



Araştırma Makalesi / Research Paper

545 MHz ile 5800 MHz Arası GSM ve ISM Bantlarda, HSMS 285c Diyodu Kullanılarak Yapılan Dickson Doğrultucu Devresinde Tek/Çift Katmanlı Yapının, RF-DC Güç Dönüştürme Verimine Etkisinin İncelenmesi

Mahmut Ahmet GÖZEL^{a*}, Ömer KASAR^b, Mesud KAHRİMAN^a

^aSüleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü
Isparta/TÜRKİYE

^bArtvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Artvin/TÜRKİYE
mahmutgozel@sdu.edu.tr

Received/Geliş: 19.07.2018

Accepted/Kabul: 03.10.2018

Özet: Bu çalışmada RF enerji hasatlama teknolojilerinde kullanılan doğrultucu topolojilerinden Dickson gerilim çoklayıcı devreleri tasarlanmıştır. Bu tasarımların farklı frekans ve yük değerlerinde verim analizi incelenmiştir. Tek katmanlı ve çift katmanlı doğrultucu devresinin tasarımı ve simülasyonları için Advanced Design System (ADS) kullanılmıştır. Tasarım mikroşerit hatlar kullanılarak yapılmıştır. Doğrultucu katmanında HSMS-285C Schottky diyodu kullanılmıştır. Tek ve iki katmanlı Dickson gerilim çoklayıcı ile giriş gücü -10 dBm ile 20 dBm arasında ayarlanarak beş farklı frekans (545MHz, 900MHz, 1800MHz, 2.45GHz ve 5.8GHz) değerinde doğrultucu verimi, çıkış gerilimleri ve devrenin sürüldüğü yük değerleri incelenmiştir. Tek katmanlı doğrultucuda, 545MHz’de %36, iki katmanlı devrede ise %32 verim gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Radyo Frekansı ile Enerji Hasatlama; Doğrultucu Topolojileri; Güç Dönüştürme Verimi

Investigation of the Effect of RF-DC Power Conversion Efficiency Single/Double Layered Dickson Rectifier Circuit Using HSMS285c Diode in 545 MHz to 5800 MHz GSM and ISM Bands

Abstract: In this study, a Dickson Voltage Multiplier circuit is designed that is used RF energy harvesting technologies as rectifier topology. The efficiency analysis of these designs at different frequency and load values has been investigated. Advanced Design System (ADS) is used for design and simulation of single and double layer rectifier circuit. This layout was made using microstrip line. HSMS-285C diode is used in the rectifier layer. Rectifier efficiency, output voltage and load value that drive the circuit was investigated in single- and double-layer Dickson voltage multiplier when input power adjusted between -10dBm to 20dBm. In the single layer rectifier, 36% efficiency was observed at 545MHz and 32% efficiency at the double layer.

Keywords: Radio Frequency Energy Harvesting; Rectifier Topology; Power Conversion Efficiency

1. Giriş

Teknolojik gelişmelere bağlı olarak elektronik, bilgi teknolojileri, malzeme bilimi gibi alanlarda gerçekleşen yenilikler düşük güçle çalışan mikro sistemlerin yaygınlaşmasını tetiklemektedir. Günümüzde, kablosuz sensör ağları, biyomedikal implantlar, RFID etiketler, askeri izleme

Bu makaleye atıf yapmak için

Gözel M.A., Kasar Ö., Kahrıman M., “545 MHz ile 5800 MHz Arası GSM ve ISM Bantlarda, HSMS 285c Diyodu Kullanılarak Yapılan Dickson Doğrultucu Devresinde Tek/Çift Katmanlı Yapının, RF-DC Güç Dönüştürme Verimine Etkisinin İncelenmesi” El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2019, 6(1); 24-30.

