ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

METAMALZEMELER İLE ENERJİ HASATLAMA

Emrullah Uzay KARAKAYA

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2019

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Emrullah Uzay KARAKAYA tarafından hazırlanan **"Metamalzemeler ile Enerji Hasatlama"** adlı tez çalışması 25/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Barış AKAOĞLU
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri :

Başkan : Doç. Dr. Alpan BEK
Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı

Üye :Prof. Dr. Asım Egemen YILMAZ
Ankara Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye :Prof. Dr. Barış AKAOĞLU
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Özlem YILDIRIM
Enstitü Müdürü Vekili

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

25/06/2019



Emrullah Uzay KARAKAYA

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

METAMALZEMELER İLE ENERJİ HASATLAMA

Emrullah Uzay KARAKAYA

Ankara Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Barış AKAOĞLU

Günümüzde makro enerji hasatlama sistemlerinin yanı sıra mikro enerji hasatlama sistemleri de büyük önem arz etmektedir. Mikro ölçekteki enerji hasatlama sistemler, çevrede bulunan titreşim, basınç, elektromanyetik dalga v.b. fiziksel niceliklerden enerji elde edilmesini sağlayan sistemlerdir. Tez kapsamında, metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı yapılar kullanılarak ortamda bulunan elektromanyetik dalganın AC akıma çevrilmesi sağlanmıştır. Çalışmalar sırasında CST Microwave Studio tam dalga paket yazılım programı, hem yansıma değerleri hem de verimlilik değerlerinin elde edilmesi için kullanılmıştır. Günümüzde en çok kullanılan iletişim bantları olan GSM ve Wi-Fi bantlarını kapsayan 0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekanslarını kapsayan tek bantlı, çift bantlı ve dört bantlı metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı yapıları tasarlanmıştır. Ayrıca hedeflenen dört frekansta EM hasatlama yapabilecek çok katmanlı ve bükülebilir yapıların da simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Dört frekans bandında ve tek katmanlı olarak tasarlanan yapılar için en iyi hasatlama verimliliğine sahip MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısı fotolitografi yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen malzemeye ait yansıma parametresi laboratuvar ortamında yarı yankısız odada, network analizör kullanılarak ölçülmüştür.

Haziran 2019, 101 sayfa

Anahtar Kelimeler: Metamalzeme, enerji hasadı, doğrultucu devre, verimlilik

ABSTRACT

M.Sc Thesis

ENERGY HARVESTİNG WİTH METAMATERİAL

Emrullah Uzay KARAKAYA

Ankara University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Barış AKAOĞLU

Nowadays, macro-energy harvesting systems, as well as micro-energy harvesting systems are of great importance. Energy harvesting in the micro scale is the systems that provide energy from the physical quantities such as vibration, pressure, electromagnetic wave etc. in the environment. Within the scope of the thesis, the electromagnetic wave in the environment was converted to AC current by using metamaterial-based energy harvesting structures. During the studies, CST Microwave Studio full wave packet software program was used to obtain both reflectance and efficiency values. Single-band, dual-band and quad-band metamaterials-based energy harvesting structures covering the frequencies of 0.9 GHz, 1.8 GHz, 2.6 GHz and 5.8 GHz, which are the most widely used communication bands, are designed. In addition, simulation studies of multi-layered and bendable structures that can harvest EM at four targeted frequencies were performed. The energy harvesting structure based on metamaterial has been produced by photolithography method which has the best harvesting efficiency for structures designed in four frequency bands and single layer. The reflection parameter of the produced material was measured in a semi-anechoic chamber in the laboratory using the network analyzer.

June 2019, 101 pages

Key Words : Metamaterial, energy harvesting, rectifier circuit, efficiency

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Tüm çalışmalarım boyunca bilgi ve önerileriyle katkıda bulunan, destek ve güvenini bir an olsun esirgemeyen, danışman hocam Sayın Prof. Dr. Barış AKAOĞLU'na (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı Öğretim Üyesi), çalışmalarımı şekillendirmeme deneyimleriyle destek veren Sayın Prof. Dr. A. Egemen YILMAZ'a (Ankara Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Öğretim Üyesi), Sayın Dr. Sultan CAN'a (Ankara Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi) ve Sayın Doç. Dr. Fulya BAĞCI'ya (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi), çalışmam süresince yardımlarını eksik etmeyen arkadaşım Özgür DEMİRKAP'a ve öğrenim hayatım boyunca büyük bir emek ve sabır göstererek maddi ve manevi destek olan annem Güler KARAKAYA ve babam İsmail KARAKAYA'ya en içten duygularımla teşekkür ederim.

Emrullah Uzay KARAKAYA
Ankara, Haziran 2019

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK ..... **i**

ÖZET ..... **ii**

ABSTRACT ..... **iii**

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR ..... **iv**

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ ..... **vii**

ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **ix**

ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xiii**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ÖZETLERİ VE KAVRAMSAL TEMELLER **5**

2.1 Metamalzemeler **5**

2.2 Metamalzemelerin Deneysel Gösterimi **7**

2.3 Metamalzeme Tabanlı Elektromanyetik Dalga Soğurucular **12**

2.4 Metamalzeme Tabanlı Elektromanyetik Enerji Hasatlayoco Yapıları **16**

3. MATERYAL VE YÖNTEM **23**

4. ARAŞTIRMA BULGULARI **26**

4.1 Tek Birim Hücrede Metamalzeme Tabanlı Elektromanyetik Enerji Hasatlayıcı Yapıları **26**

4.1.1 Ayrık halka rezonatör yapısı ile tek bantlı enerji hasatlama **26**

4.2 İki Bantlı Metamalzeme Tabanlı Enerji Hasatlayıcı Yapıları **32**

4.2.1 Ayrık halka rezonatörler ile iki bantlı metamalzeme tabanlı elektromanyetik enerji hasatlayıcı **32**

4.2.2 Kare halka rezonatörler ile iki bantlı metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı **34**

4.3 Dört Bantlı Metamalzeme Tabanlı Enerji Hasatlayıcılar **37**

4.3.1 Dört bantlı metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı-1 ..... **37**

4.3.2 Dört bantlı metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı-2 ..... **40**

4.3.3 Dört bantlı metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı-3 ..... **46**

4.3.4 Dört bantlı metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı-4 ..... **48**

4.3.5 Dört bantlı metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı-5 ..... **52**

4.3.6 Dört bantlı metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı yapısı-6 ..... **68**

4.4 Çok Katmanlı Metamalzeme Tabanlı Elektromanyetik Enerji Hasatlama **73**

4.4.1 Çok katmanlı metamalzeme tabanlı elektromanyetik enerji hasatlayıcı..... 73
4.5. Bükülebilir Metamalzeme Tabanlı Elektromanyetik Enerji Hasatlama..... 85
4.5.1 Bükülebilir özellikli metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı yapısı 85
5. SONUÇ..... 90
KAYNAKLAR 95
ÖZGEÇMİŞ..... 98

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	Soğurma Oranı
C	Kapasitans
E	Elektrik Alan
e	Elektron Yükü
ε	Elektriksel Geçirgenlik Sabiti
ε_r	Etkin Elektriksel Geçirgenlik Sabiti
$\varepsilon(\omega)$	Frekansa Bağlı Elektriksel Geçirgenlik
F	Fraksiyonel Hacim
k	Dalga Vektörü
L	İndüktans
m	Elektron Kütlesi
m_{eff}	Etkin Elektron Kütlesi
μ	Manyetik Geçirgenlik Sabiti
μ_r	Etkin Manyetik Geçirgenlik Sabiti
$\mu(\omega)$	Frekansa Bağlı Manyetik Geçirgenlik
N	Elektron Yoğunluğu
N_{eff}	Etkin Elektron Yoğunluğu
n	Kırılma İndisi
P_g	Gelen EM Dalganın Gücü
P_t	Devre Elemanı Üzerinde Harcanan Güç
R	Yansıma
R_i	Devre Elemanılarının Toplam Direnci
S_{11}	Yansıma için Saçılma Parametresi
S_{21}	İletim için Saçılma Parametresi
T	İletim
tanδ	Kayıp Tanjantı
V_i	Devre Elemanı Üzerinde Toplam Gerilim
ω	Açısal Frekans

ω_p	Plazma Frekansı
η	Verimlilik
γ	Sönümlenme Sabiti
Φ	Manyetik Akı

Kısaltmalar

EM	Elektromanyetik
MM	Metamalzeme
SRR	Ayrık Halka Rezonatör
SSRR	Kare Ayrık Halka Rezonatör
ENG	Elektrik Negatif
MMA	Metamalzeme Tabanlı Soğurucu
DNG	Çift Negatif Ortam

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 İleri yayılan dalga (a) ters yayılan dalga (b) 5
Şekil 2.2 ε ve μ değerlerinin alabileceği işaretlerin kombinasyonu ve malzeme özelliklerini gösteren şema..... 6
Şekil 2.3 İlk olarak ε negatif ortamın gözlendiği periyodik yapıya sahip iletken teller 8
Şekil 2.4 Yapay MNG ortamın elde edilmesi için kullanılan SRR yapıları 10
Şekil 2.5 Yapay olarak elde edilen ilk DNG metamalzeme yapısı 12
Şekil 2.6 Metamalzeme tabanlı elektromanyetik (EM) dalga soğurucu yapısının katmanları 13
Şekil 2.7 Çalışmada önerilen iki bandlı MMA yapısı..... 14
Şekil 2.8 Tasarlanan soğurucu yapısının genel görünümü (sol üst), yandan görünümü (sağ üst) ve üretilen numunenin görünümü (alt) 15
Şekil 2.9 Aynı taban alanına sahip anten ve SRR yapıları (T. Almoneef, 2012)..... 18
Şekil 2.10 Üretilen ELC rezonatörlerinin ön yüzü (a) ve arka yüzü (b) 19
Şekil 2.11 EM enerji hasadında kullanılan U şeklinde rezonatör yapıları (M. Bakır, v.d. 2018)..... 21
Şekil 2.12 Kelebek şekilli kapalı halka rezonatör yapısının ön yüzü (a) ve arka yüzü (b) (X. Zhang, v.d., 2017)..... 22
Şekil 3.1 Devre elemanlarını üretilen numuneye entegre etmek için kullanılan lehimleme cihazı 24
Şekil 3.2 Metamalzeme Araştırma Grubu bünyesinde bulunan VNA ve horn anten setine ait görsel 25
Şekil 4.1 Tek bantlı hasatlayıcı yapısına ait birim hücre görüntüsü (a), elektrik alan uyarım yönü (b)..... 27
Şekil 4.2 Yansıma parametresinin alt taş kalınlığına göre değişimi (r_o= 20 mm,w= 24mm, l= 24 mm, t= 2 mm, g= 1 mm, R= 3000 Ωve ε_r= 2.2) 28
Şekil 4.3 Farklı alttaş kalınlıklarına ait verimlilik grafiği (r_o=20 mm, w=24 mm, l=24 mm, t=2 mm, g=1 mm, R=3000 Ω ve ε_r=2.2) 28
Şekil 4.4 S_{11} parametresinin devre elemanına göre değişimi (r_o=20 mm, w=24 mm, l=24 mm, t=2 mm, g= 1 mm, h= 1,575 mm ve ε_r=2,2)..... 29

Şekil 4.5 Verimliliğin devre elemanı değerine göre değişimi (r_o=20 mm, w=24 mm, l=24 mm, t=2 mm, g=1 mm, h_s=1,575 mmve ε_r= 2,2) 30
Şekil 4.6 S_{11} parametresinin alt taş malzeme türüne göre değişimi (r_o=20 mm, w=24 mm, l=24 mm, t=2 mm, g=1 mm h_s=1.575 mm ve R=3000 Ω) 31
Şekil 4.7 Devre elemanı üzerinde harcanan güç cinsinden alt taş malzeme çeşidine göre değişimi (r_o=20 mm, w=24 mm, l=24 mm, t=2 mm, g=1 mm, h_s=1,575 ve R=4000 Ω) 31
Şekil 4.8 1,8 GHz ve 2,6 GHz frekansları için tasarlanan EM dalga hasatlayıcı (a), yapıya gönderilen EM dalganın elektrik alan yönelimi (b) 33
Şekil 4.9 Tasarlanan ayrık halka rezonatörlere bağlanan devre elemanı üzerinden harcanan güç 33
Şekil 4.10 SSRR'lerden oluşan EM dalga hasatlayıcının birim hücre görünütüsü (a), EM dalganın elektrik alan yönelimi (b) 35
Şekil 4.11 Metamalzeme tabanlı hasatlayıcının S_{11} grafiği 36
Şekil 4.12 Devre elemanı üzerinde harcanan güç 36
Şekil 4.13 Geliş açısı θ'ya bağlı verimlilik grafiği 37
Şekil 4.14 4BT-1'e ait birim hücre görüntüsü (a), elektrik alan yönelimi (b) 38
Şekil 4.15 Tasarıma ait verimlilik grafiği 39
Şekil 4.16 Tasarlanan birim hücre yapısı (a), EM dalganın elektrik alan yönelimi (b) .. 41
Şekil 4.17 Farklı alttaşlar kullanılarak elde edilen RF-AC verimliliği 42
Şekil 4.18 Yapıya üçünde devre elemanı eklendikten sonra birim hücre görüntüsü 43
Şekil 4.19 Mikrodalga-AC dönüşüm verimliliği 44
Şekil 4.20 Rezonas frekanslarında birim hücredeki yüzey akım dağılımları a) 0,95 GHz için b) 1,85 GHz için c) 2,6 GHz için d) 5,8 GHz için 45
Şekil 4.21 Simülasyon programında birim hücrede hapsedilen güç 46
Şekil 4.22 SRR'ler ile MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısına ait birim hücre görüntüsü 47
Şekil 4.23 RF-AC verimlilik grafiği 48
Şekil 4.25 Birim hücrede gerçekleştirilen RF-AC çevrim verimliliği 50
Şekil 4.26 Birim hücre üzerinde oluşan yüzey akım dağılımları 0,94 GHz'de (a), 1,82 GHz'de (b), 2,51 GHz'de (c), 4,9 GHz'de (d) 51

Şekil 4.27 Dört bantlı MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısına ait birim hücre görüntüsü 53
Şekil 4.28 Devre elemanları üzerinde harcanan güç 54
Şekil 4.29 Birim hücreye ait yüzey akım dağılımları 0,9 GHz için (a), 1,8 GHz için (b) 2,6 GHz için (c) 5,8 GHz için (d) 55
Şekil 4.30 Parametrik analizler sonucunda elde edilen yapının birim hücre görüntüsü 56
Şekil 4.31 Simülasyon çalışmalarının ardından elde edilen verimlilik grafiği 57
Şekil 4.32. Üretilen MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısı, üretilmeden önce (a) üretildikten sonra (b) 59
Şekil 4.33 S parametresi ölçüm düzeneğinin genel çizimi 59
Şekil 4.34 MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısına ait simülasyon programında elde edilen (a) yapılan ölçümde elde edilen S_{11} grafikleri (b) 60
Şekil 4.35 CST Microwave Studio (a) ve Ansoft HFSS (b) programlarında tasarlanan yapıya ait birim hücre görüntüleri 62
Şekil 4.36 Tasarım 11-3'e ait verimlilik grafiği 63
Şekil 4.37 Birim hücreye ait yüzey akım dağılımları 0,9 GHz için (a) 1,8 GHz için (b) 2,6 GHz için (c) 5,8 GHz için (d) 64
Şekil 4.38 Metamalzeme tabanlı EM enerji hasatlayıcı 65
Şekil 4.39 Yarı yankısız odada yansıma katsayısı parametrelerinin ölçümü 66
Şekil 4.40 Laboratuvar ortamında ölçülen S_{11} spektrumu 67
Şekil 4.41 CST ve HFSS simülasyon programlarından ve ölçüm sonucunda elde edilen S_{11} grafiği 67
Şekil 4.42 Birim hücreye ait geometrik yapı (a) yapıya gönderilen EM dalganın elektrik alan yönelimi (b) 68
Şekil 4.43 MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısına ait verimlilik grafiği 70
Şekil 4.44 EM dalganın geliş açısı olan θ'nın pozitif yönde (a) ve negatif yönde (b) değişiminin verimlilik grafiği 71
Şekil 4.45 Birim hücrede oluşan yüzey akım dağılımları 0,9 GHz için (a) 1,8 GHz için (b) 2,6 GHz için (c), 5,8 GHz için (d) 72

Şekil 4.46 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekans bantları için tasarlanan birinci (ön) katman (a) ve 0,9 GHz ve 1,8 GHz frekans bantları için tasarlanan ikinci (arka) katman (b) 74
Şekil 4.47 Çok bantlı yapıda devre elemanında harcanan güç grafiği 75
Şekil 4.48 Katmanların yeri değiştirildikten sonra elde edilen verimlilik grafiği 76
Şekil 4.49 Optimize edilen çok katmanlı yapının ön yüzü (a) ve arka yüzü (b) 76
Şekil 4.50 Çok katmanlı MM tabanlı EM enerji hasatlayıcının verimlilik grafiği 78
Şekil 4.51 Arka katmandaki birim hücrede bulunan SSRR'lerin sayısının çoğaltılmış görseli 79
Şekil 4.52 İkinci katmanda sayısı artırılan rezonatörlerden sonra elde edilen verimlilik grafiği 80
Şekil 4.53 Frekansa bağlı verimlilik grafiği 82

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 Tasarıma ait hedef frekanslardaki verimlilik değerleri 54
Çizelge 4.2 Tasarıma ait hedef frekanslardaki verimlilik değerleri 58
Çizelge 4.3 Tasarıma ait hedef frekanslardaki verimlilik değerleri 63
Çizelge 4.4 birim hücre parametrelerinin değerleri (Şekil 4.49) 77
Çizelge 4.5 Yapıya ait parametrelerin değerleri 81
Çizelge 4.6 Frekanslara karşılık gelen verimlilik değerleri 82
Çizelge 4.7 Geliş açısının değişiminin verimliliğe etkisi 89

1. GİRİŞ

Tarih boyunca insanoğlu, enerji ihtiyacını gidermek için, su çarklarından yel değirmenlerine, termik santrallerden hidroelektrik ve nükleer santrallere kadar birçok yöntem geliştirmiştir. Geliştirilmiş olan büyük elektrik santrallerinin yanı sıra günümüz dünyasında, teknolojinin ilerlemesi ile küçülen elektronik cihazlar ve bunların ihtiyaç duydukları enerjinin nispeten düşük olması mikro ölçekli enerji hasatlama fikirlerini ortaya çıkarmıştır. Günümüzde çevremizi saran otonom akıllı sistemlerin sayısı her geçen gün artmaktadır. Otonom sistemlerin yanı sıra kendi aralarında iletişim kuran sistemler de günlük hayatımızın içine girmektedirler. Söz konusu sistemler ile birlikte, dünyada birbirine bağlı sayısız sensör ağlarının varlığı kaçınılmaz olacaktır. Büyük bir bölümü kablosuz olan sistemlerin enerji gereksinimleri, tekrar şarj edilmeleri ve belirli aralıklarla değiştirilmesi gereken bataryalar ile sağlanmaktadır. Dünyamızı çevrelemesi öngörülen nesnelerin internet teknolojisinin milyarlarca sensör ağlarından oluşacağı göz önünde bulundurulduğunda, var olan durumun pratik ve uygulanabilir olmadığı açıktır. Bu çerçevede, enerjisini otonom şekilde sağlayan güç kaynakları son derece kritik bir öneme sahiptir. Otonom güç kaynakları ise, geliştirilen sistemler gereği, küçük, maliyeti ucuz ve güvenilir olmak zorundadır.

Bahsi geçen tüm bu nedenlerden dolayı, son yıllarda, mikro enerji hasatlama sistemleri çalışmalarına duyulan ilgi oldukça artmıştır. Söz konusu sistemlere, titreşimden, küçük ölçekli güneş panellerinden, ısıdan ve elektromanyetik (EM) dalgalardan elde edilen enerjiler örnek olarak gösterilebilir. Düşük enerji kapasiteli ve yenilenebilir enerji kategorisinde bulunan bu sistemler, askeri ve sivil olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadırlar.

Metamalzemeler (MM), doğada bulunmayan optik özelliklere sahip olabilen, dalga boyu altı yapay malzemelerdir. İlk olarak Rus bilim adamı Victor Veselago tarafından 1967 yılında teorik olarak ortaya atılmıştır (Veselago, 1967). Victor Veselago, "malzemelerin negatif kırılma indisine sahip oldukları durumda yani elektriksel geçirgenlik sabitleri ε ve manyetik geçirgenlik sabitleri μ değerlerinin negatif olduğu durumda ne olurdu?" sorusuna cevap aramıştır. Yaptığı hesaplamalar sonucunda söz

konusu durumun nedensellik ve pasiflik ilkelerini koruyarak Maxwell denklemlerini sağladığını göstermiştir. Aradan geçen uzun yılların ardından 1998 yılında J. Pendry ve çalışma arkadaşları tarafından ilk ε negatif yapay malzemeler üretilmiştir. Negatif ε özelliği, EM dalganın elektrik alan bileşeninin, iletken malzemelerden oluşan çubuklardan oluşturulmuş ortama, paralel olarak gönderilmesi ile sağlanmıştır. Böylece yapı elektriksel olarak uyarılmış ve negatif elektriksel geçirgenlik değeri elde edilmiştir. Daha sonra Smith vd. tarafından 2001 yılında elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik değerleri negatif olan yapay malzeme üretilmiştir. Laboratuvar ortamında, iletken ayrık kare halka rezonatörler ve çubuklardan oluşan yapıya, EM dalganın elektrik alan bileşeni paralel, manyetik alan bileşeni ise dik doğrultuda iletilerek, hem negatif elektriksel geçirgenlik hem de negatif manyetik geçirgenlik elde edilmiştir. Metamalzemelerin boyutu, üzerine gelen EM dalganın malzemeyi bir ortam olarak algılaması için oldukça önemli olduğundan, metamalzemelerin boyutunun, üzerine gelen EM dalganın, dalga boyunun onda biri ile dörtte biri oranında bir skalaya sahip olması gerekmektedir.

EM dalga soğurucular, dalgaların üst üste binmesi ilkesine dayanan soğurucular ve rezonatif soğurucular olarak ayrılmaktadırlar. Rezonatif soğuruculara örnek olarak, metamalzemelerin uygulama alanlarından biri olan EM dalga soğurucular gösterilebilir. Metamalzeme tabanlı EM dalga hasatlayıcılar, oluşturulan etkin ortamın elektriksel ve manyetiksel geçirgenlik sabitlerinin manipülasyonu ile elde edilmektedir (Landy vd., 2008). MM yapıların, üzerine gelen EM dalgayı soğurabilmesi için, etkin ortamın empedans değerinin, havanın empedans değeri (377 Ohm) ile eşleşmesi gerekmektedir. Söz konusu yapılar üç katmandan oluşmaktadır. Birinci katman, meta yüzey olarak isimlendirilen metalik desenden oluşan kısımdır. İkinci katman, dieletrik tabakadan oluşmaktadır ve EM dalganın soğurulması için gerekli boşluğu sağlamaktadır. Ayrıca yüksek kayıplı bir dielektrik malzeme kullanıldığında söz konusu katman, EM dalganın soğurulmasına katkı sağlamaktadır. Üçüncü katman ise toprak düzleminden oluşmaktadır. Malzemesi metal olan bu kısmın sistemdeki görevi, EM dalganın yapının arkasına geçmesini engellemektedir, bir diğer ifade ile iletimi sıfırlamaktır. Böylece EM dalganın geri yansıması sağlanmaktadır.

Enerji hasatlama, ortamda bulunan enerjinin cihaz ya da sistem tarafından hapsedilerek, kullanışlı elektrik enerjisine dönüştürülmesi olarak tanımlanmaktadır [microenergyhar]. Günümüz teknolojisinde kulanılan elektronik cihazların (sensör ağları v.b.), mW mertebesinde düşük güç ile çalışması, ihtiyaç duyulan gücün enerji hasadı ile elde edilmesi fikrini ortaya çıkarmıştır ve son yıllarda oldukça ilgi görmektedir. Kablosuz iletişim sistemlerinin hızla gelişmesi ve hayatımızın her alanına dâhil olan mobil cihazların iletişim sağlamak için kullandığı EM dalgalar, ister istemez çevremizde EM kirliliğe neden olmaktadır. Çevremizde süreklilik arz eden elektromanyetik kirlilikten faydalanılarak enerji elde edilmesi, güneş panellerindeki gündüz gece bağımlılığı ya da termo elektrik sistemlerde gerekli olan ısı farkı gibi koşullara bağlı olmaksızın enerji üretilebilmesini sağlamaktadır. Metamalzeme ile enerji hasadı sistemleri de ortamdaki elektromanyetik dalganın soğurulması ile elde edilmektedir. Metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcılar ise ortamda var olan elektromanyetik dalgayı hapsedip enerji üretmektedir. Güneş panellerinde ya da termo elektrik sistemlerindeki koşullar günümüz dünyasındaki şehir hayatı düşünüldüğünde elektromanyetik tabanlı elektromanyetik hasatlayıcılara göre daha keskindir. Günlük yaşantımızda kullandığımız mobil telefon ya da Wi-Fi bantlarında sürekli bir trafik ve buna bağlı olarak sürekli bir EM kirlilikten bahsedebilir. Söz konusu durum ise metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcılar için sürekli açık olan bir kaynak gibidir. Bu nedenle EM dalganın kaynak olarak kullanıldığı hasatlayıcı yapıları enerji akışı açısından daha avantajlıdır. İlk olarak 2012 yılında metamalzeme tabanlı EM enerji hasatlayıcı yapısı, ayrık kare halka rezonatör (SSRR) yapıları kullanılarak sunulmuştur. Söz konusu ayrık kare rezonatörlerin açıklık kısmına bir devre elemanı eklenmiştir. Böylece metamalzeme yapısında hapsolan EM dalganın iletken halka üzerinde indüklediği akım, devre elemanı üzerinde alternatif akım (AC) olarak harcanmıştır (Ramahi vd., 2012).

Tez kapsamında MM tabanlı EM enerji hasatlama işlemi için çevremizde elektromanyetik kirliliğin en fazla olduğu GSM ve Wi-Fi bantları hedef alınmıştır. 0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekanslarında tek bantlı, iki bantlı ve dört bantlı, ortalama %75 RF sinyalde, AC akıma çevrim verimliliğine sahip EM hasatlama yapabilecek tasarımlar yapılmıştır. CST Microwave Studio ve Ansoft HFSS tam dalga paket simülasyon programları, hem EM hasatlayıcı tasarımlarını yapmak hem de

saçılma parametresi, hasatlama oranı gibi verileri elde etmek için kullanılmıştır.

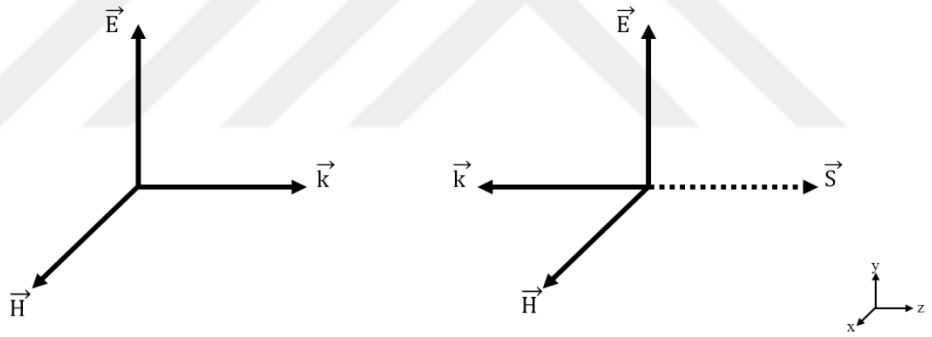
MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapıları tek bir birim hücre olarak tasarlanacağı gibi çok katmanlı olarak da tasarlanabilir. Bu kapsamda tek bantlı, iki bantlı ve dört bantlı birim hücre EM enerji hasatlama çalışmalarının yanı sıra dört bantlı enerji hasatlama tasarımının yapılması ve simülasyon çalışmaları tez kapsamında yapılan çalışmalardan biridir. Ayrıca enerji hasatlayıcı yapılarının sadece düz yüzeylere değil silindirik yüzeylere de uygulanması için bükülebilir MM tabanlı enerji hasatlayıcı çalışmaları yapılmıştır.

En yüksek verimlilik oranına sahip birim hücre, fotolitografi yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Üretilen MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısına devre elemanları lehimlendikten sonra ölçüme hazır hale getirilmiştir. Vektör network analizör ve horn anten seti kullanılarak laboratuvar ortamında yarı yankısız oda oluşturularak üretilen numunenin S parametresi ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ VE KAVRAMSAL TEMELLER

2.1 Metamalzemeler

İlk olarak 1967 yılında Rus bilim adamı Victor Veselago tarafından, "eğer negatif kırılma indisine sahip bir malzeme olsaydı ne olurdu?" sorusuna cevap aranmış ve negatif kırılma indisine sahip bir malzemenin Maxwell denklemlerini sağladığı teorik olarak gösterilmiştir. Böylece negatif kırılma indisine sahip malzemelerin nedensellik ve pasiflik ilkelerini sağladığı ispatlanmıştır. Veselago tarafından ortaya konulan malzemeler şekil 2.1'de görüldüğü gibi, ters yayılma etkisi gösterdiği için solak malzemeler olarak adlandırılmıştır. şekil 2.1(b)'de görüldüğü gibi EM dalga ters yayılma özelliği göstermesine rağmen enerji akış vektörünün yönü ileri yayılan dalga yönü ile aynıdır.



(a) (b)

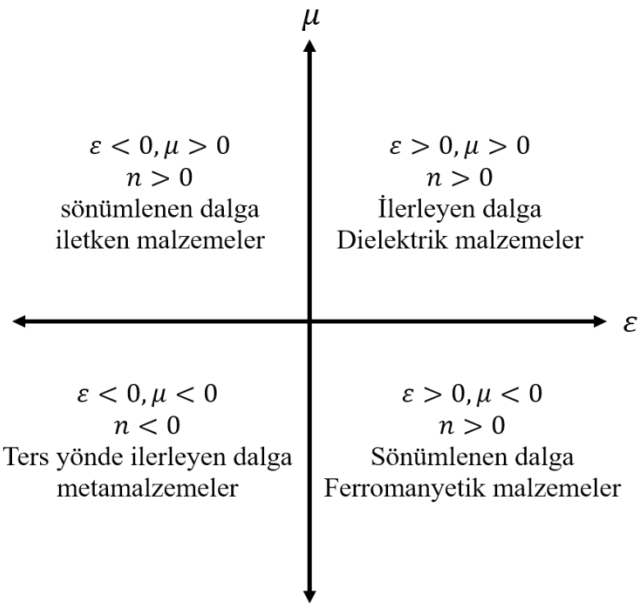
Şekil 2.1 İleri yayılan dalga (a) ve ters yayılan dalga (b)

Yapay malzemelerin solak malzeme özelliği sergilemeleri için homojen yapıda olmaları gerekmektedir. Homojen ortam özelliklerinin sağlanması için, yapının hücre boyutunun gelen dalganın dalga boyundan çok daha düşük olması gerekmektedir. Bu yüzden oluşturulan yapay malzemenin hücre boyutunun, EM dalganın dalga boyunun çeyrek katı olması etkin homojenlik limiti olarak tanımlanmaktadır (Hong vd., 2001). Homojenlik koşulu sağlandıktan sonra oluşturulan yapay malzeme doğal bir malzeme gibi davranarak, yayılma doğrultusu boyunca elektromanyetik özellikler açısından aynı tepkileri verecektir.

Malzemeler için temel olarak iki yapısal parametreden bahsedilebilir, bunlar elektrik geçirgenlik ε ve mayetik geçirgenlik μ sabitleridir ve malzemenin kırılma indisini belirlemektedirler.

$$n = \pm\sqrt{\varepsilon_r \mu_r} \tag{2.1}$$

Denklem 2.1'de yer alan ε_r ve μ_r ifadeleri sırasıyla relatif elektriksel ve manyetik geçirgenli katsayılarıdır ve malzemlerin sahip olduğu değerler ile boş uzayın sahip olduğu değerlerin oranı ile elde edilmektedir. Boş uzayın elektriksel ve manyetik geçirgenlik değerleri ise sırasıyla 8.854×10^{-12} ve $4\pi \times 10^{-7}$ dir. Elektriksel ve manyetik geçirgenlik sabitlerinin alacağı pozitif ve negatif değerler göz önünde bulundurulduğunda karşımıza dört farklı kombinasyon çıkmaktadır. Kombinasyonlardan üçü, doğal malzemelerde gözlenirken, ε ve μ değerlerinin her ikisinin de negatif olduğu anlık durumlar, doğal malzemelerde bulunmayan bir özelliktir ve malzemenin negatif kırılma indisine sahip olmasına neden olmaktadır. Şekil 2.2'de ε ve μ değerlerinin alacağı kombinasyonlar ve kombinasyonların neden olduğu malzemelerin özellikleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2 ε ve μ değerlerinin alabileceği işaretlerin kombinasyonu ve malzeme özelliklerini gösteren şema

Malzemenin sahip olduğu ε ve μ değerlerinin negatif olduğu durumda doğal malzemelerde gözlenmeyen olgular meydana gelmektedir. Söz konusu olgulara negatif kırılma (Smith, 2003), ters doppler etkisi (Lee vd. 2010), ters Cerenkov ışıması (Grzegorczyk, vd. 2003), dalgaboyualtı odaklama (Pendry, 2000) gibi özellikler örnek gösterilebilir.

2.2 Metamalzemelerin Deneysel Gösterimi

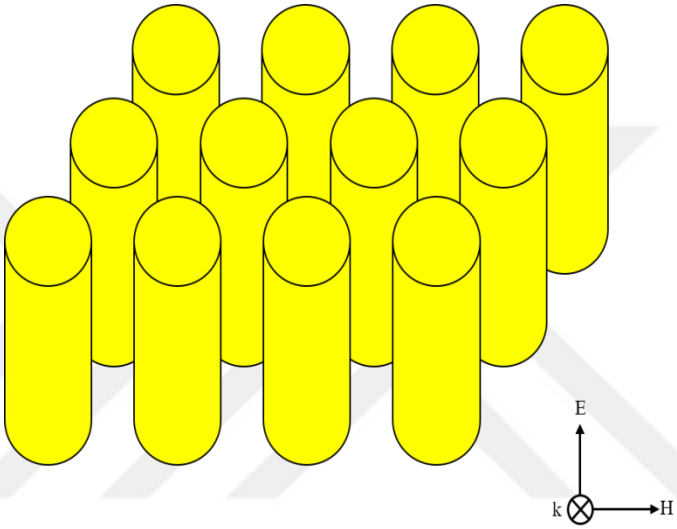
Manyetik geçirgenlik pozitifken elektriksel geçirgenliği negatif olan ortamlar var olabilmektedir. Örneğin gümüş, altın, bakır gibi metaller kızılötesi ve görünür bölge spektrumlarında epsilon negatif (ENG) özelliği göstermektedir. Optik frekanslardaki metaller, Drude ilişkisine göre frekansla değişen elektrik geçirgenliği ile nitelendirilir.

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 \left[1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}\right] \tag{2.2}$$

Denklem 2.2'de ω_p metallerin plazma frekansına eşittir ve $\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{m\varepsilon_0}$ denklemi ile elde edilir. Burada *N* elektron yoğunluğuna, *e* elektronun yüküne ve m elektronun kütlesine karşılık gelmektedir. Denklem 2.2'de yer alan γ değeri ise plazma osilasyon genliğinin sönümlenme oranıdır. Sönümlenme oranının sıfıra eşit olduğu ve $\omega < \omega_p$ koşullarının sağlandığı durumlarda, elektriksel geçirgenlik değeri sıfırdan küçük olmaktadır. Sönümlenme sabitinin morötesi bölgedeki örnek değeri (bakır için) yaklaşık $4x10^{23}$ rad/sn iken plazma frekansı değeri tüm frekanslarda $\omega < \omega_p$ koşulunu sağlamaktadır. Söz konusu durum dielektrik sabitinin sıfırdan küçük çıkmasına neden olmaktadır ancak aynı zamanda $\omega << \gamma$ koşulu ortaya çıktığı için elektriksel geçirgenlik değerinin sanal kısmı baskın hale gelmektedir. Elektriksel geçirgenlik değerinin sanal kısmı soğurmayı kontrol ettiği için bu durum EM dalganın soğurulmasına neden olmaktadır. Bu durum mikrodalga bölgesi için bir sınırlama meydana getirmektedir (Wartak vd. 2011).

Veselago'nun ileri sürdüğü ε ve μ değerlerinin negatif olduğu çift negatif ortam (double negative media DNG) elde edilmesi için ilk adım olarak yukarıda bahsedilen

sınırlamanın ortadan kaldırılması ile elde edilen ENG yapıların ortaya çıkarılması gösterilebilir. Söz konusu yapay ENG yapıları ilk olarak Imperial College of London'dan J. Pendry ve ekibi tarafından deneysel olarak ortaya çıkarılmıştır. Şekil 2.3'de gösterildiği gibi iletken çubuk yapısıyla, plazma rezonansının neden olduğu sınırlamanın üstesinden gelinmiş ve mikrodalga bölgesinde ENG ortama sahip bir malzeme yaratılmıştır.



Şekil 2.3 ilk olarak ε negatif ortamın gözlendiği periyodik yapıya sahip iletken teller

Yarıçapları r olan ince metalik çubuklar periyodik olarak şekil 2.3'deki gibi xy düzleminde dizilmiştir. Söz konusu periyodik yapının birim hücre uzunluğu ise a ile temsil edilmektedir. Yapının üzerine gelen EM dalganın elektrik alan bileşeni $\mathbf{E} = E_0 e^{-i(\omega t - kz)}\hat{\mathrm{z}}$ olarak belirlenirse çubukların içerisindeki serbest elektronlar elektrik alan doğrultusunda hareket etmeye zorlanmış olacaklardır. Eğer yapının üzerine gelen EM dalganın dalgaboyu yapıya ait birim hücre kenar uzunluğu olan a ile karşılaştırıldığında çok büyük ise ($\lambda >> a$) bütün yapıda, elektronlar (iletken çubuğun içindeki) elektrik alan doğrultusundan hareket eden bir etkin ortam meydana getirecektir. Elektronların hareketi iletken çubuklar ile sınırlı olduğu için etkin ortam içinde Denklem 2.3'de verilen etkin elektron yoğunluğu oluşturacaktır.

$$N_{eff} = \frac{\pi r^2}{a^2} N \tag{2.3}$$

Denklem 2.3'de yer alan N değeri her bir iletken çubuktaki elektron yoğunluğunu, r iletken çubukların yarıçapını ve a birim hücrenin kenar uzunluğunu temsil etmektedir. Yeterince ince bir iletken çubuk için, oluşturulan ortamın etkin elektron yoğunluğu olan N_{eff}, N'ye kıyasla çok daha küçük hale gelebilir, böylece üretilen yapay ortamın plazma frekansını önemli ölçüde azaltır. Örneğin yarıçapları 1 μm olan iletken çubukların kullanıldığı ve örgü sabitinin 5 mm olduğu bir yapay ortamın elektron yoğunluğu yaklaşık 1.3×10^{-7}N'dir. Görüldüğü gibi elektron yoğunluğu yedi basamak azalmaktadır.

İletken tellerden oluşturulan etkin ortamda, tellerin içerisinde hareket eden elektronların etkin kütlesi Denklem 2.4 ile verilmektedir.

