

Metamalzeme tabanlı çok bantlı enerji hasadı uygulaması

Mehmet BAKIR*

*Bozok Üniversitesi, Mühendislik.-Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü,
Erdoğan Akdağ Kampüsü, Yozgat*

*Geliş Tarihi (Received Date): 08.06.2017
Kabul Tarihi (Accepted Date): 23.05.2018*

Özet

Bu çalışmada, değişik boyutlu halka rezonatörlerinden oluşan mükemmel sinyal emici özellik gösteren bir metamalzeme enerji hasadı uygulaması için, tasarım, üretim, simülasyon ve deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Önerilen yapının en önemli avantajlarından birisi, benzer çalışmaların aksine hiçbir tasarım ögesi değiştirilmeden 1.8GHz, 2.45 GHz ve 2.60 GHz de doğal olarak mükemmel sinyal emici özelliği göstermesidir. Bu değerler yapının hem GSM (Global System for Mobile) hem de ISM (Industrial Scientific Medical) bantlarında enerji hasadı amaçlı kullanılabileceğini göstermektedir. Simülasyon çalışmaları CST Microwave Studio programında gerçekleştirilmiştir, belirtilen bantlarda rezonatörler üzerinde oluşan enerjinin hasadı için HSMS 2860 Schottky diyot kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarını desteklemek için yansıma katsayısı (S_{11}) ölçümü, diyot etkisinin belirlenmesi, spektrum analizör ve dc voltaj ölçümleri deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Yansıma katsayısı ölçümlerinde rezonans frekanslarında -20dB lik bir değer elde edilirken, spektrum analizör ölçümünde yaklaşık 30dBm lik bir artış söz konusudur. Diyot üzerinde dc gerilim ölçümünde 47.6mV' luk bir gerilim gözlenmiştir. Elde edilen deneysel ve simülasyon sonuçları birbirleri ile uyumlu olup önerilen yapının çok bantlı enerji hasadı uygulamalarında kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: *Metamalzeme, enerji hasadı, çok bantlı.*

Metamaterial based multiband energy harvesting application

Abstract

In this study, perfect metamaterial absorber based structure, which consists of variable sized ring resonators is designed, produced, simulated and experimentally tested for

* Mehmet BAKIR, mehmet.bakir@bozok.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-5847-743X>

energy harvesting applications. One of the major advantages of proposed structure is to achieve perfect signal absorber ability at 1.8GHz, 2.45 GHz and 2.60 GHz frequencies without making any alteration in design contrary to similar studies. These frequencies present that this structure can be applicable in both GSM (Global System for Mobile) and ISM (Industrial Scientific Medical) bands for energy harvesting purposes. Simulation studies are implemented by using CST Microwave Studio software and HSMS 2860 Schottky diode is used to harvest produced energy on resonators at stated bands. Reflection coefficient (S_{11}) measurement, determination of the effects of Schottky diode on reflection, spectrum analyser measurement and dc voltage measurements are completed experimentally in order to validate simulation study results. While -20dB difference in resonance frequencies is observed during reflection coefficient measurements, 30dBm increment in resonance frequencies occurred during spectrum analyser measurement. 47.6mV is observed on Schottky diode during dc voltage measurements. Obtained both experiment and simulation results are congruent with each other and it indicates that proposed structure is appropriate for using in multiband energy harvesting applications.

Keywords: *Metamaterial, energy harvesting, multi band.*

1. Giriş

Metamalzemeler, doğada kendiliğinden bulunmayan ancak mühendislik teknikleri kullanılarak üretilen malzeme olarak tanımlanabilir [1]. Metamalzemeler, sahip oldukları negatif kırılma indisi sayesinde gelen dalgayı manipüle edebilmektedir. Bu olağan dışı özellik sayesinde gelen elektromanyetik dalganın enerjisinin soğurularak enerji hasadı, sinyal emici, görünmezlik gibi amaçlar için kullanılması mümkündür [2-5]. Metamalzemelerin en önemli uygulamalarından biri mükemmel sinyal emilimi uygulamasıdır. Mükemmel sinyal emilimi, elektromanyetik dalganın sönümlenmesi ile gerçekleşir [6]. Metamalzeme birim hücresi tipik olarak rezonatör ve alt kısmı metal kaplı dielektrik bir alttaş tan oluşur. Rezonatör boyutları ve şekilleri amaçlanan çalışma frekansı ve mükemmel sinyal emilim frekansı ile alakalı olarak halka, kare, dikdörtgen veya daha farklı şekillerde olabilir [7]. Teorik olarak, mükemmel sinyal emilimi, metamalzeme birim hücresinin ayarlandığı frekansta veya frekans aralığında boş uzayın empedansına eşitlenmesi sonucu gerçekleşebilir. Metamalzemelerin mükemmel sinyal emilimi uygulamaları ile ilgili olarak, önceki çalışmalarda polarizasyon bağımsız [8], geniş bant [9] ve çok bantlı [10] uygulamalar görülmektedir.

