



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



RF ENERJİ HASADINDA KULLANILACAK
MİKROŞERİT YAMA ANTEN TASARIMININ
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Hilal ÇETİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim
Dalı

Ekim-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Hilal ÇETİN tarafından hazırlanan “**RF Enerji Hasadında Kullanılacak Mikroşerit Yama Anten Tasarımının Gerçekleştirilmesi**” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Unvanı Adı SOYADI

Danışman

Unvanı Adı SOYADI

Üye

Unvanı Adı SOYADI

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması BAP tarafından 211002012 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Hilal ÇETİN

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RF ENERJİ HASADINDA KULLANILACAK MİKROŞERİT YAMA ANTEN TASARIMININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Hilal ÇETİN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Dilek UZER

2021, 58 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Dilek UZER
Doç. Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN
Dr. Öğr. Üyesi Özgür DÜNDAR

Son yıllarda, yenilenebilir enerjiye artan talep nedeniyle insan hayatını kolaylaştıran sistemlere ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Günümüz şartlarında telefon, tablet, sensör vb. bataryalı ya da bataryasız düşük güç tüketen cihazlar sürekli enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Bundan dolayı düşük güçlü enerji elde etme yollarına ilgi hızla artmaktadır.

Kullanılan pillerin ömrünü uzatmak ve enerjinin sürekli hale dönüştürülmesi insanlık için gerekli bir ihtiyaca dönüşmüştür. Enerji kaynağının düşük bakım maliyetli, uzun ömürlü ve sürekli olması kullanılan cihazlar ve insanların ihtiyaçları doğrultusunda istenen en önemli noktalarıdır. Bu yüzden şimdi ve gelecekte kullanılabilecek yöntemlerin en önemlilerinden biri de radyo ve mikrodalga frekanslarından enerji hasat etmektir.

Bulduğumuz ortamda, enerji hasadında kullanabileceğimiz, serbest halde elektromanyetik dalgalar bulunur. Bulunan bu elektromanyetik dalgaların enerjisi bir devre tasarımı yapılarak kullanılabilecek duruma dönüştürülür. Dönüştürülen bu enerji kullanılabilecek miktarda ve verimlilikte olmalıdır.

Elektromanyetik dalgalardan enerji hasatlama sisteminde amaç, öncelikle RF dalga yayılımı yapan kaynaklardan elde edilen elektromanyetik dalgaların yakalanması ve ardından bu dalgaların üzerinde barındırdığı enerjinin uygun antenler yardımıyla en verimli şekilde toplanmasıdır. Sistemde havadaki elektromanyetik dalgaları toplayan antenlerin parametreleri, bazı antenlerin tasarımında kullanılan hesaplamalar ve antenin çalışma verimliliğini etkileyen faktörler araştırılmıştır.

Havada yayılım yapan elektromanyetik dalgalardan yüksek verimde enerji hasat etmek için ısıma güç yoğunluğunun değeri, verici gücüne, verici anten kazancına ve mesafeye bağlıdır. Sistem performansını doğrudan ya da dolaylı olarak etkileyen durumlardan biri devrenin mevcut geometrik konumu ve ortamda iyi bir şekilde konumlandırılmasıdır..

RF enerji hasadında kullanılan anten diğer anten çeşitlerine göre daha ufak ve taşınabilir uygulamalarda kullanılabilmelidir. Özellikle antenin ufak olması RF enerji toplayan devre sistemlerin tasarımında önemli bir adımdır.

RF enerji hasadında kullanılacak mikroşerit yama anten tasarımının gerçekleştirilmesine yönelik bu tez çalışmasında kare yama üzerine yarıklaç açılarak H benzeri şekilli bir mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan antenlerin parametrik taramaları gerçekleştirilerek en iyi sonuca ulaşmaya çalışılmıştır. Tasarlanan antenlerin hem simülasyonu hem de optimum antenin üretimi yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki tasarlanan antenler RF enerji hasadında kullanıma uygun özellikler taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik Dalga, HFSS, Mikroşerit Anten, RF Enerji Hasadı

ABSTRACT

MS THESIS

REALIZATION OF MICROSTRIP PATCH ANTENNA DESIGN TO BE USED IN RF ENERGY HARVEST

Hilal ÇETİN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical-Electronics Engineering**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Dilek UZER

2021, 58 Pages

Jury

**Asst. Prof. Dr. Dilek UZER
Prof. Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN
Asst. Prof. Dr. Özgür DÜNDAR**

In the recent years, interest in systems that make human life easier has been increasing demand for renewable energy. In today's conditions, phones, tablets, sensors etc. low-power devices with or without batteries need continuous energy. Because of this need, alternative ways of obtaining low-power energy have become popular.

Extending the life of the batteries used and the continuity of energy has become a necessary need for humanity. Low maintenance cost, long life and continuous energy source is one of the most important criteria required according to the demand of the devices and people used. Therefore, one of the most important methods that can be used now and in the future is to harvest energy from radio and microwave frequencies.

In order to harvest energy, the energy of electromagnetic waves in a free state in the environment in which we are located is converted into a form that can be used by designing a circuit. This converted energy must be in the amount and efficiency that can be used.

In the RF energy harvesting system, the goal is to capture electromagnetic waves obtained from sources broadcasting RF waves, and then collect the energy contained on these waves in the most efficient way with the help of appropriate antennas and transmit them to the amplifier and rectifier circuits by minimizing the loss. Parameters of antennas collecting electromagnetic waves in the air in the energy harvesting system, calculations used in the design of some antennas, factors affecting the working efficiency of the antenna were investigated.

In order to harvest energy at high efficiency from electromagnetic waves broadcasting in the air, the value of the radiation power density depends on the power of the transmitter, the gain of the transmitting antenna, and the distance. The current geometric position of the circuit and its good positioning in the environment is one of the situations that directly or indirectly affects system performance.

The antenna used in the RF energy harvesting should be used in smaller and portable applications than other types of antennas. In particular, the small antenna is an important criterion in the design of circuit systems that collect RF energy.

In this thesis, the design of a microstrip patch antenna to be used in RF energy harvesting was realized by opening slits on the square patch and designing an H-shaped microstrip antenna. Parametric scans of the designed antennas were performed to achieve the best result. The results were compared by both simulation of the designed antennas and production of the optimal antenna. The results have shown that the antennas designed are suitable for use in RF energy harvesting.

Keywords: Electromagnetic Wave, HFSS, Microstrip Antenna, RF energy Harvesting

ÖNSÖZ

Yüksek lisans sürecinde bana danışmanlık yapan ve her zaman her konuda desteğini esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Dilek UZER hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hilal ÇETİN
KONYA-2021



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. RADYO FREKANSLARI İLE ENERJİ HASATLAMA	7
3.1. Frekans Aralıklarına Göre Enerji Hasatlama Devreleri.....	8
3.2. Enerji Hasadında Kavramlar.....	10
3.2.1. Enerji, güç ve güç aktarımı	11
3.2.2. Doğrultma.....	12
3.2.3. Giriş gücü.....	13
3.2.4. Çıkış gerilimi.....	14
3.2.5. Güç dönüştürme verimi (GDV).....	15
3.2.6. Yük direnci analizleri.....	17
3.2.7. Frekans ve bant genişliği.....	18
3.2.8. Empedans kavramı ve iletim hattı.....	19
3.2.9. Yansıma ve iletim.....	20
4. MİKROŞERİT ANTENLER.....	22
4.1. Mikroşerit Antenlerin Temel Karakteristikleri.....	22
4.2. Mikroşerit Antenlerin Analizi.....	22
4.3. Anten Parametreleri.....	25
4.3.1. Işıma örüntüsü.....	25
4.3.2. Geri dönüş kaybı.....	25
4.3.3. Bant genişliği.....	26
4.3.4. Kazanç.....	26
4.3.5. Kutuplama.....	27
4.3.6. Yönlendirilebilirlik.....	27
4.3.7. Verimlilik.....	27
4.4. Dikdörtgen Şekilli Mikroşerit Anten.....	28
5. MATERYEL VE YÖNTEM.....	30
5.1. HFSS (High Frequency Structural Simulator) (Yüksek Frekans Yapısal Simulatorü)	30
5.2. POWERCAST Enerji Hasadı Geliştirme Kiti).....	31

6. ANTEN TASARIMLARI.....	32
6.1. H Şekli Yama Anten.....	32
6.2. H Benzeri Köşeleri Kırpılmış Anten Tasarımı.....	37
6.3. 915 MHz'te Geliştirme Kartına Uygun Olarak Tasarlanan Anten.....	41
6.3.1. H benzeri şekilli üstten ve yandan yarıklı 915 MHz antenler için P2110-EVB modül kullanımı ve sonuçları.....	46
6.3.2. P2110-EVB modül kullanımı anten kombinasyonları ve sonuçları.....	49
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	50
7.1. Sonuçlar.....	50
7.2. Öneriler.....	50
KAYNAKLAR	52



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Q:	Kalite Faktörü
h:	Mikroşerit Anten Taban Kalınlığı
t:	Mikroşerit Anten Yama ve Toprak Düzlemi Kalınlığı
e:	Işıma verimi
ϵ_r :	Dielektrik Sabiti
λ :	Dalga Boyu
C:	Işık Hızı
dB:	Desibel
L:	Dikdörtgen Mikroşerit Anten Boyu
W:	Dikdörtgen Mikroşerit Anten Eni
S_{11} :	Geri Dönüş Kaybı
%BW:	Yüzde Bant Genişliği
Z_0 :	Karakteristik Empedans
ϵ_{eff} :	Efektif Dielektrik Sabiti
R_L :	Anten Yük Direnci
Γ :	Yansırma Katsayısı
f_0 :	Merkezi Frekans
f_{alt} :	Frekans Bandının Alt Sınırı
$f_{üst}$:	Frekans Bandının Üst Sınırı
ρ :	Yansırma Katsayısı
f_r :	Çalışma Frekansı

Kısaltmalar

BG:	Bant Genişliği
DC:	Direct Current
GSM:	Mobil İletişim İçin Küresel Sistem
GHz:	Gigahertz
HFSS:	High Frequency Structural Simulator (Yüksek Frekans Yapısal Simulatörü)
ISM:	Endüstriyel, Bilimsel ve Tıbbi Bandı
MHz:	Megahertz
MoM:	Moment metodu
RF:	Radio Frequency
RFID:	Radio Frequency Identification (Radyo Frekansı Kimlik Tanılama)
Wi-Fi :	Wireless Fidelity
IoT :	Internet of Things

1. GİRİŞ

Günümüzde, özellikle yaşam alanlarında, pek çok farklı frekansta elektromanyetik dalgalar ortamda sürekli bulunmaktadır. Bu da elektromanyetik dalgaların neredeyse her an her ortamda bulunduğunu göstermektedir. İhtiyaç olan enerjiyi, ortamdaki RF sinyal kaynaklarından elde etme işlemine RF enerji hasatlama adı verilir.

Modern dünyanın ve teknolojinin gelişimiyle paralel olarak, günümüzde kullanılan cihazlar da gelişmektedir. Cihazların gelişmesi enerji kaynakları ihtiyacını arttırmaktadır. Enerji hasatlama devreleri de elektronik devrelerin ve cihazların ihtiyacı olan güç ve enerjiyi sağlamada anlık ve sürekli çözümler sunmaktadır.

Enerji hasatlama günümüzde oldukça popüler bir işlemdir. Batarya ve benzeri enerji depolama hücrelerinin yerine enerji hasatlama devreleri oldukça yaygınlaşmaya başlamıştır. Gerek akademik gerekse endüstriyel çalışmalar elektronik cihazların ihtiyacı olan enerjiyi temin etmede enerji hasatlama yöntemlerinden çokça faydalanmaya başlamışlardır. Çünkü bataryalar, hem ağır ve hantal olduğundan hem de hacimsel olarak çok yer kapladığından kullanışsız olmaya başlamıştır. Hem kısa zaman da yeniden doluma ihtiyaç duymaktadır hem de pillerin kullanım süreleri sınırlıdır. Buna karşın ortamdaki elektromanyetik dalgalar ve haberleşme sinyalleri devamlılık arz etmektedir. Bu yönüyle enerji hasatlama işlemi pek çok yönden avantaj sağlayacaktır.

Ortamdaki iletişim sinyallerinden doğru akım ve gerilim elde etme işlemi RF enerji hasatlama sürekli yayılan enerjinin hasatlanması işlemine dayanır. Bu yönüyle sürekli bir enerji kaynağı olduğu söylenebilir. Düşük maliyetli ve hafif devre elemanları ile gerçekleştirilebilen bir yöntemdir. Bu yöntemin en büyük dezavantajı dönüştürebildiği güç yoğunluğunun düşük olmasıdır. Ayrıca bu güç yoğunluğunun kaynaktan uzaklaşılan mesafeye göre azalmasıdır.

RF enerji hasatlama devrelerinin avantajları ve dezavantajları göz önüne alındığında, bu kadar düşük ve haberleşme sinyal kaynaklarına olan uzaklığa göre değişen güç yoğunluğuna rağmen kullanılabilirliği değerlendirilmelidir.

Literatürdeki enerji hasatlama devreleri, enerji alma mesafelerine göre yakın alan ve uzak alan enerji hasatlama devreleri olarak ikiye ayrılır. Yakın alan enerji uygulamaları çoğunlukla biyomedikal uygulamaları ve giyilebilir teknolojiler için önerilmektedir. Öngörülen uzak alan enerji hasatlama uygulamalarına örnek, elektrik

kaynağına yakın olmayan mesafelerde ve uzaktan algılama uygulamaları için güç aktarımı çalışmalarıdır.

RF enerji hasatlama işlemi, alınan uyumlandırma ve doğrultma devreleri yardımıyla elde edilen DC gücü, çalıştırılacak cihazın güç besleme girişine aktarma süreçlerini içerir.

Bir mikrodalga devrede, yansımanın olmaması veya minimum olması empedans uyumunun bir göstergesidir. Alıcıdan (anten vs.) alınan sinyal, doğrultucu devreye gelmeden önce yansıma, duran dalga vb. kayıpları en aza indirmek için uyumlandırma devresine gelir. Sinyalin frekansı uyumlandırma frekansı ile aynı ise yansıma seviyesi düşer ve daha fazla güç taşıyan sinyal doğrultucu devreye girer. Alınan bir elektromanyetik dalganın bozulmaya ve zayıflamaya uğramaması için uyumlandırma katmanı çok önemlidir. RF enerji hasatlama işleminde varılmak istenen nokta daha geniş frekans bandını kapsayan ve farklı geometrik şekillere sahip mikroşerit anten tasarımlarının ve uygulamalarının yapılarak optimum tasarımı gerçekleştirmektir.

Mikroşerit antenlerin bu özellikleri kullanılarak tez konusu RF enerji hasadında mikroşerit yama anten tasarımı denenmiştir. Antenin yama şekli, boyut ve rezonans frekansları, dielektrik değerleri gibi parametrelerin önemi oldukça büyüktür ve bu özellikler antenin parametrelerini değiştirebilmektedir. Dolayısıyla antenin performansını da etkileyebilmektedir. Simulasyon ortamında yapılan parametrik analizler sonucunda en iyi sonuçları veren parametreler belirlenerek antenlerin üretimi gerçekleştirilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Günümüzde, özellikle yaşam alanlarında, pek çok farklı frekansta elektromanyetik dalgalar ortamda sürekli bulunmaktadır. Bu da elektromanyetik dalgaların neredeyse her an her ortamda bulunduğunu göstermektedir. Örneğin baz istasyonlarından yayılan cep telefonu sinyalleri GSM 1800, yine baz istasyonlarından kablosuz internet için EDGE, 3G, 4.5G vb. gibi haberleşme sistemlerinden yayılan sinyallerin taşıdığı güçler, veyahut bina içlerinde kablosuz modemlerden yayılan ISM bandından sinyallerin sahip oldukları güçler anlık olarak ortamda bulunan elektromanyetik dalgalara örnektir. Bunun yanında sayısal televizyon yayınları (DVB-T) ve FM radyo dalgaları bu sinyaller arasındadır. Dikkat edildiğinde ortamda bulunan elektromanyetik dalgalar pek çok farklı frekansa sahiptirler. Ayrıca kullanım alanlarına göre pek çok farklı güç aralığında olabilmektedir (Kasar vd., 2019).

Genel olarak enerji hasatlama devreleri, ortamdaki enerjinin doğru akım ve gerilime dönüştürülmesini temel almaktadır. Literatürde, RF'ten farklı enerji çeşitlerini dönüştürerek enerji hasatlama yöntemleri de bulunmaktadır. Temiz enerji sınıfında sayılabilecek bu başlıca enerji hasatlama teknikleri; güneş (solar), ısı (termal), ve titreşim (piezzo) enerjileridir (S. Kim vd., 2014).

Enerji hasatlama tekniklerinin kullanım alanları ve koşulları göz önüne alındığında RF enerji hasadının diğer üç tekniğe göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Güneş enerjisinden elde edilen güç yoğunluğu göreceli olarak yüksektir. Fakat güneşten faydalanma süresi mevsime ve konuma göre değiştiğinden bu enerji türü sürekli değildir. Bundan dolayı ya güneş enerjisi anlık tüketilecek veya depolama birimleri ile beraber kullanılacaktır. Buna karşılık taşıdığı yüksek enerji yoğunluğu güneş enerjisini enerji hasatlama süreçleri arasında reddedilemez bir konuma çıkarmaktadır (S. Kim vd., 2014; Z. Liu vd., 2015).

Titreşime duyarlı malzemelerden (piezoelektrik) elde edilen enerjinin güç yoğunluğu güneş kadar olmasa da göreceli olarak yüksektir. Fakat titreşim enerjisi için de anlık titreşim kaynağı ve tetikleme gerekecektir. Dolayısıyla bu teknik de sınırlı kullanım koşullarında geçerlidir (Z. Liu vd., 2015).

Literatürde termal enerji dönüşümü, sürekli olmasının yanında ani ısı değişimlerinden çok etkilenen ve kırılgan (kayıpları çok olan) özelliğe sahip bir hasatlama türü olarak gösterilmiştir. Ayrıca termal enerjinin, anlık olarak elektrik enerjisine

dönüştürecek sistemler pratik olmadığından DC elde edilmesinde kullanımına neredeyse hiç ihtiyaç duyulmamıştır (S. Kim vd., 2014).

Literatürde enerji hasatlama devreleri, enerji alma mesafelerine göre yakın alan ve uzak alan enerji hasatlama devreleri olarak ikiye ayrılır. Yakın alan enerji hasatlama uygulamaları çoğunlukla biyomedikal uygulamaları ve giyilebilir teknolojiler için önerilmektedir. Örneğin ilk akla gelen uygulama kalp pili için güç aktarma devresi uygulaması olacaktır. Buna benzer pek çok uygulama alanı ‘kaliteli yaşam’ ve ‘tıpta ilerleme’ bağlamında düşünülebilir. Ayrıca giydiğimiz bir giysinin üzerindeki sensörler enerji hasatlama devreleri ile besleme çalışmaları olabilecektir (Collado ve Georgiadis, 2013).

Öngörülen uzak alan enerji hasatlama uygulamalarına örnek, elektrik kaynağına yakın olmayan mesafelerde ve uzaktan algılama (remote sensing) uygulamaları için güç aktarımı çalışmalarıdır (Song vd., 2016). Literatürde kendi kendine devam edilebilen (stand-alone) RF enerji devrelerinin uzak alan uygulamaları üzerine çalışmalar yoğunlaşmaya başlamıştır (S. Kim vd., 2014). Düşük akım ve gerilimlerde çalışan ve düşük güç tüketen uzak alan uygulamalardan bazıları; düşük güç sensör uygulamaları, nesnelerin interneti (IoT) uygulamaları, mikro işlemci tabanlı sensör platformları ve düşük güç tüketen gönüllü devrelerdir (Z. Liu vd., 2015).