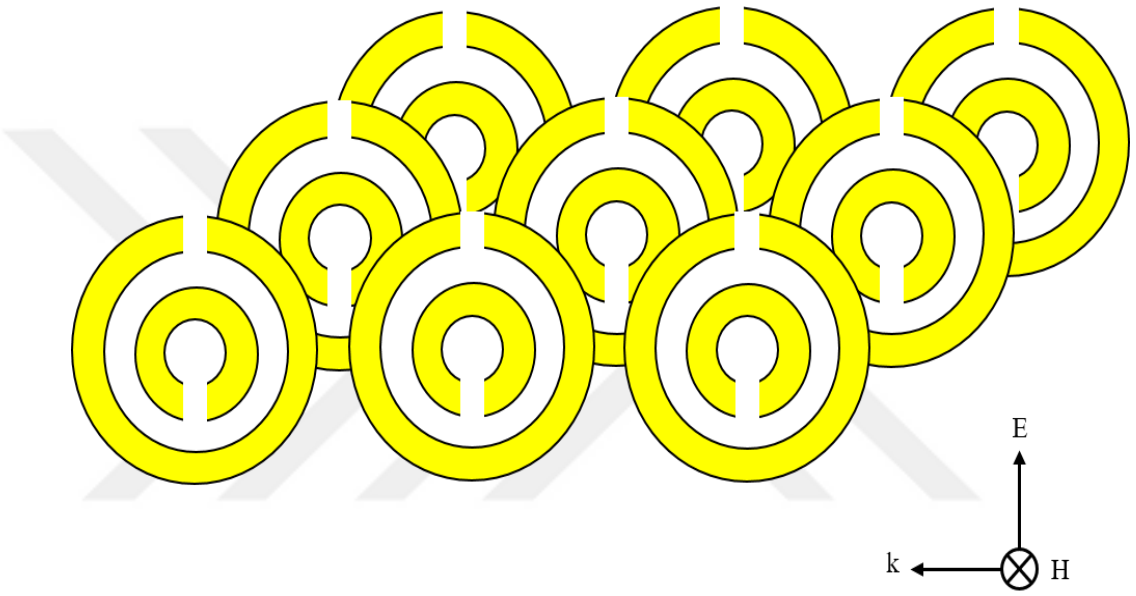
$$m_{eff} = \frac{\mu_0 N e^2 r^2 \ln a/r}{2} \tag{2.4}$$

Denklem 2.4'de yer alan parametreler yarıçap değeri 1μm olan bakır bir iletken çubuk ve örgü sabiti 5 mm ortamın m_{eff} değeri $1.3 \times 10^4 m_e$ olarak hesaplanmaktadır. Hesaplamadan görüldüğü gibi yapay ortamda bulunan elektronun etkin kütlesi serbest elektronun kütlesinden dört basamak daha yüksektir. Üretilen yapay ortamda hem etkin elektron kütlesi hem de etkin elektron yoğunluğunda meydana gelen değişiklikler elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde Denklem 2.5'de görüldüğü gibi etkin plazma frekansına neden olmaktadır.

$$\omega_p^2 = \frac{N_{eff} e^2}{m_{eff} \varepsilon_0} \tag{2.5}$$

Elde edilen parametreler sonucunda ince iletken çubuklar ile oluşturulan ortamın örgü sabiti, plazma frekansının 1/7 katıdır. Söz konusu değer daha önce tanımlanan etkin ortam koşulunu sağlamaktadır. Böylece elde edilen parametreler ile negatif ε değerine sahip yapay bir ortam elde edilmiştir (Pendry vd. 1996).

Manyetik geçirgenlik sabiti olan μ değerinin negatif, ε değerinin ise pozitif olduğu ortamlara μ negatif ortam (MNG) denmektedir. MNG özellikleri doğada sadece gyrotropic ya da gyromagnetic malzemelerde gözlenmektedir. Yapay olarak MNG malzeme elde etmek için ise şekil 2.4'te görüldüğü gibi eş merkezli ayrık halka rezonatörler (split ring resonator *SRR*) kullanılmaktadır. Şekil 2.4'teki yapı basit bir RLC devresi gibi çalışmaktadır. Metal halka bir R direnci ve L indüktansı oluşturmaktadır. Halkaların ayrık bölgelerinden ise C kapasitansı oluşmaktadır.



Şekil 2.4 Yapay MNG ortamın elede edilmesi için kullanılan SRR yapıları

Şekil 2.4'te gösterilen SRR yapısının üzerine gönderilen elekromanyetik dalganın manyetik alan bileşeni, yapıya dik olacak şekilde ayarlanmaktadır. Yapıya dik olarak gönderilen manyetik alan ise her bir ayrık halka üzerinde akım indüklemektedir. Ardışık x düzlemlerinde oturan halkalar birbirine yakınsa, her bir sütundaki halkalar arasındaki manyetik akı kaybı ihmal edilebilir olacaktır. Bu nedenle manyetik akı Denklem 2.6'daki gibi olacaktır.

$$\Phi = \frac{\mu_0 \pi r^2 I}{l} \tag{2.6}$$

Denklem 2.6'da yer alan *l* değeri ayrık halka rezonatörlerin arasındaki mesafeye, r ise

halka rezonatörlerin yarıçapına karşılık gelmektedir. Her bir halka rezonatördeki indüktans değeri ise Denklem 2.7'deki gibi olacaktır.

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\mu_0 \pi r^2}{l} \tag{2.7}$$

Tüm halkalar tarafından üretilen depolarize edici manyetik akı çizgilerinin, halka rezonatörlerin bulunduğu düzleme düzgün bir şekilde yayıldığı ve bunun iki SRR arasında karşılıklı bir indüktansa neden olduğu varsayılmaktadır (Wartak vd., 2011). Söz konusu indüktans, Denklem 2.8'de verilmiştir.

$$M = \frac{\pi r^2}{a^2} L = F \tag{2.8}$$

Denklem 2.8'de yer alan F, bir ayrık halka rezonatör yapısının işgal ettiği fraksiyonel hacme karşılık gelmektedir. Sonuç olarak ortamın etkin manyetik geçirgenlik değeri Denklem 2.9'da verilmiştir.

$$\mu_r = 1 - \frac{F}{1 - \frac{1}{\omega^2 LC} + \frac{iR}{\omega L}} \tag{2.9}$$

Manyetik geçirgenlik sabitinin negatif değerler aldığı aralık, $\frac{1}{\sqrt{LC}} < \omega_p < \frac{1}{\sqrt{LC(1-F)}}$ olarak verilmiştir.

Negatif elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik değerlerine sahip yapay malzemelerin ayrı ayrı elde edilmesinden sonra, ilk çift negatif (double nagative DNG) yapay malzeme Smith ve Kroll tarafından 2000 yılında elde edilmiştir. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi, iç içe geçmiş iletken ayrık halka rezonatörler ile iletken çubukların bir araya getirilerek oluşturulan etkin ortam DNG özellikleri yapay bir ortam ile elde edilmiştir (Smith ve Kroll, 2000).



Şekil 2.5 yapay olarak elde edilen ilk DNG metamalzeme yapısı

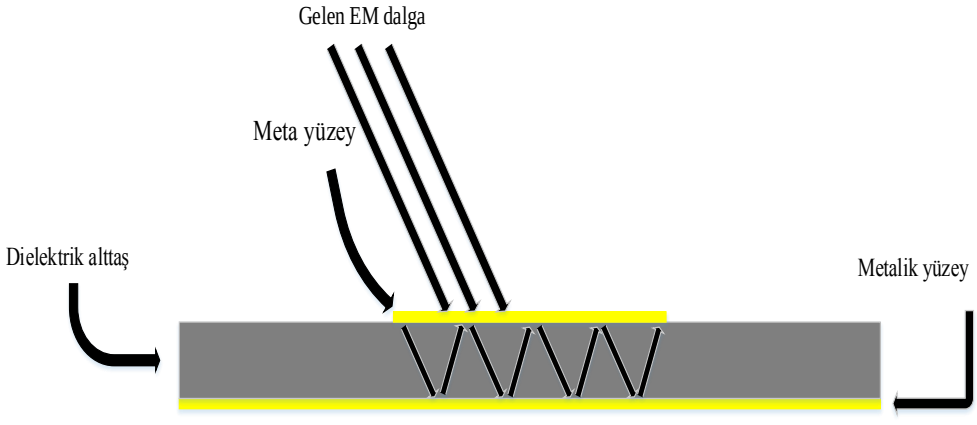
İlk metamalzeme yapısı literatüre kazandırıldıktan sonra metamalzemelerin uygulama alanları ve DNG ortamlarının iletim parametrelerinin iyileştirilmesine yönelik hem deneysel hem de teorik olarak çalışmalar oldukça hız kazanmıştır. Metamalzemelerin uygulama alanlarına örnek olarak süper lensler (Ramakrishna, ve Pendry, 2004, Zhang ve Liu, 2008), elektromanyetik görünmezlik (Pendry, vd., 2006, Cai vd., 2007), EM dalga soğurucu yapılar (Watts, vd., 2012), anten uygulamaları (Alù, vd., 2007), enerji hasadı (Ramahi, vd., 2012) ve son yıllarda kuantum metamalzemeler (Zheludev, 2010, Zagoskin, 2012, Wang, vd., 2019) gösterilebilir.

Metamalzemeler genellikle, birim hücrenin mimarisine ve kimyasal bileşenine bağlı olan periyodik ya da periyodik olmayan yapıya sahip makroskobik ölçekte bir kompozit olarak tanımlanmaktadır. Ancak metamalzemeler etkin bir ortam olarak kabul edilirse, birim hücre boyutunun dalgaboyu altı olması gerekmektedir (Cui vd., 2010). Metamalzemelerin birim hücre boyutunun dalgaboyu altında olması koşulu nedeni ile etkin ortam teorisi kullanılarak tanımlanmaktadır.

2.3 Metamalzeme Tabanlı Elektromanyetik Dalga Soğurucular

Metamalzeme tabanlı EM dalga soğurucular genel olarak rezonatif olmayan ve rezonatif yapılar olarak ikiye ayrılmaktadır. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen

metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı yapıları rezonatif EM dalga soğurucu tabanlı yapılar (Jeong, vd., 2018, Suen, vd., 2019) oldukları için, bu bölümde metamalzeme tabanlı rezonatif soğurucu yapılar incelenecektir. Metamalzeme tabanlı EM dalga soğurucular genelde üç katmandan oluşmaktadır. Birinci katman rezonanstan sorumlu meta yüzey olarak adlandırılan metalik desenden, ikinci katman toprak düzlem ile meta yüzeyi birbirinden ayıran dielektrik katmandan, üçüncü katman ise toprak düzlemden oluşmaktadır. İlk katman olan meta yüzeyin empedansı havanın empedansı olan 377 ohm'a eşit olmalıdır, bu sayede soğurucu yapısının üzerine gelen EM dalganın ön katmandan yansıması engellenir. İkinci katman olan dielektrik katman ise toprak düzlem ile meta yüzey arasında boşluk oluşturmaktadır ve bu bölgede meydana gelen çoklu girişimler ile soğurulma meydana gelmektedir. Ayrıca daha önce değinildiği gibi frekansa bağlı elektriksel geçirgenlik katsayısı reel ve sanal kısımlardan oluşmaktadır, elektriksel geçirgenlik sabitinin sanal kısmı ise soğurulmalara neden olmaktadır. Bu durum ikinci katmanda elektriksel geçirgenlik sabitinin sanal kısmının soğurmaya katkı yaptığını göstermektedir. Sonuç olarak ikinci katmanda yüksek bir soğurulma gerçekleştirmek için elektriksel geçirgenlik değerinin sanal kısmında büyük dielektrik malzemeler tercih edilmektedir (Shen, vd., 2011). Üçüncü katman olan toprak düzlem ise EM dalganın yapıdan iletilmesini engelleyerek yansıma yapmasını sağlamaktadır.



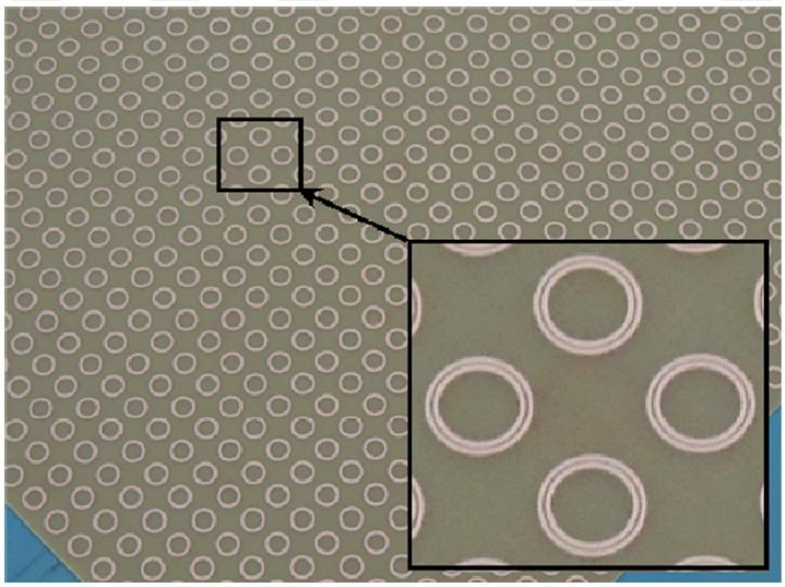
Şekil 2.6 Metamalzeme tabanlı EM dalga soğurucu yapısının katmanları

Yapı üzerinde EM dalganın ne kadar soğurulduğunu veren denklem, yansıma ve geçme parametrelerine bağlıdır ve Denklem 2.10'daki gibidir.

$$A = 1 - (R + T) = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (2.10)$$

Toprak düzlem, meta yüzeyden ve dielektrik katmandan geçerek gelen EM dalgayı geri yansıtır ve EM dalganın geçmesini engeller. Böylece Denklem 2.10, $A = 1 - |S_{11}|^2$ haline gelmektedir, iletim sıfıra yakın bir duruma geldiği için sadece yansıma parametresi incelenerek yapının üzerine gelen EM dalgayı hangi oranda soğurduğu hesaplanmaktadır. Metamalzeme tabanlı EM dalga soğuruculardа kullanılan meta yüzey, tasarımına ve/veya kullanılan katman sayısına bağlı olarak tek ya da çoklu frekanslarda soğurma özellikleri gösterebilir.

Metamalzeme tabanlı EM dalga soğuruculardа, meta yüzey katman olarak halka rezonatörlerin kullanılması oldukça yaygın bir yöntemdir. Meta yüzey katmanı için halka rezonatör kullanılmasının en önemli nedeni kare rezonatörlere göre bant genişliğinin görece daha fazla olmasıdır. Şekil 2.7'de görüldüğü gibi iki adet halka rezonatörün iç içe eklenmesi ile iki bantta soğurma gerçekleştiren EM dalga soğurucu çalışması yapılmıştır (Gosh, vd. 2015).

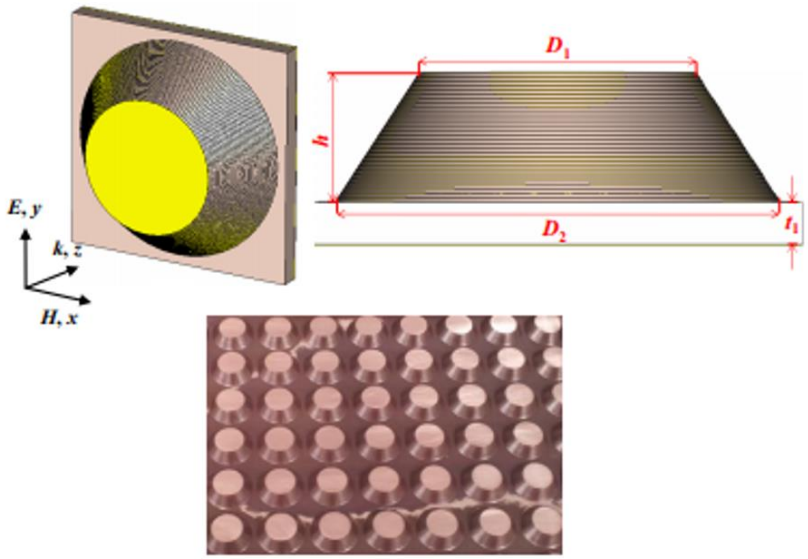


Şekil 2.7 Çalışmada önerilen iki bantlı MMA yapısı

Söz konusu çalışmada iki halka rezonatör kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında, EM dalganın geliş açısının normal doğrultusunda olduğu zaman, 9 ve 11

GHz'de sırasıyla %96,41 ve %93,61 oranında soğurma gerçekleştirilmiştir. Çalışmada alttaş olarak ε değeri 4,6 tanδ değeri 0,019 ve kalınlığı 0.8 mm olan FR4 kullanılmıştır. Çalışmada birim hücre boyutu 9 mm olarak verilmiş ve rezonans frekansına karşılık gelen dalga boyu, birm hücrenin kenarının yaklaşık 3.6 katına denk gelmektedir. Yapılan ölçümlerde ise ilk frekans 9,33 GHz'e ikinci frekans ise 11,63'e kaymıştır, soğurma oranları ise sırasıyla %99,07 ve %83.70 olarak hesaplanmıştır. Önerilen yapının meta yüzey tasarımının sonucu olarak polarizyondan bağımsız ve geliş açısına göre soğurma oranı hassasiyeti oldukça yüksek bir MMA soğurucu olduğu çalışmada vurgulanan diğer noktalardır.

Şekil 2.8'de görüldüğü gibi çok katmanlı bir yapı oluşturularak polarizasyondan bağımsız, bant genişliği artırılmış ve iki bantta soğurma işlemi gerçekleştirilmiştir (Kim, vd., 2015). Çalışmada önerilen yapıda iletken kısımlar için 0.036 mm kalınlığında bakır, dielektrik alttaş için ise 2.2 mm kalınlığında FR-4 malzemesi kullanılmıştır. Ayrıca her bir bakır katman arasında kullanılan yalıtkan tabaka için de 0.182 mm kalınlığa sahip FR-4 malzemesi kullanılmıştır.



Şekil 2.8 Tasarlanan soğurucu yapısının genel görünümü (sol üst), yandan görünümü (sağ üst) ve üretilen numunenin görünümü (alt)

MMA yapısının tasarımı ve nümerik çözümleri CST paket yazılım programı ile gerçekleştirilmiş ve 3,93 GHz ile 6,08 GHz arasında ve 9,95 GHz ile 10,46 GHz

arasında %90'nın üzerinde EM dalga soğurulmuştur. Böylelikle hem iki bantlı hem de geniş bant aralıklı MMA yapısı üretilerek ölçümler gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerde 3,88 GHz ile 6,08 GHz aralığında, 9,95 GHz ile 10,46 GHz aralığında ve 11,86 GHz ile 13,84 GHz aralığında %90'nın üzerinde soğurma gerçekleştiği raporlanmıştır. Üretimden önce gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında iki bantta ortaya çıkan soğurmanın ölçümde üç banda çıkması ise üçüncü dereceden harmonik rezonans frekansı olarak açıklanmıştır.

2.4 Metamalzeme Tabanlı Elektromanyetik Enerji Hasatlayıcı Yapıları

Teknolojik ilerlemeler hız kazandıkça günlük hayatımızda kullandığımız teknolojik cihazların da boyutları küçülmekte ve kullandıkları enerji miktarları azalmaktadır. Bu nedenle cihazların ihtiyaç duydukları enerjinin hasatlama yöntemleri ile elde edilmesi son yıllarda araştırmacıların oldukça ilgi duyduğu bir alandır. Ortamdaki sıcaklık farkından ya da titreşimden elde edilen enerji hasatlama yöntemlerinin yanında EM enerji hasatlama da oldukça ilgi çeken bir diğer enerji hasatlama yöntemidir.

Metamelzeme tabanlı soğuruculardа soğurulan EM dalga, bir önceki bölümde de anlatıldığı gibi meta yüzey katmanda akım indüklenmesine neden olmaktadır. Meta yüzey katmanda oluşturulan bir açıklık ile bu bölgede yoğun bir elektrik alan oluşturulması mümkündür. Oluşan elektrik alan, meta yüzeydeki açıklıkta bir voltaj meydana getirecektir. Böylece açıklık bölgesine yerleştirilen bir devre elemanı ile burada oluşan enerji toplanabilmektedir. Bir önceki bölümde EM soğurucunun dielektrik katmanında bulunan malzemenin elektriksel geçirgenlik değerinin sanal kısmı ne kadar yüksek olursa EM dalganın soğurulma oranına o denli katkı yaptığından bahsedilmiş ve bu durumun dielektrik katmanda yapının üzerine gelirken EM dalganın bir kısmının soğurulmasına neden olduğu belirtilmişti. Ancak söz konusu olan soğurulan EM dalgadan enerji elde edilmesi olunca bu durum değişmektedir. EM dalgayı hasatlama işleminde ise dielektrik katmanda meydana gelen kayıplar hasatlama verimliliğini düşüreceğinden, bu katmandaki malzeme seçiminde, malzemenin elektriksel geçirgenlik değerinin sanal kısmının düşük olması verimlilik açısından önemli bir ayrıntıdır.

Metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı yapısının üzerine gelen EM dalgayı AC akımına dönüştürme oranı verimlilik olarak tanımlanmaktadır. Söz konusu oran ise Denklem 2.11 ile hesaplanmaktadır.

$$\eta = \frac{P_t}{P_g} \tag{2.11}$$

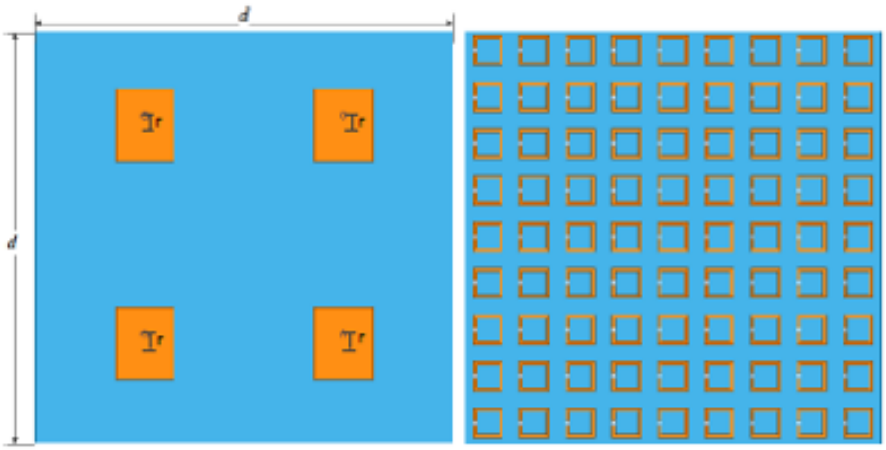
Denklem 2.11'deki η, EM dalgadan AC akıma çevirilen enerjinin verimliliğini, P_g, yapı üzerine gelen EM dalganın gücünü, P_t ise metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı yapısına entegre edilen devre elemanı ya da elemanları üzerindeki toplam zaman ortalamalı AC gücünü belirtmektedir. Eğer yapı üzerinde AC akımı toplayacak birden fazla devre elemanı var ise o zaman P_t değeri aşağıdaki Denklem 2.21 ile hesaplanmaktadır.

$$P_t = \sum_{i=1}^{n} \frac{V_i^2}{R_i} \tag{2.12}$$

Denklem 2.12'de yer alan V_i ve R_i, hasatlama işleminde enerji toplamak için kullanılan yapı üzerinde bulunan her bir devre elemanı üzerindeki gerilim ve dirence karşılık gelmektedir.

Ayrık halka rezonatörlerin açıklık kısmına devre elemanı entegre edilerek söz konusu kısımda depolanan gerilimin hasat edilme çalışması, Waterloo Üniversitesi'nde Thamer Almoneef tarafından tez çalışması olarak yapılmıştır (2012). Çalışma kapsamında 5.8 GHz frekansında çalışan SRR yapısının mikrodalgadan AC akıma dönüşme verimliliği incelenmiştir. Tasarlanan SRR yapılarını uyarmak için gönderilen EM dalganın manyetik alan bileşeninin metamalzeme yapısına dik doğrultuda gönderilmesi ile SRR yapıları manyetik olarak uyarılmıştır. Manyetik olarak uyarılan SRR yapıları üzerinde indüklenen akım sayesinde yapının açıklık kısmında çok yoğun olarak elektrik alan birikmektedir. Biriken elektrik alan ise SRR'lerin açıklık kısmında gerilim farkı oluşturmaktadır ve söz konusu gerilim farkını hasat etmek için devre elemanları kullanılmıştır. EM enerji hasatlama için kullanılacak devre elemanının (direnç) optimal değerini bulmak için 100 Ohm ile 10000 Ohm direnç değerleri arasında hesaplamalar

gerçekleştirilmiştir ve 4 kΩ değerinde en iyi hasatlama verimliliğine ulaşılmıştır. Yapı üzerine gelen EM dalganın mikrodalgadan AC akıma dönüştürülme verimliliği ise %40 civarında elde edilmiştir. Tek bir SRR yapısı üzerinde yapılan hesaplamalar ve analizlerin ardından, 9x9 dizi şeklinde üretilen SRR yapıları ile hasatlama uygulamasında kullanılan 2x2 dizi olarak üretilen standart yama anten ile boyut ve verimlilik değerleri açısından karşılaştırma yapılmıştır. Daha sonra yapılan çalışmalar geliştirilerek çeşitli dizi anten örüntüleri ile SRR yapıları karşılaştırılmıştır (Almoneef ve Ramahi, 2014). Şekil 2.9'da üretilen SRR yapıları ve yama anten yapıları görülmektedir. Şekil 2.9'da görüldüğü gibi 85x85 mm dielektrik alttaş tabanında 81 adet SRR yapısı tasarlanıp üretilebilirken aynı taban alanında sadece 4 adet yama anten yapısı tasarlanıp üretilebilmektedir.

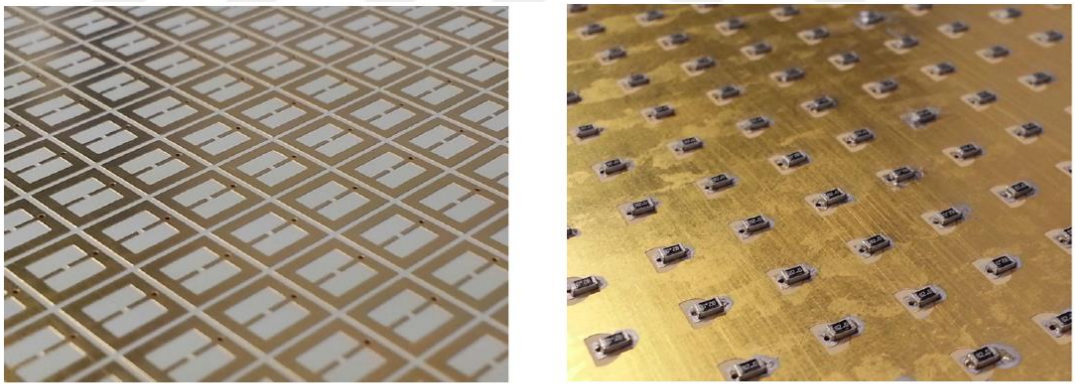


Şekil 2.9 Aynı taban alanına sahip anten ve SRR yapıları (Almoneef 2012)

Yapılan çalışmada EM dalganın yapılara 30˚, 45˚ ve 60˚'de verimlilikleri incelenmiş ve dizi SRR yapısının yama anten yapılarına göre verimliliğinin daha fazla olduğu gösterilmiştir. Ayrıca bant genişliği açısından, SRR dizilerinin geleneksel yama anten yapılarına göre daha avantajlı olduğu da çalışmada vurgulanmıştır. Daha sonra elde edilen veriler O.M. Ramahi ve T. Almoneef tarafından 2012 yılında makale olarak yayınlanmıştır (Ramahi, vd. 2012).

Metamalzeme tabanlı EM dalga soğurucular, istenilen frekans ve polarizasyonda, gelen EM dalganın hem yansımasını hem de iletilmesini engelledikleri̇nden, elektromanyetik

hasatlama sistemleri için de kullanılabilmektedirler. Ancak metamalzeme tabanlı soğurucular ile hasatlayıcılar arasında kritik bir ayrım bulunmaktadır. Söz konusu ayrım MMA yapılarında sadece gelen EM dalganın soğurulması değil aynı zamanda soğurulan gücün büyük bir kısmının hasatlama yapılması için yapıya entegre edilmiş devre elemanına aktarılmasıdır. Bu kapsamda yapılan ilk MMA tabanlı EM enerji hasatlayıcı yapısı Şekil 2.10'da görüldüğü gibi ELC (electiric-inductive-capacitive) rezonatör şeklinde tasarlanmış bir yapıdır (Almoneef ve Ramahi, 2015). ELC rezonatörleri EM dalgayı soğurmalarının yanı sıra soğurulan gücün büyük kısmını da yapıya entegre edilen devre elemanına aktarmaktadır. EM enerji hasatlamak için tasarlanan yapının birim hücresi aynı açıklık kısmını paylaşan iki adet ayrık halkadan, dielektrik alttaştan, toprak düzleminden ve alt ve üst iletken düzlemeler arasında bağlantı sağlayan bir viadan oluşmaktadır. Birim hücrenin bir kenar uzunluğu ise 7,5 mm'dir. 13x13 dizi şeklinde üretilen yapı rezonans frekansı 3 GHz olacak şekilde optimize edilmiştir. Yapıda kullanılan dielektrik katman ise 2,44 mm kalınlığında ε_r değeri 9,9, kayıp tanjant değeri ise 0,002 olan Rogers TMM10i olarak seçilmiştir.

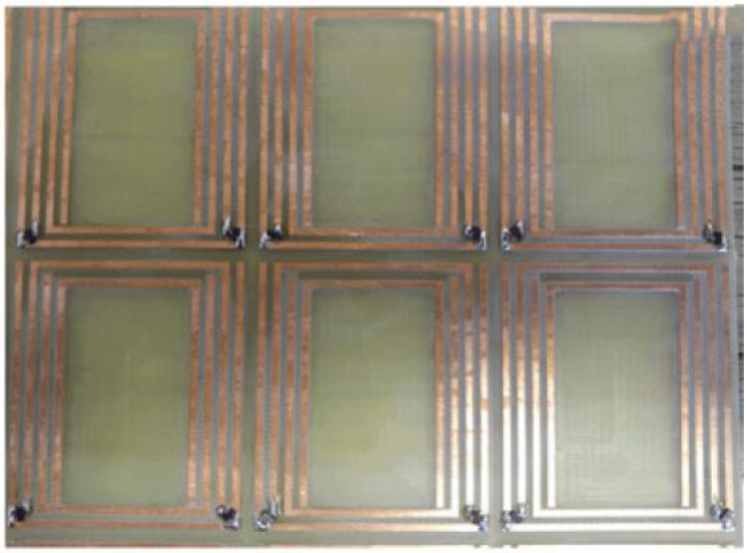


Şekil 2.10 Üretilen ELC rezonatörlerinin ön yüzü (a) ve arka yüzü (b)

Elektromanyetik tam dalga simülasyon programı olan ANSYS HFSS'de yapılan analizler sonucunda ise en yüksek verimlilik değerine 82 ohm direnç eklendiğinde elde edildiği raporlanmıştır. Yapılan simülasyon çalışmalarında 3 GHz rezonans frekansında mikrodalgadan AC akıma dönüşme verimliliği %97 olarak hesaplanmıştır. Sunulan yapıda bulunan via yüzey akımlarını devre elemanına maksimum verimlilikte iletebilmesi tasarlanmıştır ve bu yüzden birbirine ters ayrık halka rezonatörlerden

kaynaklanarak ters yönde indüklenen akımı devre elemanına iletebilmesi için yapının üst kısmına yerleştirilmiştir ve önerilen yapının toprak düzlem kısmına devre elemanı entegre edilmiştir. Çalışmanın deney kısmı için yüksek frekans sinyal jeneratörü kullanılarak 11,5 dBi kazanca sahip geniş bant horn anten 24 dBm güç ile beslenmiştir. Üretilen yapı, EM dalganın düzlem dalga oluşturabilmesi için horn antenden 3 metre uzağa yerleştirilerek EM olarak uyarılmıştır. Yapılan ölçüm sonucunda ise verimliliğin pik noktasında %93 verimlilik elde edilmiştir. Aynı zamanda rezonans frekansının merkez noktasında %6 oranında bir değişim olduğu çalışmada belirtilmiştir. Çalışmada, fiziksel dünyada EM kaybın, simülasyon ortamına göre daha fazla olduğu vurgulanarak verimlilikte gerçekleşen %4 farkın kabul edilebilir olduğu vurgulanmaktadır.

Tez çalışmasının daha önceki kısımlarında anlatıldığı gibi metamalzeme yapılarının topolojik özellikleri ya da farklı özelliklerde katman sayısı değiştirilerek birden fazla rezonans frekansı elde edilebilmektedir. Şekil 2.11'de görülen yapıda GSM 900 ve GSM 1800 frekans bantlarında enerji hasadı yapacak metamalzeme tabanlı yapı görülmektedir (Bakır, vd. 2018). Sunulan çalışmada 1.6 mm kalınlığında ve dielektrik sabiti 4.3 olan FR-4 dielektrik alttaşın arka ve ön yüzüne içe içe geçmiş dört adet U şeklinde rezonatörler yerleştirilmiştir. Yapıya gelen EM dalganın iletiminin engellenmesi içinse, rezonatör yapısından sonra bir hava katmanı bırakılarak bakır düzlem yerleştirilmiştir. Enerji hasatlama yapısına hava katmanının eklenmesinin nedeni ise soğurmayı artırmak ve rezonans frekansında hassas değişimler yapmak olarak açıklanmıştır. Söz konusu hava boşluğu (4,6 mm olarak ayarlandığında) ile bakır katman arasında ve arka düzlemde bulunan rezonatörlerin ikinci bir rezonans oluşturduğu raporlanmıştır ancak çalışmada 1.5 GHz'in üzerinde çıkan rezonans, EM hasatlama için kullanılmamıştır.

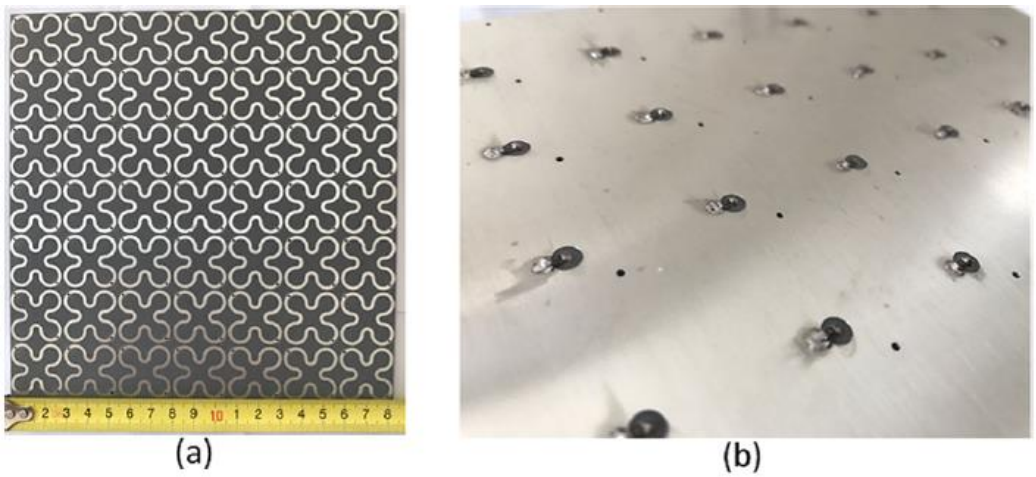


Şekil 2.11 EM enerji hasadında kullanılan U şeklinde rezonatör yapıları (Bakır vd. 2018)

Çalışmada birim hücre boyutu 50x60 mm olarak belirlenmiş ve LPKF kullanılarak üretilmiştir. Şekil 2.11'de görüldüğü gibi rezonatörlerin köşelerine HSMS 2860 pin diyot entegre edilmiştir. Çalışmada CST Microwave Studio tam dalga paket yazılım programı'nda gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları sonucunda 900 MHz ve 1020 MHz frekanslarında EM enerji hasatlama gerçekleştirilmiştir. Ancak deney düzeneğinde kullanılan spektrum analizör üzerinden ölçüm alınırken sadece 900 MHz frekansında 40 dBm'lik bir değişim gözlenmiş, 1020 MHz frekansında ise rezonans gözlenemediği çalışmada belirtilmiştir. Ayrıca spektrum analizör ile yapılan ölçümde 1,5 ve 2,5 GHz frekanslarında rezonans gözlendiği belirtilerek, hem durumun hem de 1020 MHz'de gözlenmesi gereken rezonansın oluşmamasının nedeninin laboratuvar ortamında yankısız bir ortamın sağlanamaması olduğu raporlanmıştır.

Birden fazla frekansta EM enerji hasatlama, birim hücredeki rezonatör sayısının artırılması ile birlikte, birim hücrede bulunan bir rezonatörün topolojik özellikleri değiştirilerek de gerçekleştirilebilir. Şekil 2.12'de görüldüğü gibi kelebek şeklinde kapalı bir halka rezonatör kullanılarak, üç bantta EM enerji hasatlama gerçekleştirilmiştir (Zhang, vd., 2017). 0,9 GHz, 2,6 GHz ve 5,7 GHz frekanslarında EM hasatlama yapabilen birim hücrenin kenar uzunluğu 26,90 mm olarak belirlenmiştir. Alttaş olarak ise kalınlığı 4mm, dielektrik sabiti 2,65 ve kayıp faktörü 0,001 olan F4-B

malzemesi kullanılmıştır. Yapılan çalışmada tasarlanan rezonatör, merkeze göre simetrik olduğu için, EM dalganın geliş açısından bağımsız hasatlama gerçekleştirmektedir ve via yardımı ile topladığı enerjiyi toprak düzleme entegre edebilen devre elemanına aktarmaktadır. Toprak düzleme via ile aktarılan enerjiyi toplamak için ise via ile toprak düzlem arasına 2776 Ohm değerinde direnç entegre edilmiştir.



Şekil 2.12 Kelebek şekilli kapalı halka rezonatör yapısının (a) ön yüzü (b) arka yüzü (Zhang vd. 2017)

Şekil 2.12 (b)'de görülen yapının arka yüzeyinde, simetrik olarak yer alan iki adet metalik via görülmektedir. Metalik vialardan bir tanesi enerjiyi toplamak ve devre elemanına iletmek için kullanılırken, diğeri rezonat halka ve toprak düzlem arasına yerleştirilerek rezonatörün indüktans değerinin artmasının sağlanması ile oluşan yüzey akımlarının iletim yolunu uzatmış ve böylelikle yapıda minyatürizasyon sağlandığı vurgulanmıştır. HFSS tam dalga paket yazılım programı ile simülasyonları gerçekleştirilen yapı 7x7 dizi şeklinde üretilip, standart horn anten, sinyal jeneratörü ve spektrum analizör kullanılarak ölçümlerin gerçekleştirildiği belirtilmiştir. Yapılan simülasyonlarda 900 MHz, 2,6 GHz ve 5,7 GHz frekanslarında hesaplanan verimlilik, sırasıyla %70, %80 ve %82, ölçümlerde ise sırasıyla %65, %70 ve %70 olarak belirtilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez kapsamında tek bantlı, iki bantlı ve dört bantlı metamalzeme tabanlı EM enerji hasatlayıcılar, CST Microwave Studio paket benzetim programından faydalanılarak tasarlanmıştır. Söz konusu benzetim programı, sonlu integral yöntemi kullanarak çözümleme yapan tam dalga elektromanyetik paket programıdır. CST Microwave Studio ile tasarlanan metamalzeme tabanlı EM enerji hasatlayıcıların saçılma parametreleri ve yapıya entegre edilen devre elemanı üzerinden harcanan güç hesaplanmıştır. Ayrıca yapıdaki metalik kısımlarda, dielektrik kısımlarda ne kadar enerji harcandığı ve tasarlanan birim hücrenin toplamda ne kadar EM dalgayı hapsettiği benzetim programı yardımı ile bulunmuştur. Yapılan tasarımların sayısal çözümlemeleri söz konusu benzetim programı ile yapılmıştır.

