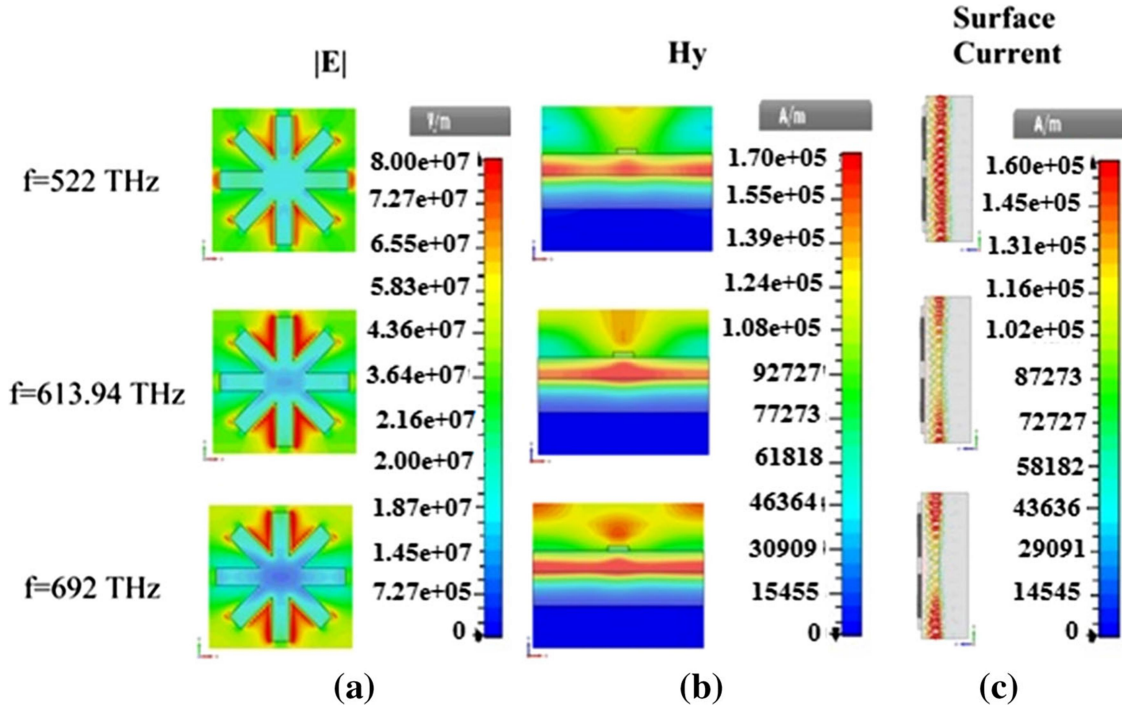
nitür ve Cam (Pyrex) dielektrik tabakadan oluşan önerilen yapının, emilim oranları sırasıyla 520 THz-750THz ve 500 THz-750 THz aralığındaki frekansa göre lineer değişiminden dolayı, ışık dalga boyu detektörü olarak kullanılabilir. Bu da önerilen yapının bu dielektrik malzemeler ile güneş pili ve görünmezlik uygulamalarının haricinde diğer bir uygulama alanıdır. Ayrıca, silikon amorf dielektrik katmanına sahip yapı güneş ışığı emici hücre, 650 THz–770 THz aralığında geniş bir frekans bandında yarı güç emici olarak kullanılabilir.



Şekil 4.67. Farklı dielektrik malzemelere sahip yıldız şekilli rezonatörlü yapının görünür ışıktaki emilim değerleri

Son olarak önerilen sinyal emicinin çalışma mekanizmasını anlamak için, 522 THz, 613.94 THz (rezonans frekansları) ve 692 THz gibi belirli frekanslardaki elektromanyetik alan ve yüzey akım dağılımı incelenmiştir. Elektrik alan dağılımlarının ( $|E|$ ) büyüklüğü, manyetik alan dağılımlarının ( $H_y$ ) y-bileşeni ve önerilen yapının yukarıda belirtilen frekanslarda yüzey akımı dağılımı, sırasıyla Şekil 4.68'de gösterilmiştir. 522 THz, 613.94 THz ve 692 THz'de elektrik alan çizgileri, Şekil 4.68. (a)'da görüldüğü gibi dikey ve diyagonal şeritler arasında yoğunlaşmıştır ve aynı zamanda yatay şeritlerin kenarlarında ve diyagonal şeritlerin köşesinde birikmiştir. Dikey ve diyagonal şeritler arasındaki elektrik alan konsantrasyonunun büyüklüğü, rezonans frekansında (613.94 THz) en büyük değerine ulaşır. Şekil 4.68. (b)'de ise önerilen yapının manyetik alan dağılımının y-bileşeni gösterilmiştir. Şekil 4.68. (b)'den görülebileceği üzere, yıldız şekilli rezonatör ile alt metal tabaka arasındaki birleştirme etkisi, anti-paralel dağılımlara sahip bir indüklenmiş manyetik alan oluşturur. Her şerit, 522 THz ve 692 THz'de bu manyetik alan dağılımından sorumlu olsa da, manyetik alan çizgileri, çoğunlukla rezonans frekansında (613.94 THz) dikey şeritler etrafında yoğunlaşmaktadır. Şekil 4.68. (c)'de ise önerilen yapının yüzey

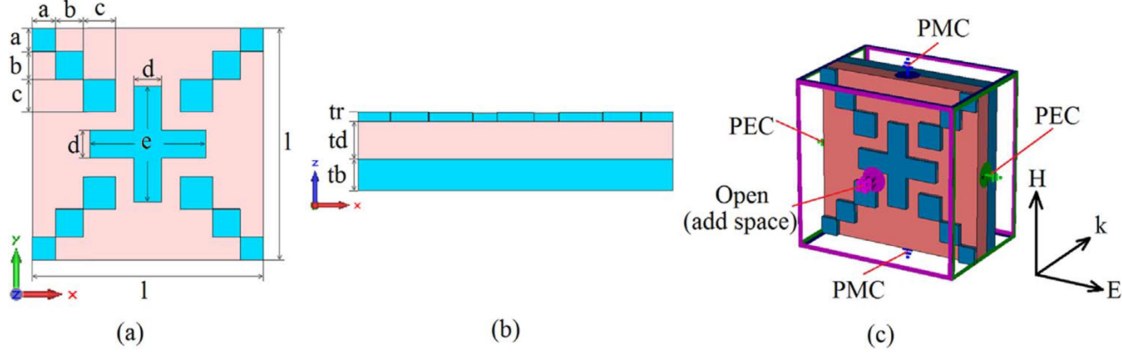
akımı dağılımları gösterilmiştir. Şekil 4.68. (c)'ye bakıldığında, yüzey akımının önerilen yapı boyunca aktığı görülmüştür. Yüzey akımları, yapının yüzeyi üzerinde 522 THz'de eşit olarak dağılırken, 613.94 THz ve 692 THz'de ise önerilen yapının kenarlarının yakınında yoğunlaştırılmaktadır.



Şekil 4.68. Önerilen yapının (a) Elektrik alan dağılımlarının büyüklüğü, (b) manyetik alan dağılımlarının y-bileşeni ve (c) önerilen MA'nın yüzey akım dağılımları

#### 4.2.2. Artı ve Çapraz Şekilli Rezonatörlü Sinyal Emici

Önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısı Şekil 4.69. (b)'de gösterilen iki Ni(Nikel) metalik tabakadan ve bunların arasında bulunan SiO<sub>2</sub>(silikon dioksit) bir dielektrik tabakadan oluşur. Şekil 4.69. (a)'da gösterilen önde bulunan rezonatör artı şekilli bir parçadan ve yapının köşegenlerinden merkeze doğru uç uca yerleştirilmiş kare parçalardan oluşur. Şekil 4.69. (a) ve (b)'de gösterilen önerilen yapının birim hücrenin ölçüleri Çizelge 4.8'de verilmiştir. Çizelge 4.8'de verilen arka taraftaki Ni tabakanın kalınlık değeri çok önemlidir. Çünkü arkadaki Ni tabakanın, yapının içine giren EM dalgaya bir optik ayna olarak davranır. Ayrıca arka taraftaki Ni tabakasının bu kalınlığı aynı zamanda, Şekil 4.69. (b) 'de görülen üstteki rezonatör tabakası ile bir dipol oluşturur ve böylece elektromanyetik enerjiyi emen ve yapının içine hapseden bir elektrik ve manyetik dipol oluşturur. Ni ve SiO<sub>2</sub>'nin kompleks dielektrik parametreleri [75, 76] 'dan alınmıştır.



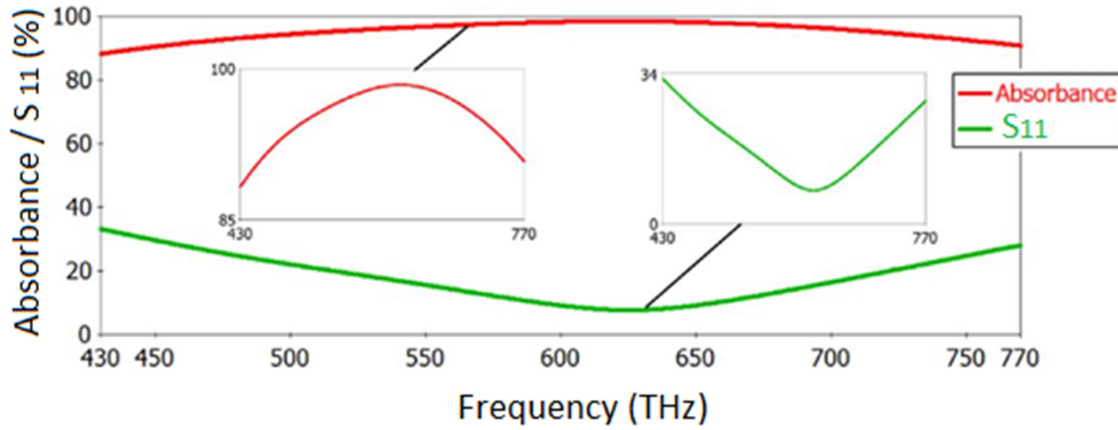
Şekil 4.69. Önerilen yapının birim hücrenin (a) önden görünümü, (b) yandan görünümü ve (c) üç boyutlu görünümü ve sınır koşulları

Çizelge 4.8. Önerilen yapının birim hücrenin ölçüleri

	a	b	c	d	e	tr	td	tb
Ölçüler (nm)	50	60	70	60	250	15	60	50

Önerilen MTM tabanlı sinyal emicinin emilim karakteristiğini araştırmak için nümerik çözümler yapılmıştır. Önerilen yapı çok küçük boyutlara sahip olduğundan laboratuvar koşullarından dolayı üretimi ve deneysel ölçümleri yapılamamıştır. Nümerik çözümler sonlu entegrasyon tekniğine dayalı elektromanyetik çözücü yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Nümerik çözümlerde Şekil 4.69. (c)'de gösterilen yapının sınır koşulları x yönü için elektrik sınırları, y yönü için manyetik sınırlar ve z yönü için boşluklu açık olarak seçilmiştir. Nümerik çözümlerde yapıya gelen EM dalganın elektrik ve manyetik alan bileşenleri sırasıyla x ve y yönüne polarize edilir ve dalganın yayılma yönü Şekil 4.69. (c)'de gösterilen z yönünde seçilmiştir.

Önerilen yapının güneş ışığının görünür ışık bölgesindeki (430 THz- 770 THz) yansımaya ve emilim oranları Şekil 4.70'te gösterilmiştir. Önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısı rezonans frekansı olan 621.76 THz'de % 98.4 emilim oranına sahiptir ve önerilen yapının emiciliği hemen hemen tüm görünür ışık bölgesinden % 90'ın üzerindedir (445 THz - 770 THz).

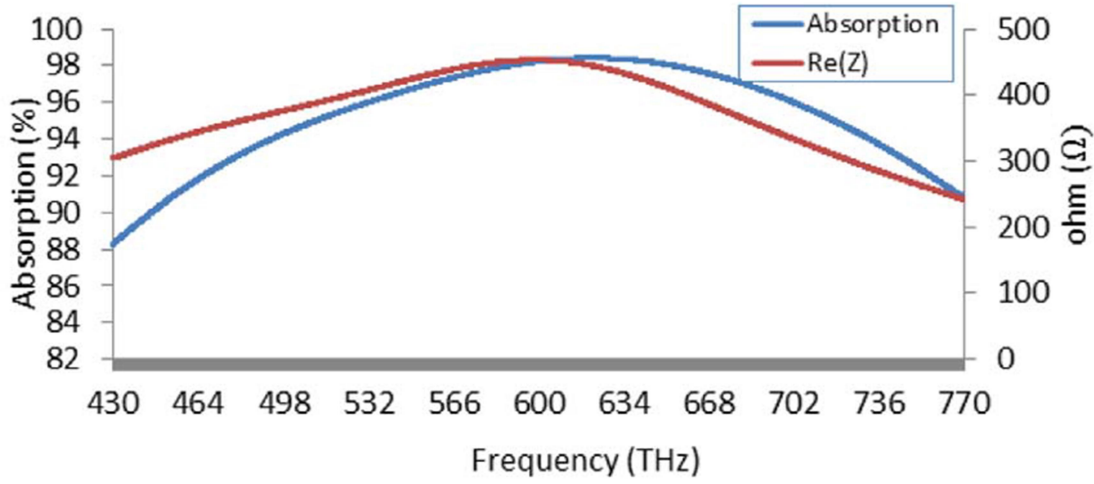


Şekil 4.70. Önerilen sinyal emici yapısının görünür ışık frekans spektrumunda emilim ve yansıma oranları

Önerilen sinyal emici yapısının etkin empedansı ve emilim karakteristiği arasındaki ilişkiyi araştırılmıştır. Şekil 4.71’de önerilen yapının etkin empedansı ve emilim oranı gösterilmiştir. Sinyal emici yapısının etkin empedansı ( $Z(\omega)$ ) boş uzayın eşdeğer empedansı ( $Z_0$ ) olan  $377\Omega$  eşleştiğinde yapı mükemmel bir emiciliğe sahip olur. Sinyal emicinin yapısının etkin empedansı boş alanın empedansı ile eşleştiğinde, yapıya gelen EM dalganın, yapıdan yansıyan bileşeni ( $R(\omega)$ ) ve yapıdan iletilen bileşeni ( $T(\omega)$ ) sıfır olur. Önerilen yapının etkin empedansı aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır;

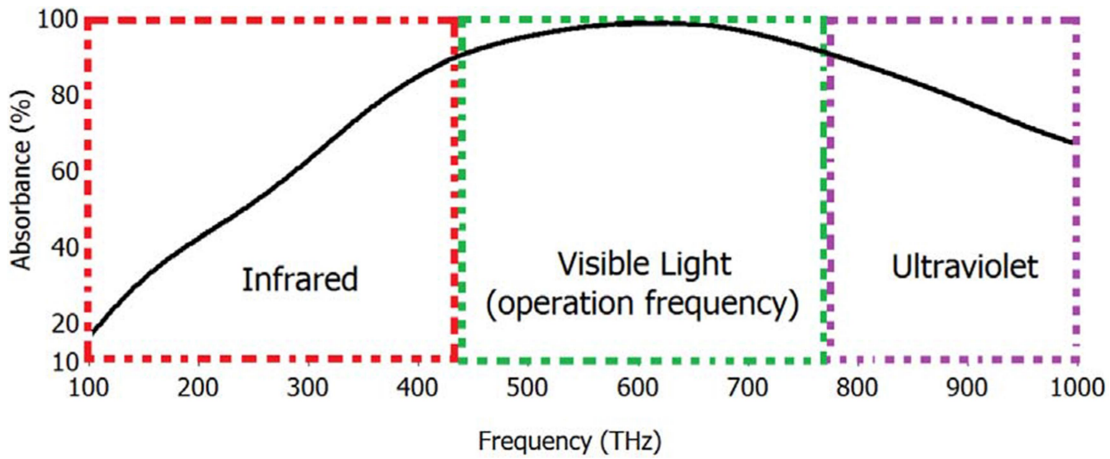
$$Z(\omega) = \sqrt{\mu(\omega)/\varepsilon(\omega)} \quad (4.10)$$

Eşitlik (4.10) önerilen sinyal emici yapısının etkin empedansının, yapının elektriksel geçirgenliğine ( $\varepsilon(\omega)$ ) ve manyetik geçirgenliğine ( $\mu(\omega)$ ) bağlı olduğu görülmektedir. Yani empedans eşleşmesi durumunda, hem elektriksel hem de manyetik rezonanslar meydana gelir. Önerilen yapının emilim özelliklerini göstermek için yapının etkin empedansın gerçek kısmı ( $R(\omega)$ ) ve emilim değerleri Şekil 4.71’de gösterilmiştir.



Şekil 4.71. Önerilen sinyal emici yapısının emilim oranı ve etkin empedansının gerçek kısmı

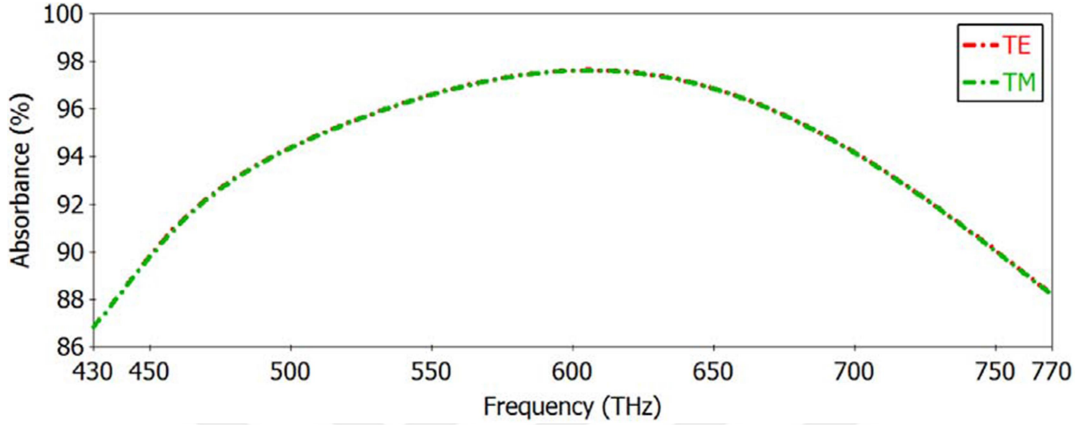
Şekil 4.72’de önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısının güneş ışığının tüm frekans aralıklarındaki (100 THz- 1000 THz) emilim karakteristikleri gösterilmiştir. Şekil 4.72’ye bakıldığında önerilen yapının güneş ışığının tüm ultraviyole bölgesinde ( 770 THz- 1000 THz) % 67’in üzerinde emilim oranına ve kızılötesi bölgesinin ise 288 THz ile 430 THz frekans aralıklarında % 60’ın üzerinde emilim oranına sahip olduğu görülmektedir. Bu nümerik çözümlerin ışığında, önerilen yapının sadece görünür ışık bölgesinde değil, aynı zamanda kızılötesi ve ultraviyole bölgelerinde de mükemmel bir emicilik özelliğine sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 4.72. Önerilen sinyal emici yapısının güneş ışığının tüm frekans spektrumlarındaki emilim oranları

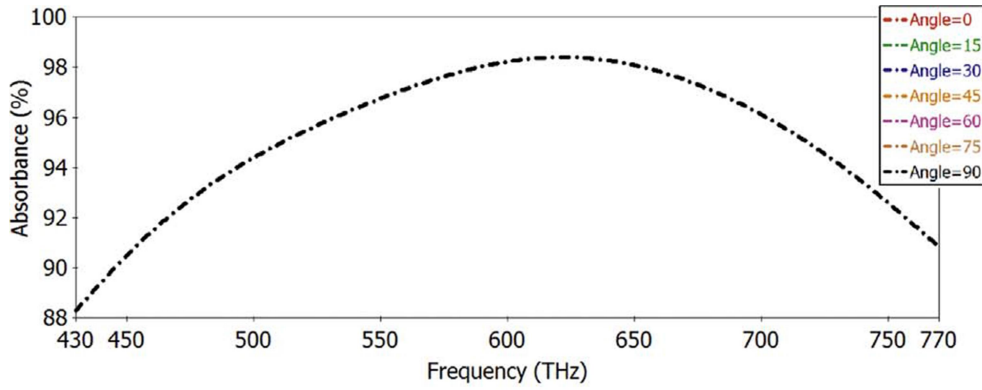


Şekil 4.73'te önerilen sinyal emici yapısının farklı polarizasyonlarda gelen dalgalara karşı emilim tepkisi gösterilmiştir. Önerilen sinyal emici yapısı gelen EM dalganın hem TE hem de TM polarizasyonu durumunda aynı emilim tepkilerini göstermiştir. Yani önerilen sinyal emici yapısı gelen ışığın polarizasyonundan bağımsızdır.

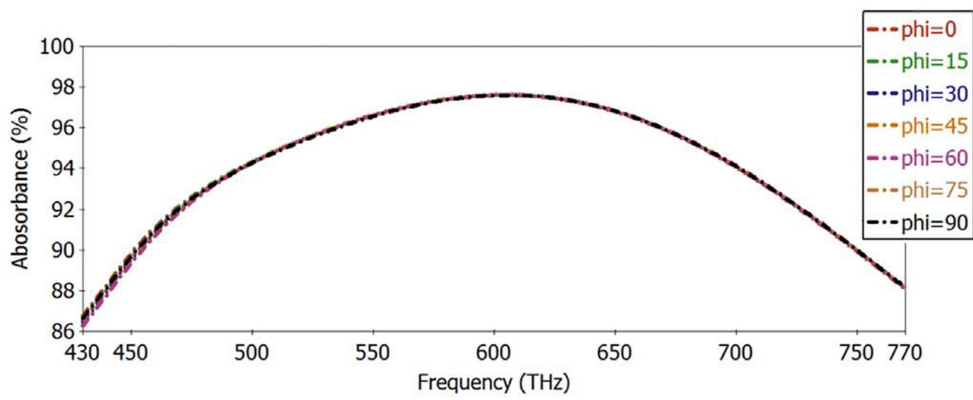


Şekil 4.73. Önerilen sinyal emici yapısının gelen ışığın TE ve TM polarizasyonları için emilim tepkisi

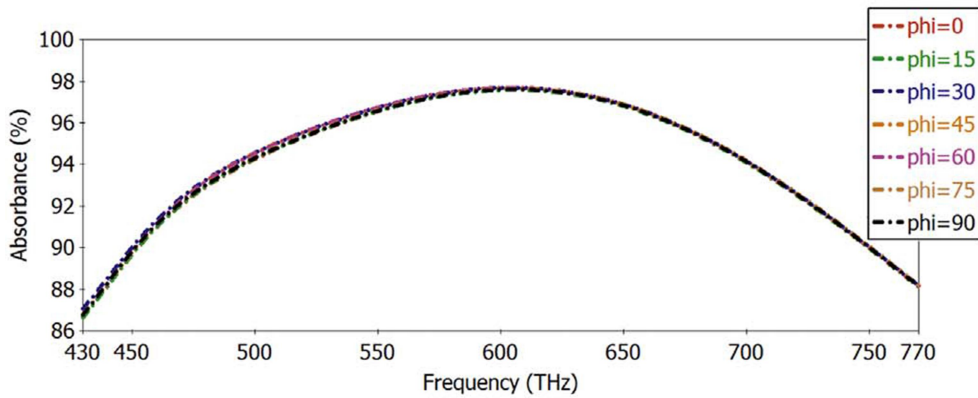
Şekil 4.74'te önerilen yapının gelen EM dalganın TEM, TE ve TM polarizasyonlarında, farklı polarizasyon açılarında göre emilim tepkisi gösterilmiştir. Şekil 4.74. (a)'da gelen EM dalganın TEM olması durumunda farklı polarizasyon açıları için önerilen sinyal emici yapısının emilim değerleri gösterilmiştir. Önerilen yapının emilim değerlerinin TEM polarizasyonun tüm açılarında aynı olması, önerilen sinyal emici yapısının simetrik geometrisinden kaynaklanmaktadır. Şekil 4.74. (b) ve (c)'de ise önerilen yapının emilim değerlerinin gelen TE ve TM dalganın polarizasyon açılarından bağımsız olduğu görülmektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi, TE ve TM polarizasyonları için farklı polarizasyon açıları için yapının bu açı bağımsızlığı, önerilen sinyal emici simetrik karakteristiğinin bir sonucudur. Önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısı gelen dalganın polarizasyonlarından ve polarizasyon açılarından bağımsız olarak görünür ışık bölgesinde % 86'nın üzerinde emilim oranına sahiptir.



