



## RF ENERJİ HASATLAMA SİSTEMLERİ İÇİN ÇİFT BANDLI GREINACHER DOĞRULTUCU DEVRE TASARIMI

Mehmet Ali BELEN\*

Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Artvin, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

*RF Enerji Hasatlama,  
Kablosuz Enerji Transferi,  
Greinacher Doğrultucu,  
Rectenna,  
HSMS2850,*

### Özet

Enerji hasatlama sistemleri günümüzde yeni bir enerji kaynağı olarak adlandırılmakta ve ortamda bulunan mevcut elektromanyetik enerjinin kullanılmasını hedeflemektedir. Enerji hasatlama sistemleri, düşük güç tüketimine sahip cihazlar için etkili bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Bu sistemlerinin temel amacı, düşük güç tüketimine sahip haberleşme sistemleri (ZigBee teknolojileri ve Kablosuz sensör ağları) ile birlikte kullanılıp batarya ömrünü uzatmaktır. Bu sistemlerin temel bileşenleri şunlardır: (1) minyatür anten ve (2) yüksek verimli doğrultucu devresi. Birinci bileşen ortamdaki RF dalgalarını toplarken, ikincisi ise toplanan RF enerjisini doğrultarak DC'ye çevirir. Bu çalışmada 2.4GHz ve 2.7GHz frekanslarında çalışan çift bandlı Greinacher doğrultucu devre tasarımı önerilmiştir. Uyumlandırma katında L-C ve mikroşerit stub yapıları kullanılmıştır. Greinacher doğrultucu devresinin simetrik yapısı, diyotlar tarafından üretilen harmoniğin azalmasına yardımcı olmaktadır. Yapılan simülasyon sonuçlarına göre, 10dBm giriş gücüne karşılık çıkışta 100 Kohm'luk yük direncinde 4,02V'luk bir DC gerilim elde edilmiştir. 0dBm'lik giriş gücünde ise LTE frekansında 100ohm ile 100Kohm arasında değişen yük dirençlerinde -5 ile -15dBm arasında güç değerleri elde edilmiştir. Tasarımlar ve spesifikasyonları AWR yazılımında yapılan benzetimler ile elde edilmiştir. Doğrultucudan elde edilen DC gerilim kullanılarak düşük güç tüketimine sahip sensörler ve sensör ağları beslenebilir ya da DC gerilim depolanarak pil ömrü uzatılabilir.

## DUAL BAND GREINACHER RECTIFIER CIRCUIT DESIGN FOR ENERGY HARVESTING SYSTEMS

### Keywords

*RF Energy Harvesting,  
Wireless Energy Transfer,  
Greinacher Rectifier,  
Rectenna,  
HSMS2850,*

### Abstract

Nowadays, the RF energy harvester systems can be named as one of the novel energy source which aims to use the electromagnetic energy in environment. Harvester systems are seen as an effective solution method for low power consumption circuits. These systems can be used with low power consumption communication system (ZigBee and wireless sensors) to extend the battery life. These systems are consist of: (a) a miniaturized antenna, (b) a high performance rectifier circuit. The first component gathers the RF signals in environment while the second component rectifies the signals to a DC current. Herein, design of a dual band Greinacher rectifier circuit for 2.4 and 2.7 GHz applications is studied. L-C type circuits and microstrip stub structures are used for matching layer. The symmetrical structure of Greinacher rectifier provides reduction in harmonics of diodes. As it can be seen from simulation results, for an input power of 10 dBm a voltage of 4.02V DC voltage on a 100 Kohm load resistor, and for an input power of 0 dBm with a variable load resistor of 100-100K ohm -5~15 dBm is obtained. Designs and specifications were obtained by simulations performed in AWRsoftware. Thus, by

\* İlgili yazar / Corresponding author: mehmetalibelen@artvin.edu.tr +90-466-215-4650

using the DC voltage that is rectified by the RF harvester it is possible to supply low power sensors or extend the battery life of the systems.

