Metamalzeme Yapıların Enerji Hasadı Uygulamaları

Program Kodu: 3001

Proje No: 116E188

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Barış Akaoğlu

Araştırmacılar:
Prof. Dr. A. Egemen Yılmaz
Dr. Fulya Bağcı

Bursiyerler:
Emrullah Karakaya
Cenk Mülazımoğlu

EYLÜL 2018
ANKARA

ÖNSÖZ

Günümüz teknolojilerinde elektronik cihazların boyutlarının küçülmesi ile birlikte bu cihazlar daha düşük güç ile çalışabilir duruma gelmiştir. Hava durumu gözlemi, çevre bilgilerinin izlenmesi, sağlık uygulamaları, endüstriyel kontrol ve otomasyon, düşman hareketlerinin takibi gibi çok çeşitli sivil ve askeri uygulamalarda düşük güçte çalışan çok sayıda kablosuz algılayıcılar (kablosuz algılayıcı ağları) kullanılmaktadır. Algılayıcılarda gereksinim duyulan enerji, pil içerisinde saklanmaktadır. Pillerin kimyasal olarak çevreye ve insan sağlığına zarar verdiği ve yenilenebilir olmadığından enerji ve kaynak israfına yol açtığı göz önünde bulundurulduğunda, yenilenebilir enerjilere duyulan ihtiyacın kaçınılmaz olduğu görülmektedir. Güneş enerjisi, ısı enerjisi, titreşim enerjisi vb. gibi yenilenebilir enerji yöntemlerinin yanında elektromanyetik enerji hasadı son yıllarda üstün özelliklerinden dolayı öne çıkmaktadır. Bu üstün özellikler, hareket, sıcaklık, manyetik alan değişimi gibi özelliklere gereksinim duymaması, iklim şartlarından etkilenmeyerek zamana karşı nispeten kararlı bir enerji dönüşümü elde etmesi, radyo frekansı/mikrodalga frekans bölgelerindeki elektromanyetik dalgaların insan yaşam alanlarındaki atmosferde geniş çapta bulunması (TV, radyo, cep telefonu, elektronik çok sayıda cihaz) olarak sıralanabilir. Bu bağlamda, bu proje kapsamında 900 MHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekans bantlarında %75'in üzerinde hasatlama yapabilen tek katmanlı, çok katmanlı ve bükülebilir metamalzeme hasatlayıcılar tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu proje, hem eğitime hem tasarım/üretime yönelik deneyimler kazandırmıştır. Uluslararası literatürde erişilen düzey takip edildiği gibi ulusal öncelikler de göz önüne alınmıştır. Bu proje kapsamında, 15 aylık bir süre içerisinde edinilen deneyimler ileriki yıllarda proje takımınca yürütülecek metamalzemeler ve uygulamaları ile ilgili birçok çalışma için sağlam bir temel oluşturacaktır.

Bu projenin tamamlanmasında, TUBİTAK-EEEAG başta olmak üzere, katkısı olan tüm özel ve tüzel kişilere teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i
ŞEKİLLER iv
TABLOLAR vii
ÖZET viii
ABSTRACT ix
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR ÖZETİ 2
3. GEREÇ VE YÖNTEM 4
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 5
4.1 Tek Bantlı Metamalzeme Tabanlı Elektromanyetik Enerji Hasatlama 5
4.1.1 Tasarım T1 5
4.2 İki Bantlı Elektromanyetik Enerji Hasatlama 12
4.2.1 Tasarım T2 12
4.2.2 Tasarım T3 13
4.2.3 Tasarım T4 16
4.2.4 Tasarım T5 ve T6 19
4.3 Dört Bantlı Metamalzeme Tabanlı Elektromanyetik Enerji Hasatlama 23
4.3.1 Tasarım T2-1 23
4.3.2 Tasarım T7 28
4.3.3 Tasarım T8 30
4.3.4 Tasarım T8-2 32
4.3.5 Tasarım T9 35
4.3.6 Tasarım T10 37
4.3.7 Tasarım T11 40
4.3.8 Tasarım T11-2 43
4.3.9 Tasarım T11-3 47
4.3.10 Tasarım T12 55
4.4 Çok Katmanlı Metamalzeme Tabanlı Elektromanyetik Enerji Hasatlama 59
4.4.1 Tasarım T13 59
4.4.2 Tasarım T14 61
4.4.3 Tasarım T15 63
4.4.4 Tasarım T15-2 64
4.5 Bükülebilir Metamalzeme Tabanlı Elektromanyetik Enerji Hasatlama 68
4.5.1 Tasarım T16 69
5. SONUÇ 72

6. KAYNAKLAR 75

ŞEKİLLER

Şekil 1. RF enerji hasatlama için haftanın günlerine yayılan enerji profili. 1
Şekil 2. Üç bantta elektromanyetik hasatlama yapan (a) kapalı halka rezonatörlü (Zhang vd., 2017) ve (b) ayrık halka rezonatörlü (Zhong vd., 2016) metamalzeme yapıları. 3
Şekil 3.(a) Tasarlanan metamalzeme tabanlı hasatlayıcının birim hücresi ve (b) soğurma eğrisi 6
Şekil 4. Alttaş, metal ve direnç üzerinde biriken elektromanyetik güç (yüzdesel) 7
Şekil 5. (a) Farklı direnç değerleri için hasatlama verimliliği, (b) 5,8 GHz frekansında yüzey akım yoğunluğu. 7
Şekil 6. (a) Via konumu, (b) farklı via konumlarında hasatlama verimliliği. 8
Şekil 7. Farklı geliş açıları altında hasatlama verimliliği 8
Şekil 8. (a) Arka düzlemi tamamen bakır kaplı alttaş üzerinde AHR yapısı ve (b) karşı gelen devresi. 10
Şekil 9. AHR rezonatörlü metamalzemenin kapasitans değerinin frekans ile değişimi. 11
Şekil 10. (a) AHR açıklığına direnç elemanı yerleştirilmiş metamalzeme tabanlı hasatlayıcının birim hücresi, (b) tasarlanan birim hücreye karşı gelen eşdeğer devre. 11
Şekil 11. (a) Örnek metamalzeme tabanlı hasatlayıcı ve (b) hasatlama verimliliği 11
Şekil 12. (a) 0,9 GHz ve 5,8 GHz frekanslarında hasatlama işlemi için yapıya dahil edilen dirençler ile birlikte birim hücre görüntüsü ve (b) gönderilen dalganın elektrik alan yönelimi. 12
Şekil 13. Ön yüzeyine direnç bağlanan Şekil 10'daki yapıda dirençler üzerinden harcanan güç 13
Şekil 14. Tasarlanan metamalzeme yapısının önden (solda) ve arkadan (sağda) görüntüsü. 14
Şekil 15. TM uyarım altında (a) 2,6 GHz ve (b) 5,8 GHz frekanslarında elektrik alan dağılımı 14
Şekil 16. TE uyarım altında (a) 2,6 GHz ve (b) 5,8 GHz frekanslarında elektrik alan dağılımı. 15
Şekil 17. Metamalzeme tabanlı hasatlayıcının frekansa bağlı yansıma parametresinin büyüklüğü (a) CST benzetim sonuçları (b) HFSS benzetim sonuçları (kırmızı eğri: TM, siyah eğri: TE) 16
Şekil 18. Metamalzeme tabanlı hasatlayıcının frekansa bağlı hasatlama verimliliği 16
Şekil 19. Metamalzeme tabanlı hasatlayıcının birim hücre geometrisi ve (b) soğurma grafiği. 17
Şekil 20. Metamalzemeye dik gönderilen elektromanyetik dalgalar için direnç, alttaş ve metalik kısımlarda harcanan AC güç oranları. 18
Şekil 21. Farklı geliş açıları için direnç üzerinden hasatlama verimliliği. 18
Şekil 22. (a) 1,8 GHz ve (b) 2,6 GHz frekanslardaki yüzey akım yoğunluğu 19
Şekil 23. (a) 1,8 GHz ve 2,6 GHz frekansları için tasarlanan EM dalga hasatlayıcı, (b) yapıya gönderilen dalganın elektrik alan yönelimi 20
Şekil 24. Tasarlanan ayrık halka rezonatörlere bağlanan direnç üzerinden harcanan güç grafiği 20
Şekil 25. (a) Ayrık kare halka rezonatörlerden oluşan EM dalga hasatlayıcı, (b) yapıya gönderilen EM dalganın elektrik alan yönelimi. 21
Şekil 26. Metamalzeme tabanlı hasatlayıcının S11 grafiği 22
Şekil 27. Devre elemanı üzerinde harcanan güç. 22
Şekil 28. (a) Geliş açısı θ'nın tanımı, (b) θ'ya bağlı devre elemanı üzerinde harcanan güç. .23
Şekil 29. (a) Tasarım T2-1'in birim hücre görüntüsü, (b) elektrik alan yönelimi 24
Şekil 30. Tasarım T2-1'in S11 grafiği 25
Şekil 31.(a) Tasarım T2-1'e 5,8 GHz için eklenen dairesel halka rezonatör ile birim hücre görüntüsü, (b) 5,8 GHz için yapının ortasına eklenen kare halka rezonatör ile birim hücre görüntüsü. 26
Şekil 32. (a) Ayrık halka rezonatör eklenmiş birim hücre görüntüsü (b) elektrik alan yönelimi 26
Şekil 33. Şekil 30.a'daki tasarımın S_{11} grafiği. 27
Şekil 34.(a)Tasarım T2-1'in dört bant için tamamlanmış hali, (b) elektrik alan yönelimi. 27
Şekil 35. Dört bant için tasarlanan metamalzeme tabanlı enerji hasatlama çalışmasının S11 sonuçları. 28
Şekil 36. (a) T7'ye ait birim hücre görüntüsü (b) elektrik alan yönelimi. 29

Şekil 37. Tasarım T7'ye ait dirençler üzerinde harcanan güç.....30
Şekil 38. (a) Tasarlanan birim hücre yapısı (T7) (b) yapının elektrik alan yönelimi.....31
Şekil 39. Farklı alttaşlar kullanılarak elde edilen devre elemanı üzerinde harcanan güç.....32
Şekil 40. Tasarım T7-2'ye ait birim hücre görüntüsü.....32
Şekil 41. Devre elemanları üzerinde harcanan güç.....33
Şekil 42. Birim hücrede indüklenen akıma ait yüzey akım dağılımları a) 0,95 GHz için b) 1,85 GHz için c) 2,6 GHz için d) 5,8 GHz için.....34
Şekil 43. Benzetim ortamında birim hücrede hapsedilen güç.....35
Şekil 44. Tasarım T9'a ait birim hücre.....36
Şekil 45. Devre elemanları üzerinde harcanan güç.....37
Şekil 46. Tasarım T10'a ait birim hücre.....38
Şekil 47. Tasarım T10 üzerinde devre elemanları üzerinde harcanan güç.....39
Şekil 48. Birim hücrede indüklenen akımlar (a) 0,94 GHz'de (b) 1,82 GHz'de (c) 2,51 GHz'de (d) 4,9 GHz'de.....40
Şekil 49. Tasarım T11'e ait birim hücre görüntüsü.....41
Şekil 50. Devre elemanları üzerinde harcanan güç.....42
Şekil 51. 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.....43
Şekil 52. Tasarım T11-3'e ait birim hücre görüntüsü.....44
Şekil 53. Devre elemanı üzerinde harcanan güç.....45
Şekil 54. Üretilen metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı yapısı (a) üretilmeden önce (b) üretildikten sonra.....46
Şekil 55. Ölçüm düzeneğin genel bir çizimi.....46
Şekil 56. Tasarım T11-2'ye ait S11 grafikleri (a) benzetim ortamında (b) ölçüm.....47
Şekil 57. (a) CST Microwave Studio ve (b) Ansoft HFSS'de tasarlanan T11-2'ye ait birim hücre görüntüleri.....48
Şekil 58. (a) Metamalzeme tabanlı hasatlayıcının birim hücre geometrisi, (b) temsili eşdeğer devresi.....49
Şekil 59. Hasatlayıcı metamalzemenin (a) yansıma ve (b) soğurma spektrumu.....50
Şekil 60. Metamalzeme tabanlı hasatlayıcının empedans spektrumu.....50
Şekil 61.Tasarım 11-3'e ait verimlilik grafiği.....51
Şekil 62. 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.....52
Şekil 63. Metamalzeme tabanlı EM enerji hasatlayıcı.....52
Şekil 64. Yankısız odada yansıma katsayısı parametrelerinin ölçümü.....53
Şekil 65. Laboratuvar ortamında ölçülen S_{11} spektrumu.....53
Şekil 66. Benzetim ortamlarında (CST ve HFSS) ve ölçüm sonunda elde edilen S11.....54
Şekil 67. Spektrum analizör ile hasatlanan elektromanyetik gücün ölçülmesi.....55
Şekil 68. Kullanılan spektrum analizörü.....55
Şekil 69. (a) Birim hücreye ait geometrik yapı (T12) (b) gönderilen EM dalganın elektrik alan yönelimi.....56
Şekil 70. Metamalzemeye dik açıda gönderilen EM dalganın ne kadarının AC akım olarak dirençler üzerinde harcanan güce oranı.....57
Şekil 71. Geliş açısı θ'nın (a) pozitif yönde, (b) negatif yönde değişiminin verimlilik üzerine etkisi.....57
Şekil 72. Birim hücrede indüklenen yüzey akım dağılımları a) 0,9 GHz için b) 1,8 GHz için c) 2,6 GHz için d) 5,8 GHz için.....58
Şekil 73.(a) 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekansları için tasarlanan birinci katman ve (b) 0,9 GHz ve 1,8 GHz frekansları için tasarlanan ikinci katman.....59
Şekil 74. Çok bantlı yapıda devre elemanında harcanan güç grafiği.....60
Şekil 75. Katmanlar değiştirildikten sonra elde edilen, yapıya bağlanan devre elemanında harcanan güç.....61
Şekil 76. Optimize edilen çok katmanlı yapının (a) ön yüzü ve (b) arka yüzü.....61
Şekil 77. Çok katmanlı EM dalga hasatlayıcının verimliliği.....62
Şekil 78. Arka katmandaki ayrık halka rezonatörlerin sayısının artırılmış görseli.....63
Şekil 79. Arka katmanda sayısı artırılan rezonatörlerden sonra devre elemanı üzerinde harcanan güç grafiği.....64
Şekil 80. Devre elemanları üzerinde harcanan güç.....65
Şekil 81. Frekansa bağlı verimlilik grafiği.....66

Şekil 82. (a) 0,9 GHz için (b) 1,8 GHz için (c) 2,6 GHz için (d) 5,8 GHz için yüzey akım dağılımları 67
Şekil 83. Tasarım T1'in bükülerek yapılan analizi sonucu elde edilen görsel 68
Şekil 84. Bükülen yapı üzerindeki devre elemanında harcanan güç 69
Şekil 85. Bükülebilir yapıya ait (a) bükülme işleminden önceki hali (b) sonraki hali 70
Şekil 86. Bükülebilir yapıya ait açıya bağlı verimlilikler.....71
Şekil 87. Bükülebilir yapıya ait yüzey akım dağılımları (a) 0,9 GHz için (b) 1,8 GHz için (c) 2,56 GHz için (d) 5,88 GHz için 72
Şekil 88. Tek katmanlı yapılara ait verimliliğin grafiksel gösterimi 74
Şekil 89. Dört bantlı yapılara ait verimliliklerin grafiksel gösterimi 74
Şekil 90. İki katmanlı yapılara ait verimliliklerin grafiksel gösterimi.....75

TABLOLAR

Tablo 1. Tasarım T11'e ait hedef frekanslardaki verimlilik değerleri.....42
Tablo 2. Tasarım T11-2'ye ait hedef frekanslardaki verimlilik değerleri.....45
Tablo 3. Tasarım T11-3'e ait hedef frekanslardaki verimlilik değerleri.....51
Tablo 4. Şekil 42'de yer alan parametrelerin değerleri. 62
Tablo 5. Yapıya ait parametrelerin değerleri 64
Tablo 6. Frekanslara karşılık gelen verimlilik 66
Tablo 7. Geliş açısının değişiminin verimliliğe etkisi 72

ÖZET

Bu proje, tek katmanlı ve çok katmanlı metamalzeme yapılar kullanılarak 0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz GSM ve Wi-Fi bandlarına yönelik AC güç hasadı gerçekleştirilmesini, bükülebilir esnek alttaşların hasatlama verimliliğine etkisinin araştırılmasını kapsamaktadır. Proje sonucunda iyi hasatlama verimliliğine sahip olan tek katmanlı, dört bantlı bir metamalzeme hasatlayıcı üretilerek sayısal hesaplamalarla gerçekleştirilen sonuçların doğruluğu mikrodalga laboratuvar ortamında test edilmiştir.

Proje çalışması; proje öneri formunda hedeflendiği doğrultuda yürütülmüştür. Bu bağlamda, 900 MHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekans bantlarında %75'in üzerinde hasatlama yapabilen tek katmanlı bir metamalzeme hasatlayıcı tasarımı hedefi başarı ile tamamlanmıştır. Çok katmanlı metamalzeme hasatlayıcı olarak iki katmanlı bir hasatlayıcı tasarlanmış olup öngörülen dört frekans bandında yine %75'in üzerinde hasatlama verimi elde edilerek başarı hedefi sağlanmıştır. Bükülebilir alttaşlar ile de elektromanyetik enerji hasadına yönelik çalışmalar da gerçekleştirilmiş olup farklı geliş açıları (0^o-30^o) için verimliliğin en fazla %6 farklılaştığı görülmüştür. Proje süresince tasarlanan metamalzeme tabanlı hasatlayıcı yapıları içerisinde yüksek verime sahip yapı (%79,5 verimlilik) üretilmiştir ve direnç elemanları metamalzeme üzerinde uygun konumlara lehimlenmiştir. Yapının ölçülen soğurma spektrumunda projede belirtilen dört frekans bandında da soğurma gözlenmiştir. Deney sonuçlarının benzetim sonuçlarını doğruladığı görülmüştür. Proje çerçevesinde lisansüstü tez konuları metamalzemeler üzerine odaklanan iki yüksek lisans öğrencisi yetiştirilmiştir. Ayrıca, proje kapsamında yedi adet ulusal kongre bildirisi sunulmuştur. Dört bantlı tek katmanlı metamalzeme hasatlayıcının özellikleri makale formatında hazırlanarak SCI indeksli bir dergiye gönderilmiştir.

Projeye sağladığı maddi destekten dolayı TÜBİTAK ve EEEAG'ye teşekkür ederiz.

Anahtar Kelimeler: Enerji hasadı, metamalzemeler, metamalzeme tabanlı enerji hasadı, elektromanyetik hasatlama.

ABSTRACT

This project involves AC power harvesting at GSM and Wi-Fi bands of 0.9 GHz, 1.8 GHz, 2.6 GHz and 5.8 GHz using monolayer and multilayer metamaterial structures and investigating the effect of bending substrates on harvesting efficiency. As a result of the project, a single-layer, four-band metamaterial harvester with good harvesting efficiency is fabricated and the accuracy of the results performed by numerical calculations is tested in a microwave laboratory.

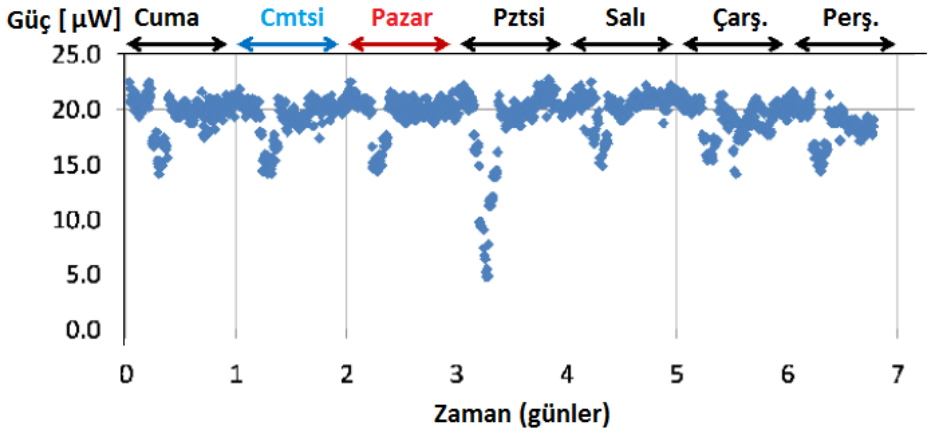
The project is carried out in the direction of the proposal form of the project. In this context, the design of a monolayer metamaterial harvesting structure with more than 75% harvesting efficiency in 900 MHz, 1.8 GHz, 2.6 GHz and 5.8 GHz frequency bands is successfully achieved. As multilayer metamaterial harvester, a dual layer harvesting structure is designed and the goal of obtaining harvesting efficiency over %75 in four frequency bands is achieved. Studies on electromagnetic energy harvesting is also carried out with bendable substrates. For different incident angles (0^o-30^o), the efficiency differs by at most 6%. Within the metamaterial-based harvesting structures designed during the project work, the structure with high harvesting efficiency (79.5% efficiency) is fabricated and resistive elements are soldered to appropriate positions on the metamaterial. In the absorption spectrum of the structure, absorption is observed in the four frequency bands specified in the project. It is found that the measurement results verify the simulation results. In the context of the project, two graduate students are educated whose thesis are focused on metametarials. Moreover, in the scope of the project seven national conference proceedings are presented. The properties of our four-band single layer metamaterial harvester is written as article form and has recently been submitted to a SCI-indexed journal.

We would like to thank to TUBİTAK and EEEAG for their financial support to our project.

Keywords: Energy harvesting, metamaterials, metamaterial based energy harvesting, electromagnetic harvesting.

1. GİRİŞ

Çevre görüntüleme, sağlık uygulamaları, endüstriyel işlemlerin görüntülenmesi ve kontrolü gibi çok çeşitli uygulamalar için yan yana dizilmiş çok sayıda kablosuz algılayıcı modüllerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ağ şeklinde tasarlanan bu modüller düşük güçte çalışan çok sayıda algılayıcıdan oluşmaktadır. Her ne kadar pil teknolojisinde depo edilebilen enerji yoğunluğunu artırmaya yönelik gelişmeler olsa da bu pillerin sınırlı bir ömrü bulunmaktadır. Bu algılayıcıların pillerinin sürekli değiştirilmek zorunda olması kullanımlarını kısıtlamaktadır. Kullanılan atık piller insan sağlığına ve çevreye zarar vermektedir. Kablosuz algılayıcı modülleri, enerji hasatlanması ile enerji ihtiyacını karşılayabilirse daha yüksek verim ile çalışabilecektir. Bu amaçla önerilen güneş enerjili hasatlayıcılar gece-gündüz farkı, atmosferik koşullar gibi etkenlerden ötürü zamana göre kararlı bir hasatlama verimliliği gösterememektedir. RF enerji hasatlama ile kablosuz algılayıcı dizilerinin çalıştırılması bu sebeple etkin bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Bu amaçla gerçekleştirilen bir çalışmada televizyon yayınları 7 gün boyunca rektenna ile toplanarak kablosuz algılayıcı modülleri için gerekli olan enerji sağlanmıştır (Nishimoto vd., 2010). Tokyo'daki bir TV kulesinin 6,6 km ilerisine yerleştirilen 1 kΩ'luk dirençten 7 gün boyunca hasatlanan enerji profili Şekil 1'de verilmiştir (Nishimoto vd., 2010). Bu profilden görüldüğü üzere gece yarısı olduğunda güç azalsa da hasatlanan RF enerji gücü zamanla sabit bir davranış göstermektedir (Nishimoto vd., 2010).



Şekil 1. RF enerji hasatlama için haftanın günlerine yayılan enerji profili.

Bir diğer çalışmada ise Londra'daki 270 adet yer altı metrosunda, bazı sokaklarda ve Imperial College civarında (Londra'da) cep telefonu görüşmelerinin yoğun olduğu 10:00-15:00 saatleri arasında yönden bağımsız anten ve RF analizör ile dijital televizyon, GSM900, GSM1800, 3G ve WiFi bantlarının hasatlanması gerçekleştirilmiştir (Pinuela vd., 2013). Tek bantlı hasatlayıcıların şehir merkezi ve yakınlarında %40'a varan verimlilikle hasatlama yapabildiği ve -25 dBm gibi düşük güçlerden itibaren hasatlamanın gerçekleştiği ortaya konulmuştur (Pinuela vd., 2013).

Cep telefonlarında kullanılan GSM bantları, kablosuz yerel alan ağlarında kullanılan WiFi/WLAN bantları, uydu haberleşmelerinde kullanılan C, X, K_u ve K bantları ve kablosuz algılayıcılarda kullanılan L, S, C ve X bantları ile birlikte elektromanyetik dalgalar çevremizde

oldukça yaygın halde bulunmaktadır. Bu elektromanyetik dalgaların geri kazanılarak DC güce çevrilmesi için geleneksel bir yöntem rektennaların kullanılmasıdır. Rektenna, bir alıcı anten ve doğrultucu devreden oluşmaktadır. Fakat rektennaların antenlerindeki ışıma elemanları yarım dalga boyu ebatlarında olduğundan rektennalar hacimsel olarak küçültülmeye uygun değildir.

Metamalzemelerin gelişimi ile birlikte elektromanyetik enerjinin toplanmasında yeni bir yaklaşım doğmuştur. Metamalzemeler dalga boyu altı periyodik parçacıklardan oluşmakta olup yapay olarak istenilen elektriksel (ε_r) ve manyetik geçirgenlik (μ_r) değeri kazandırılabilen malzemelerdir. Çok çeşitli uygulamalarının yanında üstün bir elektromanyetik hasatlayıcı olarak son yıllarda metamalzeme tabanlı hasatlayıcılar ile yapılan çalışmalar öne çıkmaktadır. Metamalzemelerdeki periyodik elemanların boyutları çoğunlukla dalga boyunun 1/4'ü ile 1/14'ü arasında değişmektedir. Bu sebeple metamalzeme tabanlı hasatlayıcılar rektennalara göre daha küçük ebatlarda tasarlanabilmektedir. Ayrıca, enerji toplayıcı birim hücreler diziler şeklinde periyodik yapıda tasarlandığından daha yüksek miktarlarda elektromanyetik güç depo edilebilmektedir.

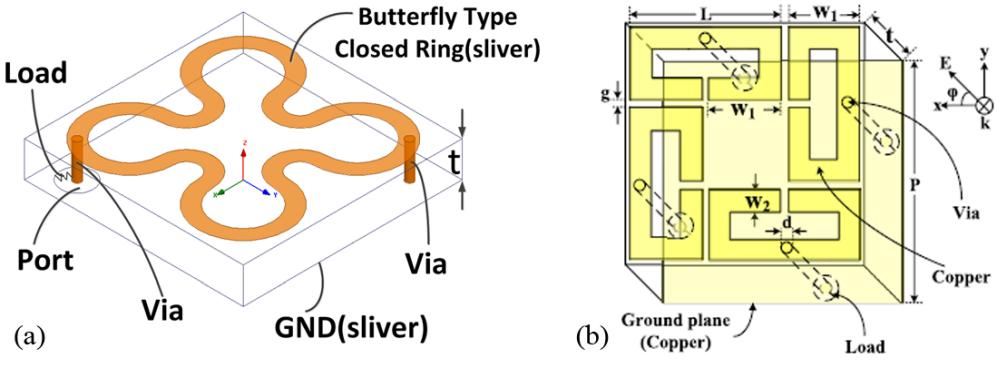
Bu proje çalışması çerçevesinde dört bantlı metamalzeme tabanlı hasatlayıcı iki nihai yapı tasarlanmıştır. Yapılardan biri çok katmanlı olup arkadaki alttaşta 2,6 ve 5,8 GHz frekansları, öndeki alttaşta ise 0,9 ve 1,8 GHz frekansları için enerji hasatlaması gerçekleştirilmiştir. Dik doğrultuda gelen dalgalar altında 0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekansları için hasatlama verimlilikleri sırası ile %82,3, %82,8, %74,6 ve %83,6 olarak hesaplanmıştır. Ortalama verimlilik %80,85 olduğundan projemizin başarı ölçütlerinden biri olan çok katmanlı yapılarda en az %75 hasatlama verimliliği hedefine başarı ile ulaşılmıştır. Çok bantlı geliştirilen bir yapının bükülmeye karşı verimliklerindeki değişimler incelenmiş ve 20^o'lik bükülmede, geliş açısı 0^o'den 30^o'ye kadar değiştiğinde verimliliğin en fazla %6 fark ettiği tespit edilmiştir. Dört bantlı yüksek hasatlama verimliliğine sahip diğer bir metamalzeme tabanlı yapı tek katmanlı olup projede belirtilen 0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekanslarında ortalama olarak %79,5 verim ile elektromanyetik hasatlama yapmaktadır. Dolayısı ile öngörülen frekanslarda tek katmanlı yapı için de en az %75 verimlilik hedefine başarı ile ulaşılmıştır. Bu metamalzeme yapısı fotolitografi ile üretilerek yansıma katsayısı spektrumu ölçümleri alınmıştır. Soğurma spektrumunun benzetim sonuçları ile tutarlı olduğu gösterilmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Metamalzeme yapılarda elektromanyetik dalgaların yansıma olmadan yük elemanı üzerinden toplanabilmesi için boş uzayın empedansı ile aynı olacak biçimde metamalzemenin elektriksel geçirgenlik (ε_r) ve manyetik geçirgenlik (μ_r) değerlerinin ayarlanması gerekmektedir. Bu durum metamalzeme soğuruculardada aynı olsa da, elektromanyetik enerji metamalzeme soğuruculardada dielektrik alttaş tarafından, metamalzeme tabanlı hasatlayıcılarda ise rezistif yük elemanları tarafından soğurulmaktadır. İlk defa 2012 senesinde elektromanyetik hasatlama için bir metamalzeme yapısı önerilmiştir (Ramahi vd.,

2012). Bu yapı ayrık halka rezonatörlerden (AHR'den) oluşmaktadır (Ramahi vd., 2012). Nümerik hesaplamalarda AHR'de 2,3 kΩ'luk direnç olduğunda maksimum güç aktarımı gerçekleştiği gösterilmiştir (Ramahi vd., 2012). Sonrasında elektrik indüktif-kapasitif (*ELC*) rezonatör (Almoneef vd., 2015) ve tümleyici AHR (Alavikia vd., 2014; Alavikia vd., 2015) ile elektromanyetik dalgaların AC güç olarak en yüksek verimlilikle hasatlanması çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Birim hücrede 50 Ω'luk dirençler yüklü dört adet omega halka rezonatör kullanılarak 5,8 GHz frekansında kutupluluktan bağımsız AC güç hasatlama yapılmıştır (Shang vd., 2017). Dik doğrultuda gönderilen dalgalar için benzetim sonuçlarına göre en yüksek %93,1, ölçüm sonuçlarına göre ise %90 verimlilikte hasatlama başarılmıştır (Shang vd., 2017). 2018 senesinin eylül ayında yayımlanan bir çalışmada ise ayrık kesik tel ve halka silindirli üç boyutlu bir metamalzeme yapısı ile 2,45 GHz'de deneysel olarak en yüksek %97,3 verimde hasatlama yapılabildiği gösterilmiştir (Duan vd., 2018). Literatür incelendiğinde metamalzeme tabanlı bu hasatlayıcı yapılarının çoğunlukla tek bir bantta hasatlama işlemini gerçekleştirdiği göze çarpmaktadır.

Birden çok bantta hasatlama gerçekleştiren metamalzeme tabanlı çalışmalar içerisinde literatürde en fazla üç bantta hasatlama yapabilen metamalzeme çalışmaları bulunmaktadır (Zhang vd., 2017; Zhong vd., 2016). Şekil 2(a)'da gösterilen, Zhang vd. (2017) tarafından tasarlanan hasatlayıcının birim hücresinde hücre merkezi etrafında dönme simetrisine sahip kapalı halka bir rezonatör bulunmaktadır. Üstteki rezonatör metal iki tel (via) ile toprak düzlemine bağlanmıştır. Toprak düzlemine giden tellerden biri ile toprak düzlemi arasına 277,6 Ω'luk bir direnç bağlanarak AC güç hasatlama bu direnç üzerinden yapılmıştır (Zhang vd., 2017). Metal teller yüzey akımının yolunu artırarak frekansın azalmasına, dolayısıyla yapıda minyatürleşmeye izin vermektedir. Fakat periyodik tellerden oluşan bir metamalzeme hasatlayıcının üretimi zorlu olacaktır. Örneğin böyle bir yapının küçük ve çok sayıda algılayıcılardan oluşan bir ağda kullanımı pratik değildir. Zhong vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada kullanılan üç bantlı metamalzeme tabanlı hasatlayıcı yapısının birim hücresi ise Şekil 2(b)'de gösterilmiştir. Birim hücresinde dönen merkezi simetride dört adet AHR rezonatör ve 240 Ω'luk dört dirençten oluşan bu metamalzeme yapısında 1,75 GHz, 3,8 GHz ve 5,4 GHz frekanslarında (GSM 1800, WiMAX ve WLAN bantları) sırasıyla %30, %90 ve %74 oranlarında hasatlama verimliliği elde edilmiştir.



Şekil 2. Üç bantta elektromanyetik hasatlama yapan (a) kapalı halka rezonatörlü (Zhang vd., 2017) ve (b) ayrık halka rezonatörlü (Zhong vd., 2016) metamalzeme yapıları.

Genel olarak literatürdeki çalışmalar tek bantta hasatlama yapabilen yapılar üzerine temellenmektedir. Öte yandan, çok bantlı yapılar için çalışmalar gerçekleştirilmiş olsa da en çok 3 banda kadar hasatlama yapılmış ve bu hasatlama yöntemlerinde vialar (metalik teller) kullanıldığından yapının üretiminin zaman ve maliyet bakımından nispeten zorlaştığı görülmüştür. Bu proje kapsamında yukarıda bazılarından söz ettiğimiz literatür çalışmalarından farklı olarak çok bantta viasız bir tasarım geliştirilmiştir. Ayrıca, ilk defa hasatlanan bant sayısı dörde çıkarılmıştır. Elde edilen sayısal çalışmalar bu hasatlamanın dört bantta ortalama verimin %80 civarında olduğunu göstermiştir. Tüm bu sözü edilen çalışmalara ek olarak da yapıların çok katmanlı ve bükülebilir olmasının etkileri araştırılmıştır.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Projenin amaçları doğrultusunda aşağıda listelenen araçlar kullanılmıştır:

CST Microwave Studio Paket Programı: Bu benzetim programı, metamalzemelerin saçılma parametrelerini ve metamalzeme üzerine entegre edilen direnç elemanında, alttaşta ve metalik elemanlarda ne kadar elektromanyetik güç birikimi olduğunu hesaplamaya olanak vermektedir. Bu program sonlu integrasyon yöntemi üzerine temellenen tam dalga bir elektromanyetik çözüm sunmaktadır. Proje kapsamında üretilen yapıların sayısal çözümlemesi bu yöntem üzerine temellenmiştir.

HFSS Ansoft Paket Programı: Yapıların benzetim sonuçlarının test edilmesi için bu paket programdan da faydalanılmaya çalışılmıştır. Bu paket program sonlu elemanlar yöntemi hesaplama tekniğini kullanmaktadır. Bu proje kapsamında HFSS paket programından CST Microwave Studio programı ile elde edilen sonuçların karşılaştırılarak doğrulanması amacı ile yararlanılmıştır.

Horn Antenler: 0,8 GHz-18 GHz frekans aralığında çalışan Rohde Schwarz HF 907 model alıcı ve verici iki adet dalga kılavuzu tipinde horn antenlerdir. Yansıma parametresi ölçümlerinde metamalzemeye elektromanyetik dalgayı göndermek ve yansıyan dalgaları toplamak için kullanılmıştır.

Vektör Network Analizör: 9 kHz ile 13,6 GHz frekans aralığında çalışan Rohde Schwarz ZVL-13 model network analizörüdür. Yansıma parametresini ölçmek için kullanılmıştır.

Yarı-yankısız ölçüm düzeneği: Ölçüm ortamı TDK mikrodalga IS-012A modelinde 32 adet 60 cmx60 cm ebatlarında soğurucular ile çevrilerek yarı-yankısız bir odacık oluşturulmuştur.

Projenin ilk iş paketi (literatür araştırması) TÜBITAK'dan gelen talep üzerine iptal edilmiştir. Proje kapsamında polimid alttaşlar ile yapılan tasarımların hasatlama verimlilikleri başarısız sonuçlandığından, hem benzetim hem de deneysel çalışmalar proje önerisinde Risk

Yönetimi tablosunda B planında verildiği gibi teflon alttaşlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Projenin ikinci iş paketi kapsamında tek katmanlı yapılar tasarlanmıştır. Bu yapılar ile ilgili sonuçlar hasatlama bant sayılarına göre aşağıda "Tek Bantlı, İki Bantlı ve Dört Bantlı Elektromanyetik Enerji Hasatlama" olarak başlıklandırılan ilgili bölümler altında verilmiştir. Dört bantlı ve tek katmanlı hedeflenen optimum özelliklerdeki yapının elde edilmesi için öncelikle daha az bantta hasatlama yapan yapılarla çalışılmaya başlanmıştır. Bant sayısı dörde kademeli arttırılarak (1, 2, ve 4 bantlı) metamalzeme tabanlı hasatlayıcı yapılar geliştirilmiştir. Bu doğrultuda ilerleyen çalışmalarımızda projenin en çok zaman alan aşamasını hasatlama verimliliğinin geliştirilmesi oluşturmuştur. Ortalama verimliliği %75'in üzerine çıkacak yapının tasarlanmasında öngörülemeyen problemler ortaya çıkmıştır ve proje takvimindeki ek sürenin (3 aylık) ana nedeni olmuştur.

Projenin üçüncü iş paketi kapsamında çok katmanlı yapılar tasarlanmıştır. Bu çalışmalar "4.4. Çok Katmanlı Elektromanyetik Enerji Hasatlama" başlığı ile verilmiştir. Ön katmanda ve arka katmanda bulunan rezonatörlerin hangi katmanda bulunursa daha verimli bir hasatlamanın yapılabileceği konusunda analizleri yapılmıştır. Her bir rezonatör için tek tek katmanlardan oluşan bir yapı tasarlamak yerine bir katmanda iki rezonatör kullanılarak yapı hacminde nispeten küçültme sağlanmıştır. Her katmanda elektromanyetik dalga şiddetinin zayıflaması nedeniyle oluşacak kaybın önlenmesi için katman sayısı iki ile sınırlandırılmıştır.

Projenin dördüncü iş paketi kapsamında bükülebilir yapıların tasarımı çalışılmıştır. Bu çalışmalar aşağıda "4.5. Bükülebilir Metamalzeme Tabanlı Elektromanyetik Enerji Hasatlama" başlıklı bölümde verilmiştir. Bükülebilir yapıların analizi için projenin bu aşamasına kadar elde edilen hasatlama verimliliği yeterince yüksek bir yapı ele alınmıştır.

Bu proje kapsamında şimdiye kadar gerçekleştirilen çalışmalar tek bantta hasatlama, iki bantta hasatlama ve dört bantta hasatlama olarak altta başlıklar içerisinde sunulmuştur. Sonuç olarak, tek katmanlı 0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekanslarda yaklaşık ortalama %80 verimlilik mertebesinde çalışabilen metamalzeme tabanlı bir hasatlayıcı tasarımı başarıyla geliştirilmiştir. Hem tek katmanlı hem de dört ayrı frekans bandında hasatlama yapabilen bir çalışmaya henüz literatürde rastlanmamıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Tek Bantlı Metamalzeme Tabanlı Elektromanyetik Enerji Hasatlama

4.1.1 Tasarım T1

Bu çalışma kapsamında sayısal yöntemler kullanılarak baskı devrelerde sıkça kullanılan FR-4 alttaş üzerinde 5,8 GHz frekans bandında elektromanyetik hasatlama yapabilen bir metamalzeme yapısı tasarlanmıştır. Metamalzeme 1,6 mm kalınlıkta arka yüzü tamamen bakır kaplı FR-4 alttaş üzerinde periyodik dizili elektrik-*LC* rezonatörlerden oluşmaktadır.

Birim hücresi 15 mm'dir. Metamalzeme gönderilen dalganın elektrik alan vektörü ayrık kısıma paralel olacak şekilde karşıdan uyarılmaktadır. Metamalzemenin birim hücresi Şekil 1.a'da geometrik değerleri ile birlikte gösterilmiştir. Arka toprak düzlemi ile üst düzlem arasında, direnç elemanının 1 mm altında alttaşı delen 0,5 mm yarıçapında bir bakır tel (*via*) kullanılmıştır. Bu bakır tel aracılığıyla arka düzlemde ters yönde indüklenen yüzey akımları ön düzlemdeki devre elemanınca toplanmıştır. Tasarımda tam-dalga bir elektromanyetik benzetim programı olan CST Microwave Studio kullanılmıştır.

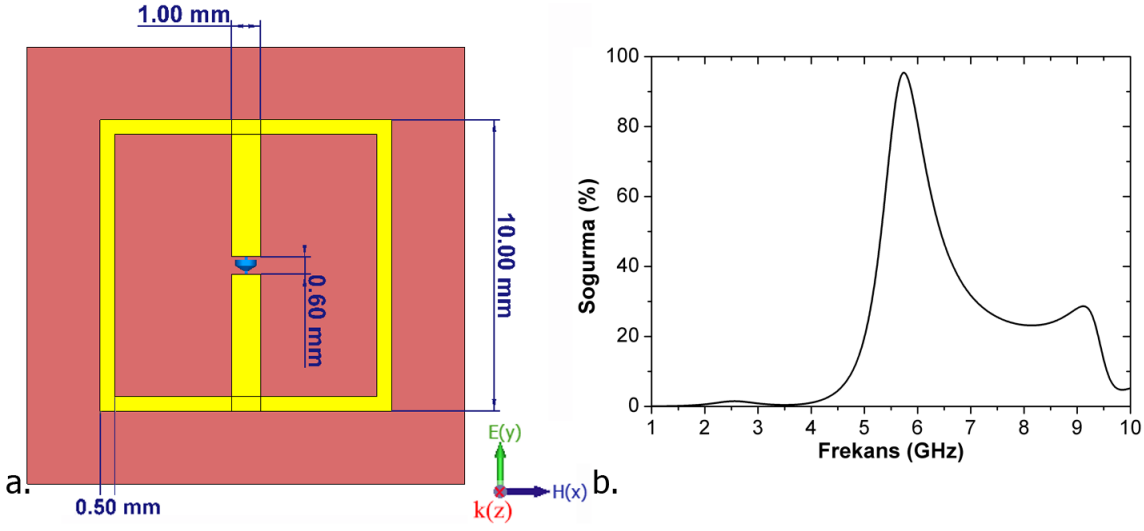
Metamalzemenin arka düzlemi tamamen bakır ile kaplı olduğundan elektromanyetik dalgaların arka tarafa sızması neredeyse imkansızdır. Bu sebeple iletim sıfırlanmakta ve soğurmanın büyüklüğü, *A* eşitlik (1)'e göre hesaplanmaktadır. Burada *R*, yansımanın büyüklüğünü, f ise frekansı göstermektedir:

$$A(\omega) = 1 - (R(f) + T(f)) \qquad (1)$$

Metamalzeme tabanlı hasatlayıcı 5,75 GHz'de en yüksek %95 oranında soğurma göstermektedir. %50 soğurmanın olduğu bant genişliği 1,1 GHz'dir.
CST Microwave Studio benzetim programı standart olarak metamalzeme üzerine 0,5 W güçte elektromanyetik dalga göndermektedir. Hasatlama verimliliği alttaki eşitliğe göre hesaplanmaktadır.

