



RF Enerji Hasatlama Uygulamaları için Üç Bantlı Anten ve Doğrultucu Tasarımı

Tri-Band Antenna and Rectifier Design for RF Energy Harvesting Applications

Muhammet Emin İnce¹, Çetin Kurnaz², Ertuğrul Çam¹

¹Samsun Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 55420, Samsun, TÜRKİYE

²Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 55139, Samsun, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 14/06/2023

Kabul / Accepted: 11/07/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 11/07/2023

Son Versiyon/Final Version: 15/07/2023

Öz

Çok bantlı RF enerji hasadı, aynı anda birden fazla radyo frekansı (RF) bandından enerji hasadını içeren bir tekniktir. Bu yaklaşım, daha yüksek enerji hasadı verimliliğine ve daha geniş bir RF kaynağından enerji yakalama yeteneğine sahiptir. Bu çalışmada GSM900, GSM1800 ve UMTS2100 hücreli sistem frekanslarında enerji hasatlama için kullanılmak üzere anten ve doğrultucu tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan anten 0,94, 1,8 ve 2,15 GHz orta frekanslarında çalışmakta olup bu frekanslarındaki geri dönüş kayıpları sırasıyla -18 dB, -27 dB ve -31dB'dir. Tasarlanan antenin bu frekanslardaki kazançları ise yine sırasıyla 3,74 dBi, 2,3 dBi ve 1,76 dBi'dir. Antenin 0,94 GHz'deki en yüksek verimi %78 iken, 1,8 GHz ve 2.15 GHz'deki en yüksek verim değerleri sırasıyla %79 ve %75'tir. Anten tasarımından sonra GSM900, GSM1800 ve UMTS2100 frekanslarındaki tüm sinyal güçlerini toplamak için T tipi eşleme kullanılarak bir doğrultucu tasarımı yapılmıştır. Gerilim doğrultucu çıkışında maksimum 5.6 V değeri 3 dBm giriş gücünde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

"RF enerji hasatlama, Üç bantlı mikroşerit anten, Doğrultucu, CST, ADS"

Abstract

Tri-band RF energy harvesting is a technique that involves harvesting energy from multiple radio frequency (RF) bands simultaneously. This approach offers higher energy harvesting efficiency and the ability to capture energy from a broader range of RF sources. In this study, antenna, and rectifier design were carried out for energy harvesting in the GSM900, GSM1800, and UMTS2100 cellular system frequencies. The designed antenna operates at frequencies of 0.94 GHz, 1.8 GHz, and 2.15 GHz, with return losses of -18 dB, -27 dB, and -31 dB, respectively. The gains of the designed antenna at these frequencies are 3.74 dBi, 2.3 dBi, and 1.76 dBi, respectively. The antenna achieves the highest efficiency of 78% at 0.94 GHz, while the highest efficiency values at 1.8 GHz and 2.15 GHz are 79% and 75%, respectively. Following the antenna design, a rectifier was designed using T-type matching to combine the power from the GSM900, GSM1800, and UMTS2100 frequencies. A maximum output voltage of 5.6 V was obtained at a 3 dBm input power level.

Key Words

"RF energy harvesting, Tri-band microstrip antenna, Rectifier, CST, ADS"

1. Giriş

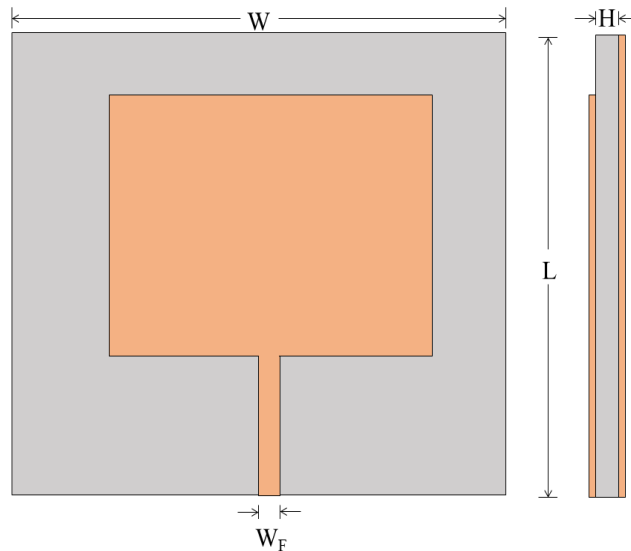
RF enerji hasadı, özellikle nesnelerin interneti (IoT) ile kablosuz ağlardaki enerji kısıtlaması sorunlarını ele almayı amaçlayan umut verici bir teknolojidir. Güç verimliliği sağlayan IoT uygulamalarına yönelik artan talep, bu cihazlara güç sağlamak için alternatif bir yaklaşım olarak, RF enerji hasadının araştırılmasına yol açmıştır. RF enerji hasadı, radyo frekansı (RF) dalgalarının elektrik enerjisine dönüştürülmesini sağlar ve bu enerji daha sonra pillere veya harici güç kaynaklarına ihtiyaç duyulmadan IoT cihazlarına güç sağlamak için kullanılabilir (Wang et al., 2021). Bu teknoloji esnekliği, taşınabilirliği ve uzun süreli çalışma potansiyeli nedeniyle dikkat çekmiş ve zorlu ortamlarda konuşlandırılan veya güç kaynaklarına sınırlı erişimi olan IoT cihazları için özellikle uygun hale gelmiştir (Sherazi et al., 2022). RF enerji hasadındaki en önemli zorluklardan biri, özellikle hasat edilen RF gücü küçük olduğunda, RF'den DC'ye enerji dönüşüm verimliliğinin düşük olmasıdır (Lu et al., 2015). Bununla birlikte, son gelişmeler RF enerji hasat sistemlerinin performansını artırmaya odaklanmıştır. Örneğin, tek bantlı sistemlerin sınırlamalarının üstesinden gelmek ve enerji hasadı verimliliğini artırmak için çok bantlı RF enerji hasadı ön uç sistemlerinin geliştirilmesi araştırılmıştır. Bu sistemler, enerji hasadı sürecini optimize etmek için antenler, empedans eşleştirme ağları ve RF-DC doğrultucular gibi devreler içermektedir (Lee et al., 2023). Çok bantlı RF enerji hasadı kavramı, birden fazla frekans bandından gelen radyo frekansı (RF) dalgalarının elektrik enerjisine dönüştürülmesini içerir. Bu enerji daha sonra kablosuz sensörler, IoT cihazları ve iletişim sistemleri gibi çeşitli cihazlara güç sağlamak için kullanılabilir. Birden fazla frekans bandından enerji hasat ederek, genel enerji hasat verimliliği artırılabilir ve sistem farklı çevresel koşullara ve RF kaynaklarına uyum sağlayabilir.

