



Araştırma Makalesi / Research Article

RF enerji hasatlama için 915 MHz taşıyıcı frekansında mikroşerit anten tasarımı ve uygulaması

*Design and implementation of microstrip antenna at 915 MHz carrier frequency for RF energy harvesting*Hussein YOUSEFALTURK¹, Mustafa CANSIZ^{2*}¹ Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır, Türkiye, huseyin90alturk@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5237-4448>² Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır, Türkiye, mustafa.cansiz@dicle.edu.tr, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2534-9770>

MAKALE BİLGİLERİ

ÖZ

Makale Geçmişi:

Geliş 29 Temmuz 2022
Revizyon 5 Ağustos 2022
Kabul 7 Ağustos 2022
Online 30 Eylül 2022

Anahtar Kelimeler:

Enerji hasatlama, Mikroşerit anten, RF sinyali, Anten tasarımı, HFSS

Radyo Frekansı (RF) enerji hasatlama sistemleri günümüzde alternatif bir enerji kaynağı olarak adlandırılmakta ve ortamda bulunan mevcut elektromanyetik enerjinin kullanılmasını hedeflemektedir. Bu enerji hasatlama sistemlerinin amaçlarından biri, düşük güç tüketimine sahip haberleşme sistemleri ile birlikte kullanılıp batarya ömrünü uzatmaktır. RF enerji hasatlama sistemi; anten, empedans uyumlandırma, RF doğrultucu devresi, DC filtre devresi ve yükten oluşmaktadır. Bu çalışmada, 915 MHz taşıyıcı frekansında ve 200 MHz bant genişliğinde bir mikroşerit anten modeli elektromanyetik yapıları sonlu elemanlar yöntemi ile çözen HFSS programı yardımıyla tasarlanmıştır. Önerilen 79x100x1.6 mm³ anten boyutu, parametrik analiz kullanılarak optimize edilmiştir. Daha sonra tasarlanan anten, düşük profilli FR4 alt katmanı üzerinde imal edilmiştir. Son aşamada vektör network analizör cihazı ile antenin ölçümleri alınmış ve geri dönüş kaybı, VSWR ve ışınma paterni gibi özellikleri değerlendirilmiştir. Tasarlanan anten kazancının 2.38 dB olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca, antenin ölçüm ve simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Son olarak, bu çalışmanın sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, önerilen antenin 915 MHz taşıyıcı frekansında çalışan RF enerji hasatlama sistemleri için uygun bir anten olduğu tespit edilmiştir.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received 29 July 2022
Received in revised form 5 August 2022
Accepted 7 August 2022
Available online 30 September 2022

Keywords:

Energy harvesting, Microstrip antenna, RF signal, Antenna design, HFSS

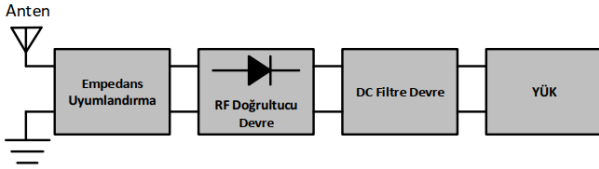
Nowadays, Radio Frequency (RF) energy harvesting systems are called an alternative energy source and target to use the electromagnetic energy available in the environment. One of the purposes of these energy harvesting systems is to extend battery life by being used with communication systems with low power consumption. RF energy harvesting system consists of antenna, impedance matching, RF rectifier circuit, DC filter circuit and load. In this study, a microstrip antenna model with a carrier frequency of 915 MHz and a bandwidth of 200 MHz was designed with the help of HFSS program that solves electromagnetic structures by finite element method. The proposed antenna size of 79x100x1.6 mm³ has been optimized using parametric analysis. Later, designed antenna was fabricated on a low profile FR4 substrate. In the last step, the measurements of the antenna were taken by the vector network analyzer device and the characteristics such as return loss, VSWR and radiation pattern were evaluated. The designed antenna gain was calculated as 2.38 dB. In addition, it has been observed that the measurement and simulation results of the antenna are compatible. Finally, considering the results of this study, it has been determined that the proposed antenna is suitable for RF energy harvesting systems operating at 915 MHz carrier frequency.

Doi: 10.24012/dumf.1150600

* Sorumlu Yazar

Giriş

Günümüz koşullarında akıllı telefonlar, tabletler ve sensörler gibi birçok pilli veya pilsiz düşük güçlü cihazlar sabit güç ihtiyacı duymaktadır. Bu nedenle, düşük güçlü alternatif enerji elde etme yöntemleri popüler hale gelmektedir. Düşük bakım maliyeti, uzun ömürlü olması ve güç kaynağının sürekliliği insanların ihtiyaçları doğrultusunda gereksinim duyulan en önemli kriterler arasında yer almaktadır. Buna bağlı olarak, günümüzde ve gelecekte kullanılacak en önemli yöntemlerden biri radyo ve mikrodalga frekanslarından enerji hasatlamaktır [1]. Son zamanlarda RF enerji hasatlama teknolojisinde çok ilerlemeler kaydedilmiştir [2], [3]. Özel bir kaynaktan veya ortamda bulunan RF enerjinin hasatlanması, düşük güçlü cihazların kablosuz olarak şarj edilmesini sağlamakta ve ayrıca ürün tasarımı, kullanım kolaylığı ve güvenilirlik açısından avantajlar sağlamaktadır [4]. Radyo frekanslı enerji hasatlama sistemleri, düşük güç tüketimi olan cihazlar için etkin bir çözüm olarak ortaya çıkmakta ve bu sistemlerin temel amacı, düşük güç tüketimli haberleşme sistemleri ile birlikte kullanılarak pil ömrünü uzatmaktır. RF enerji hasatlama sistemi, anten, empedans uyumlandırma, RF doğrultucu devresi, DC filtre devresi ve yükten oluşmaktadır [5].