How to cite this article

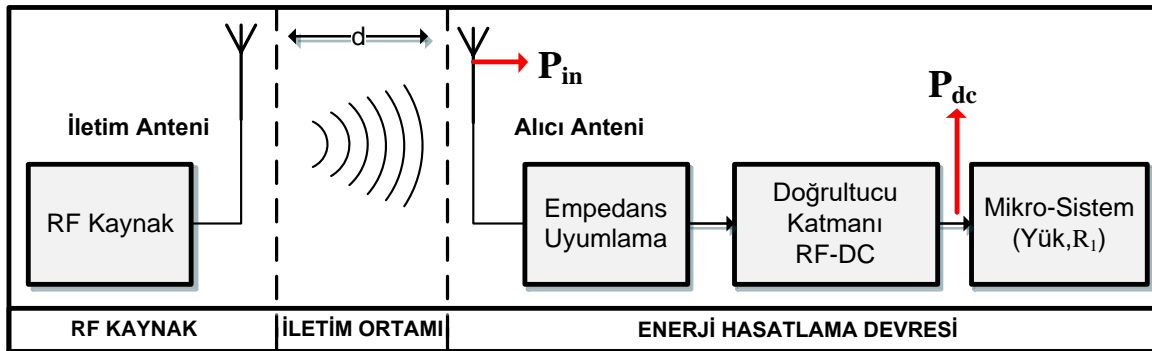
Gözel M.A., Kasar Ö., Kahrıman M., “Investigation of the Effect of RF-DC Power Conversion Efficiency Single/Double Layered Dickson Rectifier Circuit Using HSMS285c Diode in 545 MHz to 5800 MHz GSM and ISM Bands” El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2019, 6(1); 24-30.

cihazları-yapıya gömülü sistemler, hesap makinaları, saatler, bluetooth kulaklıklar v.b. kablosuz düşük güçle çalışan mikro sistemlere sahip birçok cihaz yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Radyo Frekansı ile Enerji Hasatlama (RFEH), düşük güçle çalışan sistemlerde enerji ihtiyacının ortamdan sağlanabilmesi için kullanılan yöntemlerden bir tanesidir [2]. Bununla birlikte kullanılan cihazın ortamına ve ihtiyaç duyduğu enerjiye bağlı olarak fotovoltaik, piezoelektrik, termoelektrik gibi alternatif teknikler ile enerji hasatlama uygulamaları mevcuttur [3]. Tablo 1’de dört farklı enerji hasatlama tekniği ile bu tekniklerin sağlayabileceği güç değerleri ve avantaj/dezavantajları ile ilgili değerlendirmeler sunulmuştur.

Tablo1. Pillerin yerine kullanılan alternatif enerji kaynaklarının karşılaştırılması [4].

| Kaynak | Güç Yoğunluğu | Hasatlama Tekniği | Avantaj | Dezavantaj |
|----------|----------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------|
| Güneş | 10 μ W/cm ² - 10mW/cm ² | Fotovoltaik | Yüksek Güç Yoğunluğu | Işık olmalı, İmplant Edilemez, Pahalı |
| Titreşim | 4 μ W/cm ² - 100 μ W/cm ² | Piezoelektrik | Yüksek Verim, İmplant edilebilen | Titreşim olmalı, Fiziksel büyüklük |
| Termal | 30 μ W/cm ² - 10mW/cm ² | Termoelektrik | Yüksek Güç Yoğunluğu, İmplant edilebilen | Aşırı ısı, Her an ortamda olmaz |
| RF | GSM: 0,1 μ W/cm ² WI-FI: 1mW/cm ² | Anten-RFEH | Her an ortamda mevcut, İmplant edilebilen | Düşük Güç Yoğunluğu, Uzak mesafe |

Tablo 1’e bakıldığında diğer enerji kaynaklarına göre RF enerji kaynaklarının her an mevcut olması ve RFEH tekniğini tercih sebebi yapmaktadır. RFEH yönteminde iki farklı yolla enerji hasatlanabilir: kaynağı kullanıcı tarafından belirlenen ve ortamda bulunan farklı güç ve frekanslardaki RF dalgalardan. Buradaki en önemli konu ortamda bulunan RF kaynaklı güç yoğunluklarının düşük olmasıdır. Bu sebeple düşük güçle çalışan cihazların gereksinim duyduğu enerjiyi en az kayıpla ortamdan cihaza aktarabilmek için doğru uyumlandırma tekniği, uygun devre tasarımı ve verimli çalışan doğrultucu topoloji seçimi oldukça önemlidir.



