



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 30.06.2022
Kabul Tarihi : 09.08.2022

Received Date : 30.06.2022
Accepted Date : 09.08.2022

NESNELERİN İNTERNETİ (IOT) UYGULAMALARI İÇİN POLARİZASYONDAN BAĞIMSIZ METAMALZEME EMİCİ TABANLI ENERJİ HASATLAMA

POLARIZATION-INDEPENDENT METAMATERIAL ABSORBER BASED HARVESTING FOR INTERNET OF THINGS (IOT) APPLICATIONS

Ayşe İNCESU DOKUMACI^{1*} (ORCID: 0000-0001-9746-1935)

Vedat ÖZKANER² (ORCID: 0000-0001-8293-0022)

Muharrem KARAASLAN² (ORCID: 0000-0003-0923-1959)

¹Kilis 7 Aralık Üniversitesi, Elektrik Programı Bölümü, Kilis, Türkiye

²İskenderun Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İskenderun, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ayşe İNCESU DOKUMACI, ayseincesu@kilis.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada Nesnelerin İnterneti (IoT) için metamalzeme emici tabanlı enerji hasatlayıcı önerilmiştir. Önerilen metamalzeme yapının ön yüzeyi bakır rezonatör ile dielektrik malzemeden ve arka yüzey de tamamen bakırdan oluşmaktadır. Önerilen metamalzeme tabanlı emici 2.44 GHz ve 4.33 GHz mikrodalga frekanslarında çalışmaktadır. Bu çalışmada enine elektrik (TE), enine manyetik (TM) ve enine elektromanyetik (TEM) modları sayısal olarak incelenmiş ve emilim değerleri karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada Sonlu Entegrasyon Tekniği (FIT) tabanlı simülasyon programı kullanılmış ve FIT tabanlı simülasyon sonuçlarına göre 2.44 GHz'de emilim tepe noktası yaklaşık %91 ve 4.33 GHz frekansta ise emilim tepe noktası %97'dir. Sunulan yapının sinyal emici özelliği sayesinde hapsolan elektromanyetik enerji yerleştirilen dirençler üzerinden elektrik enerjisine dönüştürülmüştür. Bu çalışmanın amacı ISM çalışma frekanslarında metamalzeme emici tabanlı hasatlayıcı ile elektromanyetik dalgaların enerji emilimi ve dönüşümü daha küçük yapılarla sağlamaktır.

Anahtar Kelimeler: IoT teknoloji, metamalzeme, sinyal emici

ABSTRACT

In this study, a metamaterial absorber based energy harvester is proposed for the Internet of Things (IoT). The front surface of the proposed metamaterial structure consists of copper resonator and dielectric material, and the back surface is completely copper. The proposed metamaterial-based absorber operates at microwave frequencies of 2.44 GHz and 4.33 GHz. In this study, transverse electric (TE), transverse magnetic (TM) and transverse electromagnetic (TEM) modes were numerically investigated and their absorption values were compared. In this study, Finite Integration Technique (FIT) based simulation program was used and according to the FIT based simulation results, the absorption peak is approximately 91% at 2.44 GHz and 97% at 4.33 GHz frequency. Thanks to the signal absorbing feature of the presented structure, the trapped electromagnetic energy converted into electrical energy through resistors placed. The aim of this study is to provide energy absorption and conversion of electromagnetic waves with a metamaterial absorber based harvester at ISM operating frequencies with smaller structures.

Keywords: IoT technology, metamaterial, absorber

ToCite: İNCESU DOKUMACI, A., ÖZKANER, V., & KARAASLAN, M., (2022). NESNELERİN İNTERNETİ (IOT) UYGULAMALARI İÇİN POLARİZASYONDAN BAĞIMSIZ METAMALZEME EMİCİ TABANLI ENERJİ HASATLAMA. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(3), 461-471.

GİRİŞ

Nesnelerin interneti (IoT) geçmişten günümüze kadar kullanılan insan-makine iletişiminin yerini almaya hazırlanan bir adaydır. IoT, insan müdahalesi olmadan cihazdan cihaza iletişimi mümkün kılar. Akıllı bir evde yaşamaktan tıp endüstrisine ve nanosensörlerin kullanım alanlarına kadar neredeyse tüm modern hayatı her yönden etkileyecek bir teknolojidir. Nesnelerin interneti (IoT) cihazların gelecekte tamamen tüm hayatımızda olması beklenmektedir. Düşük güçlü IoT cihazlarında önemli miktarda enerji tüketen sensörler IoT teknolojisinin önemli elemanlarından bir tanesidir. Elektromanyetik dalgalar kullanılarak enerji hasadı ile sağlanan enerji tıp, gıda ve tarım gibi çeşitli sektörlerde tercih edilen düşük güçlü sensörlerin çalışması için kullanılabilir. Tarım alanında IoT teknolojisinde yağış, sıcaklık, toprak nemi gibi sensörler ya yerin altında ya da üstünde kullanılmaktadır (Mattsson et al., 2018). Yerin üstünde bulunan sensörlerin çalışması için gerekli olan enerji pil veya güneş pilleri gibi seçeneklerle sağlanmaktadır. Fakat bunlar pahalı olması, çevre sorunları ve uzak alanlara erişilmesinin zorlukları gibi nedenlerden dolayı dezavantaj getirmektedir. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için de en iyi çözüm elektromanyetik dalgaların enerjisini kullanmaktır. Bununla ilgili bir çalışmada elektromanyetik enerji hasadı kullanarak kablosuz tıp uygulamasında giyilebilir bir sensör önerilmiştir (Biswas et al., 2018).

Yeni nesil IoT cihazlarının hem iletim hem de güç aktarımı açısından tamamen kablosuz olması gerekmektedir. Günümüzde sensörlerin güç kaynaklarından uzak mesafede olması nedeniyle kablosuz güç aktarımı önem kazanmıştır. Ortamdaki enerjiyi kullanmak IoT cihazlarına güç sağlamak için bir alternatif olmaktadır. Ortam enerji kaynaklarından bazıları da güneş, termal, mekanik enerjilerdir fakat pratik olmadığı ve maliyetli olduğu için bu teknolojide tercih edilmemektedir. Bu ortam enerji kaynak çeşitleri arasında düşük güçlü IoT teknolojisinde cihazları şarj etmek için elektromanyetik dalgalar kullanılabilir. Yaşam alanlarında sinyallerin olmadığı bir ortam neredeyse yoktur. Cep telefonları ve Wifi vericileri gibi kablosuz teknoloji elemanlarının bulunmasıyla büyük miktarda elektromanyetik enerji sağlamak mümkündür. Aynı zamanda diğer ortam kaynak çeşitlerine göre elektromanyetik enerjiyi toplamak daha az alt yapı gerektirmektedir.