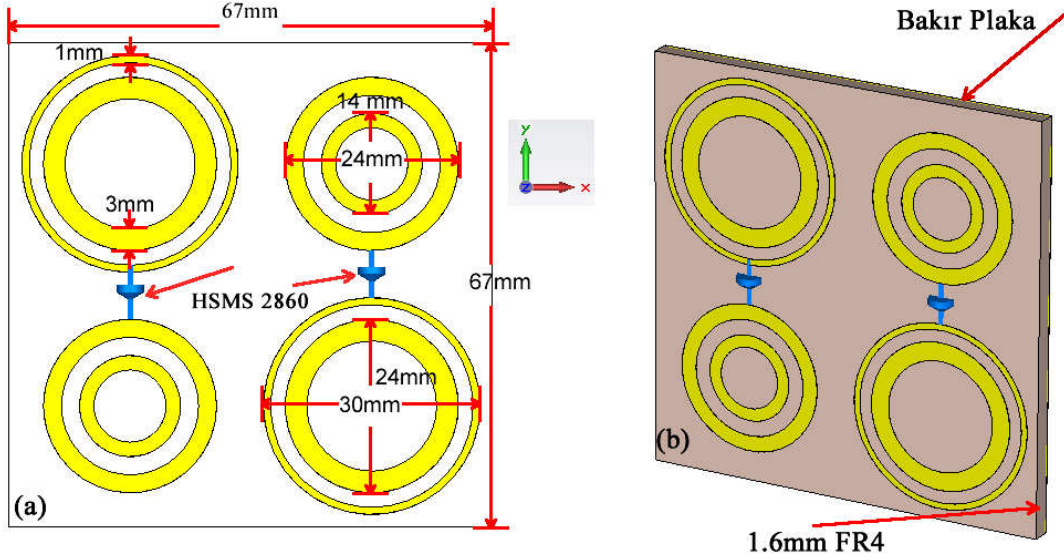
Bu çalışmanın da konusu olan enerji hasadı uygulamalarına gelecek olursak, enerji hasadı uygulamaları için sadece mükemmel sinyal emilimi yeterli olmayıp enerji hasadının yapılacağı yükün üzerinde maksimum gücün toplanması beklenmektedir [11]. Mevcut literatür incelendiğinde, çoğu çalışmada dielektrik alttaşın yük üzerinde enerji oluşumunda önemli rol oynadığını görürüz [12]. Ayrıca, enerji hasadı için kullanılacak elektronik elemanların metamalzeme sinyal emiciye entegre edildiğini ve sinyal emilimini artırdığı da görülmektedir [13]. Bu çalışmanın da konusu olan GSM baz istasyonlarından enerji elde etmek için benzer çalışmalar yapılmış olup bu çalışmalar anten temelli olabildiği gibi [14-15], metamalzeme tabanlı [16] veya giyilebilir özellik gösterenleri de [17] mevcuttur.

Bu çalışmanın benzer enerji hasadı çalışmalarından farkı GSM1800, ISM ve IMT-2000 frekans bantlarında enerji hasadı yapabilecek olmasıdır. Bu konunun daha iyi anlaşılması ve çalışmanın karşılaştırılması için benzer çalışmalar örnek olarak verilebilir [18-20]. Pinuela vd. 2013 yılında yaptıkları çalışmada GSM bandının farklı frekanslardaki versiyonlarında enerji hasadı için aynı yapıyı büyütüp küçülterek rezonans frekansını değiştirmişlerdi [18]. Anandhimeena vd. 2016 yılında yaptıkları çalışmada GSM bandının farklı frekansları için ilk tasarladıkları şekle çok benzer tasarımlar oluşturmuş ve bu tasarımları enerji hasadı için kullanmışlardır [19]. Bakır vd. 2017 yılında yaptıkları çalışmada ise GSM bandında enerji hasadı yapabilecek yapı tasarlanmış anca yapının arkasında bulunan boşluğun daraltılıp uzatılarak rezonans frekansı istenen seviyeye getirilmiştir [20]. Bu çalışmada ise fiziki olarak hiçbir tasarım ögesi ile oynanmadan birden fazla mikrodalga bandında (GSM 1800, ISM ve IMT - 2000) enerji hasadı yapabilecek yapı tasarımı, üretimi ve testleri gerçekleştirilmiştir. Enerji hasadı çalışmalarında mükemmel sinyal emilimi bir gereksinim olduğu için öncelikli olarak belirtilen frekans bantlarında mükemmel sinyal emilimi simülasyon ve deneysel çalışması sunulmuştur. Sonrasında enerji hasadı için kullanılan HSMS2860 Schottky diyotunun yansıma katsayısı üzerinde ne gibi bir etkisi olduğunun gösterilmesi için deneysel ve simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalara ek olarak enerji hasadı ile ilgili yapının simüle edilen yüzey akım dağılım grafiği, elektrik alan dağılımı sunulmuştur. Son olarak deneysel bir düzenek oluşturularak, spektrum analizör ve dc voltmetre ile Schottky diyot üzerinden ölçümler alınarak çalışma tamamlanmıştır. Simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları birbirleri ile karşılaştırıldığında uyumlu sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Daha önce belirtildiği gibi bu çalışmanın en önemli özelliği GSM1800 ve ISM bantlarından hiçbir tasarım değişikliği yapılmasına gerek olmadan elektromanyetik enerjinin hasat edilebiliyor olmasıdır. Elde edilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları da bu bulguyu doğrulayacak niteliktedir. Makalenin akışı şu şekilde gerçekleşmektedir, ikinci bölümde önerilen yapı tanıtılıp, yansıma katsayısı sinyal emilim özelliği, yüzey akım ve elektrik alan dağılımları ve enerji hasadı ile ilgili yapının simüle edilen enerji verimliliği grafiği sunulmuştur. Akabinde, enerji hasadı ile ilgili deneysel çalışmalar yapılmış bulgular ilgili grafiklerde paylaşılmıştır. Son bölümde ise çalışma sonucu elde edilen bulgular özetlenerek sonraki çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

2. Simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları

Bu çalışmada dört adet farklı boyutlardaki halka rezonatörden oluşan yapı Şekil 1' de görüldüğü gibi arkası bakır kaplı FR4 alıtış üzerine yerleştirilerek birim hücre oluşturulmuştur. FR4 malzeme, temin edilmesi kolay ve mikrodalga uygulamaları ile uyumlu olup, dielektrik katsayısı 4.2' dir ve bu çalışmada tercih edilen kalınlık 1.6 mm'dir. Gerek rezonatörlerin gerekse alıtış arkasında yer alan bakırın iletim katsayısı 5.8×10^8 S/m olup kalınlığı 0.035mm'dir. Bu çalışmada tasarım ve simülasyon çalışmalarında sonlu entegrasyon yöntemi (FIT) tabanlı bir yazılım olan CST Microwave Studio yazılımı kullanılmıştır. Sonlu entegrasyonu metodu, uzay koordinatlarına bağlı ayırık tabanlı bir metot olup zaman ve frekans domeninde elektromanyetik alan problemlerini nümerik olarak çözmekte kullanılmaktadır [21]. Tasarım işlemleri için öncelikli olarak değişik rezonatörler oluşturulmuş ve denenmiştir. Rezonans frekansları için rezonatör boyutları ayarlanırken $\lambda/5$ değeri baz alınarak 3cm ve 2.4cm çaplara sahip rezonatörler oluşturulmuştur. Bu rezonatörlerin yapılan simülasyonlar sonucunda yetersiz kalmasından dolayı ek rezonatörler eklenmiştir. Son