Şekil 1. Radyo Frekansı ile Enerji Hasatlama (RFEH) Sistem Blok Diyagramı

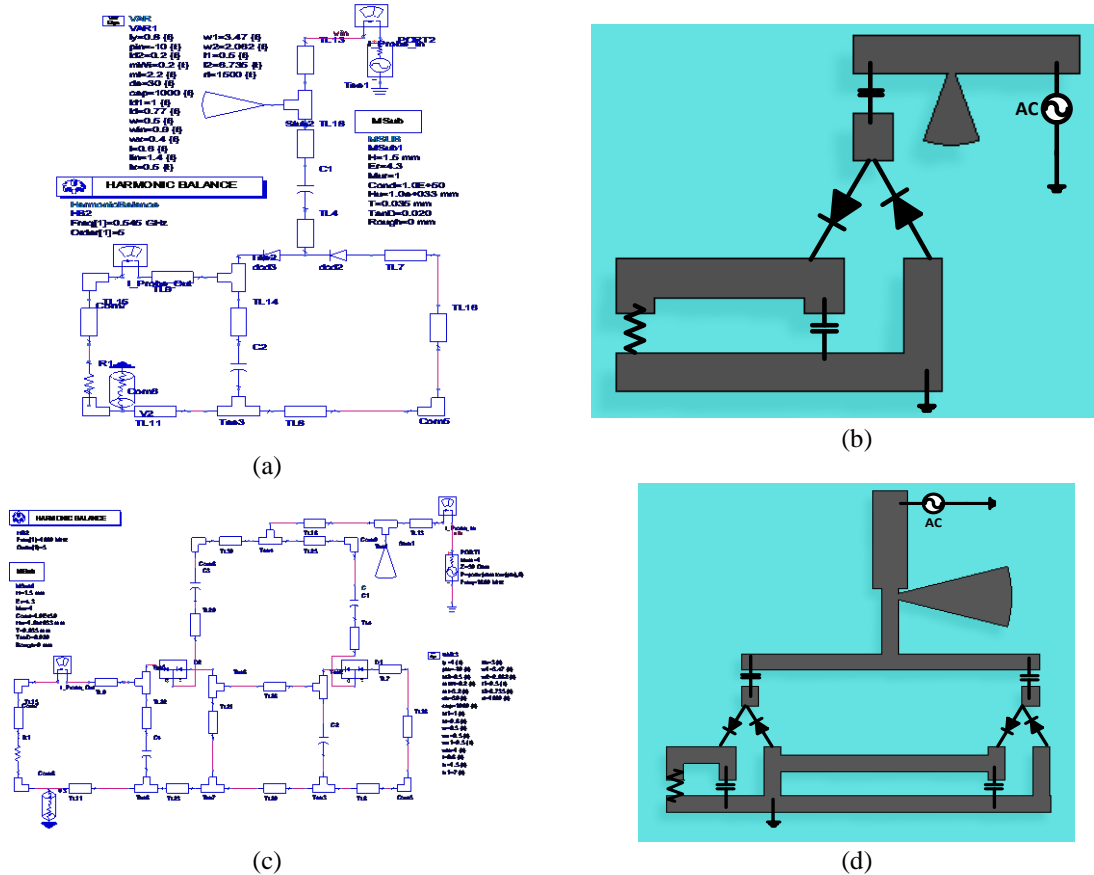
Şekil 1’de RFEH sistemine ait bir blok diyagram verilmiştir. Bu çalışmada incelenecek olan kısım doğrultucu katmanıdır. Bir RFEH uygulamasında; “RF-DC dönüştürme verimi” ve yüke aktarılan gücü hesap etmek için kullanılan “çıkış gerilimi”, ortamdaki gücün ne kadarının yüke aktarılabildiğini ve ihtiyaç olan enerjinin sağlanıp sağlanmadığını anlayabilmek adına önemli parametrelerdendir. Bir RFEH doğrultucu katmanında RF-DC güç dönüştürme verimi denklem (1) de gösterildiği gibi hesaplanabilir [5].