Metamalzeme doğada bulunmayan özelliklere sahip bir malzemedir. Metamalzemeler, etkin dielektrik katsayısı $\epsilon(\omega)$ ve etkin manyetik geçirgenlik $\mu(\omega)$ ile karakterize edilmektedir. IoT teknolojisini daha yaygın kılmak için enerji hasadı ve algılama tasarımlarında metamalzeme kullanmak enerji kullanımını daha verimli hale getirecektir. Bunun nedeni ise düşük güçlü ortamda yayılan elektromanyetik enerjiyi absorbe etme yeteneğinin daha yüksek olmasıdır. Sensörlerin duyarlılığını artırmak için mükemmel metamalzeme emici yapısı tasarlanarak IoT cihazların ve sensörlerin işlevselliğini de artırmak mümkündür. Aynı zamanda metamalzeme yapıları ile yayılan elektromanyetik dalganın büyük çoğunluğunun absorbe edilmesini artırarak enerji hasadının daha verimli hale gelmesi sağlanacaktır (Kaur et al., 2019). Metamalzeme mükemmel emici yapısı bant durduran filtreye benzemektedir. Yayılan sinyaller rezonans frekansında ne iletilir ne de yansıtılır. Bu da iletilen sinyallerin (S_{21}) ihmal edilecek kadar az olduğu fakat sıfır olmadığı anlamına gelir. Metamalzeme mükemmel emiciler, farklı uygulamalarda da tercih edilmektedir. Bunlardan metamalzeme sensör (Bakir et al., 2016; Bakir et al., 2018), optik anahtarlama (Hajizadegan et al., 2018), enerji hasadı (Unal et al., 2015; Bağmancı et al., 2018) ve istenmeyen frekans emilimi (Costa et al., 2013) uygulamaları en çok kullanılanlardır.

Ortamdaki elektromanyetik sinyallerin emilimini sağlamak için geleneksel ferrit ve yüksek kayıplı dielektrik levhaların yerini metamalzeme emici yapıları almıştır. Bu malzemelerin özellikleri sayesinde verimlilik artmış ve maliyet azalmıştır. Literatürde bununla ilgili çalışmalara bakıldığında; ortamdaki elektromanyetik sinyallerden WiFi sinyallerini absorbe etmek için fraktal şekilli metamalzeme mükemmel emici tasarlanmıştır ve üç geniş emilim bandı elde edilmiştir. Bu çalışmada tasarlanan yapı 2.4 ve 5 GHz frekans spektrumunda çalışan uygulamalar için uygundur (Amiri et al., 2019).

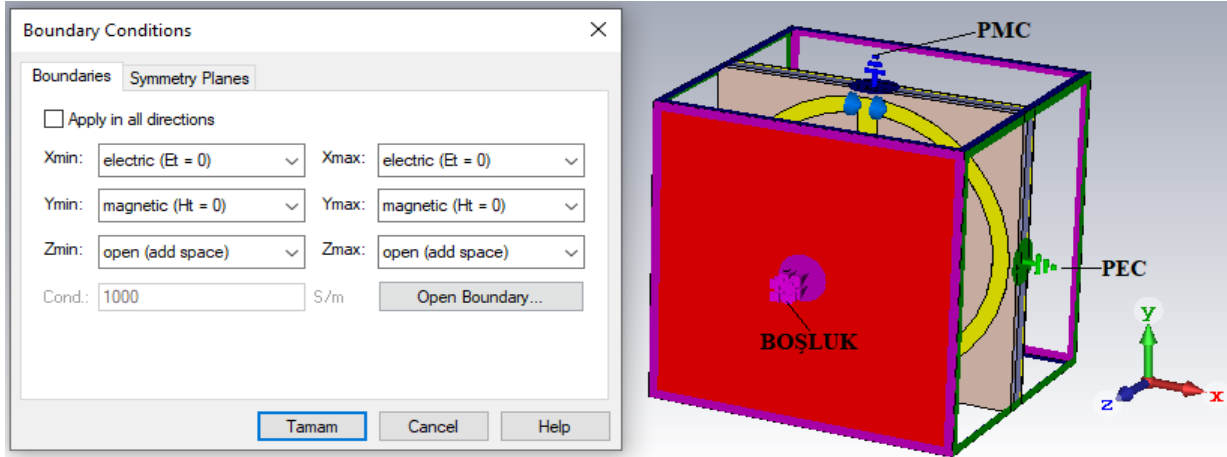
Kullanılan çoğu IoT uygulamaları GSM ve WiFi ticari frekans bantlarında çalışmaktadır. 5G teknolojisinin ilerlemesiyle buna 23 ile 64 GHz frekans spektrumu da eklenecektir. Yüksek frekansların uzun menzilli iletimi zordur fakat kimyasal ve biyolojik algılama, tıbbi teşhis ve yüksek veri hızlı kısa yollu kablosuz iletişim gibi avantajları vardır. Yüksek frekansta yapının boyutunun küçülmesiyle karmaşıklık oluşmaktadır. Burada istenilen emilim bantlarını elde etmek için rezonatör şekilleri olan esnek ve dayanıklı özelliğe sahip metamalzeme kullanılması umut verici bir çözümdür. Literatüre bakıldığında metamalzeme emici tabanlı hasatlayıcı tasarımları genellikle ön yüzeyi ayrık dikdörtgen veya halka rezonatörden arka yüzeyleri de bakır levhadan oluşmaktadır (Dincer et al., 2016). Metamalzeme mükemmel emici yapıları kullanarak yüksek frekanslarda emilim sağlamak için dielektrik olarak silikon ve iletken olarak altın tercih edilmiştir (Redo-Sanchez et al., 2013). Yapılan bir çalışmada

altın alttaş filmi ile silikon çubuk şekilli rezonatör çiftleri kullanarak dört emilim bantlı metamalzeme mükemmel emici tasarlamışlardır (Liu et al., 2020). Bu tasarım dalga boylarını ayarlamaya yarayan optoelektronik cihazlarda kullanmak için önerilmiştir. Diğer bir çalışmada ise alttaş olarak silikon kullanıldığı ve iletken olarak altından oluşan iç içe geçmiş kare halkalardan oluşan mükemmel metamalzeme emici tasarlanmıştır ve yapılan ölçüme göre yüksek verimliliğe sahip olduğu gösterilmiştir (Wang et al., 2014). Kablosuz iletim bantlarında enerji hasadı uygulamaları için çok katmanlı kare bölünmüş halka rezonatör yapısından oluşan metamalzeme emici yapısı önerilmiştir (Karaaslan et al., 2017). Önerilen metamalzeme emici yapısı tüm çalışma frekanslarında yüksek emilime sahip olduğu ve polarizasyon açısından bağımsız olduğu gösterilmiştir. Farklı bir çalışmada ise metamalzeme emici tabanlı elektromanyetik enerji toplayıcı tasarlanmıştır. Tasarlanan yapı ISM bandında 2.4 GHz'de çalışmaktadır. Kare halka rezonatör yapılarından oluşan tasarımda boşluklara direnç eklenmesiyle güç emilimi sağlanmış ve enerji hasadı uygulaması için %83,6 verimlilik elde edilmiştir (Dincer et al., 2016). Enerji hasadı uygulaması için metamalzeme mükemmel emici yapısı üzerine ek bir parçanın eklenmesiyle emilim frekansı ve oranı üzerine olumlu etkisi olduğu bir çalışma yapılmıştır (Shang et al., 2017). Burada ek parçaların emilim üzerine etkisini azaltmak ve doğru akım çıkışını yükseltmek için direnç ve diğer elemanlar tasarlanan yapının arka tarafına yerleştirilmiştir. Bu uygulama metamalzeme alıcı ve doğrultucunun birleşimi olan yöntemlerden biridir.