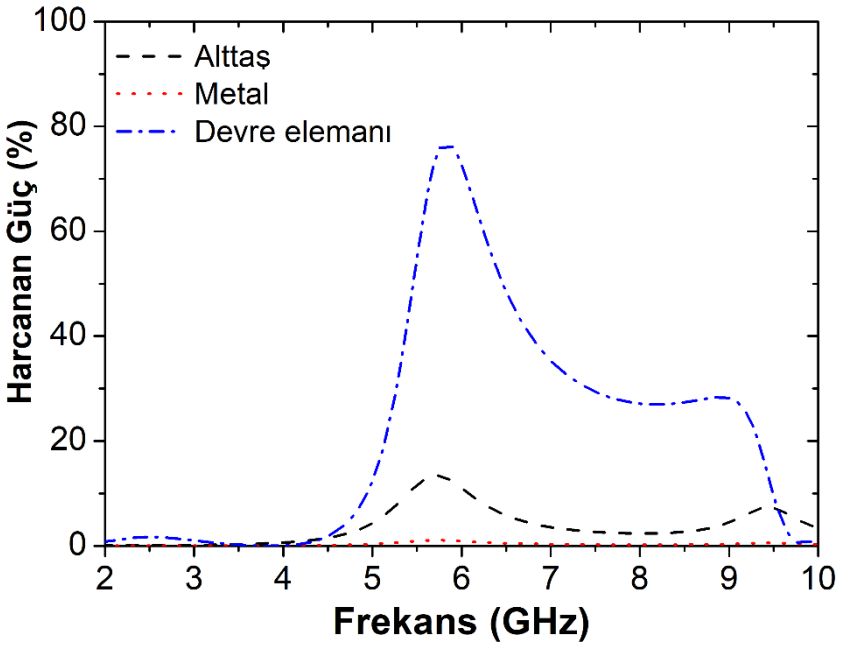
$$\eta(f) = \frac{P_{direnç}(f)}{P_{gelen}(f)} \qquad (2)$$

Burada $P_{direnç}$ direnç üzerinde depo edilen gücü, P_{gelen} ise gönderilen dalganın gücünü göstermektedir.



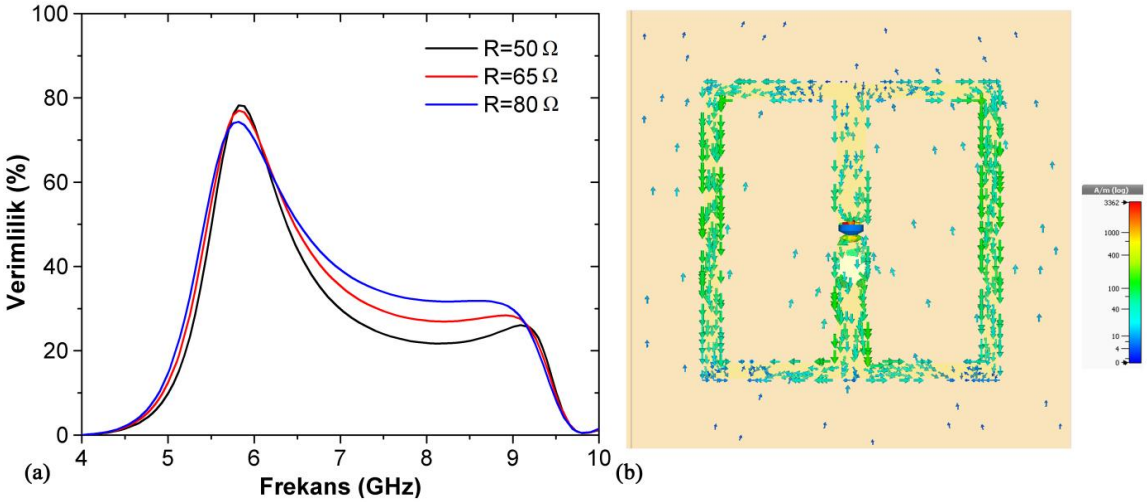
Şekil 3.(a) Tasarlanan metamalzeme tabanlı hasatlayıcının birim hücresi ve (b) soğurma eğrisi.

Metamalzemenin alttaşında (FR-4 plaka), bakır elemanlarda ve direnç elemanında soğurulan elektromanyetik dalga gücünün yüzde olarak değeri eşitlik (2)'e göre hesaplanmış ve grafik olarak Şekil 4'de sunulmuştur. Gönderilen dalganın gücünün %91'i metamalzeme tarafından soğurulmakta olup bu enerjinin %13'ü FR-4 dielektrik alttaşta, %1 kadarı ise bakır metallerde ısı olarak kaybolmaktadır. Gücün arta kalan %77'si, değeri optimize edilmiş 65 Ω'luk direnç tarafından AC güç olarak depo edilmektedir.



Şekil 4. Alttaş, metal ve direnç üzerinde biriken elektromanyetik güç (yüzdesel).

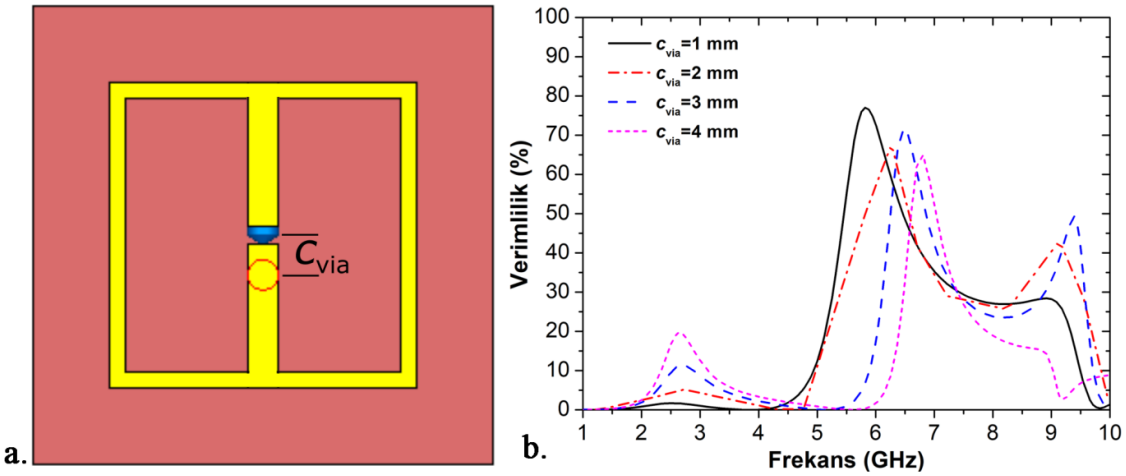
Farklı direnç değerleri için hasatlama verimlilik eğrisi Şekil 5(a)'da gösterilmiştir. Direnç değeri 80 Ω'dan 50 Ω'a azaldıkça %50 verimliliğe sahip bant genişliği azalmakta, fakat 5,8 GHz'deki maksimum verimlilik %74,3'den %78,2'ye çıkmaktadır. Bu çalışmada ara değer olan 65 Ω direnç değeri kullanılmıştır. 5,8 GHz rezonans frekansta yüzey akım yoğunluğu Şekil 5.b'de gösterilmiştir.



Şekil 5. (a) Farklı direnç değerleri için hasatlama verimliliği, (b) 5,8 GHz frekansında yüzey akım yoğunluğu.

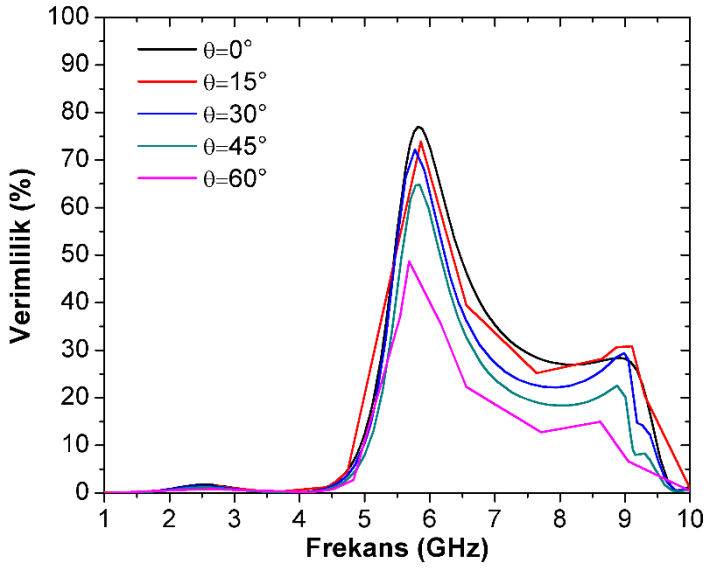
FR-4 alttaşın üst ve alt düzlemlerini birleştiren via'nın konumunun etkisini belirlemek için direncin konulduğu aralık kısmın orta noktasından 1, 2,3 ve 4 mm öteye via konulmuştur. Via

konumu Şekil 6.a'da, via konumuna bağlı hasatlama verimliliği eğrileri Şekil 6.b'de österilmiştir. Via konumu dirençten uzaklaştıkça bantta daralma ve frekansta artış gözlenmiştir. Dolayısıyla via'nın dirence yakın olduğu 1 mm değeri en uygun konum olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6. (a) Via konumu, (b) farklı via konumlarında hasatlama verimliliği.

Hasatlama verimliliğinin farklı geliş açıları için değişimi Şekil 7'de verilmiştir. 0° geliş açısında verimlilik %77 iken geliş açısı 15°, 30°,45° ve 60° olduğunda verimlilik sırasıyla %74, %72, %65 ve %49 olarak değişmektedir.



Şekil 7. Farklı geliş açıları altında hasatlama verimliliği.

Bu çalışmada 5,8 GHz ISM bandında %77 oranında hasatlama yapabilen bir metamalzeme nümerik yöntemler ile tasarlanmıştır. En yüksek hasatlama verimliliği için uygun direnç değeri 65Ω olarak tespit edilmiştir. Via konumu dirençten uzaklaştıkça bantta daralma ve frekansta maviye kayma gözlenmiştir. Metamalzeme tabanlı elektromanyetik hasatlayıcıya gelen elektromanyetik dalgaların geliş açısı arttıkça en yüksek hasatlama verimliliği değeri azalmaktadır. 30°'ya kadar geliş açıları için verimlilik %70'in üzerindedir. Çalışmanın devamında metamalzeme hasatlayıcı örneği üretilerek soğurma ve verimlilik değerleri

Ankara Üniversitesi Mikrodalga Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan horn antenler ve ağ analizörü aracılığıyla ölçülecektir. Benzetim sonuçlarının doğruluğu sınanacaktır.

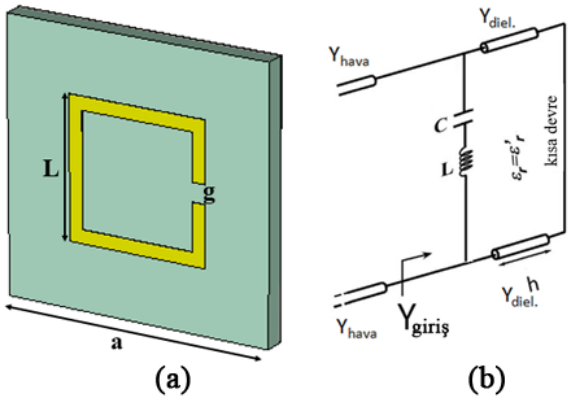
Metamalzemelerin elektromanyetik tepkisini analiz etmek için zamanda sonlu farklar yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi, momentler yöntemi gibi çok farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler ile hesaplamalar doğruya çok yakın sonuçlar verse de simülasyonlar uzun zaman almaktadır ve yapının ardındaki fiziksel olayların tartışılmasına nispeten daha az izin vermektedir. Eşdeğer devre modellerinin kullanılması fiziksel mekanizma hakkında bilgi vermesi ve sonucun kısa sürede alınması bakımından oldukça avantajlıdır (Xu vd., 2012; Costa vd., 2009; Pong vd, 2013). Kare halka rezonatör gibi basit rezonatör yapıları için impedans/admitans değerlerinin hesaplanabileceği analitik formüller mevcuttur.

Bir metamalzeme tabanlı hasatlayıcı tasarlamanın ilk aşaması istenilen frekansta S_{11} yansıma rezonansı verebilecek metamalzeme tabanlı bir soğurucu tasarlanmasıdır. Fakat, metamalzeme soğuruculardan farklı olarak soğurma metamalzemenin alttaşından değil, devre elemanından gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla ilk aşama olarak devre elemanı olmadan metamalzemeyi oluşturan rezonatörlerin yapısal parametrelerinin istenilen frekansta rezonans verecek şekilde tasarlanması gerekmektedir.

Metamalzeme tabanlı hasatlayıcıların genellikle arka düzlemi tamamen bakır kaplı toprak düzlemi olmaktadır. Bu sayede iletim neredeyse sıfır olmaktadır.

Periyodik yapı, kenarları periyodik sınır koşullarına sahip bir dalga kılavuzu içerisindeymiş gibi düşünülebilir. Metamalzeme hasatlayıcılarda eşdeğer devre kullanımını göstermek amacıyla Şekil 6'da gösterilen tek halkadan oluşan bir ayrık halka rezonatör (AHR) yapısı ele alınmıştır. Elektromanyetik dalga AHR'deki açıklığa paralel elektrik alan vektörü olacak şekilde karşıdan gönderilmiştir.

Bu AHR arka düzlemi bakır olan Rogers RT Duroid/5880 alttaşın üzerindedir. AHR seri bağlı bir *LC* devresi ile temsil edilmiştir. Dielektrik alttaş Y_{diel} admittansı ile, alttaşın önündeki hava tabakası Y_{hava} admittansı ile gösterilmiştir. Toprak düzleminden iletim olmayacağından Y_{diel} admittansı kısa devre ile sonlandırılmıştır. Tüm yapının eşdeğer devresi Şekil 8(b)'de gösterilmiştir. Birim hücre parametresi olan a=20 mm, L=10,4 mm ve g=1,4 mm olarak seçilmiştir. AHR rezonatörün genişliği ise 1 mm'dir.



Şekil 8. (a) Arka düzlemi tamamen bakır kaplı alttaş üzerinde AHR yapısı ve (b) karşı gelen devresi.

Seri bağlı bir *LC* devresinin admittansı eşitlik (3) ile verilmektedir:

$$Y_{AHR} = -\frac{\omega C}{(\omega^2 \mathrm{LC}-1)}\, j = -\frac{\omega C}{\left(\frac{\omega}{\omega_{res}}\right)^2 - 1}\, j \qquad (3)$$

Toprak düzlemi ile sonlandırılmış dielektrik alttaşın admittansı ise, ε alttaşın dielektrik sabiti, η havanın impedansı olmak üzere, eşitlik (4) ile verilmektedir:

$$Y_{diel.} = -\frac{\sqrt{\varepsilon}}{\eta}\cot(\beta \mathrm{h})\, j \qquad (4)$$

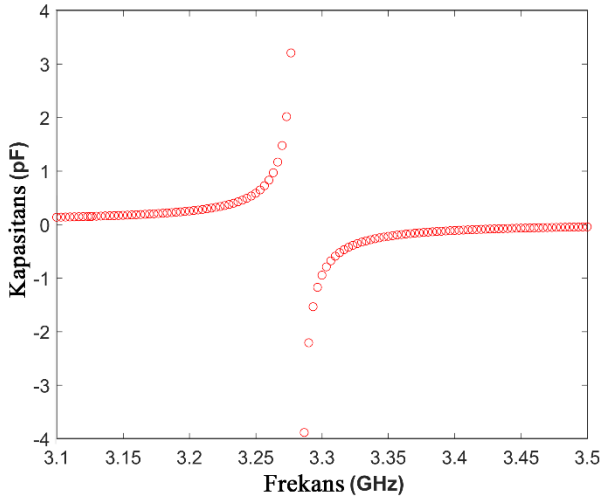
Toplam admittans bu iki admitansın toplamıdır ve Şekil 6(b)'de gösterilen giriş admitansını oluşturmaktadır. Yansıma parametresi kompleks bir nicelik olup eşitlik (5) ile hesaplanmaktadır:

$$S_{11} = \frac{Y_{hava} - Y_{giriş}}{Y_{hava} + Y_{giriş}} \qquad (5)$$

Bu S_{11} parametresinin büyüklüğü eşitlik (6)'den bulunabilir:

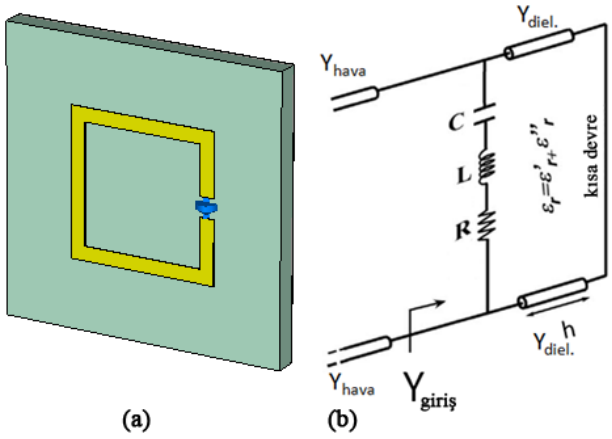
$$\left|S_{11}\right| = \sqrt{S_{11}.S_{11}^*} \qquad (6)$$

Direnç elemanı yokken CST Microwave Studio'dan hesaplanan S_{11} değerleri yukarıdaki eşitliklerde yerine konularak ayrık halka rezonatörün kapasitansı ve indüktansı bulunmuştur. Ayrık halka rezonatörün kapasitansının bulunması için öncelikle kapasitansın frekansa bağlı grafiği çizdirilmiştir. Bu grafik Şekil 9'da gösterilmiştir. Sonrasında fazın sıfır olduğu metamalzemenin frekansındaki kapasitans değeri not edilmiştir. Bu değer 0,35 pF'dır. Rezonans frekans bilgisi bilindiğinden indüktans değeri de 4,92 nH olarak bulunmuştur.



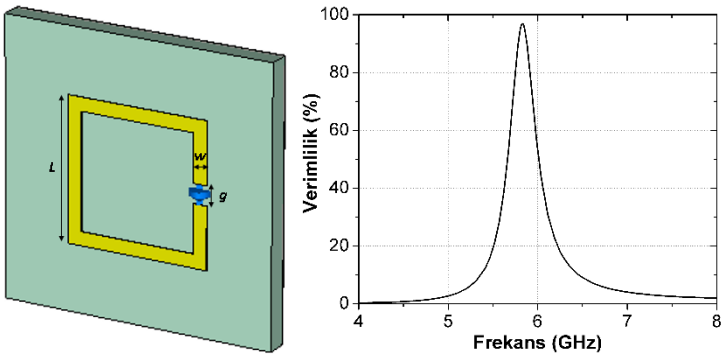
Şekil 9. AHR rezonatörlü metamalzemenin kapasitans değerinin frekans ile değişimi.

AHR rezonatördeki ayrık bölgeye bir direnç eklendiğinde metamalzemenin şekli Şekil 10(a)'da, bu yapının eşdeğer devresi ise Şekil 10(b)'de gösterilmiştir. Rogers RT/Duroid 5880 alttaşın kayıp tanjantı 0,0009'dur. Direnç eklendiğinde metalik rezonatör, direnç elemanı ve alttaştan ötürü metamalzemede kayıp oluşmaktadır. En verimli hasatlama için dielektrik kayıbı en aza indirerek dirençte oluşan güç depolamasını artırmak gereklidir.



Şekil 10. (a) AHR açıklığına direnç elemanı yerleştirilmiş metamalzeme tabanlı hasatlayıcının birim hücresi, (b) tasarlanan birim hücreye karşı gelen eşdeğer devre.

Şekil 11(a)'da gösterilen yapıda AHR açıklığına 10 ohm'luk direnç bağlandığında en iyi hasatlama verimliliği elde edilmiştir. Hasatlama verimliliği %96 oranında olup Şekil 11(b)'de gösterilmiştir.



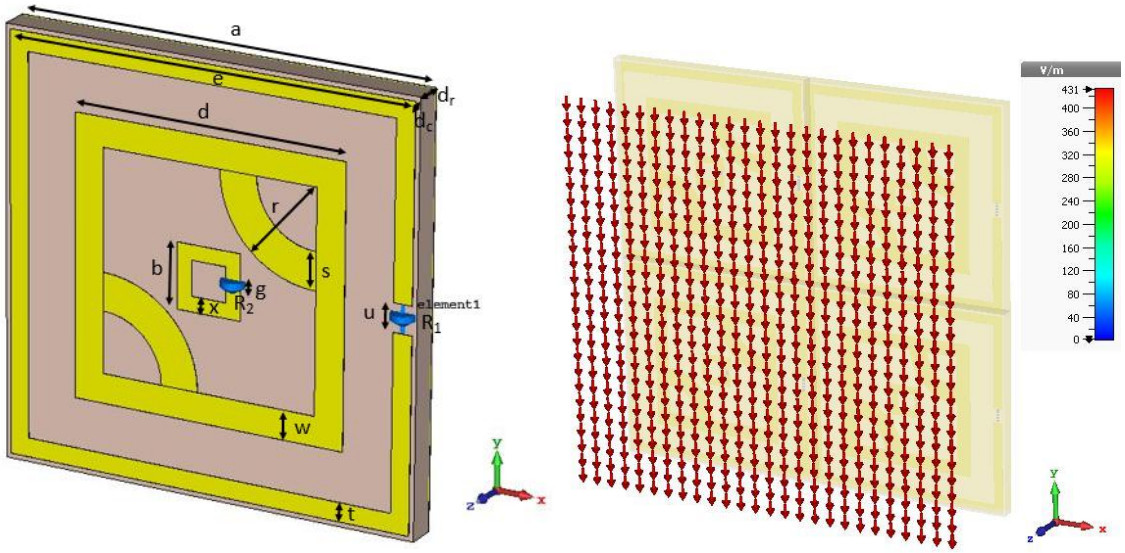
Şekil 11. (a) Örnek metamalzeme tabanlı hasatlayıcı ve (b) hasatlama verimliliği.

L uzunluğu artırılırsa indüktans artacağından rezonans frekans azalmaktadır. *w* genişliğinin artması ise indüktansı azaltarak rezonans frekansı artırmaktadır. *g* açıklığının azalması ise kapasitansı artırarak rezonans frekansı azaltmaktadır

4.2 İki Bantlı Elektromanyetik Enerji Hasatlama

4.2.1 Tasarım T2

CST Microwave Studio paket programında yapının üzerine düşen toplam güç 0,5 W'dır. İlk önce Şekil 10'da görüldüğü gibi 0,9 GHz ve 5,8 GHz için tasarlanan ayrık halka rezonatörlerin ayrık kısmına dirençler eklenmiştir.



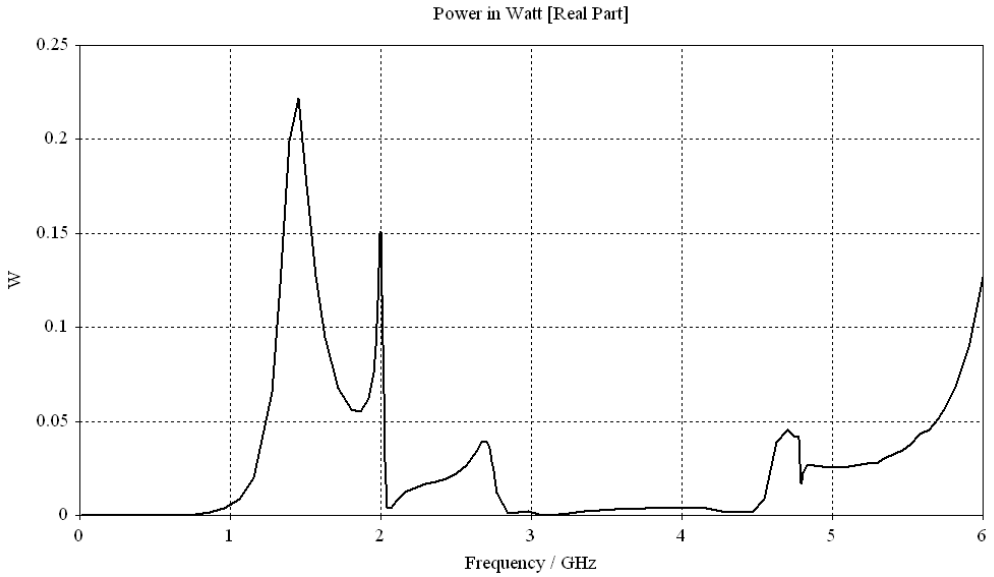
(a) (b)

Şekil 12. (a) 0,9 GHz ve 5,8 GHz frekanslarında hasatlama işlemi için yapıya dahil edilen dirençler ile birlikte birim hücre görüntüsü ve (b) gönderilen dalganın elektrik alan yönelimi.

Şekil 12.a'da görülen a parametresi birim hücrenin boyutunu, e en dıştaki ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğunu, t genişliğini, u ise ayrığın uzunluğunu, d kare halka rezonatörün boyutunu, w kare halka rezonatörün genişliğini, r dairesel halka rezonatörün yarıçapını, s dairesel halka rezonatörün genişliğini, b içteki ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğunu, x genişliğini, g ise ayrığın uzunluğunu, d_r dielektrik alttaşın kalınlığını, d_c iletkenlerin kalınlığını, R_1 ve R_2 ise sırasıyla 0.9 GHz ve 5.8 GHz'teki hasatlama işlemi için yapıya entegre edilen dirençleri temsil etmektedir. Söz konusu parametreler sırasıyla 45 mm, 44mm, 2mm, 3mm, 29.5 mm, 3.1 mm, 10.5 mm, 4 mm, 6.9 mm, 1.6 mm, 0.8 mm, 3.21 mm, 0.035 mm'dir ve yapıya entegre edilen dirençlerin değerleri ise sırasıyla 50 ve 150 Ω değerindedir.

Şekil 12.a'da görülen tasarıma dirençler eklendikten sonra elektromagnetik dalga hasatlayıcıyı istenilen frekanslarda çalıştırmak için yapının parametrelerinde ve birim hücrenin boyutunda değişiklik yapılmıştır. Ancak yapılan parametrik analizler sonucu elde edilen son sonuçlar Şekil 13'de görüldüğü gibidir. Hem yapıdan 0,9 GHz'de tepki alınamamış, hem de 5,8 GHz civarında yapıya bağlanan devre elemanından istenilen verim alınamamıştır. Yapı tasarlanırken 0,9 GHz ve 5,8 GHz için yapının ön kısmına bağlanacak

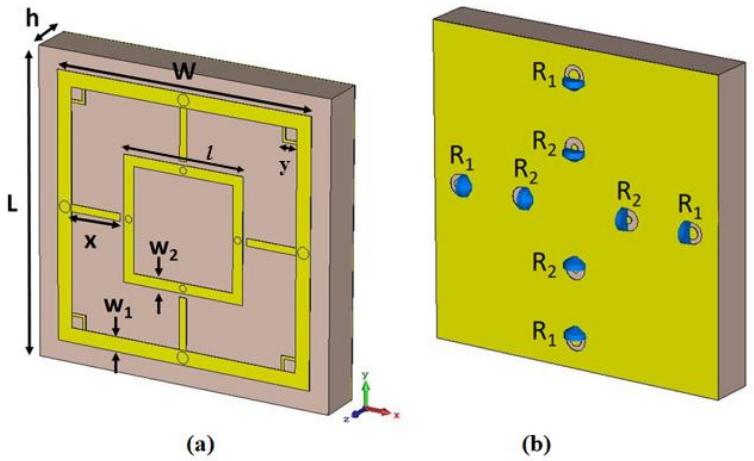
devre elemanları üzerinden, 1,8 GHz ve 2,6 GHz frekansları için ise via yardımı ile yapının arka yüzeyine iletilen akımın bu yüzeye bağlanacak devre elemanları üzerinden harcanan gücün belirlenmesi hedeflenmiştir. Ancak 0,9 GHz ve 5,8 GHz frekanslarında istenilen değerler elde edilemediğinden ikinci aşamaya geçilememiştir. Yapının ön yüzüne bağlanan devre elemanlarının yapının söz konusu frekanslardaki tepkisini çok değiştirmesi ve metalik yüzeylerin rezonans sırasında birbirlerini çok fazla etkilemeleri nedeniyle Şekil 13'de görüldüğü gibi istenilen frekanslarda tepki alınamamıştır. Yapı sözü edilen nedenlerden dolayı sadece 2 bantta hasatlama tasarımı olarak kalmıştır.



Şekil 13. Ön yüzeyine direnç bağlanan Şekil 10'daki yapıda dirençler üzerinden harcanan güç.

4.2.2 Tasarım T3

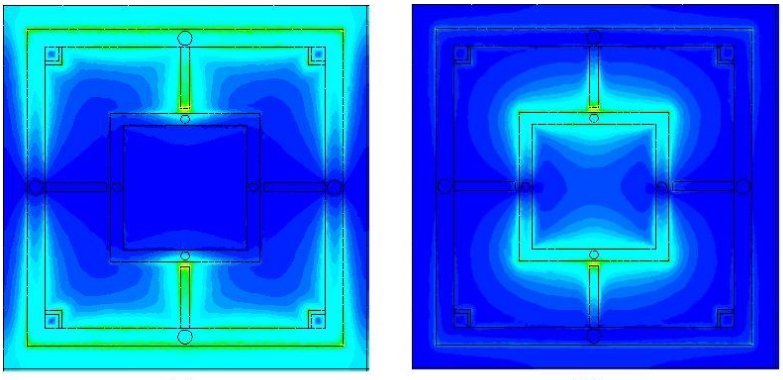
Bu çalışmada 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekans bantlarında TE ve TM modlarında %95 verimlilikte hasatlama gerçekleştirebilen metamalzeme tasarımı önerilmiştir. Tasarımda CST Microwave Studio kullanılmıştır. Metamalzemenin birim hücresi iç içe geçmiş iki adet kare halka rezonatörden oluşmaktadır. Hasatlayıcı, dielektrik sabiti 2,2 olan Rogers Duroid RT5880 alttaş üzerine tasarlanmıştır. Alttaş kalınlığı 3 mm olup malzemenin kayıp tanjantı 0,0022'dir. Metamalzemenin arka yüzeyi gelen elektromanyetik dalganın arkaya iletimini tamamen durdurmak için bakır toprak düzlemiyle kaplanmıştır. Önde ve toprak düzlemindeki bakır kalınlığı 0,035 mm'dir. Şekil 14'de tasarlanan metamalzemenin birim hücresi yapı parametreleri ile birlikte verilmiştir.



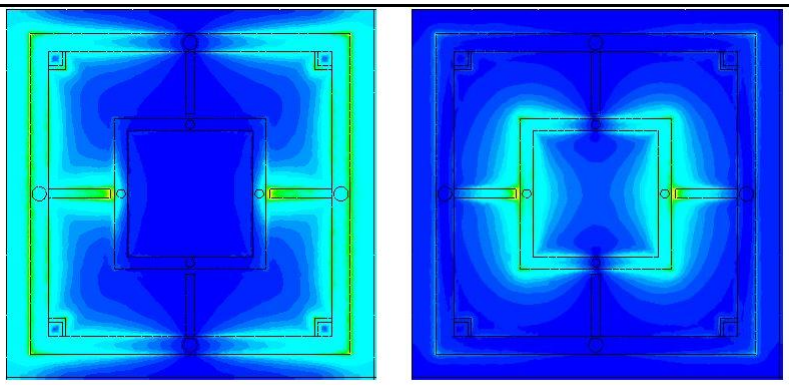
Şekil 14. Tasarlanan metamalzeme yapısının önden (solda) ve arkadan (sağda) görüntüsü.

Bu metamalzeme yapısında birim hücre sabiti (L) 20,7 mm, dıştaki kare halka rezonatörün boyu (w) 18 mm ve genişliği (w_1) 1 mm, x uzunluğu 3,5 mm, içteki kare halka rezonatörün (*l*) uzunluğu 8,48 mm, genişliği (w_2) 0,7 mm ve y uzunluğu 1 mm'dir. Metamalzemenin üst düzleminden arka toprak düzlemine doğru sekiz adet via yerleştirilmiş ve bu vialar ile toprak düzlemi arasına direnç elemanları yerleştirilmiştir. 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekanslarda en iyi verimliliği veren direnç değerleri R_1=1300 ohm ve R_2=2100 ohm olarak bulunmuştur. Dış halkada kullanılan viaların yarıçapları 0.40 mm, iç halkada kullanılan viaların yarıçapları ise 0.24 mm'dir. Ön yüzeydeki rezonatörlerde lokalize olan yüzey akımları vialar yardımı ile toprak düzlemindeki dirençler üzerine yönlendirilmiştir. Dış kare halka rezonatörün köşelerinde bulunan küçük kare halkalar dış kare halkanın rezonansa girdiği frekanstaki hasatlama verimliliğini artırmak amacıyla eklenmiştir.

2,6 GHz ve 5,8 GHz frekanslarda metamalzeme üzerindeki elektrik alan dağılımı Şekil 13'de TM uyarım altında, Şekil 15'de ise TE uyarım altında verilmiştir. Dıştaki kare halka 2.6 GHz frekans bandındaki elektromanyetik dalga ile etkileşirken, içerideki karesel halka 5.8 GHz frekans bandında gelen elektromanyetik dalgayı soğurmaktadır. TM mod için kare halka rezonatörün yatay yöndeki kısımları, TE mod için ise düşey yöndeki kısımları gönderilen elektromanyetik dalga ile etkileşmektedir.



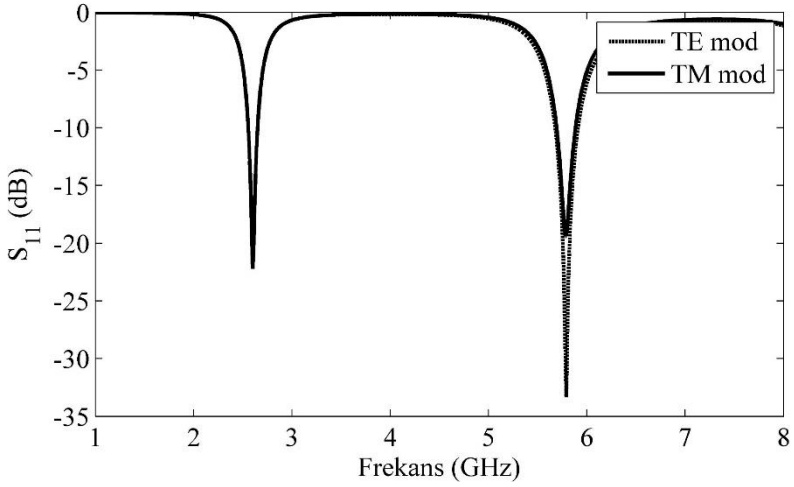
Şekil 15. TM uyarım altında (a) 2,6 GHz ve (b) 5,8 GHz frekanslarında elektrik alan dağılımı.



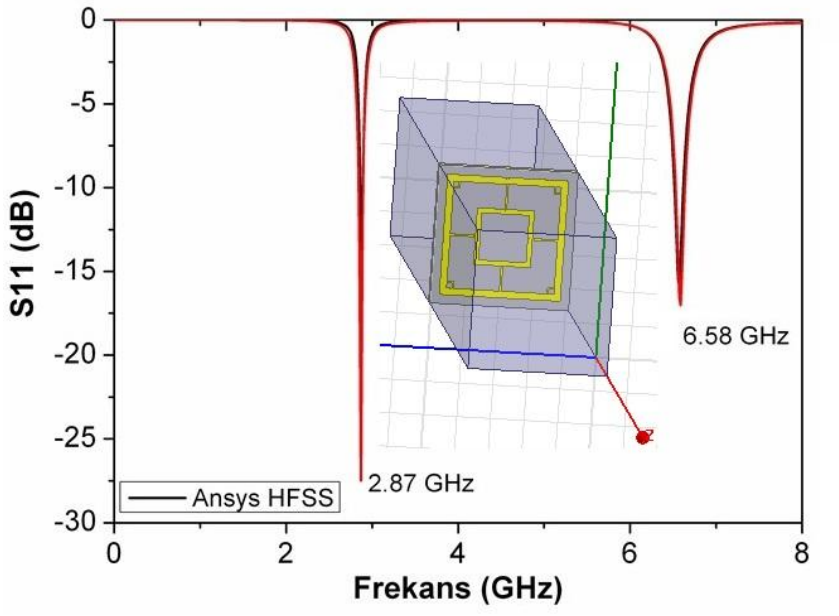
(a) (b)

Şekil 16. TE uyarım altında (a) 2,6 GHz ve (b) 5,8 GHz frekanslarında elektrik alan dağılımı.

CST Microwave Studio tam dalga analiz programında yapılan simülasyonlardan elde edilen yapıya ait yansıma parametreleri ve hasatlama verimliliği Şekil 17.a'da ve Şekil 18'de verilmiştir. Yapı dörtlü dönme simetrisine sahip olduğundan, TE ve TM modda gelen sinyallerde soğurmanın neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Yansıma parametreleri 2,6 GHz'de -23 dB iken, 5.8 GHz'de -34 dB değerindedir. Şekil 17b'de aynı yapının HFSS paket programı ile elde edilen benzetim sonuçları verilmiştir. HFSS benzetim sonuçlarında da TE ve TM dalgaları için aynı yansıma parametreleri elde edilmiştir. Bu frekanslarda hasatlama verimliliği değerleri ise, yansıma parametreleriyle uyumluluk göstermekte ve 2.6 GHz frekansta gelen elektromanyetik dalga %96 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştürürken, 5.8 GHz'de ise %93 verimlilikte hasatlama işlemi gerçekleşmektedir. TE ve TM modda gelen elektromanyetik dalgalar için soğurma ve verimlilik eğrileri aynı olduğundan 2,6 GHz ve 5,8 GHz bantlarında hasatlama kutupluluktan bağımsız olarak gerçekleştirilmektedir.

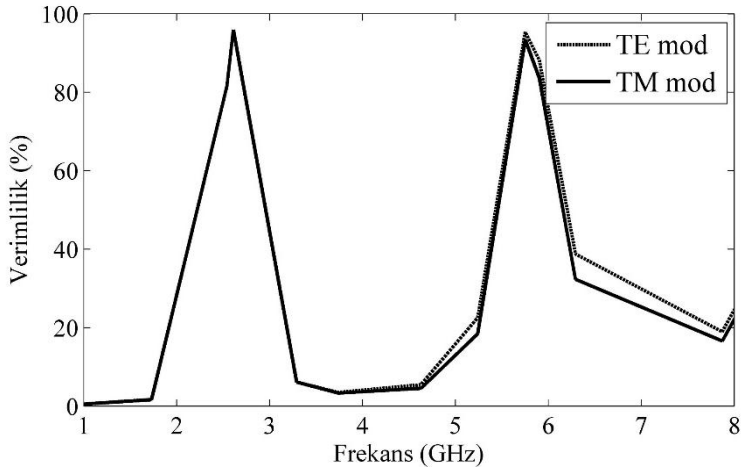


(a)



(b)

Şekil 17. Metamalzeme tabanlı hasatlayıcının frekansa bağlı yansıma parametresinin büyüklüğü (a) CST benzetim sonuçları (b) HFSS benzetim sonuçları (kırmızı eğri: TM, siyah eğri: TE).



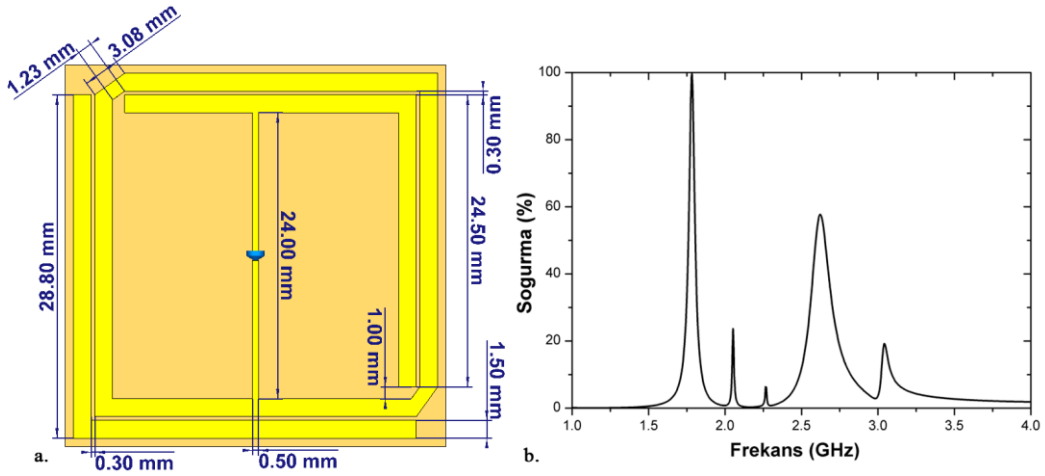
Şekil 18. Metamalzeme tabanlı hasatlayıcının frekansa bağlı hasatlama verimliliği.

4.2.3 Tasarım T4

Bu çalışmada sayısal yöntemlerle 1,8 GHz ve 2,6 GHz Wi-Fi frekanslarındaki elektromanyetik sinyali sırasıyla %83 ve %54 verimlilikle hasatlayabilen bir metamalzeme tabanlı elektromanyetik hasatlayıcı tasarlanmıştır. Tasarımın birim hücresinde, arka düzlemi tamamen bakır kaplı, 1,5 mm kalınlıklı teflon alttaş üzerinde indüktif-kapasitif bir rezonatör ve 45 Ω değerinde bir adet direnç kullanılmıştır. Önerilen metamalzeme hasatlayıcının birim hücresi geometri değerleri ile birlikte Şekil 19.a'da gösterilmiştir. Metamalzemenin birim hücre sabiti 32 mm'dir. Bir kare halka rezonatörün iç ve dış yüzeylerine L şeklinde rezonatörler eklenerek indüktif-kapasitif (LC) bir rezonatör yapısı oluşturulmuştur. Arka yüzdeki yüzey akımını devre elemanı üzerinde toplamak için akımın yoğunlaştığı en dıştaki rezonatörün sol alt köşesine ve en sağdaki rezonatörün orta kısmına alttaşı delen 0,5 mm çaplı bakır tel (via) ilave edilmiştir. Rezonatörleri oluşturan bakır kalınlığı 35 µm, teflon alttaş kalınlığı 1,5 mm olarak seçilmiştir. Teflonun dielektrik sabiti 2,1, kayıp tanjantı ise 0,0002'dir.