aşamada ise CST microwave Studio içinde yer alan optimizasyon özelliği parametrik olarak kullanılarak yazılımın rezonatör boyutlarını küçük çapta değiştirmesine izin verilmiş ve en güncel tasarım ortaya çıkartılmıştır. Şekil 1 de görüldüğü gibi dört farklı boyutta halka rezonatör kullanılmış ve bu rezonatörlerin üst ve alt kısmı arasında enerji hasadı için HSMS 2860 Schottky diyot yerleştirilmiştir. Yine aynı şekilde görüldüğü gibi çarpraz konumda yer alan rezonatörler birbirinin aynısıdır.



Şekil 1. Önerilen yapıya ait tasarım özellikleri (a) ön görünüş, (b) profil görünüş.

Şekil 1' de görüldüğü gibi önerilen yapı içindeki büyük olan rezonatör ile içinde yer alan küçük rezonatör arasında 2mm boşluk vardır. Büyük halka rezonatörlerden oluşan yapı sol üste ve sağ alta gelecek şekilde konumlandırılmıştır. İki adet halka rezonatörden oluşan küçük yapı ise sağ üst ve sol alta gelecek şekilde bir kenarı 67mm olan alttaş üzerine konumlandırılmıştır. Şekilde görüldüğü üzere toplam sekiz adet halka rezonatör olup bu rezonatörlerin boyutları ve diğer tasarım öğeleri GSM1800 ve ISM bandında enerji hasadı yapabilecek şekilde çok hassas olarak ayarlanmıştır.

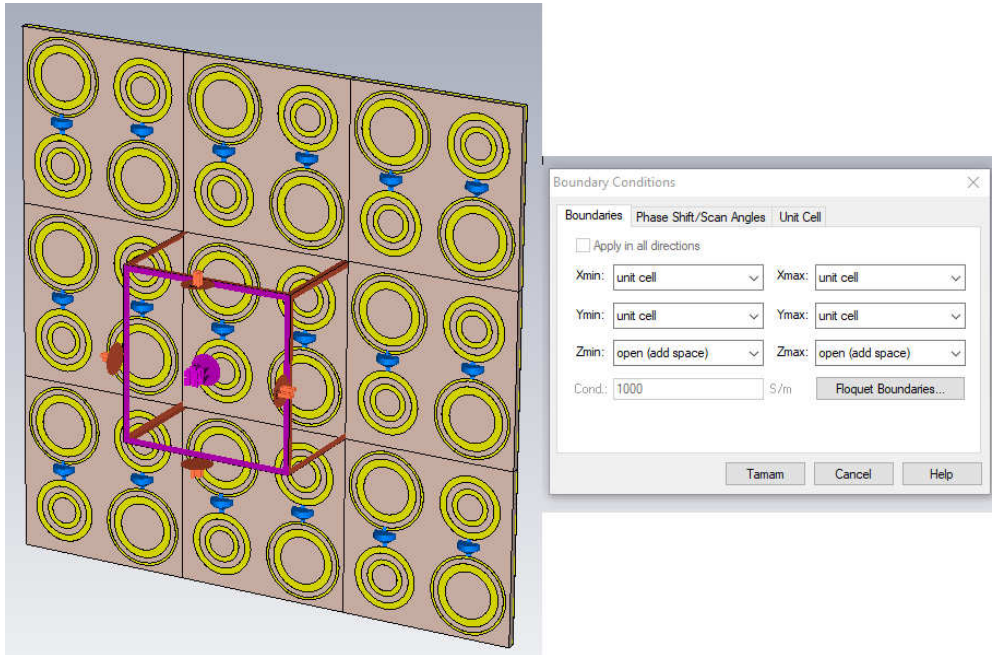
Önerilen bu yapının simülasyonu için CST Microwave Studio programında test ortamı ile uyumlu olması için birim hücre (Unit Cell Boundary) sınır koşulları seçilmiştir. Sinyal emilimi

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

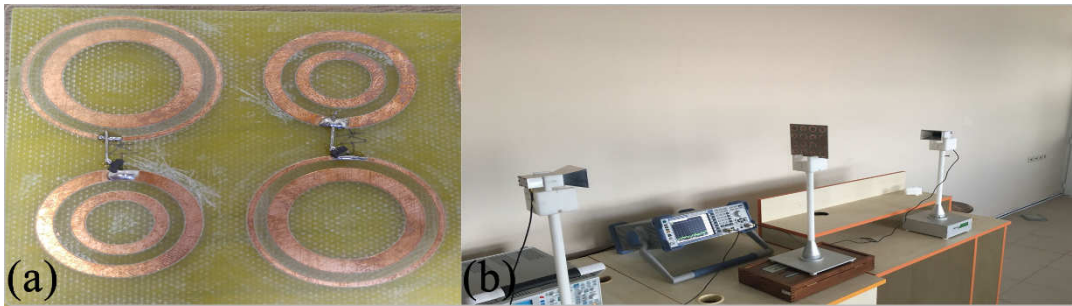
Olarak tanımlanabilir [3]. Burada $A(\omega)$, $R(\omega)$ ve $T(\omega)$ emilim, yansımaya ve iletim olarak tanımlanabilir. Yansımaya $R(\omega) = |S_{11}|^2$ ve iletim $T(\omega) = |S_{21}|^2$ olarak tanımlanırsa emilimin, iletim değerinin iletim ve yansımaya değerlerinin minimum olduğu durumda maksimuma çıktığı görülmektedir. Alttaşın arka kısmında bakır plaka olduğu için iletim sıfır olmaktadır, bu yüzden yansımaya minimum olduğu noktalarda emilim değeri en yüksek değerine ulaşacaktır. Yüksek emilimde yüksek enerji hasadı anlamına geleceği için bu çalışma için büyük bir önem arz etmektedir. Emilim sonucu hapsolan enerji HSMS2860 schottky diyot ile hasat edilebilir bunun için simülasyon programında bu diyot ile ilgili devre parametreleri program içinde yer alan lumped network element üzerinden girilmiştir.

