



**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

HÜCRESEL HABERLEŞME FREKANSLARINDA RF ENERJİ HASAT SİSTEMİNİN TASARIMI VE UYGULANMASI

Yüksek Lisans Tezi

Muhammet Emin İNCE

Danışman
Doç. Dr. Çetin KURNAZ

II. Danışman
Prof. Dr. Ertuğrul ÇAM

SAMSUN
2023

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



HÜCRESEL HABERLEŞME FREKANSLARINDA RF ENERJİ HASAT SİSTEMİNİN TASARIMI VE UYGULANMASI

Yüksek Lisans Tezi

Muhammet Emin İNCE

Danışman

Doç. Dr. Çetin KURNAZ

II. Danışman

Prof. Dr. Ertuğrul ÇAM

SAMSUN
2023

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammet Emin İNCE tarafından, **Doç. Dr. Çetin KURNAZ** danışmanlığında hazırlanan “**HÜCRESEL HABERLEŞME FREKANSLARINDA RF ENERJİ HASAT SİSTEMİNİN TASARIMI VE UYGULANMASI**” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 4.9.2023 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	Sonuç
Başkan	Dr. Öğr. Üyesi Ayhan YAZGAN Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Elektronik Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Doç.Dr. Çetin KURNAZ Ondokuz Mayıs Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Elektronik Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Begüm KORUNUR ENGİZ Ondokuz Mayıs Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Elektronik Ana Bilim Dalı	☒ Kabul ☐ Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

Prof. Dr. Ahmet TABAK
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Yüksek Lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evet ☐ (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır ☒

06 /10 / 2023

Muhammet Emin İNCE

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : HÜCRESEL HABERLEŞME FREKANSLARINDA RF ENERJİ HASAT SİSTEMİNİN TASARIMI VE UYGULANMASI

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 06/07/2023 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 9

Tek kaynak oranı : % 2 çıkmıştır.

06 /10 / 2023

Doç. Dr. Çetin KURNAZ

ÖZET

HÜCRESEL HABERLEŞME FREKANSLARINDA RF ENERJİ HASAT SİSTEMİNİN TASARIMI VE UYGULANMASI

Muhammet Emin İNCE
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Yüksek Lisans, Eylül/2023
Danışman: Doç. Dr. Çetin KURNAZ

RF Enerji hasadı teknolojisi, kablosuz cihazların ve sensörlerin kullanımının yaygınlaştığı günümüzde büyük ilgi görmektedir. Enerji ihtiyacını bataryalardan sağlama imkanı olmayan uygulamalar için kolay ve ücretsiz enerji sağlamaktadır. Bu nedenle dünyadaki en çok araştırma konularından biri haline gelmiştir. Bu tezde, dört farklı frekansta, rektenna (anten ve doğrultucu devre) ve eşleme devresinden oluşan çok bantlı RF enerji hasat sisteminin tasarımı sunulmaktadır. Mikroşerit geniş bantlı log-periyodik dipol anten, GSM (Global System for Mobile Communications) dahil olmak üzere UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) ve LTE (Long-Term Evolution) frekanslarını içeren çok bantlı sinyalleri toplamak için tasarlanmıştır. Tasarlanan anten 0,78 GHz ile 3,1 GHz aralığında iyi bir geri dönüş kaybı performansına sahiptir. Önerilen antenin tasarımı ve performans optimizasyonu bilgisayar simülasyon yazılımı CST Studio Design yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Anten simüle edilmiştir ve simülasyonlar sonucunda 6,3 dBi gibi tatmin edici bir tepe kazancı elde edilmiştir. Antenin fabrikasyonu gerçekleştirilmiş olup geri dönüş kaybı için, simülasyon verileri ile VNA verileri uyum içindedir. Sonraki aşama olarak, RF' den DC' ye dönüşüm ve yüksek voltaj çıkışı elde etmek için doğrultucu devreler önerilmiştir. RF enerjisini DC çıkışa dönüştürmek için SMS7630-005LF Schottky diyotları kullanan üç aşamalı voltaj katlayıcı doğrultucu devreleri tasarlanmıştır. Tasarımda T tipi toplu elemanlar eşleştirme tekniği dört bant için de kullanılmıştır. Tasarımda Advanced Design System (ADS 2019) yazılımı kullanılarak çok bantlı doğrultucular için kullanılan T tipi toplu eleman eşleme ağı ile GSM-900/1800, UMTS-2100 ve LTE-2600 frekanslarında rezonansa getirilmiştir. Ayrıca RF-DC maksimum dönüşüm verimlilikleri 900 MHz için %78, 1800 MHz için %79, 2100 MHz için %75 ve 2600 MHz için ise %68' dir. Doğrultucu çıkış gerilimleri ise her bir frekans için maksimum 5.6 V' dur. Tasarımı tamamlanan RF enerji hasat sistemi dış ortam ve iç ortam ölçümleri yapılmıştır. İç ortamda 900 MHz frekansı için yapılan ölçümlerde, -3 dBm giriş gücü için 3.1 V' dur. Ayrıca iç ortam ölçümlerinin simülasyon sonuçları ile benzer olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: RF enerji hasadı, RF doğrultucu, Yama anten, Log periyodik dipol anten, CST, ADS

ABSTRACT

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF RF ENERGY HARVESTING SYSTEM IN CELLULAR COMMUNICATION FREQUENCIES

Muhammet Emin İNCE
Ondokuz Mayıs University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrics and Electronics Engineering
Master, September/2023
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Çetin KURNAZ

RF energy harvesting technology is of great interest today, where the use of wireless devices and sensors has become widespread. It provides easy and free energy for applications that do not have the opportunity to provide energy from batteries. For this reason, it has become one of the most researched topics in the world. In this thesis, the design of a multiband RF energy harvesting system consisting of rectenna (antenna and rectifier circuit) and matching circuit at four different frequencies is presented. The microstrip wideband log-periodic dipole antenna is designed to harvest multiband signals including GSM (Global System for Mobile Communications), UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) and LTE (Long-Term Evolution) frequencies. The designed antenna has good return loss performance in the range from 0.78 GHz to 3.1 GHz. The design and performance optimisation of the proposed antenna is carried out using the computer simulation software CST Studio Design. The antenna is simulated and a satisfactory peak gain of 6.3 dBi is obtained from the simulations. The antenna has been fabricated and the simulation data and VNA data are in agreement for return loss. As the next step, rectifier circuits are proposed for RF to DC conversion and high voltage output. Three-stage voltage doubler rectifier circuits using SMS7630-005LF Schottky diodes are designed to convert RF energy to DC output. T-type lumped element matching technique is used for all four bands. The design was resonant at GSM-900/1800, UMTS-2100 and LTE-2600 frequencies with the T-type bulk element matching network used for multiband rectifiers using Advanced Design System (ADS 2019) software. In addition, RF-DC maximum conversion efficiencies are 78% for 900 MHz, 79% for 1800 MHz, 75% for 2100 MHz and 65% for 2600 MHz. Rectifier output voltages are maximum 5.6 V for each frequency. Outdoor and indoor measurements of the designed RF energy harvesting system were performed. The indoor measurements for 900 MHz frequency are 3.1 V for -3 dBm input power. It is also observed that the indoor measurements are similar to the simulation results.

Keywords: RF energy harvesting, RF rectifier, Patch antenna, Log-periodic dipole antenna, CST, ADS

ÖN SÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Çetin KURNAZ' a ve ikinci danışmanım sayın Prof. Dr. Ertuğrul ÇAM' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez sürecinde desteğini esirgemeyen bölüm başkanım Doç. Dr. Alırza KALELİ' ye teşekkürlerimi borç bilirim. Ayrıca tez sürecim boyunca maddi ve manevi desteklerini arkamda hissettiğim aileme teşekkür ederim.

Muhammet Emin İNCE

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Taraması	2
1.2. Tezin Amacı	10
2. GENEL BİLGİLER	11
2.1. RF Enerji Hasadı	11
2.2. Anten Teorisi	12
2.3. Maxwell Denklemleri	13
2.4. Antenlerin Temel Özellikleri	15
2.4.1. Işıma Örüntüsü	15
2.4.2. Işın Genişliği	16
2.4.3. Anten Yönlülüğü	16
2.4.4. Anten Kazancı	17
2.4.5. Geri Dönüş Kaybı	18
2.4.6. Bant Genişliği	18
2.4.7. Anten Polaritesi	19
2.5. Anten Çeşitleri	20
2.5.1. Mikroşerit Anten	20
2.5.2. Geniş Bantlı Anten	22
2.5.2.1. Log-Periyodik Anten	22
2.5.2.2. Yagi-Uda Anten	23
2.5.2.3. Vivaldi Anten	23
2.6. Hücresel Haberleşme Frekansları	24
2.6.1. GSM-900/1800	25
2.6.2. UMTS-2100	25
2.6.3. LTE-2600	25
2.7. Emmedans Eşleme Devresi	26
2.7.1. Empedans Eşleme Teknikleri	26
2.7.1.1. Toplu Öğeli Empedans Eşleme	26
2.7.1.2. Dağıtılmış Öğeli Empedans Eşleme	28
2.8. Doğrultucu Devresi	28
2.8.1. Yarım Dalga Doğrultucu	29
2.8.2. Tam Dalga Doğrultucu	29
2.8.3. Gerilim Katlayıcı Doğrultucu	29
2.8.4. Çok Kademeli Doğrultucu	30
2.8.4.1. Villard Doğrultucu	31
2.8.4.2. Dickson Doğrultucu	32
2.8.5. Schottky Diyot	32
3. MATERYAL VE YÖNTEM	33

3.1. Yazılım Gereksinimleri	33
3.1.1. CST Studio	33
3.1.2. Advanced Desing System.....	33
3.2. Donanım Gereksinimleri	35
3.2.1. Dielektrik Malzeme	35
3.2.2. SMA Konnektör	35
3.2.3. Shottky Diyot	36
3.2.4. Arduino Uno.....	37
3.2.5. Gerilim Sensörü.....	37
3.2.6. RF Explorer 6G Combo	38
3.3. Anten Tasarımı	39
3.4. Doğrultucu Tasarımı.....	44
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	48
4.1. Log-Periyodik Anten Analizleri	48
4.1.1. Geri Dönüş Kaybı	48
4.1.2. Işıma Deseni	49
4.1.3. Antenin Kazancı	50
4.1.4. Gerilim Durağan Dalga Oranı.....	52
4.1.5. Yüzey Akımları	53
4.1.6. Log-Periyodik Anten Fabrikasyonu ve Ölçümü	54
4.2. Doğrultucu Analizleri.....	56
4.2.1. Geri Dönüş Kaybı	56
4.2.2. Verimlilik.....	60
4.2.3. Çıkış Gerilimi	64
4.2.4. Çıkış Gücü	67
4.2.5. Doğrultucu Fabrikasyonu	69
4.3. Dış Ortam Ölçümleri	70
4.4. İç Ortam Ölçümleri	73
4.5. Genel Değerlendirme.....	74
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	77
KAYNAKÇA	79
ÖZ GEÇMİŞ.....	83

SİMGELER

2B	: İki boyut
Ω	: Ohm
3B	: Üç boyut

KISALTMALAR

dB	: Desibel
dB _i	: İzotropik ışımaya göre desibel değeri
dB _m	: Mili-Desibel
Hz	: Hertz
GHz	: Gigahertz
kHz	: Kiloherertz
Mbps	: Saniye başına megabit
MHz	: Megahertz
ms	: milisaniye
AC	: Alternatif akım
ADS	: Advanced Design System
DC	: Doğru akım
E	: Elektrik alan
EM	: Elektromanyetik
FNBW	: First Null Beam Width
GDDO	: Gerilim durağan dalga oranı
GSM	: Global System for Mobile Communications
HPBW	: Half Power Beam Width
LPDA	: Log-periyodik dipol anten
LTE	: Long Term Evolution
RF	: Radyo frekans
RL	: Return Loss
TV	: Televizyon
UMTS	: Universal Mobile Telecommunications System
VNA	: Vector Network Analyzer
WiFi	: Wireless Fidelity

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Çok katlı Dickson doğrultucu	3
Şekil 1.2. Çift bant doğrultucu	4
Şekil 1.3. ADS programında RF hasat sistemi tasarımı.....	5
Şekil 1.4. Çift bantlı monopol anten fabrikasyonu	5
Şekil 1.5. Üç bantlı doğrultucu fabrikasyonu.....	6
Şekil 1.6. Farklı bantlar için doğrultucu fabrikasyonları	7
Şekil 1.7. Anten ve doğrultucu ile açık ortam ölçümleri	8
Şekil 1.8. RF enerji hasat sistemi tasarımı	9
Şekil 1.9. Farklı frekanslar için doğrultucu fabrikasyonları	10
Şekil 2.1. RF enerji hasat sistemi	11
Şekil 2.2. İletim hattı ve verici modunda antenin Thevenin eşdeğeri.....	12
Şekil 2.3. Bir cihaz olarak anten	13
Şekil 2.4. Anten analizi için koordinat sistemi	15
Şekil 2.5. Bir anten elektrik alan deseninin radyasyon lobları ve ışın genişliği	16
Şekil 2.6. Geri dönüş kaybı grafiğinde -10 dB’ deki bant genişliği.....	19
Şekil 2.7. Doğrusal, dairesel ve eliptik olarak üç tip anten polarizasyonu	20
Şekil 2.8. Mikroşerit yama anten	21
Şekil 2.9. Log-periyodik dipol antenin görünüşü.....	22
Şekil 2.10. Vivaldi antenin görünüşü	24
Şekil 2.11. Türkiye’ deki mobil haberleşme frekansları	24
Şekil 2.12. Empedans eşleme devresi	26
Şekil 2.13. L tipi empedans eşleme devresi	27
Şekil 2.14. T tipi empedans eşleme devresi	27
Şekil 2.15. π tipi empedans eşleme devresi.....	28
Şekil 2.16. Basit doğrultucu devresi	29
Şekil 2.17. Gerilim katlayıcı	30
Şekil 2.18. Villard doğrultucu.....	31
Şekil 2.19. Dickson doğrultucu.....	32
Şekil 3.1. CST programının görünümü	33
Şekil 3.2. ADS programının görünümü	34
Şekil 3.3. SMA konnektör.....	35
Şekil 3.4. SMS7630-005LF Shottky diyotu.....	36
Şekil 3.5. Arduino Uno	37
Şekil 3.6. Gerilim sensörü.....	38
Şekil 3.7. RF Explorer 6G Combo	39
Şekil 3.8. Log-periyodik dipol için Carrel grafiği.....	39
Şekil 3.9. Birinci tasarım antenin ön ve yandan görünüşü.....	40
Şekil 3.10. Besleme hattı üzerine açılmış yarığın görüntüsü	42
Şekil 3.11. İkinci tasarım antenin ön ve arka yüzü	43
Şekil 3.12. Doğrultucu tasarımının blok diyagramı	45
Şekil 3.13. Üç katlı ve dört bantlı doğrultucu	46
Şekil 3.14. ADS programında sistemin tasarımı	47
Şekil 3.15. Doğrultucu devresinin baskı devre tasarımı	47
Şekil 4.1. Birinci tasarım antenin geri dönüş kaybı	48
Şekil 4.2. İkinci tasarım antenin geri dönüş kaybı	49
Şekil 4.3. Önerilen antenin ışıma deseni a) 0,8 GHz, b) 0,9 GHz, c) 1,8 GHz, d) 2,1 GHz, e) 2,6 GHz.....	50
Şekil 4.4. Birinci tasarım antenin kazancın frekansla değişimi	51

Şekil 4.5. İkinci tasarım antenin kazancın frekansla değişimi	52
Şekil 4.6. İkinci tasarım antenin gerilim durağan dalga oranı	53
Şekil 4.7. İkinci tasarım antenin yüzey akımlarının gösterimi a) 0,8 GHz, b) 0,9 GHz, c) 1,8 GHz, d) 2,1 GHz, e) 2,6 GHz	54
Şekil 4.8. Log-Periyodik antenin fabrikasyonu.....	55
Şekil 4.9. VNA ile Log-Periyodik antenin geri dönüş kaybı ölçümü	55
Şekil 4.10. Log-Periyodik antenin CST ve VNA sonuçları	56
Şekil 4.11. Doğrultucunun GSM-900 için geri dönüş kaybı.....	57
Şekil 4.12. Doğrultucunun GSM1800 için geri dönüş kaybı	58
Şekil 4.13. Doğrultucunun UMTS-2100 için geri dönüş kaybı	59
Şekil 4.14. Doğrultucunun LTE-2600 için geri dönüş kaybı	60
Şekil 4.15. Doğrultucunun GSM-900 için verimliliği	61
Şekil 4.16. Doğrultucunun GSM1800 için verimliliği.....	62
Şekil 4.17. Doğrultucunun UMTS-2100 için verimliliği	63
Şekil 4.18. Doğrultucunun LTE-2600 için verimliliği.....	63
Şekil 4.19. Doğrultucunun GSM-900 için çıkış gerilimi	64
Şekil 4.20. Doğrultucunun GSM1800 için çıkış gerilimi	65
Şekil 4.21. Doğrultucunun UMTS-2100 için çıkış gerilimi.....	66
Şekil 4.22. Doğrultucunun LTE-2600 için çıkış gerilimi	67
Şekil 4.23. Giriş sinyal gücüne göre çıkış gücü	68
Şekil 4.24. Giriş sinyal gücüne göre çıkış akımı.....	69
Şekil 4.25. Doğrultucu fabrikasyonu	69
Şekil 4.26. Konum-1 için ölçüm düzeneği.....	70
Şekil 4.27. Konum-1 için frekans spektrumu	71
Şekil 4.28. Farklı 10 konum için toplam alınan güce karşılık gelen ortalama gerilimler	72
Şekil 4.29. İç ortam deney düzeneği	73
Şekil 4.30. Simülasyon ve iç ortam ölçümü.....	74

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Enerji toplama kaynaklarından elde edilen mevcut güç	2
Tablo 2.1. Maxwell denklemlerinin genel formları	14
Tablo 3.1. Diyot parametreleri	37
Tablo 3.2. Birinci tasarım anten için ölçüler.....	41
Tablo 3.3. İkinci tasarım anten için ölçüler.....	44
Tablo 3.4. Empedans eşleme ve doğrultucu elemanlarının değerleri	46
Tablo 4.1. Sinyal gücü ve çıkış gerilimleri	72
Tablo 4.2. İkinci tasarım antenin mevcut çalışmalar ile karşılaştırılması.....	75
Tablo 4.3. Enerji hasat sisteminin mevcut çalışmalar ile karşılaştırılması	76



1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze enerji ihtiyacı artarak devam etmektedir. Artan enerji ihtiyaçlarını karşılamak için diğer enerji kaynaklarının yanında enerji hasadı da günden güne gelişerek devam etmiştir. Son zamanlarda RF enerji hasadı, kısa ömürlü bataryalara alternatif bir çözüm olarak araştırmacıların ilgisini daha fazla çekmektedir. Özellikle düşük güçlü entegre devrelerdeki son gelişmeler ve ortaya çıkan Nesnelerin İnterneti (IoT) uygulamaları ile enerji hasadı, yaygın olarak kullanılan kablosuz ağ sensörlerine, düşük güçlü cihazlarına ve iletişim cihazlarına güç sağlamak için umut verici bir yaklaşım haline gelmiştir. Enerji hasadı, çevredeki doğal veya yapay kaynaklardan ortam enerjisini toplama ve bu enerjiyi elektronik ve elektrikli cihazlara güç sağlamak için elektriğe dönüştürme yöntemidir. 1980'lerden bu yana cep telefonu teknolojisi hızla büyümüş ve daha uzun pil ömrüne ihtiyaç duyulmuştur. Bataryaların enerjisini iyileştirmek önemli bir araştırma alanı olmasının yanı sıra, yeni gelişmelerle beraber enerji hasadı da üreticilere daha iyi güç kaynağı arayışında yardımcı olmuştur (Mitcheson et al., 2008). Enerji hasadının rüzgar, güneş ve ısı hasadının haricinde kablosuz haberleşme sistemlerinden RF sinyallerinin hasadı gibi birçok şekli vardır. Bu RF sinyalleri, enerji hasadı sistemi ile DC güce dönüştürülebilir ve kullanılabilir. Çevredeki RF enerjisinin, sadece güneş ışığı mevcut olduğunda kullanılabilen ancak güneşin daha yüksek enerjiye sahip olduğu güneş enerjisinin aksine, tüm gün ve gece boyunca mevcut olması gibi bir avantajı vardır. Başka yollarla enerji elde etmek isteyen üreticiler cihazın güç tüketimi, kullanım şekli, boyutu verimliliğini göz önünde bulundurmaktadır (Mitcheson et al., 2008). RF enerji hasadı, implante edilebilir sensörler, ev otomasyonu, tarımsal yönetim, düşman birlik hareketlerinin izlenmesi, verimli ofis enerji kontrolü ve uzaktan hasta izleme gibi çeşitli alanlarda uygulama alanı bulmaktadır. TV ve radyo yayın istasyonları, mobil baz istasyonları, el telsizleri ve cep telefonları da dahil olmak üzere milyarlarca radyo vericisi havaya RF enerjisi yaymaktadır. Diğer hasat edilebilen titreşim, güneş ve ısı gibi enerji hasat kaynaklarının Tablo 1.1' de mevcut gücünü görebilirsiniz. RF hasat sistemleri rektenna olarak da adlandırılabilir.

Tablo 1.1. Enerji toplama kaynaklarından elde edilen mevcut güç

Kaynak	Enerji tipi	Güç yoğunluğu	Avantaj	Dezavantaj
Güneş	Işıma	100 mW/cm ²	Büyük miktarlarda mevcuttur	Işık yokluğunda mevcut değildir, düşük verimlilik
RF	Işıma	40 μ W/cm ² (10 m' de)	Büyük miktarlarda mevcuttur	Düşük verimlilik
Isı	Termal	135 μ W/cm ² (10 °C' de)	Kullanımı kolay	Yalnızca sıcaklık farkı yüksek olduğunda kullanılabilir
Hareket	Mekanik	800 μ W/cm ²	Yüksek güç yoğunluğu	Yalnızca hareket sırasında kullanılabilir
Rüzgar	Mekanik	177 μ W/cm ²	Yüksek güç yoğunluğu	Düşük dönüşüm verimliliği
Titreşim	Mekanik	4 μ W/cm ²	Yüksek güç yoğunluğu	Düşük dönüşüm verimliliği
Piezoelektrik	Mekanik	50 μ W/cm ²	Yüksek güç yoğunluğu	Çevrede bulunmaz

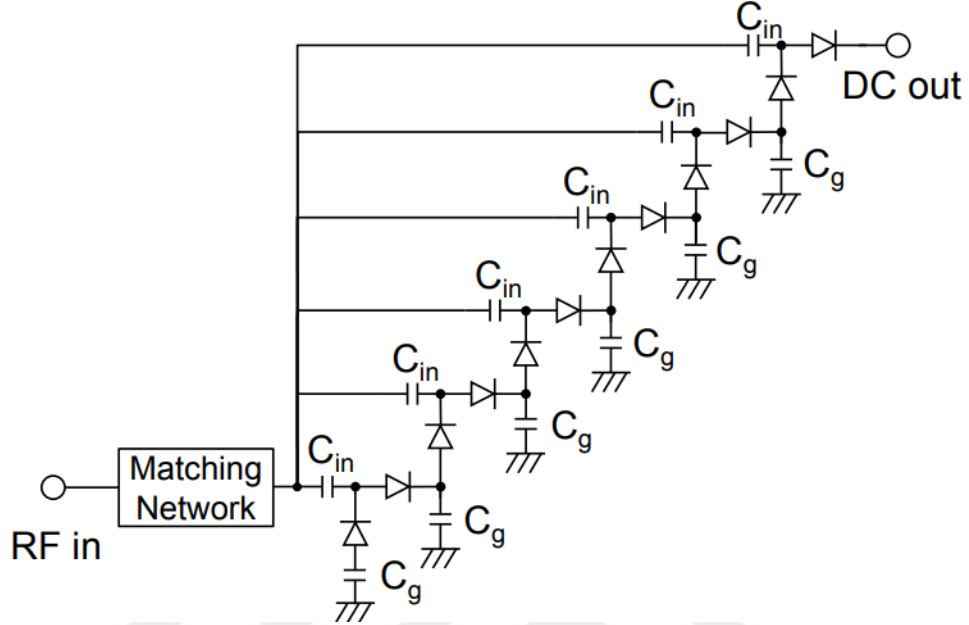
1.1. Literatür Taraması

Literatürde enerji hasat sistemleri ve uygulamaları hakkında çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

(Keyrouz et al., 2013)' de, 800MHz, 900MHz ve 2.45 GHz' de çok bantlı bir RF enerji hasat sistemi tasarlanmış ve simüle edilmiştir. Toplanan radyo frekanslarını doğrultmak ve doğrultucu empedansını azaltmak ve antenle eşleştirmek için bir gerilim katlayıcı kullanılır. Tasarlanan sistem, tek frekanslı RF toplayıcıya kıyasla %15 daha fazla verim elde edebilmektedir. Simülasyon sonuçları sunulmuş ancak doğrultucu için pratik sonuçlar sunulmamıştır.

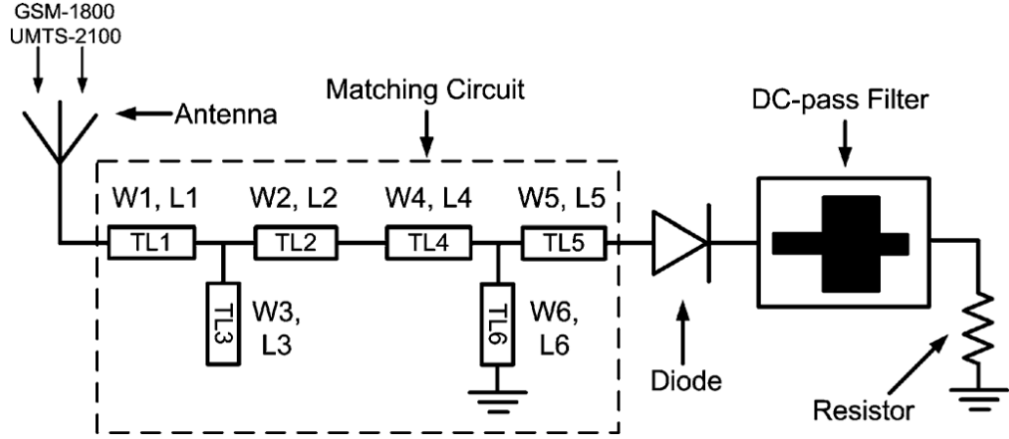
(Kitazawa, Ban, & Kobayashi, 2012)' de, çevredeki radyo frekansı (RF) kaynaklarından enerji hasat çalışması sunulmuştur. Sonuçlar, 800 MHz bandındaki mobil haberleşme baz istasyonundan (BS) elde edilen ortalama -25 dBm' lik alınan güç değerinin, Dijital TV yayınından elde edilenden ortalama 13 dB daha güçlü olduğunu göstermiştir. Daha yüksek bir DC çıkışı elde etmek için Şekil.1.1.' de

görüldüğü üzere RF-DC dönüştürme devresi çok aşamalı doğrultucu tercih edilmiştir. Bu çalışma sonucunda, GSM, TV frekanslarında daha verimli olan çift bantlı doğrultucu önerilmiştir.



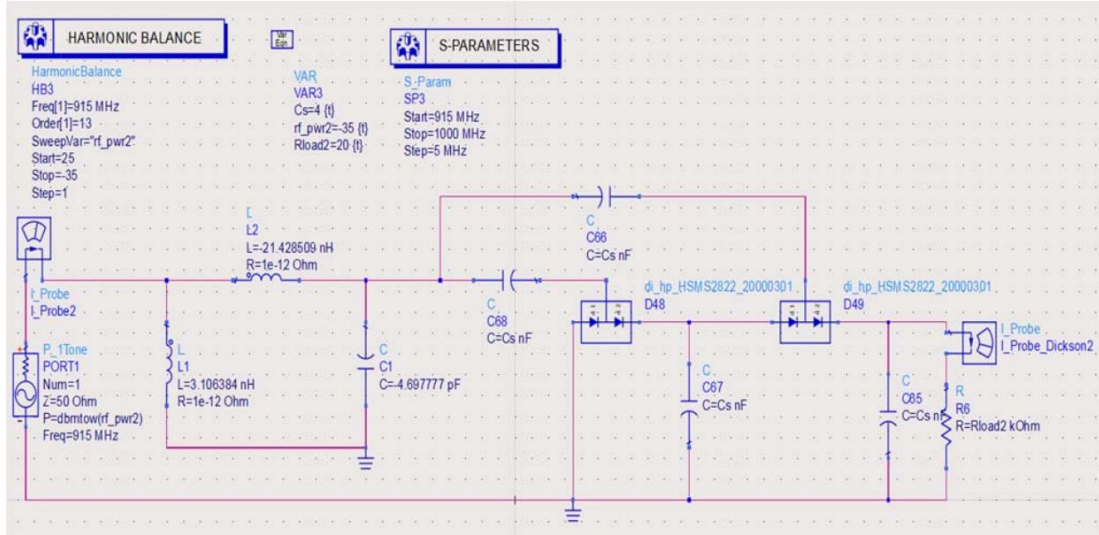
Şekil 1.1. Çok katlı Dickson doğrultucu

(Sun, Guo, He & Zhong, 2013)' te, ortam RF gücünün hasadı için geniş bant Yagi anten dizisi kullanan çift bantlı bir RF enerji hasat sistemi sunulmuştur. Şekil 1.2.' de görüldüğü gibi GSM-1800 ve UMTS-2100 bantlarının ortam RF gücünü hasat etmek için geniş bant Yagi dizi antenli ve çift bant doğrultuculu yeni bir rektenna tasarlanmıştır. Ortamda ölçülen çıkış DC gerilimi 300 ila 400 mV arasındadır. Ancak Yagi anten dizisinin kullanılması sistemi büyük hale getirmiştir.



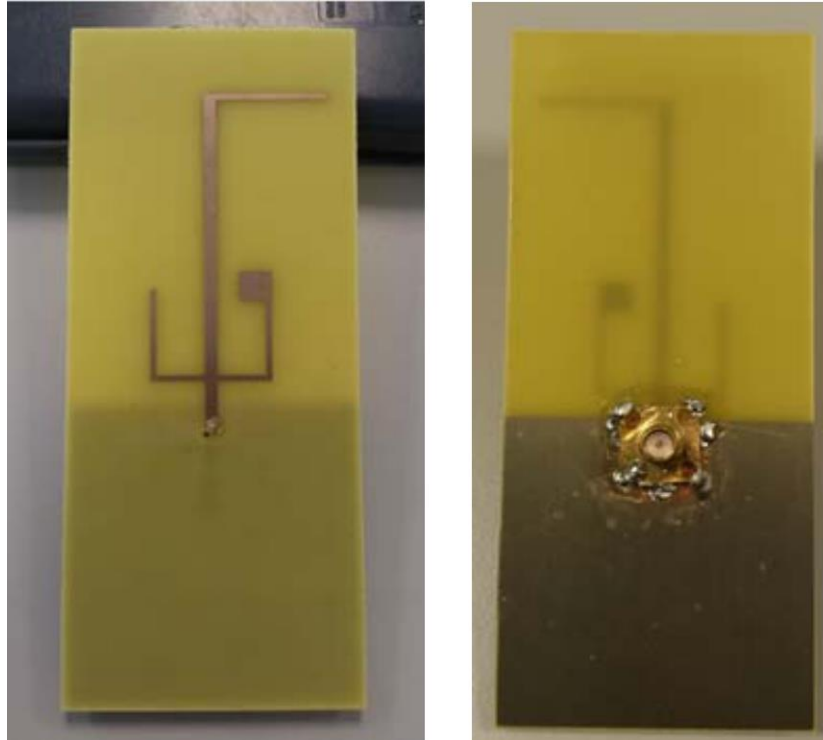
Şekil 1.2. Çift bant doğrultucu

(Al-Azawy & Sari, 2019)' da, -35dBm ile 25dBm arasındaki giriş güçleri için verimliliğe ve çıkış DC gerilimine bağlı olarak RF enerji hasadı parametrelerini sunmaktadır. Bu çalışmada, 2 ile 6 aşamalı çok aşamalı Dickson gerilim katlayıcı 20-50-100-500 k Ω gibi çeşitli yük dirençleri ile tasarlanmış ve uygulanmıştır. L-eşleştirme, T-eşleştirme ve Pi-eşleştirme gibi farklı eşleştirme topolojileri uygulanmıştır ve ayrıca verimlilik üzerindeki etkilerini görmek için iki Schottky diyot modeli olan HSMS-2852 ve HSMS-2822 kullanılmıştır. Tüm simülasyonlar Şekil 1.3.' de görüldüğü üzere Advance Design System 2017 kullanılarak yapılmıştır. Tasarımda seçilen hedef frekans 915 MHz' dir. Simülasyon sonuçları, düşük giriş gücü için eşleştirmesiz doğrultucu devresine kıyasla eşleştirmeli doğrultucu devre tasarımı için daha yüksek verimlilik ve yüksek çıkış DC gerilim elde edildiğini göstermektedir.



