



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**KABLOSUZ GÜÇ İLETİMİNDE RF ENERJİ HASADINA YÖNELİK
ANTEN TASARIMI**

Javid MAYILOV

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı

**Eylül-2023 KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KABLOSUZ GÜÇ İLEİTİMİNDE RF ENERJİ HASADINA YÖNELİK ANTEN TASARIMI

Javid MAYILOV

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri
Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr. Ömer Faruk KESER

2023, 76 Sayfa

Jüri Prof.Dr. Ömer Faruk KESER, Dr. Öğr. Üyesi özgür DÜNDAR,
Doç. Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN

Yenilenebilir enerjiye olan talebe bağlı olarak bu alanda hayatımızı kolaylaştıran sistemlere olan ilgi de her geçen gün artmaktadır. Günümüzde tablet, telefon, sensör vb, bataryasız veya bataryalı düşük güç tüketen cihazlar her zaman enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle düşük güçlü enerjiye ihtiyaç duyan cihazlarda kullanılan pil ve bataryalardaki enerjinin sürdürülebilirliğini uzatma çalışmaları araştırmacıların temel ilgi alanını oluşturmaktadır. Mevcut ortamda farklı frekanslarda çok fazla elektromanyetik dalga bulunmaktadır. Bu dalgaların bir bölümü özellikle kullanılan teknolojiye bağlı olarak ihtiyaç olan enerjinin sağlanması amacıyla hasat edilebilir yapıdadır. Bu amaçla öncelikle ortamda olan bu dalgaların enerjisi bir devre tasarlayarak kullanılabilir hale getirilebilir. Önemli olan hasat edilecek bu enerjinin kullanılabilir miktarda ve verimlilikte olmasıdır. Bu nedenle ortam enerji yoğunluğunun hasat edilecek frekans açısından belirlenmesi oldukça önemlidir. Bunun yanında ilgili literatürde belli bir düzeyin üzerindeki enerji yoğunluğunun insan sağlığını tehdit ettiği yönünde bilgiler ileri sürülmektedir. Aynı zamanda günümüz teknolojik gelişmelerine bağlı olarak Radyo Frekansı (RF) güç iletiminin ve hasat tekniklerinin gelecek nesil kablosuz ağların güçlendirilmesi için alternatif bir yöntem haline geldiği görülmektedir. Ortamda olan bu elektromanyetik dalgalardan enerji hasadında temel amaç, öncelikle RF dalga yayını yapan kaynaklardan gelen yüksek yoğunluklu ortam elektromanyetik dalgalarının toplanması ve daha sonra bu dalgalardaki enerjinin uygun antenler aracılığıyla ihtiyaç duyulan enerji formuna maliyetsiz olarak dönüştürülmesidir.

Bu çalışmada farklı seramik malzemeler üzerinde tasarlanan mikroşerit antenlerin anten performansları temel anten parametreleri bağlamında değerlendirilmektedir. Bu kapsamda RF enerji hasadında kullanılan antenler için yapılan çalışmalar genellikle dikdörtgen şekilli yama antenler üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmalarda, tasarım denklemleri kullanılarak yama anten ve toprak boyutları yanında, besleme noktasının konumu hesaplanmış ve simüle edilmiştir. Çalışmada antenler FR4, Rogers3006 ve Rogers4003C olmak üzere üç farklı seramik malzeme üzerinde tasarlanmıştır. 2.4 GHz frekansta simülasyonları yapılarak tasarlanan antenlerin geri dönüş kaybı, duran dalga oranı, bant genişliği ve kazancı gibi elektriksel parametreleri ölçülerek ilgili değişkenler açısından karşılaştırılmıştır. Tasarlanan antenler laboratuvar şartlarında üretilmiş ve tasarım değerlerine uyumu açısından değerlendirilerek kritik edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, seramik malzemelerden Rogers4003C tabakalı dikdörtgen mikroşerit anten tasarımının wi-fi, kablosuz telefonlar ve bebek telsizleri gibi kablosuz haberleşmede yoğun olarak kullanılan bantlar için enerji hasadı açısından uygun ve üretilebilir yapıda olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: HFSS, Kablosuz Güç İletimi, Mikroşerit Anten Tasarımı, RF Enerji Hasadı

ABSTRACT

MS THESIS

ANTENNA DESIGN FOR RF ENERGY HARVESTING IN WIRELESS POWER TRANSFER

Javid MAYILOV

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTIN ERBAKAN UNIVERSITY THE DEGREE OF MASTER OF
SCIENCE IN ENERGY SYSTEMS ENGINEERING**

Advisor: Prof. Ömer Faruk KESER

2023, 76 Pages

Jury

Advisor Prof. Ömer Faruk KESER

Assoc. Prof. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN

Asst. Prof. Özgür DÜNDAR

Depending on the demand for renewable energy, interest in systems that make our lives easier in this field is increasing day by day. Nowadays, low-power devices such as tablets, phones, sensors, etc., without or with batteries, always need energy. For this reason, studies on extending the sustainability of energy in cells and batteries used in devices that require low-power energy are the main area of interest for researchers. There are many electromagnetic waves of different frequencies in the current environment. Some of these waves can be harvested to provide the energy needed, especially depending on the technology used. For this purpose, the energy of these waves in the environment can be made usable by designing a circuit. The important thing is that the energy to be harvested is in the amount and efficiency that can be used. Therefore, it is very important to determine the ambient energy density in terms of the frequency to be harvested. In addition, there is information in the relevant literature that energy density above a certain level threatens human health. At the same time, depending on today's technological developments, it seems that Radio Frequency (RF) power transmission and harvesting techniques have become an alternative method for strengthening next generation wireless networks. The main purpose of energy harvesting from these electromagnetic waves in the environment is to first collect high-intensity ambient electromagnetic waves coming from sources emitting RF waves and then convert the energy in these waves into the required energy form cost-free through appropriate antennas.

In this study, the antenna performances of microstrip antennas designed on different ceramic materials are evaluated in the context of basic antenna parameters. In this context, studies on antennas used in RF energy harvesting have generally focused on rectangular-shaped patch antennas. In these studies, the location of the feed point as well as the patch antenna and ground dimensions were calculated and simulated using design equations. In the study, the antennas were designed with three different ceramic materials: FR4, Rogers3006 and Rogers4003C. Electrical parameters such as return loss, standing wave ratio, bandwidth and gain of the designed antennas, simulated at 2.4 GHz frequency, were measured and compared in terms of relevant variables. The designed antennas were produced under laboratory conditions and evaluated and criticized in terms of their compliance with the design values.

The results obtained showed that the rectangular microstrip antenna design with Rogers4003C layer made of ceramic materials is suitable and manufacturable in terms of energy harvesting for bands used extensively in wireless communication such as Wi-Fi, cordless phones and baby monitors.

Keywords: HFSS, Microstrip Antenna Design, RF Energy Harvesting, Wireless Power Transfer

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında tamamlanan lisansüstü bir araştırma çalışmasının ürünüdür.

İlk olarak, tez süreci boyunca tüm bilgi ve birikimlerinden faydalandığım danışman hocam Prof. Dr. Ömer Faruk Keser'e en derin minnettarlığımı sunmak istiyorum. Sizin mütevaziliğiniz, sabrınız ve tutkunuz sayesinde, bu çalışmada beni ileriye taşıyan bir öğrenci olarak kendimi şanslı hissettim.

Çalışmamın olgunlaşmasına katkıda bulunan, fikirlerini paylaşan ve beni destekleyen değerli hocam Dr. Öğr. Muhammed İSAYEV, Dr. Öğr. Üyesi Dilek UZER ve Dr. Öğr. Üyesi Özgür Dündar'a derin teşekkürlerimi bildirmek istiyorum. Sizlerle olan tartışmalar ve fikir alışverişleri, bu tezi daha kapsamlı hale getirmeme yardımcı oldular.

Ayrıca, çalışmamın gerçekleştirilmesi için bana maddi ve manevi destek sağlayan aileme ve sevdiğime de teşekkür etmek istiyorum. Sizlerin sabrı, anlayışı ve sürekli motivasyonu sayesinde bu zorlu süreci başarıyla tamamladım.

Javid MAYILOV
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|------------|
| ÖZET | ii |
| ABSTRACT | iii |
| ÖNSÖZ | iv |
| İÇİNDEKİLER..... | v |
| SİMGELER VE KISALTMALAR | vii |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1. Kablosuz Güç İletimi..... | 4 |
| 1.1.1. Enerji Hasadı Teknolojileri..... | 6 |
| 1.1.2. Güneş Enerji Hasadı..... | 7 |
| 1.1.3. Termoelektrik Malzemelerden Enerji Hasadı..... | 9 |
| 1.1.4. Piezoelektrik Enerji Hasadı..... | 11 |
| 1.1.5. Havacılık ve Uzay Araçlarında Enerji Hasadı..... | 13 |
| 1.1.6. RF Enerji Hasadı..... | 16 |
| 1.1.7. RF Enerji Hasadı Teknolojisi..... | 18 |
| 1.1.8. RF Enerji Hasadının Avantajları..... | 19 |
| 1.1.9. Mikroşerit Antenler..... | 20 |
| 1.1.10. Mikroşerit Anten Özellikleri..... | 21 |
| 1.2. Kaynak Araştırması..... | 22 |
| 1.3. Araştırmanın Problemi..... | 28 |
| 1.4. Araştırmanın Amacı..... | 28 |
| 2. MATERYAL VE YÖNTEM | 30 |
| 2.1. Yöntemsel Teorik Temeller..... | 30 |
| 2.1.1. Mikroşerit Antenin Fiziksel Parametreleri..... | 30 |
| 2.1.1.1. Mikroşerit Anten Dielektrik Malzemeleri..... | 32 |
| 2.1.1.2. Besleme Teknikleri..... | 34 |
| 2.1.1.2.1. Mikroşerit Hat Besleme..... | 34 |
| 2.1.1.3. Mikroşerit Yama Anten Geometrisi..... | 35 |
| 2.1.1.4. Mikroşerit Yama Antenlerde Saçaklanma..... | 38 |
| 2.1.2. Antenlerin Elektriksel Parametreleri..... | 39 |
| 2.1.3.1. Yönlülük..... | 40 |
| 2.1.3.2. Giriş Empedansı..... | 40 |
| 2.1.3.3. Kazanç..... | 41 |
| 2.1.3.4. Gerilim Duran Dalga Oranı..... | 42 |
| 2.1.3.5. Bant Genişliği..... | 42 |
| 2.1.3.6. Geri Dönüş Kaybı..... | 43 |
| 2.1.3.7. Verimlilik..... | 43 |

| | |
|---|-----------|
| 2.1.3. RF Anten Tasarım Simülatörleri..... | 44 |
| 2.1.3.1. HFSS (Yüksek Frekans Yapısal Simulatörü) | 45 |
| 2.2.Yapılan Çalışmalar | 46 |
| 2.2.1. Kapsamlı Literatür Araştırması | 47 |
| 2.2.2. Ortam RF Enerji Yoğunluğunun Belirlenmesi | 47 |
| 2.2.3. Simülasyon Programının Seçimi | 48 |
| 2.2.4. Mikroşerit Anten Tasarım Süreci..... | 48 |
| 2.2.4.1. Mikroşerit Anten Geometrisinin Belirlenmesi | 49 |
| 2.2.4.2. Mikroşerit Anten Dielektrik Malzemesinin Belirlenmesi | 50 |
| 2.2.4.3. Mikroşerit Anten Besleme Yönteminin Belirlenmesi | 50 |
| 2.2.5. Tasarlanan Antenlerin Elektriksel Parametrelerinin Belirlenmesi..... | 51 |
| 2.2.5.1. FR4 Tabakalı MYA..... | 51 |
| 2.2.5.2. Rogers3006 Tabakalı MYA | 53 |
| 2.2.5.3. Rogers4003C Tabakalı MYA..... | 55 |
| 3. BULGULAR | 60 |
| 3.1 Üretilen FR4 Alt Tabakalı Mikroşerit Anten Verileri..... | 60 |
| 3.2. Üretilen Rogers3006 Alt Tabakalı Mikroşerit Anten Verileri | 61 |
| 3.3. Üretilen Rogers4003C Alt Tabakalı Mikroşerit Anten Verileri..... | 61 |
| 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 63 |
| 4.1 Sonuçlar..... | 63 |
| 4.2. Öneriler | 65 |
| KAYNAKLAR | 68 |
| ÖZGEÇMİŞ | 76 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

| | |
|---------------------|---|
| T | : Sıcaklık |
| H | : Plank Sabiti |
| K | : Boltzman Sabiti |
| Q | : Kalite Faktörü |
| T | : Mikroşerit Anten Yama ve Toprak Düzlemi Kalınlığı |
| h | : Mikroşerit Anten Taban Kalınlığı |
| ϵ_r | : Dielektrik Sabiti |
| e | : Işıma Verimi |
| λ | : Dalga Boyu |
| dB | : Desibel |
| C | : Işık Hızı |
| L | : Dikdörtgen Mikroşerit Anten Boyu |
| S ₁₁ | : Geri Dönüş Kaybı |
| W | : Dikdörtgen Mikroşerit Anten Eni |
| BW | : Bant Genişliği |
| ϵ_{eff} | : Efektif Dielektrik Sabiti |
| Z ₀ | : Karakteristik Empedans |
| RL | : Anten Yük Direnci |
| Γ | : Yansıma Katsayısı |
| f ₀ | : Merkezi Frekans |
| f _{üst} | : Frekans Bandının Üst Sınırı |
| f _{alt} | : Frekans Bandının Alt Sınırı |
| f _r | : Çalışma Frekansı |
| ρ | : Yansıma Katsayısı |
| η_{rad} | : Antenin Radyasyon Verimliliği |
| P _{rad} | : Yayılan Güç |
| P _{inject} | : Terminallere Gönderilen Güç |
| P _{kaybı} | : Malzemelerde Dağılan Güç |

Kısaltmalar

| | |
|------|---------------------------------------|
| EH | : Enerji Hasadı |
| RF | : Radio Frekansı |
| BG | : Bant Genişliği |
| DC | : Doğru Akım |
| GSM | : Küresel İletişim İçin Mobil Sistem |
| GHz | : Gigahertz |
| ISM | : Endüstriyel, Bilimsel ve Tıbbi Bant |
| MoM | : Moment Metodu |
| RFID | : Radyo Frekansı Kimlik Tanılama |
| MHz | : Megahertz |
| HFSS | : Yüksek Frekans Yapısal Simulatörü |
| IoT | : Nesnelerin İnterneti |

1. GİRİŞ

Kablosuz enerji iletim teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla birlikte kablosuz cihazlara talep de artmaktadır. Dünyada farklı formda bulunan pek çok enerji kaynağı kullanılırken, üretilen enerjinin sınırlı olması ve oransal olarak her geçen gün giderek azalması ile birlikte daha fazla enerji üretme ihtiyacı da devam etmektedir. Yenilenebilir yeşil enerjinin temiz bir gelecek enerjisi olarak sunulmasından beri güneş, rüzgâr vb. enerji uygulamaları da yaygınlaşmaktadır. Yine de enerjiye olan ihtiyacın büyüklüğü temiz enerji kaynaklarına yönelik araştırmaların devam etmesine neden olmaktadır. Bu bağlamda var olan maliyetsiz ortam enerjisinden yararlanma hedefine yönelik enerji hasadı kavramı literatürümüze girmiştir. Enerji hasadı; termal, mekanik ve elektromanyetik titreşim vb. gibi ortamdaki farklı enerji formlarının toplanması ve elektrik enerjisine dönüştürülmesi süreci olarak tanımlanabilir. Mevcut ortamda farklı frekanslarda çok fazla elektromanyetik dalga bulunmaktadır. Bu dalgaların bir bölümü özellikle kullanılan teknolojiye bağlı olarak ihtiyaç olan enerjinin sağlanması amacıyla hasat edilebilir yapıdadır. Bu amaçla öncelikle ortamda olan bu dalgaların enerjisi bir devre tasarlayarak kullanılabilir hale getirilebilir. Önemli olan hasat edilecek bu enerjinin kullanılacak miktarda ve verimlilikte olmasıdır. Ortam enerjisi; Güneş, termal gradyanlar, mekanik titreşimler ve elektromanyetik dalgalar gibi farklı enerji türlerinden oluşmaktadır. Bu kaynakların güç yoğunluğu, enerji hasadı için çok önemlidir. Bu enerji kaynakları arasında, güneş enerjisi en yüksek güç yoğunluğuna sahip ve en çok kullanılan enerji kaynağı olarak kabul edilir. Gündüzleri, güneş enerjisinin ortalama güç yoğunluğu yaklaşık olarak 1000 W/m^2 veya 100 mW/cm^2 'dir. Ancak bulutlar bu değeri azaltabilirken deniz seviyesinde bu değer biraz daha yüksektir (Siddique ve ark., 2016). Ayrıca, güneş panellerinin daha yüksek üretim oranına yükselmesi için yüzey değerlerinin artırılması gerekmektedir. Bu da Güneş enerji hasadının verimine yönelik önemli göstergelerden birisidir.

Ortam enerjisinin hasadında kullanılan bir diğer teknoloji ise termoelektrik malzemeler üzerine odaklanmıştır. Termoelektrik malzemeler düşük veya yüksek oranda ısıya maruz bırakıldığında elektrik potansiyeli oluşturmaktadır (Bulat 2021). Bu, termoelektrik jeneratörlerinin enerji üretmek için ısı farkına ihtiyaç duyduğu anlamına gelmektedir. Potansiyel fark ne kadar fazlaysa termoelektrik jeneratörler o kadar fazla

elektrik üretir. Bu uygulama tersine yürütüldüğünde ise, ısı enerjisi üretilebilmektedir. İnsan vücudu termal enerji kaynağı olarak kabul edilirse oda sıcaklığında yaklaşık olarak $20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ile $60 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ arasında termal yoğunluğa sahiptir (Leonov, 2013). Buradan hareketle insan vücudundaki enerjiyi kullanarak çalışan saatler tasarlanmıştır. Temel mantık, sürekli bir potansiyelin sağlanması için yaklaşık 37°C civarındaki insan vücudu ile temas eden saatin alt yüzeyi ile saatin soğutucuya sahip üst yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının korunmasıdır. Bu da $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ seviyelerinde bile enerji hasadının kullanışlı ve sürekli olabileceğinin en önemli göstergelerindendir. Ortam enerjisinin hasadında kullanılan bir diğer teknoloji piezoelektrik malzemelere odaklanmıştır. Piezoelektrik malzemeler, mekanik titreşimlerden, hareketlerden veya gürültüden elektrik enerjisi üreten veya elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirebilen malzemeler olarak bilinmektedir (Orecchini ve ark., 2011). Yüksek voltaj ve düşük akım nedeniyle, bu enerji kaynağı türü düşük dönüşüm verimliliğine sahiptir. Aynı zamanda aşırı voltajlardan devreyi korumak için bir voltaj regülatörüne ihtiyaç duyarlar. Piezoelektrik enerji yoğunluğu hareketin özelliklerine bağlıdır, ancak tipik olarak değer yaklaşık $250 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ değere sahiptir (Liang ve ark., 2021). Bu değerler dikkate alınarak optimize edilen ve geliştirilen teknoloji ile güncel hayatta kullanılabilir sistemler sunulmuştur(Çalışır ve ark., 2020). Bu kapsamda metro istasyonlarında araçtan iniş ve çıkış yanında, istasyona veya havaalanlarına giriş ve çıkış sürecinde yoğun yolcu hareketine bağlı olarak turnikelerde ciddi bir hareket enerjisi potansiyeli düşünülerek Piezoelektrik malzemenin elektrik üreten bir sistem geliştirilmiştir. Bu sistemde üretilen enerji miktarı m^2 'de yaklaşık 100W 'tır. İstasyonda 20 adet turnike bulunduğu kabul edilirse sistem, saatte 2 kW/h enerji tüketmektedir. Yapılan çalışma, turnikeler tarafından üretilen enerjinin sistem tarafından ihtiyaç duyulan bu enerjiyi yeterince karşıladığını göstermiştir. İstasyonun 18 saat işletmede kaldığı kabul edilerek toplam enerji tüketiminin günlük olarak 36 kW/h olduğu belirtilmektedir.

Termoelektrik ve piezoelektrik teknolojilerin enerji hasadında kullanımı yapısal özelliklerinden dolayı daha sınırlı ve tanımlı ortamları gerektirmektedir. Özellikle enerjinin sürekliliğini gerektiren daha kapsamlı uygulamalar için daha farklı enerji hasadı teknolojilerinin araştırılmasını gerektirmektedir. Bu kapsamda yenilenebilir enerji kaynaklarına ek olarak kullanılabilir bir uygulama olan Radyo Frekans - RF enerjisi, kablosuz olarak güç kaynağı görevini görerek tüketim cihazlarını beslemek için

kullanılabilir. Elektromanyetik dalgalardan enerji alınarak, kablosuz ağlar ve düşük güçlü kablosuz cihazların sürdürülebilir bir şekilde çalışması sağlanabilir.

RF dalgalarından elde edilen enerji sınırlıdır ve mesafe arttıkça hızla kaybolur. Yine de bu, ücretsiz enerji elde etmenin ve daha sürdürülebilir bir dünyaya doğru gelişmenin bir yolu olarak görülebilir.

Ayrıca, küçük cihazları sürdürmek için yeterli enerjiye sahip olmak, küçük cihazlarımızda belki de pil kullanımına son verebilecek önemli bir teknolojik gelişme olması nedeniyle gelecek açısından umut vadetmektedir. Son dönemlerde RF Enerji Hasadı uygulaması önemli araştırma alanlarından biri haline gelmiştir (Bouchouicha ve ark., 2010). Bu alanda yapılan çalışmalar daha ziyade mevcut enerji kaynaklarından en yüksek verimliliği elde etmeye odaklanmıştır. Bu başlık altında, RF enerjisi hasat sistemlerinin bir genel bakışı sunulmuştur. RF Enerji hasadı bileşenleri; kablosuz iletişim ortamı, anten ve empedans eşleme devresi, doğrultucu, voltaj çarpanı ve enerji depolama cihazı veya yüklerdir. Bu bileşenlerin özellikleri, bir RF enerjisi hasat sisteminin performansını doğrudan etkiler. Sistem performansı, dönüşüm verimliliği ve empedans eşleşme verimliliği olarak adlandırılan her bloktaki çıkış ve giriş güçlerinin oranına odaklanmaktadır. Bu oran, sistem genelindeki verimliliği belirlemektedir.

Çevresel ortamlarda, radyo frekansı (RF) enerjisi, yukarıda bahsedilen enerji kaynaklarına kıyasla en düşük güç yoğunluğuna sahip olan güç kaynağıdır. RF enerjisinin güç yoğunluğu $0,2 - 1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ arasında değişir (Yıldız, 2007). Diğer bir yandan, RF enerjisi elektromanyetik dalgalar yardımıyla çok daha geniş bir alandan elde edilebilir yapıdadır. Farklı frekans bantlarında radyo frekansı enerji kaynaklarından yayılan elektromanyetik dalgalar yaygın olarak bulunabilir. Bu nedenle, bu geniş alandan sürekli enerji elde etmek mümkündür. Ayrıca, RF enerji hasadı, kablosuz güçlendirilmiş iletişim (WPC) ve eşzamanlı kablosuz bilgi ve güç aktarımı (SWIPT) sistemleri gibi iletişim sistemlerinde bilgi transferi ile birlikte de kullanılabilir (Ng ve ark., 2013). Ayrıca, düşük güçlü kablosuz cihazların kullanımı artmaktadır. Bu nedenle son yıllarda RF enerji hasadı teknolojisinde önemli gelişmeler gözlenmiştir (Jain ve ark., 2018; Elwi, 2019; Behera ve ark., 202; Kumar ve ark., 2021; Agrawal ve ark., 2017). RF enerji toplayıcıları, kablosuz sensör ağları (WSN) ve nesnelerin interneti gibi uygulamalar için uygun bir enerji kaynağı rolünü oynamaktadır. Bu sensörler, tarım, savunma, enerji yönetimi, bina otomasyonu, güvenlik, endüstriyel izleme, sağlık izleme, çevre izleme, veri merkezi ve akıllı şebekeler gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Buna ek olarak, uzaktan kumandalar,

klavyeler ve kulaklıklar gibi düşük güçlü tüketici elektroniği RF enerji hasadı için pratik uygulama alanı olarak ortaya çıkmaktadır. Powercast Şirketi'nden P2110 Powerharvester modülü, 902 - 928 MHz frekans aralığında verimli enerji hasadı sağlayan ticari bir üründür. RF enerji toplayıcıların geliştirilmesi sayesinde AA veya AAA boyutundaki piller kablosuz olarak şarj edilebilmesinin yanında, ışık yayan diyotlar (LED'ler) kablosuz olarak aydınlatılabilir yapıya kavuşmuştur. Bu konuda yürütülen bir çalışmada, akıllı sayaç ve LCD ekran kablosuz enerji toplayıcısına bağlanarak katlanabilir bir çift yönlü anten tasarlanmış ve üretilmiştir. Sonuç olarak, geliştirilen antenin akıllı sayaç ve LCD ekranın kablosuz enerji toplayıcısı ile tam şekilde çalıştığı görülmüştür (Bito ve ark., 2014).

Bir RF enerji hasat sistemi genellikle anten, empedans eşleme devresi, doğrultucu, gerilim çarpanı ve enerji depolama cihazı veya yükten oluşur. Bu tez çalışmasında inceleneceği gibi, bir RF enerji hasat sisteminde öncelikle, kablosuz iletim ortamı boyunca iletilen RF sinyali bir tek anten veya çoklu antenler tarafından uzak alan bölgesinde yakalanır. Bu sistemlerde, empedans eşleme devresi, maksimum güç transferini sağlamak için kullanılmaktadır. Daha sonra, doğrultucu, RF gücünü doğru akıma (DC) dönüştürür. Doğrultucunun çıkış gerilimi, bir kablosuz cihazı çalıştırmak için genellikle çok düşük olmaktadır. Bu nedenle, DC voltaj seviyesini artırmak için bir gerilim çarpanı kullanılır. Son olarak, hasat edilen enerji, bir şarj edilebilir pil ve süperkapasitör gibi bir enerji depolama cihazına depolanabilir veya doğrudan yüke bağlanabilir. Bir RF enerji hasat sistemi, indüktif kavşak ve manyetik rezonans kavşağı gibi yakın alan bölgesinde RF sinyal enerjisi hasat etmeyi hedeflemektedir.