2.1. Sinyal emilimi simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları

Bu bölümde ilk olarak yansımaya katsayısı (S_{11}) ve sinyal emilim ($A(w)$) değerlerinin ölçüm ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Simülasyon ve deneysel çalışma koşullarının birbirleriyle uyumlu olması için simülasyon programında sınır değerleri Şekil 2’ de görüldüğü üzere X- ve Y- eksenlerinde “unit cell” olarak seçilirken, Z- Ekseninde “open add space” olarak seçilmiştir. Ardından CST de oluşan Zmin ve Zmax portlarının referans düzleme olan mesafeleri ayarlanarak simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma için ise, ilk olarak tasarlanan yapı CNC kontrollü PCB üretim makinasında üretilmiştir, üretilen yapı Şekil 3.a’ da görülmektedir. Ardından üretilen bu yapı iki adet huni anten ve 6 GHz’ lik Rohde & Schwartz network analizörü kullanılarak laboratuvarında yansımaya katsayısı değeri ölçümü Şekil 3.b’ de görüldüğü gibi gerçekleştirilmiştir. Huni anten konumları belirlenirken, uzak alan koşulları (far field conditions) göz önünde bulundurularak huni anten ile metamalzeme arasındaki mesafe $2*\lambda$ dan daha büyük olacak şekilde seçilmiştir [22]. Kaybın en az olması için, vektor network analizörüne bağlı olan anten, metamalzemeye önce yaklaştırılmış daha sonra yansımaya katsayısı örüntüsü sabit olana dek geriye çekilmiştir. Bu nokta, düzlem dalga formunun oluştuğu konumdur.

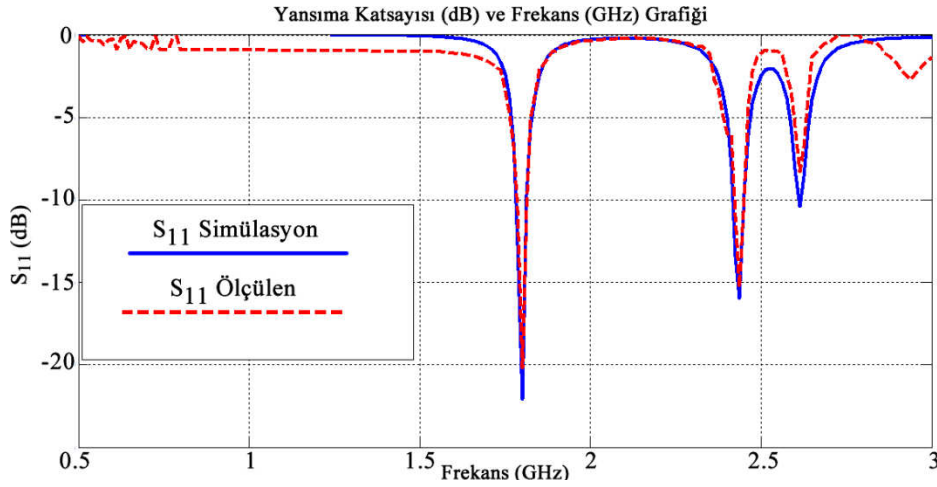


Şekil 2. Simülasyon programında seçilen sınır değerlerin gösterilmesi.



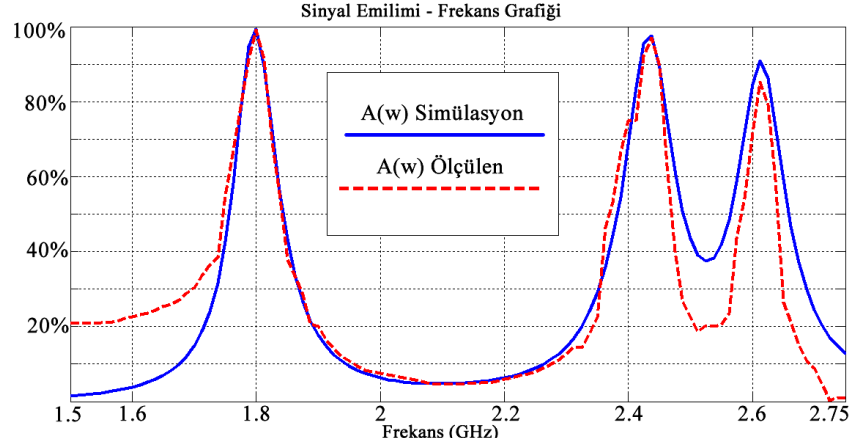
Şekil 3. (a) önerilen yapının HSMS 2860 diyot montajı yapılmadan önceki hali, (b) Önerilen yapının yansımaya katsayısı deneysel ölçüm resmi.

Gerçekleştirilen ölçümlere ilişkin simülasyon ve deneysel çalışmanın karşılaştırılması için ilk olarak Şekil 4’ de görüldüğü gibi yansıma katsayısı(dB)-Frekans grafiği sunulmuştur. Grafikte görüldüğü gibi önerilen yapının 1.8GHz, 2.45GHz ve 2.60 GHz de yansıma katsayısı değeri düşmekte en küçük değere ise 1.8 GHz de yaklaşık -22dB olarak ulaşmaktadır. Bu rezonans noktaları daha önce belirtildiği gibi halka rezonatörlerin boyutlarının çok hassas olarak ayarlanması sonucu elde edilmiştir. Elde edilen bu rezonans değerleri yapının tam istendiği gibi GSM1800 ve ISM bantları ile birlikte gelecekte geçilmesi düşünülen IMT-2000 frekans bandında (Global Mobile Broadband) enerji hasadı gerçekleştirebileceğini göstermektedir. Deneysel çalışma ve simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında ikisinin arasında birkaç dB fark olduğu görülmektedir. Bu fark laboratuvar ortamından ve kalibrasyon hatalarından kaynaklanmaktadır.