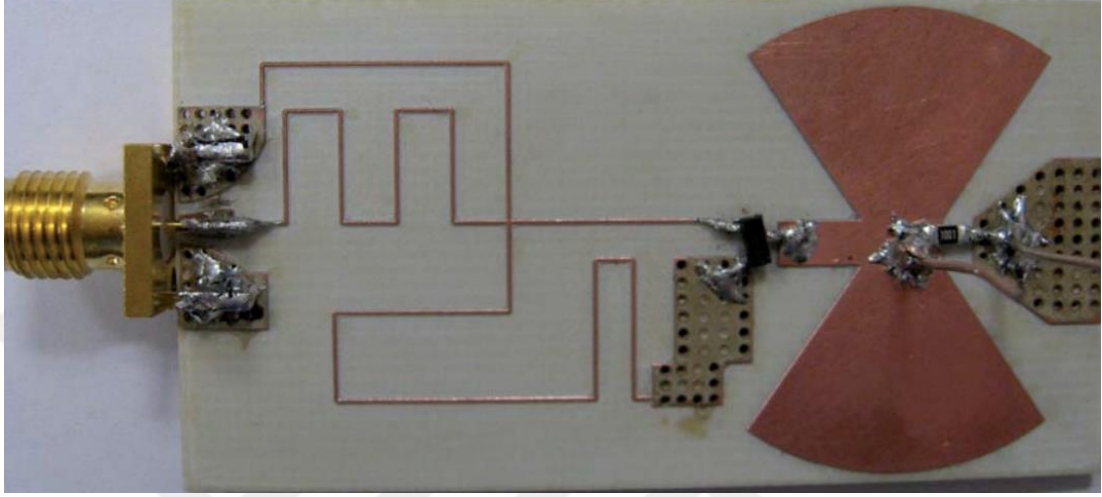
Şekil 1.3. ADS programında RF hasat sistemi tasarımı

(Zakaria, Zainuddin, Aziz, Husain, & Mutalib, 2013)' de düzlemsel çift bantlı bir monopol anten sunulmuştur. Şekil 1.4.' de verilen anten GSM bandı uygulamaları olan 915MHz ve 1800MHz' de çalışmaktadır. Tasarımın simülasyonu yapılmış ve ölçülen sonuçlar simülasyon değerinden daha iyi çıkmıştır. Monopol anten 915 MHz ve 1800 MHz frekanslarında 124.2 MHz ve 196.9 MHz bant genişliğine sahiptir. Ayrıca sırasıyla 1.97 dB ve 3 dB kazanç ile iyi bir geri dönüş kaybı elde edilmiştir.



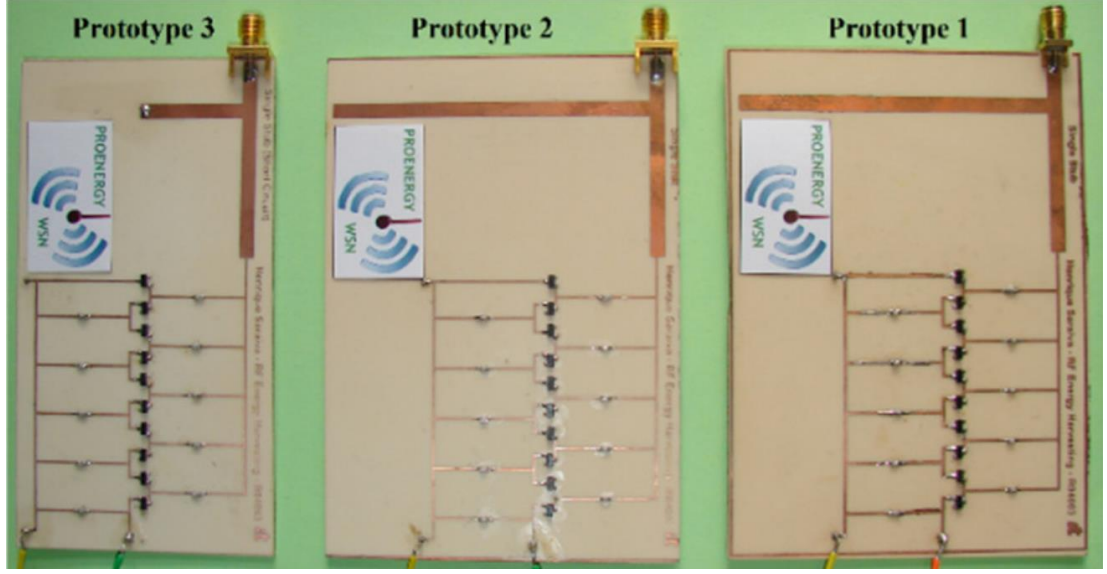
Şekil 1.4. Çift bantlı monopol anten fabrikasyonu

(D. Wang & Negra, 2014)' de 1050, 2050 ve 2600 MHz frekanslarında kablosuz enerji hasadı için yeni üç bantlı RF doğrultucu tasarımı önerilmiştir. İlgili çalışma frekanslarındaki kaynaklardan 10 mW RF enerjisini hasat etme yeteneğine sahiptir. Doğrultucu, Şekil 1.5.' de verildiği gibi Rogers RO4003CTM alt tabaka üzerinde tasarlanmış ve üretilmiştir.



Şekil 1.5. Üç bantlı doğrultucu fabrikasyonu

(Borges et al., 2014)' de GSM-900 ve GSM-1800 bantları için özel olarak geliştirilmiş RF enerji hasat devresi tasarlanmıştır. GSM-900 ve GSM-1800 frekans bantlarından elektromanyetik enerji hasat edebilen 1.8-2.06 dBi mertebesinde kazanç ve %77.6-82 verimliliğe sahip giyilebilir bir çift bantlı basılı anten geliştirilmiştir. Çalışmada ayrıca bir IRIS düğümüne güç sağlamak için 5 aşamalı bir Dickson voltaj çarpanını simüle etmişlerdir. Şekil 1.6.' da verilen eşleşme empedansına sahip 5 aşamalı Dickson voltaj çarpanı için üç prototip önerilmiş ve deneysel olarak karakterize edilmiştir. Sonuçlar, her üç prototipin de -4 dBm, -6 dBm ve -5 dBm RF güçlerinde sırasıyla %20, %32 ve %26 dönüşüm verimlilikleri ile IRIS sensör düğümüne güç sağlayabildiğini göstermektedir. Sonuçlar tatmin edici olsa da saplama eşleştirme ve FR-4 gibi kayıplı malzemelerin kullanılması düşük verimliliğe yol açmaktadır.

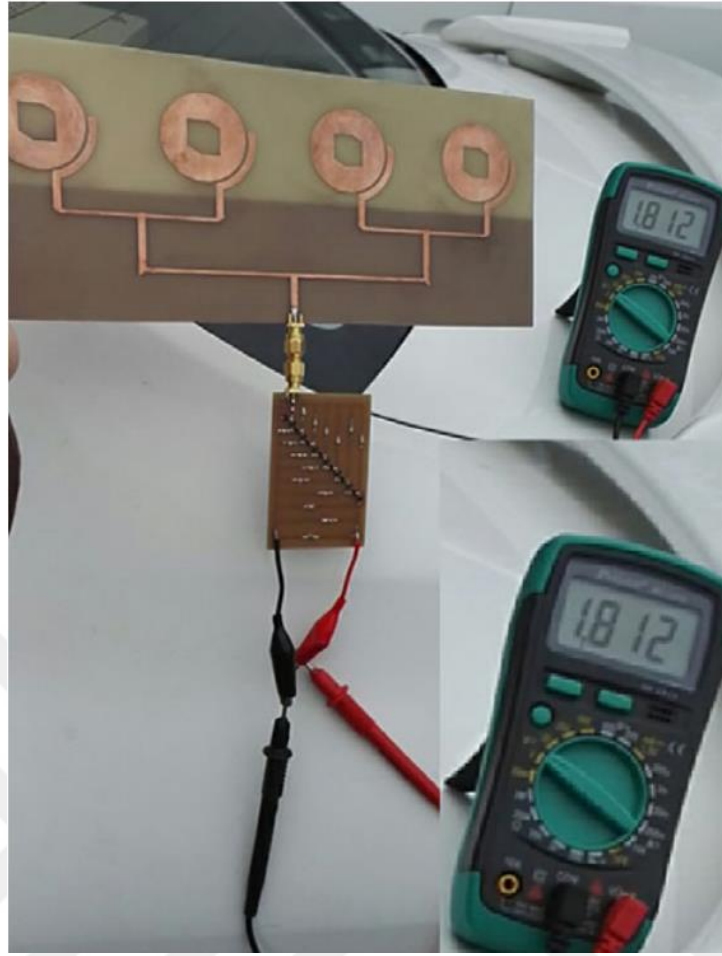


Şekil 1.6. Farklı bantlar için doğrultucu fabrikasyonları

(Belo & Carvalho, 2014)' de, 810MHz ve 1580MHz frekanslarında çalışan kablosuz sensörler için tasarlanmış, çok bantlı RF-DC dönüştürücüsü sunulmuştur. RF-DC dönüştürücüsü iki bantta çalışacak şekilde optimize edilmiştir. İki bantın birleşik çalışması ekstra güç hasadı için yararlı olabileceği gösterilmiştir.

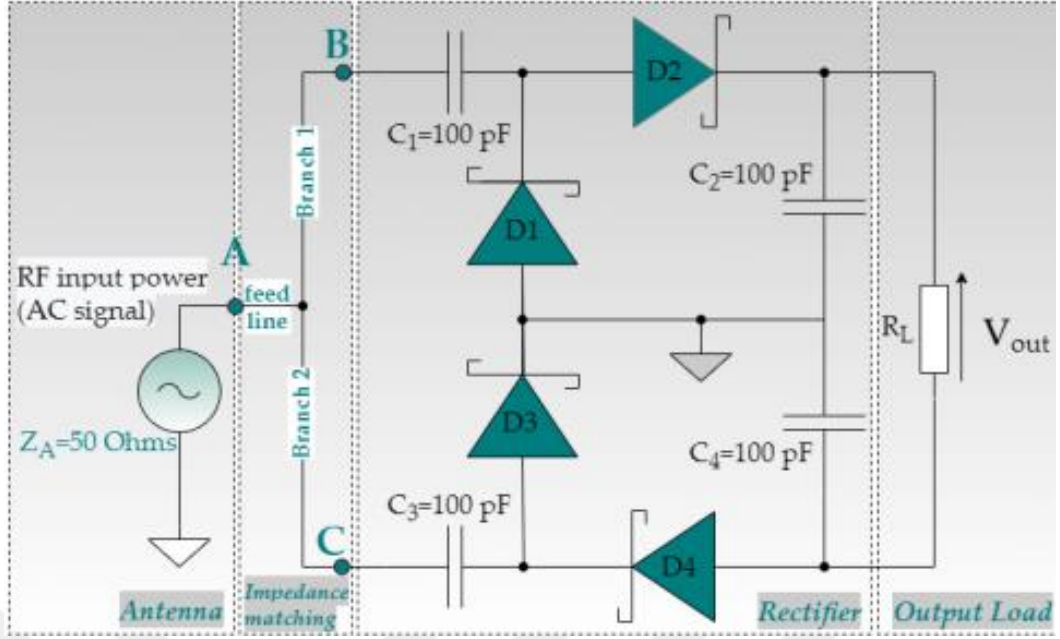
(Kuhn, Lahuec, Seguin & Person, 2015)' de, kablosuz haberleşme ağlarında RF enerji hasadı için GSM-900, GSM-1800, UMTS-2100 ve WiFi bantlarını kapsayacak şekilde bir sistem tasarlanmıştır. Üretilen prototipde, dört RF kolunun her birinde ayarlanan 0-dBm giriş gücünde %84 RF-DC dönüşüm verimliliği elde edilmiştir. Tek bantlı bir sistem ile karşılaştırıldığında verimlilik, iki katından fazladır.

(Adam, M. Yasin, A. Rahim, Soh, & Abdulmalek, 2018)' de 1800 MHz' den 2.5 GHz' e kadar çalışan kompakt bir geniş bantlı anten önerilmektedir. Bu çalışmada, Şekil 1.7.' deki sistem ile dört farklı açık ortamdaki mevcut RF enerjisi hasatlanmıştır. Hasat performansı bu çalışmada dairesel polarize ve dizi anten olmak üzere iki anten kullanılarak incelenmiştir. Düşük ortam güç yoğunlukları nedeniyle, önerilen sistemin çıkış DC voltajını iyileştirmek için çok kademeli bir doğrultucu kullanılmıştır. Ölçümler sonucunda sistemin kentsel bir alanda ortam RF enerji kaynaklarından 1,8 V' a kadar çıkış alınabildiği sonucuna ulaşılmıştır.



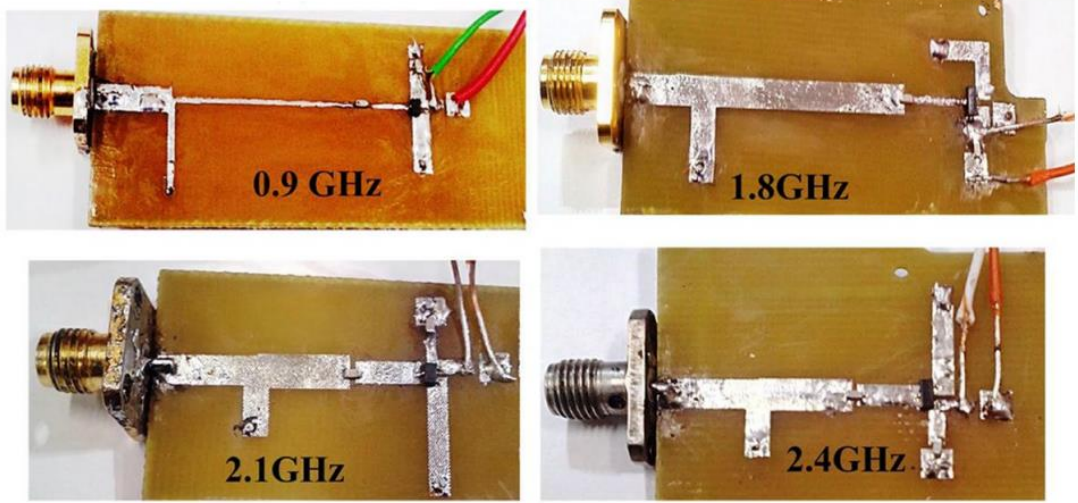
Şekil 1.7. Anten ve doğrultucu ile açık ortam ölçümleri

(Boursianis et al., 2021)' de dış mekan RF enerji uygulamaları için üç bantlı tek katmanlı bir rektenna önerilmiştir. Önerilen sistem LoRa, GSM-1800 ve UMTS-2100 frekans bantlarında çalışmaktadır. Önerilen antenin nihai geometrisi Moth Search Algoritması kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 1.8.' de görüldüğü üzere RF-DC doğrultucu Greinacher topolojisine dayalı olarak tasarlanmıştır. Tasarımda tek katmanlı FR-4 kullanılmıştır. Ölçülen sonuçlar, önerilen doğrultucunun dış ortamdaki kaynaklardan RF enerjisini yaklaşık %52 verimlilikle toplayabildiğini göstermektedir.



Şekil 1.8. RF enerji hasat sistemi tasarımı

(Agrawal & Parihar, 2021)' de, bir RF enerji hasat sisteminin performansı düzlemsel ve dielektrik rezonatör anten(DRA) olmak üzere iki farklı anten tipi için karşılaştırılmıştır. Simülasyonları gerçekleştirmek için CST Microwave Studio ve Advance Design System (ADS) kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarını doğrulamak için iç ve dış ortamlarda iki deneysel yöntem gerçekleştirilmiştir. İç ortamda, bir sinyal üretici ile uyarılan bir boynuz anten RF güç aktarıcısı olarak kullanılmıştır. Dış ortamda ise, mobil baz istasyonu ortam güç kaynağı olarak kullanılmıştır. İç ve dış ortamlarda yapılan simülasyon ve deneyler sonucunda, rektenna sisteminin dielektrik rezonatör anten ile daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.



Şekil 1.9. Farklı frekanslar için doğrultucu fabrikasyonları

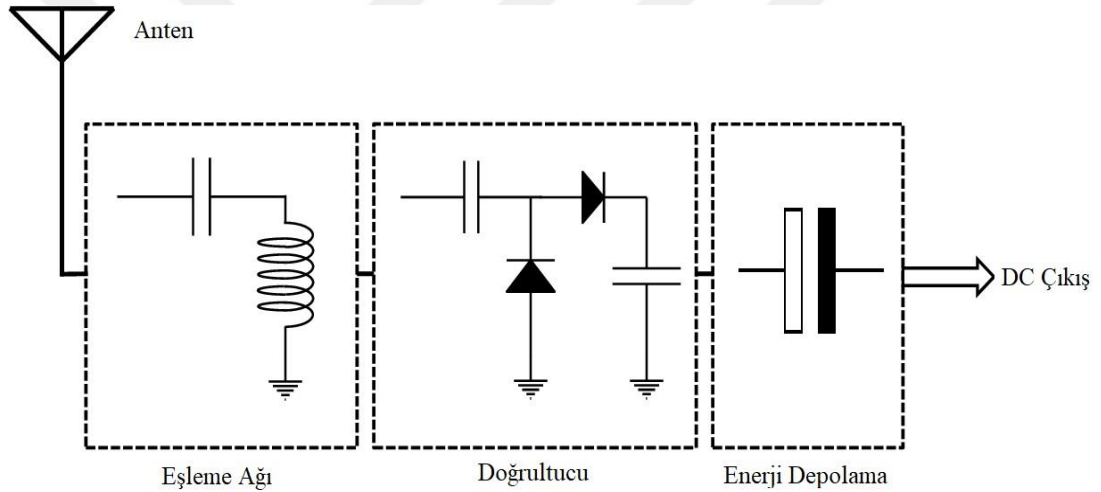
1.2. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında kablosuz haberleşme frekanslarının RF hasat devreleri sayesinde gerilim üretme potansiyeli üzerinde durulmuştur. Kablosuz haberleşme frekanslarını kapsayan Log-periyodik dipol anten tasarımı sayesinde GSM-900, GSM-1800, UMTS-2100 ve LTE-2600 frekanslarındaki aşağı ve yukarı bağlantı sinyallerini toplanması amaçlanmıştır. Toplanan dalgaların dört bantlı ve üç katlı doğrultucu ile gerilim elde edilecektir. Sistemin belirtilen frekanslarda geri dönüş kaybı verimlilik ve çıkış gerilimleri analiz edilmiştir. Ayrıca tasarlanan RF hasat sistemi ile 10 farklı konumdaki dış ortam ölçümleri ile sistemin gerilim üretme yeteneği test edilmiştir. 900 MHz iç ortam ölçümleri ile ise sistemin simülasyon verileri ile ölçümlerin karşılaştırılması hedeflenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. RF Enerji Hasat Sistemleri

Bir RF enerji toplama sistemi 3 temel kısımdan oluşur. Şekil 2.1’ de görüldüğü gibi, GSM baz istasyonu gibi bir radyasyon kaynağından yayınlanan sinyaller anten tarafından toplanır ve empedans eşleme ağı ile doğrultucu ile empedans eşlenir. Daha sonra RF-DC dönüştürme devresi vasıtasıyla kullanılabilir elektrik gücüne dönüştürülür. Üretilen elektrik gücü doğrudan yüke güç sağlayabilir. Örneğin, toplanan güç yüke güç sağlamak için gereken güçten daha fazlaysa, bir depolama elemanı da yerleştirilebilir. Ayrıca, RF enerji toplayıcının çıkış voltajı yeterli değilse veya dalgalanıyorsa, toplayıcının çıkışı ile yük arasında bir DC-DC dönüştürücü yerleştirilebilir.

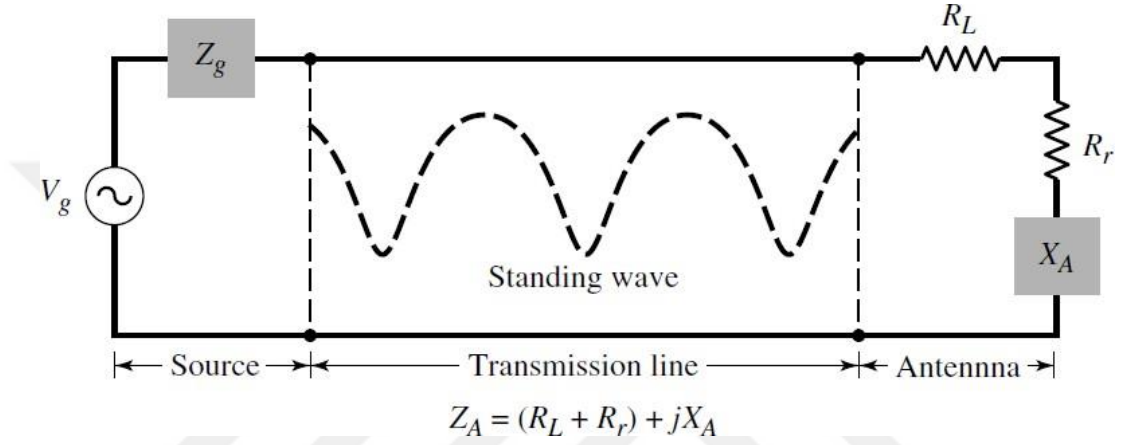


Şekil 2.1. RF enerji hasat sistemi

Üretilen DC gücü, enerji hasat tekniği, kullanılan frekans bandı, anten ve mevcut RF gücü gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Devrenin girişinde istenmeyen yüksek mertebeli harmonikleri bastırmak için bir alçak geçiren filtre kullanılabilir. Aynı zamanda bu filtre eşleme ağı ile aynı görevi görmektedir. Doğrultucu kısmında, yüksek frekanslardan dolayı hızlı anahtarlama yapan Schottky diyot kullanılır.

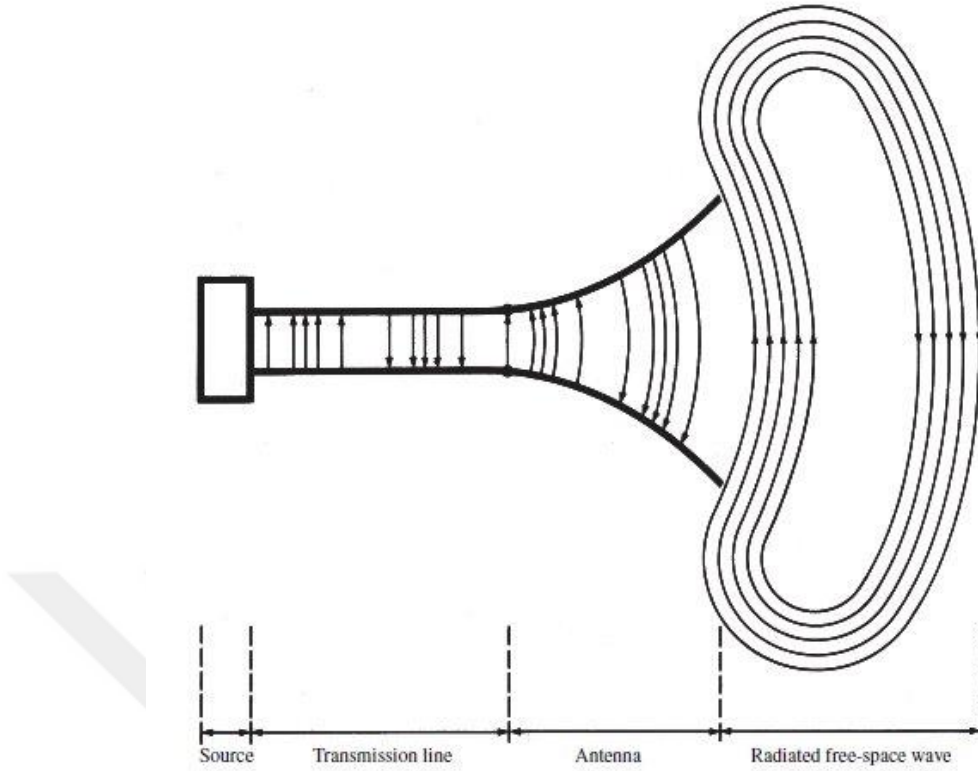
2.2. Anten Teorisi

Anten, elektromanyetik alanları alternatif akıma (AC) veya alternatif akımı elektromanyetik alanlara (EM) dönüştüren özel bir yapı olarak tanımlanabilir (Song, Chin, Liang, & Anyi, 2006). Antenler iki farklı görevde kullanılabilir. Bunlardan verici anten AC gücünü iletilecek EM alanına dönüştürür. Alıcı anten ise EM enerjisini AC gücüne dönüştürür. Her anten amacına göre belirli bir frekans bandındaki sinyalleri almak veya vermek üzere tasarlanır.



Şekil 2.2. İletim hattı ve verici modunda antenin Thevenin eşdeğeri (Balanis, 2005)

Bir anten, iletim modundayken sistemin eşdeğeri olarak Şekil 2.2’ de gösterilen Thevenin eşdeğeri ile modellenebilir. İletim hattı karakteristik empedansı Z_c olan bir hat ile temsil edilebilir ve anten iletim hattına bağlı bir yük Z_A [$Z_A = (R_L + R_r) + jX_A$] ile temsil edilir. Yük direnci R_L , antenin dielektrik ve iletim kayıplarını temsil etmek için kullanılırken, ısıma direnci olarak adlandırılan R_r ise ışımayı temsil etmek için kullanılır. Reaktans X_A , anten tarafından yapılan ısıma ile ilgili olarak temsil edilen empedansın sanal kısmıdır (Balanis, 2005).



Şekil 2.3. Bir cihaz olarak anten (Balanis, 2005)

Şekil 2.3’ de gösterildiği gibi IEEE’ nin resmi anten tanımı "Elektromanyetik dalgaları yaymak veya almak için tasarlanmış bir verici veya alıcı sistemin parçası" olarak verilmiştir (Balanis, 2005).

2.3. Maxwell Denklemleri

Maxwell denklemleri, elektrik yüklerinin ve akımlarının dağılımından kaynaklanan manyetik ve elektrik alanları (E) ve bu alanların zamanla nasıl değiştiğini tanımlayan dört denklemden oluşur. Maxwell denklemleri Tablo 2.1’ de gösterilmiştir. Ayrıca Lorentz yasasının, klasik elektromanyetizmanın, klasik optiğin ve elektrik devrelerinin temelini oluşturan kısmi diferansiyel ve integral denklemler kümesidir. Güç üretimi de dahil olmak üzere tüm manyetik, elektrik, optik ve radyo teknolojilerinin temelini oluşturmaktadır.

Gauss’ un elektrik yasası, statik elektrik alanı ile elektrik alanına neden olan elektrik yükleri arasındaki ilişkiyi açıklar. Statik elektrik alanı her zaman pozitif yükten uzağa doğru, negatif yüke doğru yönelir. Ayrıca herhangi bir kapalı yüzeyden elektrik alanının net çıkışının, o kapalı yüzeyin çevrelediği net yük miktarıyla doğru

orantılı olduğunu açıklar (Huray, 2011).

Gauss' un manyetizma yasası kapalı bir yüzeyden geçen manyetik alanın net manyetik akısının sıfır olduğunu belirtir. Bunun nedeni, mıknatısların her zaman dipollerde oluşması ve manyetik monopollerin mevcut olmamasıdır. Gauss' un manyetizma yasasına göre manyetik alan çizgileri oluşturur ve mıknatıstan başlayarak sonsuza kadar uzanır. Gauss yüzeyinden geçen toplam manyetik alan sıfırdır ve manyetik alan selenoidal bir vektör alanıdır .

Faraday' ın indüksiyon yasası zamanla değişen bir manyetik alan tarafından elektrik alanlarının üretimini açıklar. Bu yasa, bir birim yükü kapalı bir döngü yapısı etrafında hareket ettirmek için gereken iş, söz konusu döngü etrafında döñüşen manyetik alana eşittir şeklinde açıklamaktadır.

Ampere yasasına göre, manyetik alan ya elektrik akımıyla ya da elektrik alanının değiştirilmesiyle üretilebilir. Herhangi bir kapalı döngü etrafında indüklenen manyetik alan, o kapalı yüzeyden geçen elektrik akımı ve yer değiştirme akımıyla doğru orantılıdır (Huray, 2011).

Tablo 2.1. Maxwell denklemlerinin genel formları (Sadiku, 2014)

İsim	İntegral denklemleri	Türev denklemleri
Gauss yasası	$\nabla \cdot D = \rho_v$	$\oint_s D \cdot dS = \oint_v \rho_v \cdot dv$
Manyetizma için Gauss yasası	$\nabla \cdot B = 0$	$\oint_s B \cdot dS = 0$
Faraday yasası	$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t}$	$\oint_L E \cdot dl = - \frac{\partial}{\partial t} \int B \cdot dS$
Amper yasası	$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$	$\oint_L H \cdot dl = \int_s \left(J + \frac{\partial D}{\partial t} \right) \cdot dS$

Elektrik alan yoğunluğu **E** (V/m), manyetik alan yoğunluğu **H** (A/m) elektrik yükü ρ_v (coulomb/m³), akım yoğunluğu **J** (ampere/m²) **D** elektrik akı yoğunluğu (coulomb/m²) ve **B** manyetik akı yoğunluğu (weber/m²) olarak gösterilmiştir.

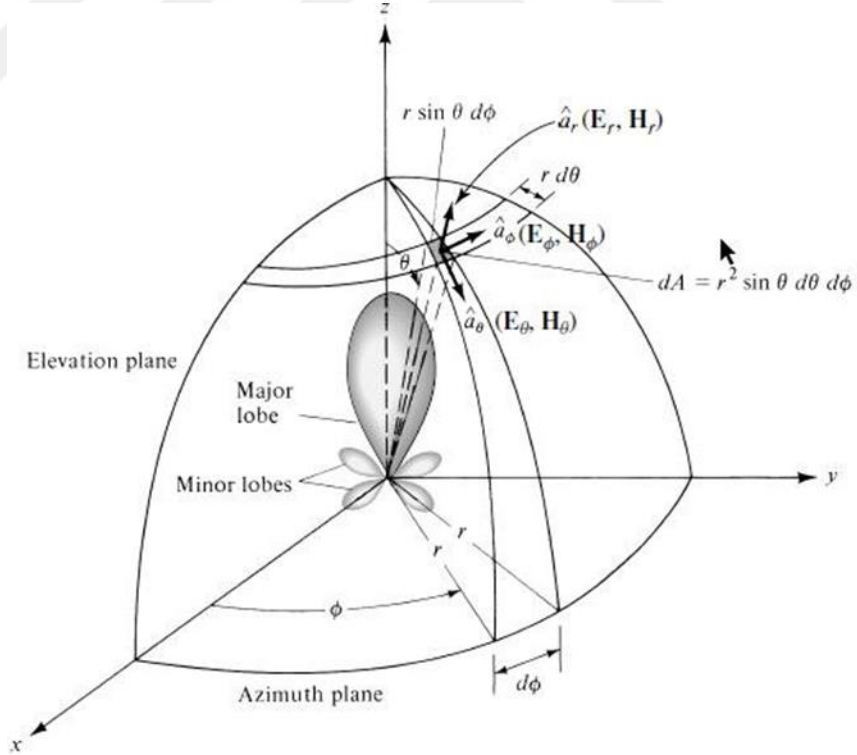
2.4. Antenlerin Temel Özellikleri

Bir antenin performansı, anteni tasarlarırken ve ölçerken anten parametreleri incelenerek değerlendirilir. Anten tasarımında kritik rol oynayan parametreler, ışıma örüntüsü, ışın genişliği, yönlülük, kazanç, polarizasyon, bant genişliği, geri dönüş kaybı, gerilim durağan dala oranı(GDDO) ve bant genişliğidir.