### Alıntı / Cite

Belen M. A. (2018) RF Enerji Hasatlama Sistemleri İçin Çift Bandlı Greinacher Doğrultucu Devre Tasarımı, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(2), 348-353.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

M. A. Belen, 0000-0001-5588-9407

<b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b>	17.02.2018
<b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>	05.06.2018
<b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>	18.06.2018
<b>Yayın Tarihi / Published Date</b>	23.06.2018

## 1. Giriş

Radyo frekansı (RF) enerjisi, cep telefonları, el telsizleri, mobil baz istasyonları ve televizyon / radyo yayın istasyonları da dahil olmak üzere, milyarlarca radyo vericisinden yayınlanmaktadır (Paradiso, Starner, 2005). RF enerjisini ortamdan veya tahsis edilmiş kaynaklardan toplanması, düşük güçlü cihazların sürekli şarj edilmesini sağlayacak ve batarya ihtiyacını ortadan kaldıracaktır (Gilbert, Balouchi, 2008; Curty, Joehl, 2000). Ayrıca, şarj edilebilir ve atılabilir pillerin kullanım ömrünü uzatmak için batarya tabanlı cihazlar şarj edilebilir. Pilsiz cihazlar, isteğe bağlı olarak veya yeterli şarj biriktiginde çalışmak üzere tasarlanabilir. Her iki durumda da, cihazlar kablosuz enerji ile beslenerek konnektörlerden, kablolardan ve pil içeren panellerden arındırılır. Kablosuz güç iletiminde çevreci RF enerjisinin toplanması konusundaki yoğunlaşma, mobil baz istasyonları ve el cihazları gibi radyo vericilerinin ürettiği 'serbest' enerjinin kullanılmasıdır. RF vericileri, mobil aboneliklerin sayısı arttıkça artmaya devam edecektir (Rebello, 2010). Özellikle 1 milyar'a ulaşan geniş bant mobil aboneliklerinin artması ilgi çekicidir (Cheng, Chawathe, 2005). Ayrıca, dizüstü bilgisayarlar gibi kablosuz cihazların ve WiFi yönlendiricilerin sayısının da gün geçtikçe arttığını göz önünde bulundurulmalıdır. Zaten kentsel bazı ortamlarda tek bir konumdan onlarca WiFi vericisi algılayabilir (Cheng, Chawathe, 2005), kapalı alanda, kablosuz yerel ağ (WLAN veya basitçe WiFi) erişim noktalarında olduğu gibi, 100 mW'lık bir güç seviyesinde iletim yapan tipik bir WiFi yönlendiriciden enerji toplayabilirsiniz. Elbette, uzun mesafeli hasat için, mobil baz istasyonlarından ve yayın radyo kulelerinden RF enerjisinin pratik olarak hasat edilmesi için daha yüksek kazanımlara ihtiyaç vardır. Çünkü cep telefonları, RF enerjisini toplayacak geniş bir verici kaynağını temsil etmektedir ve kullanıcı sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Ortamdaki RF enerjisi, çok çeşitli düşük güçlü cihazları şarj etmek veya çalıştırmak için kullanılabilir. Yakın mesafeden (RF vericisine) bu enerji, küresel konumlandırma sistemi veya radio frekansı tanımlama (RFID) izleme etiketleri, giyilebilir medikal sensörler ve elektronik kitap okuyucuları ve kulaklıklar gibi tüketici

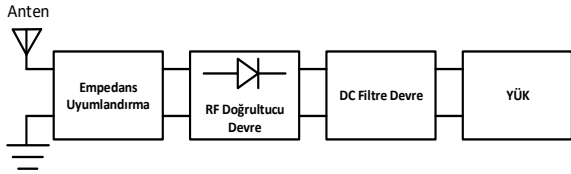
elektronikleri dâhil bir dizi cihazı şarj etmek için kullanılabilir. Cep telefonları, birtakım pilsiz kablosuz cihazlar için taşınabilir RF güç kaynakları olarak da kullanılabilir. Yani, cep telefonunu kullanırken, vücuda takılan sensörler, WiFi, Bluetooth veya ZigBee gibi yaygın olarak kullanılan protokoller aracılığıyla veri aktarımını etkinleştirmek üzere güçlendirilebilir. Aktarılan veriler daha sonra telefonda yerel olarak görüntülenebilir veya bir hastane veya bakım noktası servis sağlayıcısındaki uzaktan izleme servisine iletilebilir.