(a)



(b)

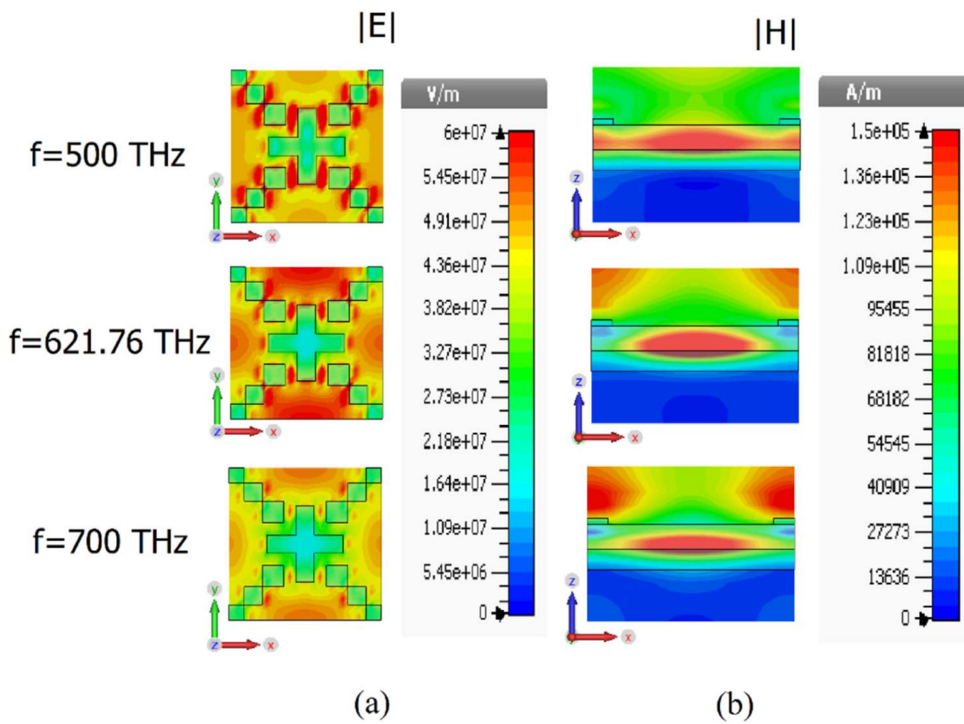


(c)

Şekil 4.74. Önerilen sinyal emici yapısının gelen EM dalganın (a) TEM, (b) TE ve (c) TM polarize olduğu durumlarda farklı polarizasyon açıları için emilim değerleri

Bu bölümde önerilen MTM tabanlı sinyal emici yapısının elektrik ve manyetik alan dağılımları 500 THz, 621.76 THz (rezonans frekansı) ve 700 THz frekanslarında incelenmiştir. Şekil 4.75. (a)'da elektrik alan dağılımlarının büyüklüğü ( $|E|$ )

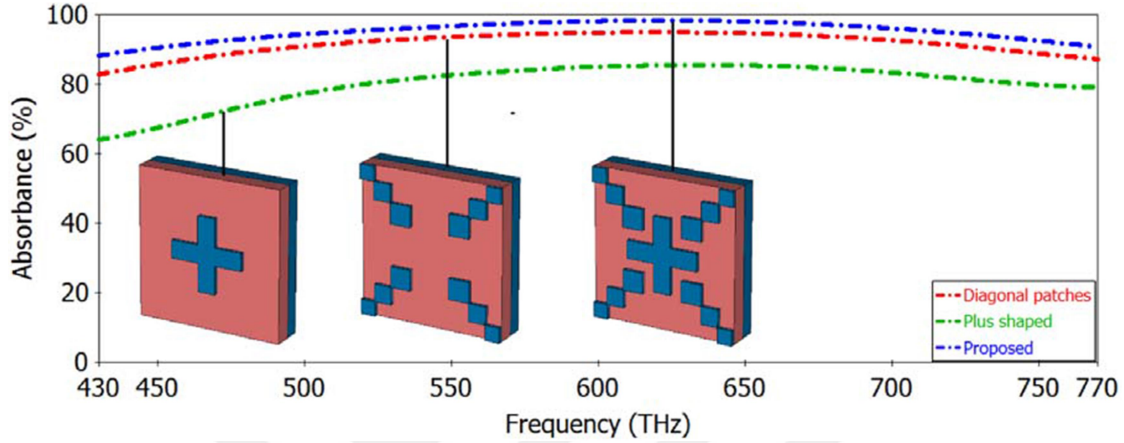
gösterilmektedir. 500 THz frekansında elektrik alan yapının köşegenlerinde bulunan kare parçaların sağ ve sol taraflarında yoğunlaşmaktadır. 621 THz’de elektrik alan dağılımı yapının alt ve üst taraflarında oluşurken, 700 THz elektrik alan dağılımı tüm yapıda azalır. Şekil 4.75. (b)’de manyetik alan dağılımlarının ( $|H|$ ) büyüklüğü gösterilmektedir. Şekil 4.75. (b) 'ye bakıldığında, 500 THz’de manyetik alanın sadece artı şeklindeki rezonatör ve arka taraftaki metal düzlemi arasında ve rezonatörün kare parçaları üzerinde, 62,76 THz’de ise yer alan kareler rezonatör ve yer metal düzlemi arasında yoğunlaştığı görülmektedir. 700 THz’de ise sadece artı şekilli rezonatör ve arka metal düzlemde yoğunlaşmaktadır.



Şekil 4.75. Önerilen sinyal emicinin 500 THz, 621.76 THz ve 700 THz’de (a) elektrik alan dağılımları ve (b) manyetik alan dağılımları

Bu bölümde rezonatördeki parçaların önerilen sinyal emicinin emilim karakteristiği üzerine etkileri araştırılmıştır. Şekil 4.76’da sadece artı şekilli rezonatöre sahip yapının, sadece çapraz kare parçalara sahip yapının ve önerilen yapının emilim değerleri belirtilen frekans aralığında gösterilmiştir. Şekil 4.76’ya bakıldığında önerilen sinyal emicinin emilim karakteristiğinin sadece artı şekilli rezonatöre ve sadece çapraz kareli rezonatöre sahip yapıların emilim karakteristiklerinden daha iyi olduğu görülmektedir. Sadece çapraz yama rezonatörlere sahip yapının emilim değerleri bile literatürde güneş ışığı frekansında çalışan birçok sinyal emiciden daha iyidir. Artı şekilli ve çapraz yama rezonatörlerin birleşmesinden oluşan önerilen rezonatörün emilim değerlerinin bu parçaların bireysel

emilim değerlerinden daha iyi olması, bu parçaların birbirilerinin emilim değerlerini güçlendirmesinden dolayıdır. Yani, artı şeklindeki rezonatör mükemmel bir emiciliğe sahip olmasa da, çapraz yamalar ve artı şeklin birleşimiyle oluşan rezonatöre sahip yapı mükemmel bir emiciliğe sahiptir.



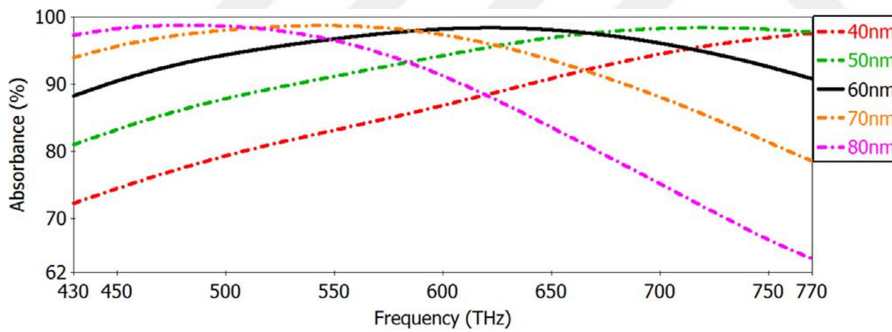
Şekil 4.76. Sadece artı şekilli rezonatör, sadece çapraz yama rezonatör ve önerilen yapının emilim değerleri

Bu bölümde önerilen sinyal emici yapısının emilim değerlerinin, yapının ölçülerine bağlı değişimi araştırılmıştır. Çizelge 4.8’de verilen dielektrik tabakanın kalınlığı (td) ve öndeki rezonatörün kalınlığı (tr), diğer ölçüler sabit tutularak belirli sınırlar içinde değiştirilmiştir. Şekil 4.77. (a) ve (b)’de, farklı büyüklükteki dielektrik ve rezonatör katman kalınlıkları için sinyal emicinin, emiciliği gösterilmiştir. Şekil 4.77. (a) ve (b)’deki siyah ve düz çizgiler, en iyi emilim değerlerine sahip yapıları göstermektedir. Bu nedenle, bu ölçüler, önerilen MTM tabanlı sinyal emicinin ölçüleri olarak seçilmiştir. Dielektrik kalınlığının (td) yapının emilim tepkisine etkisini göstermek için, ‘td’ 40 nm ila 80 nm arasında değişmiştir ve sonuçlar Şekil 4.77. (a)’da çizilmiştir.

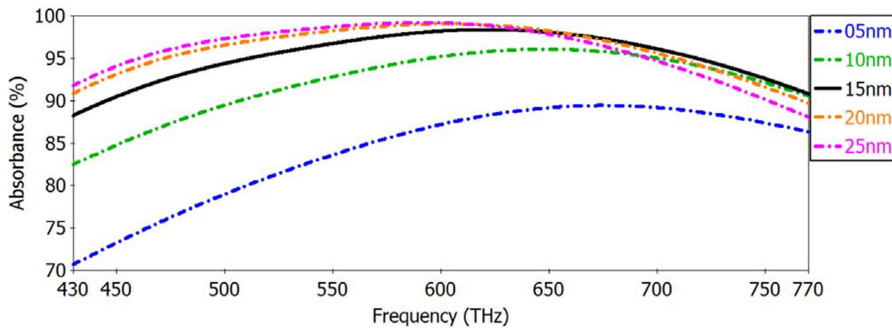
Dielektrik tabaka kalınlığının tüm değerleri için emilim büyüklüğü, rezonans frekansında yaklaşık % 98’dir. Şekil 4.77. (a)’da gösterildiği gibi, 60 nm dielektrik tabaka kalınlığına sahip yapı hariç diğer tüm kalınlık değerlerinde emilim oranı düşük değere sahiptir. Ayrıca, dielektrik kalınlığı arttıkça, sinyal emici yapısının rezonans frekansı daha düşük frekanslara kaymaktadır. 40 nm, 50 nm, 60 nm, 70 nm ve 80 nm dielektrik tabaka kalınlıklarına karşılık gelen rezonans frekansları sırasıyla 770 THz, 719 THz, 621 THz, 545 THz ve 482 THz ‘dir. Rezonans frekansının değişimi rezonatörün genel kapasitans değişiklikleriyle açıklanabilir. Dielektrik kalınlığının azaltılması, arka metal tabaka ve

rezonatör arasındaki her bir kapasitans değerinde bir artışa neden olur. Rezonatörün her kapasitansı diğerleriyle seri halinde olduğundan, sistemin eşdeğer kapasiteleri azalır. Eşdeğer kapasitansın azaltılması, rezonans frekansındaki artışın sebep olur. Rezonans frekansının sağa kayması, optik basınç sensörü uygulamalarında kullanılabilir. Çünkü bu kayma, dielektrik tabakanın kalınlığının artışına göre doğrusaldır.

Şekil 4.77. (b)'de rezonatör kalınlığı (tr) 5 nm ila 25 nm arasında değiştirilerek, bu değişimin sinyal emici yapısının emilim değerlerine etkileri gösterilmiştir. Elektromanyetik alanın elektrik alan bileşenine maruz kalan rezonatörün bir endüktans değeri olduğu için, rezonatör kalınlığı arttıkça, önerilen sinyal emici yapısının rezonans frekansının düşük frekanslara kaydığı açıkça görülmektedir. Ayrıca, rezonatör ve arka metal tabaka arasında bir kapasitif bir etki oluşmaktadır. Bu nedenle, kalınlığın artırılması yapının endüktansını artırır. Bu, LC rezonans devresinin rezonans frekansının azaltılması ile sonuçlanır. Rezonatör kalınlığı arttıkça, önerilen sinyal emici yapısının emiciliği % 89'dan % 99'a çıkar.



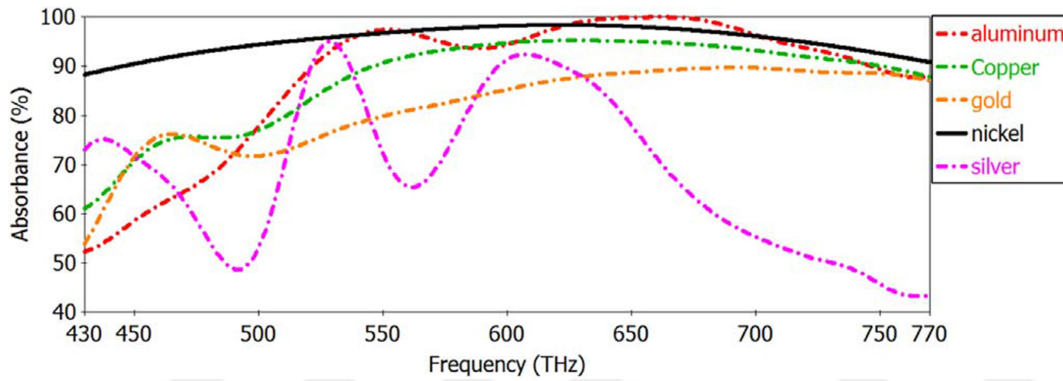
(a)



(b)

Şekil 4.77. Önerilen yapının farklı (a) dielektrik kalınlıklarına ve (b) rezonatör kalınlıklarına göre emilim tepkisi

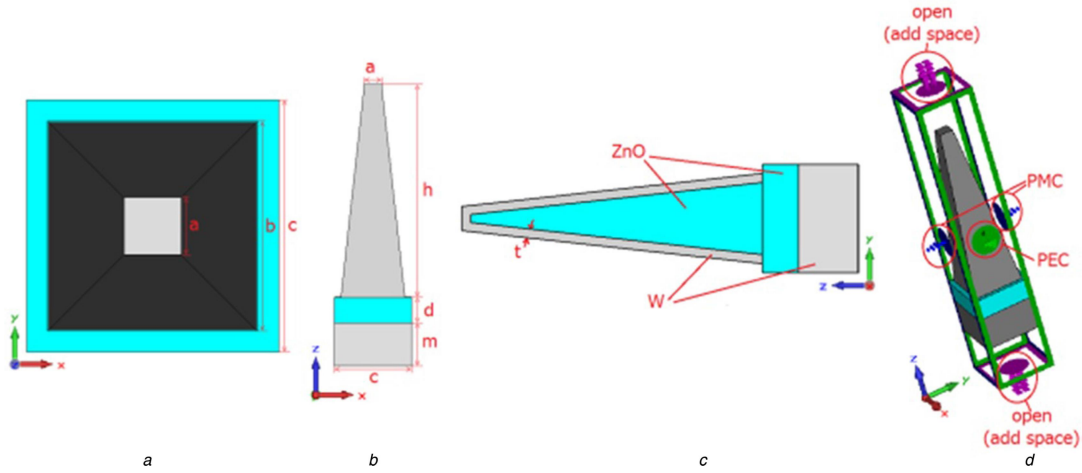
Son olarak önerilen MTM yapısında öndeki rezonatör ve arkadaki metal plaka olarak Nikel 'den farklı metaller kullanılması durumunda oluşacak yeni yapının özellikleri araştırılmıştır. Nikel (Ni), alüminyum (Al), bakır (Cu), altın (Au) ve gümüş (Ag) gibi farklı metallerin kullanıldığı yapıların sahip oldukları emilim değerleri Şekil 4.78'de gösterilmiştir. Şekil 4.78'den de görüldüğü üzere rezonatör ve metal plaka olarak Ni kullanılan sinyal emicinin emilim değerleri, diğer metallerden yüksektir. Diğerler metallerin sonucuna göre, Ni 'den oluşan metalin tüm görünür spektrumda en yüksek emme oranına sahip olduğu görülebilir. Al, Cu ve Au metal olarak kullanılan yapılar da yüksek frekanslarda yüksek emme oranlarına sahiptir.



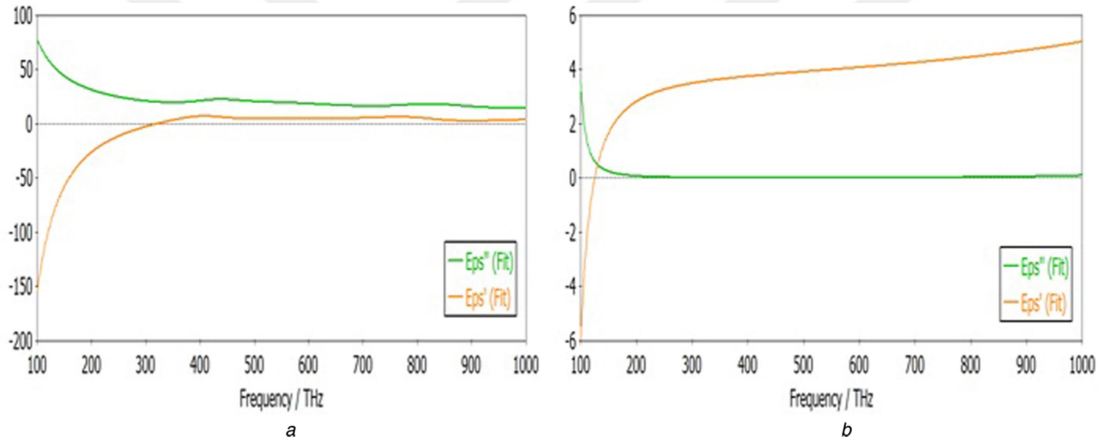
Şekil 4.78. Farklı metaller kullanılarak yapılmış yapıların emilim oranının

#### 4.2.3. Piramit Şekilli Rezonatörlü Sinyal Emici

Önerilen MTM tabanlı mükemmel sinyal emici yapısı Şekil 4.79'da gösterilmektedir. Şekil 4.79.(a)'da yapının üstten görünüşü, Şekil 4.79.(b)'de yandan görünüşü ve Şekil 4.79.(c)'de yapının yandan kesit görünüşü gösterilmektedir. Şekil 4.79.(c)'de görüldüğü üzere önerilen yapının kesik piramit şeklindeki rezonatör katmanı ve arka metalik katmanı tungstenden (W: Wolfram), kesik piramit ve düz tabakadan oluşan dielektrik katmanı ise çinko oksitten (ZnO) oluşmaktadır. W ve ZnO'nun frekans bağımlı kompleks dielektrik parametreleri sırasıyla [77, 78] 'den alınmıştır. 100-1000 THz frekans aralığında tungsten (volfram) ve çinko oksidin elektrik dağılım diyagramı Şekil 4.80'de verilmiştir. Önerilen MTM tabanlı mükemmel sinyal emicinin birim hücrenin ölçüleri Çizelge 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.79. Önerilen yapının (a) Üstten görünümü, (b) yandan görünümü, (c) Kesit görünümü, (d) Sınır koşulları.



Şekil 4.80. Önerilen yapıda kullanılan maddelerin 100 THz–1000 THz frekans aralığında elektriksel dağılımları (a) Tungsten (wolfram), (b) ZnO

Çizelge 4.9. Önerilen yapının birim hücrenin ölçüleri

	a	b	c	h	d	m	t
Ölçüler (nm)	40	150	180	500	60	100	15

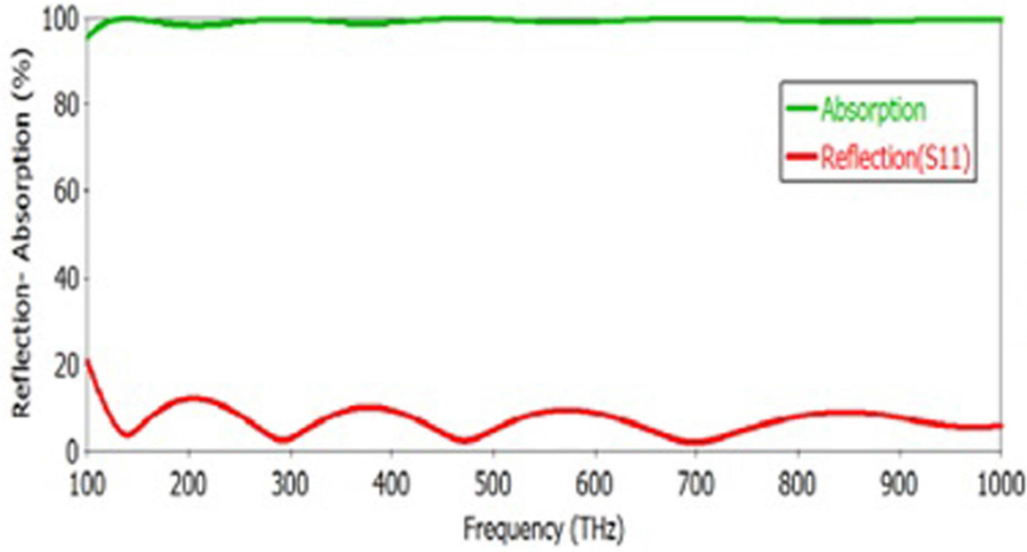
Önerilen yapı çok küçük boyutlarda (nanometre) olduğu için laboratuvar imkânlarında üretimi yapılamamıştır. Önerilen yapı imal edilmemesine rağmen, tungsten alaşım kaplama, fiziksel buharlaştırma tekniği [ark-fiziksel buhar biriktirme yöntemi (Arc-PVD)] kullanılarak, kesilmiş piramit yapısını oluşturmak için ZnO dielektrik tabaka üzerinde homojen bir şekilde gerçekleştirilebilir. Alaşım kaplama, nanometre kalınlığında gerçekleştirilebilir. Bu kriteri sağlamak için birçok biriktirme metodu kullanılabilir. Vakum dâhil olmak üzere tüm yöntemler, dış ortam ile istenmeyen reaksiyonu azaltmak ve

film kompozisyonunu sağlamak için kullanılır. Arc-PVD tekniğinde, önce piramit sinyal emiciyi tasarlamak için bir maske üretilir. Daha sonra, alt ZnO katman mikro-filtreli katodik ark tabancasının altında odaya yerleştirilir. Filtrelenmiş Arc-PVD, volframı erime noktasına kadar buharlaştırır. Bu metal nanopartiküller hızlanır ve daha sonra elektromanyetik (EM) toroid ile filtrelenir. Elde edilen iyonize ve yüksüz plazma, piramit sinyal emiciyi oluşturmak için maske aracılığıyla ZnO üzerinde püskürtülür. Önerilen kesik piramit sinyal emici, elektron-ışınli litografi, ince film biriktirme ve kaldırma işlemleri kullanılarak da üretilebilir [79].

Önerilen yapının emilim özelliklerini anlamak için bazı bazı nümerik analizler yapılmıştır. Nümerik analizler sonlu entegrasyon tekniğini (FIT) tabanlı analiz programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Malzeme parametreleri, terahertz özelliklerini seçerek benzetici programın kütüphanesinden atanır. Şekil 4.79. (d)'de nümerik analizlerde önerilen yapının sınırı koşulları gösterilmiştir. Sınır koşulları y-z düzlemleri için mükemmel elektrik iletkeni (PEC), x-z düzlemleri için mükemmel manyetik iletken (PMC) ve x-y düzlemlerinde boşluklu açık olarak seçilmiştir. Seçilen PEC ve PMC sınır koşulları, enine elektrik-manyetik (TEM) gelen EM dalgası için periyodiklik sağlar. Gelen EM dalgasının elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin sırasıyla x ve y yönlerinde olduğu varsayılmaktadır. Güneş tarafından yayılan EM dalga geniş bir frekans aralığı içerdiğinden, tüm güneş ışığı için kızılötesi (100 THz–430 THz), görünür ışık (430 THz–770 THz) ve ultraviyole (770 THz–1000 THz) bölgelerini içeren çalışma frekansı seçilmiştir.

