



RF Enerji Toplayıcı Devre Tasarımı RF Energy Harvesting Circuit Design

Mehmet Muhittin Maç¹, Ümit Binici², Hakan P.Partal³, Sibel Zorlu Partal⁴, Mehmet Ali Belen⁵

^{1,2,3,4,5}Yıldız Teknik Üniversitesi-Elektrik Elektronik Fakültesi

^{1,3,4,5}RADARCOMM Ltd. Şti, YTÜ Teknopark, İstanbul

mehmetmuhittinmac@gmail.com, umitbinici@gmail.com, hpartal@radarcomm.com, zorlu@yildiz.edu.tr, mbelen@yildiz.edu.tr,

Özet

Bu çalışmada enerji hasatlama için radyo frekansı (RF) elektromanyetik dalgalardan enerji toplayıcı bir modül önerilmiştir. Diğer alternatif enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında, ortamda mevcut veya transfer edilebilecek RF enerji, düşük yoğunluğuna sahiptir ve hasatlama verimliliği açısından yüksek verimli doğrultucu anten tasarımına ihtiyaç vardır. RF enerji hasatlama uygulamaları, kablosuz sensör ağları ve ZigBee teknolojiler gibi düşük güçte çalışan haberleşme sistemleri ile birlikte kullanılabilir ve bu sistemlerin batarya ömrünü uzatıp, çalışma performansını artırabilir. Bu çalışmada öncelikle önemli uygulama alanı olan kablosuz sensör ağları ile ilgili literatür ve market araştırması özeti verilmiş olup, daha sonra RF hasatlayıcı devreleri için empedans uyumlandırılmış doğrultucu devre ve çok bantlı anten tasarımları yapılmıştır. Bu devreler ait simülasyon yazılımı ile optimize edilerek sonuçları detaylı olarak verilmiştir.

Abstract

In this study, an energy harvester module utilizing radio frequency (RF) / electromagnetic waves is proposed. Comparing with other alternative energy sources, the ambient or transmitted RF energy has very low energy density, therefore requires a high efficient rectifier antenna (rectenna) design. RF energy harvesting applications include RFID, low power sensors, low power RF communications, and wireless sensor network. Harvested RF energy increases battery life or allows battery-free operations for low power electronics. In this work, the literature and market research summary is presented for especially wireless sensor network applications. Then, rectifier circuits and their matching networks are designed, finally a multiband antenna is designed by using microwave and electromagnetic simulation tools. Simulation results for these circuits were given in detail.

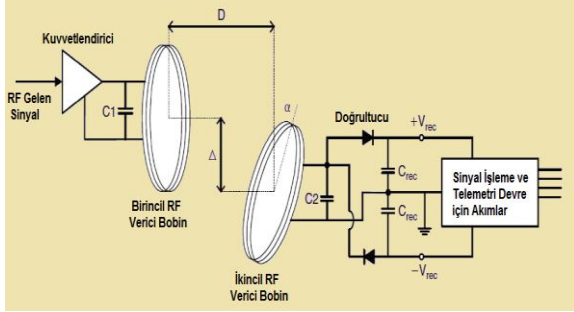
1. Giriş

Son yıllarda daha hızlı veri transferi yapmak amacı ile birçok modülasyon tipi geliştirilmiş ve değişik kablolu/kablosuz protokoller oluşturulmuştur. Cep telefonu sistemlerinin yaygınlaşması ile dikkat çekmeye başlayan kablosuz haberleşme sistemleri, daha hızlı veri alışverişine olanak sağlayan yapıları ile yeni oluşturulan protokoller içerisinde