Ortamdaki RF enerjisini toplamak için araştırma çabaları 1990'lı yılların sonlarından beri hız kazandı. Bu ivmenin başlıca nedeni RF verici cihazların büyümesi ve düşük güç tüketen elektroniğin yaygınlaşmasıdır. Hagerty (Hagerty, Helmbrecht, 2006), önceki çalışmaları arasında çevre RF gücünü 2-18 GHz frekans aralığında hasat etmeye çalışan geniş bantlı bir anten dizisi sunmuştu. Ayrıca, 2009 yılında Intel Research Seattle, 960 kW'lık bir TV yayın istasyonunu kullanarak 4.1 km uzaklığa RF enerjisinin hasat edildiğini gösterdi (Sample, A., Smith, 2009). Powercast, 2005 yılında benzer bir çalışma gerçekleştirerek daha küçük bir güç (5 kW AM) radyo istasyonu (Ostafte, 2010) kullanarak 2,4 km uzaklıktan RF enerjisiyi başarılı bir şekilde hasatlamıştır. Bununla birlikte, bu sistemlerde yapılan ölçümler açık alanda alıcı vericinin görüş alanları açıkken yapılmış hasatlayıcı devrenin boyutu fiziksel olarak büyük, yüksek kazançlı anten kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Görüş alanının kısıtlanması RF sinyal seviyesinde düşmeye sebep olacaktır. Anten boyutunun minimize edilmeside kazancı düşüreceğinden yine elde edilebilecek gücün düşmesine sebep olacaktır.

Bu çalışmada ISM ve LTE bandlarının yoğun olarak kullanıldığı ortamlardaki düşük güç tüketimine sahip cihazlara yönelik 2.4GHz ve 2.7GHz frekanslarında çalışan çift bandlı greinacher doğrultucu devre tasarımı önerilmiştir. Böylece düşük güç tüketimine sahip haberleşme sistemleri için batarya sorununu çözecek bir yöntemdir. Tüketici elektroniği (mobil cihazlar) ve endüstriyel alanda (kablosuz sensör şebekeler, tıbbi ve askeri cihazlar) bir çok uygulamada kullanılabilir.

## 2. RF Enerji Hasatlayıcı Devre Tasarımı

RF enerji toplama sistemi, anten, empedans uyumlandırma, RF doğrultucu devresi, DC filtre devresi ve yükten oluşur. RF enerjisi anten tarafından alınır ve daha sonra alıcı sinyal alıcı anten ile RF sinyalini DC çıkış gücü haline dönüştüren RF doğrultucu devresi arasında eşleşecek şekilde kaynakçıkme tekniği ile tasarlanan empedans eşleştirmesi yoluyla gönderilir. DC çıkış gücü, Şekil 1'de gösterildiği gibi yüke göndermeden önce DC filtre devresi tarafından filtrelenir. Bu çalışmada, RF doğrultucu, empedans uyumlandırma ve 50 ohm girişi destekleyecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 1. RF Enerji Hassatlayıcı Blok Diagramı

### 2.1 Uyumlandırma Katı Tasarımı

Enerji toplama devresinin en önemli şartlarından biri ortamdaki alınan gücü anten tarafından doğrultucu devreye aktarmaktır. Bu kısımda anten ile doğrultucu devre kısmında empedans uyumsuzlukları meydana gelebilir bunun en önemli nedeni diyotun doğrusal olmayan çalışma karakteristiğidir. Bu durumda, devrenin performansı doğrultucu ve anten arasında uyumlandırma katının devreye sokulmasıyla kontrol edilebilir. RF sinyal girişinde uyumlandırma sağlanmadığında, bir miktar enerji yansır, bu yansıyan güç, çıkış voltajında azalmaya yol açar, kaynak ve yük arasındaki iletim hattında duran dalgalar oluşturur. Uygun uyumlandırma, uygun uyumlandırma topolojisi ve bileşen değerleri seçimi ile mümkündür. Uyumlandırma katındaki ufak bir değişiklik, enerji dönüşümünün etkinliğinin maksimum olduğu frekans aralığını büyük ölçüde değiştirir. Bu çalışma kapsamında L-C ve mikroşerit stublar kullanılarak uyumlandırma sağlanmıştır.