Çok bantlı RF enerji hasadını uygulamak için çeşitli bileşenler ve teknikler kullanılır. Bunlar arasında çok bantlı antenler, empedans eşleştirme ağları ve RF-DC doğrultucular yer almaktadır (Lee et al., 2023). Çok bantlı antenler, farklı bantlardan RF enerjisinin yakalanmasına izin verecek şekilde birden fazla frekansta rezonansa girecek şekilde tasarlanmıştır (Sabaawi et al., 2022). Empedans eşleştirme ağları, anten ile enerji toplama devresi arasındaki enerji transferini optimize etmek için kullanılır. RF-DC doğrultucular, RF enerjisini kullanılabilir DC gücüne dönüştürmekten sorumludur (Adam et al., 2018). (Boursianis et al., 2021)'de dış mekan RF enerji uygulamaları için üç bantlı tek katmanlı bir anten önerilmiştir. Önerilen sistem LoRa, GSM-1800 ve UMTS-2100 frekans bantlarında çalışmaktadır. Önerilen antenin nihai geometrisi Moth Search algoritması kullanılarak elde edilmiştir. RF-DC doğrultucu Greinacher topolojisine dayalı olarak tasarlanmıştır. (Kuhn, Lahuec, Seguin & Person, 2015)'de ise, kablosuz haberleşme ağlarında RF enerji hasadı için GSM-900, GSM-1800, UMTS-2100 ve WiFi bantlarını kapsayacak şekilde bir sistem tasarlanmıştır. Üretilen prototipde, dört RF kolunun her birinde ayarlanan 0 dBm giriş gücünde %84 RF-DC dönüşüm verimliliği elde edilmiştir. Tek bantlı bir sistem ile karşılaştırıldığında verimlilik, iki katından fazladır.

Bu çalışmada CST Microwave Studio (CST) kullanılarak standart dikdörtgen yama antenlerden farklı olarak yarıklı besleme hattı kullanılan ve dikey ve yatay oluklar açılarak üç bantlı anten tasarlanmıştır. Ayrıca bu bantları kapsayan empedans eşlemeli doğrultucu tasarımı yapılmıştır. Bu doğrultucu Advanced Design System (ADS) programında hücresel sistemlerde sıklıkla kullanılan 900 MHz, 1800 MHz ve 2100 MHz frekanslarında (Korunur Engiz & Kurnaz, 2016) kapsayacak, üç katlı olacak şekilde tasarlanmıştır.

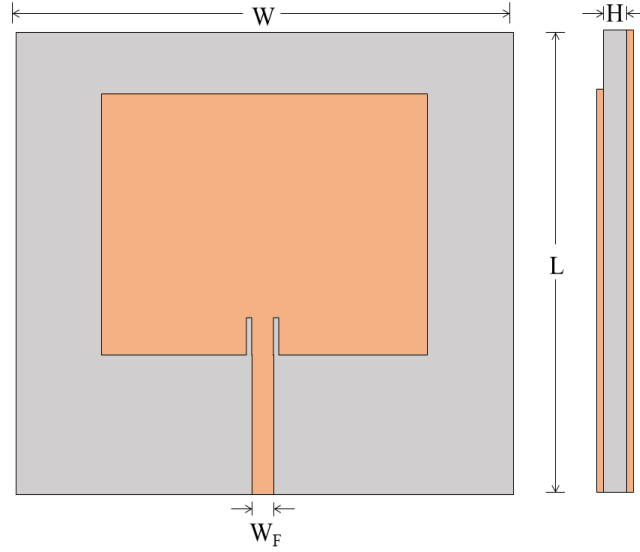
2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, GSM900, GSM1800 ve UMTS2100 frekans bantlarında (aşağı hat, downlink) RF enerji hasatlama uygulamaları için bir dikdörtgen mikroşerit yama anten önerilmiştir. Ayrıca belirtilen frekanslarda doğrultucu tasarımı da yapılmıştır. Standart dikdörtgen yama antenlerin dört tane tasarım parametresi vardır. Bu parametreler mikroşerit yama uzunluğu ve genişliği, toprak düzleminin uzunluğu ve genişliği, dielektrik malzemenin uzunluğu ve genişliği ve dielektrik malzemenin kalınlığıdır. Standart yama antenin görüntüsü Şekil 1' de verilmiştir.



Şekil 1. Standart mikroşerit yama antene ait görüntü.