Bu bölümde enerji hasadı teknolojileri, güneş enerjisi hasadı, termoelektrik enerji hasadı, piezoelektrik enerji hasadı ve uzay ve havacılık araçlarında enerji hasadı kapsamlı bir şekilde araştırılarak sunulmaktadır. Bunun yanısıra RF enerji hasadı ve güncel enerji hasat teknolojileri, avantajları ve taşıdığı potansiyeller açısından değerlendirilmektedir.

1.1. Kablosuz Güç İletimi

Başlangıçta Danimarkalı fizikçi ve kimyager H.C. Oersted'in 1819'da yaptığı Kablosuz güç iletimi – WPT deneyi rapor edilmiştir. Oersted, bir elektrik kablosundan geçen elektrik akımının iletkenin etrafında bir manyetik alan oluşturduğunu keşfetmiştir.

Oersted'in temel keşfini takiben, Amper Yasası, Biot-Savart Yasası ve Faraday Elektromanyetik İndüksiyon Yasası gibi önemli bulgular ortaya çıkmıştır. 1864'te J.C. Maxwell, manyetik ve elektrik alanların birbirleri tarafından nasıl üretildiğini ve etkilendiğini detaylı olarak açıklayabildiği Maxwell denklemleriyle matematiksel olarak tanımlamıştır (Hughes ve Dibner, 1962). Daha sonra 1873'te, Cambridge'deki zamanındaki diğer araştırma çabalarıyla birlikte, elektromanyetizma teorisi "Electricity and Magnetism Treatise" başlıklı bir yayında birleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, elektrik ve manyetizmanın aynı kuvvet tarafından düzenlendiğini ortaya konulmuştur. Bu tarihi ilerleme, elektromanyetizmanın teorik temelini oluşturmuştur (Maxwell, 1873). Bunun ardından, ilk elektromanyetik radyasyonun deneysel olarak varlığının kanıtlandığı büyük bir teknik atılım, Alman bilim adamı Heinrich Hertz tarafından 1888'de gerçekleştirilmiştir. Hertz, bir çift salınım cihazını başarılı bir şekilde bobinler arasındaki küçük bir boşluktan elektriksel güç aktarmak için kullanmıştır. Bu deney, elektromanyetik radyasyonun varlığının ilk pratik gözlemi olarak görülmekte ve Maxwell'in tahminlerini doğrulamaktaydı. Diğer yandan ünlü bilim adamı Nikola Tesla, elektromanyetik radyasyona dayalı bir dizi deney gerçekleştirmek amacıyla büyük bir zaman ve sermaye harcamıştır. Tesla'nın çalışmasının ana odak noktası, elektrik enerjisini elektrik tellerini ortadan kaldırarak uzun mesafelere aktaran bir sistem geliştirmektir. Tesla, 150 kHz'de rezonansa giren ve Colorado Springs Elektrik Şirketi'nden elde edilen 300 kW düşük frekanslı güç ile beslenen ünlü "Tesla bobini"ni geliştirmiştir (Şekil 1.1).



Şekli 1.1 Tesla bobini (Wikipedia, 2023).

Bununla da mikrodalga teknolojisine dayalı WPT deneylerini yapan ilk kişi olmuştur. Sonuç olarak 1901'de Tesla, iyonosfer üzerinden elektrik enerjisi iletimi için tasarlanmış ünlü Wardencllyffe Kulesi'ni tamamlamıştır (Marincic, 1982).

1960'ların sonlarında, üretilen mikrodalga ışınları kullanılarak bir helikoptere güç vermek ve konumlandırmak için kablosuz güç temizleme deneyleri yapıldı. O zamandan bu yana, enerji hasadı kavramları iyi bilinmeye başlandı ve termoelektrik dönüşüm, piezoelektrik etki, güneş enerjisi dönüşümü ve çok daha fazlası gibi enerji için farklı fiziksel özellikler kullanan birçok farklı ortam enerji temizleme konseptine yol açtı (Hamed, 2022).

Fiziksel özellikler arasında elektromanyetik enerji, uzayda en bol bulunan enerji şeklidir ve herhangi bir sınırlama olmadan elde edilebilir, bu nedenle kablosuz enerji hasadı birçok düşük güçlü uygulama için ilginç bir aday haline gelmektedir.

Kablosuz güç iletimi kısa, orta ve uzun menzilli olmak üzere üç sınıfta incelenebilir. Mikrodalga veya RF dalgaları açısından değerlendirildiğinde enerjiye ve bu gücün kablosuz iletimine olan ihtiyaç bağlamında enerji hasadı teknolojilerine olan ilgi her geçen gün daha da artmaktadır (Mohammed ve ark., 2010).

1.1.1. Enerji Hasadı Teknolojileri

Enerji hasadı, ortamdaki mekanik, termal ve elektromanyetik enerjilerden elektrik enerjisi elde etme sürecidir. Yaygın olarak kullanılan enerji hasadı teknolojileri şunlardır (Akinaga, 2020):

- Güneş pilleri: Güneş pilleri, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılan cihazlardır. Bu piller, güneş enerjisinin fotovoltaiik etkisini kullanarak çalışır ve özellikle güneş ışığına maruz kaldıkları sürece enerji sağlarlar.
- Termoelektrik jeneratörler: Sıcaklıktaki farklılıkların kullanımıyla oluşan potansiyele bağlı olarak termal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Bu jeneratörler, farklı malzemelerin termal iletkenliklerini kullanarak termodiferansları (sıcaklık farklılıklarını) kullanır.
- Piezoelektrik jeneratörler: Mekanik basınç ve titreşim gibi mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Kristallerin bir tarafında yük birikirken diğer tarafında ise eksi yük birikir.

- Radyo frekansı (RF) jeneratörler: Elektromanyetik spektrumun Radyo frekansı dalgalarından elektrik enerjisi elde etmek için tasarlanmıştır. Bu teknoloji, radyo frekansını alan içindeki antenler aracılığıyla yakalar ve elektrik enerjisine dönüştürür.

Bu teknolojilerin her biri farklı koşullarda ve uygulamalarda kullanılabilir ve farklı avantajlara sahiptir. Bu kapsamda enerji hasadının faydaları;

- Pilleri değişimi gerektirmez.
- Kablolama olmaksızın kablosuz enerji iletim teknolojilerini kullanır.
- Altyapıları güçlendirmeleri kolaydır.
- Fiziksel kurulum, değiştirme ve bakım maliyetlerinin yanında, zamanın verimli kullanımını açısından “tak ve unut” yaklaşımını temsil ederler.

Enerji hasadı teknolojisi ile geleceğin hava ve uzay araçlarından daha iyi performans elde edebilir. Bu hava ve uzay araçlarının gelişmiş seyir menzili ve batarya süreleri onların operasyonel ömürlerinde oldukça belirleyicidir (Fan ve ark., 2019).

1.1.2. Güneş Enerji Hasadı

Güneş enerjisinden ya da yapay ışımalarda enerji toplama işlemi geleneksel olarak foto-sensörler, foto-diyotlar ya da güneş panelleri aracılığıyla sağlanabilir. Dünyamıza ulaşan Güneş ışınma değeri yönetilemez ancak tahmin edilebilir olarak karakterize edilebilirler. Çünkü sadece Dünyamızın dönüşü ile sınırlı olmayan kesintili bir doğal kaynak olan güneş ışığına bağlıdır. Bu durum, güneş pillerinin/fotovoltaiklerinin geleneksel elektrik şebekesi sistemlerine entegrasyonu için güç çıkışı öngörülebilirliğini kritik hale getirmektedir. Genel olarak Güneş enerjisi ile Dünyamıza cm^2 başına 100 mW güç düşerken, % 15 dönüşüm verimliliği sebebi ile solar hücre teknolojisi kullanılarak 15 mW/ cm^2 kadar enerji hasat edilebilmektedir. Güneş panelleri bir akım kaynağı olarak düşünülebilir. Elde edilen akım direkt olarak panelin boyutu ile ilişkilidir (Vandenbosch ve Ma, 2012). Ayrıca ışığın yoğunluğu da elde edilen güç ve dolayısıyla akım miktarını etkileyen en önemli faktörlerdendir. Güneş enerji hasadı, süreklilik arz eden işlemlerde, akıllı enerji transferi yönetimi sistemlerinde ve kablosuz sensör ağları için mikro-solar güç alt sistemlerinde özel teknolojiler yardımıyla kullanılabilir.

Enerji ihtiyacımızın büyük bir bölümü doğrudan Güneş enerjisinin hasadına dayanmaktadır. Güneş enerji hasadı için geliştirilen güneş pillerinin % 90'ı kristal silikon plakalardan oluşmaktadır (Sezer ve Koç, 2021). Bu pillerin dezavantajı ise, enerjiyi optik frekanslardan daha düşük frekanslara dönüştürmede düşük verime sahip olmasıdır. Buradaki verim düzeyi %20 ve %30 arasındadır. Bu verimlilikleri göz önünde bulundurarak gerekli hesaplamalar yapılırsa, ihtiyaç olan enerji miktarı için aktif olarak kullanılacak güneş pillerinin 400.000 km² alana yerleştirilmesi gerekirdi (Vandenbosch ve Ma, 2012). Bu enerji ihtiyacının sadece % 10'nun güneş enerjisi hasadı ile sağlanacağı varsayılarak ve bu verim düzeyinin ikiye katlandığını kabul edersek gerekli olan alanın 20.000 km² olduğu görülecektir. Bu durum fotovoltaik hücrelerin bu denli yaygınlaşmış olmasına karşın, Güneş enerjisi hasadının verimliliğinin artırılmasına yönelik çalışmaların halen ne kadar önemli olduğunu göstermektedir (Kotter ve ark, 2009).

Güneşten enerji hasadı için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Belirtilen sınırlılıklara rağmen fotovoltaik hücreler kullanılarak güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi en yaygın olanıdır. Fotovoltaiklere bir alternatif ise, bir alıcı anten ve bir doğrultucunun birleşimi olan rectennalar'dır. İlk anten konsepti, 1964 yılında Raytheon Company tarafından mikrodalga güç iletimi için sunulmuştur (Kotter ve ark, 2009). Şekil 1.1.'deki ışımaya değerleri dikkate alındığında Güneş enerjisinin optik ve IR bölgesini hasat etmek için son zamanlarda nano-rectennalar kullanma fikri öne sürülmüştür. Yapılan çalışmalar bu teknolojinin çok daha büyük bir verimlilik sağlayacağı yönünde iddialar içermektedir (Kotter ve ark, 2009). Bir antenin radyasyon verimliliği aşağıdaki şekilde sunulabilir (Vandenbosch ve Ma, 2012):

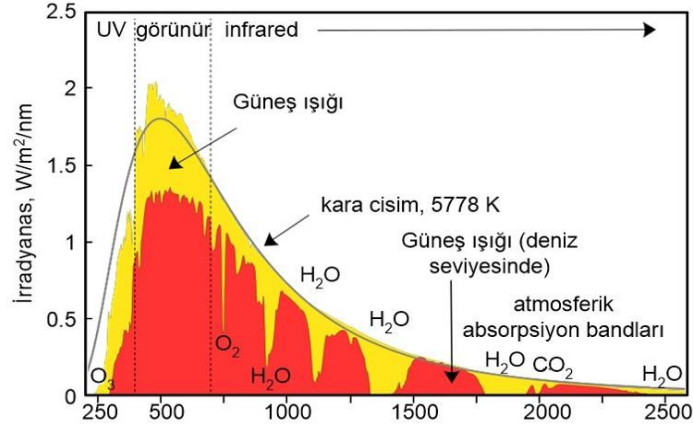
$$\eta_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{enjekt}} = \frac{P_{rad}}{P_{rad} + P_{kaybi}}$$

burada;

P_{rad} - yayılan güç,

P_{injekt} - terminellere enjekte edilen güç

P_{kaybi} - malzemelerde dağılan güçtür.



Şekil 1.2. Güneş spektrumu (Wikipedia, 2023)

Şekil 1.2’de enerjinin büyük bir kısmı görünür ve kızıl ötesine yakın bantta bulunduğu görülmektedir. 1500 nm’nin üzerindeki kısmın toplam enerjisine katkısı çok azdır. p Planck'ın siyah cisim ışıması;

$$P(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

İfadesiyle verilir. Planck yasası belirli bir sıcaklıkta termal denge durumunda bulunan bir siyah cismin yaydığı elektromanyetik ışınımı ifade eder. Herhangi bir yüzeyin spektral radyansı P, farklı frekansların ne kadar enerji yaydığının bir ifade şeklidir. Burada T siyah cismin mutlak sıcaklığıdır. h, Planck sabitidir (6.626×10^{-34} Js), c, vakumlu ışığın hızıdır (3×10^8 m / s) ve k, Boltzman sabiti (1.38×10^{-23} J / K). Güneş enerjisi durumunda, sıcaklık T, güneş yüzeyinin sıcaklığıdır.

Hesaplanan değerler pratik güneş ışıması atmosfer tarafından filtrelendiğinden Air Mass – AM (havakütle) katsayısı AM0 olunca atmosfer olmadığı anlamına gelir ve bu değer uzay güç uygulamalarında referans olarak alınır. AM0 iken ~ 1350 W/m² uzay değeri, AM1 olduğunda ~ 1040 W/m² deniz seviyesi ve AM1,5 olduğunda ise, $\sim 930 - 1000$ W/m² Dünya yüzeyinin kabaca üst sınırları olarak düşünülmelidir. Hava kütleli katsayısı, güneş radyasyonu atmosferden geçtikten sonra güneş spektrumunu karakterize etmeye yardımcı olmak için kullanılabilir.

1.1.3. Termoelektrik Malzemelerden Enerji Hasadı

Termoelektrik malzemeler, sıcaklık farklılıklarından kaynaklanan termoelektrik etkiyi kullanarak ısı enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen

malzemelerdir. Bu etki, "Seebeck etkisi" olarak bilinir. Seebeck etkisi, farklı sıcaklıklara sahip iki nokta arasında oluşan sıcaklık gradyanının, elektrik potansiyel gradyanına dönüşmesini ifade eder (Bulat, 2021; Paper, 2020). Yani sıcaklık farklılıklarının doğrudan elektriğe dönüşümü olarak tanımlanabilir.

Baltık Alman fizikçi Thomas Johann Seebeck 1821'de bu olayı keşfederek bunun metallerin sıcaklık farklılığına farklı tepkiler verme olayı şeklinde yorumladı. Danimarkalı fizikçi Hans Christian Orsted hatayı düzeltti ve "termoelektrik" terimini türetti. Bu çalışmadan sonra yarıiletkenlerin elektrik – ısı ilişkisi termoelektrik alanında Peltier Etkisi olarak anılarak literatürdeki yerini almıştır.

Seebeck etkisi sayesinde, termoelektrik malzemeler özellikle enerji geri kazanımı ve soğutma sistemlerinde olduğu gibi birçok farklı uygulamada kullanılabilir. Termoelektrik enerji hasadı, birçok endüstri ve teknoloji alanında potansiyel olarak büyük bir etkiye sahiptir (Bulat, 2021; Dresselhaus ve ark., 2009).

Bu özellik sayesinde, ortamdaki ısı enerjisi sensör ağları, giyilebilir cihazlar ve uzaktan izleme sistemleri gibi uygulamalarda düşük güç gereksinimlerini karşılamak için kullanılabilir. Örneğin, vücut sıcaklığından veya güneş ışığından elde edilen ısı enerjisi, termoelektrik malzemeler vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülebilir. Atomik ölçekte, uygulanan bir sıcaklık gradyanı, malzemedeki yük taşıyıcıların sıcak taraftan soğuk tarafa yayılmasına neden olur. Bu etki elektrik üretmek, sıcaklığı ölçmek veya nesnelerin sıcaklığını değiştirmek için kullanılabilir.

Termoelektrik malzemeler, Peltier etkisi olarak bilinen bu etkiyi kullanarak sıcaklık farklılıkları aracılığıyla soğutma veya ısıtma sağlayabilirler. Bu tür sistemler, minyatür soğutma cihazlarından endüstriyel ısı pompalarına kadar çeşitli uygulamalarda kullanılabilirler (Usta ve Kırmacı, 2002). Genel açıdan değerlendirildiğinde verimlerinin düşük olduğu söylenebilir.

Uzaydaki farklı sıcaklık bölgeleri arasındaki büyük sıcaklık gradyanları, termoelektrik malzemeler aracılığıyla uzay istasyonlarında veya derin uzay görevi için geliştirilen uzay araçlarında enerji üretimi için kullanılabilir (Bulat, 2022). Yakın uzay yörüngelerinde temel enerji kaynağı Güneştir. Bu nedenle uyduların veya diğer uzay platformlarının güç sistemleri genellikle Güneş pilleri teknolojilerine dayanmaktadır. Oysa derin uzay görevlerinde Güneşin etkileri ya çok zayıf veya yok mertebesindedir. Bu gibi durumlarda Radyoizotop Termoelektrik Jeneratörler – RTG kullanılır (Keser ve ark, 2019). Bu sistemlerde ısı enerjisini sağlayan temel enerji kaynağı radyoaktif çekirdeklerdir. NASA geliştirdiği RTG'lerin çoğunda radyoaktif ısı kaynağı olarak

Plutonium 238 kullanılmaktadır. RTG'lerin iç kısmı yaklaşık 1000°C'de çalışırken dış kısmında ısı taşıyıcı olarak soğutucu radyatörler kullanılır (Bulat, 2022). Bu sistemlerin verimi % 6,6 kadar düşük olmasına rağmen alternatif güç sistemlerinin kütle, maliyet ve ömür gibi değişkenleri ile kıyaslandığında bu durum göz ardı edilebilecek kadar önemsizdir (Bulat, 2021). Örneğin, bu kapsamda geliştirilen ilk cihazlardan birisi olan ve ilk olarak 1959 yılında tanıtılan SNAP-3, 1,8 kg ağırlığında, 2,5 W gücünde ve 280 günlük periyotta 11,6 kW/h enerji üretebilecek kapasitedeydi. Buna eşdeğer miktardaki enerjiyi sağlayabilecek Nikel-Kadmiyum bataryanın 315 kg ağırlığında olması gerekirdi. İlgili literatürde bu açıdan değerlendirildiğinde, yakın, orta ve uzun vadede derin uzay görevleri planlayan Ülkemiz ve benzer ülkeler için RTG sistemlerinin ve güvenlik kısıtları nedeniyle uygun fırlatma teknolojilerinin geliştirilmesi kuvvetle önerilmektedir (Keser ve ark., 2019).

Endüstriyel tesislerde veya enerji üretim tesisleri açısından değerlendirildiğinde, atık ısı enerjisi termoelektrik malzemeler aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülerek enerji verimliliği artırılabilir. Örneğin; Ülkemizde bir çimento fabrikasında tüketilen elektriğin yaklaşık % 25 – 30'luk dilimi atık ısıdan karşılandığı rapor edilmektedir. Enerji maliyetleri en fazla elektrik ile kömüre dayalı olan Çimento sektöründe, elektrik enerjisi maliyetini yüzde 25 oranında düşürerek, aylık olarak üretilen enerjiyle yaklaşık 90 bin nüfuslu bir şehrin tüm enerjisi ihtiyacını karşılayacak kadar enerji üretilebilmektedir. Ayrıca bu atık ısının sisteme kazandırılmasıyla çevreye yapacağı olumsuz etkiler de bertaraf edilmiştir.

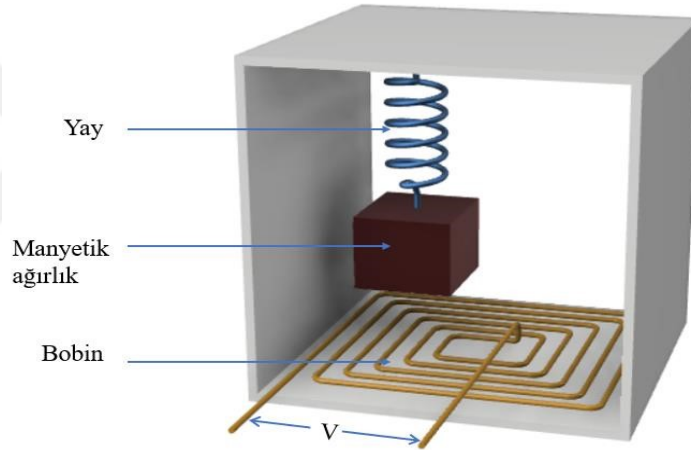
Termoelektrik malzemeler, taşınabilir cihazlarda enerji kaynağı olarak da kullanılabilir. Özellikle harici sıcaklık kaynaklarına maruz kalan cihazlarda bu tür bir enerji hasadı sistemi, pil değiştirme veya şarj gereksinimini azaltabilir.

Sonuç olarak, termoelektrik malzemelerin enerji hasadı ve dönüşümü alanında potansiyel birçok uygulaması bulunmaktadır. Ancak, mevcut termoelektrik malzemelerin verimliliği genellikle düşük olduğundan, daha yüksek verimli malzemelerin geliştirilmesi ve ticarileştirilmesi bu teknolojinin daha geniş çapta kullanılabilir hale gelmesi için önemli görülmektedir (Petsagkourakis ve ark., 2018).

1.1.4. Piezoelektrik Enerji Hasadı

Piezoelektrik enerji hasadı, yüksek güç yoğunluğu, mimari basitlik ve ölçeklenebilirlik gibi avantajları nedeniyle özellikle son on yılda araştırmacıların büyük ilgisini çekmiştir. Piezoelektrik malzemeler, salınımlı mekanik enerjiyi hasat yaparak

elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılır. Parmak hareketleri, adımlar, nefes alma ve kan basıncı gibi günlük hareketlerle özel bir gayret içerisine girmeden oluşan mekanik enerjileri bu sistemler yardımı ile elektrik enerjisine çevrilebilir (Lai ve ark., 2021). Bu bakımdan parmak hareketleri ve adım birer kinetik enerji kaynağıdır (Wu ve ark., 2021). Bu tür kaynaklar tamamıyla kontrol edilebilir yapıda olup piezoelektrik teknolojisi ile 19-67 mW arasında güç üretebilirler. Örneğin; aktif insan gücünden % 7.5 – % 11 dönüştürme verimliliği ile 2.1mW – 5mW arasında enerji hasadı yapılabilmektedir (Tao ve ark., 2017). Bunun yanı sıra nefes alma ve kan basıncı da enerji kaynağı olarak kullanılabilir (Sezer ve Koç, 2021). Bu tür kaynaklar yönetilemez ancak tahmin edilebilir kaynaklar olarak karakterize edilir. Bu gibi enerji hasadının verimliliği % 40 – 50 arasında olup ortalama olarak 0.4 mW elektrik enerjisi üretilebilmektedir.



Şekil 1.3. Titreşimden enerji hasat eden sistem örneği (Tao ve ark., 2017).