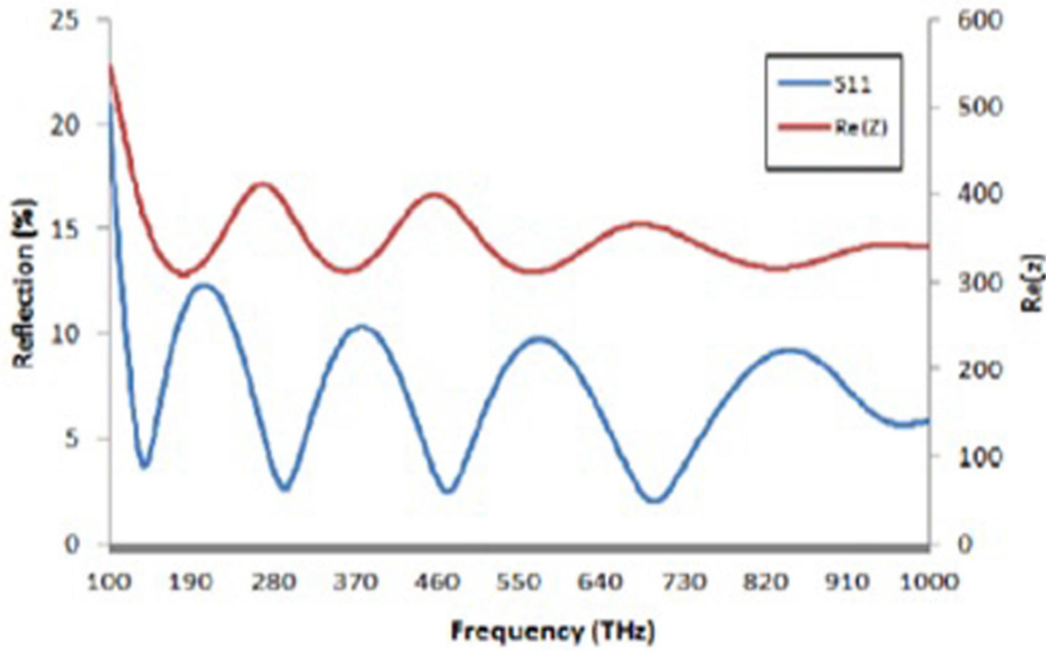
Çizelge 4.9'daki verilen ölçülerle oluşturulan önerilen mükemmel sinyal emici yapısının 100 THz-1000 THz frekans aralığında emme ve yansıma katsayısı Şekil 4.81'de gösterilmiştir. Şekil 4.81'den görüldüğü üzere mükemmel MTM tabanlı sinyal emicinin emilim oranı nerdeyse tüm çalışama frekansında (119 THz- 1000 THz) %99'un üzerindedir. Emilim oranın düşük olduğu 100 THz ile 119 THz aralığında bile, emilim değeri %95'in üzerindedir. Önerilen mükemmel sinyal emici yapısı, sadece mükemmel emiciliğe sahip olmakla kalmayıp aynı zamanda kızılötesi, görünür ve ultraviyole ışık bölgeleri içeren geniş çalışma frekans bandına sahiptir. Geniş frekans aralığı ve yüksek emilimi nedeniyle, önerilen mükemmel MTM tabanlı sinyal emici yapısı güneş enerjisi uygulamaları için iyi ve yeni bir adaydır.





Şekil 4.81. Önerilen MTM tabanlı mükemmel sinyal emicinin emilim oranı ve yansıtma katsayısı oranı

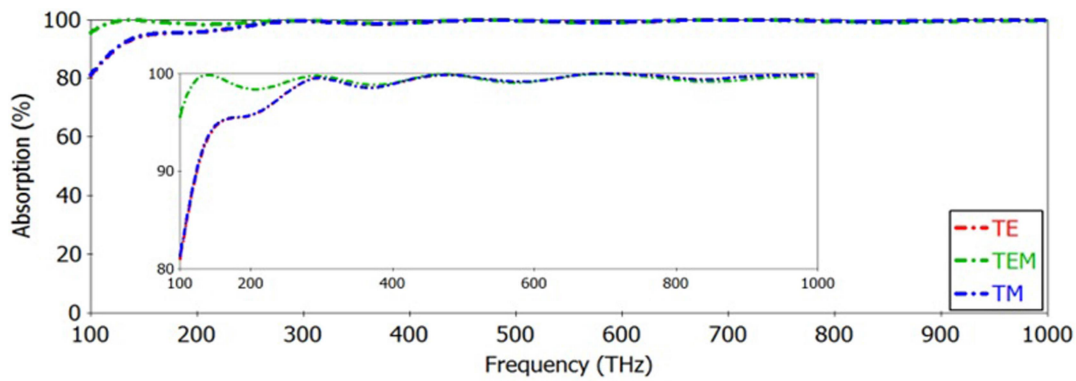
Neredeyse tüm güneş ışığı altında % 99'luk emilim oranı ile önerilen mükemmel sinyal emicinin bu başarısı, önerilen yapının empedansı ( $Z(\omega)$ ) ve boşluğun empedansı ( $Z_0$ ) arasında iyi bir empedans uyumu olmasıdır. Önceki çalışmalarda da belirtildiği gibi, empedans uyumu minimum yansıma katsayısına ( $S_{11}$ ) yol açar.  $S_{11}$ 'e bağlı olarak empedans uyumunu göstermek için,  $Z(\omega)$ 'in gerçek kısmı ( $\text{Re}(Z)$ ) ile  $S_{11}$  Şekil 4.82'de gösterilmiştir. Boşluğun empedansı ( $377 \Omega$ ) ile  $\text{Re}(Z)$  eşleşmesine bağlı olarak  $S_{11}$ 'in neredeyse sıfır olduğu görülmektedir. Şekil 4.82'den görülebileceği üzere önerilen yapının empedans değeri, güneş enerjisinin tüm frekanslarında neredeyse boş alan empedansına eşittir. Bu nedenle, empedans eşleşmesi durumunda, mükemmel sinyal emicinin içerisinden geçen EM dalganın önlenmesiyle gerçekleşen mükemmel bir emilim ortaya çıkar.



Şekil 4.82. Önerilen yapının çalışma frekansında yansıma katsayısı ve efektif empedansının gerçek kısmı

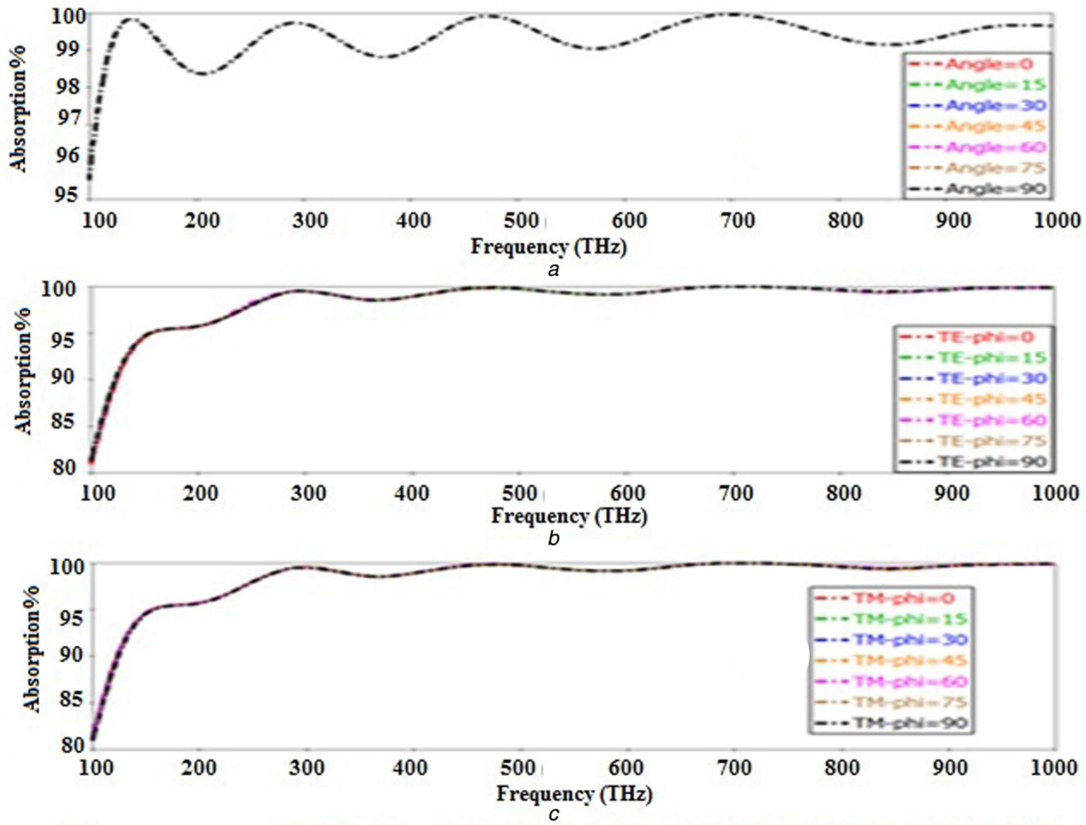
Bu bölümde önerilen MTM tabanlı mükemmel sinyal emici yapısının gelen EM dalganın farklı polarizasyonlarına göre emilim tepkisi incelenmiştir. Nümerik analizlerde gelen dalganın TE ve TM polarizasyonları için sınır koşulları x ve y yönleri için birim hücre, z yönünde boşluklu açık olarak seçilmiştir. Önerilen mükemmel sinyal emicinin TEM durumu ve TE ve TM polarizasyonları için emilim karakteristikleri Şekil 4.83'te gösterilmiştir. Şekil 4.83'te önerilen yapının gelen dalganın sadece TEM durumu için değil TE ve TM polarizasyonları için de mükemmel emilim oranlarına sahip olduğu görülmektedir. Yapının merkezi simetrisinden dolayı gelen dalganın TE ve TM polarize olması durumunda önerilen yapı güneş ışığının spektral ışınlımının maksimum 2,5 W/m<sup>2</sup> olduğu 300 THz ve 1000 THz arasında % 98'in üzerinde bir emilim oranına sahiptir. Önerilen güneş emicinin TE / TM gelen dalga için frekans bağımsızlığı göstermesine rağmen, emilim özellikleri 100 ve 300 THz arasındaki TEM gelen dalgasından farklıdır. Ayrıca önerilen sinyal emicinin emilim seviyesi, güneş ışığının spektral ışınlımının 1 W / m<sup>2</sup>'nin üzerinde olduğu 140 ve 300 THz arasında % 90'dan daha yüksektir. Güneş ışığının en düşük spektral ışınlımının olduğu 100 ile 140 THz arasında, önerilen yapı emilim seviyesi TE / TM için % 80'in üzerinde ve TEM durumu için % 96'nın üzerindedir. Sonuç olarak, yapı piramit şeklindeki yapıya bağlı olarak 300 ile 1000 THz arasında % 90'lık bir emme oranına sahip olan gelen dalga polarizasyon tipinden (TE / TM / TEM) bağımsızdır.

Bu özelliğinden dolayı önerilen sinyal emici yapısı güneş pilleri uygulamalarının geliştirilmesi için bir basamaktır. Bunların yanında önerilen sinyal emici yapısının bazı dezavantajları vardır. Bunlardan biri, piramit tipi güneş emicilerinin üretiminin zor olmasıdır. Üretimde küçük bir kusur, yüksek bir bozulma ile emilim oranını, frekans bandını ve açı bağımsızlığını etkileyebilir. Önerilen yapının bir başka kusuru, yapının birim hücre boyutudur. Bunun yanı sıra, polarizasyon açısı bağımsızlığının ölçümü de gerçek bir problemdir, çünkü önerilen yapıya uygulamak için herhangi bir açı ile polarize sinyal üretmek bu geniş bant frekans aralığında birçok polarizatör gerektirir.



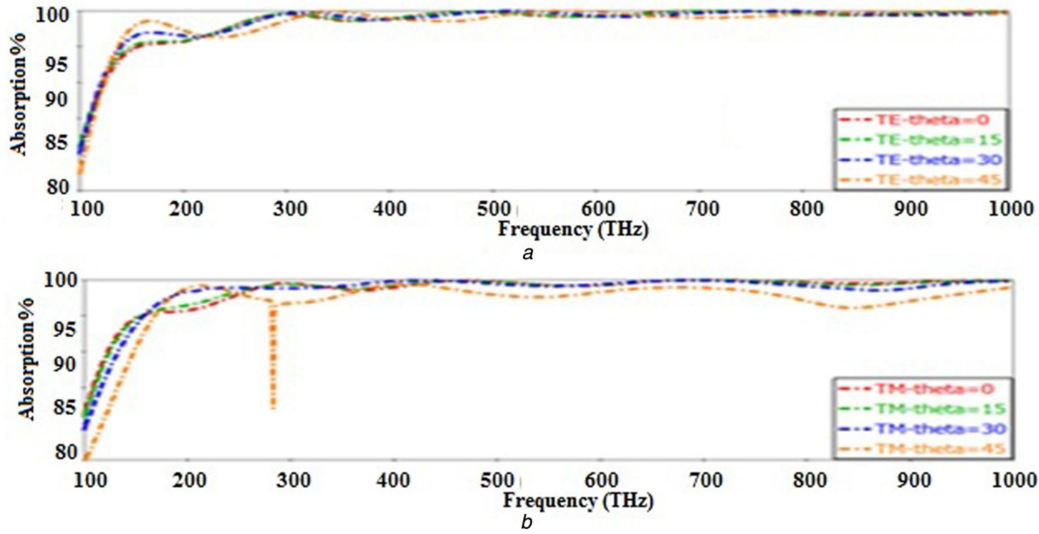
Şekil 4.83. Önerilen mükemmel sinyal emici yapısının TE ve TM polarizasyonları ve TEM durumu için sinyal emilim oranları

Bu bölümde gelen EM dalganın polarizasyon açısının emilim karakteristiğine etkisi TE ve TM polarizasyonu ve TEM modu için de araştırılmıştır. Nümerik analizlerden, TEM durumu için sınır koşulları x, y ve z yönlerinde sırasıyla PEC, PMC ve boşluklu açık olarak ayarlandı. TE ve TM polarizasyonları için sınır koşulları, x ve y yönleri için birim hücre ve z yönünde boşluklu açık seçildi. Şekil 4.84'te görüldüğü gibi, önerilen MTM tabanlı mükemmel sinyal emici % 98'in üzerinde emilim oranı ile gelen dalganın TEM durumu için polarizasyon açısından bağımsızdır ve aynı zamanda neredeyse tüm güneş ışığı frekans bandı boyunca % 95'in üzerinde emilim oranı ile TE ve TM polarizasyonlarında polarizasyon açısına ( $\phi$ ) duyarsızdır.



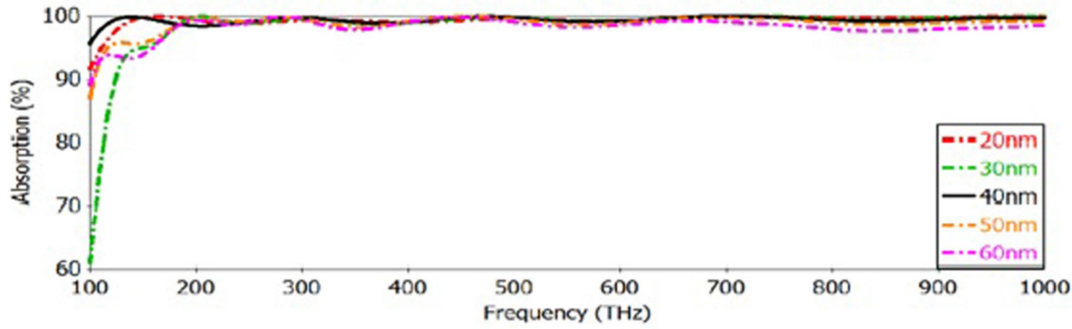
Şekil 4.84. Önerilen MTM tabanlı mükemmel sinyal emicinin, gelen dalganın farklı polarizasyon açıları için emilim tepkisi (a) TEM durumu, (b) TE polarizasyonu için  $\phi$  açısı, (c) TM polarizasyonu için  $\phi$  açısı

Önerilen yapının emilim karakteristiği, aynı zamanda, gelen EM dalganın TE ve TM polarizasyonları için, dalganın geliş açısı ( $\theta$ ) için de istikrarlı. Şekil 4.85'ten görüleceği üzere güneş ışığının hemen hemen tüm frekans alanında % 90'ın üzerinde bir emilim oranına sahiptir. Önerilen MTM tabanlı mükemmel sinyal emici yapısının bu özelliği, güneş enerjili hasat için uygulanabilir olmasını sağladığından, yapının güneş ışığının açısına olan bağımlılığını ortadan kaldırır. Bu nedenle, yapı sadece polarizasyon bağımsızlığı sağlamakla kalmaz, aynı zamanda TE, TM ve TEM vakaları için geniş frekans bandında yüksek emilim oranı ile gelen dalga açısı bağımsızlığı sağlar.



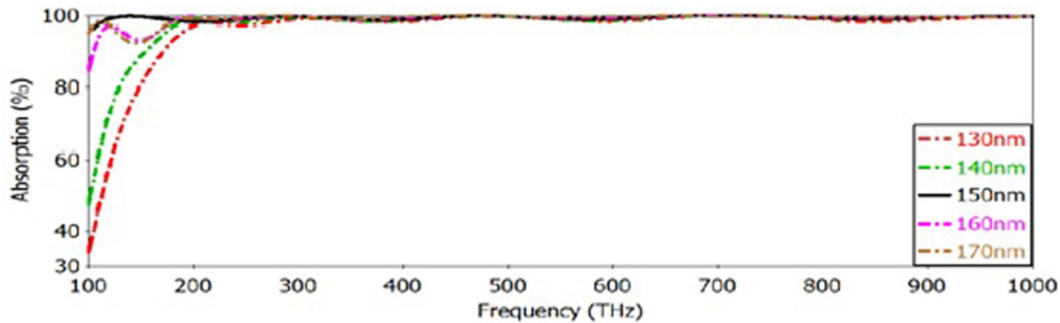
Şekil 4.85. Önerilen MTM tabanlı mükemmel sinyal emicinin, gelen dalganın farklı geliş açıları için emilim tepkisi (a) TE polarizasyonu için  $\theta$  açısı, (b) TM polarizasyonu için  $\theta$  açısı

Bu bölümde yapının ölçülerine bağlı olarak önerilen yapının emilim tepkisi araştırılmıştır. En iyi ölçüleri elde etmek ve önerilen yapının emilim mekanizmasını anlamak için parametrik çalışmalar yapılmıştır. Çizelge 4.9’da verilen önerilen yapının ölçüleri bu parametrik çalışmalarla elde edilmiştir. Diğer ölçüler sabit tutulurken bazı ölçüler belirli bir aralık içinde değiştirilmiştir. Parametrik çalışmalar kesik piramit üst kenarı(a), kesik piramit alt kenarı (b), dielektrik tabakanın kalınlığı (d) ve arka metal katmanın kalınlığı (m) değiştirilerek yapılmıştır. Parametrik çalışmalar ile ilgili verilen şekillerde siyah-düz eğriler istenen sonuçları ve dolayısıyla en iyi sonuçları göstermektedir. Bu nedenle bu parametreler mükemmel emiciliğe ulaşmak için önerilen yapının ölçüleri olarak seçilmiştir. Şekil 4.86’da, kesik piramidin üst kenarının (a) uzunluğundaki değişimin emilim tepkisi üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Üst kenarın uzunluğu başlangıç değerinin etrafında değiştirilmiştir (20 nm ile 60 nm arasında ve 10 nm’lik değişim) ve sonuçlar Şekil 4.86’da gösterilmiştir. Nümerik analiz sonuçları, 200 THz ve üzeri frekanslarda önerilen yapının üst kenar uzunluğunun tüm değerleri için mükemmel emilim oranlarına sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, sadece en iyi değer olan 40 nm tüm çalışma frekansı boyunca mükemmel bir emme seviyesi sağlar. Düşük frekanslardaki emilimin düşük seviyelerde olması, yapının iç empedansının EM dalgasının geldiği boş uzayın empedansı ile eşit olmamasından olabilir.



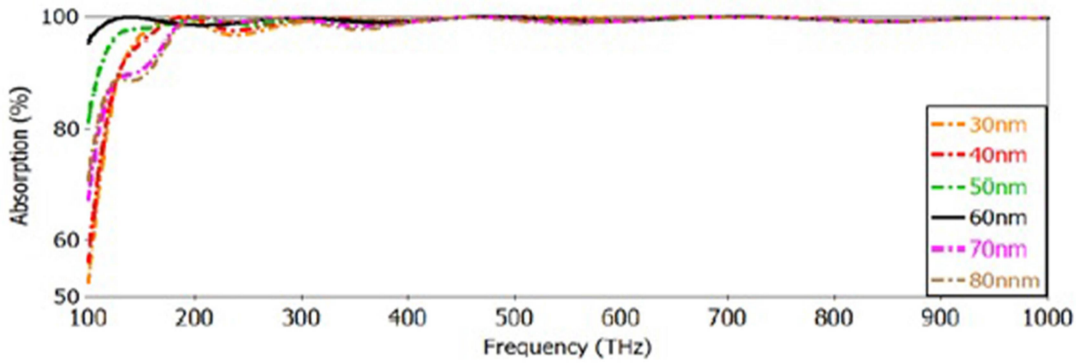
Şekil 4.86. Kesik piramidinin üst kenarının farklı değerleri için önerilen yapının emilim yanıtı

İkinci olarak, kesik piramidin alt kenarının (b) uzunluğundaki değişimin emilim tepkisi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Alt kenarın uzunluğu bir başlangıç değeri (130 nm ile 170 nm arasında 10 nm'lik değişim) etrafında değiştirilmiştir ve sonuçlar Şekil 4.87'de çizilmiştir. Kesik piramidin üst kenarı gibi, 200 THz ve üzerindeki tüm frekanslarda alt kenar uzunluğunun tüm değerleri için önerilen yapının emilim oranları % 99'un üzerindedir. Şekil 4.87'de, kesik piramidin alt kenarının uzunluğu arttıkça emilim oranının arttığı açıkça görülmektedir. Bununla birlikte, alt kenarın uzunluğu 150 nm'yi aştığında, emicilik azalır. Kesik piramid yapısı sürekli katmanlı rezonans özelliklerini gösterdiğinden dolayı, alçak frekanslardaki rezonanslar, üst kenarlar tarafından ve yüksek frekanslardaki rezonanslar piramidin alt katmanları tarafından oluşturulur. Bu nedenle, düşük frekanslardaki (yani daha yüksek dalga boylarında) tam emilim, alt kenarın uygun boyutlarından kaynaklanmaktadır. Bu da, piramidin alt kenarının boyutunun, daha düşük frekanslarda gelen dalga ile rezonans yapmak için yeterli olmadığı anlamına gelir.



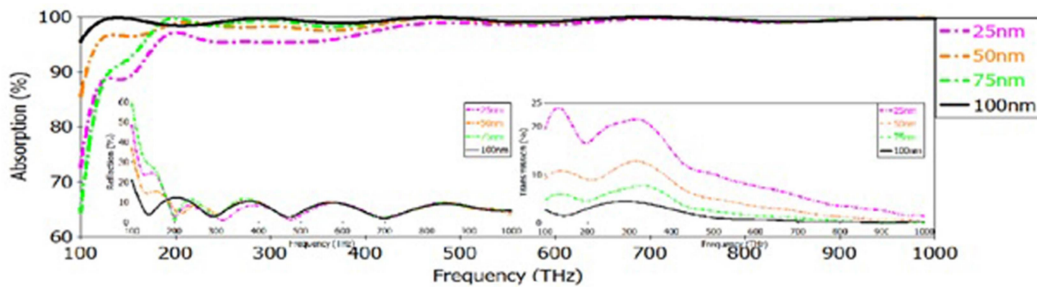
Şekil 4.87. Kesik piramidinin alt kenarının farklı değerleri için önerilen yapının emilim yanıtı

Üçüncü olarak farklı dielektrik kalınlık değerlerinin emilim tepkisi de, Şekil 4.88’de gösterilmiştir. Dielektrik kalınlığının değeri, 10 nm’lik bir artışla 30 nm’den 80 nm’ye kadar arttırıldı. Önerilen yapının emilim değerleri kalınlık artışı ile artmıştır, ancak en iyi değer olan değer olan 60 nm dielektrik kalınlığı aşıldığı zaman düşmeye başlamıştır. Ayrıca, önerilen yapının 400 THz üzerinde yüksek frekanslarda kalınlık değişimlerine karşı duyarsız olduğuna dikkat çekilebilir. Önerilen yapının emilim değerleri, özellikle, daha yüksek dalga boyları, yani 100 ila 200 THz arasındaki düşük frekanslar için farklıdır. Bunun nedeni, yapının içerisindeki giren yüksek dalga boylu EM dalganın dalga boyundan daha küçük genişlikte yollara girmesiyle, enerjinin yapıdan sızmasına neden olmasıdır.