Bu çalışmada IoT teknolojisinde kullanılan sensörlerin güç aktarımını sağlamak için metamalzeme emici ve hasatlayıcı tasarlanmıştır. IoT teknolojisinde tercih edilen frekanslar, ISM bant frekanslarıdır. ISM bant frekanslarından da çoğunlukla 4.33GHz, 915MHz, 2.4GHz ila 5GHz kullanılmaktadır. Önerilen birim hücre 2.44 GHz frekansında %91 ve 4.33 GHz frekansında ise %97 sinyal emilimi sağlamaktadır. Tasarlanan MTM tabanlı yapı sinyal emici özelliğinin yanı sıra enerji hasatlama özelliği de bulunmaktadır.

MATERYAL VE METOT

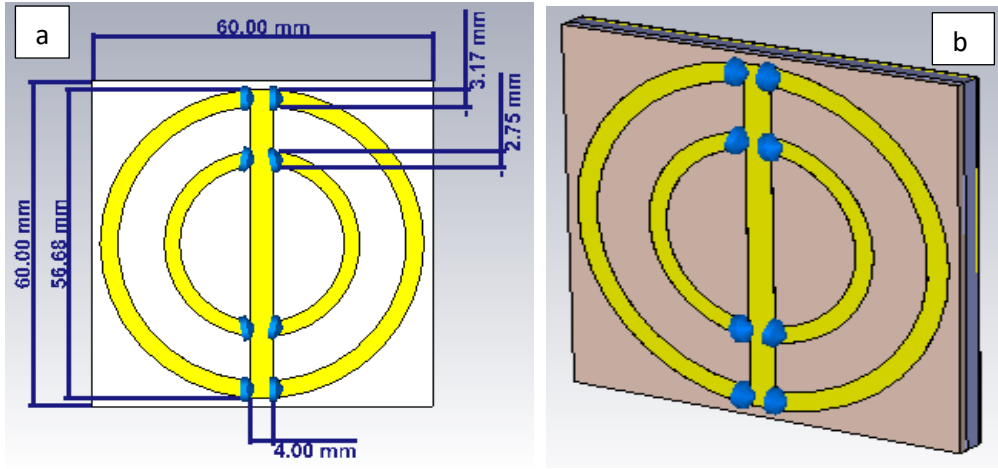
Önerilen birim hücre tasarımı Sonlu Entegrasyon Tekniği (FIT) tabanlı benzetim programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. TEM modu simülasyonu için benzetim programının sınır koşulu elektrik, manyetik ve simülasyonda açık alan olarak ayarlanmıştır. Tasarlanan birim hücrenin numerik analizde sınır koşulu x-yönünde PEC, y-yönünde PMC ve z- yönünde boşluklu açık olarak Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. FIT Tabanlı Yazılım Programında Önerilen Yapının Sınır Koşulları

Tasarlanan yapının birim hücresi; bakır rezonatör, FR4 dielektrik katmanı, hava ve bakır levha olmak üzere dört tabakadan oluşur. Sarı alanlar bakır metal rezonatör tabakayı ve beyaz alanlar FR4 yalıtkan malzemesini temsil etmektedir. Bakır rezonatörün elektrik iletkenliği $\sigma = 5.8 \times 10^8$ S/m ve FR4 yalıtkan malzemesinin kalınlığı 1.6 mm, kayıp tanjantı 0.025 ve bağıl dielektrik sabiti 4.3'tür. FR4 dielektrik katmanının en ve boyu 60mm'dir. Bakır rezonatörün kalınlığı 0.035 mm'dir. Sinyal emilimini artırmak ve rezonans frekansını ayarlamak için 3.10 mm kalınlıkta hava boşluğu, rezonatör ve arka bakır levha arasına yerleştirilmiştir. Ön ve arka rezonatör, elektromanyetik enerjiyi manipüle etmek için kullanılmakta ve birbiri arasında elektrik bağlantısına sahip değildir. Birim hücrenin arka tabakasının tamamen bakır levha ile kaplanmasından dolayı iletim değeri sıfırdır. Bu nedenle emilim değeri tamamen yapıdan yansıma değerine bağlıdır. Yapı tasarımının en önemli kısımlarından biri rezonatör tabakalarının doğru yerleşmesidir. İstenilen çalışma frekanslarını yakalayabilmek için yapı iç içe geçmiş ayrıık rezonatör yapısı oluşturulmuştur. Şekil 2'de direnç elemanları mavi, bakır rezonatörler ise sarı renklidir. Şekil 2'de

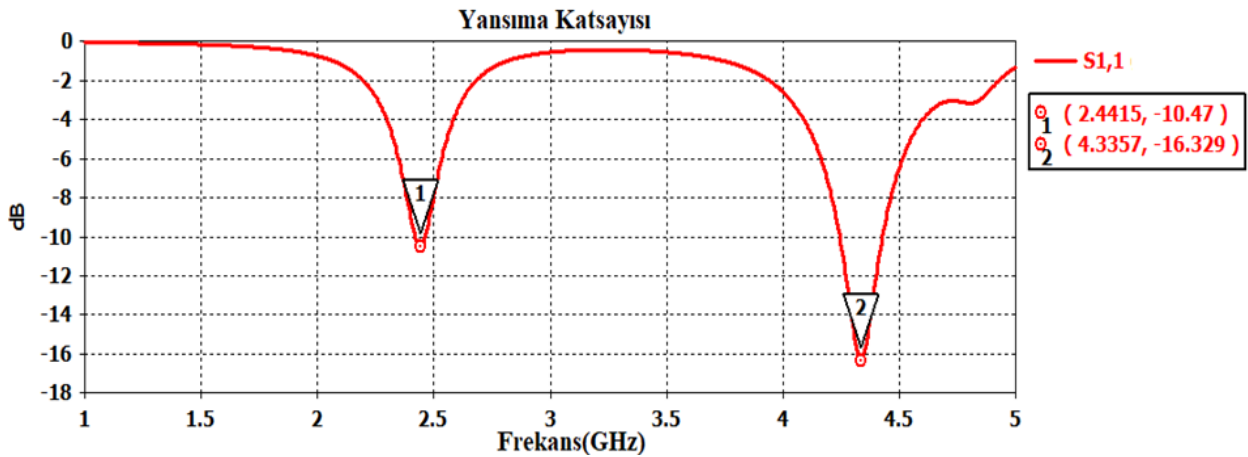
görüldüğü gibi dıştaki rezonatör 3.17 mm, içteki rezonatör de 2.75 mm kalınlığındadır. Rezonatörler arasında dikdörtgen yapı bulunmaktadır. Yapının ön yüzeyinde 1000 Ω değerinde dirençler yerleştirilmiştir. Böylece sinyal emici özelliği sayesinde ortamdan elde ettiği elektromanyetik enerjiyi elektrik enerjiye dönüştürmektedir. Birim hücrenin arka kısmı da 0.20 mm kalınlığında bakır levha ile kaplanmıştır.