Şekil 1.3 de görüldüğü üzere yaya bağlı manyetik ağırlık sürekli bir salınım hareketi yapıyorsa bu salınım hareketi bobin üzerinde bir akım indükler. Şekil 1.3 bu nedenle mekanik titreşim hareketinden doğrudan elektrik elde edilmesine dönük piezoelektrik bir düzeneği örnekleemektedir. Buradaki salınım hareketi, yoldan geçen araçların hareketine bağlı olarak sürekli bir ortam enerjisi olarak kabul edilirse, bu sistem geliştirilerek uygun enerji hasat sistemlerinin tasarlandığı güncel çalışmaların yürütüldüğü görülmektedir (Toyabur ve ark., 2018; Moure ve ark., 2016 ; Chen ve ark., 2020 Chen ve ark., 2021)

1.1.5. Havacılık ve Uzay Araçlarında Enerji Hasadı

Havacılık ve uzay mühendisliğindeki en büyük zorluklardan birisi, uçuş sırasında mevcut olan sınırlı enerjidir. Bu sorun, aracın operasyonel ömrünü ve dolayısıyla uçuş görevlerini olumsuz etkiler. Uyduların yörüngedeki irtifa kayıplarının telafisi ve irtifanın korunması için harcanan enerji ise, genellikle kimyasal yakıt ünitelerinin yer aldığı birincil güç sistemlerinden sağlanır. Birincil güç sistemlerinden enerji sağlayamayan bir uzay platformunu ömrü tamamlanmış olarak kabul edilir. Ömrü biten uzay araçlarının pek çoğu yörüngedeki hareketine uzay çöpü olarak devam ederler. Bu durum bir uzay aracının yörüngedeki hareketi sürecinde bu hareketi gerçekleştirmek için enerjiye ihtiyaç duymadığının en somut göstergesidir. Ancak yakın dünya yörüngesindeki insansız gözetleme uyduları ve uluslararası uzay istasyonu gibi insanlı uzay platformları iletişim, veri transferi, yörünge içi manevralar vb. diğer tüm operasyonel işlemlerini yürütürken enerjiye ihtiyaç duyarlar. İhtiyaç duydukları bu enerjiyi üzerlerindeki ikincil güç sisteminin parçası olan ve Şekil 1.4’de örneği görülen bataryalardan sağlarlar. Bataryalarda eksilen enerjinin telafisi için ise, genellikle Güneşten enerji hasat etmek için tasarlanan Güneş panelleri kullanılır (Keser ve ark., 2017; İdare, 2018., Keser ve ark., 2022). Üretilen enerji ve bağlı olduğu değişkenler aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir;

$$E_{\text{üretilen}} = L\phi_{\text{Güneş}} \cos\theta A_{\text{Panel}} \eta$$

L : Aydınlanma miktarı

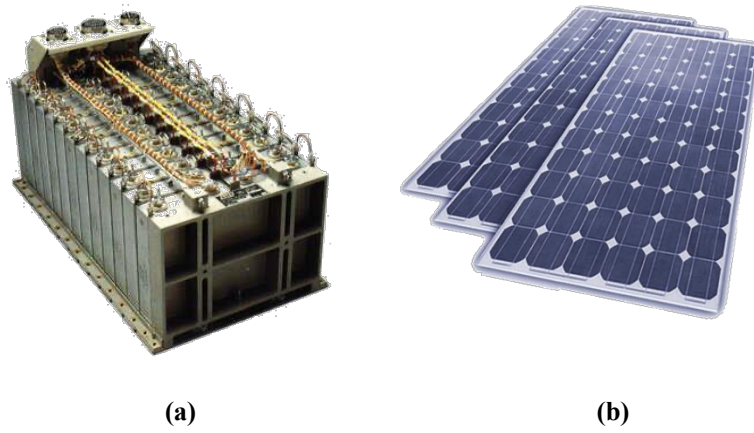
ϕ : Akı [W/m^2]

$$\phi \propto \frac{1}{4\pi R^2}$$

θ : Işığın geliş açısı

A : Panel alanı (m^2)

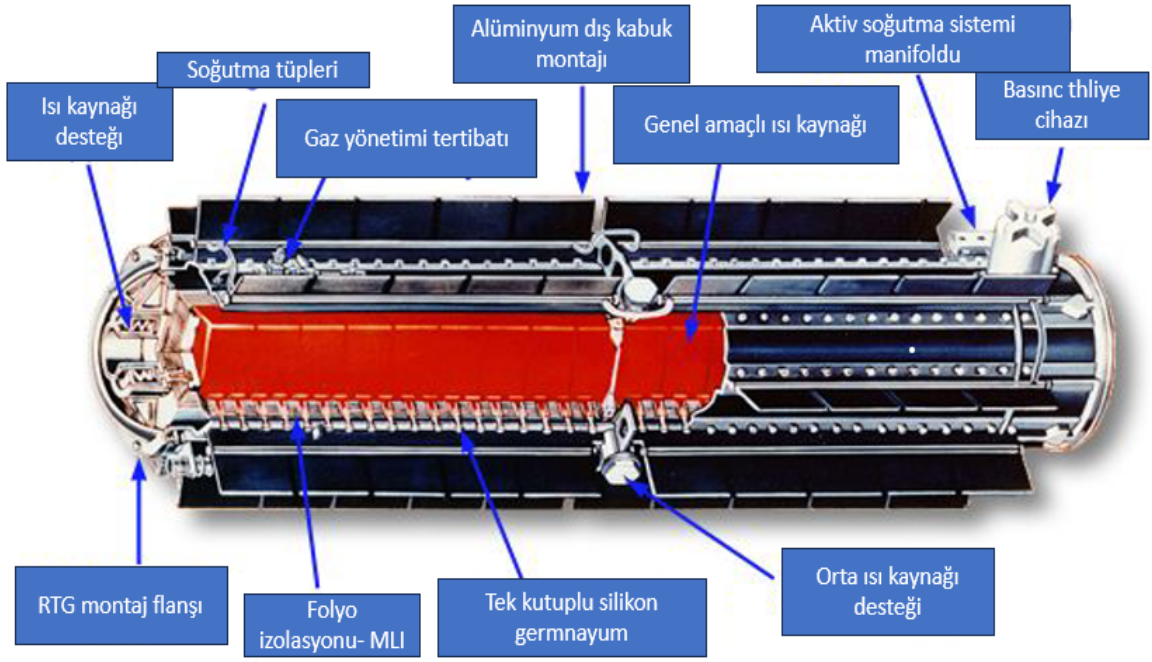
η : Panellerin verimi



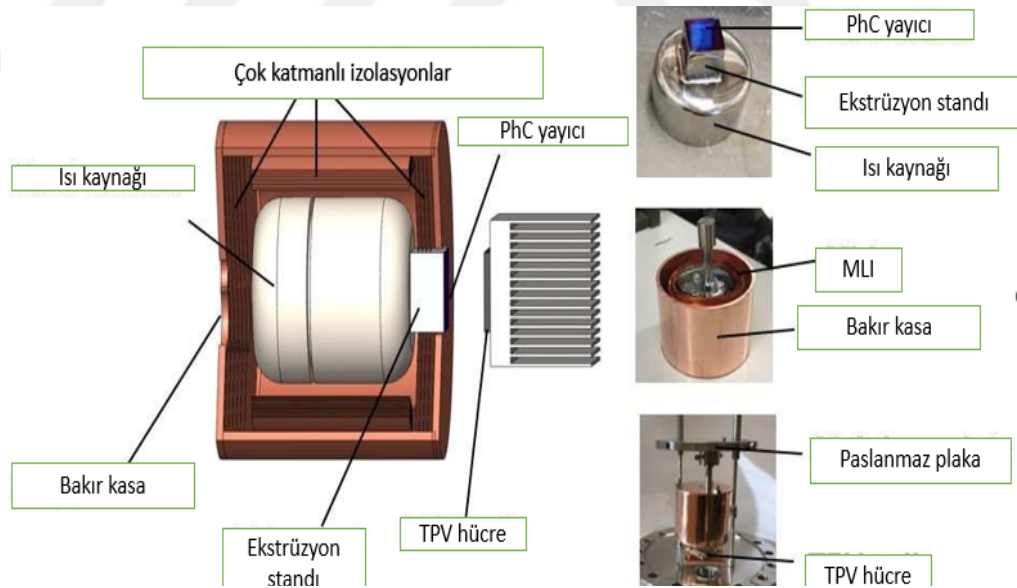
Şekil 1.4 Uydu ikincil güç sisteminin bileşenleri **(a)** Uydu ikincil güç sisteminin temel bileşeni olan batarya **(b)** Uydu güneş panelleri

Bir uzay platformundaki 64m^2 'lik alana sahip bir güneş paneli LEO – Dünya yakın yörüngede 10 – 15kW azami güç üretimi sağlarken, Güneş'e en uzak noktada 0.4kW azami güç üretimi sağlayabilir.

Uydunun çalışması için gerekli enerjiyi üreten güç sistemi, uydunun faydalı yüküne ve kendi boyutlarına bağlı olarak uydu boyutlarını, çalışma ömrünü, görev verimliliğini ve maliyetini belirlemektedir. Uyduya yönelik güç sistemlerinin performansının artırılması sürecinde ağırlığın azaltılması ve sistem sürekliliğinin sağlanması çalışmaları oldukça önemli görülmektedir (Keser ve ark, 2017; İdare, 2018). Çünkü, ağırlığın ve hacmin azaltılması uzay platformunun operasyonel görevine bağlı olarak yapısal nitelikleri ve fırlatma maliyetlerini olumlu etkiler. Bir uzay platformunun ömrünü belirleyen en önemli faktör birincil güç sistemleri olduğuna göre, özellikle uzay platformunun irtifasının değişimine bağlı hareketlerde veya yörüngeden bağımsız derin uzay görevlerinde Şekil 1.5'de görülen Radyoizotop Termoelektrik veya Şekil 1.6'da sunulan Radyoizotop Termofotovoltaik Jeneratörlü düşük kütleli alternatif birincil güç sistemlerinin tasarlanması önem kazanmaktadır (Keser ve ark, 2022; Bulat, 2021; Chan ve ark., 2017). Buradaki radyoaktif çekirdekte sağlanan ısı ve elektromanyetik ışınım enerjisi ortam enerji olarak değerlendirilirse, kurulacak elektrik enerjisi dönüşüm sisteminin enerji hasadı devresi olduğu açıkça görülmektedir;



Şekil 1.5 Radyoizotop Termoelektrik Jeneratör – RTG (Taner, 2018)



Şekil 1.6 Radyoizotop Termofotovoltaik Jeneratör – RTPVG (Chan ve ark., 2017)

Uzayda enerji hasadı, uzay araçlarının görevlerini daha uzun süre boyunca sürdürebilmeleri için enerji kaynaklarına erişim sınırlılıklarını aşmalarını sağlar. Bu nedenle araştırmacılar uzayda farklı enerji hasadı teknolojilerini geliştirmekte ve

optimize etme konusunda devamlı çalışmaktadırlar. Uzayda enerji hasadının bir diğer yolu da enerjinin mikrodalga yoluyla uzaktan iletilmesidir. Mevcut ortamda farklı frekanslarda çok fazla elektromanyetik dalga bulunmaktadır. Bu dalgaların bir bölümü günümüz erişilen teknolojisine bağlı olarak ihtiyaç olan enerjinin sağlanması amacıyla hasat edilebilir yapıya sahiptir. Bu amaçla öncelikle ortamda olan bu dalgaların enerjisi bir devre tasarlayarak kullanılabilir hale getirilebilir. Önemli olan hasat edilecek bu enerjinin kullanılabilir miktarda ve verimlilikte olmasıdır.

Günümüz teknolojik gelişmeleri, Radyo frekansı (RF) enerjisi transferinin ve hasat tekniklerinin gelecek nesil kablosuz ağların güçlendirilmesi için bir potansiyele sahip olduğunu ve alternatif bir yöntem haline gelebileceğini göstermektedir. RF enerji hasadı tarihsel olarak yaklaşık 50 yıllık bir geçmişe sahip olmakla birlikte, teknolojik gelişmelere paralel olarak günümüzde RF ortam enerji yoğunluğunun büyük bir kısmının DTV, GSM900, GSM1800, WiFi, 3G, 4G ve 5G frekans bantlarından oluşmaktadır (Ambient, 2013; Tran ve ark., 2017). Diğer yandan gelişen teknolojiye bağlı olarak ortamdaki artan RF yoğunluğunun canlılar üzerindeki olumsuz etkileri hakkında popüler ve bilimsel tarzda pek çok çalışma da yürütülmektedir. Bu bağlamda günümüz ortam RF yoğunluğunun yeni muhtevasına uygun enerji hasat teknolojilerinin geliştirilmesi enerjiye olan ihtiyaç ve canlılar üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılması açısından önemli görülmektedir.

1.1.6. RF Enerji Hasadı

Radyo frekansı (RF) enerjisi transferi ve hasat teknikleri, gelecek nesil kablosuz ağların güçlendirilmesi için alternatif bir yöntem haline gelmiştir. RF hasatı, alınan RF sinyallerinin elektriğe dönüştürülme yöntemidir. Aynı zamanda bu yolla enerjisi kısıtlı kablosuz ağları da güçlendirmek bir çözüm haline gelmiştir. RF enerji hasadı (RF-EH), bir radyo ortamında sürdürülebilir bir güç kaynağını gerektirmektedir. Bu nedenle, kablosuz cihazların bilgi işleme ve iletimi için RF dalgalarından enerji toplamasına izin vermektedir. Sonuç olarak, RF-EH, kablosuz sensör ağları ve kablosuz şarj sistemleri gibi çeşitli biçimlerde hızla uygulama alanları bulmuştur (Lu ve ark., 2015).

Kablosuz iletişimin yayın niteliğinden dolayı, farklı iletişim araçları tarafından yayılan RF dalgalarının güç yoğunlukları da farklı olur. Tablo 1’de farklı RF kaynaklarından gelen dalgaların güç yoğunlukları gösterilmiştir (Luo ve ark., 2019).

| Kaynak / Osilatör | Frekans Aralığı | Güç Yoğunluğu |
|-------------------|-----------------|-------------------------|
| DTV | 470–610 MHz | 0.89 nW/cm ² |
| GSM900 (YA) | 880–915 MHz | 0.45 nW/cm ² |
| GSM900 (AA) | 920–960 MHz | 36 nW/cm ² |
| GSM1800 (YA) | 1710–1785 MHz | 0.5 nW/cm ² |
| GSM1800 (AA) | 1805–1880 MHz | 84 nW/cm ² |
| 3G (YA) | 1710–1785 MHz | 0.46 nW/cm ² |
| 3G (AA) | 2110–2170 MHz | 12 nW/cm ² |
| Wi-Fi | 2.4–2.5 GHz | 0.18 nW/cm ² |

AA: Ana Aktarıcı; YA: Yardımcı Aktarıcı

Tablo 1. Farklı enerji kaynaklarının güç yoğunluğu (Luo ve ark., 2019).

RF enerji kaynakları, özel kaynaklar ve çevre kaynakları olmak üzere iki türe ayrılabilir.

- **Özel kaynaklar:** Belirli bir cihaza öngörülebilir bir enerji kaynağı sağlamak için kullanılan RF kaynaklarıdır. Frekans ve maksimum güç gibi parametreler, sensör cihazlarının gereksinimlerini karşılamak üzere optimize edilebilir. Lisanssız ISM frekans bantlarını kullanarak RF enerjisi transferi için optimize edilebilirler. Ticarileştirilmiş olan 1W veya 3W ile çalışan 915MHz Powercaster vericisi bir örnektir. Özel RF kaynağının kullanımı, ağ için yüksek maliyetlere neden olabilir. Ayrıca, RF radyasyonunun güvenlik ve sağlık endişeleri nedeniyle Federal İletişim Komisyonu (FCC) gibi düzenlemelere göre RF kaynağının çıkış gücü sınırlanmalıdır (Mejjaouli ve Babiceanu, 2015).
- **Çevre kaynakları:** RF enerjisi transferi amaçlı olmayan RF vericilerine atıfta bulunur. Çevre RF kaynaklarının verici gücü önemli ölçüde değişim gösterir. Örneğin, TV kulesi için yaklaşık 106W'dan, mobil iletişim cihazları ve Wi-Fi sistemleri için yaklaşık 0,1W'a kadar değişir (Mejjaouli ve Babiceanu, 2015.)

Çevre RF kaynakları iki kategoriye ayrılabilir: statik ve dinamik kaynaklar.

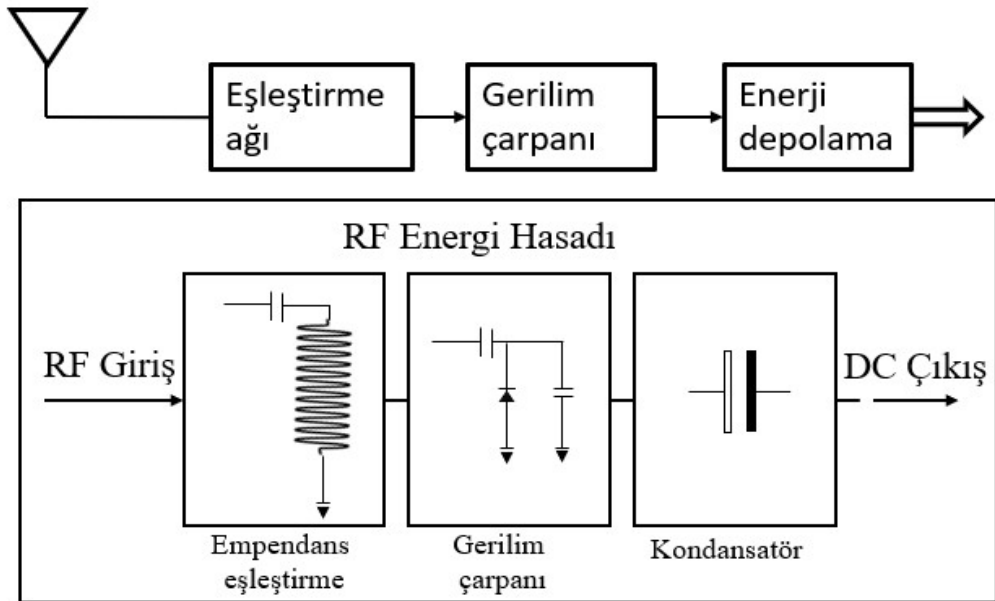
Statik Çevre RF kaynakları, TV ve radyo kuleleri gibi zamanla kararlı bir güç yayan vericilerdir. Bu statik kaynaklar öngörülebilir RF enerjisi sağlarlar ve farklı frekans bantlarındaki güç yoğunluğu düşüktür. Sonuç olarak, tüm frekans bantları için yüksek kazançlı bir anten gereklidir. Bu kaynaklarda doğrultucu, geniş bant spektrumu için tasarlanmış olmalıdır.

Dinamik Ortam RF kaynakları, periyodik olarak çalışan veya zamanla değişen iletim gücü kullanan RF vericileridir (örneğin WiFi erişim noktaları). (Mejjaouli ve Babiceanu, 2015).

Çeşitli amaçlarla üretilen RF dalgalarının ortam elektromanyetik dalgaları içindeki çeşitliliği, ortam enerjisinden enerji hasadı yapmaya yönelik çalışmalarda olduğu gibi, araştırmacılar tarafından RF enerji hasadı için de ilgi çekici bir potansiyel içerdiği görülmüştür. Bu durum doğal olarak bu alandaki teknolojilerin gelişmesine de neden olmuştur.

1.1.7. RF Enerji Hasadı Teknolojisi

Bir RF enerji toplayıcısının temel blok diyagramı, Şekil 1.7'de gösterildiği gibi, anteni takip için empedans devresi, gerilim çarpanı ve son olarak enerji depolama ünitesinden oluşur (Yalçın, 2021).



Şekil 1.7. RF Enerji Toplayıcısı. (Yalçın, 2021)

- **Anten:** Boşluktaki elektromanyetik dalgaları toplayarak bu dalgaların iletim hatları içerisinde sinyaller olarak yayılmasını sağlayan ("alıcı anten") veya iletim hatlarından gelen sinyalleri boşluğa dalga olarak yayan ("verici anten") cihazlardır. Antenler tek bir frekans veya birden fazla frekans bandında çalışacak şekilde tasarlanabilir. Bu sayede, ağ düğümü tek veya birden fazla kaynaktan aynı anda enerji toplayabilir (Öztürk, 2021).
- **Empedans uyumu:** Anten ve çarpan arasındaki güç transferini maksimize etmek için tasarlanmış bir rezonans devresi olan bir uyum devresidir. Bir diğer ifadeyle, maksimum güç aktarımı için kaynak ve yük empedanslarını eşitlemektir. Veya kayıpları en aza indirmek için kaynak ve yük empedansını mümkün olduğunca benzer hale getirmektir. Bu durum, düşük güç seviyelerinde verim açısından büyük öneme sahiptir.
- **Gerilim çarpanı:** Gerilim çarpanının ana bileşeni, RF sinyallerini (doğası gereği AC sinyalleri) DC gerilime dönüştüren doğrultma devresinin diyotlarıdır. Genellikle, daha düşük gerilime sahip diyotlarla daha yüksek dönüşüm verimliliği elde edilebilir.
- **Kapasitör:** Gücün yüke düzgün bir şekilde aktarılmasını sağlar. Ayrıca, RF enerjisi mevcut olmadığında, kapasitör kısa bir süre için bir rezerv olarak da hizmet edebilir (Öztürk, 2021).

1.1.8. RF Enerji Hasadının Avantajları

Enerji toplama teknolojisi her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Bunun ardında geleneksel yöntemlere taşıdığı bazı avantajlar bulunmaktadır;

- Mikroişlemci teknolojisindeki gelişmeler, mühendislik cihazlarının güç tüketimini azaltmakta ve enerji toplama cihazlarının verimliliği artırmaktadır. Bu da enerji hasadının gelecekte birçok düşük güçlü uygulamasının olabileceği ve mevcut güç kaynaklarını potansiyel olarak değiştirebileceği anlamına gelmektedir (Bakır, 2018).
- Pil teknolojilerine göre daha düşük maliyetli, değişim ve bakım gerektirmeyen, alternatif bir enerji toplama yöntemidir. Enerji kaynağı garanti edildiği sürece,

enerji hasat sistemleri iyi tasarlanırsa, pil ve fiş tabanlı bağlantılardan daha güvenilir ve sınırsız ömre sahip olabilir.

- Enerji hasadı, güç sistemlerinde yedek jeneratör olarak kullanılabilir. Bunun yanında güvenilirliği artırarak güç kesintilerini önlemeye yardımcı olabilir (Çetin, 2021).
- Enerji hasat sistemleri, geleneksel fişe takılan elektrik kaynaklarına bağımlı olan cihazlara hareketlilik sağlayabilir. Bu nedenle bazı kablolu uygulamalar, kablosuz uygulamalara dönüştürülebilir (Bakır, 2018).

Bu araştırma kapsamında RF enerji hasadına ve hasat teknolojilerine yönelik kapsamlı bir bakış sağlamak amacıyla son yıllarda yapılan araştırmalar incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Bu süreçte, ayrıca kablosuz güç aktarımının tarihsel gelişimine de yer verilmiştir.

1.1.9. Mikroşerit Antenler

Mikroşerit/Yama antenlerin amacı, mikrodalga aralığında elektromanyetik enerji yaymak ve almaktır. Bu nedenle kablosuz iletişim uygulamalarında önemli bir rol oynar. Mikroşerit antenler elektromanyetik uygulamalardaki en son teknolojilerden biridir. Basitliği ve baskılı devre teknolojisi ile uyumluluğu nedeniyle günümüzde kablosuz iletişim sisteminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektromanyetik dalga yayan mikroşerit geometrileri ilk olarak 1950'lerde tasarlandı.

Tarihsel gelişim süreci açısından değerlendirilirse, mikroşerit anten kavramı ilk olarak 1953 yılında Deschamps (Mishra, 2016) tarafından önerilmiştir. Gutton ve Baissinot, 1955 yılında mikroşerit için bir patent sundu. İlk mikroşerit hatları ve radyatörler, laboratuvarlarda geliştirilen özel cihazlardı. Bu dönemde kontrollü dielektrik sabitlerine sahip ticari olarak temin edilebilen hiçbir baskılı devre kartı geliştirilmedi. Dolayısıyla bu anten, Robert E. Munson tarafından daha da geliştirildiği halde 1970'lere kadar pratik hale gelmedi (Mishra, 2016). Bu on yıl boyunca geliştirme, diğer araştırmacılar tarafından düşük kayıplı malzemelerin mevcudiyeti ile hızlandırıldı. Geliştirme için diğer faktörler, geliştirilmiş fotolitografi teknikleri, daha iyi teorik modellemeyi ve alt tabakanın çekici termal ve mekanik özelliklerini içerir. İlk pratik anten Munson ve Howell tarafından geliştirilmiştir (Munson, 1974), (Howell, 1973). O

zamandan beri, mikroşerit antenlerin ve dizilerinin kapsamlı araştırma ve geliştirmeleri, mikrodalga antenlerin geniş alanı içinde çeşitlendirilmiş uygulamalara yol açmıştır.

Baskı devre teknolojisindeki son gelişmelerle birlikte hemen hemen tüm kablosuz sistemlerde mikroşerit veya baskılı yama antenler kullanılmaktadır. Bir mikroşerit antenin performansı ve çalışması, yazdırılan yamanın geometrisine ve üzerine antenin yazdırıldığı alt tabakanın malzeme özelliklerine bağlıdır (Pozar, 1996).

1.1.10. Mikroşerit Anten Özellikleri

Mikroşerit antenler, 100 MHz ila 100 GHz arasındaki geniş frekans aralığındaki birçok uygulamasıyla geleneksel mikrodalga antenlerle kıyaslandığında çeşitli avantajları nedeniyle birçok uygulama için mükemmel bir yayıcı olduğu kanıtlanmıştır (Bhartia, 1980).

Başlıca avantajlarından bazıları şunlardır:

- Küçük hacim kaplarlar.
- Hafiftir.
- İnce bir yapıya sahiptir.
- Düzlemsel ve düzlemsel olmayan yüzeylere uyumlu hale getirilebilirler.
- Seri üretim kolaylığı, düşük imalat maliyetine yol açar.
- Cihaz üzerinde uygulanması kolaydır.
- Aynı alt tabaka üzerindeki diğer MIC'lerle entegre edilmeleri daha kolaydır.
- Basit bir şekilde doğrusal ve dairesel polarizasyona izin verirler.
- Kişisel mobil iletişimde kullanım için kompakt hale getirilebilirler.
- İkili ve üçlü frekans işlemlerine izin verirler.
- Verimli bir radyatör görevi görürler.
- Düşük saçılma kesitine sahiptirler.
- Sert yüzeylere monte edildiğinde mekanik olarak sağlamdırlar.
- Şok ve titreşime karşı dayanıklıdırlar.
- Elde taşınan kablosuz cihazlardaki gömülü antenler için iyi uyumludurlar.
- Besleme hattı, alt tabaka üzerinde aynı anda kolayca üretilebilir.

Ancak bu antenlerin geleneksel antenlere göre bazı sınırlamaları da bulunmaktadır:

- Dar bant genişliğine sahiptirler.

- Verimlilik düşüktür.
- Kazançları düşüktür.
- Düşük güç taşıma kapasitesine sahiptirler.
- Anten bileşenleri ile besleme noktası arasında düşük izolasyona sahiptirler.

Bazı avantaj ve dezavantajlarına rağmen, mikroşerit anten boyutunun çok büyük olduğu bazı uygulamalar vardır. Bir mikroşerit antenin boyutu, frekansı ile ters orantılıdır. Mikrodalgadan daha düşük frekanslarda yani 300 MHz'nin altında, gerekli boyutlar nedeniyle mikroşerit yamalar mantıklı değildir. Dar bant genişliği, bu tür antenlerin ana dezavantajlarından biridir. Bant genişliğini iyileştirmenin basit bir yöntemi, alt tabaka kalınlığını artırmaktır.

Çözülmesi gereken bir diğer problem, geleneksel mikroşerit antendeki düşük kazançtır. Kavite desteği ve lens kaplaması, kazancı artırmanın iki yoludur. Çift yönlü radyasyonu ortadan kaldırmak ve böylece geleneksel mikroşerit antene kıyasla daha yüksek kazanç sağlamak için boşluk desteği kullanılmıştır. Entegre lensli mikroşerit anten, yüksek frekans uygulamaları için çok kullanışlı olan mikroşerit radyatör elemanları ve dielektrik merceklerle birleştirilmiş kompozit anten olarak da kullanılabilir (Jäger-Waldau, 2017; Hughes ve Dibner, 1962; Kernweis, 1981).

Ayrıca, mikroşerit antenlerin kullanım alanları belirtilen avantajlarından dolayı; uzay endüstrisi (uydu görüntüleme sistemleri), kablosuz haberleşme alanı (Bluetooth, WLAN, Wi-Fi), askeri telsiz ve ekipman sistemleri (Füze sistemleri, akıllı silah uygulamaları), GPS ve GSM uygulamaları olarak sayılabilir.

1.2. Kaynak Araştırması

Son zamanlardaki teknolojik yenilikler, uzaktaki cihazların proaktif enerji şarjını mümkün kılmaktadır. RF enerji transferi ve toplama stratejileri, son zamanlarda ileri düzey uzaktan yönetim ünitelerinin kontrolü için mümkün bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır (Sankaralingam ve Gupta, 2009), (Paul ve ark., 2012), (Yang ve ark., 2008), (Taghadosi ve ark., 2015). Tez çalışmasının bu bölümünde RF enerji hasadına yönelik anten tasarımları, anten tasarım sürecinde kullanılan simülasyon programları ve besleme yöntemleri ile ilgili son zamanlarda gerçekleştirilen yenilikçi çalışmalar derlenerek, detaylı bir şekilde sunulmaktadır.

