

Mikrodalga ve Radyo Dalga Enerji Hasadı

Ali KURALAY; Emre ERTÜRK; Hakan YILDIRIM;

Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Bölümü, Erzurum Teknik Üniversitesi

Özet:

Son yıllarda, yenilenebilir enerjiye artan talep nedeniyle insan hayatını kolaylaştıran sistemlere ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Günümüz şartlarında telefon, tablet, sensör vb. bataryalı ya da bataryasız düşük güç tüketen cihazlar sürekli enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Bu ihtiyaçtan dolayı düşük güçlü alternatif enerji elde etme yolları popülerleşmiştir. Kullanılan pillerin ömrünü uzatmak ve enerjinin sürekliliği insanlık için gerekli bir ihtiyaca dönüşmüştür.

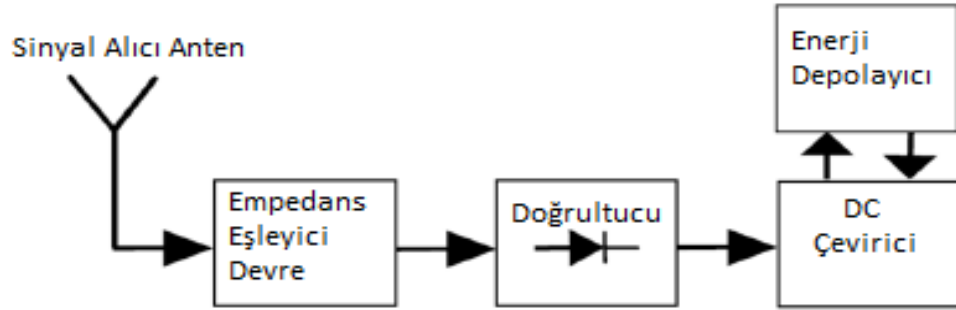
Enerji kaynağının düşük bakım maliyetli, uzun ömürlü ve sürekli olması kullanılan cihazlar ve insanların talebi doğrultusunda istenen en önemli kriterlerdendir. Bu yüzden şimdi ve gelecekte kullanılacak yöntemlerin en önemlilerinden biride radyo ve mikrodalga frekanslarından enerji hasat etmektir.

Enerji hasadı yapmak için bulunduğumuz ortamda serbest halde bulunan elektromanyetik dalganın enerjisi bir devre tasarımı yapılarak kullanılacak forma dönüştürülür. Dönüştürülen bu enerji kullanılacak miktarda ve verimlilikte olmalıdır. Hasat edici sistem ortamın şartlarına ve besleyeceği sistemin gücüne uygun olmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik dalgalar; Wireless; Enerji hasadı; Uyumlaştırılmış doğrultucu devre; UHF (Ultra yüksek frekans); VHF (Çok yüksek frekans);

1. Giriş

Bu projede bulunduğumuz ortamda serbest halde bulunan elektromanyetik dalgalardan enerji hasat edilmesine yönelik iki ayrı çalışma yapılmıştır. İlk olarak UHF (2.4 GHz- 2.5 GHz) bant genişliğinde bulunan elektromanyetik dalgalardan enerji hasadı için empedans uyumlaştırılmış doğrultucu devre tasarımı yapılmıştır ve bu devreye ait simülasyon sonuçları ayrıntılı olarak verilmiştir. İkincil olarak ise VHF (30-300 MHz) seviyelerinde bulunan radyo frekansından enerji hasat edilmesine yönelik devre tasarımı RLC devre elemanları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çevremizde bulunan elektromanyetik enerji düşük yoğunluğa sahiptir ve hasatlama verimliliği açısından yüksek verimli devre tasarımlarına ihtiyaç vardır. RF enerji hasatlama uygulamaları düşük güçle çalışan haberleşme sistemleri ile birlikte kullanılabilir ve bu sistemlerin batarya ömrünü uzatıp, çalışma performansını arttırabilir.