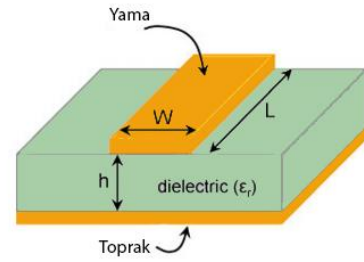


Şekil 1. RF enerji hasatlama blok şeması [6].

Şekil 1'de görüldüğü gibi, RF enerji hasatlama sisteminin ilk bileşeni olan anten, ortamdaki elektromanyetik sinyallerin alınmasından sorumludur. Empedans uyumlandırma devresi, doğrultucu devre ile anten girişi arasındaki empedans uyumsuzluğunu ortadan kaldırmaktadır. Dolayısıyla, empedans uyumlandırma devresi sistemdeki kayıpları önlemektedir. Daha sonra doğrultulan sinyalin DC çıkış gücü yüke aktarılmadan önce DC filtre devresi tarafından filtrelenmektedir. Hasat edilen enerji miktarı, ortamdaki güç yoğunluğuna, güç dönüşümünün verimliliğine (RF'den DC'ye) ve RF enerji hasatlama sisteminin boyutuna bağlıdır. Diğer bir deyişle, RF enerji hasatlama sisteminin performansı empedans uyumu, doğrultucu devresi ve en önemlisi antenin verimliliğine bağlıdır [7]. 2019 yılında RF enerji hasatlama sistemlerinin verimliliği ile ilgili kapsamlı bir inceleme yapılmıştır. Yapılan çalışmada, bir RF enerji hasatlama sisteminin performansının, iletim gücü, yayılma mesafesi, frekans bandı, çalışma gerilimi, anten kazancı ve anten sayısı gibi birçok faktöre bağlı olduğu belirtilmiştir [8]. Bu bilgiler ışığında, RF enerji hasatlama sisteminin en önemli bileşeni antendir, çünkü anten ortamdaki var olan elektromanyetik sinyallerin alıcısı olarak çalışmaktadır. Bu yüzden, bu çalışmada RF enerji hasatlama sistemleri için bir mikroşerit anten tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir.

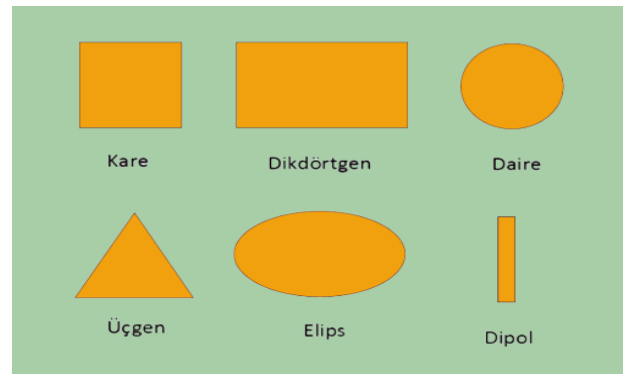
Mikroşerit Antenler

Mikroşerit anten veya yama anten olarak adlandırılan anten, küçük boyutlarının yanı sıra analiz ve kurulum kolaylığı nedeniyle yaygın olarak kullanılan antenlerden biri haline gelmiştir. Genellikle bu anten 1 GHz'den yüksek olan frekanslarda daha çok kullanılır. Örneğin bu antenler mobil cihazlar, uçaklar ve uydular gibi birçok uygulamada kullanılmaktadırlar. Mikroşerit anten, Şekil 2'de gösterildiği gibi bakır veya altın gibi iletken ve Rogers veya FR4 gibi yalıtkan iki katmandan oluşmaktadır. Üst kısım L uzunluğuyla ve W genişliğiyle yama şeklinde, alt kısım ise toprak yüzeyi temsil etmekte ve bunların arasında h kalınlığıyla elektrik yalıtkanı bulunmaktadır.



Şekil 2. Mikroşerit antenin yapısı.

Mikroşerit antenlerin avantajları; küçük boyutlu, düşük profilli, hafif, düzlemsel ve düzlemsel olmayan yüzeylere uyumlu olmasıdır. Montaj sırasında yapının çok az bir hacmini doldurur. Modern baskılı devre teknolojisi kullanılarak üretimi basit ve ucuzdur. Ancak, mikroşerit antenlerin dezavantajları da vardır. Mikroşerit antenlerin başlıca dezavantajları şunlardır: düşük verimlilik, %5'ten daha az dar bant genişliği, radyasyon yaması ve toprak düzlemi arasındaki küçük ayırım nedeniyle düşük RF gücüdür (yüksek güçlü uygulamalar için uygun değildir). Mikroşerit antenlerin yaması, Şekil 3'te görüldüğü gibi birkaç farklı şekle sahiptirler, ancak en popülerleri kare, dikdörtgen ve dairesel olanlardır.



Şekil 3. Mikroşerit anten yamaları.

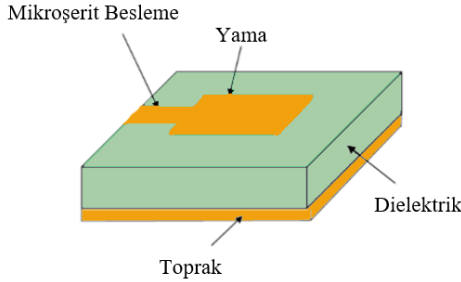
İyi performanslı bir anten elde etmek için, genel olarak düşük dielektrik sabiti olan bir yalıtkan tercih edilmelidir, çünkü bu daha büyük bant genişliği ve daha iyi ışıma ve aynı zamanda daha fazla verimlilik sağlayacaktır [9]. Literatürdeki çalışmalarda çoğunlukla dikdörtgen veya dairesel mikroşerit anten yamaları tercih edilmiştir.