Dhar ve arkadaşlarının yapmış oldukları bu çalışmada diyot kullanarak bir gerilim doğrultucu devresi tarafından takip edilen mikroşerit radyatör yüzeyinin altıgen şeklinde yuvalı bir tasarımla çalışan tek portlu altıgen yuvalı bir rectenna tasarlanmıştır. Rectenna; doğrultucu, alıcı anten anlamına gelmektedir. Ortam elektromanyetik enerjisinin doğru akıma çevrilmesi için kullanılır. Radyo dalgalarıyla güç aktarımının yapıldığı kablosuz güç iletim sistemlerinde kullanılır. Simetrik olarak genişletilmiş bir toprak düzlemi ve dikdörtgen yuvalar, anten bant genişliğinin iyileştirilmesi ve istenen rezonans elektriksel parametrelerin elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Üç farklı anten tasarımı karşılaştırılmış ve analiz edilmiştir. En iyi kazanç ve en geniş bant genişliği, simetrik olarak genişletilmiş toprak düzlemine sahip olan yeni tasarlanmış dikdörtgen ve altıgen yuvalı tasarımda görülmüştür. 2.45 GHz'de kablosuz güç iletimini maksimize etmek için RF kapasitör ve indüktör bazlı bir eşleştirme ağı tasarlanmıştır. Bu, farklı yük dirençleri ve giriş güç değerleri için doğrultucu verimliliğini artırmaya da yardımcı olmaktadır. Ayrıca, küçük boyutu korumak ve enerji kaybını en aza indirmek için doğrultucunun toprağı doğrudan antenin toprak düzlemine bağlanmıştır. Önerilen tasarım, HFSS ve ADS yazılımlarında simüle edilmiş, prototip oluşturulmuş ve ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarda, önerilen 2.45 GHz RF güç alma anteni geniş bir bant genişliği aralığında (1.25 – 2.63 GHz) çok iyi performans gösterdiği görülmüştür. Önerilen rectenna, 0 dBm giriş gücünde 2.45 GHz'de % 62,4'e varan maksimum verimliliğe sahiptir. Ayrıca, geniş bir düşük giriş gücü aralığında 4 – 12 k Ω 'luk yük direncindeki değişimlerle, rectenna, ortam RF sinyali zayıf olduğunda bile anten güç dönüşümü açısından verimli bir şekilde çalışmaktadır. Sonuç olarak, rectenna, 2.45 GHz Wi-Fi bant genişliğinde RF enerjisi hasat edecek çeşitli düşük güçlü elektronik devreler için uygun olduğu söylenebilir. Ayrıca, önerilen anten aynı zamanda 1.45 GHz frekans bandında kullanılan kablosuz tıbbi telemetri, uydu telefonu ve Wi-Fi uygulamaları için de kullanılabilir (Dhar ve ark., 2022).

Muhammad ve ark., yaptıkları çalışmada öncelikle ortamda olan RF frekanslarını RF spektrum analizörü ile GSM/900 ve GSM/1800 bantlarında ölçüm yaparak (RF) enerjisini toplamak için uzun menzilli çift bantlı bir rectenna tasarlamışlar. Tasarlanan antenin dış mekan performansı, bq25504-674 EVM kullanarak 0,747 V çıkış DC voltajı ve düşük güçlü modül olmadan 0,374 V üretir. Önerilen rectenna, -30 dBm giriş gücü için 0,9 GHz'de %12,93'lük RF'den DC'ye PCE tepe noktasına ulaştı. Bu nedenle, toplanan ortam RF sinyalleri, önerilen antenin uygun enerji yönetimi yoluyla birkaç düşük güçlü cihazı etkinleştirebilir (Muhammad ve ark, 2021)

Toktaş, yapmış olduğu çalışmada 6.19 – 13.71 GHz rezonans frekans aralığında çalışan 14,8 x 16,8 mm² boyutlarında bir mikroşerit anteni Hyperlynx 3D EM benzetim yazılımı ile tasarlanmıştır. Antenin ışıyan elemanı saçaklı bir monopolden ve boşluklu bir toprak düzlemden oluşmaktadır. Anten tasarımının önemli basamakları, rezonans bant genişliği bakımından incelenmiştir. Ayrıca önerilen antenin performansı, empedans bant genişliği, ışımaya örüntüsü ve kazanç grafikleri üzerinden analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları incelendiğinde, küçük yapısından ve yönsüze yakın ışımaya özelliğinden dolayı, önerilen antenin özellikle internet erişim (access point) cihazları için uyumlu bir model olduğu belirtilmektedir (Toktaş, 2019).

Sreelekshmi ve Perumal Sankar tarafından yapılan çalışmada, serbest alan, vücut üzeri ve anten bükülme etkileri gibi ilgili parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Mikroşerit anten, dielektrik sabiti 2,2 ve kalınlığı 0,787 mm olan esnek Rogers RT-5880 malzemesi üzerine inşa edilmek üzere tasarlanmıştır. Tasarım, sayısal ve gerçek anten ölçümlerinin karşılaştırılmasıyla doğrulanmıştır. Simülasyon ve ölçüm sonuçları arasında iyi bir uyum görülmüştür. İmal edilen anten, serbest alan koşullarında 2.4 ve 3.6 GHz'de sırasıyla 1036 MHz alt frekans aralığında ve 352 MHz üst frekans aralığında bir empedans bant genişliği, 2.7dB, 2.35 dB kazanç, 3dB, 2.9dB doğruluk, %93.32, %88.21 radyasyon verimliliği sağlamaktadır. Sonuç olarak, enerji verimli çift bantlı önerilen bir antenin giyilebilir uygulamalarda ve ISM ve WiMAX bantlarındaki IoT düğümleri için mikrodalga enerji toplama için uygulanabilir olarak öngörülmüştür (Sreelekshmi ve Perumal, 2022).

İsayev yaptığı bir çalışmada, Duroid, Al₂O₃, Rogers4350B, TMM6, Rogers4003C ve Rogers3006 seramik malzemeler üzerinde RF enerji hasadından ziyade mikroşerit anten yapılarının performanslarına odaklanmış ve değerlendirmiştir. Çalışmalar dikdörtgen şekilli yama anten üzerine yürütülmüştür. Tasarım denklemleri kullanılarak yama, toprak boyutları, besleme noktası konumu hesaplanarak simüle edilmiş ve tasarlanmıştır. Tasarımı ve üretimi yapılan antenlerin kalınlıkları aynı alınarak beş farklı seramik malzeme üzerine gerçekleştirilmiştir. Seramik malzemelerle tasarlanıp simüle edilen ve üretilen antenlerin tümü için, 2.4 GHz (Wi-Fi), 5.8 GHz (Wimax) ve 10 GHz (X-Bant) frekanslarında çalışılmıştır. Tasarlanıp simülasyonları yapılarak üretilen antenlerin bant genişliği, geri dönüş kaybı, kazancı ve duran dalga oranı ölçümleri yapılmış, simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, seramik

malzemelerin Wi-Fi, Wimax ve X-Bant gibi kablosuz haberleşmede yoğun olarak kullanılan bantlarda kullanılabileceği yönünde göstergeler içermektedir (Isayev, 2021).

İnce ve arkadaşlarının yapmış olduğu bu çalışmada RF enerji hasadı sistemlerinde kullanılmak üzere katlama tekniği ile boyutları küçültülmüş geniş bantlı ve yüksek kazançlı baskılı bir log periyodik dipol anten tasarlanmıştır. Tasarlanan anten dipoller eklenerek bant genişliği artırılmıştır. Anten 2G/3G/4G frekans bantlarını kapsayan 0,78 GHz – 3.1GHz frekans aralığında çalışmaktadır. Dielektrik malzeme olarak bağlı geçirgenliği 4.2 olan FR4 kullanılan antenin kazancı, 3dBi ile 6.3dBi arasında değişmektedir (İnce ve ark., 2023).

Gokul ve arkadaşlarının yapmış oldukları RF enerji hasadına yönelik anteni 2.4 GHz de FR4 malzeme üzerinde tasarlamış ve optimize etmişler. Tasarladıkları anten üzerinde yarıklar açarak anten frekans toplama verimini artırmaya çalışmışlar. Analiz programı olarak ANSYS HFSS programını kullanarak antenin verilerini optimize etmişler. Elde edilen sonuçlar anten kazancının ve verimliliğin iyi olduğu yönündedir. Ayrıca, anten üzerinde olan yarıkların bant genişlenmesine ve kazancın artmasına etkili olduğu tespit edilmiştir (Gokul ve ark., 2020).

Çetin yaptığı bir araştırmada RF dalgalarından enerji hasat etmek amacıyla H benzeri bir mikroşerit anten tasarlamıştır. Bu tasarımı geliştirmek için, simülasyon ortamında kısa devre pini ilavesi ve yarıklı zemin düzlemi kullanmıştır. Çalışmada Powercast firmasına ait P2110-EVB geliştirme kartı kullanılmıştır. Yapılan çalışmada üç farklı mesafede ölçümler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre mesafe kısaldıkça ölçülen gerilim değerinin arttığı görülmektedir. Aynı zamanda mesafe kısaldıkça daha kısa sürede ölçümün gerçekleştiği, mesafe arttıkça da daha geç sürede modül çıkışındaki kondansatörün şarj olduğu ve değerlerdeki değişimlerin daha yavaş olduğu gözlenmiştir. Çalışmada, H benzeri yandan yarıklı anten, H benzeri üstten yarıklı antene göre daha fazla hasatlama gerçekleştirebileceği sonucuna varılmıştır (Çetin, 2021).

Kuşulay ve Toktaş'ın yapmış oldukları çalışmada C-bant (4 – 8 GHz) ve X – bant (8 – 10 GHz) uygulamaları için küçük boyutlu kompakt ultra geniş bant yeni bir mikroşerit anten tasarımı sunmuştur. Sunulan anten, bir mikroşerit hat ile beslenen dirgen şekilli bir ışıyıcı ve dikdörtgen bir toprak düzlemden oluşmaktadır. Üretim maliyetini azaltmak ve malzemeyi kolay temin etmek için anten tasarımında 1.6 mm kalınlığı, 4.4 dielektrik sabiti ve 0,02 tanjant kaybı olan FR4 malzeme kullanılmıştır. Anten tasarım

prosedürü, rezonans bant genişliği bakımından dört farklı aşamada incelenmiştir. Antenin rezonans bant genişliği, yüzey akım dağılımları, kazanç ve ışıma örüntüsü analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, antenin ultra geniş bant frekans aralığını kapsayan 3,65 – 11,46 GHz aralığında $S_{11}(\text{dB}) < -10\text{dB}$ olduğundan düşük verimliliğe ve 7,3 GHz merkez rezonans frekansında çok yüksek bant genişliğine sahip olduğu görülmüştür (Kuşulay ve Toktaş 2020).

Keskin ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada mikroşerit antenin optimizasyonu yapılarak, antenin kazanç ve bant genişliğinin artırıldığı FR4 malzemesi ile yeni bir anten tasarımı sunulmuştur. Antenin yansıma katsayıları E5063A Network Analizör cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Yapılan çalışmada mikroşerit yama antenin tasarımı CST Microwave Studio programı ile yapılmıştır. CST'den alınan sonuçlara göre 10dB bant genişliğinin 301 MHz olduğu ve bant genişliğinin %12.5 arttığı görülmektedir (Keskin, 2019).

Belen'in yapmış olduğu bir diğer çalışmada ultra geniş bant uygulamaları için 3GHz ile 11GHz arasında çalışan eş düzlemsel hat besleme (CPW-fed) yapısına sahip mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımlarda CST Microwave Studio programı kullanılmıştır. Anten 1.56 mm kalınlıklı, FR4 ve 4.4 epsilon değerinde taban üzerine tasarlanmıştır. Anten 24mm x 40mm boyutlarındadır. Yapılan benzetimlerde bant genişliği, S_{11} , kazanç ve ışıma örüntüsü incelenerek ve parametrelerde değişiklikler yapılarak en iyi performansı gösteren anten yapısı belirlenmiş ve üretimi yapılarak ölçümleri tamamlanmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda üretilen anten modelinin 3GHz ile 11GHz arasında kazancı 1dB ile 3.7 dB arasında olup, geridönüş kaybı ise, $S_{11} < -10\text{dB}$, elde edildiğinden dolayı, verimli olmadığı görülmüştür (Belen, 2018).

Güngörer ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada 2.4 GHz frekansında çalışan farklı boyutlara sahip mikroşerit hat ve koaksiyel beslemeli iki dikdörtgen mikroşerit anten tasarlanmıştır. Tasarlanan anten laboratuvarda üretilerek ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tasarımlarda sonlu integral metodunu temel alan CST elektromanyetik benzetim programı kullanılmıştır. Sonuç olarak koaksiyel hat ile beslenen antenin benzetim sonucuna göre geri dönüş kaybı – 21 dB iken üretilen antenin laboratuvar ortamında gerçekleştirilen ölçümleri sonucu elde edilen geri dönüş kaybı – 10 dB olarak elde edilmiştir. Hat beslemeli antenin sonuçları ise benzetimi sonucun geri dönüş kaybı -19 dB iken ölçüm sonucu -11 dB olarak elde edilmiştir. Her iki tasarlanan antenin

sonuçlarının birbirlerine yakın ve düşük verimliliğe işaret ettiği görülmüştür (Güngörer ve ark., 2019).

Kütük ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada yakın gelecekte yaygınlaşması beklenen WiMax ve benzeri yeni nesil kablosuz haberleşme teknolojisinde kullanılacak 3.3 GHz frekanslı mikroşerit anten tasarlanmıştır. Tasarlanan antenin beş temel besleme yöntemi ile (hat, koaksiyel, CPW, Açıklık ve yakınlık) analizleri yapılmıştır. Tasarımda antenin yama boyutları, dielektrik malzeme ve alt tabaka kalınlığı sabit tutularak sadece besleme yöntemleri ve besleme hattı boyutları değiştirilmiştir. Böylece besleme yöntemlerinin performansları karşılaştırılarak geniş bantlı mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ansoft – HFSS programı kullanılarak antenlerin simülasyonları yapılmış ve bant genişliği %60'lara ulaşan antenler tasarlanmıştır. En iyi performansın CPW besleme ile olduğu görülmüştür (Kütük ve ark. 2000).

Ali ve Hekal'ın çalışmasında FR4 malzeme üzerinde RF enerji hasadına yönelik mikroşerit anteni Cockcroft Walton doğrultucu devresi vasıtasıyla 2,4 GHz'de çalışacak şekilde tasarlamış ve simüle etmişlerdir. Aldıkları sonuçları HFSS ve ADS yazılımı kullanılarak optimize etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre anten nispeten verimli ve iyi çıkış voltajına sahiptir (Ali ve Hekal, 2022).

Yukarıda incelenen araştırmalar RF enerji hasadına yönelik anten tasarımları ve besleme yöntemleri gibi anten parametreleri yanında, anten tasarım sürecinde kullanılan simülasyon programları açısından değerlendirilirse; yapılan çalışmalarda tasarlanan antenlerin 350 MHz – 10 GHz arasında olduğu görülmektedir.

Yapılan çalışmalarda, anten tasarım malzemelerinin genellikle FR4 seramik malzemesinden oluştuğu görülürken, Duroid, Al₂O₃, Rogers4350B, TMM6, Rogers4003C ve Rogers3006 seramik malzemeleriyle daha düşük oranda çalışıldığı tespit edilmiştir.

Ayrıca anten tasarımında farklı boyut ve geometrilerin verim ve kazanç üzerindeki sonuçları araştırılmıştır. Genellikle en fazla kazançlı antenlerin dikdörtgen şekilli antenlerde sağlandığı varsayılarak bu geometrinin daha çok tercih edildiği görülmektedir.

İlgili çalışmalar besleme yöntemi açısından değerlendirdiğinde, en verimli yöntem olan mikroşerit hat besleme yanında, koaksiyel besleme, açıklık, yakınlık ve CPW besleme yöntemlerine de yer verildiği görülmektedir. Ayrıca elde edilen düşük

verim ve kazanç durumunda farklı besleme noktası ve yöntemi seçilerek anten verim ve kazanç değerlerinin artırılabilceği önerilmektedir.

Tasarım sürecinde en çok HFSS olmak üzere CST, Hyperlynx 3D EM ve ADS simülasyon programlarının tercih edildiği görülmektedir.

Yapılan değerlendirmelerde dikkat çeken diğeri bir husus ise, RF enerji hasadına yönelik üretilen antenlerin verimi üzerinde en etkili faktörlerden birisi olan çalışma ortamındaki RF enerji yoğunluğunun belirlenmesidir. Bu konuda pek az çalışmanın bu ayrıntıya yer ve önem verdiği görülmektedir. Özellikle gelişen ve kullanılan teknolojiye bağlı olarak son zamanlarda ortam enerjisindeki RF yoğunluğunun WiFi ve GSM1800 bantlarında olmasından dolayı çalışmaların daha çok bu frekans aralıklarında yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Ayrıca incelenen çalışmalarda simülasyon programları aracılığıyla tasarlanan antenlerin öngörülen verim ve kazanç değerlerinin üretim ve uygulama sonucunda elde edilen değerlerden farklılık gösterdiği yaygın olarak görülmüştür. Beklenen ve gözlenen değerler arasındaki bu farklılık pek çok çalışmada açıklanamamaktadır. Bunun en önemli nedeni ortam RF enerji yoğunluğunun belirlenmemesi olabilir. Bu açıdan değerlendirildiğinde ortam RF enerji yoğunluğunun ölçülmesinin büyük önem arz ettiği söylenebilir. Bu nedenle bu tür ölçümlere yer veren çalışmaların bulguları çalışma şartlarının tanınması adına daha dikkate değer görülmelidir.

1.3. Araştırmanın Problemi

Bu araştırmanın temel problemi, temel anten parametrelerine uygun farklı yapıdaki mikroşerit anten performanslarının değerlendirilebileceği RF enerji hasadına yönelik antenler tasarlanıp üretilebilir mi? Sorusudur.

1.4. Araştırmanın Amacı

Bu çalışmada RF enerji hasadına yönelik farklı seramik malzemeler üzerine tasarlanan ve üretilen mikroşerit anten performanslarının temel anten parametrelerine uygunluğunun değerlendirmesi amaçlanmaktadır.

Bu amaçla yürütülen çalışmanın bu ilk bölümünde enerjiye olan ihtiyaç bağlamında enerji hasadı ve bu alandaki teknolojiler genel olarak incelenmektedir. Bu

bağlamda, Güneş enerji hasadı, termoelektrik enerji hasadı, piezoelektrik enerji hasadı, Havacılık ve Uzay alanındaki enerji ve RF enerji hasadı teknolojileri değerlendirilmektedir. Ayrıca bu teknolojilerin avantajları ve enerji hasadına yönelik anten tasarımı ile ilgili güncel literatür eşliğinde kapsamlı olarak incelenmekte ve sunulmaktadır. Bir sonraki bölümde ilgili amacı gerçekleştirmek üzere enerji hasadına yönelik anten tasarımı teknolojileri ve bu süreçteki temel anten parametreleri bağlamında bu çalışmayla benimsenen temel araştırma yöntemi kapsamlı olarak sunulmaktadır.



2. MATERYAL VE YÖNTEM

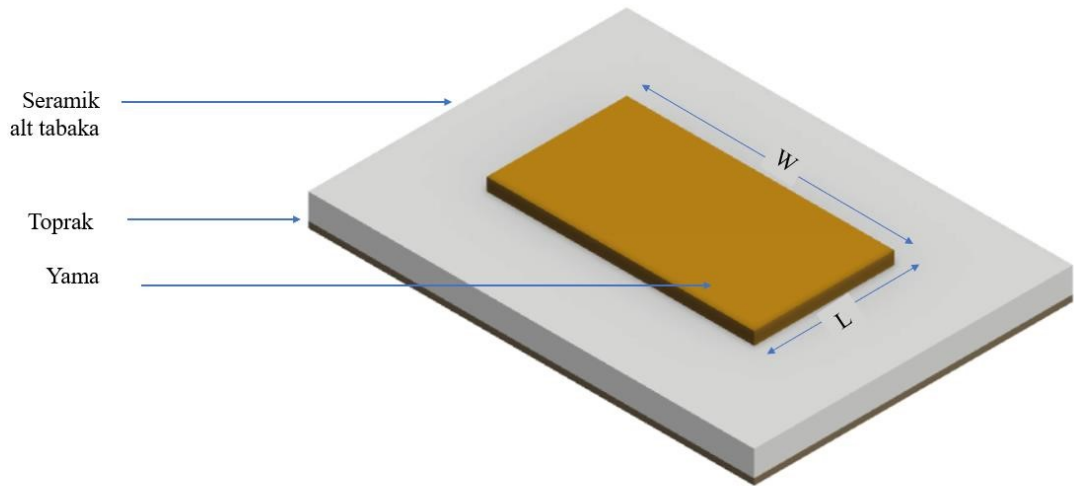
Bu çalışmanın ilk bölümünde enerjiye olan ihtiyaç bağlamında enerji hasadı ve bu alandaki teknolojiler genel olarak incelenmektedir. Bu bağlamda, Güneş enerji hasadı, termoelektrik enerji hasadı, piezoelektrik enerji hasadı, Havacılık ve Uzay alanındaki enerji ve RF enerji hasadı teknolojileri değerlendirilmektedir. Ayrıca bu teknolojilerin avantajları ve enerji hasadına yönelik anten tasarımı ile ilgili güncel literatür eşliğinde kapsamlı olarak incelenmekte ve sunulmaktadır.

Bu bölümde, RF enerji hasadına yönelik farklı seramik malzemeler üzerine tasarlanan ve üretilen mikroşerit anten performanslarının temel anten fiziksel ve elektriksel parametrelerine uygunluğunun değerlendirmesi amacıyla yürütülen bu çalışma için benimsenen temel araştırma yöntemi yöntemsel literatür eşliğinde kapsamlı olarak sunulmaktadır.

2.1. Yöntemsel Teorik Temeller

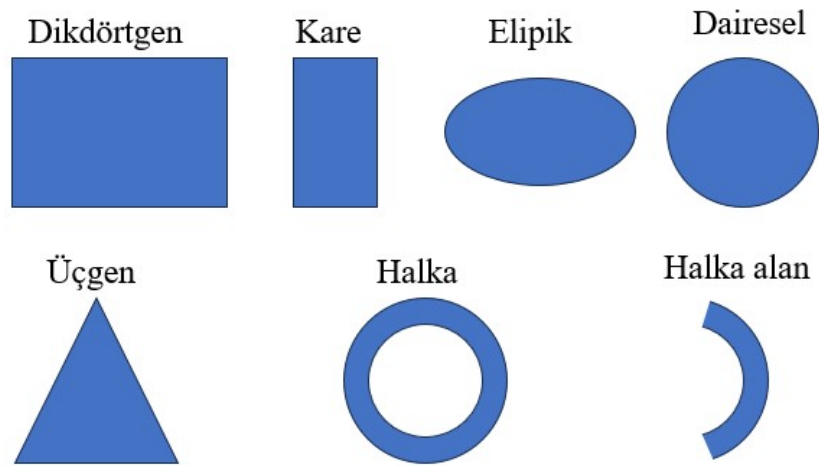
2.1.1. Mikroşerit Antenin Fiziksel Parametreleri

Literatürde farklı sınıflamalar bulunmakla birlikte (Constantine, 2016, Dündar, 2017), bu çalışmada mikroşerit antenlerin geometrisi, üretildiği malzeme, besleme yöntemi ve saçaklanma gibi yapısal özelliklerine dair bilgiler tasarımdaki belirleyiciliği açısından onun temel fiziksel parametreleri olarak, üretilen bir mikroşerit antene dair ölçüm değerleri ise, onun elektriksel parametreleri olarak kabul edilmektedir. Mikroşerit yama anteni – MYA temel haliyle, Şekil 2.1’de olduğu gibi alt kısmında toprak adı verilen iletken tabaka, diğer kısmında zemin düzlemi olan seramik yapıda dielektrik alt tabaka ve üzerine yerleştirilen yamadan oluşur. Yama farklı şekillerde, bakır veya altın gibi iletken olan malzemelerden seçilir. Işıma yapan besleme ve yama hatları dielektrik olan alt tabakanın üzerine baskı devre teknikleriyle yerleştirilir.



Şekil 2.1. Dikdörtgen Şekilli Mikroşerit Yama Anten – MYA (Balanis, 2016).

Performansını ve analizlerin tahminlerini basitleştirebilmek için yama antenler genellikle Şekil 2.2’de olduğu gibi dairesel, kare, eliptik, dikdörtken, üçgen veya daha farklı şekillerde olabilir. Dikdörtgen mikroşerit yama anten için uzunluk (L) $0.3333\lambda_0 < L < 0.05\lambda_0$ olmalıdır. Burada λ_0 hedef boş alan veya ortam RF dalga boyu dur. Yama kalınlığı genellikle $t \ll \lambda_0$ (burada t -yama kalınlığı) şeklinde seçilir. Dielektrik olan alt tabaka yüksekliği $0.003\lambda_0 \leq h \leq 0.05\lambda_0$ olmalıdır. Alt tabaka sabiti (ϵ_r) genel olarak $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$ aralığındadır (Balanis, 2016).



Şekil 2.2. Mikroşerit Anten Geometri şekilleri (Balanis, 2016).

Bu antenlerin genel olarak yayılması yama kenarı ve zemin düzlemi arasındaki saçaklanma nedeniyle olur. Antenin iyi performanslı olması için bant genişliği büyük, dielektrik sabiti düşük, verimliliği yüksek ve kalın bir dielektrik tabaka seçilmelidir.

Kompakt mikroşerit yama anteni tasarlamak için verimliliği ve bant genişliği düşük, dielektrik sabiti daha yüksek olan malzemeler kullanılmalıdır. Bununla birlikte anten performansı ve anten boyutu arasında bir uygunluk gerekmektedir (Balanis, 2016).

2.1.1.1. Mikroşerit Anten Dielektrik Malzemeleri

Mikroşerit antenlerin tasarımında ilk önce, uygun bir dielektrik taban yani malzeme seçimi yapılmalıdır. Mekanik açıdan sağlamlığı artıran kalın dielektrik tabanlar, ısıma gücünü artırırken iletken kayıplarını düşürecek ve empedans bant genişliğinde iyileşmeler sağlayacaktır (Dündar, 2017).