Metamalzemenin birim hücre sabiti 32 mm'dir.

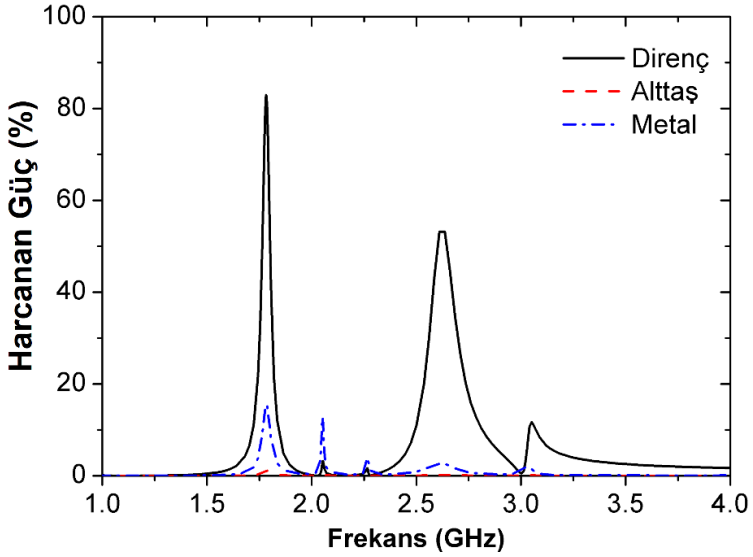
Metamalzemeye elektromanyetik dalga dik olarak gönderilmiştir. Gönderilen dalganın elektrik alan vektörü direnç elemanına paralel, manyetik alan vektörü ise diktir. Metamalzeme tabanlı elektromanyetik hasatlayıcının soğurma grafiği Şekil 19.b'de gösterilmiştir. Metamalzeme 1,8 GHz'de %99,6, 2,6 GHz'de %56,8 oranında soğurma yapmaktadır.



Şekil 19. Metamalzeme tabanlı hasatlayıcının birim hücre geometrisi ve (b) soğurma grafiği.

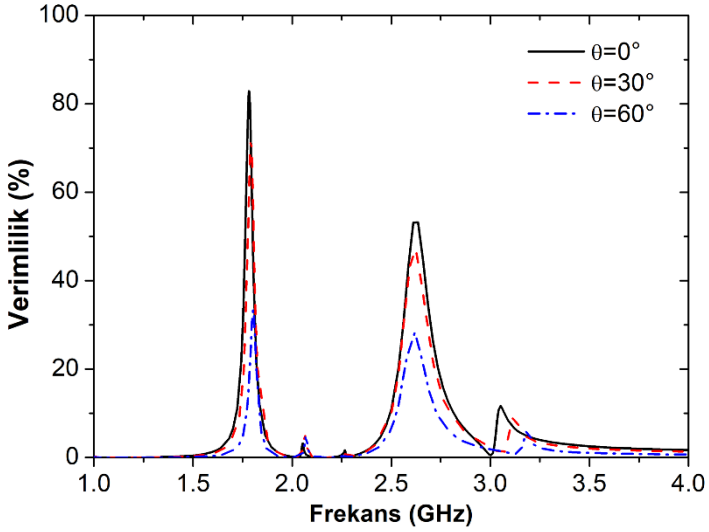
Metamalzeme rezonatörün orta kısmındaki ayrık tele hasatlama yapması için bir direnç yerleştirilmiştir. Her iki banttaki verimliliğin toplamını en yüksek yapan direnç değeri 45 Ω olarak belirlenmiştir. Bu değerden daha düşük direnç değerlerinde ikinci bandın hasatlama verimliliği artış gösterse de birinci bandın hasatlama verimliliği hızlı bir düşüş göstermektedir. 45 Ω'dan daha yüksek direnç değerlerinde ise birinci bandın hasatlama verimliliği yavaş biçimde artış göstermekte; fakat ikinci bandın hasatlama verimliliği azalmaktadır. Metamalzeme birim hücresi periyodik olarak kendisini tekrar ettiğinden birim hücrede bir adet direnç kullanmak tercih edilmiştir.

Metamalzeme tabanlı hasatlayıcıdaki direnç üzerinde, teflon alttaş içerisinde ve bakır metal plakada depo edilen AC gücün metamalzemeye gönderilen güce oranları Şekil 20'de gösterilmiştir. 45 Ω'luk direncin uçları arasında 1,8 GHz'de %83, 2,6 GHz'de ise 54% oranında hasatlama gerçekleşmektedir. Bakır kısımlarda bu oran 1,8 GHz için %15,4 ve 2,6 GHz için ise %2,6'dır. Teflon alttaşta ise 1,8 GHz ve 2,6 GHz frekanslarda yalnızca sırasıyla %1,2 ve %0,2 oranlarında güç birikimi gerçekleşmiştir. Bu durum gönderilen elektromanyetik dalganın çoğunluğunun direnç elemanı üzerinde depo edildiğini göstermektedir. 1,8 GHz ve 2,6 GHz için harcanan güçlerin toplamı soğurma oranları ile aynıdır.



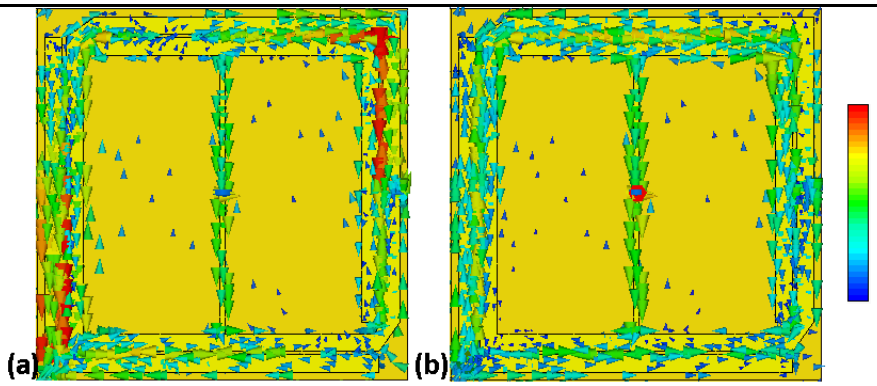
Şekil 20. Metamalzemeye dik gönderilen elektromanyetik dalgalar için direnç, alttaş ve metalik kısımlarda harcanan AC güç oranları.

Pratik uygulamalarda metamalzemeye elektromanyetik dalga herhangi bir açıda gelebilir. Hasatlama verimliliğinin gönderilen elektromanyetik dalganın geliş açısına bağlılığı Şekil 21'de incelenmiştir. 1,8 GHz'de, geliş açısı, θ=30° iken hasatlama verimliliği %71,7'ye, θ=60° iken ise %33,4'e azalmıştır. 2,6 GHz'de ise θ=30° iken hasatlama verimliliği %47,2, θ=60° iken ise %28,3 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 21. Farklı geliş açıları için direnç üzerinden hasatlama verimliliği.

Metamalzeme tabanlı hasatlayıcıda hasatlamanın nasıl gerçekleştiğini fiziksel olarak açıklayabilmek için 1,8 GHz ve 2,6 GHz rezonans frekanslarda ön yüzdeki yüzey akım dağılımı incelenmiş ve Şekil 22.a ve b'de gösterilmiştir. 1,8 GHz frekansta via'nın olduğu sol alt kısımda ve sağ üst kısımda yüzey akımı yoğunlaşmaktadır (kırmızı renkli bölgeler). Bu akım yan kısımlardaki iki bakır tel rezonatörün ara bölgesinden geçerek direnç üzerinde toplanmaktadır. 2,6 GHz frekansta ise via'lardan toplanan yüzey akımlarında azalma görülmektedir. Yüzey akımları etkin biçimde direnç üzerine gönderilemediğinden direnç üzerinden depolanan güç %54'de kalmıştır.



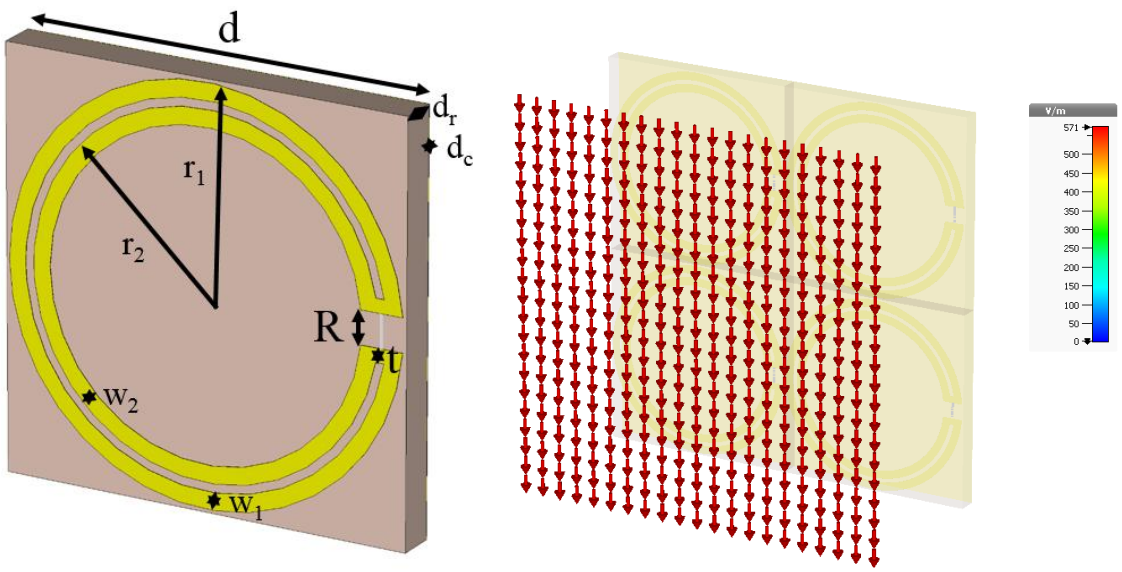
Şekil 22. (a) 1,8 GHz ve (b) 2,6 GHz frekanslardaki yüzey akım yoğunluğu.

4.2.4 Tasarım T5 ve T6

Bu metamalzeme tabanlı hasatlayıcının tasarımı aşamaları ile birlikte altta anlatılmıştır. Nihai tasarım ikinci aşamada gerçekleştirilmiştir.

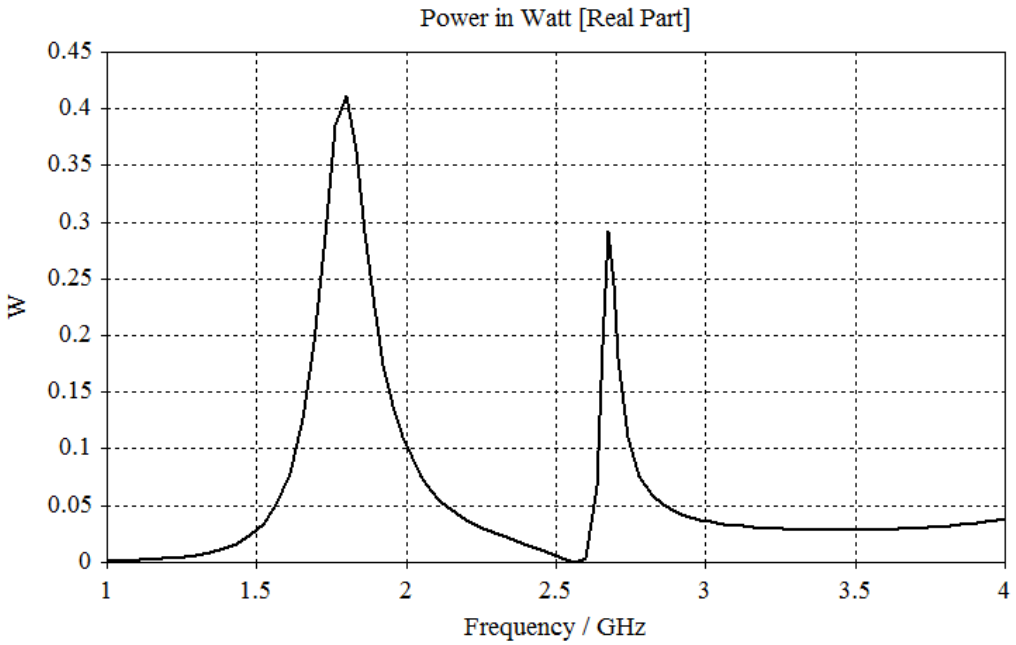
1. Aşama (T5)

Öncelikle birbirine bir iletken hat ile bağlı, 1,8 GHz ve 2,6 GHz frekanslarında rezonans verecek ayrık halka rezonatörler tasarlanmıştır. Üzerine gelen elektromanyetik (EM) dalgayı hasatlaması için ayrık bölgelerine bir adet direnç bağlanmıştır. Yapı metalik toprak düzlem, dielektrik tabaka ve rezonatörler olmak üzere üç katmandan oluşmaktadır. Dielektrik katman olarak dielektrik sabiti (ε) 2,2, manyetik geçirgenliği (μ) 1 ve kayıp oranı (tanδ) 0,0009 olan Rogers RT 5880 kullanılmıştır. Şekil 21'de görülen yapıda dış halka 1,8 GHz frekansında içteki halka ise 2,6 GHz frekansında EM dalgayı hasatlaması için tasarlanmıştır. Şekil 23.a'da verilen parametrelerin değerleri yapılan benzetim çalışmaları sonucu belirlenmiştir ve en iyi sonuç alınan değerlere karşılık gelmektedirler. Şekil 23.a'daki parametrelerde d birim hücrenin kenar uzunluğunu, r_1 1,8 GHz için tasarlanan ayrık halkanın yarıçapını, r_2 2.6 GHz için tasarlanan ayrık halka rezonatörün yarıçapını temsil etmektedir ve değerleri sırasıyla 34,00 mm, 16,75 mm ve 13,60 mm'dir. Dış kısımdaki ayrık halka rezonatörün genişliğini w_1, iç kısımdaki ayrık halka rezonatörün genişliğini w_2 temsil etmektedir ve ikisinin de değeri 1,40 mm'dir. Ayrık halka rezonatörlerin birleştirildiği iletken hattın kalınlığı t (1,13 mm) ile gösterilmiştir. Yapıya devre elemanı olarak bağlanan direnç değerini ise R temsil etmektedir ve değeri 20 Ω'dur. Söz konusu değerlere karşılık gelen, devre elemanı üzerinde harcanan güç grafiği şekil 24'de gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil 23. (a) 1,8 GHz ve 2,6 GHz frekansları için tasarlanan EM dalga hasatlayıcı, (b) yapıya gönderilen dalganın elektrik alan yönelimi.



Şekil 24. Tasarlanan ayrık halka rezonatörlere bağlanan direnç üzerinden harcanan güç grafiği.

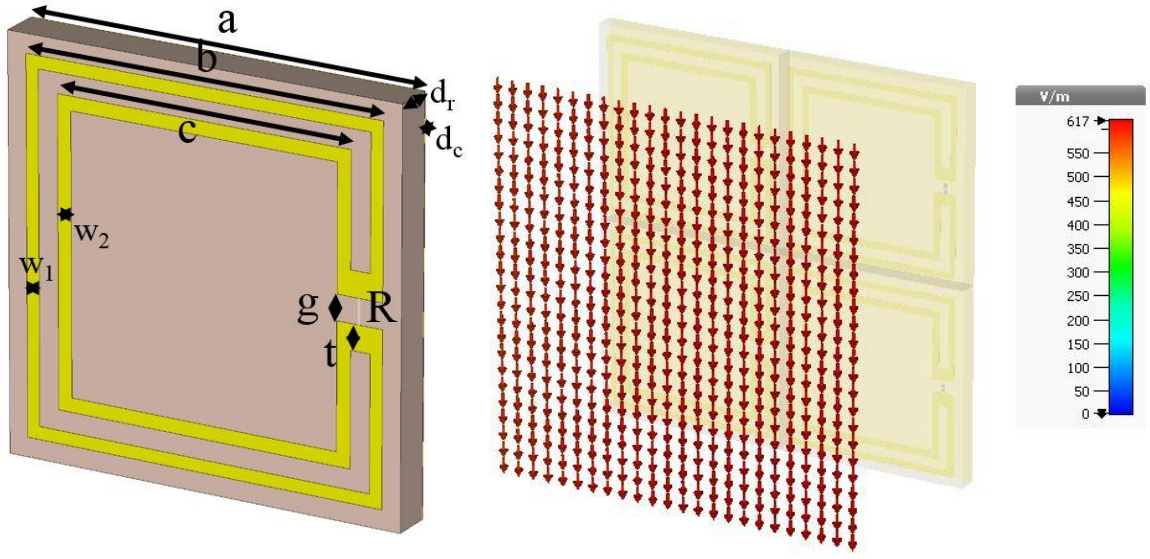
Şekil 24'de görüldüğü gibi yapı beklendiği gibi iki rezonans tepkisi vermiştir ve direnç üzerinde güç harcanmıştır. Benzetim ortamı olarak kullanılan CST Microwave Studio paket yazılım programında yapıya gönderilen EM dalganın gücü 0,5 W olarak ayarlanmıştır. Bu bilgi doğrultusunda yapılan hesaplamalarda metamalzeme tabanlı EM dalga hasatlayıcı yapısında 1,8 GHz frekansında elde edilen verimlilik %82,4 iken 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 rezonans 2.6'ya çekilmek için yapıda yapılan değişiklikler başarılı olmuştur. Ancak, 2,6 GHz için tasarlanan dıştaki ayrık halka rezonatörün boyu büyütüldüğünde, 1,8 GHz için tasarlanan yapı ile etkileşime girerek söz konusu frekanstaki rezonansı ve verimliliği

olumsuz yönde etkilemektedir.

2. Aşama (T6)

Ayrık halka rezonatörlerde karşılaşılan ve yukarıda sözü edilen problemlerden sonra metamalzeme tabanlı EM dalga hasatlayıcı yapısında değişikliğe gidilerek ayrık kare halka rezonatörler ile EM dalga hasatlayıcı tasarlanmıştır. Böylelikle kare halka rezonatörlerin köşelerinden kaynaklanan saçaklanma (fringing) etkisi ile ekstra kapasitif etki sağlanarak halka rezonatörler arasındaki boyut farkı artırılmış ve birbirleri ile etkileşmelerinin önüne geçilmiştir.

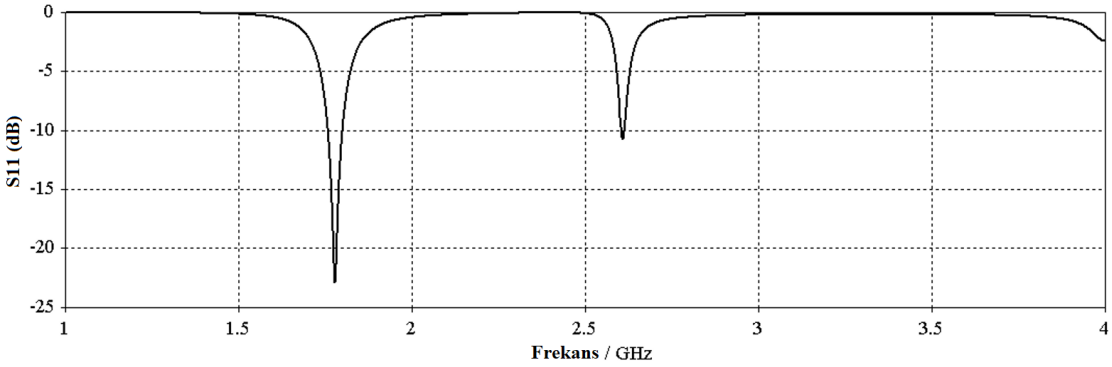
Ayrık halka rezonatörlerin ayrık bölgesine devre elemanı eklenerek CST Microwave Studio'da benzetim çalışmaları yapılmıştır. Yapılan benzetim çalışmaları sonucunda elde edilen nihai yapı Şekil 25.a'da görülmektedir. Yapıya EM dalgalar Şekil 25.b'de gösterildiği gibi elektrik alan vektörü düşey yönde olacak biçimde karşıdan gönderilmiştir.



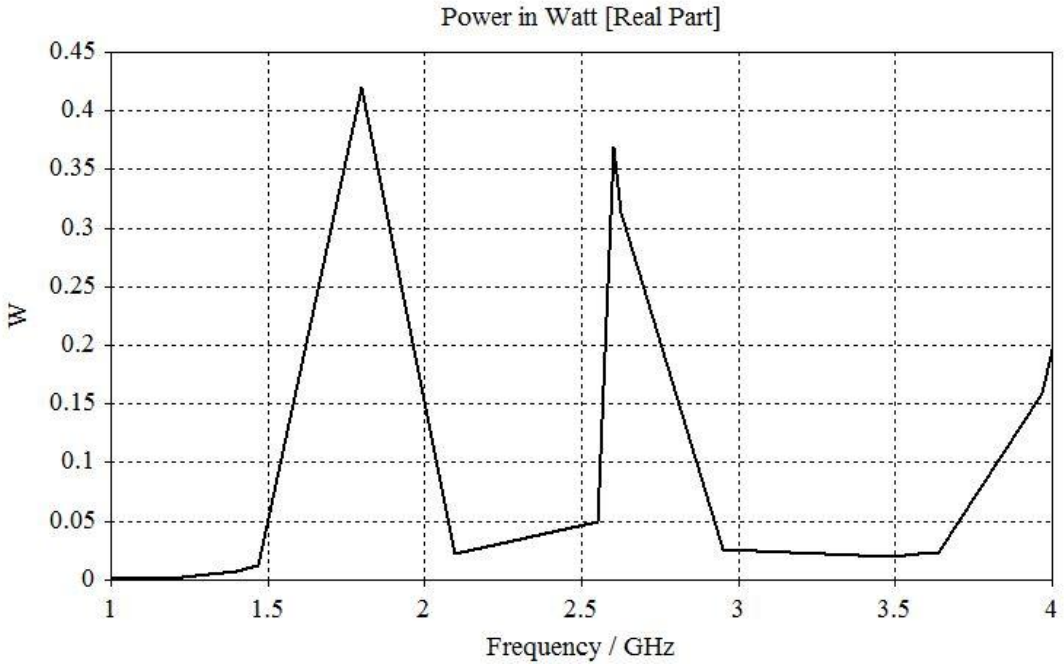
(a) (b)

Şekil 25. (a) Ayrık kare halka rezonatörlerden oluşan EM dalga hasatlayıcı, (b) yapıya gönderilen EM dalganın elektrik alan yönelimi.

Şekil 25.a'da verilen parametrelerin değerleri yapılan benzetim çalışmaları sonucu belirlenmiştir ve en iyi sonuç alınan değerlere karşılık gelmektedir. Şekil 25.a'daki parametrelerde a birim hücrenin kenar uzunluğunu, b 1,8 GHz için tasarlanan ayrık kare halkanın kenar uzunluğunu, c 2,6 GHz için tasarlanan ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğunu temsil etmektedir ve değerleri sırasıyla 32,00 mm, 29,00 mm ve 23,85 mm'dir. Dış kısımdaki ayrık kare halka rezonatörün genişliğini w_1, iç kısımdaki ayrık kare halka rezonatörün genişliğini w_2 temsil etmektedir ve ikisinin de değeri 1,10 mm'dir. Ayrık kare halka rezonatörlerin yarık bölgesinin genişliğini g, birleştirildiği iletken hattın kalınlığını t, yapıya devre elemanı olarak bağlanan direnç değerini ise R temsil etmektedir ve değerleri sırasıyla 2,00 mm, 2,00 mm ve 15 Ω'dur. Bu metamalzeme tabanlı hasatlayıcının yansıma parametreleri Şekil 26'da gösterilmiştir. Devre elemanı üzerinde harcanan güç grafiği ise Şekil 27'de verilmiştir.



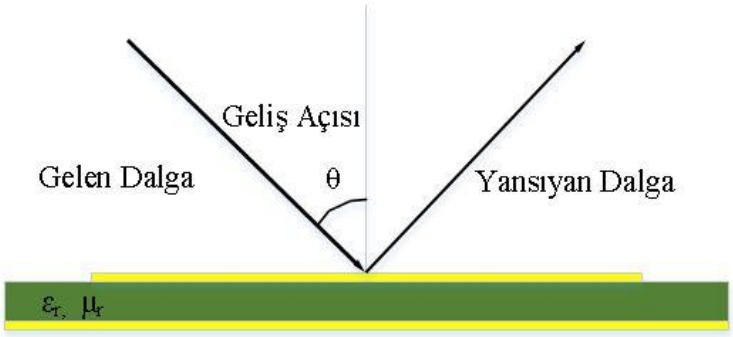
Şekil 26. Metamalzeme tabanlı hasatlayıcının S11 grafiği.



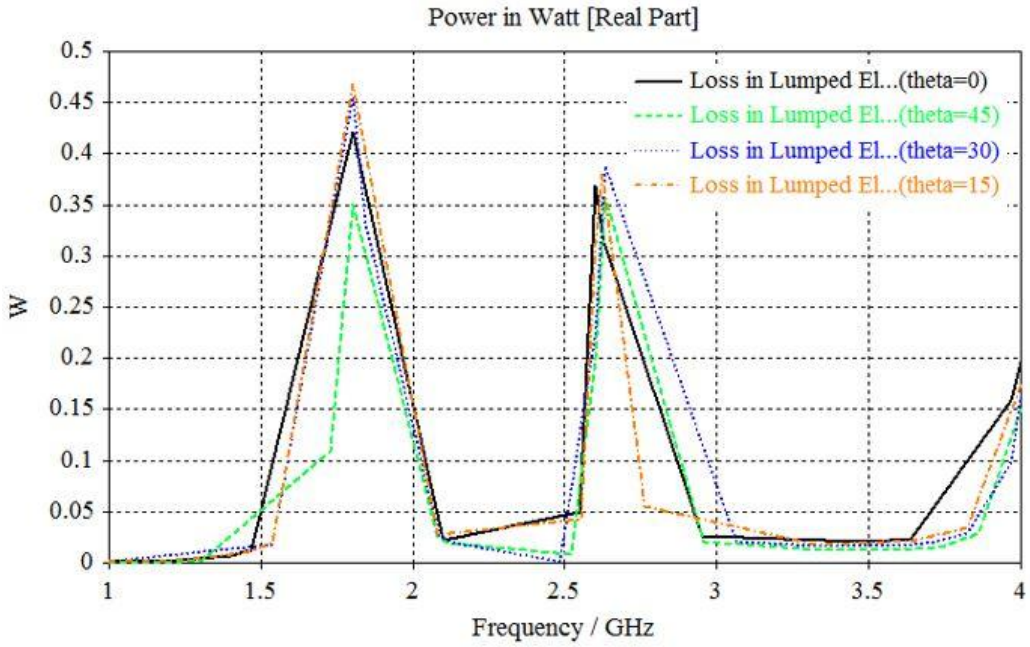
Şekil 27. Devre elemanı üzerinde harcanan güç.

Şekil 27'de sunulan grafikte 1.8 GHz ve 2.6 GHz frekanslarında devre elemanı üzerinde harcanan güç sırası ile 0,4205 W ve 0,3690 W olarak belirlenmiştir. Giriş gücünün 0,5 W olduğu göz önüne alındığında verimlilik değerleri sırasıyla %81 ve %73,8 olarak bulunmuştur. Ortalama verimlilik %77,4 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 27'deki sonuçlara ek olarak metamalzeme tabanlı EM dalga hasatlayıcı yapısının geliş açısı θ'ya bağlılığı da incelenmiştir. Geliş açısını tanımlayan θ Şekil 28.a'da, bu açıya bağlı devre elemanı üzerinde harcanan güç grafiği Şekil 28.b'de gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 28. (a) Geliş açısı θ'nın tanımı, (b) θ'ya bağlı devre elemanı üzerinde harcanan güç.

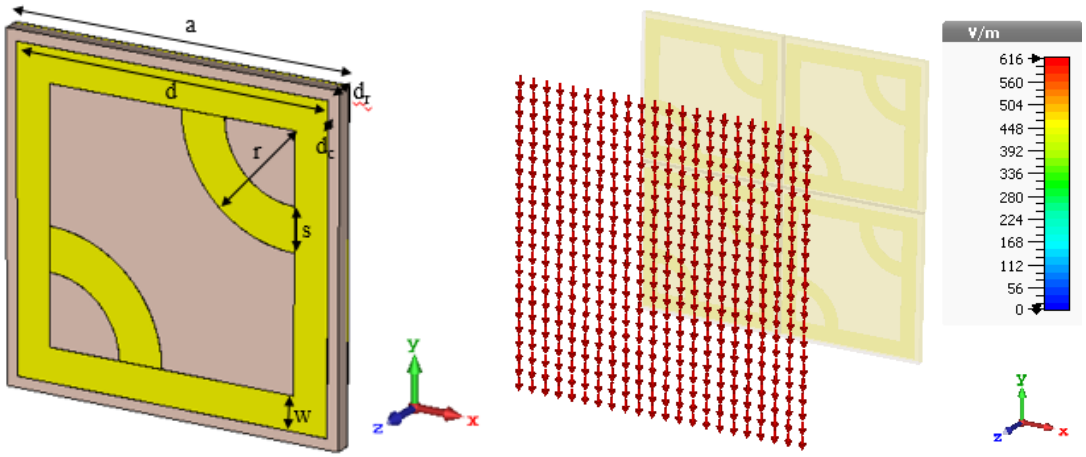
EM dalganın geliş açısında göre devre elemanı üzerinde harcanan güç 1,8 GHz ve 2,6 GHz frekanslarında 0°, 15°, 30° ve 45° geliş açılarında incelenmiştir. Söz konusu açı değerlerinde 1,8 GHz'de devre elemanı üzerindeki harcanan güç oranı (verimlilik) sırası ile %83,0, %93,6, %91,0 ve %70,2 olarak hesaplanmıştır. 2,6 GHz frekansındaki devre elemanı üzerinde harcanan güç oranı ise sırası ile %73,8, %62,2, %44,9 ve % 40,0 olarak hesaplanmıştır.

4.3 Dört Bantlı Metamalzeme Tabanlı Elektromanyetik Enerji Hasatlama

4.3.1 Tasarım T2-1

Tasarım T2-1 hazırlanırken proje kapsamında hedeflenen bantlardan 1,8 ve 2,6 GHz frekansında soğurma yapması amaçlanmıştır. Söz konusu yapı Şekil 29'da görüldüğü gibi bir kare halka ve iki adet kare halkaya bağlı dairesel halkalardan oluşmaktadır. Metamalzeme tabanlı elektromanyetik dalga soğurucu üç katmandan oluşmaktadır. Birinci katman elektromanyetik dalganın iletimini engellemek için kullanılan metaldir (çoğunlukla bakır). İkinci katman yapıya gelen elektromanyetik dalganın rezonansa girmesi için iki iletken arasındaki boşluğu sağlayan dielektrik alttaştır. Metamalzeme tabanlı EM dalga soğurucu

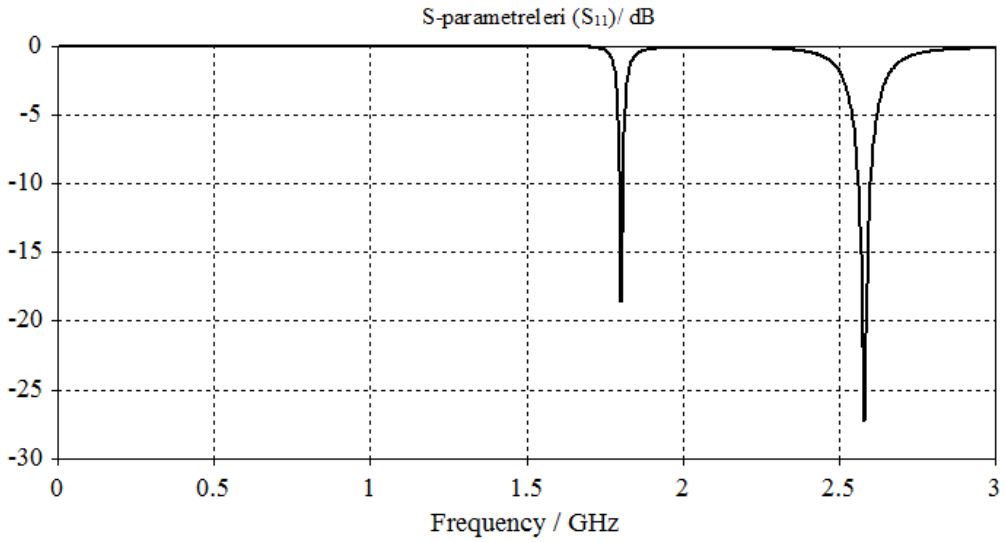
tasarımlarında genellikle dielektrik sabitinin soğurmadan sorumlu olan sanal kısmı büyük olan malzeme seçilir ve yapının bütününde daha fazla soğurma meydana gelmesi sağlanır. Ancak enerji hasatlama işleminde kullanılan alttaşın dielektrik sabitinin düşük olması gerekmektedir. Çünkü hasatlama işleminde soğurmanın iletken kısımda rezonans olarak gerçekleşmesi gerekmektedir. Üçüncü katman ise yapının hangi frekanslarda soğurma yapacağını belirleyen metalik modeldir.



(a) (b)

Şekil 29. (a) Tasarım T2-1'in birim hücre görüntüsü, (b) elektrik alan yönelimi.

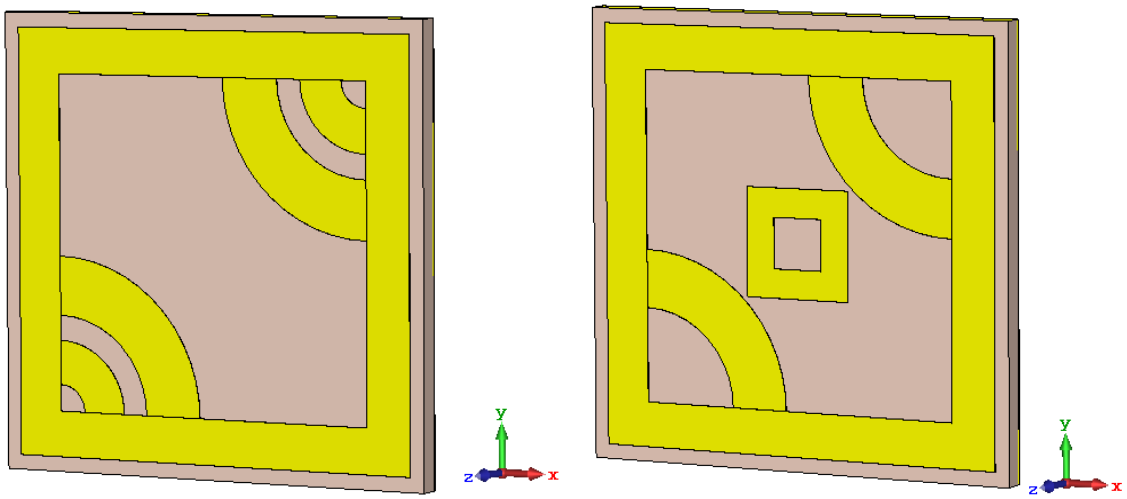
Şekil 29'da görülen a parametresi birim hücrenin boyutunu, d kare halka rezonatörün boyutunu, r dairesel halka rezonatörün yarı çapını, w kare halka rezonatörün genişliğini, s dairel halka rezonatörün genişliğini d_r dielektrik alttaşın kalınlığını, d_c iletkenlerin kalınlığını temsil etmektedir ve bunlar sırası ile 31,0 mm, 29,0 mm, 10,5 mm, 3.1 mm, 4,0 mm 1,575 mm ve 0,035 mm'dir. Dielektrik alttaş malzemesi olarak tan δ değeri düşük olan Rogers 5880 malzemesi seçilmiştir. Kare halka rezonatör 1,8 GHz, dairesel halka rezonatörler ise 2,6 GHz frekansında soğurma gerçekleştirmesi için tasarlanmıştır. Yapının bir kare halka ve buna birleşik iki dairesel halkadan oluşturulmasının nedeni daha sonra eklenecek olan devre elemanlarının sayısını azaltmaktır. Kare halka rezonatörün diğer köşelerine ise projede hedeflenen diğer frekanslarda çalışacak rezonatör yapı eklenmesi düşünüldüğü için boş bırakılmıştır. Ancak yapıyı oluşturan parametrelerin iki frekansı da etkilemesinden dolayı daha detaylı bir parametrik analiz yapılmıştır.



Şekil 30. Tasarım T2-1'in S11 grafiği.

–x ve *–y* düzlemleri için sınır koşulları periyodik olarak belirlenirken *–z* düzlemi kaynaktan düzlem dalganın yapıya ulaşması için gerekli mesafe var olacak biçimde (*open-add space*) olarak seçilmiştir. Çok sayıda ve uzun süren parametrik analizlerin ardından yapının çalışma frekansları 1,8 ve 2,6 GHz civarında elde edilmiştir. Şekil 30'da görüldüğü gibi tasarlanan birim hücre 1,80 GHz'de -18 dB, 2,58 GHz'de -27 dB değerlerinde üzerine gelen EM dalgayı soğurmaktadır. Bu değerler ile yapıda %90'ın üzerinde soğurma sağlanmıştır. Bu da bize enerji hasatlama için gerekli soğurmayı sağlamaktadır.

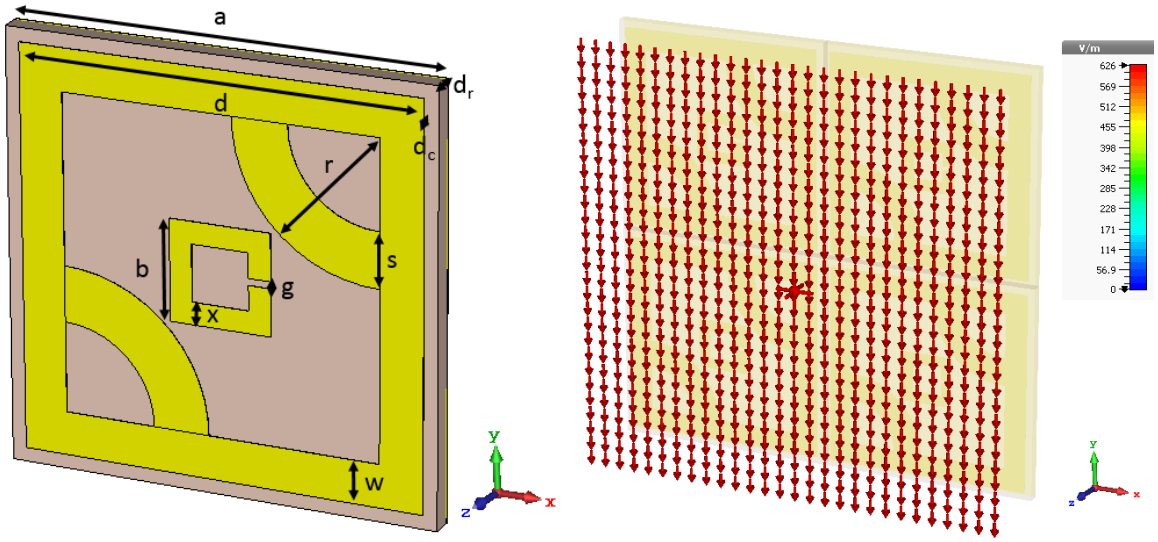
Tasarıma 5,8 GHz'de üzerine gelen EM dalgayı soğurması için Şekil 31.a'da görüldüğü gibi yapıda var olan çeyrek daire halka rezonatör içerisine bir halka rezonatör daha eklendi. 5,8 GHz için eklenen yapı 1,8 ve 2,6 GHz gibi tasarlanan yapı ile bütünleşik olduğundan bu frekansların rezonans frekansını fazla etkilemese de soğurma oranlarında ve band genişliklerinde değişime neden olmaktadır. 5.8 GHz için eklenen yapının 6.5 GHz'in üstünde kalması ve eklendiği alanın boyutu nedeni ile parametrik analizlerin ardından Şekil 29(a)'da yer alan eklemeden vazgeçildi. Daha sonra birim hücrenin ortasına Şekil 31.b'de görüldüğü gibi kare halka rezonatör eklenerek 5,8 GHz'de soğurma gerçekleştiren bir yapı elde edilmeye çalışıldı. Ancak kare halka rezonatör yapısı ile gerçekleştirilen parametrik analizlerin ardından, birim hücre içerisinde var olan alan darlığı nedeni ile yapının boyutlarıyla yeteri kadar oynanamadığı için rezonans 6,5 GHz civarından aşağıya indirilemedi. Bu tasarımda da 5,8 GHz'de rezonans elde edilemedi.



(a) (b)

Şekil 31.(a) Tasarım T2-1'e 5,8 GHz için eklenen dairesel halka rezonatör ile birim hücre görüntüsü, (b) 5,8 GHz için yapının ortasına eklenen kare halka rezonatör ile birim hücre görüntüsü.

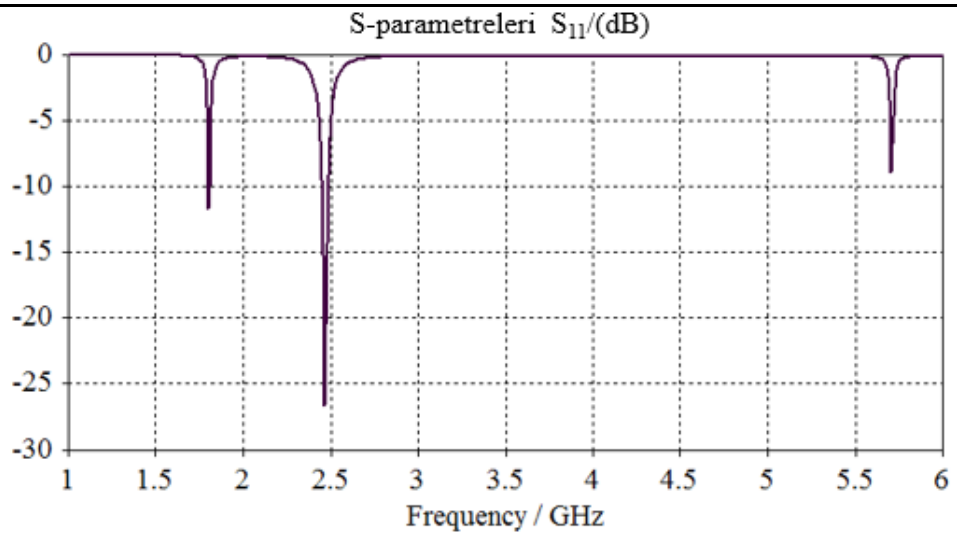
Daha sonra 5,8 GHz rezonans frekansını elde etmek için eklenen Şekil 31.b'de yer alan kare halka rezonatör yapısında yarık açıldı. Bu sayede ekstra kapasitif etki gelmesi sağlanarak rezonans frekansının aşağıya kayması amaçlandı. Ayrık halka rezonatör ile birlikte birim hücre görüntüsü ve elektrik alan yönelimi Şekil 32'de verilmiştir.