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{in}} \cdot 100\% = \frac{V_{dc}^2}{R_1 P_{in}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Burada; R_l yük direncini (ohm), P_{dc} doğrultucu devrenin çıkışında ölçülen ve yüke aktarılan gücü (watt), P_{in} antenden alınan ve aynı zamanda doğrultucu devrenin girişine gelen gücü (watt), V_{dc} yük üzerindeki geilimi (volt), η ise doğrultucu devrenin verimini ifade etmektedir.

2. Doğrultucu/Gerilim Çoklayıcı Devre Tasarımı

RFEH sistemlerinde alıcı anten tarafından boş uzaydan çekilen RF enerji genellikle düşük güç yoğunluğuna sahiptir [6]. Çünkü Şekil 1’de de gösterilen alıcı anten ile verici antenin arasındaki mesafeye (d) bağlı olarak elektrik alan güç yoğunluğu $1/d^2$ oranında azalır [7]. Bu yüzden yükü sürebilmek için EM dalgadan yeterli DC enerjiyi sağlayabilecek bir güç yükseltici gerekmektedir. Bu durum iki olasılığa neden olur: eğer güç tüketimi ortalama güç hasadından düşük ise yükteki elektronik cihazlar sürekli olarak çalışabilir, aksi takdirde yük güç hasat devresinin üretebileceğinden daha fazla enerji tüketirse cihazlar sürekli olarak çalışamaz [8]. Güç hasadı devrelerinde antenden alınan RF sinyalin sinüzoidal bir şekli vardır. Bu sinyalin elektronik cihazın güç gereksinimlerini karşılayabilmesi açısından doğrultulup yükseltilmesi gerekmektedir. Bu doğrultma işlemini yapacak farklı topolojiler mevcuttur [9-13]. Bu çalışmada RFEH sistemleri için kullanılan doğrultucu topolojilerinden Dickson gerilim çoklayıcı devresi modellenmiştir. Gerilim çoklayıcılar AC girişini DC çıkışına dönüştüren ve AC çıkışını yükselten özel bir doğrultucu tipidir.



Şekil 2. ADS ile Tasarlanan (a) Tek Katmanlı Dickson Doğrultucu devre, (b) Tek Katmanlı Baskı Devre Görünümü, (c) İki Katmanlı Dickson Doğrultucu Devre ve (d) İki Katmanlı Baskı Devre Görünümü