kullanımı en hızlı artan sistemler olmuşlardır. Kablosuz sistemler, özellikle kısa mesafe veri iletişim sistemleri içerisinde, en az kablolu olanlar kadar hızlı ve güvenilir olmaktadır. Kablosuz yerel alan ağ (WLAN) sistemleri, entegre devre teknolojileri ile üretilebilmekte ve böylelikle düşük maliyetli sistemler oluşturulabilmektedir. Kısa mesafe, hızlı veri alışverişine uygun kablosuz haberleşme protokolü olan IEEE 802.11b/g, 2.4–2.5 GHz bandında çalışmakta ve geniş bir kullanım alanına sahiptir. ISM/SRD uygulamalarında kullanılan RF modüllerin veri aktarım kapasiteleri, IEEE 802.11 standartlarında çalışan cihazlar kadar yüksek değildir. Ancak, kullanım amaçları açısından bakıldığında buna gerek olmadığı görülecektir. ISM ve SRD uygulamalarında amaç “Komuta ve Kontrol” dür. Yani amaç bir yerdeki bilgi kütlelerini bir başka yere aktarmak değildir. Henüz yeni bir teknoloji olan ZigBee; IEEE802.15.4 altyapısında ve standart sarmal ağlar ile uygulama profilleri kullanılarak kurulan kısa mesafe kablosuz ağ standardı olarak tanımlanabilir. Güvenirliği, düşük maliyeti ve enerji tasarrufu gibi avantajları göz önüne alındığında ZigBee, PC girdi aygıtları gibi sensör ve yönetim ürünlerinin kablosuz bağlantıları için kullanılabilir. RF enerji toplama devreleri, ısı sensörleri, nem sensörleri gibi ZigBee teknolojisinin kullanıldığı uygulamalarda, sürekli bir enerji kaynağı oluşturmak amacıyla kullanılabilir. RF enerji hasatlayıcı devreler uzun ömürlü, düşük hacimli ve düşük çevresel etkilerle kullanım alanlarını her geçen gün genişletmektedirler.

2013 yılında Zoya Popovic tarafından yapılan bir çalışmada kablosuz olarak beslemesi gerçekleştirilen kablosuz sensörlerin [1]’de anlatıldığı gibi, yönsüz antene sahip bir verici ile güç yoğunluğunun 10-100 nW/cm² seviyelerinde yapıldığı görülmüştür. Güç kaynağı olarak da ticari alanda 1-3 GHz frekanslarında çalışan antenlerden hasatlanan çeşitli güç seviyeleri ile bu deneyler gerçekleştirilmiştir. Doğrultucu anten (Rectenna) olarak bilinen bu sistemlerde tasarımları yapılan uygun frekanslardaki enerji verimi yüksek bir doğrultucu devre kullanılarak doğrultulmaktadır. 2013 yılında Alirio Boaventura, doğrultucu anten sistemlerinde nonlineer diyot modeli tasarlamış, doğrultulan bu RF enerjinin, anten devresinin verimine ve çevredeki diğer kaynaklardan yayılan RF enerjinin yoğunluğuna bağlı olarak değiştiğini belirtmiştir [2]. Başka bir çalışmada tıbbi alanda uygulamaya başlayan kablosuz yakın mesafeden gerçekleştirilen güç iletimi incelenmiştir [3]. Şekil 1’de yer alan ve Witricity (Wireless - Electricity) olarak bilinen bu sistemde,

birbirlerine kuplajlı hâlde bulunan ve manyetik rezonans yapan dört veya iki adet bobin bulunmaktadır [3,4]. Manyetik rezonansın belirli bir frekansta sürekli olarak gerçekleşmesi sağlanarak(gerekirse bağımsız, dışarıdan bir uyarın ile)verimli bir şekilde biyolojik dokular arasında güç transferi sağlanabilmektedir.



Şekil 1: Endüktif kuplajlama yöntemi [3]

2. RF Enerji Hasatlama Yöntemleri

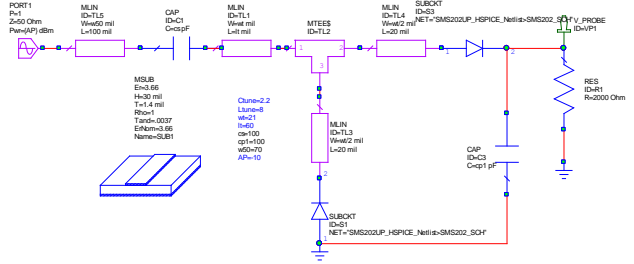
RF enerji toplayıcı devrenin tasarımı iki aşamada tamamlanmıştır. İlk aşamada schottky diyotlu devre tasarımı ve simülasyon sonuçları elde edilmiştir. İkinci aşamada da istenilen frekanslarda tasarımı gerçekleştirilen bir mikroşerit antenin çalışması simülasyon ortamında test edilmiş ve sonuçları incelenmiştir.