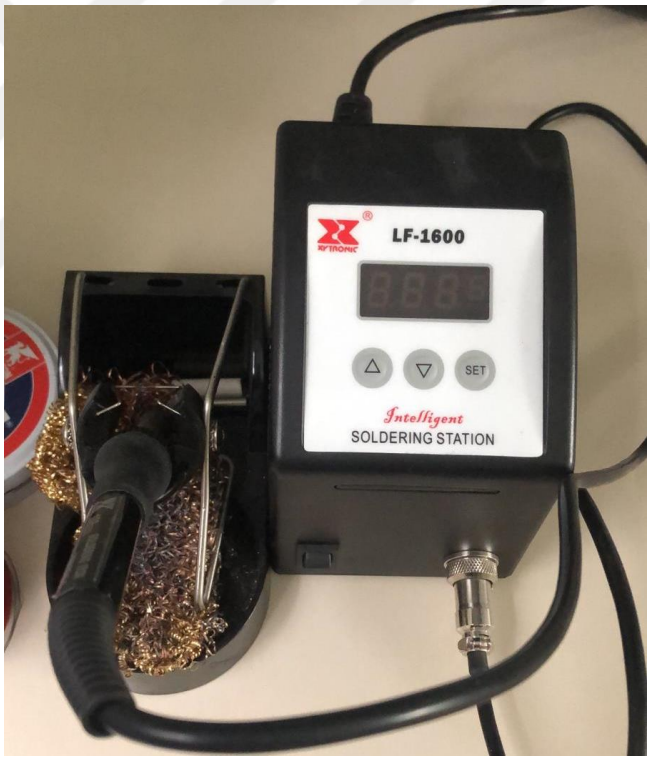
Tasarlanan metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı için dielektrik tabakanın kayıp tanjant değerinin (tan δ) oldukça düşük bir malzemeden seçilmesi gerekmektedir. Çünkü yapı tarafından soğurulan EM dalganın dielektrik malzemede soğurmaya uğrayarak ısıya dönüşmesi değil meta yüzey katmanda akım olarak indüklenmesi istenmektedir. Bu bağlamda tasarımlarda tan δ değeri 0,0002 olan saf PTFE (Teflon) ve tan δ değeri 0,0009 olan Rogers RT5880 malzemesi karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar ışığında PTFE malzemesi dielektrik alttaş olarak tercih edilmiştir.

Tasarım aşaması bitirildikten sonra üretim aşamasında bakır kaplı PTFE bulunamadığı için tasarlanan yapının iletken kısımları için 0,035 mm kalınlığa sahip iletken (bakır) bant temin edilmiştir. Ancak birim hücredeki meta yüzey boyutlarının çalışma frekansı için oldukça önem arz etmesi ve söz konusu yöntem ile hassas üretim gerçekleştirilememesi üzerine bakır bant tercihinden vazgeçilmiştir. Bu durumdan dolayı alttaşın tamamını tek parça iletken ile kaplayabilmek için 0,1 mm kalınlığa sahip bakır folyo temin edilmiş ve PTFE üzerine metal-plastik yapıştırıcısı ile kaplanmıştır. Kaplanan PTFE alttaşa sahip bakır kaplı malzemelerin üretimi için fotolitografi yöntemi kullanılmıştır. Söz konusu yöntemin işlem adımları aşağıdaki gibi sıralanmaktadır;

- Yöntemin uygulanacağı yüzeyin metal temizleyici yardımı ile temizlenmesi
- Laminasyon makinesi ile fotorezirt filmin iletken kısma uygulanması,

- Tasarıma ait birim hücrenin laminasyon kağıdı ile bir kopyasının hazırlanması,
- Malzemenin UV ışığa maruz bırakılması,
- Çeşitli asitler kullanılarak pozlama işleminin gerçekleştirilmesi,
- Üretimi gerçekleştirilen yapının temizlenmesi

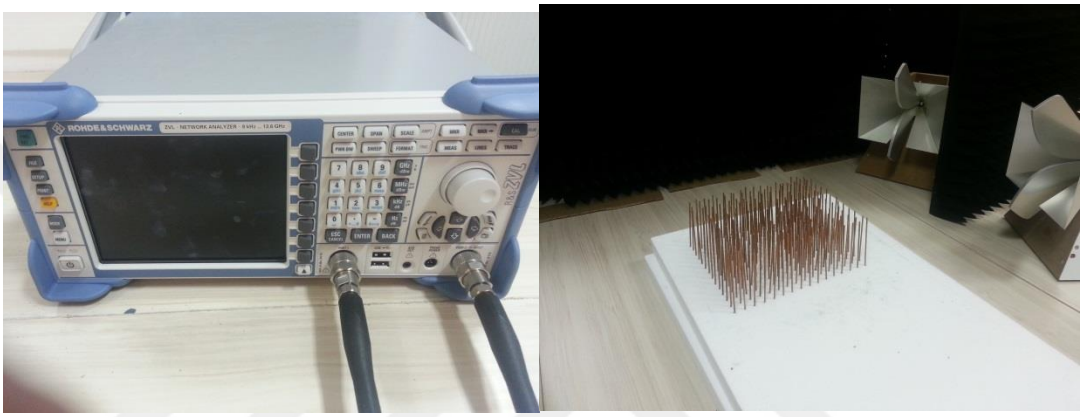
Metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı yapısı üretildikten sonra elde edilen yapıya devre elemanları entegre edilmiştir. Devre elemanlarının yapıya lehimlenmesi için XYTRONİC Marka, LF-1600 Model Sıcaklık Kontrollü Lehimleme Cihazı kullanılmıştır. Cihazın bir görseli şekil 3.1'de sunulmuştur. 300 ^{o}C'ye ayarlanan lehimleme cihazının 0,2 mm kalınlığa sahip ucu kullanılarak lehimleme işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1 Devre elemanlarını üretilen numuneye entegre etmek için kullanılan lehimleme cihazı

Ölçüm aşamasında, yapıyı uyarmak ve S_{11} saçılma parametresini ölçmek için 9 kHz ile 13,6 GHz arasında çalışabilen Rohde & Schwarz Marka ZVL-13 Model Vektör Network Analizörü (VNA) kullanılmıştır. VNA'den alınan sinyalin yapıya iletilmesi

için açık 0,8 GHz ile 18 GHz arasında çalışan Rohde & Schwarz Marka HF-907 Model biri alıcı diğeri verici anten olmak üzere iki adet horn anten kullanılmıştır. Ölçüm ortamını dışarıdan gelebilecek sinyallerden korumak için, ortam TDK Marka IS-012A Model 60x60 cm ebatında mikrodalga soğurucular ile çevrilerek yarı yankısız oda haline getirilmiştir. Ölçüm sırasında kullanılan VNA ve horn antenlere ait görsel, Şekil 3.2'de sunulmuştur.



Şekil 3.2 Metamalzeme Araştırma Grubu bünyesinde bulunan VNA ve horn anten setine ait görsel

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde tek bantlı metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcıların benzetim ortamında tasarımı ve söz konusu tasarıma ait devre elemanı üzerinde harcanan gücün verimlilik açısından değerleri incelenmiştir. Daha sonra iki bantlı metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı tasarımları benzetim ortamında gerçekleştirilmiş ve sonuçları devre elemanı üzerinden harcanan güç cinsinden incelenmiştir. Son kısımda ise şehirlerde EM kirlilik açısından en yaygın bulunan 0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekanslarında hasatlama yapabilen metamalzeme tabanlı yapılar, tek katmanlı ve çok katmanlı yapılar benzetim ortamında tasarlanmıştır.

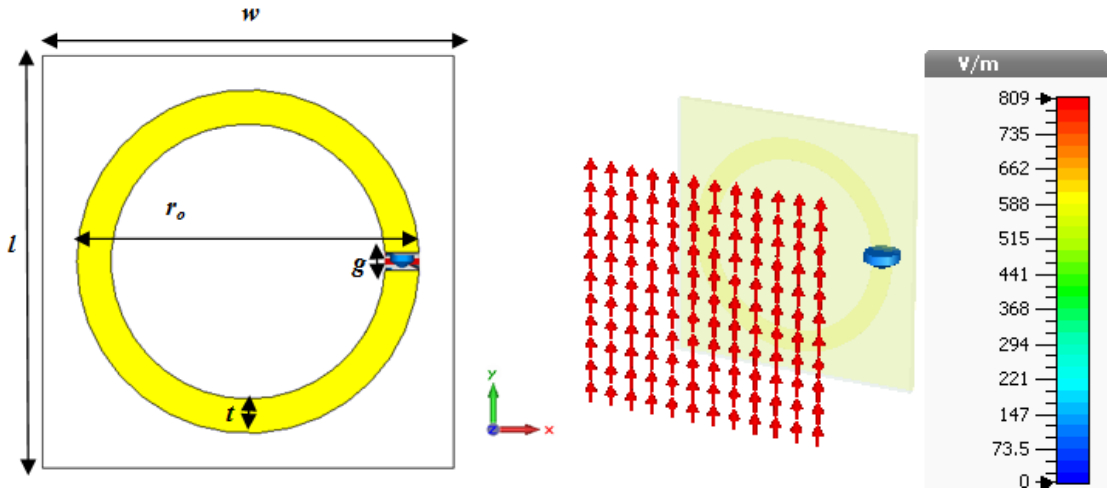
Tek katmanlı olarak tasarlanan dört bantlı metamalzeme tabanlı enerji hasatlama yapısı laboratuvar ortamında üretilmiş ve saçılma parametresi (S_{11}) açısından, benzetim ortamındaki değerler ile ölçüm sonuçları kıyaslanmıştır.

4.1 Tek Birim Hücrede Metamalzeme Tabanlı Elektromanyetik Enerji Hasatlayıcı Yapıları

Tek birim hücre elektromanyetik enerjiyi hapsetme literatürde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

4.1.1 Ayrık halka rezonatör yapısı ile tek bantlı enerji hasatlama

Tek bantlı MM tabanlı enerji hasatlayıcı için şekil 4.1'de görülen birim hücre içerisinde bir adet SRR yapısı tasarlanmıştır. Rezonatörün ayrık bölgesine ise soğurulan EM dalgayı hasatlayabilmek için devre elemanı olarak bir adet direnç entegre edilmiştir.

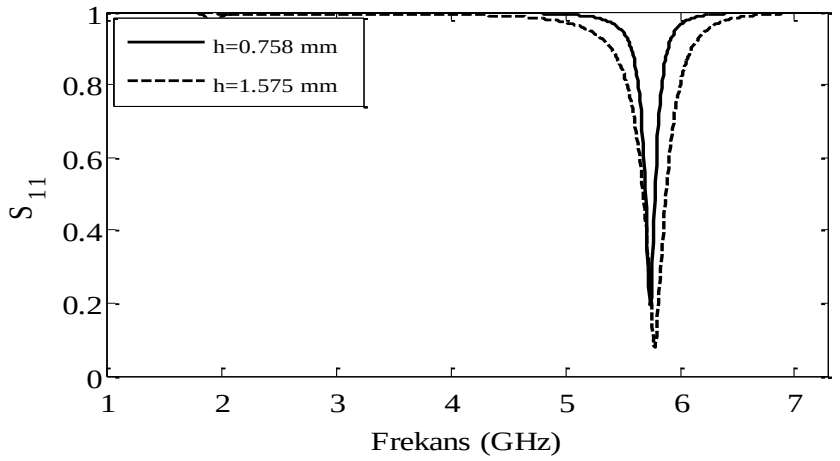


(a) **(b)**

Şekil 4.1 Tek bantlı hasatlayıcı yapısına ait birim hücre görüntüsü (a) ve elektrik alan uyarım yönü (b)

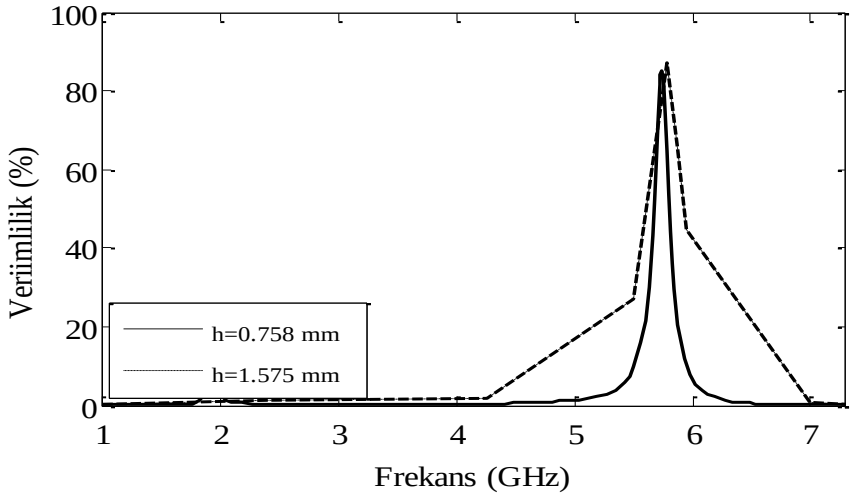
Yapıda alttaş olarak kalınlığı 1,575 mm, μ ile ε değerleri sırasıyla 1 ve 2,2, kayıp tanjat değeri 0,0009 olan Rogers 5880 malzemesi kullanılmıştır. Şekil 4.1'deki görselde bulunan *w, l, t, g* ve r_o değerleri ise sırasıyla 24 mm, 24 mm, 2 mm, 1 mm ve 10 mm'dir. Elektromanyetik dalganın yayılım yönü *z* doğrultusunda ve *-z* yönündedir. Şekil 4.1 (b)'de birim hücre uyarımında elektrik yönelimi ve bu yönelime bağlı olarak birim hücrenin elektriksel olarak uyarıldığı gösterilmektedir.

CST Microwave Studio simülasyon programında gerçekleştirilen analizlerde alttaş kalınlığının, kullanılan alttaş malzemenin türü ve direnç değerleri incelenerek, EM dalganın soğurulma ve verimlilik oranlarına etkisi incelenmiştir. Şekil 4.2'de 0,758 mm ve 1,575 mm kalınlığında iki farklı alttaş malzemesi yansıma parametresi ve Şekil 4.3'de ise alttaş kalınlığına göre verimlilik oranındaki değişimin grafikleri görülmektedir. Verimlilik oranı alttaş kalınlığı açısıdan incelendiğinde önemli bir değişim görülmemiştir ancak yansıma parametresinde kalınlığın değişmesi frekansın kaymasına neden olmuştur. En yüksek verimlilik değeri ise 1,575 mm kalınlık değerinde %87,07 olarak bulunmuştur.



Şekil 4.2 Yansıma parametresinin alttaş kalınlığına göre değişimi (r_o= 20 mm,w= 24mm, l= 24 mm, t= 2 mm, g= 1 mm, R= 3000 Ωve ε_r= 2.2)

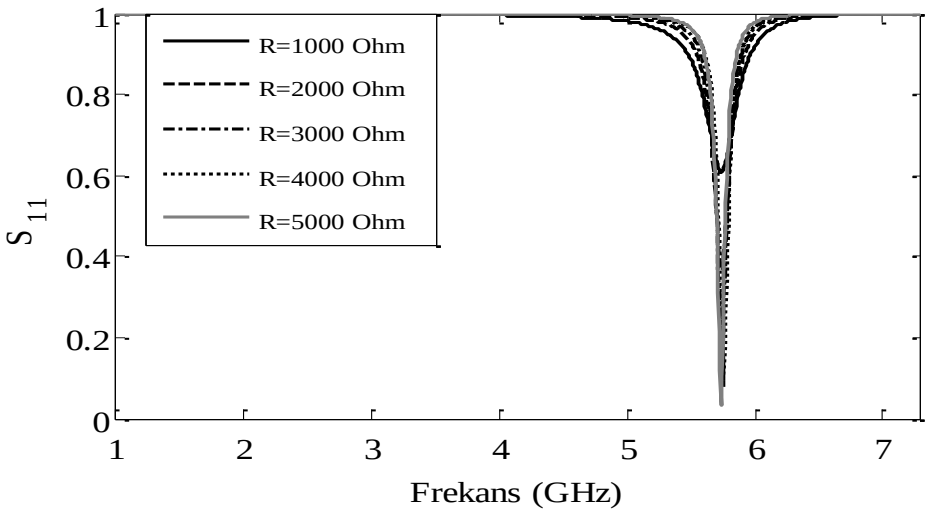
Alttaş kalınlığının değerinin bir noktaya kadar artırılması, birim hücrede soğurulan EM dalganın oranını ve buna bağlı olarak devre elemanı üzerinde harcanan gücü artıracaktır. Bu bağlamda Şekil 4,2'de görüldüğü gibi h=0,758 mm'de hesaplanan soğurulma değeri yaklaşık %96, h=1,575 mm'de ise bu oran yaklaşık %99 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.3'te rezonans noktasında (5,74 GHz) verimliliğin %85 oranında olduğu görülmektedir.



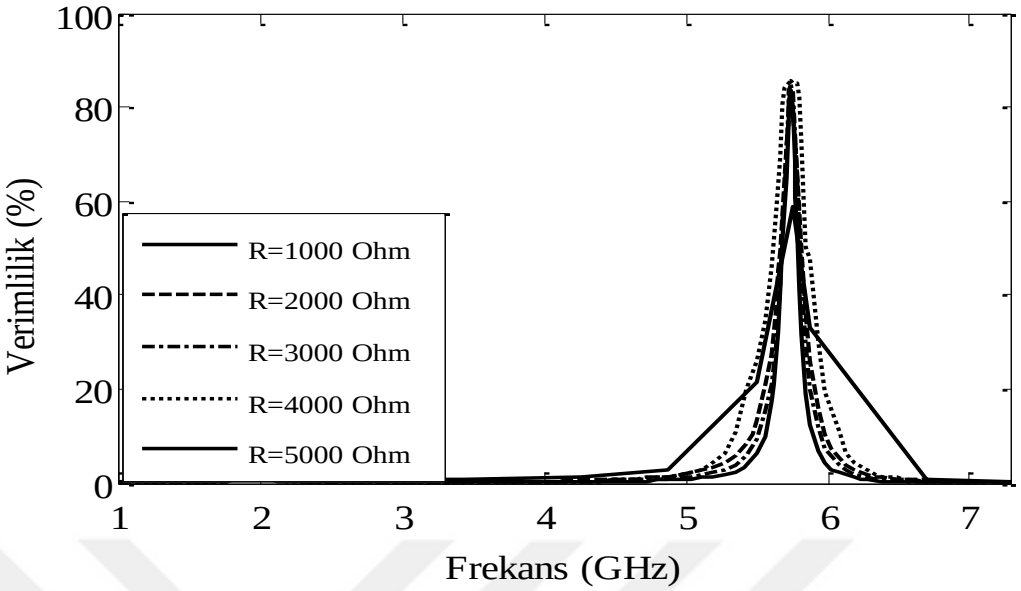
Şekil 4.3 Farklı alttaş kalınlıklarına ait verimlilik grafiği (r_o=20 mm, w=24 mm, l=24 mm, t=2 mm, g=1 mm, R=3000 Ω ve ε_r=2.2)

Gerçekleştirilen parametrik analizlerin ardından alttaş kalınlığı olarak 1,575 mm'nin

birim hücredeki hasatlama verimliliğinin daha yüksek değere sahip olması üzerine bundan sonraki aşamalarda söz konusu kalınlık değeri kullanılmıştır. SRR yapısı üzerindeki ayrık bölgeye entegre edilen devre elemanının parametrik analizi için kullanılan direnç değerleri sonucunda elde edilen S_{11} ve verimlilik değerleri şekil 4.4 ve şekil 4.5'de sırasıyla verilmiştir. Açıklık bölgesine eklenen direnç değeri artırıldıkça söz konusu devre elemanı üzerinde harcanan gücün değeri de artmıştır fakat 4000 Ω değerinden sonra verimlilik değerinde azalma meydana gelmiştir. Yapılan parametrik analizler sonucunda en yüksek verimlilik değeri 4000 Ω değerinde %85.58 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.6'da sunulan yansıma parametresi değerlerine göre analizlerin gerçekleştirildiği direnç değerlerinde, söz konusu değerin artmasıyla yapı üzerinde soğurulan EM dalganın oranının arttığı belirlenmiştir. 5000 Ω değerinde en yüksek soğurma hesaplanırken bu değerdeki verim 4000 Ω değeri için hesaplanan verimden düşüktür. Yük direncinin değerinin büyüklüğü arttıkça metamalzeme yapısının soğurduğu elektromanyetik dalganın oranı da artmıştır. En yüksek verimlilik değeri 5.754 GHz frekans değerinde direnç değerinin 4000 Ω olduğu durumda %85 olarak hesaplanmıştır.



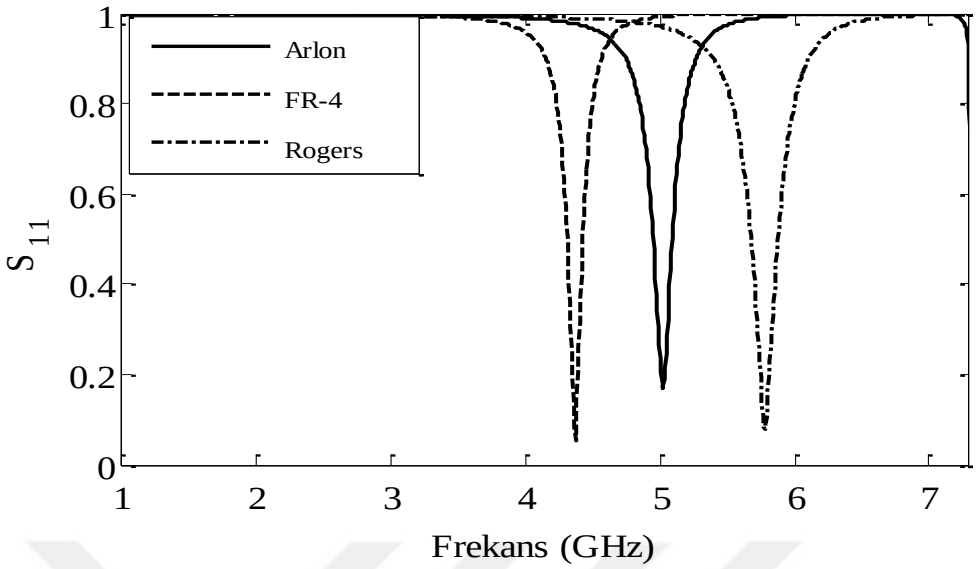
Şekil 4.4 S_{11} parametresinin devre elemanına göre değişimi (r_o=20 mm, w=24 mm, l=24 mm, t=2 mm, g= 1 mm, h= 1,575 mm ve ε_r=2,2)



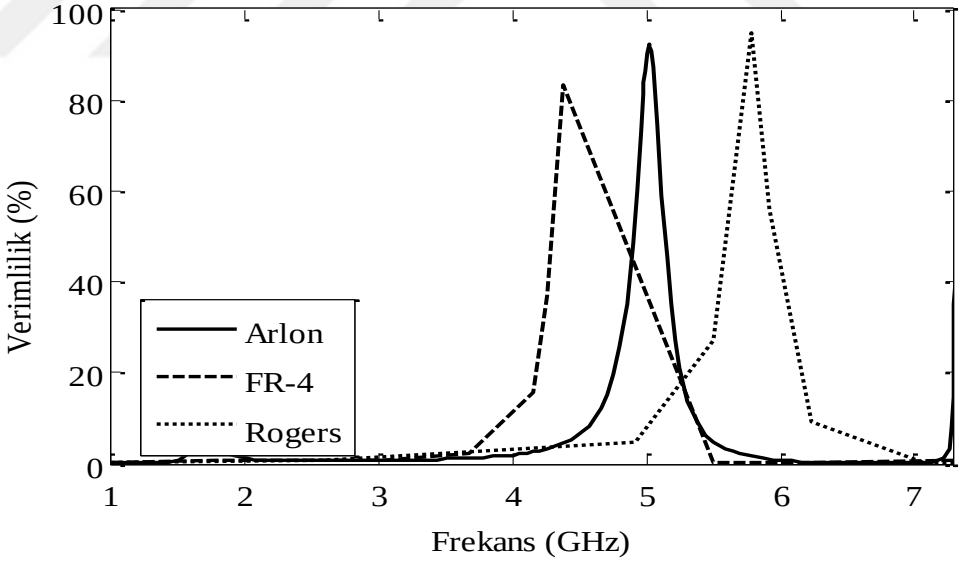
Şekil 4.5 Verimliliğin devre elemanı değerine göre değişimi (r_o=20 mm, w=24 mm, l=24 mm, t=2 mm, g=1 mm, h_s=1,575 mmve ε_r= 2,2)

Analizleri yapılan son değişken ise alttaş olarak kullanılan malzemenin dielektrik sabitinin etkileri incelenerek elde edilen yansıma parametresi ve verimlilik oranının değerleri şekil 4.6 ve şekil 4.7'de verilmiştir. Dielektrik malzeme olarak kullanılan FR-4, Arlon ve Rogers 5880 malzemelerinin dielektrik sabitlerinin değerleri sırasıyla 4,3, 2,95 ve 2,2'dir. Şekil 4.6'da görüldüğü üzere dielektrik sabitinin değeri arttıkça rezonans frekansının değeri azalmıştır. Şekil 4.7'de alttaş modellerine ve buna bağlı olarak dielektrik sabitinin değişimine göre verimlilik oranının grafiği verilmiştir. Söz konusu grafik incelendiğinde en yüksek verimlilik değeri yaklaşık %95 olarak Rogers 5880 malzemesinde hesaplanmıştır.

SRR yapısının açıklık kısmına devre elemanı bağlanılarak elde edilen MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısı 2016 yılında gerçekleştirilen 24. Signal Processing and Communication Application Conference (SIU)'da sunulmuştur (Karakaya, vd., 2016)



Şekil 4.6 S_{11} parametresinin alttaş malzeme türüne göre değişimi (r_o=20 mm, w=24 mm, l=24 mm, t=2 mm, g=1 mm h_s=1.575 mm ve R=*3000 Ω*).

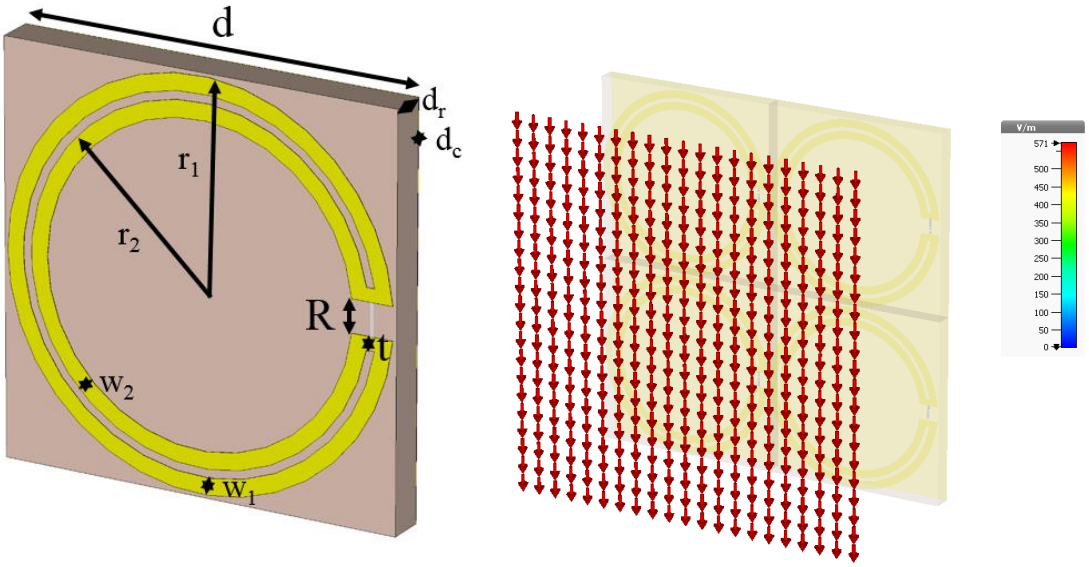


Şekil 4.7 Devre elemanı üzerinde harcanan güç cinsinden alttaş malzeme çeşidine göre değişimi (r_o=20 mm, w=24 mm, l=24 mm, t=2 mm, g=1 mm, h_s=1,575 ve R=*4000 Ω*)

4.2 İki Bantlı Metamalzeme Tabanlı Enerji Hasatlayıcı Yapıları

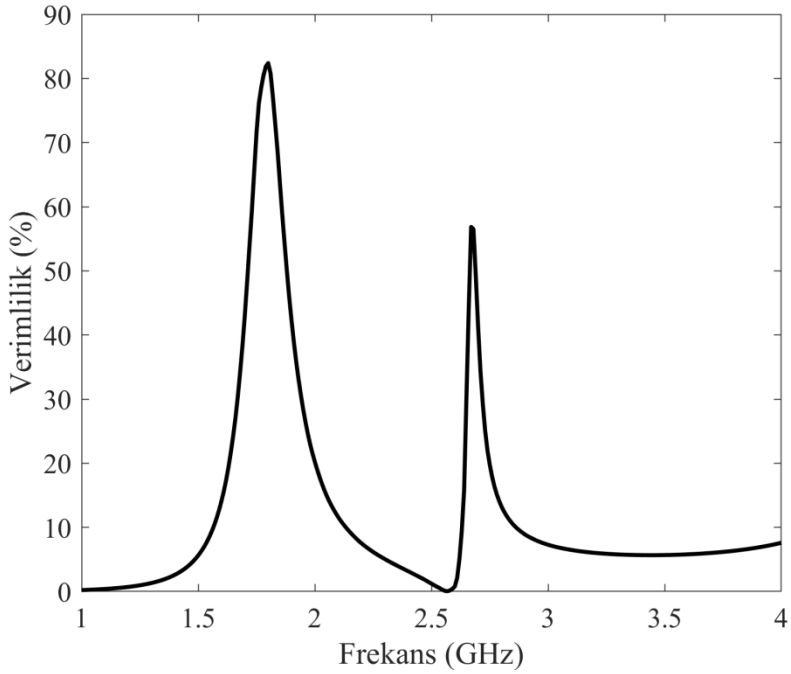
4.2.1 Ayrık halka rezonatörler ile iki bantlı metamalzeme tabanlı elektromanyetik enerji hasatlayıcı

EM kirliliğin yoğun olduğu 1,8 GHz ve 2,6 GHz frekanslarındaki EM dalgayı hasatlayabilmek için iki adet iç içe geçmiş ayrık halka rezonatörler kullanılmıştır. Birim hücre yapısında tasarlanan SRR'ler birbirlerine bir iletken hat ile bağlanmıştır. Üzerine gelen EM dalgayı hasatlaması için birleştirilen ayrık bölgeleye bir adet devre elemanı entegre edilmiştir. Yapı rezonatörler, dielektrik tabaka ve metalik toprak düzlem olmak üzere üç katmandan oluşturulmuştur. Dielektrik katman malzemesi olarak dielektrik sabiti (ε) 2,2, manyetik geçirgenliği (μ) 1 ve kayıp tanjant oranı (tanδ) 0,0009 olan, ticari olarak bulunabilen Rogers RT 5880 kullanılmıştır. Şekil 4.8'de geometrik şekli verilen yapıda dış kısımdaki halka 1,8 GHz frekansında, iç kısımdaki halka ise 2,6 GHz frekansında EM dalgayı soğurması ve hasatlaması için tasarlanmıştır. Şekil 4.8 (a)'da verilen parametrelerin değerleri simülasyon ortamında yapılan parametrik analizler sonucu belirlenmiştir ve en iyi sonuç alınan değerlere ulaşılmıştır. Şekil 4.8 (a)'da verilen parametrelerde d birim hücrenin kenar uzunluğunu, r_1 1,8 GHz'de rezonans gerçekleşmesi için tasarlanan SRR'nin yarıçapını, r_2 ise 2.6 GHz'de rezonans gerçekleşmesi için tasarlanan SRR'nin yarıçapını temsil etmektedir ve sırasıya 34,00 mm, 16,75 mm ve 13,60 mm'dir. Dış kısımdaki SRR'nin genişliği w_1, iç kısımdaki SRR'nin genişliği w_2 ile temsil etmektedir ve iki genişliğin de değeri 1,40 mm'dir. SRR'lerin birleştirildiği iletken hattın kalınlığı t ile gösterilmiştir ve değeri 1,13 mm'dir. Yapıya devre elemanı olarak entegre edilen direnç değeri ise R temsil etmektedir ve değeri 20 Ω'dur. Söz konusu değerlere karşılık gelen devre elemanı üzerinde harcanan güç ise şekil 4.9'da verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.8 (a) 1,8 GHz ve 2,6 GHz frekansları için tasarlanan EM dalga hasatlayıcı, (b) yapıya gönderilen EM dalganın elektrik alan yönelimi



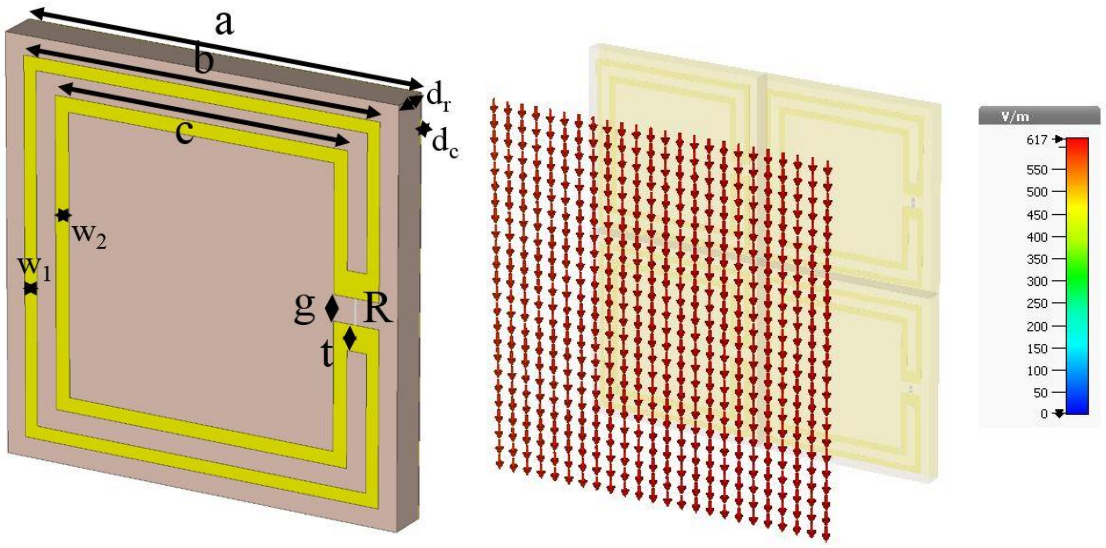
Şekil 4.9 Tasarlanan ayrık halka rezonatörlere bağlanan devre elemanı üzerinden harcanan güç

Şekil 4.9'da verilen grafikte yapı beklendiği gibi iki frekansta hasatlama

gerçekleştirmiştir. Benzetim ortamı olarak kullanılan CST Microwave Studio Paket Yazılım Programı'nda yapıya gönderilen EM dalganın gücü 0,5 W olarak belirlenmiştir. Söz konusu değer doğrultusunda yapılan hesaplamalarda metamalzeme tabanlı EM dalga hasatlayıcı yapısında 1,8 GHz frekansında elde edilen verimlilik %82,4 iken ve 2,7 GHz'de kayda değer bir verimlilik elde edilmişken, 2,6 GHz frekansında bu değer çok düşük kalmıştır. Bu 2,7 GHz'de elde edilen rezonansın 2.6 GHz'de de elde edilmesi için yapıda yapılan değişiklikler başarılı olmuştur. Ancak, 2,6 GHz için tasarlanan iç kısımdaki ayrık halka rezonatörün boyu büyütüldüğünde, 1,8 GHz için tasarlanan yapı ile etkileşime girerek söz konusu frekanstaki rezonansı ve verimliliği olumsuz yönde etkilemiştir.

4.2.2 Kare halka rezonatörler ile iki bantlı metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı

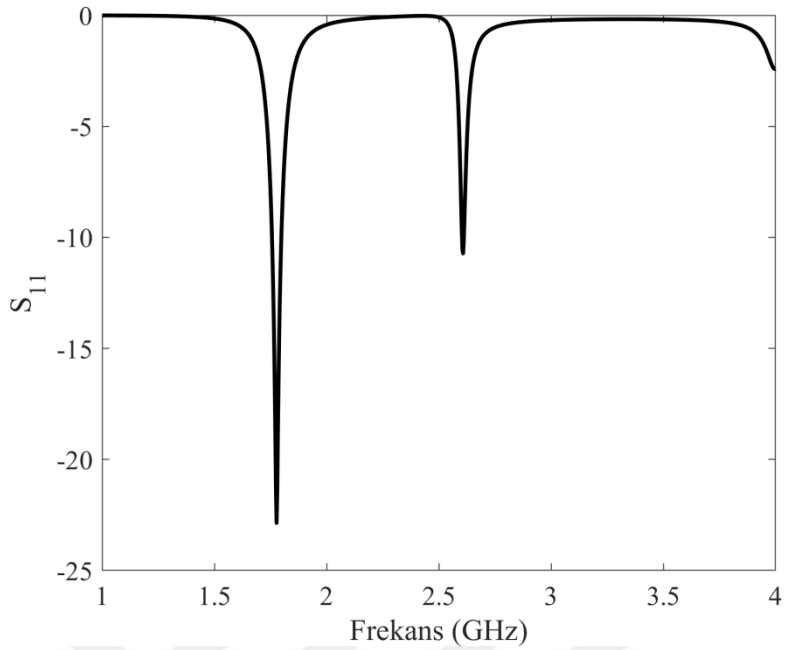
Ayrık halka rezonatörlerde karşılaşılan problemlerden sonra MM tabanlı EM dalga hasatlayıcı tasarımında değişiklik yapılmıştır. Ayrık kare halka rezonatörler ile EM dalga hasatlayıcı tasarlanmış, böylelikle kare halka rezonatörlerin köşelerinden kaynaklanan saçaklanma (fringing) etkisi ile ekstra kapasitif etki yaratılarak, halka rezonatörler arasındaki boyut farkı genişletilmiş ve birbirlerini etkilemelerinin önüne geçilmiştir. SSRR'lerin ayrık bölgesine devre elemanı entegre edilerek CST Microwave Studio'da simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarından elde edilen nihai yapı şekil 4.10 (a)'da görülmektedir. EM dalga birim hücreye şekil 4.10 (b)'de gösterildiği gibi elektrik alan vektörü düşey yönde olacak biçimde gönderilerek yapı elektriksel olarak uyarılmıştır.



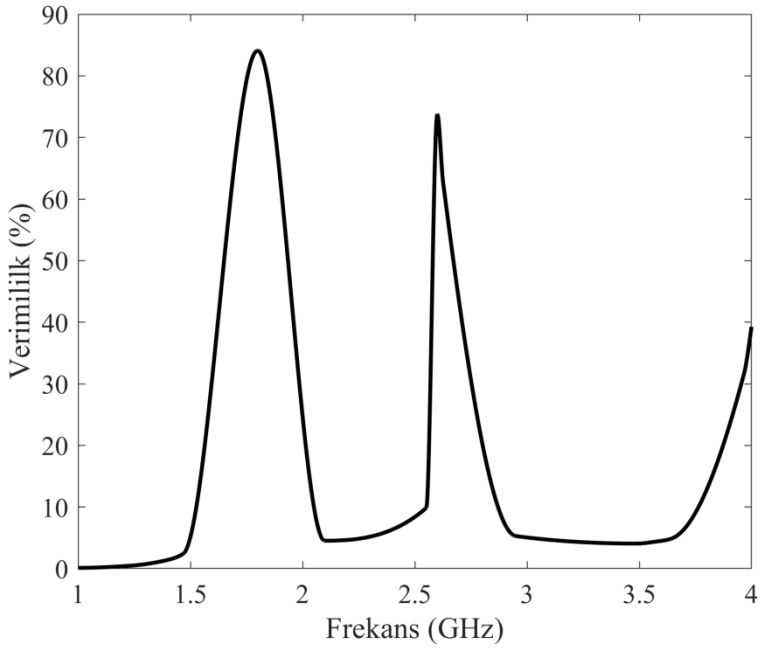
(a) (b)

Şekil 4.10 (a) SSRRlerden oluşan EM dalga hasatlayıcının birim hücre görüntüsü, (b) EM dalganın elektrik alan yönelimi

Şekil 4.10 (a)'da verilen parametrelerin değerleri yapılan simülasyon çalışmaları sonucu belirlenmiştir ve hasatlama oranı açısından en iyi sonuç alınan değerler elde edilmiştir. Şekil 4.10 (a)'daki parametrelerde a, birim hücre kenar uzunluğuna, b, 1,8 GHz için tasarlanan SSRR'nin kenar uzunluğuna ve c, 2,6 GHz için tasarlanan SSRR'nin kenar uzunluğuna karşılık gelmektedir ve değerleri sırasıyla 32,00 mm, 29,00 mm ve 23,85 mm'dir. Dış kısımdaki SSRR'nin genişliğini w_1, iç kısımdaki SSRR'nin genişliğini w_2 temsil etmektedir ve ikisinin de değeri 1,10 mm'dir. SSRR'lerin ayrık bölgesinin genişliğini g, birleştirildiği iletken hattın kalınlığını t, yapıya devre elemanı olarak entegre edilen direnç değerini ise R temsil etmektedir ve değerleri sırasıyla 2,00 mm, 2,00 mm ve 15 Ω'dur. Benzetim ortamında tasarımları ve simülasyon çalışmaları yapılan metamalzeme tabanlı hasatlayıcının yansıma parametreleri şekil 4.11'de verilmiştir. Devre elemanı üzerinde EM dalgadan AC akıma dönüşerek harcanan güç grafiği ise şekil 4.13'de verilmiştir.