FR4 Malzemesi

FR4 malzemesi, PCB üretiminde sıkça kullanıldığı gibi anten tasarımında da tercih edilen bir malzemedir. FR4 tabanlı antenler, kablosuz iletişim sistemlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bunlar;

- Yama (Patch) Antenler: FR4 malzemesi, dikdörtgen veya kare şeklindeki antenlerin üretiminde sıklıkla kullanılır. Yama antenler, düşük profilli, kompakt ve taşınabilir cihazlarda geniş bant genişliği ile yönlendirilmiş radyasyon sağlar.
- Mikroşerit Antenler: Yüksek frekanslarda çalışabilen, küçük boyutlu ve düşük profilli antenlerdir. FR4 tabanlı mikroşerit antenler, Wi-Fi, Bluetooth, GPS ve diğer kablosuz iletişim uygulamalarında yaygın olarak kullanılır.
- Yama Dizi Antenler: Birden fazla yama antenin düzenli bir şekilde düzenlenmesiyle oluşturulan anten sistemleridir. FR4 tabanlı yama dizi antenler, daha fazla yönlendirilmiş radyasyon, daha geniş kapsama alanı ve daha yüksek kazanç sağlamak için kullanılabilir.

FR4 malzemesi, anten tasarımlarında kullanıldığında iyi elektriksel özellikler, mekanik dayanıklılık ve işlenebilirlik sunar. Ayrıca, FR4 malzemesi genellikle düşük maliyetli ve yaygın olarak bulunabilen bir malzemedir. Bu da anten tasarımlarının maliyet etkin olmasını sağlar. Ancak, tasarım sürecinde FR4 malzemesinin dielektrik

sabiti ve diğer elektriksel özellikleri dikkate alınmalı ve anten performansının optimize edilmesi için doğru tasarım hesaplamaları yapılmalıdır.

Rogers3006

Rogers3006 yüksek frekanslarda da düşük kayıplar sağladığı için kablosuz iletişim uygulamaları için ideal bir seçenektir. Diğer yandan Rogers3006 alt tabakalı hat beslemeli olarak tasarlanmış bir MYA, düşük profilli ve taşınabilir bir yapıya sahiptir. Ayrıca, düşük dielektrik kaybına sahip olduğu için tasarlanan antenin verimliliğini artırır. Bu tür tasarımlar, genellikle kaybın düşük olduğu kompakt ve taşınabilir cihazlarda kullanılan antenler için tercih edilir (Tokgöz, 2019). Tabletler, akıllı telefonlar, kablosuz iletişim cihazları, sensörler ve diğer RF uygulamaları gibi cihazlarda kullanılan antenlerde Rogers 3006 alt tabanlı hat beslemeli MYA tasarımı kullanılabilir (Tokgöz, 2019).

Bu tasarımın avantajları arasında düşük profilli yapı, geniş bant genişliği, yüksek verimlilik ve iyi yönlendirilmiş radyasyon deseni yer alır. Antenin boyutları ve parametreleri, tasarım denklemleri ve simülasyonlar kullanılarak optimize edilir.

Rogers3006 alt tabakalı hat beslemeli MYA tasarımında amaç, yüksek performanslı ve güvenilir bir RF iletişimi sağlamaktır.

Rogers4003C

Rogers4003 tabakalı hat beslemeli antenler, yüksek frekanslı uygulamalarda kullanılan RF antenleridir. Hat besleme tekniği, antenin besleme noktasının antenin yüzeyine yerleştirildiği bir besleme yöntemidir. Rogers 4003 ise, düşük kayıplı ve yüksek frekanslı uygulamalarda kullanılan bir tür RF laminat malzemesidir (Bala ve ark., 2021).

Hat beslemeli antenlerin Rogers4003C tabanlı olarak tasarlanması, yüksek performans, düşük kayıp ve iyi sinyal bütünlüğü sağlama amaçlıdır. Bu tip antenler, özellikle mikrodalga ve RF frekans aralığında çalışan cihazlarda kullanılır. Hat beslemeli antenler, genellikle yüksek yönlendirilmiş radyasyon deseni, dar bant genişliği ve yüksek kazanç gibi özelliklere sahiptir (Isayev, 2021, Hızal ve ark, 2020).

Rogers4003C malzemesi, 3.38 düzeyinde yüksek dielektrik sabitine sahip ve 0.0027'lik düşük tanjant kaybı olan bir malzemedir. Bu özellikleri sayesinde, RF

sinyallerinin iletiminde minimum kayıplar sağlar ve anten performansını optimize eder. Aynı zamanda, Rogers4003C malzemesi iyi mekanik dayanıklılığa sahiptir ve karmaşık anten yapılarının üretiminde kullanılan bir laminat malzemesidir. (Yerlikaya, 2021).

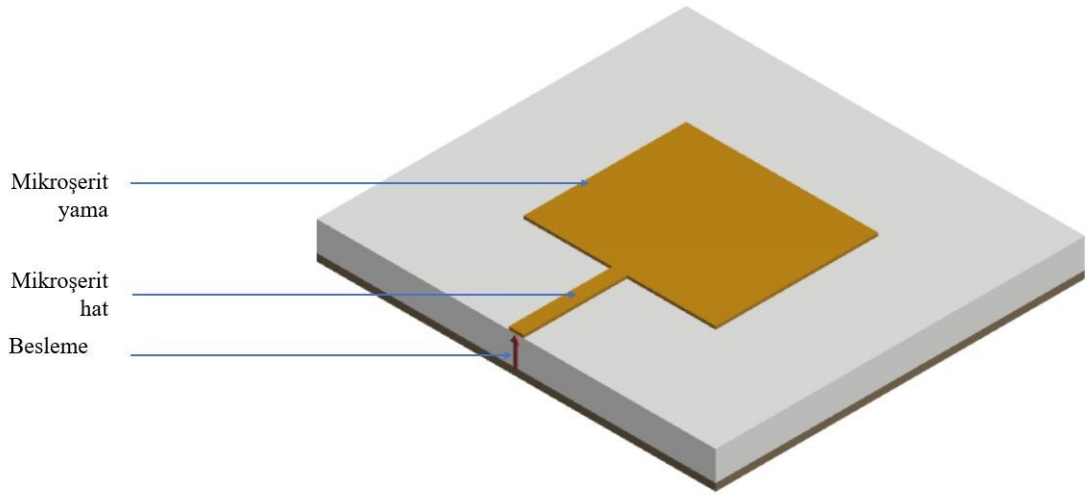
Hat beslemeli antenler, geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Kablosuz iletişim sistemlerinden radar sistemlerine, uydu haberleşmesinden savunma sanayisine kadar birçok alanda kullanılabilirler. Rogers4003C tabanlı hat beslemeli antenler, yüksek frekanslı uygulamalarda istenen performansı sağladığı için güvenilir ve verimli iletişim imkanı sunar (Isayev, 2021).

2.1.1.2. Besleme Teknikleri

Mikroşerit antenlerde kullanılan besleme teknikleri bir antenin polarizasyonu ve giriş empedansı üzerinde büyük öneme sahiptir. Besleme teknikleri bağlantılı ve bağlantısız olmak üzere iki çeşittir. Bağlantılı beslemede güç direk olarak ışıma yapan yamaya iletilir. Bağlantısız beslemede ise bu güç bağlantısız yama ve mikroşerit hat arasındaki elektromanyetik alan vasıtasıyla taşınır. MYA'ların beslemesinde koaksiyel besleme, mikroşerit/hat besleme, düzlemsel dalga kılavuzlu besleme, yakınlık bağlantılı besleme ve açıklık bağlantılı besleme olmak üzere birden fazla yöntem kullanılabilir. (Kütük, 2012, Balanis, 2016)

2.1.1.2.1. Mikroşerit Hat Besleme

Mikroşerit hat besleme yönteminde, iletken şerit Şekil 2.3'de olduğu gibi yamanın kenarına doğrudan bağlanır. Bu iletken olan şeridin genişliği, yamaya kıyasla genellikle çok daha küçüktür. Mikroşerit hat beslemesinin üretimi, besleme noktasının konumunu kontrol ederek eşleştirmesi ve modellenmesi oldukça basittir. Ancak alt tabaka kalınlığı arttıkça yüzey dalgaları ve sahte besleme radyasyonu artar, bu da pratik tasarımlar için bant genişliğini sınırlar (Balanis, 2016; Güngörler ve ark, 2019).



Şekil 2.3. Mikroşerit Hat Besleme (Balanis, 2016).

Şekilden görülen yamadaki gömülmüş beslemenin amacı, besleme empedansını hiçbir eleştirme elemanına gerek kalmaksızın yama ile eşleştirmektir (Balanis, 2016).

2.1.1.3. Mikroşerit Yama Anten Geometrisi

Mikroşerit antenler, mikrodalga frekans aralığında çalışan kompakt antenlerdir. Genellikle mikroşerit kartlar üzerine yerleştirilirler. Bu antenler, dikdörtgen, kare, dairesel, yamuk, küçük dikdörtgen yama, dilim, yama içerisine gömülü mikroşerit antenler gibi çeşitli şekil ve konfigürasyonlarda tasarlanabilirler. Mikroşerit antenlerin şekil ve boyutları, tasarımın amaçlarına, frekans gereksinimlerine ve çevresel faktörlere bağlı olarak değişebilir (Balanis, 2016). Bu nedenle bu antenler, şekilleri ve özellikleri açısından çeşitli niteliklere sahiptirler.

RF enerji hasadına yönelik tasarlanan antenlerin genellikle dikdörtgen yapıda olduğu görülmektedir (İmamoğlu, 2019). Dikdörtgen antenlerin yaygın kullanım gerekçelerinden bazıları aşağıda belirtilmiştir (İmamoğlu, 2019.).

- Yatay ve Dikey Polarizasyon: Dikdörtgen antenler hem yatay hem de dikey polarizasyonlu sinyalleri iletebilir ve alabilirler. Bu, farklı iletişim gereksinimlerini karşılamak için kullanışlıdır. Örneğin, kablosuz iletişimde yatay polarizasyon tercih edilirken, televizyon yayınlarında dikey polarizasyon yaygındır.
- Yüksek Kazanç: Belirli bir boyuttaki dikdörtgen antenler yüksek kazanç sağlayabilirler. Bu, sinyal iletim mesafesini artırabilir.

- Yatay Yönlendirme: Dikdörtgen antenler, yatay yönde dar bir radyasyon deseni sağlayabilirler. Bu, belirli bir yönde daha fazla sinyal odaklanmasına ve gürültüyü azaltmaya yardımcı olabilir.
- Basit Tasarım: Bazı dikdörtgen anten tasarımları, basit ve maliyet etkin olabilir. Bu, kitlesel üretim ve yaygın kullanım için uygun olabilir.
- Çoklu Polarizasyonlar: Bazı dikdörtgen antenler, birden fazla polarizasyon modunu destekleyebilirler. Bu da çeşitli iletişim ihtiyaçlarına uyarlanabilirlik sağlar.

Mikroşerit yama antenleri tasarlanırken ilk önce mikroşerit anten denklemlerine göre anten boyutlarını hesaplamak gerekmektedir. Verilen formülleri kullanarak bulunan boyutlar simülasyon ve optimizasyon için bir kolaylık sağlar. Bu süreçten sonra antenin boyutları üzerinde yapılacak değişikliklerle gerekli optimizasyon sağlanabilir. Bir dikdörtgen MYA'nın tasarımında kullanacak formüller aşağıda gösterilmiştir (Arianfar, 2015).

Yamanın genişliğindeki artış, radyasyon veriminde ve bant genişliğinde artışa neden olur. Yama genişliği aşağıdaki 2.1- denklemiyle hesaplanır;

$$W = \frac{1}{2fr\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}} = \frac{c}{2fr} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r+1}} \quad (2.1)$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r+1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2} \quad (2.2)$$

$$\Delta L = 0.412h \times \frac{(\epsilon_{reff}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{reff}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.8\right)} \quad (2.3)$$

Alanlar sadece yama ile sınırlı değildir. Alanların bir kısmı, saçaklı alan olarak adlandırılır ve bu yamanın fiziksel boyutu dışında kalır. Bu saçaklanma alan etkisi, dielektrik sabiti (ϵ_{reff}) ile toplam alana dahil edilebilir. Bu yamanın uzunluğu aşağıdaki denklemde olduğu gibi hesaplanır;

$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad (2.4)$$

$$f_r = \frac{c}{2L_e \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.5)$$

Burada:

L : Yamanın uzunluğu,

W: Yamanın genişliği,

ϵ_r : Taban malzemenin dielektrik sabiti,

f_r : Çalışma (Rezonans) frekansı,

h : Dielektrik malzemenin kalınlığı,

ϵ_{reff} : Taban malzemenin etkin dielektrik sabiti,

ΔL : Yamanın her iki ucunda genişleme mesafesi,

c : Işık hızı = 3×10^8 m / s,

μ_0 : 1.266×10^{-6} Weber,

ϵ_0 : 8.8542×10^{-12} Farad / m² 'dir.

Yukarıda belirtilmiş formüller kullanılarak dikdörtgen yamalı mikroşerit anten tasarlanabilir. Bu antenin tasarımını gerçekleştirilmesi için taban malzemenin kalınlığı (h), dielektrik sabiti (ϵ_r) ve (F_r) rezonans frekansı'nın bilinmesi gerekir. Bunlara beraber yamanın uzunluğu (L) ve genişliği de (W) bilinmesi gerekmektedir. Yamanın uzunluğunu ve genişliğini bulmak için aşağıdaki adımlar izlenebilir;

- Bir ışıma için yamanın genişliği (W) eşitlik (2.1) kullanılmakla hesaplanır.
- Antenin dielektrik sabiti (ϵ_r) eşitlik (2.2)'ile bulunur.
- Yamanın uçlarında oluşan genişleme uzunluğu (ΔL), (2.3) eşitliği ile bulunur.
- Yamanın gerçek uzunluğu ise (L), eşitlik (2.4) kullanılarak hesaplanır.
- Frekans rezonansı (F_r)ise, (2.5) denkleminde dayanarak hesaplanır.

Buradaki esas amaç belirli bir frekansta dikdörtgen bir yama ile mikroşerit anten tasarlamaktır (Balanis, 2016).

Toprak düzlemi boyutları hesaplanması (L_g , W_g): Tam bir yama anten tasarımı için, pratik olarak iletken bir malzeme ve sınırlı bir zemin düzlemi gerekmektedir (İsayev,

2016). Toprak düzlemi, alt tabaka ile hemen hemen aynı boyuttadır. Fakat, denklem 2.6 ve 2.7'de görüldüğü üzere, alt tabakanın boyutları, yama antenin boyutlarından alt tabakanın kalınlığının altı katı kadar daha büyüktür. Zemin düzlemi ve alt tabakanın boyutları aşağıda gösterildiği gibi hesaplanabilir (Balanis, 2016).

$$W_g = W_p + 6h \quad (2.6)$$

$$L_g = L_p + 6h \quad (2.7)$$

Burada:

L_p = Yamanın uzunluğu,

L_g = Toprak düzlemi/zemin uzunluğu,

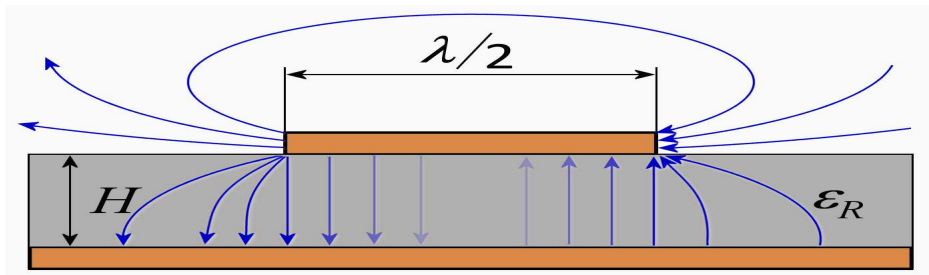
h = Alt tabaka malzemenin kalınlığı,

W_g = Toprak düzlemi/zemin genişliği,

W_p = Yamanın genişliğidir.

2.1.1.4. Mikroşerit Yama Antenlerde Saçaklanma

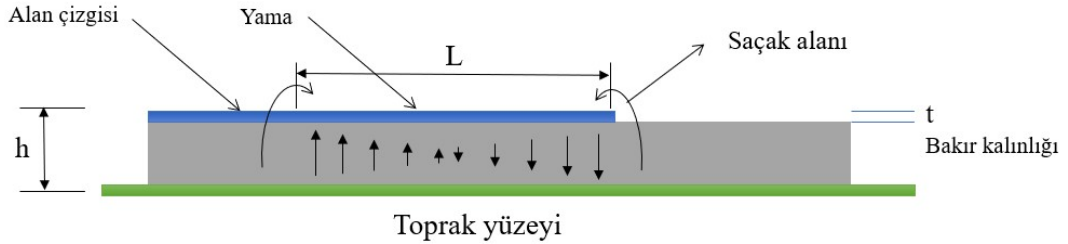
Saçak alanlarının mikroşerit antenin performansı üzerinde büyük etkisi vardır. Mikroşerit antenlerde yamanın merkezinde elektrik alan sıfırdır. Radyasyon, yamanın çevresi ile yer düzlemi arasındaki saçak alanından kaynaklanmaktadır (Elrashidi, 2012). Anten yamasının kenarlarındaki alanlar, yamanın boyutları genişlik ve uzunlukla sınırlı olduğundan toprağa doğru saçaklanır. Bu saçaklanmanın miktarı, kullanılan taban malzemenin yüksekliğine ve yamanın boyutlarına bağlıdır. Saçaklanma etkisi, Şekil 2.4 ve Şekil 2.4'de görüldüğü üzere yamanın tüm çevresinde gözlenir. (Balanis, 2016).



Şekil 2.4. Saçaklanma Etkili Mikroşerit Yama Anten (Balanis, 2016)

XY düzlemi için saçaklanma; L yamasının uzunluğunun alt tabakanın h yüksekliğine (L/h) ve alt tabakanın dielektrik sabiti ϵ_r 'ye oranının bir fonksiyonudur.

Mikroşerit yama antenlerinde saçaklanma $L/h \gg 1$ olduğunda azalır. Bu düzlem saçaklanmasında saçaklanma etkisinin bu yama anteninin rezonans frekansına olan etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Bu etki nedeniyle; anten yamasının elektriksel boyutu antenin fiziksel boyutlarından çok büyük olur (Balanis, 2016.).



Şekil 2.5. Işıyan Mikroşerit Yama Antende Saçaklanma (Balanis, 2016).

Dalgaların bazılarının tabanda, bazılarının ise havada hareket etmesi nedeniyle saçaklanma ve mikroşerit hattaki dalga yayılımını hesaba katabilmek adına etkin dielektrik sabiti (ϵ_{eff}) tanımlanır. Taban malzemesinin üzerindeki malzemesi hava olan bir mikroşerit hat için, etkin dielektrik sabiti değerleri $1 \leq \epsilon_{eff} \leq \epsilon_r$ aralığındadır. $\epsilon_r \gg 1$ olan birçok uygulama için, ϵ_{eff} değeri ϵ_r 'ye çok yakındır. ϵ_{eff} frekansın da bir fonksiyonudur. Düşük frekanslarda ϵ_{eff} genellikle sabittir. Orta frekanslarda ise değeri monoton bir şekilde artarak ϵ_r 'ye yaklaşır.

2.1.2. Antenlerin Elektriksel Parametreleri

Antenler (alıcı/verici), elektrik akımının oluşturduğu elektromanyetik alanı yayacak şekilde tasarlanır. Herhangi bir antenin tasarımının kalitesi hakkında bilgi sahibi olmak için bazı ölçülebilir özelliklerini bilmek gerekir. Bunlardan en önemlileri; yönlülüğü (D), anten giriş empedansı (Z), kazancı (G), verimliliği (e_0), gerilim duran dalga oranı (VSWR), bant genişliği (BW), geri dönüş kaybı (S_{11}) (Balanis, 2014, Arianfar, 2015).

Tasarım sürecinde bu elektriksel parametrelerin tümü optimize edilebilir olmalıdır. Mesela geri dönüş kaybı (S_{11}) -10dB'den büyük olduğunda Gerilim Duran Dalga oranı (VSWR) değeri 2'den fazla olacak ve anten planlanan ışımaya rezonans frekansında çalışmayacaktır.

2.1.3.1. Yönlülük (D)

Yönlülük, “antenden belirli bir yöndeki ışıma yoğunluğunun, tüm yönlerde ortalama ışıma yoğunluğuna oranı” olarak tanımlanır. Ortalama ışıma yoğunluğu, antenin yaydığı toplam gücün 4π 'ye bölünmesine eşittir. Daha basit bir ifadeyle, izotropik olmayan bir kaynağın yönlülüğü, belirli bir yöndeki radyasyon yoğunluğunun izotropik bir kaynağinkine oranına eşittir (Balanis, 2016).

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.8)$$

Burada;

D: Yönlülük (boyutsuz),

U: Antenin belli bir yöndeki ışıma yoğunluğu (W/birim katı aç),

P_{rad} : Antenin yaydığı toplam ışıma gücü (W),

$U_0 = P_{rad}/4\pi$: İzotropik kaynağın/Ortalama ışıma yoğunluğu (W/birim katı aç)

Yönlülük bir anten için çok önemli bir parametredir. Haberleşmede iletimin sağlanabilmesi için iki adet anten kullanılmalı ve bunlar doğru konumlandırılmalıdır. Bu nedenle yönlülük önemli bir anten elektriksel parametresidir (Alkhafaji, 2019; Williamson, 1997)

2.1.3.2. Giriş Empedansı (Z)

Giriş empedansı, "bir antenin terminallerinde ölçülen empedans veya bir çift terminaldeki voltajın akıma oranı" olarak tanımlanabilir (Balanis, 2016). İdeal kablosuz iletişim sistemlerinde, kaynak vericiden çıkan gücün kayıpsız bir şekilde ışıma yoluyla iletilmesi istenir. Bunun için her iki antenin empedansının uyumlu olması gerekir. Kaynak ile alıcı anten arasındaki empedans uyumsuzluğu durumunda ise, kayıplar ortaya çıkar. Antenin giriş empedansı iki parametreden oluşur;

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (2.9)$$

Burada;

Z_A : Anten giriş empedansı,

R_A : Giriş direnci,

jX_A : Giriş reaktansıdır.

Giriş direnci (R_A) da iki parametre ile belirlenir;

$$R_A = R_R + R_L \quad (2.10)$$

Burada;

R_R : Antenin ışıma direnci,

R_L : Antenin kayıp direncidir.

2.1.3.3. Kazanç

Bir antenin performansını açıklayan bir diğer yararlı değer ise kazançtır. Antenin kazancı yönlülük ile yakından ilişkili olmakla birlikte, verimliliğini de dikkate alan bir ölçüdür (Balanis, 2016).

Kazanç antenlerde meydana gelen kayıpların belirlenmesinde önemli bir faktördür ve aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$(G_{ot})_{dB} + (G_{or})_{dB} = 20 \log \frac{(4\pi R)}{\lambda} + 10 \log \frac{P_r}{P_T} \quad (2.11)$$

Burada;

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

$(G_{or})_{dB}$: Alıcı anten kazancı,

P_r : Alınan Güç (W),

P_T : İletilen Güç (W)'tür.

2.1.3.4. Gerilim Duran Dalga Oranı (VSWR)

Mikroşerit antenin daha verimli çalışabilmesi için kaynaktan antene gönderilen gücün maksimum olması gerekmektedir. Bu kaynak ile anten arasındaki empedans uyumuna bağlıdır. Anten ve besleme kaynağı aralarında empedans uyumunun sağlamadığı durumda geriye yansıyan dalgalar, ilerleyen dalgalarla girişim oluşturur. Bu durum hat üzerinde dalgaların oluşmasına yol açar. Voltaj duran dalga oranı (Voltage Standing Wave Ratio, VSWR) hattın üzerindeki gerilim seviyesinin minimum genliği ile maksimum genliğinin oranıdır. VSWR, eşitlik (2.12) ile bulunur.

$$VSWR = \frac{V_{Max}}{V_{Min}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (2.12)$$

Bu formülde yansıma katsayısı (Γ) 0 ve 1 arasında değerler alırken, voltaj duran dalga oranı ise 1 ve ∞ arasında değer alabilmektedir. Empedans uyumunun mükemmel olduğu durumda yansıma katsayısı $\Gamma = 0$ ve VSWR'nin değeri 1'e eşit olur. Bu da fiziksel olarak mümkün olmasa da gücün tamamen aktarıldığı anlamına gelir. İstenen durum ise, VSWR değerinin 1'e yakın olması ve 2'den büyük olmamasıdır (Çetin, 2021).

2.1.3.5. Bant Genişliği

Antenler geniş ve dar bantlı olarak tanımlanır. Bant genişliği, anten karakteristiklerinin bir merkez frekansının her iki tarafındaki frekans aralığı olarak düşünülebilir. Geniş bant antenler için bant genişliği, üst kesimin frekansının alt kesim frekansına oranı olarak tanımlanabilir. Dar bantlı antenler için bant genişliği, bant genişliğinin merkez frekansına göre frekans farkının (üst eksi alt) yüzdesi olarak ifade edilir. Günümüzde 40:1 oranında çok fazla geniş bant antenleri vardır (Balanis., 2016; Çetin, 2021).

$$BG = \frac{f_{üst}}{f_{alt}} \text{ (Geniş bant)} \quad (2.13)$$

$$BG = \frac{f_{üst} - f_{alt}}{f_{merkez}} \times 100 \text{ (Dar bant)} \quad (2.14)$$

Burada;

BG-bant genişliği

$f_{üst}$ - üst kesim frekansı

f_{alt} - alt kesim frekansı

f_{merkez} - merkez frekansı

2.1.3.6. Geri Dönüş Kaybı

Devrede verilen elektromanyetik sinyalin geri dönen kısmına yansıyan dalga denir. Yansıyan bu dalgayı ifade etmek için yansıma katsayısı kullanılır. Kaynağa geri yansıyan ışık miktarının ölçümüne Geri Dönüş kaybı adı verilir. Bu değer antene doğrudan iletilen ve yansıyan güç hakkında bilgi verir. dB cinsinden ifade edilir ve geri dönüş kaybı (return loss – RL) olarak adlandırılır. Bu değer (S_{11}), 0 dB ise, antene gelen tüm güç yansıyor. Gerçekte karşılaşılmayan bu değer verimsizlik anlamına gelir ve anten tarafından ışınan güç demek değildir (İsayev, 2021). Geri dönüş kaybı, tasarlanan antenin empedans uyumluluğunun ne kadar iyi olduğunun göstergesidir. Diğer bir ifadeyle; antenin yansıma katsayısı veya S_{11} , empedans uyumsuzluğu nedeniyle geri yansıtılan RF gücü hakkında bilgi sağlar. Geri dönüş kaybı matematiksel olarak aşağıda gösterilmiştir.

$$RL = -20 \log |\Gamma| \quad (2.15)$$

Burada; Γ : yansıma katsayısıdır.

