

**Atf İçin:** Zuhur, S. ve Boybay, M. S. (2023). 1.5 GHz – 3.1 GHz Arası Bantlarda Verimli Çalışan Geniş Bant RF Enerji Hasatlama Devresinin Toplu Elemanlarla Tasarımı. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(2), 973-982.

**To Cite:** Zuhur, S. & Boybay, M. S. (2023). Design of Wideband RF Energy Harvesting Circuit with Lumped Elements Working Efficiently in 1.5 GHz – 3.1 GHz Band. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(2), 973-982.

## 1.5 GHz – 3.1 GHz Arası Bantlarda Verimli Çalışan Geniş Bant RF Enerji Hasatlama Devresinin Toplu Elemanlarla Tasarımı

Sadık ZUHUR<sup>1\*</sup>, Muhammed Said BOYBAY<sup>2</sup>

### **Öne Çıkanlar:**

- 10 dBm giriş gücünde 1.5 GHz – 2.7 GHz aralığında geniş bantta yansımaya kaybı sağlamıştır.
- 5 dBm giriş gücünde geniş bantta verim %68.2 olarak hesaplanmıştır.
- 1.5 GHz – 2.7 GHz aralığında 0 dBm giriş gücünde çıkış gerilimi 0.70 V olarak elde edilmiştir.

### **ÖZET:**

Kablosuz iletişim teknolojilerinin kullanımı ile birlikte ortamda farklı frekanslarda elektromanyetik dalgaların varlığı gittikçe artmaktadır. Bu çalışmada ortamda bulunan GSM 1800 (MTX), GSM 1800 (BTX), 3G (MTX), 3G (BTX), ISM 1400, Wi-Fi 1450, LTE 2600 bantlarını hasatlayabilen ve düşük giriş güçlerinde çalışan geniş bant doğrultucu devre toplu elemanlar kullanılarak ADS programında tasarlanmıştır. Tasarlanan devre 1.5 GHz – 3.1 GHz aralığında eşik değeri sayılabilecek -10 dB altında yansımaya kaybı sağlamıştır. 1.5 GHz – 2.7 GHz aralığının tamamındaki frekanslarda 0 dBm giriş gücünde ve 1 k $\Omega$  yükte çıkış gerilimi 0.70 $\pm$ 0.02 V olarak elde edilirken doğrultma verimi %50 $\pm$ 2 olarak hesaplanmıştır. En yüksek verim ise 5 dBm giriş gücünde ve 2 k $\Omega$  yükte çıkış gerilimi 2.02 V iken %68.2 olarak elde edilmiştir.

### **Anahtar Kelimeler:**

- RF enerji hasatlama
- Toplu eleman
- Empedans eşleştirme,
- Geniş bant
- HSMS2852

## Design of Wideband Rf Energy Harvesting Circuit with Lumped Elements Working Efficiently in 1.5 GHz – 3.1 GHz Band

### **Highlights:**

- It provides reflection loss in the range of 1.5 GHz to 2.7 GHz at -10 dBm input power.
- The efficiency in wideband at 5 dBm input power is calculated as 68.2%.
- Output voltage is 0.70 V at 0 dBm input power in the 1.5 GHz. – 2.7 GHz range.

### **ABSTRACT:**

With the use of wireless communication technologies, the presence of electromagnetic waves at different frequencies in the ambient is increasing. In this study, a wideband rectifier circuit that can harvest GSM 1800 (MTX), GSM 1800 (BTX), 3G (MTX), 3G (BTX), ISM 1400, Wi-Fi 1450, LTE 2600 bands and operates at low input powers was designed in ADS program using lumped elements. In the 1.5 GHz – 3.1 GHz range, the designed circuit provided a reflection loss below -10 dB, which can be considered the threshold value. While the output voltage is 0.70 $\pm$ 0.02 V at 0 dBm input power and 1k $\Omega$  load at frequencies across the entire 1.5 GHz – 2.7 GHz range, the rectification efficiency is calculated as 50 $\pm$ 2%. The highest efficiency was obtained as 68.2% at 5 dBm input power and 2 k $\Omega$  loads, while the output voltage was 2.02 V.

### **Keywords:**

- RF energy harvesting
- Lumped elements
- Impedance matching
- Broadband
- HSMS2852

<sup>1</sup> Sadık ZUHUR ([Orcid ID: 0000-0001-7033-4098](https://orcid.org/0000-0001-7033-4098)), İğdır Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, İğdir, Türkiye

<sup>2</sup> Muhammed Said BOYBAY ([Orcid ID: 0000-0003-0503-2557](https://orcid.org/0000-0003-0503-2557)), İğdır Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İğdir, Türkiye

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Sadık ZUHUR, e-mail: sadik.zuhur@igdir.edu.tr

## GİRİŞ

Son yıllarda kablosuz iletişim teknolojilerinin kullanımıyla birlikte bulunduğumuz ortamlarda bilgi taşıyan RF bölgesindeki elektromanyetik dalgaların varlığı giderek artmıştır. Ortamda bilgi iletimi amacıyla yayınlanan televizyon, radyo, Wi-Fi, cep telefonu gibi haberleşme sinyalleri genellikle mikrodalga frekanslardaki elektromanyetik dalgalar ile taşınmaktadır. Ortama yayılan bu elektromanyetik dalgalar aynı zamanda güç de taşımaktadır. Muhammad ve ark. yaptıkları çalışmada farklı frekanslarda kamu telekomünikasyon bantlarından alınan enerji miktarını ölçmüşlerdir ve alınan sonuçlar Çizelge 1’de verilmiştir (Muhammad ve ark., 2021a). RF enerji hasatlama, ortamdaki bu enerjiyi toplayarak düşük güçle çalışan cihazlarda kullanmayı, depolamayı veya desteklemeyi amaçlamaktadır. Teknolojik ilerleme ve kablosuz iletişimin yaygınlaşması, düşük güçlü nesnelerin interneti (IoT) cihazlarının ve sensör ağlarının yaygınlaşmasına neden olmuştur. Bu cihazlar genellikle pillerle çalıştırılır. RF enerji hasatlama pillerle enerji sağlanması esnasındaki şarj etme, pil değiştirme işlemleri ve bakım maliyetleri gibi sorunları ortadan kaldıracabilecek olan bir teknolojidir (Muhammad ve ark., 2021b). Çizelge 2 kablosuz elektronik cihazların güç tüketimini göstermektedir.