Şekil 4.11 Metamalzeme tabanlı hasatlayıcının S_{11} grafiği

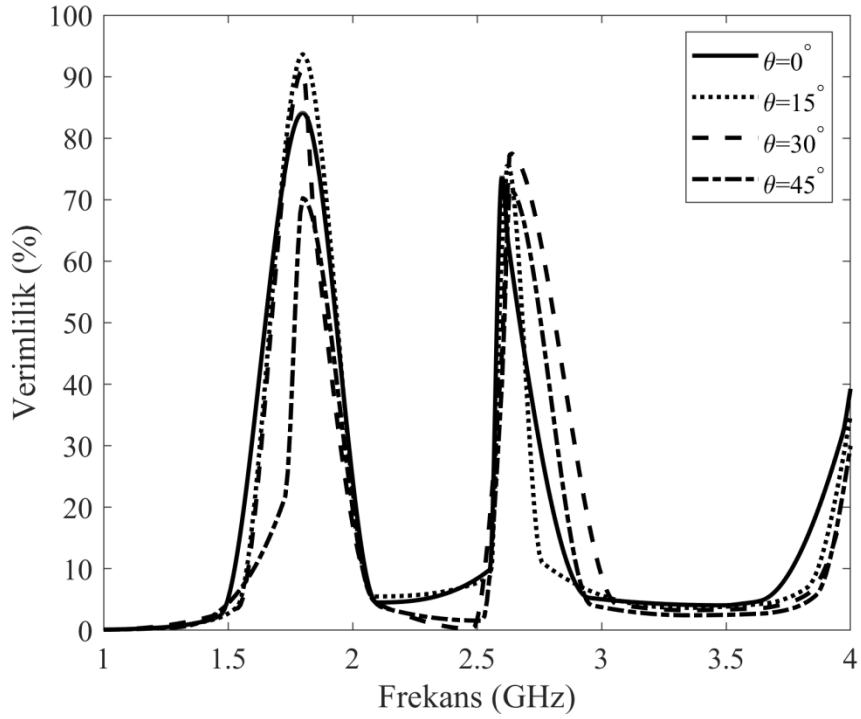


Şekil 4.12 Devre elemanı üzerinde harcanan güç

Şekil 4.13'de verilen grafikte 1,8 GHz ve 2,6 GHz rezonans frekanslarında devre elemanı üzerinde harcanan güç sırası ile 0,4205 W ve 0,3690 W olarak hesaplanmıştır. Simülasyon programındaki giriş gücünün 0,5 W olduğu göz önüne alındığında

verimlilik oranları sırasıyla %81 ve %73,8 olarak hesaplanmıştır. Ortalama verimlilik ise %77,4 olarak hesaplanmıştır.

MM tabanlı EM dalga hasatlayıcı yapısının elektromanyetik dalganın geliş açısı olan θ'ya bağımlılığı da incelenmiştir. EM dalganın geliş açısına bağlı verimlilik grafiği şekil 4.13'de verilmektedir.



Şekil 4.13 Geliş açısı θ'ya bağlı verimlilik grafiği

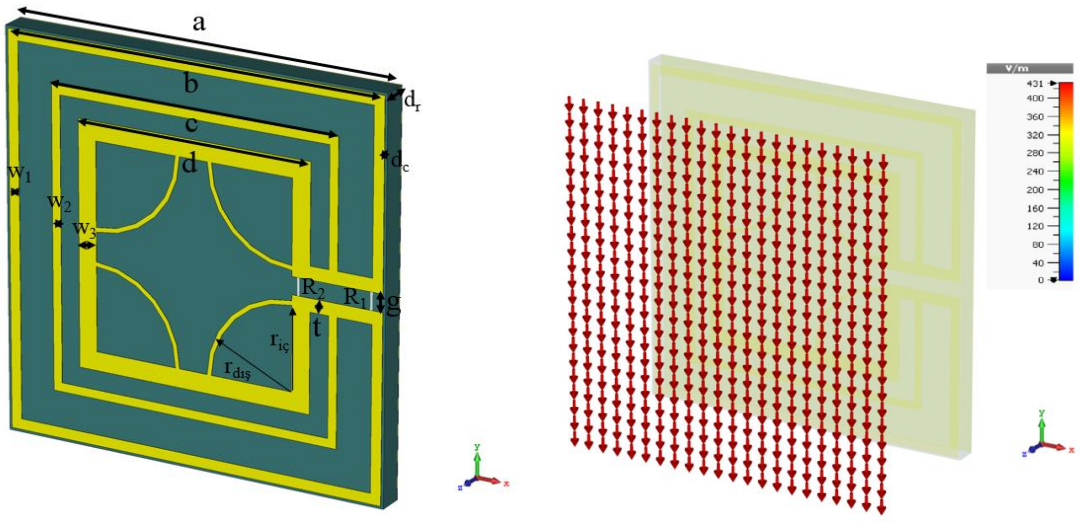
EM dalganın geliş açısında yapı üzerinde EM dalgadan AC akıma çevrilen enerjinin oranı 0°, 15°, 30° ve 45° geliş açılarında incelenmiştir. Söz konusu EM dalganın geliş açısını değerlerinde 1,8 GHz'de birim hücrede verimlilik oranları sırasıyla %83,0, %93,6, %91,0 ve %70,2 olarak hesaplanmıştır. 2,6 GHz frekansındaki birim hücrede verimlilik oranları sırasıyla %73,8, %62,2, %44,9 ve %40,0 olarak hesaplanmıştır.

4.3 Dört Bantlı Metamalzeme Tabanlı Enerji Hasatlayıcılar

4.3.1 Dört bantlı metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı-1

Tek bir birim hücrede EM kirliliğin en yoğun olduğu dört bant olan 0,9 GHz, 1,8 GHz,

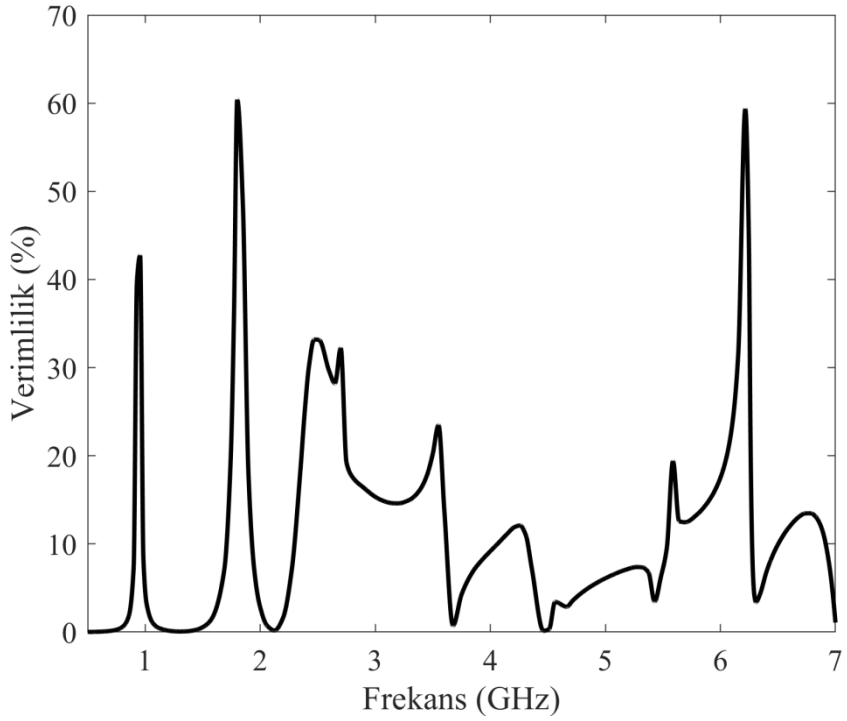
2,6 GHz ve 5,8 GHz'de elektromanyetik hasatlama yapabilmek için üç adet SSRR ve en iç kısımdaki SSRR'nin köşelerine dört adet çeyrek halka rezonatör yapısı kullanılmıştır. Şekil 4.14 (a)'da verilen yapıda en içteki SSRR'nin köşe bölgelerine yerleştirilen çeyrek halka rezonatörler ile 5,8 GHz'de hasatlama gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Şekil 4.14 (a)'da görüldüğü gibi SSRR'ler iletken hat yardımı ile ayrık bölgelerinden birleştirilmiş ve indüklenen akımların hat üzerinde toplanması hedeflenmiştir. Hasatlama yapısında dielektrik alttaş malzemesi olarak dielektrik sabiti 2,1, μ değeri 1, ve tanδ değeri 0,0002 olan PTFE (Teflon) kullanılmıştır. Metamalzeme tabanlı EM dalga soğuruculardа dielektrik alttaşın soğurma katsayısını veren tanδ değerinin büyük olması istenmektedir çünkü yapıda rezonans yolu ile sağlanan soğurmaya katkı olarak dielektrik alttaşın da yapıya gelen EM dalganın bir kısmını soğurması sağlanmaktadır. Ancak metamalzeme tabanlı EM hasatlayıcılarda yapıya gelen EM dalganın dielektrik alttaş da en az soğurulma ile rezonans yoluyla meta yüzeyde akım indüklemesi hasatlama verimliliğinin artmasına neden olacaktır. Bundan dolayı MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapılarında kayıp tanjant değeri mümkün olduğu kadar düşük dielektrik malzeme seçilmelidir. Bu amaçla tanδ değeri en düşük dielektrik malzemelerden biri olan saf PTFE dielektrik alttaş olarak kullanılmıştır.



(a) (b)

Şekil 4.14 Tasarıma ait birim hücre görüntüsü (a) elektrik alan yönelimi (b)

Simülasyon çalışmaları gerçekleştirilen yapıda, şekil 4.14 (b)'de görüldüğü gibi elektrik alan yönelimi –y doğrultusunda seçilerek elektriksel olarak uyarılmıştır. Şekil 4.14 (a)'daki birim hücrenin kenar uzunluğuna karşılık gelen a değeri 45 mm, 0,9 GHz'de hasatlama yapabilmek için tasarlanan SSRR'nin kenar uzunluğuna karışılık gelen b değeri ise 44,4 mm'dir. 1,8 GHz hasatlama yapabilmek için tasarlanan SSRR'nin kenar uzunluğunu ifade eden c değeri 33,9 mm, 2,6 GHz'de hasatlama yapabilmek için tasarlanan SSRR'nin kenar uzunluğuna karşılık gelen d değeri ise 27,5 mm'dir. 5,8 GHz'de hasatlama yapmak için tasarlanan çeyrek halka rezonatörlerin iç ve dış yarıçapları ise $r_{dış}$ 9 mm ve $r_{iç}$ 8,5 mm'dir. Kullanılan SSRR'lerin genişlikleri w_1, w_2 ve w_3 olarak temsil edilmiş ve değerleri sırasıyla 1,2 mm, 1 mm ve 2,1 mm'dir. Ayrık bölgenin genişliği g, ayrık bölgeleri birleştirmek için kullanılan iletken hattın kalınlığı ise t ile gösterilmiştir ve değerleri 2 mm'dir. MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısına entegre edilen iki adet devre elemanı R_1 ve R_2 ile gösterilmiştir ve değerleri sırasıyla 5 ohm ve 100 ohm'dur.



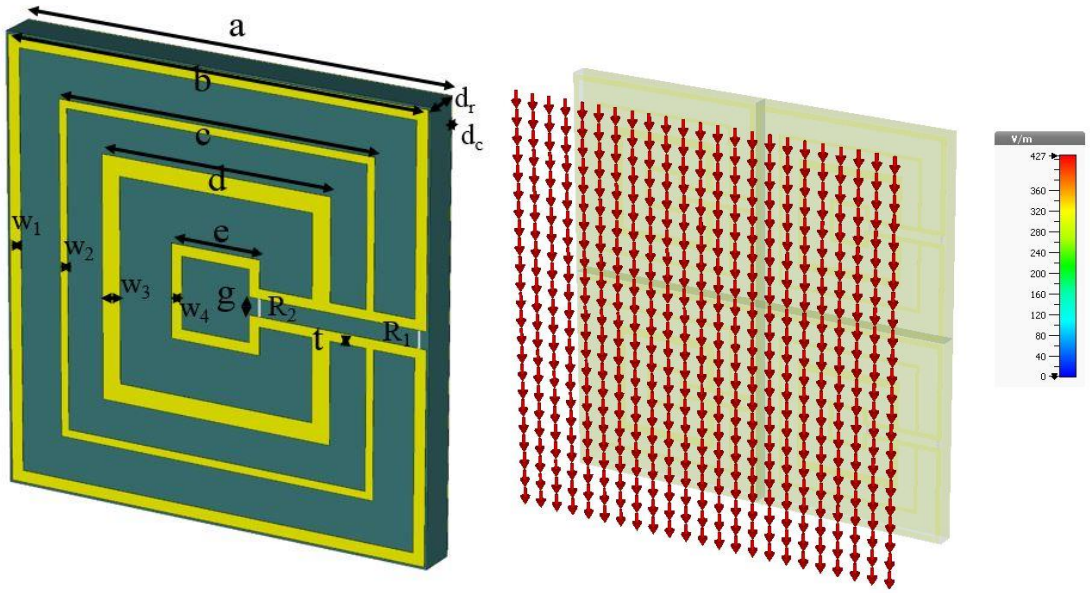
Şekil 4.15 Tasarıma ait verimlilik grafiği

4 bantlı MM tabanlı enerji hasatlayıcı-1'e ait şekil 4.15'deki verimlilik grafiğinde

görüldüğü gibi hedeflenen frekanslara yakın bölgelerde hasatlama yapılmaktadır. Ancak simülasyon programında gerçekleştirilen parametrik analizler sonucunda en iyi verilerin 0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz GSM ve Wi-Fi bantlarında hedeflenen ortalama %75 verimlilikten çok uzakta olduğu görülmektedir. Gerçekleştirilen uzun simülasyon sayıları ve sürelerinin ardından, tasarlanan birim hücrede rezonatörler arasında etkileşimin fazla olduğu ve bu durum düzeltilmek istendiğinde ise soğurma ve verimlilik değerlerinin çok aşağılara indiği belirlenmiştir. Bu nedenle 4 bantlı MM tabanlı enerji hasatlayıcı-1 yapısının analizlerine devam edilmemiştir.

4.3.2 Dört bantlı metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı-2

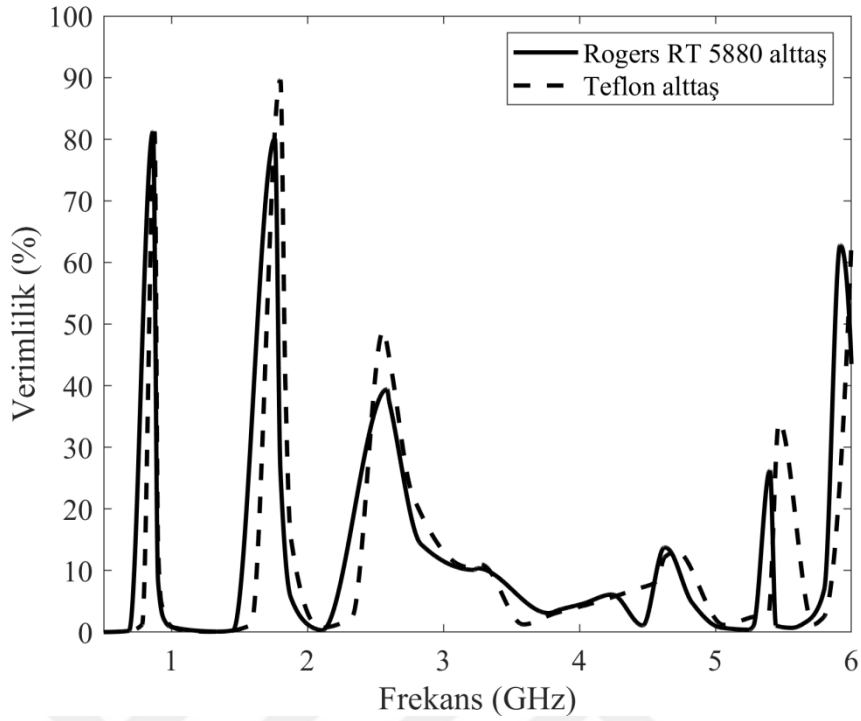
Tek bir birim hücrede dört bantta EM dalgayı hasatlayabilmek adına dört farklı SSRR kullanılmıştır. Daha öceki tasarımda olduğu gibi SSRR yapıları ayrık bölgelerinden birleştirilerek yapı üzerinde indüklenen akımın iletken hat üzerinde toplanması hedeflenmiştir. Şekil 4.16 (a)'da görülen SSRR yapısında alttaş malzemesi olarak ε değeri 2,1, μ değeri 1, ve tanδ değeri 0,0002 olan Teflon (PTFE) ve ε değeri 2,2, μ değeri 1 ve kayıp tanjant değerlerinin karşılaştırılması için tanδ değeri 0,0009 olan Rogers RT5880 kullanılmıştır. Fakat kullanılan dielektrik malzeme kalınlığı olarak tercih edilen 4 mm değeri Rogers RT5880 malzemesinin ticari olarak var olmayan bir değeri olduğu için sadece alttaş malzemesinin etkisini incelemek amacıyla analiz edilmiştir.



(a) (b)

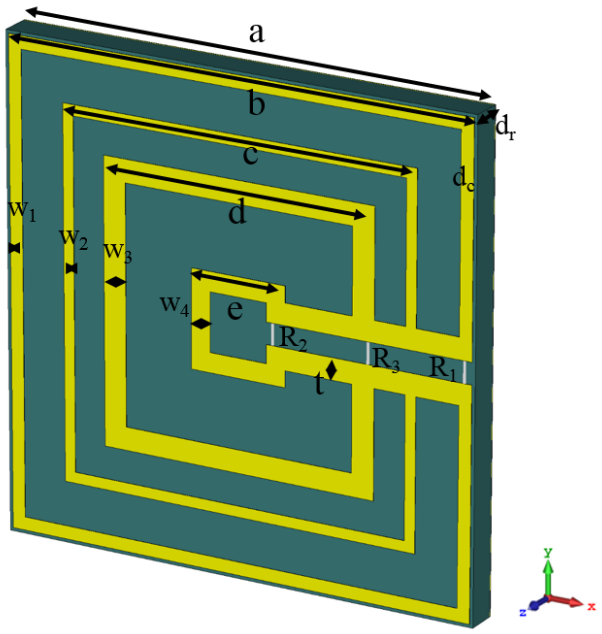
Şekil 4.16 (a) Tasarlanan birim hücre yapısı (b) EM dalganın elektrik alan yönelimi

Şekil 4.16 (a)'da verilen a parametresi, birim hücrenin kenar uzunluğunu, b parametresi, 0,9 GHz'de hasatlama yapması için tasarlanan SSRR'nin kenar uzunluğunu, w_1 ise söz konusu rezonatörün iletken kısmının genişliğini ifade etmektedir ve değerleri sırasıyla 45,5 mm, 45,0 mm ve 1,2 mm'dir. 1.8 GHz frekans değeri için tasarlanan SSRR'nin kenar uzunluğunu c, rezonatörün genişliğini ise w_2 temsil etmektedir ve değerleri sırasıyla 33,9 mm ve 0,8 mm'dir. SSRR'lerin birleştirildiği iletken şeridin kalınlığını t, ayrık bölgenin genişliğini ise g temsil etmektedir ve değerleri sırasıyla 1,2 mm ve 2 mm'dir. MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısında d parametresi, 2,6 GHz frekansında hasatlama yapması için tasarlanan SSRR'nin kenar uzunluğunu, w_3 ise rezonatörün genişliğini temsil etmektedir ve değerleri sırasıyla 24,6 mm ve 1,9 mm'dir. 5,8 GHz için tasarlanan SSRR'nin kenar uzunluğunu e, rezonatörün genişliğini ise w_4 temsil etmektedir ve değerleri sırasıyla 9,5 mm ve 1,1 mm'dir. SSRR'lerin birleştirilen ayrık bölgesine devre elemanı olarak entegre edilen dirençleri R_1 ve R_2 temsil etmektedir ve değerleri sırasıyla 5 Ω ve 100 Ω'dur. Alttaş malzemesi olarak tercih edilen Teflon ve Rogers RT 5880'nin kalınlığı d_r olarak ifade edilmiştir ve değeri 4 mm'dir. Toprak düzlem ve rezonatörler için kullanılan bakır kalınlığı d_c olarak ifade edilmiştir ve değeri 0.035 mm'dir.



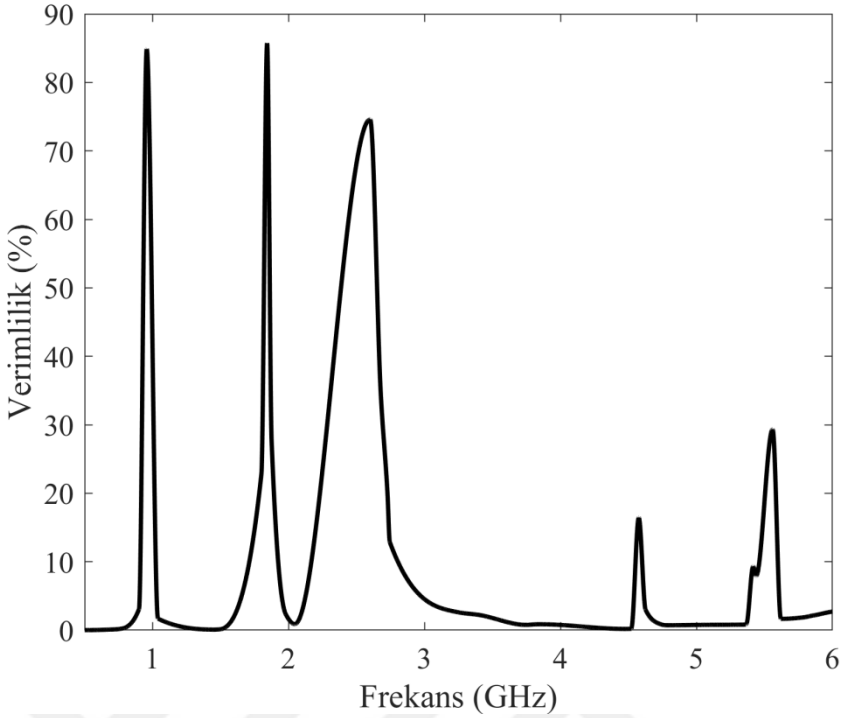
Şekil 4.17 Farklı alttaşlar kullanılarak elde edilen RF-AC verimliliği

Şekil 4.17'de görüldüğü üzere tanδ değeri Rogers RT5880'den daha düşük olan Teflon malzemesinde yapıya gelen EM dalga dielektrik katmanda daha az kayba uğramayarak bağlanan devre elemanı üzerinde AC akıma dönüşmektedir. Ancak MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısında hedeflenen ortalama %75 verimlilik oranına ulaşılamamıştır. 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekanslarında birim hücrenin ayrık bölgesine entegre edilen devre elemanları üzerindeki harcanan gücün yetersiz olması nedeni ile yapıda hasatlanan güce destek vermesi için SSRR'lerin ayrık bölgesine bir adet daha devre elemanı eklenmesinin, söz konusu frekanslardaki ve diğer frekanslardaki verimliliği pozitif yönde etkileyeceği düşünülmüştür. Bu nedenle rezonatörler üzerinde indüklenen akımı toplamak için tasarlanan iletken şeride şekil 4.18'de görüldüğü gibi bir devre elemanı daha eklenmiştir.



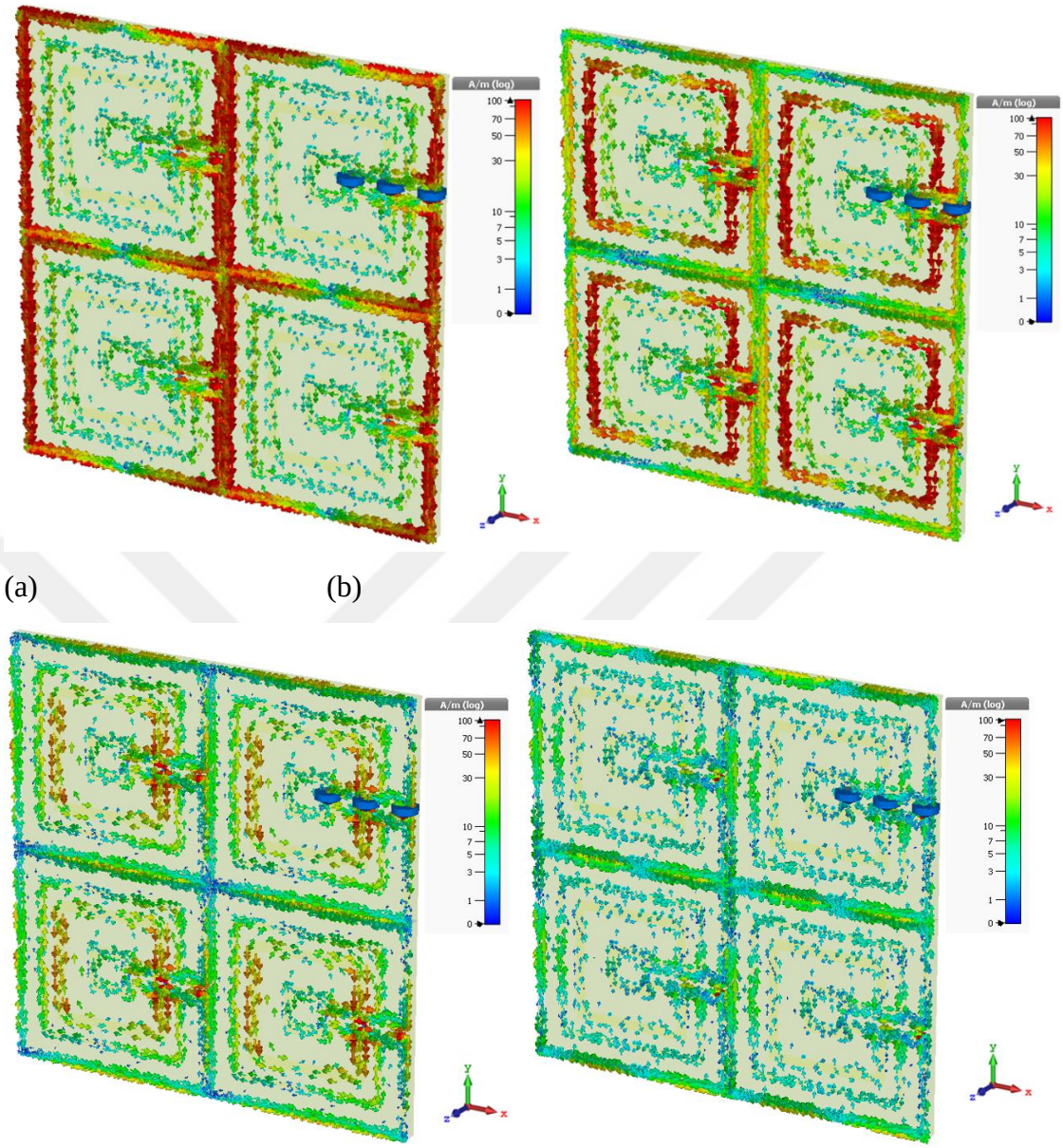
Şekil 4.18 Yapıya üçüncü devre elemanı eklendikten sonra birim hücre görüntüsü

Yapıya bir adet daha devre elemanı eklendikten sonra gerçekleştirilen parametrik analizler sonucunda daha önce verilen değerlerde de değişiklik meyadana gelmiştir. Şekil 4.18'de görülen a, b ve w_1 parametrelerinin değerleri sırasıyla 45 mm ve 44,4 mm ve 1,2 mm olmuştur. 1,8 GHz için tasarlanan SSRR'nin değerleri c ve w_2 parametrelerinin değerleri ise sırasıyla 33,9 mm ve 1 mm değerlerini almıştır. Birim hücredeki d parametresi ve w_3 parametrelerinin değerleri ise 26 mm ve 2,1 mm olmuştur. 5,8 GHz frekansı için tasarlanan SSRR'nin kenar uzunluğunu e, iletken kısmın genişliğini ise w_4 ise sırasıyla 10 mm ve 2 mm olarak değişmiştir. SSRR'lerin birleştirildiği iletken şeridin kalınlığı t ve ayrığın genişliği g parametreleri sırasıyla 2 mm ve 2,2 mm değerlerini almıştır. SSRR'lerin ayrık bölgesine bağlanan dirençler olan R_1, R_2 ve R_3'ün değerleri ise sırasıyla 5 Ω ve 100 ve 20 Ω'dur. Yapının uyarım yönü ise şekil 4.16 (b)'deki ile aynı olup elektriksel olarak uyarılmıştır. Bu değerlere karşılık gelen birim hücrede mikrodalgadan AC akıma çevrilen gücün grafiği ise şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19 Mikrodalga-AC dönüşüm verimliliği

Yapılan parametrik analizler sonucunda elde edilen en iyi verimlilik değerleri şekil 4.19'da verilmiştir. Öngörüldüğü gibi 2,6 GHz'de devre elemanları üzerinde çevrilen RF-AC verimliliği artmıştır. Fakat 5,8 GHz frekansında benzer oranda bir artış meydana gelmemiştir. CST Microwave Studio simülasyon programında yapı 0,5 W değerinde güce sahip EM dalga ile uyarılmıştır. Sinyal gücü üzerinden AC akıma dönüşerek devre elemanları üzerinde harcanan gücün verimlilik oranı hesaplandığında ise hedeflenen 0,9 ve 1,8 GHz frekanslarına oldukça yakın değerler bulunmuştur. 0,95 GHz'de RF-AC verimliliği %84,8 iken 1,85 GHz'de söz konusu verimlilik değeri %85 civarındadır. 2,6 GHz'de ise RF-AC verimliliği %75,5 civarındandır. 5,8 GHz'de ise kayda değer bir rezonans gerçekleşmediği için verimlilik değeri oldukça düşüktür.

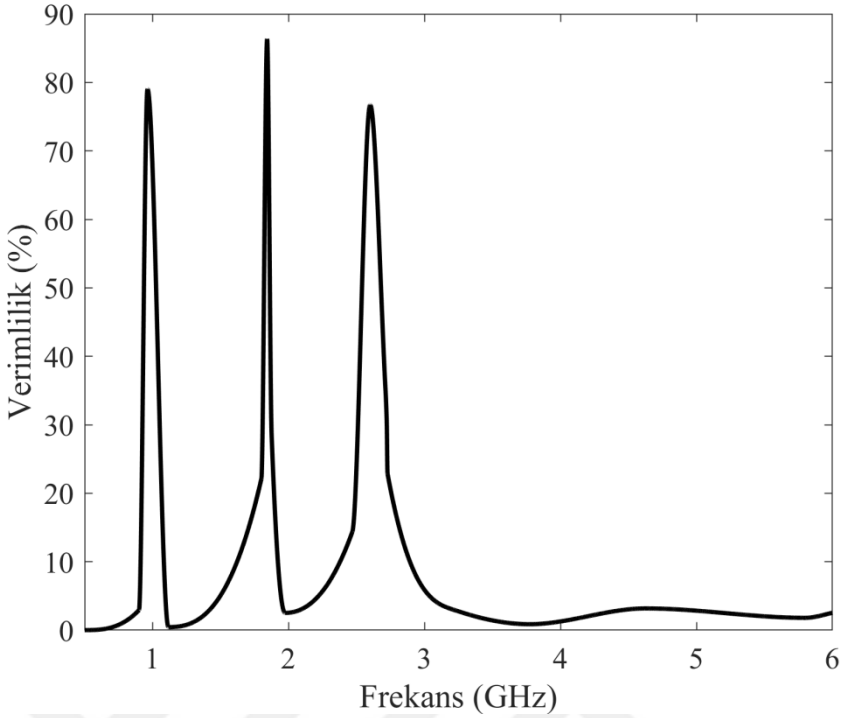


(a) (b)

(c) (d)

Şekil 4.20 Rezonas frekanslarında birim hücredeki yüzey akım dağılımları a) 0,95 GHz için b) 1,85 GHz için c) 2,6 GHz için d) 5,8 GHz için

Şekil 4.20'de verilen yüzey akım dağılımlarından görüldüğü gibi 0,95 GHz, 1,85 GHz ve 2,6 GHz'de yapı rezonatif tepki gösterirken 5,8 GHz yapı üzerinde kayda değer bir rezonans ve buna bağlı olarak yüzeyde indüklenen akımda kayda değer bir verimlilik elde edilememiştir. Bu nedenle 5,8 GHz'de hasatlama gerçekleşmemiştir.

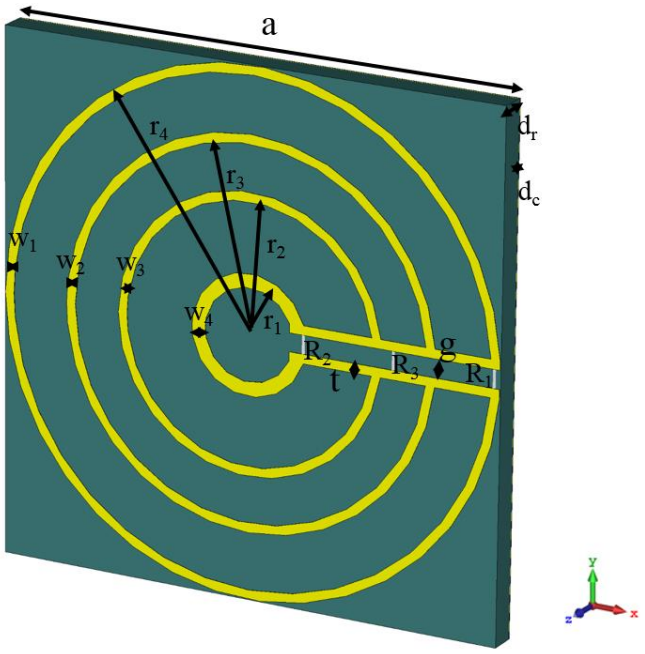


Şekil 4.21 Simülasyon programında birim hücrede hapsedilen güç

Şekil 4.21'de görüldüğü gibi birim hücrede rezonans frekansları olan 0,95 GHz, 1,85 GHz ve 2,6 GHz'de hapsedilen güç simülasyondaki elektromanyetik dalganın gücüne (0,5 W) oldukça yakınken hedeflenen bir diğer frekans olan 5,8 GHz'de birim hücre içinde hapsedilen güç neredeyse sıfırdır. Bu durum, yapının 5,8 GHz'deki empedansının havanın empedansına (377 ohm) uyuşmamasından kaynaklanmaktadır. Söz konusu frekansta empedans uyumunu sağlamak adına yapıda değişiklikler yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır ve problemi çözmeye yönelik adımlar atılmıştır.

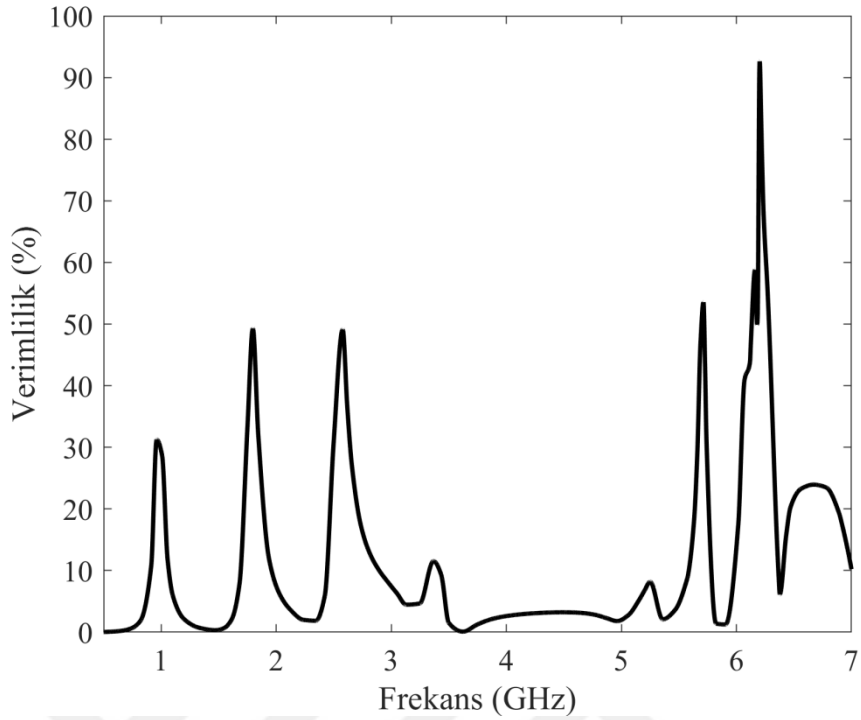
4.3.3 Dört bantlı metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı-3

Birim hücrede dört frekans bandında EM dalgayı AC akıma çevirmek için kare halka rezonatörler yerine bant genişliğini artıracağı için şekil 22'deki gibi iç içe geçmiş SRR'ler tasarlanmıştır. Halka rezonatörler daha önceki dört bantlı EM dalga hasatlama çalışmalarına ait tasarımlarda olduğu gibi ayrık kısımlarından bakır şerit ile birleştirilmiş ve üç adet direnç ile RF-AC dönüşümü yapılarak hasatlama yapılması hedeflenmiştir.



Şekil 4.22 SRR'ler ile MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısına ait birim hücre görüntüsü

Şekil 4.22'de verilen yapıda birim hücrenin kenar uzunluğunu temsil eden a değerinin karşılığı 56,4 mm'dir. 0,9 GHz'de EM hasatlama yapması için tasarlanan en dış kısımdaki halkanın yarıçapını r_4, halka rezonatörün genişliğini ise w_4 temsil etmektedir ve değerleri sırası ile 56,32 mm ve 1 mm'dir. 1,8 GHz frekansında EM hasatlama yapması için tasarlanan SRR'nin yarıçapını r_3, genişliğini ise w_3 temsil etmektedir ve değerleri sırasıyla 42 mm ve 1 mm'dir. 2,6 GHz'de EM hasatlama yapması için tasarlanan SRR'nin yarıçapını r_2, genişliğini ise w_2 temsil etmektedir ve değerleri sırasıyla 30 mm ve 1 mm'dir. Birim hücrenin iç kısmındaki SRR ise 5,8 GHz'de hasatlama yapması için tasarlanmıştır ve r_1 yarıçapını, w_1 ise genişliğini temsil etmektedir ve sırasıyla 13 mm ve 1,5 mm'dir. Şekil 4.22'de SRR'lerin ayrık genişliğini g, ayrık bölgeleri birleştiren hattın kalınlığını ise t temsil etmektedir ve değerleri sırasıyla 2 mm ve 1mm'dir. Birim hücrede ortamdaki elektromanyetik dalganın soğurulması ile AC akıma çevrilen enerjiyi hasatlamak için kullanılan devre elemanlarını R_1, R_2 ve R_3 temsil etmektedir ve değerleri sırasıyla 70 ohm 15 ohm ve 90 ohm olarak belirlenmiştir.



