



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÇOK BANTLI RF ENERJİ HASADI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aziz Burak YALÇIN

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Filiz SARI

AKSARAY, 2021

Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 192363006 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi, Aziz Burak YALÇIN tarafından hazırlanan “**ÇOK BANTLI RF ENERJİ HASADI**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Filiz SARI

Aksaray Üniversitesi

.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. İsmail BAYRAKLI

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. Hakkı Alparslan ILGIN

Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 21/06/2021

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Mehmet Ali HINIS

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın yazdığımı, yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu, çalışmamda kullandığım verilerin orijinalliğini ve her türlü intihalden uzak olduğunu beyan ederim.

Enstitü tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Aziz Burak YALÇIN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca göstermiş olduğu özveri ve desteklerinden dolayı tez danışmanım Aksaray Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Öğretim Üyesi Dr. Öğr. Üyesi Filiz SARI'ya ve manevi desteğini her an yanımda hissettiğim aileme teşekkür etmek istiyorum.

Aziz Burak YALÇIN

AKSARAY, 2021



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Elektromanyetik Dalgalardan Enerji Hasat Etme	3
1.2 Kablosuz Güç Hasatlama Sistemini Tasarlama ve Optimize Etme	8
1.3 GSM 900 ve GSM 1800	9
1.4 Wi-Fi (Wireless Fidelity)	11
1.5 Gerilim Çoklayıcı Devre (Doğrultucu)	13
1.6 Empedans Eşleme Devresi	13
1.7 Kapsam ve Hedefler	14
2. KAYNAK ÖZETLERİ	15
2.1 Yapılan Çalışmalar	15
3. ENERJİ HASAT DEVRESİNİN TASARIMI	22
3.1 Yük	22
3.2 Gerilim Çoklayıcı	22
3.3 Diyot Seçimi	25
3.4 Hasat Sistemi Tasarımı ve Simülasyon	26
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	27
4.1 Yük Seçimi	27
4.2 LC Empedans Eşleme	30
4.3 Çok Bantlı RF Hasatlama Devresi (LC Eşleme)	33
4.4 LL Empedans Eşleme	36
4.5 Çok Bantlı RF Hasatlama Devresi (LL Eşleme)	39
4.6 π Empedans Eşleme	42
4.7 Çok Bantlı RF Hasatlama Devresi (π Eşleme)	45
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	56

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇOK BANTLI RF ENERJİ HASADI

Aziz Burak YALÇIN

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Filiz SARI

ÖZET

Cep telefonları, Wi-Fi gibi kablosuz haberleşme cihazlarının kullanımındaki büyük artışa paralel olarak ortamda mevcut olan elektromanyetik dalgaların varlığı da önemli ölçüde artmıştır. Enerji hasadı olarak adlandırılan ortamda az miktarda bulunan bu enerjinin toplanarak kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürülmesi olayı son zamanlarda büyük ilgi görmeye başlamıştır. Bu ilgideki en büyük etken düşük güç tüketen cihazların yaygın olarak kullanılmaya başlanması ve bunların sürekli olarak enerjiye ihtiyaç duymasıdır. Bu ihtiyaç düşük güçlü enerji elde etme çalışmalarında artışı da beraberinde getirmiştir.

Bu tezde, çok bantlı RF enerji hasatlama devresi tasarlanmıştır. 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz frekanslarında oluşturulmuş sistemin çıkış gerilimi ve verimi ortaya konmuştur. Bu tezdeki tüm simülasyonlar ADS (Advance Design System) 2017 programı kullanılarak yapılmıştır. Öncelikle iki kademedan on iki kademeye kadar olan çok kademeli DVM (Dickson Voltage Multiplexer) tasarlanmıştır. Her bir frekans için maksimum gücü veren yük dirençleri tespit edilmiş ve her üç frekans için de uygun olan ortak yük seçilmiştir. Daha sonra, iki Schottky diyot modelli (HSMS-2852) iki kademedan altı kademeye kadar olan çok kademeli DVM tasarımında maksimum çıkış gücünü elde edebilmek için bu devrelere LC, LL ve π tipi empedans eşleme devreleri uygulanmıştır. Her bir eşleme tipi için her bir frekansa ait maksimum çıkış gücünü veren kademe sayıları belirlenmiştir. Her bir eşleme tipi için 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz frekanslarında elde edilen kademe sayılarına sahip bu üç devre birleştirilmiştir. Sonuç olarak her bir eşleme tipi için ortaya çıkan sistemin çıkış gerilimi ve verimi analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çok bantlı radyo frekansı enerji hasadı, Dickson gerilim çoklayıcı, Empedans eşleme topolojisi, Schottky diyot, düşük güç uygulaması