2.1. Schottky Diyotlu Devre Tasarımı

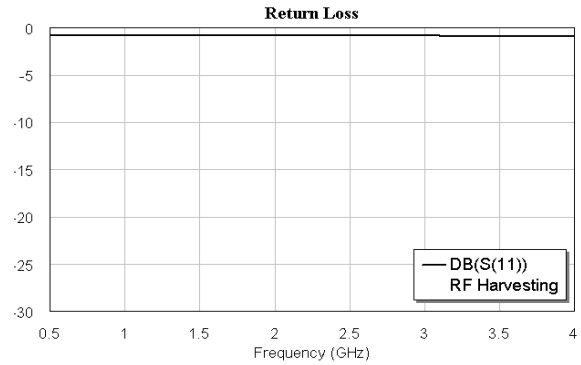
Kapasite ve diyottan oluşan schottky-diyot doğrultucu devreleri yaygın olarak RFID uygulamalarında kullanılmaktadır. Çıkış gerilim seviyesini ve dönüşüm verimliliğini artırmak için genellikle düşük iletkenlik direnci ve kavşak kapasitesi olan schottky-diyotlar kullanılır. Schottky diyotlar girişlerindeki RF dalgayı doğrultarak DC'ye çevirmektedirler. Doğrultucu devrelerde kullanılan schottky diyotlar düşük barrierli ve çok zayıf giriş RF güçlerini algılayabilme özelliklerine sahip olmalıdır. Böylece yüksek hassasiyetli olması devrenin daha yüksek verimde ve diyot tarafında daha az kayıpla çalışmasını sağlamaktadır. Bu tasarım kapsamında toplu (lumped) elemanlar ile Aeroflex firmasının SMS ailesi schottky diyot modeli kullanılmıştır. Bu schottky diyotun çekici özelliği düşük yüzey kayıpları ve hassasiyetidir.

Şekil 2'de tek katlı olarak tasarımı yapılan devre incelendiğinde,geri dönüş kayıplarının yüksek olması sebebiyle, girişe gelen RF sinyalinin çok az bir kısmının çıkışta Schottky diyot tarafından doğrultulduğu görülmüştür. Bunun için RF sinyalin geldiği anten bölümünde bir uyumlama yapılarak, sinyallerin diyotlara daha verimli bir şekilde ulaştırılması sağlanmıştır.

İlk durumda Şekil 2'de verilen devrede bir uyumlama yapılmadığı için geri dönüş kayıpları yüksektir. Bu durumda elde edilen yüksek kayıplar, şekil 3'te gösterilmiştir.

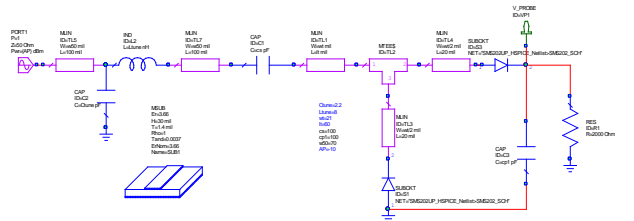


Şekil 2: Uyumlandırılmamış tek katlı doğrultucu devre



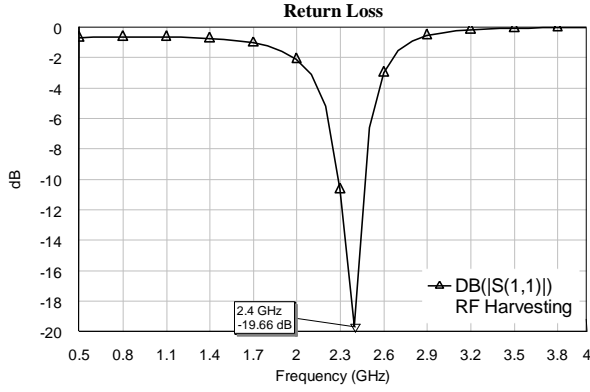
Şekil 3:Uyumlandırılmamış devrenin geri dönüş kaybı(S₁₁)

Daha sonra şekil 4'de verilen uyumlama devresi tasarlanmış, bu uyumlama devresi(L Tipi) doğrultucu devreye eklenmiş ve geri dönüş kayıplarını da içeren simülasyon sonuçları şekil 5'de verilmiştir.