Şekil 1. Sistem tasarımı blok şeması

Elektromanyetik enerji hasadı için gerekli devrenin kısımları Şekil 1 de gösterildiği gibi; Talep edilen frekans bandına göre tasarlanmış bir anten, empedans uyumlama devresi, doğrultucu ve doğrultulan DC enerjinin depolanması için bir batarya ya da kondansatör kısımlarından oluşmaktadır.

$$(1) \eta_{verim} = \frac{P_{GIRIŞ}}{P_{RF_IN}} = \eta_{ANTEN}, \eta_{DOĞRULTUCU}, \eta_{UYUMLAMA}$$

(1) Anten, empedans eşleme ve doğrultucu devrenin verimliliği vardır. Alınan elektromanyetik dalgaların DC enerjiye dönüştürme seviyesi bu verimliliklere bağlıdır.

2. Materyal ve Yöntem

Materyal ve Yöntem

a) UHF (Ultra Yüksek Frekans) bant genişliğinde bulunan elektromanyetik dalgaları işlemek için devre tasarımı yapmak bazı zorlukları da beraberinde getirir. Ayrıca, yüksek frekanslı tasarımlarla çalışmak, bakır izlerinden kaynaklanan parazit indüktans, performans üzerinde istenmeyen etkilerden kaçınmak gerekmektedir. Doğrultucu devre tasarımı öncelikle hesaplama ve simülasyon yoluyla gerçekleştirilmelidir. Bu aşamada NI AWR Design Environment (<http://www.awrcorp.com/>) programı kullanılmıştır. NI AWR Design Environment programı, RF ve mikrodalga devre tasarımı için simülasyon ortamı sunmaktadır. Tasarımı gerçekleştirilen doğrultucu devrenin daha sonra PCB cihazından baskısı alınarak performansını değerlendirmek için test edilmesi gerekmektedir.

Materyal ve Yöntem

b) VHF (Çok Yüksek Frekans) 30 ile 300 MHz arasında bulunan radyo dalgalarına verilen genel isimdir. FM radyo yayını, mobil radyo sistemleri (acil durum, iş, özel kullanım ve askeri) ve televizyon yayıncılığı bu frekans bandını kullanır. Bunların dışında pek çok kullanım alanı vardır. 30 ile 300 MHz arasında bulunan radyo dalgalarından enerji hasadı yapılmasına yönelik gerilimi katlayan, Greinacher devresi adı da verilen bir doğrultucu devresi kullanılarak anten vasıtasıyla alınan frekans hem doğrultulmuş (AC-DC) hem de yükseltilmiş şekilde devre çıkışından alınmıştır.

FR-4 Mikroşerit Tabaka

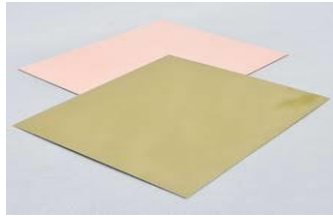
Tasarladığımız uyumlaştırılmış doğrultucu devremizi FR-4 adı verilen mikroşerit tabaka üzerine PCB cihazını kullanarak baskı devresini alıp tasarımımızı tamamlamış olduk. Bu mikroşerit tabakanın değerlerinin ilk olarak programa tanımlanması gerçekleştirilir. Çünkü kullanacağımız tabakanın değerleri empedans uyumlamasında etkili olduğundan programda değerlerin tanıtılıp daha sonra devremizi tasarlayıp NI AWR Design Environment programı yardımıyla simülasyon yaparak empedans uyumlaması gerçekleştirildi.

Schottky Diyot: (HSMS-2850)

Schottky tip diyotların eşik gerilimleri sıradan silisyum diyotlardan daha düşüktür. Örneğin tipik bir silisyum diyot 0.6V-0.7V eşik gerilimine sahiptir, fakat Schottky diyotlar 0.15V kadar düşük seviyelerde ilettime geçebilirler. Bu özelliklerinden dolayı tasarımımızda Schottky diyot kullanılmıştır.

SMA Dişi Konnektör

Tasarımı gerçekleştirilen devre tek girişi olan yani tek kapılı devredir ve bu kapıya anten takmak için dişi konnektör kullanılmıştır.