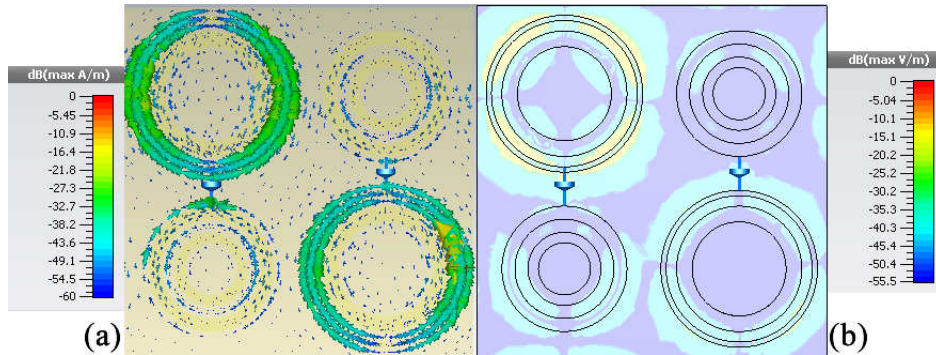
Şekil 4. Önerilen yapının yansıma katsayısı (dB) simülasyon ve deneysel çalışma sonucu ölçülen değerlerinin 0.5 GHz ile 3GHz arası gösterimi.

Yansıma katsayısı verildikten sonra enerji hasadı uygulamalarında önemli bir yeri olan Sinyal emilim seviyesinin verilmesi faydalı olacağı için Şekil 5’ de yer alan grafik verilmiştir. Emilim seviyesinin daha net görülmesi için sinyal emilim grafiği 1.5GHz-2.75GHz aralığında verilmiştir. Simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarına bakıldığında önerilen yapının 1800MHz de emilim yüzdesi yaklaşık 99% seviyelerinde belirlenirken bu değer 2.45GHz de 97% seviyesine 2.6GHz de ise 90% değerine düşmektedir. Sinyal emilim yüzdesinin 90 ve üzerine çıktığı noktalar mükemmel sinyal emici olarak tanımlanmaktadır. Bu tanıma göre önerilen yapının GSM1800, ISM 2.45GHz ve IMT-2000 2.6GHz seviyelerinde mükemmel sinyal değerine ulaştığı söylenebilir.



Şekil 5. Önerilen yapının emilim seviyesinin (%) 1.5GHz - 2.75 GHz aralığında simülasyon ve deneysel bulgularının karşılaştırılması.

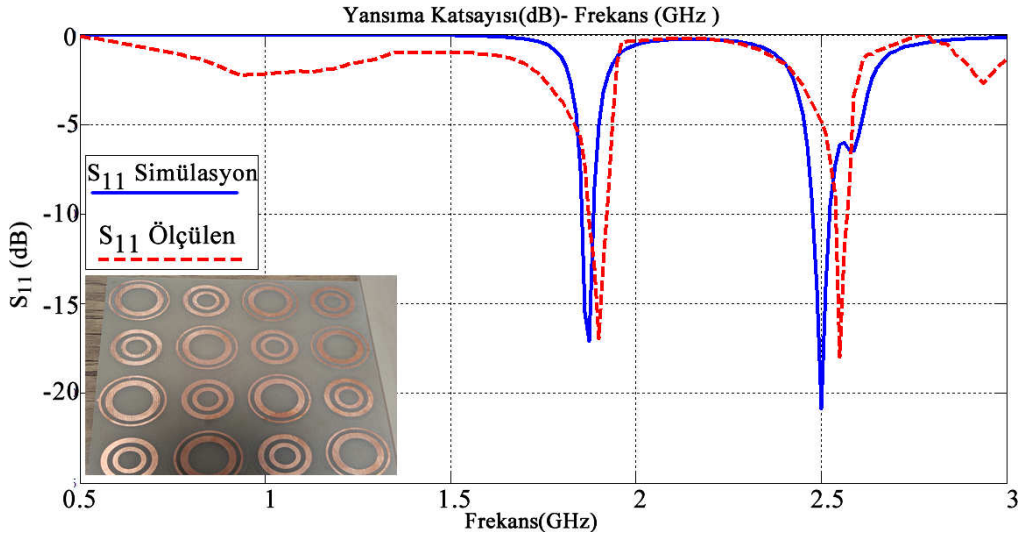
Önerilen yapının GSM1800, ISM ve IMT-2000 frekans bantlarında mükemmel sinyal emilimi gerçekleştirdiği gösterildikten sonra bu frekanslarda yüzey akım dağılım ve elektrik alan dağılım grafiğinin verilmesi sinyal emilimi ve enerji hasadı konusunun daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır. Bu bağlamda, 1800MHz de simüle edilen yüzey akım dağılım ve elektrik enerji dağılım grafiği CST Microwave Studio programında elde edilerek Şekil 6' da sunulmuştur. Yüzey akım dağılım grafiğine bakıldığında, yüzey akımlarının sol üst ve sol alt rezonatörler arasında çok yoğun olduğu ve yüzey akımlarının paralel ve anti-paralel şekilde aktığı görülmektedir. Paralel akan akımlar elektrik alana sebep olurken anti-paralel akımlar manyetik akıma sebep olmaktadır. Gelen elektromanyetik dalganın Elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri rezonatörler üzerinde bir elektromanyetik alan oluşturmaktadır. Elektrik alan yapının her iki yüzü arasında dolaşarak serbest elektronları tetikler. Bu yüzden yüzey akımları elektrik alanın yoğun olduğu noktalarda aktive olur ve buda bir manyetik tepki oluşturup rezonans oluşturur. Oluşan bu rezonans noktasında sinyal emilimi artacaktır. Şekil 6.a' da görüldüğü gibi paralel ve anti paralel akımlar, elektrik ve manyetik alan oluşturacaktır. Oluşan bu manyetik akım gelen elektromanyetik dalgaya tepki verecek bu tepkide empedans uyum noktasında mükemmel sinyal emilimine sebep olacaktır. Mükemmel emilim seviyesinde gelen elektromanyetik dalganın enerjisi sinyal emici içinde hapsolacaktır.