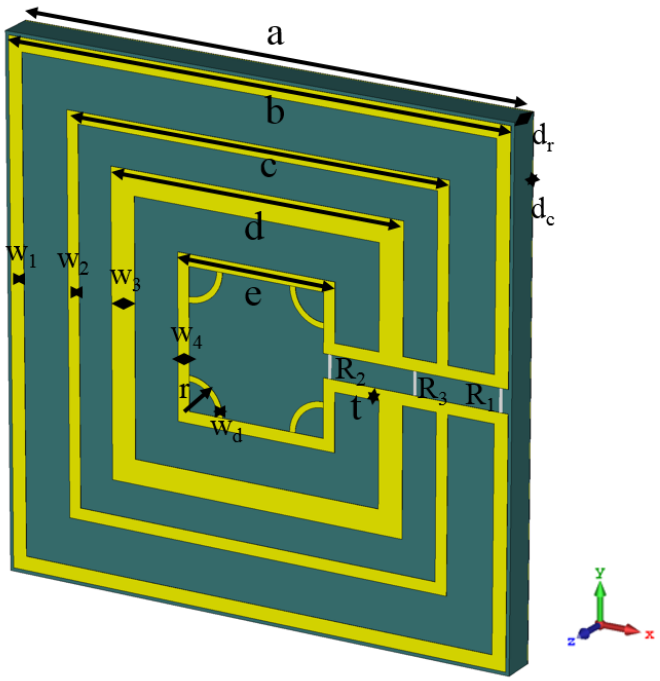
Şekil 4.23 RF-AC verimlilik grafiği

Birim hücrede dört adet SRR kullanılarak gerçekleştirilen EM dalga hasatlama tasarımı üzerinde yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen en iyi veri şekil 4.23'de verilmiştir. Sadece 5,8 GHz frekansında RF-AC verimliliği %50'nin üzerine çıkmış diğer üç bantta ise %50'nin altında kalmıştır ve verimlilik oranları hedeflenen ortalama verimlilik olan %75'in uzağında kalmıştır. RF'den AC akıma çevrim verimliliğini artırmak için daha fazla analiz yapılabilirdi ancak birim hücrenin boyutunun 5,8 GHz frekansına karşılık gelen dalga boyundan (yaklaşık 51 mm) büyük olması ve bu nedenle dalga boyu altı malzeme olma özelliğini kaybetmesinden dolayı söz konusu yapının analizlerine son verilmiştir.

4.3.4 Dört bantlı metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı-4

Daha önce Dört Bantlı MM Tabanlı Enerji Hasatlayıcı-2 başlığı altında sunulan çalışmanın analizleri sonucunda elde edilen sonuçların ve verilerin ışığından yola çıkılarak, 5,8 GHz'de EM dalgayı hasatlamak için söz konusu başlık altında sunulan SSRR'lerden oluşan birim hücrede değişiklikler yapılmıştır. Şekil 4.18'de en içteki

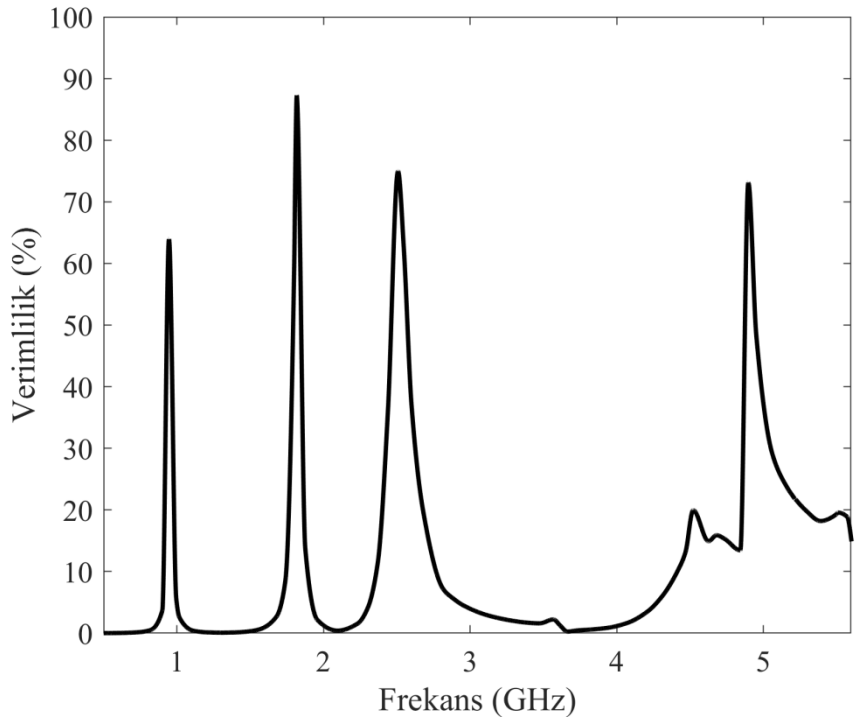
halka rezonatör, 5,8 GHz rezonans gerçekleştirmesi için tasarlanmıştı fakat yapılan parametrik analizler sonucunda, en içteki SSRR'nin boyutlarında değişiklik yapıldığı zaman birim hücrede oluşan akımı toplamak için tasarlanan bakır şeridin boyutları ile oynanması gerekmektedir. Bakır şeridin boyutları değiştirildiği zaman yapıdaki tüm rezonansların pik değerlerinde değişmeler meydana gelmektedir. Ek olarak 5,8 GHz için birim hücreye gelen EM dalgada soğurma ve hasatlama oluşmaması bu frekans için birim hücrede hava ile empedans uyuşması için değişiklikler yapılması gerekmektedir. Karşılaşılan bu tür sorunlar sonrasında tasarlanan birim hücrede 5,8 GHz'deki hasatlama bandı için ek bir yapı eklenmesinin EM dalganın soğurulmasına ve buna bağlı olarak hasatlama verimliliğine faydası olacağı düşünülmüştür. Bu bağlamda şekil 4.24'de görüldüğü gibi iç kısımdaki SSRR'ye dört eş çeyrek halka rezonatör ilave edilmişir.



Şekil 4.24 MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısına ait birim hücre görüntüsü

Şekil 4.24'de verilen birim hücrenin kenar uzunluğu a ile gösterilmişir ve değeri 45 mm'dir. 0,9 GHz'de rezonans oluşması için tasarlanan dış kısımdaki SSRR'nin kenar uzunluğu b, genişliği ise w_1 ile gösterilmiştir ve sırasıyla 44,4 mm ve 1,2 mm'dir. 1,8 GHz'de rezonans oluşması için tasarlanan SSRR'nin kenar uzunluğu c, genişliği w_2 ile

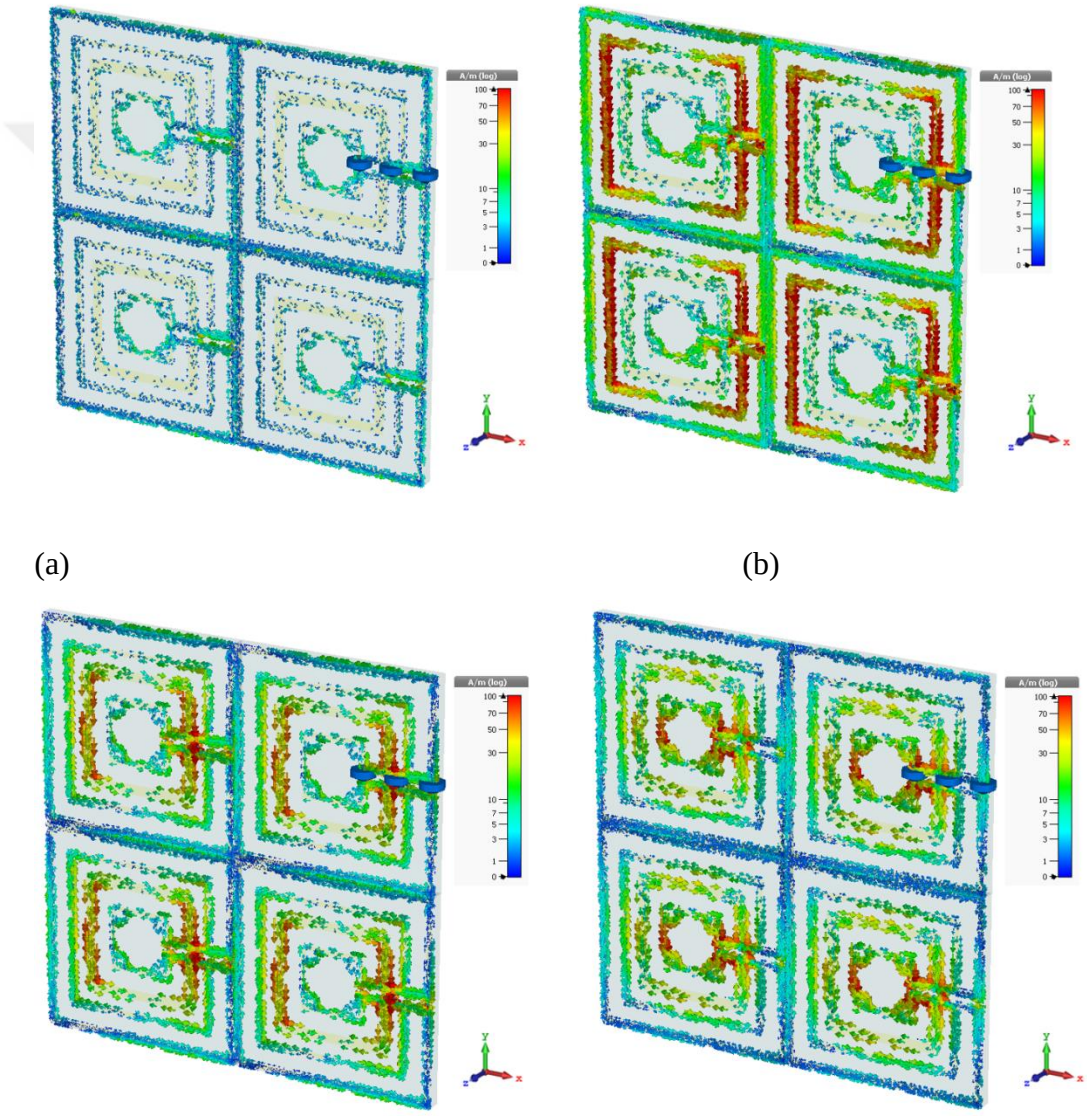
temsil edilmiştir ve değerleri sırasıyla 33,9 mm ve 1 mm'dir. 2,6 GHz'de rezonans oluşması için tasarlanan SSRR'nin kenar uzunluğu d, genişliği ise w_3 ile temsil edilmiştir ve sırası ile 26 mm ve 2,1 mm'dir. 5,8 GHz'de rezonans oluşması için tasarlanan iç kısımdaki SSRR'nin kenar uzunluğu e, genişliği ise w_4 ile temsil edilmiştir ve karşılıkları sırasıyla 14 mm ve 1 mm'dir. İç kısımdaki SSRR'ye ilave edilen çeyrek halka dilim rezonatörlerin yarıçapı r, genişliği ise w_d ile temsil edilmiştir ve sırasıyla 2,5 mm ve 0,5 mm'ye karşılık gelmektedir. Alttaş malzemesi olarak kullanılan saf teflonun kalınlığı d_r ile, rezonatörlerde kullanılan bakırın kalınlığı d_c ile temsil edilmiştir ve değerleri sırasıyla 4 mm ve 0.035 mm'dir. Birim hücrede soğurulan EM dalga ile oluşan akımı toplamak için ayrık bölgeye entegre edilen dirençler R_1, R_2 ve R_3 ile temsil edilmiştir ve sırasıyla 5 ohm, 100 ohm ve 20 ohm'a karşılık gelmektedir.



Şekil 4.25 Birim hücrede gerçekleştirilen RF-AC çevrim verimliliği

CST Microwave Studio simülasyon programında yapılan analizler neticesinde hedeflenen frekans bantlarına oldukça yakın değerlerde elde edilen mikrodalgadan AC akıma çevrilen EM dalganın verimlilik grafiği şekil 4.25'de verilmiştir. Simülasyonlarda sınır koşulları periyodik olarak seçilip, elektrik alan yönelimi birim

hücre elektriksel olarak uyarılacak biçimde –*y* doğrultusunda belirlenmiştir. 0,9, 1,8, 2,6 GHz'e yakın frekanslarda rezonaslar elde edilirken şekil 4.25'de 5,8 GHz'e yakın bir frekansta rezonansa ulaşılamadığı görülmektedir. Gerçekleştirilen birçok parametrik analizin neticesinde elde edilen sonuçların paylaşıldığı şekil 4.25'deki grafikte yer alan verilere göre 0,94 GHz'de %64,0, 1,82 GHz'de %87,3 oranında verimlilik elde edilmiştir. 2,51 GHz'de %74,9, 4,9 GHz'de %73 oranında verimlilik elde edilmiştir. Rezonans frekanslarındaki ortalama verimlilik ise %74,8'dir.



(a) (b)

(c) (d)

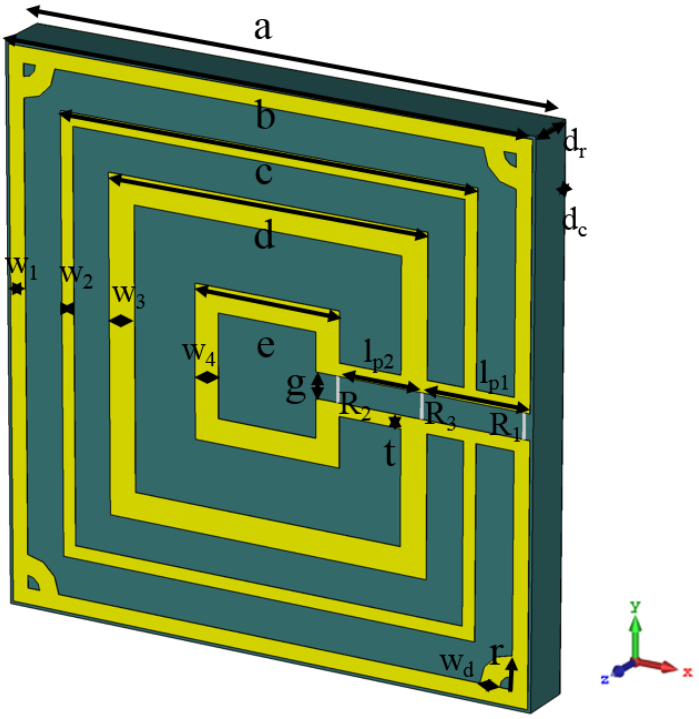
Şekil 4.26 Birim hücre üzerinde oluşan yüzey akım dağılımları (a) 0,94 GHz'de (b) 1,82 GHz'de (c) 2,51 GHz'de (d) 4,9 GHz'de

Şekil 4.26'da görüldüğü gibi rezonans frekansları için tasarlanan SSRR'lerde oluşan yüzey akımları devre elemanlarının yerleştirildiği ayrık bölgede birikmektedir. Fakat 0,94 GHz'de en dış kısımdaki SSRR'nin yanı sıra iç kısımda bulunan SSRR'den de katkı gelmektedir. 5,8 GHz frekansında rezonans oluşması için birim hücreye bir yapı eklenmesi fikrinin olumlu sonuç verdiği şekil 4.25 ve şekil 4.26'da görülmektedir. Birim hücrenin iç kısımındaki SSRR'ye eklenen dört adet çeyrek dilim halka rezonatörün şekil 4.26 (d)'deki yüzey akım dağılımından görüldüğü EM dalganın hasatlanmasına katkı yaptığı anlaşılmaktadır.

Gerçekleştirilen parametrik analizler ve değerlendirmeler ile şekil 4.25'de verilen verimlilik grafiğinde görüldüğü gibi 4,9 GHz'de meydana gelen rezonans hedeflenen 5,8 GHz'e getirilmeye çalışılmıştır. Fakat yapılan denemeler ve analizler neticesinde söz konusu frekans değeri için rezonans frekansı hedef frekansa yaklaştırılamamıştır. Gerçekleşen rezonansı 5,8 GHz'e yaklaştırmak için yapılan simülasyon çalışmalarında, çeyrek dilim halka rezonatörlerin boyutlarında yapılan değişiklikler nedeni ile rezonans frekansının genliğinde azalmalar oluşmuştur ve rezonans kaybolma noktasına gelmiştir. Bu durumda tekrar empedans uyuşmazlığı meydana geldiği düşünülmüş ve yapının simülasyon çalışmarına son verilerek birim hücrede değişiklik yapılması gerektiğine karar verilmiştir.

4.3.5 Dört bantlı metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı-5

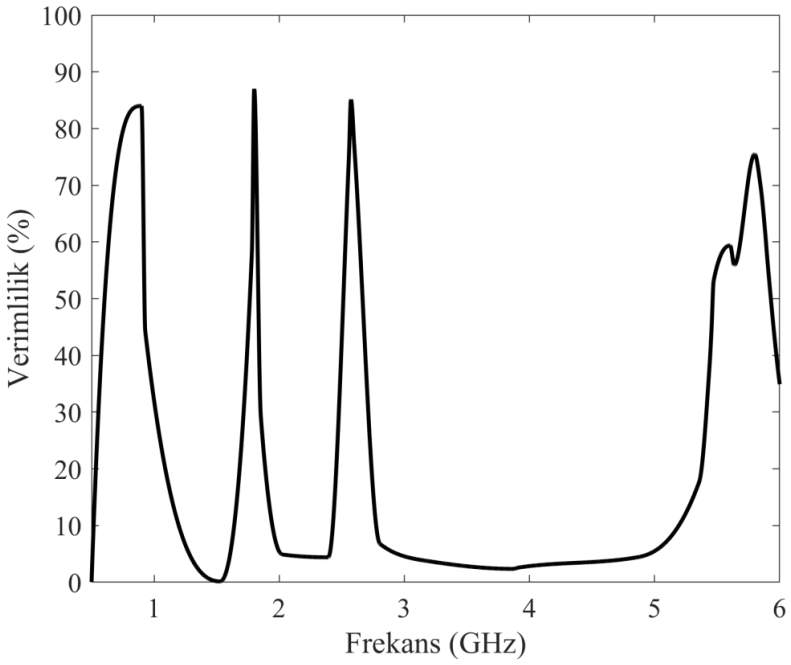
Hedeflenen EM hasatlama frekanslarından biri olan 5,8 GHz'deki soğurma ve hasatlama sorununu giderebilmek için birim hücrede değişiklikler yapılmıştır. Daha önce yapılan MM tabanlı enerji hasatlayıcı tasarımlarında incelenen yüzey akım dağılımlarında 5,8 GHz'deki hasatlama verimliliğine katkı sağladığı anlaşılan ve dış kısımda bulunan SSRR'ye Şekil 4.27'de görüldüğü üzere çeyrek halka dilim rezonatörler ilave edilmiştir.



Şekil 4.27 Dört bantlı MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısına ait birim hücre görüntüsü

Şekil 4.27'de verilen birim hücre görüntüsünde a ile temsil edilen birim hücre kenar uzunluğunun değeri 43 mm'dir. 0,9 GHz'de EM hasatlama yapması için tasarlanan dış kısımdaki SSRR'nin kenar uzunluğu b, genişliği w_1 ile temsil edilmiştir ve sırasıyla 42,5 mm ve 1,25 mm'ye karşılık gelmektedir. Hedeflenen 1,8 GH frekans bandı için tasarlanan SSRR'nin kenar uzunluğu c, genişliği w_2 ile temsil edilmiştir ve sırasıyla 33,9 mm ve 1 mm'ye karşılık gelmektedir. 2,6 GHz'de EM hasatlama yapması için tasarlanan SSRR'nin kenar uzunluğu d, genişliği w_3 ile ifade edilmiştir ve sırası ile 26 mm ve 2,1 mm'ye karşılık gelmektedir. 5,8 GHz'de için tasarlanan iç kısımdaki SSRR'nin kenar uzunluğu e, genişliği w_4 ile temsil edilmiştir ve sırasıyla 11,8 mm ve 1,9 mm'ye karşılık gelmektedir. Dış kısımdaki SSRR'ye eklenen çeyrek dilim halka rezonatörlerin yarıçapı r, genişliği w_d ile temsil edilmiştir ve değerleri sırasıyla 2,6 mm ve 1,6 mm'dir. Alttaş malzemesi olarak kullanılan saf teflonun kayıp tanjant değeri tanδ=0,0002 ve d_r ile ifade edilen kalınlık değeri 4 mm'dir. Rezonatörler için kullanılan bakırın kalınlığı d_c ile ifade edilmiştir ve değerleri 0.035 mm'dir. Soğurulan EM dalgayla rezonatörler üzerinde oluşan yüzey akımlarını toplamak için yapıya ilave edilen devre elemanları R_1, R_2 ve R_3 ile temsil edilmiştir ve değerleri sırasıyla 240 ohm,

40 ohm ve 15 ohm'dur. Bakır hatta bağlanan dirençlerden R_3 bu hattın ortasında bulunmaktadır. Şekil 4.27'de görüldüğü üzere orta noktadan (merkezde bulunan R_3 konumundan) l_{p1} kadar uzaklığa R_1, l_{p2} kadar uzaklığa R_2 dirençleri eklenmiştir ve değerleri sırasıyla 8,2 mm ve 6,8 mm'dir.



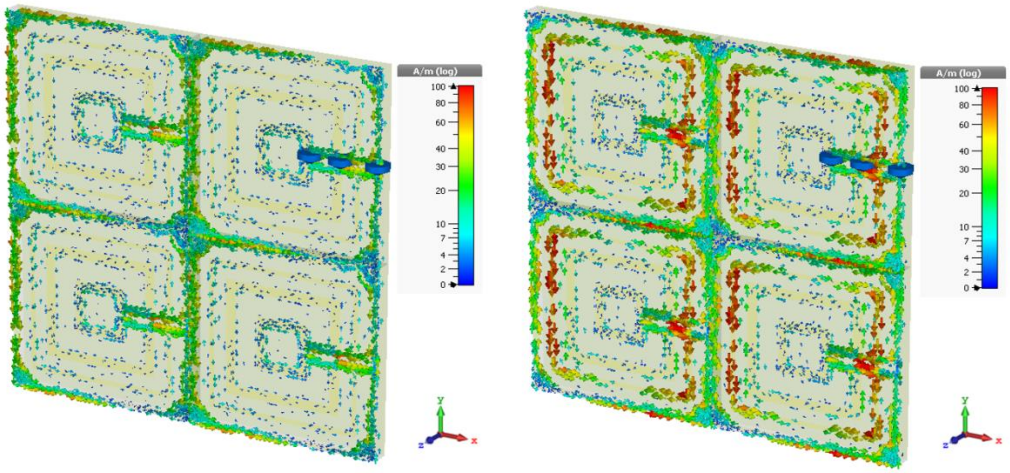
Şekil 4.28 Devre elemanları üzerinde harcanan güç

CST Microwave Studio tam dalga simülasyon programında yapılan parametrik analizlerin ardından elde edilen mikrodalgadan AC akıma dönüşümün verimlilik grafiği şekil 4.28'de verilmiştir. Grafikteki rezonans bantlarının pik noktalarına ait verimlilik oranları çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Tasarıma ait hedef frekanslardaki verimlilik değerleri

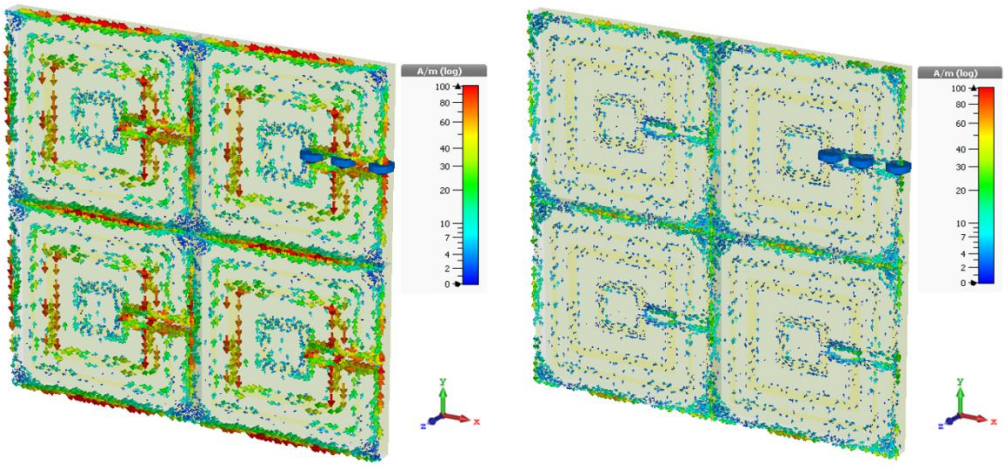
Frekans (GHz)	0,9	1,8	2,6	5,8
Verimlilik (%)	83,98	87	76,84	75,51
Ortalama Verimlilik (%)	%80,83			

Çizelge 4.1'de görüldüğü üzere tek bir birim hücrede hedeflenen dört frekansta hedeflenen %75 verimliliğin ortalama %80,83 ile üzerine çıkılmıştır. Şekil 4.29'da sunulan yüzey akım dağılımlarından anlaşıldığı gibi 5,8 GHz'de hasatlama gerçekleştirmesi için tasarlanan dış kısımdaki SSRR'nin köşelerine ilave edilen çeyrek dilim halka rezonatörler tüm rezonans frekanslarında küçük de olsa katkılar yapmaktadır.



(a) (b)

Şekil 4.29 Birim hücreye ait yüzey akım dağılımları (a) 0,9 GHz için (b) 1,8 GHz için (c) 2,6 GHz için (d) 5,8 GHz için

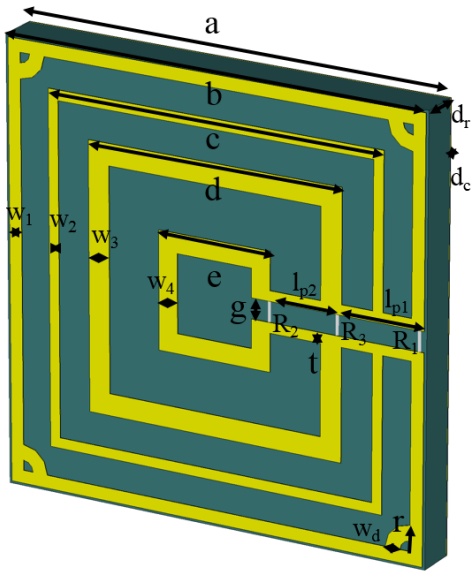


(c) (d)

Şekil 4.29 Birim hücreye ait yüzey akım dağılımları (a) 0,9 GHz için (b) 1,8 GHz için (c) 2,6 GHz için (d) 5,8 GHz için (devam)

Elde edilen sonuçlardan sonra üretim aşamasına ve birim hücreye entegre edilen devre elemanlarının alım sürecine geçilmiştir. Fakat yurt içinde yapı üzerinde kullanılan devre elemanlarının değerlerine sahip SMD direnç bulunamadığı için yurt içinden temin edilen devre elemanlarının değerleri üzerinden tekrar simülasyon programı üzerinden parametrik analizlere geçilmesi gerekmiştir.

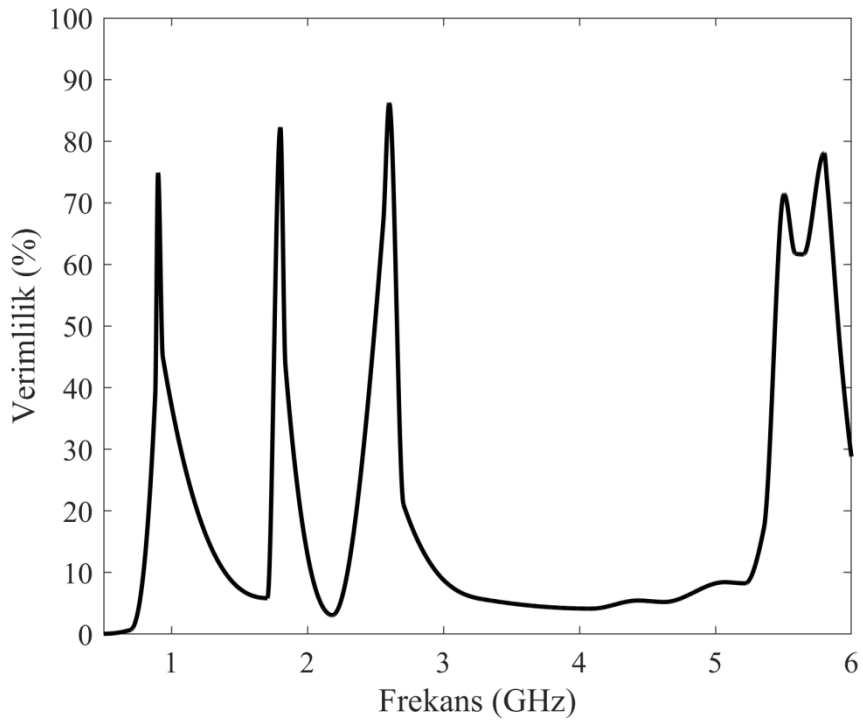
Tasarlanan birim hücre geometrisinde değişiklik yapılmadan, temin edilen devre elemanları kullanılarak parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak dirençler ile sınırlı kalınarak gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında istenilen ortalama verimlilik oranına ulaşılamadığı için SSRR'ler üzerinden de simülasyon programı üzerinden parametrik analiz yapılması zorunlu olmuştur. Tekrar parametrik analiz çalışmalarına dönülmesi simülasyon çalışmalarının uzamasına neden olmuştur. Elde edilen birim hücrenin geometrisi **şekil 4.27**'de sunulan birim hücre yapısı ile aynı olmasına karşın boyutlarında farklılıklar bulunmaktadır.



Şekil 4.30 Parametrik analizler sonucunda elde edilen yapının birim hücre görüntüsü

MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısında alttaş malzemesi olarak tercih edilen saf teflon, rezonatörler ve toprak düzlemi için kullanılan bakırın özelliklerinde bir değişiklik yapılmamıştır. Şekil 4.30'da verilen a birim hücrenin kenar uzunluğunu ifade

etmektedir ve 43 mm'dir. Dış kısımda bulunan SSRR'nin kenar uzunluğu b, genişliği w_1 ile gösterilmiştir ve sırasıyla 42,5 mm ve 1,25 mm'dir. 1,8 GHz frekansında soğurma ve hasatlama yapması için tasarlanan SSRR'nin kenar uzunluğunu c, genişliğini w_2 ifade etmektedir ve sırasıyla 34,2 mm ve 1mm'dir. 2,6 GHz'deki bant için tasarlanan SSRR'nin kenar uzunluğu d, genişliği w_3 ile temsil edilmiştir ve sırasıyla 25,9 mm ve 2,1 mm'dir. İç kısımda bulunan SSRR'nin kenar uzunluğu e ve genişliği w_4 ile gösterilmiştir ve sırasıyla 11,8 mm ve 1,9 mm'dir. Şekil 4.30'da görüldüğü gibi dış kısımdaki SSRR'nin köşe kısımlarına yerleştirilen çeyrek dilim halka rezonatörlerin yarıçapı r, genişliği ise w_d olmak üzere değerleri sırasıyla 2,5 mm ve 1,5 mm'dir. SSRR'lerin birleştirildikleri iletken hattın genişliği t ile ifade edilmiştir ve sayısal değeri 1 mm'dir. Ayrık kısmın genişliğini gösteren g'nin değeri 2 mm'dir. R_3 devre elemanının bağlandığı kısım iletken hattın tam ortası olmakla birlikte lp_1, R_1'in merkezden olan uzaklığına, lp_2 ise R_2'nin merkezden olan uzaklığına karşılık gelmektedir ve değerleri sırasıyla 8,2 mm ve 6,8 mm'dir. R_1, R_2 ve R_3'e karşılık gelen değerler ise 270 ohm, 33 ohm ve 27,4 ohm'dur.



Şekil 4.31 Simülasyon çalışmalarının ardından elde edilen verimlilik grafiği

CST Microwave Studio simülasyon programında gerçekleştirilen parametrik analizlerin ardından elde edilen verimlilik grafiği şekil 4.31'de verilmiştir. Birim hücre üzerinde soğurulan EM dalgadan AC akıma çevrilme verimliliği oranları çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Tasarıma ait hedef frekanslardaki verimlilik değerleri

Frekans (GHz)	0,9	1,8	2,6	5,8
Verimlilik (%)	74,9	82,26	86,2	78,1
Ortalama Verimlilik (%)	%80,37			

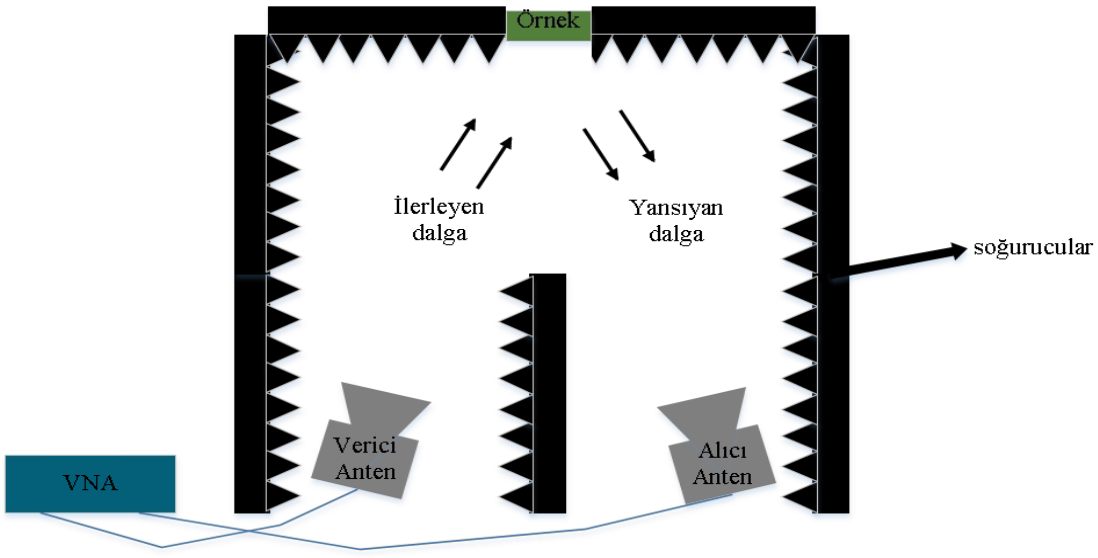
Yapılan parametrik analizlerin ardından ulaşılan değerler hedeflenen ortalama %75 verimlilikten daha yüksek bir oran ile elde edildikten sonra MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapının üretim aşamasına geçilmiştir. Yurt içinden veya yurt dışından iki yüzü 35 μm kalınlıkta bakır kaplı 4 mm kalınlığında saf teflon (politetrafloroetilen) alttaş alınamadığı için yurt içinden bakır kaplamasız PTFE alınmıştır. Ardından 35 μm iletken kalınlığa sahip bakır bant satın alınmıştır. Bakır bant yeterince geniş olmadığı için yekpare olarak teflonun üzerine yapıştırılamamış bu nedenle birim hücre boyutuna uygun olarak kare parçalar kesilerek alttaş malzemesinin her iki tarafına şekil 4.32 (a)'da görüldüğü gibi yapıştırılmıştır. Yapıştırılan kare bant parçalar, ek yerleri SSRR üzerinde herhangi bir girişim meydana getirmesin diye komşu birim hücreler arasındaki boşluklara denk gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Fotolitografi yöntemi kullanılarak üretilen MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısı şekil 4.32 (b)'de verilmiştir. Üretilen yapının açıklık kısmına daha önce değerleri verilen dirençler lehimlenerek ölçüme hazır hale getirilmiştir.



(a) (b)

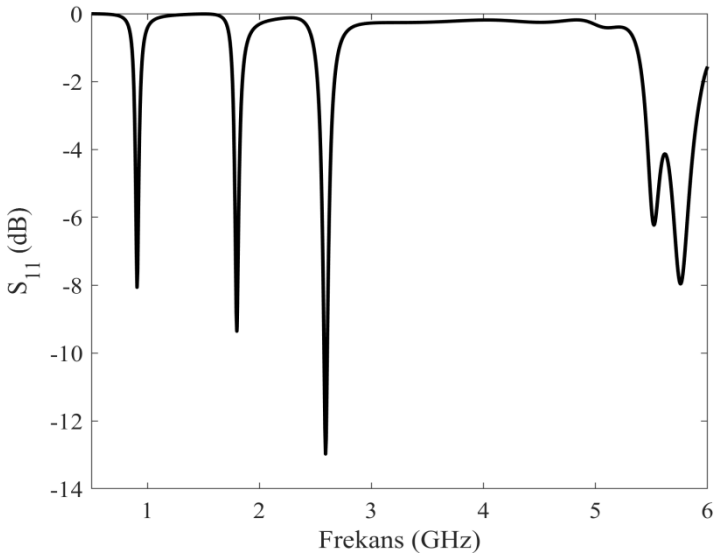
Şekil 4.32 Üretilen MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısı (a) üretilmeden önce (b) üretildikten sonra

Yansıma (S_{11}) ölçümlerinin yapıldığı deney düzeneğinin genel görünümü **şekil 4.33**'de verilmiştir. MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısının ölçümlerinin gerçekleştirileceği alan mikrodalga soğurucular ile çevrelenerek oluşturulan yarı yankısız odada dış etkilerden ve oluşacak elektromanyetik girişimlerden korunarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Verici horn antenden iletilen elektromanyetik dalgalar test altındaki numuneden yansıtılarak alıcı horn antenden alınan yansıma spektrumu verileri network analizörüne aktarılmıştır.

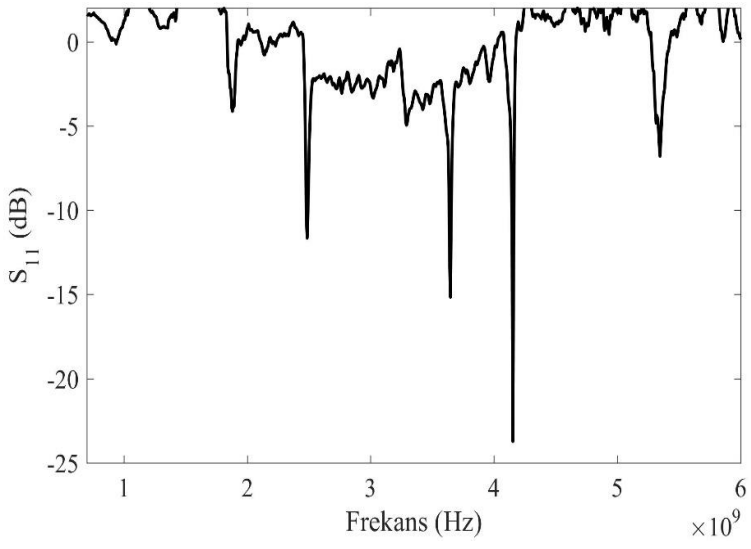


Şekil 4.33 S parametresi ölçüm düzeneğinin genel çizimi

Şekil 4.32 (b)'de verildiği gibi 9x9 dizi şeklinde üretilen MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısında hassas bir üretim yapılamamıştır. Dış kısımdaki SSRR'nin köşe noktalarına eklenen çeyrek dilim halka rezonatörlerin orta kısmında olması gereken boşluklar aşınmamıştır ve birim hücreler birçok noktada birbirine temas etmektedir ve MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısı yer yer tek parça yapı şeklinde davranmaktadır. Sonuç olarak simülasyon programında elde ettiğimiz yansıma parametresi verilerinin benzerinin üretilen numuneden ölçülmesi mümkün olmamıştır.



(a)



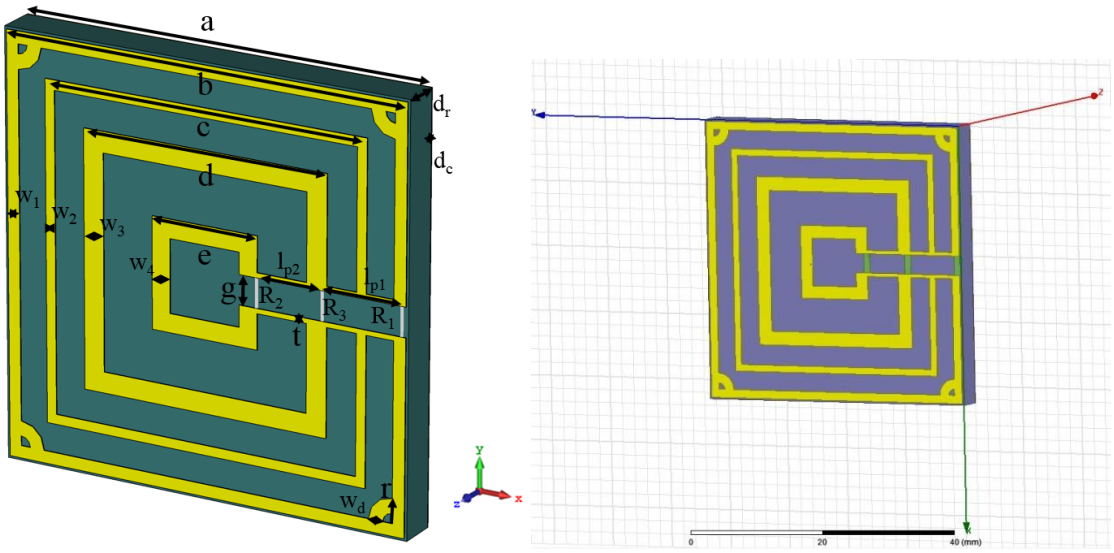
(b)

Şekil 4.34 MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısına ait (a) simülasyon programında elde edilen (b) yapılan ölçümde elde edilen S_{11} grafikleri

Şekil 4.34 (a)'da verildiği gibi simülasyon programında hedeflenen frekanslarda soğurma meydana gelmektedir. Fakat şekil 4.34 (b)'de verilen ölçüm sonuçlarında aynı sonuçlara ulaşılamamıştır. Daha önce bahsedilen üretim hatalarından kaynaklanan nedenlerden dolayı ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçları arasında uyuşmazlık olduğu sonucuna varılmıştır.