Şekil 2. FR-4 Mikroşerit tabaka

Şekil 3. Schottky diyot

Şekil 4. Konnektör

3. Analizler

Analiz

a) Bu bölümde 2.4 ile 2.5 GHz bant genişliğinde bulunan elektromanyetik dalgalardan enerji hasat edilmesine ilişkin analizlere yer verilmiştir.

Levha kalınlığı, bakır kalınlığı, alt tabaka geçirgenliği ve iz genişliğine göre belirlenen bakır izlerin karakteristik empedansı da tasarım amaçları için kullanılmalıdır. Bu, yüksek frekanslarda her bir izin bir iletim hattı olarak ele alınması gerektiğinden kaynaklanır. İstenilen PCB alt tabakası, uygun tasarımına olanak sağlamak için tasarım sürecinin başında seçilmelidir. Bir mikroşerit iletim hattının karakteristik empedansını hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılabilir:

$$(2) Z_{MİKROŞERİT} = \frac{Z_0}{2\pi\sqrt{2(1+\epsilon_r)}} \ln\left(1 + \frac{4h}{w_{eff}} \left[\frac{14 + \frac{8}{\epsilon_r}}{11} \frac{4h}{w_{eff}} + \sqrt{\left(\frac{14 + \frac{8}{\epsilon_r}}{11} \frac{4h}{w_{eff}}\right)^2 + \pi^2 \frac{1 + \frac{1}{\epsilon_r}}{2}} \right]\right)$$

Burada $Z_{mikroşerit}$ iletim hattının karakteristik empedansıdır, Z_0 boş alanın empedansıdır, ϵ_r boş alanın görelî geçirgenliği, h alt tabakanın kalınlığıdır ve w_{eff} aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$(3) w_{eff} = w + t \frac{1 + \frac{1}{\epsilon_r}}{2\pi} \ln \frac{4e}{\sqrt{\left(\frac{t}{h}\right)^2 + \left[\frac{1}{\pi} \frac{1}{\frac{w}{t} + \frac{11}{10}}\right]^2}}$$

w iz genişliğidir, h alt tabakanın kalınlığıdır ve t iletken kalınlığıdır (H. Wheeler). Yukarıda belirtilen denklemlerden yararlanarak tasarımcı, alt tabaka özellikleriyle bağlantılı olarak kullanılan, bu empedansı elde etmek için gerekli iz genişliğini hesaplayabilen istenen bir karakteristik empedansı seçebilir. Alternatif olarak, tasarımcı bileşen boyutu veya parazit indüktans hesaplamalarına göre istenilen iz genişliği seçebilir ve bu değeri, anten ve filtreleme devrelerinin tasarımında kullanılabilen mikroşerit iletim hattının karakteristik empedansını hesaplamak için kullanabilir (S.W. Ali 2016).

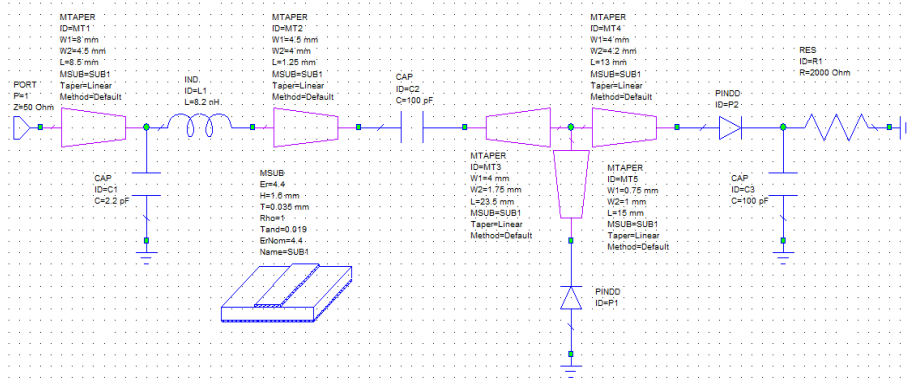
Bakır izlerinden kaynaklanan parazitik endüktans, tasarımcının PCB düzenini gerçekleştirirken dikkat etmesi gereken bir diğer unsurdur. İletkenler doğası gereği endüktif bileşenlerdir ve bu indüktörlerden kaynaklanan reaktans, sinyalin frekansı arttıkça artar. Bir mikroşeritin yaklaşık endüktansını hesaplamak için kullanılan ortak bir denklem aşağıdaki gibi verilir:

$$(4) L_{MİKROŞERİT} = 0.0002 * L \left[\ln \left(\frac{2L}{W+H} \right) + 0.2235 * \left(\frac{W+H}{L} \right) + 0.5 \right] \mu H$$

L mikroşerit uzunluğudur, W genişliğidir ve H yüksekliktir. Bu basit bir yaklaşım olsa da, bir PCB üzerindeki parazitik indüktansı azaltmak için en iyi yöntemlerin başında gelir. Parazitik indüktansı azaltmak için birincil yöntem, parçaların titizlikle yerleştirilmesini gerektiren izlerin uzunluğunu mümkün olduğunca azaltmaktır. İz uzunluğu en aza indirildiğinde, parazitleri daha da azaltmak için iz genişliği artırılabilir. Ne yazık ki, artan iz genişliği de mikroşeritin karakteristik empedansını değiştirecek ve böylece tasarımda ek değişikliklere neden olacaktır (H. Wheeler 2011, S.W. Ali 2016, H. Zumbahlen 2008).

Doğrultucu Devre

Yapılan kapsamlı araştırmalar neticesinde schottky diyot kullanılan doğrultucu devre modellerinin yaygın olarak kullanıldığı gözlemlenmiştir. Schottky diyotlar normal diyotun n ve p maddelerinin birleşim yüzeyinin altın, gümüş veya platinle kaplanmasından meydana gelmiştir. Birleşim yüzeyi platinle kaplanarak ortadaki nötr bölge inceltmiş ve akımın nötr bölgeyi aşması kolaylaştırılmıştır. Normal diyotlar 0.6–1.7 volt arasında iletme geçerken schottky diyotlar 0.15–0.45 volt arasında iletme geçmektedirler. Hızlı tepki vermesinden dolayı yüksek frekans devrelerinde tercih edilmektedirler. Tasarımı yapılan devrenin yüksek verimli ve daha az kayıpla çalışabilmesi için devre modeline uygun düşük yüzey kayıpları ve hassasiyeti dikkate alınarak Schottky diyot seçimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. Empedans uyumlaması yapılmış doğrultucu devre

Analiz

b) Bu bölümde ise VHF (30-300 MHz) seviyelerinde bulunan radyo frekansından enerji hasat edilmesine yönelik analizlere yer verilmiştir.

Şekil 6, Greinacher devresini göstermektedir. Giriş voltajı negatif olduğunda, D1 diyotu açılır, D2 kesilir, giriş voltajı C1 kondansatörünü şarj eder. Daha sonra kapasitörün C1 çıkış voltajı aşağıdaki gibi verilir