**Çizelge 1.** Çeşitli kamu telekomünikasyon bantlarından alınan enerji (Muhammad ve ark., 2021a)

Bant	Çalışma Frekansı (GHz)	Alınan güç seviyesi* (dBm)	Ortalama alınan güç (dBm)
GSM 900 (M <sub>TX</sub> )	0.88-0.960	(-45) – (-26.5) aralığında	-27.8
GSM 900 (B <sub>TX</sub> )	0.925-0.960	(-40) – (-17.5) aralığında	-21.2
GSM 1800 (M <sub>TX</sub> )	1.710-1.785	(-47) – (-40) aralığında	-42.7
GSM 1800 (B <sub>TX</sub> )	1.805-1880	(-35) – (-14) aralığında	-15.3
3G (M <sub>TX</sub> )	1.920-1.980	(-44) – (-25.5) aralığında	-26.7
3G (B <sub>TX</sub> )	2.110-2.170	(-43) – (-20.1) aralığında	-22.5
ISM1400	2.305-2.400	(-45) – (-29.7) aralığında	-30.1
Wi-Fi1450	2.400-2.500	(-35) – (-15) aralığında	-17.7
LTE2600	2.500-2.690	(-45) – (-19.5) aralığında	-23.8

**Çizelge 2.** Kablosuz elektronik cihazların güç tüketimi (Kuhn ve ark., 2015)

Güç	1 $\mu$ W	10 $\mu$ W	100 $\mu$ W	1 mW
Cihaz	32 kHz Quartz Osilatör	Saat, Hesap Makinesi, Pasif RFID	İşitme Cihazı, Sıcaklık Sensörü	Aktif RFID, Minyatür FM alıcısı

Bu çalışmada ortamdan antene gelen RF sinyalleri DC güce dönüştürmeyi amaçlayan radyo frekanslı enerji hasadı (RF-EH) üzerinde durulmuştur. Bu teknik, güneş ve rüzgâr gibi diğer alternatif enerji kaynaklarına kıyasla küçük miktarlarda enerji hasadı yapmasına rağmen, RF-EH sistemlerinin birçok avantajları vardır. Örneğin güneş enerjisi sistemleri güneş ışığının olmadığı yerlerde, kapalı mekanlarda enerji hasadı yapamazken RF-EH sistemleri güçlü RF sinyalleri olan herhangi bir yerde enerji hasadı yapabilmektedir. RF enerjisi, güneş ve rüzgâr gibi diğer kaynaklarda dikkate alınması gereken günün saati ve hava koşulları gibi etkenlerden dolayı kesintiye uğramaz. Hasat devreleri boyut olarak küçük olabilir ve hareketli parçalar içermez. Ayrıca, anten tasarımına bağlı olarak kullanılması istenen cihazlara kolaylıkla yerleştirilebilir ve kullanıcı dostu tasarımlar yapılabilir. Bu devrelerin tümü elektrondur ve üretilmesi ucuzdur (Muncuk ve ark., 2018).

Küçük cihazlar için güç kaynakları olarak kullanılan RF-EH sistemleri temel olarak RF enerjisini toplayan bir antenden ve doğrultucu devresinden oluşmaktadır. Anten ile doğrultucu devresi arasında empedans uyumsuzluğunu gidermek amacıyla eşleştirme devresi yer almaktadır. Doğrultucu devre, alınan AC sinyalini bir DC sinyaline dönüştürmek için kullanılır ve genellikle frekansa, giriş gücüne ve yüke bağlı empedansları değişen Schottky diyotlarından oluşur. Eşleştirme devresi, maksimum güç

aktarımı elde etmek için doğrultucunun giriş empedansını antenin çıkış empedansı ile eşleştirmek için kullanılır (Saranya ve Kesavamurthy, 2019). Şekil 1’de empedans eşleştirme devresi, RF doğrultucu devre, filtre devresi ve yükten oluşan doğrultucunun blok diyagramı verilmiştir. Bu çalışmada doğrultucu devre tasarımı yaparken düşük giriş gücü seviyesi ve daha geniş frekans aralığında doğrultma veriminin artırılması gibi faktörler dikkate alınmıştır. Bu amaçla klasik güç devrelerinden farklı olarak tasarımda toplu elemanlar kullanılarak 1.5 GHz ile 3.1 GHz bant aralığında ve (-10, 10) dBm giriş gücü aralığında verimli çalışan bir RF-EH sistem tasarlanmıştır. Literatürde toplu elemanlar kullanılarak çok bantlı ve geniş bantlı doğrultucuların tasarımı üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır (Liu ve ark., 2020; Erkmn ve Ramahi, 2021; Kim ve Oh, 2021; Bo ve ark., 2022). Literatürden birkaç örnek çalışmaya yer verilecek olursa, Mansour ve Kanaya empedans uyumu için iki L topolojisini kullanarak bir eşleştirme devresi önermişlerdir. 870 MHz'den 2.5 GHz'e doğrultma verimliliği sağlanmıştır ve 0 dBm giriş gücünde dönüştürme verimliliği %30'un üzerindedir (Mansour ve Kanaya, 2018). Fakharian yaptığı çalışmada 1.7 GHz ila 2.6 GHz bant genişliğinde enerji toplayabilen dairesel polarize bir anten ile rektenna tasarlamıştır. Bu çalışmada önerilen doğrultucuda 1 k $\Omega$  yük için sırasıyla 1.85 GHz ve 2.45 GHz'de 12 dBm giriş gücü ile %69 ve 10 dBm giriş ile %64 tepe verimi elde edilmiştir (Fakharian, 2022). Muhammad ve ark. FR-4 substratı kullanan ve 1.78 GHz ile 2.62 GHz aralığını kapsayan geniş bantlı bir RF doğrultucu önermiştir. Önerilen RF doğrultucu, 10 ve -20 dBm RF giriş gücünde sırasıyla %88.25 ve %15.10 gibi bir doğrultma verimliliğine ulaşmıştır (Muhammad ve ark., 2022).