Yaygınlaşmaya başlayan literatür çalışmalarından birisi de enerji hasatlama devrelerinin birlikte kullanımıdır. Son zamanlarda ‘hibrit enerji hasatlama devreleri’ de çalışılmaya başlanmıştır. Uygun güç yönetim ünitelerinin sağladığı olanaklarla iki veya daha fazla enerji hasatlama tekniğinin birlikte kullanılması (örneğin güneş enerjisi ve RF enerji), ilerleyen zamanlarda ticari olarak piyasaya sürüleceği değerlendirilmektedir (Collada ve Georgiadis, 2013).

RF enerji hasatlama işlemi, alınan RF güçten, uyumlandırma ve doğrultma devreleri yardımıyla elde edilen DC gücü, çalıştırılacak cihazın güç besleme girişine aktarma süreçlerini içerir (Devi vd., 2012; H. Liu vd., 2014; Mansour ve Kanaya, 2018; Penella-López ve Gasulla-Fornier, 2011).

Bu çalışmada, en çok bilinenlerinden iki tanesi Greinacher ve Dickson doğrultma devreleri kullanılmıştır. Bu devrelerde düşük akım ve gerilimlere cevap verebilen Schottky diyotları kullanılmıştır (Belen, 2018; P. Kim vd., 2013; Mousa Ali vd., 2017).

Bir mikrodalga devrede, yansımanın olmaması veya minimum olmaması empedans uyumunun bir göstergesidir (Balanis, 2005). Alıcıdan (anten vs.) alınan

sinyal, doğrultucu devreye gelmeden önce yansıma, duran dalga vb. kayıpları en aza indirmek için uyumlandırma devresine gelir. Sinyalin frekansı uyumlandırma frekansı ile aynı ise yansıma seviyesi düşer ve daha fazla güç taşıyan sinyal doğrultucu devreye girer (Kasar vd., 2019).

Alınan bir elektromanyetik dalganın bozulmaya ve zayıflamaya uğramaması için uyumlandırma katmanı çok önemlidir. Son zamanlarda tek frekansta, çoklu frekanslardaki uygulamaların yanında geniş bantlı enerji hasatlama çalışmaları önemi artmıştır (Costanzo ve Masotti, 2016; Lin vd., 2017).

“Giyilebilir Antenlerin Tasarımı” isimli makale ile tabanın tekstil yapılı olduğu giyilebilir ve kıvrım tasarımlı bir mikroşerit yama anten tasarımı sunulmuştur. Antenin beslemesi koaksiyel bir beslemedir ve ışıma deseni, dönüş kaybı, kazancı gibi performansı ile ilgili parametreleri ve analizi CAD FEKO yazılımı kullanılarak yapılmıştır. U-yarıklı, eliptik, dikdörtgen, parabol, E ve H şeklindeki dikdörtgen yama antenleri gibi farklı şekiller çeşitli kumaşlar kullanılarak analizler yapılmıştır. Sonuçta yıkanmış pamuğun geri dönüş kaybının düşük olduğu ve vücuda giyildiğinde daha az ısınım gösterdiği sonucuna varılmıştır (Singh, Singh, & Singh, 2015).

Son yıllarda, güneşten enerji toplamak için güneş hücrelerinin şeffaf bir antenle entegrasyonu incelenmiştir. Bu opak güneş pilleri veya reflektör görevi gören panelin bir sonucu olarak yönlenen dar bantlı bir antendir. Böyle bir antenin pencere camı için uygulamaları için potansiyelini sınırlandırır. Başka bir çalışmada ise, metal bir alüminyum arka elektrot veya taşlanmış bir a-Si güneş paneline entegre olmasıyla çok yönlülük saplayabilen yeni bir UWB antenin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu UWB antenin bina camının ve evlerin camlarının her iki tarafına kablosuz olarak sinyal göndermesini ve almasını sağlar. Başka bir çalışmada, basit bir geometriye sahip çok bantlı bir anten sunulmaktadır (Thomas Peter vd., 2014).

Birden fazla ticari mobil band kullanan, üretim dostu ve düşük maliyetli bir anten olduğu öne sürülmüştür ve bu antenin üç bantta RF enerjisi toplanması amaçlanmıştır. Geniş ölçüde erişilebilir ve istikrarlı olarak gelecek vadeden RF kaynakları, dijital TV yayınları (500 MHz band) ve mobil telefon hizmetleridir (875 MHz band aşağı bağlantı) (S. Kitazawa vd., 2014).

Ortam radyo dalgalarının güç akı yoğunluğu çok düşük olduğundan, mümkün olduğu kadar RF enerjisi elde etmek için her iki frekansı yakalamak tercih edilir. Spiral antenler kullanan bir ultra-geniş bantlı (2-18 GHz) doğrultucu anten dizisi sunulmuştur. Ancak RF'den DC'ye dönüşüm verimliliği düşüktür. Dijital TV ve hücre bantları için

dar band halka antenler tasarlanmış ve her bir band için özel redresör uygulanmıştır (M. Pinuela vd., 2013).

500 ve 875 MHz bantlar için, halka antenler uygun olarak düşünülebilir, çünkü bu tip anten şu anda verici tarafı için kullanılır ve nispeten yüksek giriş empedansı RF-DC dönüşüm verimliliği açısından bir avantaj olabilir (H. Arai vd., 2012).

Diferansiyel konfigürasyonlu antenler dipol veya çerçeve antenler ile sınırlıdır. Bu antenler 2 dBi kazanç ile çok yönlüdür. Kazancı arttırmak için Yagi-Uda antenleri kullanılmıştır. Bu antenler büyük bir boyuta sahiptir, bu da onların RFID enerji toplama ve iletişim için entegre devreler gibi modern uygulamalarda kullanılmaya uygun değildir (C. A. Balanis vd., 2005).

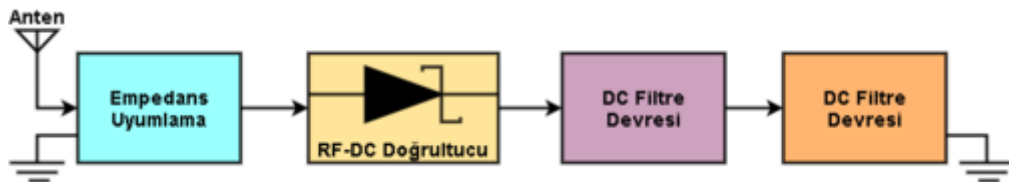
Mikroşerit antenler daha küçüktür ve kazanç gereksinimlerini karşılarlar ancak tek uçludurlar. Bu nedenle, sinyali diferansiyelden tek uca dönüştürmek için anten ile entegre devre arasında genellikle bir balun kullanılır. Bu sınırlamalar dikkate alınarak geliştirilmiş kazanç, verimlilik ve band genişliğine sahip farklı elektromanyetik olarak bağlanmış mikroşerit anten geliştirilmiş ve sunulmuştur (M. Arrawatia vd., 2015).

Başka bir çalışmada ise, hem dikey hem de yatay polarize dalgaları alabilen geniş bantlı bir rectenna (rectified-antenna) sunulmuş, sabit bir radyasyon düzeyine sahip ve tüm band genişliği boyunca doğrultucuya uğrar (M. Arrawatia vd., 2015).

3. RADYO FREKANSLARI İLE ENERJİ HASATLAMA

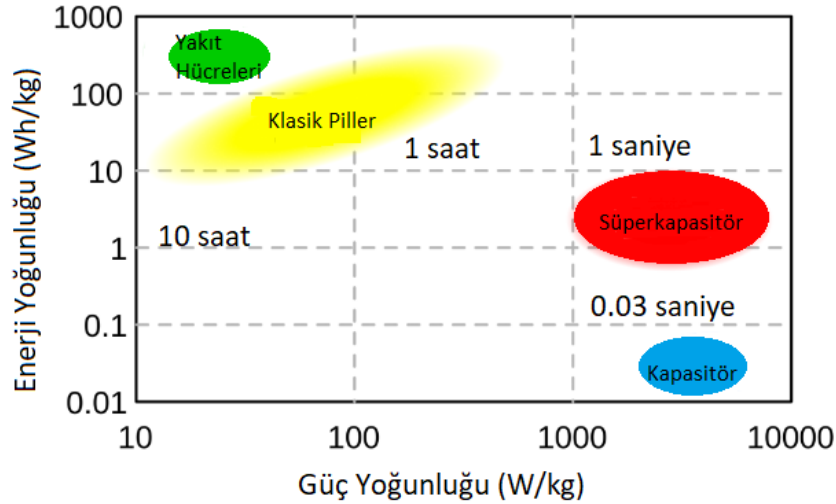
Kablosuz sensör ağları fabrikalardan otomobillere, akıllı binalardan insan vücuduna kadar pek çok yerde bulunur. IoT’de yaşanan hızlı gelişmeler ve yeni kablosuz teknolojilerle birlikte kablosuz sensör ağlarının hayatımızın ayrılmaz bir parçası olacağı konuşulmaktadır. Çoğu zaman binlerce düğümden oluşan bu ağlar geniş bir alana yayılmaktadır. Ağı oluşturan her bir düğüm gücünü bataryalardan karşılar. Bir düğümün ağ içinde ayakta kalması ve data iletmesi bataryaların izin verdiği ölçüdedir. Bataryası biten bir sensör düğümü merkeze veri iletemez. Eğer başka düğümler bu düğüm üzerinden veri aktarıyorsa o zaman problem daha da büyür. Ağdaki düğümlerin çalışıp çalışmadığının gözlemlenmesi, varsa biten bataryaların değiştirilmesi gerekir. Ancak bazı şartlarda bataryanın değiştirilmesi zor bir işlemdir. Örneğin köprü ayaklarına takılan ve betonda oluşan çatlakları algılayan bir sensörün bataryasını değiştirmek kolay değildir. Yanı sıra boşalan bataryaların yok edilmesi de çevre açısından sıkıntılara sebep olacak diğer bir süreçtir. Tüm bu problemler kablosuz sensör ağlarının hızlı bir şekilde yaygınlaşmasının önündeki engellere örnek olarak gösterilebilir. Bu bakımdan bataryalara alternatif olarak enerji hasatlama düşünülebilir. Enerji hasatlama hali hazırda ortamda bulunan enerji kaynaklarının verimli şekilde dönüştürülerek kullanılabilir hale getirilmesidir. Enerji hasatlayıcılar titreşim, sıcaklık, ısı, ışık ve RF enerjiiyi alır, uygun forma getirip depolar.

RF enerji hasatlayıcılar havada bulunan RF sinyalleri kullanarak hasatlama yapar. Bu sinyaller çoğunlukla baz istasyonu, TV vericileri, cep telefonları ve modemlerden yayılan sinyallerdir. RF enerji hasatlayıcıların kablosuz güç iletimi sistemlerinden farkı hasatlayıcı sistemlerin çok düşük güçlerle çalışabilmesidir. Bu nedenle hasatlayıcıların mümkün olduğunca yüksek verimle çalışması gerekir. Şekil 3.1’de standart bir RF enerji hasatlayıcı sistemi görülmektedir.



Şekil 3.1. RF enerji hasatlama sistemi (Wikipedia)

Şekil 3.1’de görüldüğü üzere sistemin ilk elemanı antendir. Anten ortamdaki RF enerjiyi toplayan pasif elemandır. RF-DC doğrultma işlemi sonunda harmonik sinyaller oluşmaktadır. Harmoniklerin antene geri yansması antenin performansını düşürür ve aynı zamanda sisteminde verimini de düşürmektedir. Alçak geçiren süzgeç, DC ve temel frekanstaki sinyalleri geçirirken, harmonik sinyalleri sönümler. Doğrultucu, RF-DC dönüşümünü yapan ve doğrultucu anten verimini belirleyen en önemli elemandır. Doğrultucular transistör veya diyotlardan oluşur. RF enerji hasatlayıcı doğrultucu antenlerde diyot doğrultucular kullanılır. Yüksek frekanslı sinyallerin doğrultulmasında Schottky diyotlar tercih edilir. Sistemin gereksinimleri doğrultusunda farklı yüzeylerde doğrultucular tasarlanır. Doğrultucu antenlerden elde edilen enerji ile bir elektronik alet çalıştırılmak isteniyorsa DC-DC boost dönüştürücülerin kullanımı gerekmektedir. DC-DC boost dönüştürücü düşük çıkış gerilimini kullanılabilir seviyeye çıkarmaktadır. Çıkış gücü hemen kullanılmayıp depolanmak istendiğinde batarya ya da süper kapasitörler kullanılır. Süper kapasitörler bataryalara alternatif olmamakla birlikte depolama kapasiteleri ve kullanım amaçları birbirlerinden farklıdır. Süper kapasitörler binlerce kez doldurulup boşaltılabilmelerine rağmen performanslarında çok az düşme görülmektedir. Bataryalar ise daha uzun süreli enerji tutmaya olanak sağlamaktadır. Şekil 3.2’de çeşitli güç depolama birimlerinin güç ve enerji yoğunlukları verilmiştir.

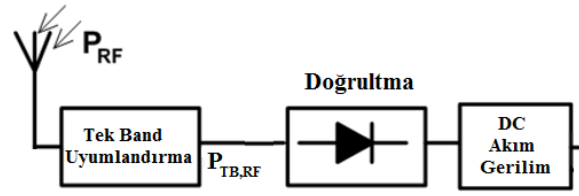


Şekil 3.2. Çeşitli güç depolama birimlerinin güç ve enerji yoğunluğunun grafiği (H. N. Gülmez, 2017)

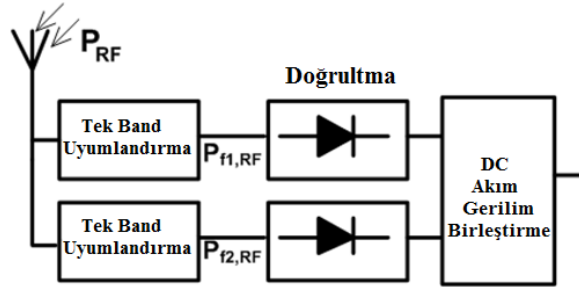
3.1. Frekans Aralıklarına göre Enerji Hasatlama Devreleri

RF enerji hasatlama işlemi, alınan RF güçten, uyumlandırma ve doğrultma devreleri yardımıyla elde edilen DC gücü, çalıştırılacak cihazın güç besleme girişine aktarma süreçlerini içerir (Devi vd., 2012; H. Liu vd., 2014; Mansour ve Kanaya, 2018; Penella-López ve Gasulla-Forner, 2011).

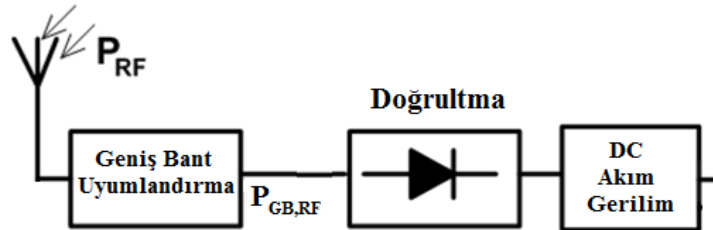
Bu çalışmada, Greinacher ve Dickson doğrultma devreleri kullanılmıştır. Bu devrelerde düşük akım ve gerilimlere cevap verebilen Schottky diyotları kullanılmıştır (Belen, 2018; P. Kim vd., 2013; Mousa Ali vd., 2017).



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.3. (a) tek bant (b) çift bant (c) geniş bant RF güç hasatlama devreleri (O. Kasar, 2019)

Bir mikrodalga devrede, yansımanın olmaması veya minimum olması empedans uyumunun bir göstergesidir (Balanis, 2005). Alıcıdan (anten vs.) alınan sinyal, doğrultucu devreye gelmeden önce yansıma, duran dalga vb. kayıpları en aza indirmek için uyumlandırma devresine gelir. Sinyalin frekansı uyumlandırma frekansı ile aynı ise yansıma seviyesi düşer ve daha fazla güç taşıyan sinyal doğrultucu devreye girer (Kasar vd., 2019).

Alınan bir elektromanyetik dalganın bozulmaya ve zayıflamaya uğramaması için uyumlandırma katmanı çok önemlidir. Son zamanlarda tek frekansta, çoklu frekanslardaki uygulamaların yanında geniş bantlı enerji hasatlama çalışmaları önemi artmıştır (Costanzo ve Masotti, 2016; Lin vd., 2017). RF enerji hasadı son zamanlarda çokça çalışılan güncel konulardan biridir (Adam vd., 2016; Gozel vd., 2019). Şekil 3.3'te tek bant, çift bant ve geniş bant enerji hasatlamada devrelerinin genel şeması ve empedans uyumlandırmanın bu işlemdeki yeri görülmektedir.

Görüldüğü gibi enerji hasatlama devreleri, ya bir frekanstaki (örneğin DVB-T) sinyallerinden DC üretecek, ya iki iletişim bandını kapsayacaktır, ya da geniş bir frekans aralığını kapsayacaktır (Adam vd., 2016; Chaour vd., 2017).

3.2. Enerji Hasadında Kavramlar

Bu bölümde, enerji hasadı çalışmalarının teorik altyapısını oluşturan kavramlar ve tanımlara yer verilmiştir. Enerji ve güç arasındaki ilişki, enerji hasatlamada maksimum güç aktarımı probleminin yeri değerlendirilmiştir.

Temel bir enerji hasatlama devresi doğrultma, uyumlandırma ve aktarma devrelerinden oluşmaktadır. Doğrultucu devre tasarımında, giriş ve çıkış parametrelerinin teorik hesaplamalarına bu bölümde yer verilmiştir. Bu parametreler giriş gücü, çıkış gerilimi ve çıkış gücü, yük direnci, güç dönüştürme verimidir.

Bir RF enerji hasatlama devresi, ortamda (havada) yayılan iletişim sinyallerini yakalar, doğru akım ve gerilime dönüştürür ve kullanılacak cihaza aktarır. Bunun olması için de enerji hasatlama devresinin o iletişim bandında yansımanın minimum olması gerekmektedir. Yansımanın olmaması veya düşük olması empedans uyumunun bir ölçüsüdür. Bu bölümde empedans uyumu, yansıma, iletim ve bant genişliğinin tanımlarına ve enerji hasadı uygulamalarındaki temel hesaplamalarına yer verilmiştir.

3.2.1. Enerji, güç ve güç aktarımı

Birim zamandaki ortalama güç akışına ‘enerji’ denir. Enerji hasatlama aynı zamanda güç hasatlama olarak da ifade edilebilir. Enerji ile güç arasındaki ilişki (3.1)’den kolayca anlaşılmaktadır (Cheng, 1993).

$$W = P \times t \quad (3.1)$$

Burada W enerjiyi ifade eder, birimi Joule’dür. Güç sembolü olan P’nin birimi Watt’tır. t ise zamanı ifade eder, birimi saniyedir. Dolayısıyla eğer zaman kavramından bağımsız olarak anlık ifade edilmek gerekirse güç ifadesi daha doğru olacaktır. Bu çalışmada enerji hasatlama kavramı, güç hasatlama işlemi ile aynı anlamda ve zamandan bağımsız (anlık) olarak kullanılmıştır.