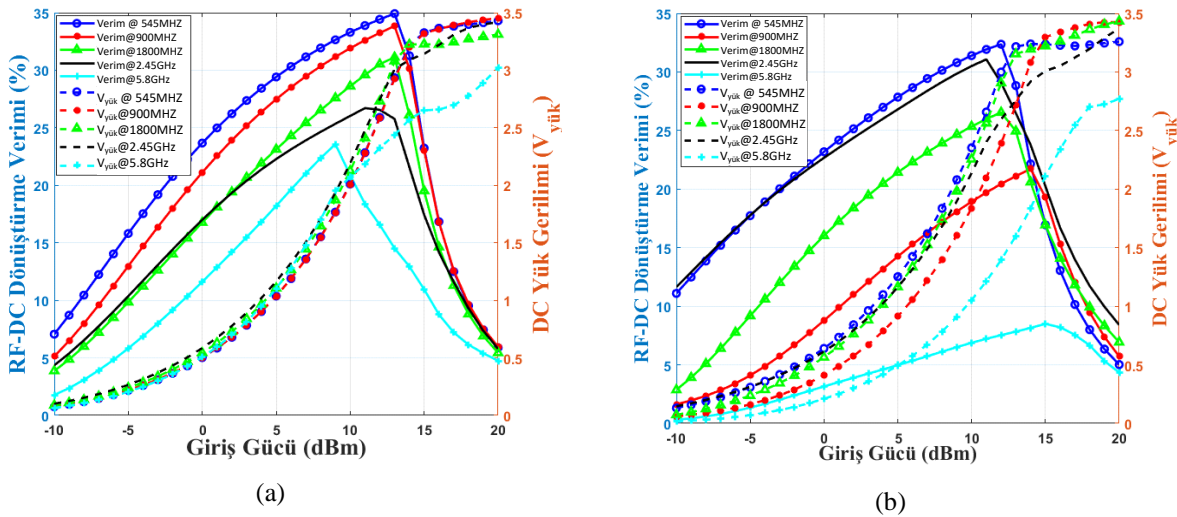
Doğrultulmuş gücün uygulama için yetersiz olduğu bazı durumlarda, DC çıkışı, tek fazlı doğrultucuları seri bağlamak suretiyle oluşturulan gerilim çoklayıcılara ihtiyaç duyulur [14]. Tasarlanan doğrultucu devreler ve baskı devre çıktıları Şekil 2’de gösterilmiştir. Bu tasarımlar FR4 malzemesi ($\epsilon_r=4,3$, $h=1,5\text{mm}$, $\tan\delta_c=0,02$) seçilerek, mikroşerit hatlar kullanılarak yapılmıştır.

Doğrultucu devre için ADS kütüphanesinde mevcut olan Agilent Technologies ürünü 3 terminalli HSMS-285C Schottky diyodu kullanılmıştır. RFEH devrelerinde alıcı antenden gelen AC sinyalin minimum güç kaybıyla yüke DC sinyal olarak aktarılabilmesi için doğrultucu devreler için kullanılan güç dönüştürme verimliliği (PCE) en önemli parametrelerden biridir. Ayrıca yükü sürebilmek için ihtiyaç duyulan çıkış gerilim değeri de kritik öneme sahiptir [15].

Şekil 2’de tek katmanlı ve çift katmanlı olarak tasarlanmış Dickson doğrultucu devrelerinin mikroşerit hatlarla ADS çizimi ve yine tek/çift katmanlar için devre baskı tasarımları verilmiştir. Bu tasarımlar gerçekleştirilirken doğrultucu güç dönüştürme verimini etkileyebilecek ve gücün geri yansımaya sebep olabilecek gereksiz mikroşerit hat kullanımından kaçınılmıştır. Tasarımda giriş kısmında empedans uyumlama sağlayabilecek radyal saplama kullanılmıştır.

3. Farklı Frekans Değerlerine Göre Doğrultucu Veriminin İncelenmesi

Bu kısımda giriş gücü -10dBm ile 20dBm arasında olan Şekil 2’de gösterilen devreler için; beş farklı frekansta elde edilen çıkış gerilimleri ve RF-DC güç dönüştürme verimliliği karşılaştırılmış böylece frekans değerlerine göre bir RF doğrultucu devrenin tepkisi incelenmiştir.