Haziran, 2021; 56 sayfa

M.Sc. THESIS

MULTI-BAND RADIO FREQUENCY ENERGY HARVESTING

Aziz Burak YALÇIN

Aksaray University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical-Electronic and Computer Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Filiz SARI

ABSTRACT

In parallel with the great increase in the use of wireless communication devices such as mobile phones and Wi-Fi, the presence of electromagnetic waves in the environment has increased significantly. The phenomenon of collecting this small amount of energy in the environment called energy harvesting and converting it into usable electrical energy has recently attracted great interest. The biggest factor in this interest is the widespread use of low-power devices and their constant need for energy. This need has brought about an increase in low-power energy acquisition studies.

In this thesis, a multi-band RF energy harvesting circuit is designed. The output voltage and efficiency of the system built at 900 MHz, 1800 MHz and 2450 MHz frequencies have been demonstrated. All simulations in this thesis were made using the ADS (Advance Design System) 2017 program. Firstly, the multi-stage DVM (Dickson Voltage Multiplier), ranging from two to twelve stages, was designed. The load resistances giving the maximum power for each frequency were determined and a common load suitable for all three frequencies was selected. Then, LC, LL and π type impedance matching circuits were applied to these circuits in order to obtain maximum output power in multi-stage DVM design with two Schottky diode models (HSMS-2852) from two stages to six stages. The number of steps giving the maximum output power for each frequency is determined for each matching type. These three circuits with the number of steps obtained at the frequencies 900 MHz, 1800 MHz and 2450 MHz are combined for each matching type. The output voltage and efficiency of the resulting system were analyzed for each matching type.

Keywords: Multi-band radio frequency energy harvesting, Dickson Voltage Multiplier, Impedance matching topology, Schottky diode, low power application.