Şekil 1'deki gibi standart mikroşerit anten beslemesi yüksek bir giriş empedansı sağlamaktadır. Bu yüzden yama merkeze daha yakın beslenirse giriş empedansı ($Z=V/I$) azaltılabilir. Bunun, Şekil 2'de gösterildiği gibi bir yarıklı besleme yöntemi kullanılmaktadır.



Şekil 2. Yarıklı beslemeli mikroşerit anten.

Eşitlik (1)'de antenin yama genişliğine ait matematiksel ifade verilmiştir.

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

Eşitlik (2)'de ise mikroşerit antenin yama uzunluğunun ifadesi verilmiştir.

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (2)$$

Buradaki c ışık hızı, ϵ_r dielektrik sabiti, ϵ_{eff} dielektrik sabitinin efektif değerini, f_r rezonans frekansını ve ΔL ise yama uzunluğunun değişimini ifade eder.

Antenin toprak düzleminin uzunluğu (L_g) ve genişliği (W_g) (3) ve (4) eşitliklerinde verildiği gibidir.

$$L_g = 6h + L \quad (3)$$

$$W_g = 6h + W \quad (4)$$

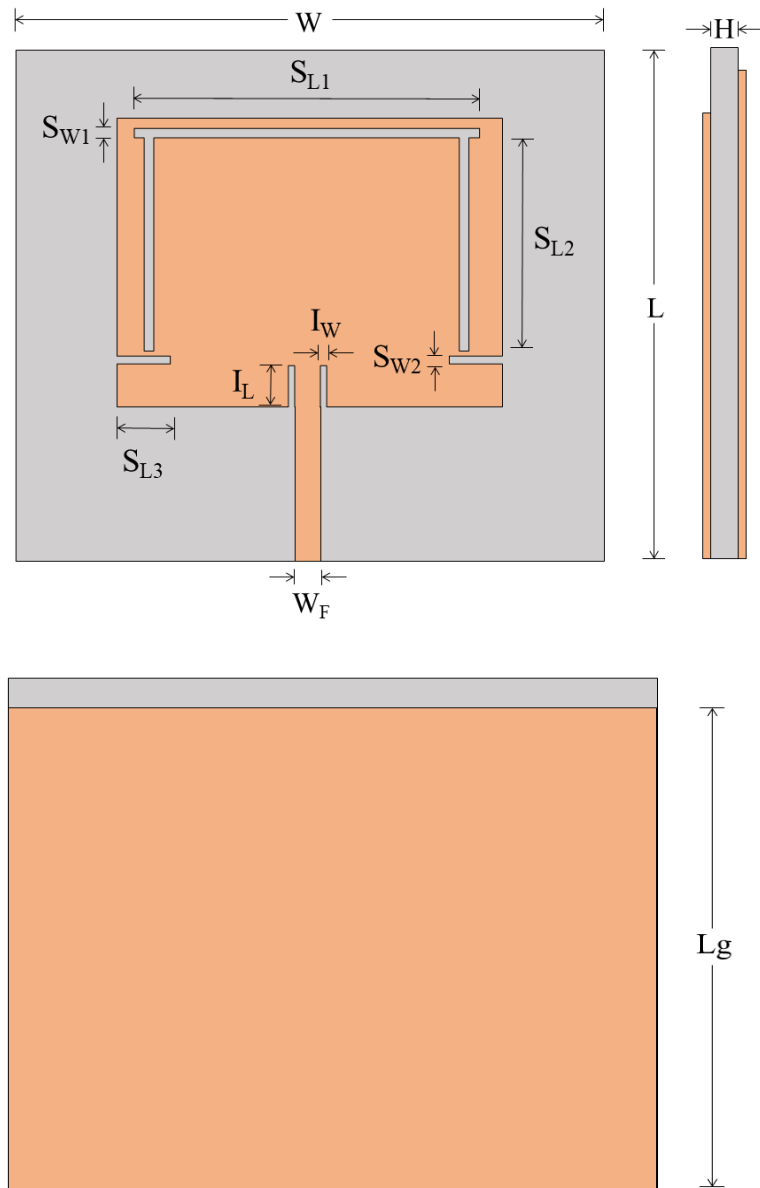
Buradaki h dielektrik malzemenin kalınlığını ifade etmektedir.

Antenin üç bantlı tasarımı aşamalarından ilkinde bant sayısını ikiye çıkarmak amacıyla antenin sağına ve soluna iki adet dikey yarık açılmıştır. Bu yarıklar sonrasında antenin 1800 MHz ve 2100 MHz' de çalışması sağlanmıştır. En yoğun kullanılan kablosuz haberleşme frekanslarından biri olan 900 MHz frekansı için mikroşerit yamanın üst kısmına yatay yarık açılmıştır. Antenin geometrik parametreleri ve bunlara karşılık gelen değerler Şekil 3'de, değerler ise Tablo 1'de verilmiştir. Toprak ve yama malzemesi olarak 0.035 mm kalınlığında bakır kullanılmıştır. Dielektrik malzeme olarak $\epsilon_r=4,2$ olan 1,5 mm kalınlığında FR-4 kullanılmıştır.