2.1.3.7. Verimlilik

Anten verimi kısaca, antenden ışınan gücün kaynaktan antene iletilen güce oranı olarak tanımlanabilir. Bu nedenle 0 ile 1 arasında bir değer alabilir. Bir antenin kaynaktan aldığı gücün bir bölümü ısı kayba dönüşür. Bu nedenle kaynaktan çekilen güç, antendeki ısı kayıplar ve anten ışınma gücünün toplamına eşittir. Isıl kayıplar ne kadar yüksekse, anten verimliliği de o kadar düşüktür. Isıl kayıplar, omik direnç kayıpları, yansıma kayıpları ve anten yapısından kaynaklanan kayıpların toplamıdır. Bunun yanında besleme hattının empedans uyumsuzluğu ve dielektrik malzeme kayıpları da verimi olumsuz etkileyen faktörlerdir (Çetin, 2021).

$$e_0 = e_c \times e_r \times e_d \quad (2.16)$$

Burada;

e_0 : Anten verimi,

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

e_r : İletim verimi,

e_d : Dielektrik materyalin verimidir.

2.1.3. RF Anten Tasarım Simülatörleri

RF anten simülasyon programları, radyo frekansı (RF) antenlerin tasarımını, analizini ve optimize edilmesini kolaylaştırmak için kullanılan yazılım araçlarıdır. Buradaki temel amaç, girilen parametrelere dayalı olarak optimum performans için tasarlanan antene ait elektriksel parametrelere ulaşmaktır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar üç aşamada ele alınmaktadır. İlk adım, belirli bir anten tasarımı için analitik denklemleri ve limit koşullarını kullanarak L, W ve h temel boyutlarını belirlemektir. Bu denklemler, antenin çalışma frekansına, kazanç gereksinimlerine, ışın genişliğine ve diğer tasarım parametrelerine bağlı olarak değişebilir. Genellikle bu denklemler ve koşullar, antenin belirli bir performans hedefini karşılamasını sağlamak için kullanılır.

İkinci adım, belirlenen boyutlara dayalı olarak, elektromanyetik simülasyon yazılımları kullanılarak antenin fiziksel tasarımını yapmaktır. Tasarım sürecinde, antenin geometrisi, malzemeleri, bağlantı noktaları ve diğer parametreleri tanımlanır.

Tasarımın tamamlanmasından sonra, programı üzerinde tasarım doğrulaması yapılır. Bu, antenin simülasyonunu çalıştırmak, sonuçları analiz etmek ve tasarımın hedeflenen performansı karşılayıp karşılamadığını değerlendirmek anlamına gelmektedir. Bu süreçte kullanılan en genel anten simülasyon programları;

- **Ansys HFSS (High-Frequency Structure Simulator):** HFSS, elektromanyetik alan simülasyonu için güçlü bir yazılım aracıdır. Karmaşık RF antenlerin tasarımını ve analizini yapabilme ve farklı frekans aralıklarında çalışan antenlerin performansını değerlendirebilme imkanı sağlar (El Mrabet, 2006).
- **CST Studio Suite:** Elektromanyetik simülasyon ve analiz için kullanılan bir diğer güçlü yazılım paketidir. Geniş bir anten tasarımı yelpazesi için uygundur ve RF, mikrodalga ve optik uygulamaları destekler (Yousefalturk ve Cansız 2022).
- **Keysight Advanced Design System (ADS):** Mikrodalga ve RF antenlerin tasarımı ve simülasyonu için kullanılan bir yazılım platformudur.

Elektromanyetik simülasyon modülleri içerir ve karmaşık RF antenlerin analizini gerçekleştirebilir yapıdadır (Balashov, 2020).

- **FEKO:** Elektromanyetik analiz ve simülasyon için kullanılan bir yazılım paketidir. RF antenlerin yanı sıra elektronik devrelerin elektromanyetik analizi için de kullanılabilir (Aguilar ve ark., 2015).
- **Sonnet Suites:** Mikroşerit antenler ve mikroşerit devrelerin elektromanyetik simülasyonu için özellikle güçlü bir araçtır. Yüksek frekansta çalışan antenler için uygundur (Rautio, 2011).
- **Antenna Magus:** Anten tasarımını hızlandırmak için kullanılan bir yazılım aracıdır. Kullanıcılarına büyük bir anten veritabanı sunar ve tasarım sürecini basitleştirir (Sickel ve ark., 2015)

HFSS (Yüksek Frekanslı Yapısal Simülatör), elektromanyetik yapıları sonlu elemanlar yöntemiyle çözen bir yazılımdır. Bu yazılımın üreticisi Ansys Corporation'dır. HFSS, antenler, filtre içeren karmaşık RF devreleri ve iletim hatları gibi tasarımların yapılmasında en çok tercih edilen ticari yazılımlardan biridir (El Mrabet, 2006).

2.1.3.1. HFSS (Yüksek Frekans Yapısal Simulatörü)

Elektromanyetik yapıları sonlu elemanlar yöntemiyle çözen yazılımsal bir simülatördür. Bu bağlamda HFSS, sonlu eleman, integral denklem veya gelişmiş hibrit yöntemlere dayalı olarak son teknoloji ürünü çözümler sunar. HFSS'nin güçlü otomatikleştirilmiş çözüm süreci sayesinde, kullanıcılar sadece geometriyi, malzeme özelliklerini ve istenen çıktıları belirtmeleri gerekmektedir. Bu sayede, kullanıcılar detaylı matematiksel denklemlerle uğraşmadan, tasarımlarını analiz edebilir ve sonuçları elde edebilirler (El Mrabet, 2006). ANSYS HFSS, kullanıcı üretkenliğini artırmak için iki çalışma modu sunar:

Üç boyutlu arayüz: HFSS'in üç boyutlu arayüzü, elektromanyetik yapıların tasarım ve analizini gerçekleştirmek için kullanıcı dostu bir ortam sağlar. Bu modda, kullanıcılar 3D modellemeyi kolayca yapabilir, malzeme özelliklerini belirleyebilir, geometri manipülasyonları yapabilir ve sonuçları görselleştirebilir. 3D arayüzü, karmaşık yapıların hızlı bir şekilde modellenmesini ve analiz edilmesini sağlar (Zhang ve ark, 2021)

ECAD için HFSS: Bu mod, Elektronik Tasarım Otomasyonu (ECAD) araçları ile entegrasyonu sağlar. ECAD araçları, devre tasarımı ve baskı devre kartı (PCB) tasarımı

için kullanılan yazılımlardır. ECAD için HFSS, bu araçlarla entegre olarak çalışabilir ve devre tasarımlarını doğrudan HFSS'e aktarabilir. Bu şekilde, kullanıcılar HFSS içerisinde elektromanyetik analizleri gerçekleştirirken, aynı zamanda ECAD ortamında yapılan değişiklikleri otomatik olarak senkronize edebilirler. Bu mod, tasarım sürecini hızlandırır ve entegre bir tasarım deneyimi sunar.

Her iki çalışma modu da kullanıcıların verimli bir şekilde tasarım yapmalarını ve analiz yapmalarını sağlamak için HFSS'in yeteneklerini farklı şekillerde kullanmalarını sağlar. Üç boyutlu arayüz, kullanıcıların karmaşık üç boyutlu geometrileri modellemesine olanak tanır. Genellikle yüksek frekanslı bileşenlerin (antennas, RF/mikrodalga bileşenleri, biyomedikal cihazlar vb.) modellemesi ve simülasyonu için kullanılır. Bu modda, kullanıcılar saçılma matrisi parametrelerini (S, Y, Z parametreleri gibi) çıkarabilir ve üç boyutlu elektromanyetik alanları (yakın ve uzak alan) görselleştirebilirler. Diğer çalışma modu olan ECAD için HFSS, çip üzerinde gömülü pasif elemanlar, IC paketleri, PCB ara bağlantıları gibi katmanlı geometri ve yüksek hızlı bileşenlerin yerleşimiyle ilgilenen tasarımcılar için idealdir. Bu mod, elektrikli bir CAD arabirimi olarak hizmet verir ve ECAD araçlarıyla entegre çalışarak tasarım sürecini hızlandırır. Tasarımcılar, devre tasarımlarını ECAD aracında yaparken aynı zamanda HFSS içerisinde elektromanyetik analizleri gerçekleştirebilirler. Bu entegrasyon sayesinde tasarımların doğruluğu artar ve tasarım süreci daha verimli hale gelir (El Mrabet, 2006).

2.2.Yapılan Çalışmalar

RF enerji hasadına yönelik farklı seramik malzemeler üzerine tasarlanan ve üretilen mikroşerit anten performanslarının antenin elektriksel parametrelerine uygunluğunun değerlendirmesi amacıyla benimsenen yöntem eşliğinde yapılan çalışmalar öncelikle Tablo 2.1'de sunulan iş ve işlem basamaklarında yürütülmüştür.

| Yapılan Çalışmalar | |
|--------------------|---|
| 1 | Kapsamlı literatür araştırması |
| 2 | Ortam RF enerji yoğunluğunun belirlenmesi |
| 3 | Simulasyon programının seçimi |

| | |
|---|---|
| 4 | Mikroşerit anten tasarım süreci |
| 5 | Tasarlanan antenlerin elektriksel parametrelerin belirlenmesi |
| 6 | Mikroşerit anten üretim süreci |
| 7 | Elde edilen bulgular analiz edilerek sonuç ve önerilerin geliştirilmesi |

Tablo 2.1. Yürütülen Çalışmanın İş ve İşlem Basamakları

2.2.1. Kapsamlı Literatür Araştırması

Yürütülen bu çalışma, giriş bölümünde başlık 1.2’de sunulan son 10 yıllık sürece ait kapsamlı literatür incelemesi ile başlamış ve belirlenen problem ve amaca bağlı olarak başlık 2.1’de sunulan yöntemsel literatür araştırması ile devam etmiştir. Her iki literatür üzerinde yapılan değerlendirmelerle RF enerji hasadına yönelik yürütülecek bu çalışma için uygun bir yöntem benimsenmiştir.

2.2.2 Ortam RF Enerji Yoğunluğunun Belirlenmesi

Ortam RF enerji yoğunluğunu ölçmek elektromanyetik alanların çevresel etkilerini ve potansiyel riskleri izlemek ve değerlendirmek için kullanılır. Aynı zamanda RF enerji yoğunluğu çevre koruma ve insan sağlığını koruma amacıyla, elektromanyetik kirliliğin izlenmesi ve sınırlanması için de gerekebilir (Valberg ve ark, 2007; Er ve Black, 2003; Hardell ve Sage, 2008). RF enerji yoğunluğunu ölçmek, bu tür kirliliği izlemek ve düzenlemek için önemlidir. Diğer yandan RF hasadına yönelik anten tasarım sürecinde antenin elektriksel parametrelerinin etki düzeyini belirleyerek tasarımı iyileştirmek ve geliştirilen antenle verimli enerji hasadı yapabilmek için uygun ortamların belirlenmesi ve ilgili ortamın RF enerji yoğunluğunun ölçülmesi büyük önem arz etmektedir (Arpanutud, 2022). İlgili literatürde ortam RF enerji yoğunluğunun ölçülmesinde spektrum analizör cihazı kullanıldığı tespit edilmiştir (Surajo ve ark., 2021; Arpanutud ve ark., 2022; Piñuela ve ark., 2017). Bu bağlamda yürütülen bu araştırmanın RF enerji hasadına yönelik anten tasarım ve geliştirme sürecinde ortam RF enerji yoğunluğunun belirlenmesi amacıyla zaman ve ekonomik sınırlılıklardan dolayı spektrum analizör elde edilememiş olup, farklı kaynaklar üzerinde yürütülen ısrarlı araştırmalarda da kullanılabilir durumda bir spektrum analizör cihazına ulaşmak mümkün olmamıştır.

2.2.3 Simülasyon Programının Seçimi

Anten tasarımlarında HFSS, CST, Hyperlynx 3D EM ve ADS simülasyon programları kullanılır. Fakat bu programlar içinde en yaygın kullanılan Ansoft HFSS simülasyon programıdır. Bu program, RF ve mikrodalga uygulamaları için özellikle yüksek frekansta çalışma yeteneği sunar. Bu, özellikle kablosuz iletişim, radar, anten tasarımı ve mikrodalga devre tasarımı gibi uygulamalar için önerilmektedir. Program 3D elektromanyetik modelleme yeteneklerine sahiptir. Bu, karmaşık yapıların detaylı simülasyonlarını yapmayı mümkün kılar. Özellikle antenler gibi karmaşık 3D yapıların tasarımı ve analizi için idealdir. Bununla birlikte otomatik ölçüm ve optimizasyon özellikleri ile tasarım süreçlerini hızlandırır. Bu nedenle RF enerji hasadında kullanılacak anten tasarım sürecinde HFSS programı tercih edilmiştir. Bu süreçte belirlenen parametrelere dayalı olarak, HFSS (High-Frequency Structure Simulator) programında her anten için ayrı-ayrı optimizasyon yürütülmüştür. Bu kapsamda en iyi performanslı antenler tasarlanarak her bir anten için ilgili elektriksel parametrelere ulaşılmıştır.

2.2.4. Mikroşerit Anten Tasarım Süreci

Bu tez çalışmasında, dikdörtgen mikroşerit yama antenlerin farklı geometrilerinin rezonans frekansı ve bant genişliği üzerindeki etkileri incelenmektedir. Bu süreçte ilgili literatür doğrultusunda analitik denklemler ve limit koşulları kullanılarak belirlenen L , W ve h temel boyutlarına dayalı olarak, öncelikle ANSYS HFSS tasarım programı kullanılarak antenin fiziksel tasarımı yapılmıştır. Bu bağlamda, antenin geometrisi, malzemeleri, bağlantı noktaları ve diğer fiziksel parametreleri HFSS programında tanımlanmıştır. Tasarım sürecinin daha iyi anlaşılması için bu sürece ait tüm bulgular bu başlık altında sunulmaktadır.

Tasarımın tamamlanmasından sonra, HFSS programı üzerinde tasarım doğrulaması yapılmıştır. Bu, antenin simülasyonunu çalıştırmak, sonuçları analiz etmek ve tasarımın hedeflenen performansı karşılayıp karşılamadığını değerlendirmek anlamına gelmektedir. HFSS programı yardımıyla, antenin kazancı, bant genişliği, ışın genişliği ve radyasyon deseni gibi elektriksel parametreleri görselleştirilmiş ve analiz edilmiştir.

Bu süreçte kullanılan tasarım programının kullanım amacı öncelikle, daha iyi performans sağlayacak bir geometri bulmaktır. Bu kapsamda, tasarlanan antenlerin

rezonans frekansı ve bant genişliği için optimizasyon sağlamak amacıyla bir dizi ölçüm gerçekleştirilerek farklı geometrilerin etkileri karşılaştırılmıştır.

2.2.4.1 Mikroşerit Anten Geometrisinin Belirlenmesi

Mikroşerit antenlerin tasarımı ve performansını belirlemek için dikkate alınması gereken temel elektriksel parametreleri, antenin çalışma frekansı, boyutları ve geometrisi, dielektrik malzemesi, bant genişliği ve besleme noktasıdır. Bu parametreler, antenin çalışma frekansı, verimliliği, direnç, kazanç ve boyutları gibi elektriksel parametreleri belirlemeye yardımcı olması açısından önemli görülmektedir. Bu parametreleri belirlemek için öncelikle ortam RF enerji yoğunluğunun büyük bir kısmını oluşturan bant genişliği tercih edilerek RF enerji hasadı yapmak üzere geliştirilecek antenin çalışma frekansı 2.4 GHz olarak belirlenmiştir.

Daha sonra yöntemsel literatürde ayrıntılı olarak sunulan malzemelerin olumlu ve olumsuz yönleri değerlendirilerek geliştirilecek mikroşerit antenin malzemesi FR4 ($\epsilon_r = 4.4$), Rogers3006 ($\epsilon_r = 6.15$) ve Rogers4003C ($\epsilon_r = 3.38$) olarak belirlenmiştir.

Frekans ve malzemesi belirlenen mikroşerit antenin başlık 2.1.1.3'te sunulan formüller aracılığıyla hesaplanarak boyutları herbir malzeme için Tablo 2.2'de sunulmuştur. Bu süreçte ayrıca mikroşerit antenler için avantajlarından dolayı en çok kullanılan dikdörtgen geometri tercih edilmiştir.

Son aşamada antenin besleme noktası olarak mikroşerit hat besleme yöntemi tercih edilerek HFSS programı aracılığıyla simülasyon ve bir dizi optimizasyon yapılmıştır.

| Alt Tabaka Boyutları Alt Tabaka Malzemesi | Toprak Genişliği W_g (mm) | Toprak Uzunluğu L_g (mm) | Anten Genişliği W_p (mm) | Anten Uzunluğu L_p (mm) | Toprak Yüksekliği h (mm) |
|--|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| FR4 | 46 | 46 | 38 | 28 | 1.6 |
| Rogers3006 | 40.6 | 54.2 | 33 | 25 | 1.27 |
| Rogers4003C | 48 | 50 | 39 | 32.1 | 1.52 |

Tablo 2.2. Anten Boyutları

Bundan sonraki aşamalarda, farklı malzemelerin kullanımı veya antenin diğer parametrelerinin optimize edilmesi gibi konulara odaklanılmaktadır.

2.2.4.2. Mikroşerit Anten Dielektrik Malzemesinin Belirlenmesi

Mikroşerit antenlerin tasarımında mekanik açıdan sağlamlığı artıran kalın dielektrik tabanlar, ışıma gücünü artırarak iletken kayıplarını düşürecek ve empedans bant genişliğinde iyileşmeler sağlayacak şekilde uygun bir dielektrik taban yani malzeme seçimi önemli bir yer tutmaktadır. Bu nedenle ilgili literatür incelemesine dayalı olarak yapılan değerlendirmelerle, yapısal özellikleri ve sağladığı avantajlar dikkate alınarak FR4, Rogers3006 ve Rogers4003C malzemeleri taban dielektrik malzemesi olarak belirlenmiştir.

2.2.4.3. Mikroşerit Anten Besleme Yönteminin Belirlenmesi

Mikroşerit antenlerde bir antenin polarizasyonu ve giriş empedansı üzerinde büyük öneme sahip olan besleme teknikleri üzerinde yapılan literatür değerlendirmeleri sonucunda besleme noktasının konumunu kontrol ederek eşleştirmesi, modellenmesi ve üretimi oldukça basit olmasından dolayı mikroşerit hat besleme yöntemi tercih edilmiştir.

| Malzemeye Göre Antenin Elektriksel Parametreleri | Anten Kazancı G | Gerilim Duran Dalga oranı VSWR | Geri Dönüş Kaybı S ₁₁ |
|--|-----------------|--------------------------------|----------------------------------|
| FR4 | 3.4 | 5.48 | -9.8 |
| ROGERS3006 | 4.7 | 16.2 | -2.7 |
| ROGERS4003C | 6 | 9.38 | -6.12 |

Tablo 2.3. Yarıksız Hat Beslemeli Anten Tasarım Verileri

Tasarım sürecinde hat besleme yöntemini kullanırken öncelikle Şekil 2.3.'de görülen yapıda bir tasarım yapılmış ve ölçülen değerler Tablo 2.3'de sunulmuştur. Bu yapıdaki bir hat beslemenin geri dönüş kaybının -10'dan büyük olduğundan ve gerilim duran dalga oranı VSWR'nin 2'den büyük olmasından dolayı çalışmayacağı anlaşılmıştır. Bu değerleri iyileştirmek amacıyla uzmanlarla yapılan görüşmeler sonucunda hat yapısının yarıklı olarak tasarlanmasının daha uygun olabileceği kanaatine varılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen bulgular hat besleme yönteminin yarıklı tasarlanmasının antenlere işlerlik kazandırdığı görülmüştür (Tablo 2.7).

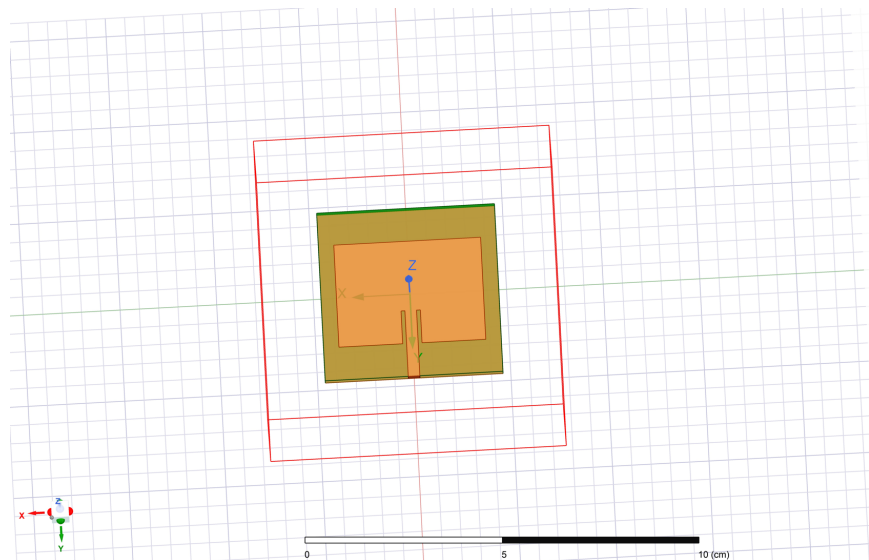
2.2.5. Tasarılan Antenlerin Elektriksel Parametrelerinin Belirlenmesi

Bir antenin tasarımının niteliğini anlamak için bazı ölçülebilir özellikleri bilmek gerekmektedir. Bunlardan en önemlileri; Yönlülüğü (D), Anten Giriş Empedansı (Z), Kazancı (G), Verimliliği (ϵ_0), Gerilim Duran Dalga Oranı (VSWR), Bant Genişliği (BW), Geri Dönüş Kaybı (S_{11})'dir. Bu parametrelerin tümü tasarım anında optimize edilebilir yapıdadır. Mesela geri dönüş kaybı (S_{11}) -10dB'den büyük olduğunda anten ışımaya yaptığı rezonans frekansında çalışmayacaktır. Bu durumda, anten ve besleme hattı boyutlarının optimizasyonu önemlidir. Gerilim Duran Dalga Oranı (VSWR) değeri 2'den fazla olduğunda ise, yine anten çalışmayacaktır. Uygun değerlerin sağlanması için besleme hattı boyutlarının optimize edilmesi gerekmektedir.

Bu bağlamda antenlerin tasarım sürecinde daha yüksek verimi sağlamak adına yama boyutları, yama yarığı boyutları, besleme noktaları ve besleme hattı boyutları üzerinde bir dizi optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.

Bu kapsamda tercih edilen dielektrik malzemelerin herbirisi için tasarlanan antene ait geri dönüş kaybı, bant genişliği ve kazanç gibi elektriksel parametreleri elde edilerek, tasarım sürecine ait bu bulgular bu başlık altında sunulmaktadır.

2.2.5.1. FR4 Tabakalı MYA



Şekil 2.6. FR4 Tabakalı, Hat Beslemeli, Dikdörtgen MYA

Şekil 2.6'da tasarlanan FR4 tabakalı, hat beslemeli ve dikdörtgen şekilli antene ait parametreler Tablo 2.4'de gösterilmiştir.

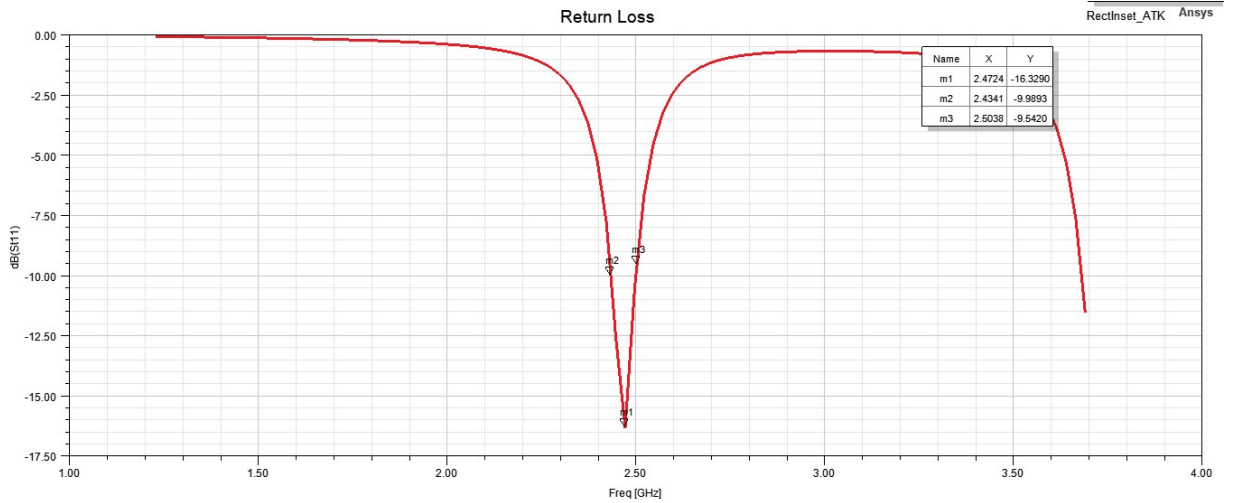
| FR4 Tabakalı Anten Parametreleri | |
|----------------------------------|---------|
| L_g | 46 mm |
| W_g | 46 mm |
| L_p | 28.1 mm |
| W_p | 38 mm |
| x_f | 3 mm |
| y_f | 18 mm |
| h | 1.6 mm |
| f_r | 2.4 GHz |

Tablo 2.4. FR4 Tabakalı Anten Parametreleri

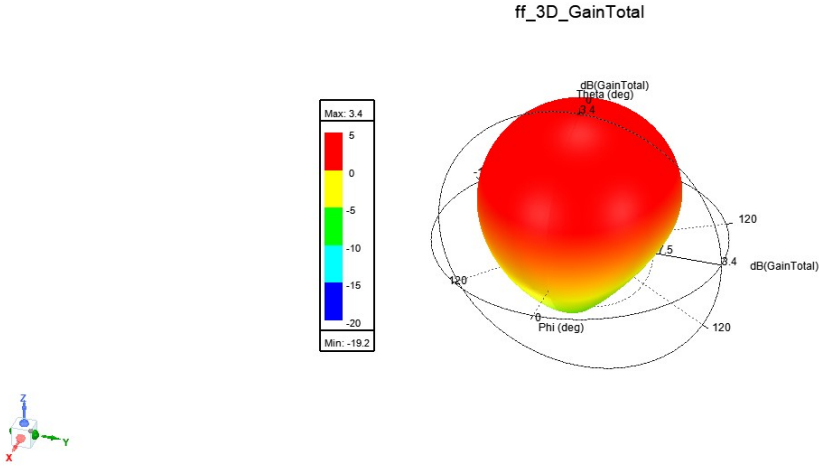
Burada

- Toprak genişliği (W_g):
- Toprak uzunluğu (L_g):
- Yama genişliği (W_p):
- Yama uzunluğu (L_p):
- Besleme hattı genişliği (x_f)
- Besleme hattı uzunluğu (y_f)
- Mikroşerit Anten Taban Kalınlığı (h)

Simülasyon sonuçlarına göre, 2.4 GHz rezonans frekansında antenin performansı aşağıdaki şekilde ölçülmüştür (Şekil 2.7).