June, 2021; 56 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Enerji hasat sisteminin temel bileşenleri	2
Şekil 1.2.	Elektromanyetik spektrum ve uygulamaları	6
Şekil 1.3.	RF hasat sistemine ait blok şema	7
Şekil 1.4.	RF hasat sisteminin temel bileşenleri.....	7
Şekil 1.5.	RF güç hasat sisteminin kavramsal blok şeması	8
Şekil 1.6.	Kablosuz güç hasat sisteminin tasarım protokolü	9
Şekil 1.7.	GSM 900 ve GSM 1800'ün dünyada kullanımı.....	10
Şekil 1.8.	GSM 900 yukarı bağlantı ve aşağı bağlantı	11
Şekil 1.9.	GSM 1800 yukarı bağlantı ve aşağı bağlantı	11
Şekil 1.10.	2,4 GHz bandında çakışan ve çakışmayan kanalların grafik gösterimi ..	13
Şekil 1.11.	Basit bir doğrultucu devre	13
Şekil 1.12.	(a) L tipi (b) π tipi (c) T tipi empedans eşleme ağları	14
Şekil 2.1.	a) Frekansın bir fonksiyonu olarak alt sistemlerin ve tüm sistemin çıkış gerilimi b) Frekansın bir fonksiyonu olarak alt sistemlerin ve tüm sistemin verimi	16
Şekil 2.2.	Önerilen üç bantlı RF enerji hasatlama sistemine ait blok diyagram.....	17
Şekil 2.3.	Çift bantlı doğrultucu devrenin ADS simülasyon gösterimi	18
Şekil 2.4.	Çok bantlı doğrultucu devrenin gösterimi	19
Şekil 2.5.	Çift bantlı doğrultucu devrenin gösterimi	20
Şekil 2.6.	(a) Frekans değişimine bağlı verim (b) Giriş gücü değişimine bağlı verim.....	21
Şekil 3.1.	Yük direncine ait gösterim (Rload2).....	22
Şekil 3.2.	Villard Gerilim Çoklayıcıya ait temel devre gösterimi	23
Şekil 3.3.	Dickson Gerilim Çoklayıcıya ait n kademeli temel devre gösterimi	23
Şekil 3.4.	Greinacher Gerilim Çoklayıcıya ait n-kademeli temel devre gösterimi .	24
Şekil 3.5.	Schottky diyot için eşdeğer devre	26
Şekil 3.6.	HSMS 2852 Schottky diyot	25
Şekil 4.1.	Çok bantlı RF enerji hasat sistemi konfigürasyonu	27
Şekil 4.2.	Yük direncine karşılık güç değerlerinin gösterimi (900 MHz).....	28
Şekil 4.3.	Yük direncine karşılık güç değerlerinin gösterimi (1800 MHz).....	29
Şekil 4.4.	Yük direncine karşılık güç değerlerinin gösterimi (2450 MHz).....	29
Şekil 4.5.	(a) LC eşleme devresi (b) Smith diyagramı (c) Eşleme devresi tepkisi (900 MHz).....	30
Şekil 4.6.	900MHz için 2 - 6 kademe DVM LC eşleme devresinin çıkış gerilimi ve verimi	31
Şekil 4.7.	1800 MHz için 2 - 6 kademe DVM LC eşleme devresinin çıkış gerilimi ve verimi	32
Şekil 4.8.	2450 MHz için 2 - 6 kademe DVM LC eşleme devresinin çıkış gerilimi ve verimi	32
Şekil 4.9.	Birleştirilmiş devre.....	34
Şekil 4.10.	LC empedans eşlemesi için giriş gücüne karşılık (a) Çıkış gerilimi (b) verim.....	35
Şekil 4.11.	(a) LL eşleme devresi (b) Smith diyagramı (c) Eşleme devresi tepkisi (1800 MHz).....	36
Şekil 4.12.	900MHz için 2 - 6 kademe DVM LL eşleme devresinin çıkış gerilimi ve verimi	37
Şekil 4.13.	1800 MHz için 2 - 6 kademe DVM LL eşleme devresinin çıkış gerilimi ve verimi	38

Şekil 4.14. 2450 MHz için 2 - 6 kademe DVM LL eşleme devresinin çıkış gerilimi ve verimi	38
Şekil 4.15. Birleştirilmiş devre	40
Şekil 4.16. LL Eşleme ile 900 MHz, 1800 MHz, 2450 MHz ve birleştirilmiş devrenin (a) Çıkış Gerilimi (b) verimi	41
Şekil 4.17. (a) π eşleme devresi (b) Smith diyagramı (c) Eşleme devresi tepkisi (2450 MHz)	42
Şekil 4.18. 900MHz için 2 - 6 kademe DVM π eşleme devresinin çıkış gerilimi ve verimi	43
Şekil 4.19. 1800MHz için 2 - 6 kademe DVM π eşleme devresinin çıkış gerilimi ve verimi	44
Şekil 4.20. 2450 MHz için 2 - 6 kademe DVM π eşleme devresinin çıkış gerilimi ve verimi	44
Şekil 4.21. Birleştirilmiş devre	46
Şekil 4.22. 900 MHz, 1800 MHz, 2450 MHz ve birleştirilmiş devrenin π uyumlama için (a) Çıkış gerilimi (b) verimi	47
Şekil 4.23. Üç bantlı enerji hasatlama sisteminin gösterimi	48
Şekil 4.24. Birleştirilmiş devrede eşleme tipinin gerilim ve verim üzerindeki etkisi	48

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Alternatif enerji kaynaklarına genel bakış	3
Çizelge 1.2. RF enerji üreteç kaynakları.....	5
Çizelge 1.3. WLAN frekansları	12