(a) (b)

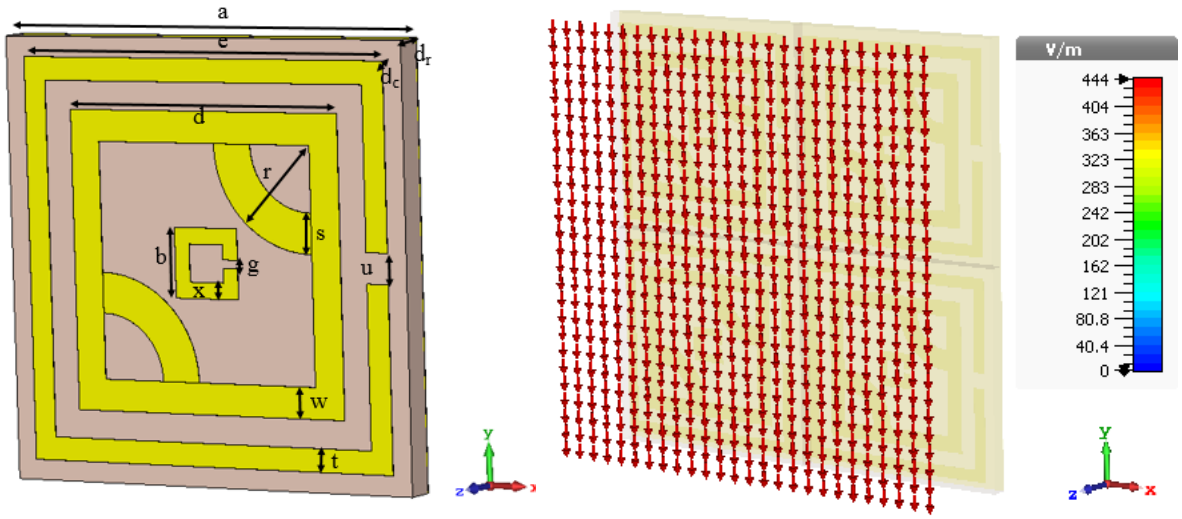
Şekil 32. (a) Ayrık halka rezonatör eklenmiş birim hücre görüntüsü (b) elektrik alan yönelimi.

Şekil 32.a'da görülen parametreler Şekil 29.a'daki değerler ile aynıdır. Bunlara ek olarak ayrık halka rezonatörün parametrelerinde kare halkanın kenar uzunluğunu b, genişliğini x, ayrığın genişliğini ise g temsil etmektedir. Bu değerler sırasıyla 7,5 mm, 2,0 mm ve 1,0 mm olarak seçilmiştir. Uzun süren parametrik analizler ve simülasyonların ardından en iyi sonuç Şekil 33'de gösterilmektedir.



Şekil 33. Şekil 30.a'daki tasarımın S_{11} grafiği.

Şekil 33'de görüldüğü gibi 1,8 GHz ve 2.6 GHZ için hedeflenen değerlerde bir değişiklik olmadı. Bunlara ek olarak 5,8 GHz'de soğurma sağlaması için eklenen ayrık kare halka rezonatörü 5,7 GHz'te -8,9 dB'lik bir soğurma gerçekleştirdi. Yapının soğurma değeri ve rezonans frekansı istenen değerlere yakın olduğu için ve 900 MHz için yapıya eklenecek rezonatörün söz konusu değerleri etkileyeceği öngörülerek daha fazla parametrik analiz yapılmadı ve 4 bantta soğurma gerçekleştirmesi için tasarım T2-1'e yeni rezonatör eklenmesine karar verildi.



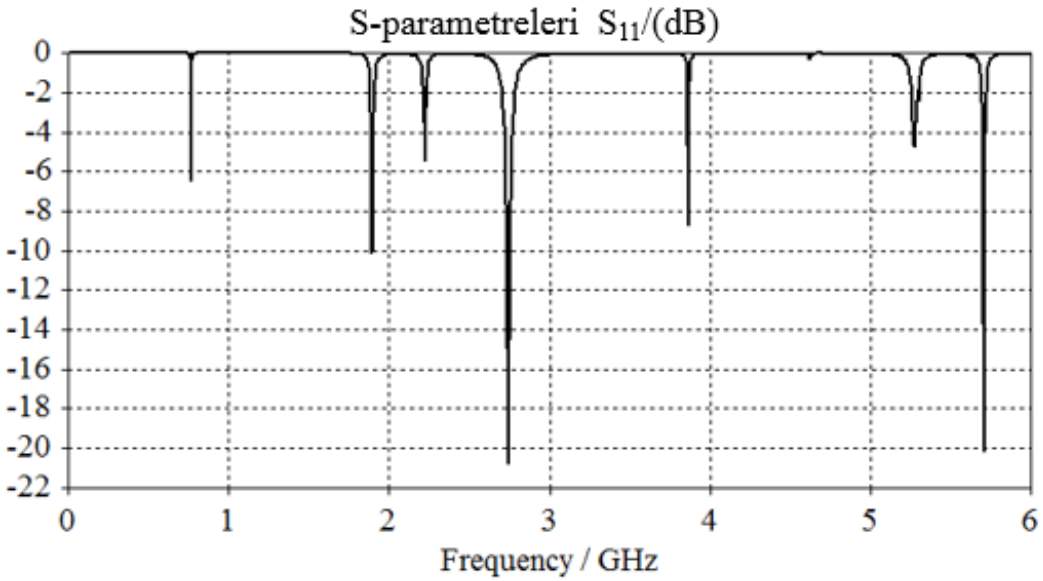
(a) (b)

Şekil 34.(a)Tasarım T2-1'in dört bant için tamamlanmış hali, (b) elektrik alan yönelimi.

Şekil 34'de görülen a parametresi birim hücrenin boyutunu, e en dıştaki ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğunu, t genişliğini, u ise ayrığın uzunluğunu, d kare halka rezonatörün boyutunu, r dairesel halka rezonatörün yarı çapını, w kare halka rezonatörün genişliğini, s dairesel halka rezonatörün genişliğini, b içteki ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğunu, x genişliğini, g ise ayrığın uzunluğunu, d_r dielektrik alttaşın kalınlığını, d_c iletkenlerin kalınlığını temsil etmektedir ve bunlar sırası ile 43.7 mm, 39.7 mm, 2.3 mm, 3 mm, 29.5 mm, 10.5 mm, 3.1 mm, 4 mm, 6.9 mm, 1.6 mm, 0.8 mm, 3.21 mm ve 0.035 mm'dir. Dielektrik alttaş malzemesi değiştirilmedi ve tan δ değeri düşük olan Rogers 5880

malzemesi kullanılmaya devam edildi. Diğer bir deyişle, daha güçlü bir rezonans elde etmek için alttaş kalınlığı arttırıldı.

Şekil 34'de görüldüğü gibi son olarak 900 MHz için tasarım T2-1'in en dış kısmına 5.8 GHz frekansındaki rezonansı elde ettiğimiz gibi bir adet ayrık kare halka rezonatör eklendi. Ancak söz konusu ekleme 1.8 GHz ve 2.6 GHz için oluşturulan yapının (Şekil 32.a) boyutlarında değişime gidilmesine neden olmuştur. Bunun nedeni birim hücre parametresinin Şekil 32.a'daki yapı için değişmiş olmasıdır. Her ne kadar yapı yakın frekanslarda tepki vermiş olsa da 900 MHz için eklenen kare halka rezonatörden dolayı tüm rezonans frekanslarını tekrar aynı yere çekmek için parametreler ile oynanmıştır. Uzun süren simülasyon çalışmalarının ardından istenilen dört frekans bandına (900 MHz, 1.8 GHz, 2.6 GHz ve 5.8 GHz) yakın frekanslarda sonuçlar alınmıştır. Uzun süren parametrik analizlerin ardından elde edilen en iyi simülasyon sonucu Şekil 35'de gösterilmektedir.



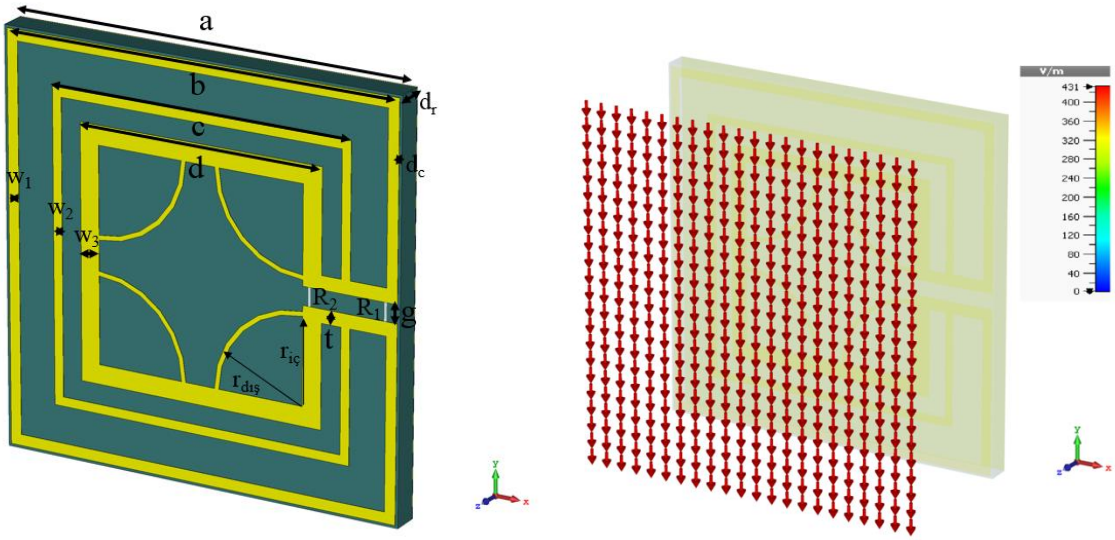
Şekil 35. Dört bant için tasarlanan metamalzeme tabanlı enerji hasatlama çalışmasının S11 sonuçları.

Şekil 35'de görüldüğü gibi istenilen frekansların dışında bazı hedeflemediğimiz rezonanslar göze çarpmaktadır. Hedeflenen rezonans frekanslarının birbirinden çok uzak olmasından ve yapının büyük ve karmaşık olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Hedeflenen frekanslara yakın frekanslarda elde edilen sonuçlar şöyledir: 0,9 GHz için 0,77 GHz'te -6,5 dB, 1,8 GHz için 1,89 GHz'te -10 dB, 2,6 GHz için 2,73 GHz'de -10,2 dB ve 5,8 GHz için 5,71 GHz'de -20,2 dB. Bu yapıya dirençler bağlandığında hasatlama gerçekleştirilen bant sayısı 2'ye indiğinden verimlilik sonuçları "iki bantlı elektromanyetik enerji hasatı" başlığı altında Tasarım T2 olarak yukarıda verilmiştir.

4.3.2 Tasarım T7

Tek bir birim hücre üzerinde dört bantta (0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz) elektromanyetik hasatlama yapabilmek için üç adet ayrık halka rezonatör ve dört adet çeyrek halka dilimi kullanılmıştır. Şekil 36'da görülen yapıda en içteki halka rezonatörün köşe bölgelerine yerleştirilen çeyrek halka rezonatörler ile 5,8 GHz frekansında hasatlama

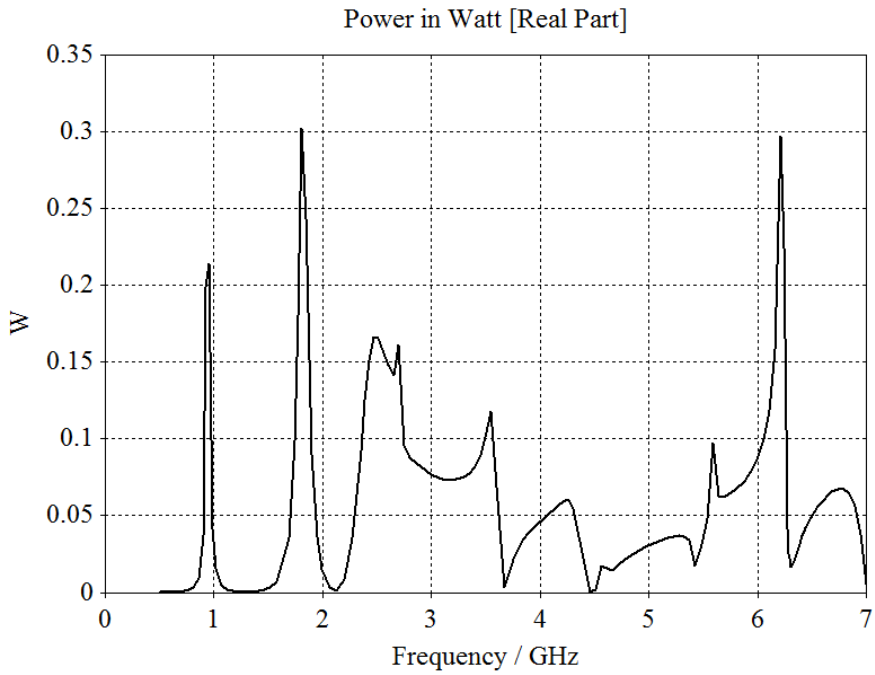
gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Şekil 36'da görüldüğü gibi ayrık halka rezonatörler iletken yardımı ile ayrık bölgelerinden birleştirilmiştir ve indüklenen akımlar bu hat üzerinde toplanmıştır. Yapıda dielektrik alttaş olarak ε değeri 2,1, μ değeri 1, ve tanδ değeri 0,0002 olan PTFE (teflon) kullanılmıştır. Metamalzeme tabanlı soğuruculardaki dielektrik alttaşın soğurma katsayısını veren tanδ (kayıp tanjantı) değerinin büyük olması istenmektedir çünkü yapıda rezonans yolu ile oluşturulan soğurmaya katkı olarak dielektrik alttaşın gelen EM dalganın bir kısmını soğurması istenmektedir. Ancak metamalzeme tabanlı EM hasatlayıcılarda yapıya gelen EM dalganın dielektrik alttaş da kayıba uğraması değil rezonans yoluyla meta yüzeyde akım indüklemesi istenmektedir. Bundan dolayı metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcılarda kayıp tanjant değeri oldukça küçük seçilmelidir. Bu amaçla tanδ değeri en düşük malzemelerden biri olan PTFE yapıda dielektrik alttaş olarak kullanılmıştır.



(a) (b)

Şekil 36. (a) T7'ye ait birim hücre görüntüsü (b) elektrik alan yönelimi.

Simülasyonları gerçekleştirilen T7 Şekil 36.b'de görüldüğü gibi elektriksel olarak uyarılmıştır. Şekil 36.a'daki birim hücre boyutlarına karşılık gelen ifadeler ve değerleri ise şöyledir; birim hücre boyutu a ve değeri 45 mm, b, 0,9 GHz için tasarlanan ayrık halka rezonatörün kenar uzunluğuna karışılık gelmektedir ve değeri 44,4 mm'dir, c 1,8 GHz için tasarlanan halka rezonatörün kenar uzunluğuna karşılık gelmektedir ve değeri 33,9 mm'dir, d ise 2,6 GHz için tasarlanan halka rezonatörün kenar uzunluğunu ifade etmektedir ve değeri 27,5 mm'dir. 5,8 GHz için tasarlanan çeyrek halka rezonatörlerin boyutları ise $r_{dış}$ 9 mm ve $r_{iç}$ 8,5 mm'dir. Şekil 36'da görülen w_1, w_2 ve w_3 değerleri ise halka rezonatörlerin kalınlıklarını ifade etmektedir ve değerleri sırasıyla 1,2 mm, 1 mm ve 2,1 mm'dir. arık bölgenin genişliği g, ayrık bölgeleri birleştiren iletken hattın kalınlığı t ile gösterilmiştir ve değerleri sırasıyla 2 mm ve 2 mm'dir. Kullanılan devre elemanları R_1 ve R_2 gösterilmiştir ve değerleri sırasıyla 5 ohm ve 100 ohm'dur.

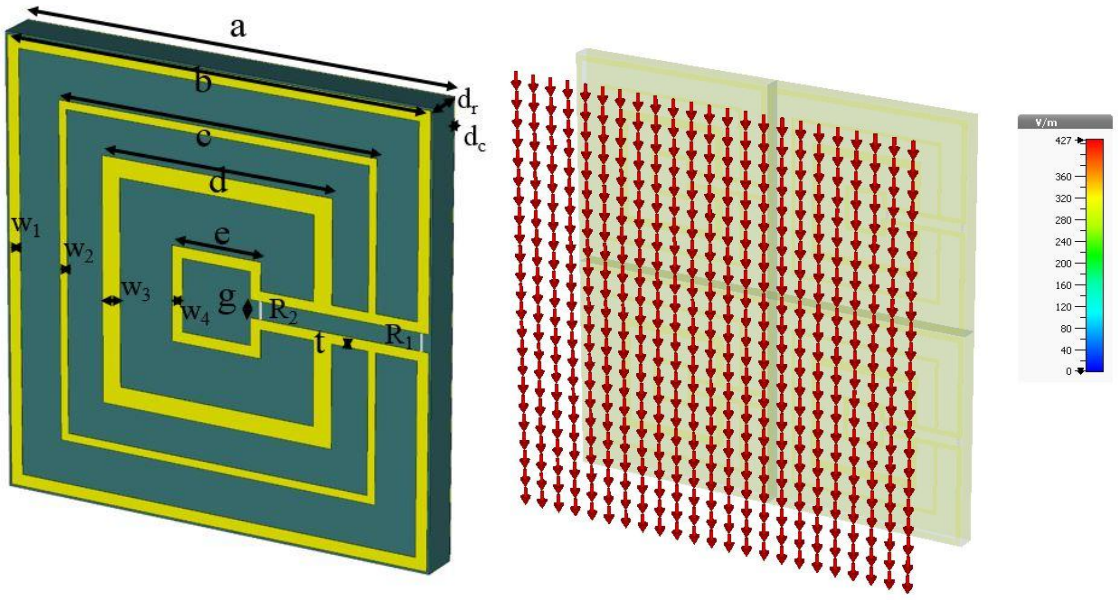


Şekil 37. Tasarım T7'ye ait dirençler üzerinde harcanan güç.

Tasarım T7'ye ait Şekil 37'deki dirençler üzerinde harcanan güç grafiğinde görüldüğü gibi hedeflenen frekanslara yakın bölgelerde hasatlama yapılmaktadır. Ancak yapılan parametrik analizler sonucunda en iyi sonuçların verildiği Şekil 37'deki grafik hedeflenen 0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz GSM ve Wi-Fi bandlarında ortalama %75 verimlilikten çok uzaktadır. Uzun simülasyon sayıları ve sürelerinden sonra tasarlanan birim hücrede yapılar arasında etkileşimin fazla olduğu ve bu durum düzeltilmek istendiğinde ise soğurma ve verimlilik değerlerinin çok aşağılara indiği anlaşılmıştır. Bu nedenle yapısının analizlerine devam edilmemiştir.

4.3.3 Tasarım T8

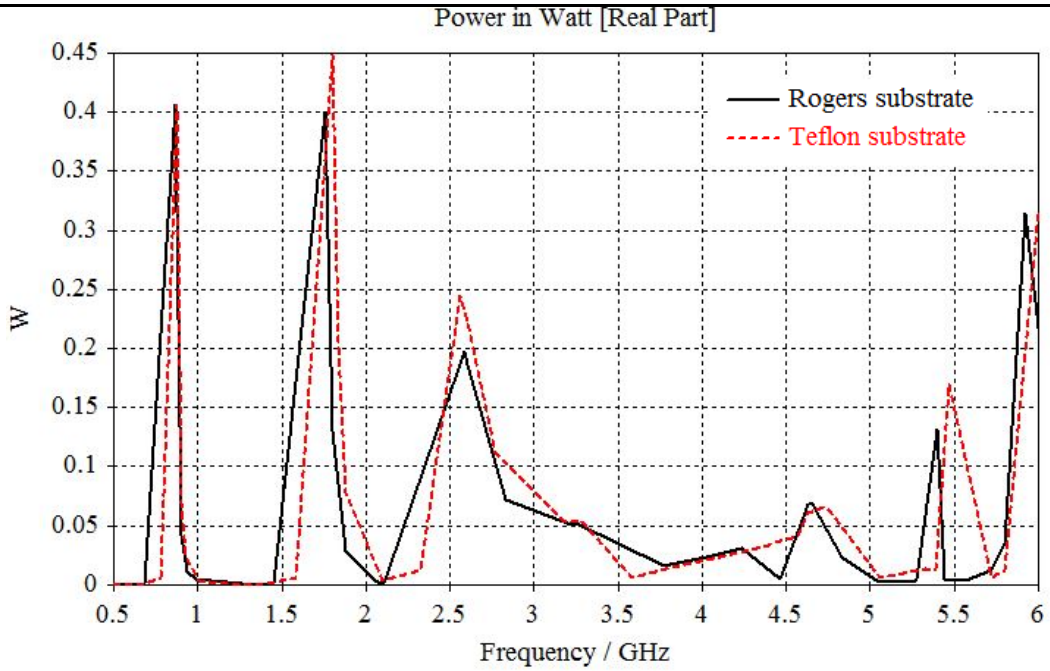
Tek bir birim hücre üzerinden dört bantta EM dalgayı hasatlayabilmek için dört farklı boyutta ayrık halka rezonatörler kullanılmıştır. Rezonatörler ayrık bölgelerinden birleştirilerek akım iletken hat üzerinde toplanmak istenmiştir. Böylelikle daha az devre elemanı kullanılmıştır. Şekil 36'da görülen yapıda 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 tanδ değeri 0,0009 olan Rogers RT5880 kullanılmıştır. Söz konusu alttaşlar tanδ değerinin etkisini incelemek için karşılaştırılmıştır. Ancak dielektrik malzeme kalınlığı olarak kullanılan 4 mm değeri Rogers RT5880 malzemesinin piyasada olmayan bir değeri olup sadece alttaş malzemesinin etkisini değerlendirmek amacıyla analiz edilmiştir.



(a) (b)

Şekil 38. (a) Tasarlanan birim hücre yapısı (T7) (b) yapının elektrik alan yönelimi.

Şekil 38a.'da görülen a parametresi birim hücrenin kenar uzunluğunu, b parametresi 0,9 GHz frekansında hasatlama yapması için tasarlanan ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğunu, w_1 ise iletken kısmın genişliğini ifade etmektedir ve bunların değerleri sırasıyla 45,5 mm ve 45,0 mm ve 1,2 mm'dir. 1.8 GHz için tasarlanan ayrık halka rezonatörün kenar uzunluğunu c, iletkenin genişliğini ise w_2 temsil etmektedir ve bu parametrelerin değerleri sırasıyla 33,9 mm ve 0,8 mm'dir. Ayrık halka rezonatörlerin bileştirildiği iletken şeridin kalınlığını t, ayrığın genişliğini ise g temsil etmektedir ve sırasıyla 2 mm ve 2 mm'ye karşılık gelmektedir. Birim hücredeki d parametresi 2,6 GHz'de hasatlama yapması için tasarlanan ayrık halka rezonatörün kenar uzunluğunu, w_3 ise halkanın genişliğini temsil etmektedir ve değerleri sırasıyla 24,6 mm ve 1,9 mm'dir. 5,8 GHz frekansı için tasarlanan ayrık halka rezonatörün kenar uzunluğunu e, iletken kısmın genişliğini ise w_4 temsil etmektedir ve sırasıyla 9,5 mm ve 1,1 mm'ye karşılık gelmektedir. Rezonatörlerin ayrık bölgesine devre elemanı olarak bağlanan dirençleri R_1 ve R_2 temsil etmektedir ve değerleri sırasıyla 5 Ω ve 100 Ω'dur. Alttaş olarak kullanılan Teflon ve Rogers RT5880'nin kalınlığı d_r olarak ifade edilmiştir ve değeri 4 mm olarak belirlenmiştir. Arka katmanda toprak düzlem olarak kullanılan bakır plakanın ve rezonatörlerin kalınlığı d_c olarak ifade edilmiştir ve değeri 0.035 mm'dir.

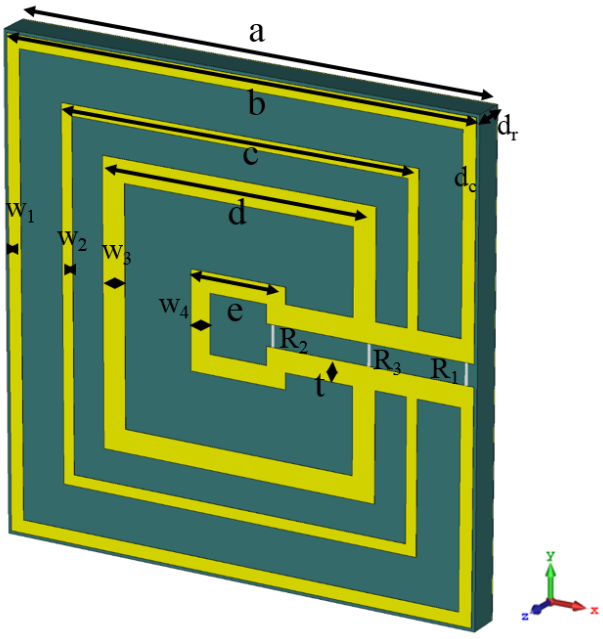


Şekil 39. Farklı alttaşlar kullanılarak elde edilen devre elemanı üzerinde harcanan güç.

Şekil 39'da görüldüğü gibi tanδ değeri daha düşük olan Teflon malzemesinde yapıya gelen EM dalga daha fazla oranda yapıya bağlanan devre elemanı üzerinde harcanmaktadır. Yapıda istenilen frekanslara yakın bölgelerde rezonanslar meydana gelse de yeterli bulunmamıştır.

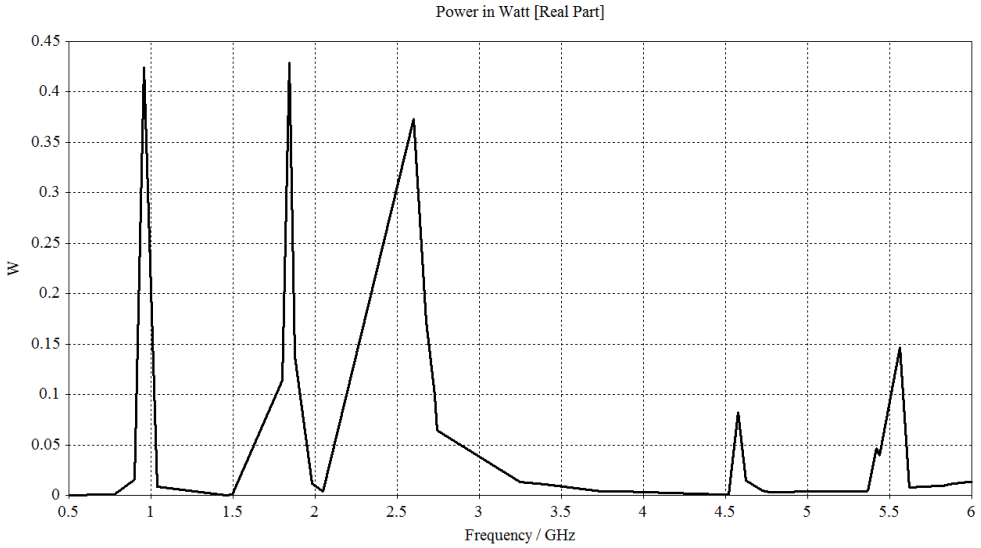
4.3.4 Tasarım T8-2

Tasarım T8'de 2,6 GHz ve 5,8 GHz'de birim hücreye entegre edilen devre elemanları üzerindeki harcanan gücün yetersiz olması nedeni ile yapıda harcanan güce destek vermesi için yapıya bir adet devre elemanı daha eklenmesine karar verildi. Bu bağlamda yapıda indüklenen akımı toplamak için tasarlanan iki devre elemanının bağlı olduğu iletken şeride Şekil 40'da görüldüğü gibi bir devre elemanı daha eklenmiştir.



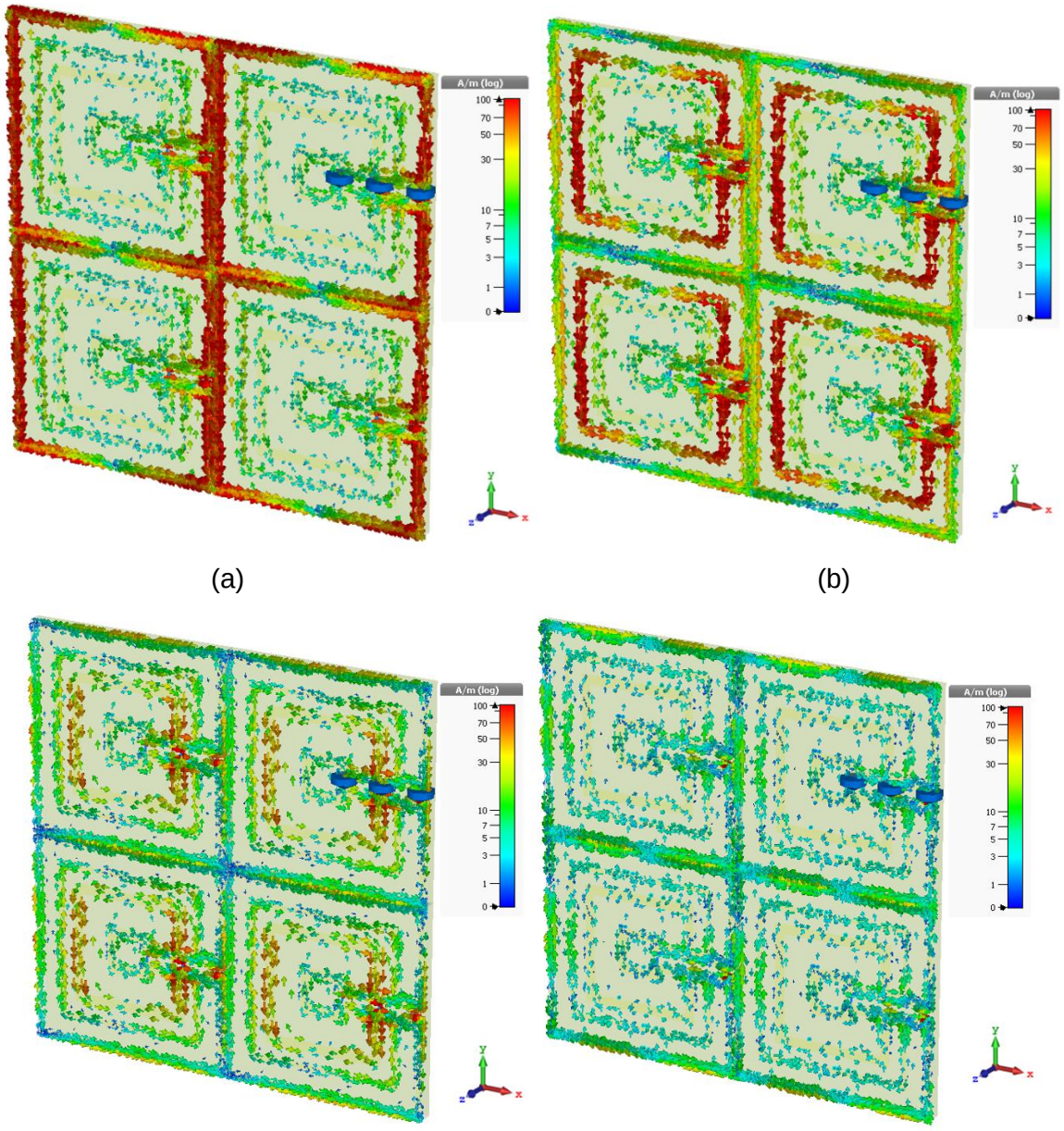
Şekil 40. Tasarım t7-2'ye ait birim hücre görüntüsü.

Şekil 40'da görülen a parametresi birim hücrenin kenar uzunluğunu, b parametresi 0,9 GHz frekansında hasatlama yapması için tasarlanan ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğunu, w_1 ise iletken kısmın genişliğini ifade etmektedir ve bunların değerleri sırasıyla 45 mm ve 44,4 mm ve 1,2 mm'dir. 1,8 GHz için tasarlanan ayrık halka rezonatörün kenar uzunluğunu c, iletkenin genişliğini ise w_2 temsil etmektedir ve bu parametrelerin değerleri sırasıyla 33,9 mm ve 1 mm'dir. Birim hücredeki d parametresi 2,6 GHz'de hasatlama yapması için tasarlanan ayrık halka rezonatörün kenar uzunluğunu, w_3 ise halkanın genişliğini temsil etmektedir ve değerleri sırasıyla 26 mm ve 2,1 mm'dir. 5,8 GHz frekansı için tasarlanan ayrık halka rezonatörün kenar uzunluğunu e, iletken kısmın genişliğini ise w_4 temsil etmektedir ve sırasıyla 10 mm ve 2 mm'ye karşılık gelmektedir. Ayrık halka rezonatörlerin bileştirildiği iletken şeridin kalınlığını t, ayrığın genişliğini ise g temsil etmektedir ve sırasıyla 2 mm ve 2,2 mm'ye karşılık gelmektedir. Rezonatörlerin ayrık bölgesine devre elemanı olarak bağlanan dirençleri R_1, R_2 ve R_3 temsil etmektedir ve değerleri sırasıyla 5 Ω ve 100 ve 20 Ω'dur. Yapının uyarım yönü ise tasarım T7 ile aynı olup yapı elektriksel olarak uyarılmıştır. Bu değerlere karşılık gelen birim hücrede harcanan güç grafiği ise Şekil 41'de verilmiştir.



Şekil 41. Devre elemanları üzerinde harcanan güç.

Yapılan parametrik analizler sonucu elde edilen en iyi sonuç Şekil 41'de verilmiştir. Öngörüldüğü gibi 2,6 GHz'de devre elemanları üzerinde harcanan güç artmıştır. Ancak 5,8 GHz'de benzer bir artış gerçekleşmemiştir. Benzetim ortamında yapı 0,5 W değerinde güç ile uyarılmıştır. Uyarılma gücü üzerinden AC akıma dönüşerek dirençler üzerinde harcanan gücün oranı hesaplandığında projede hedeflenen 0,9 ve 1,8 GHz frekanslarına oldukça yakın değerler bulunmuştur. 0,95 GHz'de devre elemanları üzerinde harcanan güç yaklaşık %84,8 iken 1,85 GHz'de söz konusu değer %85 civarındadır. 2,6 GHz'de devre elemanları üzerinde harcanan güç yaklaşık %75,5 civarındandır. 5,8 GHz'de ise kayda değer bir sonuç alınamamıştır.

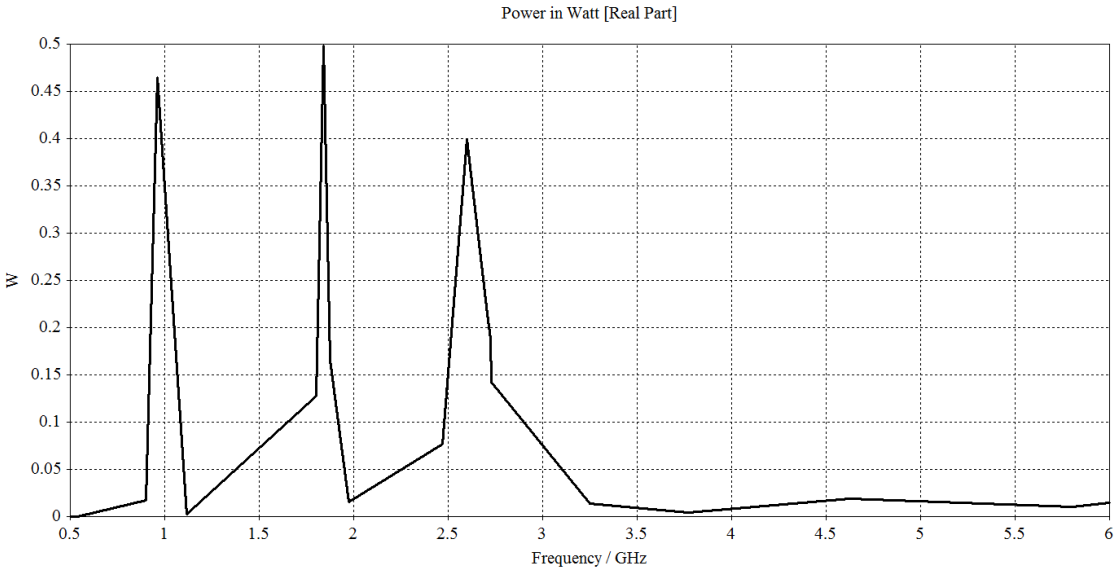


(a) (b)

(c) (d)

Şekil 42. Birim hücrede indüklenen akıma ait yüzey akım dağılımları a) 0,95 GHz için b) 1,85 GHz için c) 2,6 GHz için d) 5,8 GHz için.

Şekil 42'de görülen yüzey akım dağılımlarından anlaşıldığı gibi 0,95 GHz, 1,85 GHz ve 2,6 GHz frekanslarında yapı rezonatif etki gösterirken 5,8 GHz yapıda kayde değer bir rezonans ve buna bağlı olarak yüzeyde indüklenen akımda kayda değer bir veri elde edilememiştir. Bundan dolayı 5,8 GHz'de hasatlama işlemi gerçekleşmemiştir.

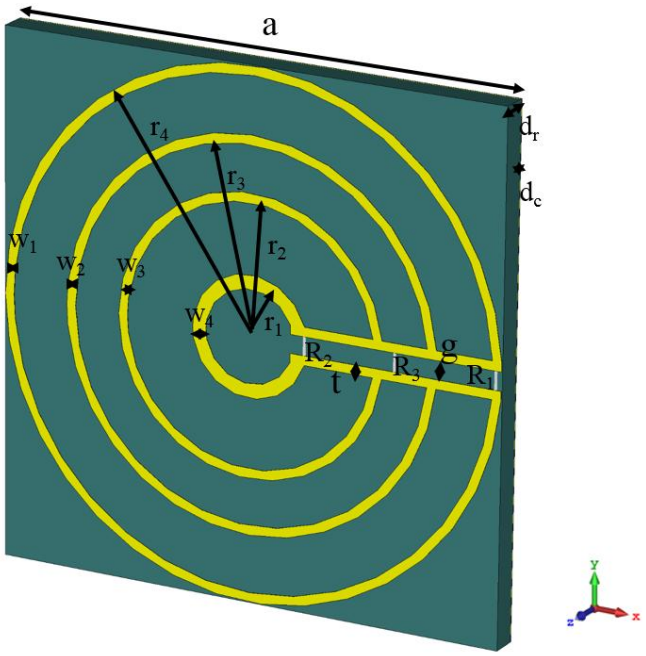


Şekil 43. Benzetim ortamında birim hücrede hapsedilen güç.

Şekil 43'de görüldüğü gibi benzetim ortamında rezonans frekanslarında (0,95 GHz, 1,85 GHz ve 2,6 GHz) birim hücreye hapsedilen güç benzetim ortamındaki elektromanyetik dalganın gücüne (0,5 W) oldukça yakınken 5,8 GHz'de birim hücrede hapsedilen güç nerdeyse sıfırdır. Bunun nedeni olarak yapının 5,8 GHz frekansındaki empedansın havanın empedansı (377 ohm) uyuşmamasından kaynaklanmaktadır. Empedans uyumunu sağlamak için yapıda değişiklikler yapılması gerekmektedir. Bundan sonraki tasarım adımlarında bu problemi çözmeye yönelik adımlar atılmıştır.

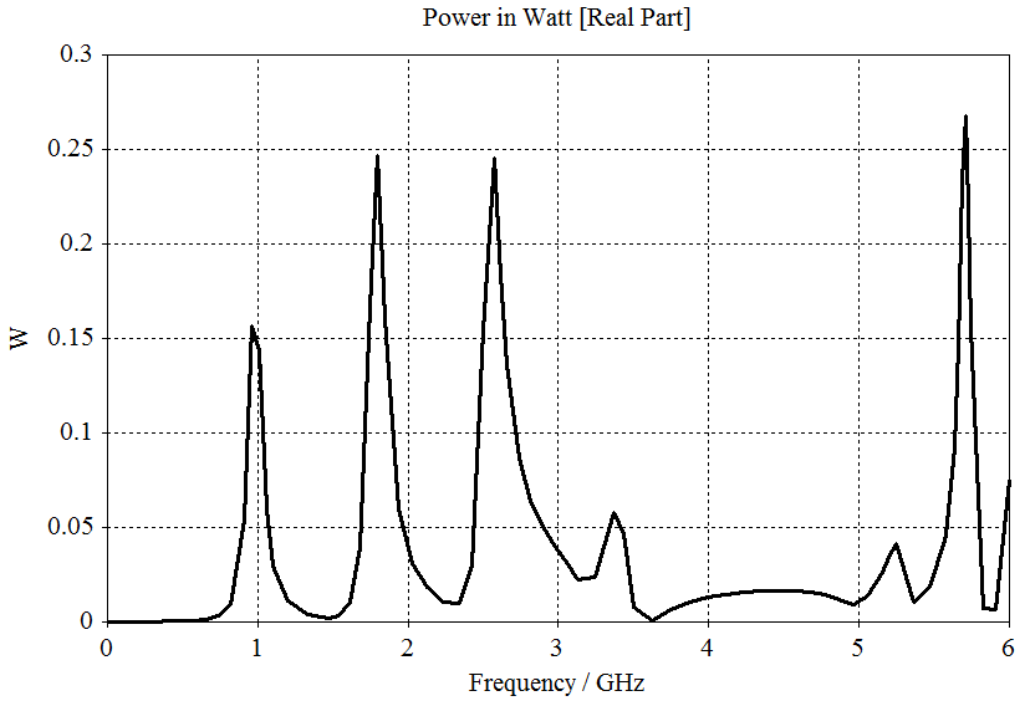
4.3.5 Tasarım T9

Birim hücrede 4 bantlı hastlama işlemi yapmak için kare halka rezonatörler yerine daha geniş bant genişliğine sahip olacağı için halka Şekil 44'deki gibi iç içe geçmiş halka rezonatörler tasarlanmıştır. Halka rezonatörler tasarım T8-2'de olduğu gibi ayrık bölgelirinden iletken ile birleştirilmiş ve üç adet devre elemanı ile hasatlama yapılmak istenmiştir.



Şekil 44. Tasarım T9'a ait birim hücre.