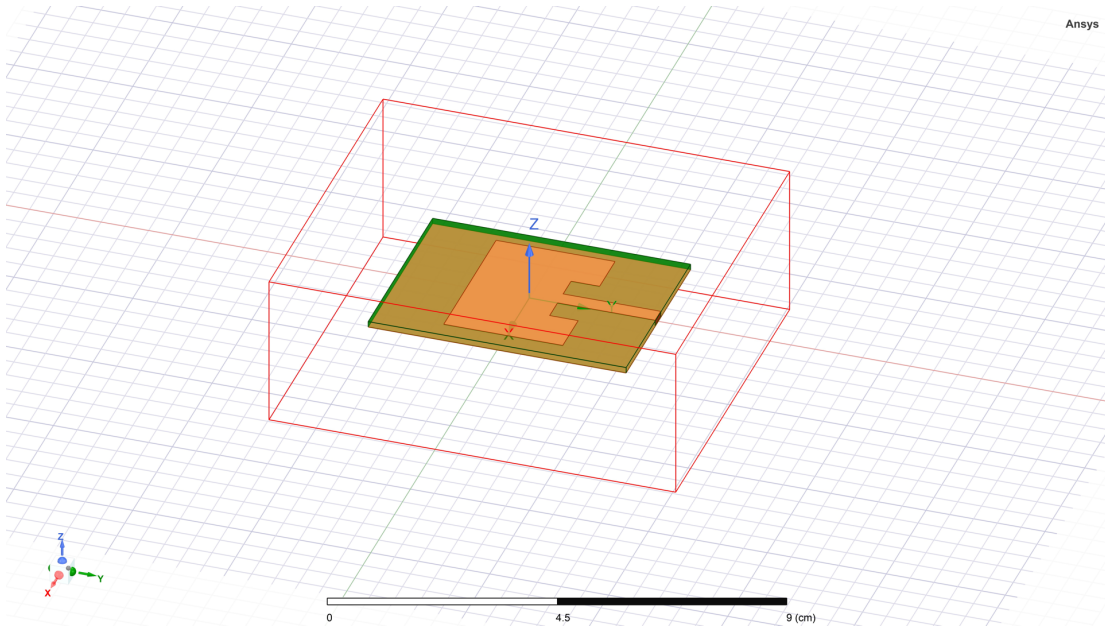
Şekil 2.7. S_{11} değişimi



Şekil 2.8. FR4 Tabakalı Antenin Kazancı

Yukarıda görüldüğü gibi bu antenin geri dönüş kaybı (S_{11}): 2.45 GHz'de yaklaşık -17 dB olarak elde edilmiştir (Şekil 2.7). Bu değer, -10 dB'den düşük olması nedeniyle kabul edilebilir düzeydedir. Bant genişliği yüzdesi (BW), %2,81 olarak bulunmuştur (Şekil 2.7). Bu değer, literatürde önerildiği üzere Eşitlik 2.14 aracılığıyla hesaplanarak elde edilmiştir. İlgili değerlerin %2'nin üzerinde çıkması RF enerji hasadı açısından olumlu karşılanmaktadır. Antenin kazanç değeri 3.4 olarak elde edilmesi, verimlilik adına memnuniyet vericidir (Şekil 2.8).

2.2.5.2. Rogers3006 Tabakalı MYA



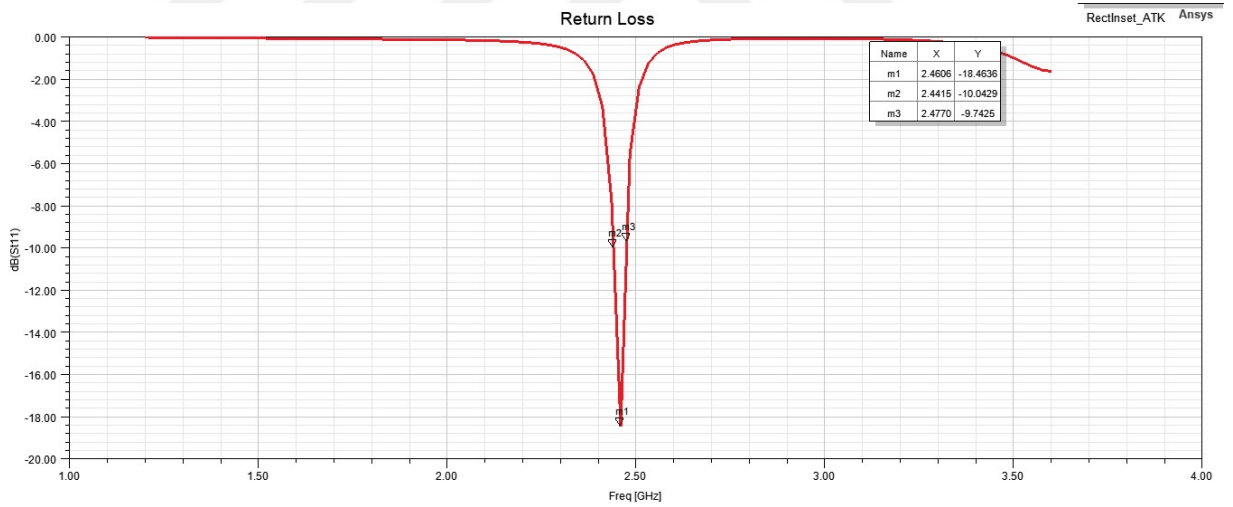
Şekil 2.9. Rogers3006 Tabakalı, Hat Beslemeli Dikdörtgen MYA

Şekil 2.9’da tasarlanan Rogers3006, mikroşerit hat beslemeli ve dikdörtgen şekilli antene ait parametreler Tablo 2.5’de gösterilmiştir.

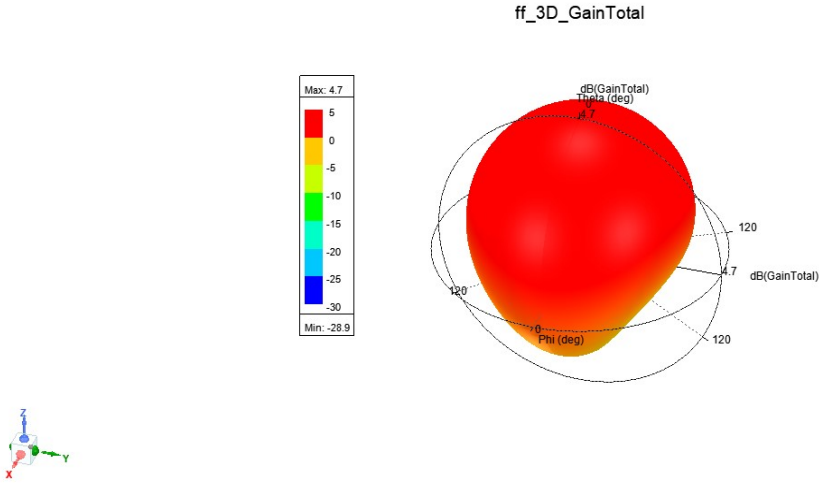
| | |
|----------------|----------|
| Wg | 42.06 mm |
| Lg | 35.96 mm |
| Wp | 33.06 mm |
| Lp | 26.36 mm |
| x _f | 3.5 mm |
| y _f | 20.5 mm |
| h | 1.6 mm |
| f _r | 2.4 GHz |

Tablo 2.5. Rogers3006 Tabakalı Anten Parametreleri

Rogers3006 alt tabakalı mikroşerit hat beslemeli antenin S₁₁ değişimi grafiği aşağıdaki gibidir.



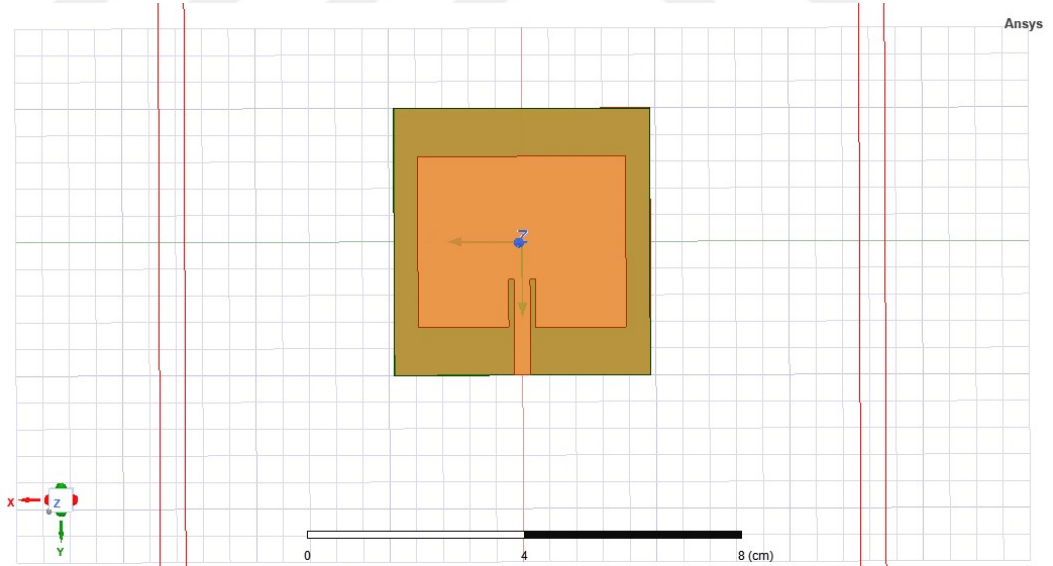
Şekil 2.10. S₁₁ değişimi



Şekil 2.11. Rogers3006 Tabakalı Hat Beslemeli Anten Kazancı

Geri dönüş kaybı (S_{11}): 2.4 GHz'de -19 dB olarak belirlenmiştir (Şekil 2.10). Bant genişliği yüzdesi (BW): %1,81 olarak ölçülmüştür (Şekil 2.10). Antenin kazanç değeri 4.7 ölçülmüştür (Şekil 2.11).

2.2.5.3. Rogers4003C Tabakalı MYA



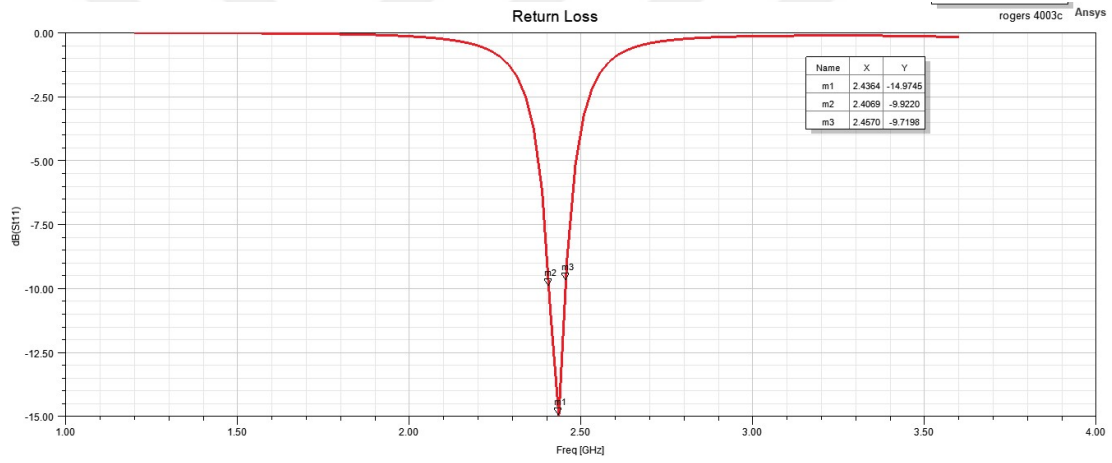
Şekil 2.12. Rogers4003C Tabakalı, Hat Beslemeli, Dikdörtgen MYA

Şekil 2.12'de tasarlanan Rogers4003C tabakalı, hat beslemeli ve dikdörtgen şekilli antene ait parametreler Tablo 2.6'da gösterilmiştir.

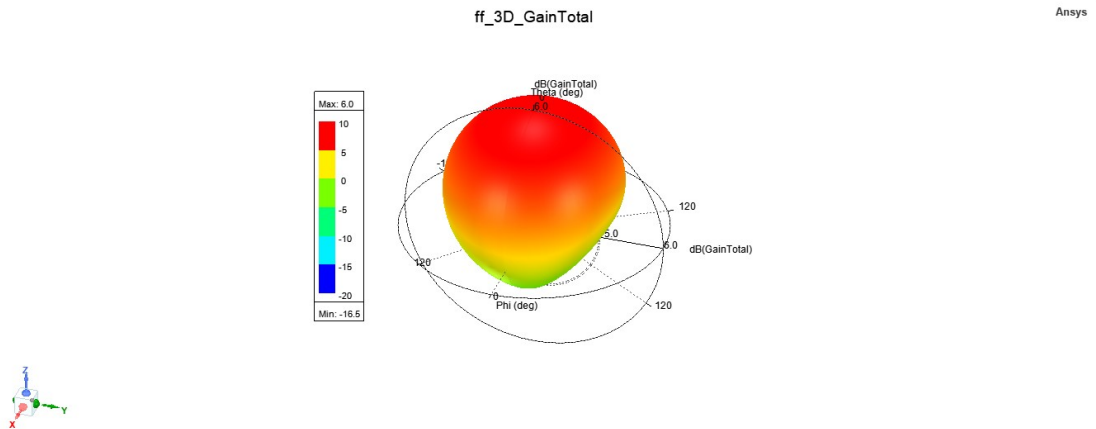
| | |
|----------------|----------|
| Wg | 48 mm |
| Lg | 50.1 mm |
| Wp | 39 mm |
| Lp | 32.1 mm |
| x _f | 3 mm |
| y _f | 18 mm |
| h | 1.52 mm |
| f _r | 2.45 GHz |

Tablo 2.6. Rogers4003C Tabakalı Anten Parametreleri

Simülasyon sonuçlarına göre Rogers4003C tabakalı hat beslemeli anten 2.4 GHz rezonans frekansında antenin geri dönüş kaybı aşağıdaki şekilde ölçülmüştür:



Şekil 2.13. S₁₁ değişimi



Şekil 2.14. Rogers4003C Tabakalı Hat Beslemeli Anten Kazancı

Elde edilen tasarım verilerine bakıldığında antenin geri dönüş kaybı (S_{11}): 2.4 GHz'de -23 dB ve bant genişliği yüzdesi (BW)'nin %2.05 olduğu görülmektedir (Şekil 2.13). Ayrıca, antenin kazanç değeri 6 olarak elde edilmiştir (Şekil 2.14).

Tasarlanan antenler için simülasyon programı üzerinde yapılan son optimizasyonlar sonucunda elde edilen bazı elektriksel parametreleri Tablo 2.7'de toplu halde sunulmaktadır.

| Malzemeye Göre Antenlerin Elektriksel Parametreleri | Giriş Empedansı Z (Ω) | Anten Kazancı G | Gerilim Duran Dalga oranı VSWR | Bant Genişliği BW (%) | Geri Dönüş Kaybı S_{11} (dB) |
|---|----------------------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| FR4 | 50 | 3.4 | 1.7 | 2.8 | -17 |
| ROGERS3006 | 50 | 4.7 | 1.43 | 1.8 | -19 |
| ROGERS4003C | 50 | 6 | 1.28 | 2.5 | -16 |

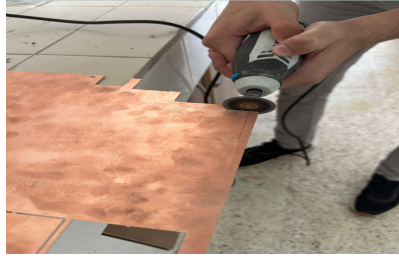
Tablo 2.7. Tasarlanan Antenlere Ait Bazı Elektriksel Parametreler

Yukarıda belirtilen tabloya bakarsak, yapılan simülasyon ve optimizasyonlara göre, antenler arasında en iyi bant genişliği FR4 alt tabaka malzemeli antende görülmektedir. Bant genişliğinin bu yükseklik değeri alacağı ışınım miktarının yüksekliğinden dolayı enerji hasadı sürecinde verimli çalışacağı habercisi olarak yorumlanabilir. Bu antenlerin içinde geri dönüş kaybı en iyi olan anten Rogers3006 alt tabakalı olan anten olduğu görülmektedir. Bu değer ilgili frekansta minimum kayıpla çalışma performansı sağlayacağı şeklinde yorumlanabilir. Diğer yandan en kazançlı anten ise, Rogers4003C alt tabakalı anten olduğu görülmektedir. Bu değerleri RF enerji hasadı açısından değerlendirirsek dB/V dönüştürücüde en iyi enerji hasadını 5V potansiyel fark ile en çok kazancı olan Rogers4003C alt tabakalı antenin yapabileceği söylenebilir.

2.2.6. MYA Üretimi

Çalışmanın bu bölümünde tasarlanan antenlerin anten parametrelerini göz önünde bulundurarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan antenlerin üretimi Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği laboratuvarı altyapısında uzmanların nezaretinde ve gerekli durumlarda ilgili bölüm öğretim üyelerine danışarak gerçekleştirilmiştir.

Üretim aşamasında öncelikle antenlerin alt seramik malzemeleri kesilmiş ve tasarım boyutları sağlanana kadar zımparalanmıştır (Şekil 2.15).



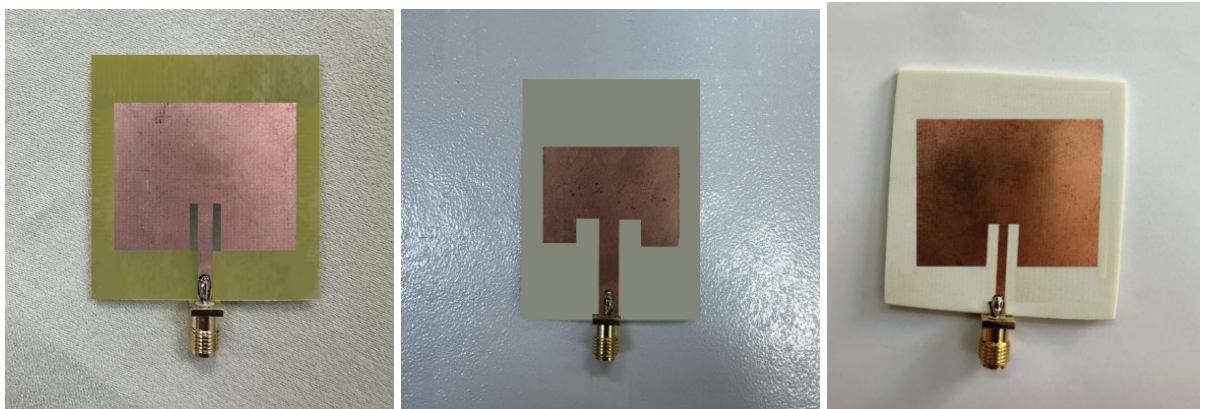
Şekil 2.15. Antenin Alt Tabakasının Kesimi

Bu aşamadan sonra Şekil 2.17'deki gibi baskı yapılan antenlerin yama ve toprak bölümü boyanarak asitle temizlendi.



Şekil 2.16. Baskısı Yapılmış MYA

Bu aşamadan sonra antenlerin beslenme noktasına Sma 180C konektörü lehimlenerek son şekline ulaşılmıştır (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. a) FR4 Alt Tabakalı MYA, b) Rogers3006 Alt Tabakalı MYA, c) Rogers4003C Alt Tabakalı MYA

Üretilen antenlerin kısa devre testi yapılarak, Şekil 2.18'deki ZVL-NETWORK ANALYZER cihazı ile her bir anten için ölçüm değerleri elde edilmiştir.



Şekil 2.18. ZVL-NETWORK ANALYZER

Bu bölümde RF enerji hasadına yönelik farklı seramik malzemeler üzerine tasarlanan ve üretilen mikroşerit anten performanslarının temel anten fiziksel ve elektriksel parametrelerine uygunluğunun değerlendirilmesi amacıyla yürütülen bu çalışma için benimsenen temel araştırma yöntemi yöntemsel literatür eşliğinde kapsamlı olarak sunulmuştur. Bundan sonraki bölümde tasarım verileriyle karşılatırmak ve değerlendirmelerde bulunmak amacıyla üretilen mikroşerit yama antenlere yönelik elektriksel parametreler sunulmaktadır.

3. BULGULAR

Bu çalışmanın bulguları tasarım ve üretim sürecinden elde edilen verilerden oluşmaktadır. Tasarım sürecine ait bulgular bu süreçte yapılan çalışma ve optimizasyonun daha iyi anlaşılması için yöntem bölümünde tasarlanan antenlerin elektriksel parametrelerinin belirlenmesi başlığı altında başlık 2.2.5'te ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

Üretilen FR4, Rogers3006 ve Rogers4003C tabakalı mikroşerit antenlere ait veriler ise, bu başlık altında ilgili ölçümler ve görseller eşliğinde kapsamlı olarak sunulmaktadır.

3.1 Üretilen FR4 Alt Tabakalı Mikroşerit Anten Verileri

Alt tabakası FR4 malzemesi olan mikroşerit antenin 1GHz – 4GHz aralığında ölçümüyle üretilen antenin 2.42 GHz frekansında geri dönüş kaybı (S_{11}) -18.94dB (Şekil 3.1), empedansı 49.1Ω ve VSWR değeri 1.27 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.1. FR4 Alt Tabakalı MYA Ölçümü (S_{11} değişimi)

Üretilen bu antenin VSWR değeri 1 ve 2 aralığında olduğundan dolayı ve geri dönüş kaybı (S_{11})'in -10'dan düşük olmasından dolayı çalışır yapıda olduğu görülmektedir.

3.2. Üretilen Rogers3006 Alt Tabakalı Mikroşerit Anten Verileri

Alt tabakası Rogers3006 malzemesi olan mikroşerit antenin 1GHz – 4GHz aralığında ölçümüyle üretilen antenin 2.35 GHz frekansında geri dönüş kaybı (S_{11}) - 14.32dB (Şekil 3.2), empedansı 39.2Ω ve VSWR değeri 1.87 olarak elde edilmiştir.

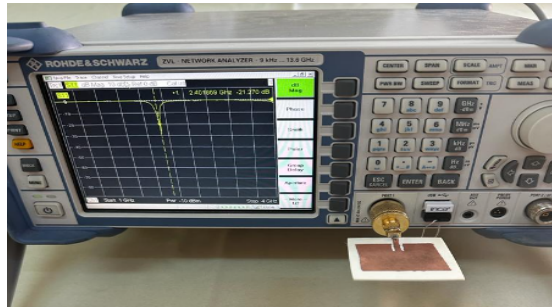


Şekil 3.2. Rogers3006 Alt Tabakalı MYA Ölçümü (S_{11} değişimi)

Üretilen bu antenin VSWR değeri yine 1 ve 2 aralığında olduğundan dolayı ve geri dönüş kaybı (S_{11})'in -10'dan düşük olmasından dolayı çalışır yapıda olduğu görülmektedir.

3.3. Üretilen Rogers4003C Alt Tabakalı Mikroşerit Anten Verileri

Alt tabakası Rogers4003C malzemesi olan mikroşerit antenin 1GHz – 4GHz aralığında ölçümüyle üretilen antenin 2.4 GHz frekansında geri dönüş kaybı (S_{11}) - 39.4dB (Şekil 3.3.), empedansı 46.18Ω ve VSWR değeri 1.059 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.3. Rogers4003C Alt Tabakalı MYA Ölçümü (S_{11} değişimi)

Üretilen bu antenin VSWR değeri yine 1 ve 2 aralığında olduğundan dolayı ve geri dönüş kaybı (S_{11})'in -10'dan düşük olmasından dolayı çalışır yapıda olduğu görülmektedir.

| Sermik Malzemeler | F_r (GHz) | S₁₁ (dB) | VSWR | Empedans (Ω) |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------|---------------------------------|
| FR4 | 2.42 | -18.94 | 1.27 | 49.1 |
| Rogers3006 | 2.35 | -14.32 | 1.87 | 39.2 |
| Rogers4003C | 2.41 | -39.4 | 1.059 | 46.18 |

Tablo 3.1. Üretilen Antenlere Ait Ölçüm Verileri

Yapılan çalışmada farklı malzemeler üzerinde tasarlanarak üretilen antenlere ait veriler kıyaslama ve değerlendirme etkinliklerine katkı sağlamak adına toplu halde Tablo 3.1'de sunulmuştur.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında 2.4 GHz frekansında FR4, Rogers 3006 ve Rogers 4003C gibi üç farklı seramik malzeme tabanlı ve hat besleme yöntemiyle anten tasarlanmış, simülasyon ve optimizasyon yapılmıştır. Yapılan simülasyon ve edilen optimizasyon ile ilgili antenlerin fiziki parametreleri belirlenmiştir. Tasarım sürecine dair veriler ilgili sürecin daha iyi anlaşılması için Materyal ve Yöntem bölümünde sunulmuştur. Son aşamada tasarlanan antenlerin üretimi yapılarak ZVL-NETWORK ANALYZER’de ölçümleri yapılmıştır. Alınan simülasyon verileri ve üretim değerleri Bulgular bölümünde kapsamlı olarak verilmiş olup, Tablo 4.1’de karşılaştırma ve değerlendirmeye katkı sağlamak için tasarım verileriyle birlikte sunulmuştur. Elde edilen bulguların değerlendirilmesiyle ulaşılan sonuçlar bu bölümde maddeler halinde sunulmaktadır.

| | Seramik Malzemeler | Z (Ω) | F _r (GHz) | S ₁₁ (dB) | VSWR |
|--------------------------------|--------------------|----------------|----------------------|----------------------|-------|
| Simülasyon Verileri 2.45GHz | FR4 | 50 | 2.4 | -17 | 1.7 |
| | Rogers3006 | 50 | 2.4 | -19 | 1.43 |
| | Rogers4003C | 50 | 2.4 | -16 | 1.28 |
| Üretim Verileri 2.45GHz | FR4 | 49.1 | 2.42 | -18.94 | 1.27 |
| | Rogers3006 | 39.2 | 2.35 | -14.32 | 1.87 |
| | Rogers4003C | 46.18 | 2.41 | -39.4 | 1.059 |

Tablo 4.1. Tasarım ve Üretim Verileri

- Tablo 4.1 genel olarak değerlendirildiğinde üretilen antenlerin tasarıma uygun olarak öngörüldüğü şekilde çalışır bir yapıda olduğu görülmektedir. Bu nedenle anten geometrisi, frekansı, dielektrik malzemesi ve besleme yöntemini içeren tasarım parametrelerinin ve tasarım yazılımının doğru seçildiği söylenebilir.
- Yapılan teorik ve yöntemsel literatür araştırmasının bu çalışmaya olumlu katkılar sağladığı söylenebilir. Bunun yanında anten parametrelerinin iyileştirilmesi için yapılan optimizasyonlarda uzman görüşlerinin alınmasının elde edilen bulgulara olumlu katkılar sağladığı sonucuna varılmıştır.