### 2.2 Schottky Diyot Seçimi

RF enerjileri genellikle düşük güç alanlarından olduğundan, bu bölgedeki sinyallerin tepe voltajı doğrultucu diyotun açılma geriliminden (H. Yan, J. G. M. Montero, 2005) çok daha küçüktür. Bu gereksinimi karşılamak için çok düşük voltaj gerilimi ve yüksek anahtarlama hızı gereklidir. Düşük gerilim düşüşünden dolayı, ısı olarak daha az enerji harcanır ve verimlilik açısından hassas uygulamalar için en verimli seçimdir. Schottky diyot düşük ileri gerilimi ve yüksek anahtarlama hızı sunar ve RF enerji toplama için ideal bir bileşen olarak düşünülür. RFID uygulamalarında schottky diyot doğrultucu devreleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Schottky diyot girişine uygulanan RF dalgalar doğrultularak DC'ye doğrultulmaktadır. RF enerji hasatlama uygulamaları

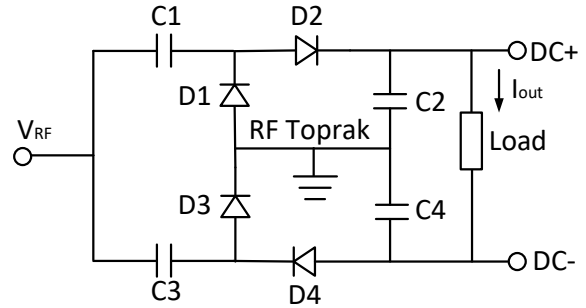
için kullanılacak schottky diyotlar düşük barrierli olmalıdır. Doğru diyot seçimi ile yüksek hassasiyetli, yüksek verimli ve az kayıplı doğrultma gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada 2.4GHz ve 2.7GHz frekanslarında çalışacak toplu (lumped) elemanlar ile HSMS2850 (düşük yüzey kayıplı) schottky diyot modeli kullanılarak greinacher doğrultucu devre tasarımı önerilmiştir.

### 2.3 Yük Empedansı Seçimi

Her elektronik cihazın belirli bir aralıktaki yük empedansı üzerinde çalışması için standart bir şartı vardır, bu belirli aralığın altında ve üstünde cihaz performansı düşecektir. Enerji toplama devreleri, kademelerin sayısına, doğrusal olmayan cihazın tipine ve reaktif bileşenin seçimine göre değişen belirli bir yük empedansı aralığına sahiptir. Bu nedenle, yük empedansı aralığının seçimini ve devre performansı üzerindeki etkisini doğrulamak önemlidir. Bu çalışmada doğrultucu devresini, hattın yük empedansı değişimine göre performansı incelenmiştir.

### 2.4 Doğrultucu Tasarımı

Kablosuz yerel ağ (WLAN veya basitçe WiFi) erişim noktalarında, 100 mW'lık bir güç seviyesinde iletim yapan tipik bir WiFi yönlendiriciden enerji toplayabilirsiniz. Elbette, uzun mesafeli hasat için, mobil baz istasyonlarından ve yayın radyo kulelerinden RF enerjisinin pratik olarak hasat edilmesi için daha yüksek güç kazançlarına ihtiyaç vardır. Bu amaca yönelik olarak, tek kademeli tam dalga greinacher doğrultucunun (Curty, Joehl, 2000; Olgun, Chen, 2012' den) modifiye edilmiş bir versiyonunu Şekil 2'de gösterilmiştir.



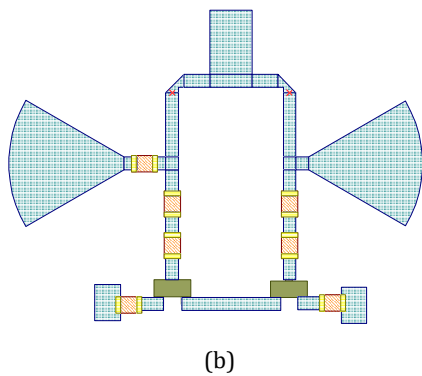
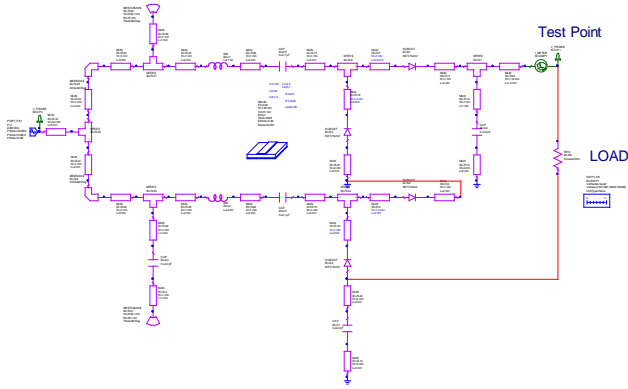
Şekil 2. Greinacher Tek Katlı Tam Dalga Doğrultucu