MM malzeme tabanlı enerji hasatlayıcı yapısının üretim aşamasında oluşan hataları engellemek adına yapının tek parça bakırdan üretilmesine karar verilmiştir. Fakat yurt içinde ve yurt dışında gereken büyüklükte ve kalınlıkta bakır bant bulunamamıştır. Bakır bant dışında 35 μm kalınlığında bakır folyo alınması için araştırmalar yapılmış ancak söz konusu kalınlıktaki bakır folyo da ticari olarak bulunamamıştır. Yapılan araştırmalar sonucu bulunan en ince bakır folyo 100 μm kalınlıkta olup bu malzemenin alınmasına karar verilmiştir.

Simülasyon programında bakır kalınlığı 100 μm olarak değiştirildikten sonra yapı üzerinde benzetim ortamında çalışmalara geri dönülmüştür. Tasarım üzerinden devam eden CST Microwave Studio Tam Dalga Paket Yazılım Programı'ndaki çalışmalarda yapının geometrisinde değişiklik yapılmamış daha önce verilen değerler üzerinde değişiklikler yapılarak hedeflenen frekanslarda EM dalgayı hasatlama çalışmaları devam etmiştir.



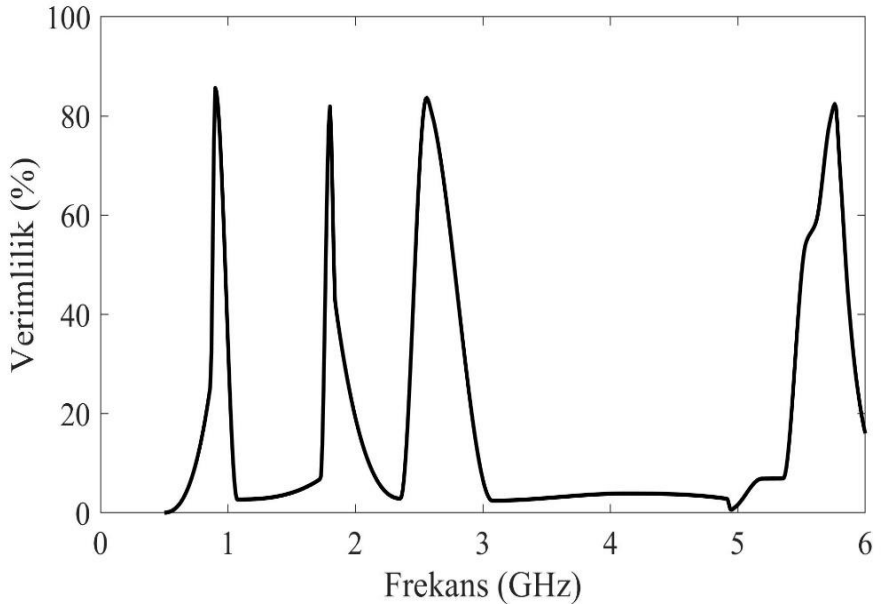
(a) (b)

Şekil 4.35 CST Microwave Studio (a) ve Ansoft HFSS (b) programlarında tasarlanan yapıya ait birim hücre görüntüleri

Birim hücrenin sahip olduğu kenar uzunluğu şekil 4.35'de görüldüğü gibi a ile temsil edilmiştir ve 43 mm'dir. 0,9 GHz'de rezonans gerçekleştirmesi için tasarlanan dış kısımdaki SSRR'nin kenar uzunluğu b, genişliği w_1 ile temsil edilmiştir ve sırasıyla 42,5 mm ve 1,25 mm'dir. 1,8 GHz'de rezonans gerçekleştirmesi için tasarlanan SSRR'nin kenar uzunluğu c, genişliği w_2 ile ifade edilmiştir ve sırasıyla 34,2 mm ve 1 mm'dir. 2,6 GHz'de gerçekleştirmesi için tasarlanan SSRR'nin kenar uzunluğu d, genişliği w_3 ile temsil edilmiştir ve sırası ile 25,9 mm ve 2,1 mm'dir. 5,8 GHz'de rezonans gerçekleştirmesi için tasarlanan iç kısımdaki SSRR'nin kenar uzunluğu e, genişliği w_4 ile gösterilmiştir ve değerleri sırasıyla 11,2 mm ve 1,9 mm'dir. Yapının dış kısımdaki SSRR'nin köşelerine eklenen çeyrek dilim halka rezonatörlerin yarıçapı r, genişliği w_d ile gösterilmiştir ve sayısal karşılıkları sırasıyla 2,5 mm ve 1,5 mm'dir. Alttaş malzemesi olarak yine PTFE kullanılmıştır ve değeri aynı şekilde 4 mm olarak sabit kalmıştır. Yapının iletken kısımları için kullanılan bakırın kalınlığı d_c olarak gösterilmiş ve değeri 0,1 mm olarak değiştirilmiştir. Birim hücrede soğurulan EM dalga ile yapı üzerinde oluşan akımı hasatlamak için yapının açıklık kısmına entegre edilen dirençler R_1, R_2 ve R_3 ile gösterilmiş ve değerleri sırasıyla 270 ohm, 33 ohm ve 15 ohm'dur. Bakır hatta entegre edilen dirençlerden R_3 ayrık kısmın tam ortasında yerleştirilmiştir. Şekil 4.35'de görüldüğü gibi orta noktadaki R_3'den l_{p1} kadar uzaklığa R_1, l_{p2} kadar

uzaklığa R_2 dirençleri yerleştirilmiştir ve uzaklıkların değerleri sırasıyla 8,35 mm ve 6,95 mm'dir. SSRR'lerin birleştirildikleri iletken hattın genişliği t ile gösterilmiştir ve değeri 0,5 mm'dir. Ayrık bölgenin genişliğini temsil eden g'nin değeri ise 3 mm'dir.

Şekil 4.36'da MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısına ait verimlilik grafiği verilmiştir. Simülasyon çalışmalarının yapıldığı CST Microwave Studio Programı'nda birim hücreyi uyarmak için gönderilen EM sinyali 0,5 W olarak belirlenmiştir ve bu güç değeri temel alınarak hesaplanan verimlilik değerleri ve hasatlamanın yapıldığı frekans karşılıkları çizelge 4.3'de verilmiştir.

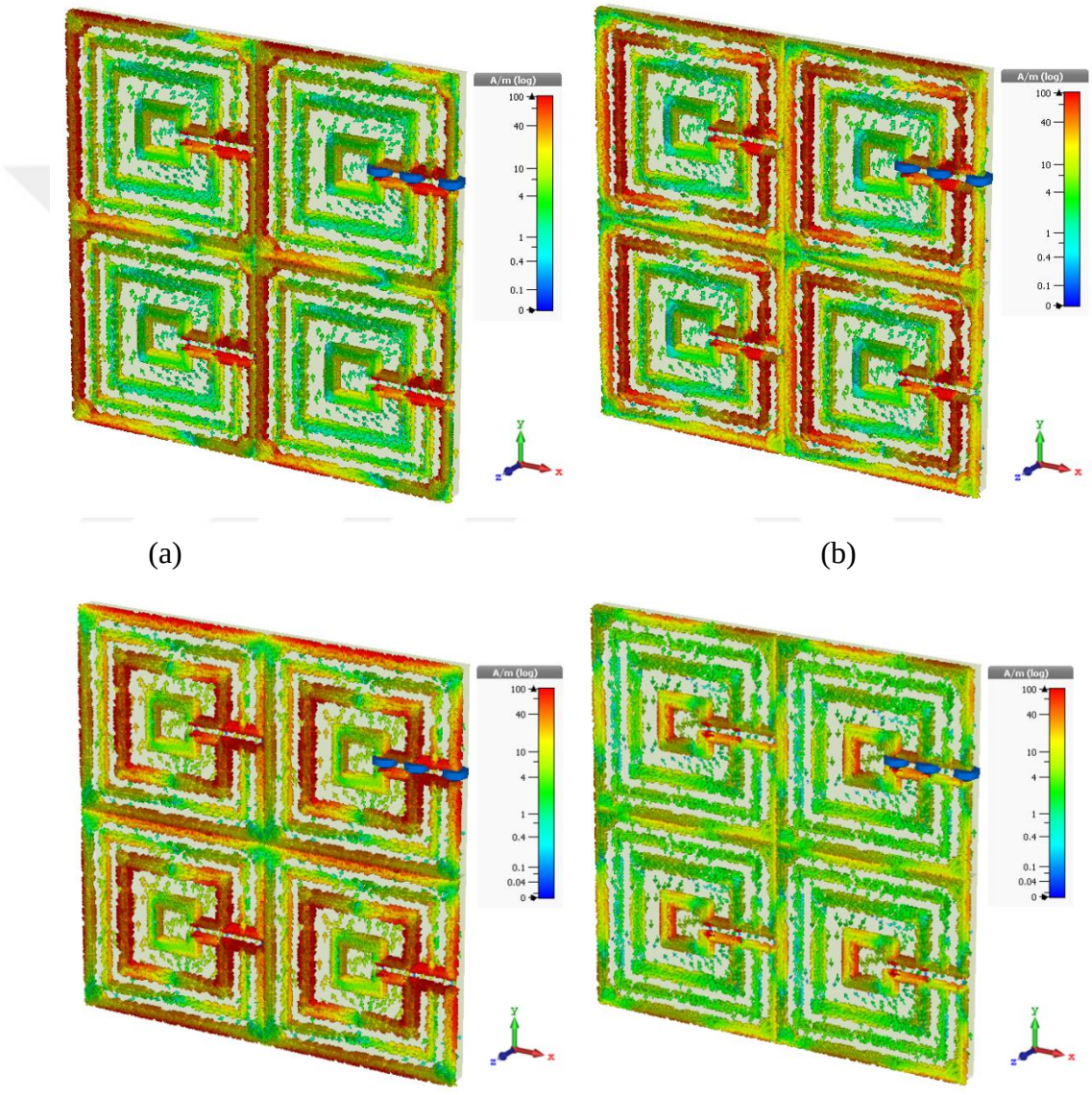


Şekil 4.36 Tasarım 11-3'e ait verimlilik grafiği

Çizelge 4.3 Tasarıma ait hedef frekanslardaki verimlilik değerleri

Frekans (GHz)	0,9	1,8	2,6	5,8
Verimlilik (%)	85,7	82	80,4	69,8
Ortalama Verimlilik (%)	%79,5			

Çizelge 4.3'deki verilerden anlaşıldığı gibi birim hücrede hedeflenen frekans bantlarında ortalama verimlilik açısından %75'in üzerinde hasatlama gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak üretim aşamasında karşılaşılan olumsuzluklara rağmen hedeflenen verimlilik oranına simülasyon çalışmalarında ulaşılmıştır. Birim hücre üzerindeki SSRR yapılarında rezonans frekanslarındaki yüzey akım dağılımları şekil 4.37'de verilmiştir.

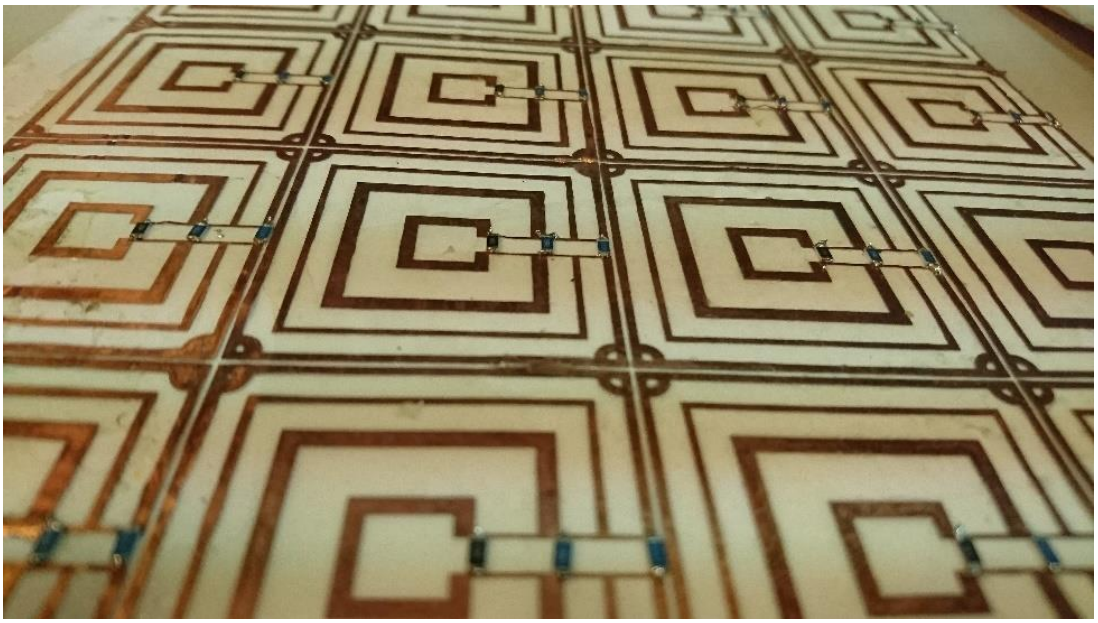


(a) (b)

(c) (d)

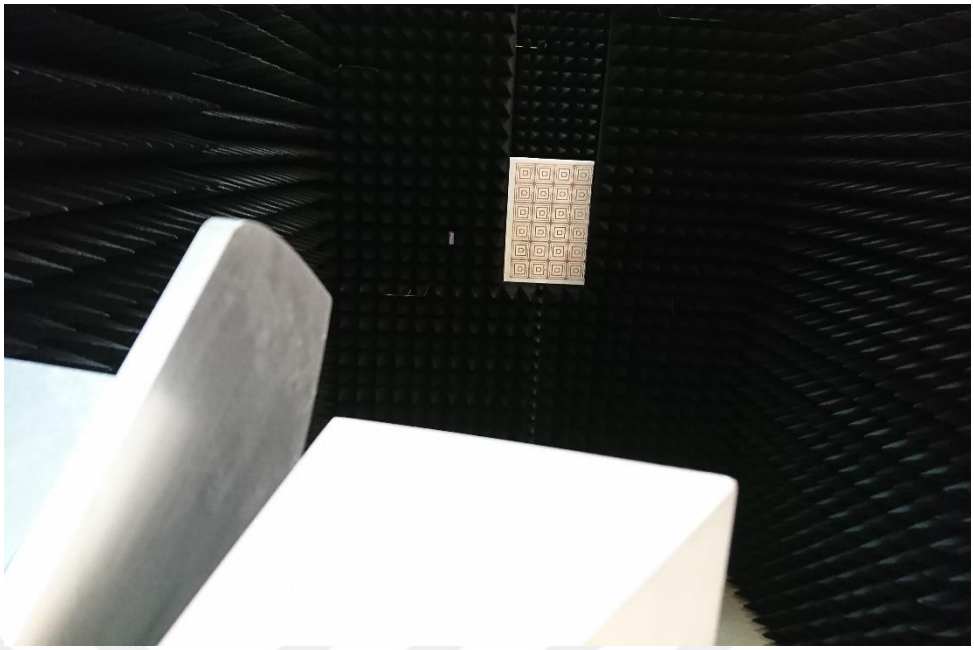
Şekil 4.37 Birim hücreye ait yüzey akım dağılımları (a) 0,9 GHz için (b) 1,8 GHz için (c) 2,6 GHz için (d) 5,8 GHz için

Yüzey akım dağılımları incelendiğinde birim hücrede dış kısımdaki SSRR'ye ilave edilen çeyrek dilim halka rezonatörler tüm hedef frekanslar için rezonansa katkı vermektedir ve sonuç olarak EM dalganın hasatlanmasına katkı vermektedir. Alımı sağlanan 0,1 mm kalınlığında bakır folyo saf teflon (PTFE) alttaşın her iki yüzeyine yapıştırılarak üretime hazır duruma getirilmiştir. Fotolitografi yöntemi kullanılarak üretilen MM tabanlı EM enerji hasatlayıcı yapısı şekil 4.38'deki görselde verilmiştir.



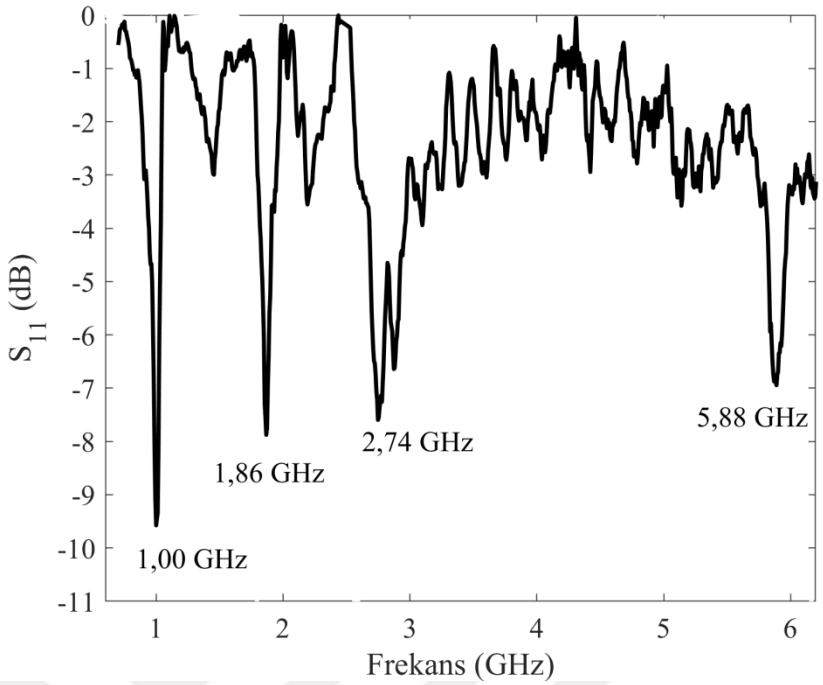
Şekil 4.38 Metamalzeme tabanlı EM enerji hasatlayıcı

Üretimi gerçekleştirilen 4x6 dizi şeklindeki MM tabanlı EM enerji hasatlayıcı yapısına SMD devre elemanları lehimlendikten sonra S parametresi ölçümü için hazır duruma gelmiştir. Dizi şeklinde üretilen hasatlama yapısında üretimden kaynaklı bazı hatalar meydana gelmiştir. Bu hataların en önemlilerinden biri, birim hücrelerin komşu birim hücreler ile bazı bölgelerde temas etmesidir. Söz konusu problemin ölçüm sırasında istenilen ölçümlerin alınamamasına neden olacağı düşünülmüş ve birleşik durumda olan bakırlar ilk önce lehim cihazı ile ısıtılmış daha sonra ayırılmıştır. Başka bir sorun ise dış kısımdaki SSRR'ye ilave edilen çeyrek dilim halka rezonatörlerin iç kısmındaki bakırın yeteri kadar aşındırılamamasıdır. Bu sorun tek bir birim hücrede sorun oluştursa bile dizi olarak üretilen yapı üzerinde ölçümü etkileyecek kadar problem oluşturduğu düşünülmemiştir.

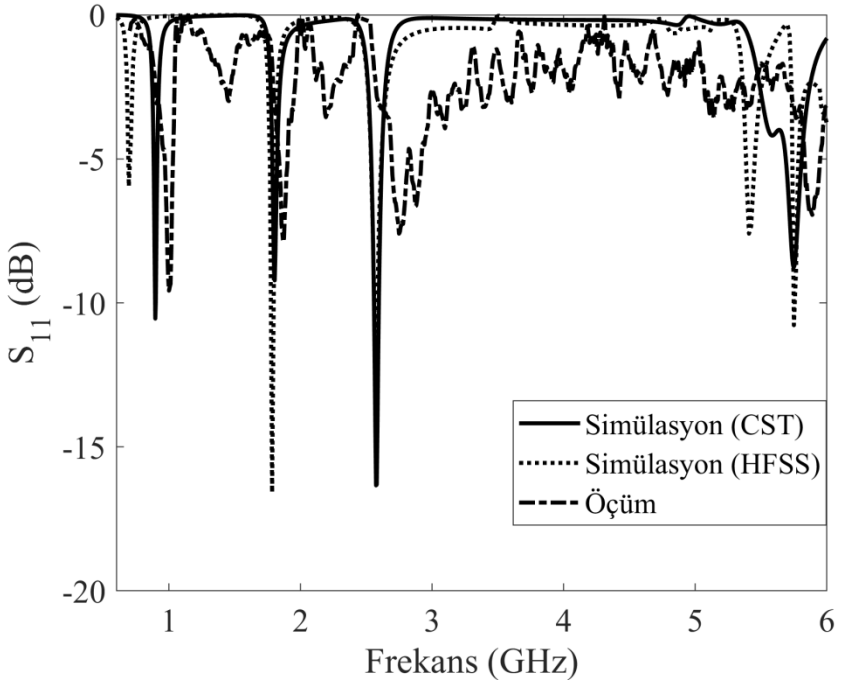


Şekil 4.39 Yarı yankısız odada yansıma katsayısı parametrelerinin ölçümü

Ölçüm sırasında çekilmiş deney düzeneğine ait fotoğraf şekil 4.39'da verilmiştir. İki adet horn anten aralarına mikrodalga soğurucu yapıları yerleştirilerek ölçümü gerçekleştirilen numunenin karşısına yerleştrilmiştir. Deney düzeneğinde kullanılan horn antenlerin marka modeli Rohde & Schwarz HF907'dir ve 800MHz ile 18GHz frekansları arasında çalışmaktadır. Ölçümler sırasında Rohde & Schwarz ZVL13 model 9kHz ile 13,6 GHz frekansları arasında çalışan vektör network analizör (VNA) kullanılarak yansıma spektrumu elde edilmiştir. Ölçüm düzeneğinin etrafı girişimleri ve dış elektromanyetik etkileri engellemek adına TDK mikrodalga IS-012A soğurucular ile çevrelenmiştir. Yapılan ölçümü sonucu S_{11} spektrumu şeklinde şekil 4.40'da sunulmuştur. Ölçüm verilerinden dört bantta yansıma olmadığı görülmektedir ve MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısının arka yüzeyi bakır olduğu için alınan ölçümler söz konusu frekanslarda yapıda soğurma gerçekleştştiği anlamına gelmektedir. Benzetim programında 0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekanslarında minimum yansıma gerçekleşirken ölçümde ise rezonans frekanslarının az miktar yükseldiği göze çarpmaktadır.



Şekil 4.40 Laboratuvar ortamında ölçülen S_{11} spektrumu

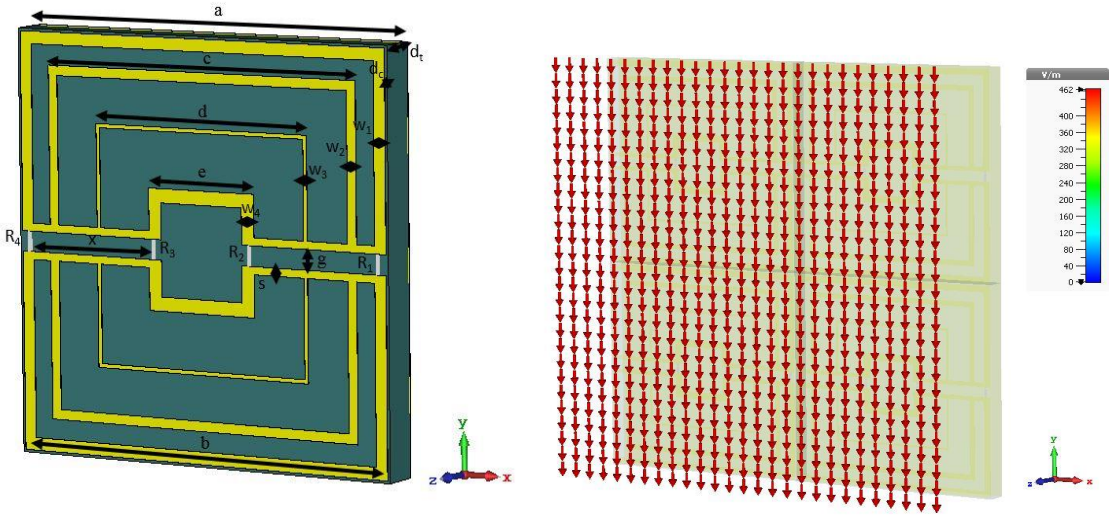


Şekil 4.41 CST ve HFSS simülasyon programlarından ve ölçüm sonucunda elde edilen S_{11} grafiği

Şekil 4.41'de görüldüğü gibi 0,9 GHz'de CST ile HFSS tam dalga paket yazılım programlarından elde edilen veriler ile ölçüm sonuçları arasında farklılıklar vardır. Diğer rezonans frekanslarının soğurma oranlarında farklılıklar meyda gelse de rezonans frekansları görece örtüşmektedir. Ölçüm sonuçlarından elde edilen rezonans frekanslarındaki değişimlerin nedeni SSRR'ların ayrık bölgesinde bulunan devre elemanlarının simülasyon programında belirlenen ölçülere göre lehimlenememiş olmasından ve/veya üretimde meyada gelen kusurlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan çalışma 2019 yılında Journal of Electronic Materials dergisinde yayınlanmıştır (Karakaya v.d. 2019)

4.3.6 Dört Bantlı Metamalzeme Tabanlı Enerji Hasatlayıcı Yapısı-6

Şekil 4.42 (a)'daki MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısı kullanılarak, EM dalganın birim hücreye geliş açısı olarak tanımlanan θ'nın soğurma ve verimlilik değerlerinde açının pozitif ya da negatif yöndeki değişiminin etkisinin aynı olması hedeflenmiştir. Bu kapsamda daha önce tez çalışmasında sunulan hasatlayıcı yapısında şekil 4.42 (a)'da görüldüğü gibi değişiklik yapılarak simetrik bir birim hücre haline getirilmiştir.



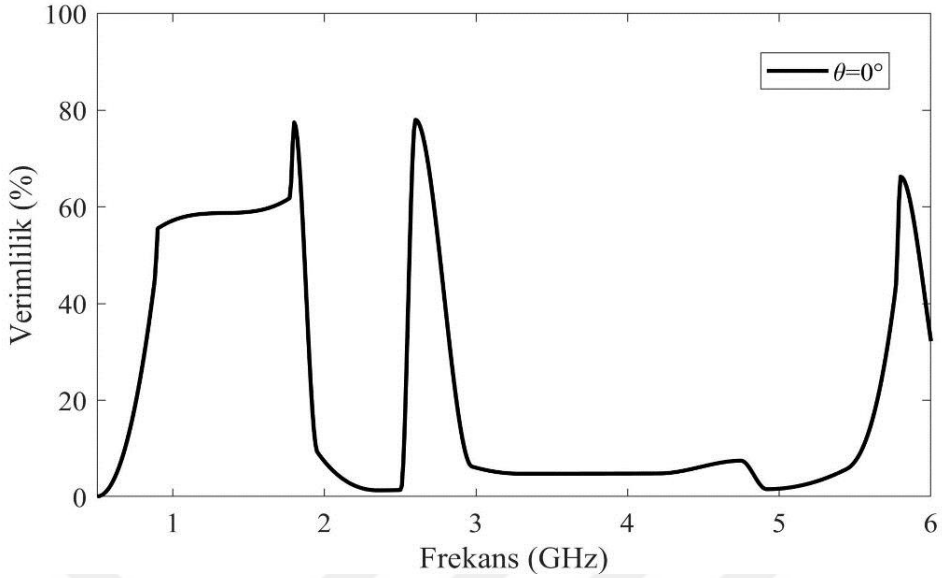
(a) (b)

Şekil 4.42 Birim hücreye ait geometrik yapı (a) yapıya gönderilen EM dalganın elektrik alan yönelimi (b)

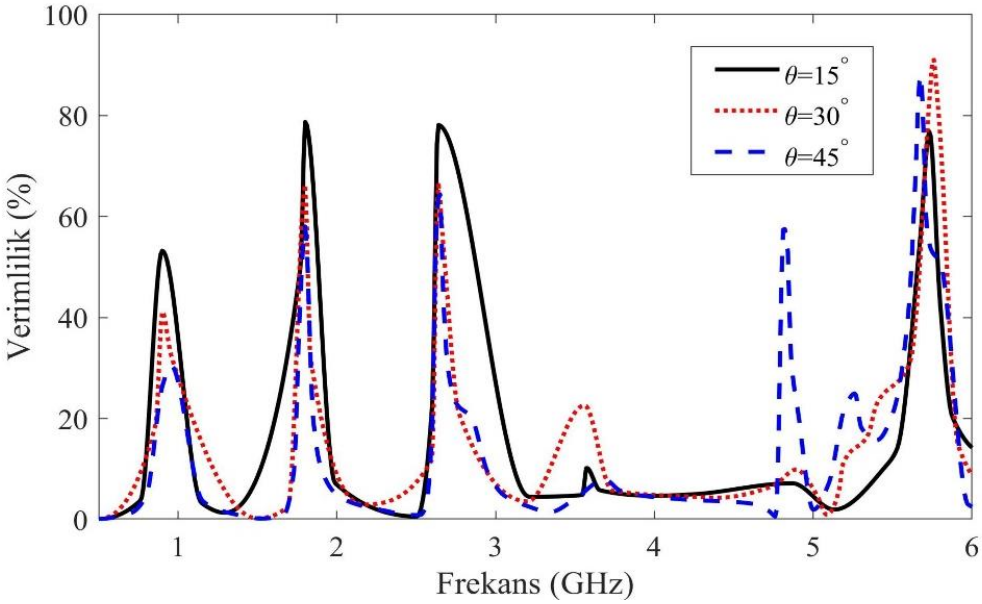
GSM ve Wi-Fi bantlarında bulunan 0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz'lerdeki EM

dalgayı hasatlamak üzere tasarlanan MM tabanlı EM dalga hasatlayıcı yapısı dört adet SSRR'dan oluşmaktadır. Yapıda EM dalgayı hasatlayıp AC akıma dönüştürmek için her bir SRR yapısına devre elemanı eklemek yerine tasarlanan rezonatörler şekil 4.42 (a)'da verildiği gibi ayrık kısımlarından bakır hat eklenerek birleştirilmiştir. Böylece rezonatör sayısından daha az direnç kullanılmıştır. Şekil 4.42 (a)'da verilen *a* birim hücrenin örgü sabitine karşılık gelmektedir ve değeri 42 mm'dir. SSRR'ların kenar uzunluklarını *b, c, d* ve *e* ile gösterilmiştir ve sırasıyla 41,6 mm, 33,8 mm, 23,0 mm ve 10,7 mm'dir. SSRR'ların genişliği w_1, w_2,w_3 ve w_4 ile temsil edilmiştir ve değerleri 1,2 mm, 1,0 mm, 0,4 mm ve 1,35 mm'dir. SSRR'ların ayrık kısmının genişliği g,söz konusu ayrık kısımların birleştirildiği bakır hattın genişliği s ile gösterilmiştir ve değerleri sırasıyla 2 mm ve 0,8mm'dir. R_1, R_2, R_3 ve R_4 EM dalgadan AC akıma çevrilen enerjinin hesaplanması için gerek duyulan dirençleri temsil etmektedir ve sırasıyla 30 Ω, 3 Ω, 3 Ω ve 30 Ω'dur. MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısında kullanılan alt taşın kalınlığı olan d_r'nin değeri 4 mm ve SSRR'lar ile toprak düzleminde kullanılan bakırın kalınlığı d_c=0.035 mm olarak belirlenmiştir. Simülasyon programında elektrik alan yönelimi şekil 4.42 (b)'de verildiği gibi –y doğrultusunda seçilerek MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısı elektriksel olarak uyarılmıştır.

Simülasyon programında yapının uyarılması için gönderilen EM sinyalin gücü 0,5 W olarak belirlenmiştir. Söz konusu güç değeri kullanılarak yapılan verimlilik oranı sonuçları şekil 4.43'de verilmiştir. Verimlilik grafiğinde MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısına gönderilen elektromanyetik dalga 0.9 GHz'te %55.54, 1.8 GHz'te %77.50, 2.6 GHz'te %78,00 ve 5.8 GHz'te %66.28 oranında yapıya entegre edilen dirençlerde harcanmıştır. Ortalama verimlilik oranı ise %69.33 olarak hesaplanmıştır.

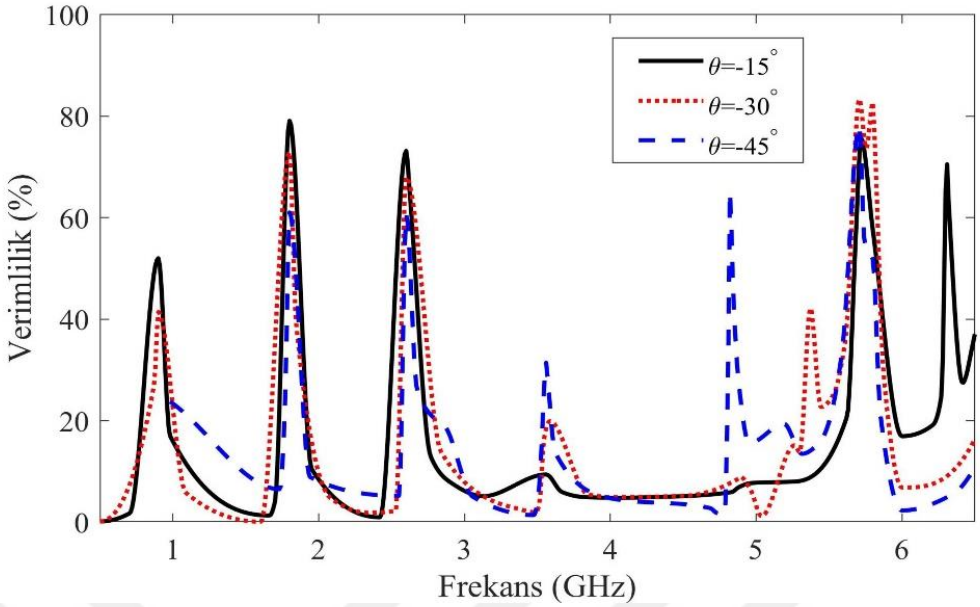


Şekil 4.43 MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısına ait verimlilik grafiği



(a)

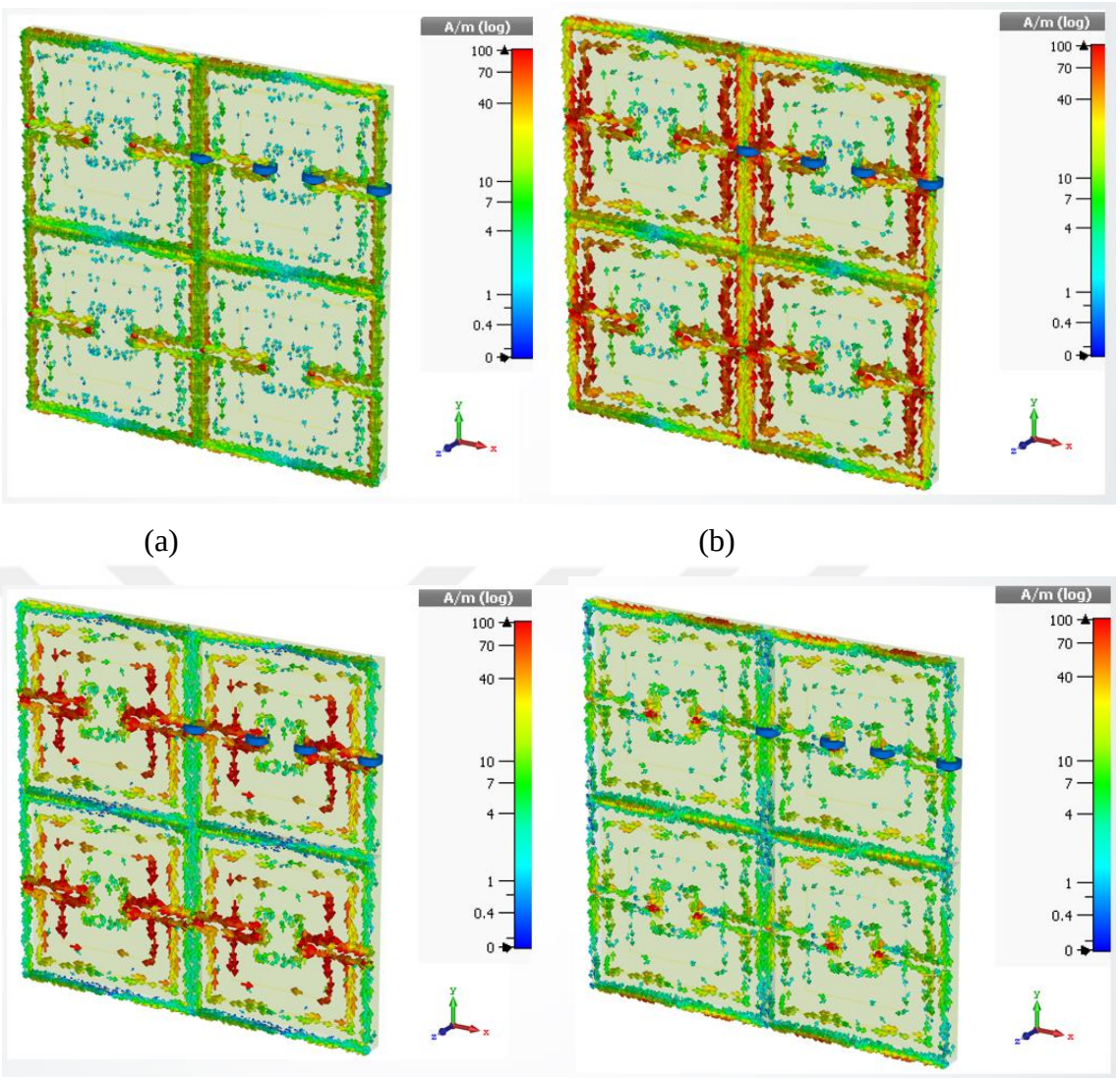
Şekil 4.44 EM dalganın Geliş açısı olan θ'nın (a) pozitif yönde, (b) negatif yönde değişiminin verimlilik grafiği



(b)

Şekil 4.44 EM dalganın Geliş açısı olan θ'nın (a) pozitif yönde, (b) negatif yönde değişiminin verimlilik grafiği (devam)

MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısına gelen elektromanyetik dalganın geliş açısı değeri arttıkça verimlilik oranında azalma olduğu şekil 4.44'de görülmektedir. 0,9 GHz için 15°, 30°, 45° geliş açılarına göre hesaplanan verimlilikler sırasıyla %53,20, %41,20 ve %26,34 oranındadır. 1,8 GHz frekansında 15°,30°,45° geliş açılarına göre hesaplanan verimlilikler ise sırasıyla %78,7, %66,3 ve %58,0 oranındadır. 2,6 GHz'deki bant için 15°, 30°, 45° geliş açılarına göre hesaplanan verimlilik yüzdeleri %22,45, %11,94 ve %18,32'dir. 5,8 GHz bandı için 15°, 30°, 45° geliş açılarına göre hesaplanan verimlilik değerleri sırasıyla %42,5 , %75,8 ve %50,9 oranındadır. MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısına diğer yönden gelen elektromanyetik dalgalarda ise 0,9 GHz frekansında -15°,-30°,-45° geliş açılarına göre hesaplanan verimlilik oranları sırasıyla %52,0, %41,0 ve %25,2'dir. 1,8 GHz'deki bant için -15°,-30°,-45° geliş açılarına göre hesaplanan verimlilik oranları sırasıyla %79,4, %72,8 ve %61,0'dır. 2,6 GHz frekansı için -15°,-30°,-45° geliş açısımdaki verilere göre hesaplanan verimlilik oranları %73,6, %67,9 ve %60,6'dır. 5,8 GHz bandı için -15°,-30°,-45° geliş açılarına göre hesaplanan verimlilikler sırasıyla %57,60, %82,70 ve %51,84 oranında bulunmuştur .