2.5. Işıma Örüntüsü

Işıma örüntüsü, antenin ışıma özelliklerinin uzay koordinatlarının grafiksel bir gösterimi olarak belirtilir. Işıma örüntüsü uzak alan bölgesinde belirlenir ve yön koordinatlarının matematiksel bir fonksiyonu olarak açıklanır. Işıma özellikleri ışıma yoğunluğu, güç akısı yoğunluğu, yönlülük, alan şiddeti ve polarizasyonu içerir.

En önemli ışıma özelliği, sabit yarıçaplı yüzeyin veya bir yol boyunca gözlemcinin konumunun bir fonksiyonu olarak yayılan enerjinin iki boyutlu (2B) veya üç boyutlu (3B) uzamsal dağılımıdır. Belirtilen koordinat istemi Şekil 2.4' te gösterilmiştir (Pozar, 2012).



Şekil 2.4. Anten analizi için koordinat sistemi (Pozar, 2012)

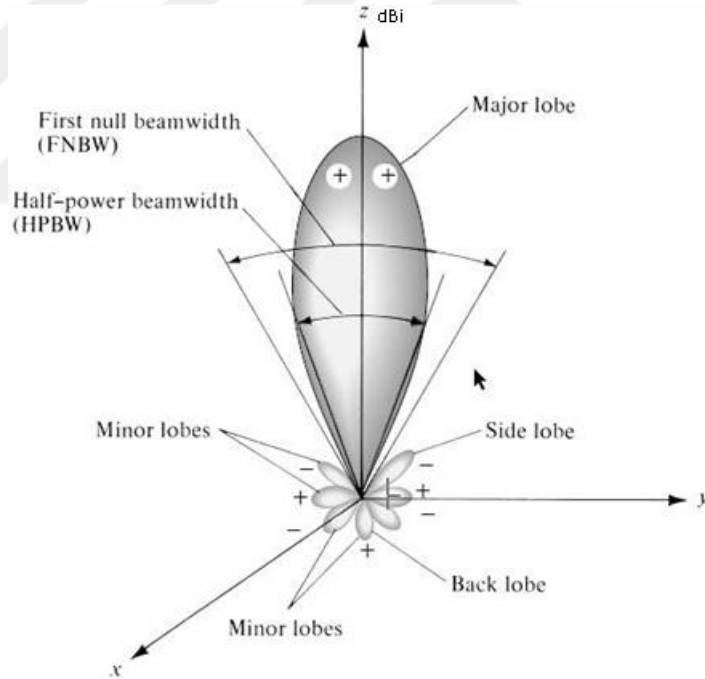
Genlik alan deseni, sabit bir yarıçapta alınan elektrik alanın şeklidir. Ayrıca, genlik güç deseni, sabit bir yarıçap boyunca güç yoğunluğunun uzamsal değişiminin

bir grafiğidir. Güç ve alan örüntüleri sürekli olarak maksimum değerlerine göre normalize edilir. Güç örüntüsü genellikle desibel (dB) cinsinden çizilir. (Pozar, 2012)

2.5.1. Işın Genişliği

Işın genişliği antenin iki komşu ışıma kaynağını veya radar hedefini ayırt etme kabiliyetini açıklamak için kullanılır. Antenlerin ışın genişliği ve yan lobları arasında bir denge söz konusudur (Kumar, Patel, Mittal, & De, 2012).

Bir antenin ışıma örüntüsünde birçok hüzmeye genişliği türü vardır. Bunlardan Half Power Beam Width (HPBW) en önemlisidir ve bir ışımanın maksimum yönünü içeren bir düzlemde, ışıma yoğunluğunun ışıma değerinin yarısı olduğu iki yön arasındaki açı şeklinde tanımlanır. First Null Beam Width (FNBW), desenin ilk boşlukları arasındaki açısal ayırma olarak tanımlanır. HPBW ve FNBW Şekil 2.5' te gösterilmekte olup, 2B ışıma örüntüsü loblarını ve ışın genişliğini tanımlamaktadır (Balanis, 2005).



Şekil 2.5. Bir anten elektrik alan deseninin radyasyon lobları ve ışın genişliği (Pozar, 2012)

2.5.2. Anten Yönlülüğü

Yönlülük, bir antenin radyasyon modelinin ne kadar yönlü olduğunun bir ölçüsüdür. Tüm yönlerde eşit olarak yayılan (izotropik) bir anten, etkili bir şekilde sıfır yönlülüğe sahip olacaktır ve bu tür antenin yönlülüğü 0 dB olacaktır.

Ayrıca anten Yönlülüğü, IEEE Anten Terimleri Tanımları Standardında antenden belirli bir yöndeki ışıma yoğunluğunun tüm yönlerin ortalamasındaki ışıma yoğunluğuna oranı olarak bilinir. Ortalama ışıma şiddeti, anten tarafından yayılan toplam gücün 4π ’ ye bölünmesiyle bulunur. Işıma yoğunluğunun yönü belirtilmemişse, bu maksimum ışmanın yönü olarak belirlenir. Sonuç olarak izotropik olmayan bir kaynağın yönlülüğü, belirli bir yöndeki ışıma yoğunluğunun izotropik bir kaynağın oranına eşittir. Matematiksel Denklem 2.1 ve 2.2’ de gösterilmiştir.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.1)$$

$$D_{maks} = D_0 = \frac{U_{maks}}{U_0} = \frac{4\pi U_{maks}}{P_{rad}} \quad (2.2)$$

D = yönlülük (boyutsuz)

$D_0 = D_{maks}$ = maksimum yönlülük (boyutsuz)

U = radyasyon yoğunluğu (W/açı), radyasyon yoğunluğunun (W_{rad}) mesafenin karesi (r^2) ile çarpılmasıyla elde edilebilir. Burada $U = r^2 W_{rad}$ ’ dir.

U_{maks} = maksimum radyasyon yoğunluğu (W/açı)

U_0 = izotropik kaynağın radyasyon yoğunluğu (W/açı)

P_{rad} = toplam yayılan güç (W)

2.5.3. Anten Kazancı

Kazanç, anten literatürde yer alan en önemli ölçümlerden biridir. Yönlülük ile yakından ilişkili olmasına rağmen, kazanç antenin verimliliğinin yanı sıra yönsel özelliklerini de dikkate alan bir ölçüdür.

Anten kazancı, "belirli bir yöndeki ışıma yoğunluğunun, anten tarafından alınan gücün izotropik olarak yayılması durumunda elde edilecek ışıma yoğunluğuna oranı" olarak tanımlanır (Balanis, 2005). Kazanç Denklem 2.3’ de gösterilmiştir.

$$\text{Kazanç} = 4\pi \frac{\text{Işıma yoğunluğu}}{\text{Toplam giriş gücü}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2.3)$$

Anten kazancı, antendeki ohmik kayıpların (e_{cd}) ve anten yönlülüğünün $D(\theta, \phi)$ Denklem 2.4' deki gibi çarpımı olarak ifade edilir.

$$G(\theta, \phi) = e_{cd} D(\theta, \phi) \quad (2.4)$$

2.5.4. Geri Dönüş Kaybı

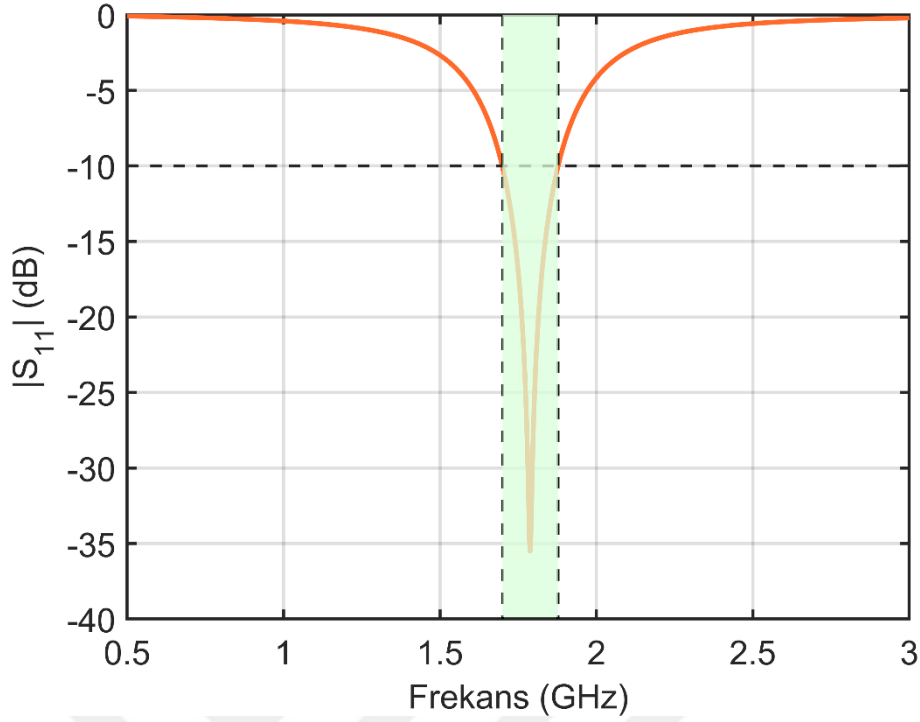
Geri dönüş kaybı (RL) kaynaktan antene gelen gücün (P_{in}) anteninden geri yansıyan güce (P_{ref}) oranı olarak tanımlanır.

Geri dönüş kaybı, giriş sinyalinin ne kadarının yansıtıldığını belirtir. Ayrıca iletilen bir sinyalin gücü ile kanal empedansındaki değişikliklerden kaynaklanan sinyal yansımalarının gücü arasındaki fark olarak da açıklanabilmektedir. Geri dönüş kaybı, desibel cinsinden ifade edilen yansımaya katsayısının negatifidir. Geri dönüş kaybı Denklem 2.5' deki gibi ifade edilebilir (Huang & Boyle, 2008; Pozar, 2012).

$$RL = 10 \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{ref}} = 20 \log_{10} \frac{VSWR + 1}{VSWR - 1} \quad (2.5)$$

2.5.5. Bant Genişliği

Anten bant genişliği antenin performansının bazı özelliklere göre belirli bir standarda uygun olduğu frekans aralığı olarak tanımlanmıştır (Balanis, 2005).



Şekil 2.6. Geri dönüş kaybı grafiğinde -10 dB’ deki bant genişliği

Bant genişliği, bir merkez frekansın her iki tarafında yer alan ve merkez frekanstaki ışıma örüntü, polarizasyon, kazanç, ışıma verimliliği gibi anten karakteristiklerinin kabul edilebilir değerlerinin bulunduğu frekans aralığı olarak belirtilir. Bant genişliğinde genellikle Şekil 2.6’ da geri dönüş kaybı grafiğinde gösterildiği gibi -10 dB altında olan kısımlar alınır.

2.5.6. Anten Polaritesi

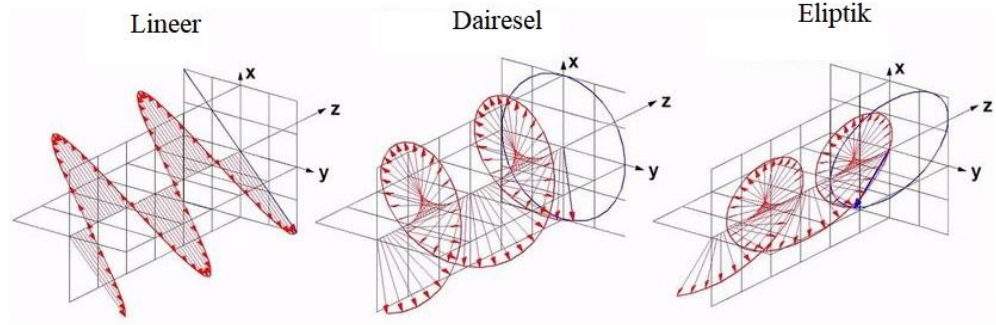
Yayılan bir dalgaının polarizasyonu bir elektromanyetik dalgaının elektrik alan vektörünün zamanla değişen yönünü ve bağıl büyüklüğünü tanımlayan özelliği olarak tanımlanır (Balanis, 2005).

Polarizasyonun Şekil 2.7’ de gösterildiği gibi doğrusal polarizasyon, dairesel polarizasyon ve eliptik polarizasyon olacak şekilde üç şekli vardır. Bir elektromanyetik dalgaının polarizasyonu anten tarafından belirlenir.

Doğrusal polarizasyon: Zamanın bir fonksiyonu olarak uzaydaki bir noktadaki elektrik alanını tanımlayan vektör her zaman bir doğru boyunca yönlendirilmesi ile oluşur.

Eliptik polarizasyon: Elektrik alan vektörü eksenleri uzunluğunun bir elips şeklini alması ile oluşur.

Dairesel polarizasyon: Elektrik alan vektörü eksenlerinin uzunluğu eşit olması durumunda oluşur.



Şekil 2.7. Doğrusal, dairesel ve eliptik olarak üç tip anten polarizasyonu

2.6. Anten Çeşitleri

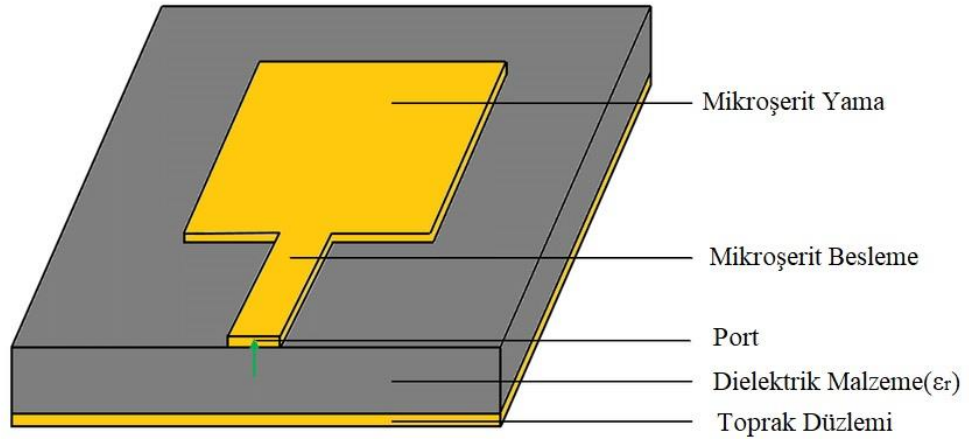
Anten, elektromanyetik dalgaları iletmek veya almak için tasarlanmış bir dönüştürücü cihazdır. Anten türleri, bant genişliği, frekans, polarizasyon veya ışıma gibi birçok faktöre bağlı olarak birçok türe ayrılabilir. Anten, elektromanyetik dalgaların iletimi için kullanılan elektronik bir cihazı ifade eder ve elektriği elektromanyetik dalgalara dönüştürür (Balanis, 2005). En yaygın kullanılan anten türlerinden biri mikroşerit antenlerdir.

2.6.1. Mikroşerit Anten

Mikroşerit yama antenler, avantajları özellikleri sebebiyle kablosuz uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Mikroşerit antenler hafiftirler, düşük hacimlidirler, düşük maliyetlidirler, boyutları daha küçüktür, fabrikasyonu kolaydır ve baskı devrelere entegre edilebilirler. Fakat mikroşerit anten, dar bant genişliği, yüksek besleme ağı kayıpları ve düşük güç işleme kapasitesi gibi bir dizi dezavantaja sahiptir.

Mikroşerit antenlerin kullanımı, özellikle kişisel iletişim sistemleri, mobil uydu iletişimi, kablosuz yerel alan ağları ve akıllı araç otoyol sistemleri gibi kablosuz iletişim sistemlerinin hızla yayılmasıyla artmıştır, bu da daha fazla çalışma yapılmasını

ve mevcut dezavantajlara çözümünü beraberinde getirmiştir.



Şekil 2.8. Mikroşerit yama anten

Mikroşerit yama anten çok kullanışlı bir anten türüdür ve dizi anten tasarımında kullanılabilir. Şekil 2.8’ de mikroşerit yama antenin bazı önemli tasarım parametreleri ve görünüşü gösterilmiştir. Mikroşerit anten tasarımında yama boyutlarının hesabı Denklem 2.6 ve Denklem 2.7’ deki gibi bulunur. Antenin toprak düzlemi boyutları ise Denklem 2.8 ve 2.9’ daki gibi bulunur.

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.6)$$

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L \quad (2.7)$$

$$L_g = 6h + L \quad (2.8)$$

$$W_g = 6h + W \quad (2.9)$$

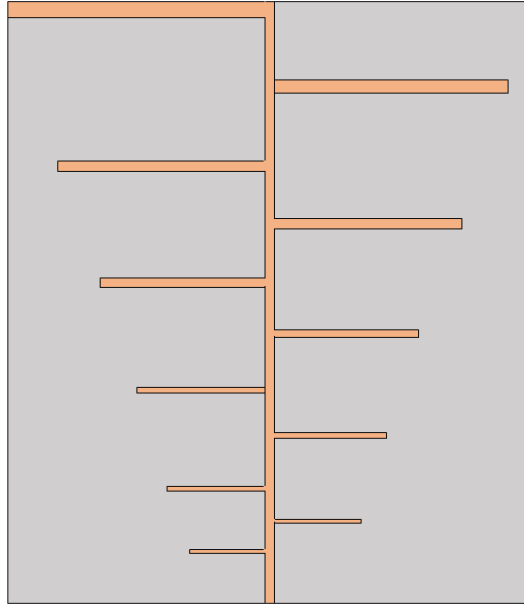
Buradaki c ışık hızı, ϵ_r dielektrik sabiti, ϵ_{eff} dielektrik sabitinin efektif değerini, f_r rezonans frekansını ifade eder.

Sınırlı bant genişliğinden dolayı son yıllarda, düşük dielektrik sabitine sahip kalın bir alt tabaka kullanılması gibi çeşitli etkili yöntemler kullanarak bu dezavantajın üstesinden gelinmiştir. Bant genişliği arttırmak yerine anten tasarımında geniş bantlı antenler de kullanılabilir.

2.6.2. Geniş Bantlı Anten

2.6.2.1. Log-Periyodik Dipol Anten

Log-periyodik dipol antenler (LPDA), geniş bir frekans aralığında çalışmak üzere tasarlanmış bir anten türüdür. Dipol elemanlarının uzunluklarının bir uçtan diğerine logaritmik olarak arttığı periyodik yapıları ile karakterize edilirler. Bu tasarım, LPDA' ların geniş bir frekans aralığında tutarlı performans göstermesini sağlar. Bu da onları radyo ve televizyon yayıncılığı, iletişim sistemleri ve radar sistemleri gibi geniş bir frekans kapsamının gerekli olduğu uygulamalar için uygun hale getirir. LPDA' lar ayrıca yönlü ışıma örüntüleriyle de bilinirler. LPDA' ların tasarımı, antenin yönlülüğünü artırmaya ve istenmeyen sinyallerden kaynaklanan paraziti azaltmaya yardımcı olan ters yönde ışımının bastırılmasına izin verir (DuHamel & Isbell, 1966). Şekil 2.9' da log-periyodik antenin görünüşü verilmiştir.



Şekil 2.9. Log-periyodik dipol antenin görünüşü

LPDA' lar hem sinyal almak hem de iletmek için kullanılabilir. Özel uygulama gereksinimlerine bağlı olarak dengeli veya dengesiz beslemeye sahip olacak şekilde tasarlanabilirler. İkiz sonlandırılmalı katlanmış dipol (TTFD) tasarımı gibi dengeli beslemeye sahip LPDA' lar, radyasyonu ileriye yönlendirmek için reflektör telleri kullanır. Öte yandan, log-periyodik dipol dizisi (LPDA) gibi dengesiz beslemeye sahip LPDA' lar, yüksek kazanç ve geniş bant genişliği elde etmek için birden fazla dipol

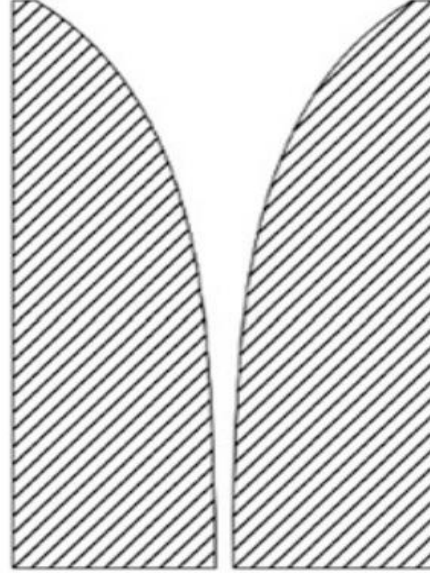
kullanır (Yeo & Lee, 2021).

2.6.2.2. Yagi-Uda Anten

Yagi-Uda anteni yüksek frekans (HF), çok yüksek frekans (VHF) ve ultra yüksek frekans (UHF) frekans aralıklarında kullanım için oldukça yaygın bir antendir. Anten, biri beslenen eleman olarak adlandırılan ve sinyal ile uyarılan, diğerleri ise indüklenen akımlara sahip parazitik elemanlar olarak davranan doğrusal dipollerden oluşur. Ana ışıma yönüne yerleştirilen parazitik elemanlar yönlendirici olarak davranırken, karşı taraftaki ise reflektör görevi görür. Yönlendiricilerin uzunlukları, beslenen dipolden biraz daha küçüktür. Yagi-Uda anteni tipik olarak düşük giriş empedansına sahiptir ve bu empedans antenin boyutları değiştirilerek optimize edilebilir. Giriş empedansının tipik değerleri 15 elemanlı bir Yagi-Uda dizisi için farklı reflektör aralığı değerleri için 12 Ω ile 62 Ω arasında değişir. Altı elemanlı tipik bir antenin yönlülüğü 10 ila 14 dBi arasında olabilir (Cheng & Chen, 1973).

2.6.2.3. Vivaldi Anten

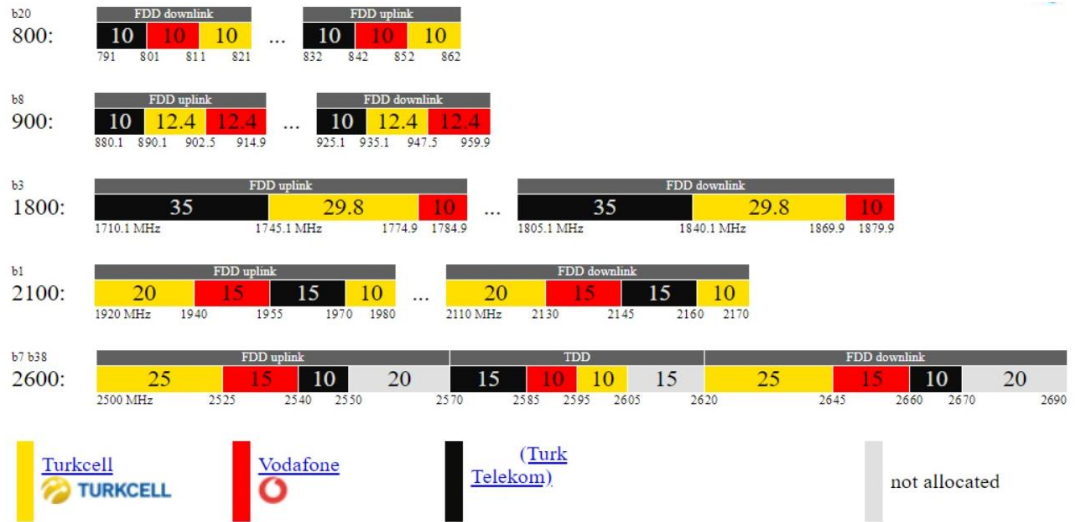
Vivaldi anten, geniş bir bant genişliği sunar. Antenin temel yapısı besleme kısmında giderek genişleyen yarık şeklindedir. Basit doğrusal konik yarıklı bir anten Şekil 2.10' da gösterilmiştir. Anten alttaki dar yarık çizgisi bölgesinden beslenir ve yarık bölgesi boyunca yapının tepesine doğru yayılırken ışıma gözlenir. Anten bir mikroşerit ya da koaksiyel iletim hattı üzerinden beslenebilir. 1979 yılında Gibson tarafından ilk kez önerilen Vivaldi antenna olarak da adlandırılan sürekli genişlikte yarık anten ve üstel olarak konik yarık anten gibi konik yarık antenin farklı varyasyonları kullanılabilir. Teorik olarak, bu tür bir yapı sonsuz bant genişliğine ulaşabilir, ancak pratikte dar taraftaki besleme, yapının geniş tarafındaki yuva açıklığı, maksimum tarama açısı ve ana düzlemler dışındaki düzlemlerdeki çapraz polarizasyon oranı ile sınırlıdır (Gibson, 1979).



Şekil 2.10. Vivaldi antenin görünüşü

2.7. Hücresel Haberleşme Frekansları

Mobil haberleşme kullanılan bir çok frekans bulunmaktadır. Bu frekanslar aşağı bağlantı ve yukarı bağlantı olarak ayrı ayrı tahsis edilmiştir. Türkiye’ de operatörlere tahsis edilen frekanslar Şekil 2.11’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Türkiye’ deki mobil haberleşme frekansları

2.7.1. GSM-900/1800

GSM-900 ve GSM-1800 (Global System for Mobile Communications) mobil veri ve ses hizmetlerini iletmek için kullanılan açık dijital hücreli teknolojidir ve dünyanın çoğu yerinde kullanılmaktadır.

GSM-900, yukarı bağlantı (Mobil istasyondan baz istasyonuna bilgi gönderme) için 880 - 915 MHz ve aşağı bağlantı (Baz istasyonundan mobil istasyona bilgi alma) için 925 - 960 MHz frekans aralığını kullanmaktadır. Her GSM bandı (yukarı bağlantı / aşağı bağlantı) 124 RF kanalından (kanal numaraları 1 ila 124) oluşur. Kanallar 200 kHz bant genişliğine sahiptir. Frekans aralığının her iki ucunda 45 MHz' lik dubleks aralığı ve 100 kHz genişliğinde koruma bantları yerleştirilmiştir (Huurdean, 2003).

Yukarı bağlantı için 1710 - 1785 MHz ve aşağı bağlantı ise 1805-1880 MHz frekanslarını kullanan GSM-1800, her GSM bandı (yukarı bağlantı / aşağı bağlantı) 374 RF kanalından (kanal numaraları 512 ila 885) oluşur. Çift yönlü aralık 95 MHz' dir.

2.7.2. UMTS-2100

UMTS (Universal Mobile Telecommunications Service), GSM standardına dayalı ağlar için üçüncü nesil (3G) mobil hücreli sistemdir. Metin, ses, video ve multimedya tabanlı paketleri 2 Mbps' a (saniye başına megabit) kadar veri hızıyla gönderir. UMTS, yukarı bağlantı için 1920 - 2025 MHz ve aşağı bağlantı için 2110 - 2170 MHz frekanslarını kullanır. UMTS, GSM iletişim standardını temel alır ve üreticiler ve büyük standart organizasyonları tarafından dünya çapındaki mobil kullanıcılar için standart olarak onaylanmıştır. UMTS' de bilgisayar ve telefon kullanıcıları her zaman ve her yerde sürekli olarak internete sahip olacaklardır. (Samukic, 1998).

2.7.3. LTE-2600

LTE (Long-Term Evolution), her yerde bulunan ve görev açısından kritik ses ve veri desteği sağlayarak kamu güvenliği teknolojilerini dönüştürme potansiyeline sahip bir geniş bant iletişim teknolojisidir. UMTS' de mevcut olan çok yönlü sönümlenme sorununun etkisinin üstesinden gelmek için LTE, aşağı bağlantı için Ortogonal Frekans Bölme Çoğullama (OFDM) kullanır. OFDM, baz istasyonundan terminale,

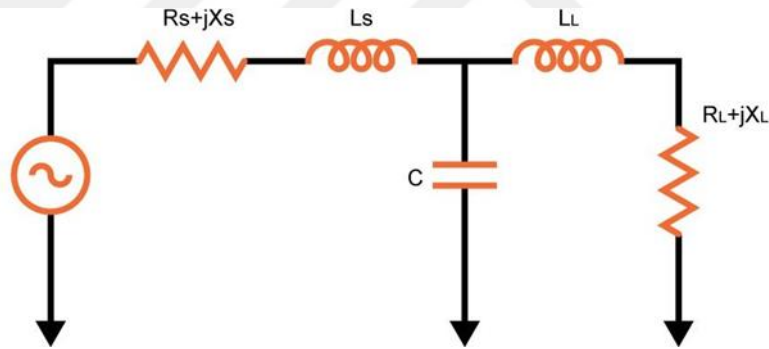
verileri 5 MHz taşıyıcı bant genişliğinin tamamına bir sinyal yaymak yerine her biri 180 KHz' lik birçok dar alt bant taşıyıcı üzerinden ileterek veri taşır.

OFDM sembolleri kaynak blokları halinde gruplandırılmıştır. Kaynak bloklarının toplam boyutu frekans alanında 180 kHz ve zaman alanında 0,5 ms' dir.

LTE-2600, yukarı bağlantı için 2500 - 2570 MHz ve aşağı bağlantı için 2620 - 2690 MHz frekans aralığını kullanmaktadır.

2.8. Empedans Eşleştirme Devresi

Empedans eşleştirme devresi, maksimum RF gücünü kaynaktan yüke aktarmak için kullanılır. RF kaynak empedansı (50Ω) doğrultucunun giriş empedansından farklı olduğundan, bu durumda maksimum gücü devreye aktarmak için empedans eşleştirmesi gereklidir (Khonsari, Björninen, Tentzeris, Sydänheimo, & Ukkonen, 2015).



Şekil 2.12. Empedans eşleme devresi

Empedans eşleştirme, RF devreleri ve mikrodalga bileşen tasarımı için önemli bir parçadır. Basitçe bir empedansı diğerine eşit hale getirme işlemi olarak tanımlanır. Empedans eşleme devresi Şekil 2.12' de gösterilmektedir. Yük empedansını kaynak empedansı veya giriş empedansı ile eşleştirmek gerekir.