Şekil 2'de görüldüğü üzere D1, D2, D3 ve D4, zero-bias low-barrier Schottky diyotlarıdır, ortamdaki RF gücü düşük seviyelerde olmasına rağmen daha yüksek çıkış gerilimi anlamına gelir. Bu diyotlar ayrıca doyunluk derecesi yüksek bir akıma sahiptir, bu nedenle ek önerilmeye gerek duymazlar. Birkaç mikroamperlik bias akımının ile çalışmaktadırlar. Şekil 2'de önerilen doğrultucu konfigürasyonunun tek dezavantajı ortaya çıkan daha yüksek seri dirençtir. Birincisi, eşleşen devrenin çıkışındaki indüklenmiş voltaj, DC bloklama kapasitörlerinden (C1 ve C3) geçer. Doğrulanmış akım çıkışı daha sonra depolama kapasitörlerine pompalanır (C2 ve C4). Bu kapasitörlerde depolanan enerji doğrultucu düzgün durumuna ulaştığında, DC gücü yüke besler. Diğer doğrultucu devrelerle

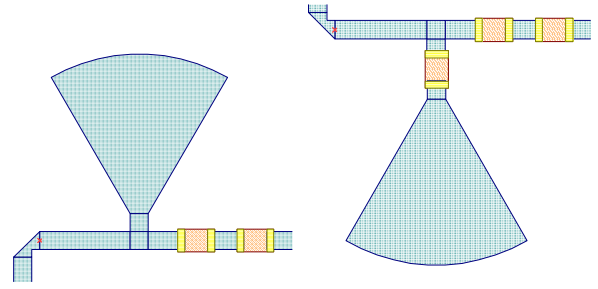
(Dickson veya Villard gibi) kıyasla, önerilen Greinacher doğrultucu simetriktir. Bu nedenle, her doğrultucu diyot, aynı giriş gücü ile harekete geçirilir. Buna ek olarak, bu simetrik yapı diyotlar tarafından üretilen harmonik içeriğin azaltılmasına yardımcı olur (hatta harmonikler birbirini iptal eder) (Olgun,Chen, 2012)[11].

RF hasat devresinin empedans uydurma aşaması, antenin doğrultucu devresine maksimum güç aktarımında kritik önem taşır. Bununla birlikte, uyumlandırma tasarımı zor olmaktadır çünkü doğrultucu diyotlar frekans, giriş gücü seviyesi ve yük direnci ile değişen karmaşık empedanslara sahip doğrusal olmayan elemanlardır. Bu nedenle sistem gereksinimleri belirlenerek en uygun uyumlandırma performansı için, bahsettiğimiz parametreler tasarımından önce belirlenmelidir.

Bu çalışmadaki RF enerji hasatlayıcı çalışma frekansları 2.4GHz (ISM) ve 2.7GHz (LTE) frekanslarını kapsamaktadır. Ayrıca, tasarım için yük direnci, 1kohm-10kohm ve 100kohm değişken yükleri için 10dBm- -30dBm giriş gücünde çıkış voltajları incelenmiştir. Şekil 3'te uyumlandırılmış devrenin şematığı ve baskı devre gösterimi verilmiştir.

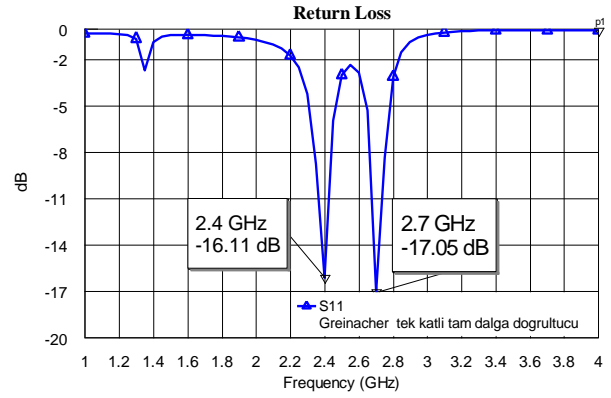


Şekil 3. Greinacher Tek Katlı Tam Dalga Doğrultucusu (a) Şematik ve (b) Baskı Devre Gösterimi