Mikroşerit Antenlerin Besleme Teknikleri

Mikroşerit antenleri beslemek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır ve bunlar temel olarak iki ana bölüme ayrılır: temaslı besleme yöntemi ve temassız besleme yöntemi. Temaslı yöntemde, RF sinyali bir konnektör kullanılarak doğrudan anten yamasına iletilmektedir. Temassız yöntemde ise, besleme hattı ile ışıma yapan yamanın arasında elektromanyetik kuplaj kullanılmaktadır. Birçok yöntem bu iki ana yöntemden çoğaltılmıştır, ancak en çok tercih edilen teknikler aşağıdaki gibidir [10]:

- Mikroşerit hat besleme
- Koaksiyel besleme
- Açıklık kuplajlı besleme
- Yakınlık kuplajlı besleme

Bu çalışmada mikroşerit hat besleme yöntemi kullanılmıştır. Şekil 4'te görüldüğü gibi, bu yöntemde bir bağlantı şeridi eklenir ve mikroşerit hattı doğrudan antenin kenarına bağlanmaktadır.



Şekil 4. Mikroşerit hat besleme.

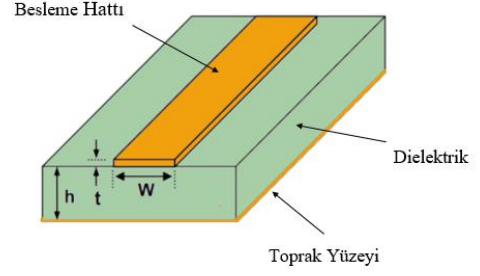
Bu besleme türü diğer yöntemlere göre bağlanması ve üretilmesi en kolay olanıdır. Ayrıca, besleme hattı ile yama arasındaki giriş empedansını eşleştirmek kolaydır. Bu nedenle mikroşerit besleme yöntemi en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir.

Mikroşerit Antenlerin Analiz Modelleri

Mikroşerit antenleri analiz etmek için kullanılan en popüler modeller aşağıda listelenmiştir:

- İletim hattı modeli
- Boşluk modeli
- Tam dalga modeli

İletim hattı modeli en kolay model sayılır ve iyi bir fiziksel kavrayış sağlamaktadır. Ayrıca ince dielektrik profiller için doğruluk derecesi yüksek olan bir yöntemdir [11]. Öte yandan, boşluk modeli iletim hattı modeli ile karşılaştırıldığında daha yüksek doğruluğa sahiptir ancak daha karmaşıktır [12], [13]. Tam dalga modeli ise diğer modellere göre en çok doğruluğa sahip modeldir ve bu model zor olmasına rağmen tek anten yapılarına, temassız antenlere ve dizi antenlere de uygulanabilmektedir [14]. Bu çalışmada, tasarım özelliklerinin belirlenmesinde iletim hattı modeli referans alınmıştır. Mikroşerit hat kesiti Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Mikroşerit hat kesiti.

Genel olarak mikroşerit anten tasarımında birçok önemli parametre mevcuttur. Bu parametreler anten giriş empedansı, geri dönüş kaybı, polarizasyon, ışıma örüntüsü, yönlülük, kazanç faktörü ve bant genişliği başlıkları altında toplanmıştır. Mikroşerit anten yapısındaki tasarım ve simülasyonların yanı sıra mikroşerit anten parametreleri ve besleme teknikleri de incelenmiştir [15], [16]. Literatüre bakıldığında, son zamanlarda yapılan çalışmalarda GSM 900 MHz ya da 1800 MHz uygulaması için çok sayıda mikroşerit antenlerinin tasarımı ve analizi yapılmıştır. Bazı çalışmalarda, Rogers ve FR4 gibi farklı yalıtkan maddeler seçilmiş ve yüksek kazanç elde etmek için mikroşerit antenin geometrik yapısında boşluk açma gibi bazı modifikasyonlar yapılmıştır [17]. Bazı çalışmalarda da yamanın köşelerinde kesikler yapılmıştır [18]. Ayrıca, besleme teknikleri değiştirilerek sonuçlar incelenmiştir. Bu çalışmalar incelendiğinde, HFSS veya CST simülasyon programları kullanılarak birçok antenin tasarlandığı görülmüştür. Başka bir çalışmada anten kazancını artırmak için iki elemanlı bir doğrusal dizi yöntemi kullanılmıştır [19]. Dahası, mikroşerit antenler üzerine birçok teorik ve uygulamalı çalışmalar bulunmaktadır [20]-[22]. Önceki çalışmaların çoğunda, analiz ve tasarım kolaylığı için dikdörtgen, üçgen veya dairesel gibi düzenli şekillere sahip mikroşerit antenlere odaklandığı görülmüştür. Bu çalışmada, mikroşerit dikdörtgen yama anteni analiz edilmiş ve tasarlanmıştır, sonraki bölümde tasarım adımları ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

Materyal ve Yöntem

Dikdörtgen Mikroşerit Antenin Tasarım Adımları

Dikdörtgen mikroşerit anteni tasarlamak için, öncelikle kalınlığı h , dielektrik sabiti ϵ_r ve Hz cinsinden rezonans frekansı f_r olan alt tabaka malzemesi seçilmelidir. Daha sonra anten boyutlarının belirlenmesi gerekir, yani yamanın genişliği W ve uzunluğu L tespit edilmelidir. Aynı zamanda kullanılacak besleme yöntemi de seçilmelidir. Bu çalışmada, dielektrik sabiti $\epsilon_r = 4.3$ ve kalınlığı $h = 1.55$ mm olan bir alt katman olarak FR4 epoksi kullanılmıştır. Diğer taraftan, yama ve toprak yüzeyini oluşturmak için iletken malzeme olarak bakır seçilmiş ve mikroşerit hat besleme yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, tasarlanan antenin 915 MHz taşıyıcı frekansında çalışması istenmektedir. Anten yamasının boyutları aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

Adım 1: Antendeki yamanın genişliğini belirlemek için aşağıdaki bağıntı kullanılır [23].