Şekil 6. Simülasyon sonucu elde edilen 1800MHz de (a) yapı üzerinde oluşan yüzey akım dağılım grafiği, (b) elektrik alan grafiği.

2.2. Kullanılan schottky diyotun yansımaya katsayısı değerine etkisi

Bu bölümde, önerilen yapı üzerinde enerji hasadı için kullanılan HSMS2860 Schottky diyotunun, yansımaya katsayısı üzerinde etkisi incelenecektir. Bu işlem için, simülasyon ve deneysel çalışmalar yapılmış olup, simülasyon çalışması CST Microwave Studio programında gerçekleştirilirken, deneysel çalışma için bir diğer örnek üretilerek yansımaya katsayısı ölçümü tekrarlanmıştır. Simülasyon ve deneysel çalışma sonucunda elde edilen yansımaya katsayısı grafiği Şekil 7’ de sunulmuştur. Simülasyon sonucuna bakıldığında ilk göze çarpan nokta, schottky diyotun kullanılması durumunda gözlemlenen 2.60 GHz de görülen rezonansın oluşmamasıdır. Ayrıca, 1800MHz ve 2.45GHz frekanslarında görülen rezonanslarda sırasıyla 1.87 GHz ve 2.45 GHz’ e kaymış durumdadır. Bu değişimin sebebi kullanılan Schottky diyotun oluşturduğu kapasitif etkinin yapı üzerinde azalması sonucu, $1/\sqrt{LC}$ denklemi ile uyumlu şekilde önceki yapının rezonans frekanslarının yukarı yönlü kaymış olmasıdır. Deneysel çalışma sonuçlarına bakıldığında ise genel olarak simülasyon sonuçları ile uyumlu sonuçlar elde edildiği görülürken, iki sonuç arasında 30MHz’ lik bir fark görülmektedir. Bu farkın oluşmasındaki en büyük etken kalibrasyon ve test ortamından kaynaklanan hatalardır.



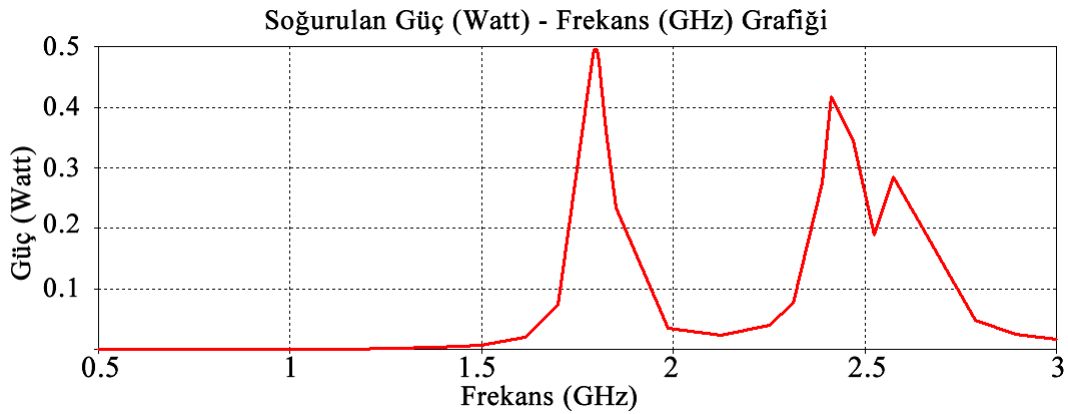
Şekil 7. Schottky diyotun yansımaya katsayısı değerine olan etkisine göstermek için hazırlanan simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları grafiği ve bu işlem için üretilen 2x2 birim hücre.

2.3. Enerji hasadı uygulamaları

Bu bölümde, çalışmada önerilen yapının enerji hasadı ile ilgili ne gibi simülasyon ve deneysel çalışmaların yapıldığı hakkında bilgi verilecektir. İlk olarak önerilen yapının enerji hasadı yüzdesi için 0.5GHz ile 3GHz aralığında çalışma yapılmış simülasyon sonucu elde edilen veriler Şekil 8’ de sunulmuştur. CST microwave studio programında Zmin ve Zmax portlarındaki gücün 1W değerinde olduğu üretici tarafından beyan edilmiştir. RF’ den DC ye dönüşüm oranı denklem(2) de görüldüğü gibi hesaplanabilir [20]. Burada belirtilen P_{RF} simülasyon programı tarafından verilen RF gücü temsil ederken, P_{DC} ise, simülasyon programı tarafından değeri hesaplanan doğru akıma çevrilmiş güç yani soğurulmuş güç değeridir.

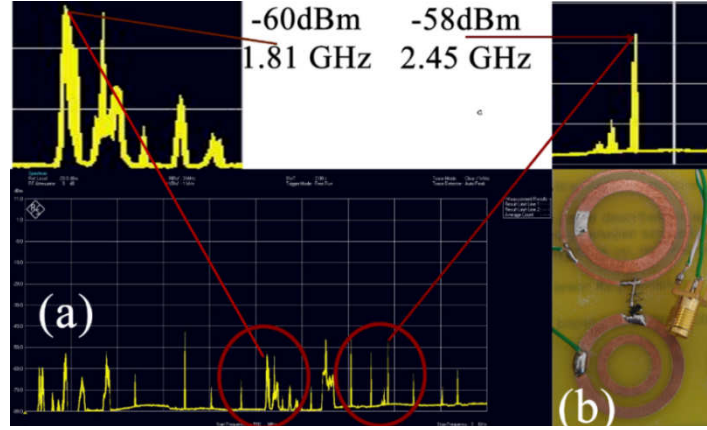
$$\rho = \frac{P_{DC}}{P_{RF}} \quad (2)$$