Güç hasatlama devrelerinin en büyük problemlerinden birisi verimdir (S. Kim vd., 2014). Verim, genel olarak giren gücün çıkan güce oranı olarak ifade edilebilir. RF enerji hasatlama, ortamda var olan enerjinin ne kadarının DC’ ye dönüştürüldüğünü değerlendirir. Buna RF’ten DC’ye dönüştürme verimi de denilebilir. Dönüştürme verimi, farklı giriş gücü değerleri için değişim gösterebilmektedir. Örneğin aynı frekansta 0 dBm için % 35 olan verimlilik elde edilirken, -25 dBm giriş gücü için verim % 60 olabilmektedir.

Dönüştürme verimliliğinin yüksek olması için DC’ ye aktarılan gücün maksimum seviyede olması gerekir. Bu konu bir maksimum güç aktarımı (P_{maks}) problemidir, (3.2)’ de maksimum güç aktarımını veren ifade yer almaktadır (Pozar, 2006).

$$P_{maks} = \frac{1}{2} |V_g|^2 \frac{1}{4 \times R_0} \quad (3.2)$$

Burada V_g giriş gerilimi, R_0 ise yük direcidir (Yarman, 2008). Fiziksel olarak yük empedansı karmaşıktır. Fakat maksimum güç aktarımı durumunda empedansın reaktif kısmı sıfır olacağı için sadece reel (direnç) değer kalır. Dolayısıyla paydadaki R_0 ifadesi resistiftir (Yarman, 2008).

Enerji hasatlama işleminin başlangıcı, bir ortamda iletken elektromanyetik dalganın alıcı anten tarafından alınması olarak kabul edilebilir. Burada, kablosuz güç

aktarımının ilkeleri geçerlidir. Sinyal iletiminin en önemli ilkesi Friis denklemidir ve (3.3)'te verilmiştir (Stutzman ve Thiele, 2012).

$$\frac{P_r}{P_t} = e_r \times e_t \times (1 - |\Gamma_r|^2) \times (1 - |\Gamma_t|^2) \times \left(\frac{\lambda}{4\pi R_a} \right)^2 \times D_t \times D_r \times \rho \quad (3.3)$$

Burada, P_t verici antenden çıkan güç, P_r alıcı antene giren güç, D_r ve D_t maksimum yönlülük, e_r ve e_t alıcı verici verimliliği, Γ_t ve Γ_r alıcı ve verici antenlerdeki yansıma katsayısı, ρ polarizasyon kayıp faktörü, λ iletilen/alınan işaretin dalga boyunu, R_a ise kaynakla alıcı arasındaki mesafeyi ifade eder (Stutzman ve Thiele, 2012).

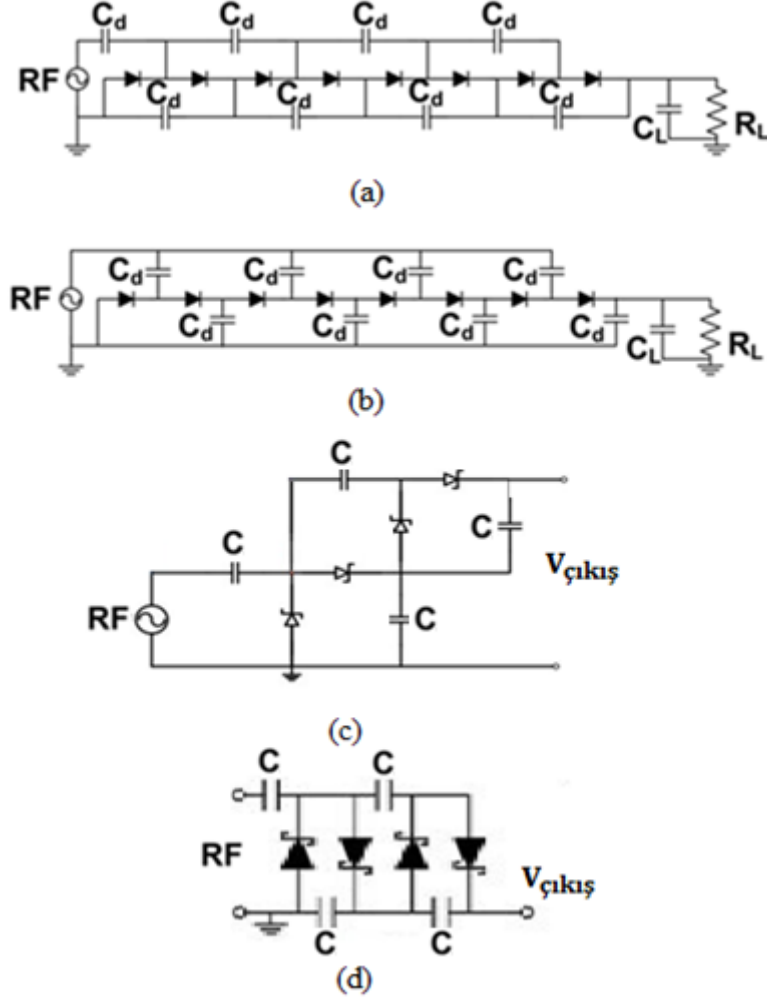
Alıcıdan (anten) alınan ve girişi uyumlandırılan RF sinyal tam dalga doğrultucuya aktarılarak pozitif ve negatif alternansları (yarım periyotları) doğrultulur. Doğrultma işleminde, RF sinyalin alternanslarından kaynaklanan dalgalanmalar alçak geçiren filtrelerden geçirilerek doğru akım ve gerilim elde edilir. Elde edilen DC, çıkıştaki yüke aktarılarak uygulamalarda kullanılabilir (Song vd., 2017).

3.2.2. Doğrultma

RF enerji hasatlama işleminin en önemli parçası doğrultucu devredir. Alternatif akımı (AC) doğru akıma çeviren devrelere doğrultucu devreler denir (Boylestad vd., 2002).

Alternatif akım gibi davranan iletişim sinyalinin gücü, doğrultucu devreye aktarılır. Böylelikle RF sinyalin periyodikliği ve dalgalanması giderilir ve çıkışta doğru akım ve gerilim elde edilir. Alınan sinyal genliğinin daha düzgün doğru akım ve gerilim elde edilmesi ve çekilen akım miktarına ve yük direncine bağlı olarak daha yüksek çıkış gerilimi değerlerine ulaşılması hedeflenir. Bunun için çeşitli RF doğrultma topolojileri literatürde sıklıkla kullanılmaktadır. Hatta bu doğrultucu devreler ile doğrultma işlemi birden fazla kere tekrarlanarak çok katmanlı doğrultma yapılan uygulamalar da mevcuttur (Chaour vd., 2017; Kim vd., 2014; Park vd., 2014). Çok katmanlı doğrultma işleminin temel amacı, ters gerilimlenen diyot üzerinden aşırı akım geçmesini önlemek ve akımın fazlasını diğer katmandaki kollara dağıtmaktır. Literatürde sıklıkla karşılaşılan çok katmanlı RF doğrultma topolijilerinin önemlilerinden olan Dickson,

Cockroft-Walton, Villard ve Greinacher doğrultucu devreleri Şekil 4.4'te verilmiştir (Collado ve Georgiadis, 2013; Mousa Ali vd., 2017).



Şekil 3.4. Doğrultucu Devre Topolojileri (a) Cockroft Walton (b) Dickson (c) Villard (d) Greinacher RF'ten DC'ye doğrultucu devreleri (O. Kasar, 2019)

Tüm bu devrelerin ortak özellikleri, girişte RF gücü olarak çıkışta DC bir potansiyel farkı meydana getirmeleridir. Enerji hasatlama devreleri ve çalışma performansı bazı parametrelere göre değerlendirilir. Bunlar giriş gücü, çıkış gerilimi, güç dönüştürme verimi ve yük direncidir (Kasar vd., 2019).

3.2.3. Giriş gücü

Enerji hasatlama devrelerinde doğrultucu girişinden devreye giren güce giriş gücü (P_{in} veya $P_{giriş}$) denir. RF enerji hasatlama uygulamalarında $P_{giriş}$, genellikle düşük

güçleri ifade etmek için dBm (desibel mili) birimine dönüştürülür. Güç işlemlerinde, logaritmik bir ifade kullanmak hesaplamalar açısından daha fazla sadelik sağlamaktadır. Matematiksel işlemlerde çarpma, logaritmada toplama anlamına geldiğinden işlemler kolaylaşmaktadır. Denklem (3.4) logaritmik güç ifadesinin reel güçten (watt) nasıl hesaplanacağını göstermektedir (Pozar, 2006).

$$P(dBm) = 10 \cdot \log_{10} \left(1000 \cdot \frac{P(W)}{1W} \right) \quad (3.4)$$

Güç birimi Watt'tır. Burada logaritma dönüşümü yapıldığında logaritmik olarak “dBm” şeklinde ifade edilir. dBm güç ifadesinden reel güç ifadesine dönüşüm işlemi (3.5)’te verilmiştir (Pozar, 2006).

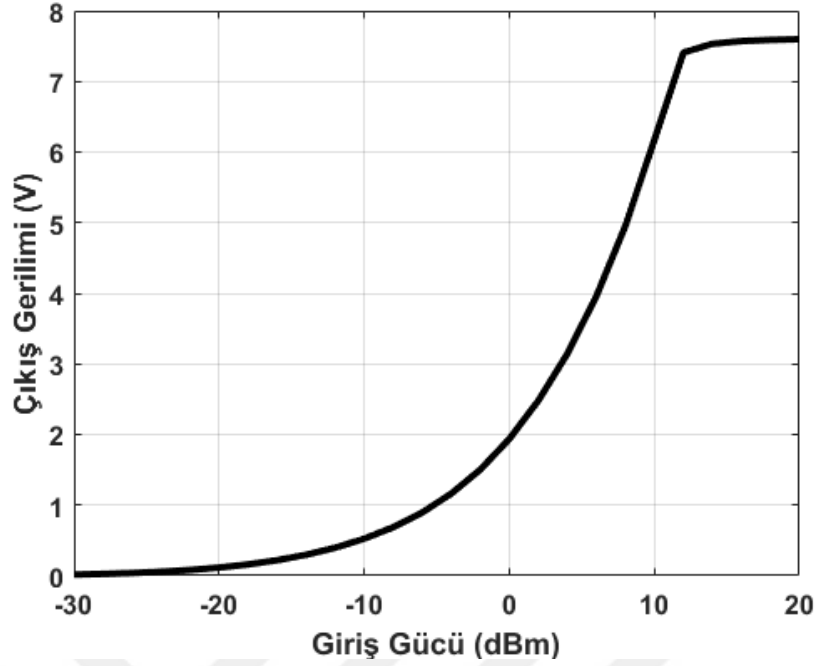
$$P(W) = 1W \cdot 10^{\left(\frac{P(dBm)}{10} \right)} / 1000 \quad (3.5)$$

3.2.4. Çıkış gerilimi

Doğrultucu devreler, girişte uygulanan RF güce karşılık, çıkıştaki yük direncinin üzerinde DC gerilim oluşmasını sağlamaktadır. Yük direnci üzerindeki gerilim, direnç değerine göre değişebilmektedir. Buna karşılık devrenin doğrultabileceği güç miktarı sınırlı olduğundan dolayı artan direnç değerine göre gerilim artsa da direnç üzerinden geçen akım miktarı düşmektedir. Bunun nedeni akım-gerilim arasındaki ilişkidir ve denklem (3.6)’da verilmiştir (D. Cheng, 1993).

$$V = I \times R \quad (3.6)$$

Burada V devrenin ürettiği DC potansiyel fark, I dirençten geçen akım ve R de yük direncidir. Şekil 3.5’de örnek bir enerji hasatlama devresinde giriş gücüne karşılık çıkış gerilimi değişimi verilmiştir.



Şekil 3.5. Örnek bir enerji hasatlama devresinde giriş gücüne karşılık çıkış gerilimi değişimi (O.Kasar, 2019)

3.2.5. Güç dönüştürme verimi (GDV)

Elde edilen DC gücün, RF giriş gücüne oranına “RF’ten DC’ye dönüştürme verimliliği” ya da “doğrultma verimi” denir (Park vd., 2014). Bu dönüştürme verimi, literatürde en çok değerlendirilen parametrelerden biridir. Farklı giriş güç değerlerine GDV verimliliği de farklı olmaktadır. Doğrultma verimini veren ifade (3.7)’de görülmektedir.

$$GDV = \frac{\text{Hasatlanan güç}}{\text{RF giriş Gücü}} = \frac{P_{DC}}{P_{in}} = \frac{V_{DC}^2}{P_{in} \times R_L} \quad (3.7)$$

GDV verim ifadesi olduğundan sıfır ile bir arasındadır ($0 \leq GDV \leq 1$). Fakat GDV değeri genellikle yüzdelik olarak ifade edilir. Bu nedenle GDV değeri 100 ile çarpılır. Yüzde GDV hesabı (3.8)’de verilmiştir (Bae vd., 2017).

$$GDV(\%) = \frac{\text{Hasatlanan güç}}{\text{RF giriş Gücü}} \times 100 = \frac{P_{DC}}{P_{in}} \times 100 \quad (3.8)$$

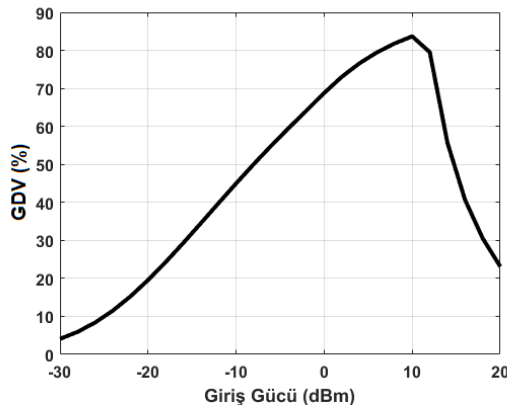
Burada P_{DC} enerji hasatlama devresinin çıkışından elde edilen güçtür. P_{in} devreye giren RF gücü ifade eder. V_{DC} , çıkıştaki DC gerilimi ve R_L ise üzerine gerilim düşen yük direncini temsil eder. Sinyal jeneratöründen alınan giriş gücü P_{in} eğer dBm cinsinden ise, GDV hesabında kullanmak için reel güç değerine dönüştürmek gerekir. Bunun için (4.5)'ten faydalanılabilir. Çıkış gücünün hesaplanması, çıkış gerilimi ve yük direncine bağlıdır. Bu da (3.9) yardımıyla yapılabilir (Mousa Ali vd., 2017).

$$P_{DC} = \frac{V_{DC}^2}{R_L} \quad (3.9)$$

Burada çıkış gücü, V_{DC} 'ye bağlı ikinci derece bir denklem olduğundan, DC gücün logaritmik (dBm) olarak hesaplanması istediğinde (3.10) kullanılır (Pozar, 2006).

$$P_{DC} (dBm) = 10 \cdot \log \left(\frac{1000 \cdot P_{DC} (W)}{1W} \right) \quad (3.10)$$

Şekil 3.6'da örnek bir enerji hasatlama devresinde giriş gücüne karşılık GDV grafiği verilmiştir.

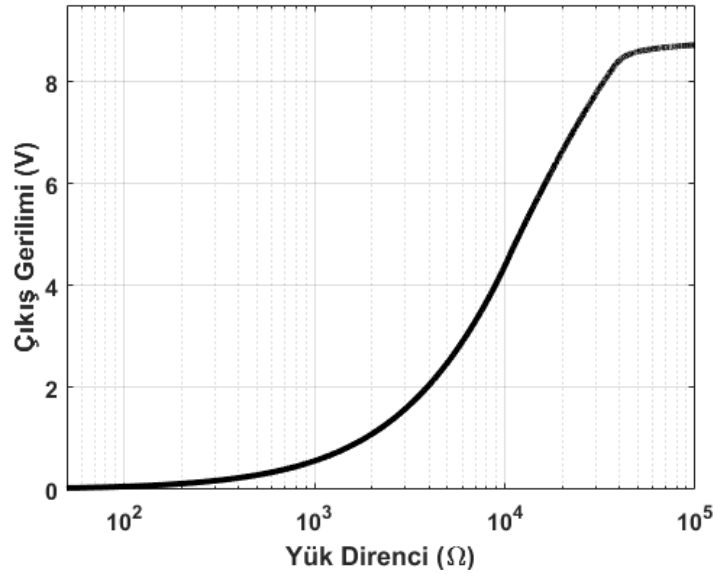


Şekil 3.6. Örnek bir enerji hasatlama devresinde giriş gücüne karşılık GDV grafiği (O. Kasar, 2019)

3.2.6. Yük direnci analizleri

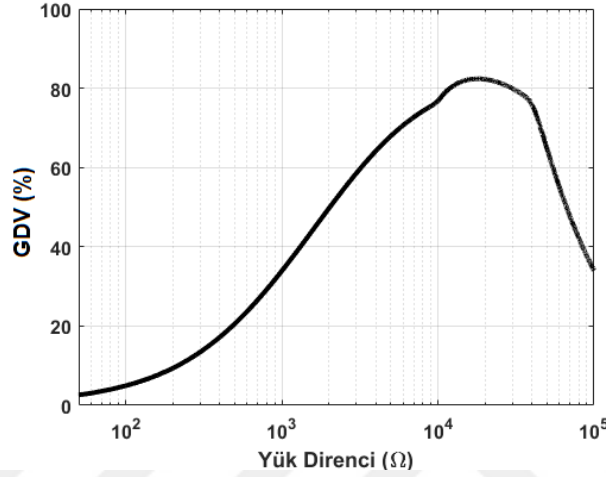
RF doğrultucu devrelerde bakılması gereken parametrelerden birisi de yük direncidir. Çünkü enerji hasatlama uygulamalarında, doğru akım ve gerilimin uygulanacağı yük direnci, çalışma gerilimini doğrudan etkilemektedir (Penella-López ve Gasulla-Forner, 2011). Doğrultma devresi çıkışından elde edilen gerilim değeri, çıkış direncinin büyüklüğü arttığında artmaktadır. Enerji hasatlama devrelerinin gerçek kullanım alanlarında bu yük dirençleri, enerji ihtiyacı karşılanacak sensörleri ve cihazları temsil etmektedir (Collado ve Georgiadis, 2013). Doğrultucu devrelerden daha yüksek akım ve gerilim elde edilmeye çalışılmasının amacı, bu sensör ve devrelerin doğrusal çalıştığı eşik sınırlar olan ‘anma akımı’ ve ‘anma gerilimi’ seviyelerinde enerji beslemesi sağlayabilmektir. Genellikle yük dirençlerinden önce enerji depolamak veyahut gerilimi belirli seviyelerin üstünde tutmak amacıyla şarj tankı adı verilen ve kapasitör görevi gören küçük devre elemanları kullanılır (Devi vd., 2012).

Şekil 3.7’de örnek bir enerji hasatlama devresinin, sabit bir giriş gücü için değişen yük direnci değerlerine karşılık çıkış gerilimi grafiği görülmektedir. Burada çıkış gerilimi, yük direncinin artmasıyla artmakta ve bir doyum sınırına ulaştığı görülmektedir. Bu sınır, doğrultucu devrenin DC’ye dönüştürebileceği akım miktarının sabit olmasıyla açıklanabilir.



Şekil 3.7. Örnek bir enerji hasatlama devresinin, değişen yük direnci değerlerine karşılık çıkış gerilimi grafiği (O. Kasar, 2019)

Şekil 3.8’de örnek bir enerji hasatlama devresinin, sabit bir giriş gücü için değişen yük direnci değerlerine karşılık GDV (%) grafiği görülmektedir. Burada GDV, yük direncinin artmasıyla artmakta ve bir maksimum sınırına ulaşmaktadır. Ardından da düşme eğilimine geçmektedir. Maksimum sınırdan sonra düşmesi, doğrultucu devrenin DC’ye dönüştürebileceği akım miktarının sabit olması ve hesaplamada artan yük direncinin paydada yer almasıyla açıklanabilir.