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

Burada, W yamanın genişliğini, c ($3 * 10^{11} \text{ mm/s}$), f_r (915 MHz) çalışma frekansını ve ϵ_r (4.3) dielektrik sabitini ifade etmektedir. Bu değerler için yamanın genişliği ($W = 100.7 \text{ mm}$) olarak hesaplanmıştır.

Adım 2: ϵ_{reff} efektif dielektrik sabiti bağıntı (2) [24] ile ($\epsilon_{reff} = 4.162$) olarak belirlenmiştir.

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{W}}} \right] \quad (2)$$

Adım 3: Bağıntı (3)'ten [24] yan alanlar tarafından üretilen artırımı uzunluk ($\Delta L = 0,747$) olarak hesaplanmıştır.

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad (3)$$

Adım 4: L_{eff} Yamanın efektif uzunluğu (4) [25] denklemi ile hesaplanmış, ardından bağıntı (5) [25] kullanılarak yamanın gerçek uzunluğu $L = 78.85 \text{ mm}$ olarak elde edilmiştir.

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (4)$$

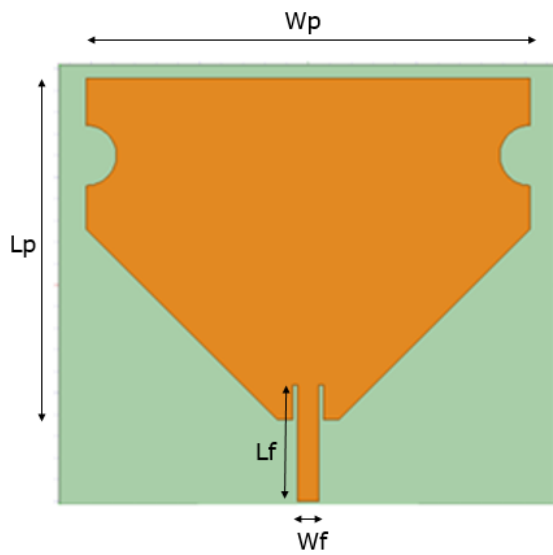
$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (5)$$

Modelleme ve Simülasyon

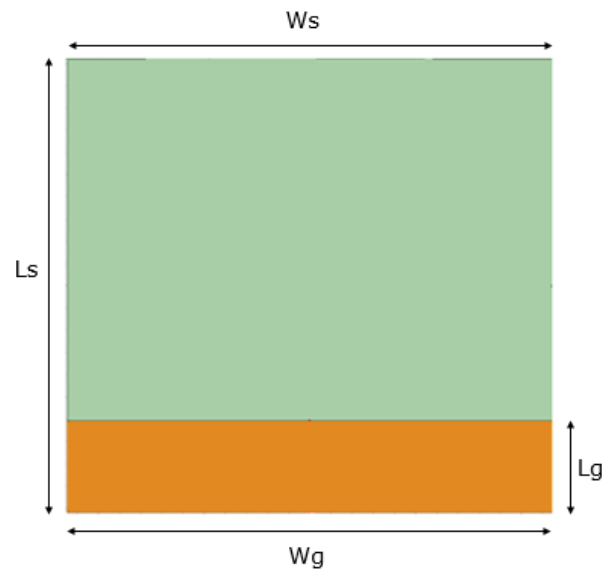
Bu çalışmada, HFSS (ANSYS) [26] programı kullanılarak yama boyutları $100.7 \text{ mm} \times 78.85 \text{ mm}$ olan ve hat besleme yöntemine sahip bir dikdörtgen mikroşerit anten tasarlanmıştır. Yamanın boyutları, besleme hattı ve diğer parametreler en iyi değeri bulmak için optimize edilerek antenin son tasarımı yapılmıştır. Fakat en iyi sonuçları elde etmek için, yamada alt köşelerden iki üçgen kesilerek, kenarlardan simetrik bir yarım daire açılarak ve toprak yüzeyi azaltılarak tasarımda optimizasyon amaçlı bazı değişiklikler yapılmıştır. HFSS yazılımı desteğiyle tasarlanan antenin önden ve arkadan görünüşleri sırasıyla Şekil 6'da gösterilmiştir. Böylece geri dönüş kaybının iyileştirilmesine, frekans bant genişliğinin artırılmasına ve istenmeyen frekansların ortadan kaldırılmasına yol açmıştır. Ayrıca, anten verimliliği de artmıştır. Tasarlanan antenin parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Tasarlanan dikdörtgen mikroşerit anten parametreleri.