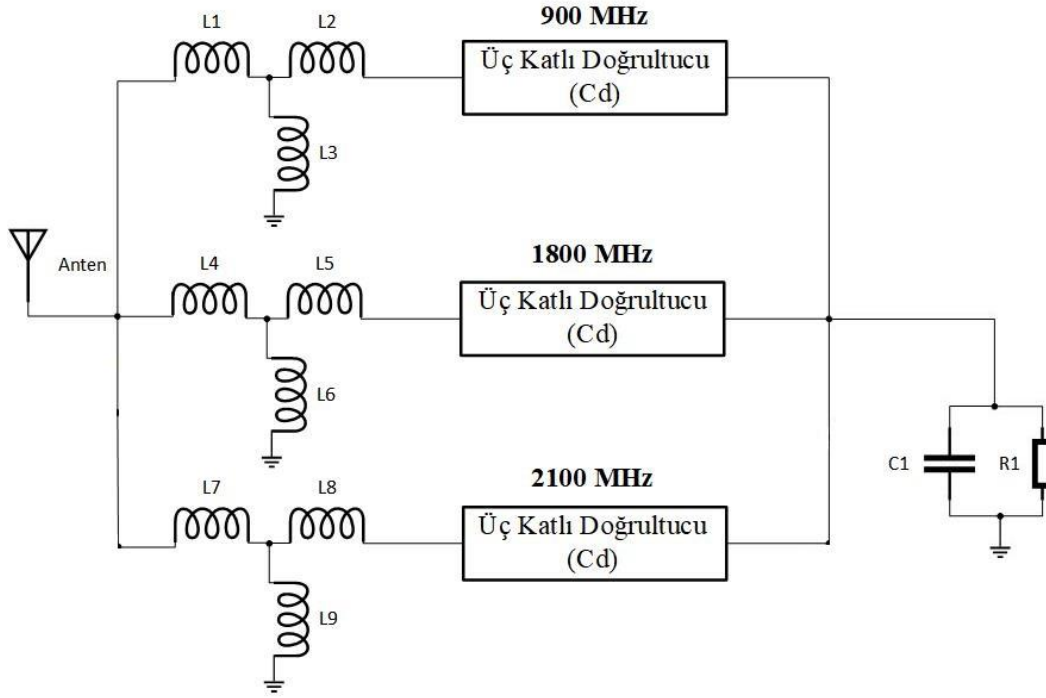
Tablo 1. Önerilen anten için ölçüler.

Parametre	Boyut (mm)	Parametre	Boyut (mm)
W	56,2	S _{W1}	1,5
L	57,8	S _{W2}	1
L _g	54,3	I _L	4,56
S _{L1}	42,65	I _W	0,65
S _{L2}	26,1	H	1,5
S _{L3}	6,9	W _F	2,8

Anten ölçüleri ve açılan yarık ölçüleri CST Studio programında “Trust Region Framework” algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. Optimize edilen antenin ön ve arka yüzü Şekil 3’de gösterilmiştir.

**Şekil 3.** Önerilen antenin ön ve arka yüzü.

Önerilen üç bantlı anten tarafından toplanan sinyalleri doğrultup DC gerilime çevirmek için eşleştirme ağı ve üç katlı Villard doğrultucu tasarımı yapılmıştır. Doğrultucu 5-7 katlı olduğunda RF-DC verimliliği önemli derecede düşmektedir. Kat sayısı 1-2 olduğunda ise istenilen DC çıkış elde edilememektedir. Bu yüzden doğrultucu üç katlı olarak seçilmiştir. Doğrultucu 900 MHz, 1800 MHz ve 2100 MHz frekanslarını temsil eden üç kol şeklinde tasarlanmıştır. Tasarımın diyagramı Şekil 4'te gösterilmiştir.



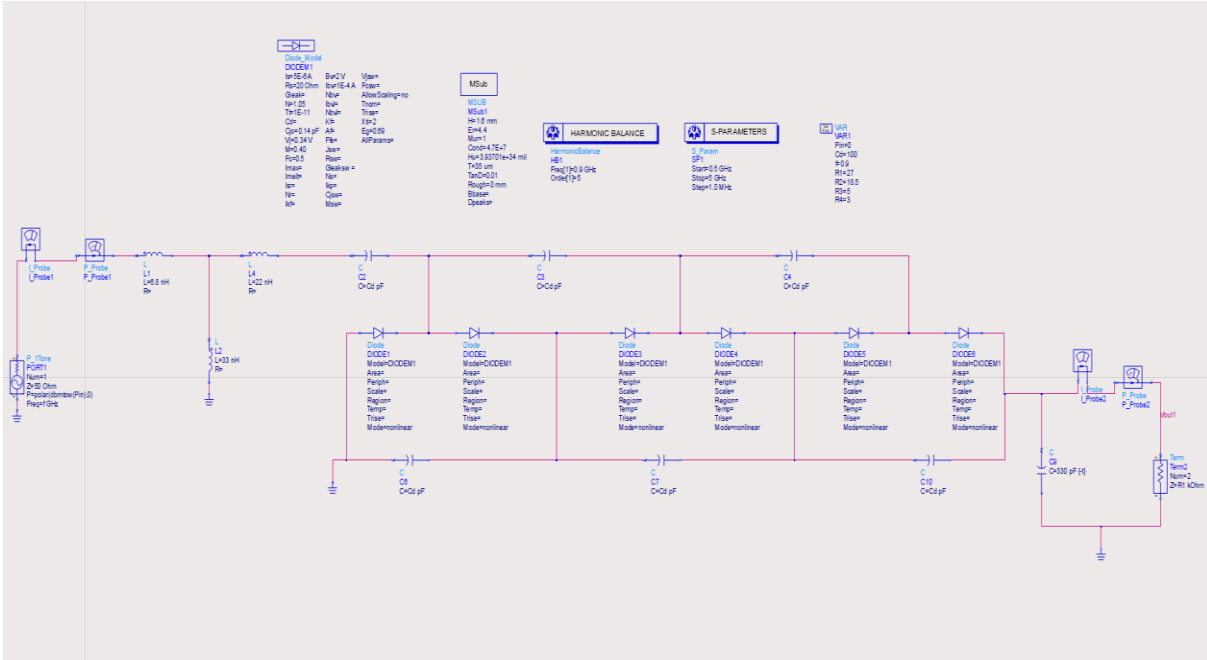
Şekil 4. Üç bantlı doğrultucu tasarımı

Üç katlı doğrultucu ve anten arasında T tipi toplu elemanlı eşleme ağı kullanılmıştır. Eşleme ağı belirtilen frekanslarda doğrultucu rezonansa sokarak verimliliği artırmaktadır. Şekil 4'te görülen kapasitör indüktör ve direnç değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Doğrultucu kısmında verilen Cd kapasitörleri, kuplaj kapasitörlerini göstermektedir.