Şekil 44'de görülen yapının birim hücre boyutunu temsil eden a değerinin karşılığı 56,4 mm'dir. 0,9 GHz'de hasatlama yapması için tasarlanan en dıştaki halkanın yarıçapını r_4, halka rezonatörün kalınlığını ise w_4 temsil etmektedir ve bunların değerleri sırası ile 42 mm ve 1 mm'dir. 1,8 GHz'de hasatlama yapması için tasarlanan halka rezonatörün yarıçapını r_3, kalınlığını ise w_3 temsil etmektedir ve bunların değerleri sırasıyla 30 mm ve 1 mm'dir. 2,6 GHz'de hasatlama yapması için tasarlanan ayrık halka rezonatörün yarıçapını r_2, kalınlığını ise w_2 temsil etmektedir ve bunların değerleri sırasıyla 30 mm ve 1 mm'dir. En iç kısımdaki halka rezonatör ise 5,8 GHz'de hasatlama yapması için tasarlanmış olup r_1 yarıçapını, w_1 ise kalınlığını temsil etmektedir ve değerleri sırasıyla 13 mm ve 1,5 mm'dir. Şekil 44'de halka rezonatörlerin ayrık kısmının genişliğini g, birim hücrede indüklenen akımı toplamak için eklenen hattın kalınlığını ise t temsil etmektedir ve bunların değerleri sırasıyla 2 mm ve 1mm'dir. Birim hücrede elektromanyetik dalganın soğurulması ile indüklenen akımı hasatlamak için kullanılan devre elemanları R_1, R_2 ve R_3 temsil etmektedir ve bunların değerleri sırasıyla 70 ohm 15 ohm ve 90 ohm olarak belirlenmiştir.

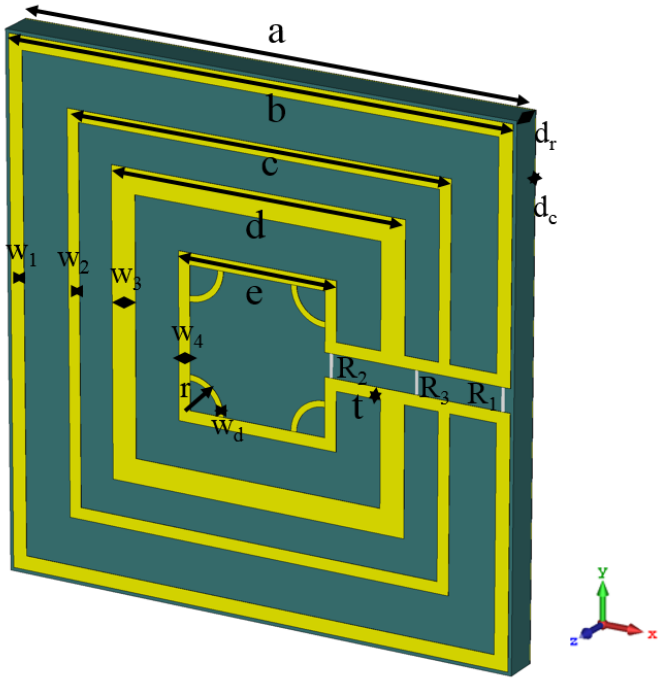


Şekil 45. Devre elemanları üzerinde harcanan güç.

Tasarım T9 üzerinde gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen en iyi sonuç Şekil 45'de verilmiştir. Benzetim ortamından birim hücrenin uyarıldığı EM dalganın gücü 0,5 W olduğu düşünüldüğünde verimlilik çok düşük seviyelerde kalmıştır. Düşük verim problemini çözmek için daha fazla analiz gerçekleştirilebilirdi ancak birim hücrenin boyutu 5,8 GHz'e karşılık gelen dalga boyundan (yaklaşık 51 mm) daha büyük olması ve bu nedenle dalga boyu altı malzeme olma özelliğinin sağlanamamasından dolayı tasarım T9'un analizlerine devam edilmedi.

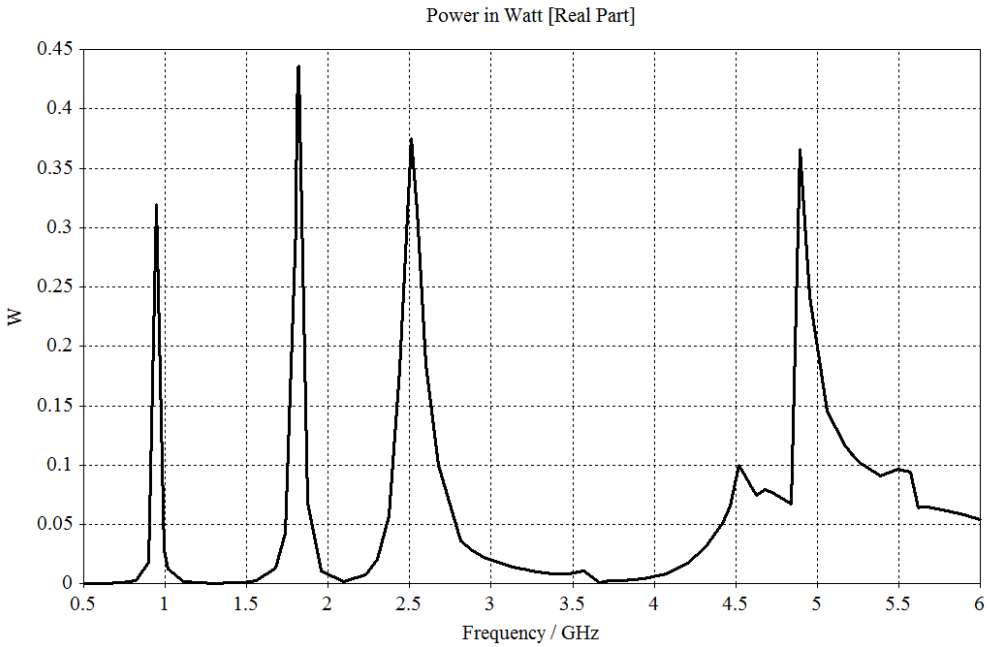
4.3.6 Tasarım T10

T8 tasarımının analizleri sonucunda elde edilen verilerden yola çıkılarak 5,8 GHz frekansı için değişiklikler yapılmıştır. Tasarım T8'deki yapıda başlık altında anlatıldığı gibi en içteki halka rezonatör 5,8 GHz frekansında tepki vermesi için tasarlanmıştı ancak yapılan parametrik analizler sonucunda, en içteki halka rezonatörün boyutları ile onandığı zaman birim hücrede indüklenen akımı toplayabilmek için tasarlanan iletken şeridin boyutları ile ister istemez oynanması gerekmektedir. İletken şeridin boyutları değiştiği zaman ise yapıdaki tüm frekansların rezonans piklerinde kaymalar meydana gelmektedir. Ayrıca 5,8 GHz için birim hücrede herhangi bir soğurma ve hasatlama gerçekleştirilememesi söz konusu frekans için yapı üzerinde empedans eşleşmesi için (hava ile) yapı üzerinde değişiklikler yapılması gerekmektedir. Karşılaşılan bu durumlar sonrasında tasarlanan birim hücre yapısında 5,8 GHz frekans bandı için ek bir yapı eklenmesinin faydalı olacağı düşünülmüştür. Bu çerçevede Şekil 46'da görüldüğü gibi en içteki ayrık kare halka rezonatöre dört adet çeyrek halka rezonatör eklenmiştir.



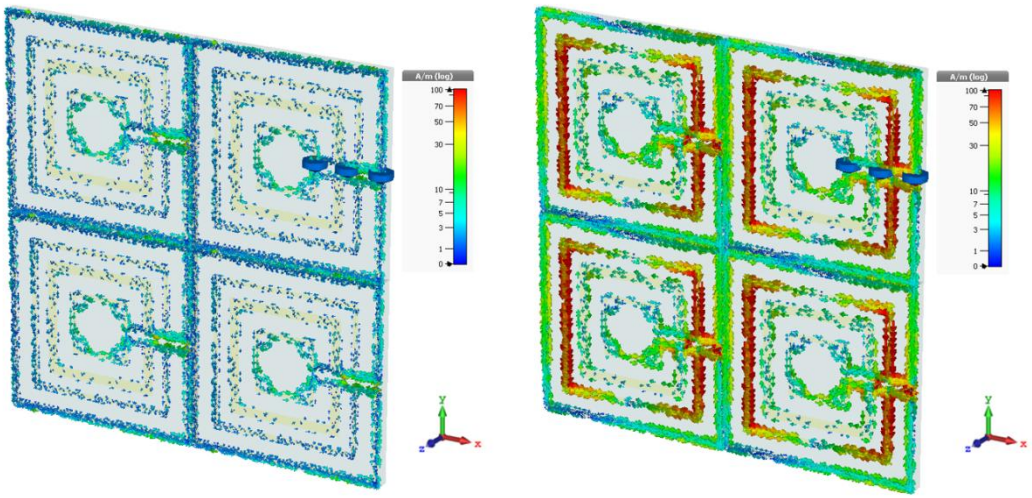
Şekil 46. Tasarım T10'a ait birim hücre.

Şekil 46'da görülen birim hücrenin kenar uzunluğu a ile ifade edilmiştir ve değeri 45 mm'dir. 0,9 GHz'de tepki vermesi için tasarlanan en dıştaki kare ayrık halka rezonatörün kenar uzunluğu b, genişliği ise w_1 ile ifade edilmiştir ve değerleri sırasıyla 44,4 mm ve 1,2 mm'dir. 1,8 GHz'de tepki vermesi için tasarlanan kare ayrık halka rezonatörün kenar uzunluğu c, genişliği ise w_2 ile ifade edilmiştir ve bunların değerleri sırasıyla 33,9 mm ve 1 mm'dir. 2,6 GHz'de tepki vermesi için tasarlanan kare halka rezonatörün kenar uzunluğu d, genişliği ise w_3 ile ifade edilmiştir ve bunların değerleri sırası ile 26 mm ve 2,1 mm'dir. 5,8 GHz'de tepki vermesi için tasarlanan en içteki kare ayrık halka rezonatörün kenar uzunluğu e, genişliği ise w_4 ile ifade edilmiştir ve bunların değerleri sırasıyla 14 mm ve 1 mm'dir. en içteki kare halka rezonatöre eklenen çeyrek halka rezonatörlerin yarı çapı r, genişliği ise w_d ile ifade edilmiştir ve bunların değerleri sırasıyla 2,5 mm ve 0,5 mm'dir. alttaş olarak kullanılan PTFE'nin kalınlığı d_r ile iletken kısım için kullanılan bakırın kalınlığı d_c ile ifade edilmiştir ve bunların değerleri sırasıyla 4 mm ve 0.035 mm'dir. Birim hücrede soğurulan EM dalga ile yapı üzerinde indüklenen akımı hasatlamak için yapıya entegre edilen devre elemanları R_1, R_2 ve R_3 ile ifade edilmiştir ve bunların değerleri sırasıyla 5 ohm, 100 ohm ve 20 ohm'dur.

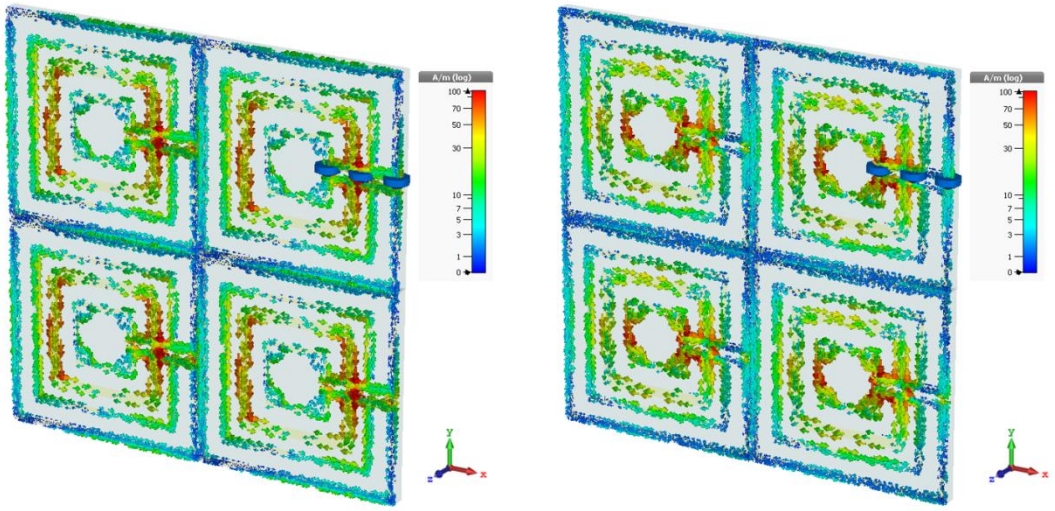


Şekil 47. Tasarım T10 üzerinde devre elemanları üzerinde harcanan güç.

CST Microwave Studio benzetim programında gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda projede hedeflenen frekans bantlarına yakın değerlerde elde edilen devre elamanı üzerinde harcanan güç grafiği Şekil 47'de verilmiştir. Benzetimlerde periyodik sınır koşulları seçilip birim hücre elektriksel olarak uyarılmıştır. 0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz'e yakın değerlerde veriler elde edilirken 5,8 GHz için hedeften uzak kalındığı görülmektedir. Yapılan birçok parametrik analizin ardından elde edilen en iyi sonuçların verildiği Şekil 47'deki grafiğe göre elde edilen hasatlama verimlilikleri kullanılarak, benzetim programında kullanılan EM dalganın gücünün 0,5 W olduğu durum için hesaplanmıştır. Bu duruma göre 0,94 GHz'de %64 verimlilik elde edilmişken 1,82 GHz'de %87,3 elde edilmiştir. Diğer bandlarda ise 2,51 GHz'de %74,9 verimlilik hesaplanmışken 4,9 GHz'de %73 olarak hesaplanmıştır. Söz konusu dört bantta ki ortalama verimlilik ise %74,8 olarak hesaplanmıştır.



(a) (b)



(c) (d)

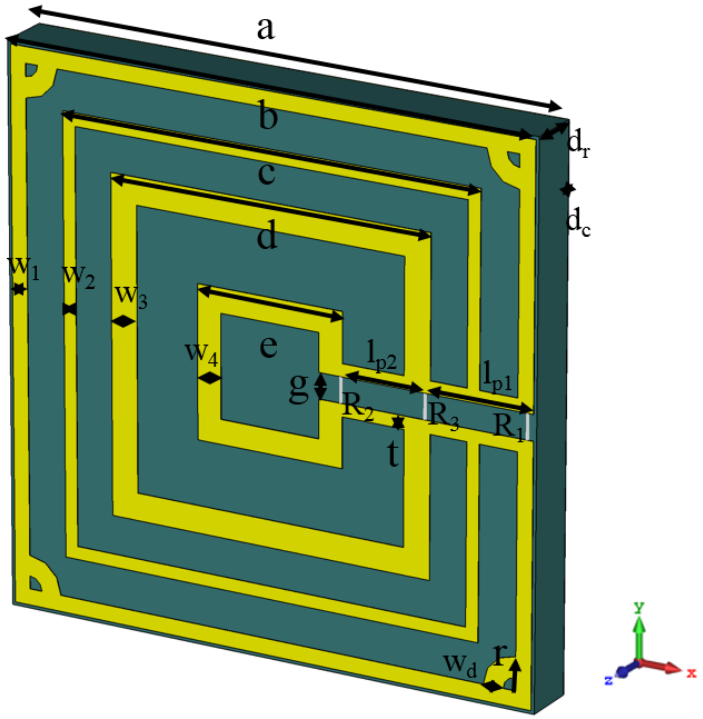
Şekil 48. Birim hücrede indüklenen akımlar (a) 0,94 GHz'de (b) 1,82 GHz'de (c) 2,51 GHz'de (d) 4,9 GHz'de.

Şekil 48'de görüldüğü gibi her bir frekans için tasarlanan kare halka rezonatörlerden indüklenen akımlar devre elemanlarının bulunduğu bölgede birikmektedir. Ancak 0,94 GHz'de en dıştaki kare halka rezonatörün yanında en içte bulunan kare halka rezonatörden de tepki gelmektedir. Ancak 0,9 GHz için en içteki halka ile devre elamanlarının bağlı olduğu iletken kısım arasında empedans uyuşmazlığı olduğu için burada indüklenen akım devre elemanlarına ulaşmadan kendi içinde kısa devre yapmaktadırlar. Tasarım T8-2'de öngörülen 5,8 GHz için birim hücre üzerinde bir yapı eklenmesi düşüncesinin söz konusu frekans için geçerli olduğu görülmektedir. En iç kısımdaki kare halka rezonatöre eklenen dört adet çeyrek halka rezonatörden Şekil 48 d'de görüldüğü gibi katkı gelmektedir.

Yapılan parametrik analizler ve bunların incelenmesinin ardından Şekil 47'de görülen 4,9 GHz'deki tepki hedef frekans olan 5,8 GHz'e kaydırılmaya çalışılmıştır. Ancak yapılan denemeler ve analizler sonucunda rezonans frekansı hedef frekansa çekilememiştir. Hedef frekansı yukarı çekmek için yapılan çalışmalarda, rezonans frekansının genliğinde azalmalar meydana gelmiştir. Bu durum rezonans frekansının yok olmasına neden olmuştur. Tasarım T8-2'de meydana gelen havanın empedansı (377 ohm) ile uyuşmazlık tekrar gözlemlenmiştir.

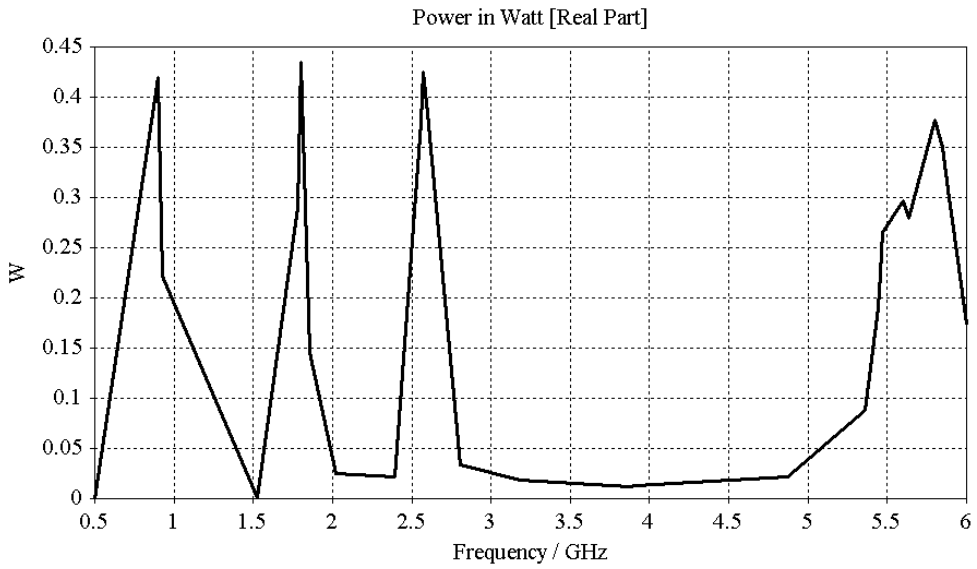
4.3.7 Tasarım T11

Hedef frekanslardan biri olan 5,8 GHz'deki soğurma ve hasatlama problemini çözebilmek için yeni çalışmalar yapılmıştır. Birim hücre yapısında daha önceki tasarımlarda incelenen akım dağılımlarında 5,8 GHz'deki rezonansa katkı verdiği belirlenen, en dış kısımda bulunan ayrık kare halka rezonatöre Şekil 49'da görüldüğü gibi çeyrek halka rezonatörler entegre edilmiştir.



Şekil 49. Tasarım T11'e ait birim hücre görüntüsü.

Birim hücrenin kenar uzunluğu Şekil 49'da görüldüğü gibi a ile ifade edilmiştir ve değeri 43 mm'dir. 0,9 GHz'de tepki vermesi için tasarlanan en dıştaki ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğu b, genişliği ise w_1 ile ifade edilmiştir ve değerleri sırasıyla 42,5 mm ve 1,25 mm'dir. 1,8 GHz'de tepki vermesi için tasarlanan ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğu c, genişliği ise w_2 ile gösterilmiştir ve bunların değerleri sırasıyla 33,9 mm ve 1 mm'dir. 2,6 GHz'de tepki vermesi için tasarlanan kare halka rezonatörün kenar uzunluğu d, genişliği ise w_3 ile gösterilmiştir ve bunların değerleri sırası ile 26 mm ve 2,1 mm'dir. 5,8 GHz'de tepki vermesi için tasarlanan en içteki kare ayrık halka rezonatörün kenar uzunluğu e, genişliği ise w_4 ile ifade edilmiştir ve bunların değerleri sırasıyla 11,8 mm ve 1,9 mm'dir. En dış kısımdaki ayrık kare halka rezonatöre eklenen çeyrek halka rezonatörlerin yarı çapı r, genişliği ise w_d ile ifade edilmiştir ve bunların sayısal karşılığı sırasıyla 2,6 mm ve 1,6 mm'dir. alttaş olarak kayıp tanjant değeri (tanδ=0,0002) en düşük malzemelerden bir olan PTFE kullanılmıştır. Kullanılan alttaşın kalınlığı ise d_r ile iletken kısım için kullanılan bakırın kalınlığı d_c ile ifade edilmiştir ve bunların değerleri sırasıyla 4 mm ve 0.035 mm'dir. Birim hücrede soğurulan EM dalga ile yapı üzerinde indüklenen akımı hasatlamak için yapıya entegre edilen devre elemanları R_1, R_2 ve R_3 ile ifade edilmiştir ve bunların değerleri sırasıyla 240 ohm, 40 ohm ve 15 ohm'dur. İletken hatta entegre edilen devre elemanlarından R_3 söz konusu hattın ortasında bulunmaktadır. Şekil 47'de görüldüğü gibi orta noktadan (merkezde bulunan R_3 konumundan) l_{p1} kadar uzaklığa R_1, l_{p2} kadar uzaklığa R_2 devre elemanları eklenmiştir ve uzaklıkların sayısal değerleri sırasıyla 8,2 mm ve 6,8 mm'dir.



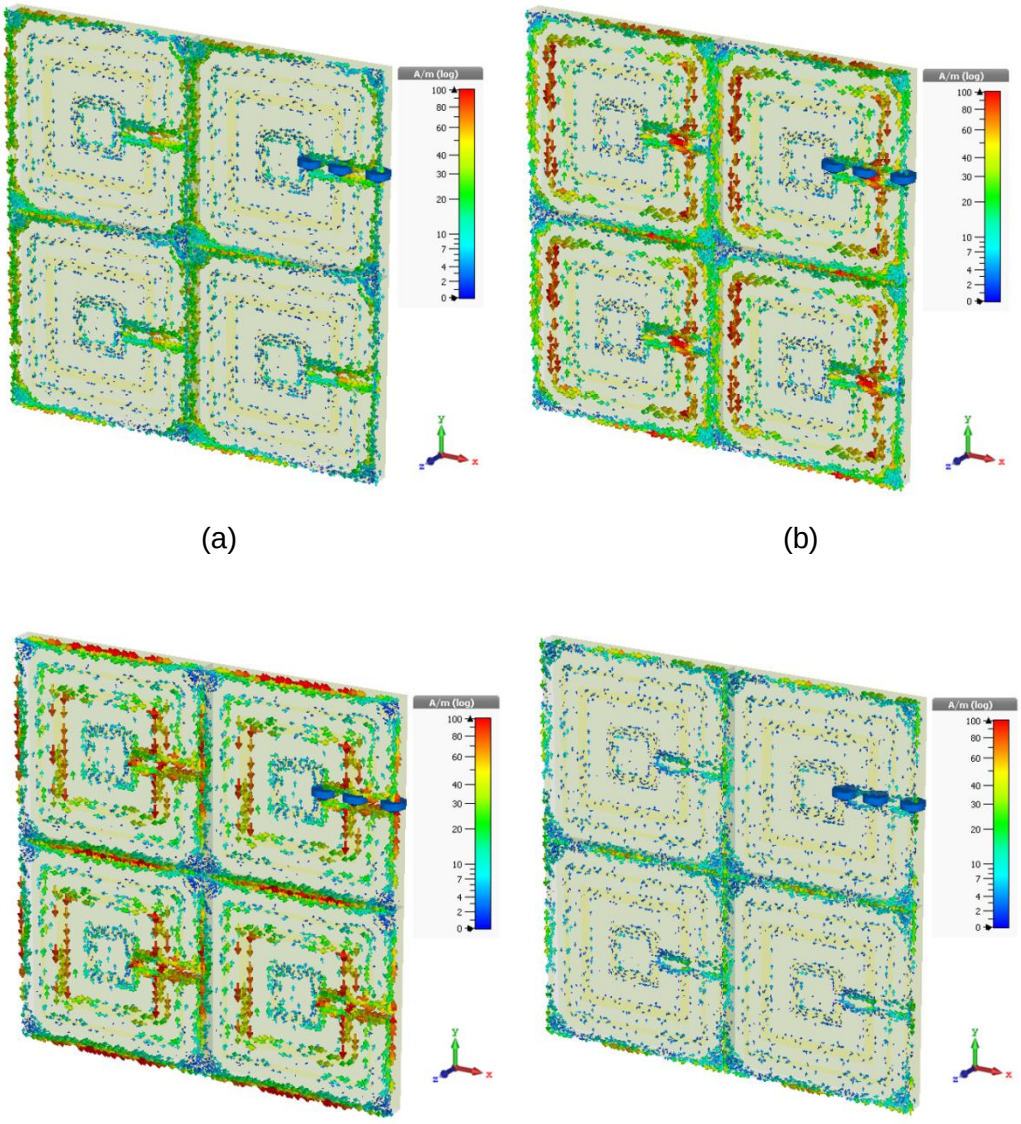
Şekil 50. Devre elemanları üzerinde harcanan güç.

CST microwave studio benzetim programında gerçekleştirilen parametrik analizler sonucunda elde edilen devre elemanları üzerinde harcanan güç grafiği Şekil 50'de verilmiştir. Benzetim ortamından birim hücreyi uyarmak için kullanılan EM dalganın gücü 0,5 W olarak belirlenmiştir. Bu değer üzerinden yapılan verimlilik hesabı ise Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Tasarım T11'e 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			

Tablo 1'de görüldüğü gibi projede hedeflerinden biri olan tek bir birim hücrede dört bantta %75 verimlilik hedefi ortalama %80,83 verimlilikle elde edilmiştir. Şekil 51'de verilen yüzey akım dağılımlarında görüldüğü gibi aslında 5,8 GHz'e katkı vermesi için tasarlanan en dıştaki kare halka rezonatörün köşelerine eklenen çeyrek halka rezonatörler tüm rezonans frekanslarına küçük katkılar yapmaktadır.



(a) (b)

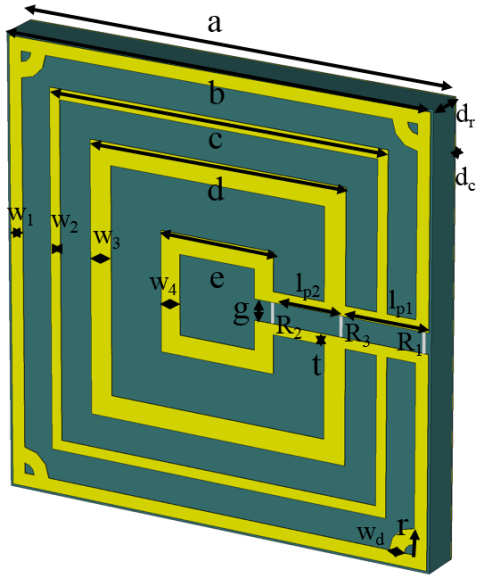
(c) (d)

Şekil 51. 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.

Tasarım T11'den elde edilen sonuçlardan sonra üretime geçilmesi devre elemanlarının temin sürecine geçilmiştir. Ancak yurt içinden temin edilmek istenen tasarım T11'de bulunan devre elemanlarına ulaşılamamıştır. Bunun üzerine elde edilen devre elemanları üzerinden tekrar parametrik analizlere geçilmesi zorunluluğu ortaya çıkmıştır.

4.3.8 Tasarım T11-2

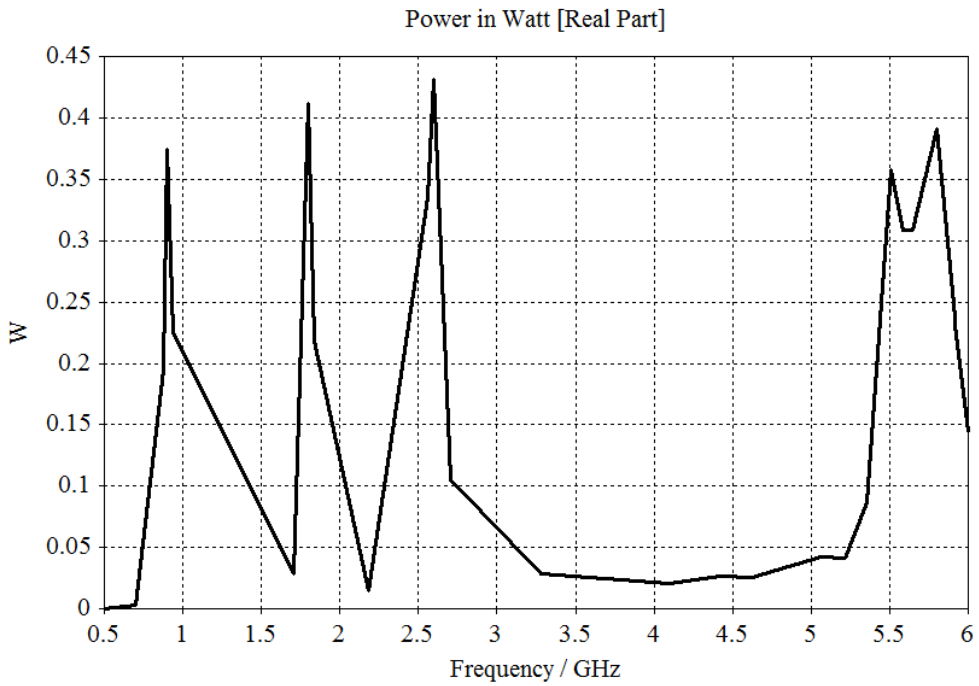
Tasarım T11'de elde edilen birim hücre geometrisinin üzerinden temini sağlanan devre elemanları üzerinden parametrik analizler yapılmıştır. Ancak ilk önce devre elemanları ile sınırlı tutulan analizlerde istenilen sonuçlar elde edilemediği için ayrık halka rezonatörler de parametrik analizlere dahil edilmek zorunda kalınmıştır. Bu durum benzetim ortamında ki çalışmaların uzamasına neden olmuştur. Son olarak elde edilen birim hücrenin geometrisi Şekil 49'da gösterilen birim hücre ile aynı olmasına rağmen boyutlarında farklılıklar bulunmaktadır.



(a)

Şekil 52. Tasarım T11-3'e ait birim hücre görüntüsü.

Yapıda tasarım T11'e göre alttaş olarak kullanılan teflon ve iletken olarak kullanılan bakır özelliklerinde herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Şekil 52'de görülen a birim hücrenin kenar uzunluğunu temsil etmektedir ve değeri 43 mm'dir. En dış kısımdaki ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğu b, genişliği ise w_1 ile ifade edilmiştir ve değerleri sırasıyla 42,5 mm ve 1,25 mm'dir. 1,8 GHz frekansında tepki vermesi için tasarlanan ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğunu c, genişliğini ise w_2 temsil etmektedir ve bunların değerleri sırasıyla 34,2 mm ve 1mm'dir. 1,8 GHz frekansında rezonans vermesi için tasarlanan ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğu d, genişliği w_3 ile gösterilmiştir ve bunların değerleri sırasıyla 25,9 mm ve 2,1 mm'dir. En iç kısımdaki rezonatörün kenar uzunluğunu ifade eden e ve genişliğini ifade eden w_4'ün değerleri ise sırasıyla 11,8 mm ve 1,9 mm'dir. en dış kısımdaki halkanın köşelerine yerleştirilen çeyrek halka rezonatörün yarıçapı r genişliği ise w_d olmak üzere değerleri sırasıyla 2,5 mm ve 1,5 mm'dir. ayrık halka rezonatörlerin birleştirildikleri iletken kısmın genişliğine karşılık gelen t'nin sayısal karşılığı ise 1 mm'dir. ayrık bölgesinin genişliğini temsil eden g'nin değeri 2 mm'dir. R_3 devre elemanının bağlandığı kısım iletken hattın tam ortası olmak ile birlikte lp_1, R_1 'in merkezden olan uzaklığını 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 53. Devre elemanı üzerinde harcanan güç.

CST microwave studio benzetim programında gerçekleştirilen tasarım T11-2'ye ek parametrik analizler sonucunda elde edilen devre elemanları üzerinde harcanan güç grafiği Şekil 53'de verilmiştir. Benzetim ortamından birim hücreyi uyarmak için kullanılan EM dalganın gücü 0,5 W olarak belirlenmiştir. Söz konusu değer üzerinden yapılan verimlilik hesabı ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Tasarım T11-2'ye 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 analizlerin ardından elde edilen değerler projede hedeflenen ortalama %75 verimlilikten yukarıda bir oran ile elde edilmesinden sonra üretim aşamasına geçilmiştir. Yurt içinden ve yurt dışından 35 µm kalınlıkta her iki yüzü bakır kaplı 4 mm kalınlığında (verimliliğin en yüksek bulunduğu kalınlık) teflon (politetrafloroetilen) alttaş temin edilemediği için yurt içinden ancak kaplamasız PTFE temin edilmiştir. Daha sonra 35 µm kalınlığa sahip bakır bant temin edilmiştir. Bakır bantımız yeterince geniş olmadığından, yekpare yapıştırmak yerine birim hücre boyutunda kare parçalar kesilerek alttaş üzerine Şekil 54.a'da olduğu gibi yapıştırılmıştır. Yapıştırılan parçaların ek yerleri birim hücreler arasında bırakılan boşluklara denk gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Fotolitografi yöntemi ile üretimi gerçekleştirilen metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı Şekil 54.b'de gösterilmektedir.

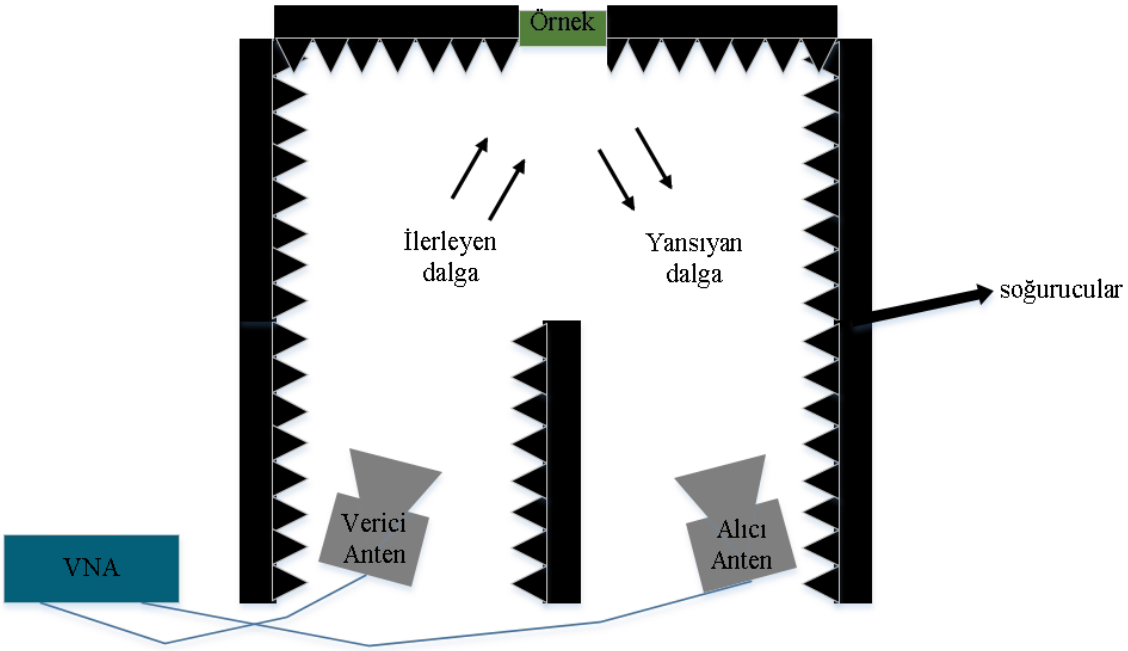
Yansıma (S_{11}) ölçümlerin gerçekleştirildiği deney düzeneği genel görünümü Şekil 55'de

verilmiştir. Örneğin ölçüleceği alan mikrodalga soğurucular ile çevrelenerek elektromanyetik girişim etkileri minimize edilmiştir. Verici antenden gönderilen elektromanyetik dalgalar örnekten yansıtılarak alıcı antenden yansıma spektrumu verileri network analizörü aracılığı ile alınmıştır. Fakat, öncelikle örnek yerine bakır plaka yerleştirilerek ortam kalibre edilmiştir ve bakırdan yansıyan tüm elektromanyetik dalgalar 0 dB'ye çekilmiştir (tam yansıma).



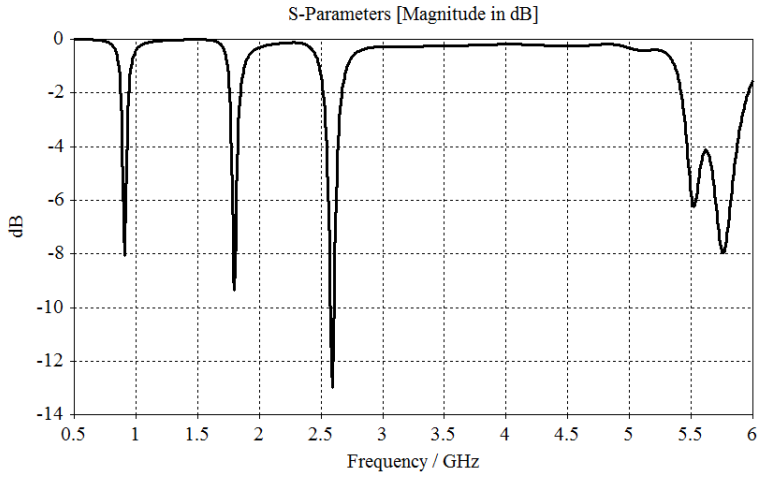
(a) (b)

Şekil 54. Üretilen metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı yapısı (a) üretilmeden önce (b) üretildikten sonra.

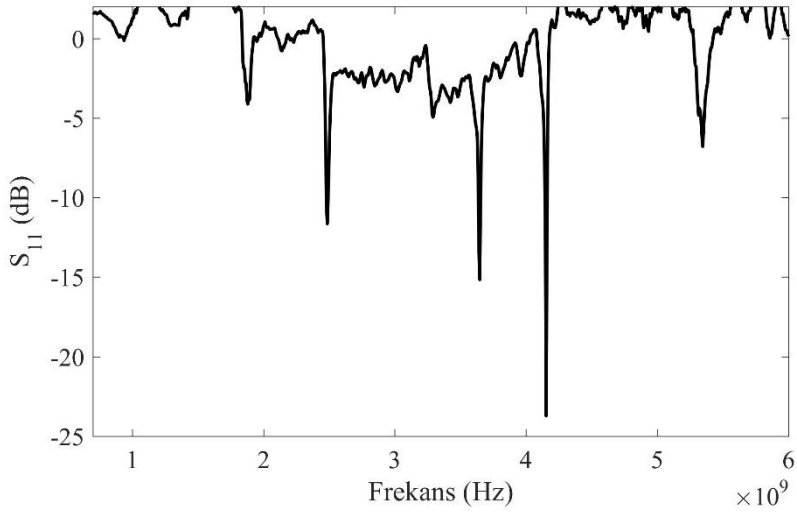


Şekil 55. Ölçüm düzeneğin genel bir çizimi.

Şekil 54.b'de görüldüğü gibi 9x9 dizi şekilinde üretilen metamalzeme yapısında hassas bir üretim gerçekleştirilememiştir. Çeyrek halka rezonatörlerin orta boşluklarında meydana gelen aşınmamıştır. Asıl problem ise birim hücrelerin birbirine temas etmesidir. Bu durumda dizi şeklinde bir yapıdan söz etmek çok zorlaşacak yapı tek parça gibi davranacaktır. Sonuç olarak benzetim ortamında aldığımız tepkileri söz konusu yapıdan alabilmemiz mümkün gözükmemiştir.



(a)



(b)

Şekil 56. Tasarım T11-2'ye ait S11 grafikleri (a) benzetim ortamında (b) ölçüm.

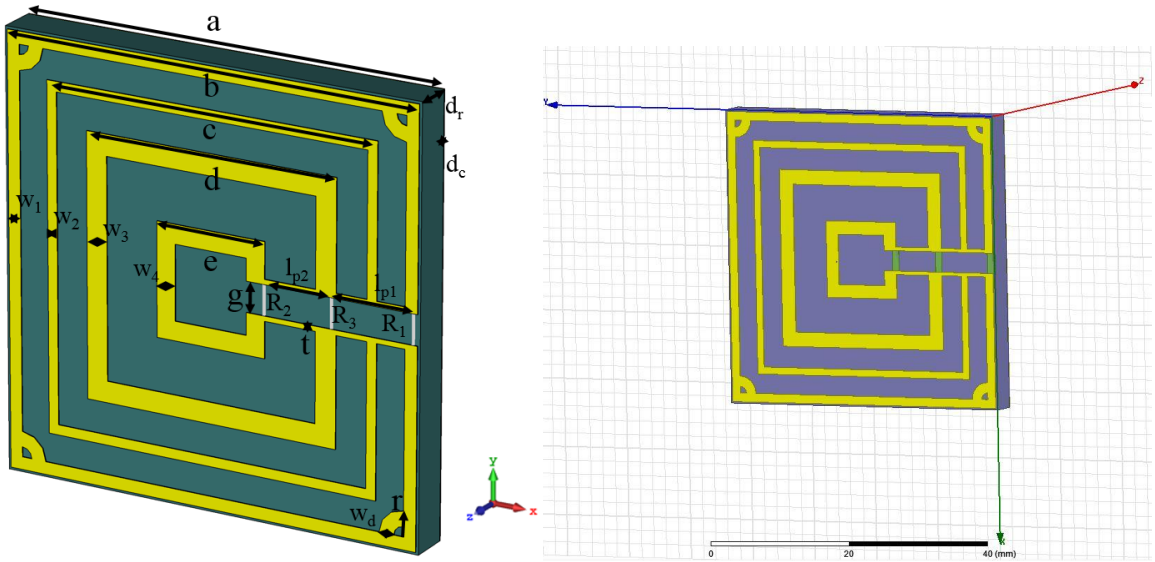
Şekil 56.a'da görüldüğü gibi benzetim ortamında proje kapsamında hedeflenen frekanslarda soğurma gerçekleşmektedir. Ancak Şekil 65.b'de görüldüğü gib ölçüm sonuçlarında aynı davranış elde edilememiştir. Yukarıda bahsedilen üretim hatalarından dolayı ölçüm sonuçlarında uyuşmazlık elde edildiği düşünülmektedir.

4.3.9 Tasarım T11-3

Tasarım T11-2'de ve birçok benzer fotolitografi işlemlerinde meydana gelen üretim hatalarını engellemek için birim hücrelerin yekpare bir bakırdan üretilmesi gerektiğine karar verilmiştir. Ancak yurt içinde ya da yurt dışında istenilen genişlikte ve 35 µm kalınlıkta bakır bant bulunamamıştır. Bakır bant dışında yine 35 µm kalınlığında bakır folyo araştırıldı ancak söz konusu kalınlıkta bir ürüne ulaşılamadı. Ulaşılabilen en ince bakır folyo olan 100 µm kalınlıktaki malzemenin alınması kararlaştırıldı.