$$(5) \quad V_{c1} = V_{in} - V_{th}$$

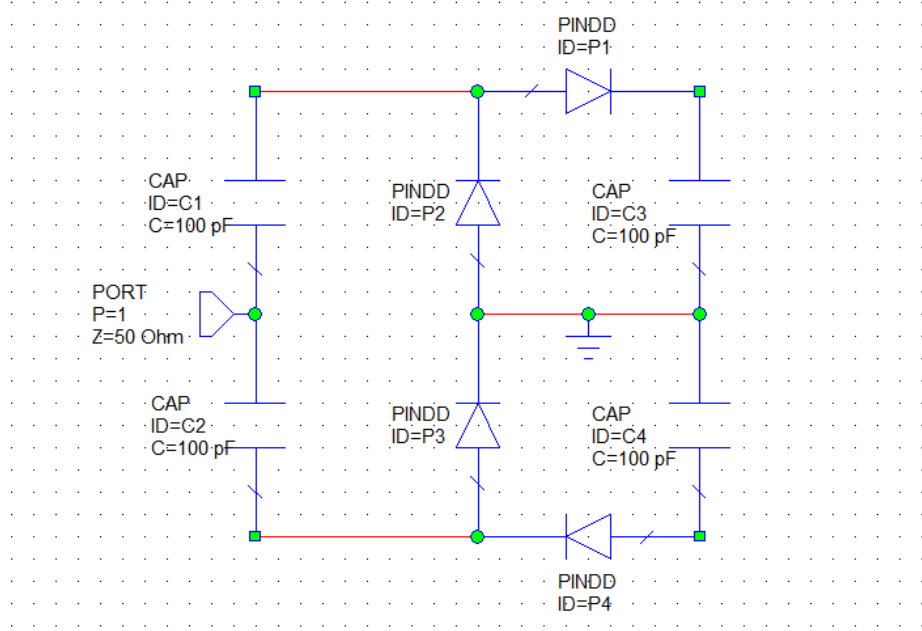
V_{in} , giriş voltajı genliği ve V_{th} diyotların ileri iletim voltajıdır.

Giriş voltajı pozitif olduğunda, D2 diyotu açılır, D1 kesilir, giriş gerilimi kapasitörü C1'i şarj eder. Daha sonra kondansatör C2'nin çıkış voltajı aşağıdaki gibi verilir

$$(6) \quad V_{c2} = 2V_{in} - 2V_{th}$$

Diyot yaklaşık olarak ön gerilimsiz olduğundan, V_{th} yaklaşık sıfıra eşit olabilir. Daha sonra kondansatör C2'nin çıkış voltajı aşağıdaki gibidir

$$(7) \quad V_{c2} = 2V_{in}$$



Şekil 6. Greinacher doğrultucu devresi

Şekil 6'ya göre aşağıdaki denklem elde edilir

$$(8) \quad V_{c4} = -2V_{in}$$

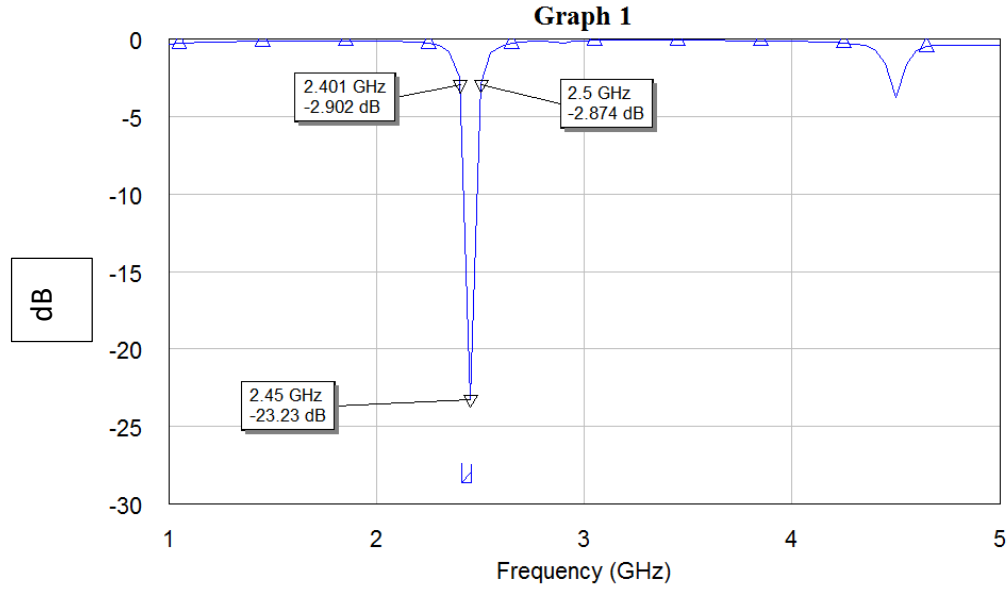
Bu nedenle Greinacher doğrultucu devresinin çıkış voltajı aşağıdaki gibi verilir

$$(9) \quad U_0 = V_{c2} - V_{c4} = 4V_{in}$$

Denklem 9'dan, Greinacher doğrultucunun çıkış voltajının giriş voltajının dört katı olduğu gösterilebilir. Greinacher doğrultucunun verimi, tek diyot doğrultuculara oranla daha yüksektir.