Bu formüle göre, grafiğe bakıldığında 1.8 GHz seviyesinde simülasyon sonucu 0.5W değerinde bir güç elde edilebildiği görülmektedir. Bu da yaklaşık 50% verimlilikte enerji hasadını mümkün kılmaktadır. Bu değer, benzer çalışmalara bakıldığında [21-23] yüksek bir değer olarak kabul edilebilir. Ayrıca bu çalışmanın en önemli özelliklerinden birisi olan çok bantlı enerji hasadı için 2.45 GHz seviyesine baktığımızda verimin 42% seviyelerinde gerçekleşirken 2.6GHz de 28% seviyelerinde kaldığı görülmektedir. Bu değerler 1.8GHz de elde edilen değerlerden düşüktür. Enerji hasadı simülasyon sonucu önerilen metamalzeme tabanlı halka rezonatörlü yapının çok bantlı GSM1800, ISM ve IMT-2000 bantlarında enerji hasadı için kullanılabilir olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Önerilen yapıya ait simüle edilen soğurulan güç (Watt)- frekans (GHz) grafiği.

Simülasyon sonuçlarını desteklemek için, enerji hasadı ile ilgili bir diğer deneysel çalışma Rohde&Schwartz FSH 8 spektrum analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için önerilen yapı 0.5GHz-3GHz aralığında çalışan vektör network analizörü ve Şekil 2 de görüldüğü gibi iki adet huni anten arasına konulmuştur. Daha sonra HSMS 2860 Schottky diyotun ucu spektrum analizörü cihazına bağlanmıştır. Bu deneysel çalışmayı yapmanın amacı çalışma frekansında özellikle rezonans frekanslarında önerilen yapının spektrum analizöründe 0.5GHz-3GHz aralığında gözlemlenerek rezonans frekanslarında sinyalin ne kadar yükseldiğinin görülmesidir. Belirtilen şekilde sistem ayarlandıktan sonra Şekil 9.a' da görülen sonuçlar elde edilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi 0.5GHz-3GHz aralığında olmaması gereken gürültüler laboratuvar ortamının yalıtılmış olmamasından dolayı oluşmuştur. Bu deneylerin yalıtılmış odada yapılması durumunda bu harmonikler yok olacağı düşünülmektedir. 1.8 GHz, 2.45 GHz ve 2.6 GHz seviyelerinde oluşması beklenen rezonanslar oluşmuş ve her iki değerinde de 30dBm seviyesinin üzerinde bir artış olduğu gözlemlenmiştir. 2.60 GHz değerine baktığımızda artışın Şekil 8 de görülen düşük güç dönüşüm oranını destekleyecek şekilde sınırlı kaldığı rahatlıkla görülebilmektedir. Elde edilen bu deneysel sonuçlarda, simülasyon çalışmalarında elde edilebilecek gücü desteklemekte ve önerilen yapının çok bantlı enerji hasadı için kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 9. (a) önerilen yapının spektrum analizör ölçüm sonuçları, (b) spektrum analizör ölçümleri için üretilen yapı.

Bu bölümde yapılan bir diğer deneysel doğrulama ise dc voltaj ölçümü şeklinde gerçekleştirilmiştir. Spektrum analizör ölçümünde kullanılan düzenek bu sistem içinde geçerlidir. Tek farkı spektrum analizöre bağlanan uç bu ölçümde dc voltmetreye bağlanmıştır. Şekil 10’ da görüldüğü gibi HSMS 2860 Schottky diyotun uçlarının dc voltmetreye bağlanması sonucu maksimum dc voltaj değeri 47.6mV olarak görülmektedir. Her ne kadar bu değer bir akıllı telefonu şarj etmek için yeterli olmasa da, kablosuz algılayıcı ağ elemanlarından, hesap makinelerine, saatlerden düşük güçlü LED’lere kadar pek çok cihazın beslemesi için yeterli olacaktır [25].



Şekil 10. Önerilen yapı üzerindeki HSMS2860 diyot uçlarının dc voltmetreye bağlanması sonucu ölçülen değer.

3. Değerlendirme ve Sonuç

Metamalzeme tabanlı GSM 1800, ISM ve IMT-2000 bantlarında enerji hasadı yapabilecek dört farklı halka rezonatöründen oluşan bir yapı dielektrik bir alttaş üzerine yerleştirilerek üç bantlı enerji hasadı uygulamasına yönelik bir yapının tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Tasarım ve üretim aşamaları sonunda önerilen yapının