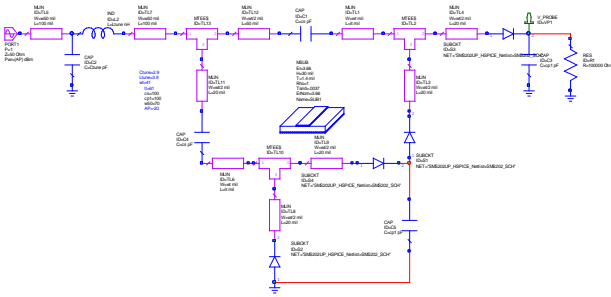
Şekil 4: Uyumlandırılmış tek katlı doğrultucu devre tasarımı

Simülasyon sonuçları incelendiğinde geri yansımının azalarak, daha yüksek genlikte RF Sinyalinin doğrultulduğu ve daha yüksek bir gerilim değeri elde edildiği görülmüştür. Şekil 5'de elde edilen sonuçlar incelendiğinde, geri yansımaya kayıplarının (Return Loss, S₁₁) kullanılan frekans bantları aralığında-10dB'den daha azolduğu ve bu sonuçların da ilk tasarım için kabul edilebilir bir aralıkta olduğu sonucuna varılmıştır. Devre üzerinde yapılacak olan uyumlama çalışmaları ile bu oran daha da iyileştirilerek, kullanılacak uygulama sahasında devrenin yeterliliği daha da artırılabilir.



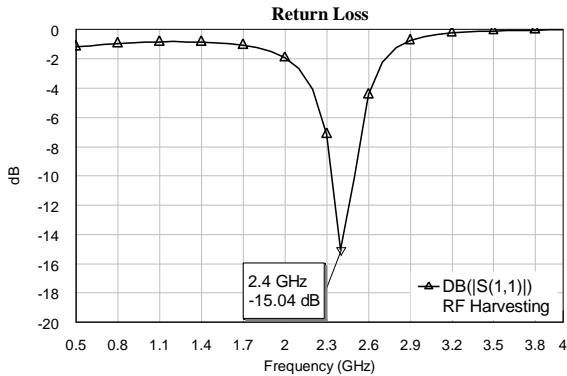
Şekil 5: Uyumlandırılmış tek katlı devrenin geri dönüş kaybı

Şekil 4’de verilen devredeki DC çıktısının artırılması amacı ile doğrultucu katmanını artırılarak, şekil 6’deki şema tasarlanmıştır ve simülasyon sonuçları şekil 7’de verilmiştir.



Şekil6: İki katlı doğrultucu devre tasarımı

Şekil 7’de devreye ilişkin geri dönüş kayıpları elde edilmiştir. Yapılan empedans uyumlama devreleri ile kullanılan üç frekans bandını kapsayacak şekilde optimum geri yansıma kayıpları (S11) elde edilmiştir.



Şekil 7: İki katlı devrenin geri dönüş kaybı (Return Loss, S11)

Çizelge 1’de Aeroflex SMS ailesi diyotu kullanılarak tasarlanan tek katlı doğrultucu devresinin, üç farklı ticari frekans için, hasatlayıcı devre çıkışında elde edilebilecek DC gerilimin simülasyon sonuçları verilmiştir. Devrenin girişine uygulanan -40dBm ile +10dBm arasında RF giriş gücü değeri için çıkışta elde edilen gerilim değerleri tablo halinde özetlenmiştir.

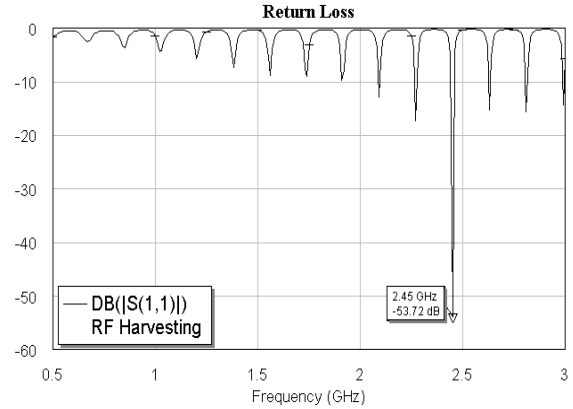
Çizelge 1: RF Giriş gücü – DC Çıkış gerilim (P_{IN} - V_{OUT}) Tablosu

Input RF Power	Vout (mV) (DC)		
	900MHz	1800MHz	2400MHz
-40dBm	0.73	0.69	0.288
-30dBm	1.11	0.880	0.871
-20dBm	7.26	5.39	2.7
-10dBm	189.2	168.3	74.7
0dBm	1027.2	936.0	610.9
10dBm	1974.4	1940	1920.6