Şekil 3.8. Örnek bir enerji hasatlama devresinin, değişen yük direncine karşı GDV grafiği (O. Kasar, 2019)

3.2.7. Frekans ve bant genişliği

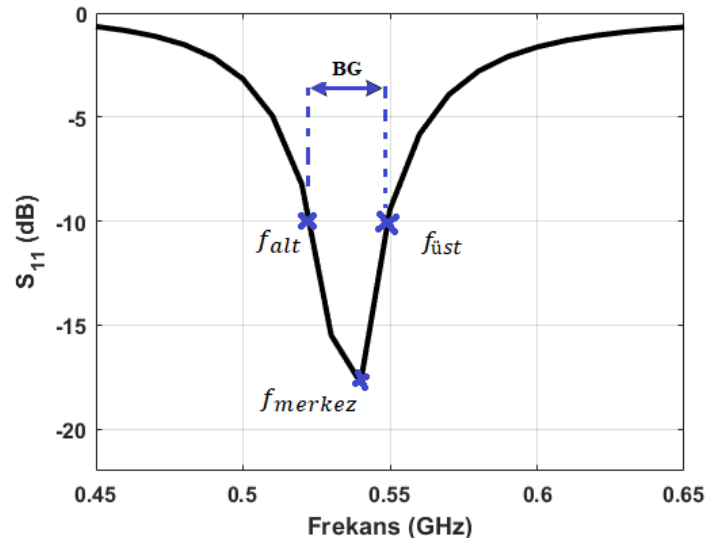
Bir elektronik devrede bant genişliği, devrenin istenilen performansı sağladığı frekans aralığı olarak tanımlanır (Boylestad vd., 2002). Enerji hasatlama devrelerinde bant genişliği, alınan RF sinyalin doğrultucu devreye, eşik genlik değerleri içinde iletilebildiği, alt kesim (f_{alt}) ve üst kesim ($f_{üst}$) frekansları arasında kalan frekans aralıklarıdır.

$$BG = f_{üst} - f_{alt} \quad (3.11)$$

Geniş bant kavramı, merkez frekansı ile orantılı olarak göreceli bir kavramdır. Ayrıca bir tasarım parametresi olarak yüzde bant genişliği diye bir parametre tanımlanmıştır. Yüzde bant genişliği denklemi (3.12)’de gösterilmiştir.

$$BG(\%) = \frac{f_{üst} - f_{alt}}{f_{merkez}} \times 100 \quad (3.12)$$

Şekil 3.9’da bant genişliğini (BG) anlatan genel bir grafik görülmektedir. ITU-R standartlarına göre ultra geniş bant tanımı merkez frekansı etrafında en az 500 MHz bant aralığı bulunan veya merkez frekansına oranla %20 bant genişliğini sağlayan sistemler ultra geniş bantlı kabul edilebilir (Lu vd., 2015).



Şekil 3.9. Bant genişliği ve kesim frekansları (O. Kasar, 2019)

3.2.8. Empedans kavramı ve iletim hattı

Bir iletim hattı, karakteristik empedansına göre fiziksel olarak gerçekleştirildiği devrede belirli bir genişliğe sahiptir. Bu genişlik kullanılan malzemenin dielektrik özelliklerine, kalınlığına, yapısına (düzlem vs.) göre değişiklik göstermektedir (Oliner vd., 2007).

Empedans uyumlandırma işlemleri genellikle çalışılan merkez frekansına göre yapılır. Mikrodalga devrelerde, eğer bir alttaş malzeme üzerinde bir devre oluşturulacaksa, iletim hattının kullanılan malzeme üzerinde ilerleme hızı ve dalga boyu bilinmelidir. Çünkü devrenin üst kısmı hava (serbest uzay) olacağından malzemenin ‘etkin dielektrik sabiti’ değişir. Değişen bu dalga boyuna ‘kılavuzlanmış dalga boyu’ denir (Balanis, 2005; Stutzman ve Thiele, 2012).

3.2.9. Yansıma ve iletim

Enerji hasatlama devresinde iletim hattı birinci ortam ve doğrultucu devre de ikinci ortam olarak düşünüldüğünde, gelen elektromanyetik dalganın doğrultucu devreye gönderilen kısmına iletilen elektromanyetik dalga denir. Kaynaktan gelen dalganın kaynağa (birinci ortama) dönen kısmına da yansıya elektromanyetik dalga adı verilir. Gelen elektromanyetik dalganın ne kadarının yansıdığını gösteren parametre de yansıma katsayısı olarak adlandırılır (Balanis, 2012).

Genlik cinsinden yansıma katsayısının logaritmik değeri geri dönüş kaybı (return loss) olarak adlandırılmaktadır. Denklem 3.15’de geri dönüş kaybı (RL) hesabı verilmiştir. Teorik olarak geri dönüş kaybı pozitifdir. Fakat literatürdeki uygulamalarda bu ifade bir kayıp değerini ifade ettiği için grafiklerde negatif olarak gösterilmiştir (Oliner vd., 2007; Stutzman ve Thiele, 2012).

$$RL = -20 \log |\Gamma| \text{ dB} \quad (3.15)$$

Geri dönüş kaybı aynı zamanda S parametreleri ile de ifade edilmektedir. Tek kapılı devrelerde girişteki yansımanın bir ölçüsü olarak geri dönüş kaybı S_{11} ile ifade edilmiştir. Diğer bir ifade ile bir devreye gelen gücün istenilen seviyeden az yansıma ile doğrultucu devreye iletilebilmesi için geri dönüş kaybının (yani $|S_{11}|$ ‘mutlak’ değerinin) 10 dB’den daha küçük olması gerekir. Bu yansıma değeri aynı zamanda yansıma katsayısının $|\Gamma| = 0.316$ ’nın altında olduğunu ifade eder. Denklem (3.16) yardımıyla, 10 dB sınırı ortalama güç aktarımının $P_{ort} = \% 90$ olduğu çıkarılabilir.

$$P_{ort} = \frac{1}{2} \frac{|V_0^+|^2}{Z_0} (1 - |\Gamma|^2) \quad (3.16)$$

Burada, Z_0 hattın karakteristik empedansı, V_0^+ devre girişindeki sinyalin geliş yönündeki genliği ve Γ ise yansıma katsayısıdır (Pozar, 2006).

RF gücün DC’ye dönüştürmesi yapılırken, hangi dalga boyundaki (frekansta) elektromanyetik dalga DC’ye dönüştürülecekse, giriş empedans uyumlandırması da bu frekansa göre yapılmalıdır. Söz konusu uyumsuzluk durumunda, doğrultucuya girmesi gereken güç üzerinde yansıma meydana gelebilir. Buna bağlı olarak maksimum güç

aktarımı gerçekleşmez (Caron, 1993). Bu gibi çalışmalarda en çok dikkat edilecek konulardan birisi de, geniş bant güç girişleri için empedans uyumluluğunu temin edebilmektir. Empedans uyumluluğu durumda, RF güç girişlerinde doğrultma ve dönüştürme daha iyi sonuçlar verecektir.

Çeşitli uyumlandırma teknikleri kullanılarak daha çok frekansı içine alan bir enerji hasatlama devresi, farklı frekanslardaki güç sinyallerinin hasatlanabileceğinin ölçüsünü göstermektedir (Devi vd., 2012; Song vd., 2017).



4. MİKROŞERİT ANTENLER

4.1. Mikroşerit Antenlerin Temel Karakteristikleri

Dielektriğin malzemesi anten performansı, band genişliği, geri dönüş kaybı ve kazanç gibi birçok parametre için önemlidir. Yalıtkan malzemenin dielektrik değerinin küçük olması ve yüksekliğinin fazla olması, antende ideal ışımanın sağlanmasıyla beraber band genişliğini de arttırmaktadır. Malzeme kalınlığının artması ile yüzey dalgalarının meydana gelmesi anten veriminde azalmaya ve ışıma deseninde bozulmaya sebep olabilir (D. M. Pozar & Schaubert, 1995).

İşımanın gerçekleştiği yama " $0 < t < 0.1 \text{ mm}$ " aralığında değerler alırken, toprak düzlemi bakır, alüminyum gibi malzemelerden, yalıtkan tabaka ise seramik, teflon, hava, epoksi tekstil gibi farklı dielektrik sabiti ve tanjant kayıplarına sahip malzemelerden seçilebilir. Yalıtkan malzeme kalınlığı (h) " $0.003\lambda \leq h \leq 0.05\lambda$ " aralığında seçilebilmektedir (Balanis, 2005).

Mikroşerit antenler yüksek kalite faktörüne (Q) sahiptirler. Kalite faktörü kayıpları temsil eder ve yüksek Q değeri, bant genişliğinin darlığına ve düşük verime karşılık gelmektedir. Kalite faktörü yalıtkan tabakanın kalınlığının artırılması ile düşürülür. Yalnız kalınlığın artması aynı zamanda istenmeyen güç kayıplarına neden olacağından anten karakteristiklerinin bozulmasına sebep olur (Garg, 2001).

Mikroşerit antenlerde ışıma deseni sıklıkla iletim hattı, boşluk ve moment metodu olarak bilinen integral denklemlerini içeren tam dalga metotları kullanılarak elde edilir (K. Carver & Mink, 1981; J. R. James, 1989). İletim hattı modeli bu yöntemler içerisinde en çok tercih edilenidir. Bu metodun dezavantajı ise diğer yöntemlere göre daha az doğrulukla analiz gerçekleştirmesidir. Boşluk yönteminde ise iletim hattı modeline göre daha fazla doğruluk sağlamasına karşın karmaşık bir analiz sunmaktadır (Malkomes, 1982; Penard & Daniel, 1982).

4.2. Mikroşerit Antenlerin Analizi

Anten analizinin amacı, hem kutuplanma, kazanç ve ışıma diyagramı gibi ışıma karakteristiklerini, hem de verim, ortak kuplaj, empedans bant genişliği ve giriş empedansı gibi yakın alan karakteristiklerini tahmin etmektir. Mikroşerit antenlerin analizi ise dielektrik homojensizliği, homojen olmayan sınır şartları, dar frekans bandı

karakteristikleri ile çok farklı besleme, yama şekli ve dielektrik taban konfigürasyonlarının varlığı sebebiyle oldukça karmaşıktır. Bu sebeple, seçilen yöntemin karmaşıklığı ile çözümün doğruluğu arasında bir denge sağlanmalıdır.

Eğer seçilen model aşağıdaki karakteristiklere sahipse, iyi bir model olduğu söylenebilir (D. M. Pozar, 1992).

- Tartışma altındaki antenin bütün empedans ve ışıma karakteristikleri hesaplamak için kullanılabilir.
- İstenilen amaca yetecek ölçüde doğru sonuç vermelidir.
- Empedans ve ışıma özellikleri için gerekli doğruluk sağlanırken mümkün olduğu kadar basit olmalıdır.
- Bilinen fiziksel nicelikler cinsinden yorumlamaya açık olmalıdır.

Tam dalga tekniklerinin bazı özellikleri aşağıda verilmiştir (D.M. Pozar, 1992):

Doğruluk: Tam dalga teknikleri genelde empedans ve ışıma karakteristikleri için en doğru çözümü vermektedir.

Bütünlük: Tam dalga teknikleri, dielektrik kaybı, uzay dalga ışıması, yüzey dalgaları ve dış kuplaj etkileri dahil olmak üzere tümünü tam olarak çözebilmektedir.

Çok yönlülük: Tam dalga teknikleri herhangi bir şekle sahip mikroşerit elemanlar ve diziler, farklı tipte besleme teknikleri, çok katmanlı geometriler, anizotropik tabanlar ve aktif antenler için kullanılabilir.

Hesaplama maliyeti: Tam dalga teknikleri, sayısal olarak yoğun işlem gerektirir ve bu sebeple hesaplama maliyetini düşürmek için dikkatli programlama gerekmektedir.

En popüler üç tam dalga tekniği şunlardır:

Spektral domen tam dalga analizi: Bu yaklaşım mikroşerit antenlerin karmaşık dielektrik yapısı için tam Green fonksiyonu kullanılır (D. Pozar, 1987) ve (Deshpande

& Bailey, 1982). Green fonksiyonu, yama iletkeninde sınır şartlarını sağlamak için elektrik alan integral denklemi formülasyonunda kullanılır. Sonuç integral denklemleri, bir matris denklemi oluşturmak üzere moment yöntemi vasıtasıyla bir dizi lineer denkleme ayrılırlar. Matris denkleminin çözümü yama iletkeni üzerindeki akım dağılımını verir. Daha sonra, antenin yakın alan ve uzak alan karakteristikleri akım dağılımından ve Green fonksiyonundan bulunur.

Karmaşık potansiyel integral denklem analizi: Karmaşık potansiyelli integral denklemi metodu, keyfi şekilli yamaların analizi için (Mosig, 1988) tarafından önerilmiştir. Metot temelde (Harrington & Harrington, 1996) ince antenler için kullanıldığı metodun mikroşerit antenlere uyarlanmış halidir. İntegral denklemi hem bir skaler potansiyel hem de bir vektör potansiyel içerir, dolayısıyla diğer yazarlar tarafından incelenen integral denkleminin genelleştirilmiş bir biçimidir. Karmaşık potansiyelli integral denklemi, moment metodu kullanarak uzay domeninde çözülür (Mosig, 1988). Karmaşık potansiyel integral denklemi yaklaşımı, spektral domende tanımlanan integral denklem analizinden hesaplama olarak daha verimlidir.

Sonlu-Fark zaman-domeni analizi: İlk defa (Yee, 1966) tarafından teklif edilmiştir ve diğer tekniklere karşı avantajları nedeniyle birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır.

- Matematiksel bakış açısıyla sonlu-fark zaman-domeni Maxwell'in eğri ifadelerinin doğrudan uygulanmasıdır. Bu sebeple, Maxwell denklemlerinin analitik işlemleri hemen hemen ihmal edilebilir.
- Analiz zaman domeninde olduğundan geniş band frekans tepkisi tahmin edilebilir.
- İnsan vücudu ile dalga etkisini, uydu, lineer olmayan devre simülasyonları, kompleks antenler vb. kompleks sistemlerin analizi yapılabilir.
- Kayıplı dielektrik, mıknatıslanmış feritler ve anizotropik plazmalar gibi farklı tipteki malzemeler kullanılan yapılar analiz edilebilir.
- Son olarak, elektromanyetik tasarımcılar için çok güçlü bir yardımcı olan gerçek zaman animasyon gösterimi sağlayabilir.

4.3. Anten Parametreleri

Temel anten parametreleri, antenin performansını değerlendirebilmek amacıyla önemli bir yere sahiptir. Anten parametrelerinin bazıları birbiriyle bağlantılıdır (Balanis, 2013).

4.3.1. Işıma Örüntüsü

Anten ışıma örüntüsü, antenin ışıma özelliklerini uzay koordinatlarına göre açıklayan matematiksel fonksiyon veya grafiksel gösterimlerdir (Balanis, 2013). Genellikle ışıma örüntüsü uzak alan için tanımlanır. Işıma özellikleri güç alıcı yoğunluğu, ışıma şiddeti, alan kuvveti, yönlülük ya da polarizasyonudur. Genellikle dB cinsinden ifade edilir. Logaritmik olarak da ifade edilebilir (Balanis, 2013).

4.3.2. Geri Dönüş Kaybı

Bir devrede verilen elektromanyetik sinyalin geri gelen kısmına yansıyan dalga denir. Geri yansıyan bu dalgayı ifade etmek için yansıma katsayısı ifadesi kullanılır (Kasar, 2015). Aynı zamanda yansıma katsayısı giden dalga gerilimiyle dönen dalga geriliminin birbirine oranına eşittir. ‘dB’ cinsinden ifade edilir. dB cinsinden bu parametreye geri dönüş kaybı (return loss, RL) adı verilir. Geri dönüş kaybı antenin empedans uyumluluğunun ne kadar iyi olduğu hakkında bilgi vermektedir. Matematiksel gösterimi:

$$RL = -20 \log |\Gamma| \quad (4.1)$$

Burada, Γ yansıma katsayısıdır.

Devrede yansımanın hiç olmaması istenir. Fakat bu mümkün değildir. Geri dönüş kaybı hiçbir zaman sıfır olamaz. Devrenin kullanıldığı yere göre minimize edilir (Gözel, 2015).

4.3.3. Bant Genişliği

Antenler geniş bantlı veya dar bantlı olarak tarif edilirler. Geniş bant üst kesim frekansının alt kesim frekansına oranı olarak verilir. Günümüzde 40:1 oranında çok geniş bantlı antenlerde vardır. Dar bantlı antenler ise üst ve alt kesim frekans aralığının merkez frekansına oranı yüzde olarak verilir (Balanis, 2013).

Bant genişliği geniş ve dar bant olarak formülize etmek gerekirse sırasıyla;

$$BG = \frac{f_{üst}}{f_{alt}} \text{ (geniş bant)} \quad (4.2)$$

$$BG = \frac{f_{üst} - f_{alt}}{f_{merkez}} * 100 \text{ (dar bant)} \quad (4.3)$$

4.3.4. Kazanç

Antende meydana gelen kayıpları belirlemede kritik bir faktördür. Antenin gücünü bir açısal uzay bölgesine yoğunlaştırabilme kabiliyeti olarak geçmektedir.

$$(G_{ot})_{dB} + (G_{or})_{dB} = 20 \log \frac{(4\pi R)}{\lambda} + 10 \log \frac{P_r}{P_t} \quad (4.4)$$

$(G_{ot})_{dB}$ = İletilen antenin kazancı

$(G_{or})_{dB}$ = Alıcı anten kazancı

P_r = Alınan Güç (W)

P_t = İletilen Güç (W)

$$(G_{ot})_{dB} = (G_{or})_{dB} = 10 \log \frac{(4\pi R)}{\lambda} + 5 \log \frac{P_r}{P_t} \quad (4.5)$$

4.3.5. Kutuplama

Bir elektromanyetik dalganın yere ya da dünyanın yüzeyine referansla bulunduğu pozisyon ve doğrultusu ile ifade edilebilir. Çok sık rastlanan iki çeşit kutuplama vardır; lineer kutuplama ve dairesel kutuplama. Mikroşerit antenlerin bu konudaki en büyük faydaları bir yamalı mikroşerit antenin lineer veya dairesel kutuplama yapacak şekilde tasarlanabilmesidir. Başarılı bir veri iletimi için alıcı ve verici antenlerin kutuplamasının aynı olması gerekmektedir.

4.3.6. Yönlülük

Yönlülük, antenin bir yöne yaptığı ışıma şiddetinin diğer bütün yönlerde yaptığı ortalama ışıma şiddetine bölünmesi ile elde edilir. Yönlülük boyutsuz bir parametredir. Ortalama ışıma şiddeti ise toplam ışıma şiddetinin 4π 'ye bölümünden elde edilir (Balanis, 2013).

Yönlülük anten için oldukça önemli bir parametredir. Çünkü haberleşme için iki anten kullanıldığında bunların yönlülük olarak doğru konumlandırılması gerekir. Böylece iletim sağlanabilir. Yönlülüğün matematiksel ifadesi:

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (4.6)$$

D: Yönlülük

U: Antenin belli bir yöndeki ışıma gücü

P_{rad} = Işıma şiddeti

4.3.7. Verimlilik

Antenin kaynaktan aldığı gücün bir kısmı ısı kayıpları olarak antende harcanır. Kaynaktan çekilen güç, ışıma gücü ve ısı kayıplarının toplamına eşittir. Isıl kayıpların toplamı, omik kayıplar, yansıma kayıpları ve anten yapısından kaynaklı kayıplardan oluşmaktadır. Antenin verimi, ışıma gücünün kaynaktan çekilen güce oranı olarak ifade edilebilir. Isıl kayıpların fazla olması anten verimini etkiler ve düşürür. Anten

verimliliği 0 ile 1 arasında tanımlanır. 1'e eşit olması, fiziksel olarak mümkün olmasa bile, arzu edilen durumdur.