SİMGELER VE KISALTMALAR

AC	Alternative Current - Alternatif Akım
ADS	Advanced Design System
CMVM	Cockcroft Walton Voltage Multiplexer - Cockcroft Walton Gerilim Çoklayıcı
DC	Direct Current - Doğru Akım
DSL	Digital Subscriber Line - Sayısal Abone Hattı
DTV	Digital Television – Dijital Televizyon
DVM	Dickson Voltage Multiplexer – Dickson Gerilim Çoklayıcı
FM	Frequency Modulation - Frekans Modülasyonu
GSM	Global System for Mobile Communications - Mobil İletişim İçin Küresel Sistem
IEEE	Institute of Engineers and Everyone Else - Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
IoT	Internet of Things – Nesnelerin İnterneti
RF	Radio Frequency - Radyo Frekansı
RFID	Radio Frequency Identification - Radyo Frekansı ile Tanımlama
SMS	Short Message Service - Kısa Mesaj Hizmeti
TDMA	Time Division Multiple Access - Zaman Bölmeli Çoklu Erişim
TV	Televizyon
UHF	Ultra High Frequency - Ultra Yüksek Frekans
VHF	Very High Frequency - Çok Yüksek Frekans
Wi-Fi	Wireless Fidelity - Kablosuz Bağlantı Alanı
Wi-Max	Worldwide Interoperability for Microwave Access - Mikrodalga Erişimi için Dünya Çapında Birlikte Çalışabilirlik
WLAN	Wireless Local Area Network - Kablosuz Yerel Alan Ağı
3G	Third Generation - 3. Nesil Teknoloji

1. GİRİŞ

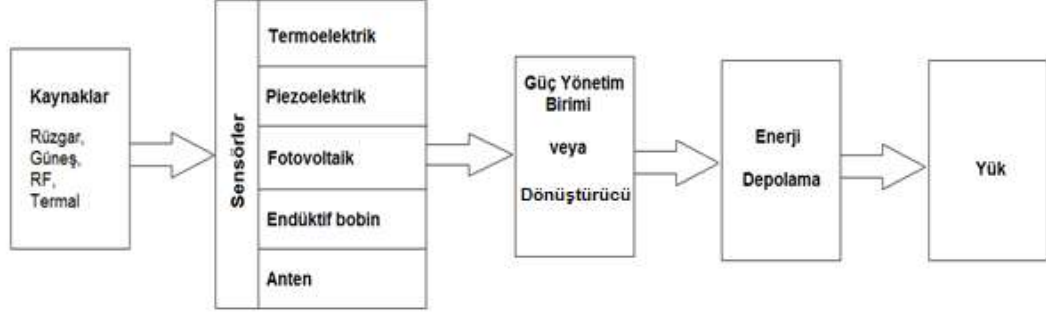
Enerji hasadı, ortamda mevcut olan az miktarda enerjinin toplanarak kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürülmesidir. Elektrik enerjisi doğrudan kullanım için uygun hale getirilir veya toplanır ve daha sonra kullanılmak üzere depolanır. Bu işlem, şebekenin bulunmadığı ve diğer alternatif enerji kaynaklarının (örneğin, rüzgâr türbinlerinin veya güneş panellerinin) monte edilmesinin verimsiz olduğu yerlerdeki uygulamalar için alternatif bir güç kaynağı görevi görür. Enerji hasadı, enerji süpürme veya mikro enerji hasadı olarak da adlandırılır.

Hiçbir küçük enerji kaynağı büyük miktarda enerji sağlamaz. Ancak, toplanan enerji çoğu kablosuz uygulama, uzaktan algılama, vücut implantları, RFID ve güç spektrumunun alt segmentlerindeki diğer uygulamalar için yeterlidir [1]. Hasat edilen enerji düşük ve bir cihaza güç vermek için yetersiz olsa bile, bir pilin ömrünü uzatmak için hala kullanılabilir.

Uzaktan algılayıcılar ve gömülü cihazlar gibi düşük güçlü elektronik cihazların çoğu bataryalarla çalışmaktadır. Bununla birlikte, uzun ömürlü pillerin bile sınırlı bir ömrü vardır ve her birkaç yılda bir değiştirilmeleri gerekmektedir. Uzak konumlarda yüzlerce algılayıcı bulunduğunda, bunları değiştirmek maliyetli hale gelmektedir. Diğer taraftan, enerji hasadı teknolojileri düşük güçlü donanımlar için sınırsız çalışma ömrü sağlar ve bataryaların değiştirilmesinin pahalı, elverişsiz veya tehlikeli olduğu durumlarda bu ihtiyacı ortadan kaldırır [1].