2.2. Doğrultucu Devre Tasarımı için Yorumlar

Schottky doğrultucu devresinin girişine gelen kablosuz RF enerjiden, devre çıkışında maksimum oranda DC gerilim elde edilmesi için devre üzerinde uyumlama çalışmaları yapılmıştır. Uyumlama için devrenin girişinde filtreler kullanılmış ve böylece teorik hesaplamalardan elde edilen sonuçlar ile simülasyon sonuçlarının birbirine yakın olması sağlanmıştır. Şekil 8’de uyumlama yapılmış devrenin geri dönüş kaybı gösterilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, tek katmanlı devrenin veriminin daha yüksek, çok katmanlı devrenin de çıkış geriliminin yüksek olduğu görülmüştür. Bu konuda yapılacak optimizasyon çalışmalarında çok katmanlı devrenin veriminin artırılmasına öncelik verilebilir. İlk hedef olarak rectenna girişinde -10 dBm RF güç seviyesinde olduğunda çıkışta 50mV’den daha yüksek gerilimlerin elde edilebilir olması hedeflenen sonuçlar açısından önemli bir kriterdir.



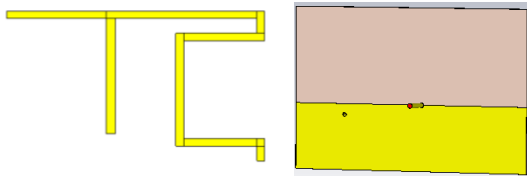
Şekil 8: Uyumlandırılmış devrenin geri dönüş kaybı

2.3. Alıcı Antenin Tasarımı

Mikroşerit iletim hatları ile yüksek kazançlı dizi antenler tasarlanarak, toplanan RF enerjinin miktarının artırılması ve Schottky diyotlar ile bu enerjinin doğrultularak düşük güçle iletilen uygulamalarda kullanımı konusunda literatürde detaylı çalışmalar bulunmaktadır. Doğrultucu devrenin hassasiyeti için, devredeki diyotların düşük RF sinyali algılaması ve ileri yönde de gerilimde daha az düşüşün olması gerekmektedir [5].

Çalışmalara, anten tasarımında önemli parametrelerin incelenmesiyle başlanmıştır. Bu parametreler, antenin giriş

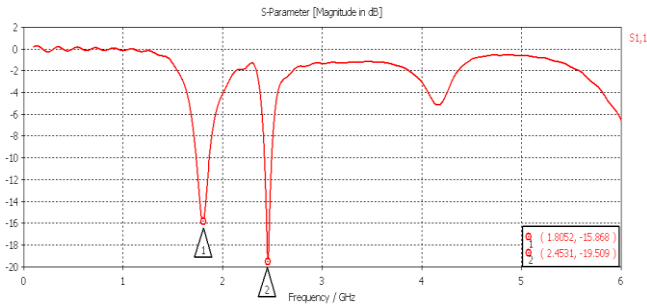
empedansı, etkin yüzeyi, duran dalga oranı, ışınma gücü ve direnci, polarizasyon, ışınma örüntüsü, yönlendiriciliği, kazanç faktörü ve demet genişliği başlıkları altında toplanmıştır[6,7].Teorik tasarımlar ve simülasyonlar, mikroşerit anten yapısında olduğu için mikroşerit anten parametreleri, besleme şekilleri de incelenmiştir.[8]'de anlatılan bu yöntemlere göre analizler yapılmıştır.Kullanılacak olan anten PIFA (Printed Inverted F-Antenna) olarak tasarlanmış olup, 1.8 GHz Sayısal Haberleşme Sistemleri (DCS) ve 2.4 GHz Kablosuz Lokal Alan Ağlarında (WLAN) kullanılan frekanslarda rezonans yapacak şekilde, malzeme uzunlukları referans alınarak tasarım çalışmaları yapılmıştır[9].Tasarımın bu şekilde seçilmesinin temel sebebi, PIFA antenlerinin diğer mikroşerit antenlere göre daha küçük ve taşınabilir uygulamalarda kullanılmasıdır. Devrenin mevcut geometrik konumu ve ortamda iyi bir şekilde konumlandırılması, sistem performansını doğrudan ya da dolaylı olarak etkileyen durumlardan biridir[6].Aşağıda bu kapsamda tasarımı yapılan çift bantlı antenin ön yüzden ve arka yüzden görünüşleri verilmiştir. Bu kapsamda S_{11} parametrelerine bağlı grafik çıktısı ve üç boyutlu ışınma örüntüsü verilmiştir. Bu sonuçlara göre yönlendiricilik ve kazanç değerleri belirlenebilir. Şekil 9'de doğrudan devre için tasarlanan anten devresinin ön ve arka yüzleri verilmiştir.