Tablo 2. Önerilen doğrultucu için eleman değerleri.

Parametre	Değer	Parametre	Değer
L1	6,8 nH	L7	5,6 nH
L2	22 nH	L8	3,3 nH
L3	33 nH	L9	4,7 nH
L4	3,3 nH	Cd	100 pF
L5	5,6 nH	C1	330 pF
L6	4,7 nH	R1	30 kΩ

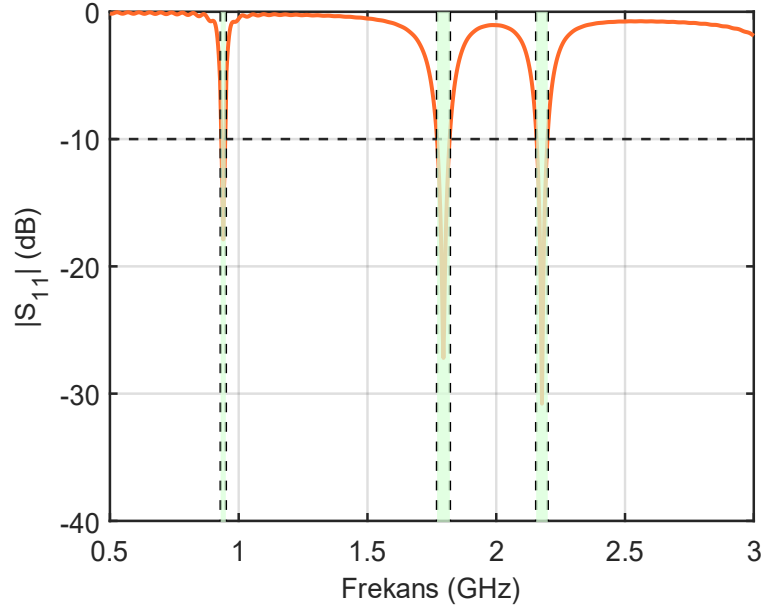
Yüksek frekanslarda doğrultma yapılacağı için tasarımda hızlı anahtarlama yapabilen Shottky diyotlar kullanılması gerekmektedir. Bu yüzden tasarımda çift diyotlu SMS7690-005LF elemanı kullanılmıştır. Diyot modeli ile tasarlanan doğrultucunun Advanced Design System programında 900 MHz kolu için tasarımı Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Önerilen doğrultucunun ADS programındaki görüntüsü.

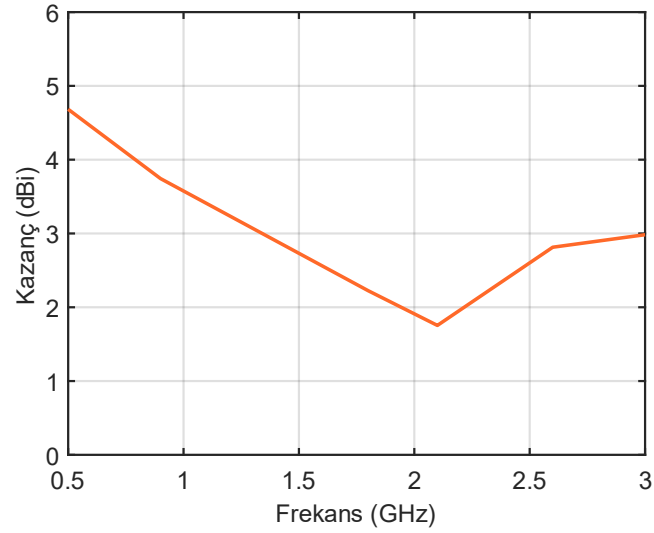
3. Benzetim Sonuçları

Önerilen antenin geri dönüş kaybı Şekil 6' da gösterilmiştir. Antenin 0,93-0,95 GHz aralığında 1,78-1,82 aralığında ve 2,13-2,17 aralığında geri dönüş kaybı -10 değerinin altındadır. Ayrıca antenin rezonans frekanslarındaki geri dönüş kaybı 0,94 için -18 dB, 1,8 GHz için -27 dB ve 2,15 için -31 dB'dir.