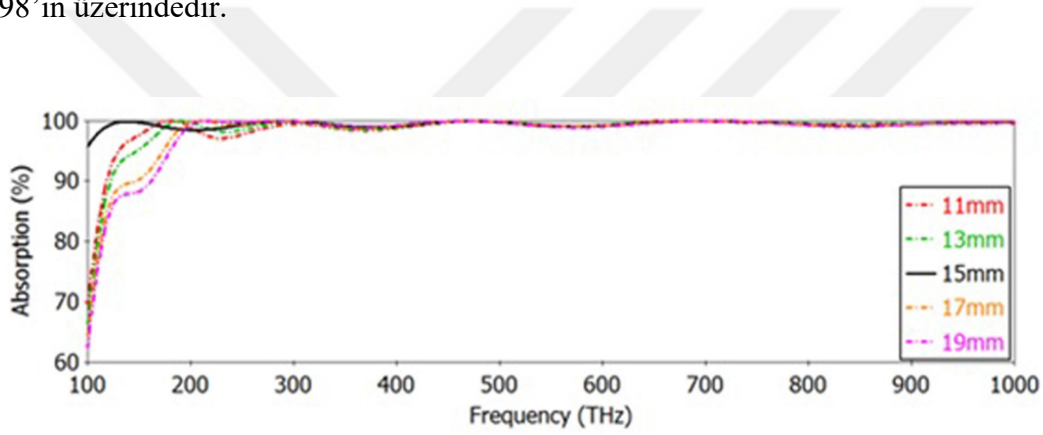
Şekil 4.88. Farklı dielektrik katman kalınlık değerleri için önerilen yapının emilim yanıtı

Dördüncü çalışma olarak, önerilen yapının arka tarafında bulunan metalik katmanın kalınlığının emilim, iletim ve yansıtma oranlarına etkisi araştırılmıştır. Şekil 4.89’da, emilim karakteristiklerine ek olarak, alt metal kalınlığının farklı değerleri için iletim ve yansıtma özellikleri de eklenmiştir. Şekil 4.89’a bakıldığında, 100 nm arka metal kalınlığına yapının emilim oranı hariç, diğer tüm kalınlık değerleri için yapının daha düşük emilim değerlerine, daha yüksek yansıtma ve iletme sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.89. Farklı arka metal kalınlık değerleri için önerilen yapının emilim yanıtı

Son parametrik çalışma olarak, kesik piramit yapısındaki dielektrik katmanın üzerindeki metalik kaplamanın kalınlığının ( $t$ ) önerilen yapının emilim değeri üzerine etkisi araştırılmıştır. Metalik katmanın ( $t$ ) kalınlığı, Şekil 4.90'da gösterildiği gibi 2 nm adım ile 11 nm ila 19 nm arasında değiştirilmiştir. Emilim yüzdesi 100 ve 200 THz arasında değişmektedir, yani daha yüksek dalga boyları için daha yüksek dalga boylarına sahip dalgalar yapıya nüfuz edememekte ve kesik piramidin ön tarafından yansıtılmaktadır. Bu, hem kırılım etkisi hem de boş uzayın ve içsel empedanslar arasındaki empedans uyumsuzluğundan kaynaklanabilir. Kesik piramidin üstündeki metalik kaplama frekans seçici bir yüzey gibi davranır ve 15 nm'lik kalınlık için gelen dalga ile rezonansa girer. 200 THz ve daha yüksek frekanslarda ise önerilen yapının emilim oranı tüm ' $t$ ' değerleri için % 98'in üzerindedir.



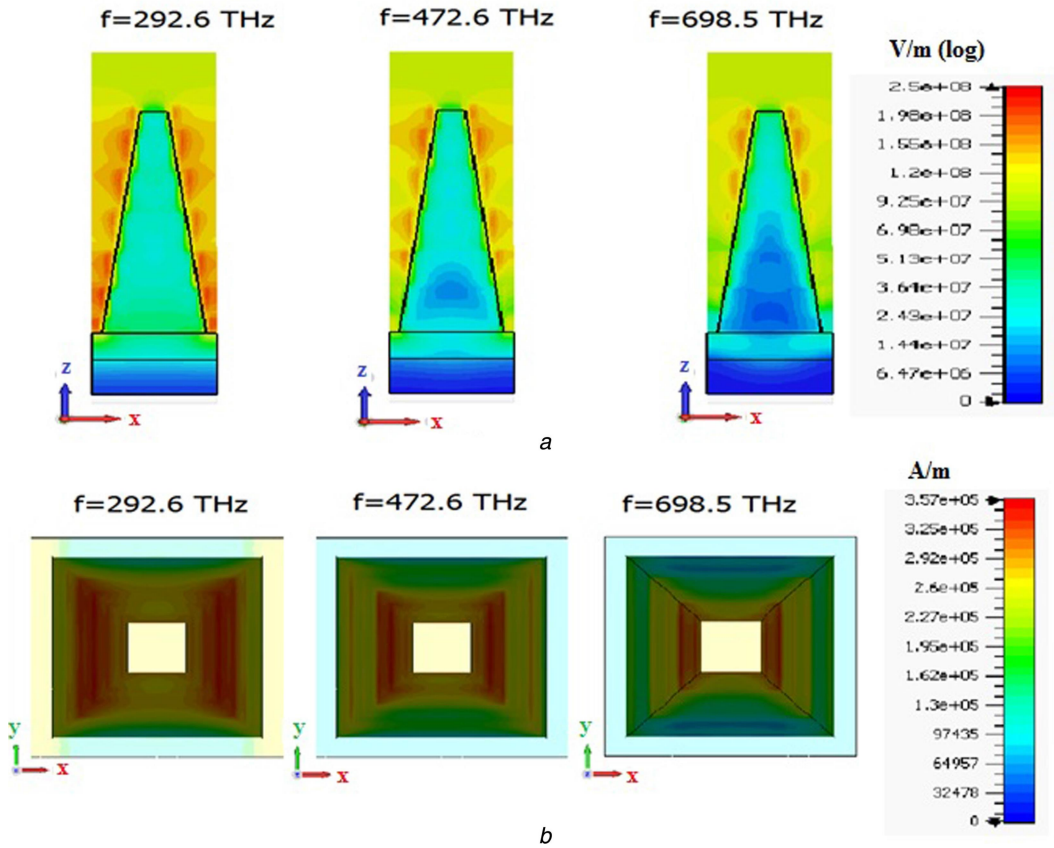
Şekil 4.90. Kesik piramidinin metalik kaplamanının farklı kalınlık değerleri için önerilen yapının emilim yanıtı

Önerilen yapının elektrik ( $|E|$ ) ve manyetik ( $|H|$ ) alan dağılımlarının büyüklükleri % 99.73, % 99.99 ve % 99.99 emilim oranlarına sahip sırasıyla 292.6 THz, 472.6 THz ve 698.5 THz olan üç rezonans frekansında için incelenmiştir. Şekil 4.91. (a)'ya bakıldığında, elektrik alanın yapı boyunca, özellikle de 292.6 THz'de kesik piramidin alt tarafında yoğunlaştığını görülmektedir. 472.6 THz'de, elektrik alan konsantrasyonu yapının üst tarafına doğru kaymaktadır ve elektrik alanının 698.5 THz'de çoğunlukla yapının üst tarafına yoğunlaştığı görülmektedir. Bu nedenle, elektriksel rezonansın, daha düşük dalga boyu rezonansı ve daha yüksek dalga boyu için, piramit şekilli konfigürasyonun, tepeden aşağı kısma doğru sürekli rezonans tepki özelliklerinden geldiği sonucuna varılabilir.

Şekil 4.91. (b)'de önerilen yapının manyetik alan dağılımı da aynı rezonans frekansları için gösterilmiştir. Elektrik alan dağılımı gibi, manyetik alan dağılımı dalga boyu azaldıkça



(yani frekans arttıkça) kesik piramidin üst tarafına kaymaktadır. Literatürde çalışılan eski çok katmanlı piramit ve koni şeklindeki yapının, yapının altındaki kısımların daha yüksek rezonans frekanslarından sorumlu olduğu ve yapının üst kısımlarının alt rezonans frekanslarından sorumlu olduğu kanıtlanmıştır.

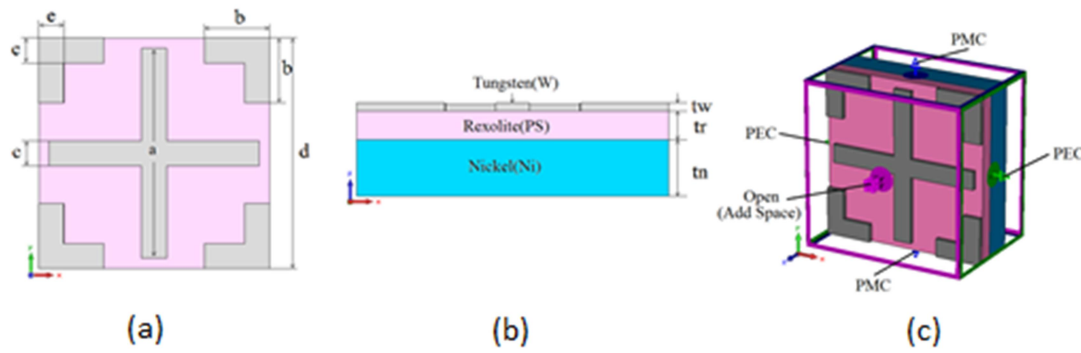


Şekil 4.91. Önerilen yapının rezonans frekanslarındaki (a) elektrik alan dağılımları, (b) manyetik alan dağılımları

#### 4.2.4. Artı Şekilli Rezonatörlü Sinyal Emici

Önerilen MTM tabanlı mükemmel sinyal emici (PMA) yapısı, iki metal katman arasında sıkıştırılmış bir dielektrik olarak Rexolite (Çapraz Bağlı Polistiren (PS)) içerir. Kimyasal direnci, hafifliği, su emilimine karşı direnci ve ihmal edilebilir gaz çıkışı nedeniyle Rexolite güneş enerjisi hücreleri için iyi bir aday olma potansiyeline sahiptir. PMA yapısındaki alt tabaka Nikel (Ni) 'den ve üst tabaka Şekil 4.92. (b)'de gösterildiği gibi metalik Tungsten (Volfram: W) şeritlerinden oluşur. Şekil 4.92'de, PMA yapısının önden görünüşü, yan görünümü ve sınır koşulları gösterilmektedir. Dielektrik ve metal tabakanın kalınlık, uzunluk ve genişliği Çizelge 4.10'da verilmiştir. Nikel (Ni) tabakasının kalınlığı, optik frekansta iletim sıfır yapmak için optik ayna görevi gördüğü için önemlidir. Bu Ni

tabakası ayrıca, elektromanyetik enerjiyi emiciye yönlendirdiğinden dolayı bir manyetik ve bir elektrik dipol oluşturmak için Tungsten (W) şeritleri ile dipol oluşturur. Bu nedenle, optik frekansta gelen EM dalga ile rezonans sağlanabilir. Ni, W ve Rexolite'nin optik frekanslarda frekansa bağlı kompleks dielektrik parametreleri sırasıyla [74-76]'dan alınmıştır. Önerilen yapının sınır koşulları Şekil 4.92. (c)'de gösterilmektedir. PEC ve PMC sınır koşulları enine elektrik-manyetik (TEM) dalgalar için periyodiklik sağlar. Gelen EM dalga hem elektrik alan hem de manyetik alan bileşenine sahiptir. Elektrik alan bileşeni PEC tarafından kapsanan yz-düzlemine dik olarak ayarlanırken, manyetik alan bileşeni birim hücre için periyodik sınır koşullarının elde edilmesi amacıyla PMC sınırlarının kapsadığı xz-düzlemine dik olarak atanmıştır. Ayrıca, PMA yapısına bir TEM dalgası uygulamak için yapının ön ve arka yüzeyi boşluklu açık olarak ayarlanmıştır.



Şekil 4.92. Önerilen PMA yapısının birim hücresinin ölçüleri ve (a) önden görünüş, (b) yandan görünüş, (c) sınır şartları.

Çizelge 4.10. Önerilen PMA yapısının ölçüleri

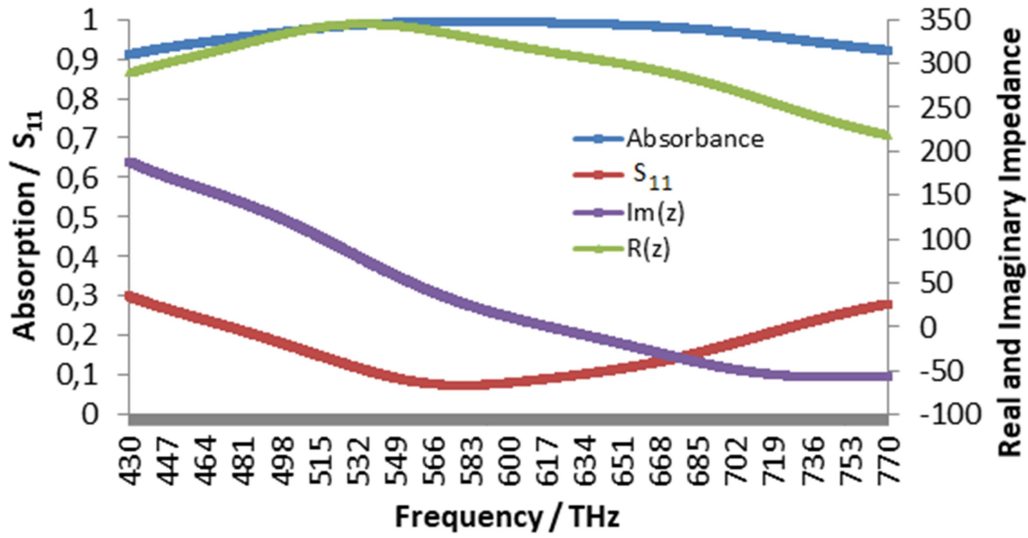
	a	b	c	d	e	tw	tr	tn
Ölçüler (nm)	500	155	60	550	60	15	50	100

Nümerik analizler FIT tabanlı mikrodalga benzetim yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nümerik analizlerde sınır koşulları x ve y yönleri için sırasıyla elektrik ve manyetik sınırlara ayarlanırken, z yönü boşluklu açık ayarlanmıştır. Ayrıca, elektrik ve manyetik alan için bileşenlerin pozitif x ve y ekseninde polarize olduğu ve yayılmanın sayısal analiz için pozitif z eksenine yönlendirildiği varsayılmaktadır.

Görünür spektrumun tamamı içinde tasarlanan yapının emilim cevabı ve yansıma katsayısı ( $S_{11}$ ) Şekil 4.93'te gösterilmiştir. Önerilen yapı, görünür ışık bölgesi boyunca ortalama % 90.98'lik bir emilim değerine sahiptir ve en yüksek emilim değeri 579.26 THz'de % 99.42'dir. Bu nedenle, tasarlanan yapı tüm görünür ışık spektrumunda % 90'lık emilim oranına ile daha verimli güneş pillerinin tasarlanmasında da kullanılabilir.

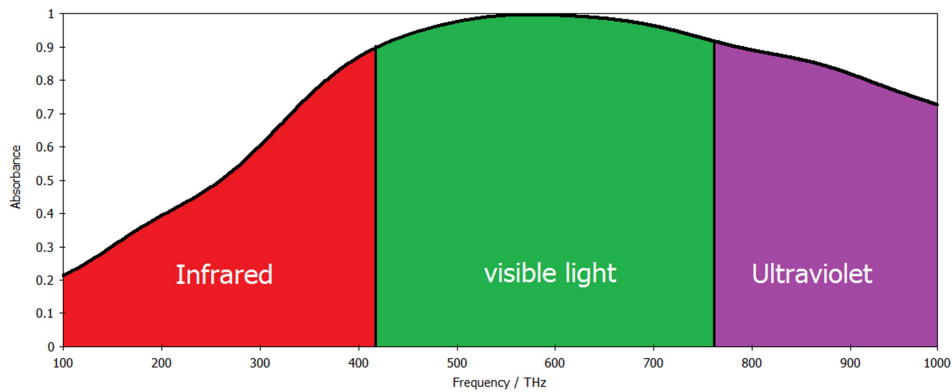
Ardından, önerilen PMA yapısının etkin empedansı ve emilim karakteristiği arasındaki ilişkiyi açıklayan, yapının karakteristik empedansı analiz edilmiştir. Önerilen PMA yapısının ( $Z(\omega)$ ) etkin empedansını, boş uzayın empedansı olan  $377 \Omega$  ile mükemmel seviyede emilim elde etmek mümkündür. Yapının etkin empedansı boşluğun empedansı ile eşleştirildiğinde, gelen EM dalganın iletilen ( $T(\omega)$ ) ve yansıyan ( $R(\omega)$ ) bileşenleri sıfır olacaktır. Efektif empedansı hesaplanması için eşitlik 4.10 kullanılmalıdır.

Eşitlik (4.10) dikkate alındığında, önerilen PMA yapısının karakteristik empedansının hem manyetik geçirgenlik ( $\mu(\omega)$ ) hem de elektriksel geçirgenliğine ( $\epsilon(\omega)$ ) bağlı olduğu görülmektedir. Yani, eş zamanlı olarak manyetik ve elektrik rezonansları olması durumunda empedans uyumu gerçekleşir. Şekil 4.93'te önerilen PMA yapısının emilim, yansıma, etkili empedansı gösterilmiştir. Şekil 4.93'ten görüldüğü gibi, karakteristik empedansın gerçek kısmı olan  $Re(Z)$ , serbest alan empedans değerine yakın olan frekans eksenindeki rezonans noktasında yaklaşık  $344 \Omega$  'dur. İyi bir performansla sahip yüksek verimli güneş pili ve optik gizleme için mükemmel bir emilim değerine sahip olan önerilen PMA yapısının, sinyal iletimini önlemek için hem serbest alan hem de arka metalle mükemmel içsel empedans eşleşmesine sahip olduğu sonucuna varılabilir.



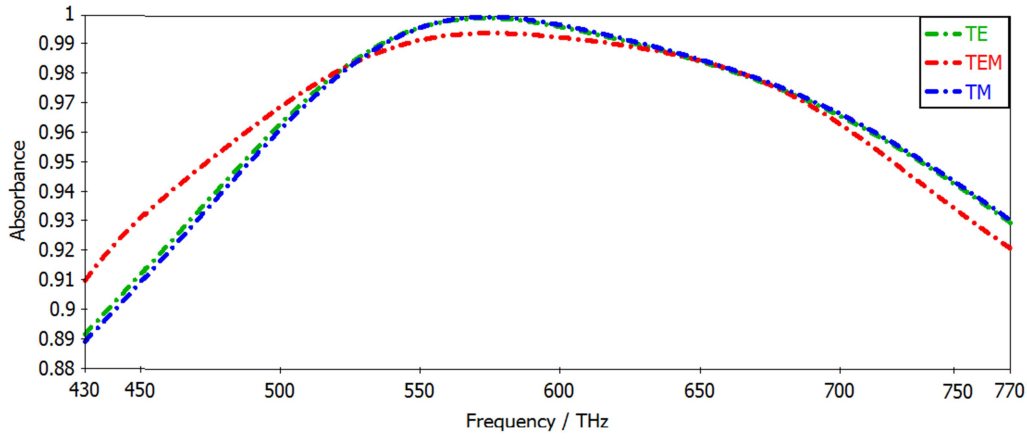
Şekil 4.93. Yapının emilim tepkisi, yansımaya katsayısı ( $S_{11}$ ) ve etkin empedansının gerçek ve sanal kısmı

Şekil 4.94'te ise önerilen PMA yapısının emilim özellikleri, kızılötesi, ultraviyole ve görünür frekans bölgesini kapsayan daha geniş frekans bantlarında (100-1000 THz) de gösterilmiştir. Şekil 4.94'te, önerilen yapının 335 THz-430THz frekans aralığında % 70'in üzerinde emilim oranına sahip olduğu görülmektedir. Bu nedenle önerilen yapının çok geniş bir bant genişliğine sahip olduğu söylenebilir. Ayrıca, Şekil 4.94'te, tasarlanan yapının emiciliğinin, 770 THz ile 1000 THz frekans aralığı olan morötesi ışık bandında % 72'den daha yüksek olduğunu görülmektedir. Önerilen PMA yapısı güneş ışığının görünür, kızılötesi ve morötesi bölgelerini kapsayan çok geniş bir frekans bandında yüksek emilim oranlarına sahiptir. Bu özelliği ile önerilen PMA yapısı, kızılötesinden morötesi ışığa kadar geniş bir frekans aralığında güneş pili uygulamalarında kullanılabilir.



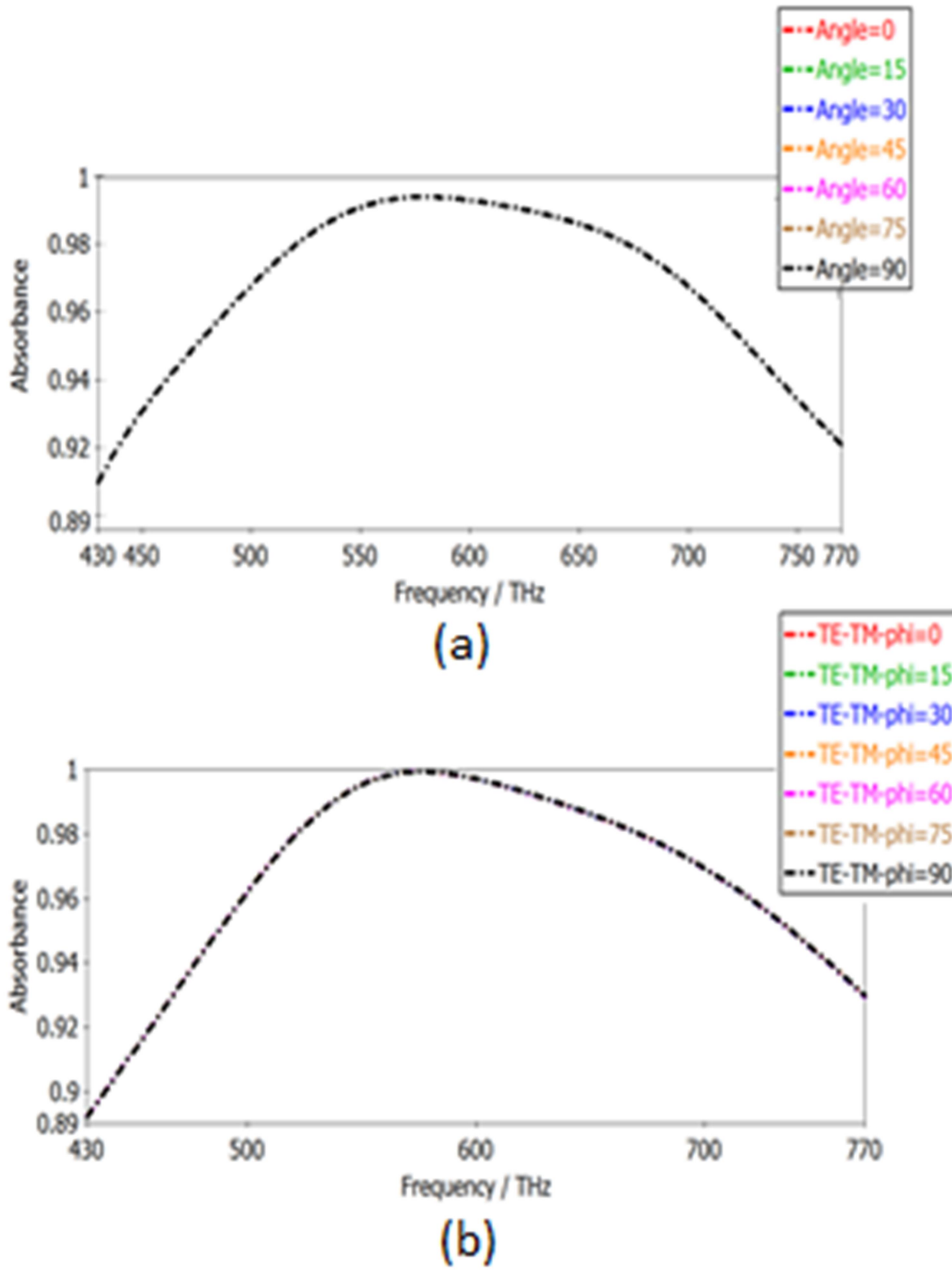
Şekil 4.94. Önerilen PMA yapısının güneş ışığının tüm frekans bandındaki emilim tepkisi

Bu bölümde önerilen PMA yapısının emilim değerlerinin gelen EM dalganın polarizasyonuna bağlılığı araştırılmıştır. Gelen dalganın TE, TM polarizasyonu ve TEM durumu için önerilen yapının emilim değerleri Şekil 4.95'te gösterilmiştir. Önerilen yapının, gelen dalganın hem TE hem de TM polarizasyonu için yaklaşık % 90'ın üzerinde bir emilim oranı ile neredeyse aynı tepkiyi gösterdiği görülmektedir. Gelen dalganın TEM durumu için elde edilen sonuçlar, Şekil 4.95'te gösterildiği gibi, tüm çalışma frekansı bandı boyunca TE ve TM polarizasyonları ile tutarlıdır.