Parametre	Değer
Çalışma Frekansı (f_r)	915 MHz
Dielektrik Sabiti (ϵ_r)	4.3
Yalıtkan Malzeme Kalınlığı (h)	1.55 mm
Yama Genişliği (W_p)	102.414 mm
Yama Uzunluğu (L_p)	79 mm
Besleme Hattının Genişliği (W_f)	5 mm
Besleme Hattının Uzunluğu (L_f)	26.8 mm
Toprak Yüzeyin Genişliği (W_g)	115 mm
Toprak Yüzeyin Uzunluğu (L_g)	20.5 mm
Malzemenin Genişliği (W_s)	115 mm
Malzemenin Uzunluğu (L_s)	102 mm



a) Önden görünüm



b) Arkadan görünüm

Şekil 6. HFSS programında tasarlanan dikdörtgen mikroşerit antenin önden ve arkadan görünüşleri.



a) Önden görünüm



b) Arkadan görünüm

Şekil 7. İmal edilen mikroşerit antenin a) önden ve b) arkadan görünümüleri.

Şekil 6'da görüldüğü gibi tasarlanan dikdörtgen mikroşerit anten daha sonra FR4 alt katman malzemesi kullanılarak Şekil 7'de görüldüğü gibi imal edilmiştir.

Ölçüm Cihazı

Bu çalışmada, Şekil 8'de görüldüğü gibi Anritsu MS2028C vektör network analizör cihazı aracılığıyla mikroşerit antenin ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 8. Anritsu MS2028C vektör network analizör cihazı.

Bulgular ve Tartışma

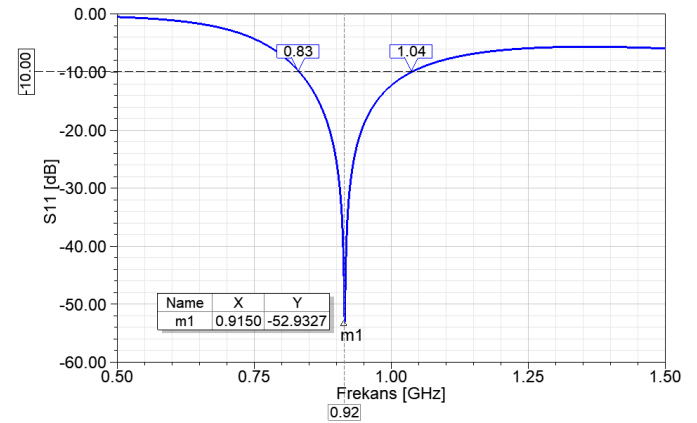
Bu çalışmada, HFSS programı ile 915 MHz taşıyıcı frekansında çalışan bir mikroşerit anten tasarlanmıştır. Daha sonra tasarlanan anten, düşük profilli FR4 alt katmanı üzerinde imal edilmiştir. Son aşamada vektör network

analizör cihazı ile mikroşerit antenin ölçümleri yapılmış ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Simülasyon Sonuçları:

Geri Dönüş Kaybı (S_{11})

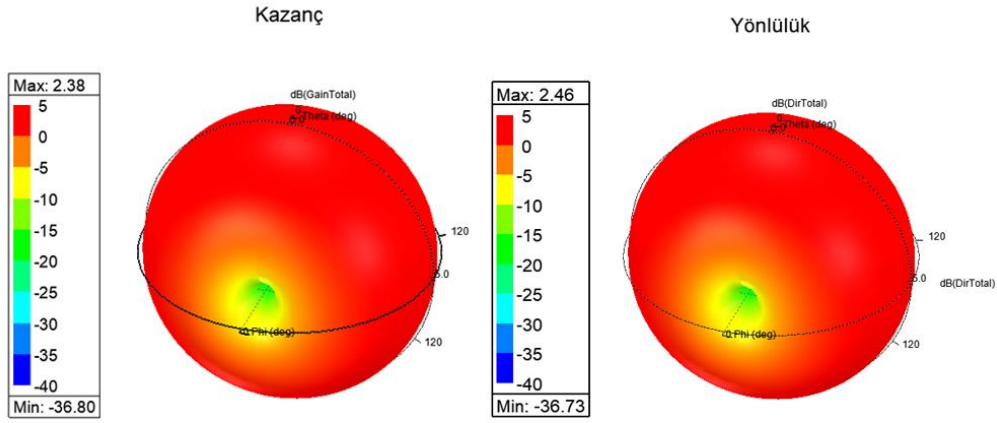
Tasarlanan mikroşerit antenin geri dönüş kaybı (S_{11}) Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi 915 MHz çalışma frekansı ve 210 MHz bant genişliği ile -52,93 dB'lik iyi bir geri dönüş kaybı elde edilmiştir.



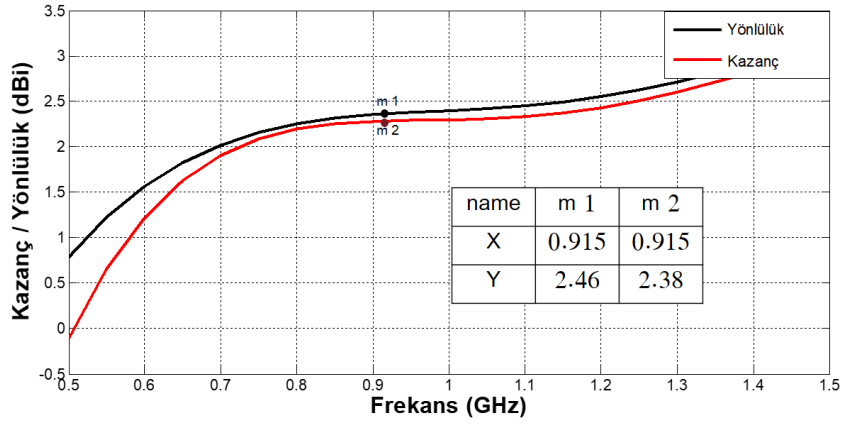
Şekil 9. Mikroşerit antenin geri dönüş kaybı.