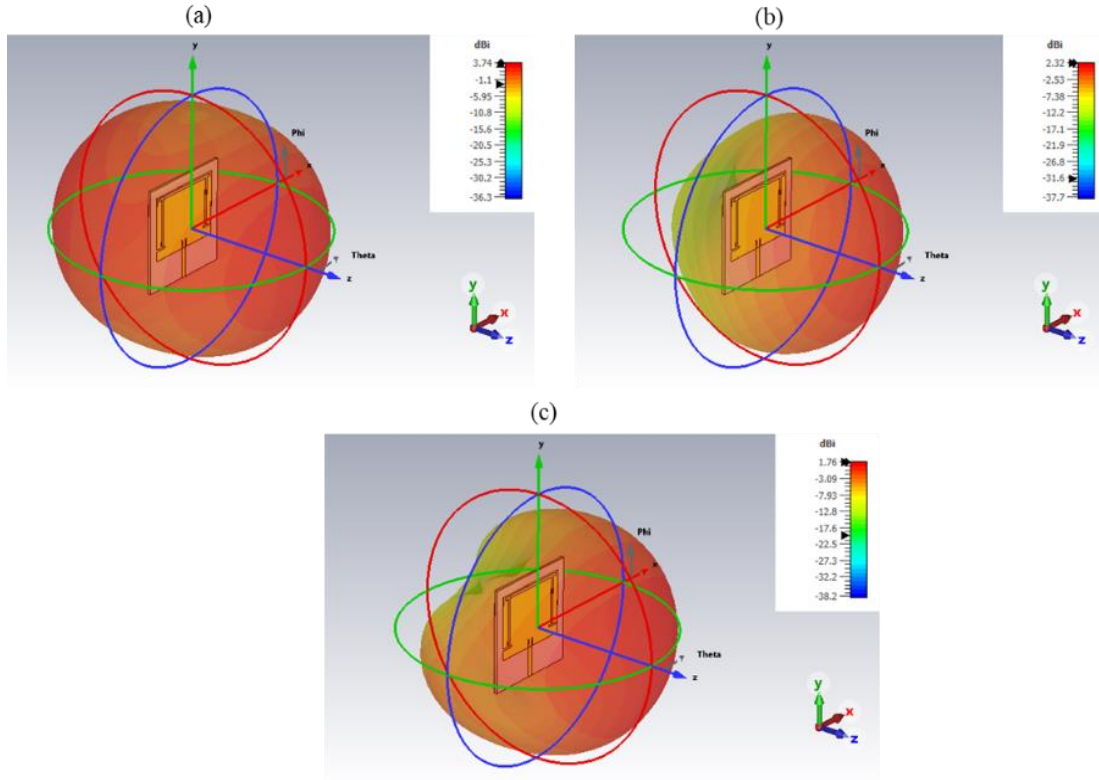
Şekil 6. Önerilen antenin geri dönüş kaybı.

Önerilen antenin frekansa göre kazanç değişimi Şekil 7' de verilmiştir. Bu antende kazanç 0,94 GHz için 3,74 dBi, 1,8 GHz için 2,3 dBi ve 2,15 GHz için ise 1,76 dBi değerindedir.



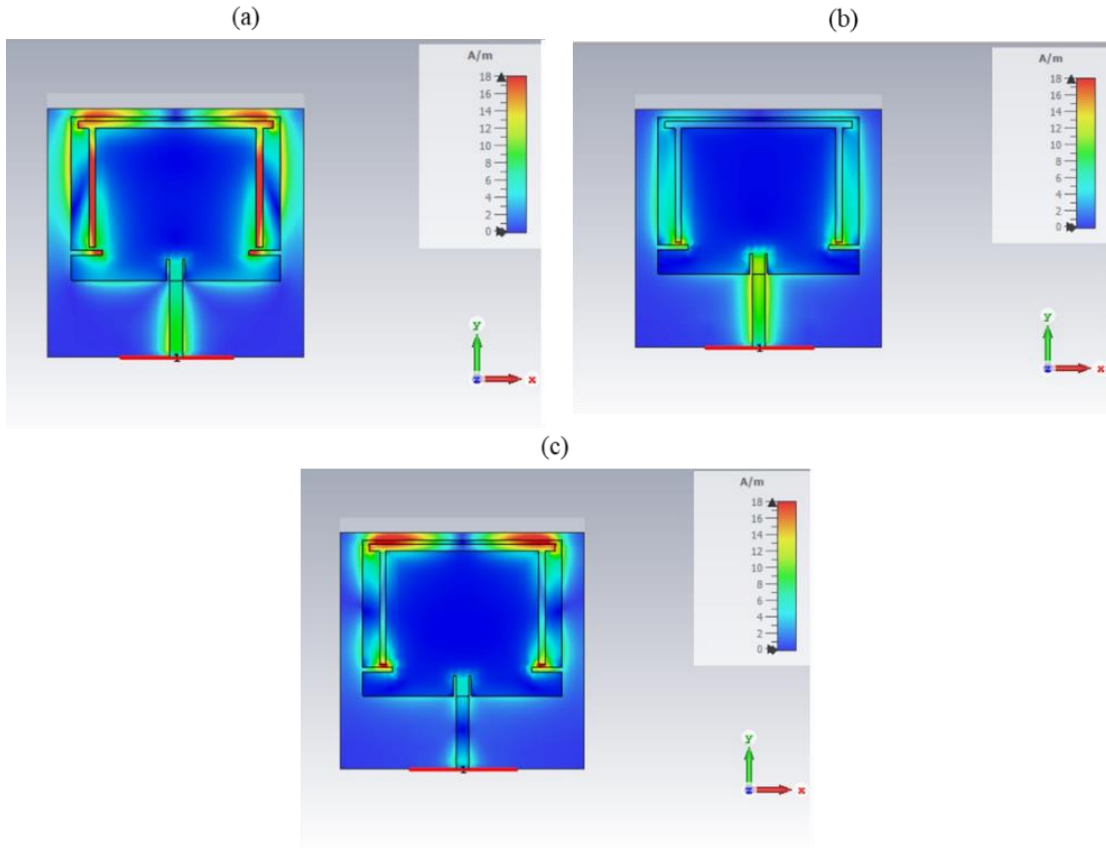
Şekil 7. Önerilen üç bant antenin kazancın frekansla değişimi.

Önerilen antenin ışıma desenlerin üç boyutlu olarak Şekil 8’ de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi tasarlanan anten üç bant için de eşyöneldir.