Şekil 4.95. Gelen dalganın TE-TM polarizasyonları ve TEM durumu için önerilen yapının emicilik grafiği

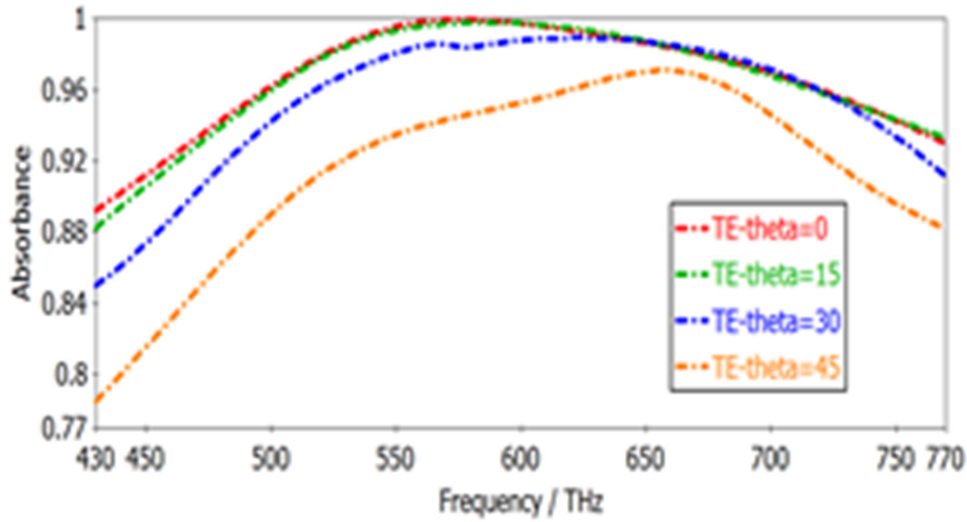
Önerilen tasarımın, aynı zamanda polarizasyon açısına karşı duyarlılığı da araştırılmıştır. Şekil 4.96'da elde edilen sonuçlardan, tasarlanan PMA'nın tüm çalışma frekansı bandındaki TE-TM polarize ve TEM durumunda gelen dalga için polarizasyon açısından bağımsız olduğunu görülmektedir.



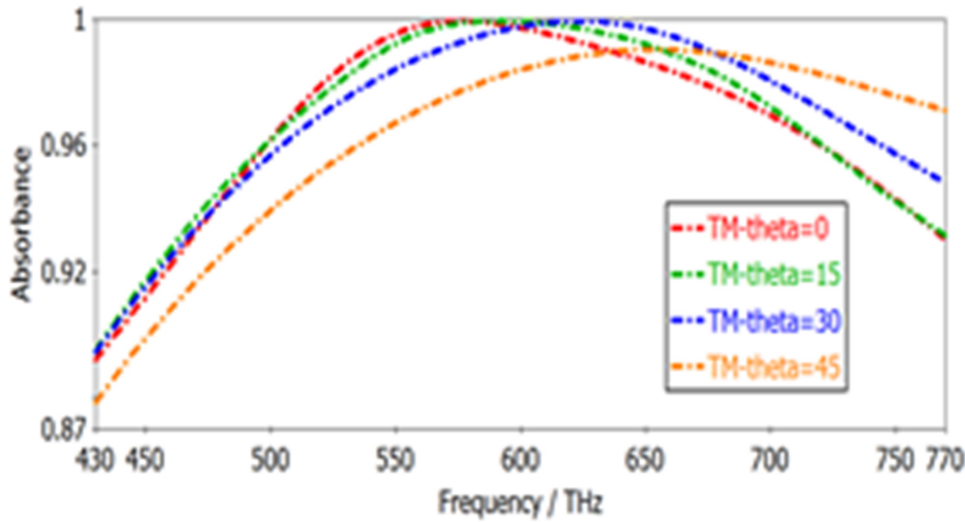
Şekil 4.96. Önerilen PMA yapısının (a) TEM durumu ve (b) TE-TM polarizasyonları için farklı polarizasyon açılarında emilim değerleri

Şekil 4.97’de önerilen PMA yapısına farklı açılarda ( $\theta$ : teta) gelen ışığa karşı yapının emilim tepkisi gösterilmiştir. Şekil 4.97. (a) ve (b)’de sırasıyla  $0^\circ$  ile  $45^\circ$  arasında açılarla gelen TE ve TM polarize dalgalara karşı yapının emilim tepkisi gösterilmiştir. Dalganın geliş açısı  $\theta$  arttıkça TE polarizasyonu için, önerilen PMA yapısının rezonanslarının frekanslarının daha yüksek frekans değerlerine kaymaktadır. Yani,  $\theta$ ’nın  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  değerleri için yapının rezonans frekansları sırasıyla 576.2 THz, 586.74 THz, 621.76 THz ve 656.78 THz’dir. Fakat yapının emilim değerlerinin  $\theta$  açısının artmasıyla azaldığı

görülmektedir. TE polarizasyonu gibi, TM polarizasyonu da  $\theta$  açısı değişimi için aynı frekans cevabını gösterir. TM polarizasyonu için elde edilen sonuçlar  $\theta$  TE polarizasyonu ile tutarlıdır.



(a)



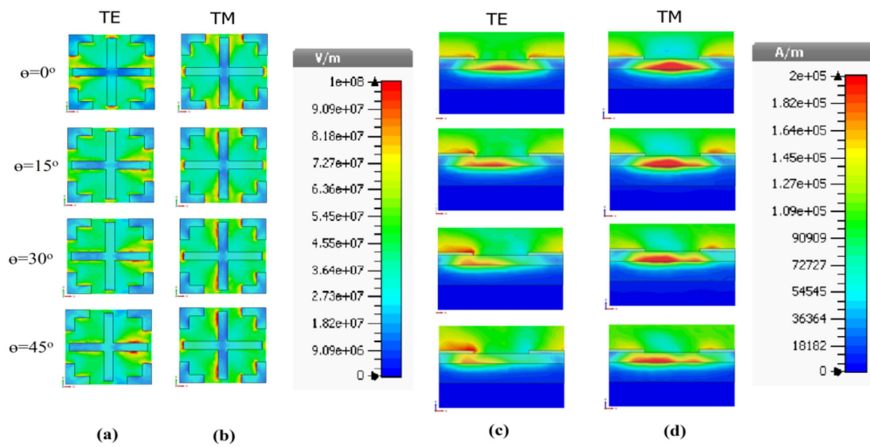
(b)

Şekil 4.97. Önerilen PMA yapısının (a) TE ve (b) TM polarizasyonu için  $\theta$  açısına bağlı frekans tepkisi

Önerilen PMA yapısının rezonans mekanizması üzerinde daha iyi bir fikir sahibi olmak için, yapının rezonans frekansında (576.2 THz) gelen dalganın TE ve TM polarizasyonları için manyetik ve elektrik alanların yüzey akımlarının dağılımları  $\theta$  açısına bağlı olarak araştırılmıştır. Çeşitli  $\theta$  açılarında elektrik rezonansının emilimi ve gücü arasındaki ilişkiyi

belirlemek için bazı nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Rezonans frekansındaki (576.2 THz) elektrik alan dağılımlarının büyüklüğü ( $|E|$ ), çeşitli teta değerleri için Şekil 4.98. (a),(b)'de gösterilmektedir.  $\theta$  açısına bağlı olarak TE polarizasyonu için elektrik alan yoğunlukları, Şekil 4.98. (a)'da gösterilmiştir. Şekil 4.98. (a)'da E-alanının yoğunluğunun, artan açı açıları ile kuvvetli bir şekilde sınırlandığını ve E alanının, artı şeklinde şekillendirilmiş rezonatörlerin sağ tarafında yoğunlaştığını görülmektedir.  $\theta$  açısı arttıkça, E alan yoğunluğu da artar.  $\theta$  açısına bağlı olarak TM polarizasyonu için toplam E alan yoğunluğu dağılımı, Şekil 4.98. (b)'de gösterilmiştir. TM polarizasyonunda elektrik alan, çoğunlukla dikey şeridin sol tarafında ve yatay şeridin sol kenarı üzerinde yoğunlaşmaktadır. TE polarizasyonu gibi,  $\theta$  açısı arttıkça, E alan yoğunluğu da artar. Şekil 4.98. (a),(b)'de önerilen PMA yapısının rezonans frekansındaki E alan şiddetinin, EM dalganın geliş açısına ( $\theta$ ) bağlı olduğu görülmektedir.

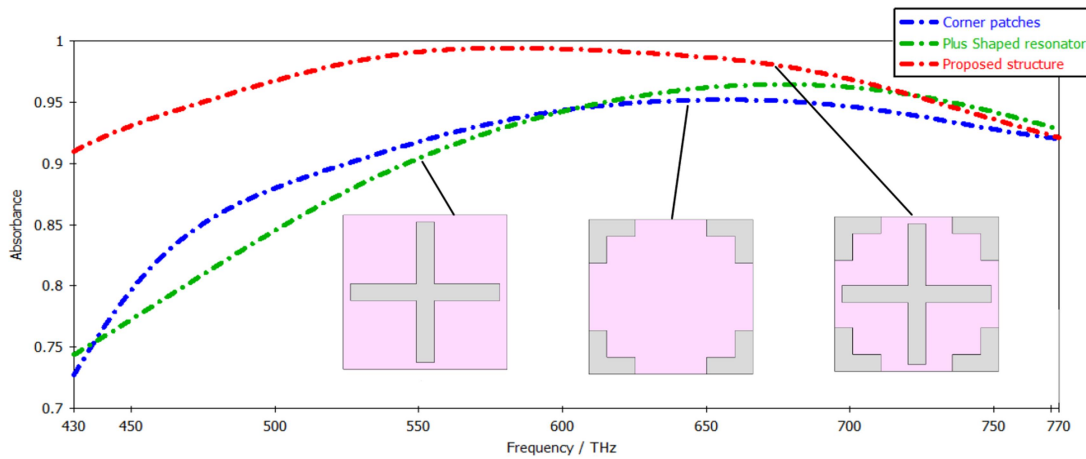
Önerilen yapının farklı açılarda gelen EM dalganın TE ve TM polarizasyon için rezonans frekanslarındaki manyetik alan şiddetinin büyüklüğü ( $|H|$ ), sırasıyla Şekil 4.98. (c), (d)'de gösterilmiştir. Şekil 4.98. (c), (d)'den açıkça görülebileceği gibi, manyetik alan çoğunlukla TE ve TM polarizasyonu için rezonatörün dikey şeridinde ve köşelerinde yoğunlaşmaktadır.  $\theta$  açısı arttıkça, şerit üzerindeki manyetik alan yoğunluğu yapının sol kısmına kayar ve dikey şeridin manyetik alan yoğunluğu azalır. Dikey şerit üzerindeki manyetik alan şiddeti,  $\theta$  açısı arttıkça azalmakla birlikte, yapının köşelerinde oluşan manyetik alan yoğunluğu artan  $\theta$  açısı arttıkça artar.



Şekil 4.98. Önerilen PMA yapısının farklı  $\theta$  açıları için, (a) TE polarizasyonu, (b) TM polarizasyonu için toplam elektrik alanı yoğunluğu ( $|E|$ ) ve (c) TE polarizasyonu (d) TM polarizasyonu için toplam manyetik yoğunluğu ( $|H|$ )



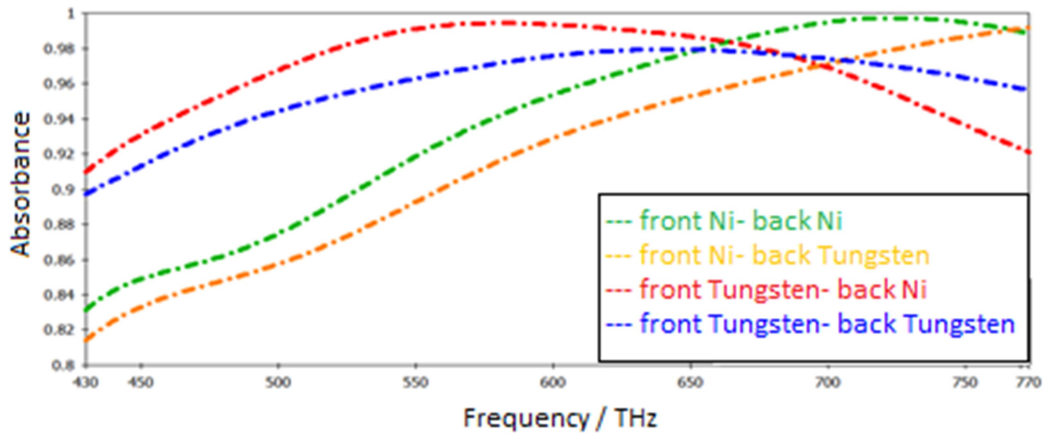
Bu bölümde önerilen PMA yapısının Şekil 4.92.(a)'da gösterilen rezonatör parçalarının bireysel emilim tepkileri çalışma frekansında araştırılmıştır. Artı şekilli rezonatör ve köşe yamalarının ayrı ve ortak etkilerini anlamak için, her bir elemanın ayrı ayrı incelenmesi gerekir. Şekil 4.99'da, artı şekilli rezonatör ve köşe yama rezonatörün yapının emilim karakteristiği üzerindeki ayrık ve ortak etkileri gösterilmektedir. Sadece artı şekilli bir rezonatöre, sadece köşe yama rezonatöre ve önerilen yapıdaki rezonatörün en yüksek emilim oranları, sırasıyla 674.46 THz'de % 96.45, 654.4 THz'de % 95.19 ve 579.26 THz'de % 99.42'dir. Sadece artı-şekilli ve köşe yama rezonatöre sahip yapıların görünür ışık frekansındaki emilim oranları önerilen PMA yapısının emilim oranlarından az olsa da, %70'in üzerinde emilim oranları ile bu yapılarda iyi emilim değerlerine sahiptirler. Bu rezonatör gruplarının birleşim etkilerinden dolayı önerilen rezonatörün emilim değerleri bu rezonatör gruplarının bireysel emilim değerlerinden büyüktür. Ayrıca, artı şekilli rezonatöre sahip yapı 430THz-600 THz frekans aralığındaki emilim değerleri frekansa göre doğrusal olarak arttığı için, bu yapı belirtilen frekans aralığında dalga boyu sensörü olarak kullanılabilir. Yani artı şeklindeki rezonatöre sahip sensör yapısı, çivit mavisi, yeşil, mavi, turuncu, mor, sarı ve kırmızı ışıkların algılanmasında kullanılabilir.



Şekil 4.99. Önerilen yapıdaki rezonatörün parçalarının ayrı ayrı ve bileşik emilim oranları

Önerilen PMA yapısında rezonatör tungsten, arkada bulunan metalik katman nikel (Ni)'den oluşmaktadır. Şekil 4.100'de rezonatör ve arka metal olarak farklı metallerin kullanılması durumunda yapının emilim tepkisi gösterilmiştir. Farklı metaller kullanılarak oluşturulan yapıların rezonans frekansları, rezonans frekanslarındaki emilim oranları ve en küçük emilim oranları Çizelge 4.11'de verilmiştir. Çizelge 4.11'de, 2. yapı (önerilen PMA yapısı) diğerleri ile karşılaştırıldığında, rezonans frekansında en yüksek emilim değerine

sahiptir ve en küçük emilim değeri en yüksek olanıdır. Şekil 4.100'de 2. yapının emilim değerleri kırmızı kesikli çizgi ile çizilmiştir. Ayrıca Çizelge 4.11'de verilen ve Şekil 4.100'de emilim değerleri mavi kesikli çizgi ile gösterilen 1. yapının emilim değerleri çalışma frekansında çok iyi ve stabildir. Çizelge 4.11'deki 3. ve 4. yapıların emilim oranları rezonans frekanslarında oldukça yüksek olmasına rağmen, bu yapıların en küçük emilim büyüklükleri 1. ve 2. yapılarınkinden çok daha düşüktür. Mükemmel emilim elde etmek için emicinin etkin empedansı ile boşluğun empedansı arasında empedans uyumu olması gereklidir. Şekil 4.100 ve Çizelge 4.11'den görüldüğü gibi, bu durum MTM yapısına tungsten rezonatör yerleştirilerek kolayca karşılanabilir. Tungsten rezonatöre sahip yapılar, tüm görünür ışık spektrumunda % 90'ın üzerinde emilim oranlarına sahiptirler. Bu nedenle, tungsten rezonatörlere sahip PMA yapıları güneş pilleri, optik sensör ve geniş frekans bandında görünmezlik uygulamaları için kullanılabilir. Ayrıca, Çizelge 4.11'deki nikel rezonatörlü 3. yapı, 600 THz-770 THz frekans aralığında emilim değerinin frekansa bağlı olarak doğrusal artmasından dolayı bir optik frekans metre olarak kullanılabilir.



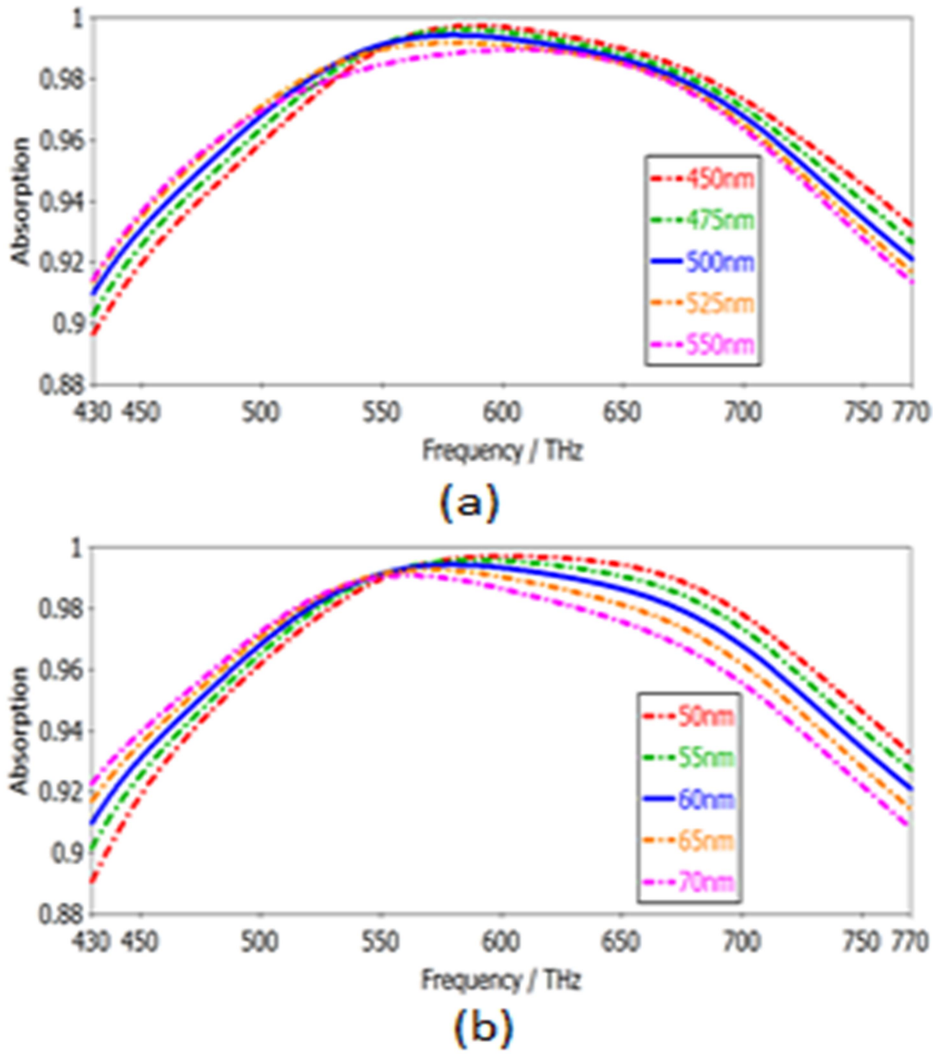
Şekil 4.100. Rezonatör ve alt metal olarak farklı metaller kullanılan önerilen yapının emilim tepkisi

Çizelge 4.11. Önerilen yapıda farklı metaller kullanılması

Sample	Resonator	Bottom Metal	Absorption		Minimum Absorption Magnitude(%)
			Magnitude at resonance frequency(%)	Resonance Frequency(THz)	
1st	Tungsten	Tungsten	97,93	640,12	89,74
2nd	Tungsten	Nickel	99,42	579,26	90,98
3rd	Nickel	Tungsten	99,17	770	81,43
4th	Nickel	Nickel	99,72	721,72	83,14

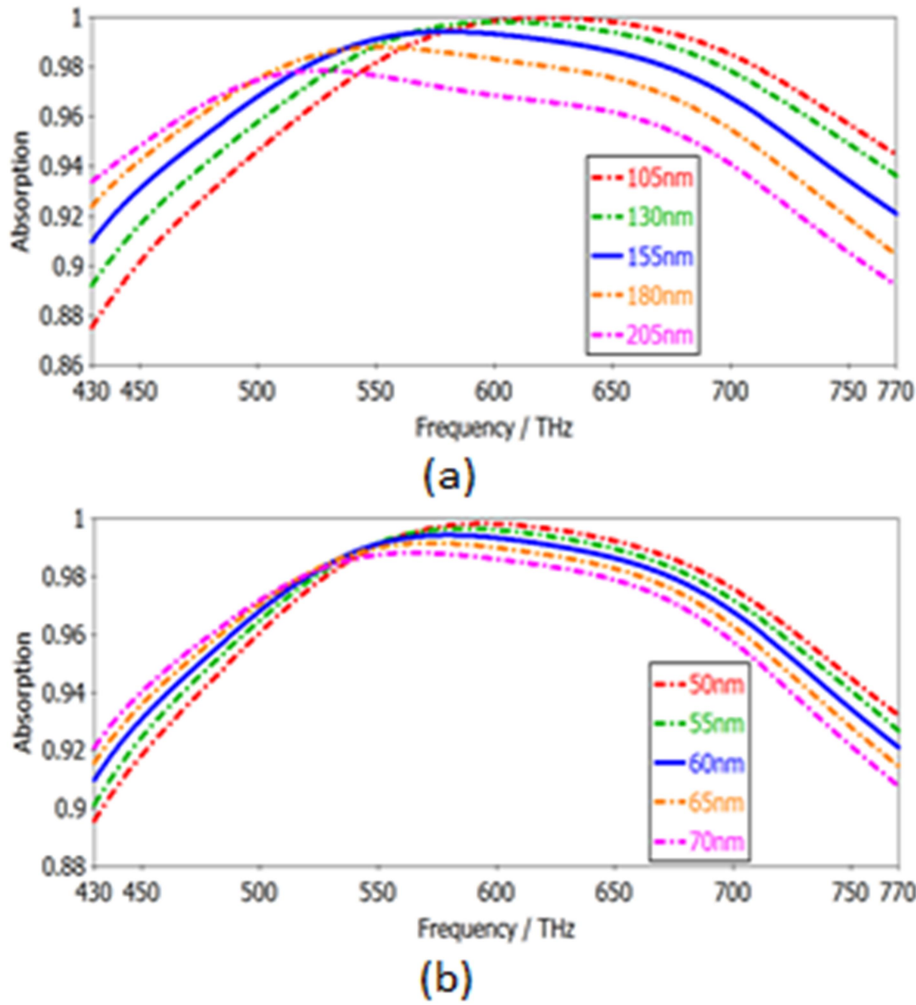
Bu bölümde Çizelge 4.10'da verilen yapının ölçülerinin önerilen yapının emilim tepkisi üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Önerilen PMA yapısının emilim karakteristiğinin daha iyi anlaşılması için, artı şekilli rezonatörün şerit uzunluğu (a), şerit genişliği (c), köşe yamaların uzunluğu (b) ve köşe yamaların genişliği (e) gibi belirli ölçüler belirli aralıklarda değiştirilmiştir. Bu parametrik çalışma için yapılan nümerik analizlerde ölçülerden biri değiştirilirken diğerleri Çizelge 4.10'daki değerinde sabit tutulmuştur. Şekil 4.101'de ve Şekil 4.102'de gösterilen nümerik analiz sonuçlarının tümünde mavi ve kalın çizgi ile gösterilen değerler en iyi değerleri göstermektedir ve Çizelge 4.10'da verilen önerilen PMA yapısının ölçüleridir.

Önerilen yapının emilim oranı, artı şeklindeki rezonatör şeritlerinin uzunluk ve genişliklerinin farklı değerleri için sırasıyla Şekil 4.101. (a) ve (b) gösterilmiştir. Şekil 4.101.(a)'da görüldüğü üzere şerit uzunluğu büyüdükçe, yapının rezonans frekansı düşük frekanslara kaymaktadır. Farklı şerit uzunluklarına sahip yapının rezonans frekansları sırasıyla 450nm, 475nm, 500nm, 525nm, 588THz, 583 THz, 579 THz ve 578 THz'dir. Artı şekilli rezonatör genişliğinin etkisi, Şekil 4.101. (b)'de gösterilmiştir. Şekil 4.101. (b)'ye bakıldığında artı şekilli rezonatör şeridinin genişliğinin emilim değerleri üzerindeki etkisinin, şerit uzunluğundaki değişime benzer olduğu görülmektedir. Şerit genişliği büyüdükçe, önerilen yapının rezonans noktaları frekans eksenindeki daha düşük değerlere kayar, fakat yapının rezonans frekansındaki emilim oranı azalmaktadır. 50 nm ve 70 nm şerit genişliklerine sahip yapının rezonans frekansında emilim oranı sırasıyla % 99.71 ve % 99.07'dir.