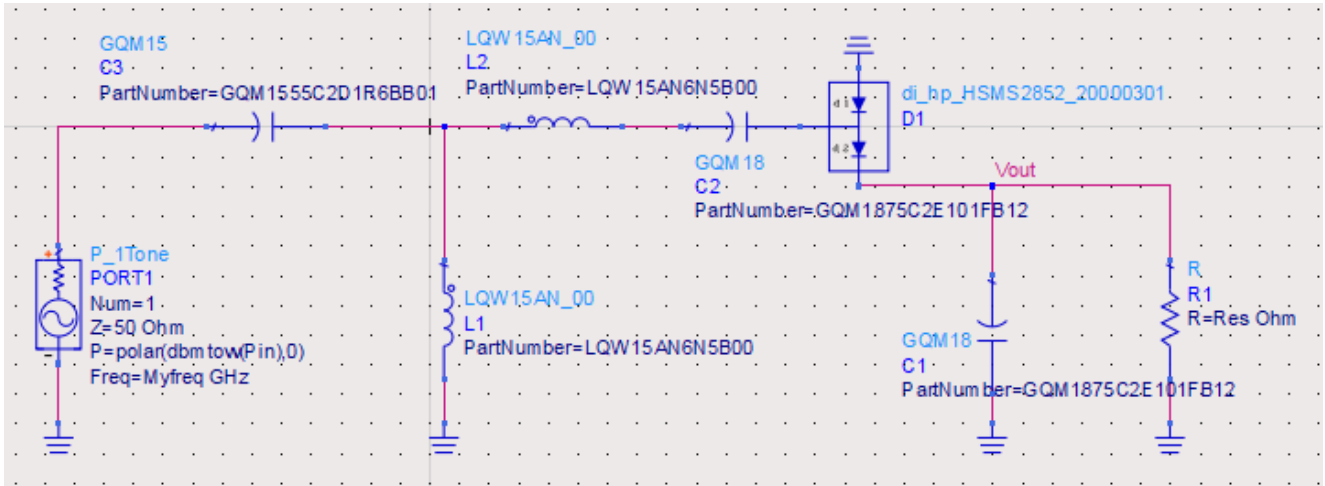


Şekil 1. Doğrultucu devrenin şematik gösterimi

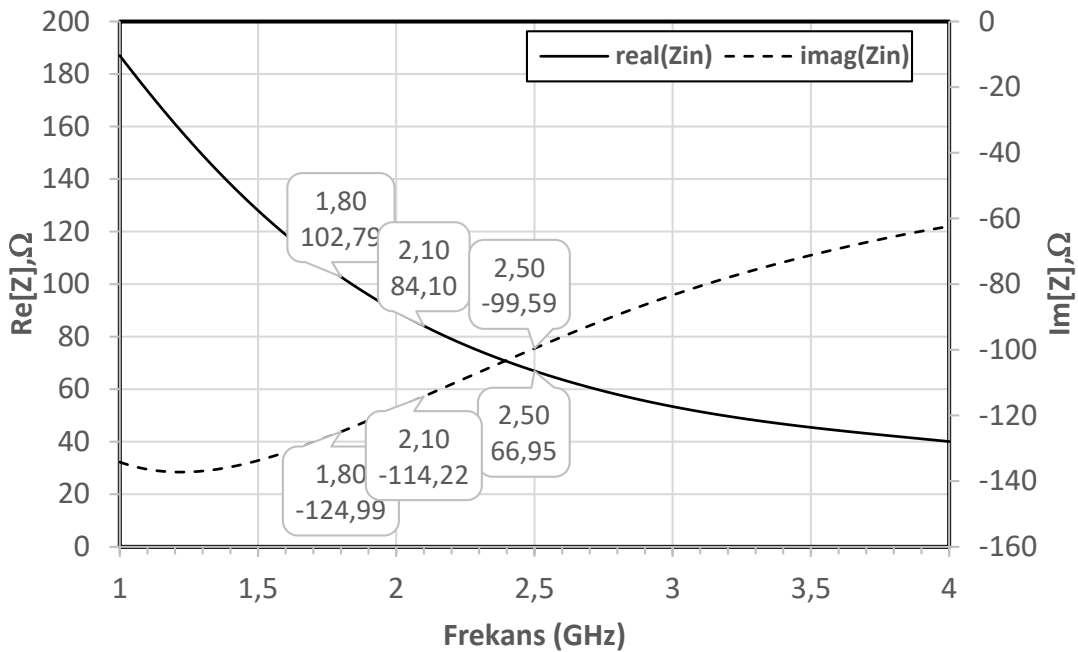
## MATERYAL VE METOT

Şekil 2 Advanced Design System (ADS-2020) simülasyon yazılımı ile hazırlanan doğrultucu devre şemasını göstermektedir. Literatürde genellikle doğrultucu devreleri tasarlanırken empedans eşleştirmesini sağlamak amacıyla saplamalar, toplu elemanlar ve çeyrek dalga dönüştürücüler kullanılmaktadır. Bu çalışmada tasarlanan doğrultucu devre piyasada ticari olarak bulunabilen Murata Manufacutring Co. Ltd. şirketinin kütüphanesinden alınan toplu elemanlar ile simüle edilmiştir. Devre tasarlanırken kaynak empedansı 50  $\Omega$  olarak alınmıştır. Empedans uyumlama devresi tasarlanırken Çizelge 1’de belirtilen bantlardan güç yoğunluğu yüksek olan 1.8 GHz, 2.1 GHz ve 2.5 GHz bantları seçilmiştir. Empedans uyumsuzluklarını gidermek amacıyla giriş empedansının 1.8 GHz, 2.1 GHz ve 2.5 GHz’deki değerleri (sırasıyla 102.79-j124.99  $\Omega$ , 84.10-j114.22  $\Omega$ , 66.95-j99.59  $\Omega$ ) ile eşleştirme yapılmıştır (Şekil 3). Empedans eşleştirmesi ADS-2020 simülasyon yazılımının Empedans Eşleştirme araçları kullanılarak yapılmış ve devrede kullanılan L1, L2 ve C3 elemanlarının topolojisi ve değerleri belirlenmiştir. Empedans eşleştirmesi 0 dBm giriş gücünde 1 k $\Omega$  yük direnci kullanılarak yapılmıştır.