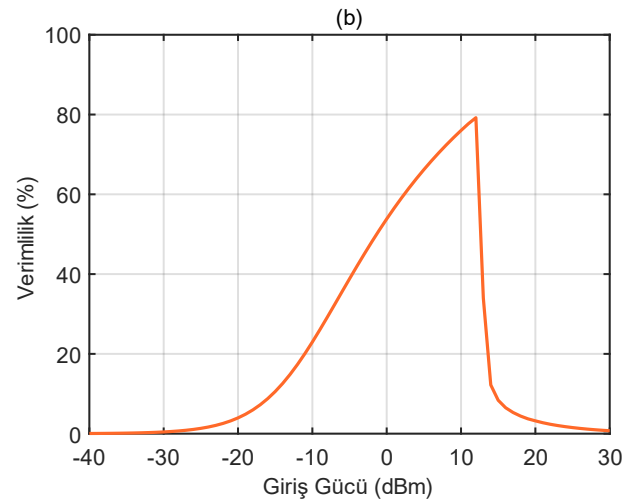
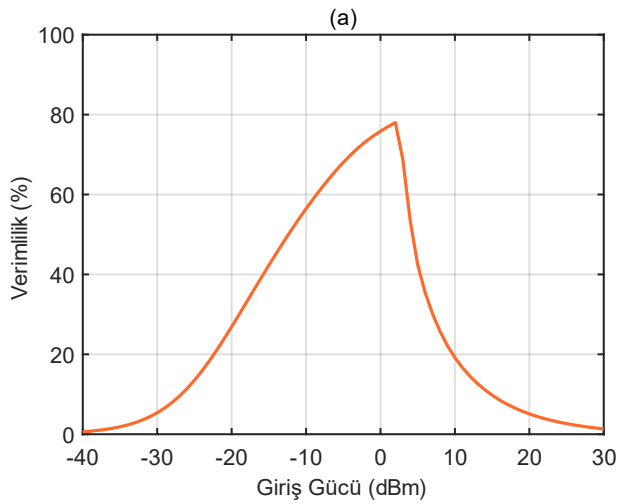
Şekil 8. Önerilen üç bant antenin üç boyutlu ışıma deseni a) 0,94 GHz, b) 1,8 GHz, c) 2,15 GHz.

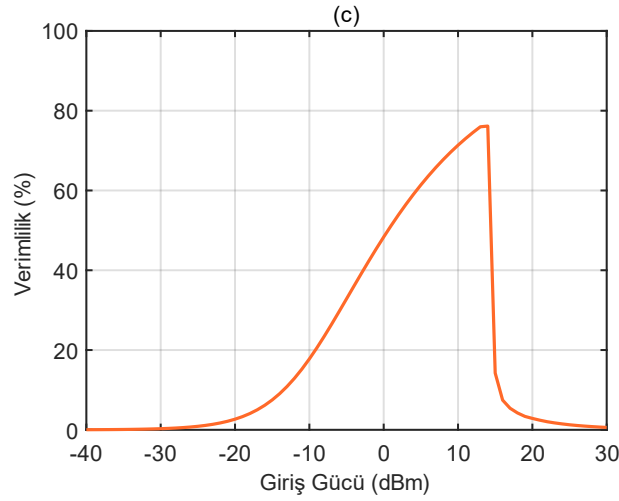
Tasarlanan antenin yüzey akım yoğunlukları Şekil 9’ da gösterilmiştir. Yüzey akımları 0,94 GHz’de antenin alt kısımlarında yoğunken 1,8 ve 2,15 GHz’de yüzey akımları yan ve üst yarık çevresinde daha yoğundur.



Şekil 9. Önerilen üç bant antenin yüzey akımlarının gösterimi a) 0,94 GHz, b) 1,8 GHz, c) 2,15 GHz.

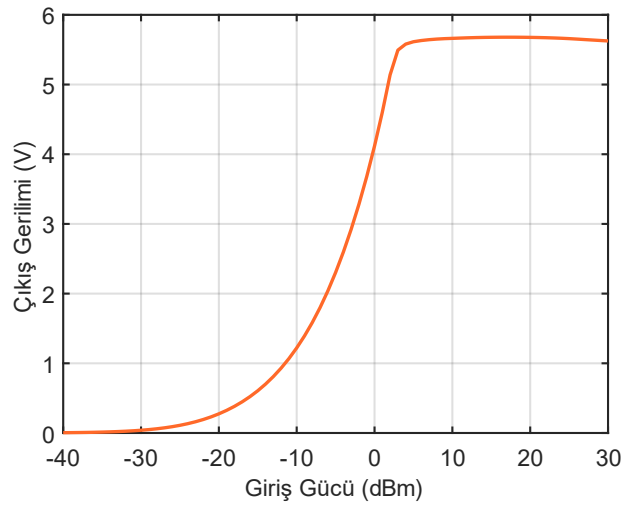
Tasarlanan doğrultucuda kolların verimlilikleri Şekil 10'da verilmiştir. 0,94 GHz'de giriş gücünün 2 dBm olduğu değerde verimlilik en yüksek değerine ulaşmıştır. GSM-900' de verimliliğin tepe değeri %78'dir. 1,8 GHz' de giriş gücünün 12 dBm olduğu değerde verimlilik en yüksek değerine ulaşmıştır. GSM1800' de verimliliğin tepe değeri yaklaşık %79'dir. 2,15 GHz'de ise giriş gücü 14 dBm olduğunda verimlilik en yüksek değeri %75 değerine ulaşmıştır.





Şekil 10. Üç bantlı doğrultucunun verimliliği a) 0,94 GHz, b) 1,8 GHz, c) 2,15 GHz.