Şekil 4.101. Önerilen PMA yapısının (a) şerit uzunluğu ve (b) şerit genişliği değişimine bağlı emilim tepkisi

Şekil 4.102. (a) ve (b)'de ise köşe yama rezonatörlerin uzunluk ve genişliklerinin önerilen yapının emilim tepkisi üzerinde etkileri gösterilmiştir. Şekil 4.102'ye bakıldığında köşe yamala rezonatörlerin ölçülerindeki değişimin yapının emilim tepkisine etkisi, Şekil 4.101'de gösterilen artı şekilli rezonatöre benzemektedir. Yani, köşe yama rezonatörlerinin uzunluğu ve genişliği büyüdükçe, yapının rezonans frekansı düşük frekanslara doğru kaymakta ve tasarlanan yapının rezonans frekansındaki emilim oranı azalmaktadır. Şekil 4.101'deki ve Şekil 4.102'deki mavi kalın çizgiler önerilen yapının en iyi sonuçlara sahip değerleridir. Bundan dolayı önerilen PMA yapısında artı şekilli rezonatörün şerit uzunluğu ve şerit genişliği sırasıyla 500 nm ve 60 nm, köşe yamaların uzunluğu ve köşe yamaların genişlikleri sırasıyla 155 nm ve 60 nm olarak ayarlanmıştır. Önerilen PMA yapısı bu ölçüler ile en iyi emilim değerlerine ve geniş bir banda sahiptir.



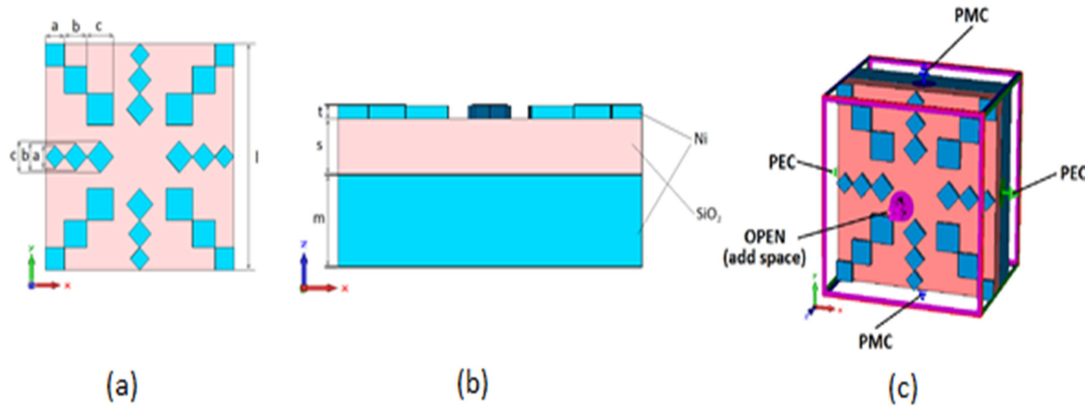
Şekil 4.102. Önerilen PMA yapısındaki köşe yama rezonatörlerin (a) uzunluğunun ve (b) genişliğinin farklı değerlerinde yapının emilim tepkisi

#### 4.2.5. Kare Yama Rezonatörlü Sinyal Emici

Önerilen yapının tasarımı Şekil 4.103'te gösterilmektedir. Önerilen yapının ölçüleri Çizelge 4.12'de verilmiştir. Yapının çapraz, yatay ve dikey çizgileri üzerinde hizalanmış karelerden oluşan rezonatör Şekil 4.103. (a)'da gösterilmiştir. Şekil 4.103. (b)'de görülen yapının ön tarafında bulunan rezonatör ve arka taraftaki metalik katman Nikel (Ni) ve bunların arasında bulunan dielektrik katman silikon dioksittir ( $\text{SiO}_2$ ). Ni ve  $\text{SiO}_2$ 'nin kompleks dielektrik parametreleri [75,76]'dan alınmıştır.

Nümerik analizlerde yapının sınır koşulları, enine elektromanyetik (TEM) gelen dalga için periyodiklik sağlamak üzere x- yönünde mükemmel elektrik iletkeni (PEC) ve y- yönünde

mükemmel manyetik iletken (PMC) olarak atanmıştır. PEC sınırı, gelen TEM dalganın elektrik alan bileşenine ve PMC sınırı, gelen TEM dalganın manyetik alan bileşenine diktir. Bu sınır koşulları sadece birim hücre yapısı için periyodiklik gösteren TEM dalgası için geçerlidir. Gelen EM dalga ve önerilen mükemmel sinyal emici (PMA) yapısının yakın alan etkisini önlemek için z- yönündeki sınır koşulları boşluklu açık olarak ayarlanmıştır. Önerilen PMA yapısının arka tarafı, hücrenin arka tarafına sinyal iletimini engellemek için metal olarak seçilmiştir. Önerilen yapı, farklı polarizasyonlara ve polarizasyon açılına sahip gelen güneş ışığı için tam olarak aynı yanıtı sağlaması için simetrik olacak şekilde tasarlanmıştır. Çizelge 4.12’de verilen önerilen PMA yapısının ölçüleri, tüm görünür ışık frekansındaki tüm güneş enerjisini emebilmesi için parametrik bir çalışma ile ve benzetim programının genetik algoritma yaklaşma aracı tarafından bulunmuştur. Nümerik analizler için sonlu entegrasyon tekniği tabanlı ticari bir elektromanyetik simülasyon yazılımı kullanılmıştır.



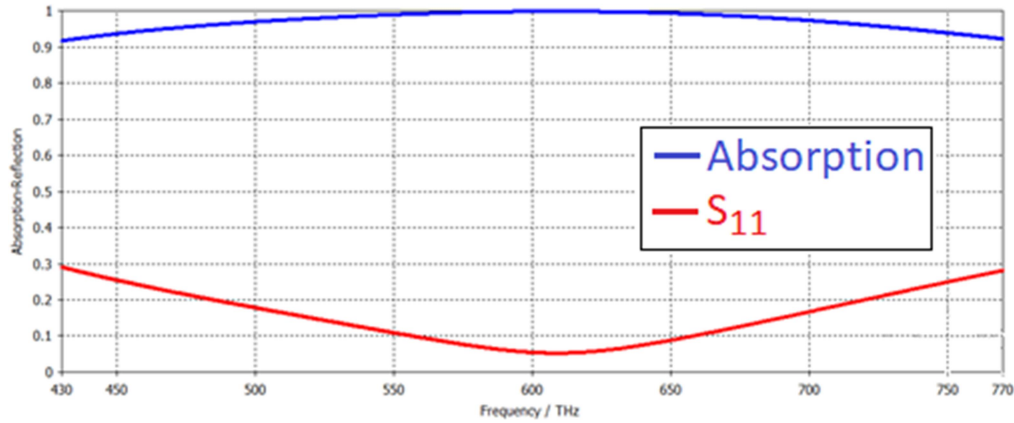
Şekil 4.103. Önerilen yapının birim hücresinin (a) önden görünümü (b) yandan görünümü ve (c) sınır şartları

Çizelge 4.12. Önerilen yapının birim hücresinin ölçüleri

	a	b	c	l	t	s	m
Ölçüler (nm)	50	60	70	500	15	60	100

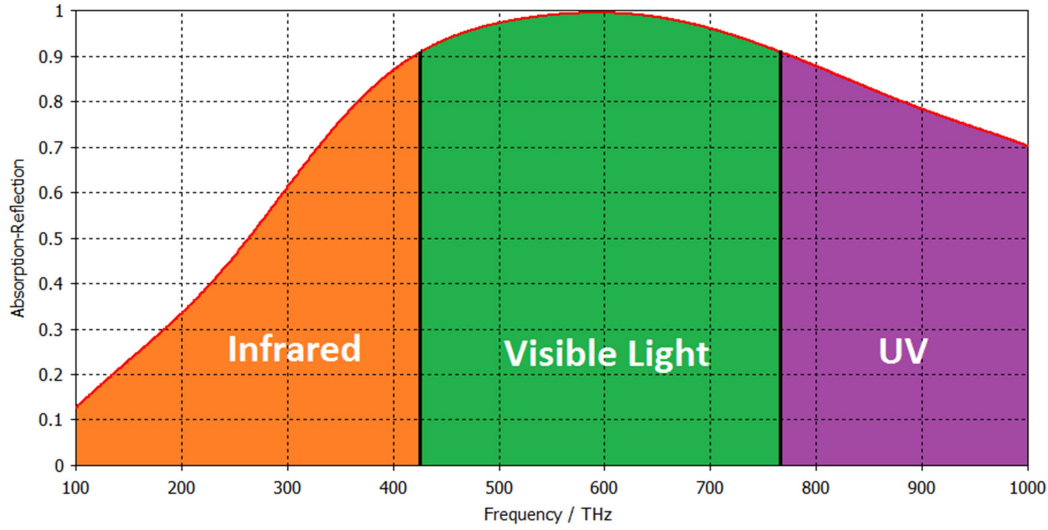
Önerilen PMA yapısının emilim değerleri ve yansıtma katsayısı ( $S_{11}$ ) Şekil 4.104’te gösterilmiştir. Önerilen PMA yapısı görünür ışık spektrumunda geniş bir bant genişliğine ve en iyi emilim değerlerine sahiptir. Şekil 4.104’ten görüleceği üzere yapının rezonans frekansı olan 608 THz’de % 99.71 emilim oranı ve 556 THz ile 657 THz frekans

aralığında % 99'un üzerinde emilim oranı vardır. Ayrıca, önerilen yapı görünür ışık bölgesindeki tüm frekanslarda % 91'in üzerinde olan yüksek bir emme kapasitesine sahiptir. Önerilen PMA yapısı, Ni-SiO<sub>2</sub> katmanlar arasında tüm güneş enerjisini sınırlama kapasitesine sahiptir. Dolayısıyla, gelen enerjinin yapının içine girmesine izin verilir. Ayrıca önerilen yapı elektrik akımını dönüştürme potansiyeline sahiptir.



Şekil 4.104. Önerilen yapının görünür ışık frekansında emilim oranı ve yansıtma katsayısı

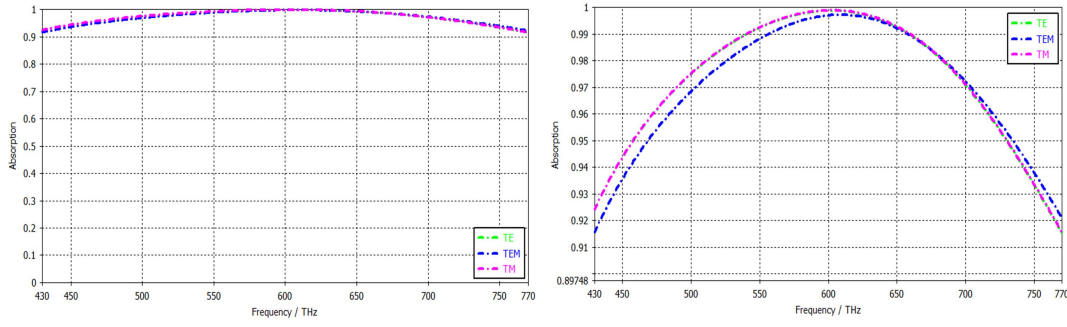
Şekil 4.105'te önerilen PMA yapısının emilim karakteristiği görünür ışık rejiminin yanında kızılötesi ve ultraviyole frekans bölgelerinde de gösterilmiştir. Kızılötesi bölge için emilim yüzdesi 424 THz ve 430 THz arasında % 90'ın üzerindedir. Kızılötesi ışık spektrumundaki bu emilim değerlerinden dolayı önerilen yapı kızılötesi bölgesinde kızılötesi dedektörü olarak kullanılabilir. Kızılötesi dedektörler, foto detektör çipleri, IR hareket detektörü, kızıl ötesi ısı detektörü, pasif kızılötesi detektör, kızılötesi ışık detektörü, kızıl ötesi alev detektörü gibi geniş bir uygulama aralığına sahiptir. İyi bir hassasiyete sahip bir IR detektörünün üretilmesi verimli bir IR emiciye ihtiyaç duyar. Önerilen PMA yapısı kızılötesi ışık spektrumunda iyi emilim değerlerine sahip olduğundan dolayı belirtilen frekans aralığında IR detektörü olarak kullanılabilir. Şekil 4.105'e bakıldığında önerilen PMA yapısı ultraviyole ışık bölgesinde 770 THz ila 774 THz arasında % 90'ın üzerinde emilim oranına sahiptir. Ayrıca, ultraviyole ışık spektrumunda, önerilen PMA yapısının emilim oranı % 70'in üzerindedir. Şekil 4.105'ten önerilen yapının sadece görünür ışık bölgesinde değil, aynı zamanda kızılötesi ve ultraviyole ışık bölgelerinde de yüksek emilim yüzdelere sahip olduğu görülmektedir.



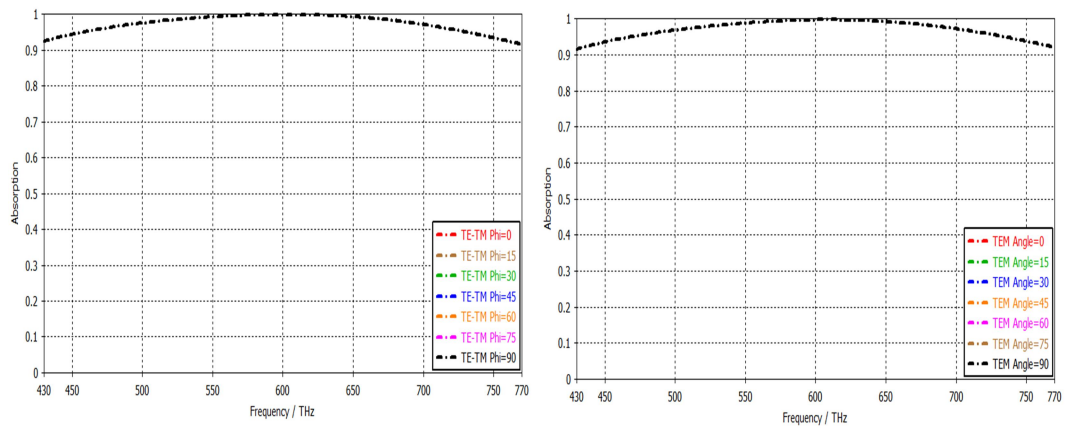
Şekil 4.105. Tüm güneş ışığı rejiminde önerilen yapının emilim karakteristiği

Bu bölümde önerilen PMA yapısı polarizasyon ve açı bağımlılığı açısından incelenmiştir. Gelen güneş ışığının görünür ışık frekans aralığında TE, TM polarizasyonu ve TEM durumu için önerilen yapının emilim karakteristikleri Şekil 4.106. (a)'da ve şeklin yakınlştırılmış hali Şekil 4.106. (b)'de gösterilmiştir. Güneş ışığının TE ve TM polarizasyonu için önerilen yapının emilim karakteristiğinin aynı olduğu ve TEM durumdaki karakteristiğinin, yapının merkezi simetrisinden dolayı TE ve TM polarizasyonu ile hemen hemen aynı olduğu görülebilir. Şekil 4.107'de önerilen PMA yapısının gelen ışığın polarizasyon açısı bağlı emilim değerleri gösterilmiştir. Şekil 4.107. (a)'dan görüleceği üzere önerilen PMA yapısı TE ve TM polarize gelen dalganın farklı polarizasyon açıları ( $\varphi$ ) için aynı emilim karakteristiğine sahiptir yani önerilen yapı  $\varphi$  açısından bağımsızdır. Şekil 4.107. (b)'de ise önerilen yapının emilim karakteristiğinin gelen dalganın TEM durumu için de polarizasyon açısından bağımsız olduğu görülmektedir. Bu nedenle, önerilen PMA yapısı, polarizasyon ve polarizasyon açısı bağımsızlığı ile görünür ışık spektrumun tamamında metalmalzeme tabanlı bir güneş pili olarak kullanılabilir.





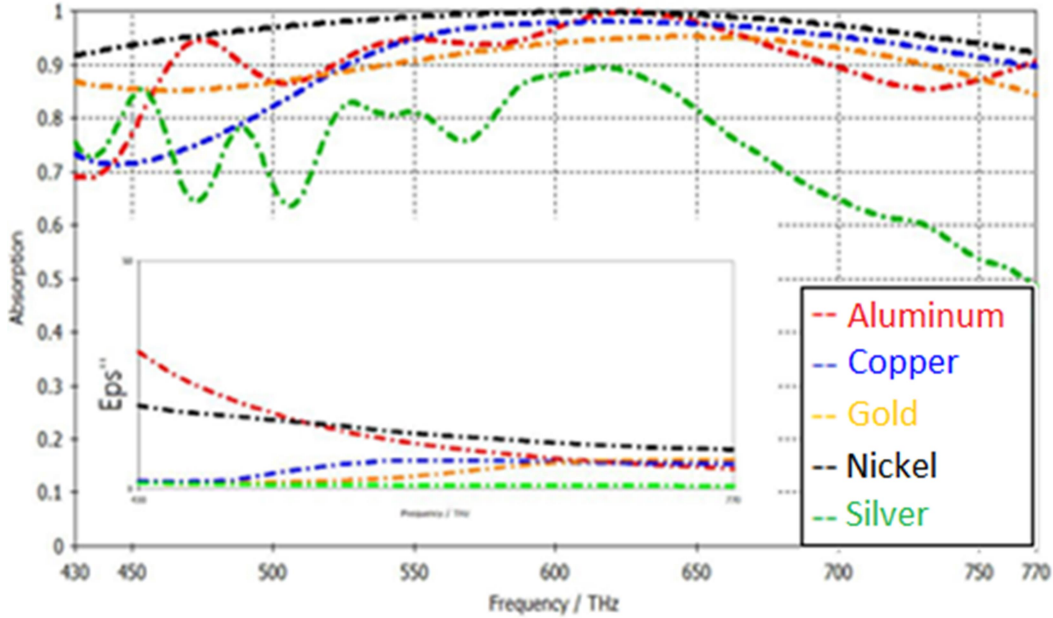
Şekil 4.106. Önerilen yapının gelen dalganın TE, TM polarizasyonu ve TEM durumu için (a) emilim karakteristiği ve (b) emilim bantlarının yakın görünümü



Şekil 4.107. Önerilen yapının gelen EM dalganın farklı polarizasyon açıları için emilim karakteristiği (a) TE ve TM polarizasyonu ve (b) TEM durumu

Bu bölümde Şekil 4.103. (b)'de gösterilen önerilen PMA yapısının rezonatör ve arka metalinin farklı metallere oluşması durumunda yapının emilim karakteristiği araştırılmıştır. Şekil 4.108'de alüminyum, bakır, gümüş, altın ve nikel rezonatör ve arka metal katmandan oluşan yapıların emilim karakteristikleri ve bu metallere dielektrik sabitlerinin sanal kısımları ( $\epsilon''$ ) gösterilmiştir. Nikel kullanılan yapının emilim oranının tüm görünür ışık spektrumunda % 90'nın üzerinde ve diğerlerinden daha iyi olduğu açıkça görülmektedir. Bunun nedeni, nikel'in  $\epsilon''$  değerinin, bu frekans aralığındaki diğer metallere göre daha yüksek olmasıdır. Bu frekans aralığında yüksek iletkenlik ve düşük  $\epsilon''$  değerine sahip olduğundan dolayı gümüş en kötü emilim değerlerine sahiptir. Ayrıca önerilen yapı mükemmel bakışlı bir şekilde sahip olduğundan alüminyum, bakır, altın, ve gümüş için bile literatürdeki diğer yapılardan daha iyi sonuçlar vermektedir. Nikel kullanılarak oluşturulan güneş pili yapısı görünür ışık spektrumunda diğer metallere göre

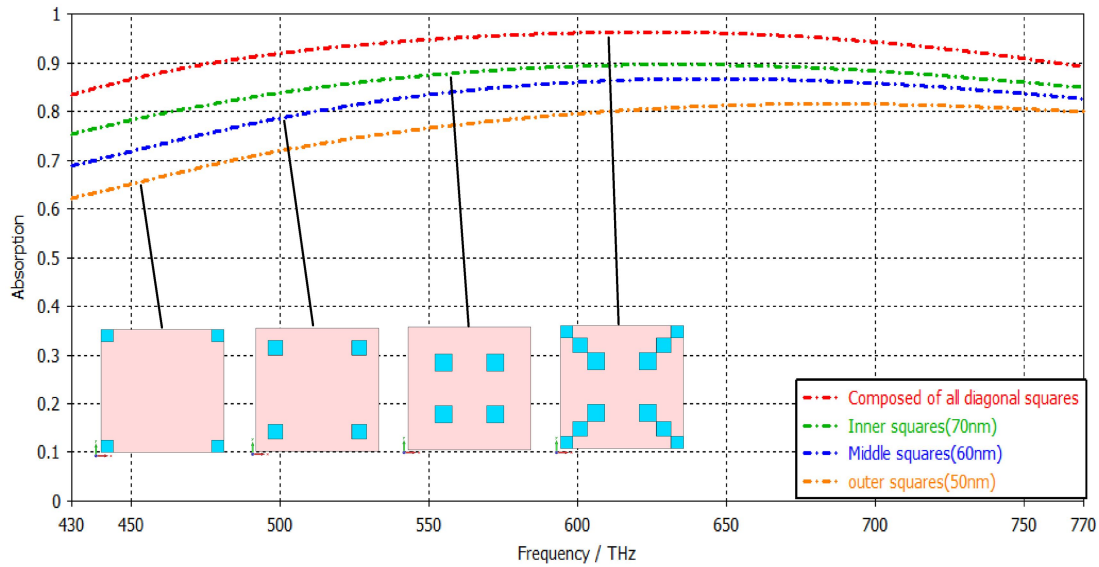
daha yüksek emilim değerlerine sahip olduğu için önerilen PMA yapısında tercih edilmiştir.



Şekil 4.108. Önerilen MTM yapısında farklı metal kullanılması durumunda oluşan emilim karakteristikleri

Bu bölümde, önerilen yapıdaki kare yama rezonatörlerin, yapının emilim karakteristiği üzerine etkileri araştırılmıştır. Kare yama rezonatörler iki gruba ayrılmıştır. Birinci grup, yapının çapraz çizgileri üzerinde bulunan kare yamalar ve ikinci grup ise yapının dikey ve yatay çizgisinde bulunan kare yamalardır. İlk olarak, birinci grubun emilim karakteristiği incelenmiştir. Nümerik analizlerde sınır koşulları TEM dalga durumu için ayarlanmıştır. Her bir kare yamanın ölçüleri Çizelge 4.12’de verildiği gibidir. Çapraz kare yamaların bireysel ve birleşik emilim karakteristikleri Şekil 4.109’da gösterilmiştir. Şekil 4.109’da çapraz kare yama rezonatör grubundaki dıştaki kare yama rezonatörlerin minimum emilim yüzdesine sahip olduğu ve karelerin birleşiminin maksimum emilim yüzdesine sahip olduğu görülmektedir. Sadece dıştaki, ortadaki ve içteki kare yamaların rezonans frekanslarındaki emilim oranları sırasıyla 685.6 THz’de % 81.54, 644.8 THz’de % 86.68 ve 632.8 THz’de % 89.61’dir. Tüm karelerin birleşiminden oluşan çapraz kare yama rezonatör grubunun emilim oranı rezonans frekansı olan 622.8 THz’de % 96.28’dir. Dıştaki kare yamalar yüksek rezonans frekansı değerine ve düşük bir emiciliğe sahipken içteki kare yamalar düşük rezonans frekansı değerine ve yüksek bir emiciliğe sahiptir. Şekil 4.109’dan da görüleceği üzere yapının çapraz çizgileri üzerinde bulunan kare

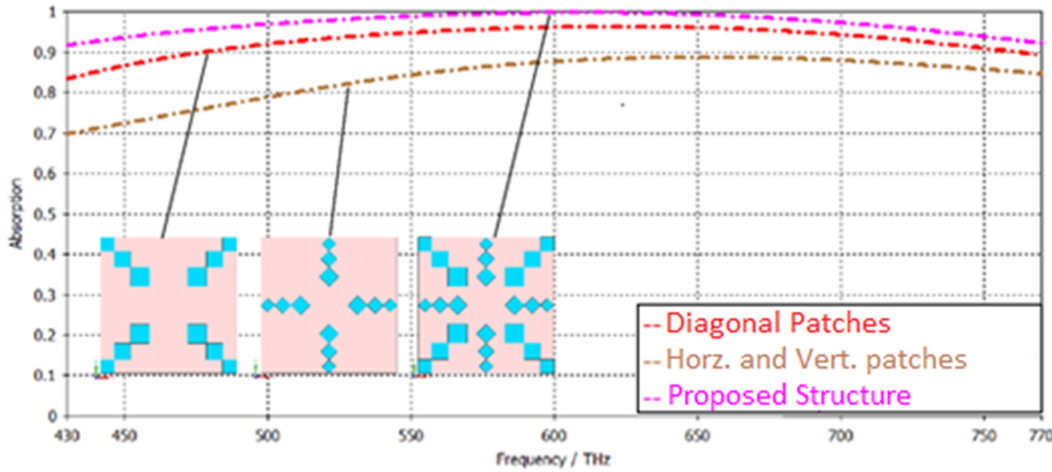
yamaların birleşmesinden oluşan yukarıda bahsedilen birinci rezonatör grubunun emilim değerleri bu kare yama rezonatörlerin bireysel emilim değerlerinden yüksektir. Sadece çapraz kare yama rezonatörlerden oluşan sinyal emici yapısı bile görünür ışığın tüm spektrumunda yaklaşık % 90'lık bir emicilik performansı sergileyen bir güneş emici olarak kullanılabilir. Bunun sebebi yapının etkin empedansının ortamın empedansına yakın değerlerde olmasıdır. Ayrıca çapraz kare yama rezonatörlerden oluşan yapı, merkezi bakışlı olduğundan dolayı yapının emilim tepkisi gelen dalganın hem polarizasyonundan hem de polarizasyon açısından bağımsızdır.