Şekil 9: Antenin görünümü(ön ve arka yüzlerden)

Antenin simülasyonu tamamlandıktan sonra, çözümlene frekansında S_{11} değeri her iki frekansta sırasıyla 1.8 GHz'de -15.9 dB ve 2.45 GHz'de de -19.5 dB olarak elde edilmiştir. Antenin 2.45 GHz de 1.8 GHz'e oranla yönlendiriciliğinin daha da arttığı görülmektedir. Ayrıca 2.45 GHz'de 2.97 dB, 1.8 GHz'de ise 1.67 dB kazanç elde edilmiştir. Antenin geri dönüş kaybı şekil 10'de gösterilmiştir[10].

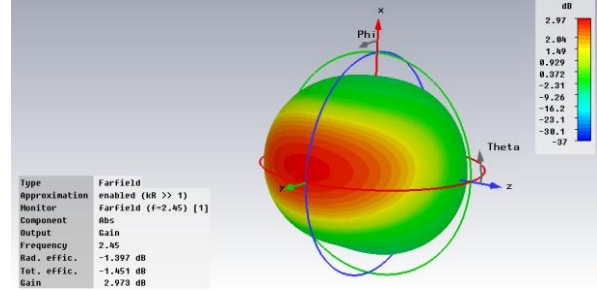
İlk durumda tasarlanan doğrultucularda çalışma frekansı 2.45 GHz olduğu için, antenin bu frekansta daha verimli çalışabilmesi için optimizasyonlar yapılmıştır. Anten üzerinde yapılan optimizasyon sonucunda elde edilen yeni geri dönüş kayıpları 2.40 GHz frekansında -35 dB, 1.8 GHz frekansında da -17.5 dB olduğu görülmüştür[10].



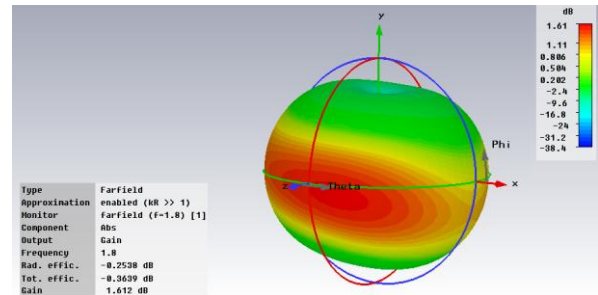
Şekil 10: Geri dönüş kaybı (S_{11})

Şekil 11 ve Şekil 12'deki ışınma örüntüleri incelendiğinde, antenin 2.4 GHz'de yönlendiriciliği daha yüksek olduğu görülmüştür.

Daha sonra anten, başka bir simülasyon/optimizasyon çalışmasında, 2.4 GHz frekansta verimliliği artırılarak, doğrultucu devre için daha uygun hâle getirilmiştir.



Şekil 11: Tasarlanan antenin 2450 MHz frekansında üç boyutlu ışınma örüntüsü



Şekil 12: Tasarlanan antenin 1800 MHz frekansında üç boyutlu ışınma örüntüsü

2.4. Alıcı Anten Tasarımı Simülasyon Sonuçları

Çift bantta tasarımı yapılan antenin geri dönüş kayıpları, kazancı ve yönlendiriciliği göz önüne alınarak doğrultucu devrenin çalışma frekansında daha iyi çalışabilmesi için optimizasyonlar yapılmış ve geri dönüş kaybı azaltılarak kazancı artırılmıştır. 2.4 GHz ISM bandında daha iyi bir performans gösteren mikrostrip PIFA anten, aynı zamanda 1.8 GHz GSM frekans bandında da rezonansa girerek çalışmakta ve çevreden topladığı RF sinyal yoğunluğu artmaktadır. Bu durumda doğrultulacak sinyal oranı artmakla beraber çıkıştan elde edilecek DC gerilim de orantılı olarak artmaktadır.