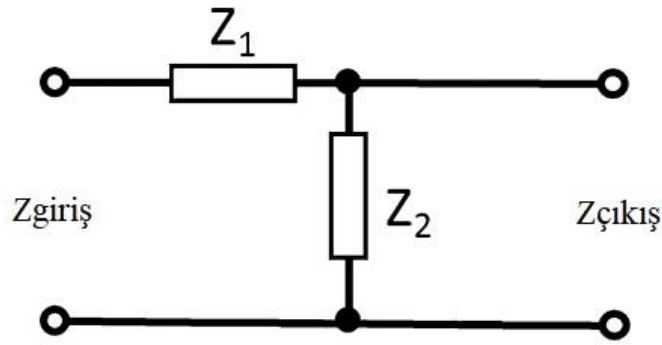
2.8.1. Empedans Eşleme Teknikleri

2.8.1.1. Toplu Öğeli Empedans Eşleme

Toplu eleman eşleştirme ağı, bir kaynak ve yük arasındaki empedansı eşleştirmek için kapasitörler ve indüktörler gibi ayrı bileşenler kullanan bir empedans eşleştirme ağı türüdür. Bu yaklaşım, güç aktarımını en üst düzeye çıkarmak ve

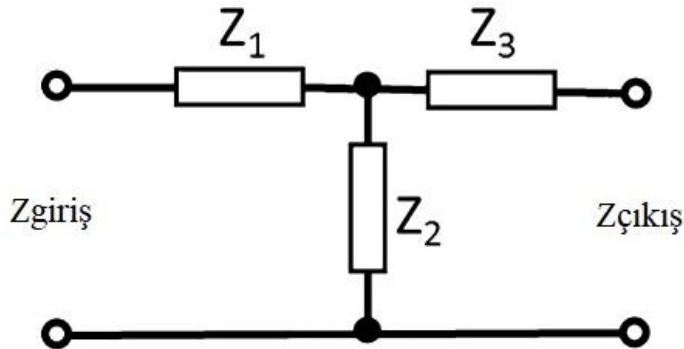
yansımaları en aza indirmek için mikrodalga ve RF devrelerinde yaygın olarak kullanılır. Toplu eleman eşleştirme ağları, dağıtılmış eleman ağlarına kıyasla basitlik ve tasarım kolaylığı sunar (Gilasgar et al., 2020). L, T ve π tipi şeklinde farklı topolojiler kullanılarak tasarlanabilirler (Han ve Perreault, 2006).

L tipi eşleme ağı kapasitör ve bobinlerin L şeklinde dizilmesiyle oluşur. Giriş kısmında 50Ω ' luk empedansı çıkışı ile eşler. L tipi empedans eşleme ağı Şekil 2.13' de gösterilmiştir.



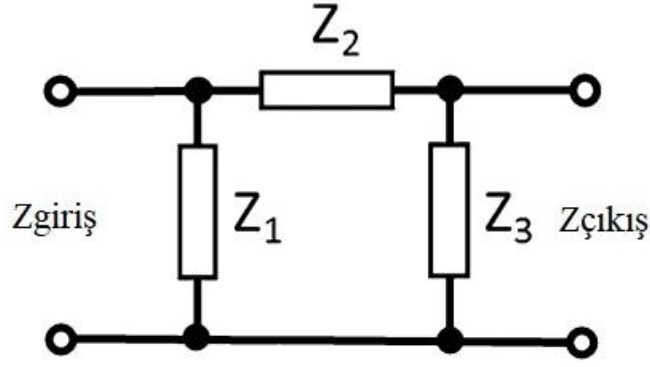
Şekil 2.13. L tipi empedans eşleme devresi

Kapasitör ve bobin gibi toplu elemanların T şeklinde dizilmesiyle oluşur. Eşleme devresi Şekil 2.14' de gösterilmiştir.



Şekil 2.14. T tipi empedans eşleme devresi

Diğer bir toplu eleman eşleme devresi olan π tipi eşlemede ise elemanlar π şeklinde dizilmesiyle oluşur. π tipi eşleme devresi Şekil 2.15.' de gösterilmiştir.



Şekil 2.15. π tipi empedans eşleme devresi

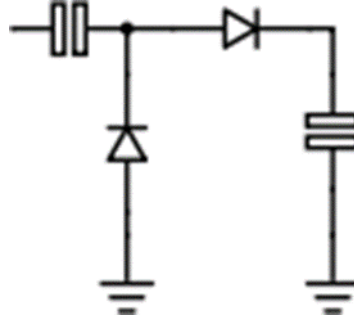
2.8.1.2. Dağıtılmış Öğeli Empedans Eşleme

Dağıtılmış eleman eşleştirme ağı, bir kaynak ve yük arasında empedans eşleştirmesi elde etmek için iletim hatları gibi dağıtılmış elemanları kullanan bir empedans eşleştirme ağı türüdür. Ayrık bileşenler kullanan toplu eleman eşleştirme ağlarının aksine, dağıtılmış eleman ağları sürekli iletim hatları kullanılarak uygulanır. Bu yaklaşım, geniş boyutlu eşleştirme ağlarının uygulanmasına sebebiyet verir (Wagih et al. 2020). Dağıtık elemanlı eşleştirme ağları, toplu elemanlı ağlara kıyasla gelişmiş verimlilik ve daha geniş bant genişliği gibi avantajlar sunar. Halka rezonatörler ve iletim hatları dahil olmak üzere çeşitli topolojilerle tasarlanabilirler. Bununla birlikte, dağıtılmış eleman eşleştirme ağlarının tasarımı daha karmaşık olabilir (Maoning et al., 2020). Genel olarak, dağıtılmış eleman eşleştirme ağları, empedans eşleştirmesi elde etmek ve performansı optimize etmek için mikrodalga ve RF devre tasarımında önemli bir araçtır (Maktoomi et al. 2017).

2.9. Doğrultucu Devresi

Doğrultucu devresi, AC voltajını DC voltajına dönüştürmek için kullanılan enerji hasat sisteminin önemli bir parçasıdır. Birçok uygulama, örneğin radyo frekansı tanımlama (RFID) sistemleri, kablosuz güç iletim sistemleri, kablosuz sensör sistemleri, uzay güneş sistemleri ve güç dedektörü sistemleri gibi birçok yapı voltaj dönüştürücü olarak doğrultucu kullanmaktadır. Enerji hasat sisteminin verimliliği antenin ve doğrultucunun verimliliğine ve anten ile doğrultucu devre arasındaki bağlantının iyi eşleşmesine bağlıdır.

Basitçe doğrultucu devresi, Şekil 2.16. 'da gösterildiği gibi (AC) alternatif akımı (DC) doğru akıma dönüştüren bir veya daha fazla diyottan oluşan bir yapıdır.



Şekil 2.16. Basit doğrultucu devresi

2.9.1. Yarım Dalga Doğrultucu

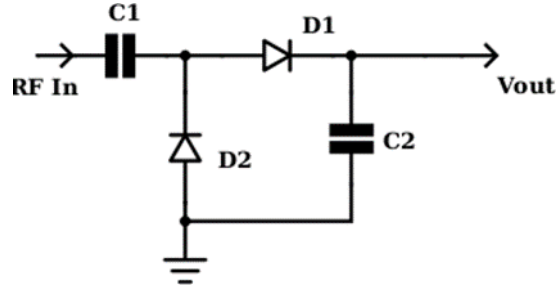
Yarım dalga doğrultucuda, AC dalganın negatif veya pozitif yarısı devreden geçirilirken, diğeryarısının geçmesine izin verilmez. Bu durumda, girişin yalnızca yarısı çıkışa ulaşabilir, böylece yarı verimli bir dönüşüm oluşmaktadır.

2.9.2. Tam Doğrultucu

Tam dalga doğrultucu, giriş dalgalarının hem pozitif hem de negatifinin çıkışa iletilmesine izin verir. Valf gibi çalışan iki diyot kullanarak, yarım dalgadan daha verimli bir tam dalga doğrultmaya ulaşmak için AC dalga formunun her iki yarısını da kullanılmasına izin verir.

2.9.3. Gerilim Katlayıcı

Gerilim katlayıcı doğrultucu iki diyot ve iki kapasitörden oluşur. Şekil 2.17.' de gerilim katlayıcı görölmektedir. İleri akım yalnızca D2' yi ve ardından D1' i kullanarak topraktan pozitif çıkış voltajı terminali V_C ' yi geçebilir. Böylece, C1 kapasitörü DC akımının kaynağa doğru geçmesini engeller. C1 kapasitörü yükü depolar ve yüksek frekanslı akımların geçmesine izin verir. Bu durumda diğeryer kapasitör, çıkış voltajı V_C ' yi yumuşatmak için ortaya çıkan yükü depolar. (J. Wang, Gao, Yu, Wang, & Jin, 2012).



Şekil 2.17. Gerilim katlayıcı

RF sinyali pozitif olduğunda ve D1 diyotunun açılması için gerekli voltajdan daha büyük olduğunda, D2 diyotu açık anahtardır ve D1 diyotu çalışır.

İkinci durum RF sinyali negatif olduğunda ve D2 diyotunun açılması için gerekli voltajdan daha büyük olduğunda, akım D2 diyotunu kullanarak topraktan geçer ve C1 kondansatörü üzerinde yük depolanmasına neden olur.

C1 kondansatörü üzerindeki gerilim, Denklem 2.10' da gösterildiği gibi negatif tepe gerilimi V_T ile negatif tepe noktasındaki diyotun V_A açma gerilimi arasındaki fark şeklinde açıklanır.

$$V_1 = V_T - V_A \quad (2.10)$$

RF döngüsünün pozitif durum kısmını, D1 diyotu üzerindeki tepe gerilimi Denklem 2.11 ve 2.12 ile hesaplanabilir.

$$V_C = V_1 - V_T - V_A \quad (2.11)$$

$$V_C = 2(V_T - V_A) \quad (2.12)$$

Çıkış gerilimi V_C , C1 kondansatörü üzerindeki gerilim ve pozitif RF geriliminin toplamı olarak hesaplanabilir, ardından açma gerilimi V_A çıkarılabilir.

2.9.4. Çok Kademeli Doğrultucu

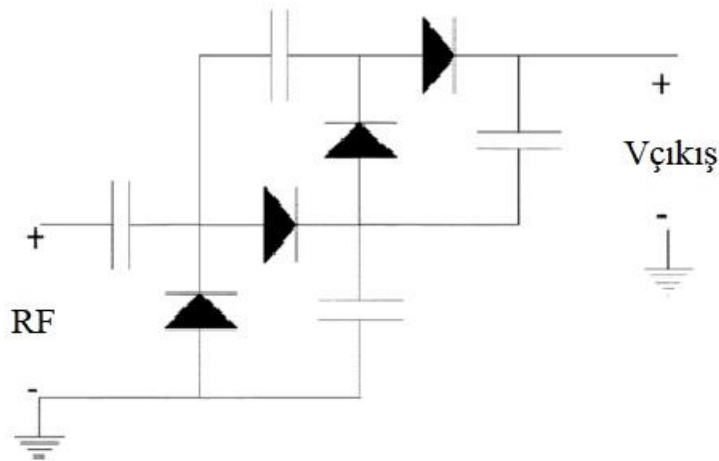
Doğrultucunun bir aşaması, üretilen voltaj $2(V_T - V_A)$ olduğu için gerekli hasat uygulamasını tetiklemek için yeterli voltaj üretmez. Böylece, çok kademeli

doğrultucuya ulaşmak için birçok gerilim katlayıcı doğrultucu kullanılabilir. Gerekli gerilime ulaşmak için üç kademeli doğrultucular önerilmiştir. N-kademeli çok kademeli doğrultucu için DC çıkış gerilimini hesaplamak için Denklem 2.13 aşağıda gösterildiği gibi kullanılabilir (J. Wang et al., 2012).

$$V_{\text{Ç}} = 2N (V_T - V_A) \quad (2.13)$$

2.9.4.1. Villard Doğrultucu

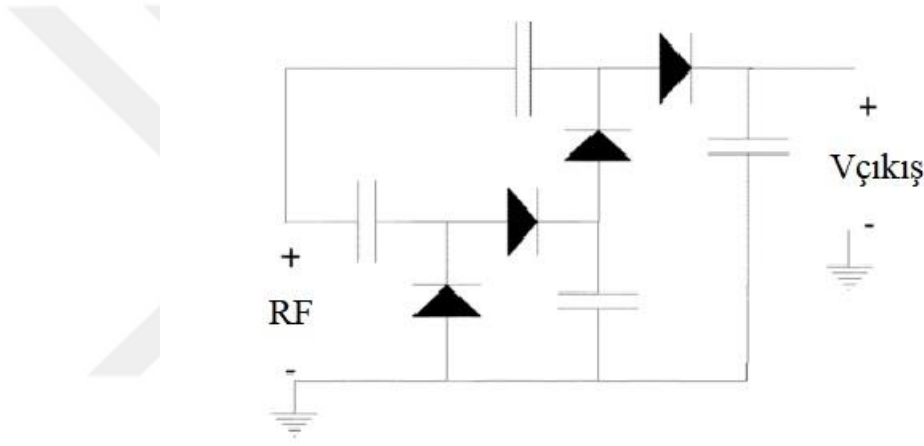
Villard doğrultucu, RF enerji hasat sistemlerinde kullanılan bir tür doğrultucu devresidir. RF sinyallerini düzeltmek ve DC voltajına dönüştürmek için Schottky diyotlarının çoklu aşamalarını kullanan bir voltaj katlayıcı devresidir (Kim et al, 2013). Villard doğrultucu, Greinacher doğrultucu doğrultucu olarak da bilinir. Voltaj çarpımı elde etmek için seri bağlanmış kuplaj kapasitörlerinin kullanılması ile karakterize edilir (Lee et al., 2023). Devre, Wi-Fi güç toplama sistemleri gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Villard doğrultucunun performansı, giriş sinyali gücüne ve frekansına bağlı olarak değişebilen RF-DC dönüşüm verimliliği ve çıkış voltajı açısından değerlendirilebilir. Villard doğrultucunun yapısı ve tasarımı, onu IoT uygulamalarında RF enerji hasadı için uygun hale getirmektedir (Lee et al., 2023). Villard doğrultucu Şekil 2.18’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Villard doğrultucu

2.9.4.2. Dickson Doğrultucu

Dickson doğrultucu, RF enerji hasadında yaygın olarak kullanılan bir doğrultucudur. Dickson doğrultucu, seri olarak Schottky diyotlu çoklu aşamalardan oluşan bir doğrultma yapısı olarak kullanılır. Çıkış voltajının tek bir şönt diyot doğrultucunun çıkış voltajının neredeyse iki katına ulaşmasını sağlar. Bununla birlikte, Dickson doğrultucudaki kademe sayısını artırmanın çıkış verimliliğini düşürmektedir. Dickson doğrultucuların performansı, kullanılan yarı iletkenlerin eşik gerilimine de büyük ölçüde bağlıdır (Zareianjahromi et al., 2022). Dickson doğrultucu Şekil 2.19’ da gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Dickson doğrultucu

2.10. Schottky Diyot

En iyi diyot seçimi, sıfır polarlamaya sahip schottky diyotlardır çünkü V_C çıkış gerilimi artması istendiğinden, diyotun geriliminin mümkün olduğunca düşük olması gerekir. V_A çok düşük olduğunda V_C çıkış gerilimi RF sinyalinin tepe gerilimini iki katına çıkabilmektedir. Çıkış voltajı V_C ’nin teorik değerden daha düşük olması gerekmektedir çünkü yük direncini göz ardı edilemez ve devre kapasitörlerde depolanan tüm akımı ve yükü dışarı çekemez (J. Wang et al., 2012).

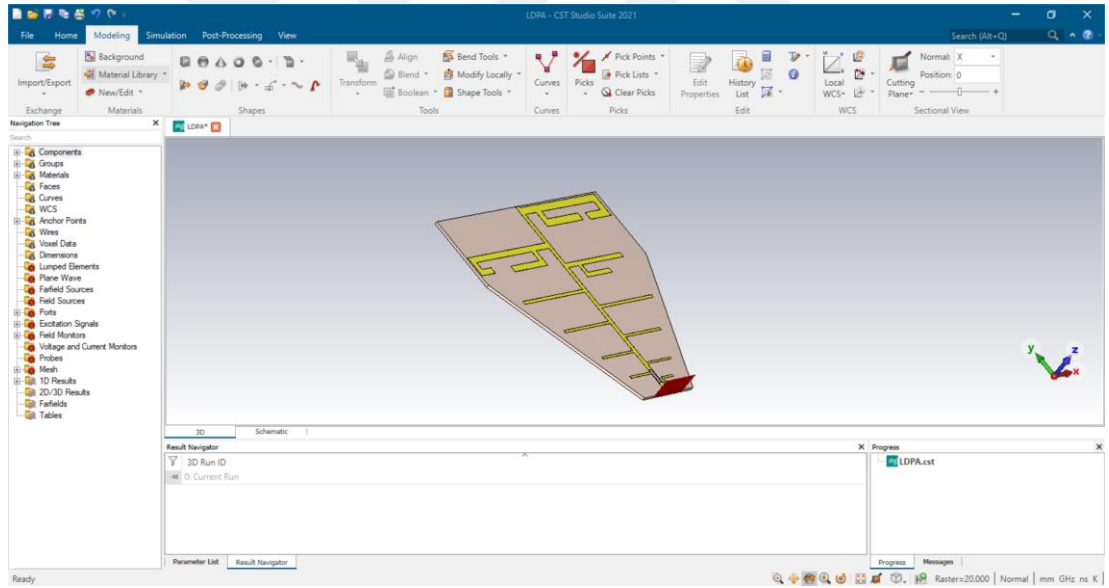
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, anten tasarımı ve doğrultucu tasarımı için gerekli olan yazılım ve donanım gereksinimleri ele alınmıştır.

3.1. Yazılım Gereksinimleri

3.1.1. CST Studio

CST Studio, Şekil 3.1’ de gösterildiği gibi elektromanyetik sistemlerin tasarımı, analizi ve optimizasyonu için yüksek performanslı bir 3D analiz yazılımıdır. Simülasyonda gerçek bir tasarımın bilgisayar programı biçimindeki bir modeli kullanılır. Antenler, filtreler ve kuplörler gibi yüksek frekanslı cihazlar bu yazılım kullanılarak hızlı ve doğru bir şekilde analiz edilebilir. Ayrıca CST Studio programı, fiziksel deneylerden önce simülasyonunun gerçekleştirilmesiyle anten fabrikasyonunun sonuçlarının tahminine yardımcı olur.



Şekil 3.1. CST programının görünümü

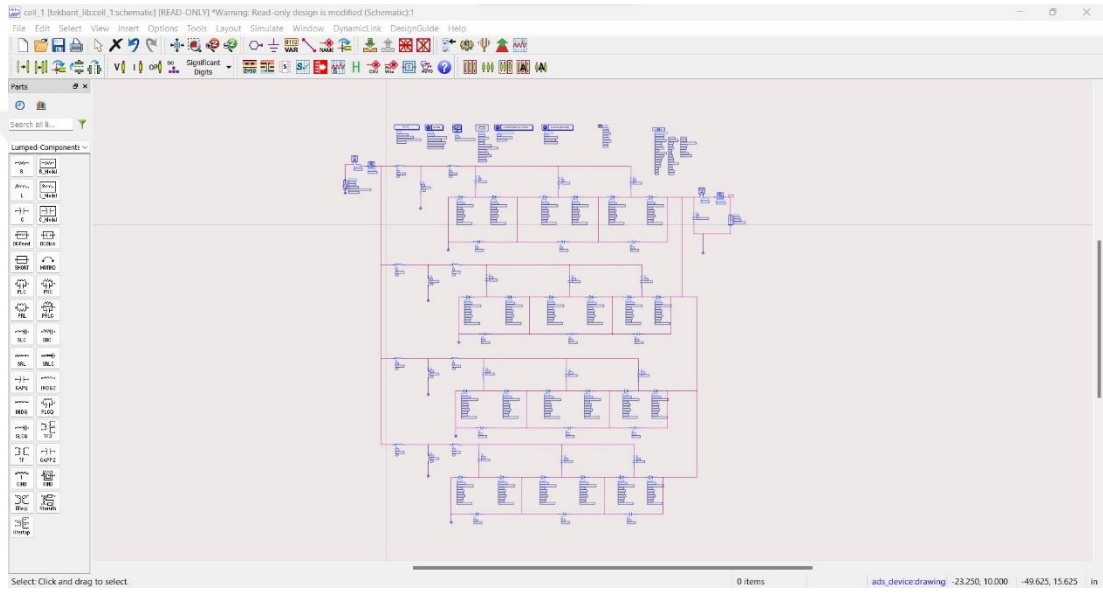
3.1.2. Advanced Design System

Advanced Design System (ADS), yüksek frekanslı ve yüksek hızlı elektronik devrelerin tasarımı ve analizi için kullanılan güçlü bir elektronik tasarım otomasyon yazılımı aracıdır. ADS, tasarımcıların devrelerinin performansını modellemelerine ve optimize etmelerine olanak tanıyan simülasyon ve analiz imkanı vermektedir.

ADS’ nin en önemli özelliklerinden biri, RF/mikrodalga devreleri, karışık sinyal

devreleri ve dijital devreler de dahil olmak üzere karmaşık devrelerin davranışını simüle ve analiz edebilmesidir. Devre performansının doğru ve verimli bir şekilde analiz edilmesini sağlayan çok çeşitli simülasyon modelleri ve algoritmaları sunmaktadır.

ADS ayrıca parametre taramaları, optimizasyon algoritmaları ve istatistiksel analiz gibi gelişmiş tasarım ve optimizasyon araçları da içermektedir. Bu araçlar, tasarımcıların, devre performansını optimize etmelerine ve bileşen varyasyonlarının ve üretim toleranslarının etkisini değerlendirmelerine olanak tanımaktadır.



Şekil 3.2. ADS programının görünümü

Ayrıca ADS, elektromanyetik simülasyon araçlarının entegrasyonunu destekleyerek tasarımcıların devrelerinin elektromanyetik davranışını analiz etmelerini ve daha iyi performans için yerleşimlerini ve ara bağlantılarını optimize etmelerini sağlamaktadır. ADS programının görüntüsü Şekil 3.2’ de verilmiştir.

3.2. Donanım Gereksinimleri

3.2.1. Dielektrik Malzeme

FR-4, alev geciktirici epoksi reçine ve cam kumaş kompozitinden yapılan bir baskılı devre kartı taban malzemesi sınıfıdır. FR, alev geciktirici anlamına gelir ve UL94V-0 gereksinimlerini karşılar. FR4, bakır folyoya iyi yapışır ve minimum su emilimine sahiptir, bu da onu standart uygulamalar için çok uygun hale getirir. FR4, 1 ve 2 katmanlı PCB' ler için bakır kaplı bir malzeme olarak kullanılır. Anten tasarımında ve doğrultucu tasarımında 4.4 dielektrik sabitine sahip FR-4 malzeme kullanılmıştır.

3.2.2. SMA Konnektör

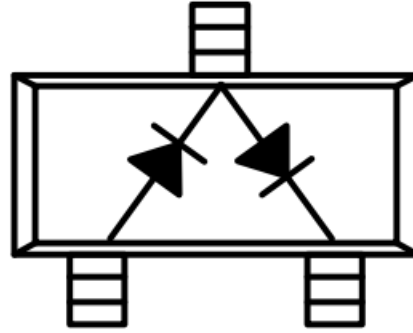
SMA konnektörleri, 18 GHz' e kadar çalışan 50 Ω RF koaksiyel konnektörlerdir. Bu konnektörler, düzgün temas sağlayarak yansımaları ve zayıflamayı en aza indiren vidalı tip bağlantı mekanizmasına sahiptir. SMA konnektörleri en çok kullanılan RF konnektörlerinden biridir. Wi-Fi ve Bluetooth gibi 6 GHz altı teknolojilerin çoğu için anten bağlantıları da dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda kullanılırlar. Konnektörün görseli Şekil 3.3' de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. SMA konnektör

3.2.3. Shottky Diyot

Kullanılan SMS7630-005LF diyonu düşük maliyetli, yüzeye monte edilebilir, plastik ambalajlı silikon karıştırıcı Schottky diyotlardır ve RF, mikrodalga devreler için tasarlanmıştır. Skyworks tarafından üretilen bu shottky diyotlar düşük bariyerli ve sıfır polarlamaya sahiptirler. Diyotun görünüşü Şekil 3.4’ de verilmiştir. Tüm diyotlar yüzde yüz DC testinden geçirilir ve performans değişkenliğini en aza indiren parametre dağılımı sunmaktadır.



Şekil 3.4. SMS7630-005LF Shottky diyonu

Bu diyotlar SOD-882, SC-79 ve SOT-23 paketlerinde mevcuttur. Kablolama konfigürasyonları tekli, seri çift ve ters seri çifti içerir. 24 GHz’ e kadarki frekanslarda kullanılabilirler. Diyotun parametreleri Tablo 3.2’ de gösterilmiştir.

Empedans eşlemesi gerektiği için diyotun empedansı oldukça önemlidir. Z_T diyotun toplam empedansını ifade etmektedir. R_s ve C_j sabitlerdir fakat çalışma frekansı ω değişken parametredir. Frekans arttığında, diyot seri direnci Z değeri ihmal edilebilir. Bu yüzden yüksek frekanslarda Schottky diyotun çalışması, çalışma frekansından bağımsız olarak düşünülebilir. Bağlantı direnci ve seri direncin ifadeleri Denklem 3.1 ve Denklem 3.2’ de verilmiştir.

$$R_j = \frac{8.33 \times 10^{-5} \times N \times T}{I_b \times I_s} \quad (3.1)$$

$$Z_T = R_s + \frac{R_j}{j\omega C_j + 1} \quad (3.2)$$

I_s doygunluk akımını, R_s seri direnci, N idealite faktörünü, C_j bağlantı kapasitansını, I_b amper cinsinden harici olarak uygulanan bias akımını, T kelvin cinsinden sıcaklığı ω ise frekansı ifade eder.

Tablo 3.1. Diyot parametreleri

	Birim	SMS7630 Serisi
I_S	A	5E-6
R_S	Ω	20
N	-	1,05
C_J	pF	0,14
I_b	A	1E-4

3.2.4. Arduino Uno

Arduino Uno, ATmega328P işlemcisine dayanan açık kaynaklı bir mikrodenetleyici kartıdır. 14 dijital I/O pini, 6 analog giriş, bir USB bağlantısı, bir güç girişi, bir ICSP başlığı ve bir sıfırlama düğmesi vardır. Mikrodenetleyiciyi desteklemek için gerekli tüm modülleri içermektedir. Çalışması için bir USB kablosuyla bilgisayara takılması veya bir adaptöre bağlanması yeterlidir.

ATMEGA328P, Microchip markasının yüksek performanslı, düşük güç kontrolcüsüdür. ATMEGA328P, AVR RISC mimarisine dayanan 8 bitlik bir mikrodenetleyicidir. Arduino kartlarında kullanıldığı için tüm AVR denetleyicileri arasında en yaygın olanıdır. Arduino Uno kartının görseli Şekil 3.5’ de verilmiştir.



Şekil 3.5. Arduino Uno

3.2.5. Gerilim Sensörü

Gerilim sensörü modülü, dirençli bir gerilim bölücü devresine dayanan 0-25 DC voltaj algılama cihazıdır. Giriş voltaj sinyalini gerilim bölücü ile azaltır ve bir analog

ıkış voltajı üretir. Herhangi bir mikrodenetleyicinin 5 V analog pinini kullanarak 25 V' a kadar gerilimi ölçebilir.

Sensörde iki direnç bulunmektedir. Giriş gerilimine yakın direnç 30 K Ω değerindedir ve toprağa yakın direnç ise 7,5 k Ω değerindedir. 7,5 k Ω üzerindeki voltaj düşüşü bölünmüş gerilimdir. Devre giriş voltajını 5' e böler. Bu nedenle sensör, bir Arduino ile 25 volttan daha düşük voltajları ölçülmesini sağlar. şekil 3.6' da gerilim sensörü grlmektedir.



şekil 3.6. Gerilim sensörü

3.2.6. RF Explorer 6G Combo

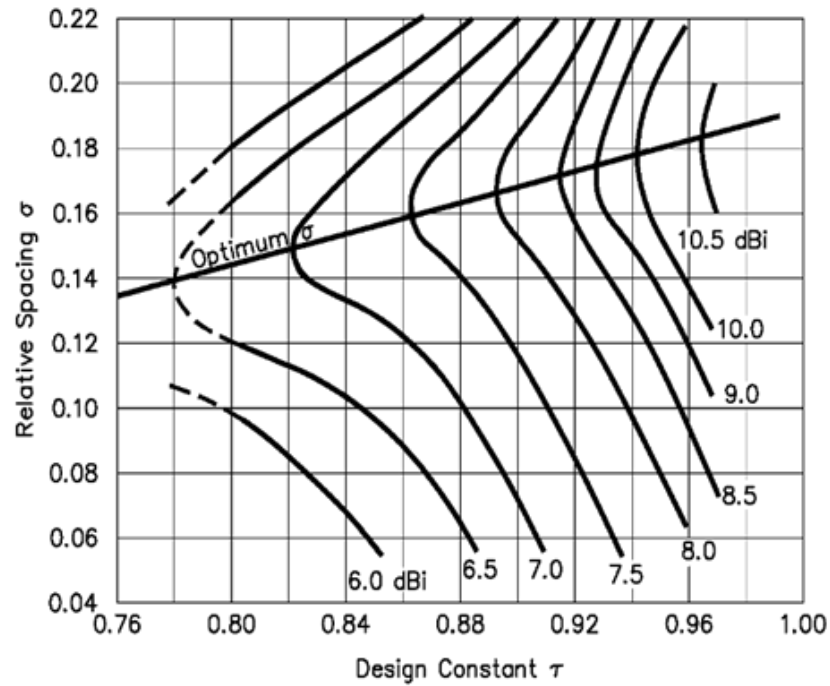
RF Explorer 6G Combo, WiFi, Bluetooth, Kablosuz Ses ve Video, LTE, GSM, GPRS, Uydu, CATV, DTV gibi frekans bantlarında çalışan bir el tipi dijital spektrum analizörüdür. Ayrıca bulunan diğer anteni ile 6G' nin alt taşıyıcı frekanslarını da ölçebilmektedir. Hem dış hem de iç mekanlarda eşit derecede kullanılmak üzere tasarlanmıştır ve standart mini USB 2.0 konektörü ile bilgisayara bağlanıp arayüzünden izlenebilir. Bu model, bir 6G temel birimi ve uygun şekilde monte edilmiş, test edilmiş bir RFEMWSUB3G genişletme modülü içerir. İki SMA konektörü ve harici  anteni vardır. RF Explorer 6G Combo cihazı şekil 3.7' de grlmektedir.



Şekil 3.7. RF Explorer 6G Combo

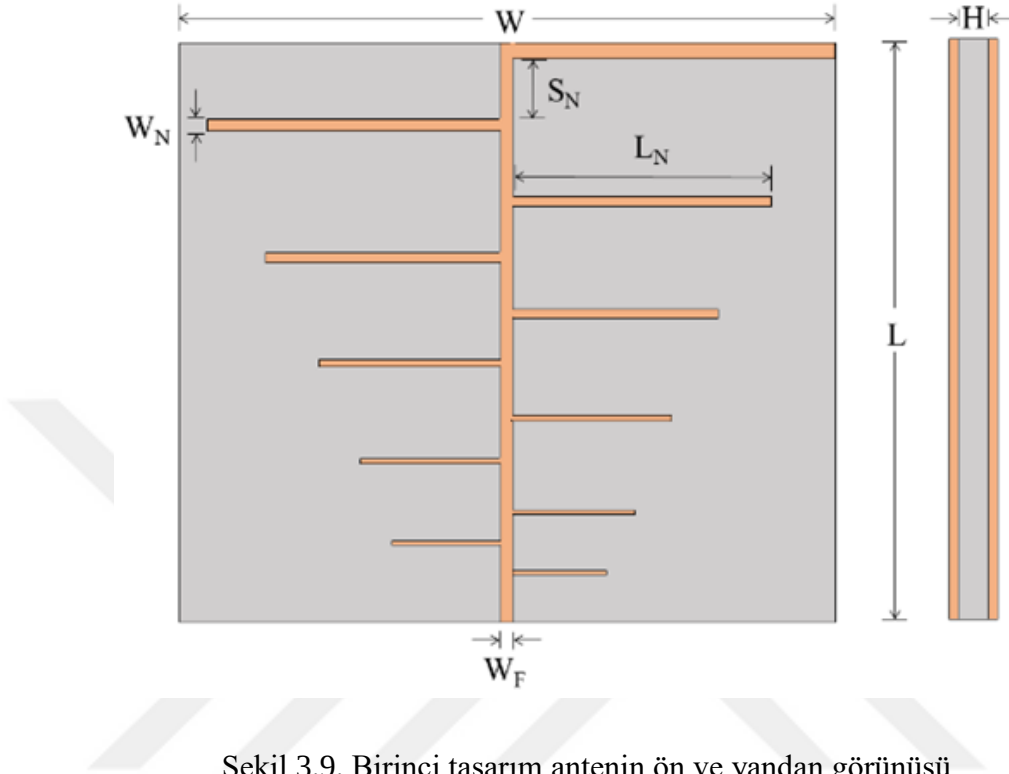
3.3. Anten Tasarımı

GSM-900/1800, UMTS-2100 ve LTE-2600 frekanslarını kapsayan bir anten tasarımı için log-periyodik anten tasarımı tercih edilmiştir. Standart baskılı log-periyodik dipol anten tasarımı temel olarak üç önemli parametre vardır. Bunlar ölçeklendirme faktörü (τ), aralık faktörü (σ) ve dipol sayısıdır (N). Log-periyodik dipol için σ ve τ ya karşı değerleri Şekil 3.8’ deki Carrel kazanç grafiği ile belirlenir (Balanis, 2016).