Şekil 4.109. Çapraz kare yamaların bireysel ve birleşik emilim tepkileri

İkinci olarak, birinci grup rezonatöre (çapraz kare yamalardan oluşan) sahip yapının, ikinci grup rezonatöre (dikey ve yatay kare yamalardan oluşan) sahip yapının ve önerilen yapının emilim karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Nümerik analizlerde Çizelge 4.12'de verilen ölçüler kullanılmıştır. Birinci ve ikinci rezonatör gruplarına sahip yapıların ve önerilen yapının sinyal emilim değerleri Şekil 4.110'da gösterilmiştir. Şekil 4.110'a bakıldığında birinci rezonatör grubunun rezonans frekansı olan 622.8 THz'de % 96.28'lik bir emilim oranına sahip olduğunu, ikinci rezonatör grubunun ise rezonans frekansı olan 651.6 THz'de % 88.71 emilim oranına sahip olduğunu ve önerilen yapının, 608.8 THz olan rezonans frekansında % 99.71 emilim oranına sahip olduğunu görülmektedir. Birinci ve ikinci rezonatör grubunun birleşmesiyle oluşan önerilen rezonatörün rezonans frekansındaki emilim değeri, birleşme ve plazmonik etki nedeniyle bu rezonatör

gruplarının bireysel emilim değerlerinden yüksektir. Gelen EM dalga TEM karakteristiğine sahip olduğu için, çapraz kare yamalar, E alanı rezonansı için yüksek metalik alanına ve H alanı rezonansı için yüksek akım akış alanına sahip olduğu için iyi bir emilim tepkisi gösterirler. Ayrıca Şekil 4.110'da gösterilen sadece çapraz kare yamalardan oluşan rezonatör grubu bile görülebilir ışığın tüm spektrumunda güneş pili uygulamaları için bir güneş emici olarak kullanılabilir.

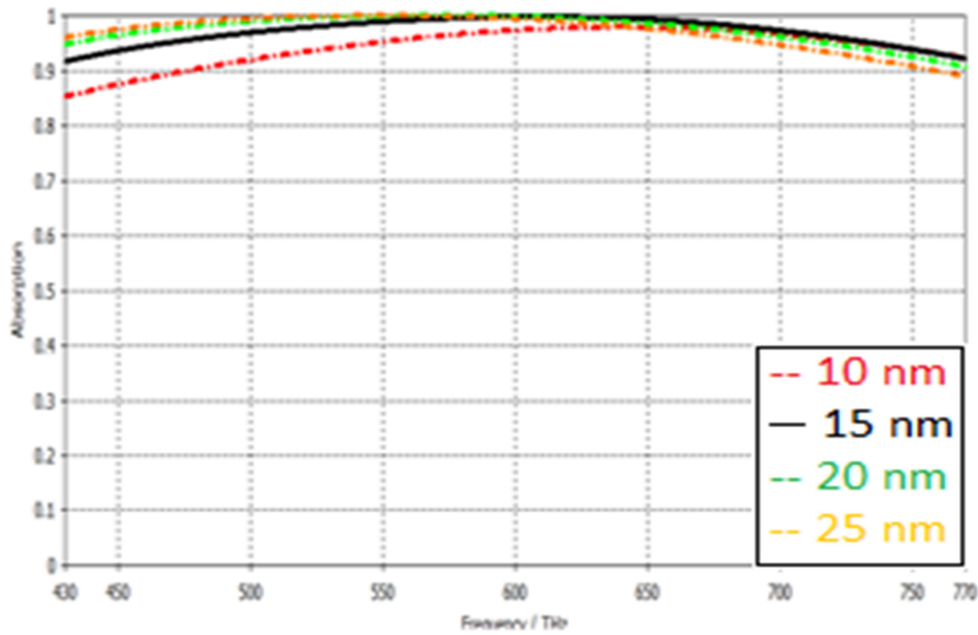


Şekil 4.110. Çapraz kare yama rezonatörün, dikey-yatay kare rezonatörün ve önerilen yapının emilim özelliği

Bu bölümde, önerilen PMA yapısının emilim karakteristiğinin rezonatör ve dielektrik tabaka kalınlığına bağımlılığı araştırılmıştır. Yapılan parametrik çalışmalarda diğer tüm ölçüler sabit tutulurken rezonatör veya dielektrik katmanın kalınlığı belirli aralıkta değiştirilmiştir. Şekil 4.111'de ve Şekil 4.112'de farklı rezonatör ve dielektrik tabaka kalınlığına sahip MTM yapılarının emilim değerleri gösterilmiştir. Şekil 4.111'de ve Şekil 4.112'de siyah düz çizgiler ile gösterilen değerler en iyi sonuçları göstermektedir. Bu nedenle, yapının mükemmel emilim karakteristiğine sahip olması için önerilen yapı için bu ölçüler ayarlanmıştır.

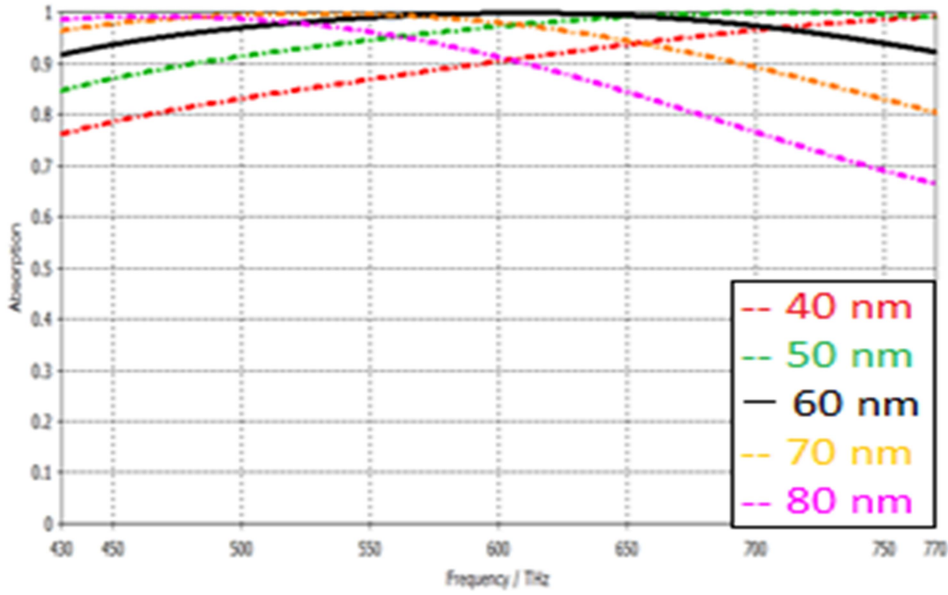
İlk olarak, Şekil 4.111'de rezonatör kalınlığının (m) değişiminin emilim tepkisi üzerine etkileri araştırılmıştır. Rezonans frekansında % 97 emilime sahip olan 10nm rezonatör kalınlığı hariç, rezonatörün diğer tüm kalınlık değerleri için yapıların rezonans frekanslarındaki emilim değerleri % 99'un üzerindedir. Yapının efektif empedansı boşluğun empedansına çok yakın olduğundan, tüm gelen EM dalga solar emiciye nüfuz eder. Fakat rezonatör tabakasının kalınlığının azaltılması, dalganın arka metal tabakadan

her geri dönüşünde yapının ön yüzünden boşluğa sızan dalga miktarını artırır. 15 nm, 20 nm ve 25 nm rezonatör kalınlıklarına sahip yapı rezonans frekanslarında % 99'luk emilim oranına sahipken, bu yapıların en düşük emilim oraları sırasıyla % 91, % 90 ve % 88'dir. Ayrıca, Şekil 4.111'den görüleceği üzere rezonatör kalınlığı arttıkça, rezonans frekansı düşük frekanslara doğru kaymaktadır. Bu, rezonatörün kapasitansının azalmasından kaynaklanır.



Şekil 4.111. Rezonatör katmanının farklı kalınlık değerlerine göre yapının emilim değerleri

İkinci olarak, dielektrik tabakanın kalınlığının (s) yapının emilim karakteristiğine etkisi incelenmiştir. Şekil 4.112'de farklı dielektrik tabaka kalınlıklarına sahip MTM yapılarının emilim karakteristikleri gösterilmiştir. Dielektrik tabakanın kalınlığı öndeki rezonatör ve alt metalik tabaka üzerinde elektrik rezonansının oluşmasına neden olur. Bu nedenle, bu kuplaj manyetik bir tepki üretir ve emicinin etkin empedansının serbest alan empedansına (empedans eşleşmesi) eşit olmasını sağlar. Bu nedenle, en iyi emilim değerine sahip olan dielektrik tabaka kalınlığı empedans uyumu ile 60 nm olarak bulunur. Şekil 4.112'den de görüleceği üzere sinyal emici yapısının mükemmel emilim karakteristiğine sahip olması için dielektrik tabakanın kalınlığının iyi seçilmesi çok önemlidir.

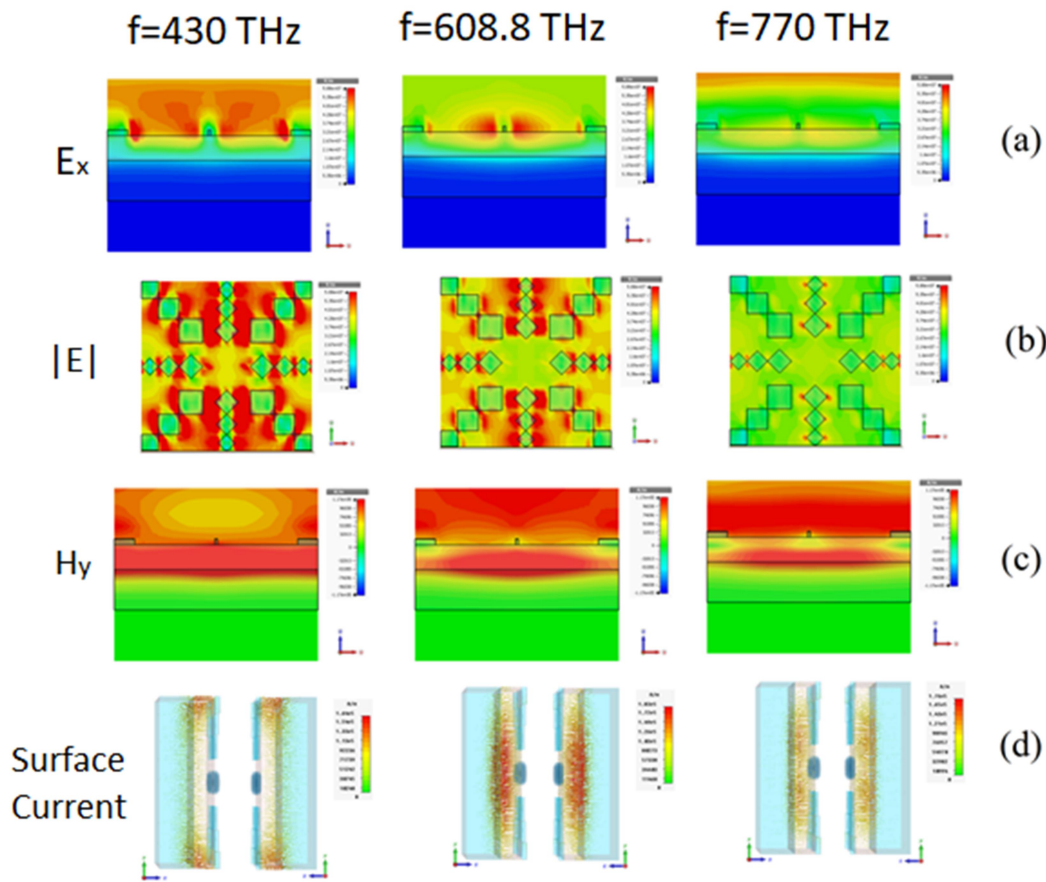


Şekil 4.112. Dielektrik katmanının farklı kalınlık değerlerine göre yapının emilim değerleri

Önerilen PMA yapısının rezonans davranışını ve çalışma mekanizmasını anlamak için yapının en düşük çalışma frekansında (430 THz), en yüksek çalışma frekansında (770 THz) ve rezonans frekansında (608.8 THz) elektrik alan, manyetik alan ve yüzey akım dağılımları Şekil 4.113'te gösterilmiştir. Önerilen PMA yapısının elektrik alan dağılımlarının x-bileşeni ( $E_x$ ), elektrik alan dağılımlarının büyüklüğü ( $|E|$ ), manyetik alan dağılımlarının y-bileşeni ( $H_y$ ) ve önerilen yapının söz konusu frekanslardaki yüzey akım dağılımı sırasıyla Şekil 4.113. (a), (b), (c) ve (d)'de gösterilmiştir.

Şekil 4.113. (a) ve (b)'ye bakıldığında 430 THz, 608.8 THz ve 770 THz'de, elektrik alanın çoğunlukla dikey kare yamaların kenarlarına, çapraz ve yatay kare yamaların köşelerinin kesişim noktalarına yakın olarak yoğunlaştığı görülmektedir. Bununla birlikte, elektrik alan dikey kare yamaların x-yönünde olan köşelerinde yoğunlaşırken, y-yönünde olan köşelerinde yoğunlaşmaz. Aynı şekilde, elektrik alan yatay kare yamaların x-yönündeki kenarlarında yoğunlaşırken, y-yönündeki kenarlarında yoğunlaşmaz. Ayrıca belirtilen frekanslarda çapraz kare yamaların köşegenlerinin kesişim yerlerinde elektrik alanı meydana gelir. Şekil 4.113. (a), (b).’den açıkça görüldüğü üzere frekans arttıkça yapıda oluşan elektrik alanın yoğunluğu da azalır. Önerilen yapının belirtilen frekanslardaki manyetik alan dağılımları Şekil 4.113. (c)'de gösterilmiştir. Tüm kare yama rezonatörler ve arka metalik tabaka arasındaki birleşme etkisi ile paralel olmayan dağılımlı manyetik kutuplaşma ortaya çıkmıştır. Manyetik kutuplaşma, düşük frekanslarda tüm kare

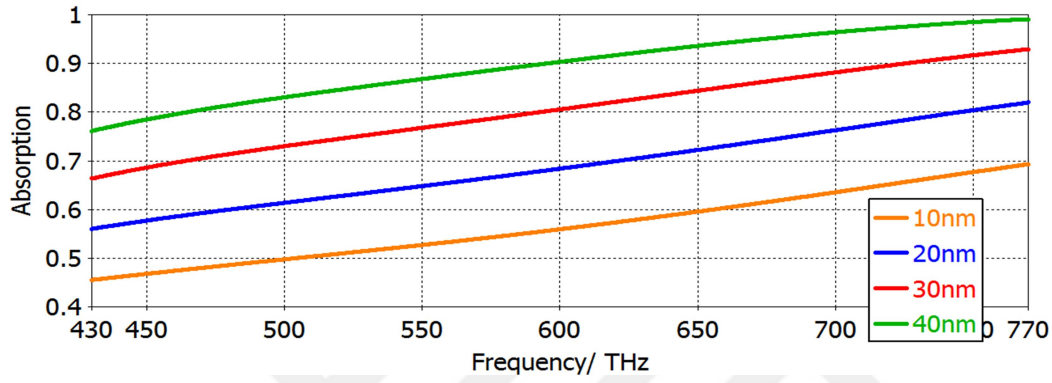
yamalardan kaynaklanırken, yüksek frekanslarda düşey kare yamalar tarafından oluşturulur. Önerilen PMA yapısının yüzey akımı dağılımları ise Şekil 4.113.(d)'de gösterilmiştir. Şekil 4.113.(d)'de yüzey akımlarının önerilen PMA yapısının her iki yanında meydana geldiği görülebilir. Yüzey akımları 430 THz'de çoğunlukla yapının kenarlarına yakın yerlerde meydana gelirken, 608.8 THz'de ve 770 THz'de önerilen yapının merkezinde yoğunlaşmıştır. Ayrıca önerilen PMA yapısının rezonans frekansı olan 608.8 THz 'deki yüzey akım yoğunluğu, 770 THz oluşan yüzey akım yoğunluğundan daha fazladır.



Şekil 4.113. Önerilen PMA yapısının (a) elektrik alan dağılımlarının x-bileşeni, (b) elektrik alan dağılımlarının büyüklüğü (c) manyetik alan dağılımlarının y-bileşeni ve (d) yüzey akım dağılımı

Şekil 4.112'de önerilen yapıda rezonatör ve arka metalik katman arasında bulunan dielektrik katmanın yapının emilim karakteristiği üzerine etkisi incelenmiştir. Şekil 4.112'de 40 nm dielektrik kalınlığına sahip yapının frekans artışına göre emilim değerlerinde doğrusal bir artışa sahip olması bu yapının farklı amaçlar içinde kullanılabileceği fikrini akıllara getirmiştir. Bundan dolayı Şekil 4.114'te 40 nm ve daha az dielektrik kalınlıklarına

sahip önerilen yapının emilim değerleri araştırılmıştır. Dielektrik kalınlığın azalmasıyla yapının emilim değerleri görünür ışık frekansında daha doğrusal olmasına sebep olmuştur. Şekil 4.114'e bakıldığında en doğrusal emilim değerlerine sahip dielektrik kalınlık değeri 20 nm'dir. Bu nedenle, 20 nm'lik bir dielektrik kalınlığı olan yapı, görünür ışık spektrumun tamamını tespit edebilen bir optik frekans algılayıcısı ve renk detektörü olarak kullanılabilir.



Şekil 4.114. 40 nm'den az dielektrik kalınlığına sahip MTM yapısının farklı dielektrik kalınlıkları için doğrusal emilim değerleri



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında iki farklı frekans aralığında çalışan MTM tabanlı sinyal emiciler tasarlanmıştır. İlk olarak Mikro dalga frekans bandında çalışan sinyal emici yapıları tasarlanmıştır. Bu sinyal emici yapılarının nümerik çözümleri ve deneysel ölçümleri yapılarak birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Daha sonra optik frekans bandında çalışan sinyal emici yapıları tasarlanarak bu yapıların nümerik çözümleri yapılmıştır. Bu yapılar çok küçük boyutlara (nanometre) sahip olduklarından laboratuvar imkânlarından dolayı üretilememiş ve deneysel çalışmaları yapılamamıştır.

Mikrodalga frekans bandında çalışan sinyal emici yapılarının hepsi çalışma frekansı aralıklarında % 90'nın üzerinde, rezonans frekanslarında ise % 99'un üzerinde emilim oranlarına ve geniş bant genişliklerine sahiptirler. Mikrodalga frekans bandında tasarlanan MTM tabanlı yapıların bazılarının sinyal emici özelliklerinin yanında enerji hasatlama özellikleri de araştırılmıştır. Bahsedilen bu yapılara dirençler yerleştirilerek sinyal emici tarafından hapsedilen EM enerji elektrik enerjisine çevrilmiştir. Çalışma frekansları, sahip oldukları emilim değerleri ve bant genişlikleri dikkate alındığında bu MTM tabanlı sinyal emici yapıları çevremizi saran WI-FI, WIMAX ve uydu haberleşmesi frekanslarında kullanılmaya elverişlidir. Çok katmanlı ayırık kare halkalı MTM sinyal emici yapısı, 3 GHz ile 12 GHz arasında altı farklı frekans bölgesinde geniş bir bant genişliği ile gelen EM dalgayı % 80'in üzerinde bir verimlilikle absorbe etmektedir. Üç tip ayırık halka rezonatöre sahip sinyal emici yapısı ise yaygın olarak kullanılan Wi-Fi ve WIMAX bant bölgelerinde % 80 ve % 70 dönüşüm verimliliğine ve Wi-Fi bandında % 82.21 emilim oranına sahiptir. Daire halkalı rezonatörlü sinyal emici yapısı 7.2 GHz ile 16.6 GHz arasında 9.4 GHz bant genişliği ile %80'nin üzerinde emilim değerlerine sahiptir. Ayrıca yapı 7.8 ile 14 GHz frekans aralığında gelen EM dalga enerjisinin en az % 80'ini aktif güce dönüştürmektedir. Çok katmanlı konik rezonatöre sahip sinyal emici yapısı 9.68 GHz ile 17.45 GHz frekans aralığında %90'nın üzerinde ve 9.91 GHz ile 14.86 GHz frekans aralığında %95'in üzerinde olan mükemmel emilim değerlerine sahiptir. Ayrıca yapı enerji hasatlama uygulamasının yanında askeri radarlardan gizlenme teknolojisinde de kullanılabilir.

Optik frekans bandında çalışan sinyal emici yapıları ise bu frekans bandı yüksek emilim değerlerine sahiptirler. Optik frekans için tasarlanan yapıların tamamı görünür ışık frekans spektrumunun tamamında (430 THz- 770 THz) %90'nın üzerinde ve rezonans

frekanslarında ise %99'un üzerinde emilim oranlarına sahiptirler. Ayrıca bu yapılar sadece görünür ışık frekans spektrumunda değil aynı zamanda kızılötesi (100 THz- 440 THz) ve ultraviyole (770 THz- 1000 THz) ışık spektrumlarında da yüksek emilim değerlerine sahiptirler. Bu yapıların optik frekanslardaki emilim karakteristiklerinin yanında başka özellikleri de araştırılmıştır. Örneğin kare yama rezonatörlü sinyal emici yapısının küçük dielektrik katman kalınlıkları için görünür ışık frekansında ışık renk detektörü olarak da kullanılabileceği gösterilmiştir. Yıldız şekilli rezonatörlü sinyal emici yapısı ise görünür ışık spektrumunda % 91.8'in üzerinde emilim değerlerine sahiptir. Ayrıca yapı 613.94 THz'de % 99.87, 548 ve 669 THz arasında % 99 oranında emilime sahiptir. Artı ve çapraz şekilli rezonatörlü siyan emici yapısı ise sadece görünür ışık frekans spektrumunun yanında kızılötesi ve ultraviyole ışık bölgelerinde de iyi emilim değerlerine sahiptir. Piramit şekilli rezonatöre sahip sinyal emici yapısı neredeyse tüm güneş ışığını kapsayan 100 THz ile 1000 THz frekans aralığında gelen güneş ışığının açısı ve polarizasyonundan bağımsız olarak %99'un üzerinde emilim oranına sahiptir. Yapı gelecekte yüksek verimli güneş pilleri tasarlamak için kritik öneme sahiptir. Son olarak artı şekilli rezonatörlü sinyal emici yapısı ise 545 THz ile 628 THz frekansa aralığında %98'in üzerinde emilim oranına ve rezonans frekansı olan 579.26 THz de 99.42% emilim oranına sahiptir. Ayrıca yapı güneş pili, görünmezlik ve renk sensörü uygulamaları için bir ön adım olmaktadır.

Gelecek çalışmalara yön vermesi açısından tasarlanan bu sinyal emici metamalzeme yapılarının hasatladığı elektrik enerjisi uygun doğrultucu ve dönüştürücü devrelerle kullanılarak doğru akıma dönüştürülmesi önerilmektedir.