Anten verimliliğini etkileyen birçok etken vardır. Örneğin besleme hattının empedans uyumluluğu, kullanılan dielektrik malzemenin kayıpları antenin verimliliğini etkileyen başlıca etkenlerdendir (Gözel, 2015).

$$e_0 = e_c \times e_r \times e_d \quad (4.7)$$

e_0 : Anten verimi

e_r : Yansıma verimi ($1 - |\Gamma|^2$)

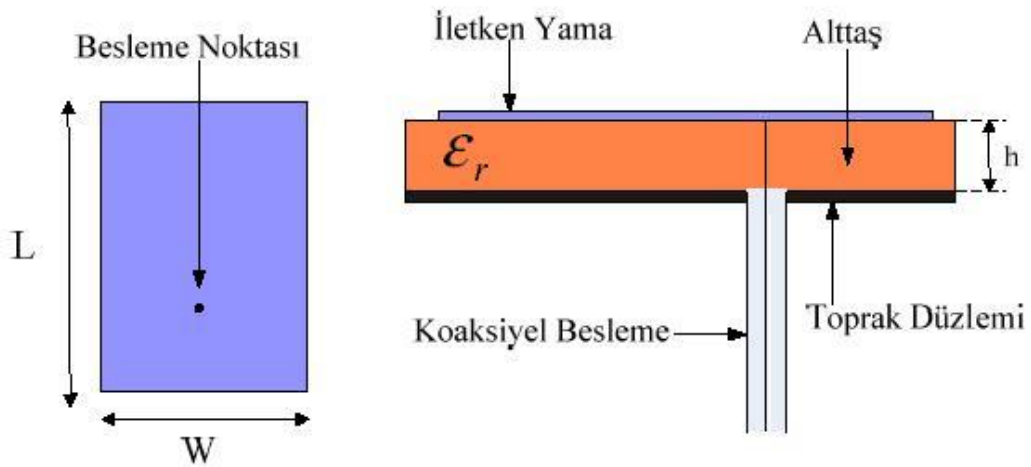
e_c : İletim verimi

e_d : Dielektrik materyalin verimi

4.4. Dikdörtgen Şekilli Mikroşerit Anten

Dikdörtgen yamalı mikroşerit antenler, en yaygın kullanılan mikroşerit anten çeşididir. İletim hattı ve boşluk metotları kullanılarak analiz edilmeleri çok basittir (Balanis, 2005).

En basit haliyle ve Şekil 4.1' de gösterildiği gibi, anten elemanı, h kalınlığında, alt yüzü toprak ve ϵ_r dielektrik sabitine sahip bir taban üzerinde iletken bir şerittir. İletken şerit $L \times W$ boyutlarındadır.



Şekil 4.1. Dikdörtgen mikroşerit anten geometrisi (R. URFALIOĞLU, 2011)

Yama bir besleme verildiğinde toprak düzlemi ve yama iletkeninde bir akım dağılımı oluşur. Yüklerin bir kısmı kenarlara doğru çekilir. Dolayısıyla kenarlarda fazla bir akım yoğunluğu oluşur. Bu yükler saçılma alanlarına bağlı ışımanın kaynağıdır. Saçılma alanı ve ışıyan güç, kalın bir dielektrik taban kullanılarak artırılabilir.

Mikroşerit yama antenlerde $L/h \gg 1$ olduğundan L 'ye bağlı saçaklanma azalır ancak yine de dikkate alınmalıdır çünkü rezonans frekansında belirleyici bir girdidir. Aynı durum anten eni (W) için de geçerlidir. $W/h \gg 1$ olduğundan elektrik alan çizgilerinin çoğunluğu alttaş malzemenin içinde, azınlık bir kısmı ise havadadır. Bu etkilerden dolayı ışıma çizgilerine bakıldığında, fiziksel boyutlardan daha geniş bir anten varmışçasına bir sonuç elde edilir.

W , yama boyu aşağıdaki formülle bulunabilir (J. R. James, 1989).

$$W = \frac{c}{2f_r} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4.8)$$

Denklemden c ışığın boşluktaki hızı, ϵ_r malzemenin dielektrik sabiti, f_r ise çalışılan frekansıdır. Etkin dielektrik sabiti ϵ_{reff} ;

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + \frac{12h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{W}{h} \right) \gg 1 \right] \quad (4.9)$$

L , yama uzunluğu;

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 0.824h \left\{ \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \right\} \quad (4.10)$$

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. HFSS (High Frequency Structural Simulator) (Yüksek Frekans Yapısal Simulatörü)

HFSS (High Frequency Structural Simulator) elektromanyetik yapıları sonlu elemanlar yöntemi ile çözen yazılımsal bir simulatördür. Üreticisi Ansys Corporation'dır. Antenlerin, filtre içeren karmaşık RF devrelerinin, iletim hatlarının tasarımında en çok tercih edilen birkaç ticari yazılımdan biridir.

Yazılımın ilk aşamaları Carnegie Mellon Üniversitesi'nden Prof. Dr. Zoltan Cendes ve öğrencileri tarafından geliştirilmiştir. Sonrasında Zoltan Cendes ve kardeşi Nicholas Cendes Ansoft'u kurmuşlar ve 1989'da Hewlett-Packard aracılığı ile bağımsız bir yazılım olan HFSS'i satmaya başlamışlardır. Sonraki yıllarda gelişen birçok ticari ilişki ve anlaşmaların neticesinde Ansoft, Ansys Corporation tarafından satın alınmıştır. HFSS'de Ansys Corporation'ın bir ürünü olarak satılmaktadır.

HFSS, çok çeşitli uygulamaları çözmek için sonlu eleman, integral denklem veya gelişmiş hibrit yöntemlere dayalı çok sayıda son teknoloji çözücü teknolojisi sunar. Her HFSS çözücü, güçlü otomatikleştirilmiş bir çözüm süreci içerir, bu nedenle yalnızca geometriyi, malzeme özelliklerini ve istenen çıktıyı belirtmek yeterlidir.

ANSYS HFSS kullanıcı üretkenliğini arttırmak için iki çalışma modu içerir:

- Üç boyutlu arayüz
- ECAD için HFSS

Üç boyutlu arayüz, kullanıcıların karmaşık üç boyutlu geometrileri modellemesine olanak tanır. Genel olarak üç boyutlu modu, antenler, RF/mikrodalga bileşenleri ve biyomedikal cihazlar gibi yüksek frekanslı bileşenleri modellemek ve simule etmek için kullanılır. Kullanıcılar saçılma matrisi parametrelerini (S, Y, Z parametreleri) çıkarabilir, üç boyutlu elektromanyetik alanları (yakın ve uzak alan) görselleştirebilirler. Diğer çalışma modu, çip üzerinde gömülü pasifler, IC paketleri ve PCB ara bağlantıları dahil olmak üzere katmanlı geometri ve yüksek hızlı bileşenlerin yerleşiminde çalışan tasarımcılar için ideal olan ECAD için HFSS elektrikli bir CAD arabirimidir.

5.2. POWERCAST Enerji Hasadı Geliştirme Kiti

Bu çalışmada, RF enerji hasatlama devresi olarak Powercast firmasına ait P2110-EVB geliştirme kartı hazır alınarak kullanılmıştır. Geliştirme kiti içeriği şu şekildedir:

- P2110 Powerharvester alıcı modülü geliştirme kartı
- 915 MHz PCB dipol anten
- 915 MHz PCB yama anten



Şekil 5.1. P2110-EVB geliştirme kartı

P2110 RF enerji hasadı modülü, 850 - 950 MHz frekans bandı aralığında radyo dalgalarından DC güç elde etmek için kullanılmaktadır. RF sinyallerden elde edilen DC güç, kart üzerinde bulunan 50 mF değerindeki kapasitör üzerinde depolanır. Kapasitör üzerinden şarj eşiğine ulaşılması ile DC-DC yükseltici gerilim değerini yükselterek DC çıkış gerilimi sağlanır. RF giriş gücü değerinin -12 dBm'den az olması durumunda modül enerji hasadını gerçekleştiremeyecektir. Modül, maksimum 5.5 V'a kadar çıkış gerilimi ve 50 mA'e kadar çıkış akımı sağlayabilir.

Tablo 5.1. Enerji hasadı geliştirme kartı anten özellikleri

Anten	Kazanç	Işıma Açısı	Empedans
915 MHz Dipol Anten (çok yönlü, dikey polarize)	1.25 (1 dBi)	360°	50 ohm
915 MHz Yama Anten (yönlü, dikey polarize)	4.1 (6.1 dBi)	122° yatay, 68° dikey	50 ohm

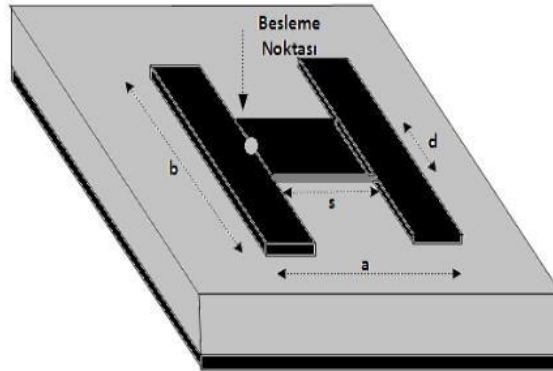
6. ANTEN TASARIMLARI

Bu çalışmada dikdörtgen mikroşerit yama anten tipinden yola çıkılarak, dikdörtgen orjinli farklı geometrilerin etkileri incelenmiş, rezonans frekansı ve bant genişliğini iyileştiren bir geometri bulunması amaçlanmıştır. Bu kapsamda dikdörtgen orjinli H tipi mikroşerit yama anten ANSYS HFSS tasarım programı ile tasarlanmıştır. Bu tez çalışması kapsamında:

- Analitik denklemlere ve limit koşullarına göre L , W ve h temel boyutlarının belirlenmesi
- Bu boyutlara göre anten iterasyonunun HFSS programında fiziksel tasarımı
- Program üzerinde tasarım doğrulama
- Tanımlanan frekans aralığı ve örnekleme sayısına göre benzeşimin yapılması

6.1. H Şekilli Yama Anten

H şekilli dikdörtgen mikroşerit yama anten temel olarak normal dikdörtgen mikroşerit yama antenden iki küçük dikdörtgenin çıkarılmasıyla oluşan antendir. Şekil 6.1’de örnek bir H şekilli mikroşerit yama anten görüntüsü verilmiştir. Antenin dış boyutları W b ile, L a ile ifade edilmiştir. b’ye paralel olan H’nin göbek kısmının kenarı d, a’ya paralel olan kısım s ile ifade edilmiştir. Normal dikdörtgen mikroşerit yama antenin rezonans denkleminde L boyutu, H yapısındaki iç oyukların hesaba etkisinden dolayı L_e olarak ifade edilmiştir (Urul ve Cengiz, 2014).



Şekil 6.1. H şekilli mikroşerit yama anten (B. URUL ve Y. CENGİZ, 2014)

Dikdörtgen yapıdaki mikroşerit yama antenin denklemine benzer şekilde elde edilir.

$$\varepsilon_{\text{reff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{b} \right]^{-1} \quad (6.1)$$

$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\varepsilon_{\text{reff}} + 0.3) + \left(\frac{b}{h} + 0.264 \right)}{(\varepsilon_{\text{reff}} - 0.258) + \left(\frac{b}{h} + 0.8 \right)} \quad (6.2)$$

$$f_r = \frac{c}{2(L_e + 2\Delta L)\sqrt{\varepsilon_{\text{reff}}}} \quad (6.3)$$

$$L_e = (a_1 \cdot a + a_2 \cdot d) \left(\frac{a}{b} \right)^{a_3} + (a_4 \cdot a + a_5 \cdot s) \left(\frac{s}{d} \right)^{a_6} + (a_7 \cdot d) \left(\frac{b}{d} \right)^{a_8} \quad (6.4)$$

Normal dikdörtgen antenden farklı olarak L_e 'nin oyuk boyutlarına bağlı denklemi birçok deneme sonucunda elde edilmiştir (Garg ve Bahal, 2001). Literatür denkleminde de anlaşıldığı üzere, antenin ışıma frekansındaki belirleyici unsur olan L boyutuna, antenin H şekli üzerindeki oyukların etkisi önemli ölçüde olmaktadır.

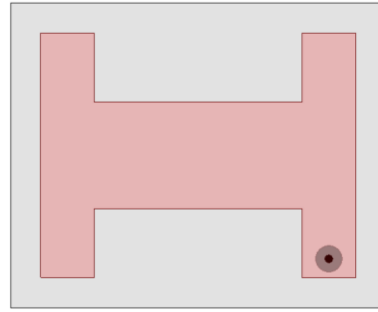
Çalışmada öncelikle geleneksel dikdörtgen antene ait formüller kullanılarak 1.6 mm kalınlığında çift yüzlü FR-4 malzeme üzerinde bir anten tasarlanmıştır. Daha sonra bu antene karşılıklı dikdörtgen şekilli yarıklar açılarak H benzeri geometrisi elde edilmiştir. Bu geometriyi oluşturan kenarlar parametrik olarak adlandırılmıştır. Bu parametreler HFSS kullanılarak sistematik biçimde taranmıştır. En iyi sonucu elde edene kadar bu taramaya devam edilmiştir. Taranan parametreler yarık kalınlığı ve genişliği, besleme noktası, yama boyutları ve toprak düzlemi boyutları olarak

sıralanabilir. Bu parametrelerin S parametreleri üzerindeki etkileri grafiklerle gösterilmiştir. Yalın anten ile elde edilen frekans, band genişliği ve diğer değerlerin iyileştirilmesi hedefiyle antene kısa devre pini ilavesi yapılmıştır. Pin konumu ve yarıçapı da yine sistematik olarak taramadan geçirilmiştir. Alınan sonuçlar yorumlanarak diğer parametrelerin yeniden taratılması sağlanmıştır.

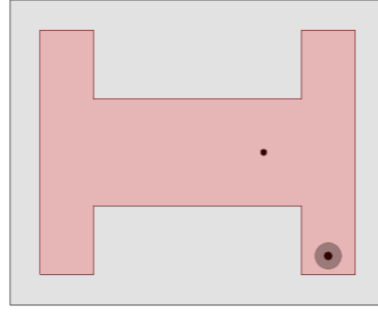
H benzeri şekilli üstten yarıklı anten geometrisi ile 2.45 GHz’de ışıma yapan anten tasarımı:

Tablo 6.1. H benzeri şekilli üstten yarıklı anten için tasarım parametreleri

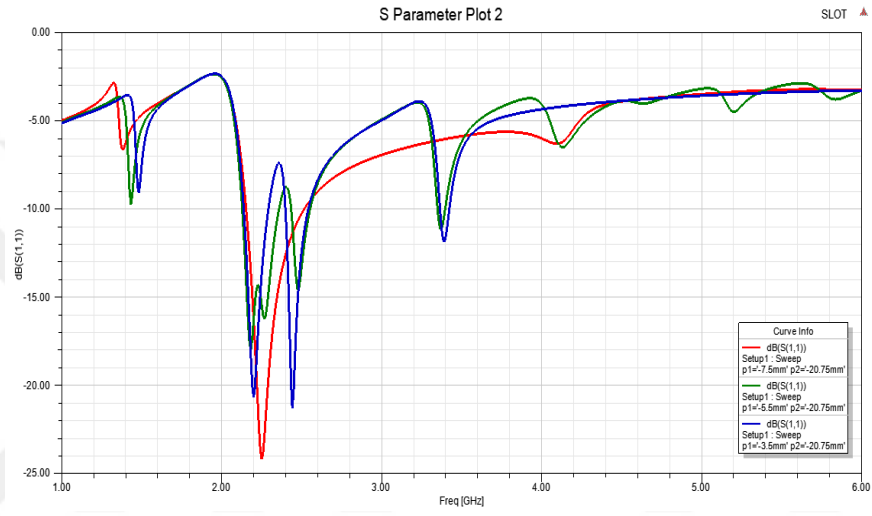
Parametreler	
L	48.60 mm
W	59.60 mm
L_p	39.00 mm
W_p	50.00 mm
x_p	0.00 mm
y_p	0.00 mm
h_1	1.60 mm
ϵ_r	4.40
f_r	2.45 GHz



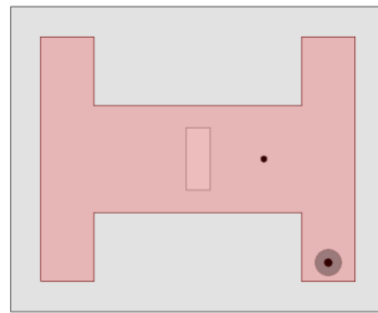
Şekil 6.2. H benzeri şekilli mikroşerit antenin ilk tasarımı



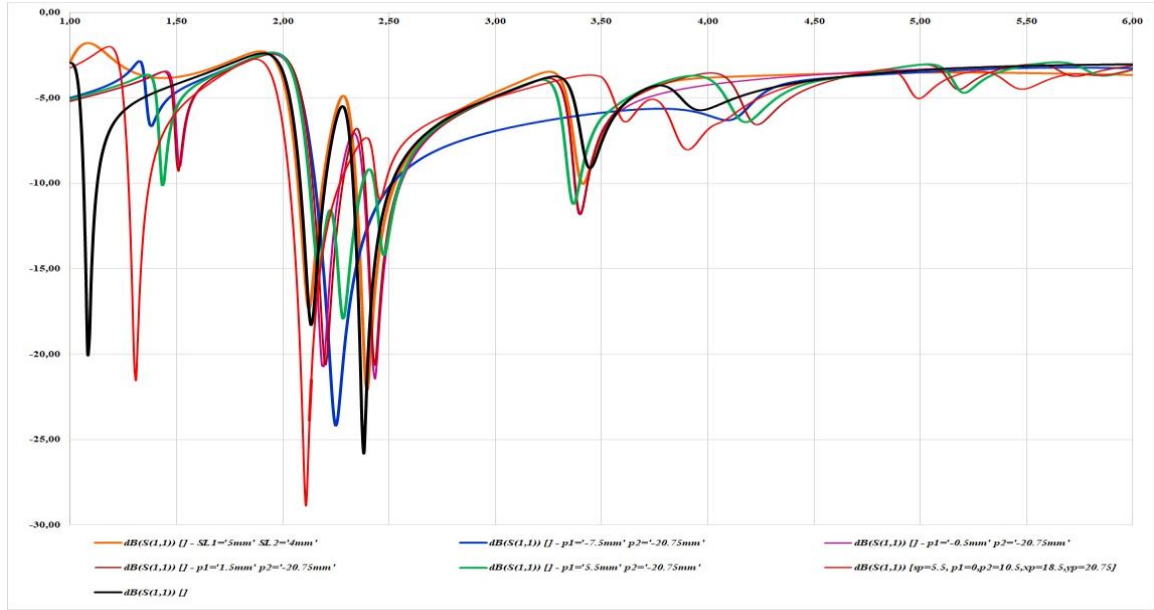
Şekil 6.3. Kısa devre pin ilaveli anten tasarımı