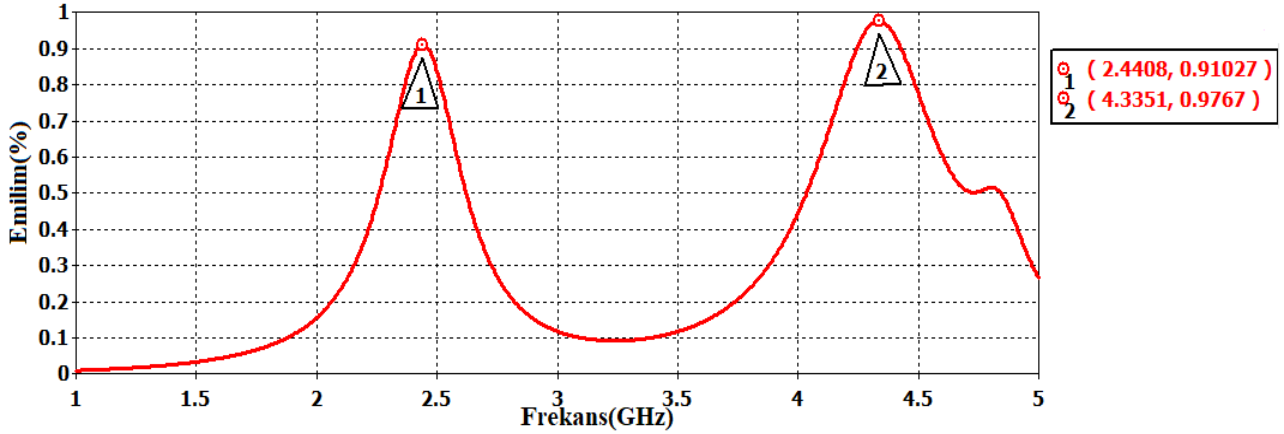
Şekil 2.a. Önerilen Birim Hücrenin Önden Görünümü b. Birim Hücrenin Perspektif Görünümü

Bir metalmazeme tabanlı sinyal emici için en önemli özellik, gelen elektromanyetik dalganın önerilen yapıda maksimum nüfuz etmesini sağlamak için bakır plaka ile yapının arka tarafını kaplamaktır. Yapı tarafından emilen elektromanyetik güç, yük üzerinde kaybolan güç ile hesaplanabilir. Emilen güç, emilim değeri $A(\omega)$ ile gösterilir. Emilim değeri $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$ eşitliğinden elde edilir. Burada $R(\omega) = |S_{11}|^2$ yansımaya katsayısı $T(\omega) = |S_{21}|^2$ iletim katsayısıdır. Hava tabakasının arkası tamamen bakır levha olduğu için iletim olmayacaktır. Ortamda var olan mikrodalga enerjisi, önerilen MTM emicide hapsolür. Böylece mükemmel emilim olduğu için enerji hasadı yükselir. Bu benzetim çalışmasında 1000 Ω değerinde direnç elemanı kullanılmıştır. MTM emici için ortamın etkin dielektrik $\epsilon(\omega)$ ve etkin manyetik geçirgenlik $\mu(\omega)$ değerlerini ayarlayarak gelen hem elektrik alan hem manyetik alan için emilim yapması sağlanır.

Şekil 3’de görüldüğü gibi önerilen birim hücrenin gelen dalganın TEM olması halinde rezonans frekanslarında yansımaya katsayısı (S_{11}) değeri verilmiştir. Simüle edilen yansımaya katsayısı 2.44 GHz’de -10 dB ve 4.33 GHz’de -16 dB’dir. Aynı şekilde tasarlanan yapının Şekil 4’de görüldüğü gibi emilim değeri incelendiğinde gelen dalganın 2.44 GHz’de %91, 4.33 GHz’de %97’nin emildiği görülmektedir.



Şekil 3. Önerilen Yapının dB Cinsinden Simüle Edilmiş Yansımaya Katsayısı

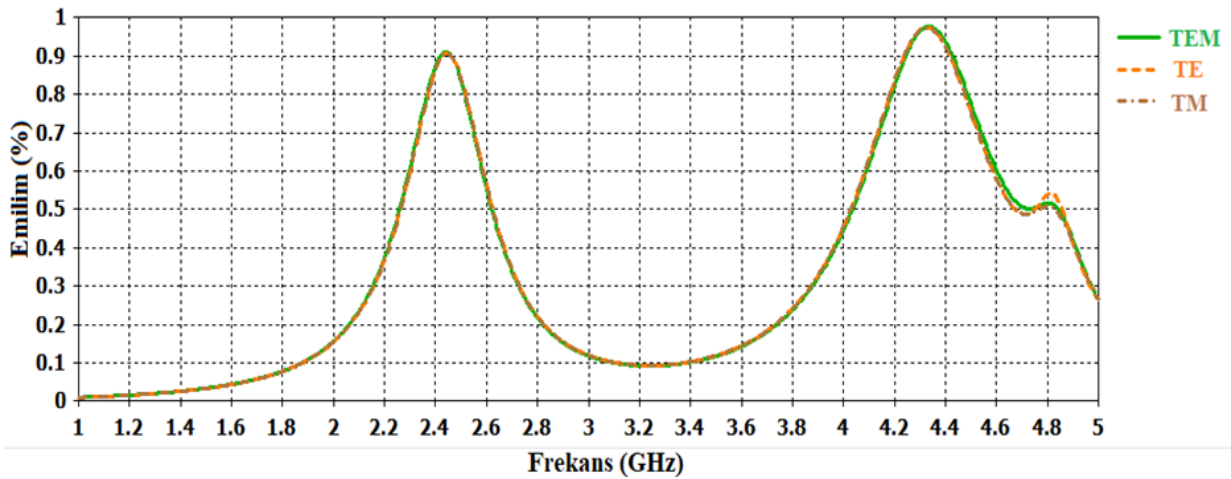


Şekil 4. Önerilen Yapının Emilim Değerleri

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

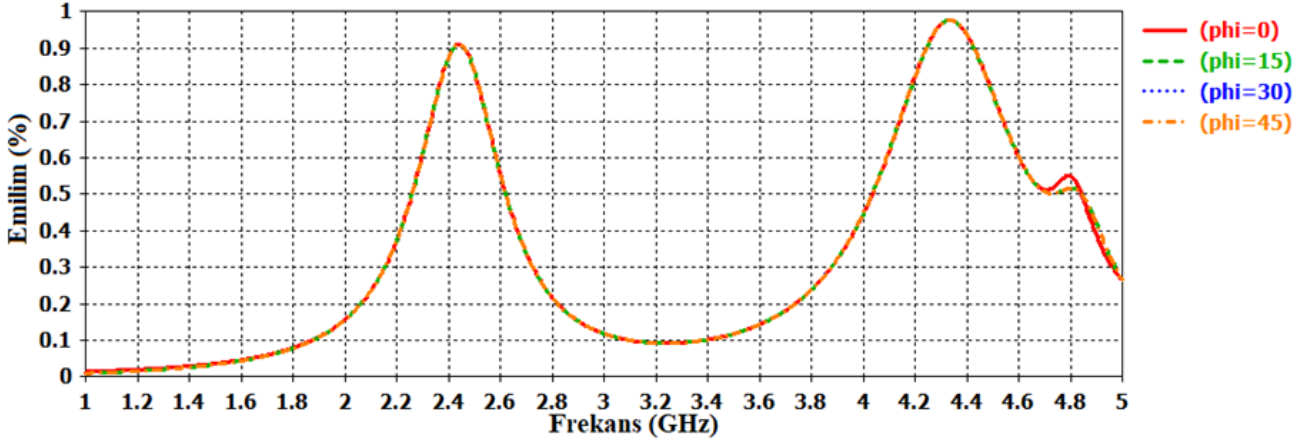
TE, TM ve TEM Mod Analizi

Önerilen metamalzeme tabanlı emici yapısının TE, TM ve TEM modlarında davranışları incelenmiştir. Şekil 5’de görüldüğü gibi yapı üç farklı polarize elektromanyetik dalga için incelendiğinde emilim değerlerinin aynı olduğu görülmektedir. 2.44 GHz ve 4.33 GHz çalışma frekanslarında yapı mükemmel emilim sağlamaktadır.