## 1.5 GHz – 3.1 GHz Arası Bantlarda Verimli Çalışan Geniş Bant RF Enerji Hasatlama Devresinin Toplu Elemanlarla Tasarımı



Şekil 2. ADS kullanılarak hazırlanan doğrultucu devre şeması.  $C1=C2=100$  pF,  $C3=1.6$  pF,  $L1=L2=6.5$  nH



Şekil 3. 0 dBm giriş gücünde, 1 kΩ yükte HSMS 2852 diyotunun giriş empedansının frekansa bağlı olarak değişimi. (Düz çizgi gerçek kısmı, kesik çizgiler sanal kısmı göstermektedir.)

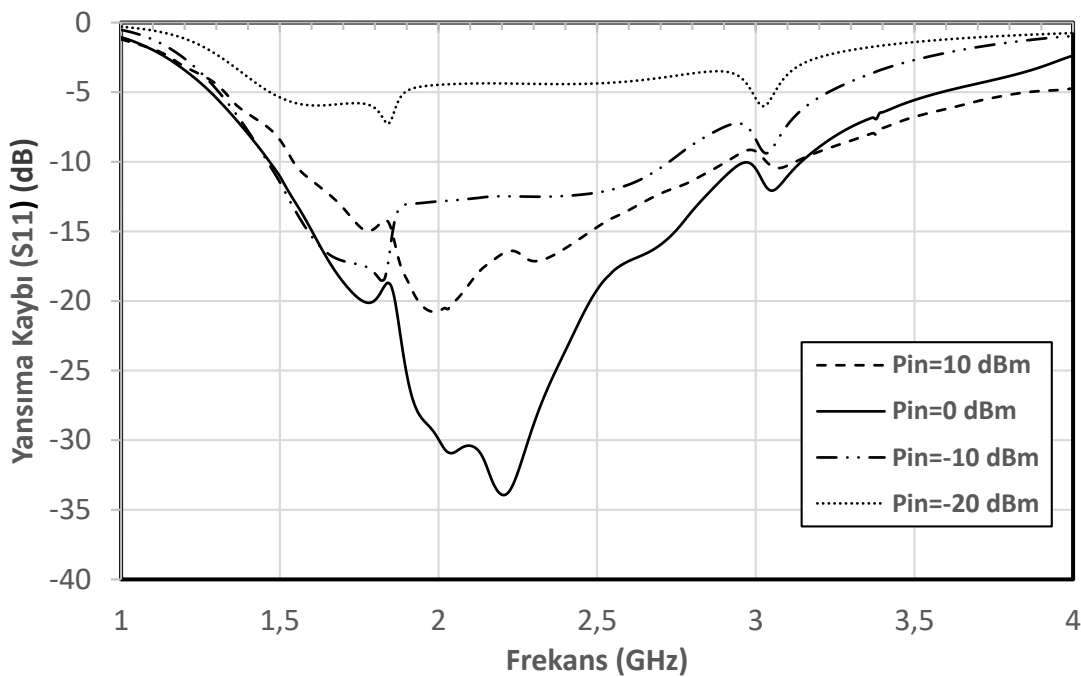
RF enerji hasatlama devrelerinin tasarımı yapılırken düşük güçlerde çalışıldığı için devrede güç kaybını en aza indirecek elemanlar kullanılmalıdır. Devrede doğrultucu olarak kullanılacak olan diyodun düşük açılma gerilim değerine ve yüksek anahtarlama hızına sahip olması gerekmektedir (Belen ve Belen, 2021). Bu nedenle çalışmada HSMS2852 diyodu (kırılma gerilimi  $V_{br}=3.8$  V, ileri gerilimi  $V_{fwd}=150$  mV ve seri direnci  $R_s=25$  Ω) devre elemanı olarak kullanılmıştır (Koohestani ve ark., 2020). Devrede C1 kapasitörü filtreleme yaparken C2 ise pasif bir voltaj katlayıcı olarak kullanılmıştır.

Tasarımda hesaplamalar yapılırken ADS programında mevcut olan Large Signal S-Parameter Harmonic Balance ve Harmonic Balance simülatörleri kullanılmıştır. Empedans eşleştirmesi yapıldıktan sonra Şekil 4'deki yansıma kaybı grafiği frekansa bağlı olarak -20 dBm ila 10 dBm giriş gücü aralığında 10 dBm adımla elde edilmiştir. Kullanılan frekans bandı aralığında -10 dB altında kalan bölgede geri yansıma kaybının yeterli olduğu kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır.

RF enerji hasatlama devrelerinin performansı; çalışma frekans aralığı, giriş gücü ve yüke bağlı olarak elde edilen güç dönüştürme verimi ile değerlendirilir. RF-DC doğrultma verimi aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir.