yansıma katsayısı ve sinyal emilim yüzdesi uygulamalarına yönelik simülasyon ve deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonunda GSM1800, ISM ve IMT-2000 bantlarında sinyal emilimi olduğu hatta ilk iki bantta mükemmel sinyal emici davranışı gösterdiği gerek simülasyon gerekse deneysel olarak doğrulanmıştır. Konunun daha iyi anlaşılması için enerji hasadında kullanılan diyotun yansıma katsayısı üzerindeki etkisi yine deneysel olarak çalışılmıştır. 1800MHz' de yüzey akım dağılımı ve elektrik alan dağılımı grafiği sunularak sinyal emicinin nasıl çalıştığı anlatılmaya çalışılmıştır. Ayrıca, spektrum analizör ve dc voltmetre ile gerilim ve sinyal ölçümleri yapı üzerinde yapılarak yapının mikrodalga enerji hasadı uygulamalarında kullanılabilceği gösterilmiştir. Yapılan simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bunlarla birlikte spektrum analizör ölçümlerinde ortam şartları ve kalibrasyon hatalarından bazı frekans değerlerinde gürültü ortaya çıkmıştır. Bu çalışmanın metamalzeme tabanlı sinyal emici ve enerji hasadı uygulamaları geliştiren bilim insanlarına faydalı olacağı öngörülmektedir. Gelecek çalışma olarak elde edilen bu verilerden yola çıkarak bir sokak veya cadde de enerji hasadı yapabilecek bir çalışma geliştirilmesi ön görülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Shelby, R.A., Smith, D.R. ve Schultz, S., Experimental verification of a negative index of refraction. **Science**, 292.5514, 77-79, (2001).
- [2] Maci, S.A, Cloaking metamaterial based on an inhomogeneous linear field transformation. antennas and propagation, **IEEE Transactions on**, 58, 1136-1143, (2010).
- [3] Sabah, C., Dincer, F., Karaaslan, M., Unal, E., Akgol, O. ve Demirel, E., Perfect metamaterial absorber with polarization and incident angle independencies based on ring and cross-wire resonators for shielding and a sensor application, **Opt. Commun.**, 322, 137-142, (2014).
- [4] Lee, J. ve Lim, S., Bandwidth-enhanced and polarization-insensitive metamaterial absorber using double resonance, **Electron. Lett.**, 47, 8-9, (2012).
- [5] Karakaya, E., Mulazimoglu, C., Can, S., Yılmaz, E. ve Akaoglu, B., Metamaterial design for energy harvesting applications, **Signal Processing and Communication Application Conference (SIU)**, 509-512, (2016).
- [6] Landy, N.I., Sajuyigbe, S., Mock, J.J., Smith, D.R. ve Padilla, W.J., Perfect Metamaterial Absorber, **Phys. Rev. Lett.**, 100, 207402, (2008).
- [7] Bakır, M., Delihacıoğlu, K., Karaaslan, M. ve Sabah C., U-shaped frequency selective surfaces for single and dual-band applications together with absorber and sensor configurations, **IET Microwaves Antennas & Propagation**, 10(3), 293-300, (2016).
- [8] Dincer F, Akgol O, Karaaslan M, Unal, E. ve Sabah C., Polarization angle independent perfect metamaterial absorbers for solar cell applications in the microwave, infrared, and visible regime. **Progress in Electromagnetics Research**, 144, 93-101, (2014).
- [9] Dang, K. Z., Shi, J.M., Wang, J.C., Lin, Z.D. ve Wang, Q. C., Tunable wideband absorber based on resistively loaded lossy high-impedance surface, **Chinese Phys. B**, 24 104104, (2015).
- [10] Dincer, F., Karaaslan, M., Colak, S., Tetik, E., Akgol, O., Altıntas, O. ve Sabah, C., Multi-band polarization independent cylindrical metamaterial absorber and sensor application, **Modern Physics Letters B**, 30(08), 1650095, (2016).

- [11] Pranav, U.S., Sudheesh, S., Stanly, P., Sankar, S., Devika, R. ve Pradeep, A., Metamaterial based energy harvester, **Procedia Computer Science**, 93, 74-80, (2016).
- [12] Thamer, S., Almoneef, T.S. ve Ramahi, O.M., Metamaterial electromagnetic energy harvester with near unity efficiency, **Appl. Phys. Lett.** 106, 153902, (2015).
- [13] Cheng, Y.Z., Wang, Y., Nie, Y., Gong, R.Z., Xiong, X. ve Wang, X., Design, fabrication and measurement of a broadband polarization-insensitive metamaterial absorber based on lumped elements, **Journal of Applied Physics**, 111(4), 044902, (2012).
- [14] Yang, G., Ho, C. K. ve Guan, Y.L., Multi-antenna wireless energy transfer for backscatter communication systems, **Selected Areas in Communications IEEE Journal on**, 33, 2974-2987, (2015).
- [15] Mrnka, M., Vasina, P., Kufa, M., Hebelka, V. ve Raida, Z., The RF energy harvesting antennas operating in commercially deployed frequency bands: a comparative study, **International Journal of Antennas and Propagation**, 2016, Article ID 7379624, (2016).
- [16] Devi, K.A., Kwong, C.F., Chakrabarty, C.K. ve Norashidah, M.D, Investigations on characteristics of metamaterial based patch antenna for rf energy harvesting at GSM 900, **Electrical and Electronic Engineering**, 5(1), 7-13, (2015).
- [17] Dini, M., Filippi, M., Costanzo, A., Romani, A., Tartagni, M., Del Prete, M. ve Masotti, D., A fully-autonomous integrated RF energy harvesting system for wearable applications, **European Microwave Conference 2013**, 987–990, (2013).
- [18] Pinuela, M., Mitcheson, P.D., Lucyszyn, S. ve Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments, **IEEE Trans. Microw. Theory Techn.**, 61(7), 2715-2726, (2013).
- [19] Anandhimeena, B. , Selvan, P. ve Raghavan, S, Compact metamaterial antenna with high directivity for bio-medical systems, **Circuits and Systems**, 7, 4036-4045, (2013).
- [20] Bakır, M., Karaaslan, M., Altıntaş, O., Bagmancı, M., Akdoğan, V. ve Temurtaş, F., Tunable energy harvesting on UHF bands especially for GSM frequencies, **International Journal of Microwave and Wireless Technologies**, 10(1). 67-76, (2018).
- [21] Born M ve Wolf E, **Principles of optics**, 7th Edition, Cambridge University Press, (1999).
- [22] Zhu, N., Ziolkowski, R.W. ve Xin, H., A metamaterial-inspired, electrically small rectenna for high-efficiency low power harvesting and scavenging at the GPS L1 frequency, **Appl. Phys. Lett.**, 99, 114101, (2011).
- [23] Ramahi, O.M., Almoneef, T.S., AlShareef, M. ve Boybay, M.S., Metamaterial particles for electromagnetic energy harvesting, **Appl. Phys. Lett.** 101, 173903, (2012).
- [24] Almoneef, T.S. ve Ramahi, O.M., 3-dimensional stacked metamaterial arrays for electromagnetic energy harvesting, **Prog. Electromagn.Res.**, 146, 109-115 (2014).
- [25] Vullers, R.J.M., Schaijk, R.V., Visser, H.J., Penders, J. ve Hoof, C.V, energy harvesting for autonomous wireless sensor networks, **IEEE Solid-State Circuits Magazine**, 2(2), 29-38, (2010).