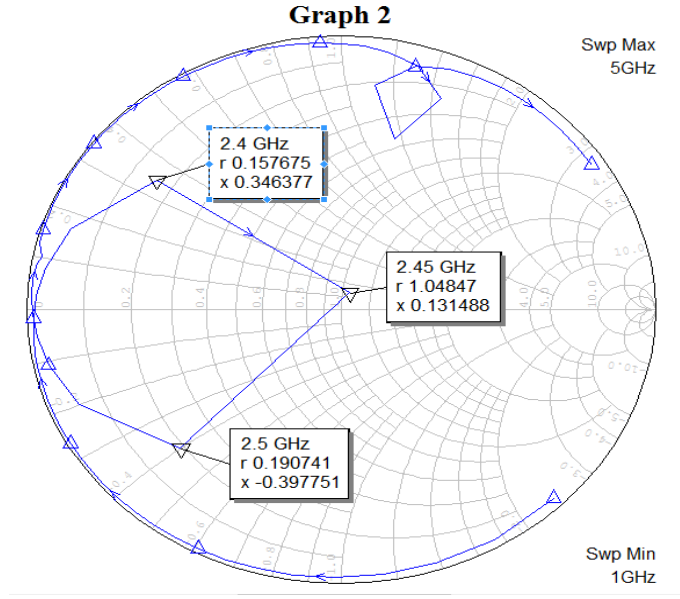
4. Araştırma bulguları

Uyumlama devresi tasarlanmış, bu uyumlama devresi (L Tipi) doğrultucu devreye eklenmiş (şekil 2) ve geri dönüş kayıplarını da içeren simülasyon sonuçları şekil 3 de verilmiştir. Simülasyon sonuçları incelendiğinde geri yansımanın az olup, yüksek genlikteki RF sinyalinin doğrultulduğu görülmüştür. Şekil 3 de elde edilen sonuçlar incelendiğinde, geri yansıma kayıplarının, (S11) kullanılan frekans bantları aralığında -10dB'den daha az olması ilk tasarım için ideal sonuçların alındığını göstermektedir.



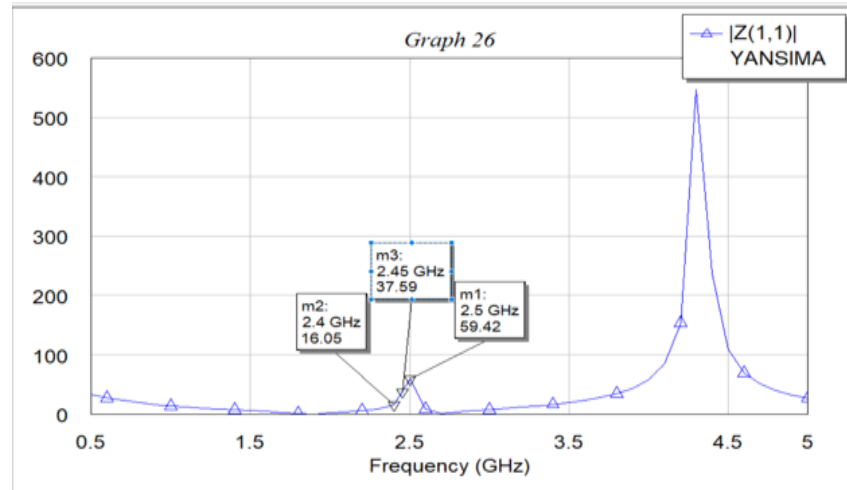
Şekil 6. Tasarımı yapılan devrenin yansıma grafiği

Smith Chart grafiği kullanılarak empedans uyumlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Yaptığımız uyumlama çalışmalarında, kullanılacak antenin empedans değerinin 50Ω olmasından dolayı tasarımı yapılan doğrultucu devresinin de 50Ω 'luk empedans değerine sahip olması gerekir. Empedans uyumunun sağlanması maksimum güç transferinin gerçekleştirilmesine olanak sağlar.