Şekil 3.8. Log-periyodik dipol için Carrel grafiği (Balanis, 2016)

Baskılı log-periyodik dipol anten tasarlanırken bant genişliği ve anten kazancına göre bu üç parametre göz önünde bulundurularak tasarım gerçekleştirilir. Standart log-periyodik dipol antenin (Birinci tasarım) görünüşü Şekil 3.9’ da verilmiştir.



Şekil 3.9. Birinci tasarım antenin ön ve yandan görünüşü

Ölçeklendirme faktörü Denklem 3.3 eşitliği ile hesaplanır.

$$\tau = \frac{L_N}{L_{N+1}} = \frac{W_N}{W_{N+1}} = \frac{S_N}{S_{N+1}} \quad (3.3)$$

Burada L_N antenin dipol uzunluğunun yarısını, W_N dipolün genişliğini, S_N ise dipoller arası mesafeyi ifade etmektedir.

Aralık faktörünün hesaplanması Denklem 3.4’ de verildiği gibidir.

$$\sigma = \frac{S_N}{4 \times L_N} \quad (3.4)$$

Log-periyodik dipol anten tasarımında dikey uzunluk arttırılması kazancı da arttırmaktadır. Yani aralık faktörü ne kadar büyük seçilirse anten boyutları ve anten kazancı o kadar artmaktadır. Antenin alt frekanslarda çalışması isteniyorsa en uzun

dipolünün uzunluğu arttırılmalıdır. Yatay uzunluğu antenin en uzun dipolü belirlemektedir. Yani anten alt frekansı ne kadar azaltılırsa yatay boyut o kadar büyümektedir. Diğer bir değişken olan dipol sayısının arttırılması frekans bandını arttırmaktadır. Fakat artan dipol sayısı dikey uzunluğu arttırmaktadır. Tüm bu değişkenler göz önüne alındığında anten için optimal değerler seçilmesi gerekmektedir. Bu yüzden antenin boyutunun küçültülmesi ve aynı zamanda kazancın da tatmin edici seviyelerde olması için Şekil 3.8’ de verilen grafikten yararlanarak $\tau=0,882$, $\sigma=0,006$ ve dipol sayısı $N=11$ olarak seçilmiştir. Bu parametreler göz önünde bulundurularak geleneksel baskılı log-periyodik dipol anten tasarlanmıştır. Tasarlanan standart log-periyodik antenin ölçüleri Tablo 3.3.’ de verilmiştir.

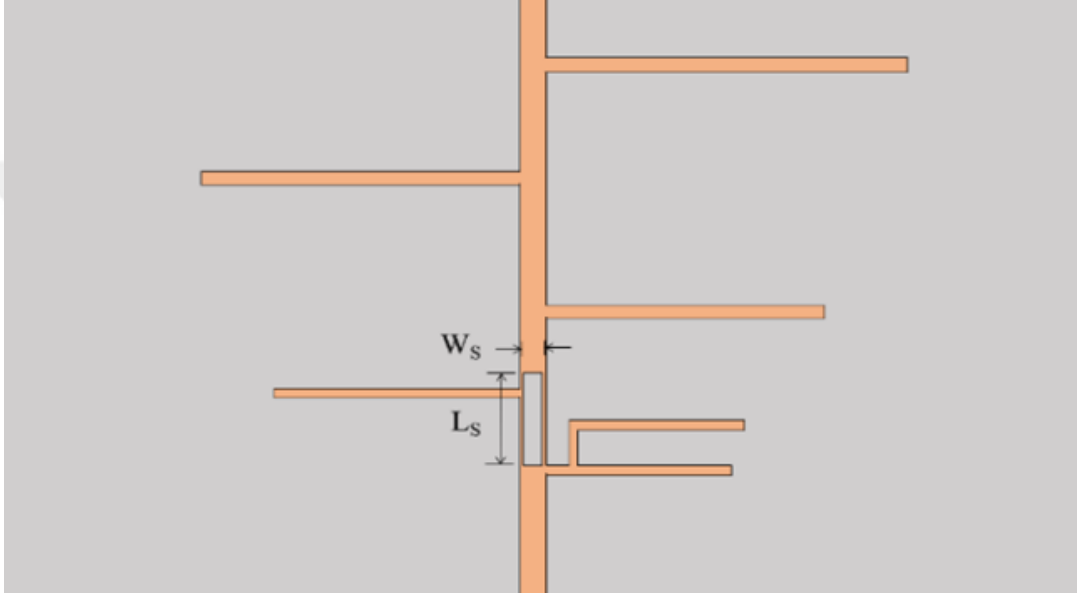
Tablo 3.2. Birinci tasarım anten için ölçüler

N	L_N (mm)	W_N (mm)	S_N (mm)
1	73,6	4	14,94
2	64,91	3,52	13,17
3	57,25	3,11	11,6
4	50,5	2,75	10,25
5	44,54	2,42	9
6	39,3	2,15	8
7	34,64	1,88	7
8	30,55	1,66	6,2
9	26,95	1,46	5,45
10	23,77	1,3	4,82
11	21	1,14	4,25

Birinci tasarım anten için $W=150$ mm, $L=123$ mm ve $H=1,6$ mm’ dir. Tasarımda $\epsilon_r=4,4$ dielektrik geçirgenliğe ve 0,025 kayıp tanjantına sahip FR-4 dielektrik malzemesi kullanılmıştır. Toprak ve yama katmanları 0,035 kalınlığında bakırdan yapılmıştır. Birinci tasarım antenin bant genişliği 0,85 GHz – 2,3 GHz aralığındadır. Mevcut tasarım, kablosuz haberleşme frekanslarından LTE-800, Wi-Fi ve LTE-2600

frekanslarını kapsamamaktadır. Ayrıca üst frekanslardaki anten kazancına bakıldığında 2 dBi gibi düşük değer görülmektedir.

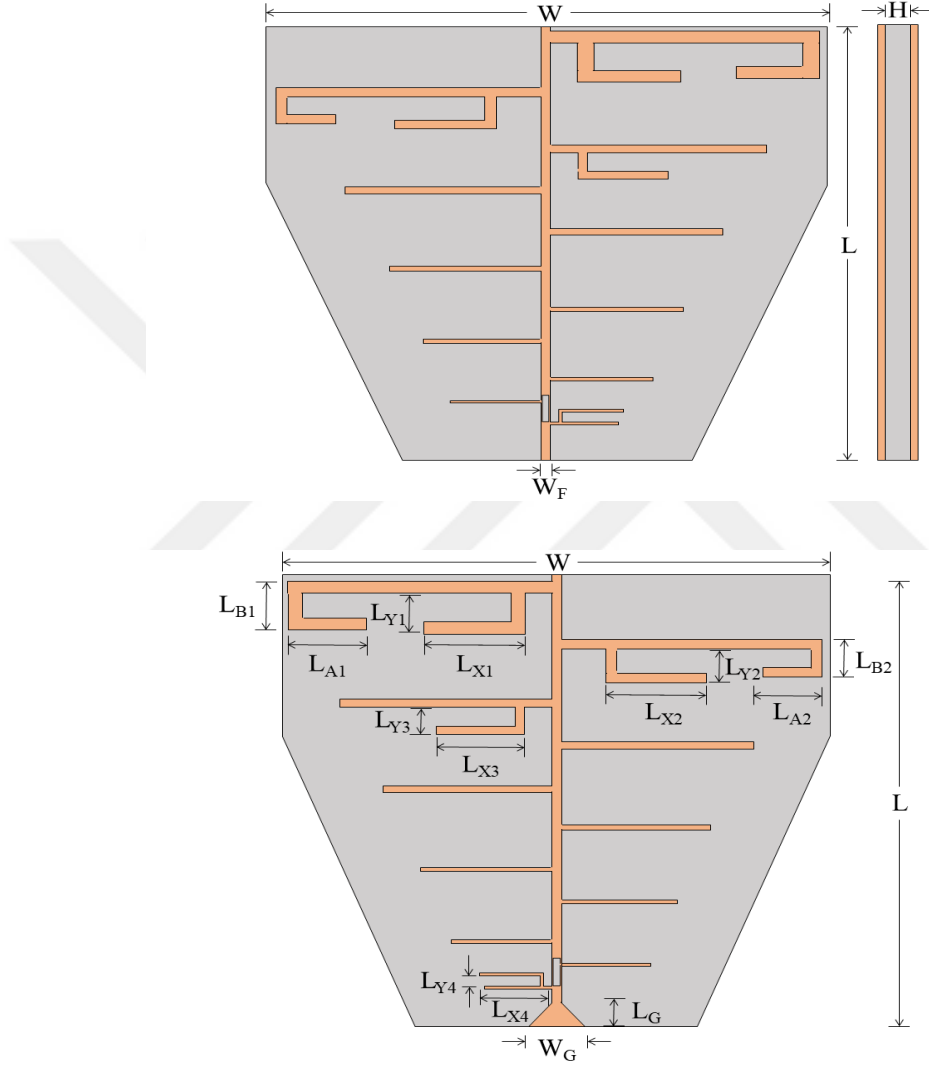
Bu dezavantajlardan dolayı yeni bant genişliği arttırılmış ve boyutları küçültülmüş optimize bir baskılı log-periyodik anten (İkinci tasarım) tasarlanmıştır. Yeni tasarımda anten genişliğini azaltmak için (Du & Jin, 2018)' deki çalışmada uygulanan en uzun iki dipol içeri katlanarak anten genişliği %14 oranında azaltılmıştır. Önerilen antenin (İkinci tasarım) ön ve arka yüzü Şekil 3.11' de gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Besleme hattı üzerine açılmış yarığın görüntüsü

İkinci tasarımda alt frekansta yüzey akım yoğunluğu fazla olan en uzun üç dipole

ek katlanmış dipoller eklenerek 850 MHz’ deki alt bant 780 MHz seviyelerine çekilmiştir. Aynı yöntem üst frekanslarda yüzey akım yoğunluğu fazla olan en kısa dipole de uygulanmıştır. Fakat üst frekanslarda LTE-2600 bandına kadar ciddi bir bant artışı gerekmektedir. Bu yüzden (Özgönül & Seçmen, 2020)’ deki çalışmada uygulanan besleme hattının alt kısmına yarık açılması yöntemi uygulanmıştır. Oluşturulan yarığın görüntüsü Şekil 3.10’ da verilmiştir.



Şekil 3.11. İkinci tasarım antenin ön ve arka yüzü

İkinci tasarım antene ait ölçüler Tablo 3.4’ de verilmiştir.

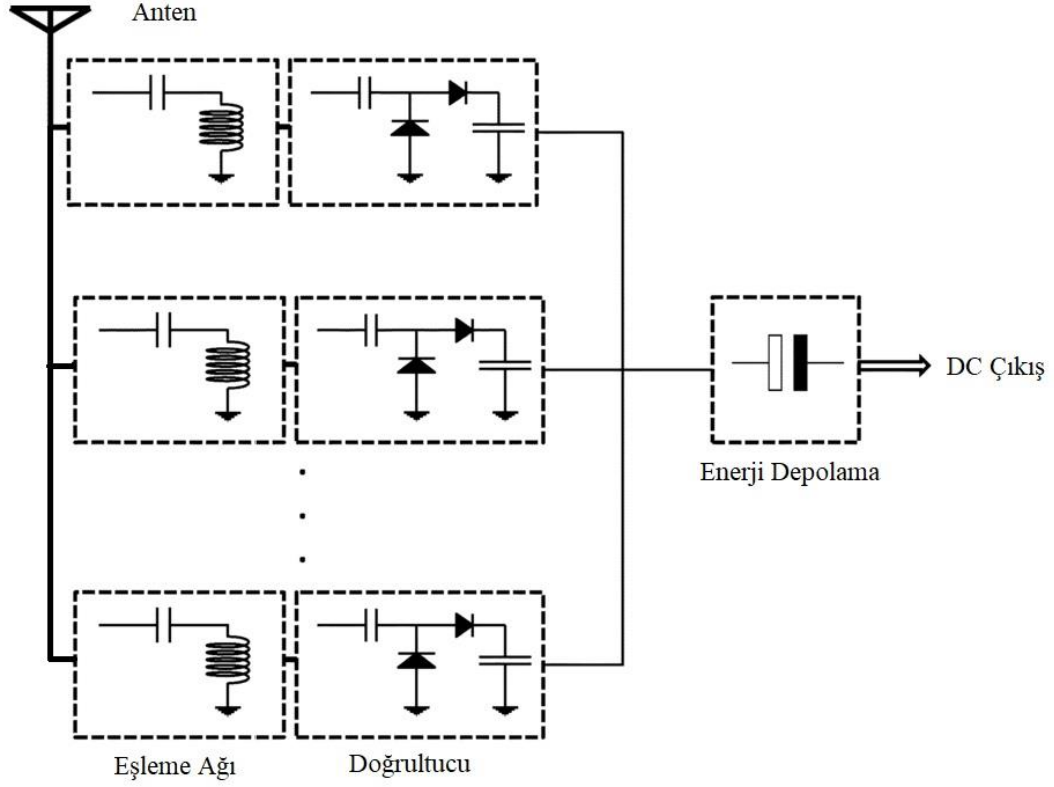
Tablo 3.3. İkinci tasarım anten için ölçüler

Parametre	Boyut (mm)	Parametre	Boyut (mm)
L_{X1}	26,42	L_{A1}	19,48
L_{X2}	26,22	L_{A2}	11,9
L_{X3}	20	L_{B1}	12,63
L_{X4}	8,7	L_{B2}	10,86
L_{Y1}	10	W_G	11,9
L_{Y2}	8,93	L_G	5,65
L_{Y3}	8	L_S	8,3
L_{Y4}	3,15	W_S	2
W	128,8	L	120,7
W_F	2,8	H	1,5

Ayrıca toprak düzleminde besleme portu kısmına üçgen şeklinde bir yama eklenmiştir. Bu yama konnektör bağlantısını uygun hale getirmiş ve üst frekanslardaki geri dönüş kaybını düşürdüğü görülmüştür.

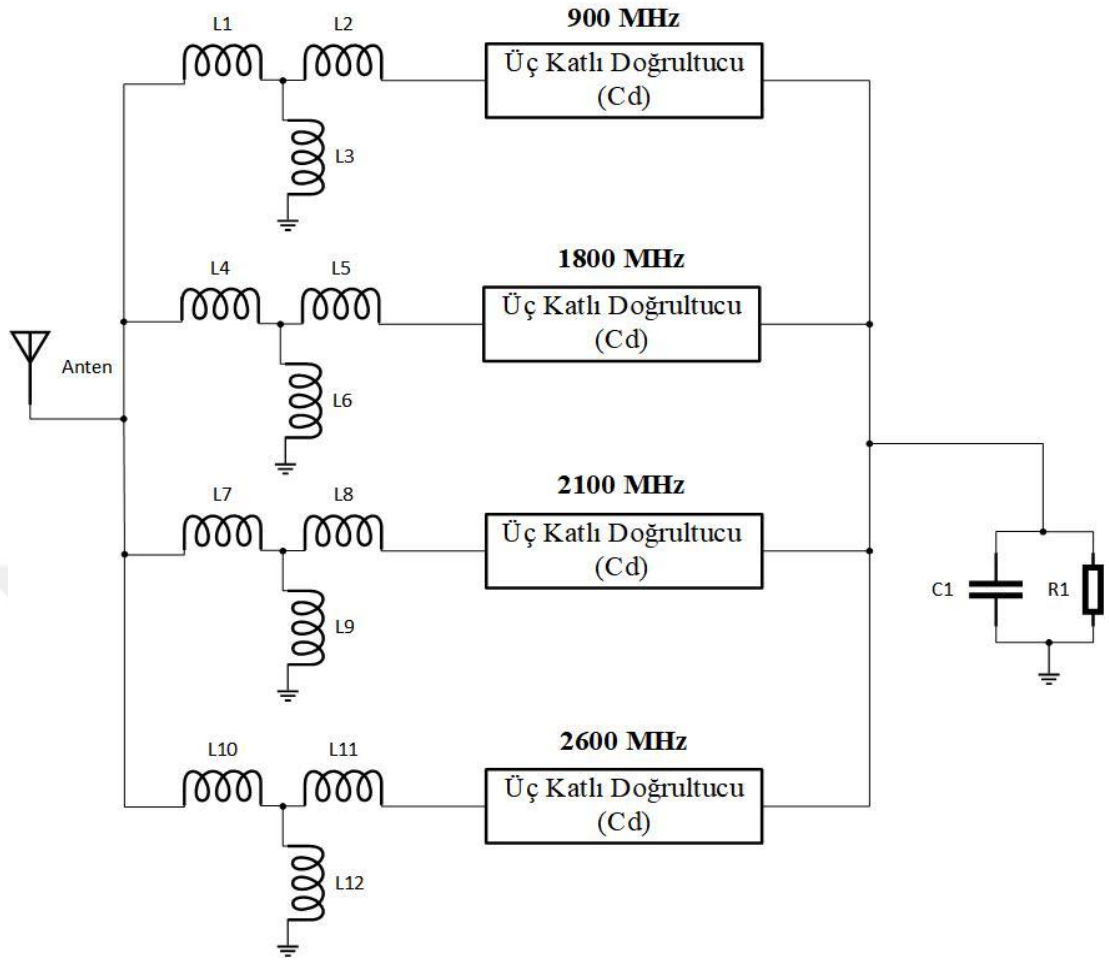
3.4. Doğrultucu Tasarımı

Log-periyodik geniş bant anten tarafından toplanan sinyaller için üç bantlı Villard doğrultucu devresinin kullanımı tercih edilmiştir. Böylece ortamda farklı bantlarda bulunan sinyalleri doğrultarak hasat edilen enerji artırılabilir. Şekil 3.12’deki blok diyagram çok bantlı gerilim katlayıcı doğrultucu tasarımını göstermektedir. Her doğrultucu kendi sinyalini birleştirir, eşleşen ağlara ve tüm bantlar için voltaj çarpanına tek bir geniş bant anteni bağlanmıştır.



Şekil 3.12. Doğrultucu tasarımının blok diyagramı

Doğrultucu tasarımı dört ana koldan oluşmaktadır. Şekil 3.13’ de gösterildiği gibi yukarıdan aşağı 900 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz ve 2600 MHz frekanslarındaki sinyalleri doğrultması hedeflenmektedir. Üç katlı doğrultucuların öncesinde bulunan indüktörler T tipi empedans eşleme bölümüdür. Bu bölüm belirtilen için empedansı 50Ω seviyesine yaklaştırarak maksimum güç aktarımını sağlar. Şekil 3.13’ deki L değerleri indüktörlerin değerini gösterirken, Cd değeri doğrultmada kuplaj kapasitörlerinin değerlerini göstermektedir. Ayrıca R1 değeri sistemin yükünü belirtirken C1 ise depolama ve filtreleme için kullanılmıştır.



Şekil 3.13. Üç katlı ve dört bantlı doğrultucu

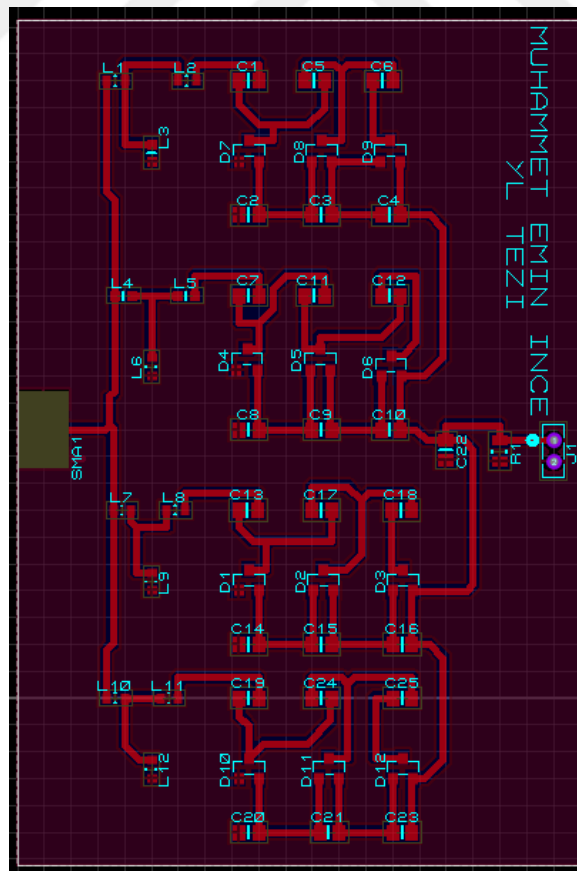
Empedans eşleme ve üç katlı doğrultucuda kullanılan elemanların değerleri Tablo 3.5’ de verilmiştir.

Tablo 3.4. Empedans eşleme ve doğrultucu elemanlarının değerleri

Parametre	Değer	Parametre	Değer	Parametre	Değer
L1	6,8 nH	L6	4,7 nH	L11	2,2 nH
L2	22 nH	L7	5,6 nH	L12	2,2 nH
L3	33 nH	L8	3,3 nH	Cd	100 pF
L4	3,3 nH	L9	4,7 nH	C1	330 pF
L5	5,6 nH	L10	3,3 nH	R1	30 kΩ

[illegible]

Ayrıca tasarlanan devrenin baskı devre çizimi yapılmıştır. Baskı devrenin çizimi Şekil 3.15’ de gösterilmiştir.



47

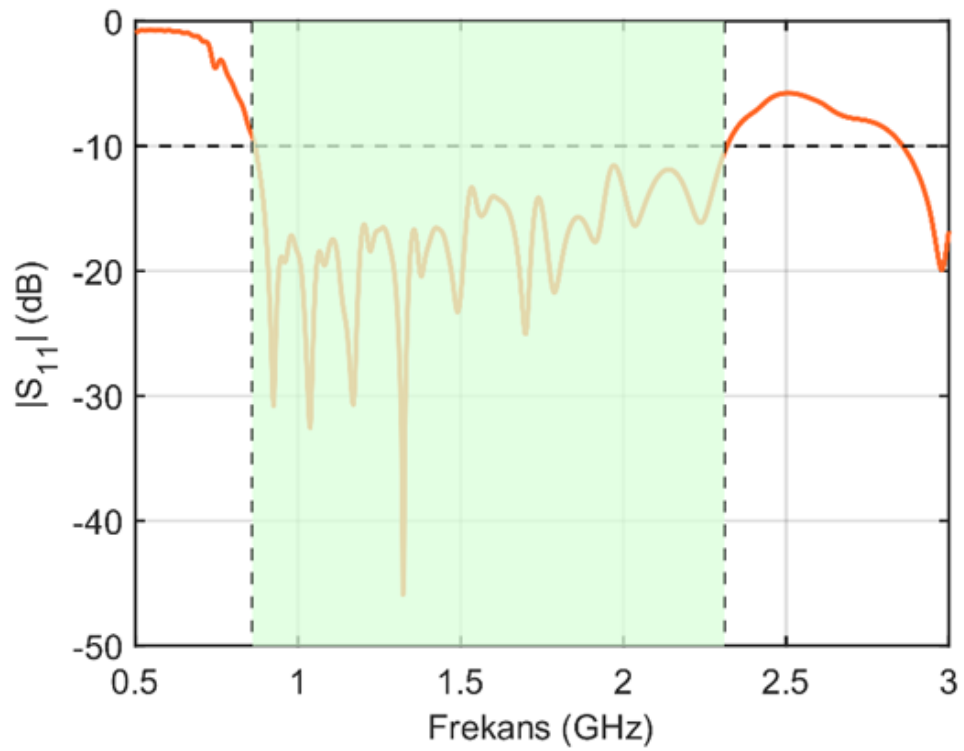
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Log-Periyodik Anten Analizleri

Tasarlanan log-periyodik antenin geri dönüş kaybı, kazancı, ışıma örüntüsü, yüzey akımları analiz edilmiştir.

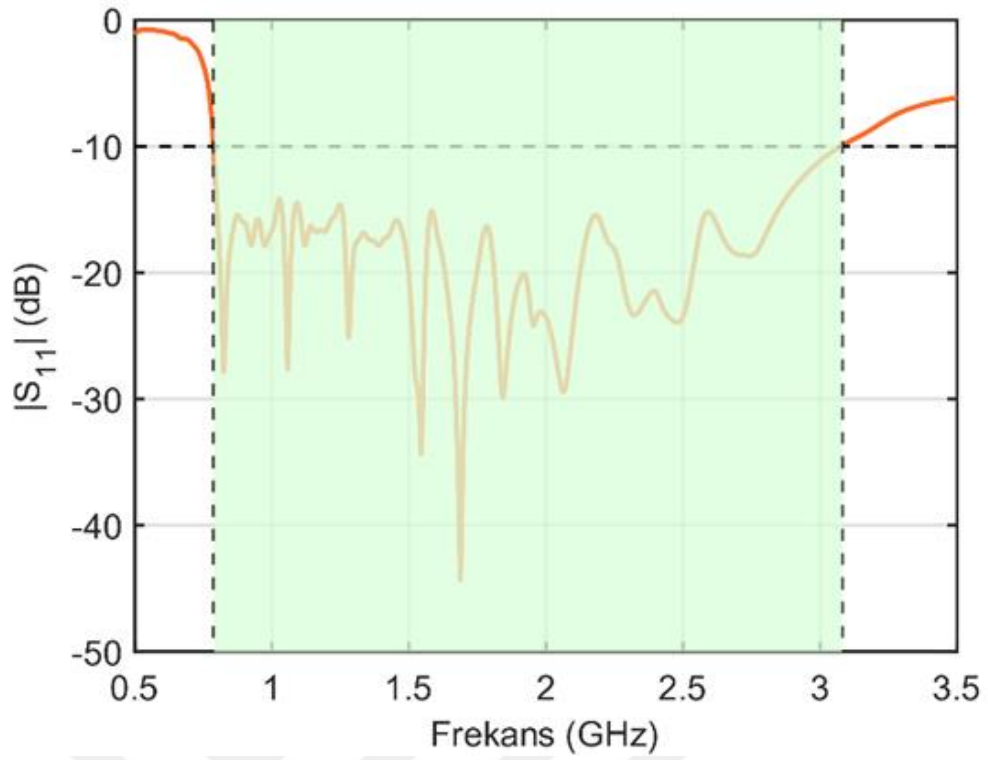
4.1.1. Geri Dönüş Kaybı

Birinci tasarım antenin geri dönüş kaybı Şekil 4.1’ de gösterilmiştir. Antenin çalışma bant aralığı 0,86 GHz ile 2,3 GHz olup bant genişliği 1,44 GHz’ dir.



Şekil 4.1. Birinci tasarım antenin geri dönüş kaybı

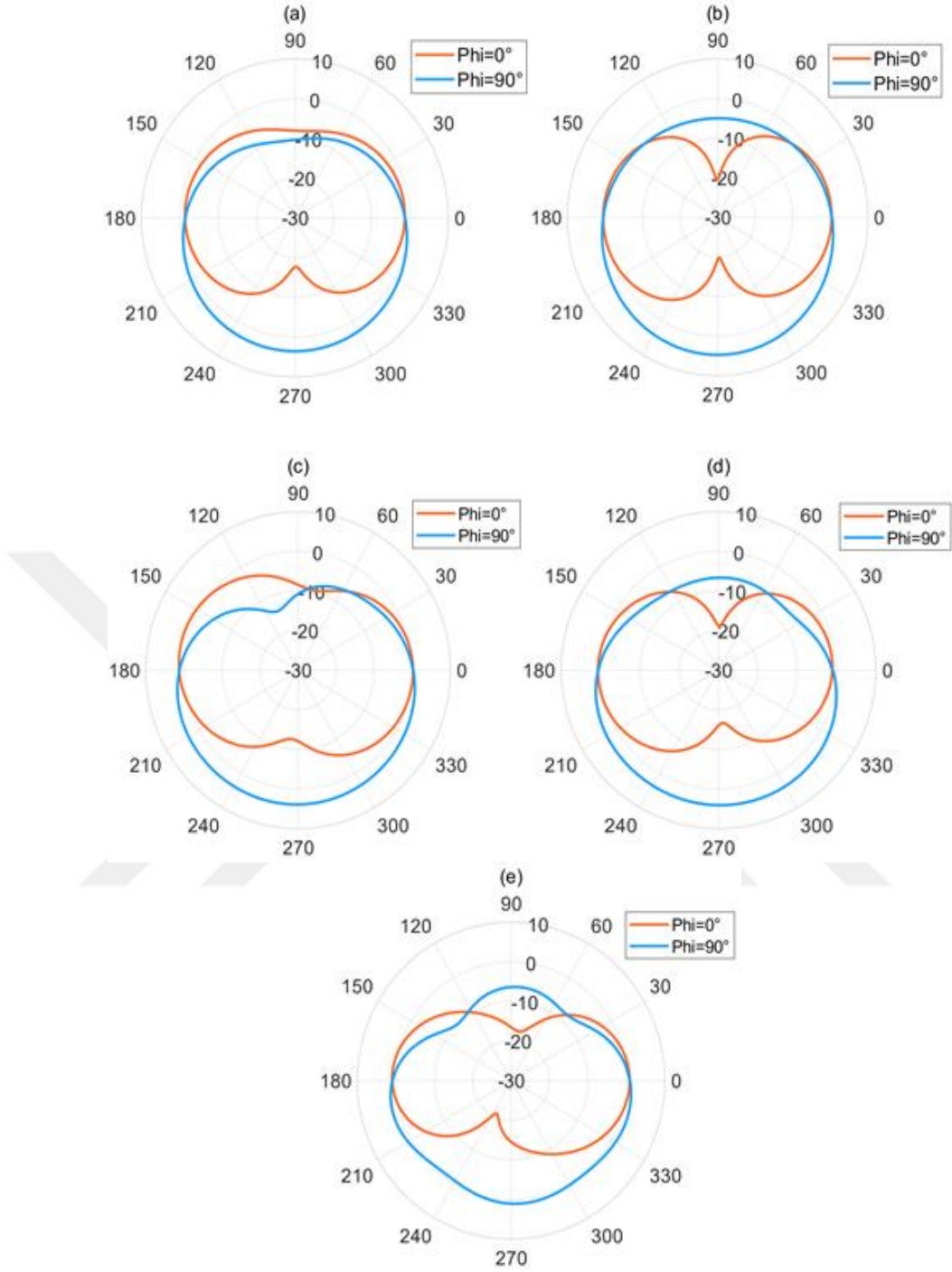
İkinci tasarım antenin S-parametresi Şekil 4.2’ de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi tasarlanan anten için 0,78 GHz – 3,1 GHz frekans aralığında geri dönüş kaybı değeri -10 dB’ nin altındadır. Tasarlanan antenin çalışma bant genişliği 2,32 GHz olup yansımaya katsayısı -44 dB değerine kadar düşebilmektedir.