3. Sonuçlar

Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlara göre, çevrede mevcut ya da belirli bir kaynaklardan belirli frekanslarda yayılan elektromanyetik dalgaların doğrultulmasıyla, DC gerilimin elde edilebileceği görülmüştür. Bunun için yüksek kazancı ve çok bantlı anten tasarımı yapılmış, doğrultucu devrelerinin de belirlenen frekanslarda uyumlu çalışabilmesi ve devrenin çıkışından elde edilecek olan DC gerilimin artırılabilmesi için doğrultucu ve alıcı anten tarafında uyumlandırma çalışmaları yapılmıştır. Uyumlandırma tekniklerinde yaygın olarak kullanılan L-tipi empedans uyumlama devresi tasarlanmıştır.

Elde edilen optimum devre simülasyon sonuçlarına göre, örneğin lisanssız serbest ISM bandı olan 2.4 GHz’de, 0dBm RF giriş gücünün doğrultulması ile yaklaşık 0.6V’luk bir DC gerilim elde edilmiştir. Elde edilen bu DC potansiyel farkı, kapasitörlerde depolanarak ya da eş zamanlı olarak düşük güçle çalışan uygulamalar için besleme amaçlı kullanılabilir veya pil ömrü uzatılabilir. Bu şekilde RF/DC Enerji dönüşümü yapılarak, birçok düşük güçlü ortam sensörleri ile RFID, ZigBee, bluetooth, kablosuz sensör ağları gibi haberleşme modülleri besleme imkanı mevcuttur.

Sonuç olarak düşük güçlü elektronik ve haberleşme uygulamaları için bataryasız çalışmayı mümkün kılacak veya batarya ömrünü uzatabilecek bir modül tasarımı yapılmıştır. Benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında tatmin edici simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda bu simülasyon devrelerinin gerçekleştirilmesi ve farklı uygulamalarla kullanılabilir bir modül geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma 7140183 no’lu TEYDEB (Teknoloji ve Yenilik Destek Programları Başkanlığı) projesi kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmektedir.

4. Kaynaklar

- [1] ZoyaPopovic, “Cut the Cord,” *IEEE Microwave Magazine*, March-April 2013, p. 56-57
- [2] AlirioBoaventura, Ana Collado, Nuno Borges Carvalho and ApostolosGerorgiadis, “Optimum Behavior”, *IEEE Microwave Magazine*, March-April 2013, p. 27-28
- [3] Qi Xu, Zhaolong, Gao, Hao Wang, Jiping He, Zhi-Hong Mao and Mingui Sun, “Batteries Not Included”, *IEEE Microwave Magazine*, March-April 2013, p. 64-65
- [4] Brian W. Flynn and KyriakiFotopoulou , “Rectifying Loose Coils”, *IEEE Microwave Magazine*, March-April 2013
- [5] J. Michael Barcak and Hakan P. Partal, “Efficient RF energy harvesting by using multiband microstrip antenna arrays with multistage rectifiers”, *IEEE Subthreshold Microelectronics Conference (IEEE SubVt 2012)*, Waltham, MA, USA, October 09 - 12, 2012
- [6] H. Y. D. Yang, “Printed straight F antennas for WLAN and Bluetooth,” in Proc. IEEEAP-S Int. Symp., Jun. 2003, vol. 2, pp. 918-921.
- [7] M. Karaboikis, C. Soras, G. Tsachtsirisand V. Makios, “Compact dual-printed inverted-F antenna diversity systems for portable wireless devices,” *Antennas and Wireless Propag. Lett.*, vol. 3, pp. 9-14, 2004.
- [8] Y. L. Kuo, T. W. Chiouand K. L. Wong, “A novel dual-band printed inverted-F antenna,” *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 31, pp. 353-355, 2001.
- [9] C. Soras, M. Karaboikis, G. Tsachtsiris, and V. Makios, “Analysis and design of an inverted-F antenna printed on a PCMCIA card for the2.4 GHz ISM band”, *IEEE Antennasand Propag. Magazine*, vol. 44, pp.37-44, 2002.
- [10] M. Muhittin Maç, U. Binici, ”RF Enerji Toplayıcı Devre ve Sistemler”, Yıldız Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Haziran 12, 2014