Kazanç ve Yönlülük

Anten kazanç ve yönlülük grafiği Şekil 10'da sunulmuştur. Üç boyutlu şekilde görüldüğü gibi, kazanç yaklaşık 2.38 dB'dir. Kazanç ve yönlülük eğrisi ise Şekil 11'de gösterilmiştir.



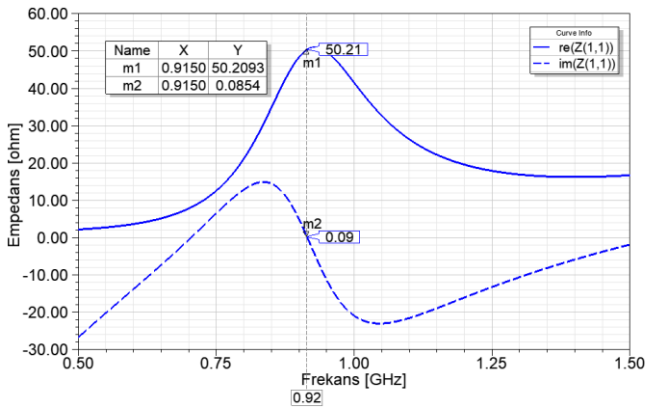
Şekil 10. Mikroşerit antenin üç boyutlu kazanç ve yönlülük grafiği.



Şekil 11. Mikroşerit antenin kazanç ve yönlülük eğrisi.

Empedans

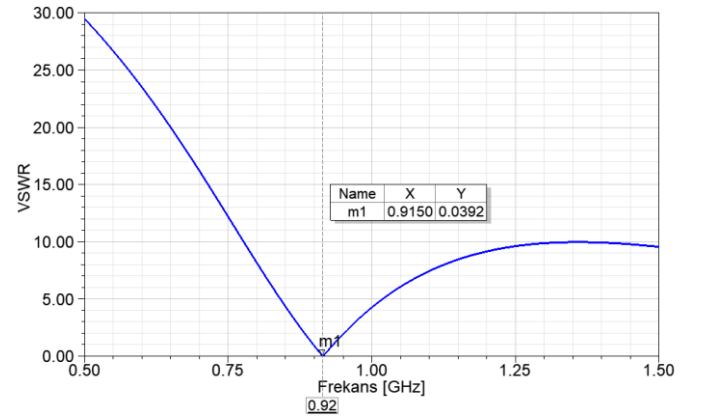
Şekil 12 mikroşerit antenin gerçel ve sanal kısımlarındaki empedans değerlerini göstermektedir. Standart 50Ω göz önünde bulundurulduğunda şekildeki m1 ve m2 değerleri antenin 915 MHz çalışma frekansında yüksek bir giriş empedans uygunluğuna sahip olduğunu göstermektedir. Çünkü gerçel kısmı 50.21Ω 'a eşit olduğu ve sanal kısmın ise sifıra yaklaştığı ve 0.09 'a eşit olduğu görülmektedir.



Şekil 12. Mikroşerit antenin empedans grafiği.

Gerilim Duran Dalga Oranı (VSWR)

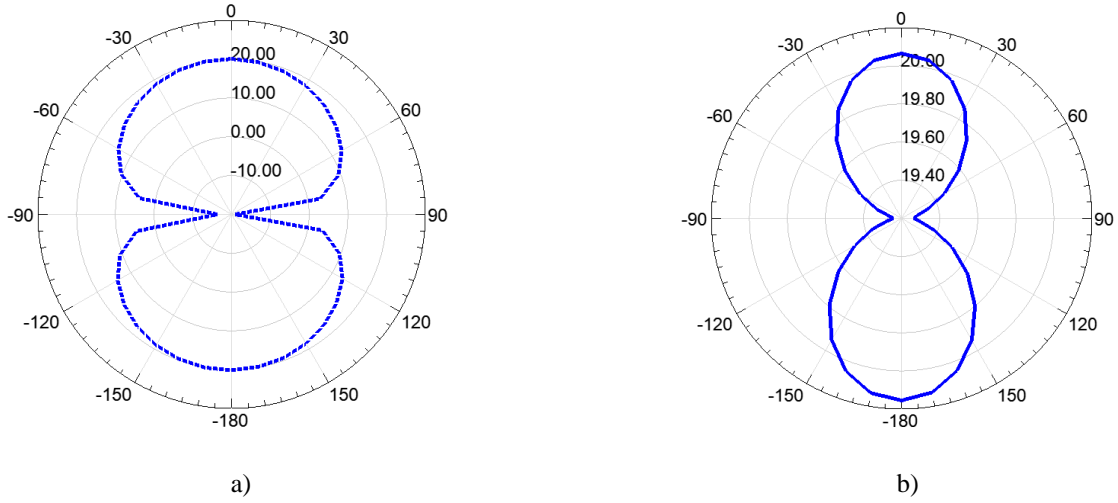
Mikroşerit antenin simülasyon sonucu olarak önemli anten parametrelerinden biri olan VSWR değeri Şekil 13'te gösterilmiştir. Şekilde yer alan m1 değeri 915 MHz taşıyıcı frekansındaki VSWR değerinin yaklaşık olarak 0.04 olduğunu göstermektedir.



Şekil 13. Mikroşerit antenin VSWR grafiği.