Şekil 6.4. Kısa devre pini konumlarının geri dönüş kaybına etkisi



Şekil 6.5. Kısa devre pin ilaveli ve yarık zemin düzlemlı anten



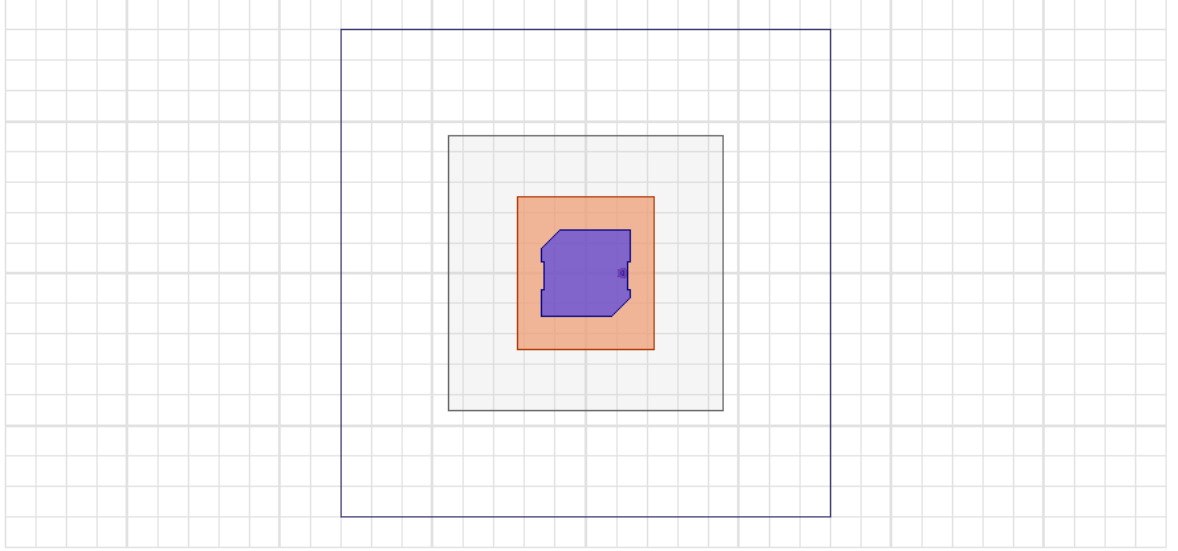
Şekil 6.6. Kullanılan tüm teknikler için antenin geri dönüş kaybı grafikleri

Tablo 6.2. Optimum parametre sonuçları

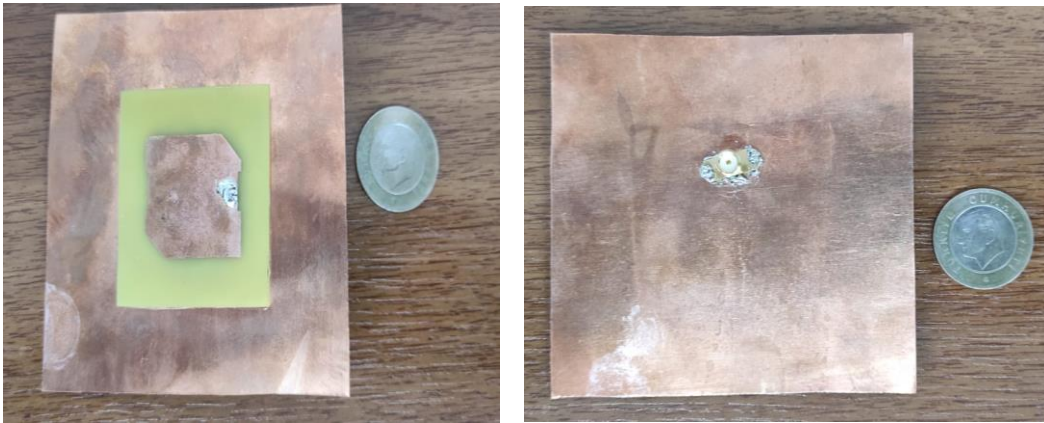
Kullanılan Teknikler	Parametreler						
	x _p	y _p	s _p	p ₁	p ₂	SL ₁	SL ₂
	(mm)						
Kısa Devre Pin İlavesi	18.5	20.75	5.5	0.0	10.5	-	-
Zemin düzlemine yarık açma	16.5	20.75	-	-	-	10	3.8
Kısa devre pin ilaveli yarıklı zemin düzlemi	16.5	20.75	0.5	-7.5	20.75	5	4.0

6.2. H Benzeri Köşeleri Kırılmış Anten Tasarımı

H benzeri yandan yarıklı anten geometrisi ile 2.45 GHz’de ışıma yapan anten tasarımları hem simulasyon hem de üretim olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.7. H benzeri şekilli yandan yarıklı anten tasarımı HFSS görüntüsü



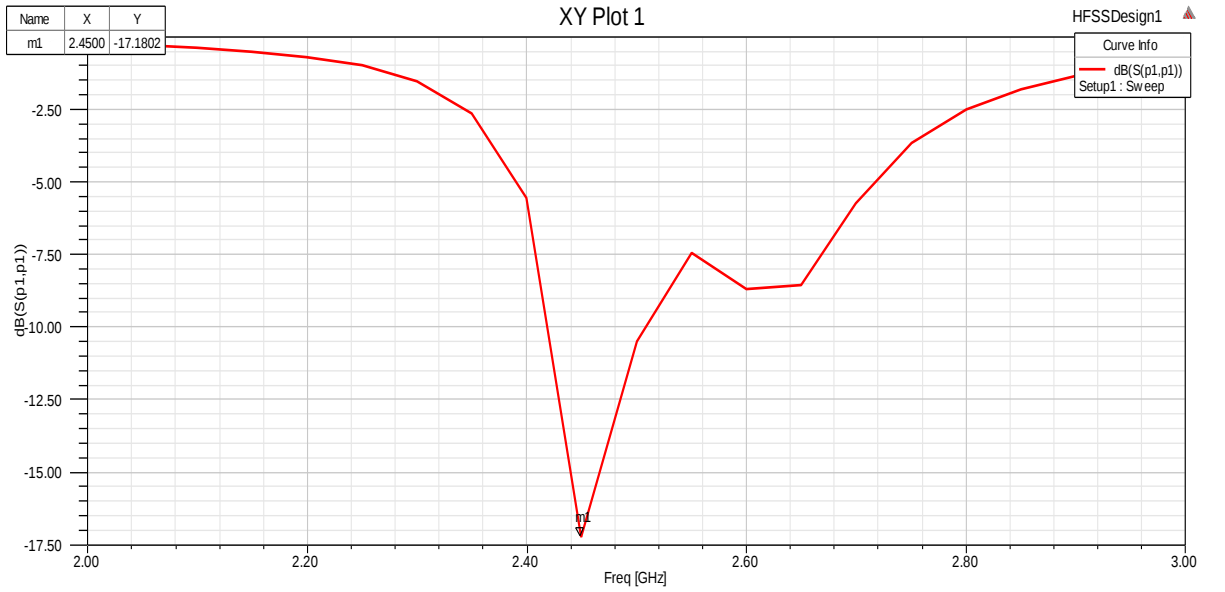
Şekil 6.8. H benzeri şekilli yandan yarıklı anten tasarımının ön ve arka görüntüleri

Tablo 6.3. H benzeri şekilli yandan yarıklı anten tasarım optimum değerleri

Parametreler	
L	45 mm
W	50 mm
L _p	29 mm
W _p	28 mm
x _f	0 mm
y _f	12 mm
h ₁	1.60 mm
ε _r	4.40
f _r	2.45 GHz

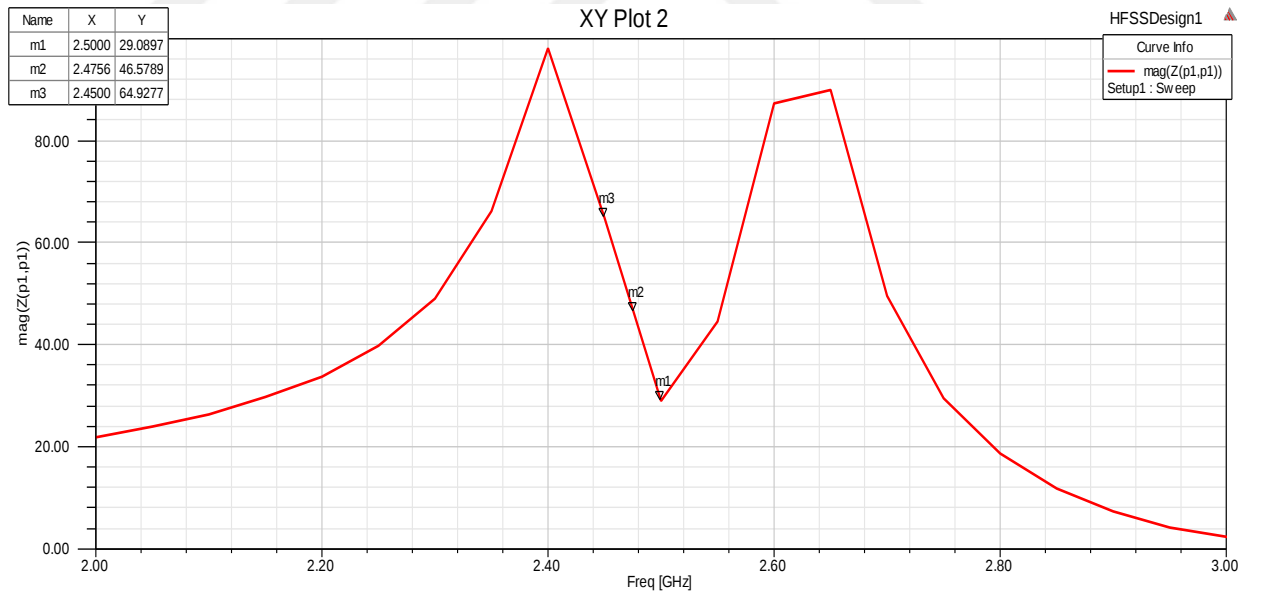
H benzeri şekilli yandan yarıklı anten tasarımının ‘L’ parametresi dielektrik malzemenin düşey eksenindeki uzunluğu, ‘W’ parametresi dielektrik malzemenin yatay eksenindeki uzunluğu; L_p ve W_p aynı şekilde yatay ve düşey uzunluklardır. x_f ve y_f ise besleme noktasını vermektedir.

RF enerji hasadının yapılması planlanan 2.45GHz ISM bandı için en iyi sonuçlar Şekil 6.9, 6.10, 6.11 ve 6.12’de verilmiştir.

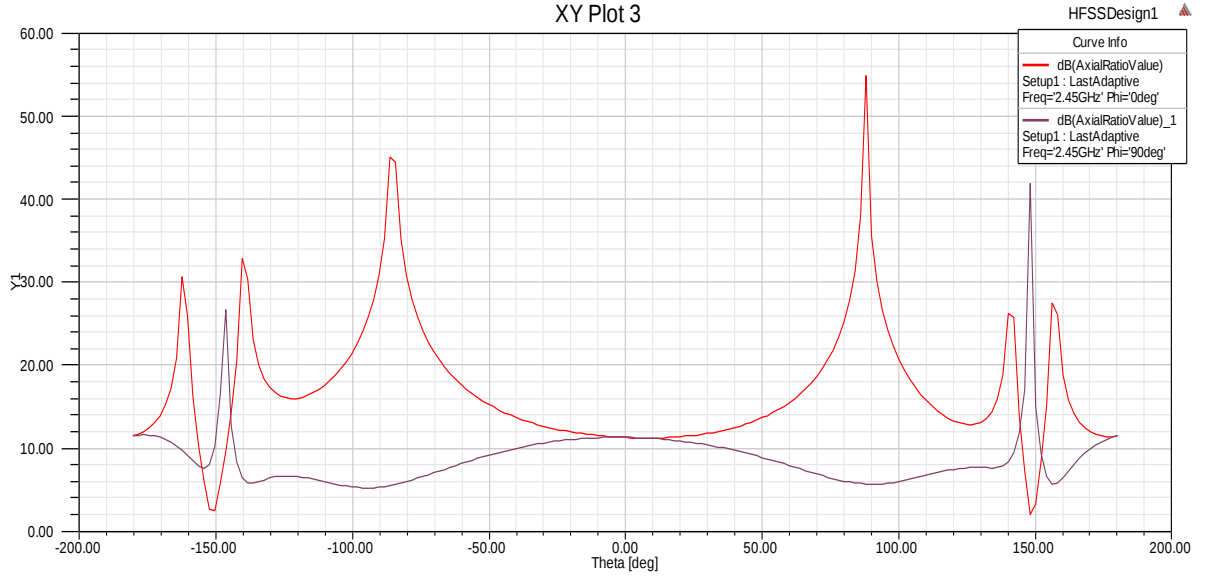
**Şekil 6.9.** S₁₁ değişimi



Şekil 6.10. Işıma deseni



Şekil 6.11. Empedans grafiği

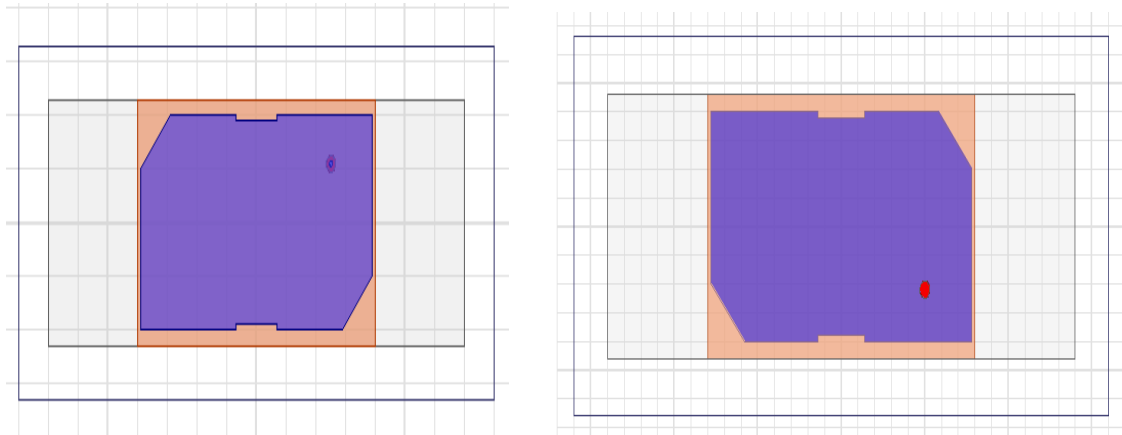


Şekil 6.12. Eksenel oran grafiği

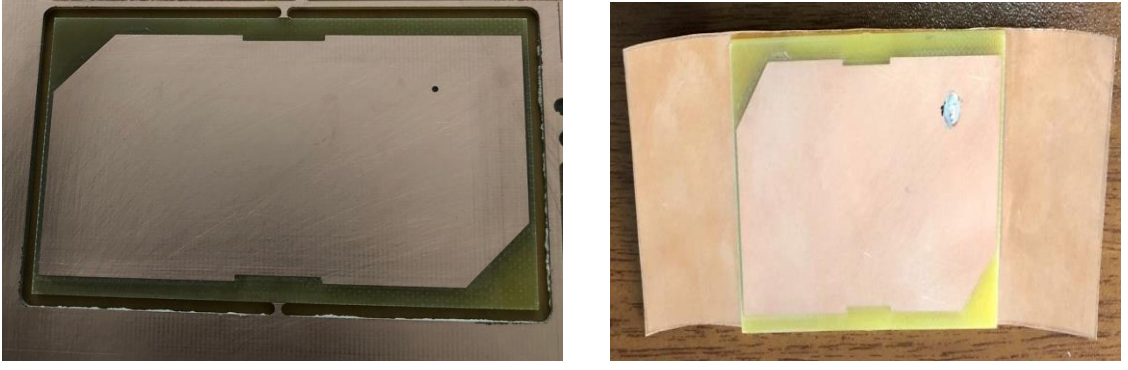
Eksenel oran grafiğinde sonuç grafiğimiz 0 dB'ye ne kadar yakın olursa o kadar dairesel polarizasyona yaklaşmış oluruz.

6.3. 915 MHz'te Geliştirme Kartına Uygun Olarak Tasarlanan Anten

H benzeri şekilli yandan ve üstten yarıklı anten geometrisi ile 915 MHz'te ışıma yapan anten tasarımı simulasyon olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.13. H benzeri şekilli üstten yarıklı anten tasarımı HFSS görüntüsü



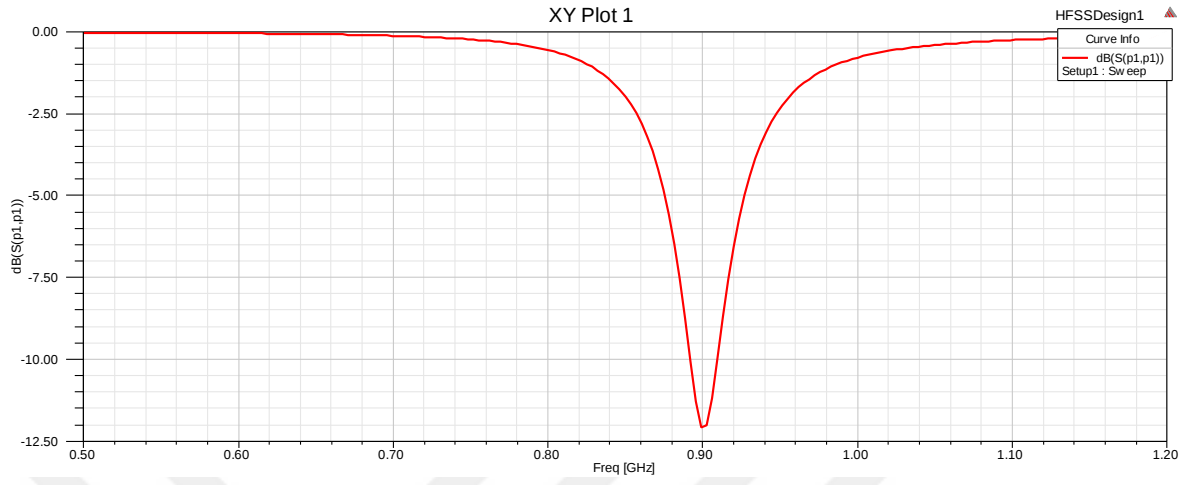
Şekil 6.14. H benzeri şekilli üstten yarıkli anten tasarımının görüntüleri

Tablo 6.4. H benzeri şekilli üstten yarıkli anten tasarım optimum değerleri

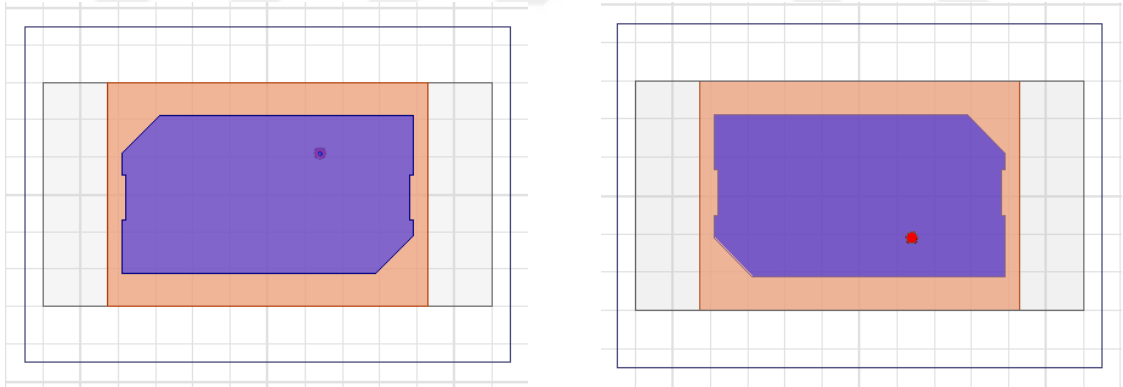
Parametreler	
L	80 mm
W	46 mm
L_p	78 mm
W_p	40 mm
x_f	-11 mm
y_f	25 mm
h_1	1.55 mm
ϵ_r	4.6
f_r	915 MHz

H benzeri şekilli üstten yarıkli anten tasarımının ‘L’ parametresi dielektrik malzemenin düşey eksenindeki uzunluğu, ‘W’ parametresi dielektrik malzemenin yatay eksenindeki uzunluğu; L_p ve W_p aynı şekilde yatay ve düşey uzunluklardır. x_f ve y_f ise besleme noktasını vermektedir.