Tasarlanan gerilim doğrultucusu çıkışı Şekil 11’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi gerilim doğrultucu çıkışında en yüksek çıkış değeri 5,6 V olarak 3 dBm giriş gücü için elde edilmiştir.



Şekil 11. Üç bantlı doğrultucunun çıkış gerilimi grafiği.

4. Sonuç

Bu çalışmada, RF enerji hasatlama uygulamaları için üç bantlı dikdörtgen mikroşerit yama anten tasarlanmıştır. Tasarlanan anten 0,93 – 0,95 GHz, 1,78 – 1,82 GHz ve 2,13 – 2,17 GHz aralığında çalışmaktadır. Geri dönüş kayıpları sırayla 0,94, 1,8 ve 2,15 GHz için sırayla en düşük -18, -27, -30 dB’ dir. Antenin en yüksek kazancı 0,94 GHz’de 3,74 dBi’dir. Tasarlanan doğrultucu T tipi empedans eşleme ağı ise belirtilen üç farklı frekansta çalışabilmektedir. Doğrultucunun 0,94, 1,8, 2,15 GHz için verimlilikleri sırasıyla %78, %79 ve %75’dir. Ayrıca doğrultucu Çıkışında gerilim maksimum 5,6 V olarak analiz edilmiştir. Benzetim sonuçlarına göre önerilen üç bantlı anten GSM900, GSM1800 ve UMTS2100’ ün aşağı hat (downlink) frekanslarını büyük bir kısmını kapsamaktadır. Üç bantlı doğrultucu ise belirtilen frekanslarda doğrultma yaparak tüm RF enerji hasatlama uygulamalarında kullanılabilir.

Referanslar

- Adam, I., Yasin, M., Rahim, H., Soh, P., Abdulmalek, M. (2018). A Compact Dual-band Rectenna for Ambient Rf Energy Harvesting. *Microw Opt Technol Lett*, 11(60), 2740-2748. <https://doi.org/10.1002/mop.31475>
- Boursianis, A. D., Papadopoulou, M. S., Koulouridis, S., Rocca, P., Georgiadis, A., Tentzeris, M. M., & Goudos, S. K. (2021). Triple-band single-layer rectenna for outdoor RF energy harvesting applications. *Sensors*, 21(10), 3460.

- Das, D., Xu, Z., Nasrollahpour, M., Martos-Repath, I., Zaeimbashi, M., Khalifa, A., & Onabajo, M. (2023). Circuit-level Modeling and Simulation of Wireless Sensing and Energy Harvesting with Hybrid Magnetolectric Antennas for Implantable Neural Devices. *IEEE Open J. Circuits Syst.*, (4), 139-155. <https://doi.org/10.1109/ojcas.2023.3259233>
- Jung, J., Kwon, I. (2022). A Capacitive DC-DC Boost Converter with Gate Bias Boosting and Dynamic Body Biasing for an RF Energy Harvesting System. *Sensors*, 1(23), 395. <https://doi.org/10.3390/s23010395>
- Korunur Engiz B., & Kurnaz, Ç. (2016). Comparison of Signal Strengths of 2G/3G/4G Services on a University Campus. *International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers*, Special Issue (2016), 37-42. DOI: 10.18100/ijamec.270710
- 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.
- Lee, Y., Ramiah, H., Choo, A., Churchill, K., Lai, N., Lim, C., & Martins, R. (2023). High-performance Multiband Ambient RF Energy Harvesting Front-end System for Sustainable IoT Applications—a Review. *IEEE Access*, (11), 11143-11164. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3241458>
- Lu, X., Wang, P., Niyato, D., Kim, D., Han, Z. (2015). Wireless Networks with RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey. *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, 2(17), 757-789. <https://doi.org/10.1109/comst.2014.2368999>
- Mouapi, A. (2022). Radiofrequency Energy Harvesting Systems for Internet of Things Applications: A Comprehensive Overview of Design Issues. *Sensors*, 21(22), 8088. <https://doi.org/10.3390/s22218088>
- Rao, A., Aziz, A., Aljaloud, K., Qureshi, M., Muhammad, A., Rafique, A., & Hussain, R. (2022). Concomitance Of Radio Frequency Energy Harvesting and Wearable Devices: A Review of Rectenna Designs. *Int J RF Mic Comp-Aid Eng*, 12(32). <https://doi.org/10.1002/mmce.23536>
- Sabaawi, A., Sultan, Q., Najm, T. (2022). Design and Implementation of Multi-band Fractal Slot Antennas for Energy Harvesting Applications. *Period. Polytech. Elec. Eng. Comp. Sci.*, 3(66), 253-264. <https://doi.org/10.3311/ppee.20301>
- Sherazi, H., Zorbas, D., & O'Flynn, B. (2022). A Comprehensive Survey on RF Energy Harvesting: Applications and Performance Determinants. *Sensors*, 8(22), 2990. <https://doi.org/10.3390/s22082990>
- Singla, J., Mahajan, R., Bagai, D. (2022). An Energy-efficient Technique for Mobile-wireless-sensor-network-based IoT. *ETRI Journal*, 3(44), 389-399. <https://doi.org/10.4218/etrij.2021-0084>
- Soares, S., Carvalho, M. (2022). An Analytical Model for the Aggregate Throughput of IEEE 802.11ah Networks Under the Restricted Access Window Mechanism. *Sensors*, 15(22), 5561. <https://doi.org/10.3390/s22155561>
- Wang, M., Zhang, Y., Tang, K., Yan, N., Min, H. (2021). A Wide Input Range Energy Harvesting System for AM Broadcast with Capacitor Load. *Electronics Letters*, 12(57), 469-471. <https://doi.org/10.1049/el12.12101>