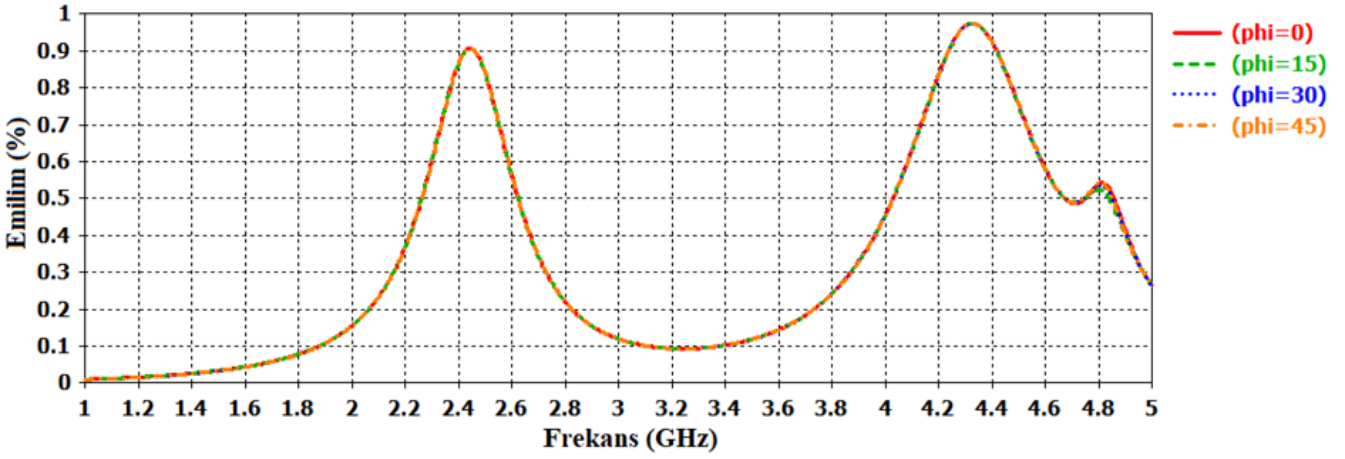


Şekil 5. Önerilen Yapının TEM, TE ve TM Modlarında Emilim Değerleri

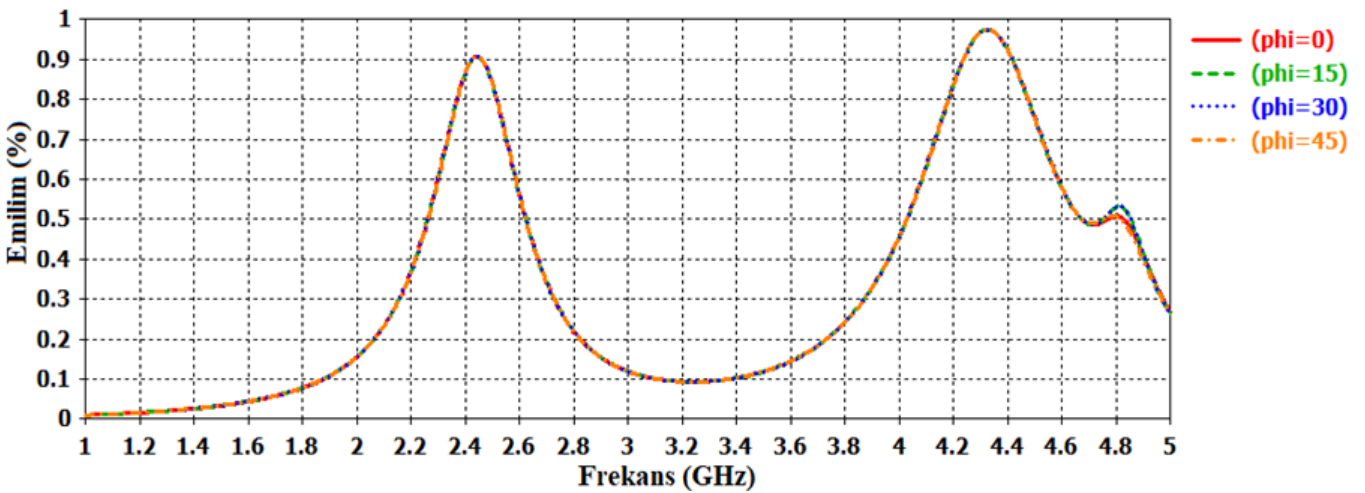
Önerilen yapının emilim karakteristiğini daha iyi anlamak için TEM, TE ve TM polarize elektromanyetik dalga için çeşitli polarizasyon açıları kullanılarak sayısal simülasyonlar yapılmış ve sonuçlar aşağıdaki grafiklerde gösterilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi birim hücrenin emilim değerinin phi polarizasyon açısından etkilenmediği görülmektedir. Bunun sebebini önerilen birim hücre yapınının merkezi simetrisinden dolayıdır. Önerilen yapı 0° ile 45° arasında değişen tüm geliş açıları için oldukça düzgün ve yüksek bir emilim sağlamaktadır.



Şekil 6. Önerilen Yapının TEM Modunda Farklı Polarizasyon Açılarının Sinyal Emilime Etkisi



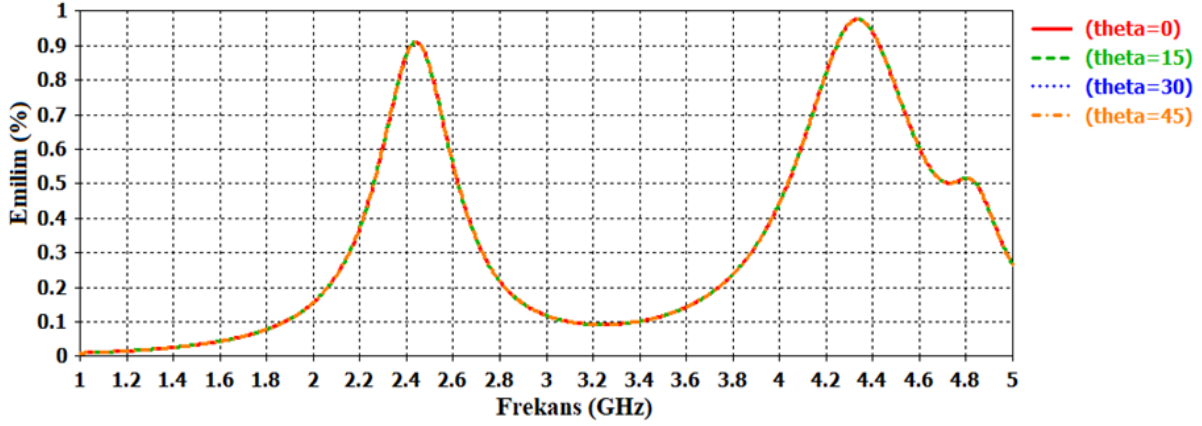
Şekil 7. Önerilen Yapının TE Modunda Farklı Polarizasyon Açılarının Sinyal Emilime Etkisi