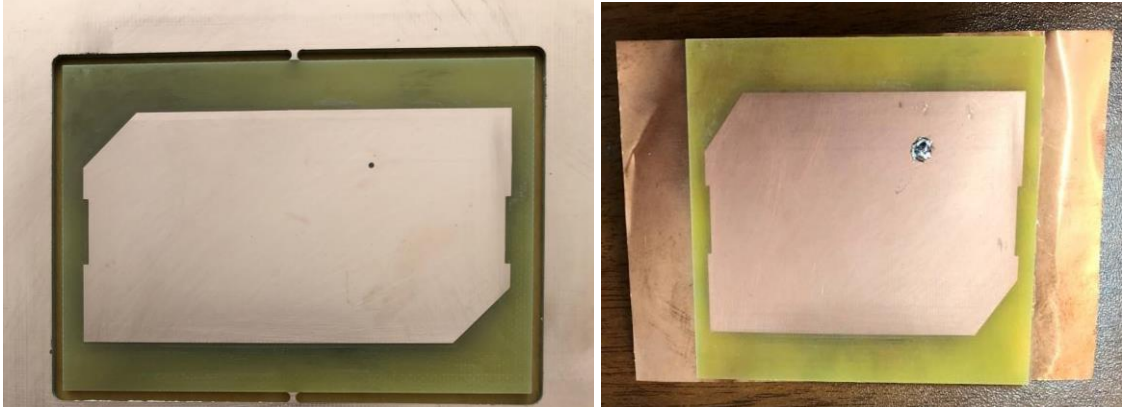
RF enerji hasadının yapılması planlanan 915 MHz ISM bandı için elde edilen S_{11} sonuçları Şekil 6.17’de verilmiştir.



Şekil 6.15. S_{11} değişimi



Şekil 6.16. H benzeri şekilli yandan yarıklı anten tasarımı HFSS görüntüsü



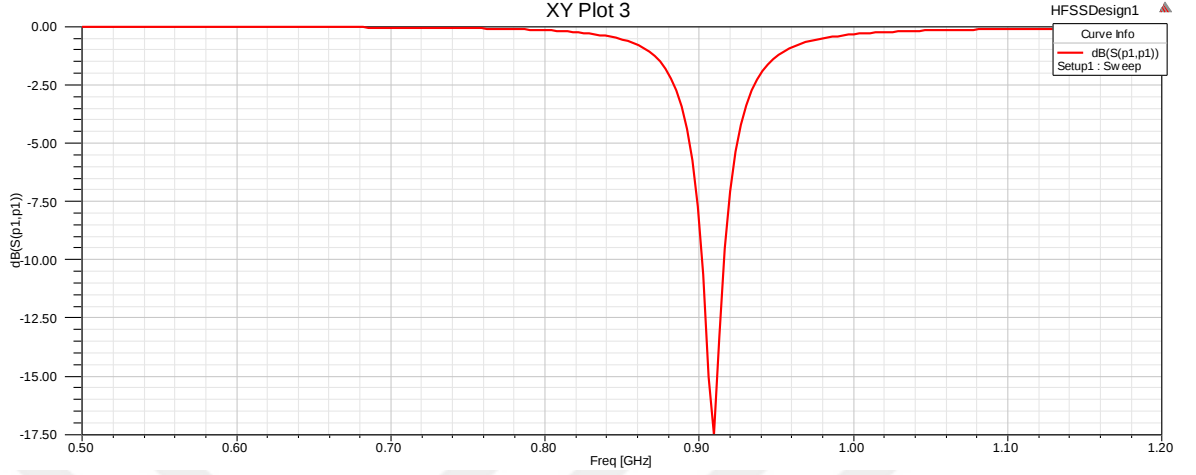
Şekil 6.17. H benzeri şekilli yandan yarıklı anten tasarımının görüntüleri

Tablo 6.5. H benzeri şekilli yandan yarıklı anten tasarım optimum değerleri

Parametreler	
L	86 mm
W	60 mm
L_p	78 mm
W_p	42 mm
x_f	-11 mm
y_f	14 mm
h_1	1.55 mm
ϵ_r	4.6
f_r	915 MHz

H benzeri şekilli yandan yarıklı anten tasarımının ‘L’ parametresi dielektrik malzemenin düşey eksenindeki uzunluğu, ‘W’ parametresi dielektrik malzemenin yatay eksenindeki uzunluğu; L_p ve W_p aynı şekilde yatay ve düşey uzunluklardır. x_f ve y_f ise besleme noktasını vermektedir.

RF enerji hasadının yapılması planlanan 915 MHz ISM bandı için elde edilen S_{11} sonuçları Şekil 6.18’ de verilmiştir.

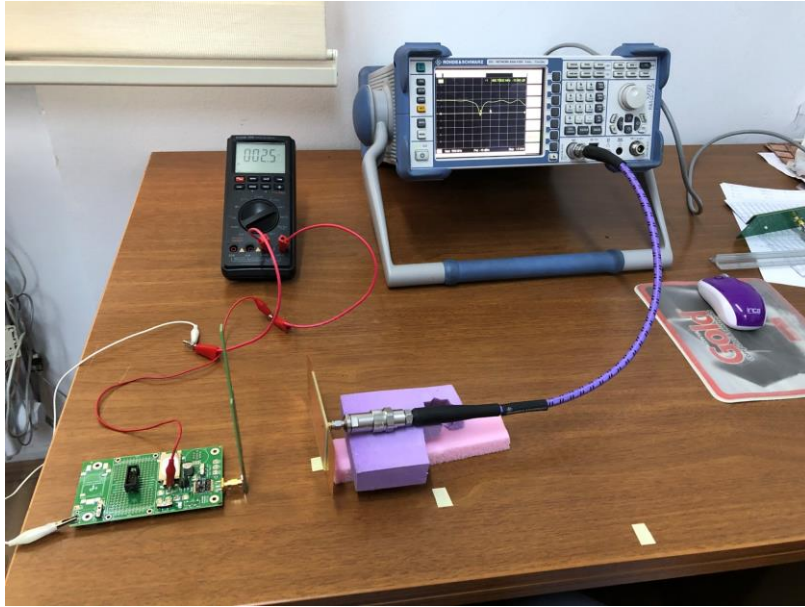


Şekil 6.18. S_{11} değişimi

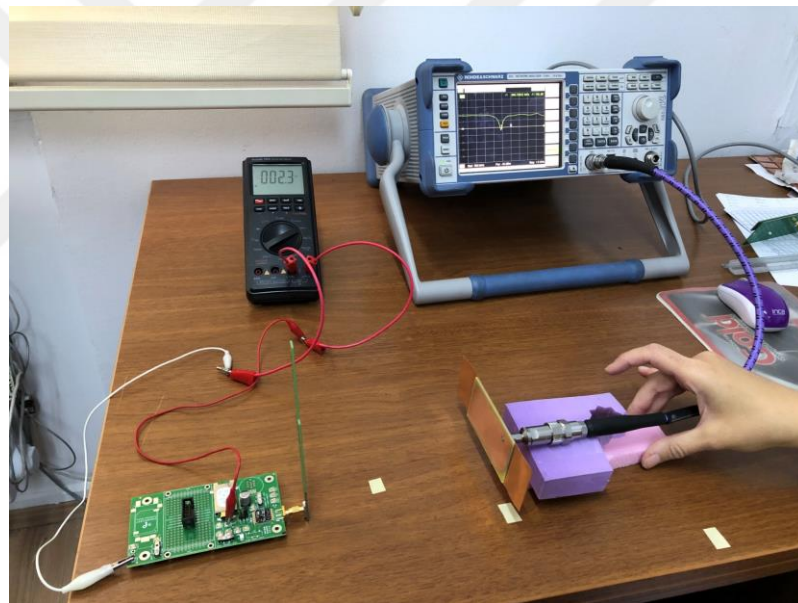
Antenlerin üretiminde hem alttaki toprak düzlemini oluşturacak 0.1 mm kalınlığına sahip bakır levhayı hem de yama şeklini asit çözeltisi içinde koruyacak olan folyo parçasını keserken Silhouette Cameo4 kesici/plotter cihazından faydalanılmıştır. Böylelikle mm’lik hassasiyette ve düzgün kenarlara sahip kesimler kolayca yapılarak anten üretim performansı da artırılmıştır.

6.3.1. H benzeri şekilli üstten ve yandan yarıklı 915 MHz antenler için P2110-EVB modül kullanımı ve sonuçları

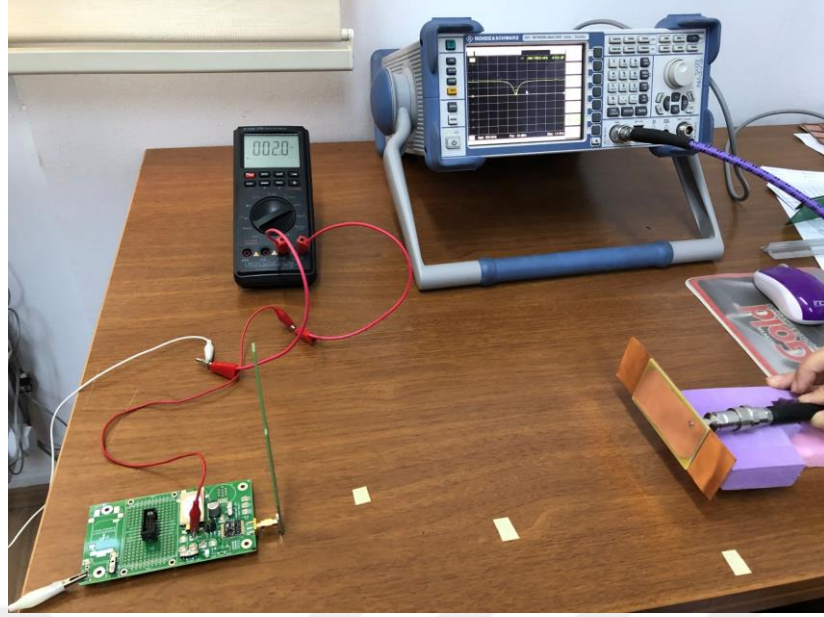
Powercast firmasına ait olan P2110-EVB modülü RF enerji hasatlama devresi olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte Rohde&Schwarz firmasının ZVL Network Analyzer cihazı RF enerji hasatlama devresini beslemek için sinyal üretmiştir. Powerharvester modülünün üretmiş olduğu akım ve gerilim değerlerini ölçmek için bir adet multimetreden faydalanılmıştır.



(a)

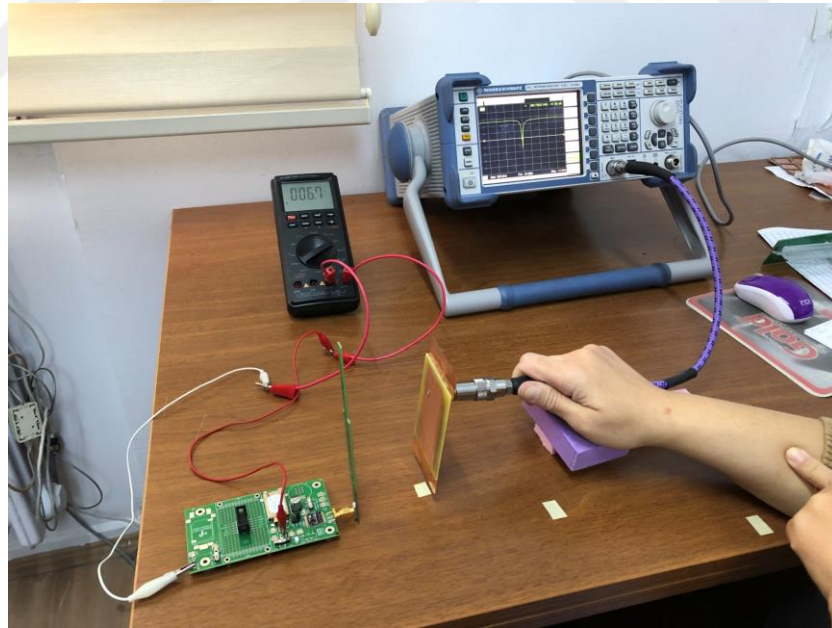


(b)

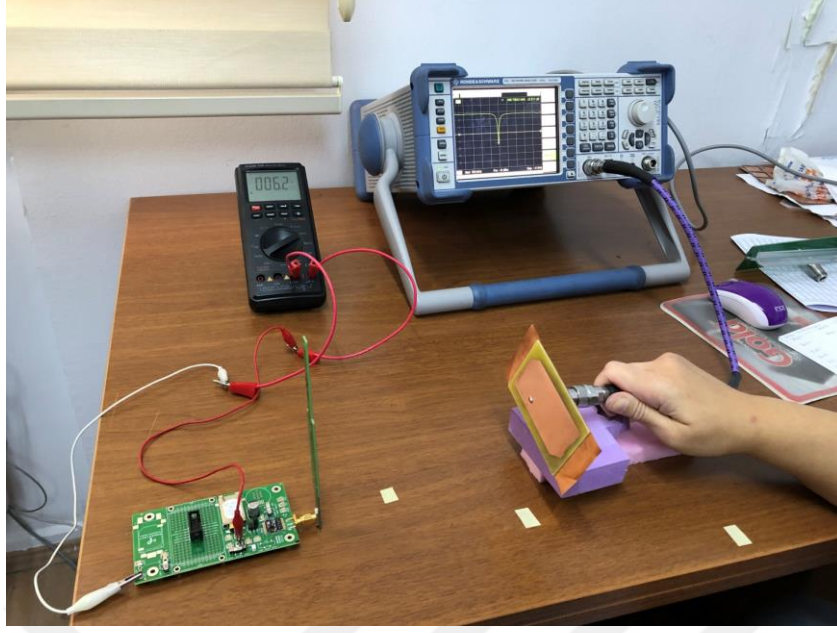


(c)

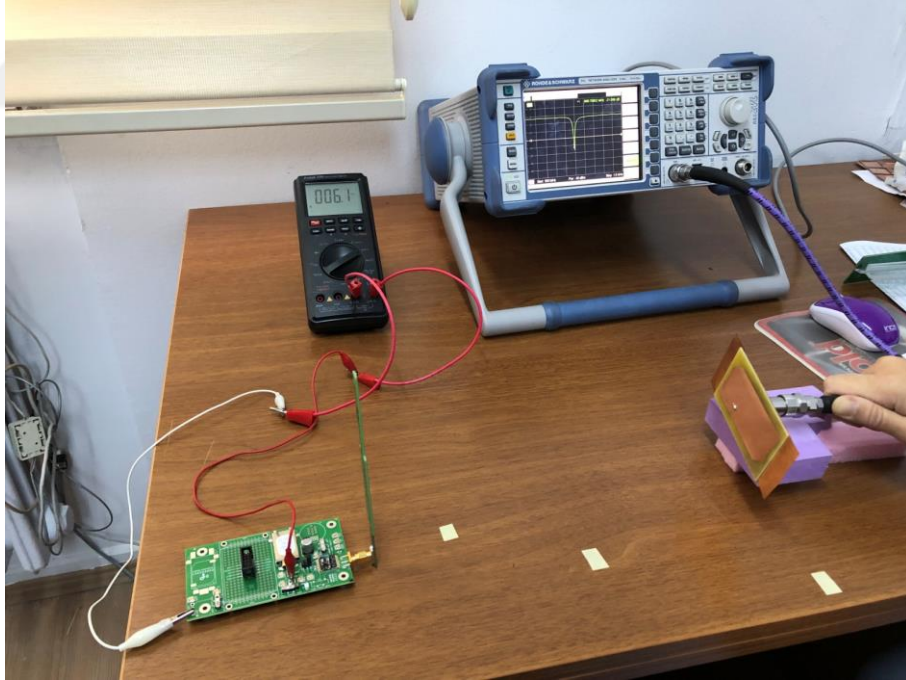
Şekil 6.19. H benzeri şekilli üstün yarıkli anten için P2110-EVB modül sonuçları (a) $\lambda/4$ mesafesinde (b) $\lambda/2$ mesafesinde (c) λ mesafesinde



(a)



(b)

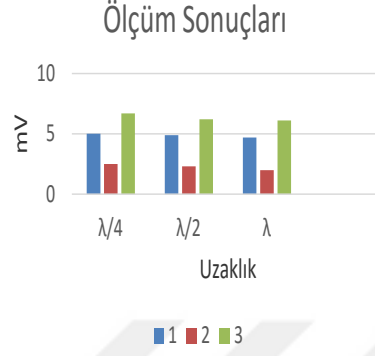


(c)

Şekil 6.20. H benzeri şekilli yandan yarıklı anten için P2110-EVB modül sonuçları (a) $\lambda/4$ mesafesinde (b) $\lambda/2$ mesafesinde (c) λ mesafesinde

6.3.2. P2110-EVB modül kullanımı anten kombinasyonları ve sonuçları

P2110-EVB modülü ile dört farklı anten tasarımı, üç farklı mesafede üç farklı kombinasyon ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.21. P2110-EVB modül sonuç grafiği

Tablo 6.6. P2110-EVB modül sonuç tablosu

Kombinasyonlar	Alıcı Taraftaki Anten (P2210-EVB)	Verici Taraftaki Anten (ZVL13 VNA)	Mesafe (λ)		
			λ	$\lambda/2$	$\lambda/4$
1	Dipol anten	Yama anten	4.7 mV	4.9 mV	5 mV
2	Dipol anten	H benzeri şekilli üstten yarıklı anten	2 mV	2.3 mV	2.5 mV
3	Dipol anten	H benzeri şekilli yandan yarıklı anten	6.1 mV	6.2 mV	6.7 mV

Tablo 6.6 ve Tablo 6.7’de H benzeri şekilli üstten ve yandan yarıklı anten tasarımlarının HFSS simulasyon sonuçları ve P2110-EVB modülü kullanarak elde edilen sonuçlar verilmektedir.

Tablo 6.7. H benzeri şekilli üstten yarıklı anten tasarımı simulasyon ve ölçüm sonuçları

Parametre	HFSS sonuçları	Ölçüm sonuçları
Z (Ω)	83.32	31.29
RL (dB)	-12.04	-14.37
f_r (MHz)	899.00	916.50
BG (%)	1.95	3.44

Tablo 6.8. H benzeri şekilli yandan yarıklı anten tasarımı simulasyon ve ölçüm sonuçları

Parametre	HFSS sonuçları	Ölçüm sonuçları
Z (Ω)	38.22	34.66
RL (dB)	-17.49	-25.71
f_r (MHz)	909.50	986.50
BG (%)	1.54	2.13

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, RF enerji hasadı uygulamaları için çift yüzölü FR-4 taban malzemesi üzerine H benzeri mikroşerit anten tasarımları gerçekleştirilmiştir. Tasarımlar 915 MHz ve 2.4 GHz frekansları hedeflenerek yapılmıştır.