Şekil 4.2. İkinci tasarım antenin geri dönüş kaybı

4.1.2. Işıma Deseni

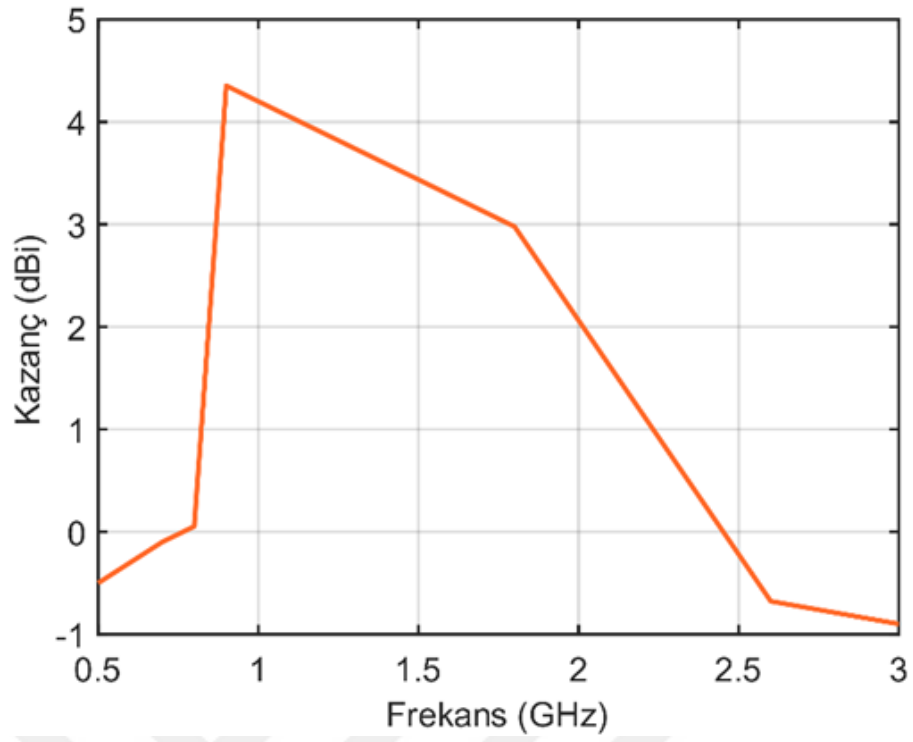
Şekil 4.3' de İkinci tasarım antenin 0,8, 0,9, 1,8, 2,1, 2,6 GHz' deki ışıma desenleri $\Phi=0^\circ$ ve $\Phi=90^\circ$ için verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi tasarlanan ikinci antenin ışıma deseni eş yöneldir. $\Phi=0^\circ$ için antenin her iki yüzü için ışıma desenleri benzerdir. $\Phi=90^\circ$ için ise 0,8, 0,9, 1,8, 2,1 ve 2,6 GHz frekanslarında antenin ışıma deseni besleme portunun olduğu kısma doğrudur.



Şekil 4.3. Önerilen antenin ışıma deseni a) 0,8 GHz, b) 0,9 GHz, c) 1,8 GHz, d) 2,1 GHz, e) 2,6 GHz

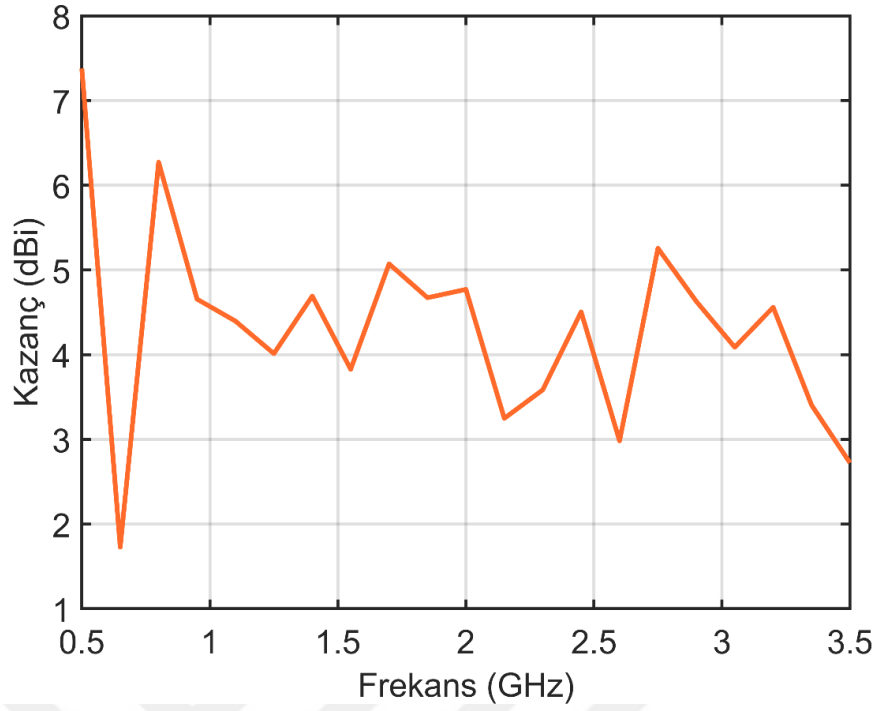
4.1.3. Anten Kazancı

Birinci tasarım antenin kazanç değişimi Şekil 4.4’ de verilmiştir. Bu antende belirtilen frekans bandında 0.9 GHz’ de tepe kazancı 4.4 dBi’ dir.



Şekil 4.4. Birinci tasarım antenin kazancın frekansla değişimi

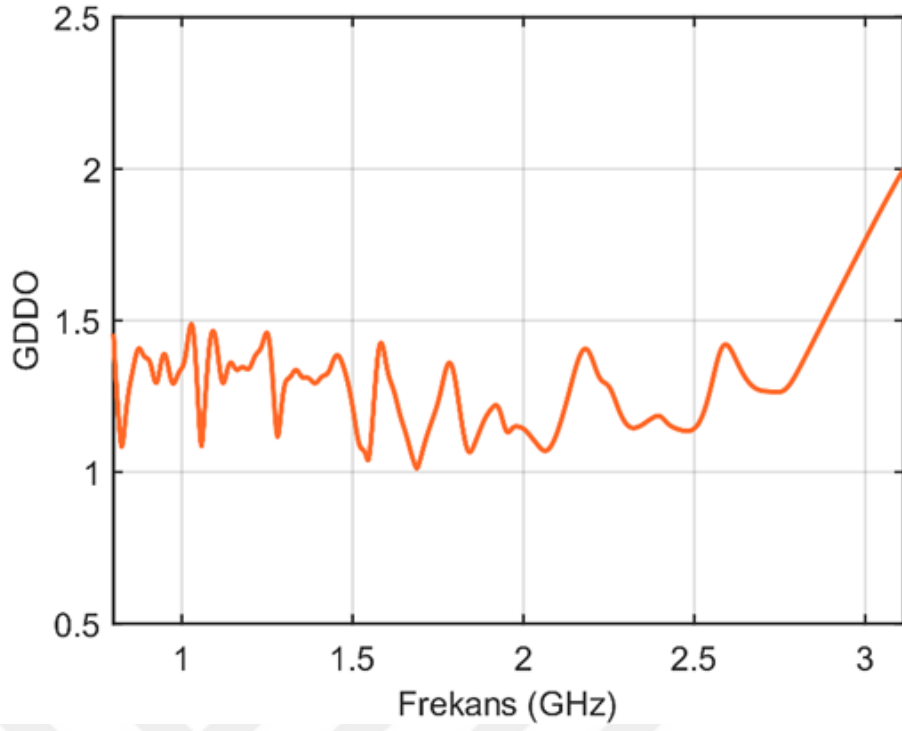
İkinci tasarım antenin frekansa bağlı kazanç değişimi Şekil 4.5’ de gösterilmiştir. Antenin en yüksek kazancı 0,8 GHz’ de 6,3 dBi iken en düşük anten kazancı ise 2,6 GHz’ de 3 dBi’ dir.



Şekil 4.5. İkinci tasarım antenin kazancın frekansla değişimi

4.1.4. Gerilim Durağan Dalga Oranı

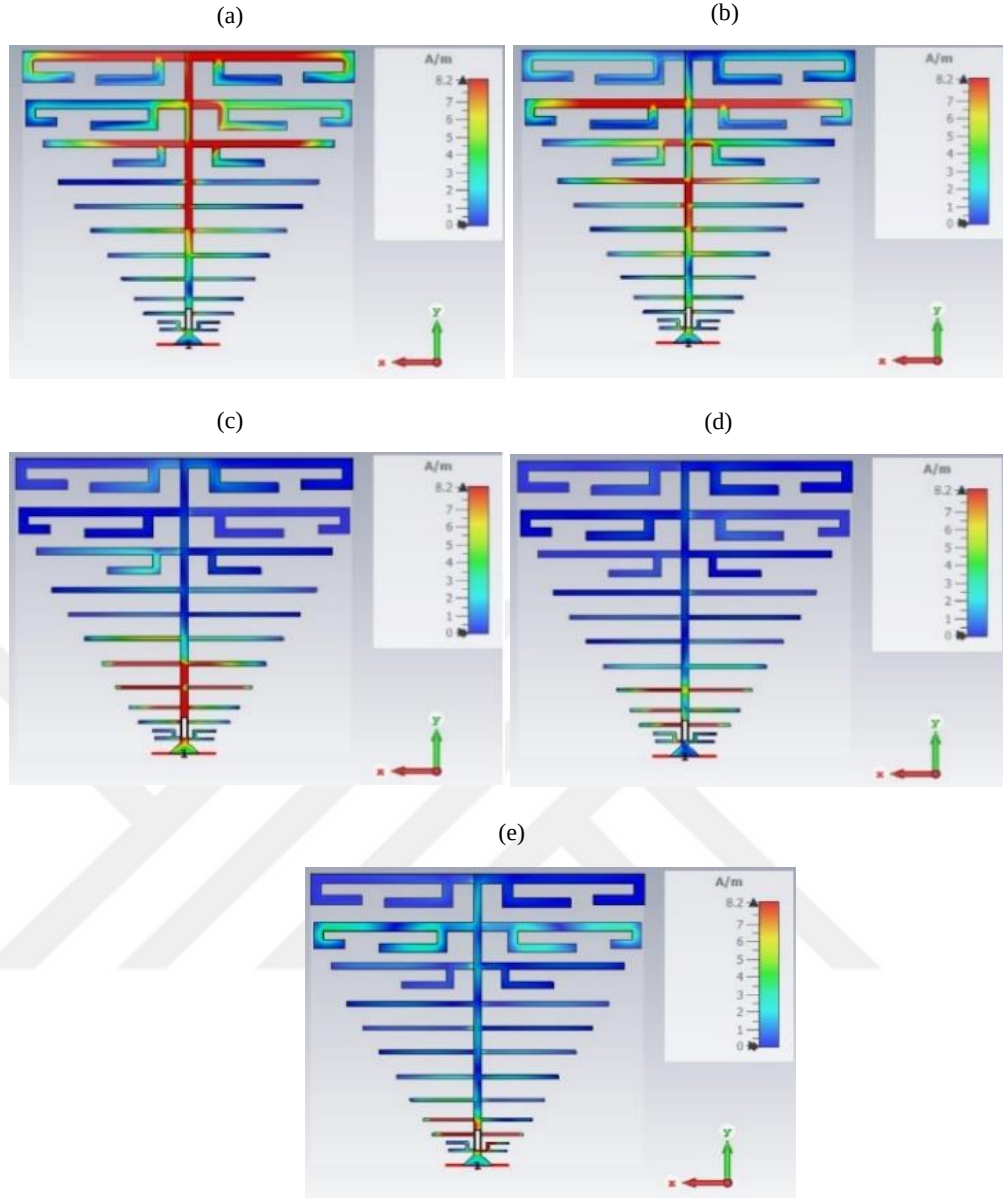
İkinci tasarım anten için gerilim durağan dalga oranı (VSWR) grafiği Şekil 4.6’ da verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi tasarlanan antenin 0,78 GHz – 3,1 GHz aralığında gerilim durağan dalga oranı (GDDO) 2’ nin altındadır.



Şekil 4.6. İkinci tasarım antenin gerilim durağan dalga oranı

4.1.5. Yüzey Akımları

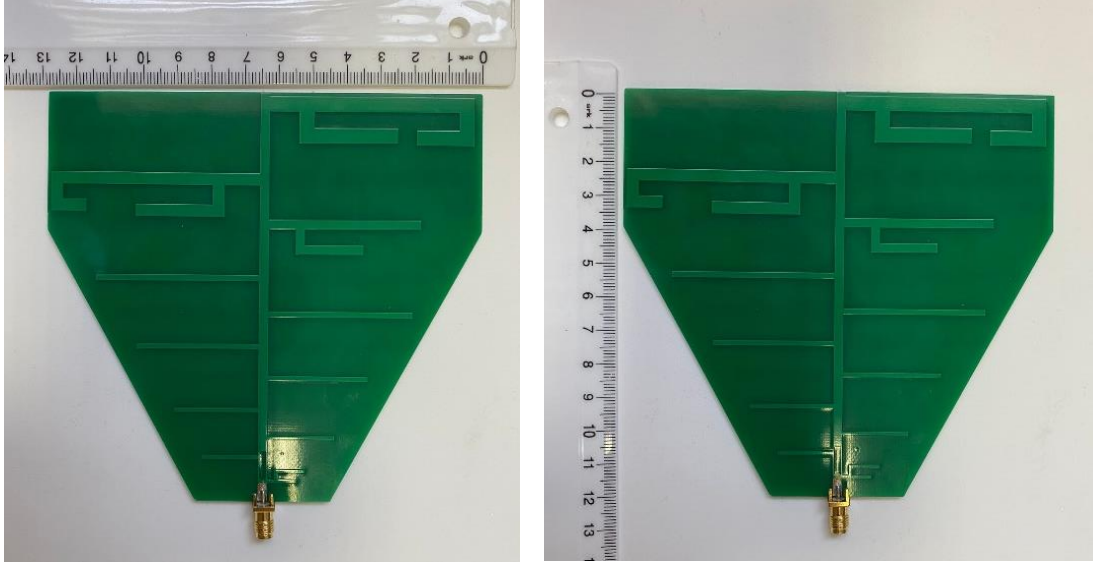
İkinci tasarım antenin yüzey akım yoğunlukları Şekil 4.7' de gösterilmiştir. Şekilde düşük frekanslarda en uzun dipollerin yüzey akımları daha yoğun iken yüksek frekanslarda kısa dipollerin yüzey akımları yoğun olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7. İkinci tasarım antenin yüzey akımlarının gösterimi a) 0,8 GHz, b) 0,9 GHz, c) 1,8 GHz, d) 2,1 GHz, e) 2,6 GHz

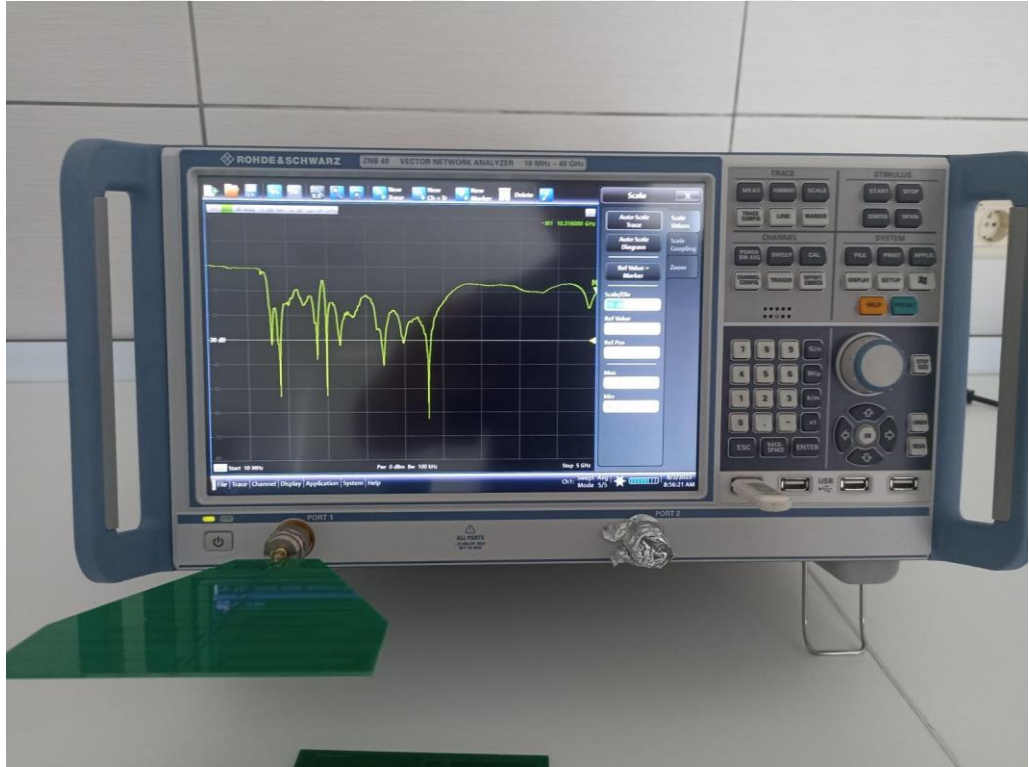
4.1.6. Log-Periyodik Anten Fabrikasyonu ve Ölçümü

Bu bölümde Log-Periyodik dipol antenin üretimi sunulmaktadır. Anten 1,6 mm kalınlığında FR-4 malzemeden üretilmiştir. Ayrıca FR-4 malzemenin alt ve üst düzlemlerinde 0,035 mm bakır bulunmaktadır. Anten 50 Ω SMA konnektör üzerinden beslenmiştir. Şekil 4.8’ de antenin fabrikasyonu gösterilmiştir.

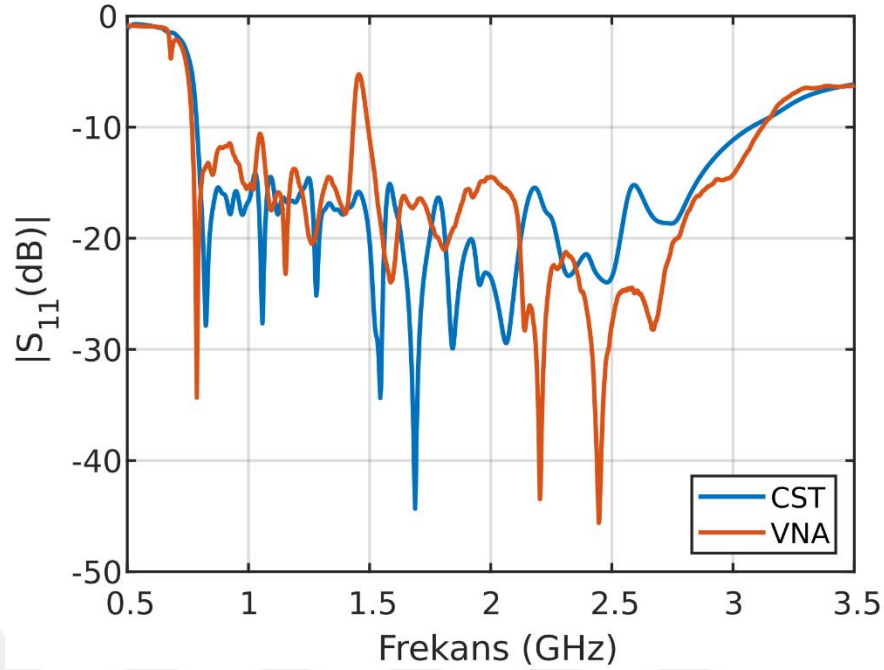


Şekil 4.8. Log-Periyodik antenin fabrikasyonu

Ağ analizörü olan ROHDE & SCHWARZ ZNB40 ile Şekil 4.9’ daki gibi geri dönüş kaybı ölçümleri yapılmıştır. Cihaz 40 GHz frekansına kadar ölçüm gerçekleştirebildiği için antenin çalışma frekansını kapsamaktadır.



Şekil 4.9. VNA ile Log-Periyodik antenin geri dönüş kaybı ölçümü



Şekil 4.10. Log-Periyodik antenin CST ve VNA sonuçları

Tasarlanan Log-Periyodik antenin CST simülasyonu ile VNA sonuçlarının karşılaştırılmalı grafiği Şekil 4.10’ da verilmiştir.

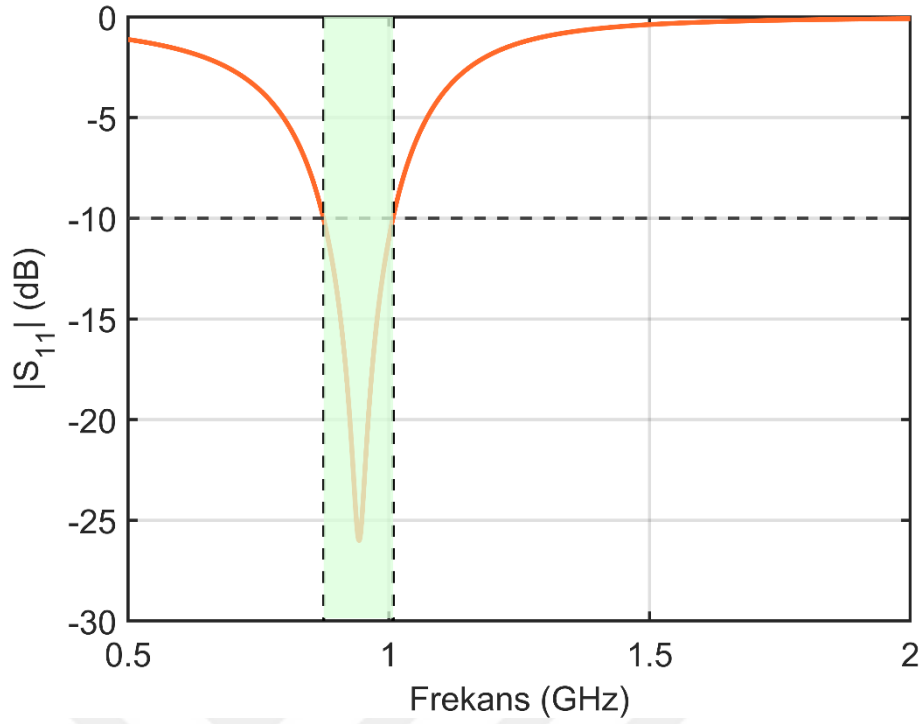
4.2. Doğrultucu Analizleri

Tasarlanan dört bantlı, dört kollu doğrultucu topolojisinin geri dönüş kaybı, verimlilik ve çıkış gerilimlerinin analizleri sunulmuştur.

4.2.1. Geri Dönüş Kaybı

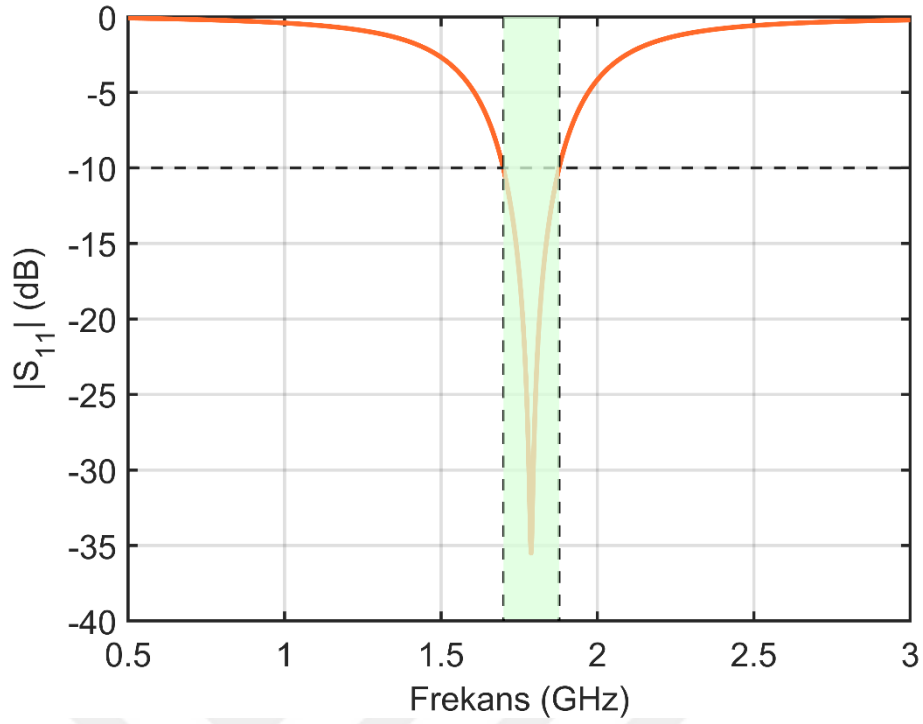
Tasarlanan doğrultucunun dört bandı için geri dönüş kaybı analizleri yapılmıştır.

Dört bantlı doğrultucunun GSM-900 sinyallerini doğrultması için tasarlanan kısmının geri dönüş kaybı grafiği Şekil 4.11’ de verilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere geri dönüş kaybı 0,87 ile yaklaşık 1 GHz arasında -10 dB’ den düşüktür. Ayrıca S_{11} değeri 0,95 GHz’ de yaklaşık -26 dB’ dedir. GSM-900 için aşağı bağlantı ve yukarı bağlantı frekanslarını kapsamaktadır.



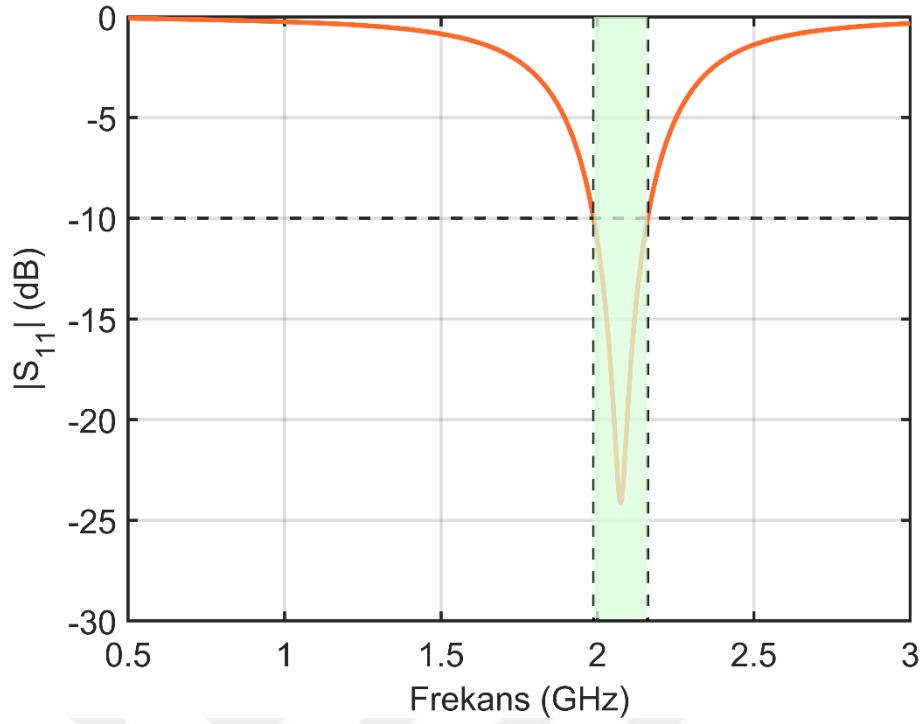
Şekil 4.11. Doğrultucunun GSM-900 için geri dönüş kaybı

GSM-1800 sinyalleri için doğrultucu tasarımının S11 grafiği Şekil 4.12’ de verilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere geri dönüş kaybı 1,7 ile yaklaşık 1,87 GHz arasında -10 dB’ den daha düşüktür. Ayrıca geri dönüş kaybı 1,86 GHz’ de yaklaşık -36 dB değerindedir. Bu değerler GSM-1800 için aşağı bağlantı ve yukarı bağlantı frekanslarını içermektedir.



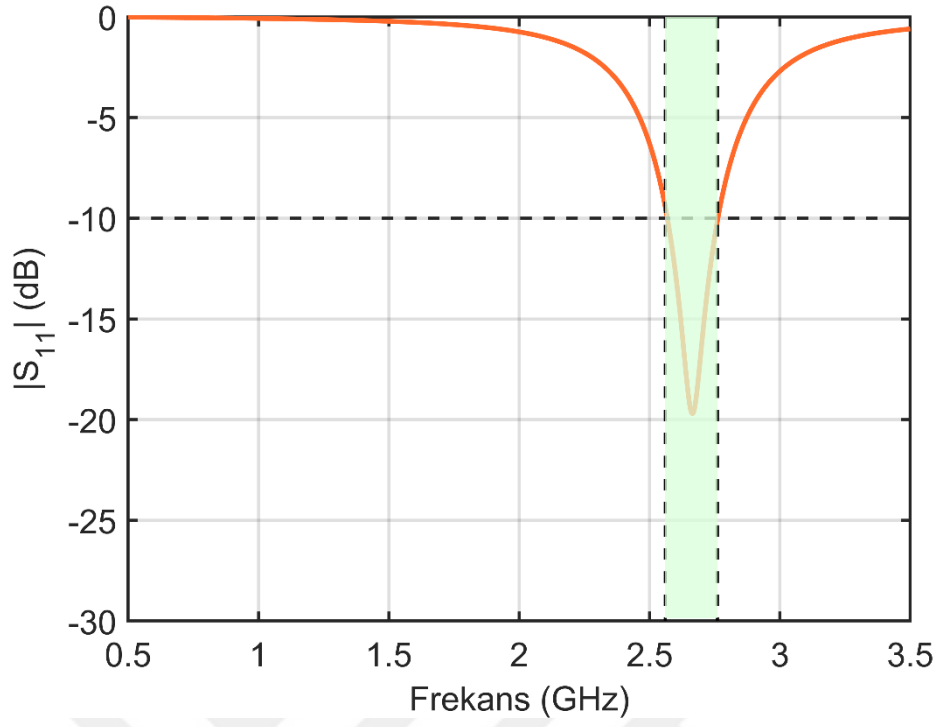
Şekil 4.12. Doğrultucunun GSM1800 için geri dönüş kaybı

Kablosuz haberleşmede kullanılan bir bant olan UMTS-2100 için tasarlanan doğrultucunun geri dönüş kaybı grafiği Şekil 4.13’ de verilmiştir. Geri dönüş kaybı 1,98 ile yaklaşık 2,16 GHz arasında -10 dB’ den daha düşük olduğu grafikte görülmektedir. Ayrıca geri dönüş kaybı 2,07 GHz’ de -24 dB değerindedir. Belirtilen frekans aralığı UMTS-2100 için aşağı bağlantı ve yukarı bağlantıları içermektedir.



Şekil 4.13. Doğrultucunun UMTS-2100 için geri dönüş kaybı

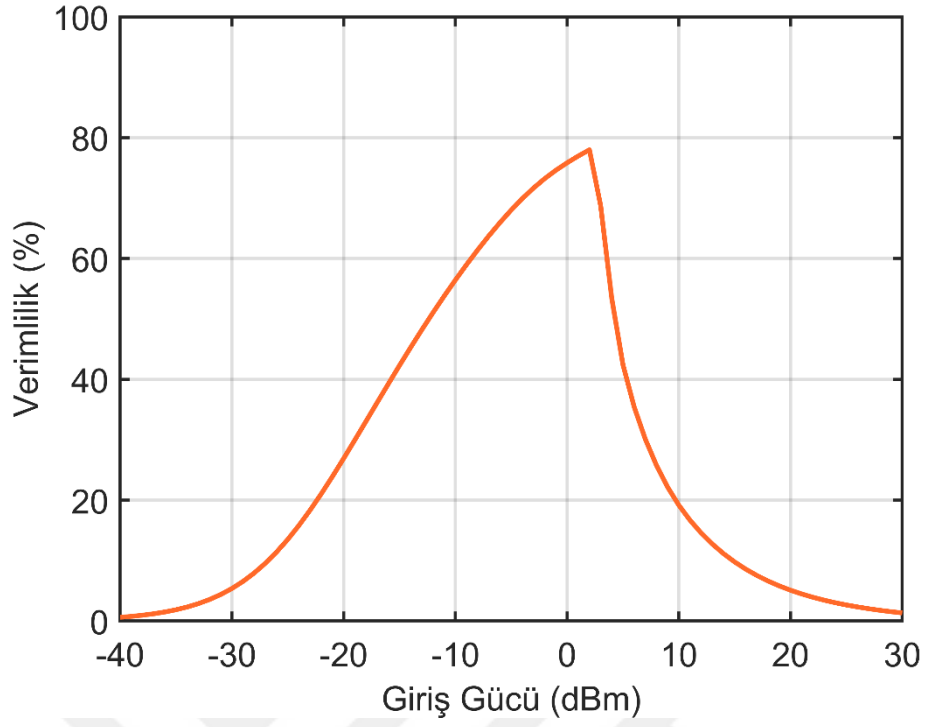
Kablosuz haberleşmede aktif olarak kullanılan son teknoloji LTE-2600 frekans bandı sinyallerini doğrultmada kullanılacak olan doğrultucu kolunun geri dönüş kaybı grafiği Şekil 4.14’ de verilmiştir. Geri dönüş kaybı 2,56 ile yaklaşık 2,76 GHz arasında -10 dB’ den daha düşük olduğu belirtilen grafikte görülmektedir. Ayrıca geri dönüş kaybı 2,66 GHz’ de yaklaşık -20 dB değerindedir. Belirtilen aralık LTE-2600 için aşağı bağlantı ve yukarı bağlantı frekanslarını kapsamaktadır.