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

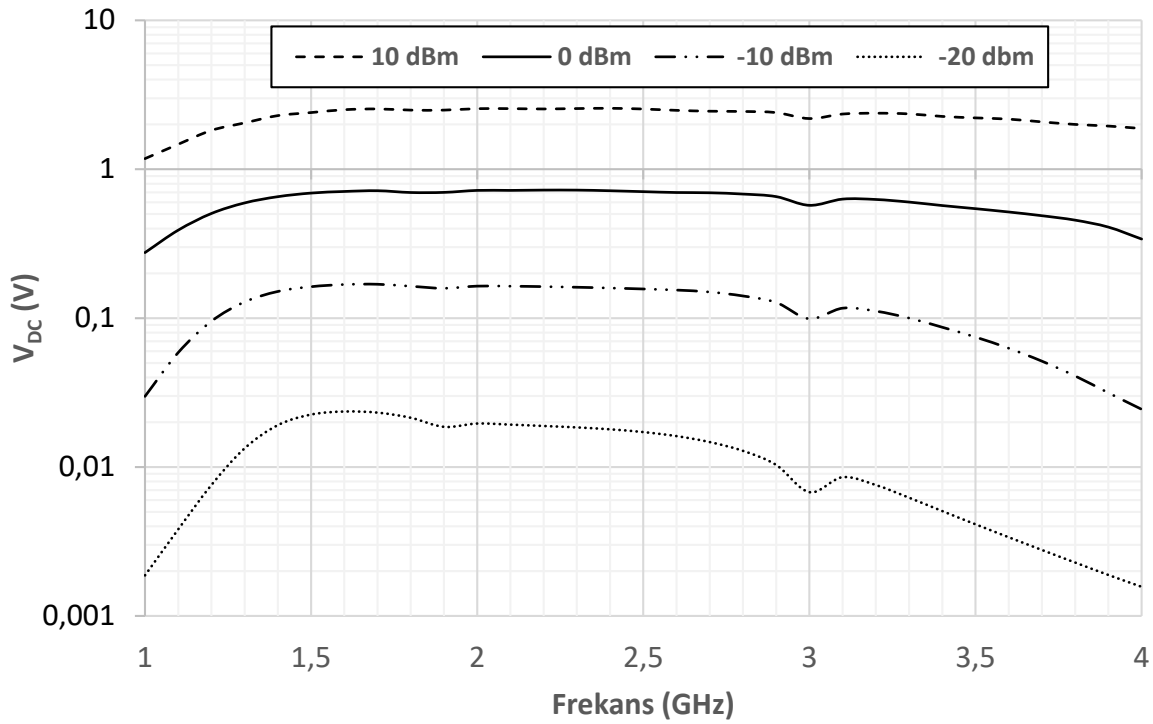
Burada;  $\eta$  Şekil 1’de gösterilen doğrultucu devrenin verimini,  $P_{in}$  antenden gelen ve doğrultucunun girişine uygulanan gücü,  $P_{dc}$  doğrultucunun çıkışından elde edilen gücü,  $V_{dc}$  yük üzerinde oluşan gerilimi ve  $R$  ise yük direncini ifade etmektedir. Bu çalışmada tasarlanan devre çıkışındaki yükte oluşan gerilim ve doğrultma verimi frekans aralığına, giriş gücüne ve yüke bağlı olarak incelenmiştir.



Şekil 4. Geri dönüş kaybının farklı giriş güçlerinde frekansa bağlı olarak değişimi

## BULGULAR VE TARTIŞMA

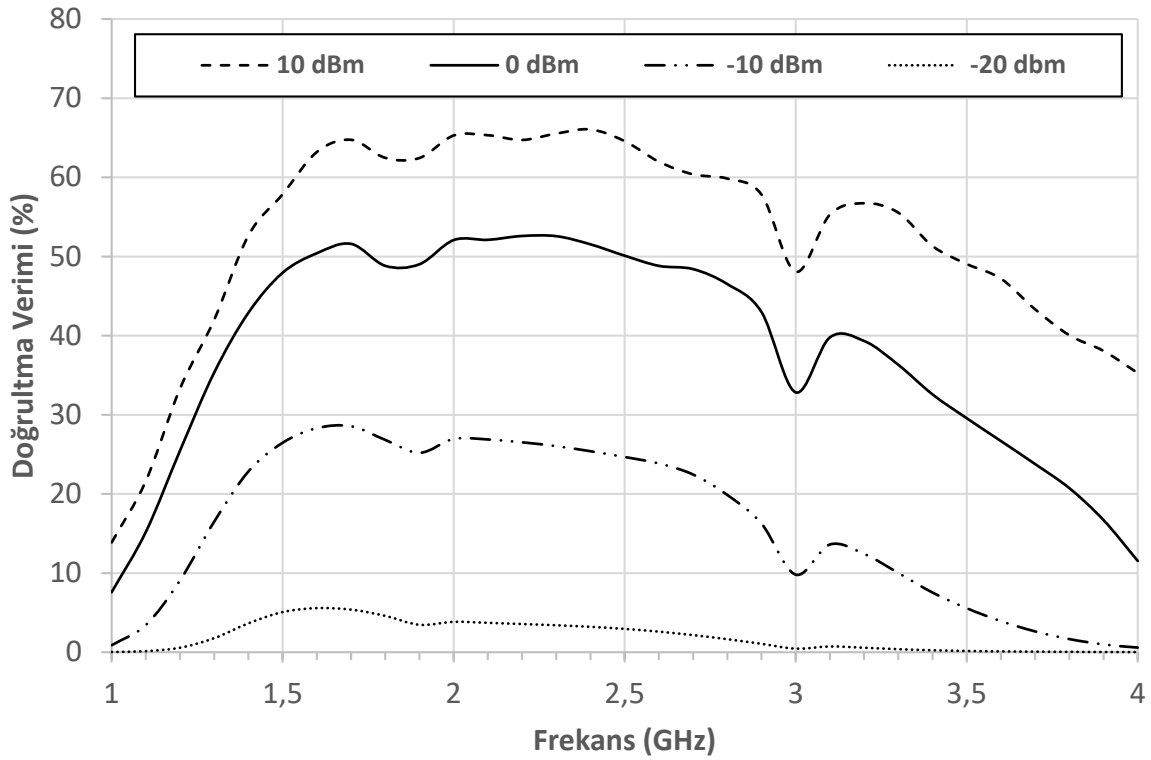
Şekil 4, simülasyonu hazırlanan RF-EH sistemin yansıma kaybını göstermektedir. Bu grafiğe göre tasarlanan sistem Çizelge 1’de belirtilen GSM 1800 (MTX), GSM 1800 (BTX), 3G (MTX), 3G (BTX), ISM 1400, Wi-Fi 1450, LTE 2600 bantlarının tamamında yansımayı engelleyerek giriş gücünü verimli bir şekilde DC güce dönüştürmeyi başarmıştır. -10 dB altında kalan bölgede geri yansıma kaybının yeterli olduğu kabul edildiğinde 0 dBm giriş gücünde 1.5 GHz ile 3.1 GHz arasında kalan geniş bantta doğrultma verimi elde edilmiştir. -10 dBm giriş gücünde bu bant aralığı 1.5 GHz – 2.7 GHz, 10 dBm de ise 1.6 GHz – 2.9 GHz olarak tespit edilmiştir. -20 dBm de ise -5 dB seviyesinde yansıma kaybı olduğu görülürken giriş gücü 10 dBm’ in üzerine çıktığında yansıma kaybının azaldığı görülmüştür. Dolayısıyla tasarlanan sistemin (-10, 10) dBm giriş gücü aralığında yansımayı önemli seviyede önlediği ve kaynak-yük empedansları uyumunu iyi bir şekilde sağladığı gözlemlenmiştir.