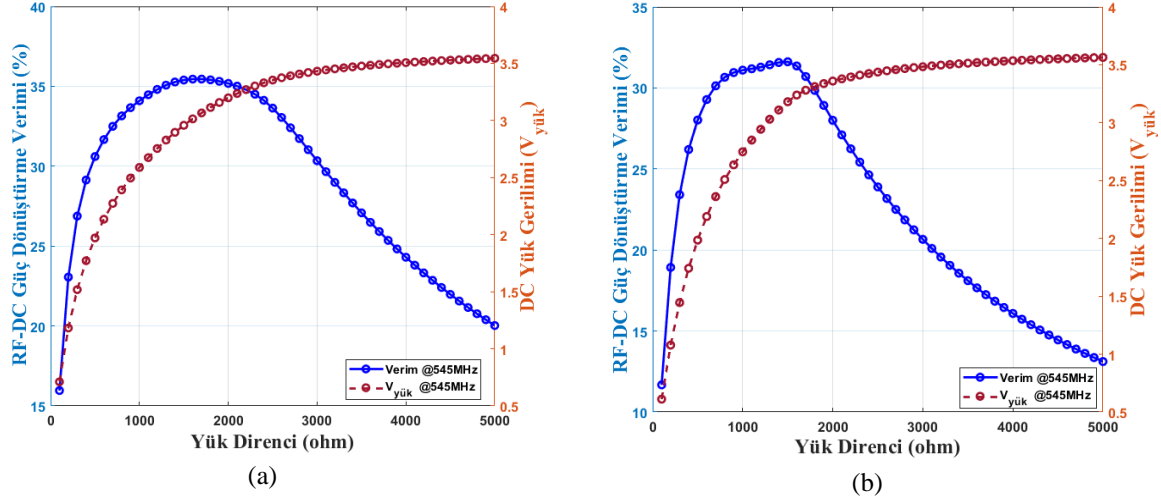


Şekil 3. -10dBm ile 20dBm Giriş Gücü Aralığında Beş Farklı Frekans Değeri İçin (a) Tek katmanlı, (b) İki katmanlı Dickson Gerilim Çoklayıcı Devresinin, RF-DC Dönüştürme Verimi ve DC Yük Gerilimi Değerlerinin Karşılaştırılması

Şekil 3. a’ da -10dBm ile 20dBm giriş gücü aralığında tek katmanlı devre için 5 farklı frekansın verim ve gerilim karşılaştırması gözükmektedir. Tasarımı Şekil 2.a’da gösterilen tek katmanlı devre için 545 MHz merkez frekansında, maksimum gerilim 3.5V, maksimum PCE değeri ise 12 dBm giriş gücünde %35’in üzerinde çıkmıştır. Bununla birlikte en düşük verim 5.8GHz frekansında %24 olarak ölçülmüştür. Aynı karşılaştırma Şekil 2.b’deki iki katmanlı devre için de yapılmış ve Şekil 3.b’de maksimum verimin %32 ile 545MHz’de olduğu gözlenmiştir. Bununla beraber iki katmanlı devrede en düşük verim 5,8GHz de %9 olarak tespit edilmiştir. Buradan yola çıkarak genellikle Dickson gerilim çoklayıcı devresi için artan frekans değerlerine ve katman sayısına bağlı olarak RF-DC dönüştürme veriminin azaldığı sonucuna varılabilir.

4. Doğrultucu Verimi-Yük Analizi

Yük değeri verimi ve çıkış gerilimini doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden bu kısımda farklı yük değerleri için (100-5000 ohm arasında) RF-DC güç dönüştürme verimi ile çıkış gerilim değerlerinin değişimi incelenmiştir.