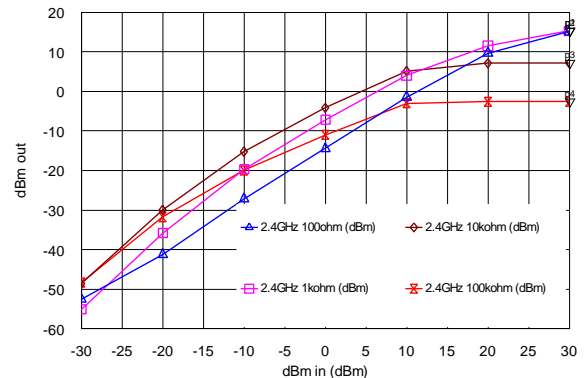
Şekil 4.: 2.4GHz Uyumlandırma Katı, 2.7GHz Uyumlandırma Katı

Şekil 4'teki devre yapısında uyumlama devresi tasarlanmıştır, bu uyumlama devresi L-C ve mikroserit stub elemanlarını kapsamaktadır. Şekil 5'te devreye ait geridönüş (S11) kaybı gösterilmiştir. Kullanılan frekans bandı aralığında -10dB den daha az olduğu ve bu seviyenin geriyanısına kaybı için kabul edilebilir seviyede olduğu sanucuna varılmıştır.

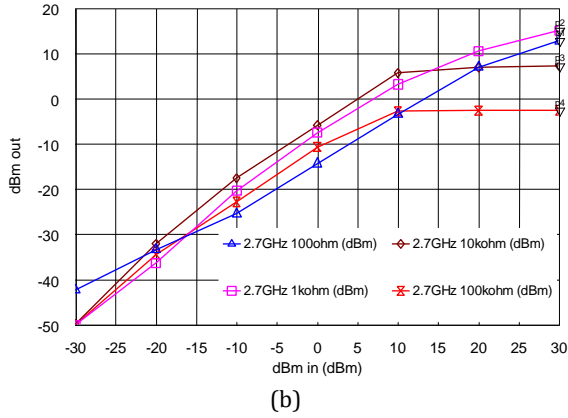


Şekil 5. Uyumlandırılmış tek katlı devrenin geri dönüş kaybı

Şekil 6'da çift bandlı doğrultucu devrenin girişine 30dBm ile -30dBm arasında RF sinyal uygulanmıştır, 2.4GHz ile 2.7GHz arasında çıkış yükü ise 100ohm ile 100Kohm arasında değiştirilerek çıkış gücü ölçülmüştür.



(a)



**Şekil 6.** 100 ohm ile 10Kohm arasında Giriş gücüne göre çıkış gücü (a)2.4GHz, (b) 2.7GHz

Tablo 1’de HSMS 2850 diyotlu Greinacher doğrultucu devre tasarımı üç farklı yük direnci için elde edilebilecek DC gerilim seviyesi verilmiştir. -30dBm ile +10dBm arasında RF giriş uygulanarak çıkış gerilimi elde edilmiştir.

**Tablo 1.** RF Giriş gücü – DC Çıkış gerilim ( $P_{IN}$ - $V_{OUT}$ ) Tablosu

Giriş RF Gücü (dBm)	Vout (mV) (DC)		
	1Kohm	10Kohm	100Kohm
-30	16	22	36
-20	69	124	214
-10	115	404	682
0	182	1100	1750
10	327	2959	4023

Tablo 2’de tasarlanan doğrultucu devrenin performansı literatürdeki çalışmalarla kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, greinacher doğrultucu devre tasarımı ile düşük empedans seçiminde veriminin daha yüksek, yüksek empedans seçiminde ise çıkış geriliminin arttığı gözlenmiştir. Bu konuda yapılacak iyileştirme çalışmalarında kullanılacak sistem yükünün belirlenerek devrenin verimi artırılabilir.