**KAYNAKLAR**

1. Smith, D. R., Pendry, J. B., & Wiltshire, M. C. (2004). Metamaterials and negative refractive index. *Science*, 305(5685), 788-792.
2. Lee, S. H., Park, C. M., Seo, Y. M., & Kim, C. K. (2010). Reversed Doppler effect in double negative metamaterials. *Physical Review B*, 81(24), 241102.
3. Zharov, A. A., Shadrivov, I. V., & Kivshar, Y. S. (2003). Nonlinear properties of left-handed metamaterials. *Physical Review Letters*, 91(3), 037401.
4. Sun, K., Fan, R. H., Zhang, Z. D., Yan, K. L., Zhang, X. H., Xie, P. T., ... & Pan, S. B. (2015). The tunable negative permittivity and negative permeability of percolative Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites in radio frequency range. *Applied Physics Letters*, 106(17), 172902.
5. Veselago, V. G. (1968). The electromagnetics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ . *Sov. Phys. Uspekhi*, 10(4), 509-514.
6. Pendry, J. B. (2000). Negative refraction makes a perfect lens. *Physical review letters*, 85(18), 3966.
7. Shelby, R. A., Smith, D. R., & Schultz, S. (2001). Experimental verification of a negative index of refraction. *science*, 292(5514), 77-79.
8. Schurig, D., Mock, J. J., Justice, B. J., Cummer, S. A., Pendry, J. B., Starr, A. F., & Smith, D. R. (2006). Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science*, 314(5801), 977-980.
9. Edwards, B., Alù, A., Silveirinha, M. G., & Engheta, N. (2009). Experimental verification of plasmonic cloaking at microwave frequencies with metamaterials. *Physical Review Letters*, 103(15), 153901.
10. Ding, F., Cui, Y., Ge, X., Jin, Y., & He, S. (2012). Ultra-broadband microwave metamaterial absorber. *Applied physics letters*, 100(10), 103506.
11. Zhang, S., Fan, W., Panoiu, N. C., Malloy, K. J., Osgood, R. M., & Brueck, S. R. J. (2005). Experimental demonstration of near-infrared negative-index metamaterials. *Physical review letters*, 95(13), 137404.
12. Liu, X., Starr, T., Starr, A. F., & Padilla, W. J. (2010). Infrared spatial and frequency selective metamaterial with near-unity absorbance. *Physical review letters*, 104(20), 207403.
13. Avitzour, Y., Urzhumov, Y. A., & Shvets, G. (2009). Wide-angle infrared absorber based on a negative-index plasmonic metamaterial. *Physical Review B*, 79(4), 045131.
14. Yao, J., Liu, Z., Liu, Y., Wang, Y., Sun, C., Bartal, G., ... & Zhang, X. (2008). Optical negative refraction in bulk metamaterials of nanowires. *Science*, 321(5891), 930-930.

15. Smolyaninov, I. I., Hung, Y. J., & Davis, C. C. (2007). Magnifying superlens in the visible frequency range. *science*, 315(5819), 1699-1701.
16. Shalaev, V. M. (2007). Optical negative-index metamaterials. *Nature photonics*, 1(1), 41.
17. Liu, N., Guo, H., Fu, L., Kaiser, S., Schweizer, H., & Giessen, H. (2008). Three-dimensional photonic metamaterials at optical frequencies. *Nature materials*, 7(1), 31.
18. Dolling, G., Wegener, M., Soukoulis, C. M., & Linden, S. (2007). Negative-index metamaterial at 780 nm wavelength. *Optics letters*, 32(1), 53-55.
19. Lin, Y. S., & Lee, C. (2014). Tuning characteristics of mirrorlike T-shape terahertz metamaterial using out-of-plane actuated cantilevers. *Applied Physics Letters*, 104(25), 251914.
20. Lee, S., Kim, S., Kim, T. T., Kim, Y., Choi, M., Lee, S. H., ... & Min, B. (2012). Reversibly stretchable and tunable terahertz metamaterials with wrinkled layouts. *Advanced Materials*, 24(26), 3491-3497.
21. Hawkes, A. M., Katko, A. R., & Cummer, S. A. (2013). A microwave metamaterial with integrated power harvesting functionality. *Applied Physics Letters*, 103(16), 163901.
22. Ramahi, O. M., Almoneef, T. S., AlShareef, M., & Boybay, M. S. (2012). Metamaterial particles for electromagnetic energy harvesting. *Applied Physics Letters*, 101(17), 173903.
23. Valentine, J., Li, J., Zentgraf, T., Bartal, G., & Zhang, X. (2009). An optical cloak made of dielectrics. *Nature materials*, 8(7), 568.
24. Ni, X., Wong, Z. J., Mrejen, M., Wang, Y., & Zhang, X. (2015). An ultrathin invisibility skin cloak for visible light. *Science*, 349(6254), 1310-1314.
25. Zhang, X., & Liu, Z. (2008). Superlenses to overcome the diffraction limit. *Nature materials*, 7(6), 435.
26. Freire, M. J., Marques, R., & Jelinek, L. (2008). Experimental demonstration of a  $\mu=-1$  metamaterial lens for magnetic resonance imaging. *Applied Physics Letters*, 93(23), 231108.
27. Lopez, M. A., Freire, M. J., Algarin, J. M., Behr, V. C., Jakob, P. M., & Marqués, R. (2011). Nonlinear split-ring metamaterial slabs for magnetic resonance imaging. *Applied Physics Letters*, 98(13), 133508.
28. Chen, Z., Guo, B., Yang, Y., & Cheng, C. (2014). Metamaterials-based enhanced energy harvesting: A review. *Physica B: Condensed Matter*, 438, 1-8.
29. Soukoulis, C. M., & Wegener, M. (2011). Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials. *nature photonics*, 5(9), 523.

30. Walia, S., Shah, C. M., Gutruf, P., Nili, H., Chowdhury, D. R., Withayachumnankul, W., ... & Sriram, S. (2015). Flexible metasurfaces and metamaterials: A review of materials and fabrication processes at micro-and nano-scales. *Applied Physics Reviews*, 2(1), 011303.
31. Jahani, S., & Jacob, Z. (2016). All-dielectric metamaterials. *Nature nanotechnology*, 11(1), 23.
32. Sun, K., Zhang, Z. D., Fan, R. H., Chen, M., Cheng, C. B., Hou, Q., ... & Liu, Y. (2015). Random copper/yttrium iron garnet composites with tunable negative electromagnetic parameters prepared by in situ synthesis. *RSC Advances*, 5(75), 61155-61160.
33. Chui, S. T., & Hu, L. (2002). Theoretical investigation on the possibility of preparing left-handed materials in metallic magnetic granular composites. *Physical Review B*, 65(14), 144407.
34. Sun, K., Zhang, Z. D., Qian, L., Dang, F., Zhang, X. H., & Fan, R. H. (2016). Dual percolation behaviors of electrical and thermal conductivity in metal-ceramic composites. *Applied Physics Letters*, 108(6), 061903.
35. Boltasseva, A., & Atwater, H. A. (2011). Low-loss plasmonic metamaterials. *Science*, 331(6015), 290-291.
36. Wang, X. A., Shi, Z. C., Chen, M., Fan, R. H., Yan, K. L., Sun, K., ... & Yu, M. X. (2014). Tunable electromagnetic properties in Co/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cermets prepared by wet chemical method. *Journal of the American Ceramic Society*, 97(10), 3223-3229.
37. Engheta, N., & Ziolkowski, R. W. (Eds.). (2006). *Metamaterials: physics and engineering explorations*. John Wiley & Sons.
38. Sun, K., Fan, R., Zhang, X., Zhang, Z., Shi, Z., Wang, N., ... & Liu, C. (2018). An overview of metamaterials and their achievements in wireless power transfer. *Journal of Materials Chemistry C*, 6(12), 2925-2943.
39. Shi, Z. C., Fan, R. H., Zhang, Z. D., Qian, L., Gao, M., Zhang, M., ... & Yin, L. W. (2012). Random composites of nickel networks supported by porous alumina toward double negative materials. *Advanced Materials*, 24(17), 2349-2352.
40. Wang, B., Teo, K. H., Nishino, T., Yerazunis, W., Barnwell, J., & Zhang, J. (2011). Experiments on wireless power transfer with metamaterials. *Applied Physics Letters*, 98(25), 254101.
41. Shelby, R. A., Smith, D. R., Nemat-Nasser, S. C., & Schultz, S. (2001). Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial. *Applied Physics Letters*, 78(4), 489-491.
42. Pendry, J. B., Holden, A. J., Stewart, W. J., & Youngs, I. (1996). Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. *Physical review letters*, 76(25), 4773.

43. Gao, M., Shi, Z. C., Fan, R. H., Qian, L., Zhang, Z. D., & Guo, J. Y. (2012). High-frequency negative permittivity from Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites with high metal contents. *Journal of the American Ceramic Society*, 95(1), 67-70.
44. Arslan, E., Şafak, Y., Altındal, Ş., Kelekçi, Ö., & Özbay, E. (2010). Temperature dependent negative capacitance behavior in (Ni/Au)/AlGaN/AlN/GaN heterostructures. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 356(20-22), 1006-1011.
45. Islam Khan, A., Bhowmik, D., Yu, P., Joo Kim, S., Pan, X., Ramesh, R., & Salahuddin, S. (2011). Experimental evidence of ferroelectric negative capacitance in nanoscale heterostructures. *Applied Physics Letters*, 99(11), 113501.
46. Linden, S., Enkrich, C., Wegener, M., Zhou, J., Koschny, T., & Soukoulis, C. M. (2004). Magnetic response of metamaterials at 100 terahertz. *Science*, 306(5700), 1351-1353.
47. Zhao, Q., Kang, L., Du, B., Zhao, H., Xie, Q., Huang, X., ... & Li, L. (2008). Experimental demonstration of isotropic negative permeability in a three-dimensional dielectric composite. *Physical review letters*, 101(2), 027402.
48. Zhao, Q., Zhou, J., Zhang, F., & Lippens, D. (2009). Mie resonance-based dielectric metamaterials. *Materials Today*, 12(12), 60-69.
49. Kasagi, T., Tsutaoka, T., & Hatakeyama, K. (2006). Negative permeability spectra in Permalloy granular composite materials. *Applied physics letters*, 88(17), 172502.
50. Pendry, J. B., Schurig, D., & Smith, D. R. (2006). Controlling electromagnetic fields. *science*, 312(5781), 1780-1782.
51. Cummer, S. A., Popa, B. I., Schurig, D., Smith, D. R., & Pendry, J. (2006). Full-wave simulations of electromagnetic cloaking structures. *Physical Review E*, 74(3), 036621.
52. Dincer, F., Karaaslan, M., Unal, E., Akgol, O., & Sabah, C. (2014). Design of polarization-and incident angle-independent perfect metamaterial absorber with interference theory. *Journal of electronic materials*, 43(11), 3949-3953.
53. Karaaslan, M., & Bakir, M. (2014). Chiral metamaterial based multifunctional sensor applications. *Progress In Electromagnetics Research*, 149, 55-67.
54. Karaaslan, M., Bağmancı, M., Ünal, E., Akgol, O., & Sabah, C. (2017). Microwave energy harvesting based on metamaterial absorbers with multi-layered square split rings for wireless communications. *Optics Communications*, 392, 31-38.
55. Bağmancı, M., Karaaslan, M., Ünal, E., Akgol, O., Karadağ, F., & Sabah, C. (2017). Broad-band polarization-independent metamaterial absorber for solar energy harvesting applications. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 90, 1-6.
56. Bağmancı, M., Karaaslan, M., Ünal, E., Akgol, O., & Sabah, C. (2017). Extremely-broad band metamaterial absorber for solar energy harvesting based on star shaped resonator. *Optical and Quantum Electronics*, 49(7), 257.

57. Ünal, E., Bağmancı, M., Karaaslan, M., Akgol, O., Arat, H. T., & Sabah, C. (2017). Zinc oxide–tungsten-based pyramids in construction of ultra-broadband metamaterial absorber for solar energy harvesting. *IET Optoelectronics*, *11*(3), 114-120.
58. Karaaslan, M., Bağmancı, M., Ünal, E., Akgol, O., Altıntaş, O., & Sabah, C. (2018). Broad band metamaterial absorber based on wheel resonators with lumped elements for microwave energy harvesting. *Optical and Quantum Electronics*, *50*(5), 225.
59. Bağmancı, M., Karaaslan, M., Altıntaş, O., Karadağ, F., Tetik, E., & Bakır, M. (2018). Wideband metamaterial absorber based on CRRs with lumped elements for microwave energy harvesting. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, *52*(1), 45-59.
60. Akgol, O., Bağmancı, M., Karaaslan, M., & Ünal, E. (2017). Broad band MA-based on three-type resonator having resistor for microwave energy harvesting. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, *51*(2), 134-149.
61. Almoneef, T., & Ramahi, O. M. (2014). A 3-dimensional stacked metamaterial arrays for electromagnetic energy harvesting. *Progress In Electromagnetics Research*, *146*, 109-115.
62. Wang, B., Yerazunis, W., & Teo, K. H. (2013). Wireless power transfer: Metamaterials and array of coupled resonators. *Proceedings of the IEEE*, *101*(6), 1359-1368.
63. Lee, J., & Lim, S. (2011). Bandwidth-enhanced and polarisation-insensitive metamaterial absorber using double resonance. *Electronics Letters*, *47*(1), 8-9.
64. Dincer, F., Karaaslan, M., Unal, E., & Sabah, C. (2013). Dual-band polarization independent metamaterial absorber based on omega resonator and octa-star strip configuration. *Progress In Electromagnetics Research*, *141*, 219-231.
65. Wang, B., Zhou, J., Koschny, T., Kafesaki, M., & Soukoulis, C. M. (2009). Chiral metamaterials: simulations and experiments. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, *11*(11), 114003.
66. Zhu, B., Wang, Z., Huang, C., Feng, Y., Zhao, J., & Jiang, T. (2010). Polarization insensitive metamaterial absorber with wide incident angle. *Progress In Electromagnetics Research*, *101*, 231-239.
67. Sabah, C., Dincer, F., Karaaslan, M., Unal, E., Akgol, O., & Demirel, E. (2014). Perfect metamaterial absorber with polarization and incident angle independencies based on ring and cross-wire resonators for shielding and a sensor application. *Optics Communications*, *322*, 137-142.
68. Yee, K. (1966). Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, *14*(3), 302-307.
69. Courant, R. (1943). Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. *Bulletin of the American mathematical Society*, *49*(1), 1-23.

70. Weiland, T. (1977). A discretization model for the solution of Maxwell's equations for six-component fields. *Archiv Elektronik und Uebertragungstechnik*, 31, 116-120.
71. Rokhlin, V. (1985). Rapid solution of integral equations of classical potential theory. *Journal of computational physics*, 60(2), 187-207.
72. Gunduz, O. T., & Sabah, C. (2016). Polarization angle independent perfect multiband metamaterial absorber and energy harvesting application. *Journal of Computational Electronics*, 15(1), 228-238.
73. Ding, F., Cui, Y., Ge, X., Jin, Y., & He, S. (2012). Ultra-broadband microwave metamaterial absorber. *Applied physics letters*, 100(10), 103506.
74. Palik, E. D. (Ed.). (1997). *Handbook of Optical Constants of Solids, Five-Volume Set: Handbook of Thermo-Optic Coefficients of Optical Materials with Applications*. Elsevier.
75. Ghosh, G. (1999). Dispersion-equation coefficients for the refractive index and birefringence of calcite and quartz crystals. *Optics communications*, 163(1-3), 95-102.
76. Johnson, P. B., & Christy, R. W. (1974). Optical constants of transition metals: Ti, v, cr, mn, fe, co, ni, and pd. *Physical Review B*, 9(12), 5056.
77. Hamouche, H., & Shabat, M. M. (2016). Enhanced absorption in silicon metamaterials waveguide structure. *Applied Physics A*, 122(7), 685.
78. Gevorgyan, A. H., & Rafayelyan, M. S. (2014). Light propagation in anisotropic metamaterials. II. Reflection from the half-space. *Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences)*, 49(1), 12-19.
79. Wang, H., Sivan, V. P., Mitchell, A., Rosengarten, G., Phelan, P., & Wang, L. (2015). Highly efficient selective metamaterial absorber for high-temperature solar thermal energy harvesting. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 137, 235-242.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BAĞMANCI, Mehmet  
 Uyruğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 01.01.1990, Şanlıurfa  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : 0 (553) 664 36 63  
 Faks : -  
 e-mail : mehmet.bagmanci@iste.edu.tr



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	İskenderun Teknik Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2018
Lisans	Mustafa Kemal Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2012
Lise	Şanlıurfa Anadolu Lisesi	2007

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-2015	DEDAŞ / Şanlıurfa	Mühendis

### Yabancı Dil

İngilizce

### Hobiler

Yüzme, Voleybol

## Yayınlar

1. Karaaslan, M., Bağmancı, M., Ünal, E., Akgol, O., Altıntaş, O., & Sabah, C. (2018). Broad band metamaterial absorber based on wheel resonators with lumped elements for microwave energy harvesting. *Optical and Quantum Electronics*, 50(5), 225.
2. Alkurt, F. Ö., Bağmancı, M., Karaaslan, M., Bakır, M., Altıntaş, O., Karadağ, F., ... & Ünal, E. (2018, February). Design of a dual band metamaterial absorber for Wi-Fi bands. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1935, No. 1, p. 060001). AIP Publishing.
3. Alkurt, F. Ö., Bağmancı, M., Karaaslan, M., Bakır, M., Altıntaş, O., Karadağ, F., ... & Ünal, E. (2018, February). Fire detection behind a wall by using microwave techniques. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1935, No. 1, p. 060002). AIP Publishing.
4. Bağmancı, M., Karaaslan, M., Altıntaş, O., Karadağ, F., Tetik, E., & Bakır, M. (2018). Wideband metamaterial absorber based on CRRs with lumped elements for microwave energy harvesting. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 52(1), 45-59.
5. Bakır, M., Karaaslan, M., Altıntaş, O., Bağmancı, M., Akdoğan, V., & Temurtaş, F. (2017). Tunable energy harvesting on UHF bands especially for GSM frequencies. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 1-10.
6. Bağmancı, M., Karaaslan, M., Ünal, E., Akgol, O., & Sabah, C. (2017). Extremely-broad band metamaterial absorber for solar energy harvesting based on star shaped resonator. *Optical and Quantum Electronics*, 49(7), 257.
7. Bağmancı, M., Karaaslan, M., Ünal, E., Akgol, O., Karadağ, F., & Sabah, C. (2017). Broad-band polarization-independent metamaterial absorber for solar energy harvesting applications. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 90, 1-6.
8. Karaaslan, M., Bağmancı, M., Ünal, E., Akgol, O., & Sabah, C. (2017). Microwave energy harvesting based on metamaterial absorbers with multi-layered square split rings for wireless communications. *Optics Communications*, 392, 31-38.
9. Akgol, O., Bağmancı, M., Karaaslan, M., & Ünal, E. (2017). Broad band MA-based on three-type resonator having resistor for microwave energy harvesting. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 51(2), 134-149.
10. Ünal, E., Bağmancı, M., Karaaslan, M., Akgol, O., Arat, H. T., & Sabah, C. (2017). Zinc oxide-tungsten-based pyramids in construction of ultra-broadband metamaterial absorber for solar energy harvesting. *IET Optoelectronics*, 11(3), 114-120.

## DİZİN

**A**

ABSTRACT · v, vii  
 ARAŞTIRMA BULGULAR VE  
 TARTIŞMA · 15  
 Ayrık Halka Rezonatör · 30  
 Ayrık Kare Halkalı Yapılı · vii,  
 15, 128

**B**

bant genişliği · 51

**C**

CRR · ix, x, 38, 39, 40, 41, 42,  
 43, 44, 45, 46, 47, 48

**Ç**

ÇİZELGELERİN LİSTESİ · viii

**D**

Dielektrik · xii, xiii, 19, 37, 49,  
 70, 72, 81, 91, 94, 113, 114,  
 115  
 dönüşüm verimliliği · ix, 35, 36,  
 59, 60, 61

**E**

EKLER · 124  
 elektrik alan · x, xi, xii, xiv, 3,  
 10, 44, 45, 51, 65, 71, 73, 79,  
 80, 82, 93, 94, 95, 100, 106,  
 114, 115  
 elektromanyetik · xiv, 1, 2, 3, 4,  
 7, 11, 12, 16, 24, 26, 73, 75,  
 85, 94, 106  
 Emilim katsayısı · 24  
 emilim verimliliği · ix, x, 35, 36,  
 60, 61  
 endüktans · 21, 71, 82  
 enerji hasatlama · iv, 7, 8, 22, 48,  
 117  
 etkin empedans · 76

**F**

FIT · iv, v, vii, xiv, 10, 11, 12,  
 13, 16, 26, 39, 42, 65, 85, 95  
 FIT Tabanlı Analiz Programı · 12

**G**

GİRİŞ · 1  
 görünür ışık · iv, xi, xii, 66, 72,  
 75, 76, 77, 78, 85, 95, 101,  
 102, 106, 107, 108, 109, 115,  
 117  
 güneş pili · iv, 65, 72, 96, 97,  
 108, 109, 112, 118

**H**

Halka Rezonatör · 25  
 hasat verimliliği · 35

**İ**

İÇİNDEKİLER · vii  
 İletim ve Yansıma  
 Parametrelerinden Emilim  
 Değerinin Elde Edilmesi · 12

**K**

kapasitans · 6, 70, 81  
 KAYNAKLAR · vii, 119  
 Kısaltmalar · xiv  
 kızılötesi · iv, 1, 6, 62, 66, 77, 85,  
 96, 107, 117  
 Koni · vii, 50

**M**

manyetik alan · x, xi, xii, xiv, 3,  
 4, 10, 44, 45, 51, 52, 53, 65,  
 73, 74, 75, 79, 80, 85, 93, 94,  
 95, 100, 106, 114, 115  
 MATERYAL VE YÖNTEM · 10  
 MTM · iv, v, x, xi, xii, xiv, 9, 13,  
 14, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45,  
 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53,  
 65, 67, 68, 69, 71, 74, 75, 77,

78, 79, 81, 83, 85, 86, 87, 88,  
 89, 90, 94, 102, 110, 112, 113,  
 116, 117  
 mükemmel sinyal emici · 27, 64,  
 85, 94

**N**

Network Analizör Cihazı · 14  
 Ni · 74, 83, 94, 102, 106, 107,  
 120, 122  
 Nikel · 74, 83, 94, 106, 109

**O**

Optik frekans · 117  
 Optik Frekans · vii, 65

**Ö**

Ölçüm düzeneği · 15  
 Ölçüm Metodu ve Ölçüm  
 Düzeneği · 13  
 ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR · 7  
 ÖZET · iv, vii  
 ÖZGEÇMİŞ · vii, 131

**P**

PEC · xiv, 13, 26, 58, 65, 68, 85,  
 88, 94, 106  
 PMC · xiv, 13, 26, 58, 65, 68, 85,  
 88, 95, 106  
 polarizasyon · ix, x, xi, xii, 8, 9,  
 20, 24, 32, 40, 41, 42, 53, 54,  
 63, 67, 68, 69, 78, 79, 87, 88,  
 89, 98, 100, 106, 108, 109,  
 111

**R**

Rexolite · 94  
 Rezonans · 44, 52, 70, 81, 100,  
 112

**S**

Sayısal Yöntemler · 10

SCR · viii, ix, 25, 26, 27, 28, 29,  
30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37,  
38, 44, 48

Sınır koşulları · xi, 84, 85

silikon dioksit · 74

**Simgeler** · xiii

**SİMGELER VE**

KISALTMALAR · xiii

sinyal emici · iv, viii, ix, x, xi, 8,  
9, 12, 18, 20, 24, 25, 26, 27,  
28, 30, 31, 32, 33, 34, 37, 38,  
39, 40, 41, 42, 44, 45, 46, 48,  
50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57,  
58, 59, 62, 63, 64, 65, 66, 67,  
68, 72, 74, 75, 76, 77, 78, 79,  
81, 82, 83, 85, 87, 88, 89, 94,  
106, 111, 113, 117, 118

Sinyal Emici · vii, 15, 25, 30, 38,  
50, 65, 74, 83, 94, 106, 125,  
126, 127, 128, 129, 130

SiO<sub>2</sub> · 65, 66, 70, 72, 74, 106,  
107

Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) ·  
10

Sonlu İntegrasyon Tekniği (FIT)  
· 11

SONUÇ VE ÖNERİLER · vii,  
117

---

## Ş

ŞEKİLLERİN LİSTESİ · ix

---

## T

TE · ix, x, xi, xii, xiv, 39, 40, 41,  
42, 45, 46, 48, 51, 53, 54, 55,  
56, 57, 58, 63, 67, 68, 69, 78,  
79, 87, 88, 89, 90, 97, 98, 99,  
100, 101, 108, 109

**TEKNOVERSİTE** · 1

TEM · x, xi, xii, xiv, 8, 26, 32,  
33, 53, 57, 58, 66, 67, 68, 69,  
70, 78, 79, 85, 87, 88, 89, 95,  
97, 98, 106, 108, 109, 110,  
111

TM · ix, x, xi, xii, xiv, 39, 40, 41,  
42, 51, 53, 54, 55, 56, 57, 58,  
63, 67, 68, 69, 78, 79, 87, 88,  
89, 90, 97, 98, 99, 100, 101,  
108, 109

Tungsten · xi, 84, 94, 102, 103  
tüketilen güç · 34

---

## U

ultraviyole · iv, 5, 66, 77, 85, 96,  
107, 118

uydu haberleşmesi · iv, 117

---

## V

volfram · 83

---

## W

WI-FI · iv, v, 117

WIMAX · iv, v, 16, 18, 19, 20,  
22, 117

---

## Y

**Yayımlar** · 132

Yıldız Şekilli Rezonatör · 65

---

## Z

Zaman Domeninde Sonlu Farklar  
Metodu (FDTD) · 10



**TEKNOVERSITE**