Benzetim ortamında bakır kalınlığı 100 µm olarak belirlendikten sonra analizlere devam edildi. tasarım T11-2 üzerinden devam eden CST microwave studio ortamındaki benzetim çalışmalarında geometride değişiklik yapılmadı ancak geometrik değerleri üzerinden

deşiklikler yapılarak hedef frekanslarda hasatlama işlemi gerçekleştirlmeye çalışıldı.



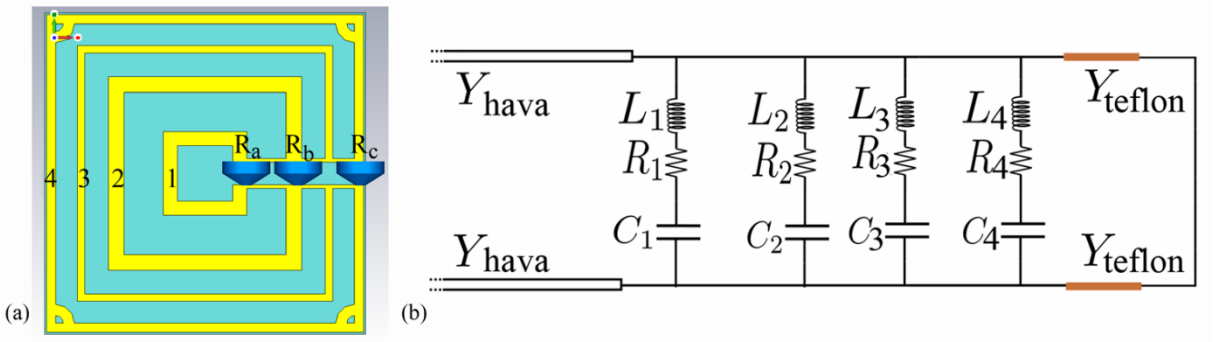
(a) (b)

Şekil 57. (a) CST Microwave Studio ve (b) Ansoft HFSS'de tasarlanan T11-2'ye ait birim hücre görüntüleri.

Birim hücrenin kenar uzunluğu Şekil 57'de görüldüğü gibi a ile ifade edilmiştir ve değeri 43 mm'dir. 0,9 GHz'de tepki vermesi için tasarlanan en dıştaki ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğu b, genişliği ise w_1 ile ifade edilmiştir ve değerleri sırasıyla 42,5 mm ve 1,25 mm'dir. 1,8 GHz'de tepki vermesi için tasarlanan ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğu c, genişliği ise w_2 ile gösterilmiştir ve bunların değerleri sırasıyla 34,2 mm ve 1 mm'dir. 2,6 GHz'de tepki vermesi için tasarlanan kare halka rezonatörün kenar uzunluğu d, genişliği ise w_3 ile gösterilmiştir ve bunların değerleri sırası ile 25,9 mm ve 2,1 mm'dir. 5,8 GHz'de tepki vermesi için tasarlanan en içteki kare ayrık halka rezonatörün kenar uzunluğu e, genişliği ise w_4 ile ifade edilmiştir ve bunların değerleri sırasıyla 11,2 mm ve 1,9 mm'dir. En dış kısımdaki ayrık kare halka rezonatöre eklenen çeyrek halka rezonatörlerin yarıçapı r, genişliği ise w_d ile ifade edilmiştir ve bunların sayısal karşılığı sırasıyla 2,5 mm ve 1,5 mm'dir. alttaş olarak tasarım T11'de kullanılan PTFE kullanılmıştır ve değeri aynı 4 mm (d_r) olarak kalmıştır. İletken olarak kullanılan bakırın kalınlığı ise daha önce bahsedilen nedenlerden dolayı 100 µm olarak değiştirilmiştir. Birim hücrede soğurulan EM dalga ile yapı üzerinde indüklenen akımı hasatlamak için yapıya entegre edilen devre elemanları R_1, R_2 ve R_3 ile ifade edilmiştir ve bunların değerleri sırasıyla 270 ohm, 33 ohm ve 15 ohm'dur. İletken hatta entegre edilen devre elemanlarından R_3 söz konusu hattın ortasında bulunmaktadır. Şekil 57'de görüldüğü gibi orta noktadan l_{p1} kadar uzaklığa R_1, l_{p2} kadar uzaklığa R_2 devre elemanları eklenmiştir ve uzaklıkların sayısal değerleri sırasıyla 8,35 mm ve 6,95 mm'dir. Ayrık halka rezonatörlerin birleştirildikleri iletken kısmın genişliğine karşılık gelen t'nin sayısal karşılığı ise 0,5 mm'dir. Ayrık bölgesinin genişliğini temsil eden g'nin değeri 3 mm'dir.

Rezonans frekansları 0.9 GHz, 1.8 GHz, 2.6 GHz ve 5.8 GHz olan metamalzeme

hasatlayıcıda yüzey akımları sırasıyla Şekil 58.a'da gösterilen 1., 2., 3. ve 4. ayrık halka rezonatörlerde yoğunlaşmaktadır. Dolayısıyla her bir ayrık halka rezonatör eşdeğer devre modelinde birbirine seri bağlı bir kapasitör, bir indüktör ve bir direnç ile temsil edilebilir. Bu eşdeğer devre Şekil 8.b'de gösterilmiştir. Kapasitif etki ayrık halka rezonatördeki açıklıktan, indüktans ise bir ucu açık olan kare halka rezonatörden kaynaklanmaktadır. Metamalzemedeki kayıpları gösteren direnç elemanı ayrık halka rezonatördeki açıklıkta bulunan dirençten dolayıdır. Bunun yanında, çok düşük de olsa teflon alttaşın soğurması bulunmaktadır (kayıp tanjantı=0.0002).



Şekil 58. (a) Metamalzeme tabanlı hasatlayıcının birim hücre geometrisi, (b) temsili eşdeğer devresi.

Alttaşın arka yüzü tamamen bakır olduğundan elektromanyetik dalgaların malzemeden iletimi yaklaşıklıkla sıfır kabul edilebilir. Bakır arka düzlem Şekil 58.b'deki eşdeğer devre modelinde kısa devre olarak gösterilmiştir.

Arkası bakır kaplı teflon alttaşın empedansı,

$$Z_{dielektrik} = \frac{Z_{hava}}{\sqrt{\varepsilon_{dielektrik}}} \tan(\beta \mathrm{h})\, j$$

ile verilmektedir. Havanın empedansı, Z_{hava}=376.73 Ω'dur. $\varepsilon_{dielektrik}$ teflon alttaşın dielektrik sabiti olan 2.1'dir. β ise ilerleme sabiti olup $w\sqrt{\varepsilon_{dielektrik}}/c$ ile verilmektedir (c: ışık hızı). h metamalzemenin kalınlığıdır.

RLC elemanlar paralel bağlı olduğundan empedans yerine admittans kullanmak daha elverişlidir.

Giriş admittansı,

$$Y_{giriş} = Y_{RLC,1} + Y_{RLC,2} + Y_{RLC,3} + Y_{RLC,4} + Y_{dielektrik}$$

olarak tanımlıdır.

Yansıma katsayısı, S_{11}'in büyüklüğü,

$$\left|S_{11}(w)\right| = \left|\frac{Y_{hava} - Y_{giriş}(w)}{Y_{hava} + Y_{giriş}(w)}\right|$$

olarak hesaplanmaktadır.

Şekil 58.a'da gösterilen hasatlayıcıda R_a=33 Ω, R_b=15 Ω ve R_c=270 Ω'dur. Rezonatörlerin ve toprak düzleminin bakır kalınlığı 100 μm'dir. Dört bantlı hasatlayıcının benzetim

sonuçlarından S11 yansıma katsayısının büyüklüğünün frekansa karşın grafiği Şekil 59.a'da gösterilmiştir. Yansıma katsayısının minimumları 0.90 GHz, 1.79 GHz, 2.59 GHz ve 5.84 GHz'dedir.

Soğurma katsayısı A(*w*) en genel olarak,

$$A(w) = 1 - (|S_{11}(w)|^2 + |S_{21}(w)|^2)$$

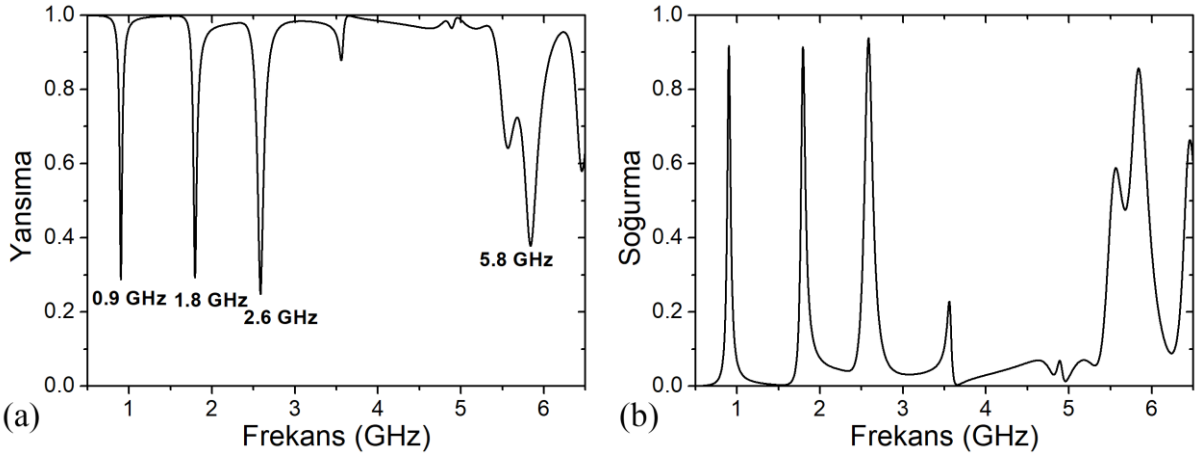
ile ifade edilmektedir.

Alttaşın arka düzlemi bakır olduğundan $S_{21}(w) = 0$ olarak kabul edilebilir. Bu sebeple A(*w*),

$$A(w) = 1 - |S_{11}(w)|^2$$

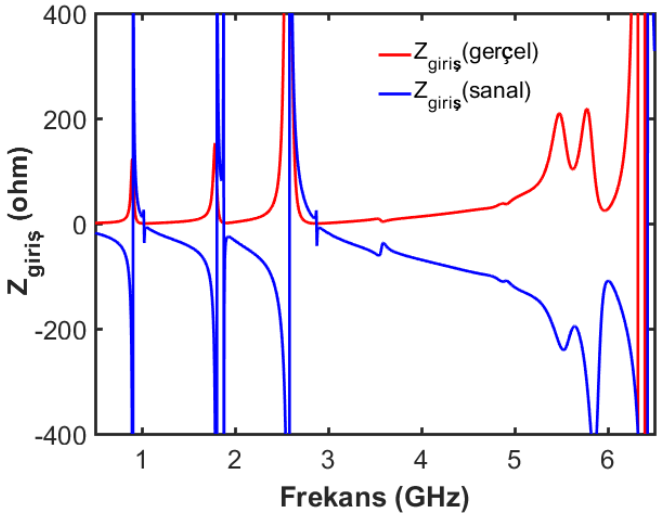
olarak verilir.

Soğurma grafiği Şekil 59.b'de gösterilmiştir. Soğurma oranları 0,9 GHz'de %91,7, 1,8 GHz'de %91,4, 2.6 GHz'de %93,8 ve 5.84 GHz'de %85,6'dır.



Şekil 59. Hasatlayıcı metamalzemenin (a) yansıma ve (b) soğurma spektrumu.

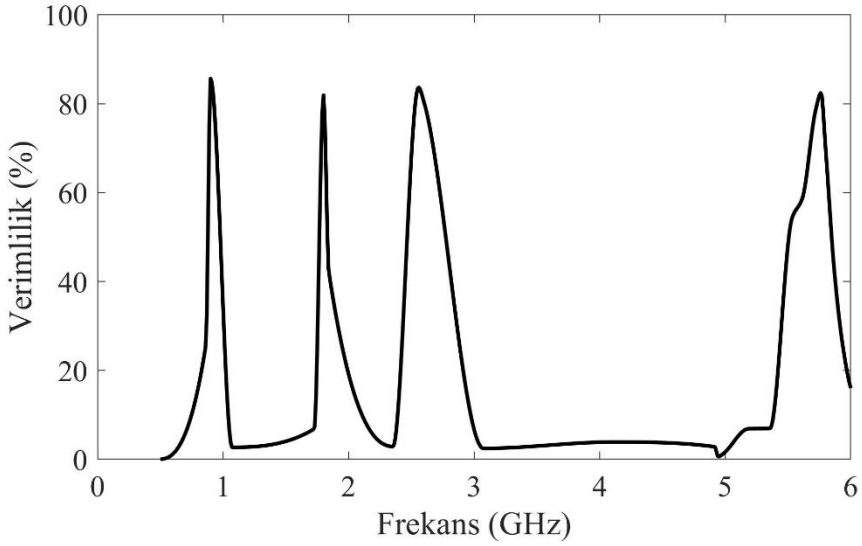
Giriş empedansının ($Z_{giriş}$) gerçel ve sanal kısımlarının frekansa karşın grafikleri Şekil 60'da gösterilmiştir. Grafikten görüldüğü gibi rezonans frekanslarda $Z_{giriş}$'in gerçel kısmı yüksek bir değer iken $Z_{giriş}$'in sanal kısmı sıfıra yakındır. Bu durum hasatlayıcının havadaki elektromanyetik dalgaların enerjisini iyi bir empedans uyumu ile yakaladığını göstermektedir.



Şekil 60. Metamalzeme tabanlı hasatlayıcının empedans spektrumu.

Şekil 61'de tasarım T11-3'e ait verimlilik grafiği verilmiştir. Benzetim çalışmalarının gerçekleştirildiği CST Microwave Studio programında birim hücreye gönderilen EM dalganın

gücü 0,5 W olarak belirlenmiştir. Söz konusu değer temel alınarak yapılan verimlilik değerleri Tablo 3'de verilmiştir.

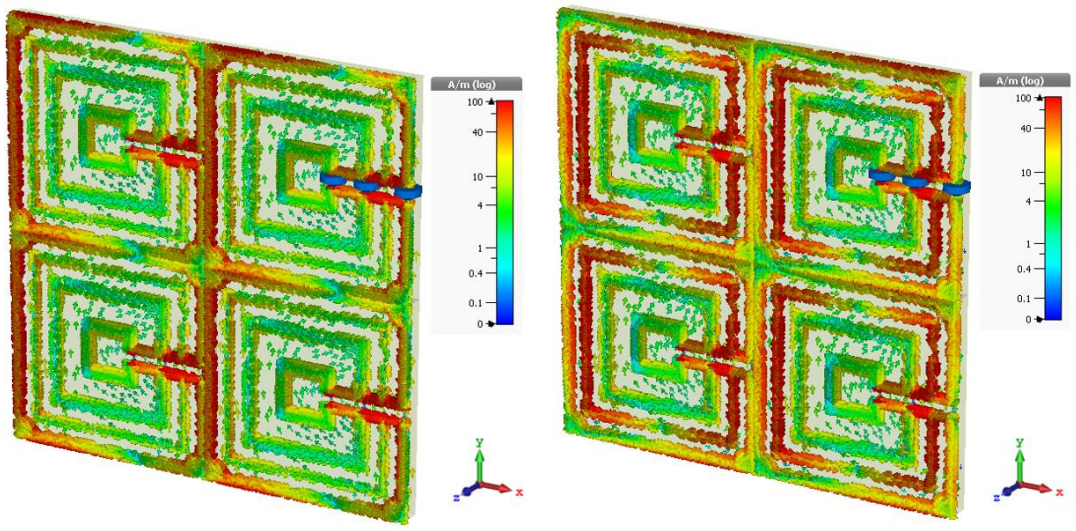


Şekil 61.Tasarım T11-3'e ait verimlilik grafiği.

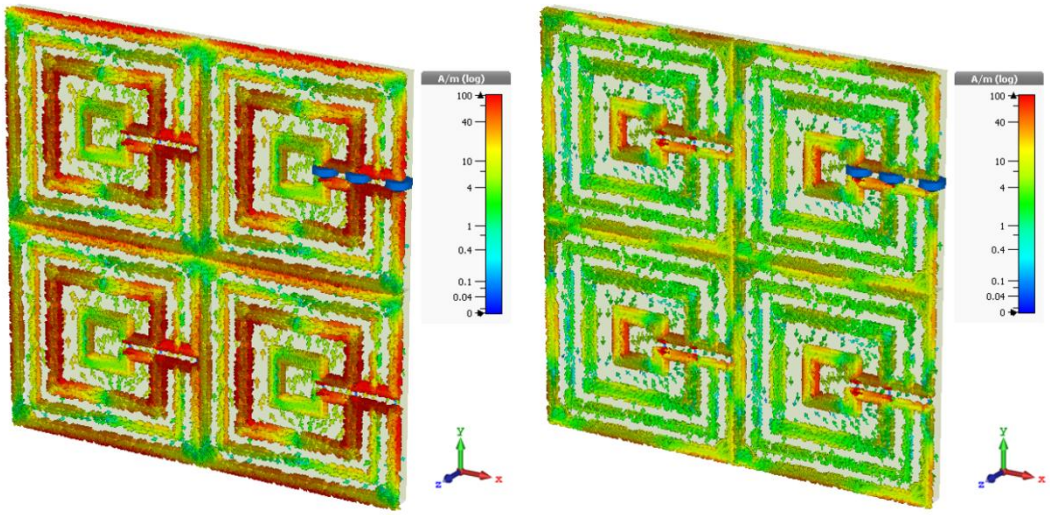
Tablo 3. Tasarım T11-3'e ait hedef frekanslardaki verimlilik değerleri.

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

Tablo 3'deki verilerden görüldüğü gibi projede tek bir birim hücrede hedeflenen frekanslarda ortalama verimlilik olarak %75'in üzerine çıkılmıştır. Böylelikle üretimde karşılaşılan olumsuzluklara karşın hedeflenen verimliliğe benzetim çalışmalarında ulaşılmıştır. Birim hücre üzerinde rezonans frekanslarındaki yüzey akım dağılımları Şekil 62'de gösterilmiştir.



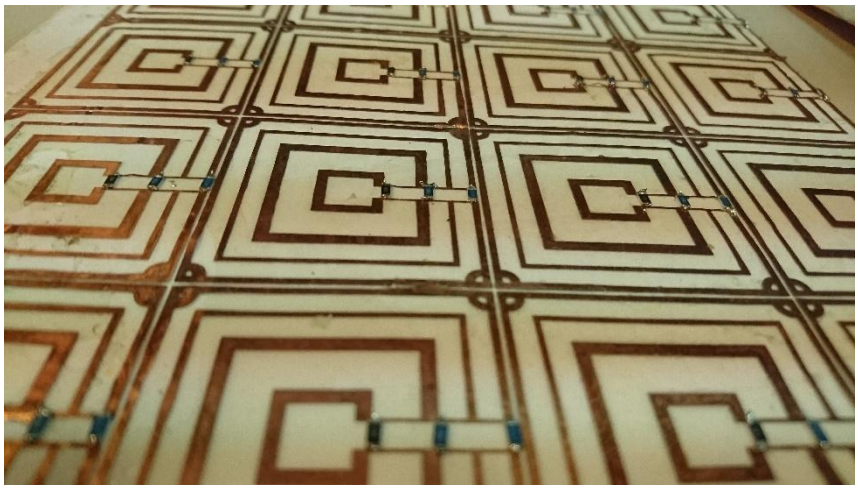
(a) (b)



(c) (d)

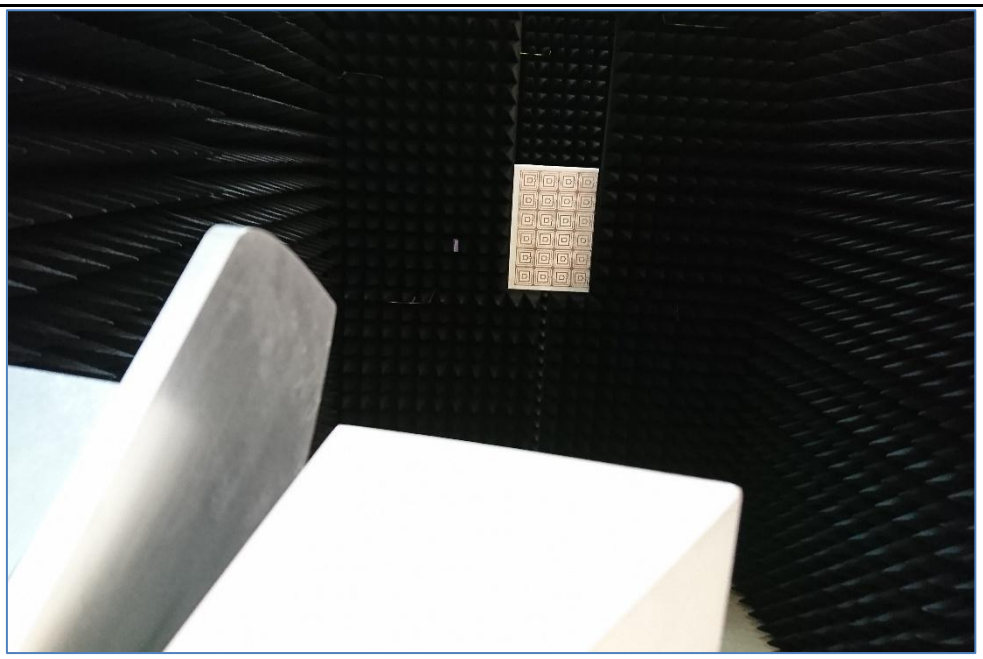
Şekil 62. Birim hücreye ait yüzey akım dağılımları (a) 0,9 GHz için (b) 1,8 GHz için (c) 2,6 GHz için (d) 5,8 GHz için.

Yüzey akım dağılımlarında görüldüğü gibi birim hücreye entegre edilen çeyrek halka rezonatörler herbir hedef frekans için tepki vermektedir ve hasatlaya katkı sunmaktadır. Temin edilen 100 µm kalınlığında bakır folyo PTFE (teflon) alttaşın üzerine yapıştırılarak üretime hazır hale getirilmiştir. Fotolitografi yöntemi ile üretilen metamalzeme tabalı EM enerji hasatlayıcı yapısı Şekil 63'de gösterilmiştir.



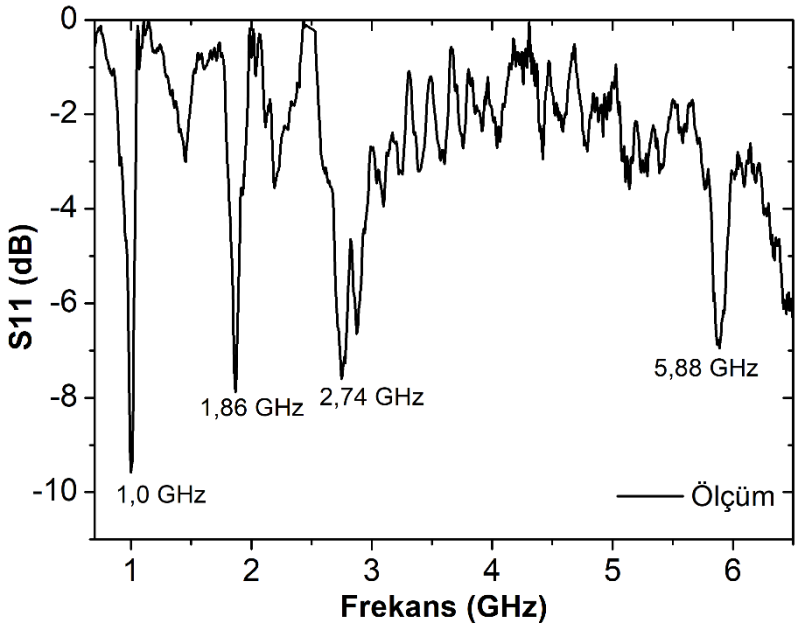
Şekil 63. Metamalzeme tabanlı EM enerji hasatlayıcı.

Üretilen 4x6 dizi metamalzeme tabanlı EM dalga hasatlayıcı yapısına devre elemanları lehimlendikten sonraki görüntüsü şekil 63'de gösterilmiştir. Dizi olarak üretilen yapıda üretimden kaynaklı bazı sorunlar meydana gelmiştir. Bu sorunlardan en önemlilerinden biri birim hücrelerin komşu birim hücre ile yer yer temas etmesidir. Bu sorun ölçüm sırasında istenilen tepkilerin alınamamasına neden olabileceği düşünülerek birleşen kısımlar ilk önce lehim ile ısıtılmış daha sonra birbirinden ayırılmıştır. Bir diğer sorun ise en dış kısımdaki ayrık kare halka rezonatöre entegre edilen çeyrek halka rezonatörlerin içinin (bakırın) yeteri kadar kazınamamasıdır. Bu durum tek tek birim hücrelerde sorun teşkil etse de dizi üzerinde fazla etkisinin olacağı düşünülmemiştir.

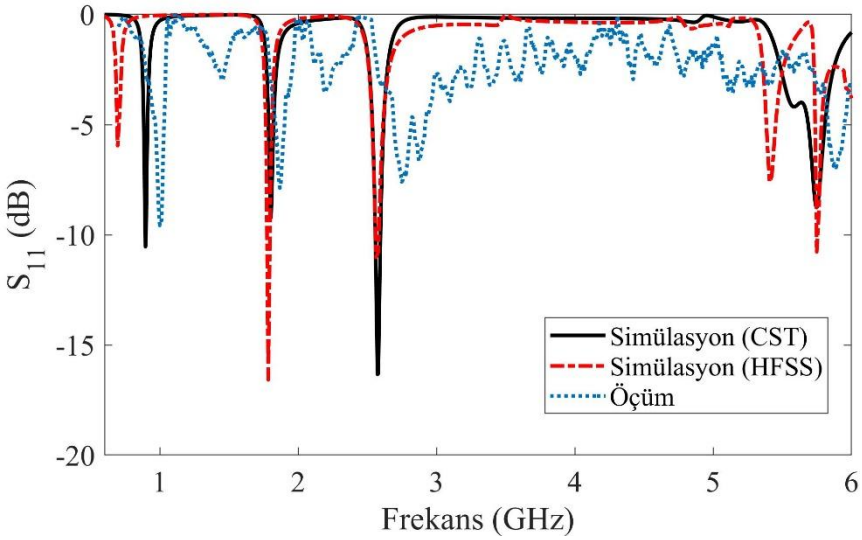


Şekil 64. Yankısız odada yansıma katsayısı parametrelerinin ölçümü.

Ölçüm sırasında çekilmiş bir görsel Şekil 64'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi iki adet horn anten aralarına soğurucu yerleştirilerek ölçümü gerçekleştirilen örneğin karşısına konulmuştur. Kullanılan horn antenlerin modeli ise Rohde & Schwarz HF907'dir ve 800MHz-18GHz frekansları arasında çalışmaktadır. Ölçümlerde Rohde & Schwarz ZVL13 model 9kHz-13,6 GHz frekansları arasında çalışan VNA (Vektör Network Analizör) kullanılmıştır. Ölçüm düzeneğinin çevresi girişimleri ve dış etkileri engellemek için soğurucular ile kapanmıştır. Ölçüm sonucu olan S11 spektrumu Şekil 65'de verilmiştir. Ölçüm verilerinden dört bantta yansıma olduğu görülmektedir. Benzetim ortamında 0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekanslarında minimum iletim gözlenirken ölçümde rezonans frekansların biraz sağa kaydığı göze çarpmaktadır.



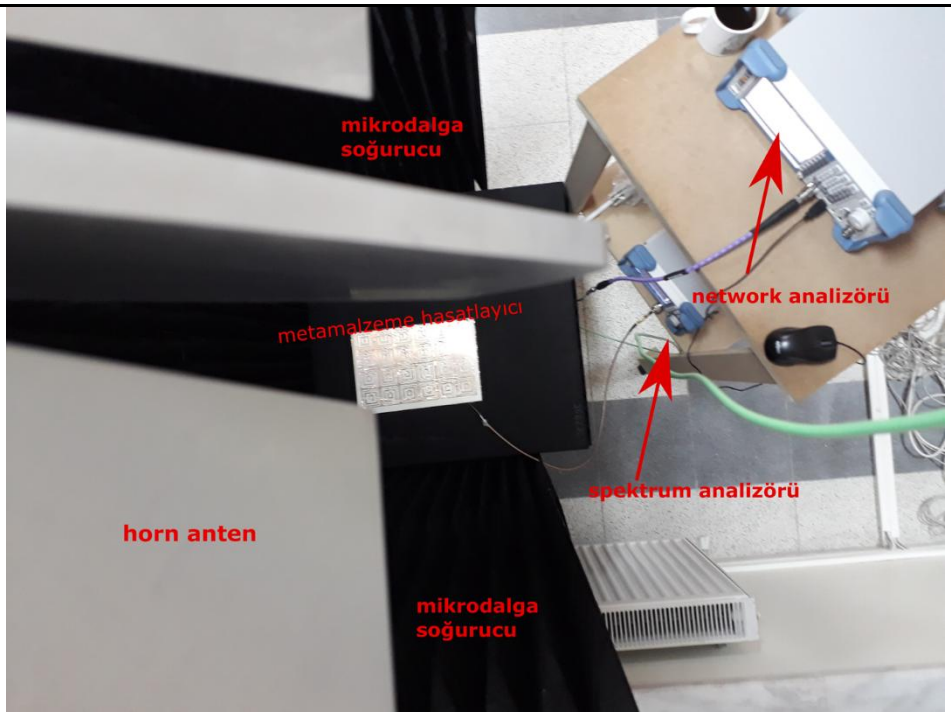
Şekil 65. Laboratuvar ortamında ölçülen S_{11} spektrumu.



Şekil 66. Benzetim ortamlarında (CST ve HFSS) ve ölçüm sonunda elde edilen S11.

Şekil 66'da görüldüğü gibi 0,9 GHz'de benzetim ve CST ile HFSS'in ölçüm sonuçları arasında bir farklılık vardır. Diğer frekanslarda soğurma oranlarında farklılık olsa da rezonans frekansları nispeten örtüşmektedir. Ölçüm sonuçlarında rezonans frekanslarındaki kaymaların nedeni devre elemanlarının tam olarak benzetim ortamında belirlenen noktalara lehimlenememiş olmasından veya üretimdeki kusurlardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Metamalzemeye eklenen direnç elemanlarında biriken elektromanyetik gücün ölçümü için 0-3 GHz frekans aralığında çalışan bir spektrum analizör ile Şekil 67'de gösterilen deney düzeneği kurulmuştur. Metamalzeme network analizöründen horn antene gönderilen elektromanyetik dalgalar ile uyarılmıştır. Ucu sıyrılmış bir kablo direnç elemanları üzerine temas ettirilerek spektrum analizöründe güç değişimi olup olmadığına bakılmıştır. Kullanılan spektrum analizörü Şekil 68'de gösterilmiştir. Spektrum analizörün tarama aralığı dar olduğundan ve direnç elemanları ile spektrumun 50 ohm giriş empedansı arasında farklılık bulunduğundan (empedans uyuşmazlığı) hasatlayıcının rezonans frekanslarında maalesef bir güç artışı gözlenememiştir.



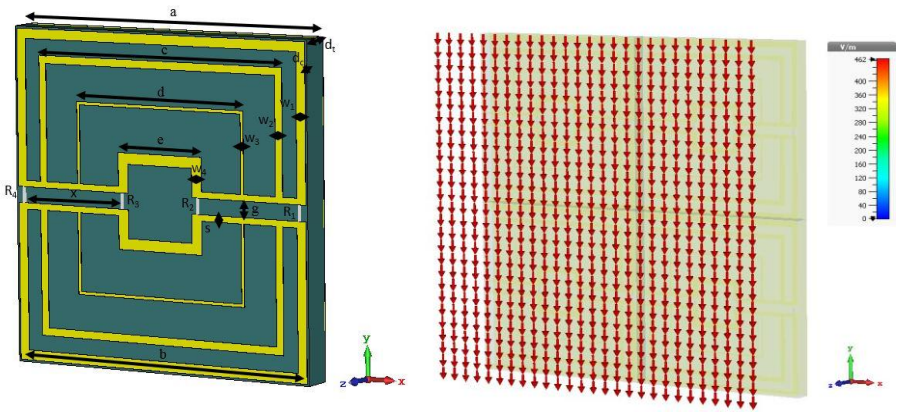
Şekil 67. Spektrum analizör ile hasatlanan elektromanyetik gücün ölçülmesi.



Şekil 68. Kullanılan spektrum analizörü.

4.3.10 Tasarım T12

Şekil 69.a'daki yapı kullanılarak, geliş açısı olarak tanımlanan θ'nın pozitif yöndeki değişimi ile negatif yöndeki değişiminin devre elemanı üzerindeki etkisinin aynı olması amaçlanmıştır. Bu çerçevede Şekil 36'da görüldüğü gibi yapının $-x$ simetriğine aynı değere sahip ayrık açıldı.

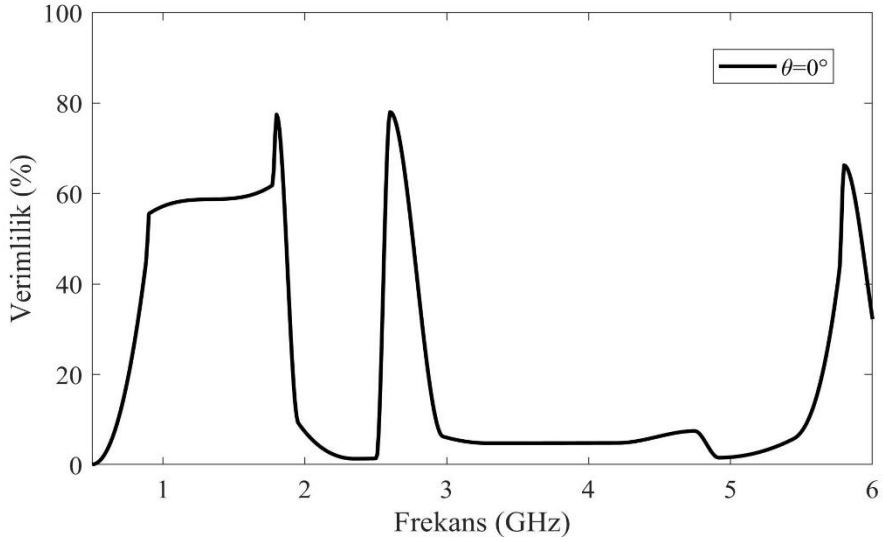


(a) (b)

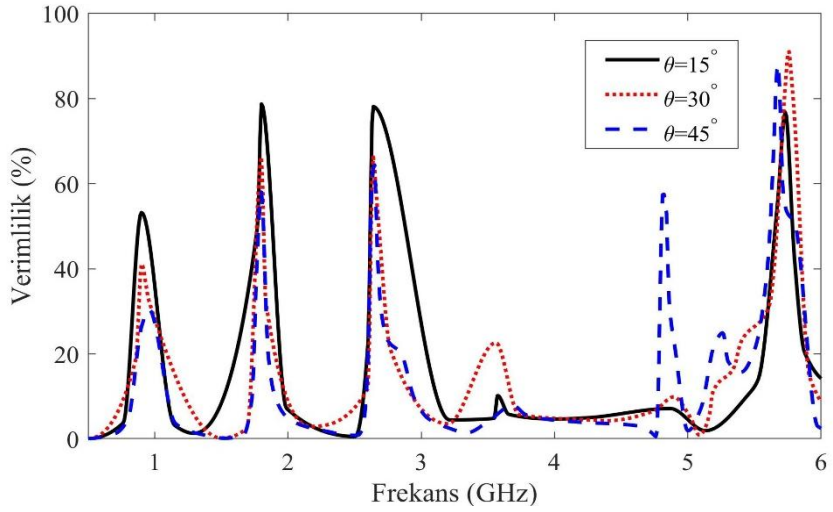
Şekil 69. (a) Birim hücreye ait geometrik yapı (T12) (b) gönderilen EM dalganın elektrik alan yönelimi.

Şekil 69.a'da görüldüğü gibi GSM ve Wi-Fi bantlarında yer alan 0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekanslarındaki EM dalgayı hasatlamak için kullanılan metamalzeme tabanlı EM dalga hasatlayıcı dört adet ayrık halka rezonatörden oluşmaktadır. Yapıda hapsolan gücü göstermek için her bir rezonatöre direnç eklemek yerine kullanılan ayrık halka rezonatörler Şekil 36(a)'da görüldüğü gibi ayrık bölgelerinden iletken hat eklenerek birleştirilmiştir. Böylece daha az devre elemanı kullanılmıştır. Şekil 69.a'da verilen *a* birim hücrenin örgü sabitini temsil etmektedir ve değeri 42 mm'dir. Halka rezonatörlerin kenar uzunluklarını *b*, *c*, *d* ve *e* ile temsil edilmiştir ve değerleri sırasıyla 41,6 mm, 33,8 mm, 23,0 mm ve 10,7 mm'dir. Ayrık halka rezonatörlerin genişliği w_1, w_2, w_3 ve w_4 ile gösterilmiştir ve bunların değerleri ise 1,2 mm, 1,0 mm, 0,4 mm ve 1,35 mm'dir. Bunun yanında Şekil 69.a'da görülen *g*= 2 mm ve *s*= 0,8 mm'dir. R_1, R_2, R_3 ve R_4 hasatlama yapmak için gerek duyulan dirençlerdir ve değerleri sırasıyla 30 Ω, 3 Ω, 3 Ω ve 30 Ω'dur. Kullanılan dielektrik alttaşın kalınlığı olan d_r = 4 mm ve rezonatörlerde ve toprak düzleminde kullanılan bakır kalınlığı d_c=0.035 mm olarak seçilmiştir. Metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı Şekil 69.b'de görüldüğü gibi elektriksel olarak uyarılmıştır.

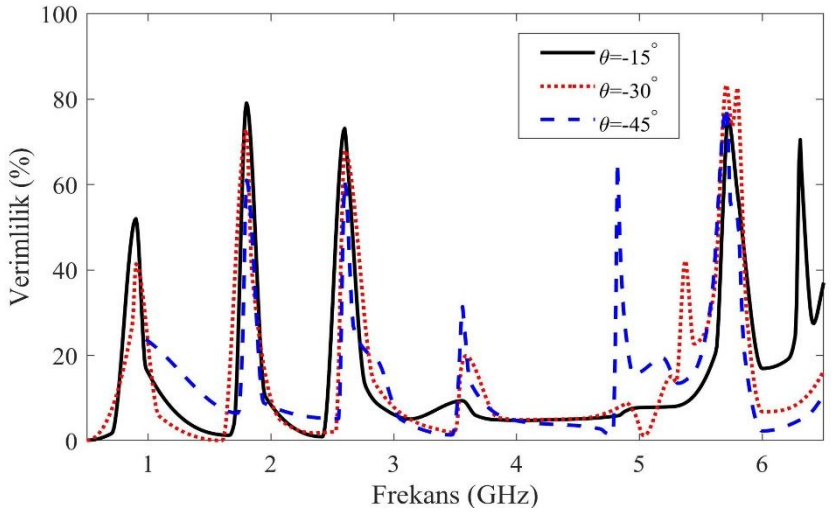
Benzetim programında yapıya gönderilen EM dalganın gücü 0,5 W olarak sabitlenmiştir. Bu değer üzerinden yapılan verimlilik hesabı Şekil 70'de sunulmuştur. Verilen grafikte metamalzemeye gönderilen EM dalga 0.9 GHz'te %55.54, 1.8 GHz'te %77.50, 2.6 GHz'te %78,00 ve 5.8 GHz'te %66.28 oranında yapıya bağlanan dirençler üzerinden harcanmıştır. Ortalama verimlilik ise %69.33 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 70. Metamalzemeye dik açıda gönderilen EM dalganın ne kadarının AC akım olarak dirençler üzerinde harcanan güce oranı.



(a)

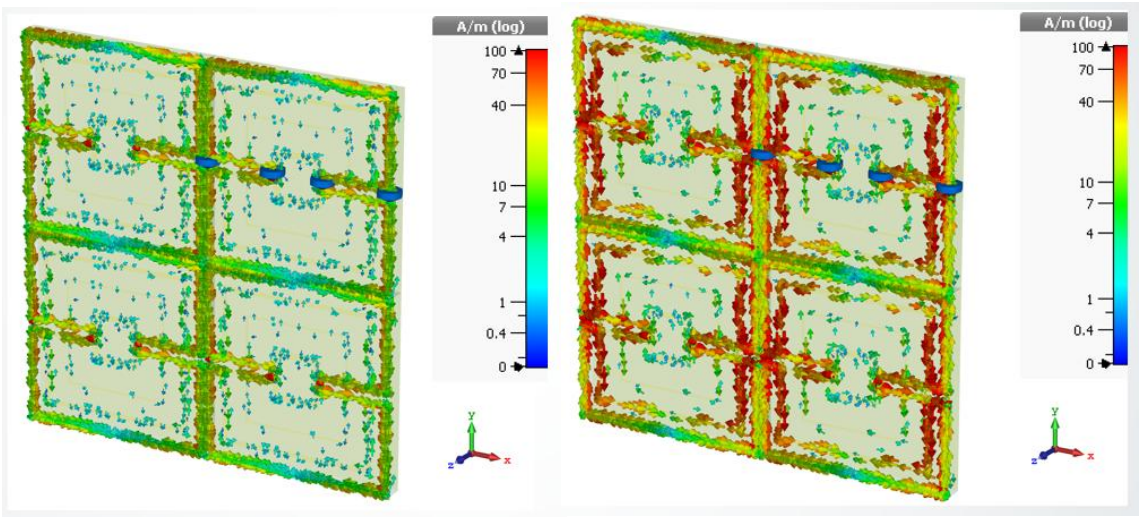


(b)

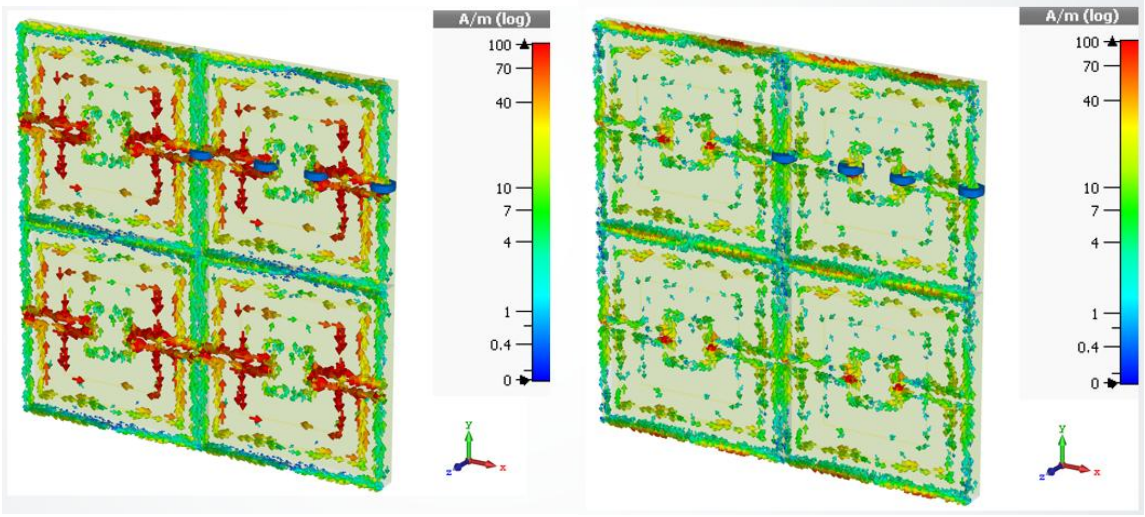
Şekil 71. Geliş açısı θ'nın (a) pozitif yönde, (b) negatif yönde değişiminin verimlilik üzerine etkisi.