İlk tasarım, literatürdeki çalışmalardan esinlenerek tam bir H şekli göz önünde bulundurularak elde edilmiştir. Tasarım performansını geliştirmek için simülasyon ortamında kısa devre pini ilavesi, yarıklı zemin düzlemi gibi ilave yöntemler de denenmiştir.

Diğer tasarımlar ise yama üzerine köşesi kırılmış ve karşılıklı yarıklarla H şekline benzetilen antenlerdir. Bu antenler de hem 915 MHz hem de 2.45 GHz frekansı hedeflenerek elde edilmiştir. Antenin en iyi sonuçları verebilmesi için yama boyutları, besleme noktası, köşeden kesilerek çıkartılan parçaların ve yarık boyutlarının parametrik analizleri tamamlanmıştır. Sonrasında anten üretilerek ölçümleri yapılmıştır. Üretimde yamanın altına 1 mm kalınlığında bakır levhadan toprak düzlemi ilave edilerek taban malzemesine çift yüzölü bant ile yapıştırılmıştır.

RF enerji hasadı uygulamaları için H benzeri üstten ve alttan yarıklı 915 MHz frekansında anten tasarımları gerçekleştirilmiştir. Powercast firmasına ait olan P2110-EVB modülü RF enerji hasatlama devresi olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte Rohde&Schwarz firmasının ZVL13 Network Analyzer cihazı RF enerji hasatlama devresini beslemek için sinyal üretmiştir. Üç farklı mesafede ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre mesafe kısaldıkça ölçülen gerilim değerinin arttığı görülmektedir. Aynı zamanda mesafe yaklaştıkça daha kısa sürede ölçümün gerçekleştiği mesafe arttıkça da daha geç sürede modül çıkışındaki kondansatörün şarj olduğu ve değerlerdeki değişimlerin daha yavaş olduğu gözlenmiştir. H benzeri yandan yarıklı anten, H benzeri üstten yarıklı antene göre daha fazla hasatlama gerçekleştirebileceği sonucuna varılmıştır.

7.2. Öneriler

Havadaki elektromanyetik dalgalardan enerji hasat eden sistemlerden yüksek verim alabilmek için, alıcı verici antenin izolasyonu iyi yapılmalıdır. Anten seçimi, band genişliği ve güç yayılmalarından dolayı sınırlamaya uğradığından seçilecek antenin hem yüksek bir kazanca hem de geniş bir band genişliğine sahip olması gerekmektedir. Aynı zamanda daha iyi sonuçlar elde edebilmek için çoklu besleme yapılabilir. Dairesel polarizasyon oranı arttırılabilir. Tasarımları gerçekleştirilen antenlerin toprak düzlemi boyutları küçültülebilir.

Yine maksimum enerji teoremi göz önüne alınarak, hem alıcı hem de verici anten ve diğer hasatlama devresi katlarında çok iyi bir empedans uyumlandırma gerçekleştirilmelidir. Böylelikle hem antenlerin çalışacağı frekans bölgesinde daha yüksek performans sergilemeleri hem de en yüksek verimle enerjinin son kata aktarımı sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Adam, I., Fareq Abd Malek, M., Najib Mohd Yasin, M., Rahim, H. A. (2016). Double band microwave rectifier for energy harvesting. *Microwave and Optical Technology Letters*, 58(4), 922-927.
- Akman H., “Hücresele Otomata ve Tabu Arama Algoritması İle Mikroşerit Yama Anten Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- Aksun, M.I., Mittra, R., 1992 Derivation of closed-form Green's functions for a general microstrip geometry. *Microwave Theory and Techniques*, IEEE Transactions on, Volume: 40 Issue:11, 2055 – 2062.
- Ali, E., Yahaya, N., Perumal, N., Zakariya, M. (2014). Design of RF to DC rectifier at GSM band for energy harvesting applications. *A Journal of Engineering, Science and Society*, 10(2), 15-22.
- Alper F., “In-Vitro Uygulamalar için 2.45 GHz Mikroşerit İmplant Anten Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- Arai, H., Chomora, M., Yoshida, M., 2012, "A voltage-boosting antenna for RF energy harvesting", *Proc. IEEE Int. Workshop Antenna Technol. (iWAT)*, pp. 169-172.
- Araki, K., Itoh, T., 1981 Hankel transform domain analysis of open circular microstrip radiating structures *Antennas and Propagation*, IEEE Transactions on, Volume: 29 Issue:1, 84-89.
- Arrawatia, M., Baghini, M. S., Kumar, G., 2015, “Broadband Bent Triangular Omnidirectional Antenna for RF Energy Harvesting”.
- Arrawatia, M., Baghini, M. S., Kumar, G., 2015, “Differential Microstrip Antenna for RF Energy Harvesting”.
- Bae, J., Koo, H., Lee, H., Lim, W., Lee, W., Kang, H., Hwang, K. C., Lee, K. Y., Yang, Y. (2017). High-efficiency rectifier (5.2 GHz) using a Class-FD Dickson charge pump. *Microwave and Optical Technology Letters*, 59(12), 3018-3023.
- Balanis, C. A., 2005, *Antenna Theory: Analysis and Design*, Hoboken, NJ, USA:Wiley.
- Balanis, C. A. (2012). *Advanced engineering electromagnetics*, Wiley Online Library.
- Balanis, C., A., 2013. *Antenna Theory, Analysis and Design* (Vol. 3), John Wiley Sons.
- Barcak, J. M., Partal, H. P., 2012, “Efficient RF energy harvesting by using multiband microstrip antenna arrays with multistage rectifiers”.
- Bhartia, P. Rao, K. V. S. Tomar, R.S. 1991. *Millimeter-wave microstrip and printed circuit antennas* Artech House 322 p.

- Bhattacharyya, A.K., Shafai, L and Gary, R. 1991. Microstrip Antenna – A Generalized Transmission Line, *Progress in Electromagnetic Research*, vol. 4, 45-84.
- Belen M.A., Güneş F., Çalışkan A., Mahouti P., Demirel S., Yildinm A., (2016). "Microstrip SIW Patch Antenna Design for X band Application", 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON), Krakow, Polland, 35: 1-2.
- Belen, M. A. (2018). Rf Enerji Hasatlama Sistemleri İçin Çift Bandlı Greinacher Doğrultucu Devre Tasarımı. *Journal of Engineering Science and Design*, 6(2), 348-353.
- Binici, Ü., “Radyo Frekansı Enerjisi Hasatlayıcı Devrelerin Bilgisayar Destekli Modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- Boylestad, R. L., Nashelsky, L., Li, L. (2002). *Electronic devices and circuit theory* (Vol. 11), Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ.
- Caron, W. N. (1993). *Antenna impedance matching*, American radio relay league.
- Carver, K., & Mink, J. (1981). Microstrip antenna technology. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 29(1), 2-24.
- Chaour, I., Fakhfakh, A., Kanoun, O. (2017). Enhanced passive RF-DC converter circuit efficiency for low RF energy harvesting. *Sensors*, 17(3), 546.
- Chen, H.-M., Lin, Y.-F., Kuo, C.-H., and Huang, K.-C., (2001). “A Compact Dual-band Microstrip-fed Monopole Antenna”, *IEEE Antennas and Propagation Society (AP-S) Proceedings*, 12(2): 124–127.
- Chen, S.-B., Y.-C. Jiao, F.-S. Zhang, and Q.-Z. Liu, (2006) “Modified T-shaped planar monopole antenna for multiband operation,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 54(8): 3267–3270.
- Cheng, D. (1993). *Fundamentals of Engineering Electromagnetics*, Addison-Wesley Longman, Limited.
- Chew, W. C., Kong J.,A.,1980 Effects of Fringing Fields on the Capacitance of Circular Microstrip Disk.Microwave Theory and Techniques, *IEEE Transactions on*, Volume: 28 Issue:2,98-104.
- Collado, A., Georgiadis, A. (2013). Conformal hybrid solar and electromagnetic (EM) energy harvesting rectenna. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 60(8), 2225-2234.
- Costanzo, A., Masotti, D. (2016). Smart solutions in smart spaces: Getting the most from far-field wireless power transfer. *IEEE Microwave Magazine*, 17(5), 30-45.
- Deschamps, G. A., & Sichak, W. (1953). *Microstrip microwave antennas*. Paper presented at the 3rd USAF Symposium on Antennas.

- Deshpande, M., & Bailey, M. (1982). Input impedance of microstrip antennas. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 30(4), 645-650.
- Devi, K. K. A., Din, N. M., Chakrabarty, C. K. (2012). Optimization of the voltage doubler stages in an RF-DC convertor module for energy harvesting. *Circuits and Systems*, 3(03), 216.
- Erdemir S., “Üç Bantlı Modern GPS Anteni Analizi ve Tasarımı”, Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 2013.
- Garg ve Bahal 2001 Microstrip Antenna Design Handbook ,Artech House antennas and propagation library, ISBN 0-89006-513-6.
- Gözel, M., A., 2015. İmplant Tanımlama İçin RFID Sistem Tasarımı. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, YL Tezi, 70s, Isparta.
- Gozel, M. A., Kahriman, M., Kasar, O. (2019). Design of an efficiency-enhanced Greinacher rectifier operating in the GSM 1800 band by using rat-race coupler for RF energy harvesting applications. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 29(1), 1-8. doi: doi:10.1002/mmce.21621.
- Gutton, H., & Baissinot, G. (1955). Flat aerial for ultra high frequencies. *French patent*, 703113.
- Hagerty, J. A., Helmbrecht, F. B., McCalpin, W. H., Zane, R., Popovic, Z. B., 2004, "Geniş bantlı rekten dizileriyle ortamdaki mikrodalga enerjisinin geri kazanılması", *IEEE Trans. Mikrodalga fırın. Teori Teknikleri* , vol. 52, hayır. 3, sayfa 1014-1024.
- Harrington, R. F., & Harrington, J. L. (1996). *Field computation by moment methods*: Oxford University Press.
- Harry, O., (2011), “RF Energy Harvesting Perpetually Powers Wireless Sensors”, Powercast Corporation, 116: 65-86.
- Hüseyin Nuri Gülmez, “RF Enerji Hasatlayıcı Rectenna Tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2017.
- İmamoğlu F., “Mikroşerit Antenlerin Tasarımı ve Performans Optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, 2019.
- Itoh, T., Menzel, W., 1981 A full-wave analysis method for open microstrip structures. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*. Volume: 29 Issue:1, 63 – 68.
- James, J. R. (1989). *Handbook of microstrip antennas*: IET.
- James, J. R. (1989). *Handbook of microstrip antennas*: IET.
- Kamoda, H., Kitazawa, S., Kukutsu, N., Kobayashi, K., 2016, “Loop Antenna Over Artificial Magnetic Conductor Surface and Its Application to Dual-Band RF Energy Harvesting”.

- Kasar O., “Geniş Bantlı Enerji Hasatlama Devrelerinin Tasarımı ve Gerçeklenmesi”, Doktora Tezi, Süleyman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- Kasar, O., Kahriman, M., Gozel, M. A. (2019). Application of ultra wideband RF energy harvesting by using multisection Wilkinson power combiner. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 29(1), 1-8.
- Kim, P., Chaudhary, G., Jeong, Y. (2013). A dual-band RF energy harvesting using frequency limited dual-band impedance matching. *Progress In Electromagnetics Research*, 141, 443-461.
- Kim, S., Vyas, R., Bito, J., Niotaki, K., Collado, A., Georgiadis, A., Tentzeris, M. M. (2014). Ambient RF energy-harvesting technologies for self-sustainable standalone wireless sensor platforms. *Proceedings of the IEEE*, 102(11), 1649-1666.
- Kitazawa, S. ve diğerleri, 2014, "Yaşam ortamında elektromanyetik enerji hasadı", *Proc. Mikrodalga firm. Atölyeler Sergisi* , ss. WS03-01.
- Kumar, G., & Gupta, K. (1984). Broad-band microstrip antennas using additional resonators gap-coupled to the radiating edges. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 32(12), 1375-1379
- Lin, Y. L., Zhang, X. Y., Du, Z.-X., Lin, Q. W. (2017). High-efficiency microwave rectifier with extended operating bandwidth. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*.
- Liu, H., Li, X., Vaddi, R., Ma, K., Datta, S., Narayanan, V. (2014). Tunnel FET RF rectifier design for energy harvesting applications. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 4(4), 400-411.
- Liu, Z., Zhong, Z., Guo, Y.-X. (2015). Enhanced dual-band ambient RF energy harvesting with ultra-wide power range. *IEEE microwave and wireless components letters*, 25(9), 630-632.
- Lu, X., Wang, P., Niyato, D., Kim, D. I., Han, Z. (2015). Wireless Networks With RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey. *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, 17(2), 757-789.
- Malkomes, M. (1982). Mutual coupling between microstrip patch antennas. *Electronics Letters*, 18(12), 520-522.
- Mansour, M. M., 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.
- Milligan, T., 1996. Polarization loss in a link budget when using measured circular-polarization gains of antennas, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 38, no. 1, pp. 56-58.

- Mosig, J. R. (1988). Arbitrarily shaped microstrip structures and their analysis with a mixed potential integral equation. *IEEE Transactions on Microwave theory and Techniques*, 36(2), 314-323.
- Mousa Ali, E., Yahaya, N. Z., Nallagownden, P., Zakariya, M. A. (2017). A novel rectifying circuit for microwave power harvesting system. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 27(4), e21083.
- Nishimoto, H., Kawahara, Y, and Asami, T. (2010). "Prototype implementation of wireless sensor network using TV broadcast RF energy harvesting," Proceedings of the 12th ACM international conference adjunct papers on Ubiquitous computing, 12: 355-356.
- Oliner, A. A., Jackson, D. R., Volakis, J. (2007). *Antenna Engineering Handbook*, McGraw Hill.
- Ozen Husham Mustafa Albairaqdar, "Giyilebilir Uygulamalar İçin Eşit Yama Alanına (EYA) Sahip Tekstil Dielektrik Malzeme Tabanlı Mikroşerit Antenlerin 2.4, 3 Ve 5.8 GHz Frekanslarındaki Performansları", Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- Ozen, B., Dilek, U., Rabia, T., & Seyfettin S, G. (2017). Usage of T- Resonator Method at Determination of Dielectric Constant of Fabric Materials for Wearable Antenna Designs. *International Congress On Semiconductor Materials And Devices ICSMD*.
- Palazzi, V., Hester, J., Bito, J., Alimenti, F., Kalialakis, C., Collado, A., Mezzanotte, P., Georgiadis, A., Roselli, L., Tentzeris, M. M. (2018). A novel ultra-lightweight multiband rectenna on paper for RF energy harvesting in the next generation LTE bands. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 66(1), 366-379.
- Park, J., Kim, Y., Yoon, Y. J., So, J., Shin, J. (2014). Rectifier design using distributed Greinacher voltage multiplier for high frequency wireless power transmission. *Journal of electromagnetic engineering and science*, 14(1), 25-30.
- Partal, H. P., Belen, M. A., Zorlu-Partal, S., Ince, A. T. (2015). *A Schottky rectifier design using EM simulation tools for RF energy harvesting applications*. Paper presented at the Applied Computational Electromagnetics (ACES), 2015 31st International Review of Progress in.
- Pekoslawski, B., 2008. Application of Vibration Energy Harvesters for Powering of Wireless Sensor Nodes in Large Rotary Machines Diagnostic System. *X International PhD Workshop OWD'2008*.
- Penella-López, M. T., Gasulla-Forner, M. (2011). *Powering autonomous sensors: an integral approach with focus on solar and RF energy harvesting*, Springer Science & Business Media.
- Penard, E., & Daniel, J.-P. (1982). Mutual coupling between microstrip antennas. *Electronics Letters*, 18(14), 605-607.

- Peter , T., Rahman , T. A., Cheung , S. W., Nilavalan , R., Abutarboush , H. F., Vilches, A., 2014,“A Novel Transparent UWB Antenna for Photovoltaic Solar Panel Integration and RF Energy Harvesting”.
- Pinuela, M., Mitcheson, P. D., Lucyszyn, S., 2013, "Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments", *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 61, no. 7, pp. 2715-2726.
- Pozar, D. (1987). Radiation and scattering from a microstrip patch on a uniaxial substrate. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 35(6), 613-621.
- Pozar, D. M. (1992). Microstrip antennas. *Proceedings of the IEEE*, 80(1), 79-91.
- Pozar, D. M., & Schaubert, D. H. (1995). *Microstrip antennas: the analysis and design of microstrip antennas and arrays*: John Wiley & Sons.
- Pozar, D. M. (2006). *Microwave Engineering* (3rd ed.). New York, USA, Wiley.
- Raju, M., 2008. ULP meets energy harvesting: A game-changing combination for design engineers.
- Schantz, H.G., (2015). The Art and Science of Ultrawideband Antennas, Artech House, Inc., Boston, LDN.
- Shieh, S., Kamarei, M. (2018). Transient input impedance modeling of rectifiers for RF energy harvesting applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 65(3), 311-315.
- Shynu, S. V., Ons, M. J. R., McEvoy, P., Ammann, M. J., McCormack, S. J. and Norton, B., 2009, “Integration of microstrip patch antenna with polycrystalline silicon solar cell,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 12, pp. 3969–3972.
- Singh, N., Singh, A. K., & Sing, V. K. (2015). Design and performance of wearable technology for healthcare provision and medical education. *International Journal of Information Management*, 35(5), 521-526.
- Song, C., Huang, Y., Carter, P., Zhou, J., Yuan, S., Xu, Q., Kod, M. (2016). A novel six-band dual CP rectenna using improved impedance matching technique for ambient RF energy harvesting. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64(7), 3160-3171.
- Song, C., Huang, Y., Zhou, J., Carter, P., Yuan, S., Xu, Q., Fei, Z. (2017). Matching network elimination in broadband rectennas for high-efficiency wireless power transfer and energy harvesting. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(5), 3950-3961.
- Steingart, D. and Polastre J., 2008. Energy Harvesting.

- Sullivan, P.L. and Schaubert, D.H. 1986. Analysis of An Aperture Coupled Microstrip Antenna, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, 977-984.
- Stutzman, W. L., Thiele, G. A. (2012). *Antenna theory and design*, John Wiley and Sons.
- Tekir O., “Havada Yayınım Yapan Elektromanyetik Dalgalardan Enerji Hasat Etmede Verimliliği Etkileyen Faktörlerin Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- Thomas Peter , Tharek Abd Rahman , S. W. Cheung , Rajagopal Nilavalan , Hattan F. Abutarboush , Antonio Vilches, “A Novel Transparent UWB Antenna for Photovoltaic Solar Panel Integration and RF Energy Harvesting”
- Toh, B., 2003. Understanding and measuring circular polarization, *IEEE Trans. on Education*, vol. 46, no. 3, pp. 313-318.
- Urul ve Cengiz 2014 H Şekilli Mikroşerit Antenin Yabani Ot Algoritması ile Rezonans Frekansının Belirlenmesi, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16 (48):109-117.
- Yarman, B. S. (2008). *Design of ultra wideband antenna matching networks via simplified real frequency technique*, Springer Science and Business Media.
- Yau, D. and Shuley, N.V. 1998. Numerical Analysis of An Aperture Coupled Microstrip Patch Antenna Using Mixed Potential Integral Equations and Complex Images, *Progress in Electromagnetic Research*, vol. 18, 229-244.
- Yee, K. (1966). Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE transactions on antennas and propagation*, 14(3), 302-307.