Çoğu enerji hasadı uygulaması, kendini idame ettirecek, uygun maliyetli olacak ve uzun yıllar boyunca çok az bakım gerektirecek veya hiç bakım gerektirmeyecek şekilde tasarlanmıştır. İlave olarak, güç kaynağına en yakın olacak şekilde kullanılır, böylece iletim kayıpları ve uzun kablo kullanımı ortadan kalkar.

Enerji hasat işlemi, elektrik enerjisine dönüştürülen enerjinin kaynağına, miktarına ve türüne bağlı olarak farklı biçimler alır. En basit haliyle enerji hasat sistemi; ısı, ışık veya titreşim gibi bir enerji kaynağı ve üç temel bileşeni gerektirir [2]. Enerji hasat sisteminin temel bileşenleri Şekil 1.1'de gösterilmektedir [3].



Şekil 1.1. Enerji hasat sisteminin temel bileşenleri [3].

Dönüştürücü/hasatçı: Bu bileşen, enerjiyi kaynağından toplayıp elektrik enerjisine dönüştüren enerji hasatçısıdır. Tipik dönüştürücüler arasında ışık için fotovoltaik, ısı için termoelektrik, manyetik için endüktif, radyo frekansı için RF (radio frequency) ve titreşimler/kinetik enerji için piezoelektrik bulunmaktadır.

Güç yönetimi: Bu bileşen, elektrik enerjisini uygulama için uygun bir duruma getirir. Tipik uygun duruma getiriciler, güç gereksinimlerine ve mevcut güce dayalı olarak gücü yönetebilen düzenleyiciler ve karmaşık kontrol devrelerini içerir.

Enerji depolama: Batarya veya süper kapasitör gibi üretilen enerjinin depolanmasında kullanılan elektronik donanımlardır.

Mevcut güç hasadı için enerji kaynaklarının bir özeti Çizelge 1.1'de gösterilmektedir [4, 5]. Güneş, titreşim, ısı ve elektromanyetik dalgalar önemli enerji kaynaklarıdır. Bu kaynaklardan elde edilen güç yoğunluğu enerji kaynağına göre değişiklik göstermektedir. Çizelge 1.1.'de yer alan enerji kaynakları arasında, güneş enerjisi en yüksek güç yoğunluğuna sahip enerji türüdür. Ancak güneş enerjisinden sadece güneş mevcut olduğunda yararlanılır. Termal enerji termoelektrik malzemedeki sıcaklık farkından elde edildiğinden sıcaklık farkının olmadığı durumlarda faydalanılamamaktadır. Titreşimden oluşan enerji ise uygulanan mekanik titreşimlerin şiddetine göre değişmekte ve titreşimlerin olmadığı durumlarda enerji üretilmemektedir. Termal veya kinetik enerjiyle karşılaştırıldığında, elektromanyetik enerji alan veya zamanla sınırlı değildir. RF dalgası gün boyunca hem iç hem de dış mekanlarda, kırsal ve kentsel alanlarda mevcuttur. Ortamdaki düşük güç yoğunluğuna rağmen, daha verimli güç iletimi için tasarlanmış bir kaynak eklenebilir ve yük uygulamasının gereksinimlerine uyacak bir yükseltici devre oluşturulabilir. Bu özellik, kablosuz sensör ağları ve IoT gibi uygulamalar aracılığıyla RF güç hasadı teknolojisini

gerçekleştirmek için araştırmayı teşvik eder.

Çizelge 1.1. Alternatif enerji kaynaklarına genel bakış [4, 5].