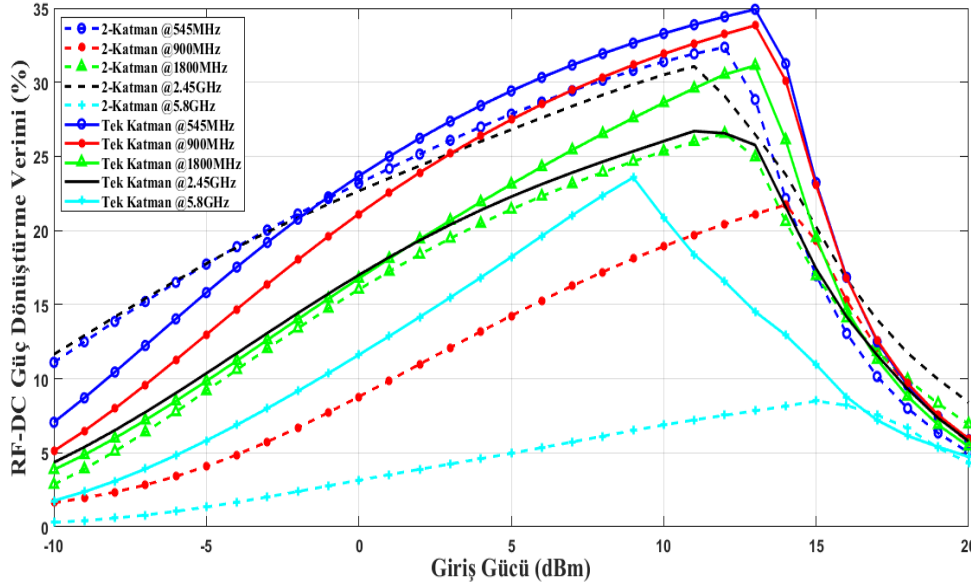


Şekil 4. 545MHz de 100-5000 ohm Yük Altında (a) Tek Katmanlı (b) İki Katmanlı Dickson Gerilim Çoklayıcı Devresinin Verim ve Çıkış Gerilimi Değerleri

Şekil 4’de tek katmanlı ve çift katmanlı devreler için doğrultucu verimi ve çıkış gerilim değerleri gösterilmiştir. Burada tek katmanlı devre için RF-DC güç dönüştürme verimi maksimum değerleri (900-2100 ohm arası) iki katmanlı devreye göre (800-1700 ohm arası) daha geniş yük aralığında sağlandığı gözlenmiştir. Yük değerinin artışı çıkış geriliminde de yükselmeye sebep olmuştur.

5. Tek ve İki Katmanlı Devrelerin Verim Karşılaştırması

Çalışmanın son kısmında tasarımı Şekil 2’de gösterilen ve RF-DC doğrultucu olan tek katmanlı ve iki katmanlı Dickson gerilim çoklayıcı devresinin RF-DC güç dönüştürme verimlilikleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 5. Tek ve İki katmanlı Dickson Doğrultucusunun RF-DC Dönüştürme Verimlerinin Karşılaştırılması

Şekil 5’deki grafiğe bakılarak Şekil 2’deki tasarımlar için maksimum verimin 545MHz’de tek katmanlı devrede %36 olarak sağlandığı, aynı frekansta iki katmanlı devrede %32 olduğu

görülmektedir. 2.45 GHz dışındaki tüm frekanslarda tek katmanlı devreye ait RF-DC dönüştürme verimlerinin iki katmanlıya göre daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. 2.45 GHz' de tek katmanlı doğrultucu verimi %27 iken iki katmanlı devre doğrultma verimi %31 civarındadır.

6. Sonuç

Bu çalışmada Enerji Hasadı uygulamalarında RF-DC doğrultucu katmanında yaygın kullanılan Dickson gerilim çoklayıcı devresinin ADS yazılımı ile tek katmanlı ve çift katmanlı tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımların -10 dBm ve 20 dBm giriş güç aralığında farklı frekanslar için RF-DC güç dönüştürme verimliliği incelenmiştir. Ayrıca devreyi sürdüğümüz yük değerlerinin değişimine bağlı olarak verimin nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Tablo 2.'de sonuçlar gösterilmektedir.

Tablo 2. Tasarımlara ait Doğrultma Verimi, Çıkış gerilimi ve Maksimum Verim Değerini Sağlayan Yük Verilerinin Analizi

| Simülasyon Sonuçları | Tek/İki Katman @545 MHz | Tek/İki Katman @900 MHz | Tek/İki Katman @1800 MHz | Tek/İki Katman @2450 MHz | Tek/İki Katman @5800 MHz |
|----------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Doğrultma Verimi | %36 / %33 | %34 / %21 | %31 / %26 | %27 / %31 | %23 / %9 |
| Çıkış Gerilimi | 3.06V / 3.1V | 2.92V / 2.7V | 2.7V / 2.9V | 2.7V / 2.4V | 1.9V / 1.8V |
| Maksimum Verimde Yük | 1.7kΩ / 1.5kΩ | 1.5kΩ / 2kΩ | 1.4kΩ / 1.8kΩ | 1.2kΩ / 1kΩ | 1kΩ / 2.5kΩ |

Tablo 2. ile doğrultucu katman sayısındaki artışın, devreyi sürdüğümüz yük değerinin ve ortamda bulunan EM dalgaya ait frekansın doğrultucu verimini ve çıkış gerilimini önemli ölçüde değiştirdiği nümerik değerlerle gösterilmiştir.