Işıma Örüntüsü

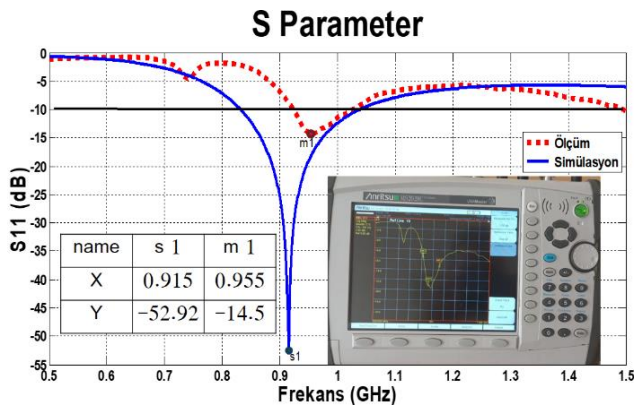
915 MHz frekansında ışınma örüntüsü Şekil 14 (a)'da E düzleminde, Şekil 14 (b)'de ise H düzleminde gösterilmiştir.



Şekil 14. Antenin ışınma örüntüsü: a) 2D E- düzlemi, b) 2D H- düzlemi.

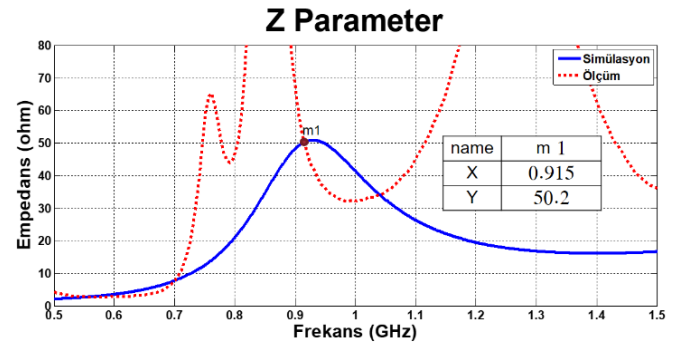
Ölçümlerin Simülasyonla Karşılaştırılması:

Bu çalışmada, vektör network analizör cihazı ile mikroşerit antenin ölçümleri alınmış, daha sonra simülasyon sonuçları ölçüm sonuçları ile karşılaştırılarak aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.



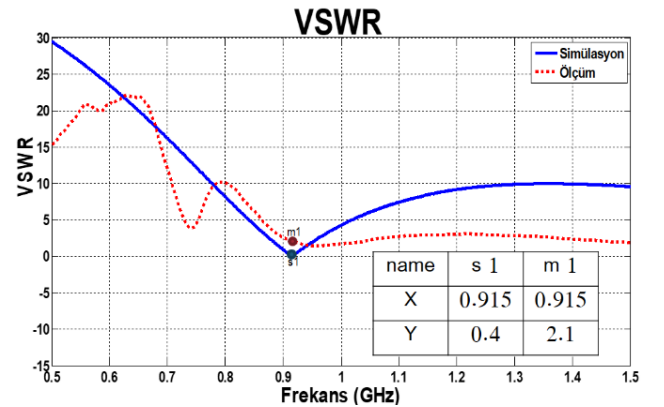
Şekil 15. Antenin simülasyon ve ölçüm geri dönüş kaybı.

Şekil 15'te görüldüğü gibi, m1 değeri ölçülen geri dönüş kaybının en düşük değerini temsil eder ve 955 MHz frekansında -14.5 dB'ye eşit olduğu görülmektedir. Buna karşın s1 değeri simülasyon geri dönüş kaybının en düşük değeridir ve 915 MHz frekansında -52.92 dB'ye eşit olduğu görülmektedir. Diğer bir değişle, ölçülen değer ile geri dönüş kaybının simüle edilen değeri arasında kabul edilebilir bir eşleşme olduğu görülmektedir. Bu fark, kullanılan malzemenin dielektrik sabitindeki küçük değişimin yanı sıra, anten boyutlarındaki küçük hatalar veya basit imalat hataları gibi çeşitli nedenlerden kaynaklanabilmektedir.



Şekil 16. Antenin simülasyon ve ölçüm empedans grafiği.

Şekil 16'da görüldüğü gibi, ölçülen ile simüle edilen empedans değerleri arasında büyük bir eşleşme olduğu ve 915 MHz frekansında empedansın 50.2 Ω 'a eşit olduğu görülmektedir.



Şekil 17. Antenin simülasyon ve ölçüm VSWR grafiği.

VSWR değerinin simülasyon ve ölçüm sonuçları Şekil 17'de aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Şekilde yer alan $s_1=0.4$ ve $m_1=2.1$ değerleri simüle edilen ve ölçülen 915 MHz'deki VSWR değerleridir.

Simülasyonu yapılan anten daha sonra imal edildiğinde simülasyon ile imal edilen antenin birçok parametreleri arasında küçük farklılıklar gözlemlenmektedir. Bu farklılıklar genellikle imalattan kaynaklanmaktadır.

Şekil 7'de görüldüğü üzere 915 MHz taşıyıcı frekansında imal edilen mikroşerit anten Powercast firmasının ürettiği P1110-EVB, P2110-EVB, P21XXCSR-EVB RF enerji hasatlama devrelerinde veya daha farklı firmaların aynı frekanstaki RF enerji hasatlama devrelerinde başarılı bir şekilde kullanılabilir.

Sonuçlar

Bu çalışmada, RF enerji hasatlama devreleri için bir mikroşerit yama anten tasarımı ve uygulaması yapılmıştır. Bu anten, ilk olarak yamanın boyutlarının hesaplanması süreci ile başlamış ve daha birçok adım uygulanarak mikroşerit anten tasarlanmıştır. Daha sonra boyutları tüm detayları ile hesaplanan antenin HFSS programı yardımıyla simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bant genişliğini artırmak ve istenmeyen frekansları ortadan kaldırmak için toprak katmanı azaltılarak ve yamanın alt köşelerinden ve kenarlarından kesimler yapılarak antenin ışıma özellikleri optimize edilmiştir. Nihayet mikroşerit anten 915 MHz rezonans frekansında, dielektrik sabiti $\epsilon_r = 4.3$ olan cam epoksi FR4 malzemesi kullanılarak imal edilmiştir.