Şekil 8. Önerilen Yapının TM Modunda Farklı Polarizasyon Açılarının Sinyal Emilime Etkisi

Geliş açısı 0° ile 45° arasında 4 farklı değerde incelendiğinde emilim performansı üzerindeki etkisi Şekil 9’da görüldüğü gibi yok denilecek kadar azdır. Birim hücrenin rezonans frekanslarında TEM modunda gelen dalga emilimi maksimum olduğu görülmektedir. Böylece, önerilen metalizeme emici yapısı, çalışma frekansı bandının

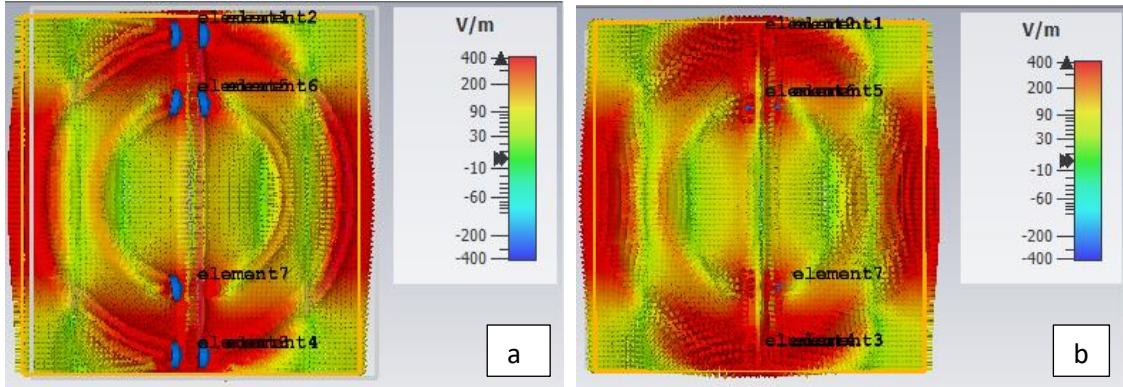
tamamı boyunca hem TE-TM polarizasyonları hem de TEM modu için geliş açısına neredeyse duyarlıdır. Önerilen yapı, mikrodalga frekans aralığında çalışan IoT sinyal emilim cihazların gerçekleştirilmesi için iyi bir adaydır. Aynı zamanda polarizasyon ve geliş açısından bağımsız özellikleri nedeniyle enerji hasadı uygulamalarında da kullanılabilir.



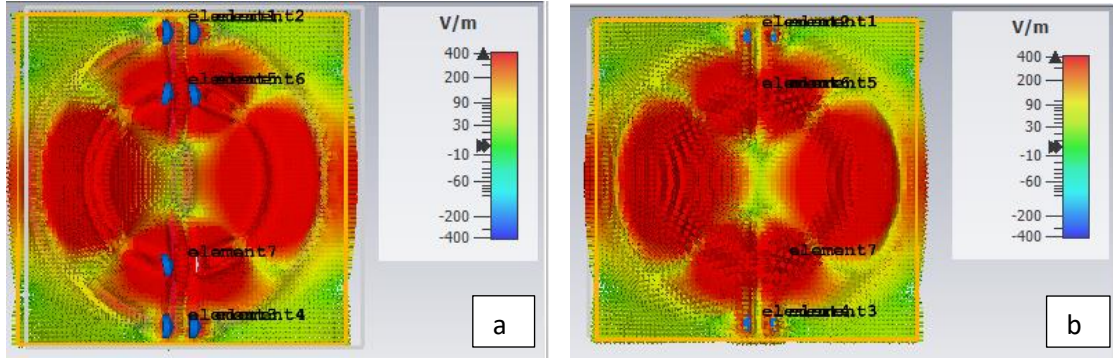
Şekil 9. Önerilen Yapının TEM Modunda Farklı Açılarda Sinyal Emilime Etkisi

Elektrik Alan, Manyetik Alan ve Yüzey Akım Dağılımları

MTM tabanlı sinyal emici yapının, gelen EM dalgaya karşı fiziksel davranışını açıklamak için rezonans frekanslarındaki elektrik alan, manyetik alan ve yüzey akımı dağılımlarına bakılmıştır. Rezonans frekanslarında yapı maksimum emilime sahip olduğundan dolayı elektrik, manyetik ve yüzey akım dağılımları bu frekans değerlerinde incelenmiştir. Simülasyon programında birim hücrenin hem ön yüzeyinde hem de arka yüzeyinde inceleme yapılmıştır. Böylece üç durum için de metalmatleme emici yapısı karakterize edilmiştir. Şekil 10 ve 11'de görüldüğü gibi yapının ilk önce elektrik alan dağılımı incelenmiştir. 2.44 GHz'de elektrik alan daha çok dıştaki rezonatörde, 4.33 GHz'de ise iç rezonatör etrafında yoğunlaşmıştır.

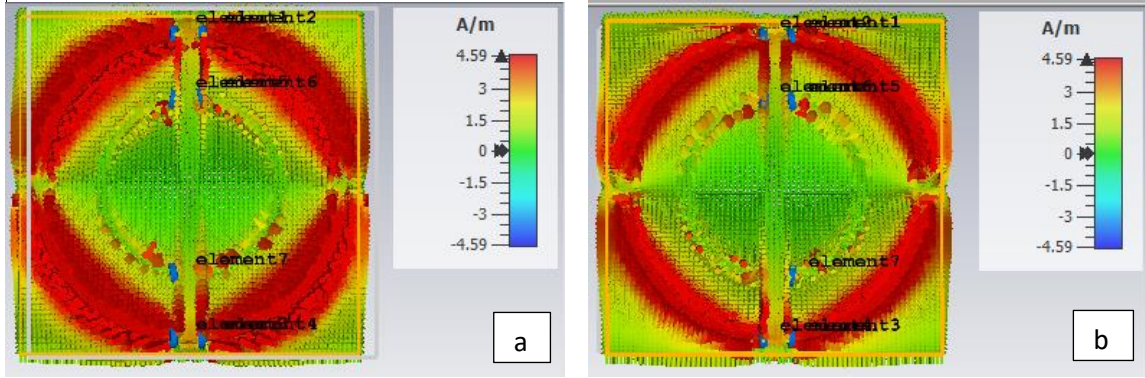


Şekil 10. a. Yapının 2.44 GHz'de Ön Yüzey Elektrik Alan Dağılımı b. Yapının 2.44 GHz'de Arka Yüzey Elektrik Alan Dağılımı

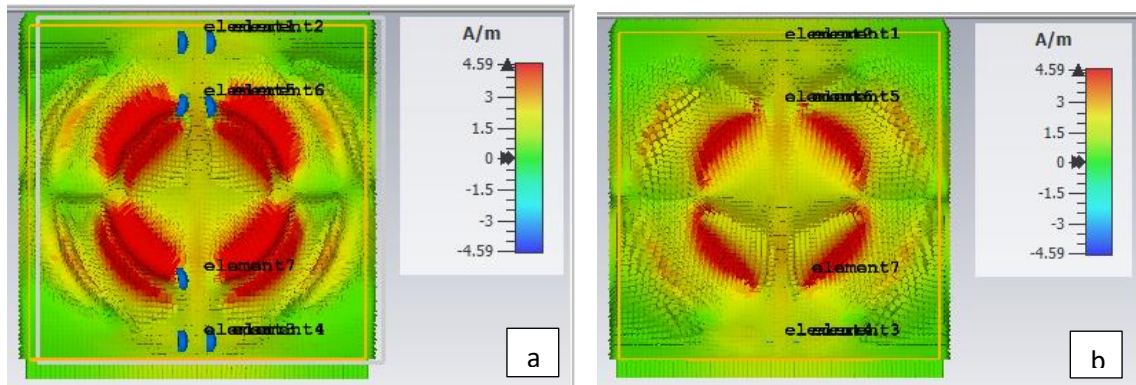


Şekil 11. a. Yapının 4.33 GHz’de Ön Yüzey Elektrik Alan Dağılımı b. Yapının 4.33 GHz’de Arka Yüzey Elektrik Alan Dağılımı