Şekil 4.45 Birim hücrede oluşan yüzey akım dağılımları (a) 0,9 GHz (b) 1,8 GHz (c) 2,6 GHz (d) 5,8 GHz için

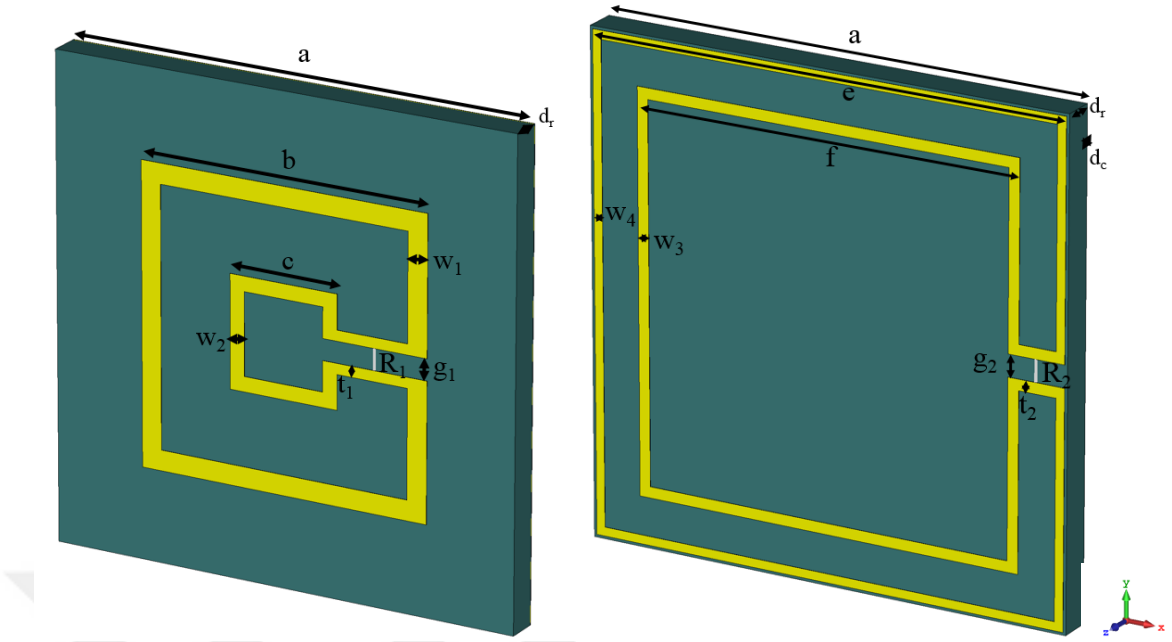
Elektromanyetik dalga MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısının birim hücresi EM sinyalin normal doğrultusunda geldiği zaman birim hücrede oluşan yüzey akımı dağılımı şekil 4.45'de sunulmuştur. Her bir frekans bandı için tasarlanan SSRR'ların ayrı frekanslarda çalıştığı ve oluşan akımın yapıya eklenen dirençlere doğru ilerlediği görülmektedir. Söz konusu çalışma URSI-TÜRKİYE'2018 IX. Bilimsel Kongresi'nde sözlü olarak sunulmuştur (Karakaya, v.d., 2018).

4.4 Çok Katmanlı Metamalzeme Tabanlı Elektromanyetik Enerji Hasatlama

Tek bir birim hücrede enerji hasatlama işlemi yapılabileceği gibi birden fazla katman kullanılarak da MM tabanlı enerji hasatlayıcı sistemleri tasarlanabilir. Bu başlık altında tez kapsamında tasarlanan çok katmanlı MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısı incelenecektir.

4.4.1 Çok katmanlı metamalzeme tabanlı em enerji hasatlayıcı

Çok katmanlı enerji hasatlayıcı sistemlerinde katman sayısı arttıkça oluşturulan katmanların dielektrik mazlemelerinden geçen EM dalgalarda zayıflamalar meydana gelecektrir. Bu yüzden tezin bu bölümden iki katmanlı MM tabanlı enerji hasatlayıcı tasarımı yapılmıştır. Her bir katmanda bulunan iki adet SSRR'lar iki frekans bandında EM hasatlama yapacak şekilde tasarlanmıştır. Toprak düzlemi için ikinci katmanın arkası EM dalganın iletimini engellemek bakır ile kaplanmıştır. EM dalga hasatlama sürecinde soğurulmaya uğrayan EM dalganın kullanılan dielektrik alt taşta malzemesinde en az soğurmaya uğraması istenilir. Bundan dolayı daha önceki tasarımlarda olduğu gibi dilelektrik alt taş olarak Teflon seçilmiştir. Şekil 4.46'da sunulan çok katmanlı MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısında birinci katman 2.6 GHz ve 5.8 GHz için tasarlanan SSRR'lardan ikinci katman 0.9 GHz ve 1.8 GHz frekans bantları için tasarlanan SSRR'lardan oluşmaktadır. Ön ve arka katmanda bulunan rezonatörlere soğurulan EM dalganın AC akıma dönüştüğünü göstermek için birer adet devre elemanı entegre edilmiştir. Böylece tez kapsamında daha önce kullanılan her bir rezonatör yapısı için devre elemanı kullanmama yöntemine çok katmanlı MM tabanlı EM enerji hasatlayıcı tasarımında da devam edilmiştir.

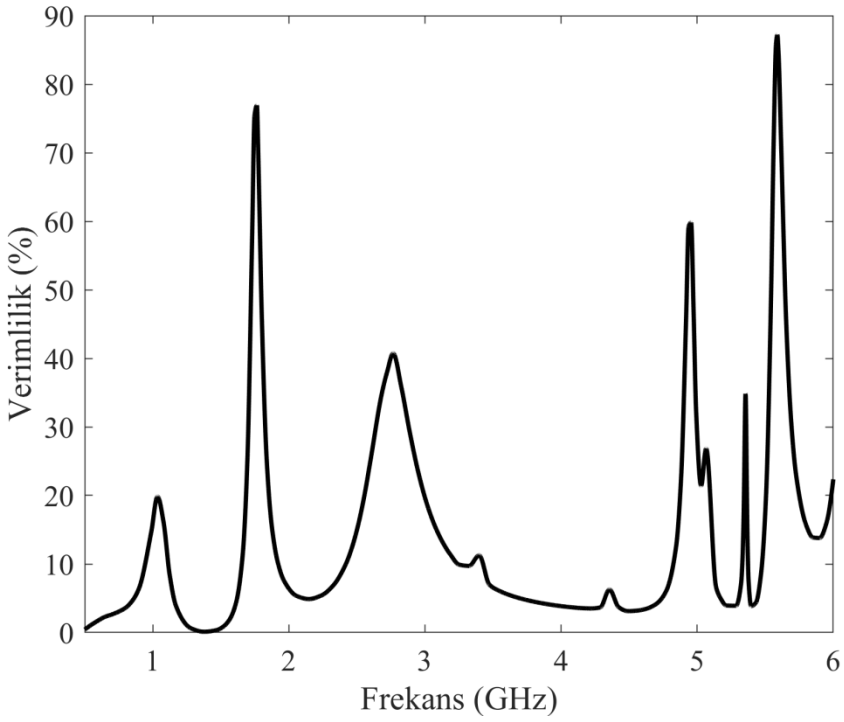


(a) (b)

Şekil 4.46 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekans bantları için tasarlanan birinci (ön) katman (a) ve 0,9 GHz ve 1,8 GHz frekans bantları için tasarlanan ikinci (arka) katman (b)

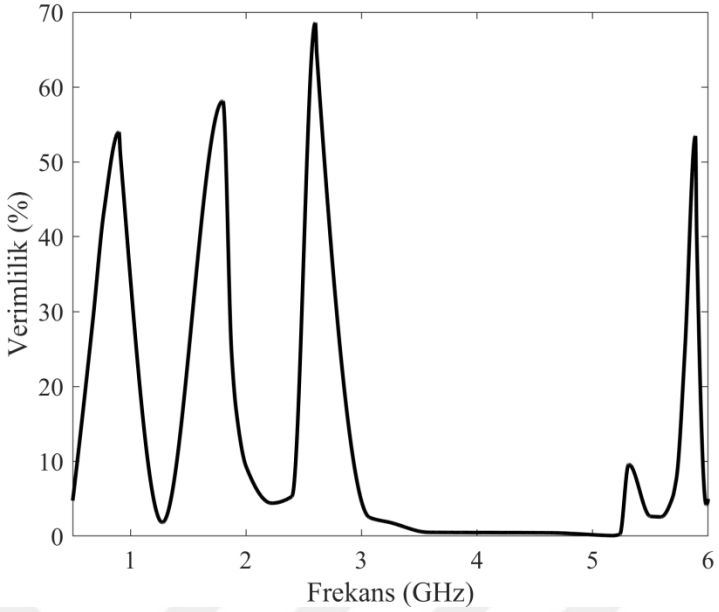
Şekil 4.46'da görülen a parametresi ön ve arka katmanlardaki birim hücrelerin kenar uzunluğunu, b 2,6 GHz frekans bandında EM hasatlama yapması için tasarlanan SSRR'ın kenar uzunluğunu, w_1 ise genişliğine karşılık gelmektedir ve sırasıyla 40,5 mm ve 26,0 mm ve 2,1 mm'dir. Ön katmanda bulunan ve 5,8 GHz bandında EM hasatlama yapması için tasarlanan SSRR'ın kenar uzunluğunu c, genişliği w_2 ile temsil etdilmektedir ve değerleri sırasıyla 11,8 mm ve 1.4 mm'dir. SSRR'ların birleştirildiği bakır şeridin kalınlığını t_1, ayrık bölgein genişliğini g_1 göstermektedir ve ikisi de 2 mm'ye değerindedir. Şekil 4.46 (b)'de verilen ikinci katmandaki birim hücrede e parametresi 0,9 GHz bandında EM hasatlama yapması için tasarlanan SSRR'ın kenar uzunluğunu, w_4 genişliğini göstermektedir ve sırasıyla 40,0 mm ve 0,8 mm'dir. İkinci katmanda 1,8 GHz frekans bandında EM hasatlama yapması için tasarlanan SSRR'ın kenar uzunluğunu f, genişliğini w_3 göstermektedir ve sırasıyla 31 mm ve 1 mm değerindedir. Ön ve arka katmanda bulunan rezonatörlere devre elemanı olarak entegre edilen dirençler R_1 ve R_2 olarak gösterilmiştir ve sırasıyla 10 Ω ve 250 Ω'a karşılık gelmektedirler. Dielektrik alt taş malzemesi olarak kullanılan PTFE kalınlığı d_r ile temsil edilmişitir ve değeri 3 mm olarak belirlenmiştir. İkinci katmanda toprak düzlem

ve SSRR'lardaki iletken kısımlar için kullanılan bakır plakanın kalınlığı d_c ile gösterilmiştir 0.035 mm'ye karşılık gelmektedir. Ön ve arka katman arasında 3,5 mm kalınlığında hava bulunmaktadır. Çok bantlı MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısında RF-AC çevrimi için bulunan verimlilik şekil 4.47'de verilmiştir. 0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz değerlerine yakın bantlarda tasarlanan yapı rezonatif tepki vermektedir.



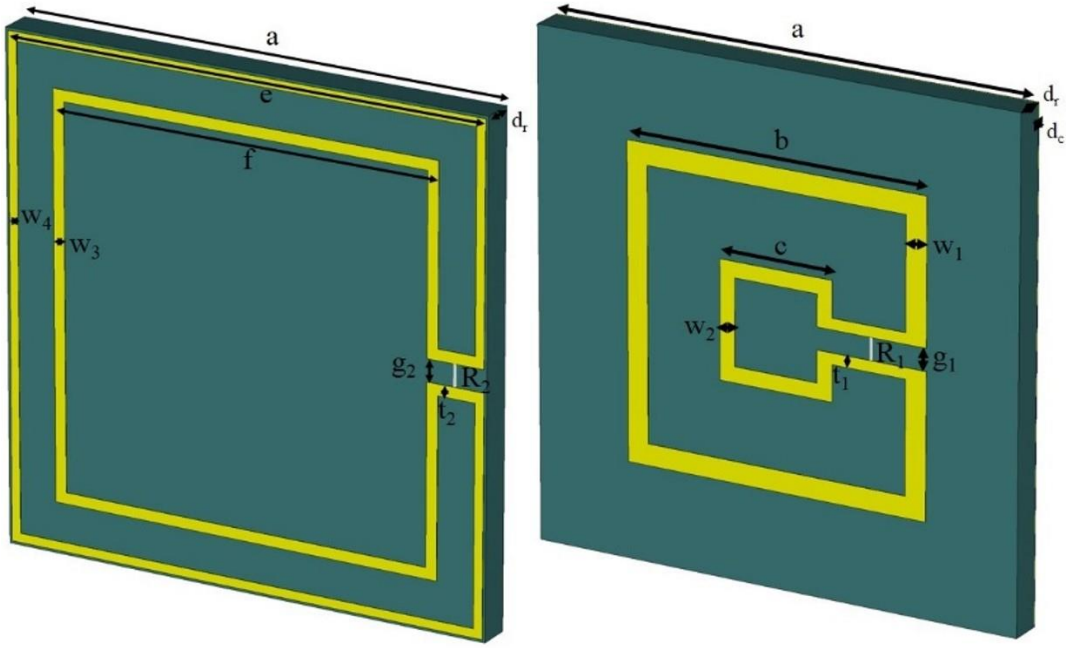
Şekil 4.47 Çok bantlı yapıda devre elemanında harcanan güç grafiği

Şekil 4.46'da gösterilen parametrelerde değişiklik yapılmayarak birinci ve ikinci katmandaki birim hücrelerin yerleri değiştirilmiş ve verimlilik oranları üzerine etkisi incelenmiştir. Katmanların yeri değiştirildikten sonra elde edilen, verimlilik değerleri şekil 4.48'de verilmiştir ve ortalama verimlilik değerinde artış olduğu görülmüştür.



Şekil 4.48 Katmanların yeri değiştirildikten sonra elde edilen verimlilik grafiği

Şekil 4.48'de elde edilen verimlilik artışı üzerine söz konusu yapı için simülasyon programında parametrik analizler yapılarak elektromanyetik dalgadan AC akıma çevrilme verimliliği arttırılmıştır. İki katman arasındaki hava boşluğu 3 mm olarak belirlenmiştir. Optimize edilen nihai yapı şekil 4.49'da sunulmuştur.



Şekil 4.49 Optimize edilen çok katmanlı yapının (a) ön yüzü ve (b) arka yüzü

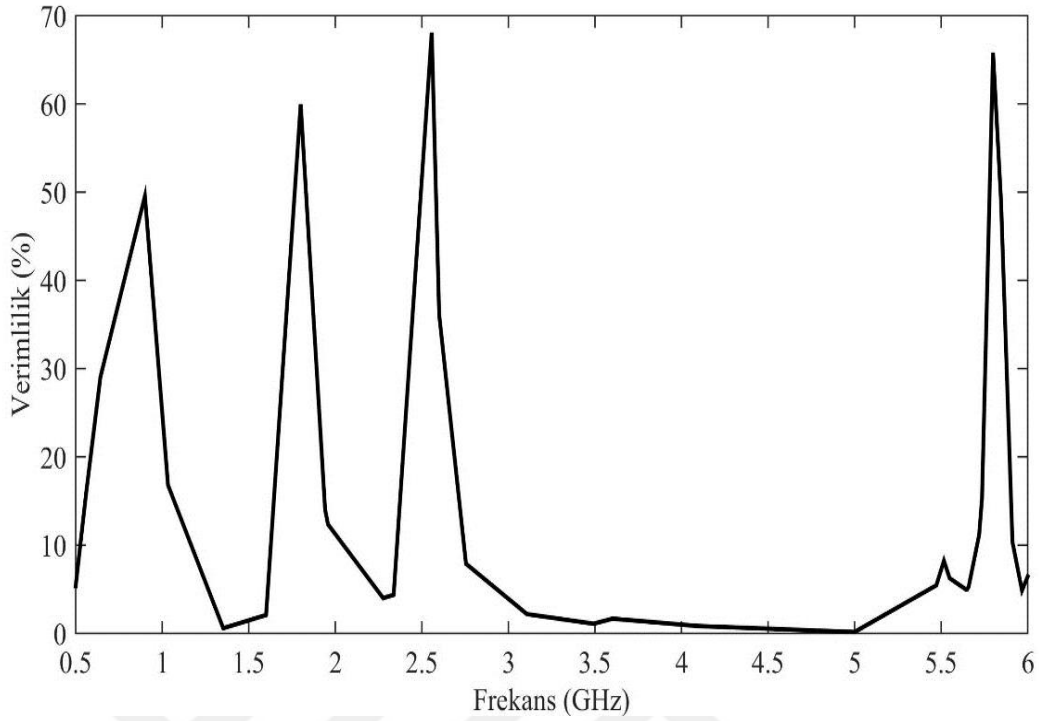
Şekil 4.49'da verilen parametreler şekil 4.46'da verilen parametreler ile aynı anlamları taşımaktadırlar. Sadece birinci katman ile ikini katmanın yerleri değiştirilmiştir. İki katmanlı MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısında kullanılan SSRR'ların parametrelerine ait sayısal değerleri çizelge 4.4'de verilmiştir

.

Çizelge 4.4 birim hücre parametrelerinin değerleri (Şekil 4.49)

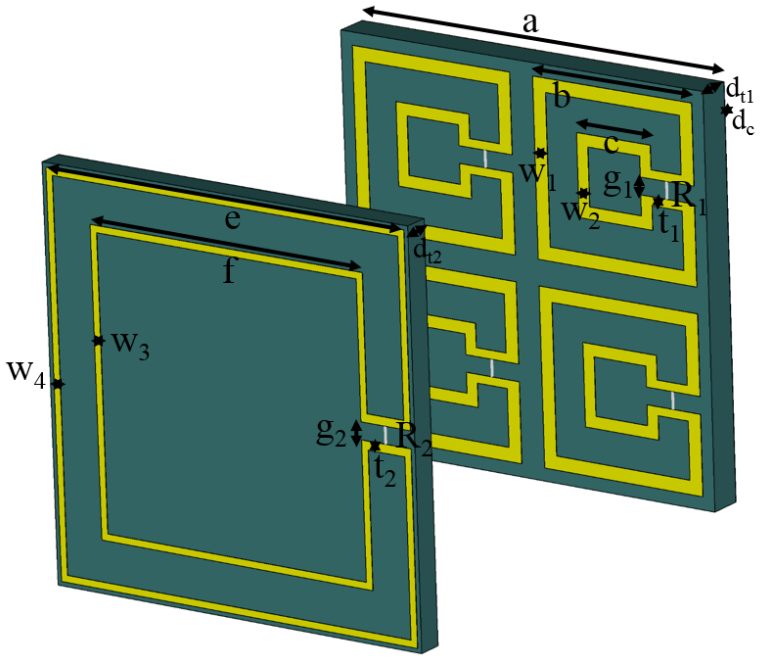
Parametre	**Uzunluk (mm)**	**Parametre**	**Uzunluk (mm)**
a	45	w_1	1.8
b	23.7	w_2	1.7
c	10.6	w_3	1
e	44.5	w_4	0.8
f	36	g_1	2
d_c	0.035	g_2	2
d_r	3	t_1	1
R_1	10 ohm	t_2	1
R_2	250 ohm		

Tasarlanan EM hasatlayıcının verimlilik grafiği şekil 4.50'de sunulmuştur. GSM ve Wi-Fi bantlarında bulunan 0.9, 1.8, 2.6 ve 5.8 GHz frekanslarında EM hasatlama gerçekleştiren rezonatör yapısı verimlilik oranları ise 0.9 GHz'de %49.54, 1.8 GHz'de %59.96, 2.6 GHz'de %68,00 ve 5.8 GHz'de %65.80 olarak hesaplanmıştır. Ortalama verimlilik değeri ise %59,37 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.50 Çok katmanlı MM tabanlı EM enerji hasatlayıcının verimlilik grafiği

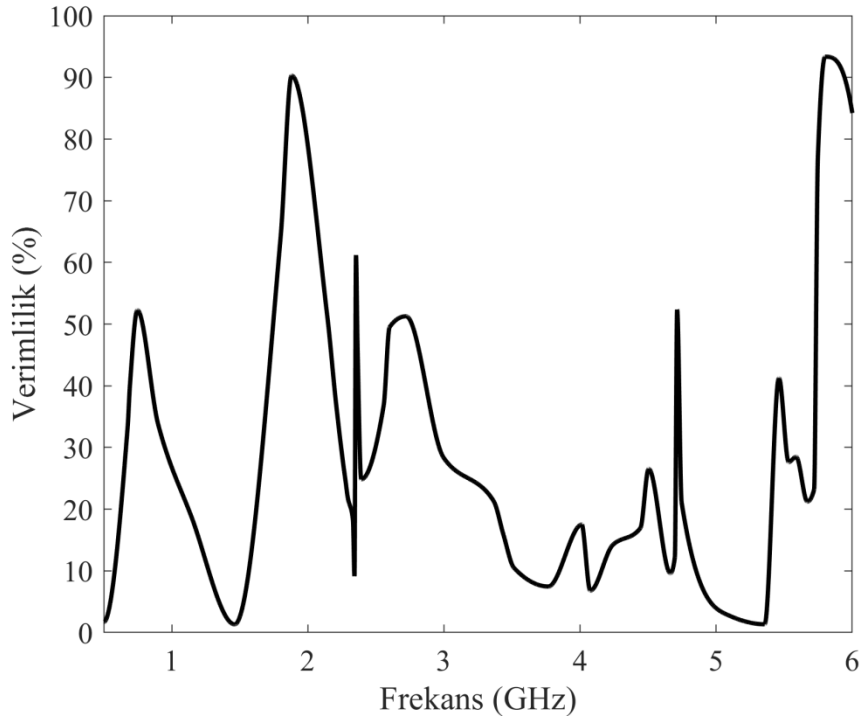
İkinci katmanda yer alan SSRR yapıları komşu birim hücre rezonatörler ile çok uzak kalmasından dolayı yeteri kadar kapasitif etki oluşmadığı ve söz konusu etki oluşturulur ise verimliliğin artacağa düşünülmüştür. Bu düşünce ile arka katmanda bulunan 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekans bantları için tasarlanan SSRR'ların sayısı taban alanı sabit tutularak arttırılmış ve tasarım şekil 4.51'de gösterilmiştir.



Şekil 4.51 Arka katmandaki birim hücrede bulunan SSRR'ların sayısının çoğaltılmış görseli

Şekil 4.51'de verilen a parametresi ön ve arka katmandaki birim hücrelerin kenar uzunluğunu, b parametresi 2,6 GHz frekans bandında EM hasatlama yapması için tasarlanan SSRR'ın kenar uzunluğunu, w_1 genişliğini temsil etmektedir ve sırasıyla 47,0 mm ve 20,6 mm ve 1,6 mm'dir. İkinci katmandaki 5,8 GHz bandında EM hasatlama yapması için tasarlanan SSRR'ın kenar uzunluğunu c, genişliğini w_2 ifade etmektedir ve değerleri sırasıyla 9,5 mm ve 1,4 mm'dir. SSRR'ların birleştirildiği bakır şeridin kalınlığı t_1, ayrık bölgenin genişliği g_1 ile gösterilmiştir ve değerleri sırasıyla 1 mm ve 2 mm'dir. Birinci katmandaki birim hücrede e parametresi 0,9 GHz'teki frekans bandında EM hasatlama yapması için tasarlanan SSRR'ın kenar uzunluğunu, w_4 genişliğini temsil etmektedir ve sırasıyla 46 mm ve 0,8 mm'dir. Birinci katmanda 1,8 GHz'deki frekans bandı için tasarlanan SSRR'ın kenar uzunluğu f, genişliği w_3 ile gösterilmiştir ve sırasıyla 35 mm ve 0,8 mm'dir. Ön katmanda bulunan SSRR^ların bileştirildiği bakır şeridin kalınlığı t_2, ayrık bölgenin genişliği g_2 gösterilmiştir ve sırasıyla 1 mm ve 2 mm'ye karşılık gelmektedir. Birinci ve ikinci katmanda bulunan rezonatörlere devre elemanı olarak entegre edilen dirençler R_1 ve R_2 gösterilmiştir ve sırasıyla 50 Ω ve 250 Ω'dur. Dielektrik alt taş malzemesi olarak kullanılan PTFE kalınlıkları d_{t1} ve d_{t2} olarak gösterilmiş ve sayısal karşılığı 4 mm olarak belirlenmiştir. İkinci katmanda toprak

düzlemi ve rezonatörlerin iletken kısımları için kullanılan bakırın kalınlığı d_c olarak gösterilmiştir ve değeri 0.035 mm'dir. İki katman arasındaki boşluk ise 3,5 mm'dir. İkinci katmandaki rezonatör sayısı yükseltildikten sonra simülasyon programında gerçekleştirilen parametrik analizlerin sonucunda elde edilen sonuçlar şekil 4.52'de gösterilmiş ve en iyi sonuçlar verilen parametreler ile elde edilmiştir. Simülasyon çalışmalarının yapıldığı CST Microwave Studio tam dalga paket yazılım programında yapının uyarıldığı EM dalganın gücü 0,5 W olarak belirlenmiştir. Şekil 4.52'de sunulan verimlilik grafiğine göre 0,9 GHz bandı için verimlilik %33,74 oranında, 1,8 GHz bandı için %64,00, 2,6 GHz bandı için %49.48 ve 5,8 GHz bandı için %93,34 olarak hesaplanmıştır. Ortalama verimlilik değeri ise %60,14'dir.



Şekil 4.52 İkinci katmanda sayısı artırılan rezonatörlerden sonra elde edilen verimlilik grafiği

İkinci katmandaki rezonatörlerin sayısının arttırılması ile birlikte verimlilik oranlarının iyileştirilmesinin ardından devam eden simülasyon çalışmalarında iki farklı alttaş kalınlığı kullanılmıştır. Böylece yapı uyarmak için gönderilen EM dalgaya arka katmandaki rezonatöler ile toprak düzlemi arasında daha çok boşluk sağlanmıştır. Yapının geometrisinde değişiklik yapılmadan rezonatör boyutlarının devre

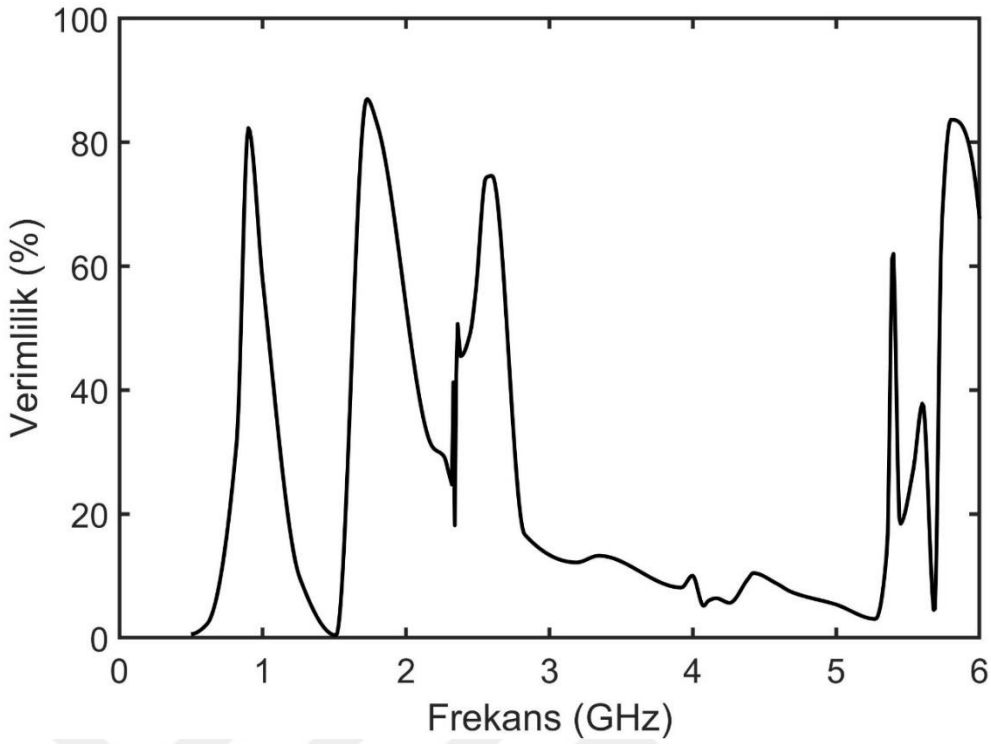
elemanlarının değerleri üzerinden simülasyon programında analizler yapılmıştır. Yapılan uzun süreli simülasyon çalışmalarının ardından ortalama %81,37 oranında verimliliğe sahip iki katmanlı MM tabanlı EM enerji hasatlayıcı yapısı elde edilmiştir. Son yapının geometrik parametrelerinin sahip olduğu değerler çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5 Yapıya ait parametrelerin değerleri

Parametre	**Uzunluk (mm)**	**Parametre**	**Uzunluk (mm)**
a	47	t_1	1
b	20,6	t_2	1
c	9,5	w_1	1,6
e	45,2	w_2	1,8
f	35,4	w_3	0,7
g_1	2,9	w_4	0,8
g_2	2	d_c	0,035
d_{t1}	4,3		
d_{t2}	3		

Çizelge 4.5'deki verilen değerlere ek olarak MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısına entegre edilen dirençler olan R_1 ve R_2'nin değerleri sırasıyla 25 ve 75 Ohm'dur. Ön ve arka katman arasındaki mesafe 2.1 mm'dir.

Devre elemanları üzerinde AC akıma çevrilen EM dalganın oranını veren grafik şekil 4.53'de verilmiştir. Hedeflenen frekanslarda elde edilen hasatlama verimlilikleri ise çizelge 4.6'da sunulmuştur.

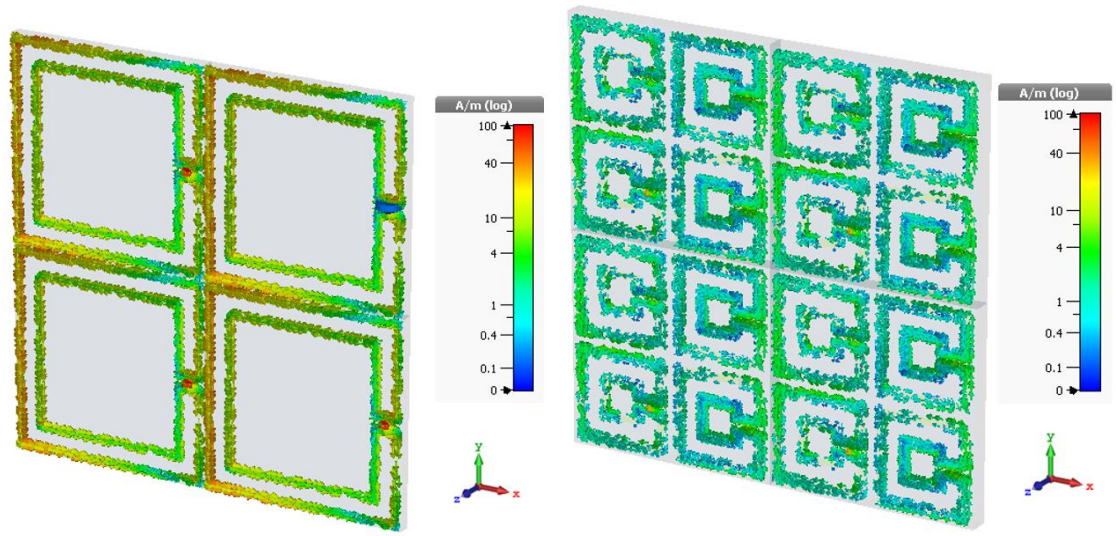


Şekil 4.53 Frekansa bağlı verimlilik grafiği

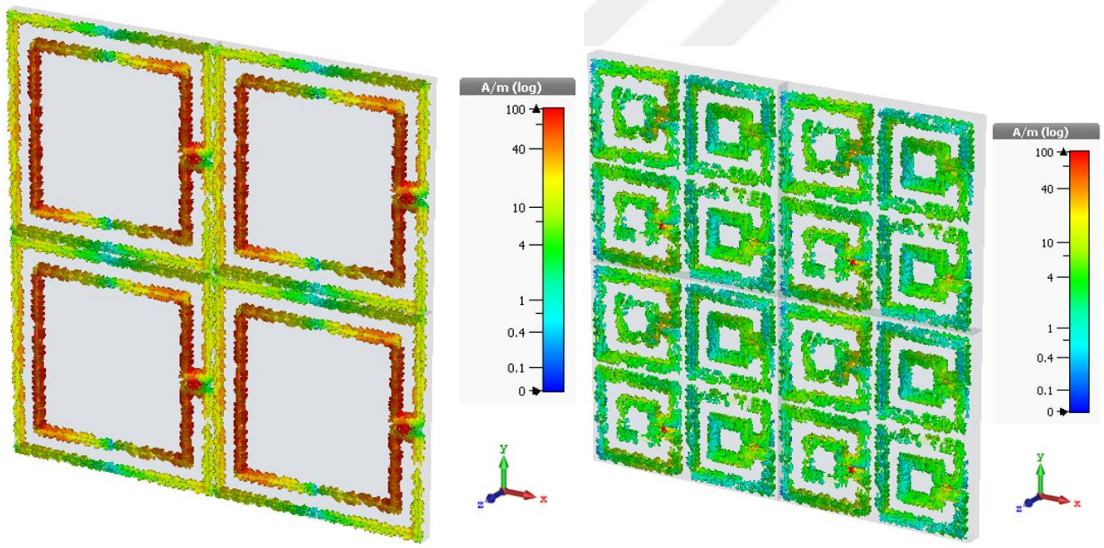
Çizelge 4.6 Frekanslara karşılık gelen verimlilik değerleri

Frekans (GHz)	0,9	1,8	2,6	5,8
Verimlilik (%)	82,32	82,81	74,61	83,65
Ortalama Verimlilik (%)	%80,85			

Hedeflenen ortalama %75 verimliliğin yaklaşık %5 üzerinde verimlilik elde edilmiştir. Yapıda oluşan yüzey akım dağılımları her bir rezonans frekansı için ayrı ayrı şekil 4.54'de verilmiştir.

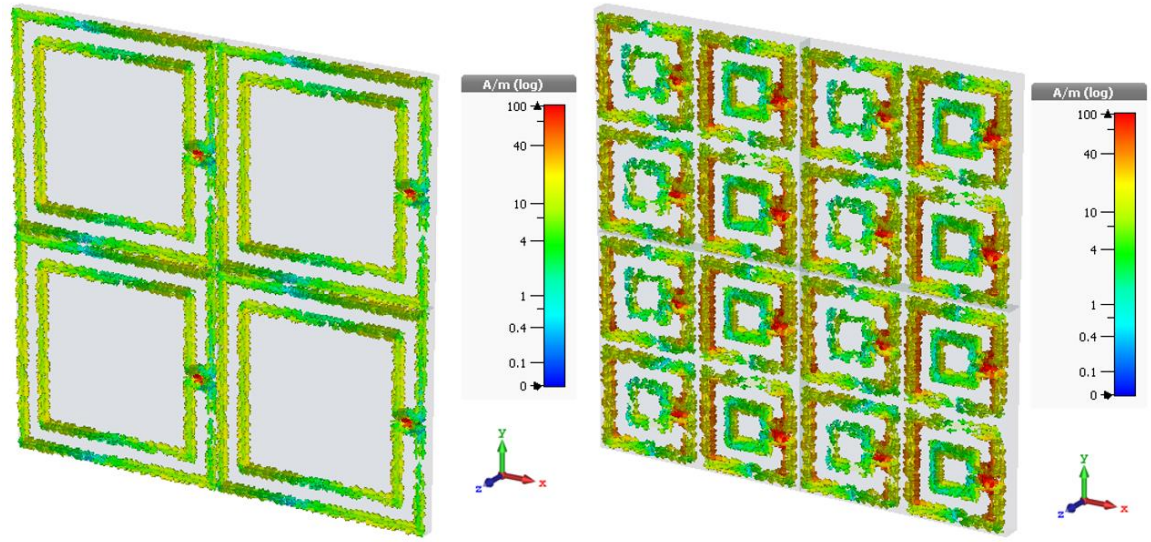


(a)

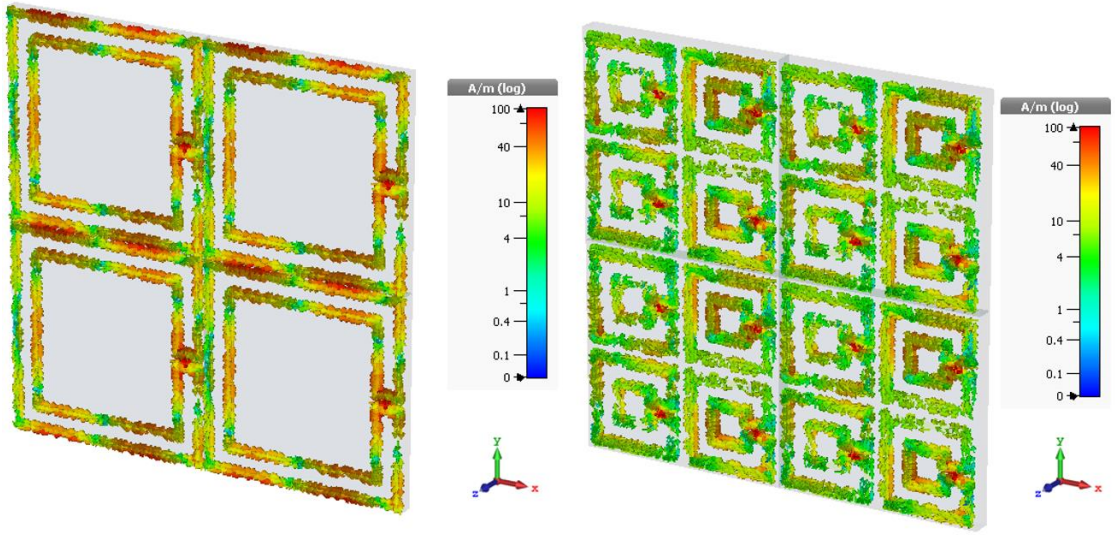


(b)

Şekil 4.54 0,9 GHz (a) 1,8 GHz (b) 2,6 GHz (c) 5,8 GHz (d) için yüzey akım dağılımları



(c)



(d)

Şekil 4.54 0,9 GHz (a) 1,8 GHz (b) 2,6 GHz (c) 5,8 GHz (d) için yüzey akım dağılımları (devam)

Şekil 4.54 (a)'daki yüzey akım dağılımları 0,9 GHz bandı için incelendiğinde en büyük akım dağılımının 0,9 GHz'de EM hasatlama yapması için tasarlanan birinci katmanın dış kısmındaki SSRR'dan geldiği anlaşılmıştır. Şekil 4.54 (b)'deki yüzey akım dağılımları 1,8 GHz bandı için incelendiğinde en yüksek miktarda akım dağılımının 1,8 GHz'de EM hasatlama yapması için tasarlanan birinci katmanın iç kısmındaki SSRR'dan kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Şekil 4.54 (c)'deki yüzey akım dağılımları 2,6 GHz bandı için incelendiğinde en yüksek katkının 2,6 GHz'de EM hasatlama

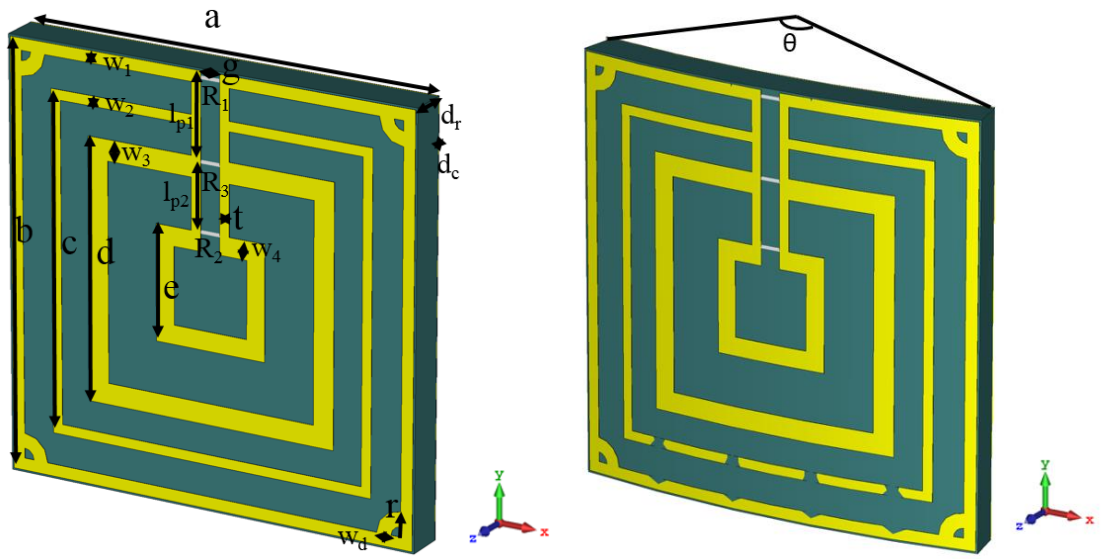
yapması için tasarlanan ikinci katmanın dış kısımda bulunan SSRR'dan kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Şekil 4.54 (d)'deki yüzey akım dağılımları 5,8 GHz bandı için incelendiğinde hem birinci katmanda bulunan iki SSRR'dan hem de ikinci katmanda bulunan ve 5,8 GHz'de EM hasatlama yapması için tasarlanan SSRR'dan kaynaklandığı görülmektedir. Yapılan çalışma International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering dergisinde 2019 yılında yayınlanmıştır (Karakaya 2019).