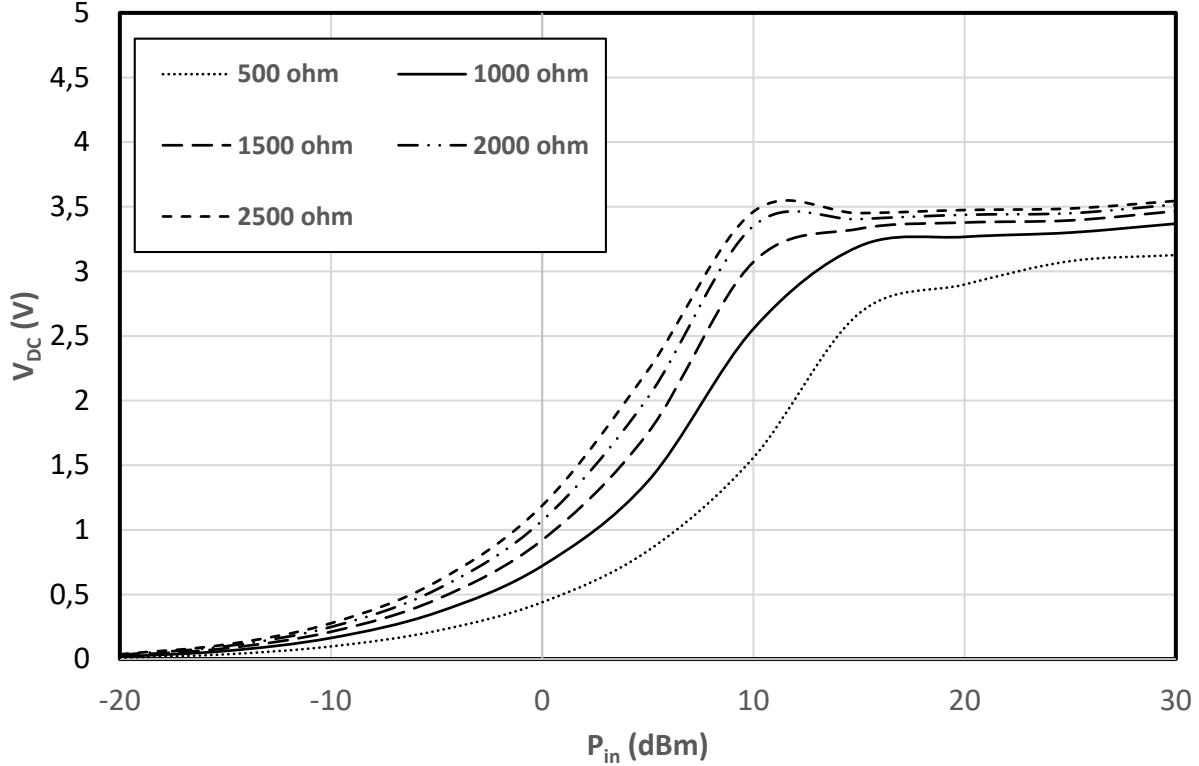
Şekil 5. 1 kΩ yükte farklı frekanslarda ve giriş güçlerinde çıkış gerilimi değişimi

Şekil 5, 1 kΩ yükte 1 GHz ile 4 GHz frekans aralığında ve farklı giriş güçlerinde çıkış gerilimi değişimini göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre giriş gücü arttığında çıkıştan alınan gerilimin dolayısı ile çıkış gücünün arttığı görülmektedir. 1.5 GHz ile 3.5 GHz aralığında her giriş gücünde çıkış geriliminin sabite yakın olduğu yani değişimin fazla olmadığı sonucuna varılabilir. Burada çıkış geriliminin en yüksek değeri en yüksek giriş gücü olan 10 dBm’de elde edilirken bu değer 2.4 GHz de 2.57 V olarak tespit edilmiştir. Şekil 6’da ise denklem 1 kullanılarak elde edilen doğrultma verimindeki değişim farklı frekans ve giriş gücü değerlerine bağlı olarak verilmiştir. Doğrultma verimi 10 dBm, 0 dBm, -10 dBm ve -20 dBm giriş güçlerinde sırasıyla 2.4 GHz ’de %66, 2.2-2.3 GHz aralığında %52, 1.7 GHz ‘de %28.5 ve 1.6 GHz ‘de %5.6 değerlerine ulaşmıştır. Verim değerlerindeki değişime bakıldığında giriş gücünün artmasıyla birlikte verim değerlerindeki tepe değerinin düşük frekanslara doğru kaydığı söylenebilir. Öte yandan Şekil 5 incelenirken (-20, 10) dBm aralığında giriş gücünün artmasıyla birlikte çıkış gerilimindeki artışın daha fazla olduğu gözlemlenmişti ancak Şekil 6’ya bakıldığında artan giriş gücüne bağlı olarak verimdeki artışın azaldığı gözlemlenmiştir.