Tasarlanan, optimize edilen ve daha sonra imal edilen mikroşerit antenin geri dönüş kaybı, empedans ve VSWR gibi değerleri dikkate alındığında simülasyon ve ölçüm sonuçları arasında yüksek bir uyum olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, üretilen mikroşerit antenin 915 MHz taşıyıcı frekansında çalışan RF enerji hasatlama devreleri için uygun ve kullanışlı bir anten olduğu tespit edilmiştir.

Kaynaklar

- [1] H. J. Visser and R. Vullers, "RF Energy Harvesting and Transport for Wireless Sensor Network Applications: Principles and Requirements," *Proceedings of the IEEE*, pp. 1410 - 1423, 2013.
- [2] A. Takacs, A. Okba, H. Aubert ve S. Charlot, «Recent Advances in Electromagnetic Energy Harvesting and Wireless Power Transfer for IoT and SHM Applications,» *IEEE International Workshop of Electronics*, pp. 1-4, 2017.
- [3] H. Reinisch, S. Gruber, H. Unterassinger, W. Pribyl ve G. Holweg, «An Electro-Magnetic Energy Harvesting System With 190 nW Idle Mode Power Consumption for a BAW Based Wireless Sensor Node,» *IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS*, cilt 46, no. 7, pp. 1728-1741, 2011.
- [4] S. Y. Liao, "Measurements and Computations of Electric Field Intensity and Power Density," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, pp. 53 - 57, 1977.
- [5] W. M. D. R. Gunathilaka, H. G. C. P. Dinesh, G. G. C. M. Gunasekara, K. M. M. W. N. B. Narampanawe and J. V. Wijayakulasooriya, "Ambient Radio Frequency energy harvesting," *2012 IEEE 7th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)*, pp. 1-5, 2012.
- [6] A. Belen and M. A. Belen, "GSM ve ISM bandi RF Enerji Hasatlama Sistemleri için Tek Katli Doğrultucu Devre Tasarımı," *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, p. 359 – 365, 2021.
- [7] N. Saranya and T. Kesavamurthy, "Design and performance analysis of broadband rectenna for an efficient RF energy harvesting application," *International Journal of Rf and Microwave Computer-Aided Engineering*, pp. 1-12, 2019.
- [8] M. Cansız, D. Altinel ve G. K. Kurt, «Efficiency in RF energy harvesting systems: A comprehensive review,» *Energy*, cilt 174, pp. 292-309, 2019.
- [9] R. Q. Lee and K. F. Lee, "Experimental study of the two-layer electromagnetically coupled rectangular patch antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 38, no. 8, pp. 1298 - 1302, 1990.
- [10] D. G. Fang, "Antenna Theory and Microstrip Antennas," *Taylor & Francis Group*, 2010.
- [11] İ. Ataş, "Yüksek Kazançlı Mikroşerit Antenlerin HFSS ile Modellenmesi ve Tasarımı," *İnönü Üniversitesi Doktora Tezi*, 2019.
- [12] A. Derneryd, "A theoretical investigation of the rectangular microstrip antenna element," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 26, no. 4, pp. 532 - 535, 1978.
- [13] M. Malkomes, "Mutual coupling between microstrip patch antennas," *Electronics Letters*, vol. 18, no. 12, pp. 520-522, 1982.
- [14] A. F. Alsager, «Design and Analysis of Microstrip Patch Antenna Arrays,» *Master in Electrical Engineering– Communication and Signal processing*, 2011.
- [15] H. Yang, "Printed straight F antennas for WLAN and Bluetooth," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 918-921, 2003.
- [16] M. Karaboikis, C. Soras, G. Tsachtsiris and V.

- Makios, "Compact Dual-Printed Inverted-F Antenna Diversity Systems for Portable Wireless Devices," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, pp. 9-14, 2004.
- [17] E. Çetme, «Yarıklı mikroşerit yama anten dizaynı,» *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı*, pp. 1-63, 2009.
- [18] M. Hayouni, F. Choubani, M. Denden, T. H. Vuong and J. David, "A Novel Compact Ultra-wideband Rectangular Shaped Antenna," *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, pp. 381-385, 2011.
- [19] J. Endri, I. Setiawan, A. Taqwa, N. F. Husni and C. R. Sitompul, "Design a Microstrip Antenna 2 Elements for 900 Mhz GSM System," *Journal of Physics: Conference Series*, pp. 1-10, 2019.
- [20] H. Werfelli, K. Tayari, M. Chaoui ve H. Ghariani, «Design of Rectangular Microstrip Patch Antenna,» *ATSIP*, pp. 21-24, 2016.
- [21] Chandan and B. S. Rai , "Bandwidth Enhancement of Wang Shape Microstrip Patch Antenna for Wireless System," *2014 Fourth International Conference on Communication Systems and Network Technologies*, pp. 11-15, 2014.
- [22] M. C. Tang, T. Shi and R. W. Ziolkowski, "Planar Ultra-Wideband Antennas with Improved Realized Gain Performance," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 1, pp. 61 - 69, 2016.
- [23] C. A. Balanis, «Antenna Theory: Analysis and Design,» *3rd ed.*, 2005.
- [24] Y. Huang ve K. Boyle, «Antennas: From Theory to Practice,» 2008.
- [25] R. Gang, P. Bhartia, I. Bahl ve A. Ittipiboon, «Microstrip Antenna Design Handbook,» 2001.
- [26] Ansys HFSS, Ansys Corporation. Canonsburg, PA, USA,» 2014.