Şekil 4.14. Doğrultucunun LTE-2600 için geri dönüş kaybı

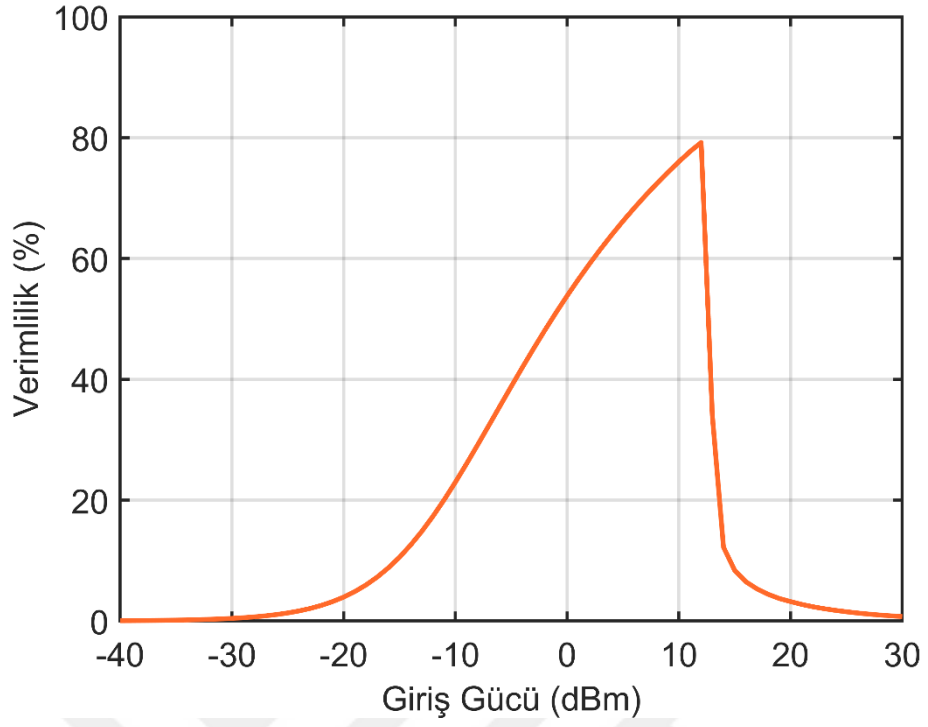
4.2.2. Verimlilik

Doğrultucunun verimliliği çıkış gücünün giriş gücüne oranı şeklinde açıklanır. Dört bantlı doğrultucunun verimlilikleri dört ayrı bant için giriş gücüne göre analizi yapılmıştır.



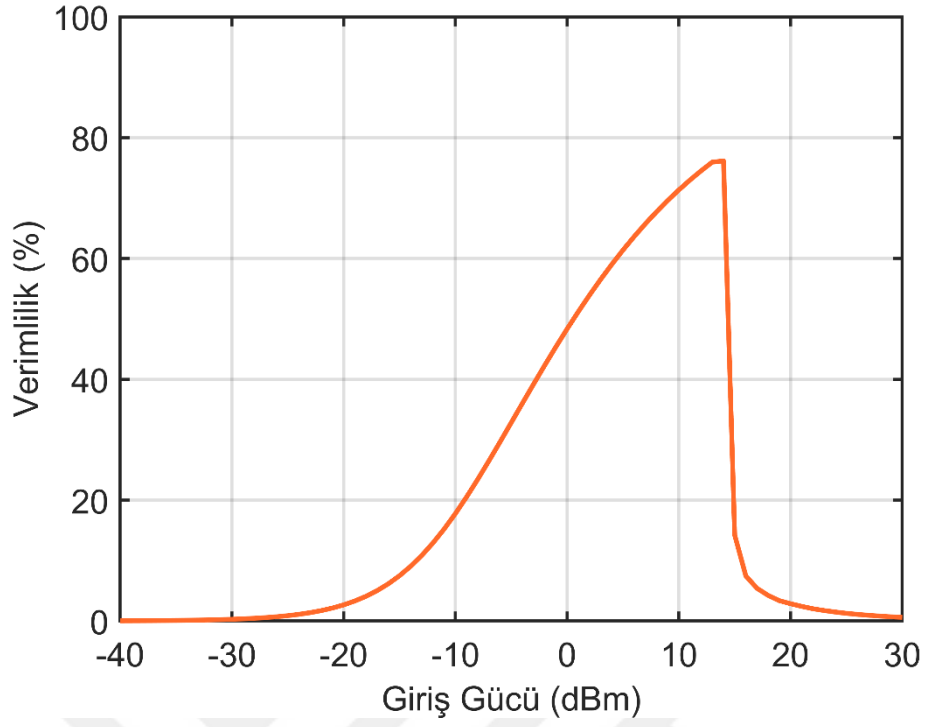
Şekil 4.15. Doğrultucunun GSM-900 için verimliliği

Doğrultucunun GSM-900’ deki verimliliği giriş gücüne bağlı olarak Şekil 4.15’ de gösterilmiştir. Giriş gücünün 2 dBm olduğu değerde verimlilik en yüksek değerine ulaşmıştır. GSM-900’ de verimliliğin tepe değeri %78’ dir.



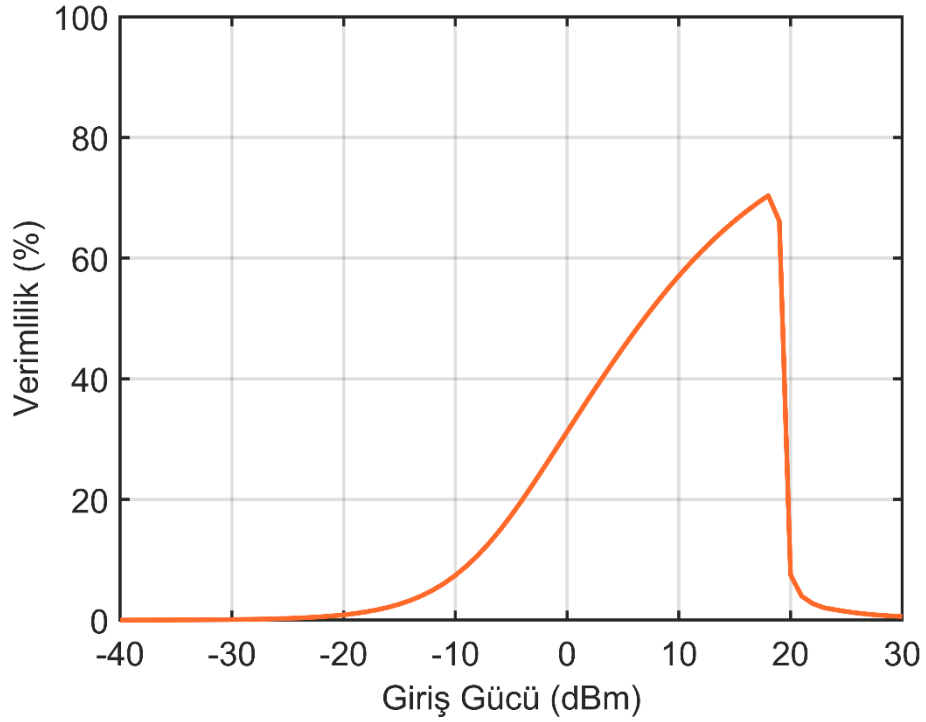
Şekil 4.16. Doğrultucunun GSM1800 için verimliliği

Tasarlanan doğrultucunun GSM1800’ deki verimliliği Şekil 4.16’ da gösterilmiştir. Giriş gücünün 12 dBm olduğu değerde verimlilik en yüksek değerine ulaşmıştır. GSM1800’ de verimliliğin tepe değeri yaklaşık %79’ dir.



Şekil 4.17. Doğrultucunun UMTS-2100 için verimliliği

Doğrultucunun UMTS-2100 kolundaki verimliliği Şekil 4.17’ de gösterilmiştir. Giriş gücü 14 dBm olduğunda verimlilik en yüksek değeri %75 değerine ulaşmıştır.

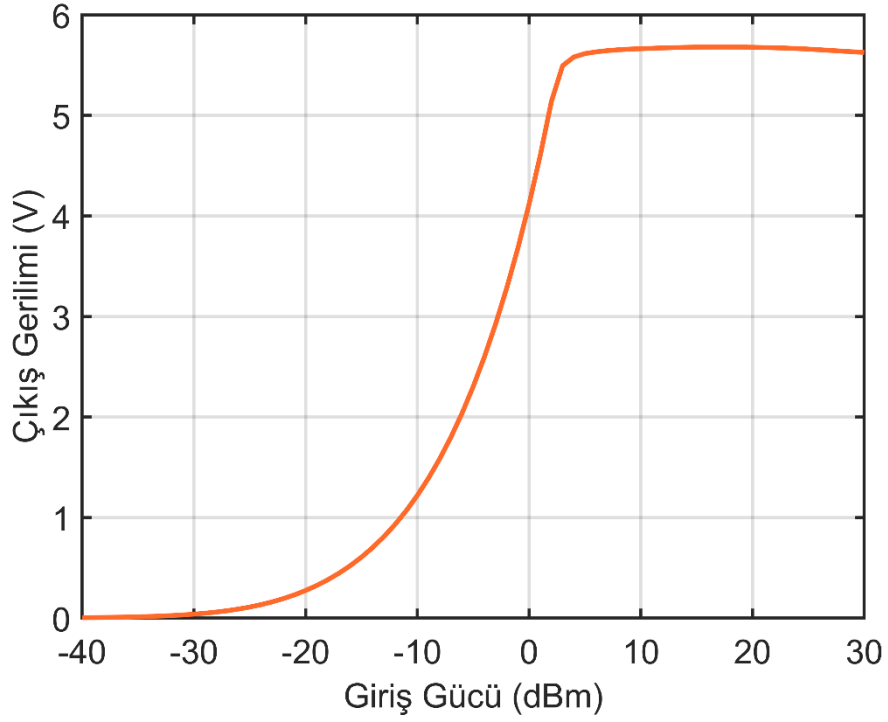


Şekil 4.18. Doğrultucunun LTE-2600 için verimliliği

LTE-2600 frekansındaki doğrultucu verimliliği Şekil 4.18’ de gösterilmiştir. Giriş gücü 17 dBm olduğunda verimlilik en yüksek değeri %68 değerine ulaşmıştır.

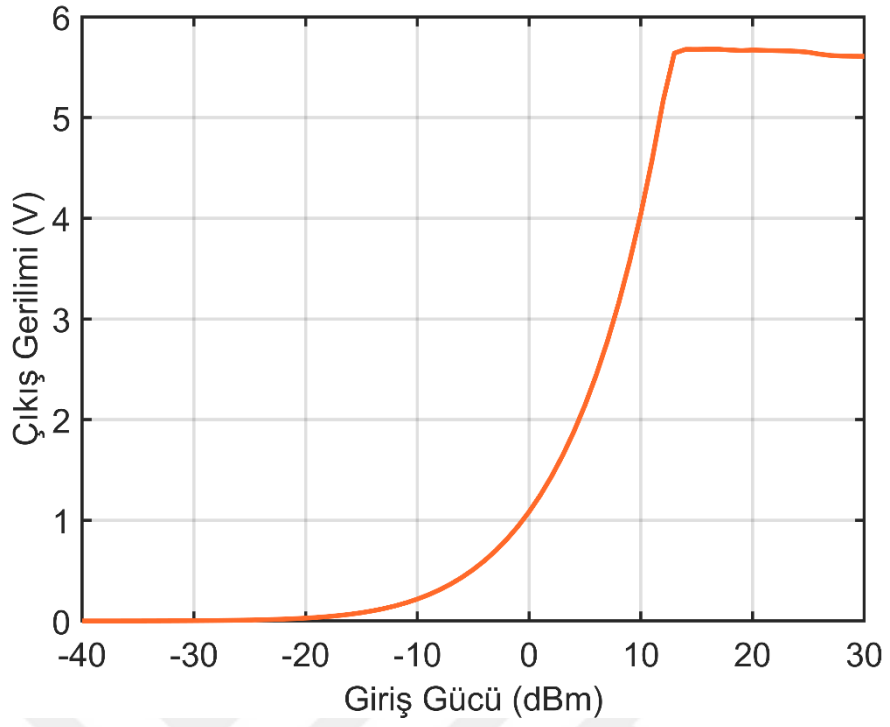
4.2.3. Çıkış Gerilimi

Çıkış gerilimi doğrultucu çıkışında elde edilen voltaj değeridir. Çıkış gerilimi, giriş gücüne bağlı olarak doğrultucunun dört ayrı frekansı için incelenmiştir



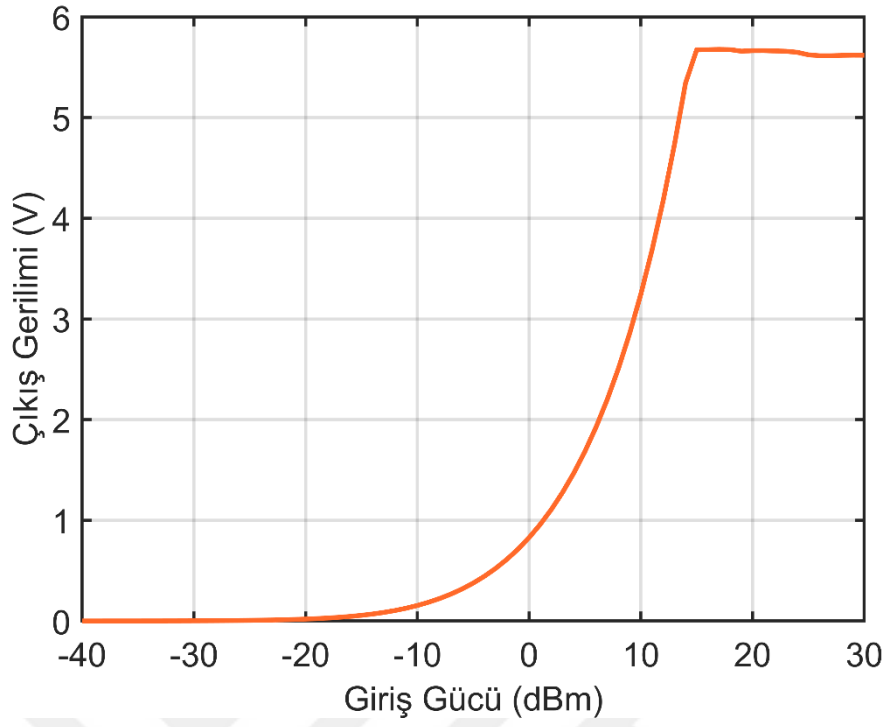
Şekil 4.19. Doğrultucunun GSM-900 için çıkış gerilimi

Çıkış gerilimi, doğrultucunun GSM-900 bandında 5.6 V değerine ulaşmıştır. Şekil 4.19’ da görüldüğü gibi doğrultucu çıkışında elde edilen maksimum değer olan 5.6 V değeri 3 dBm giriş gücünde elde edilmiştir.



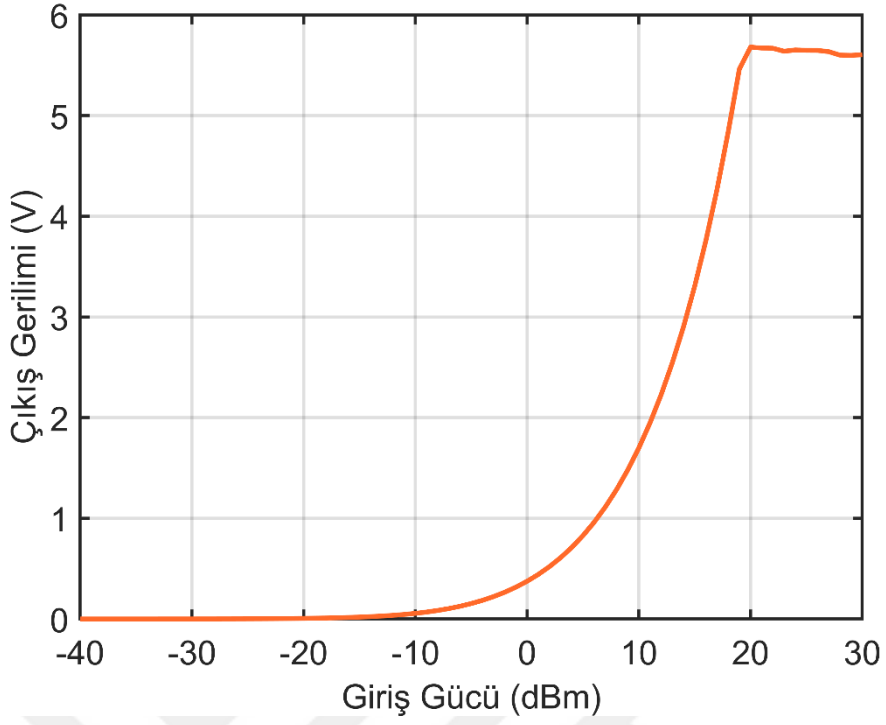
Şekil 4.20. Doğrultucunun GSM1800 için çıkış gerilimi

Şekil 4.20’ de görüldüğü üzere GSM1800 bandında çıkış gerilimi en yüksek değer olan 5.6 V’ dur. Belirtilen frekansta doğrultucu çıkışında elde edilen maksimum değer 12 dBm giriş gücünde elde edilmiştir.



Şekil 4.21. Doğrultucunun UMTS-2100 için çıkış gerilimi

Doğrultucunun UMTS-2100 bandında çıkış gerilimi tepe değeri 5.6 V'dur. Şekil 4.21'de görüldüğü gibi 2100 MHz'de doğrultucu çıkışında elde edilen maksimum değer 15 dBm giriş gücünde olduğu görülmüştür.

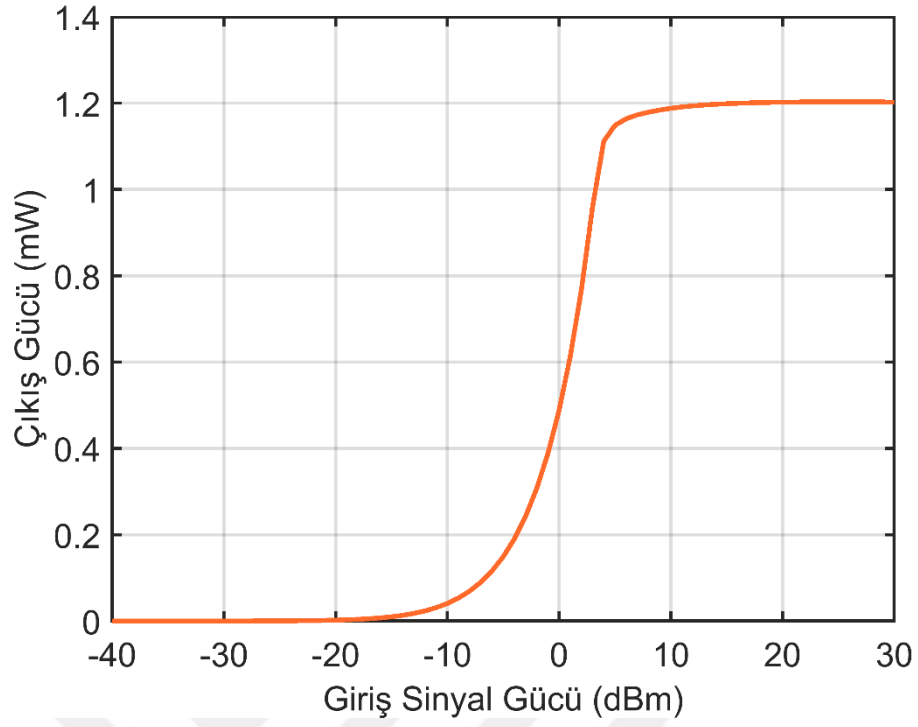


Şekil 4.22. Doğrultucunun LTE-2600 için çıkış gerilimi

2600 MHz frekansı için doğrultucu çıkış gerilimi 5.6 V ile en yüksek değerine ulaşmıştır. Şekil 4.22’ de gösterildiği gibi LTE-2600 bandında doğrultucu çıkışında, elde edilen maksimum değerine 20 dBm giriş gücünde ulaşmıştır.

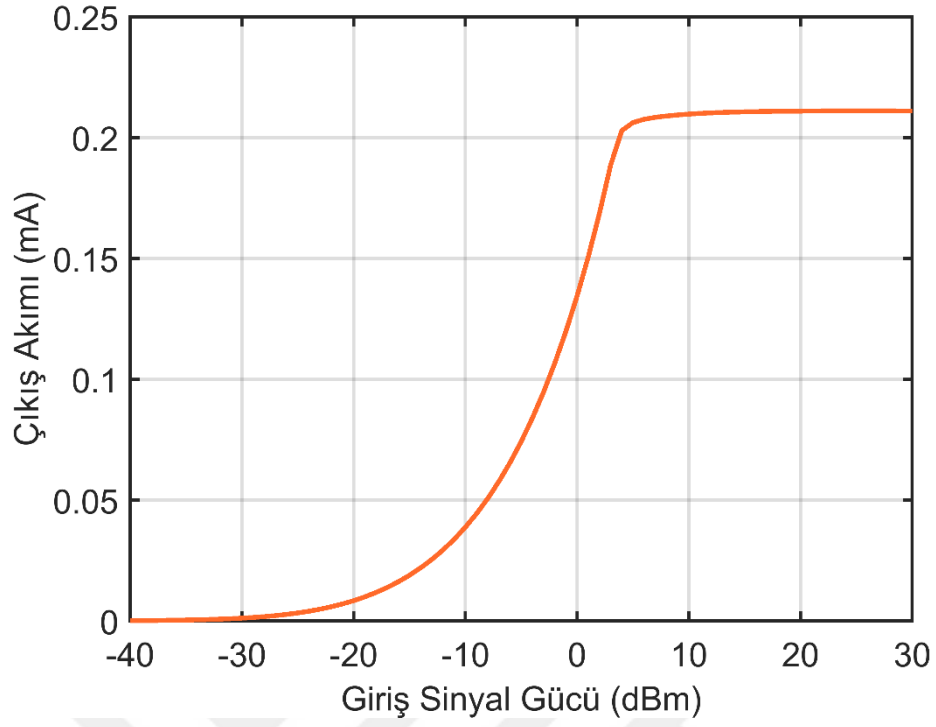
4.2.4. Çıkış Gücü

Enerji hasat sisteminin mW cinsinden çıkış gücü Şekil 4.23’ de verilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere alınan güç -15 dBm ve daha düşük değerlerde çıkış gücü μ W seviyelerindedir. Sinyal gücü arttıkça maksimum güce ulaşmaktadır. Maksimum güç 14 dBm’ de 1.2 mW seviyesindedir.



Şekil 4.23. Giriş sinyal gücüne göre çıkış gücü

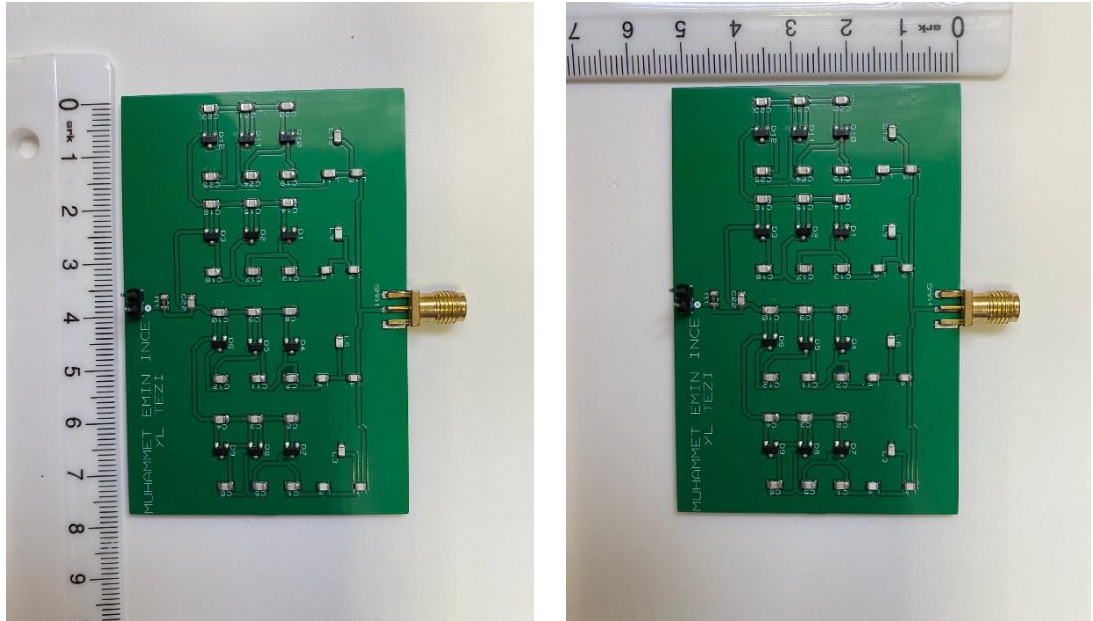
Enerji hasat sisteminin giriş sinyal gücüne göre çıkış akım grafiği Şekil 4.24’ de verilmiştir. Çıkış akımının maksimum değeri 3 dB değerinde 0.21 mA’ dir. Çıkış akımı düşük seviyelerde olmasına rağmen çıkış geriliminin tatmin edici seviyelerde olması, düşük güçlü sistemlere güç sağlayabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.24. Giriş sinyal gücüne göre çıkış akımı

4.2.5. Doğrultucu Fabrikasyonu

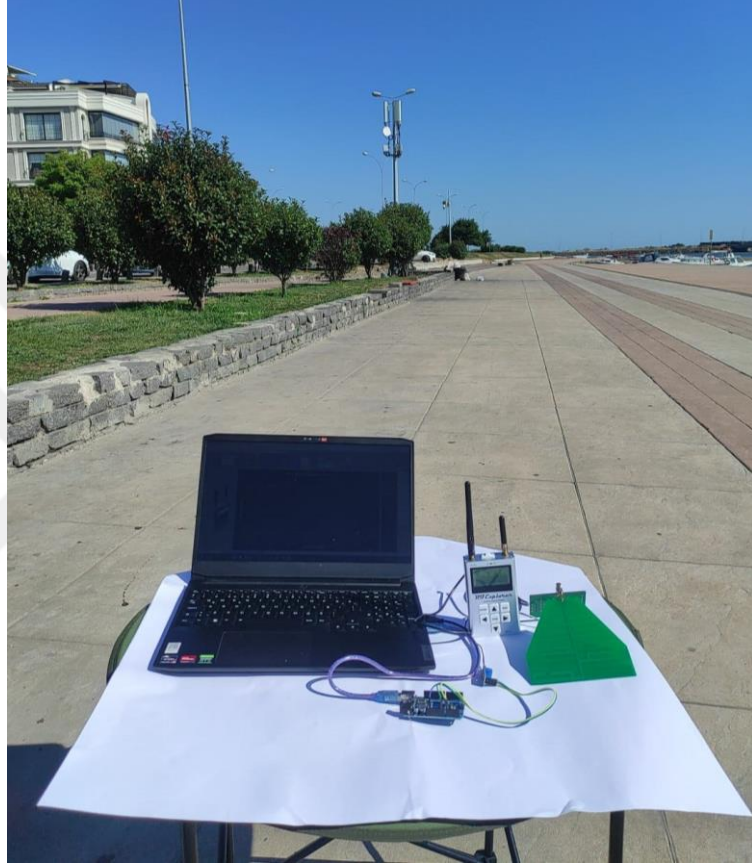
Advanced Design System ve Proteus programında tasarlanan doğrultucuda FR-4 malzemesi kullanılmıştır. Tasarlanan baskı devreye komponentler krem lehim kullanılarak montajı yapılmıştır. Ayrıca anten girişinde 50 Ω SMA konnektör kullanılmıştır. Doğrultucunun fabrikasyonu Şekil 4.25’ de görülmektedir.



Şekil 4.25. Doğrultucu fabrikasyonu

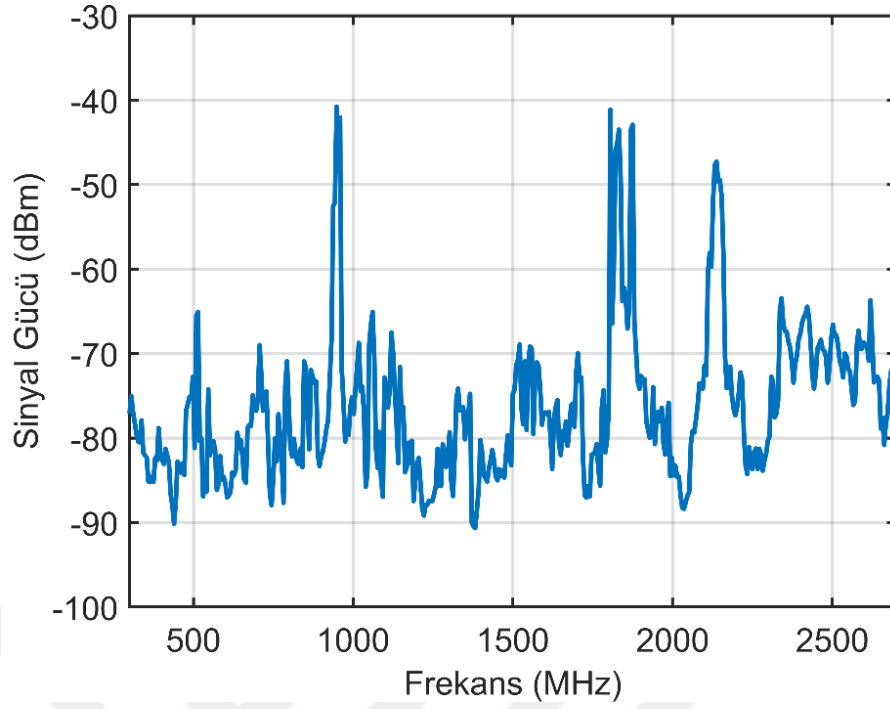
4.3. Dış Ortam Ölçümleri

Bu bölümde tasarlanan RF enerji hasat sisteminin dış ortam ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler için Samsun ilinde bulunan 10 adet konum belirlenmiştir. Bu konumlarda direk tipi baz istasyonlarının bulunduğu konumdan yaklaşık 30 metre mesafede 1 dakika süre boyunca ölçülmüştür. Konum-1 için ölçüm düzeneği Şekil 4.26' da gösterilmiştir.



Şekil 4.26. Konum-1 için ölçüm düzeneği

Spektrum analizörü ile de aynı anda sinyal gücü ölçümü yapılmıştır. Konum 1 için 700-2700 MHz aralığında ölçülen spektrum Şekil 4.27' de verilmiştir.