Bu çalışma, RF enerji hasadı uygulamaları için doğrultucu katmanının tasarlanmasında bir seçim kriteri olabilecek parametrelerin (frekans, yük, doğrultucu katman sayısı) incelenmesi ve RF-DC dönüştürme verimliliğini ne ölçüde değiştirdiğini göstermektedir. Bu parametrelerin seçilmesindeki en büyük sebep yaygın kullanılmasıdır. Yapılan çalışma RFEH devre tasarımı için bir ön çalışma niteliği taşımaktadır. Gelecekteki çalışmalarda bu çalışmadaki parametrelerin dışında seçilen taban malzemesi, farklı doğrultucu topolojileri ve farklı diyotların kullanılması gibi çalışmalar da gerçekleştirilebilir.

Kaynaklar

- [1] S. Mekid, A. Qureshi, and U. Baroudi, "Energy Harvesting from Ambient Radio Frequency: Is it Worth it?," *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2017,47(1):2673-2683.
- [2] S. Priya and D. J. Inman, *Energy harvesting technologies*, Springer, 2009,29(1): 100-104
- [3] N. Elvin and A. Erturk, *Advances in energy harvesting methods*: Springer Science & Business Media, 2013.
- [4] L.-G. Tran, H.-K. Cha, and W.-T. Park, "RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications," *Micro and Nano Systems Letters*, 2017, 5(1):14-17.
- [5] N.-D. Au and C. Seo, "A Novel Design of an RF-DC Converter for a Low-Input Power Receiver," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, 2017, 17(2): 191-196.
- [6] D. Bouchouicha, F. Dupont, M. Latrach, and L. Ventura, "Ambient RF energy harvesting," in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, 2010, pp: 1-4.
- [7] M. Hata, "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services," *IEEE transactions on Vehicular Technology*, 1980, 29(2): 317-325.
- [8] S. Radiom, G. Vandenbosch, and G. Gielen, "Impact of antenna type and scaling on scavenged voltage in passive RFID tags," in *IEEE Antennas & Propag. Society Int. Symp., APS*, 2008.

- [9] M. A. Belen, "RF Enerji Hasatlama Sistemleri İçin Çift Bandlı Greinacher Doğrultucu Devre Tasarımı," *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 2018, 6(1): 348-353.
- [10] C. R. Valenta and G. D. Durgin, "Harvesting wireless power: Survey of energy-harvester conversion efficiency in far-field, wireless power transfer systems," *IEEE Microwave Magazine*, 2014, 15(1): 108-120.
- [11] E. Mousa Ali, N. Z. Yahaya, P. Nallagownden, and M. A. Zakariya, "A novel rectifying circuit for microwave power harvesting system," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2017, 27(1): e21083-94.
- [12] E. Khansalee, Y. Zhao, and K. Nuanyai, "High frequency rectifier for RF energy harvesting systems," in *Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), 2015 7th International Conference on*, 2015, pp: 304-308.
- [13] V. Kuhn, C. Lahuec, F. Seguin, and C. Person, "A multi-band stacked RF energy harvester with RF-to-DC efficiency up to 84%," *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, 2015, 63(2): 1768-1778.
- [14] G. Gosset and D. Flandre, "Fully-automated and portable design methodology for optimal sizing of energy-efficient CMOS voltage rectifiers," *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2011, 1(1): 141-149.
- [15] H. Zhang and X. Zhu, "A broadband high efficiency rectifier for ambient RF energy harvesting," in *Microwave Symposium (IMS), 2014 IEEE MTT-S International*, 2014, pp: 1-3.