Şekil 7’de 2.1 GHz frekans değerinde (-20, 30) dBm aralığında 500 Ω adımıyla çıkış gerilimindeki değişim incelenmiştir. Burada (-20, 10) dBm değerleri arasında çıkış gerilimi üstel olarak artmaktadır. Burada 10 dBm üzerinde ise elde edilen çıkış geriliminin 500 Ω - 2500 Ω aralığında 3 V- 3.5 V arasında sabitlendiği görülmektedir. Direnç değerine bağlı olarak çıkış geriliminin azalarak arttığı görülmektedir ve en yüksek değerine 2500 Ω yükte ulaştığı görülmektedir.



Şekil 6. 1 kΩ yükte farklı frekanslarda ve giriş güçlerinde doğrultma verimi değişimi

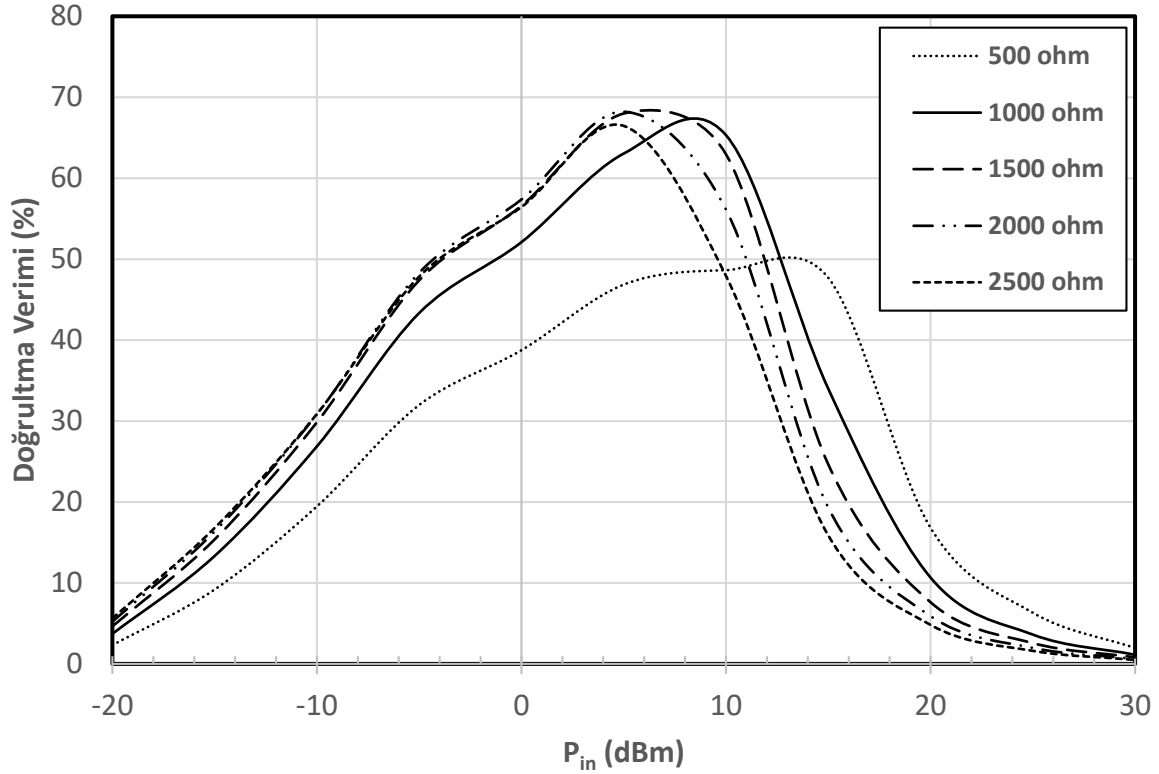


Şekil 7. 2.1 GHz'de farklı yüklerde ve giriş güçlerinde çıkış gerilimi değişimi

Şekil 8'de ise 2.1 GHz frekans değerinde (-20, 30) dBm aralığında 500  $\Omega$  adımla doğrultma verimindeki değişim incelenmiştir. Doğrultma verimi belirtilen direnç değerlerinde (5, 10) dBm giriş gücü aralığında en yüksek değerlerine doğrusal olarak ulaştığı söylenebilir ancak (5, 10) dBm



aralığından sonra üstel olarak bir azalma olduğu görülmektedir. Yük ve giriş gücü değerine bağlı olarak doğrultma verimi en yüksek değeri olan %68.2 değerine 5 dBm giriş gücünde ve 2000  $\Omega$  yük değerinde ulaşmıştır. Bu verim değerinde çıkış geriliminin 2.02 V olduğu görülmüştür.



Şekil 8. 2.1 GHz'de farklı yüklerde ve giriş güçlerinde doğrultma verimi değişimi

Çizelge 3. Bu çalışmanın literatürdeki diğer çalışmalarla kıyaslanması

	Bu çalışma	(Muhammad, ve ark., 2022)	(Mahfoudi ve ark., 2019)	(Gözel ve ark., 2019)
Çalışma Frekansı (GHz)	1.5-2.7	1.78-2.61	1.8-2-6	0.55/0.9/1.8/2.45/5.8
Giriş Gücü (dBm)	0	10	5	-
Çıkış Gerilimi (V)	0.70±0.02	3.2	1.04	3.06/2.92/2.7/1.9
Yük (k $\Omega$ )	1	2	3	1.7/1.5/1.4/1.2/1
Doğrultma Verimi (%)	50±2	75.5	50	36/34/31/27/23
Teknoloji	HSMS 2852	HSMS2850	SMS7630	HSMS 285C

Çizelge 3'te yapılan çalışma literatürdeki bazı çalışmalarla kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamalara bakıldığında, devrenin çalışma frekansı aralığı diğer çalışmalara göre daha geniştir dolayısıyla Çizelge 1'de belirtilen GSM 1800, 3G, ISM 1400, Wi-Fi 1450, LTE 2600 bantlarından güç toplayabilmektedir. Literatürde birçok çalışmada tek bantta veya çok bantta çalışan devreler tasarlanmıştır. Bu durum ara bantlardaki güçleri dönüştürmekte eksik kalmaktadır. Dolayısıyla literatürde geniş bant için yapılan çalışmalar önemlidir. Giriş gücü açısından bakıldığında Çizelge 3'teki çalışmalara göre bu çalışmada 0 dBm gibi düşük giriş gücünde %50 doğrultma verimi elde edilmiştir. Öte yandan Şekil 7'ye bakıldığında yük direncinin artmasıyla çıkış geriliminin arttığı görülmektedir. Yine Çizelge 3'teki çalışmalara bakıldığında bu çalışmaya göre hem yüksek giriş gücü kullanıldığı hem de yük direnci değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir.