4.5 Bükülebilir Metamalzeme Tabanlı Elektromanyetik Enerji Hasatlama

MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapıları ortamda bulunan elektromanyetik dalgayı kullanılabilir enerjiye çevirmek için kullanıldığından söz konusu malzemelerin konulduğu alanlar farklılık gösterebilmektedir. Bu sebeple daha önceki başlıklarda düz yüzeylere yerleştirelebilir yapılar yerine silindirik yüzeylere uygulanabilecek MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapı bu başlık altında incelenmiştir.

4.5.1 Bükülebilir özellikli metamalzemetabanlı enerji hasatlayıcı yapısı

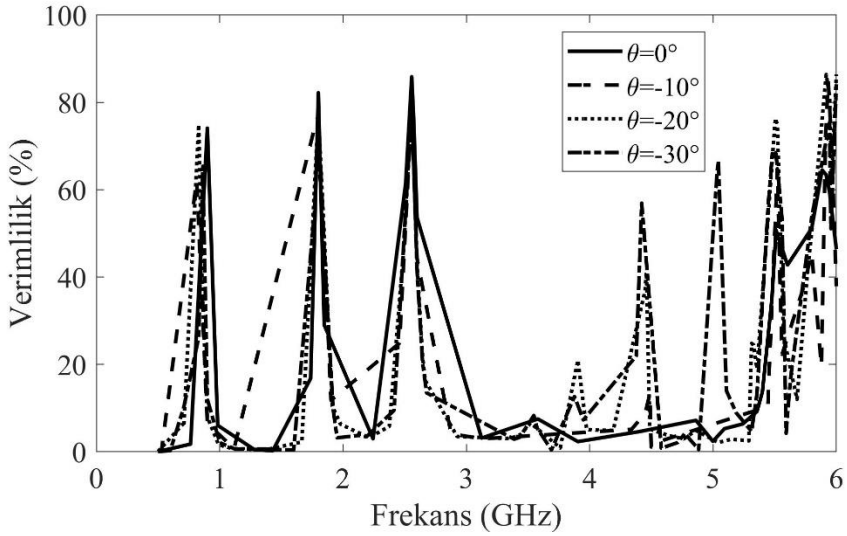
Bükülebilir dielektrik alt taş malzemesi olarak tez kapsamında daha önceki başlıklarda kullanılan PTFE (teflon) malzemesinin kullanılması uygun bulunmuştur. Çünkü hem bükülebilir/esnek özelliği olan hem de dielektrik sabitinin sanal kısmının değeri diğer ticari alt taş malzemelerine göre (Arlon, FR-4, Rogers, v.b.) düşük olduğu için EM hasatlama tasarımları için oldukça uygun bir malzemedir. CST Microwave Studio tam dalga paket simülasyon programında yapılan çalışmalar neticesinde şekil 4.55'deki MM tabanlı EM enerji hatlayıcı yapısı elde edilmiştir.



(a) (b)

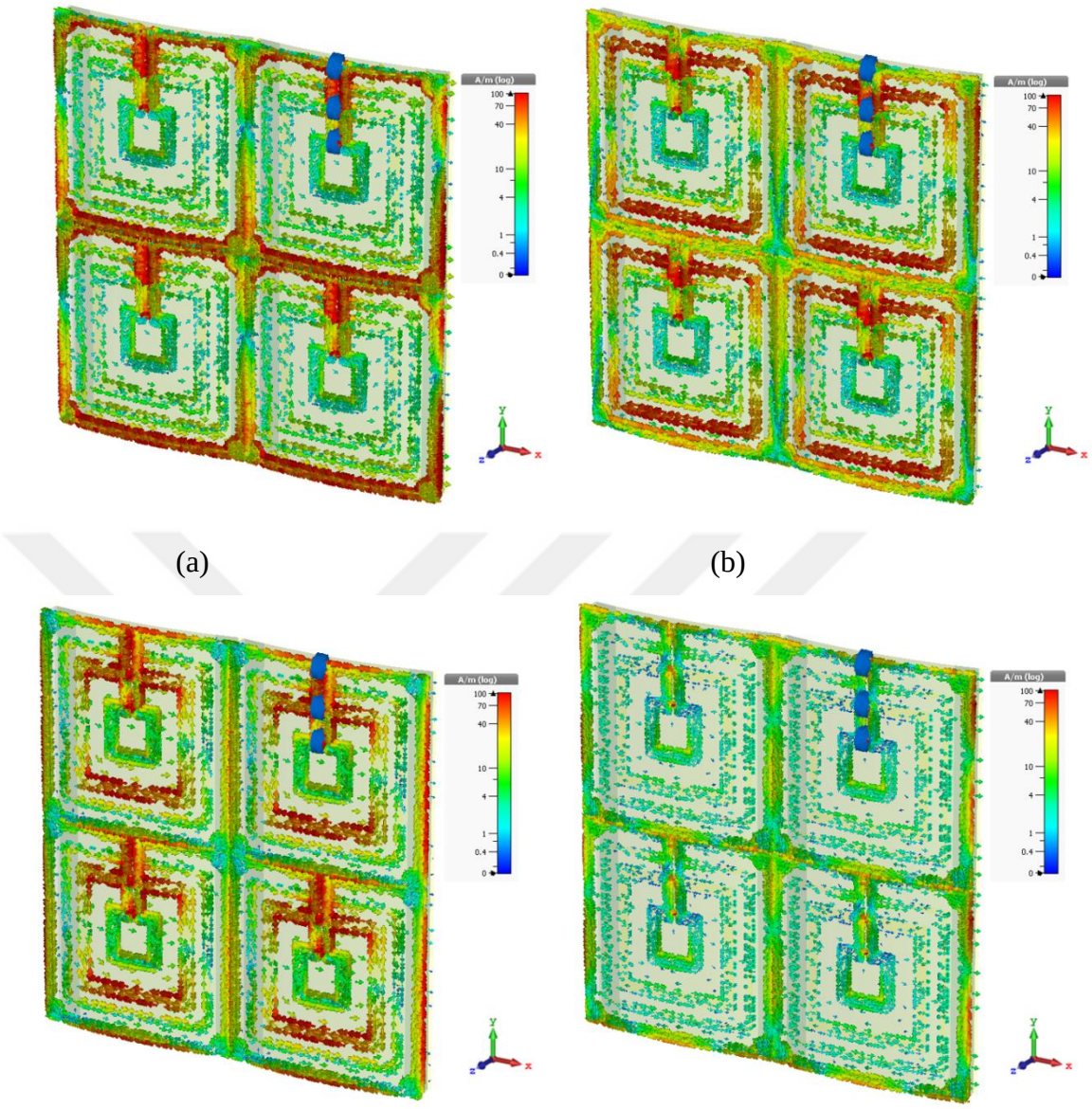
Şekil 4.55 Bükülebilir yapının önceki hali (a) sonraki hali (b)

Şekil 4.55 (a)'da verilen a parametresi birim hücrenin kenar uzunluğunu göstermektedir ve 43 mm'dir. Dış kısımda bulunan SSRR'ın kenar uzunluğu b, genişliği w_1 ile gösterilmiştir ve sırasıyla 42,6 mm ve 1,2 mm'dir. 1,8 GHz frekansında EM hasatlama yapması için tasarlanan SSRR'ın kenar uzunluğu c, genişliği w_2 gösterilmektedir ve sırasıyla 33,9 mm ve 1mm'dir. 2,6 GHz frekansında EM hasatlama yapması için tasarlanan SSRR'ın kenar uzunluğu d, genişliği w_3 ile temsil edilmiştir ve sırasıyla 26 mm ve 2,1 mm'dir. İç kısım bulunan SSRR'ın kenar uzunluğunu gösteren e ve genişliğini gösteren w_4'ün değerleri ise sırasıyla 11,5 mm ve 1,9 mm'dir. Dış kısımda bulunan SSRR'ın köşelerine ilave edilen çeyrek dilim halka rezonatörlerin yarıçapı r genişliği ise w_d ile gösterilmiştir ve sırasıyla 2,5 mm ve 1 mm'dir. SSRR'ların birleştirildikleri bakır kısmın genişliği t ile gösterilmiştir ve değeri 1 mm'dir. SSRR'ların ayrık kısmının genişliğini g ile gösterilmiştir ve değeri 2 mm'dir. Devre elemanı olarak kullanılan direncin temsil edildiği R_3 SSRR'ların ayrık kısmının birleştirildiği bakır hattın tam ortasına yerleştirilmiştir. Şekil 4.55'de gösterilen lp_1, R_1'in bakır hattın ortasından olan uzaklığını lp_2 ise R_2'nin bakır hattın ortasından olan uzaklığını ifade etmektedir ve sırasıyla 8,1 mm ve 6,8 mm'dir. R_1, R_2 ve R_3' e karşılık gelen değerler 235 ohm, 40 ohm ve 15 ohm'dur. Şekil 4.55 (b)'de ise birim hücrenin katlandığı açısıyı temsil eden θ'nın değeri ise 20°'dir.



Şekil 4.56 bükülebilir yapıya ait açıya bağlı verimlilikler

CST microwave studio simülasyon programında yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen veriler şekil 4.56'da verilmiştir. TM modunda uyarılan birim hücrede EM dalganın normal doğrultunda geldiği 0^0'de verimlilik değerleri 0,9 GHz bandında %74,12, 1,8 GHz bandında 82,23, 2,56 GHz bandında %85 ve 5,88 GHz bandında %64 olarak hesaplanmıştır. Ortalama verimlilik değeri ise %76,3 olarak hesaplanmıştır. EM dalganın geliş açısının -10°' olduğu durumda ise verimlilik değerleri 0,81 GHz bandında %61, 1,8 GHz bandında %77,1, 2,56 GHz bandında %78,9 ve 5,93 GHz bandında %84,9 olarak hesaplanmıştır. Ortalama verimlilik değeri %75,48 olarak hesaplanmıştır. EM dalganın geliş açısının -20° olduğu durumda 0,83 GHz bandında %74,8, 1,8 GHz bandında %77,5, 2,56 GHz bandında %79 ve 5,9 GHz bandında %86 verimlilik değerleri elde edilmiştir. Ortalama verimlilik değeri ise %79,3 olarak hesaplanmıştır. EM dalganın geliş açısının -30^0 olduğu durumda 0,86 GHz bandında %65,4, 1,8 GHz bandında %77,8, 2,56 GHz bandında %79,5 ve 5,94 GHz bandında %75,4 verimlilik değerleri elde edilmiştir. Ortalama verimlilik değeri ise %74,5 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.55'de verilen tasarım simetrik yapıya sahip olduğu için ters yönden (15°, 20°, 30° açılarında) uyarıldığında da aynı sonuçlar elde edilecektir.



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 4.57 Bükülebilir yapıda oluşan yüzey akım dağılımları 0,9 GHz için (a) 1,8 GHz için (b) 2,56 GHz için (c) 5,88 GHz için (d)

Şekil 4.57'de bükülebilir MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısına ait bükülme açısının 20^0 olduğu EM dalganın normal doğurultusunda geldiği (geliş açısı 0°) durumda rezonans frekanslarında oluşan yüzey akım dağılımlarından hangi rezonatörün hasatlama işlemine katkı yaptığı görülmektedir.

Çizelge 4.7 Geliş açısının değişiminin verimliliğe etkisi

Açılar (derece)	0-10	10-20	20-30	10-30
Değişim (%)	3,4	5	6,4	2,4

Çezelge 7'de her 10°'lik artışta verimliliğin % değişimi verilmiştir. Toplayadaki verilere göre EM dalganın geliş açısının 0° ile -10° arasındaki değişiminde ortalama verimlilik oranıındaki değişim yaklaşık %3,4 civarındadır. EM daşganın geliş açısının -10° ile -20° arasındaki değişimden ortalama verimlilik oranındaki değişim yaklaşık %5 civarındadır. EM dalganın geliş açısının -20° ile -30° arasındaki değişimden ortalama verimlilik oranındaki fark yaklaşık %6,4 olarak hesaplanmıştır. Böylece yapıda her bir 10°'lik açıda verimlilk en fazla %6,5 civarında değişmiştir. EM dalganın geliş açısının 0° ile -30° olduğu durumlarda ise verimlilik değerleri arasındaki fark yaklaşık %2,4 civarındadır.

5. SONUÇ

Son teknolojik gelişmeler ışığında mikro enerji hasatlama yöntemlerinden biri olan elektromanyetik dalgadan enerji elde edilmesi son yıllarda ilgi gören araştırma konularından biridir. Geleneksel alıcı anten yarıdımı ile oluşturulan EM dalga hasatlama işlemi yerine metamalzeme tabanlı EM dalga soğurularla alıcı ve hasatlama sistemlerin oluşturulması hem boyut olarak hem de verimlilik açısından daha işlevsel olduğu literatürden örnek vererek açıklanmıştır. Metamalzemelerin özelliklerinden bahsedildikten sonra metamalzeme tabanlı EM dalga soğurucu sistemleri ve metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı sistemler hakkında bilgiler verilmiştir.

MM tabanlı EM enerji hasatlama sistemleri iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci kısım ortamda bulunan EM dalganın AC akıma çevrilmesi ikinci kısım ise AC akımın DC akıma çevrilen doğrultucu sistemlerdir. Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda ortamdaki EM dalganın tasarlanan yapı tarafından soğurulduktan sonra hangi verimlilik oranında AC akıma dönüştüğü oran hesaplanmıştır. Bu bağlamda literatürde bulunan EM hasatlama yapılan bant sayıları ve elde edilen verimlilik değerlerinin nispeten düşük olması ve tez kapsamında dört bantlı ve ortalama %75'den fazla verimliliğe sahip MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısının tasarlanarak üretiminin gerçekleştrilmesi literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

Tez kapsamında ilk olarak tek bantta EM dalgayı soğurup hasatlama gerçekleştirecek MM tabanlı enerji hasatlayıcı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Söz konus yapı ayrık halka rezonatör ve rezonatörün açıklık kısmana entegre edilmiş bir adet devre elemanından oluşmaktadır. Simülasyon çalışmaları üzerinden devam eden çalışmalarda dielektrik alt taşın türünün, kalınlığının hasatlama verimliliğine etkileri incelenmiştir. Dielektrik sabirinin değeri arttıkça rezonans frekansının değerinin düşük frekanslara doğru kaydığı ve soğurulma genliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca dielektrik sabitinin sanal kısmının değerinin yüksek olması hasatlama verimliliğini düşürmesi tespit edilen bir diğer nokta olmuştur. Sonuç olarak yapılan simülasyonlar çalışmalarında EM sinyalden AC'ye dönüşüm için elde edilen en yüksek verimlilik değeri %85,58 olarak hesaplanmıştır. Çalışma 2016 yılında Zonguldak'da Bülent Ecevit Üviversitesi ev

sahipliğinde düzenlenen 24. Signal Processing and Communication Application Conference (SIU)'da poster olarak sunulmuştur.

İki bantlı MM tabanlı enerji hasatlayıcı çalışmaları tez çalışmasının bir diğer ayağını oluşturmaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmalardan biri birbirine iletken hat ile bağlanmış iki adet SRR kullanılarak MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısı oluşturulmuştur. CST Microwave Studio simülasyon programında yapılan çalışmalarında 1,8 GHz ve 2,6 GHz'de EM yapı üzerinde soğurulmuştur. Söz konusu frekanslardaki verimlilik oranları ise 1,8 GHz'de %82,4 olrak elde edilirken 2,7 GHz'de bu oran %58 civarında kalmıştır ve söz konusu frekansı hedeflenen frekans bandı olan 2,6 GHz'e indirme çalışmalarından yeterli sonuç alınamamıştır. Bunun üzerine halka rezonatörler yerine kare halka rezonatörler kullanılmış ve hem hedeflenen frekanslarda rezonasns elde edilmiş hem de verimlilik oranları arttırılmıştır. 1,8 GHz ve 2,6 GHz bantlarında yapı üzerinde EM dalga soğurlmuş ve verimlilik değerleri sırasıyla %81,0 ve %73,8 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca geliştirilen MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısı EM dalgasının geliş açısı cinsinden incelenmiştir. Söz konusu çalışma 2017 yılında Ankara'da Orta Doğu Teknik Üniversitesi ev sahipliğinde düzenlenen 23. Yoğun Madde Fiziği Toplantısında poster olarak sunulmuştur.

Tez çalışmasının ana hedefini oluşturan dört bantlı MM tabanlı enerji hasatlayıcı çalışmaları literatürde hedeflenen verimlilikte var olmaması nedeni ile oldukça önem arz etmektedir. Bu kapsamda ilek olarak Dört Bantlı MM Tabanlı EM Enerji Hasatlayıcı-1 alt başlıklı çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapı üç adet kare ayrık halka rezonatör ve iç kısımda bulunan rezonatörün köşe noktalarına ilave edilen çeyrek dilim kare halka rezonatörlerden oluşmaktadır. Tsarlanan yapıda alt taş ticari olarak bulunabilecek en düşük kayıp tanjant değerine sahip saf Teflon malzemesi kullanılarak EM dalganın dielektrik katmanda soğurulmasın en aza indirgenmesi sağlanmıştır. Yapılan simülasyon çalışmalarında hedeflenen 0,9 GHz 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekans bantların yeterli verimlilik oranlarına ulaşılamamış, hedeflenen ortalama %75 verimlilikten uzak kalınmıştır. Yapıya ilave edilen çeyrek halka dilimlerin geometrisinin daha fazla bütülememesi ve 5,8 GHz frekans bandına ulaşılamaması da bir diğer karşılaştığımız bir diğer problem olmuştur.

Karşılaşılan problemeleri çözmek adına bir diğer başlık olan Dört Bantlı MM Tabanlı Enerji Hasatlayıcı-2'de yapılan tasarıma geçilmiştir. Bu başlık altında yapılan çalışmada çeyrek dilim halka rezonatörler kaldırılarak yerine kare halka rezonatör eklenmiştir. Bu durumda tasarım dört adet ayrık kare halka rezonatörden oluşmaktadır ve rezonatörler daha önceki çalışmada olduğu gibi ayrık bölgelerinden bakır ile birleştirilmiştir. Rezonatörlerin birleştirildiği ayrık kısımlarına iki adet direnç bağlanarak EM hasatlama yapılmak istenmiştir ancak yapılan simülasyon çalışmalarında elde edilen verimlilik oranlarının 2,6 GHz'de düşük kalması üzerine yapıya entegre edilen devre elemanı sayısı üçe çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlarda 2,6 GHz'deki verimlilik oranı yükselmiş ancak 5,8 GHz bandındaki verimlilikte aynı sonuçlar elde edilememiştir.

Dört bantlı EM hasatlama çalışmaları için Dört Bantlı MM Tabanlı Enerji Hasatlayıcı-3 başlıklı çalışmada iç içe geçmiş dört adet ayrık halka rezonatör kullanılmıştır. Literatürde bulunan halka rezonatörlerin kare halka rezonatörlere daha daha fazla bant genişiğine sahip olacağı bilgisinde yola çıkılarak gerçekleştrilen çalışmada daha önceki tasarımlarda olduğu gibi SRR yapıları ayrık bölgelerinden birleştirilmiştir. Söz konusu simülasyon çalışmalarında 0,9 GHz bandında rezonans elde edebilmek için birim hücrenin kenar uzunluğunun arttırılması gerekmiştir ancak yapının büyüklüğü metamalzemelerin dalgaboyu altı malzeme olma özelliğini kaybettirmesinden dolayı tasarımın simülasyon çalışmalarına son verilmiştir. Verimlilik değerleri ise ortalama olarak hedeflene %75'in altında kalmıştır.

Bant genişliğinin arttırılması için kare halka rezonatörler yerine SRR kullanılması düşüncesinden vazgeçilmesinden sonra Dört Bantlı MM Tabanlı Enerji Hasatlayıcı-4 tasarımdan tekrar kare halka rezonatörler kullanılmıştır. Dört adet iç içe geçmiş ve ayrık bölgelerinden birleştirilmiş kare halka rezonatörlerden oluşan daha önceki yapıya benzer bir tasarım oluşturulmuştur. Ancak iç kısımdaki kare halka rezonatörlerin köşelerin çeyrek dilim halka rezonatör eklenmiştir. Yapılan simülasyon çalışmalarında 0,9 GHz, 1,8 GHz ve 2,6 GHz bantlarına yakın değerlerde yüksek verimlilik oranlarına ulaşılsada, 5,8 GHz yerine 4,9 GHz civarında bir rezonas elde edilmiş ve yapılan parametrik analizlerin sonucunda söz konusu frekans bandı hedeflenen frekans bandına getirilememiştir. Bunun üzerine Dört Bantlı MM Tabanlı Enerji Hasatlayıcı-5 başlığı

altında incelen çalışmaya geçilmiştir. Daha önceki tasarımda yer alan ve iç ksımdaki kare halka rezonatörün köşe noktalarına yerleştirilen çeyrek dilim halka rezonatörler bu sefer dış kısımda bulanan kare halka rezonatörün köşelerine eklenmiştir. Böylece 5,8 GHz bandını da kapsayacak şekilde hasatlma işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ortalama verimlilik değeri %80,37 olarak hesaplanmıştır. Literatürde var olmayan bant sayısı ve verimlilik oranı elde edildikten sonra üretim aşamasına geçilmiştir. Ancak kullanılan alt taş malzemesi olan saf Teflonun iki yüzü bakır kaplı şekilde ticari olarak elde edilememiştir. Bunun üzerine bakır kaplı olmadan temin edilen Teflonun üzerine bakır bant birim hücreler boyutunda kesilerek yapıştırılmış ve fotolitografi yöntemi kullanılarak üretimi gerçekleştirilmiştir bant teflon yüzeye yapıştırılmış ve fotolitografi yöntemi uygulanarak üretim gerçekleştirilmiştir. Ancak birim hücre boyutunda kesilen bakır bantların istenilen hassasiyette olmaması üretimin hatalı olmasına neden olmuştur. Üretilen yapının laboratuvar ortamında S_{11} ölçümleri yapılsa bile istenilen sonuçlar elde edilememiştir. Karşılaşılan problem üzerine iletken kısmın tek parça bakırdan oluşması gerektiğine karar verilmiştir. Ancak 0,035 mm kalınlığında tek parça bakır bulunamadığı için elde edilen 0,1 mm kalınlığında bakır folyo kullanılmıştır. Simülasyon çalışmlarında bakır kalınlığının değiştirilmesi sonuçları etkilediği için tekrar parametrik analiz yapılmak zorunda kalınmıştır. Yapılan simülasyon çalışmalarının ardından ortalama %79,5 verimlilik değerine ulaşılmıştır. Üretilen MM tabanlı enerji hasatlayıcı yapısı laboratuvar ortamında vektör network analizör ve horn antenler kullanılarak S parametresi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümler ile simülasyon çalışmalarından elde edilen S_{11} verileri karşılaştırılmış ve uyumlu oldukları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar 2019 yılında Juornal of Electronic Materials dergisinde yayınlanmıştır.

Dört Bantlı MM Tabanlı Enerji Hasatlayıcı Yapısı-6 başlıklı çalışmada dört adet iç içe geçmiş halka rezonatörler kullanılmış ve söz konusu rezonatörlerin her iki tarafında ayrıklar açılmıştır. Böylece yapı EM dalganın geliş açısına göre verimlilik değerlerinin fazla değişmemesi hedeflenmiştir. Ayrık bölgelerin birleştirildiği bakır hatta toplam dört adet devre elemanı eklenerek EM hasatlama gerçekleştirilmiştir. Hedeflenen frekanslarda ortalama verimlilik %69,33 olarak hesaplanmıştır. EM dalganın geliş açısının pozitif ve negatif yöndeki değişimininde simülasyon ortamında araştırıldığı

çalışma 2018 yılında Konya'da KTO Karatay Üniversitesi ev sahipliğinde düzenlenen URSİ-TÜRKİYE konferansında sözlü olarak sunulmuştur.

Tez kapsamında çok katmanlı MM yapıları ile EM hasatlama çalışmaları yapılmıştır. İki katman olarak tasarlanan yapının ön kısımında 5,8 GHz ve 2,6 GHz bantlarında arka kısmında ise 0,9 GHz ve 1,8 GHz bantlarında EM hasatlama yapması için tasarlanan ayrık kare halka rezonatörler bulunmaktadır. Yapılan simülasyon çalışmalarında 0,9 GHz bandındaki verimliliğin düşük çıkmasından sonra yapıda bulunan katmanların yeri değiştirilmiştir. Elde edilen yeni tasarım üzerine yapılan simülasyon çalışmalarında 0,9 GHz bandında da yüksek verim elde edilmiştir. Hedeflenen frekansların (2,6 GHz ve 5,8 GHz) tam olarak elde edilememesinden sonra arka katmanda bulunan rezonatörlerin aynı taban alanına sahip olacak şekilde dörde çıkarılmıştır. Böylece rezonatörlerin komşu birim hücreler ile daha yakın olması sağlanarak kapasitif etki arttırılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmaları neticesinde ortalama verimlilik %80,85 olarak elde edilmiş ve hedeflenen verimlilik oranının üzerine çıkılmıştır. Söz konusu çalışma 2019 yılında International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering dergisinde yayınlanmıştır.

Son olarak MM tabanlı EM enerji hasatlayıcı yapılarının düz zeminlerin yanı sıra eğimli zemilerde de uygulanabileceği fikrinden yola çıkılarak simülasyon programında tasarlanan EM hasatlayıcı yapısı 20°'lik açıyla eğilmiş ve EM dalganın geliş açısı cinsinden incelenmiştir. Geliş açılarına göre en fazla değişim 20° ile 30° arasında gözlenmiştir verimlilik oranının değişimi %6,4 olarak hesaplanmıştır.

Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde elde edilen bulgular gelecekte düşük güç ile çalışan bir elektronik cihazın çalıştırılması için kullanılabilir. Söz konusu cihazların çalıştırılması için yapıya entegre edilecek doğrultucu devre yardımı ile AC akımdan DC akıma çevrim sağlanabilir. Böylelikle çevremizde bulunan EM kirlilikten kullanılabilir enerji üretimi sağlanabilir.

KAYNAKLAR

Almoneef, T. S., Ramahi, O. M. (2014). Can split-ring resonators be viable for electromagnetic energy harvesting?. In 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI) (pp. 424-425). IEEE.

Almoneef, T. S., & Ramahi, O. M. (2015). Metamaterial electromagnetic energy harvester with near unity efficiency. Applied Physics Letters, 106(15), 153902.

Alù, A., Bilotti, F., Engheta, N., & Vegni, L. (2007). Subwavelength, compact, resonant patch antennas loaded with metamaterials. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 55(1), 13-25.

Bakır, M., Karaaslan, M., Altıntaş, O., Bagmancı, M., Akdogan, V., and Temurtaş, F. (2018). Tunable energy harvesting on UHF bands especially for GSM frequencies. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 10(1), 67-76.

Cai, W., Chettiar, U. K., Kildishev, A. V., Shalaev, V. M. (2007). Optical cloaking with metamaterials. Nature photonics, 1(4), 224.

Cui,T. J., D.R. Smith, and R. Liu, Metamaterial Theory and Design, Springer, NewYork,
ISBN: 978-1-4419-0573-4, 367p., 2010.

D. R. Smith and J. B. Pendry. "Reversing light: negative refraction," Physics Today, pp. 1-8, Dec. 2003.

Ghosh, S., Bhattacharyya, S., Chaurasiya, D., & Srivastava, K. V. (2015). An ultrawideband ultrathin metamaterial absorber based on circular split rings. IEEE antennas and wireless propagation letters, 14, 1172-1175.

Hong, J.S. G., Lancaster, M. J., Microstrip Filters for RF/Microwave Applications, Wiley-Interscience, 2001

J. L, T. M. Grzegorczyk, Y. Zhang, J. Pacheo, B.-I. Wu, J. A. Kong, and M. Chen. "Cerenkov radiation in materials with negative permittivity and permeability," Optics Express, vol. 11, no. 7, pp. 723–734, April 2003.

Jeong, H., Nguyen, T. T., and Lim, S. (2018). Subwavelength Metamaterial Unit Cell for Low-Frequency Electromagnetic Absorber Applications. Scientific reports, 8(1), 16774.

Karakaya, E., Mülazımoğlu, C., Can, S., Yılmaz, A. E., & Akaoğlu, B. (2016). Metamaterial design for energy harvesting applications. In 2016 24th Signal

Processing and Communication Application Conference (SIU) (pp. 509-512). IEEE.

Karakaya, E., Bağcı, F., Yılmaz, A. E., & Akaoğlu, B. (2018) GSM ve Wi-Fi Bandlarına Yönelik Metamalzeme Tabanlı Enerji Hasatlayıcı. URSI-TÜRKİYE'2018 IX. Bilimsel Kongresi, 6-8 Eylül 2018, KTO Karatay Üniversitesi, Konya

Karakaya, E., Bagci, F., Can, S., Yilmaz, A. E., & Akaoglu, B. (2019). Four-band electromagnetic energy harvesting with a dual-layer metamaterial structure. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 29(1), e21644.

Karakaya, E., Bagci, F., Yilmaz, A. E., and Akaoglu, B. (2019). Metamaterial-Based Four-Band Electromagnetic Energy Harvesting at Commonly Used GSM and Wi-Fi Frequencies. Journal of Electronic Materials, 1-10.

Kim, Y. J., Yoo, Y. J., Kim, K. W., Rhee, J. Y., Kim, Y. H., & Lee, Y. (2015). Dual broadband metamaterial absorber. Optics express, 23(4), 3861-3868.

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.

Pendry, J. B., 2000. "Negative refraction makes a perfect lens," Phys. Rev. Lett., vol. 85,
no. 18, pp. 3966–3969

Pendry, J. B., Schurig, D., and Smith, D. R. 2006. Controlling electromagnetic fields. science, 312(5781), 1780-1782.

Ramakrishna, S. A., & Pendry, J. B. 2004. Spherical perfect lens: Solutions of Maxwell's equations for spherical geometry. Physical Review B, 69(11), 115115.

Shen, X., Cui, T. J., Zhao, J., Ma, H. F., Jiang, W. X., and Li, H. (2011). Polarization-independent wide-angle triple-band metamaterial absorber. Optics express, 19(10), 9401-9407.

Smith, D. R. and Kroll, N. 2000. Negative refractive index in left-handed materials. Phys. Rev. Lett., vol. 85, no. 14, pp. 2933–2936, 2000.

Suen, J. Y., Fan, K., & Padilla, W. J. (2019). A Zero-Rank, Maximum Nullity Perfect Electromagnetic Wave Absorber. Advanced Optical Materials, 1801632.

Wang, W., Yang, X., Luk, T. S., and Gao, J. (2019). Enhanced quantum dots spontaneous emission with metamaterial perfect absorbers. Applied Physics Letters, 114(2), 021103.

Veselago, V.G., “The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of e and m,” Soviet Physics Uspekhi, vol. 10, no. 4, pp. 509–514, Jan.–Feb. 1968.

Watts, C. M., Liu, X., & Padilla, W. J. (2012). Metamaterial electromagnetic wave absorbers. Advanced materials, 24(23), OP98-OP120.

Wartak, M. S., Tsakmakidis, K. L., & Hess, O. (2011). Introduction to metamaterials. Physics in Canada, 67(1), 30-34.

Zagoskin, A. M. (2012). Superconducting quantum metamaterials in 3D: possible realizations. Journal of Optics, 14(11), 114011.

Zhang, X., Liu, H., & Li, L. (2017). Tri-band miniaturized wide-angle and polarization-insensitive metasurface for ambient energy harvesting. Applied Physics Letters, 111(7), 071902.

Zhang, X., & Liu, Z. 2008. Superlenses to overcome the diffraction limit. Nature materials, 7(6), 435-441.

Zheludev, N. I. (2010). The road ahead for metamaterials. Science, 328(5978), 582-583.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Emrullah Uzay Karakaya
Doğum Yeri : Ankara
Doğum Tarihi : 11.01.1989
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Ankara Aktepe Lisesi (2006)
Lisans : Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü (2016)
Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı
(2019)

Yayınlar (SCI)

Can, S., Karakaya, E., Bagci, F., Yilmaz, A. E., Akaoglu, B., "Dual-Band Double-Cylindrical-Ring 3D Frequency Selective Surface", ETRI Journal, 39(1), 69-75, (2017).

Sultan Can, **Emrullah Karakaya**, Fulya Bagci, A. Egemen Yilmaz, Baris Akaoglu, "Tunable Metasurfaces for Filtering the Electromagnetic Waves Under Different Excitations." Applied Computational Electromagnetics Society Journal 31.9 (2016).

F Bagci, C Mulazimoglu, S Can, **E Karakaya**, AE Yilmaz, B Akaoglu "A glass based dual band frequency selective surface for protecting systems against WLAN signals" AEU-International Journal of Electronics and Communications 82, 426-434

E. Karakaya, F. Bagci, S. Can, A. E. Yilmaz, B. Akaoglu, "Four-band electromagnetic energy harvesting with a dual-layer metamaterial structure", International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering 2019, 29.1: e21644.

E. Karakaya, F. Bagci, A. E. Yilmaz, B. Akaoglu, “Metamaterial Based Four-Band Electromagnetic Energy Harvesting at Commonly Used GSM and Wi-Fi Frequencies” Journal of Electronic Materials, 2019, 10.1007/s11664-019-06962-9

Sözlü/Poster Sunum Bilgileri:

Emrullah Karakaya, Cenk Mülazımoğlu, Sultan Can, A. Egemen Yılmaz, Barış akaoğlu, “Enerji Hasadı Uygulamalarına Yönelik Metamalzeme Tasarımı”,Signal Processing and Communication Application Conference (SIU), 2016 24th

Sultan Can, **Emrullah Karakaya**, Cenk Mülazımoğlu, Fulya Bağcı, A. Egemen Yılmaz, Barış Akaoğlu,‘’WiFi Frekansına Yönelik Pyrex-Cam Tabanlı Metayüzey Tasarımı’’, URSI-TÜRKİYE’2016 VIII. Bilimsel Kongresi, 1-3 Eylül 2016, ODTÜ, Ankara

Emrullah Karakaya, Sultan Can, Cenk Mülazımoğlu, Fulya Bağcı, A. Egemen Yılmaz, Barış Akaoğlu, ‘’Enerji Hasadı Uygulamalarında Metamalzeme’’, URSI-TÜRKİYE’2016 VIII. Bilimsel Kongresi, 1-3 Eylül 2016, ODTÜ, Ankara

Cenk Mülazımoğlu, **Emrullah Karakaya**, Sultan Can, A. Egemen Yılmaz, Barış Akaoğlu, "Hexagonal-shaped metamaterial energy harvester design." Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (METAMATERIALS), 2016 10th International Congress on. IEEE, 2016.

F. Bagci, S. Can, C. Mulazimoglu, **E. Karakaya**, A. E. Yilmaz, B. Akaoglu, Ursi-Türkiye 2016 8. Bilimsel Kongresi, ODTÜ, Ankara, "Wi-Fi Frekansinda Çalisan Metamalzemeli Dikdörtgen Mikro-Serit Yama Anten Tasarimi", (1-3).09.2016.

C. Mülazimoglu, F. Bagci, **E. Karakaya**, S. Can, A. E. Yilmaz, B. Akaoglu, "Elektronik Bant Aralikli Yapilar Kullanilarak Alçak Geçiren Mikroserit Filtre Tasarimi", Ursi Türkiye 2016 8. Bilimsel Kongresi/poster sunumu, Ankara, Türkiye, 1-3.09.2016, ODTÜ.

F. Bagci, S. Can, C. Mulazimoglu**, E. Karakaya**, A. E. Yilmaz, B. Akaoglu, Ursi-Türkiye 2016 8. Bilimsel Kongresi, ODTÜ, Ankara, "Wi-Fi Frekansında Çalışan Metamalzemeli Dikdörtgen Mikroşerit Yama Anten Tasarımı", (1-3).09.2016.

C. Mülazimoglu, F. Bagci, **E. Karakaya**, B. Akaoglu, "Elektrik-LC Rezonatörlü Metamalzeme ile Enerji Hasatlama", Fotonik 2016 18. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalistayi, 23.09.2016, Bilkent Üniversitesi Ankara, Türkiye

F. Bagci, **E. Karakaya**, S. Can, A. E. Yilmaz, B. Akaoglu, "Periyodik iki boyutlu halka veya üç boyutlu iç içe geçmis halka silindirlerin frekans seçici özelliklerinin karsilastirilmasi", 22. Yogun Madde Fizigi Ankara Toplantisi, 16.12.2016.

S Can, AE Yılmaz, C Mülazimoğlu**, E Karakaya**, B Akaoğlu "Miniaturized wide-band supercell frequency selective surface for LTE band applications" Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkiye), 2017

F Bagci, S Can, **E Karakaya**, C Mulazimoglu, AE Yilmaz, B Akaoglu "Optically transparent frequency selective surface for filtering 2.6 GHz LTE band" Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkiye), 2017

Emrullah Karakaya, Fulya Bagci, Cenk Mülazimoglu, A. Egemen Yilmaz, Baris Akaoglu, Ayrik Halka Rezonatörler ile 1.8 GHz ve 2.6 GHz Frekanslarda Elektromagnetik Enerji Hasatlama, 23. Yogun Madde Fizigi Ankara Toplantisi, 22.12.2017

Cenk Mülazimoglu, **Emrullah Karakaya**, Fulya Bagci, A. Egemen Yilmaz, Baris Akaoglu, Metamalzeme Yapilar Kullanilarak Çift-Bantli Kutupluluktan Bagimsiz Enerji Hasatlama, 23. Yogun Madde Fizigi Ankara Toplantısı, 22.12.2017

S Can, AE Yılmaz, **E Karakaya** "Conformai dual-band frequency selective surface onTextile: Design, prototyping and expriment" USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium), 2017, 17-18

Emrullah Karakaya, Fulya Bagci, A. Egemen Yilmaz, Baris Akaoglu, GSM ve Wi-Fi Bantlarina Yönelik Iki Katmanli Metamalzeme Hasatlayici, Yogun Madde Fizigi Izmir Toplantisi, Izmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 13 Nisan 2018.

Fulya Bagci, **Emrullah Karakaya**, A. Egemen Yilmaz, Baris Akaoglu, FR-4 Alttas ile 5,8 GHz Frekans Bandina Yönelik Metamalzeme Hasatlayici, Yogun Madde Fizigi Izmir Toplantisi, Izmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 13 Nisan 2018.

E. Karakaya, F. Bağcı, A.E. Yılmaz, B. Akaoğlu "SM ve Wi-Fi Bandlarına Yönelik Metamalzeme Tabanlı Enerji Hasatlayıcı" URSI-TR 2018 IX. Bilimsel Kongresi, 6-8 Eylül 2018 KTO Karatay Üniversitesi, Konya

F. Bağcı, **E. Karakaya**, A.E. Yılmaz, B. Akaoğlu "Metamalzeme ile 1,8 GHz ve 2,6 GHz Frekanslarında Elektromanyetik Hasatlama" URSI-TR 2018 IX. Bilimsel Kongresi, 6-8 Eylül 2018 KTO Karatay Üniversitesi, Konya