Dikdörtgen geometriye sahip farklı tabanlar üzerine hat besleme yöntemiyle tasarlanan mikroşerit antenlerin belirlenen parametreleriyle HFSS programı üzerinde yapılan simülasyonu sonucunda Tablo 2.7’de ve Tablo 4.1’de sunulan elektriksel parametreler elde edilmiştir. Anten tasarım ve üretim elektriksel parametre verileri açısından yapılan değerlendirmelerde;

- Tasarım sürecinde belirlenen giriş empedansı değerlerinin üretilen anten değerleriyle karşılaştırdığımızda en yüksek empedans uyumunun FR4 ve Rogers4003C alt tabakalı antenlerde olduğu görülmektedir. Bu durum her iki antenin en düşük kayıpla çalıştığı sonucunu göstermektedir.
- Literatüre dayalı olarak ve tasarımla belirlenen 2.4 GHz’lik frekans değerine en yakın çalışan antenlerin FR4 ve Rogers4003C alt tabakalı antenler olduğu sonucuna varılmıştır. Rogers3006 alt tabakalı antenin 2.4 GHz frekansta bir değer göstermediği ancak, 2.35 GHz’de verimli çalıştığı gözlemlenmiştir.
- Tasarlanan antenin verimli çalışacağına bir diğer göstergesi olan geri dönüş kaybı (S_{11}) değerlerinin -16, -17 ve -19 şeklinde -10’ dan küçük olmasından dolayı tasarlanan antenlerin ideal bir anten için beklenen değerlerde olduğu sonucuna ulaşılabilir. Geri dönüş kaybı değerleri açısından tasarıma en yakın değere sahip antenin üretim sonucunda S_{11Tsr} : -17dB ve $S_{11Ürt}$: -18.94dB değerleriyle FR4 alt tabakalı anten olduğu görülmektedir.
- Yapılan üretimler açısından geri dönüş kaybı değerleri incelenecek olursa, en verimli antenin -39.4 ile Rogers4003C alt tabakalı anten olduğu söylenebilir.
- Elektriksel parametrelerden duran dalga oranları VSWR açısından yapılan değerlendirmede, üretilen tüm antenlerin tasarıma paralel olarak çalışır yapıda olup öngörülen şekilde 1 ve 2 değeri aralığında olduğu görülmektedir.
- Bu bağlamda enerji hasadı için yapılan antenlerin fiziksel parametreleri ve elektriksel parametrelerine ilişkin tasarım ve üretim verileri toplu olarak değerlendirildiğinde Rogers3006 alt tabakalı hat beslemeli dikdörtgen şekilli mikroşerit antenin bu çalışmanın problemiyle ve amacıyla ifade edilen RF enerji hasadı için uygun nitelikte olduğu sonucuna ulaşılabilir.
- Mikroşerit anten tasarım ve üretim verileri fiziksel ve elektriksel parametreleri açısından genel olarak değerlendirildiğinde 2.4GHz frekans bölgesinde RF enerji

hasadı yapmak üzere tasarlanan ve geliştirilen antenlerden ilgili frekansa en yakın değerde çalışan antenin Rogers4003C olduğu ve bu antenin en verimli anten olması nedeniyle bu çalışma ile hedeflenen RF enerji hasadı için en uygun anten olduğu söylenebilir. Bunun yanında FR4 tabanlı mikroşerit anten verileri de Rogers4003C'ye en yakın değerlerde olup RF enerji hasadı için kullanılabilir özellik içerdiği görülmektedir.

Fiziksel parametreleri hesaplanarak tasarlanan ve elektriksel parametreleri belirlendikten sonra üretilen antene ait bulgular eşliğinde yürütülen bu çalışmada amaçlanan RF enerji hasadına yönelik antenlerin tasarımı ve üretimine dayalı olarak performanslarının değerlendirilmesidir.

Sistemin başarısı, ortamdaki elektromanyetik dalgaları toplayan antenlerin parametreleri yani, anten tasarımında kullanılan hesaplamalar ve antenin çalışma verimliliğini etkileyen faktörlerin belirlenmesine bağlıdır. Bu bağlamda tasarlanan sistemin başarılı olduğu söylenebilir.

RF enerji hasadında kullanılacak antenlerin küçük ve taşınabilir olması, enerji toplayan devre sistemlerinin tasarımında önemli bir adımdır. Küçük boyutlu antenler, taşınabilir cihazlarda enerji hasadının uygulanabilmesini sağlar. Bu nedenle, düşük güç tüketen cihazların enerji ihtiyaçlarını karşılamak için ideal bir seçenek olarak öne çıkar.

Genel açıdan değerlendirildiğine, radyo frekanslarından enerjinin hasat edilmesi amacına katkı sağlayacak bu çalışmayla elde edilen sonuçlar gelecekte enerjiye olan ihtiyaç için yararlanılacak kablosuz güç iletimi yöntemlerinden birisi olarak görülebilir.

Diğer yandan evirici kart vb. gerekli ilave bileşenlerin temini veya geliştirilmesiyle RF enerji hasadı üzerine verilerin elde edilmesi, yürütülen bu çalışmanın amacı gereğince çalışma kapsamı dışında tutulmuştur.

4.2. Öneriler

Yürütülen bu çalışmada literetürde yaygın olarak kullanılması ve daha pratik olmasından dolayı yama şekilli dikdörtgen anten seçilmiştir. Ancak bu çalışmayla seçilen frekans bölgesi için farklı geometriye sahip antenler de kullanılabilir. Bununla birlikte yürütülen bu çalışma erişilebilen dielektrik malzemelerle gerçekleştirilmiştir. Ancak,

yapılacak olan RF enerji hasadı için uygun antenin fiziksel parametrelerini değiştirerek farklı yapılarda ve farklı alt tabaka malzemeleri kullanılarak farklı antenler tasarlanmalı ve sonuçları bu çalışma ile karşılaştırılmalıdır.

Mikroşerit anten tasarlama süreci, dikkatli planlama, simülasyonlar, ölçümler ve bir dizi optimizasyon adımlarını içerir. Uygulamaya özgü gereksinimleri ve performans hedeflerini dikkate alarak, başarılı bir mikroşerit anten tasarımı gerçekleştirmek için bu çalışmayla benimsenen literatüre ve uzman görüşlerine yer verme yöntemi bu alandaki daha az deneyimli araştırmacılara önerilmektedir.

Çevredeki elektromanyetik dalgalardan enerji hasat eden sistemlerden yüksek verim alabilmek için, alıcı/verici antenin izolasyonu iyi yapılmalıdır. Anten seçimi, bant genişliği ve güç yayılmalarından dolayı sınırlamaya uğradığından seçilecek antenin hem yüksek bir kazanç hem de geniş bir bant genişliğine sahip olması gerekmektedir. Aynı zamanda daha iyi sonuçlar elde edebilmek için çoklu besleme yapılabilir. Dairesel polarizasyon oranı artırılabilir. Tasarımları gerçekleştirilen antenlerin toprak düzlemi boyutları küçültülebilir. Bununla birlikte ilgili sonuçlar için yapılan değerlendirmelerde;

- Tasarım sürecinde belirlenen giriş empedansı değerlerinin üretilen anten değerleriyle karşılaştırdığımızda en yüksek empedans uyumunun FR4 ve Rogers4003C alt tabakalı antenlerde olmasından ve her iki antenin en düşük kayıpla çalışmasından dolayı dikdörtgen yapılı ve hat beslemeli olarak tasarlanan antenler için FR4 ve Rogers4003C dielektrik malzemelerinin önerilebilir yapıda olduğu söylenebilir.
- Benzer şekilde hedeflenen frekans bölgesinde RF enerji hasadı yapmak için tasarlanacak ve geliştirilecek antenler için bu araştırmada kullanılan tüm dielektrik malzemeler önerilebilir yapıdadır.
- Üretim sonucu elde edilecek anten elektriksel parametrelerinde beklenmeyen sonuçlarla karşılaşmamak ve tasarım değerlerine en yakın değerlerin beklendiği durumlar için FR4 malzemesinin tercih edilmesi önerilebilir.

İlgili sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde bu ve benzeri çalışmalarla geliştirilen MYA'ların RF enerji hasadı için yürütülecek diğer çalışmalarda özellikle

farklı ortam RF yoğunluklarında kullanılmasının ilgili antenlerin uygulanabilirliği açısından önemli görölmektedir.



KAYNAKLAR

- Ali, N. and Hekal, S. S. 2022, Rectenna design for radio frequency wireless energy harvesting. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, 8 (4), 91-96.
- Adair, E. R. and Black, D. R., 2003, Thermoregulatory responses to RF energy absorption, *Bioelectromagnetics Journal Supplement 6*, 17-38.
- Agrawal S., Gupta RD, Parihar M. S. and Kondekar P. N., 2017, A wideband high gain dielectric resonator antenna for RF energy harvesting application. *AEU - Int J Electron Commun* 78, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2017.05.018>
- Aguilar, A. G., van Tonder, J., Jakobus, U., and Illenseer, F., 2015, Overview of recent advances in the electromagnetic field solver FEKO, *9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, IEEE, April, 2015, Lisbon, Portugal, 1-5.
- Arpanutud,K.; Tontisirin, T.; Chudpooti, N. and Chalermwisutkul, S., Estimation of harvested rf energy based on survey of ambient RF power for optimized rectifier design, *Wireless Communications and Mobile Computing*, Volume 2022, Article ID 1755053
- Arrawatia M, Baghini M. S. and Kumar G., 2015, Differential microstrip antenna for RF energy harvesting, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 63, 581–1588. <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2399939>.
- Bakır, M., 2018, Metamalzeme tabanlı çok bantlı enerji hasadı uygulaması, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20 (1), 517-538.
- Balashov, E. V., 2020, Top-down Design of integrated transceiver: peculiarity and teaching method using (EDA) advanced design system (ADS). *Computing, Telecommunication and Control*, 13 (2), 24–34.
- Balanis, C. A., 2016, *Antenna theory: Analysis and design*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Behera B. R., Srikanth P., Meher P. R. and Mishra S. K., 2020, A compact broadband circularly polarized printed monopole antenna using twin parasitic conducting strips and rectangular metasurface for rf energy harvesting application. *AEU – Int. J. Electron Commun.*, June 2020, 120, 153233. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2020.153233>.
- Belen, M. A. (2018). Ultra geniş bant uygulamaları için düzlemsel hat beslemeli mikroşerit anten tasarımı. *Gazi University Journal of Science, Part C: Design and Technology*, 6 (4), 938-946.

- Bulat, B., 2021, Uzay platformlarına yönelik bir termofotovoltaik güç sistemi tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Bito J., Kim S., Tentzeris M. and Nikolaou S., 2014, Ambient energy harvesting from 2-way talkradio signals for “smart” meter and display applications. *Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, 1353–1354. <https://doi.org/10.1109/APS.2014.6905002>.
- Calautit K., Nasir D. S. N. M. and Hughes B. R., 2021, Low power energy harvesting systems: State of the art and future challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 147, 111230. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111230>.
- Çetin, H. (2021). RF enerji hasadında kullanılacak mikroşerit yama anten tasarımının gerçekleştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Dundar, O., Koyuncu, B. and Ozcelik, H., 2021, Microstrip patch antenna system design for in-cabin wireless communications and internet services. *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*, 14, 8-14.
- Dhar A., Pattanayak P., Kumar A., Gurjar D. S. and Kumar B., 2022, Design of a hexagonal slot rectenna for RF energy harvesting in Wi-Fi/WLAN applications. *Int. J. RF Microw. Comput. Eng.*, 32, 1–14. <https://doi.org/10.1002/mmce.23512>.
- El Mrabet, O., 2006, High Frequency Structure Simulator (HFSS) Tutorial, *IETR, UMR CNRS*, Rennes, France.
- Elwi T. A., 2019, Novel UWB printed metamaterial microstrip antenna based organic substrates for RF energy harvesting applications. *AEU – Int. J. Elect. Comm.* 101, 44 – 53. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.01.026>.
- Fan K., Cai M., Wang F., Tang L., Liang J., Wu Y., et al., 2019, A string-suspended and driven rotor for efficient ultra-low frequency mechanical energy harvesting, *Energy Conv. Manag.*, 198, 111820.
- Galoić A., Ivšić B., Bonefačić D. and Bartolić J., 2016, Wearable energy harvesting using wideband textile antennas. *10th Eur. Conf. Antennas Propagation, EuCAP.2016:14–8*. <https://doi.org/10.1109/EuCAP.2016.7481416>.
- Gokul, S. V., Lakshmi, M. S., & Swetha, T. (2020). Design of RF energy harvesting antenna using optimization techniques. *Int. J. Eng. Res*, 9 (3), 595-601.

- Güngörer, B., Kayabaşı, A., and Tekbaş, M., 2019, Wlan uygulamaları için besleme metotları farklı dairesel mikroşerit anten benzetimi ve üretimi. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 1 (1), 120-127.
- Hamed, I., 2022, Design and evaluation of ambient RF energy harvesting platform for sensor-based systems: An experimental study of RF energy harvesting. *Degree Project in Electrical and Electronic Engineering*, Stockholm, Sweden.
- Hardell, L. and Sage, C., 2008, Biological effects from electromagnetic field exposure and public exposure standards, *Biomed. Pharmacother*, 62 (2), 104-109.
- Hughes T. P. and Dibner B., 1962, Oersted and the discovery of electromagnetism. *Technol. Cult.*, 3, 92. <https://doi.org/10.2307/3100806>.
- Hızal, A., Koç, S. S., Hatipoğlu, E., Halavut, E., Aydın Çivi, H. Ö. and Alatan, L., 2002, “Adaptif anten dizileri,” 2002. Accessed: 06, 2023. [Online]. Available: <https://app.trdizin.gov.tr/publication/project/detail/TnpBek13PT0>. [Ziyaret Tarihi: 6 Ağustos 2023]
- Isayev, M., 2021, Farklı yapılarıdaki seramik malzemelerin mikroşerit anten olarak tasarımları ve elektriksel performanslarının analizi, *Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*.
- İnce, M. E., Kurnaz, C., and Çam, E., 2023, Design and analysis of log-periodic dipole antenna with wideband and small size for RF energy harvesting. *IEEE, 31st Signal processing and communications applications conference (SIU)*, 1 – 4, İstanbul, Türkiye.
- İmamoğlu, F., 2019, Mikroşerit antenlerin tasarım ve performans optimizasyonu, *Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa*.
- Jäger-Waldau A. 2017, Snapshot of photovoltaics – March 2017. *Sustainability* 9, 1–9. <https://doi.org/10.3390/su9050783>.
- Jain S., Mishra P. K., Thakare V. V. and Mishra J., 2018, Design and analysis of moisture content of hevea latex rubber using microstrip patch antenna with DGS. *Mater. Today Proc.*, 29, 556–60. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.312>.
- Jasim S. E., Jusoh M. A., Mazwir M. H. and Mahmud S. N. S., 2015, Finding the best feeding point location of patch antenna using HFSS, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10 (23), 17444 – 17449.
- Kasar, Ö., 2019, Geniş bantlı enerji hasatlama devrelerinin tasarımı ve gerçekleştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta*.

- Keser, Ö. F., Yenisoy, A., and İdare, B., 2017, Development of space qualified microlens arrays for solar cells used on satellite power systems. *Sakarya University Journal of Science*, 21(4), 627-635.
- Keskin, S. E. B., 2019, 2.4 Ghz Geniş Bant Mikroşerit Anten Tasarımı. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 5(1), 1-14.
- Kumar A., Kallollu Narayaswamy N., Venkatesh Kumar H., Mishra B, Azam Siddique S. and Kumar Dwivedi A., 2021, High-isolated WiFi-2.4 GHz/LTE MIMO antenna for RF-energy harvesting applications. *AEU – Int. J. Elect. Commun.* 141,153964. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2021.153964>.
- Kuşulay, İ., and Toktaş, A., 2019, C ve X-Bant Uygulamaları İçin Kompakt Ultra Geniş Bant Dirgen Şekilli Mikroşerit Anten Tasarımı, *Elektrik Elektronik Mühendisliği Kongresi 2019 (EEMKON2019)*, 405 – 409, İstanbul.
- Kütük, H., Teşneli, A. Y. ve Teşneli, N. B., 2000, 3.3 GHz mikroşerit anten tasarımı ve farklı besleme yöntemleri için analizi. *Sakarya University Journal of Science*, 17 (1), 119-124.
- Lai Z., Wang S., Zhu L., Zhang G., Wang J. and Yang K., 2021, A hybrid piezo-dielectric wind energy harvester for high- performance vortex-induced vibration energy harvesting. *Mech. Syst. Signal Process.* 150, 107212. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.107212>.
- Leonov V., 2013, Thermoelectric energy harvesting of human body heat for wearable sensors, *IEEE Sensors Journal*, 13, 2284 – 2291. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2252526>.
- Liang H., Hao G. and Olszewski O. Z., 2021, A review on vibration-based piezoelectric energy harvesting from the aspect of compliant mechanisms. *Sensors Actuators A: Physical*, 331, 112743. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112743>.
- Lu X., Wang P., Niyato D., Kim D. I. and Han Z., 2015 Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey, *IEEE Commun. Surv. Tutorials* 17, 757–789. <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2368999>.
- Marincic A. S., 1982, Nikola Tesla and the wireless transmission of energy. *IEEE Trans. Power Appar. Syst.* 4064–4068. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1982.317084>.
- Mejjaouli S., Babiceanu R. F., 2015, RFID-wireless sensor networks integration: Decision models and optimization of logistics systems operations, *J. Manuf. Syst.* 35, 234 – 245. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.02.005>.

- Muhammad, S., Tiang, J. J., Wong, S. K., Smida, A., Ghayoula, R., and Iqbal, A., 2021, A dual-band ambient energy harvesting rectenna design for wireless power communications. *IEEE Access*, 9, 99944-99953.
- Mishra R., 2016, An overview of microstrip antenna, *HCTL Open International Journal of Technology Innovations and Research (IJTIR)*, 21 (2), 39 – 55. <https://doi.org/10.5281/zenodo.161524>.
- Ng D.W. K., Lo E. S. and Schober R., 2013, Wireless information and power transfer: Energy efficiency optimization in OFDMA systems. *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, 12, 6352–6370. <https://doi.org/10.1109/TWC.2013.103113.130470>.
- Orecchini G., Yang L., Tentzeris M. M., and Roselli L., 2011, Wearable battery-free active paper printed RFID tag with human-energy scavenger. *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.* 15–18, Baltimore, MD, USA. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2011.5972808>.
- Öztürk, E., 2021. Enerji hasadı ile nesnelerin interneti uygulaması *Yüksek Lisans Tezi, Maltepe Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, İstanbul.
- Paul D. L., Paterson M. G., and Hilton G.S., 2012, A low-profile textile antenna for reception of digital television and wireless communications. *IEEE Radio Wirel. Symp.* 51 – 54. <https://doi.org/10.1109/RWS.2012.6175344>.
- Pozar D. M., 1996, A Review of aperture coupled microstrip antennas : history, operation, development, and applications, *Internet Archive of Univ. Massachusetts at Amherst*, archived at <http://www.ecs.umass.edu/ece/pozar/aperture.pdf>.
- Rautio, J. C., 2011, Recent technology developments in the Sonnet suites of planar electromagnetic analysis software. *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, 2720-2723, Spokane, WA, USA
- Sankaralingam S., and Gupta B., 2009, A circular disk microstrip WLAN antenna for wearable applications. *2009 Annual IEEE India Conference*, 3 – 6, Ahmedabad, India. <https://doi.org/10.1109/INDCON.2009.5409355>.
- Saxena P., Ranjan R. and Gupta K., 2016, Design and analysis of frequency agile elliptical patch microstrip antenna. *Int. Conf. Innov. Challenges Cyber Secur.* 289 – 293, Greater Noida, India. <https://doi.org/10.1109/ICICCS.2016.7542338>.
- Sezer N. and Koç M., 2021, Nano energy a comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting. *Nano Energy*, 80, 105567. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105567>.

- Shetty, S. and Patel, P., 2017, Wireless transmission of electrical energy from a tesla coil using the principle of high voltage, high frequency resonance-a theoretical. *Int. J. Electr. Eng. Technol*, 8, 61-66.
- Sichak S., 2000, Panel perspectives on system architectures, *Paper presented at the RTO SCI Symposium on "System Concepts for Integrated Air Defense of Multinational Mobile Crisis Reaction Forces"*, held in Valencia, Spain, 22 – 24, and also published in *RTO MP-063 - Research and Technology Organization Meeting Proceedings – 63* at 2021.
- Sickel, T., Woods, B., Brand, K., and Barnard, D., 2015, Making better antenna design choices with antenna magus. *IEEE – 9th European conference on antennas and propagation (EuCAP)*, 1-5, South Africa.
- Siddique A. R. M., Rabari R., Mahmud S. and Van Heyst B., 2016, Thermal energy harvesting from the human body using flexible thermoelectric generator (FTEG) fabricated by a dispenser printing technique. *Energy*, 115, 1081–1091. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.087>.
- Song C., Huang Y., Carter P., Zhou J., Joseph S. D. and Li G., 2018, Novel compact and broadband frequency-selectable rectennas for a wide input-power and load impedance range, *IEEE Trans. Antennas Propag.* 66, 3306–1336. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2826568>.
- Sreelekshmi S., Perumal Sankar S., 2022, A square ring and single split resonator based wearable antenna for microwave energy harvesting for IoT nodes. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102217. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102217>.
- Sun W., Liu H., Zhang C., Zhang S. and Wu J., 2013, Design, position error analysis and adjustment of antenna array for geostationary interferometric microwave sounder, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS*, 390–393, Melbourne, VIC, Australia. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2013.6721174>.
- Taghadosi M., Albasha L., Qaddoumi N. and Ali M., 2015, Miniaturised printed elliptical nested fractal multiband antenna for energy harvesting applications. *IET Microwaves, Antennas Propag.*, 9, 1045 – 1053. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2014.0744>.
- Tao J. X., Viet N. V., Carpinteri A. and Wang Q., 2017, Energy harvesting from wind by a piezoelectric harvester. *Eng. Struct.* 133, 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.12.021>.

- Taner, A. C., 2023, *Radyoizotop termoelektrik jeneratör (Radioisotope Thermoelectric Generator – RTG) inovasyon teknolojili plutonyum 238 atom yakıtlı robot uzay araçları* [online], <https://www.fmo.org.tr/wp-content/uploads/2011/07/Radyoizotop-Termoelektrik-Jeneratör-Radioisotope-Thermoelectric-Generator---RTG-İnovasyon-Teknolojili-Plutonyum-238-Atom-Yakıtlı-Robot-Uzay-Araçları.pdf> [Ziyaret Tarihi: 6 Ağustos 2023]
- Toyabur R. M., Salauddin M., Cho H. and Park J. Y., 2018, A multimodal hybrid energy harvester based on piezoelectric- electromagnetic mechanisms for low-frequency ambient vibrations. *Energy Convers. Manag.*, 168, 454 – 466. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.018>.
- Toktaş, A., 2019, Küçük boyutlu saçak açıklıklı ve toprak düzleminde boşluk açılmış geniş bant mikroşerit anten tasarımı. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 1(1), 70-78.
- Tokgöz, E., 2019, Kablosuz haberleşme uygulamaları için frekansı ayarlanabilir mikroşerit anten tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antalya.
- Vandenbosch G. A. E. and Ma Z., 2012, Upper bounds for the solar energy harvesting efficiency of nano-antennas. *Nano Energy*, 1, 494–502. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2012.03.002>.
- Valberg, P. A., Van Deventer, T. E. and Repacholi, M. H., 2007, Workgroup report: Base stations and wireless networks-radiofrequency (RF) exposures and health consequences, *Environmental Health Perspectives*, 115 (3), 416-424.
- Wikipedia, 2023, Fotoğraf [Online], https://tr.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla. [Ziyaret Tarihi: 20 Mayıs 2023].
- Wu N., Bao B. and Wang Q., Review on engineering structural designs for efficient piezoelectric energy harvesting to obtain high power output. *Eng. Struct.*, 235, 112068. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112068>.
- Yalçın, A. B., 2021, Çok bantlı RF enerji hasadı, *Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Aksaray.
- Yang L., Martin L., Staiculescu D., Wong C. P. and Tentzeris M. M., 2008, A novel flexible magnetic composite material for RFID, Wearable RF and bio-monitoring applications. *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp.*, 963–966, Atlanta, GA, USA. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2008.4632994>.

- Yerlikaya, M., 2021, 5G mobil terminaller için yüksek kazançlı ve çoklu bant frekans seçici anten sistemi tasarımı, *Doktora Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Yousefaturk, H. ve Cansız, M. (2022). RF enerji hasatlama için 915 MHz taşıyıcı frekansında mikroşerit anten tasarımı ve uygulaması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 13 (3), 531-539.
- Zhang, N., Han, M., Wang, G., Zhao, Y., Gu, W., Zhou, M., ... ve Ji, G., 2021, Achieving broad absorption bandwidth of the Co/carbon absorbers through the high-frequency structure simulator electromagnetic simulation, *Journal of Alloys and Pound*, 883, 160918
- Zhang, X., Ho, S. L. and Fu, W., 2016, HW-04 Optimal Design and analysis of wireless power transfer system coupled with power source. *2015 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG)*, 1-1. <https://doi.org/10.1109/INTMAG.2015.7157759>.