Manyetik alan dağılımı incelendiğinde Şekil 12 ve 13’te görüldüğü gibi elektrik alan ile uyumlu olduğu görülmüştür. 2.44 GHz’de dış rezonatörde, 4.33 GHz’de iç rezonatörde yoğunlaşmıştır. Gelen dalganın elektrik alan bileşeni, bir yüzey akımına neden olan serbest elektronları uyarır ve yüzeyde oluşan yük, dış elektrik alanı boyunca salınır ve bu alan manyetik dipol momentine neden olur ve rezonans frekansında emilime neden olan bu dipol momentidir.



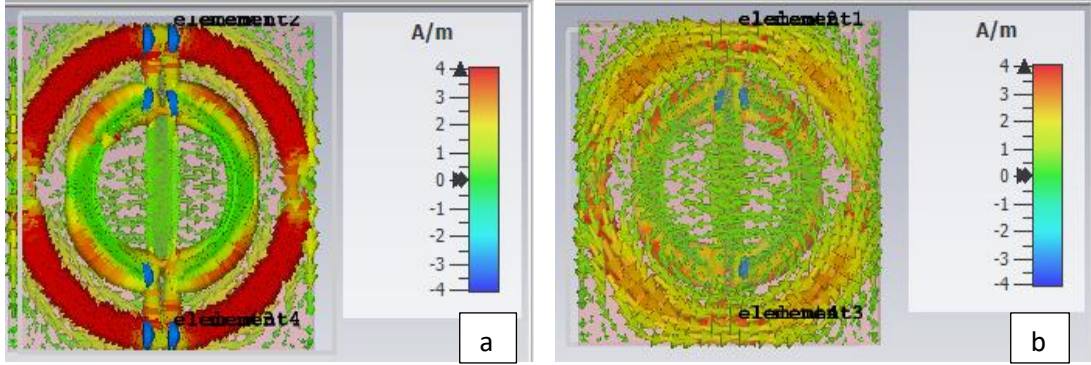
Şekil 12. a. Yapının 2.44 GHz’de Ön Yüzey Manyetik Alan Dağılımı b. Yapının 2.44 GHz’de Arka Yüzey Manyetik Alan Dağılımı



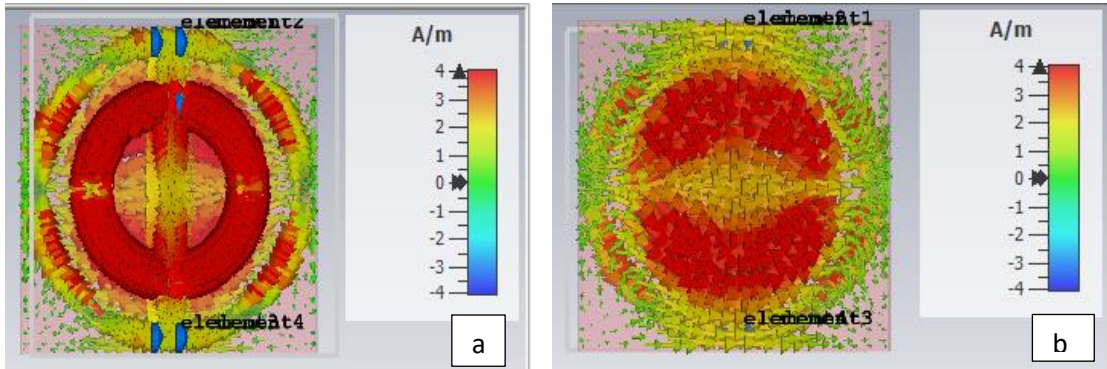
Şekil 13. a. Yapının 4.33 GHz’de Ön Yüzey Manyetik Alan Dağılımı b. Yapının 4.33 GHz’de Arka Yüzey Manyetik Alan Dağılımı

Önerilen yapının Şekil 14 ve Şekil 15’te rezonans frekansları olan 2.44 GHz ve 4.33 GHz’de yüzey akım dağılımları incelenmiştir. Bu grafiklerde görüldüğü gibi TEM modunda yapı üzerinde paralel ve paralel olmayan yüzey akımlar bulunmaktadır. Paralel akımlar elektrik alanı, paralel olmayan akımlar manyetik alanı oluşturur. Böylece gelen elektromanyetik dalganın elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri rezonans frekansında güçlü bir elektromanyetik alan üretir. Grafiklerde görüldüğü gibi 4.33 GHz’de emilim değeri 2.44 GHz’e göre daha

büyüktür. Bunun sebebi ise 4.33 GHz’de yüzey akım değerinin daha büyük olmasıdır. Yüzey akım dağılımı rezonatör yapısında 2.44 GHz’de dış rezonatörde, 4.33 GHz’de iç rezonatör üzerinde daha çok yoğunlaşmıştır. Enerji hasadı uygulamaları için elektrik alan ve yüzey akım dağılımlarından ziyade, rezonans frekanslarında güçlü manyetik alan görülmesi daha önemlidir.

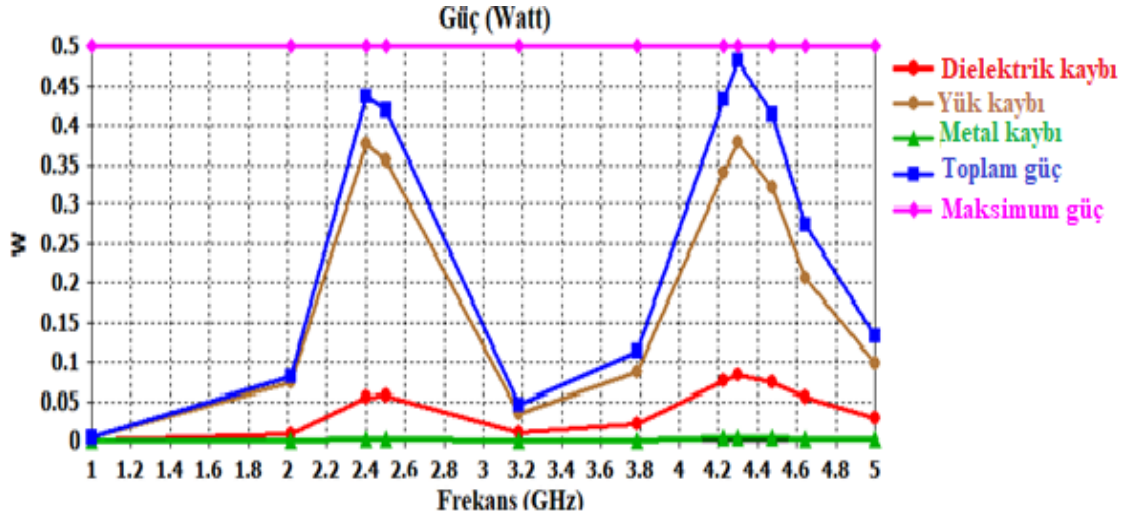


Şekil 14. a. Yapının 2.44 GHz’de Ön Yüzey Akım Dağılımı b. Yapının 2.44 GHz’de Arka Yüzey Akım Dağılımı