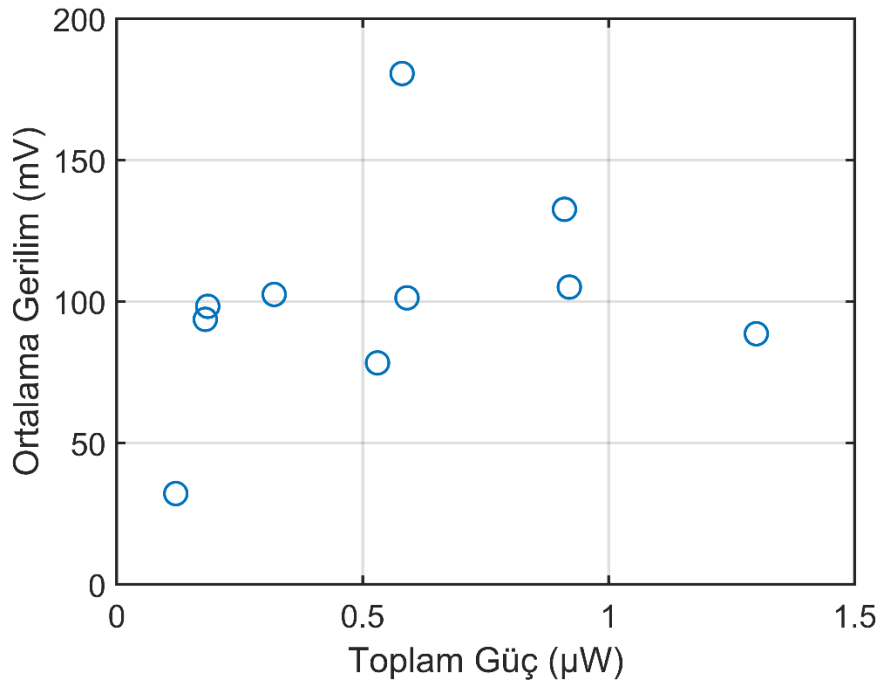
Şekil 4.27. Konum-1 için frekans spektrumu

Dört farklı bant için sinyal gücü ve çıkış gerilimlerinin 1 dakikadaki ortalamaları Tablo 4.1’ de gösterilmiştir. Yukarı bağlantı frekans bandındaki sinyal gücü aşağı bağlantı frekans bandındaki sinyal gücünden genel olarak daha düşük olduğu için aşağı bağlantı sinyal güçleri dikkate alınmıştır. AB aşağı bağlantıyı YB ise yukarı bağlantıyı ifade etmektedir.

Tablo 4.1. Sinyal gücü ve çıkış gerilimleri

	800 MHz		900 MHz		1800 MHz		2100 MHz		2600 MHz		Toplam Güç (μW)	Toplam Güç (dBm)	Ortalama Gerilim(mV)
	Sinyal Gücü(dBm)		Sinyal Gücü(dBm)		Sinyal Gücü(dBm)		Sinyal Gücü(dBm)		Sinyal Gücü(dBm)				
	AB	YB	AB	YB	AB	YB	AB	YB	AB	YB	AB	AB	
Konum-1	-70,91	-71	-40,77	-73,27	-41,13	-72,83	-47,27	-73,96	-63,68	-66,6	0,18 μW	-37,45	93,7
Konum-2	-34,55	-65,55	-33,23	-65,82	-43,82	-71,6	-44,64	-73,55	-49,18	-59,23	0,91 μW	-30,41	132,6
Konum-3	-44,5	69,59	-36,5	-62,14	-43,05	-69,91	-48,05	-69	-54,09	-55,41	0,32 μW	-34,95	102,5
Konum-4	-54,45	-71,82	-53,95	-78,27	-42,41	-67,27	-39,32	-71,36	-54,14	-70,23	0,185 μW	-37,33	98,3
Konum-5	-50,32	-77,09	-28,95	-70,09	-52,23	-74,5	-43,91	-67,59	-72,23	-67,55	1,3 μW	-28,86	88,6
Konum-6	-49,23	-76,32	-39,41	-78,05	-65,45	-91,23	-60,64	-87,5	-82,86	-74,14	0,12 μW	-39,21	32,1
Konum-7	-41,95	-59,5	-43,95	-62,6	-38,14	-59,5	-34,86	-54,18	-54,82	-58,68	0,58 μW	-32,37	180,6
Konum-8	-48,14	-77,14	-50,95	-78,5	-33,45	-63,95	-42,36	-63,6	-61,05	-57,68	0,53 μW	-32,76	78,3
Konum-9	-43,27	-64,05	-42,5	-69,36	-33,18	-59,41	-55,41	-64	-52,91	-60,14	0,59 μW	-32,29	101,3
Konum-10	-50,36	-76,95	-31	-71,59	-64,38	-68,92	-40,64	-66,92	-44,23	-69	0,92 μW	-30,36	105,1

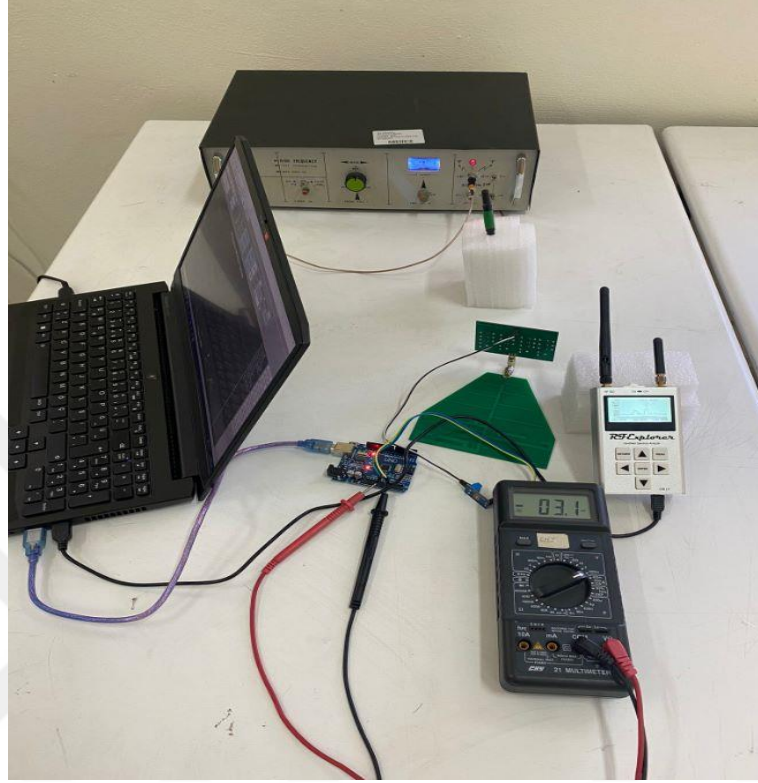
Ayrıca Tablo 4.1’ de bulunan μ W cinsinden toplam alınan güç ve ortalama gerilimlerin her konum için ayrı ayrı Şekil 4.28’ deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 4.28. Farklı 10 konum için toplam alınan güce karşılık gelen ortalama gerilimler

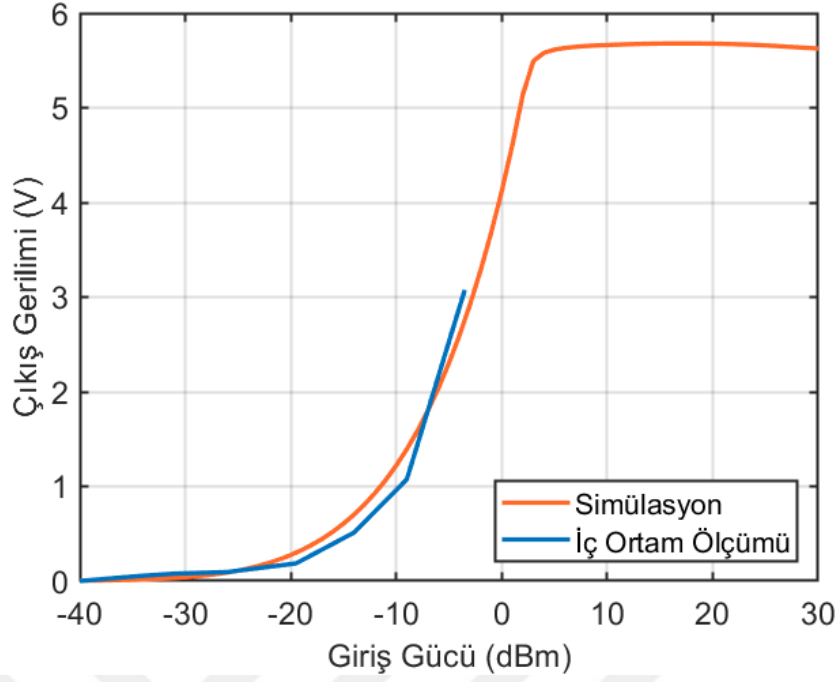
4.4. İç Ortam Ölçümleri

İç ortam ölçümleri 900 MHz sinyal üretici ve bir adet 900MHz anten ile gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan düzenek Şekil 4.29’ da gösterilmektedir.



Şekil 4.29. İç ortam deney düzeneği

Oluşturulan 900 MHz sinyaller ile RF enerji hasadı yapılarak simülasyon verileri ile karşılaştırılması yapılmıştır. 900 MHz için deney düzeneğinde elde gerilim ve ADS programında elde edilen veriler Şekil 4.30’ da verilmiştir.



Şekil 4.30. Simülasyon ve iç ortam ölçümü

4.5. Genel Değerlendirme

Literatürdeki log-periyodik anten tasarımları incelendiğinde İkinci tasarım antenin boyutlarına göre daha geniş bant sunmaktadır. Tablo 4.2’ de literatür karşılaştırması verilmiştir. Ayrıca ikinci tasarım anten mevcut kullanılan kablosuz haberleşme frekanslarının hepsini kapsamaktadır.

Tablo 4.2. İkinci tasarım antenin mevcut çalışmalar ile karşılaştırılması

Kaynak	Frekans (GHz)	Bant genişliği oranı	Boyut (mm)	Dielektrik Malzeme	Kazanç (dBi)
(Anagnostou, et al., 2008)	2,1 – 3,2	1,52:1	57,4 × 51,2	FR-4 ($\epsilon_r = 4$)	4,7
(Kwon et al., 2018)	0,92 – 2,16	2,3:1	203 × 120	Taconic RF-35 ($\epsilon_r = 3,5$)	3 – 7
(Gheethan & Anagnostou, 2008)	1,75 – 4,2	2,4:1	135 × 62	NA	-0,5 – 7,5
(Shin, Kong, Lee, Kim, & Yoon, 2018)	0,4 – 0,8	2,0:1	445 x 273	FR-4 ($\epsilon_r = 4,5$)	5,7
(Limpiti & Chantaveerod, 2016)	0,784 – 2,25	2,87:1	160 × 150	FR-4 ($\epsilon_r = 4,5$)	4,6 – 6,2
(Mistry et al., 2018)	0,8 – 2,5	3,125:1	160 x 150	FR-4 ($\epsilon_r = 4,3$)	3,5 – 6,3
(Du & Jin, 2018)	1-10	10:1	202 x 101	FR-4 ($\epsilon_r = \text{NA}$)	5-7
(Özgönül & Seçmen, 2020)	0,86 – 2,5	2,91:1	124× 133,5	FR-4 ($\epsilon_r = 4,3$)	4 – 5,5
Bu tezdeki tasarım	0,78 – 3,1	3,97:1	120,7 × 128,8	FR-4 ($\epsilon_r = 4,2$)	3 – 6,3

Doğrultucu tasarımında ise en yoğun bantlardan biri olan GSM-900’ de en yüksek performansı göstermiştir. Ayrıca bantların ayrı ayrı doğrultulması bantların birbirini negatif yönde etkilemesini önlemiştir.

Literatürdeki diğer enerji hasat sistemleri ile bu tezdeki sistemin karşılaştırmalı tablosu Tablo 4.3’ de verilmiştir. Tezdeki tasarımın bant genişliğinin diğer çalışmalara göre tatmin edici seviyededir. Ayrıca diğer çalışmalara göre iç ortam ölçümlerinin de yapılması ayırt edici yönlerindendir. Yapılan çalışmalarda genellikle 7 katlı veya tek katlı doğrultucular önerilmiştir. 7 katlı doğrultucularda verimlilik oldukça düşmektedir. Tek katlı doğrultucuda ise gerilim seviyesi düşük kalmaktadır. Bu yüzden bu çalışmada farklı olarak 3 katlı doğrultucu önerilmiştir.

Tablo 4.3. Enerji hasat sisteminin mevcut çalışmalar ile karşılaştırılması

Kaynak	Frekans (GHz)	Anten	Doğrultucu	Tek Frekanstaki Maksimum Verimlilik	Çıkış Gerilimi (V)	Güç Kaynağı
(Heydari Nasab, Asefi, Albasha, & Qaddoumi, 2010)	0.9	Tek Bant	6 Katlı Villard	-25 dBm' de %5	0.15-0.5	Dış Ortam
(Din, Chakrabarty, Ismail, Devi, & Chen, 2012)	0.9	Tek Bant	7 Katlı Villard	-	1.528	Dış Ortam
(Piñuela, Mitcheson, & Lucyszyn, 2013)	0.9,1.8,2.1	Çok Bant	Tek Diyot	-25 dBm' de %40	-	Dış Ortam
(Kuhn, Lahuec, Seguin, & Person, 2015)	0.9,1.8,2.1,2.4	Geniş Bant	Tek Katlı	20 dBm' de %15	0.409	Dış Ortam
(Song et al., 2015)	1.8-2.5	Geniş Bant	Tek Katlı Gerilim Katlayıcı	-10 dBm' de %55	0.25-0.3	Dış Ortam
(Song et al., 2016)	0.55-2.5	Geniş Bant	Tek Katlı	-5 dBm' de %67	0.6	Dış Ortam
(Adam, M. Yasin, A. Rahim, Soh, & Abdulmalek, 2018)	1.8-2.5	Geniş Bant	7 Katlı Dickson	-20 dBm' de %24	0.09-1.8	Dış Ortam
Bu tezdeki tasarım	0.78-3.1	Geniş Bant	3 Katlı Villard	-20 dBm' de %27	0.08-0.18	İç ve Dış Ortam

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde düşük güç uygulamaları için geniş bant anten, empedans eşleme ve yüke bağlı doğrultucu olmak üzere üç parçadan oluşan dört bantlı RF enerji hasat sistemi tasarlanmıştır. Enerji hasat uygulamaları için geniş bantlı mikroşerit Log-periyodik dipol anten önerilmiştir. Log-periyodik anten uzunluğu ve genişliği artan dipollerden oluşturulmuştur. Bant genişliğini arttırmak ve böylece antenin daha fazla enerji toplamasını sağlamak için dipoller eklenmiştir ve antenin dipolleri bükülerek uzatılmıştır. Önerilen anten 0,78 GHz ile 3,1 GHz frekans aralığında çalışır ve bu aralık GSM, UMTS, LTE gibi çeşitli kablosuz iletişim sistemlerinin aşağı ve yukarı bağlantı frekanslarını kapsamaktadır. Ayrıca belirtilen frekans aralığı VNA ölçümleri ile desteklenmiştir. Anten kazancı geniş bir aralıkta simüle edilmiştir. Analizler sonucunda kazanç 0,8 GHz' de 6,3 dBi' ye ulaşır ve 0,8 GHz ila 3,1 GHz aralığında 3 dBi' nin üzerindedir. Işıma örüntüleri, verilen kablosuz sistemlerin çalışma frekanslarında simüle edilmiş ve eşyönel örüntüler elde edilmiştir. Antenin bant genişliği, ışınım örüntüsü ve kazanç sonuçları, anteni enerji hasadı için iyi bir aday haline getirmiştir. Ayrıca tasarlanan anten fabrikasyonunun geri dönüş kaybı ölçümleri ROHDE & SCHWARZ ZNB40 ağ analizörü ile yapılmıştır. Ölçümler sonucunda yaklaşık 1,4 ile 1,5 GHz aralığı haricinde -10 dB altında görülmüştür. RF enerji hasadı için dört bantlı bir voltaj katlayıcı doğrultucu tasarlanmıştır. Eşleştirme devresi ile GSM-900, GSM1800, UMTS-2100 ve LTE-2600 bantlarında verimli çalışması sağlanmıştır. Eşleştirme devresinde T tipi toplu eleman eşleştirmesi eşleştirme tekniği kullanılmıştır. Tasarlanan doğrultucu, GSM-900 kollunda 2 dBm giriş gücünde RF-DC dönüşüm verimliliği %78' i göstermektedir. GSM1800 bandında giriş gücü 12 dBm olduğunda en yüksek verimlilik %79, UMTS-2100 bandında giriş gücü 14 dBm olduğunda en yüksek verimlilik %75 ve LTE 2600 bandında ise giriş gücü 18 dBm olduğunda en yüksek verimlilik %68 olarak gözlemlenmiştir. Frekans arttıkça verimliliğin tepe değeri için gerekli giriş gücü arttığı görülmüştür.

Tasarlanan RF enerji hasadı sisteminin dış ortam ölçümlerinde en yüksek sinyal gücü Konum-5' de elde edilmiştir. Bunun sebebi tek bir frekansta görülen yüksek sinyal gücüdür. Fakat Konum-5 için en yüksek ortalama gerilim görülemediği. En yüksek ortalama gerilim Konum-6' da görülmüştür. Bunun sebebi ise belirtilen frekans bantlarında sinyal gücünün dengeli dağılımıdır.

İç ortam ölçümlerinde ise 900 MHz için ADS yazılımında elde edilen veriler ile benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Doğrultucunun çıkış gerilimi arttırılması istenirse yedi katlı doğrultucular tercih edilebilir. Fakat doğrultucu katı arttıkça verimlilik düşecektir. Ayrıca gerilim ihtiyacına bağlı olarak doğrultucu çıkışına DC-DC dönüştürücü eklenebilir.

Bilişsel radyo anten tasarımı ile spektrum araştırması yapılabilir. Bilişsel radyo iletişimde spektrum algılama, spektrum yönetimi ve spektrum paylaşımı fonksiyonlarını içerir. Spektrum algılama, mevcut frekans spektrumunu taramaktadır. Spektrum yönetimi, taranan spektrumda yoğun veya az yoğun frekans spektrumlarını belirler. Spektrum paylaşımında ise kullanıcılar az yoğun spektrumlara yerleştirilir. Bu çalışmada kullanım amacı spektrum yoğunluğunu tespit etmek olabilir. Bu yüzden bilişsel radyonun spektrum algılama fonksiyonu kullanılabilir. Bilişsel radyo antenleri ile mevcut frekans spektrumunu algılanarak sadece yoğun spektrumlarda çalışan anten tasarımı gerçekleştirilebilir. Tasarlanan anten ile toplanan RF dalgaları aynı frekanslarda çalışan doğrultucu tasarımı ile DC gerilime dönüştürülebilir. Sadece yoğun frekans spektrumlarında çalışan anten ve doğrultucu tasarımı ile daha verimli bir enerji hasat sistemi elde edilebilir.

Log periyodik anten tasarımları literatürde çubuk alüminyum ve bakır malzemelerinden yapıldığı görülmüştür. Anten tasarımında FR-4 malzemesi kayıplı bir malzemedir. Log-periyodik dipol antenin FR-4 ile tasarlanması maliyet açısından avantaj sağlasa da verimlilik açısından dezavantajlıdır. Bu çalışmada mikroşerit log periyodik dipol anten tasarımı gerçekleştirilmiştir. Mikroşerit anten tasarımında dipoller arasında ve antenin iki yüzeyi arasında dielektrik malzeme olarak FR-4 malzemesi bulunmaktadır. Çubuk log periyodik antende ise tasarımda periyodik olarak boyutu büyüyen çubuk şeklinde bakır veya alüminyum dipoller tercih edilir. Bu tasarımda ise dipoller ve iki yüzü arasında dielektrik malzeme olarak hava bulunur. FR-4 malzemenin kayıp tanjantı 0.02' dir. Havanın kayıp tanjantı ise yaklaşık olarak 0' dır. Kayıp tanjantı yüksek malzeme kullanımı antenin verimliliğini olumsuz olarak etkilemektedir. Bu yüzden anten tasarımında kayıp tanjantı 0.02 olan FR-4 malzeme kullanımı, kayıp tanjantı 0 olan hava kullanımına göre daha dezavantajlıdır. Log periyodik antenin çubuk şeklinde tasarlanması, anteni daha verimli hale getirebilir. Fakat çubuk şeklinde anten tasarımı mikroşerit tasarıma göre maliyetli ve daha zordur.

KAYNAKÇA

- Pozar, D. M. (2012). *Microwave Engineering*. 4th (4 ed.): Wiley.
- Balanis, C. A. (2005). *Antenna Theory*, Hoboken. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 8(1), 21-31.
- Huray, P. G. (2011). *Maxwell's equations*: John Wiley & Sons.
- Mitcheson, P. D., Yeatman, E. M., Rao, G. K., Holmes, A. S., & Green, T. C. (2008). Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices. *Proceedings of the IEEE*, 96(9), 1457-1486.
- Keyrouz, S., Visser, H., & Tijhuis, A. (2013). Multi-band simultaneous radio frequency energy harvesting. Paper presented at the Antennas and Propagation (EuCAP), 2013 7th European Conference on.
- Kitazawa, S., Ban, H., & Kobayashi, K. (2012). Energy harvesting from ambient RF sources. Paper presented at the Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS), 2012 IEEE MTT-S International.
- Sun, H., Guo, Y.-x., He, M., & Zhong, Z. (2013). A dual-band rectenna using broadband yagi antenna array for ambient RF power harvesting. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12(1), 918-921.
- Al-Azawy, M. M., & Sari, F. (2019). Analysis of Dickson voltage multiplier for RF energy harvesting. Paper presented at the 2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM).
- Zainuddin, N., Zakaria, Z., Husain, M., Derus, B. M., Aziz, M. A., Mutalib, M., & Othman, M. (2013). Design of wideband antenna for RF energy harvesting system. Paper presented at the Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (ICICI-BME), 2013 3rd International Conference on.
- Wang, D., & Negra, R. (2014). Novel TriBand RF Rectifier Design for Wireless Energy Harvesting. Paper presented at the Microwave Conference (GeMIC), 2014 German.
- Borges, L. M., Barroca, N., Saraiva, H. M., Tavares, J., Gouveia, P. T., Velez, F. J. Gonçalves, R. (2014). Design and evaluation of multi-band RF energy harvesting circuits and antennas for WSNs. Paper presented at the Telecommunications (ICT), 2014 21st International Conference on.
- Belo, D., & Carvalho, N. B. (2014). Behavior of multi-band RF-DC converters in presence of modulated signals for space based wireless sensors. Paper presented at the Microwave Conference (APMC), 2014 Asia-Pacific.
- Kuhn, V., Lahuec, C., Seguin, F., & Person, C. (2015). A multi-band stacked RF energy harvester with RF-to-DC efficiency up to 84%. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 63(5), 1768-1778.
- Adam, I., M. Yasin, M. N., A. Rahim, H., Soh, P. J., & Abdulmalek, M. F. (2018). A compact dual-band rectenna for ambient RF energy harvesting. *Microwave and Optical Technology Letters*, 60(11), 2740-2748.
- Boursianis, A. D., Papadopoulou, M. S., Koulouridis, S., Rocca, P., Georgiadis, A., Tentzeris, M. M., & Goudos, S. K. (2021). Triple-band single-layer rectenna for outdoor RF energy harvesting applications. *Sensors*, 21(10), 3460.
- Agrawal, S., & Parihar, M. S. (2021). Performance evaluation of RF energy harvesting circuit with DRA and planar antennas. *Wireless Personal Communications*, 120, 343-352.
- Song, N. S., Chin, K. L., Liang, D. B. B., & Anyi, M. (2006). Design of broadband dual-frequency microstrip patch antenna with modified sierpinski fractal

- geometry. Paper presented at the Communication systems, 2006. ICCS 2006. 10th IEEE Singapore International Conference on.
- Sadiku, M. N. (2014). *Elements of electromagnetics* (1 ed.): Oxford university press.
- Kumar, S. V., Patel, P., Mittal, A., & De, A. (2012). Design, analysis and fabrication of rectenna for wireless power transmission-Virtual battery. Paper presented at the Communications (NCC), 2012 National Conference on.
- Huang, Y., & Boyle, K. (2008). *Antennas: from theory to practice* (1 ed.): John Wiley & Sons.
- DuHamel, R., & Isbell, D. (1966). Broadband logarithmically periodic antenna structures. Paper presented at the 1958 IRE International Convention Record.
- Gibson, P. J. (1979). The vivaldi aerial. Paper presented at the 1979 9th European Microwave Conference.
- Yeo, J., & Lee, J.-I. (2021). Miniaturized wideband loop antenna using a multiple half-circular-ring-based loop structure and horizontal slits for terrestrial DTV and UHD TV applications. *Sensors*, 21(9), 2916.
- Cheng, D., & Chen, C. (1973). Optimum element spacings for Yagi-Uda arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 21(5), 615-623.
- Huurdeman, A. A. (2003). *The worldwide history of telecommunications* (1 ed.): John wiley & sons.
- Khonsari, Z., Björninen, T., Tentzeris, M. M., Sydänheimo, L., & Ukkonen, L. (2015). 2.4 GHz inkjet-printed RF energy harvester on bulk cardboard substrate. Paper presented at the Radio and Wireless Symposium (RWS), 2015 IEEE.
- Gilasgar, M., Barlabe, A., Pradell, L. (2020). High-efficiency Reconfigurable Dual-band Class-f Power Amplifier With Harmonic Control Network Using Mems. *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, 7(30), 677-680. <https://doi.org/10.1109/lmwc.2020.2994373>
- Han, Y., Perreault, D. J. (2006). Analysis and Design Of High Efficiency Matching Networks. *IEEE Trans. Power Electron.*, 5(21), 1484-1491. <https://doi.org/10.1109/tpel.2006.882083>
- Samukic, A. (1998). UMTS universal mobile telecommunications system: development of standards for the third generation. Paper presented at the Global Telecommunications Conference, 1998. GLOBECOM 1998. The Bridge to Global Integration. IEEE.
- Wagih, M., Hilton, G. S., Weddell, A. S., Beeby, S. (2020). Broadband Millimeter-wave Textile-based Flexible Rectenna For Wearable Energy Harvesting. *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, 11(68), 4960-4972. <https://doi.org/10.1109/tmtt.2020.3018735>
- Maktoomi, M. A., Yadav, A., Hashmi, M. S., Ghannouchi, F. M. (2017). Dual-frequency Impedance Matching Networks Based On Two-section Transmission Line. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 10(11), 1415-1423. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2016.0941>
- Maoning, Z., Chen, S., Wang, W., Cai, J., Cao, W., Chan, W., ... & Wang, G. (2020). A Novel Direct Matching Network Synthesis Technique and Its Application To Broadbandclass-jpower Amplifier. *Int J RF Microw Comput Aided Eng*, 11(30). <https://doi.org/10.1002/mmce.22390>
- Wang, J., Gao, Q., Yu, Y., Wang, H., & Jin, M. (2012). Radio-triggered power management in wireless sensor networks *Wireless Sensor Networks-Technology and Applications* (1 ed.): InTech.
- Lee, Y. C., Ramiah, H., Choo, A. C. C., Churchill, K. K. P., Lai, N. M., Lim, C. P., ... & Martins, R. P. (2023). High-performance Multiband Ambient Rf Energy

- Harvesting Front-end System For Sustainable Iot Applications—a Review. *IEEE Access*, (11), 11143-11164. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3241458>
- Kim, P., Chaudhary, G., Jeong, Y. (2013). A Dual-band Rf Energy Harvesting Using Frequency Limited Dual-band Impedance Matching. *PIER*, (141), 443-461. <https://doi.org/10.2528/pier13061704>.
- Zareianjahromi, S. A., Kamsani, N. A., Rokhani, F. Z., Sidek, R. M., Hashim, S. J. (2022). A 1 V -21 Dbm Threshold Voltage Compensated Rectifier For Radio Frequency Energy Harvesting. *IJECS*, 1(27), 28. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v27.i1.pp28-36>.
- Anagnostou Anagnostou, D. E., Papapolymerou, J., Tentzeris, M. M., & Christodoulou, C. G. (2008). A printed log-periodic Koch-dipole array (LPKDA). *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 7, 456-460.
- Kwon, O. H., Lee, S., Lee, J. M., & Hwang, K. C. (2018). A compact, low-profile log-periodic meandered dipole array antenna with an artificial magnetic conductor. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2018.
- Gheethan, A. A., & Anagnostou, D. E. (2008). The design and optimization of planar LPDAs. *PIERS Online*, 4(8), 811-814.
- Shin, Geonyeong & Kong, Myeongjun & Lee, Su-Hyeon & Kim, Sang-Tae & Yoon, Ick-Jae. (2018). Gain Characteristic Maintained, Miniaturized LPDA Antenna Using Partially Applied Folded Planar Helix Dipoles. *IEEE Access*. PP. 1-1. [10.1109/ACCESS.2018.2834931](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2834931).
- Limpiti, T., & Chantaveerod, A. Y. (2016, June). Design of a printed log-periodic dipole antenna (LPDA) for 0.8–2.5 GHz band applications. In 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) (pp. 1-4). IEEE.
- Mistry, K. K., Lazaridis, P. I., Zaharis, Z. D., Xenos, T. D., Tziris, E. N., & Glover, I. A. (2018, May). An optimal design of printed log-periodic antenna for L-band EMC applications. In 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (pp. 1150-1155).
- Du, Fulin, and Long Jin. (2018). Research on miniaturization of log-periodic dipole arrays using folded dipole. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 170. No. 4. IOP Publishing.
- Özgönül, M. C., & Seçmen, M. (2020). Size-reduced printed logperiodic dipole antenna for wireless communication applications. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(3), 1631-1645.
- Adam, I., M. Yasin, M. N., A. Rahim, H., Soh, P. J., & Abdulmalek, M. F. (2018). A compact dual-band rectenna for ambient RF energy harvesting. *Microwave and Optical Technology Letters*, 60(11), 2740-2748.
- Din, N. M., Chakrabarty, C. K., Ismail, A. B., Devi, K. K. A., & Chen, W.-Y. (2012). Design of RF energy harvesting system for energizing low power devices. *Progress In Electromagnetics Research*, 132, 49-69.
- Heydari Nasab, S., Asefi, M., Albasha, L., & Qaddoumi, N. (2010). Investigation of RF signal energy harvesting. *Active and Passive Electronic Components*, 2010.
- Kuhn, V., Lahuec, C., Seguin, F., & Person, C. (2015). A multi-band stacked RF energy harvester with RF-to-DC efficiency up to 84%. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 63(5), 1768-1778.
- Piñuela, M., Mitcheson, P. D., & Lucyszyn, S. (2013). Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 61(7), 2715-2726.

- Song, C., Huang, Y., Carter, P., Zhou, J., Yuan, S., Xu, Q., & Kod, M. (2016). A novel six-band dual CP rectenna using improved impedance matching technique for ambient RF energy harvesting. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64(7), 3160-3171.
- Song, C., Huang, Y., Zhou, J., Zhang, J., Yuan, S., & Carter, P. (2015). A high-efficiency broadband rectenna for ambient wireless energy harvesting. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(8), 3486-3495.



ÖZ GEÇMİŞ

Muhammet Emin İNCE, Ondokuz Mayıs Üniveristesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği'nden 2020 yılında mezun oldu. 2020 yılında OMÜ LEE Elektrik-Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans programına girdi. Mezuniyetinden bu yana Araştırma Görevlisi olarak görev yapan Muhammet Emin İnce, iyi derecede İngilizce bilmektedir.

İletişim Bilgileri

ORCID ID : 0000-0001-9409-7314

Yayınlar:

1. **M. E. İnce**, C. Kurnaz and E. Çam, "Design and Analysis of Log-Periodic Dipole Antenna with Wideband and Small Size for RF Energy Harvesting," 2023 31st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Istanbul, Türkiye, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIU59756.2023.10224042.
2. **İnce, M. E.** , Kurnaz, Ç. & Çam, E. (2023). RF Enerji Hasatlama Uygulamaları için Üç Bantlı Anten ve Doğrultucu Tasarımı . International Journal of Engineering Research and Development , 15 (2) , 794-803 . DOI: 10.29137/umagd.1314713