Şekil 7.Smith chart grafiği

Devrenin toplam empedansının 50Ω yapılmaya çalışılmasının sebebi devrenin girişinde bulunan anten empedansının 50Ω olmasıdır. Çeşitli simülasyonlar sonucunda devrenin toplam empedansını 50Ω yapmaya çalışıldı. Aşağıdaki empedans grafiğinde de görüldüğü üzere 50Ω 'a yakın değerler elde etmiş olduk. Elde etmiş olduğumuz değer 2.45 Ghz'de 38Ω , 2.5 Ghz'de 59Ω olarak elde edilmiştir. 2.4 Ghz-2.5 Ghz band genişliğinde elde etmiş olduğumuz değerler kabul edilebilir değerler olup, devremizin verimi için yeterli olacaktır.



Şekil 8.Empedans grafiği

Sonuçlar

Sonuç a.) Bu bölümde 2.4 ile 2.5 GHz bant genişliğinde bulunan elektromanyetik dalgalardan enerji hasat edilmesine ilişkin sonuçlara yer verilmiştir.

Elde edilen sonuçlar neticesinde belirli frekans bandında yayılan elektromanyetik dalgaların doğrultulmasıyla, DC gerilimin elde edilebileceği görülmüştür. Doğrultucu devrenin belirlenen frekanslarda uyumlu çalışabilmesi ve devrenin çıkışından alınan DC gerilimi arttırabilmek için empedans uyumlama çalışmaları yapılmıştır. Projemizde L tipi uyumlama devresi tasarlanmıştır. Anten ve doğrultucu devre arasına geri dönüş kayıplarını en aza indirmek için geliştirilmiş empedans uyumlama devresi kullanılmıştır. RF devre tasarımı tamamlandıktan sonra devrenin PCB'den baskı devresi alınırken bakır izlerden kaynaklanan parazitlerin etkileri en aza indirilmeli ve RF bandına uyumlu devre tasarlanmalıdır. Anten ile uyumlaştırılmış doğrultucu devre arasındaki empedans uyumu güç transferini maksimuma çıkaracak ve tasarımın genel performansını arttıracaktır. Sonuç olarak bakır izlerden kaynaklanan parazitik etkiler simülasyon sonuçlarında elde edilen değerleri pratikte bozarak verimli bir DC gerilim elde edilmesini engellemiştir ve 0.232 milivolt'luk bir DC gerilim elde edilmiştir. Hem ticari hem de endüstriyel ortamlarda düşük güç uygulamaları için kablosuz çözümlere duyulan ihtiyaç arttıkça, RF enerji hasadı konusundaki araştırmalara devam edilmelidir. Sonuç olarak telefonların ve düşük güçle çalışan cihazların batarya ömrünü uzatabilecek modül tasarımı için alt zemin hazırlanmıştır. Projemizde yapmış olduğumuz uyumlaştırılmış devre tasarımının simülasyon sonuçları kabul edilebilir düzeyde olup, devrenin PCB baskısı alındıktan sonra network analizörle test edildiğinde simülasyon sonuçlarıyla aynı değerler elde edilememiştir. Bunun nedeni ise PCB cihazından baskı devre alınırken bakır izlerden kaynaklanan parazitik etkilerdir.

Sonuç b.) Bu bölümde ise VHF (30-300 MHz) seviyelerinde bulunan radyo frekansından enerji hasat edilmesine yönelik sonuçlara yer verilmiştir.