Metamalzeme yapısına gelen EM dalganın geliş açısı büyüdükçe verimlilikte azalma görülmektedir (Şekil 71). 0,9 GHz için 15°, 30°, 45° açılarına karşılık gelen verimlilikler

sırasıyla %53,20, %41,20 ve %26,34'dür. 1,8 GHz için 15°,30°,45° açılarına karşılık gelen verimlilik yüzdeleri ise sırasıyla %78,7, %66,3 ve %58,0'dır. 2,6 GHz için 15°, 30°, 45° açılarına karşılık gelen yüzdeler ise %22,45, %0,12 ve %0,18'dir. 5,8 GHz için ise 15°, 30°, 45° açılarına karşılık gelen verimlilik yüzdeleri sırasıyla %42,5 , %75,8 ve %50,9'dur. Yapıya negatif yönden (diğer taraftan) gelen EM dalgalar için 0,9 GHz'de -15°,-30°,-45° geliş açılarına karşılık gelen verimlilikler sırasıyla %52,0, %41,0 ve %25,2'dir. 1,8 GHz için -15°,-30°,-45° açılarına karşılık gelen verimlilik yüzdeleri sırasıyla %79,4, %72,8 ve %61,0'dır. 2,6 GHz için -15°,-30°,-45° açılarına karşılık gelen yüzdeler ise %73,6, %67,9 ve %60,6'dır. 5,8 GHz için ise -15°,-30°,-45° açılarına karşılık gelen verimlilik yüzdeleri sırasıyla %57,60, %82,70 ve %51,84 olarak bulunmuştur.



(a) (b)



(c) (d)

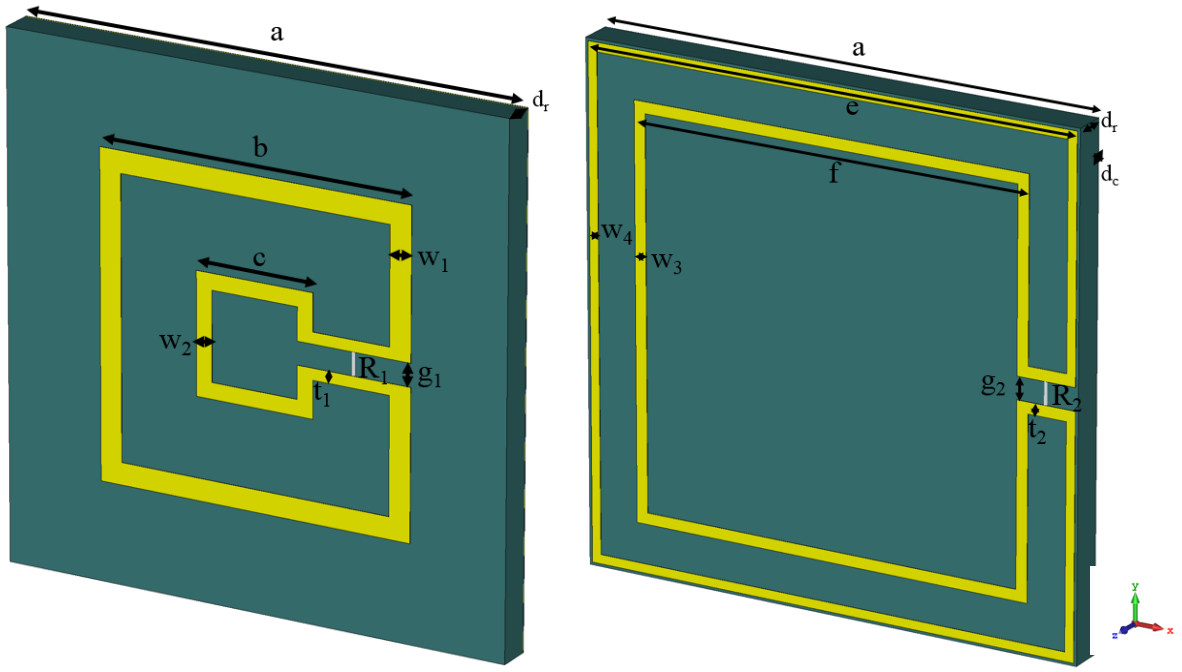
Şekil 72. Birim hücrede indüklenen yüzey akım dağılımları a) 0,9 GHz için b) 1,8 GHz için c) 2,6 GHz için d) 5,8 GHz için.

Elektromanyetik dalga yapıya dik geldiği durumda birim hücrede indüklenen akımın dağılımı şekil 72'de gösterilmiştir. Her bir frekans için tasarlanan halka rezonatörlerin ayrı bölgelerde çalıştığı ve indüklenen akımın yapıya entegre edilen dirençlere doğru aktığı görülmektedir.

4.4 Çok Katmanlı Metamalzeme Tabanlı Elektromanyetik Enerji Hasatlama

4.4.1 Tasarım T13

İki katmandan oluşan metamalzeme tabanlı hasatlayıcı tasarlanmıştır. Her bir katmanda iki frekans bölgesinde hasatlama yapacak rezonatörler bulunmaktadır. Arka katmanın arkasında ise EM dalganın iletimini engellemek için bakır kullanılmıştır. EM dalga hasatlama işleminde rezonansa giren EM dalganın kullanılan alttaşta en az soğurmaya uğraması istenilir. Bu nedenle alttaş olarak düşük tanδ değerine sahip (0.0002) Teflon (PTFE) seçilmiştir. Şekil 73'de görülen yapıda birinci katman 2.6 GHz ve 5.8 GHz frekansları için tasarlanan rezonatörlerden ikinci katman ise 0.9 GHz ve 1.8 GHz frekansları için tasarlanan rezonatörlerden oluşmaktadır. Ön katmanda bulunan ve iki frekansta (2,6 GHz ve 5,8 GHz) hasatlama yapması hedeflenen yapıya tek bir devre elemanı bağlanmıştır. Böylece iki frekanstan sadece tek bir devre elamanından hasatlama sağlanmıştır. Aynı şekilde ikinci katmandaki rezonatörlere de tek bir devre elemanı bağlanmıştır.

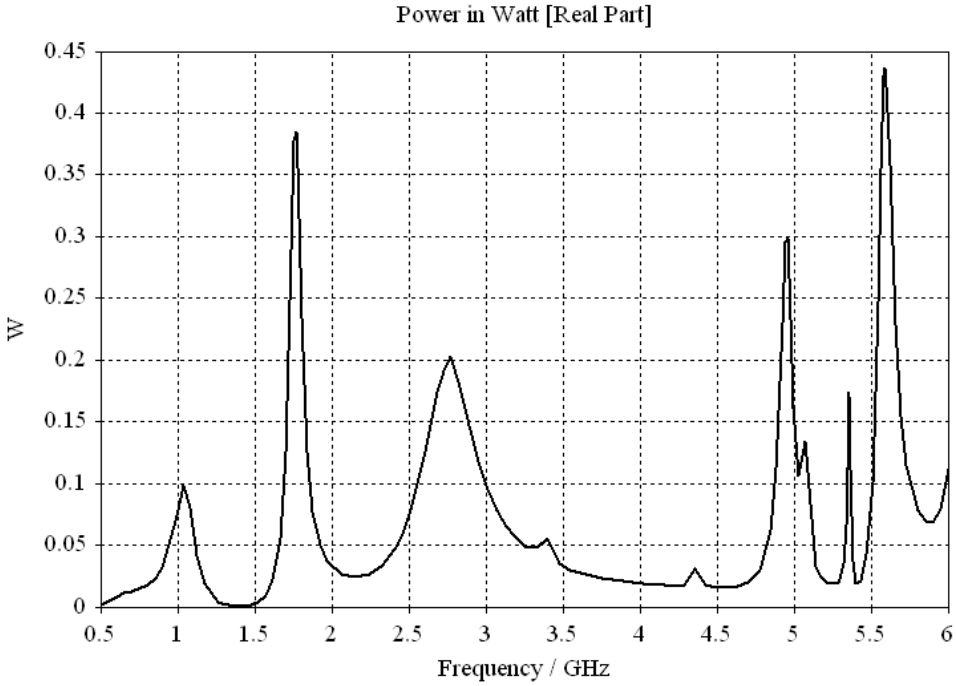


(a) (b)

Şekil 73.(a) 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekansları için tasarlanan birinci katman ve (b) 0,9 GHz ve 1,8 GHz frekansları için tasarlanan ikinci katman.

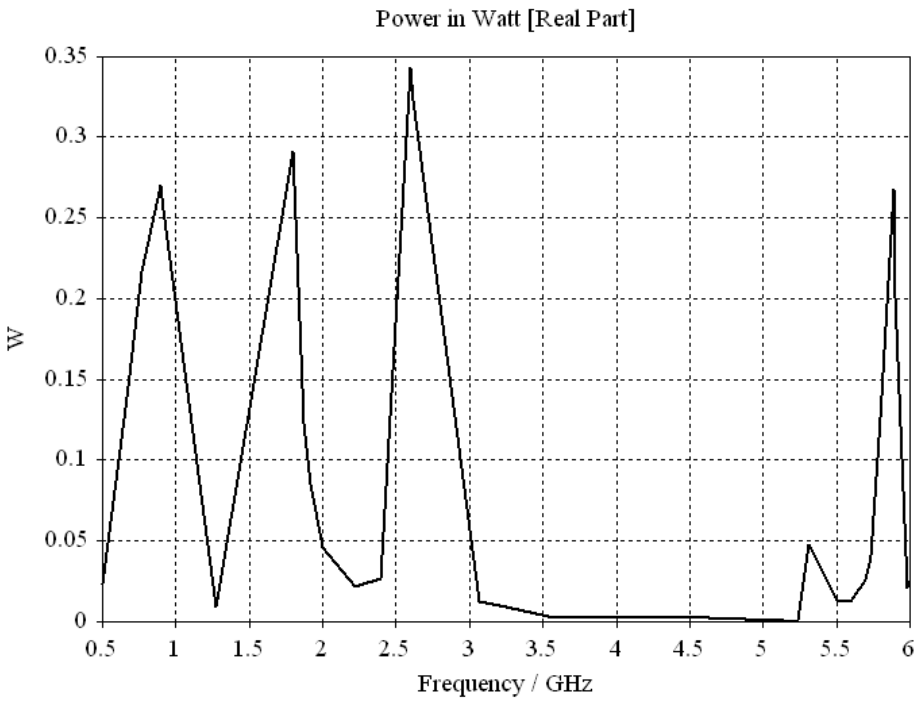
Şekil 73'de görülen a parametresi birinci ve ikinci katmandaki birim hücrelerin boyutunu, b 2,6 GHz frekansında hasatlama yapması için tasarlanan ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğunu, w_1 ise iletken kısmın genişliğini ifade etmektedir ve bunların değerleri sırasıyla 40,5 mm ve 26,0 mm ve 2,1 mm'dir. Ön katmandaki 5,8 GHz'te hasatlama yapması için tasarlanan ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğunu c, iletkenin genişliğini ise w_2 temsil etmektedir ve bu parametrelerin değerleri sırasıyla 11,8 mm ve 1.4 mm'dir. Ayrık halka rezonatörlerin bileştirildiği iletken şeridin kalınlığını t_1, ayrığın genişliğini ise g_1 temsil etmektedir ve bu parametrelerin ikisi de 2 mm'ye karşılık gelmektedir. Şekil 73.b'de gösterilen arka katmandaki birim hücrede ise e parametresi 0,9 GHz'te hasatlama yapması için tasarlanan ayrık halka rezonatörün kenar uzunluğunu, w_4 ise halkanın genişliğini temsil

etmektedir ve değerleri sırasıyla 40,0 mm ve 0,8 mm'dir. Arka katmanda 1,8 GHz frekansı için tasarlanan ayrık halka rezonatörün kenar uzunluğunu f, iletken kısmın genişliğini ise w_3 temsil etmektedir ve bu parametreler sırasıyla 31 mm ve 1 mm'ye karşılık gelmektedir. Ön ve arka rezonatörlere devre elemanı olarak bağlanan dirençleri R_1 ve R_2 temsil etmektedir ve optimize edilmiş değerleri sırasıyla 10 Ω ve 250 Ω'dur. Alttaş olarak kullanılan Teflon kalınlığı d_r 3 mm olarak belirlenmiştir. Arka katmanda toprak düzlem olarak kullanılan bakır plakanın kalınlığı d_c ise 0.035 mm'dir. İki katman arasında 3,5 mm boşluk bulunmaktadır. Çok bantlı yapıda devre elemanında harcanan güç Şekil 70'de verilmiştir. Şekil 74'de görüldüğü gibi 0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz bantlarına yakın frekanslarda yapı tepki vermektedir.



Şekil 74. Çok bantlı yapıda devre elemanında harcanan güç grafiği.

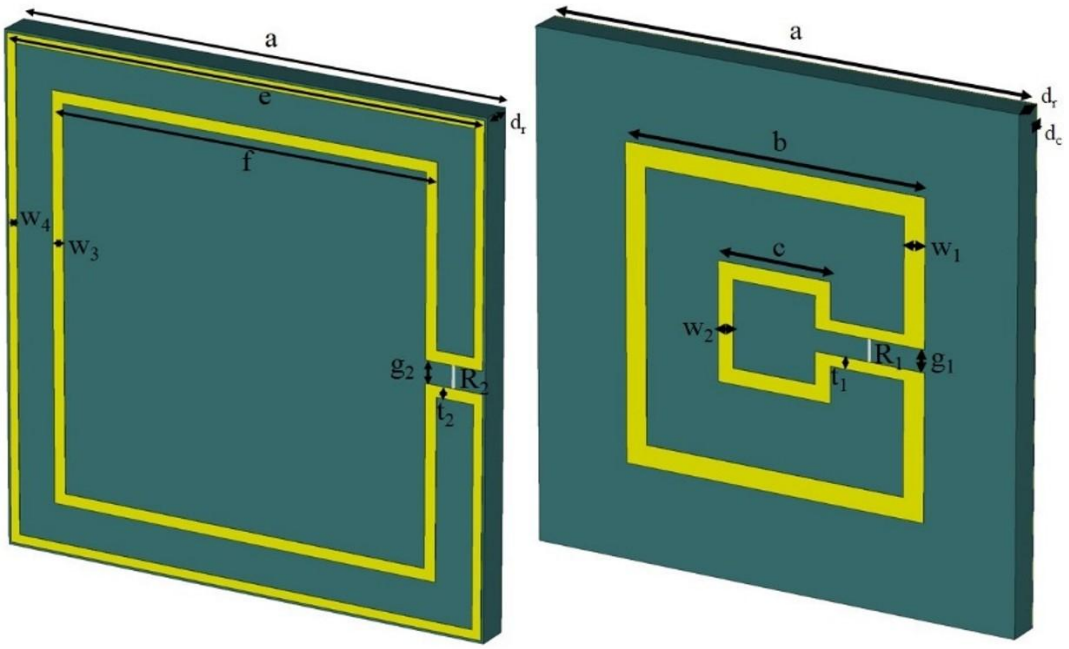
Şekil 73.a ve b'de gösterilen parametreler aynı tutularak ön ve arka birim hücrelerin sıralaması değiştirilmiş ve etkisi incelenmiştir. Katmanlar değiştirildikten sonra elde edilen, yapıya bağlanan devre elemanında harcanan güç Şekil 75'de gösterilmiştir. Ortalama verimlilikte artış olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 75. Katmanlar değiştirildikten sonra elde edilen, yapıya bağlanan devre elemanında harcanan güç.

4.4.2 Tasarım T14

Yukarıda elde edilen verimlilik artışı üzerine, yapı üzerinde parametrik analizler yapılarak devre elemanı üzerinde harcanan güç miktarları daha da artırılmıştır. İki katman arasındaki mesafe ise 3 mm olarak belirlenmiştir. Optimize edilen nihai yapı Şekil 42'de gösterilmektedir.



Şekil 76. Optimize edilen çok katmanlı yapının (a) ön yüzü ve (b) arka yüzü.

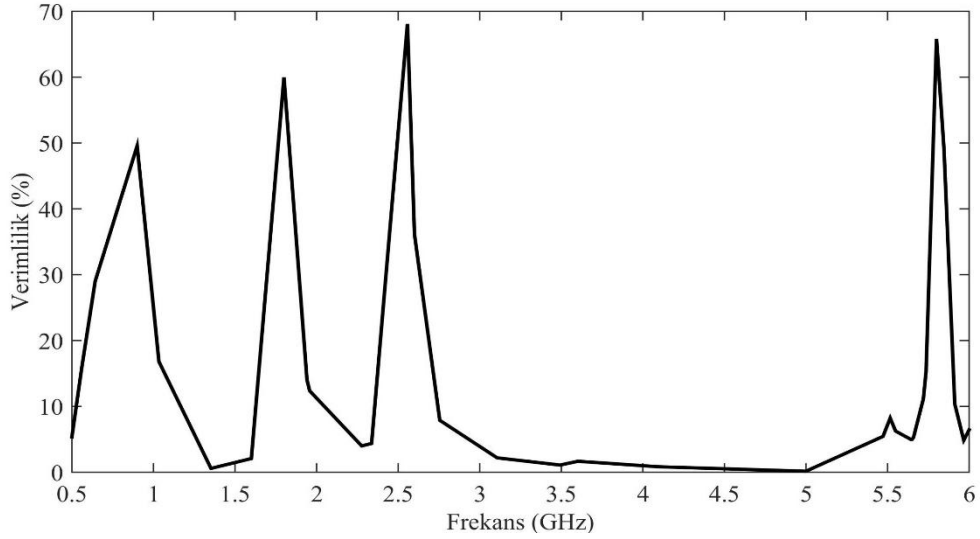
Şekil 76'a görülen a parametresi birinci ve ikinci katmandaki birim hücrelerin boyutunu, b parametresi 2,6 GHz frekansında hasatlama yapması için tasarlanan ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğunu, w_1 ise iletken kısmın genişliğini ifade etmektedir. Arka

katmandaki 5,8 GHz'te hasatlama yapması için tasarlanan ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğunu c, iletkenin genişliğini ise w_2 temsil etmektedir. Ayrık halka rezonatörlerin bileştirildiği iletken şeridin kalınlığını t_1, ayrığın genişliğini ise g_1 temsil etmektedir. Şekil 42(a)'da görülen ön katmandaki birim hücrede ise e parametresi 0,9 GHz'te hasatlama yapması için tasarlanan ayrık halka rezonatörün kenar uzunluğunu, w_4 ise halkanın genişliğini temsil etmektedir. Ön katmanda 1,8 GHz frekansı için tasarlanan ayrık halka rezonatörün kenar uzunluğunu f, iletken kısmın genişliğini ise w_3 temsil etmektedir. Söz konusu değerlerin karşılığı Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Şekil 42'de yer alan parametrelerin değerleri.

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

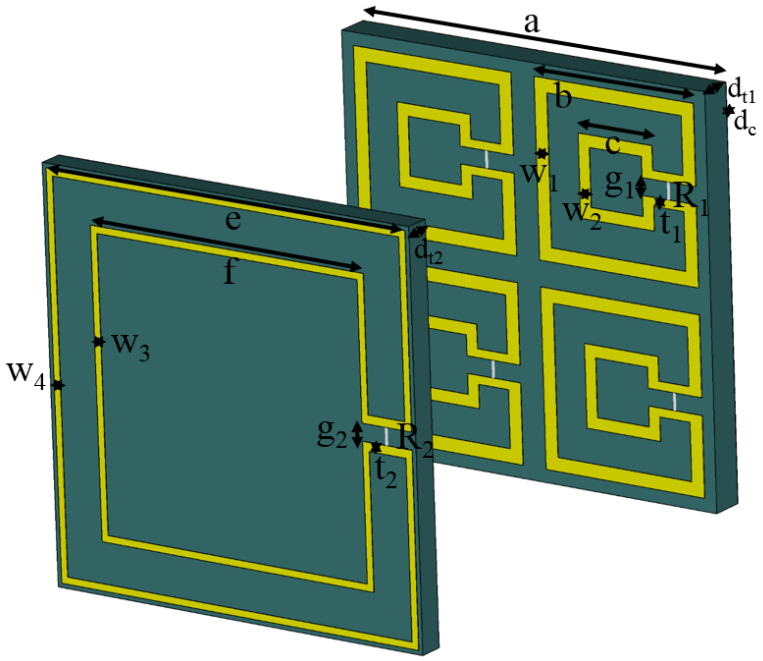
Hasatlayıcının verimliliği Şekil 77'de gösterilmiştir. 0.9, 1.8, 2.6 ve 5.8 GHz GSM ve Wi-Fi bantlarında hasatlama özelliği gösteren yapı, 0.9 GHz'de %49.54, 1.8 GHz'de %59.96, 2.6 GHz'de %36,00 ve 5.8 GHz'de %65.80 oranında verimlikler göstermektedir. Ortalama verimlilik %52.83 olarak bulunmuştur.



Şekil 77. Çok katmanlı EM dalga hasatlayıcının verimliliği.

4.4.3 Tasarım T15

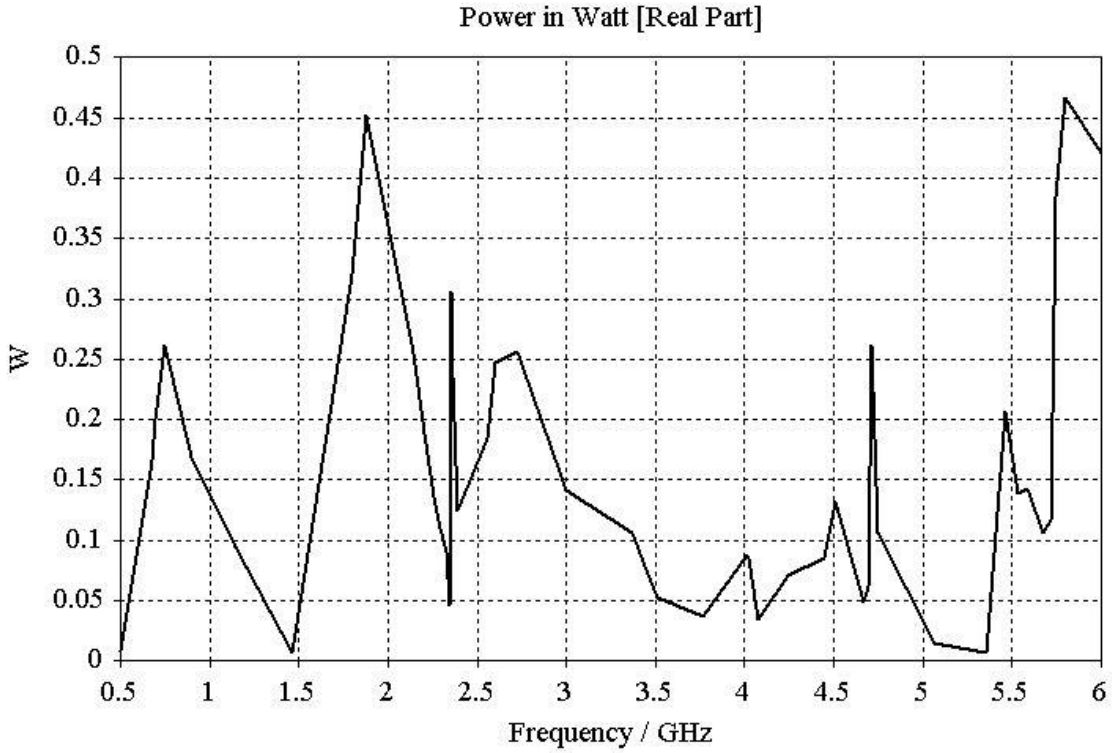
2,6 GHz frekansı için tasarlanan ayrık halka rezonatörlerin komşu birim hücre ile arasındaki mesafesinin fazla olduğu ve yeterli kapasitif etkileşme sağlayamadığı düşünülmüştür. Buradan yola çıkılarak arka katmanda var olan 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekansları için tasarlanan ayrık halka rezonatörlerin sayısı aynı dielektrik tabaka boyutu kullanılarak artırılmış ve Şekil 78'de görüldüğü gibi dörde çıkarılmıştır.



Şekil 78. Arka katmandaki ayrık halka rezonatörlerin sayısının artırılmış görseli.

Şekil 78'de görülen a parametresi birinci ve ikinci katmandaki birim hücrelerin boyutunu, b parametresi 2,6 GHz frekansında hasatlama yapması için tasarlanan ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğunu, w_1 ise iletken kısmın genişliğini ifade etmektedir. Bunların değerleri ise sırasıyla 47,0 mm ve 20,6 mm ve 1,6 mm'dir. Arka katmandaki 5,8 GHz'de hasatlama yapması için tasarlanan ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğunu c, iletkenin genişliğini ise w_2 temsil etmektedir ve bu parametrelerin değerleri sırasıyla 9,5 mm ve 1,4 mm'dir. Ayrık halka rezonatörlerin bileştirildiği iletken şeridin kalınlığını t_1, ayrığın genişliğini ise g_1 temsil etmektedir ve 1 mm ve 2 mm'ye karşılık gelmektedir. Ön katmandaki birim hücrede ise e parametresi 0,9 GHz'te hasatlama yapması için tasarlanan ayrık halka rezonatörün kenar uzunluğunu, w_4 ise halkanın genişliğini temsil etmektedir ve değerleri sırasıyla 46 mm ve 0,8 mm'dir. Arka katmanda 1,8 GHz frekansı için tasarlanan ayrık halka rezonatörün kenar uzunluğunu f, iletken kısmın genişliğini ise w_3 temsil etmektedir ve sırasıyla 35 mm ve 0,8 mm'ye karşılık gelmektedir. Ön katmandaki ayrık halka rezonatörlerin bileştirildiği iletken şeridin kalınlığını t_2, ayrığın genişliğini ise g_2 temsil etmektedir ve değerleri sırasıyla 1 mm ve 2 mm'ye karşılık gelmektedir. Ön ve arka rezonatörlere devre elemanı olarak bağlanan dirençleri R_1 ve R_2 temsil etmektedir ve değerleri sırasıyla 50 Ω ve 250 Ω'dur. Alttaş olarak kullanılan Teflon kalınlıkları d_{t1} ve d_{t2} 4 mm olarak belirlenmiştir. Arka katmanda toprak düzlem olarak kullanılan bakır plakanın kalınlığı d_c 0.035 mm'dir. İki katman arasındaki mesafe ise 3,5 mm olarak belirlenmiştir. Arka katmandaki rezonatör sayısı

artırıldıktan sonra yapılan parametrik analizlerin ardından elde edilen sonuçlar Şekil 45''de gösterilmiş ve en iyi sonuçlar yukarıda verilen parametreler ile elde edilmiştir. Benzetimlerin yapıldığı CST Microwave Studio paket programında yapının uyarıldığı EM dalganın gücü 0,5 W'dır. Şekil 79'da verilen grafikten yola çıkarak devre elamanı üzerinde harcanan gücün giriş gücüne oranı ile verimlilik hesabı yapılmıştır. Buna göre 0,9 GHz için verimlilik %33,74, 1,8 GHz için %64,00, 2,6 GHz için %49.48 ve 5,8 GHz için %93,34 olarak hesaplanmıştır. Ortalama verimlilik ise %60,14 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 79. Arka katmanda sayısı artırılan rezonatörlerden sonra devre elemanı üzerinde harcanan güç grafiği.

4.4.4 Tasarım T15-2

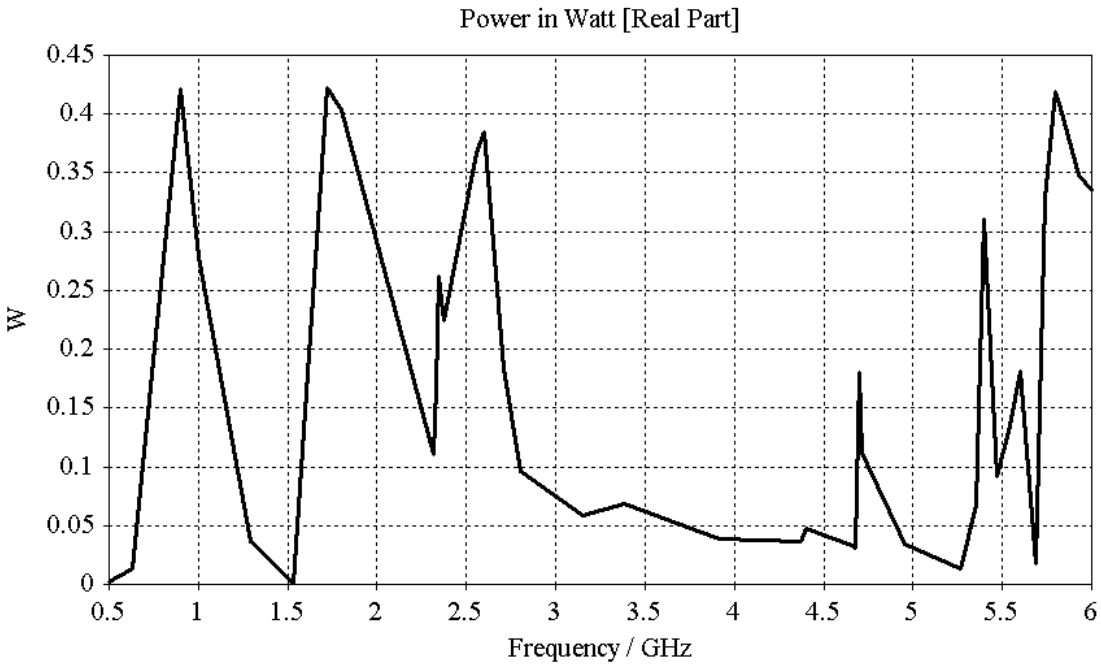
Tasarım T15 üzerinde devam eden analizler sonucunda çok katmanlı elektromanyetik enerji hasatlama için nihai bir sonuç Tasarım T15-2'de elde edilmiştir. Söz konusu analizler ilk olarak iki farklı alttaş kalınlığı kullanılarak yapılmıştır. Toprak düzlemin üzerinde olan 2,6 ve 5,8 GHz için tasarlanan halka rezonatörlerin alttaş kalınlığı artırılmıştır. Böylece yapı üzerinde gelen EM dalga için toprak düzlemi ile arasında daha fazla boşluk sağlanmıştır. Daha sonra yapının geometrisi değiştirilmeden (Şekil 78) boyutları üzerinden ve yapıya entegre edilen devre elemanının değerleri üzerinden analizler yapılmıştır. Gerçekleştirilen uzun süreli benzetim çalışmaları sonucunda yaklaşık ortalama %81,37 oranında verimliliğe sahip birçok katmanlı elde edilmiştir. Nihai yapının geometri parametreleri Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Yapıya ait parametrelerin değerleri

Parametre	**Uzunluk (mm)**	**Parametre**	**Uzunluk (mm)**

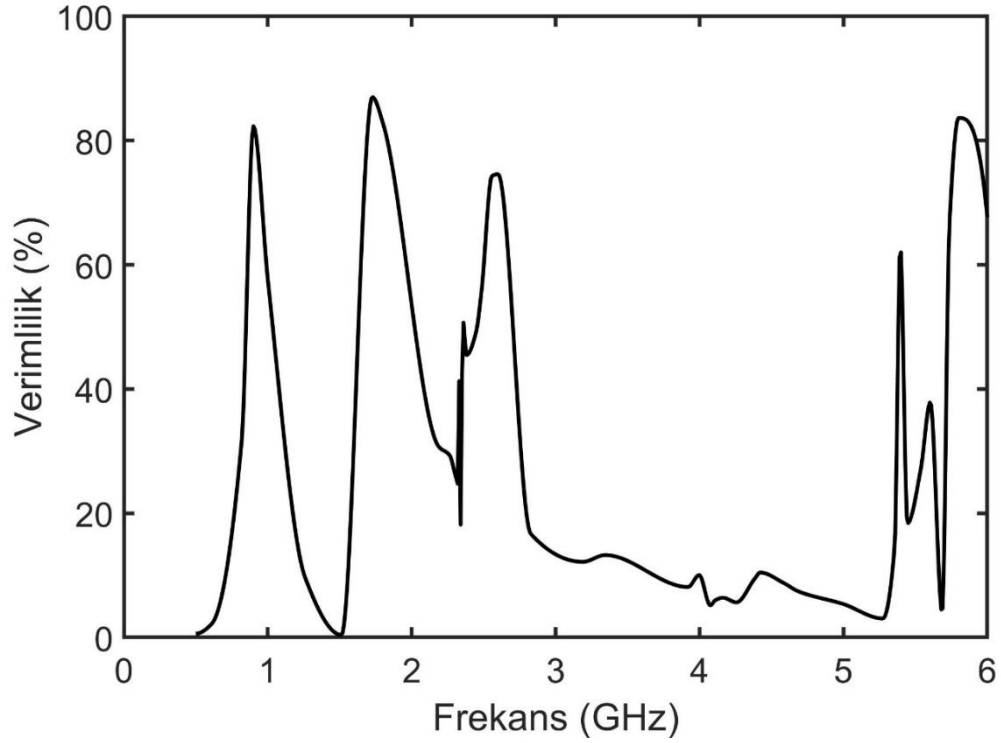
a	47	t_1	1
b	20,6	t_2	1
c	9,5	w_1	1,6
e	45,2	w_2	1,8
f	35,4	w_3	0,7
g_1	2,9	w_4	0,8
g_2	2	d_c	0,035
d_{t1}	4,3		
d_{t2}	3		

Tablo 5'deki verilere ek olarak yapıya entegre edilen devre elemanlarının değerleri R_1 ve R_2 sırasıyla 25 ve 75 Ohm'dur. İki katman arasındaki mesafe ise 2.1 mm'dir. yapıya ait devre elemanları üzerinde harcanan güç grafiği Şekil 80'de verilmiştir.



Şekil 80. Devre elemanları üzerinde harcanan güç.

Devre elemanları üzerinde harcanan güç 0,9 GHz'de 0,4116 W, 1,8 GHz'de 0,4140 W, 2,6 GHz'de 0,3730 W, 5,8 GHz'de 0,4182 olarak hesaplanmıştır. CST microwave studio benzetim programında gerçekleştirilen çalışmalarda yapıyı uyaran EM dalganın gücü 0,5 W olarak belirlenmiştir. Bu değer üzerinden elde edilen frekansa bağlı verimlilik grafiği şekil 81'de, hedeflenen frekanslardaki verimlilik ise Tablo 6'da verilmiştir.

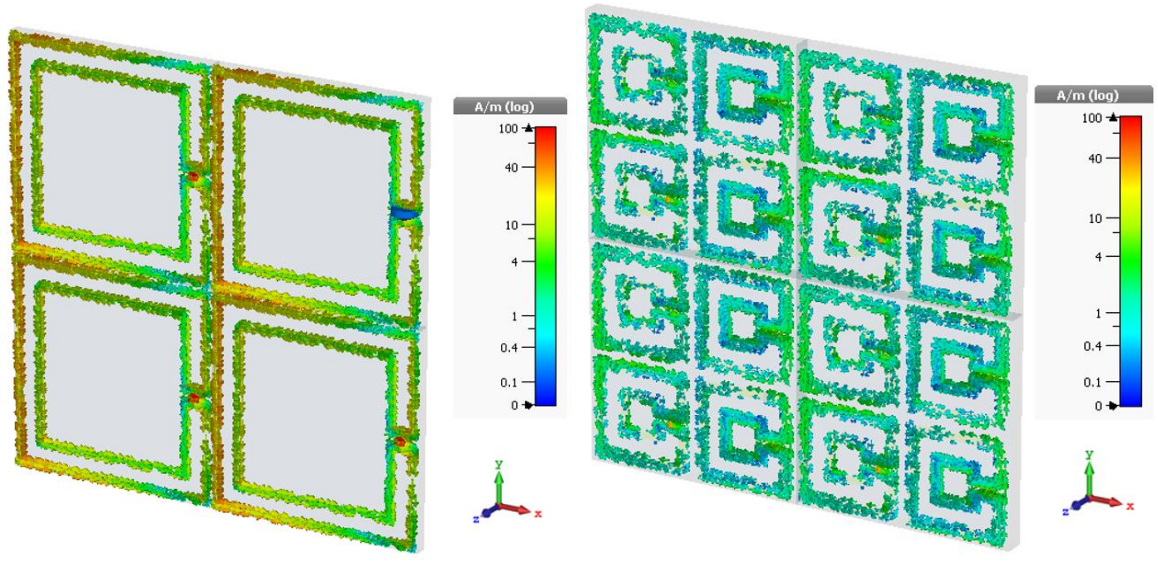


Şekil 81. Frekansa bağlı verimlilik grafiği.

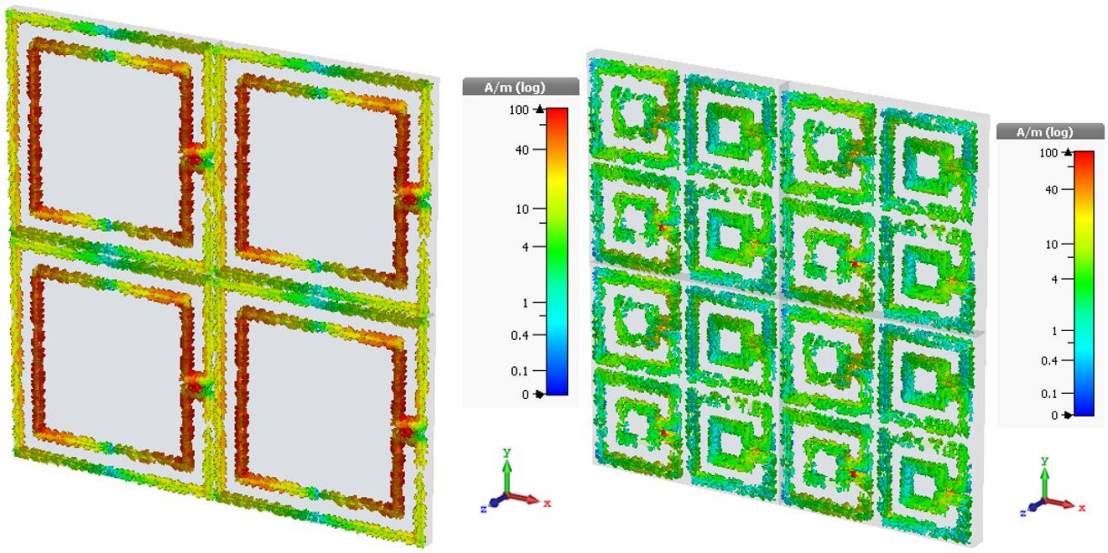
Tablo 6. Frekanslara karşılık gelen verimlilik.

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

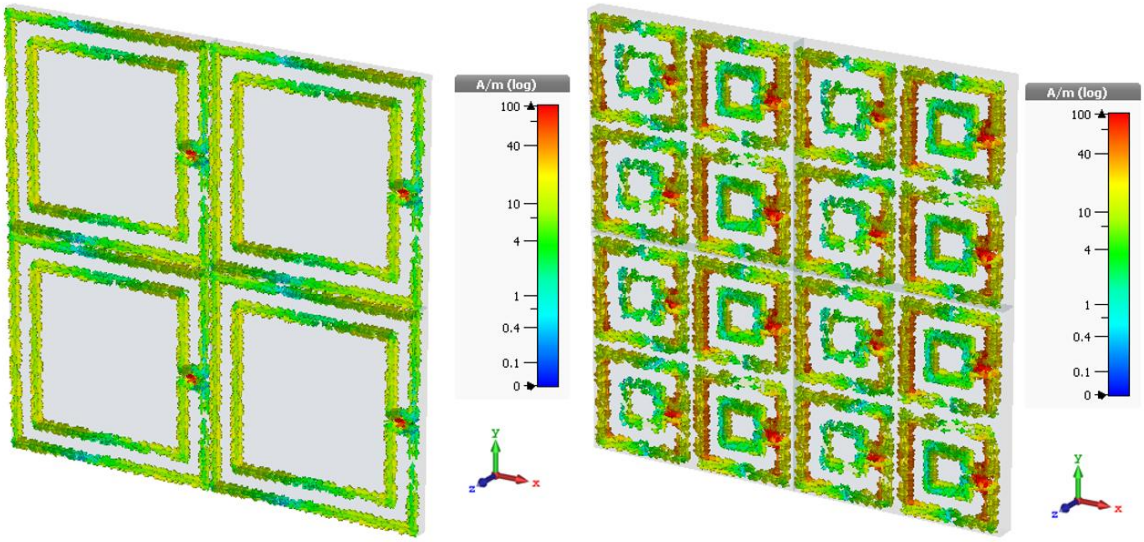
Hedef frekanslardaki ortalama verimlilik ise yaklaşık %80,85 olarak hesaplanmıştır. Projede hedeflenen ortalama %75 verimliliğin yaklaşık %5 üzerinde verimlilik elde edilmiştir. Her bir rezonans frekansı için yüzey akım dağılımları Şekil 82'de gösterilmiştir.