## SONUÇ

Bu çalışma kapsamında HSMS 2852 diyotu kullanılarak, -10 dB geri yansıma kaybının yeterli olduğu varsayıldığında, 1.5 GHz ile 3.1 GHz bant aralığında çalışan geniş bant RF-EH sistemi ticari toplu elemanlar kullanılarak ADS programında tasarlanmıştır. Tasarlanan devre performansı göstergeleri olan çıkış gerilimi ve doğrultucu verimi; frekansa, giriş gücüne ve yüke bağlı olarak incelenmiştir. Simülasyon sonuçları Çizelge 3’te literatürde yapılan bazı çalışmalarla kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalar ile uyumludur.

Sistemin giriş gücüne bağlı olarak en iyi (-10, 10) dB aralığında çalıştığı ve en yüksek doğrultma veriminin 5 dBm giriş gücünde ve 2000  $\Omega$  yükte %68.2 olduğu gözlemlenmiştir. Sistemin (-10, 10) dB aralığı gibi dar bir aralıkta verimli çalışması dezavantaj gibi görülse de kaynaklardan yayılan elektromanyetik dalgaların taşıdığı enerjinin daha stabil olması bu dezavantajı önemsiz kılmaktadır. Ayrıca 5 dBm ve 2000  $\Omega$  da en yüksek verimin elde edilmesi giriş gücü ve yük değerlerindeki artışın her zaman verimi artırmayacağı sonucunu ortaya koymuştur. Öte yandan farklı giriş güçlerinde ve yüklerde doğrultma veriminin bir noktaya kadar yükseldiği ve bu noktadan sonra üstel bir şekilde azaldığı görülmüştür. Bu durumun diyodun doğrusal olmayan özelliklerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çalışmada çalışma frekansı, geniş aynı zamanda düşük giriş güçlerine cevap veren verimli bir RF-EH sistem tasarımı yapılmıştır. Gelecekteki çalışmalarda tasarlanan doğrultucuyu kullanan 1.5 GHz ile 3.1 GHz frekans aralığındaki enerjiyi toplayan bir anten tasarlanarak rektenna tasarımı yapılabilir.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

## KAYNAKLAR

- Belen A, Belen MA, 2021. GSM VE ISM Bandı RF Enerji Hasatlama Sistemleri için Tek Katlı Doğrultucu Devre Tasarımı. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9 (2): 359-365.
- Bo SF, Ou JH, Zhang XY, 2022. Ultrawideband Rectifier with Extended Dynamic-Power-Range Based on Wideband Impedance Compression Network. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 70 (8): 4026-4035.
- Erkmen F, Ramahi OM, 2021. A Scalable, Dual-Polarized Absorber Surface for Electromagnetic Energy Harvesting and Wireless Power Transfer. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 69 (9): 4021-4028.
- Fakharian MM, 2022. A high gain wideband circularly polarized rectenna with wide ranges of input power and output load. International Journal of Electronics, 109 (1): 83-99.
- Gözel MA, Kasar Ö, Kahriman M, 2019. 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-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 6 (1): 24-30.
- Kim J, Oh J, 2021. Compact Rectifier Array with Wide Input Power Adaptive Power Distribution and Frequency Ranges Based on. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 31(5): 513-516.

- Koohestani M, Tissier J, Latrach M, 2020. A miniaturized printed rectenna for wireless RF energy harvesting around 2.45 GHz. *International Journal of Electronics and Communications*, 127: 153478.
- Kuhn V, Lahuec C, Seguin F, Person C, 2015. A Multi-Band Stacked RF Energy Harvester With RF-to-DC Efficiency Up to 84%. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 63(5): 1768-1778.
- Liu W, Huang K, Wang T, 2020. A Broadband High-Efficiency RF Rectifier for Ambient RF Energy Harvesting. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 30(12): 1185-1188.
- Mahfoudi H, Tellache M, Takhedmit H, 2019. A wideband rectifier array on dual-polarized differential-feedfractal slotted ground antenna for RF energy harvesting. *International Journal of RF Microwave Computer-Aided Engineering*, 29: e21775.
- Mansour MM, Kanaya H, 2018. Compact and Broadband RF Rectifier With 1.5 Octave Bandwidth Based on a Simple Pair of L-Section Matching Network. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 28(4): 335-337.
- Muhammad S, Tiang JJ, Wong SK, Iqbal A, Smida A, Azizi MK, 2021b. A Compact Dual-Port Multi-Band Rectifier Circuit for RF Energy Harvesting. *Computers, Materials & Continua*, 68(1): 167-184.
- Muhammad S, Tiang JJ, Wong SK, Nebhen J, Smida A, Waly MI, Iqbal A, 2022. Broadband RCN-based RF-rectifier with a large range of power for harvesting ambient wireless energy. *International Journal of Electronics and Communications*, 152: 154228.
- Muhammad S, Tiang JJ, Wong SK, Smida A, Waly MI, 2021a. Efficient quad-band RF energy harvesting rectifier for wireless power communications. *International Journal of Electronics and Communications*, 139: 253927.
- Muncuk U, Alemdar K, Sarode JD, Chowdhury KR, 2018. Multiband Ambient RF Energy Harvesting Circuit Design for Enabling Batteryless Sensors and IoT. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(4): 2700-2714.
- Saranya N, Kesavamurthy T, 2019. Design and performance analysis of broadband rectenna for an efficient RF energy harvesting application. *Int J RF Microw Comput Aided Eng.*, 29: e21628.