VHF seviyesi için kullanılan gerilim katlamalı Greinacher devresinin çıkışından, girişin dört katı kadar gerilim alınacak şekilde tasarlandı. Bunun sonucunda devrenin DC çıkışından okunan değer değişken olmakla beraber $2.5 V_{DC}$ seviyesinde olduğu gözlemlendi. Bu değer kırmızı bir ledi yaktıktan 0.5 saniye sonra kondansatörlerini boşaltıyor ve gerilim seviyesi 1.2-1.4 V_{DC} seviyesine düşüyor. Bu seviyenin altına düşmemesinin nedeni ledin eşik gerilimidir. Belirli bir seviye altındaki gerilimlerde ledler yanmazlar ve bu yüzden enerji harcamazlar. Ledler söndükten sonra kondansatörler antenden gelen AC gerilimi yeniden DC'ye çevirip depolar ve dört saniye sonra yeniden bir ledi yakabilecek kadar şarj olurlar. Sistemin bu şekilde çalışabilmesi için Greinacher devresi ile ledin arasına seri bir switch konuldu bu sayede kondansatörlerin tamamen dolması sağlanıp ledin yanmasını gözle görülür bir hale getirilebildi. UHF seviyesindeki FR4 tabakalı mikroşerit devre için gerekli tasarım ve optimizasyonlar yapıldı ve simulasyonda tatmin edici sonuçlar alındı fakat çalışmalarımızın yarısında PCB makinasının arıza vermesinden dolayı UHF seviyesindeki devre çalışmalarımız yarıda kaldı.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, bir yıl boyunca değerli bilgilerini bizlerle paylaşan, kullandığı her kelimenin hayatımıza kattığı önemini asla unutmayacağımız saygıdeğer danışman hocamız; Yrd.Doç.Dr.Fatih KABURCUK'a, bölüm başkanımız sayın Prof.Dr.Bülent ÇAKMAK'a, Yrd.Doç.Dr.Çağlar DUMAN'a ve kısıtlı vaktinden bize zaman ayıran Araştırma Görevlisi Hilal KOÇ'a ve değerli bilgileriyle bizlere ışık tutan Erzurum Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölüm hocalarımıza sonsuz teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynaklar

- H. Wheeler (2011)., “Transmission-Line Properties of Parallel Strips Separated by a Dielectric Sheet,” IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques IEEE Trans. Microwave,
- S.W. Ali (2016). “Critical guidelines for RF and microwave PCB Design,” Embedded,
- H. Zumbahlen (2008). , “Printed Circuit Board (PCB) Design Issues,” in Linear circuit Design Handbook, Newnes: 2008, ch. 12,
- ZoyaPopovic (2013). , “Cut the Cord,” IEEE Microwave Magazine, March-April 2013, p. 56-57
- İstanbul Teknik Üniversitesi(2009). , Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009 RF ENERJİ HARVESTİNG
- Harry Ostaffe (2009). , “RF Energy Harvesting Enables Wireless Sensor Networks”, Sensors Mag, October 2009
- J. Record (2011). , “RF Energy Harvesting Circuits,” University of Maine, 2011,
- E. Khansalee (2010). , et. al, “A Dual-Band Rectifier for RF Energy Harvesting,” Engineering Journal, vol. 19, issue 5, ISSN 0125-8218
- RF Enerji Toplayıcı Devre Tasarımı ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ODASI
- D. Bouchouicha (2010)., F. Dupont, M. Latrach, L.Ventura, “AmbientRF Energy Harvesting," International Conference on RenewableEnergies and Power Quality (ICREPQ'10), March, 2010
- T. Paing (2009). ,. E. Falkenstein, R. Zane, and Z. Popovic,, “Custom IC for Ultra-low Power RF Energy Harvesting," IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC 2009), p 1239-1245, 2009.
- S.W. Arms (2005). , C.P. Townsend, D.L. Churchill, J.H. Galbreath, S.W. Mundell, “Power Management for Energy Harvesting Wireless Sensors”, SPIE Int'l Symposium on Smart Structures & Smart Materials, March 2005.

M. T. Penella Lopez (2010). , Methods and Circuits for the Efficient Management of Power and Energy in Autonomous Sensors, Doctorate Thesis, University Polytechnic of Cat- alunya, 2010