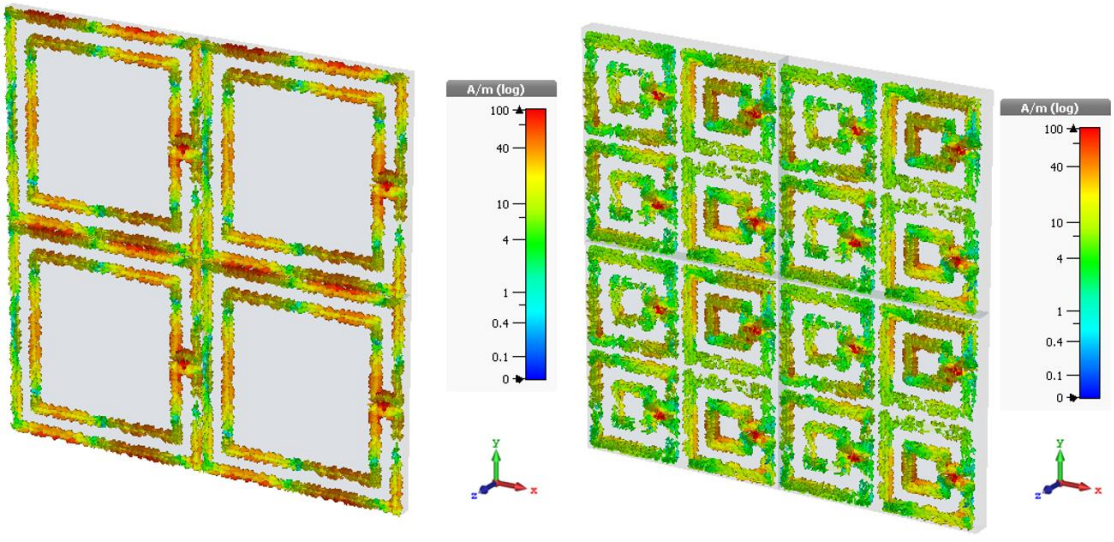
(a)



(b)



(c)



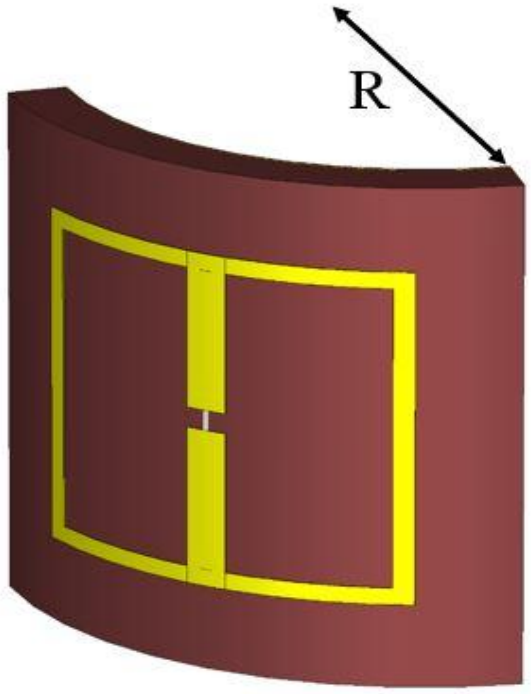
(d)

Şekil 82. (a) 0,9 GHz için (b) 1,8 GHz için (c) 2,6 GHz için (d) 5,8 GHz için yüzey akım dağılımları.

0,9 GHz için Şekil 82.a'daki yüzey akım dağılımları incelendiğinde en büyük katkının 0,9 GHz'de rezonans göstermesi için tasarlanan ön katmanda bulunan dış kısımdaki ayrık halka rezonatörden geldiği görülmüştür. 1,8 GHz için Şekil 82.b'deki yüzey akım dağılımları incelendiğinde ise en büyük katkının 1,8 GHz'de rezonans göstermesi için tasarlanan ön katmanda bulunan iç kısımdaki ayrık halka rezonatörden geldiği görülmüştür. 2,6 GHz için Şekil 82.c'deki yüzey akım dağılımları incelendiğinde ise en büyük katkının 2,6 GHz'de rezonans göstermesi için tasarlanan arka katmanda bulunan dış kısımdaki ayrık halka rezonatörden geldiği görülmüştür. 5,8 GHz için Şekil 82.d'deki yüzey akım dağılımları incelendiğinde hem ön katmanda bulunan iki ayrık halka rezonatörden hem de arka katmanda bulunan ve 5,8 GHz'de rezonans göstermesi için tasarlanan ayrık halka rezonatörlerden tepki gelmektedir.

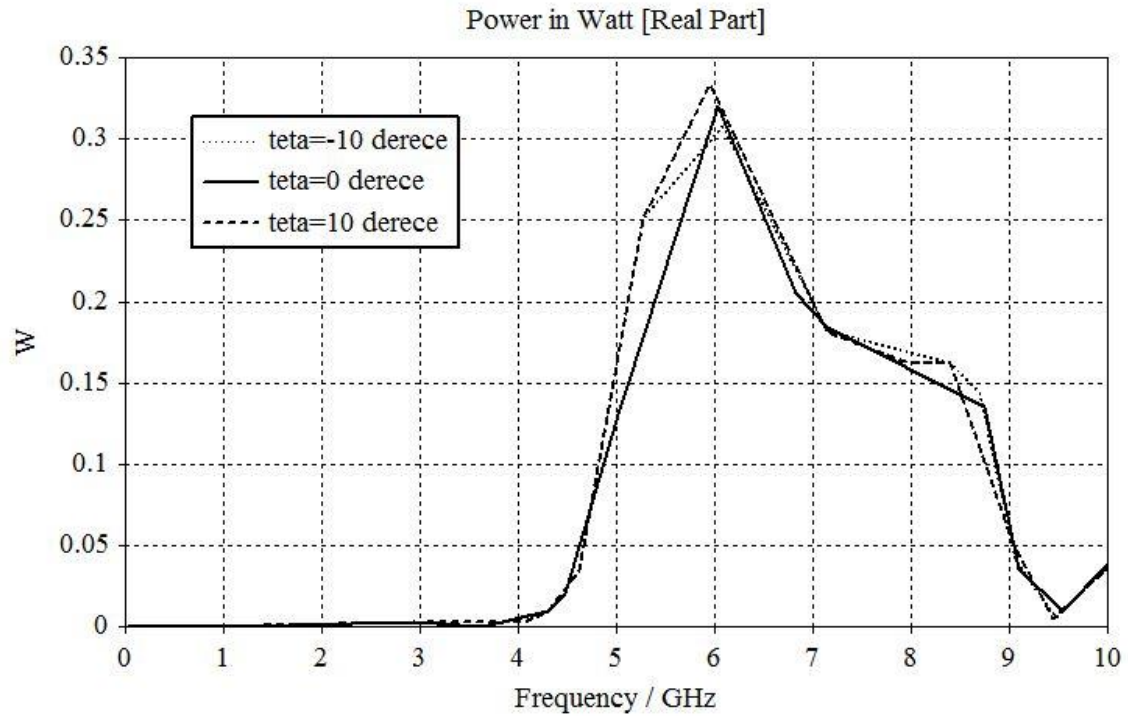
4.5 Bükülebilir Metamalzeme Tabanlı Elektromanyetik Enerji Hasatlama

Daha önce tasarımları yapılmış yapılar arasından seçilen metamalzeme tabanlı EM dalga hasatlayıcılardan bir tanesi seçilerek bükülmesi durumunda verimliliğin nasıl değişeceği üzerine analizler gerçekleştirilmiştir. CST Microwave Studio benzetim programı kullanılarak yapılan çalışmada T1 tasarımı kullanılmıştır. Şekil 83'de görüldüğü gibi bükülme yarıçap değeri R=10 mm olarak belirlenmiştir ve analizler bu yarıçap değerine göre yapılmıştır.



Şekil 83. Tasarım T1'in bükülerek yapılan analizi sonucu elde edilen görsel.

Bükülerek etkisi incelenen tasarım T1'de Şekil 1(a)'daki değerlerde değişiklik yapılmamıştır. Geliş açısının değişiminin (-10,0 ve +10,0° geliş açılarında) devre elemanı üzerinde harcanan güce etkisi incelenmiştir.



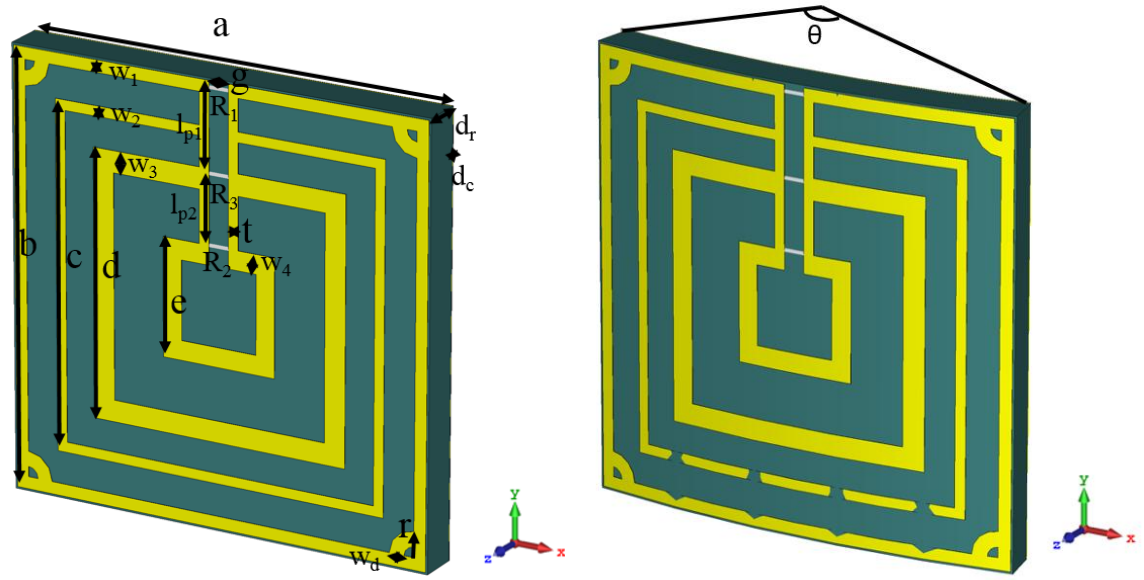
Şekil 84. Bükülen yapı üzerindeki devre elemanında harcanan güç.

Tasarım T1'de metamalzeme tabanlı EM dalga hasatlayıcının tepkisi 5,8 GHz'te iken bükülen yapının hasatlama frekansının tepe noktası 6 GHz'e kaymaktadır ve genel olarak hasatlama verimliliğinde düşüş gözlenmiştir. Bu frekans değişikliği çok önemli görülmemektedir çünkü Şekil 84'de verilen grafiklerde veri nokta sayısı arttırıldığında bu farkın azalabileceği düşünülmektedir. Yukarıda birçok tasarım için verilen verimlilik grafiklerinin bazılarında yumuşak (smooth) eğriler bazılarında da keskin (az veri noktalı) eğriler elde edilmiştir. Ancak bazı yapılarda yumuşak eğrilerin elde edilmesi için çok uzun benzetim sürelerine ihtiyaç vardır, bu durum da etkin parametrik analiz yapmayı pratikte çok zorlaştırmaktadır.

5.8 GHz'te ve 0° derecedeki verimlilik %55,5 olarak hesaplanmıştır. Analizlerin gerçekleştiği diğer dereceler olan +10° ve -10° ise verimlilik sırası ile %63,1 ve %57,64 olarak hesaplanmıştır.

4.5.1 Tasarım T16

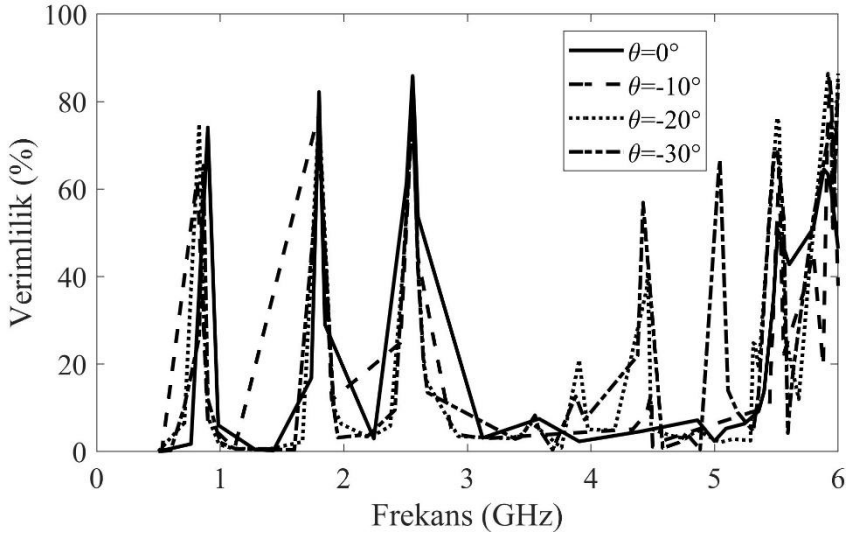
Bükülebilir alttaş olarak daha önceki tasarımlarda kullanılan PTFE (teflon) kullanılması oldukça uygun bulunmuştur. Çünkü hem esnek bir malzeme özelliğine sahip hem de kayıp tanjantı düşük seviyelerde olduğu için EM hasatlama çalışmaları için oldukça uygun bir malzemedir. CST Microwave Studio benzetim ortamında gerçekleştirilen analizler sonucunda Şekil 85'deki yapı elde edilmiştir.



(a) (b)

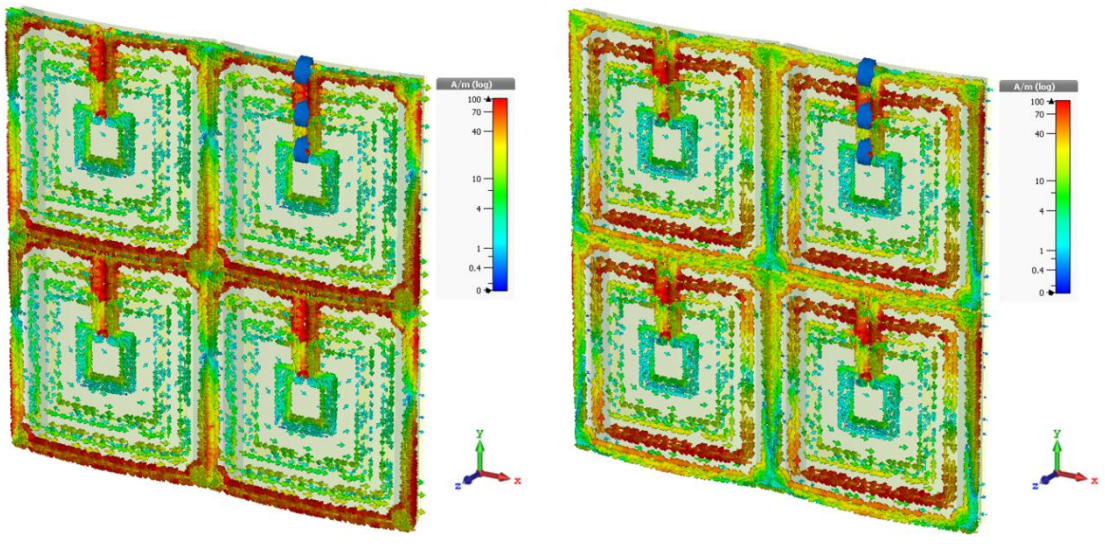
Şekil 85. Bükülebilir yapıya ait (a) bükülme işleminden önceki hali (b) sonraki hali.

Şekil 85.a'da görülen a birim hücrenin kenar uzunluğunu temsil etmektedir ve değeri 43 mm'dir. en dış kısımdaki ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğu b, genişliği ise w_1 ile ifade edilmiştir ve değerleri sırasıyla 42,6 mm ve 1,2 mm'dir. 1,8 GHz frekansında tepki vermesi için tasarlanan ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğunu c, genişliğini ise w_2 temsil etmektedir ve bunların değerleri sırasıyla 33,9 mm ve 1mm'dir. 2,6 GHz frekansında rezonans vermesi için tasarlanan ayrık kare halka rezonatörün kenar uzunluğu d, genişliği w_3 ile gösterilmiştir ve bunların değerleri sırasıyla 26 mm ve 2,1 mm'dir. En iç kısımdaki rezonatörün kenar uzunluğunu ifade eden e ve genişliğini ifade eden w_4'ün değerleri ise sırasıyla 11,5 mm ve 1,9 mm'dir. En dış kısımdaki halkanın köşelerine yerleştirilen çeyrek halka rezonatörün yarıçapı r genişliği ise w_d olmak üzere değerleri sırasıyla 2,5 mm ve 1 mm'dir. Ayrık halka rezonatörlerin birleştirildikleri iletken kısmın genişliğine karşılık gelen t'nin sayısal karşılığı ise 1 mm'dir. Ayrık bölgesinin genişliğini temsil eden g'nin değeri 2 mm'dir. R_3 devre elemanının bağlandığı kısım iletken hattın tam ortası olmak ile birlikte lp_1, R_1 'in merkezden olan uzaklığını lp_2 ise R_2'nin merkezden olan uzaklığına karşılık gelmektedir ve değerleri sırasıyla 8,1 mm ve 6,8 mm'dir. R_1, R_2 ve R_3' e karşılık gelen değerler ise 235 ohm, 40 ohm ve 15 ohm'dur. Şekil 85.b'de ise birim hücrenin bükülme açısını temsil eden θ'nın değeri 20^0'dir.

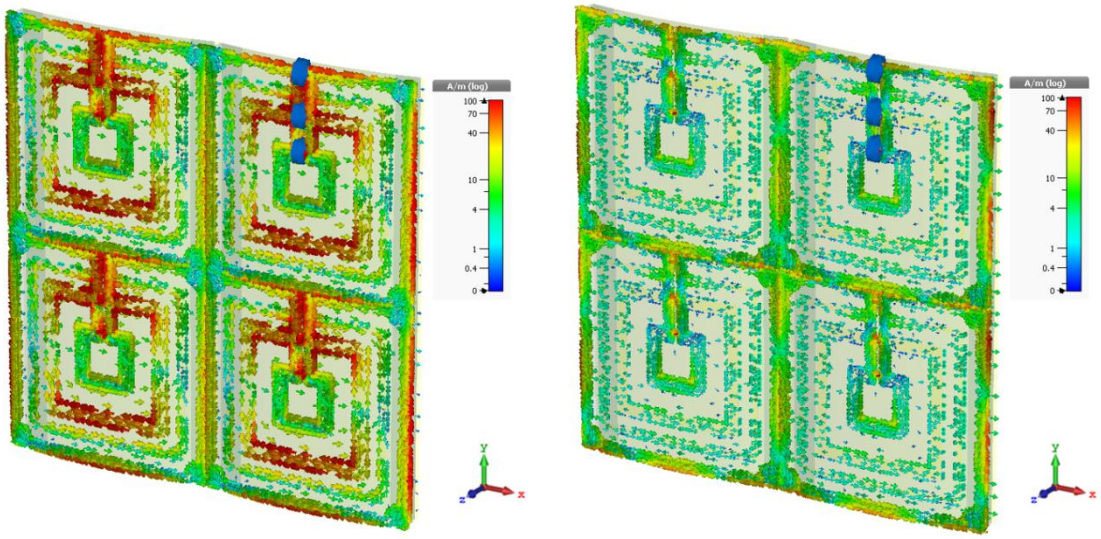


Şekil 86. Bükülebilir yapıya ait açıya bağlı verimlilikler.

CST microwave studio benzetim programında gerçekleştirilen çalışmalar elde edilen sonuçlar şekil 86'da verilmiştir. TM modunda uyarılan birim hücre yapısında 0^0'de verimlilikler 0,9 GHz'de %74,12, 1,8 GHz'de 82,23, 2,56 GHz'de %85 ve 5,88 GHz %64 olarak hesaplanmıştır. Ortalama verimlilik ise %76,3 olarak hesaplanmıştır. Geliş açısının -10^0' olduğu durumda ise verimlilikler 0,81 GHz'de %61, 1,8 GHz'de %77,1, 2,56GHz'de 78,9 ve 5,93 GHz'de %84,9 olarak hesaplanmıştır. Ortalama verimlilik ise %75,48 olarak hesaplanmıştır. Geliş açısının -20 derece olduğu durumda ise 0,83 GHz'de %74,8 verimlilik, 1,8 GHz'de %77,5 verimlilik, 2,56 GHz'de %79 verimlilik ve 5,9 GHz'de %86 verimlilik elde edilmiştir. Ortalama verimlilik ise %79,3 olarak hesaplanmıştır. Geliş açısının -30^0 olduğu durumda ise 0,86 GHz'de %65,4 verimlilik, 1,8 GHz'de %77,8 verimlilik, 2,56 GHz'de %79,5 verimlilik ve 5,94 GHz'de %75,4 verimlilik elde edilmiştir. Ortalama verimlilik ise %74,5 olarak hesaplanmıştır. Tasarım T16 simetrik bir yapı olduğu için diğer yönden (15^0, 20^0, 30^0) uyarıldığında da aynı sonuçlar elde edilecektir.



(a) (b)



(c) (d)

Şekil 87. Bükülebilir yapıya ait yüzey akım dağılımları (a) 0,9 GHz için (b) 1,8 GHz için (c) 2,56 GHz için (d) 5,88 GHz için.

Şekil 87'de bükülebilir yapıya ait bükülme açısının 20^0 olduğu geliş açısının ise 0^0 olduğu durumda rezonans frekanslarında indüklenen akımın yüzey akım dağılımları ve hangi iletim katmanından katkı geldiği görülmektedir.

Tablo 7. Geliş açısının değişiminin verimliliğe etkisi.

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

Tablo 7'de görüldüğü gibi geliş açısının 0^0 olduğu durum ile -10^0 olduğu durumlarda ortalama verimlilikte ki farkın oranı yaklaşık %3,4 civarındadır. Geliş açısının -10^0 olduğu durum ile -20^0 olduğu durumlarda ortalama verimlilikteki farkın oranı yaklaşık %5 civarındadır. Geliş açısının -20^0 olduğu durum ile -30^0 olduğu durumlarda ortalama verimliliğin farkındaki oran yaklaşık %6,4 olarak hesaplanmıştır. Proje hedeflerinden biri olan bükülebilir yapıda her bir açıda verimliliğin en fazla %10 oranında değişmesi hedefi yakalanmıştır. Geliş açısının 0^0 olduğu durum ile -30^0 olduğu durumda ise verimlilik oranları arasındaki farkın oranı ise yaklaşık %2,4 civarındadır.

5. SONUÇ

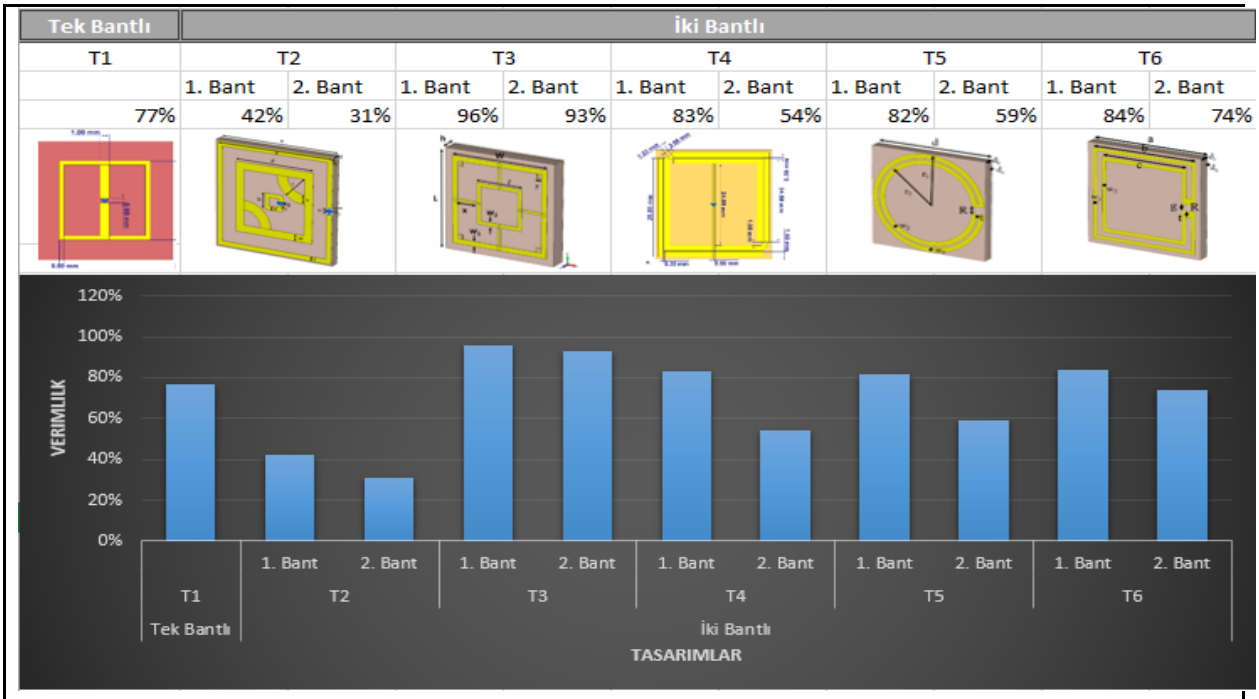
Literatürde dört bantta elektromanyetik hasatlama yapabilen metamalzeme tabanlı bir hasatlayıcı bulunmadığı, en fazla üç frekans bandına kadar hasatlama yapılabildiği literatürden örnekler verilerek tartışılmıştır. Proje çalışmaları çerçevesinde, proje önerisinde belirtilen dört farklı frekansta (0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz) elektromanyetik hasatlama yapabilecek tek tabakalı ve iki tabakalı olmak üzere metamalzeme tabanlı hasatlayıcılar tasarlanmıştır. Tek tabakalı metamalzeme hasatlayıcıda iç içe geçmiş ve birbirine ayrık kısımlarından bağlı dört adet ayrık halka rezonatör kullanılmıştır. Ayrık

kısımlarda uygun pozisyonlara yüksek verimlilik verecek biçimde uygun direnç değerleri yerleştirilmiştir. Hasatlayıcı yapıların tasarımına öncelikle tek bantlı ve iki bantlı hasatlayıcı yapıların benzetim ortamında tasarlanması ile başlanmıştır ve süreç içerisinde kazanılan deneyim ile hasatlama bantlarının sayısı artırılmıştır. Tek katmanlı metamalzeme tabanlı hasatlayıcıda dört frekans bandında ortalama %75'i aşan hasatlama verimlilikleri elde edilmiştir. İki katmanlı metamalzeme hasatlayıcıda ise ön katmanda iki adet ayrık halka rezonatör kullanılarak 0,9 GHz ve 1,8 GHz frekans bantları, arka katmanda ise daha küçük ebatlarda iki ayrık halka rezonatör kullanılarak 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekans bantları hasatlanmıştır. İki tabakalı metamalzeme tabanlı hasatlayıcıda dört frekans bandında en yüksek ortalama %80,85 hasatlama verimliliği elde edilmiştir. 20^o'ye kadar bükülebilen alttaşlar ile 0^o ile 30^o açıları arasında hasatlama verimliliğinde en fazla %6 değişim olduğu tespit edilmiştir. Teflon alttaş üzerine fotolitografik yöntem ile tek katmanlı ve dört bantta ortalama %79,5 verimliliğe sahip metamalzeme tabanlı hasatlayıcı üretilmiştir. Ayrık halka rezonatörlerin ayrık kısımlarında uygun konumlara direnç elemanları lehimlenmiştir. Metamalzeme hasatlayıcının mikrodalga laboratuvar ortamında yansıma spektrumu alınmıştır. Projede hedeflenen dört frekans bandına yakın frekanslarda (1,00 GHz, 1,86 GHz, 2,74 GHz ve 5,88 GHz) üretilen hasatlayıcıda soğurma gözlenmiştir. Üretim koşulları ve yöntemleri iyileştirilirse, üretilen hasatlayıcıların hedeflenen dört frekansta (0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz) kayma olmaksızın bir hasatlama yapılabileceği kanaati oluşmuştur. Tek katmanlı, bir bantlı ve iki bant sayısına sahip tasarımların verimliliklerinin grafiksel gösterimi Şekil 88'de verilmiştir. Tek katmanlı ve dört bantlı yapıların verimliliklerinin grafiksel gösterimi Şekil 89 a ve b'de verilmiştir. Çok katmanlı yapıların verimliliklerinin grafiksel oranı ise Şekil 90'da verilmiştir.

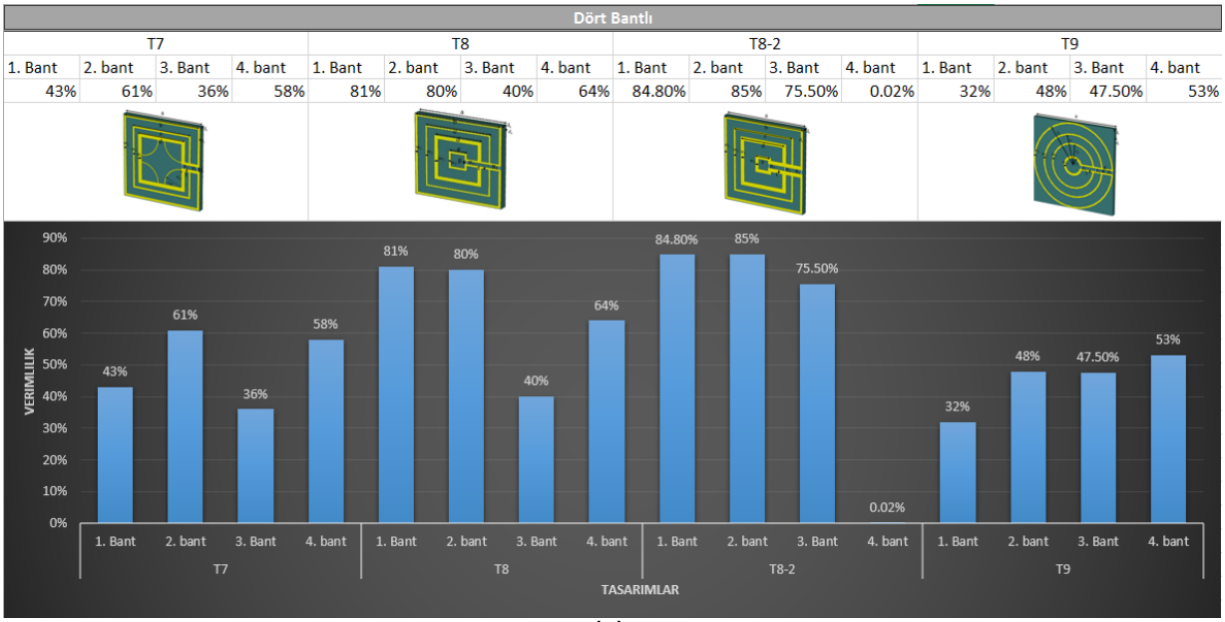
Tek katmanlı ve iki katmanlı hasatlayıcılar ile ilgili bu proje kapsamında vapılan benzetim sonuçları iki katmanlı yapının tek katmanlı yapıya göre verimliklikte kayda değer bir artış sağlamadığını göstermektedir. İki katmanlı yapının tasarım çalışmalarına fazladan bir esneklik kazandıracağı beklenirken hasatlayıcı yapısını karmaşıklaştırdığı, hacmini büyüttüğü ve dolayısıyla üretim maliyetini arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Tasarlanan hasatlayıcılarda kullanılan alttaş teflonun bükülebilir olması hasatlayıcıların çok daha geniş bir uygulama alanı bulmasının önünü açmaktadır. Proje kapsamında tasarlanan hasatlayıcı optimum yapıların verimliliklerinin bükülmeye karşı yeterince yüksek değerlerde kaldığı tespit edilmiştir.

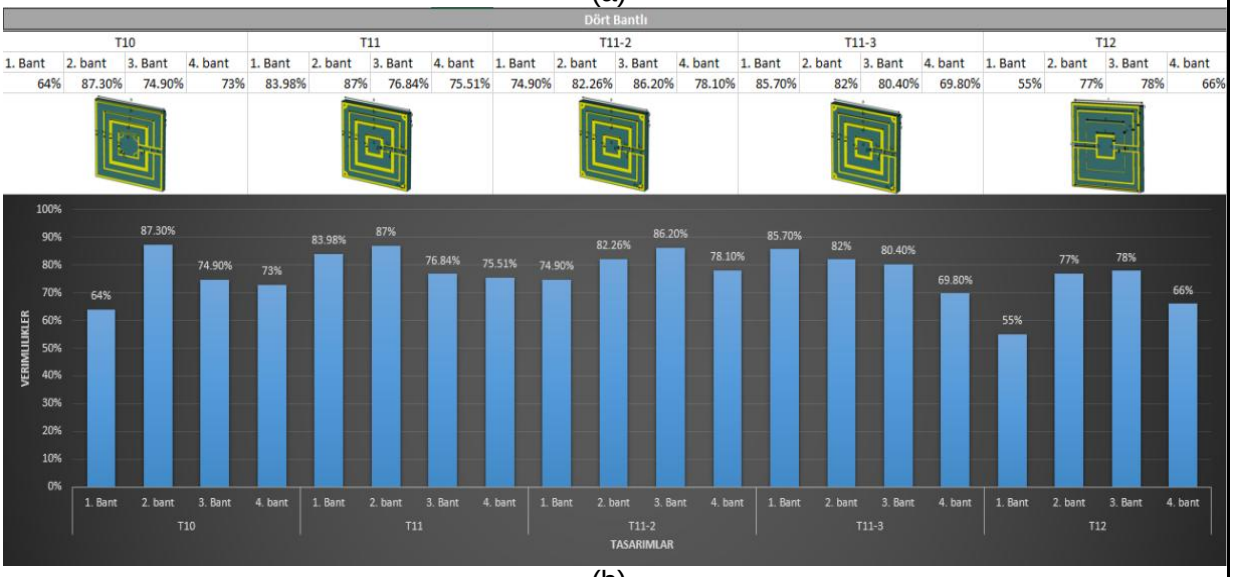
Projenin en önemli sonucu Wi-Fi ve WLAN frekansları olan dört frekans bandında %80'lere varan hasatlama verimliliğinde yapıların literatürde ilk defa tasarlanması ve üretilmesidir. Ayrıca proje çalışmaları iki adet yüksek lisans öğrencisinin tezlerine ve konu hakkındaki birikimlerine katkı sağlamıştır. Bu proje kapsamında yapılan çalışmalar sonucu elde edilen deneyimlerin ileriki yıllarda proje takımınca yürütülecek metamalzemeler ve uygulamaları ile ilgili birçok çalışma için sağlam bir temel oluşturacağı düşünülmektedir.



Şekil 88. Tek katmanlı yapılara ait verimliliğin grafiksel gösterimi.

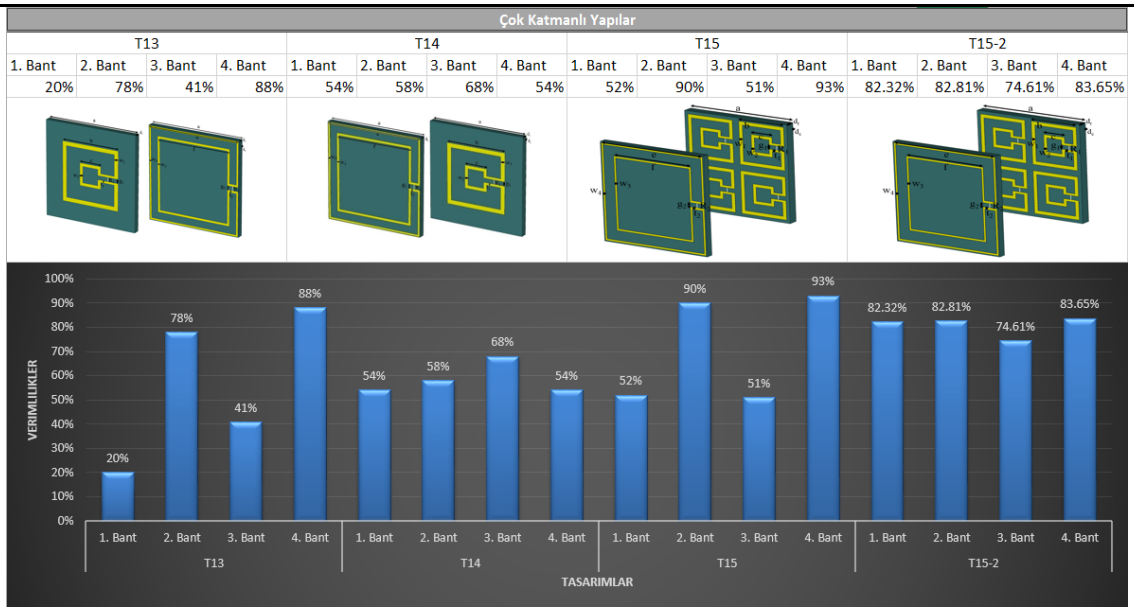


(a)



(b)

Şekil 89. Dört bantlı yapılara ait verimliliklerin grafiksel gösterimi.



Şekil 90. İki katmanlı yapılara ait verimliliklerin grafiksel gösterimi.

6. KAYNAKLAR

Alavikia, B., Almoneef, T.S., Ramahi, O.M. 2014. “Electromagnetic energy harvesting using complementary split-ring resonators”, Applied Physics Letters, 104, 163903.

Alavikia, B., Almoneef, T.S., Ramahi, O.M. 2015. “Complementary split ring resonator arrays for electromagnetic energy harvesting”, Applied Physics Letters, 107, 033902.

Almoneef, T., Ramahi, O.M. 2015. “Metamaterial electromagnetic energy harvester with near unity efficiency”, Applied Physics Letters, 106, 153902.

Costa, F., Genovesi, S., Monorchio, A. 2009. “On the bandwidth of high-impedance frequency selective surfaces,” IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, 8, 1341–1344.

Duan, X., Chen, X., Zhou, Y., Zhou, L., Hao, S. 2018. “Wideband metamaterial electromagnetic energy harvester with high capture efficiency and wide incident angle”, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 17, 9, 1617-1621.

Nishimoto, H., Kawahara, Y., Asami, T. 2010. “Prototype implementation of ambient RF energy harvesting wireless sensor networks”, IEEE Sensors 2010 Conference, 1282-1287.

Pang, Y., Cheng, H., Zhou, Y., Wang, J. 2013. “Analysis and design of wire-based metamaterial absorbers using equivalent circuit approach”, Journal of Applied Physics, 113, 114902.

Pinuela, M., Mitcheson, P.D., Lucyszyn, S. 2013. “Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 61, 7, 2715-2726.

Ramahi, O.M., Almoneef, T., Alshareef, M., Boybay M. 2012. ”Metamaterial particles for electromagnetic energy harvesting”, Applied Physics Letters, 101, 173903.

Shang, S., Yang, S., Shan, M., Liu, J., Cao, H. 2017. “High performance metamaterial device with enhanced electromagnetic energy harvesting efficiency”, AIP Advances, 7, 105204.

Xu H. X. et al. 2012. “Triple-band polarization-insensitive wide-angle ultraminiature

metamaterial transmission absorber," Physical Review B, 86, 205104.

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

Zhong, H.-T., Yang, X.-X., Tan, C., Yu, K. 2016. "Triple-band polarization-insensitive and wide-angle metamaterial array for electromagnetic energy harvesting", Applied Physics Letters, 109, 253904.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. BARIŞ AKAOĞLU
Proje No:	116E188
Proje Başlığı:	Metamalzeme Yapıların Enerji Hasadı Uygulamaları
Proje Türü:	3001 - Başlangıç AR-GE
Proje Süresi:	12
Araştırmacılar:	ASIM EGEMEN YILMAZ, FULYA BAĞCI
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ANKARA Ü. MÜHENDİSLİK F. FİZİK MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/05/2017 - 01/08/2018
Onaylanan Bütçe:	93998.0
Harcanan Bütçe:	80538.31
Öz:	Bu proje, tek katmanlı ve çok katmanlı metamalzeme yapılar kullanılarak 0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz Wi-Fi ve WLAN bandlarına yönelik AC güç hasadı gerçekleştirilmesini, bükülebilir esnek alttaşların hasatlama verimliliğine etkisinin araştırılmasını kapsamaktadır. Proje sonucunda iyi hasatlama verimliliğine sahip olan tek katmanlı, dört bantlı bir metamalzeme hasatlayıcı üretilerek sayısal hesaplamalarla gerçekleştirilen sonuçların doğruluğu mikrodalga laboratuvar ortamında test edilmiştir. Proje çalışması; proje öneri formunda hedeflendiği doğrultuda yürütülmüştür. Bu bağlamda, 900 MHz, 1,8 GHz, 2,6 GHz ve 5,8 GHz frekans bantlarında %75?in üzerinde hasatlama yapabilen tek katmanlı bir metamalzeme hasatlayıcı tasarımı hedefi başarı ile tamamlanmıştır. Çok katmanlı metamalzeme hasatlayıcı olarak iki katmanlı bir hasatlayıcı tasarlanmış olup öngörülen dört frekans bandında yine %75?in üzerinde hasatlama verimi elde edilerek başarı hedefi sağlanmıştır. Bükülebilir alttaşlar ile de elektromanyetik enerji hasadına yönelik çalışmalar da gerçekleştirilmiş olup farklı geliş açıları (0o-30o) için verimliliğin en fazla %6 farklılaştığı görülmüştür. Proje süresince tasarlanan metamalzeme tabanlı hasatlayıcı yapıları içerisinde yüksek verime sahip yapı (%79,5 verimlilik) üretilmiştir ve direnç elemanları metamalzeme üzerinde uygun konumlara lehimlenmiştir. Yapının ölçülen soğurma spektrumunda projede belirtilen dört frekans bandında da soğurma gözlenmiştir. Deney sonuçlarının benzetim sonuçlarını doğruladığı görülmüştür. Proje çerçevesinde lisansüstü tez konuları metamalzemeler üzerine odaklanan iki yüksek lisans öğrencisi yetiştirilmiştir. Ayrıca, proje kapsamında yedi adet ulusal kongre bildirisi sunulmuştur. Dört bantlı tek katmanlı metamalzeme hasatlayıcının özellikleri makale formatında hazırlanarak SCI indeksli bir dergiye gönderilmiştir. Projeye sağladığı maddi destekten dolayı TÜBİTAK ve EEEAG?ye teşekkür ederiz.
Anahtar Kelimeler:	Enerji Hasadı, Metamalzemeler, Metamalzeme Tabanlı Enerji Hasadı, Elektromanyetik Hasatlama
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK

Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Metamalzeme ile 1,8 GHz ve 2,6 GHz Frekanslarında ElektromanyetikHasatlama (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum), 2- GSM ve Wi-Fi bantlarına yönelik metamalzeme tabanlı enerji hasatlayıcı (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum), 3- FR-4 Alttaş ile 5,8 GHz Frekans Bandına Yönelik Metamalzeme Hasatlayıcı (Bildiri - Ulusal Bildiri - Poster Sunum), 4- POLARIZATION DEPENDENT POWER HARVESTING AT 3.6 GHz and 5.8GHz WiFi BANDS (Bildiri - Ulusal Bildiri - Poster Sunum), 5- GSM ve Wi-Fi Bantlarına Yönelik İki Katmanlı Metamalzeme Hasatlayıcı (Bildiri - Ulusal Bildiri - Poster Sunum), 6- FR-4 Alttaş ile 5,8 GHz Frekans Bandına Yönelik Metamalzeme Hasatlayıcı (Bildiri - Ulusal Bildiri - Poster Sunum), 7- Metamalzeme Yapılar Kullanılarak Çift-Bantlı Kutupluluktan Bağımsız Enerji Hasatlama (Bildiri - Ulusal Bildiri - Poster Sunum), 8- Ayrık Halka Rezonatörler ile 1.8 GHz ve 2.6 GHz Frekanslarda Elektromagnetik Enerji Hasatlama (Bildiri - Ulusal Bildiri - Poster Sunum),

TÜBİTAK