Şekil 15. a. Yapının 4.33 GHz’de Ön Yüzey Akım Dağılımı b. Yapının 4.33 GHz’de Arka Yüzey Akım Dağılımı

Önerilen çalışmada enerji hasadı için birim hücreye 1000 Ω değerinde dirençler eklenmiştir. Dirençler emilim değerlerini artırmanın yanı sıra, emilen elektromanyetik sinyalin gücünü toplayarak bu gücü elektriksiz olarak kullanmayı sağlar. Şekil 16’da simülasyon için TEM modunda metalmalzeme tabanlı sinyal emici yapısına EM dalga tarafından gelen güç, önerilen yapı tarafından emilen güç ve MTM yapısında dielektrik katmanda oluşan kayıp güç, dirençlerde ısıya dönüşen kayıp güç olarak gösterilmiştir. Benzetim programında maksimum güç transferi sağlandığında 0.5 Watt değerine ulaşılmaktadır. Yeşil çizgi metal yüzeylerdeki güç kaybının neredeyse olmadığını ve kırmızı çizgide FR4 dielektrik katmanında dikkate alınmayacak kadar az olduğu görülmektedir. Kahverengi çizgi ise direnç üzerindeki güç kaybını, mavi çizgi ise toplam güç transferini göstermektedir. Şekil 15’te görüldüğü gibi rezonans frekanslarında önerilen yapı üzerindeki güç transferinin yük elemanları üzerinde gerçekleşmiştir.



Şekil 16. Önerilen Yapının Güç Karakteristikleri

SONUÇLAR

Metamalzeme tabanlı sinyal emici yapısı simülasyon sonuçları geniş perspektifte incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre ISM çalışma frekanslarından olan 2.44 GHz frekansında %90 ve 4.33 GHz frekansında ise %98 mükemmel sinyal emici özelliğine sahip olduğu görülmektedir. Önerilen yapının emilim karakteristiği elektrik alan, manyetik alan ve yüzey akım dağılımı ile açıklanmıştır. Mikrodalga frekans bandında tasarlanan metamalzeme tabanlı yapının sinyal emici özelliğinin yanı sıra enerji hasatlama özelliği de bulunmaktadır. TE, TM ve TEM modlarında 0° ile 45° arasında geliş ve polarizasyon açılarında incelendiğinde üç mod için aynı emilim değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bu da tasarlanan yapının enerji hasatlayıcıları arasında iyi bir aday olduğunu göstermektedir. Böylece IoT teknolojisinde kullanılan cihazlar için elektromanyetik dalgaların enerji emilimi ve dönüşümü daha küçük yapılar ve daha verimli sonuçlar ile sağlanacaktır.

KAYNAKLAR

- Amiri, M., Tofigh, F., Shariati, N., Lipman, J., & Abolhasan, M. (2019). Miniature tri-wideband Sierpinski–Minkowski fractals metamaterial perfect absorber. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 13(7), 991-996. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2018.5837>
- Bağmancı, M., Karaaslan, M., Altıntaş, O., Karadağ, F., Tetik, E., & Bakır, M. (2018). Wideband metamaterial absorber based on CRRs with lumped elements for microwave energy harvesting. *Journal of microwave power and electromagnetic energy*, 52(1), 45-59. <https://doi.org/10.1080/08327823.2017.1405471>
- Bakır, M., Karaaslan, M., Akgol, O., Altıntaş, O., Unal, E., & Sabah, C. (2018). Sensory applications of resonator based metamaterial absorber. *Optik*, 168, 741-746. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.05.002>
- Bakır, M., Karaaslan, M., Dincer, F., Akgol, O., & Sabah, C. (2016). Electromagnetic energy harvesting and density sensor application based on perfect metamaterial absorber. *International Journal of Modern Physics B*, 30(20), 1650133. <https://doi.org/10.1142/S0217979216501332>
- Biswas, A., Hamidi, S. B., Biswas, C., Roy, P., Mitra, D., & Dawn, D. (2018). A novel CMOS RF energy harvester for self-sustainable applications. In *2018 IEEE 19th Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)* (pp.1-5). IEEE.
- Costa, F., Genovesi, S., Monorchio, A., & Manara, G. (2013). Low-cost metamaterial absorbers for sub-GHz wireless systems. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 13, 27-30. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2013.2294791>

Dincer, F., Bakir, M., Karaaslan, M., Delihacioglu, K., & Sabah, C. (2016). Perfect Metamaterial absorber based energy harvesting application in ISM Band. *International Journal of Business and Technology*, 4(2), 5. <https://doi.org/10.33107/ubt-ic.2015.91>

Hajizadegan, M., Ahmadi, V., & Sakhdari, M. (2013). Design and analysis of ultrafast and tunable all optical metamaterial switch enhanced by metal nanocomposite. *Journal of lightwave technology*, 31(12), 1877-1883. <https://doi.org/10.1109/JLT.2013.2261854>

Karaaslan, M., Bağmancı, M., Ünal, E., Akgol, O., & Sabah, C. (2017). Microwave energy harvesting based on metamaterial absorbers with multi-layered square split rings for wireless communications. *Optics Communications*, 392, 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.01.043>

Kaur, K. P., Upadhyaya, T., Palandoken, M., & Gocen, C. (2019). Ultrathin dual-layer triple-band flexible microwave metamaterial absorber for energy harvesting applications. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 29(1), e21646. <https://doi.org/10.1002/mmce.21646>

Liu, Z., Liu, X., Wang, Y., Liu, G., & Tang, C. (2020). Silicon antennas metasurface based light absorber with quantitatively adjustable operating frequency and intensity. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 27(1), 1-6. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2020.2987179>

Mattsson, M., Kolitsidas, C. I., & Jonsson, B. L. G. (2018). Dual-band dual-polarized full-wave rectenna based on differential field sampling. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 17(6), 956-959. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2825783>

Redo-Sanchez, A., Laman, N., Schulkin, B., & Tongue, T. (2013). Review of terahertz technology readiness assessment and applications. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 34(9), 500-518. <https://doi.org/10.1007/s10762-013-9998-y>

Shang, S., Yang, S., Shan, M., Liu, J., & Cao, H. (2017). High performance metamaterial device with enhanced electromagnetic energy harvesting efficiency. *AIP Advances*, 7(10), 105204. <https://doi.org/10.1063/1.5002165>

Unal, E., Dincer, F., Tetik, E., Karaaslan, M., Bakir, M., & Sabah, C. (2015). Tunable perfect metamaterial absorber design using the golden ratio and energy harvesting and sensor applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26(12), 9735-9740. <https://doi.org/10.1007/s10854-015-3642-7>

Wang, B. X., Zhai, X., Wang, G. Z., Huang, W. Q., & Wang, L. L. (2014). Design of a four-band and polarization-insensitive terahertz metamaterial absorber. *IEEE Photonics Journal*, 7(1), 1-8. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2014.2381633>