**Tablo 2.** Doğrultucu Performans Karşılaştırması

Kaynak	Bu Çalışmada	(Papotto, Carrara, 2011)	(Le, Mayaram, 2008)
$f$ (GHz)	2.4	0.9	0.91
$P_{RF}$ (dBm)	-10	-22	-15
$V_{rec}$ (V)	0.17	1	2.8
Kademe	1	17	16
Teknoloji	HSMS 2850	CMOS 90um	CMOS 150um

#### 4. Sonuçlar

Yapılan çalışmada, yüksek frekanslı çift bant doğrultma devresi önerilmiştir ve güç spektrumu incelemesine dayalı ortamdaki RF enerjisini doğrultma amacıyla tasarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar eşliğinde ortamda bulunan mevcut ISM ve LTE yada belirli kaynaktan yayılan elektromanyetik dalgaların doğrultularak verimli bir şekilde DC gerilim elde edilecektir. Bu amaçla çift katlı Greinacher

doğrultucu devre tasarımı yapılmıştır. Devre girişinde yapılan L-C ve mikroşerit stub ile yapılan uyumlandırma ile devrenin 2.4GHz ve 2.7GHz frekanslarında uyumlu çalışabilmesi sağlanmıştır. Yapılan simülasyon sonuçlarına göre, 10dBm giriş gücüne karşılık çıkışta 100 Kohm’luk yük direncinde 4,02V’luk bir DC gerilim elde edilmiştir. 0dBm’lik giriş gücünde ise LTE frekansında 100ohm ile 100kohm arasında değişen yük dirençlerinde -5 ile -15dBm arasında güç değeri elde edilmiştir. Doğrultucudan elde edilen DC gerilim ile düşük güç tüketimine sahip sensörler ve sensör ağları beslenebilir ya da depolanarak pil ömrü uzatılabilir.

#### Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the authors.

#### Kaynaklar

- Cheng, Y.-C., Chawathe, Y., LaMarca, A., Krumm, J., 2005. Accuracy characterization for metropolitan-scale Wi-Fi localization. Proc. Third Int. Conf. on Mobile Systems, pp. 233-245.
- Curty, J.-P., Joehl, N., Krummenacher, F., Dehollain, C., Declercq, M., 2000. A model for m-power rectifier analysis and design. IEEE Trans. Circuits Syst. I, 52, (12), pp. 2771-2779.
- Gilbert, J.M., Balouchi, F., 2008. Comparison of energy harvesting systems for wireless sensor networks. Int. J. Autom. Comput., 5, (4), pp. 334-347.
- Hagerty, J.A., Helmbrecht, F.B., McCalpin, W.H., Zane, R., Popovic, Z.B., 2004. Recycling ambient microwave energy with broadband rectenna arrays. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 52(3), 1014-1024.
- Le, T., Mayaram, K., Fiez, T., 2008. Efficient far-field radio frequency energy harvesting for passively powered sensor networks. IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 43, no. 5, pp. 1287-1302.
- Olgun, U., Chen, C.-C., Volakis, J.L., 2012. Design of an efficient ambient WiFi energy harvesting system. IET Microw. Antennas Propag., 6(11), 1200-1206.
- Ostafte, H., 2010. Power out of thin air: ambient RF energy harvesting for wireless sensors. <http://powercastco.com/PDF/Power-Out-of-Thin-Air.pdf>
- Papotto, G., Carrara, F., Palmisano, G., 2011. A 90-nm CMOS Threshold-Compensated RF Energy Harvester, Solid-State Circuits. IEEE Journal of, 46(9), 1985 - 1997.
- Paradiso, J.A., Starner, T., 2005. Energy scavenging for mobile and wireless electronics. IEEE Pervasive Comput., 4, (1), 18-27.
- Rebello, J., 2010. Global wireless subscriptions reach 5 billion. Available: <http://www.isuppli.com/Mobile-and-Wireless-communications/News/Pages/Global-Wireless-Subscriptions-Reach-5-Billion.aspx>

- Sample, A., Smith, J, 2009. Experimental results with two wireless power transfer systems. Proc. IEEE RWS, 16-18.
- Yan, H., Montero, J. G. M., Akhnouk, A., de Vreede, L. C. N., Burghart, J.N., 2005. An integration scheme for RF power harvesting. 8th Annu. Workshop Semiconductor Advances Future Electron. Sensors, Veldhoven, the Netherlands.