Kaynak	Güç yoğunluğu	Hasatlama teknolojisi	Avantajlar	Dezavantajlar
Güneş	Kapalı alan: $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ Açık alan: $10 \text{mW}/\text{cm}^2$	Fotovoltaik	Yüksek güç yoğunluğu	Her zaman mevcut değil Işığa maruz kalması gerekli (takılabilir değil) Pahalı
Titreşim	İnsan: $4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ Endüstriyel: $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$	Piezoelektrik Elektrostatik Elektromanyetik	Takılabilir Yüksek verimlilik	Her zaman mevcut değil Maddi fiziksel sınırlama
Termal	İnsan: $30 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ Endüstriyel: $1\text{-}10 \text{mW}/\text{cm}^2$	Termoelektrik Piroelektrik	Yüksek güç yoğunluğu Takılabilir	Her zaman mevcut değil Aşırı ısı
RF	GSM: $0,1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ Wi-Fi: $1 \text{mW}/\text{cm}^2$	Anten	Her zaman mevcut Takılabilir	Düşük yoğunluk Verimlilik mesafeyle ters orantılı

1.1 Elektromanyetik Dalgalardan Enerji Hasat Etme

Son yıllarda, yenilenebilir enerjiye artan talep nedeniyle insan hayatını kolaylaştıran sistemlere ilgi gün geçtikçe artmaktadır. Günümüz şartlarında telefon, tablet, sensör vb. bataryalı ya da bataryasız düşük güç tüketen cihazlar sürekli enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Bu ihtiyaçtan dolayı düşük güçlü alternatif enerji elde etme yolları popülerleşmiştir. Kullanılan pillerin ömrünü uzatmak ve enerjinin sürekliliği insanlık için gerekli bir ihtiyaca dönüşmüştür [6].

RF güç hasadı, bataryaları değiştirme veya kullanım ömrünü artırma konusunda büyük bir potansiyele sahiptir. Şu anda bataryalar, düşük güçlü uzak sensör aygıtlarının ve yerleşik ekipmanların çoğuna güç sağlamaktadır. Aslında, bataryaların sınırlı ömürleri vardır ve periyodik olarak değiştirilmesi gerekir. Güç hasat sistemleri kullanılarak, cihazlar ve ekipmanlar çalışma için gerekli olan enerjiye göre kendi kendini idame

ettirebilir ve böylece sınırsız bir çalışma ömrü elde edebilir. Böylece, güç bakımı talebi ihmal edilebilir hale gelecektir.

Batarya atıklarının işlenmesi de kritik bir sorundur. Bataryaların çoğunluğu toprak dolgulara girerek altındaki toprak ve suyun kirlenmesine yol açmaktadır. Batarya atıklarını azaltmak için en etkili çözüm bunları kullanmaktan kaçınmaktır. Hasat teknolojisinin uygulanması, sonuçta çevre üzerinde olumlu bir etkisi olacak olan bataryalara bağımlılığın azaltılmasına yardımcı olacaktır. Ayrıca, elektromanyetik enerjiden yararlanma süreci temiz bir enerji kaynağı olduğu için atık üretmeyecektir.

Enerji kaynağının düşük bakım maliyetli, uzun ömürlü ve sürekli olması kullanılan cihazlar ve insanların talebi doğrultusunda istenen en önemli kriterlerdendir. Bu yüzden şimdi ve gelecekte kullanılabilecek yöntemlerin en önemlilerinden biri de radyo ve mikrodalga frekanslarından enerji hasat etmektir.

Havada serbest olarak yayınım yapan radyo ya da mikrodalga frekanslarındaki elektromanyetik dalgaların üzerinde barındırdıkları enerjinin uygun antenler yardımıyla verimli şekilde toplanması ve yüksek verimde yükseltici ve doğrultucu devrelere aktarılması elektromanyetik dalgalardan enerji hasat edilmesi olarak adlandırılmaktadır.

Verici kaynaktan yayınımına başlayan elektromanyetik dalgaların taşıdığı enerji miktarları yol boyunca zayıflayarak, saçılarak ve yansiyarak alıcıya ulaşır. Havadaki elektromanyetik dalgalar, efektif ışıma açıklığında anten ile etkileşime girerek analog işarete dönüşür. Antenler tarafından toplanan enerjinin verimli bir şekilde yükseltici ve doğrultucu devrelere iletilmesinde kullanılan empedans eşleme, filtre ve gerilim yükselten gerilim çoklayıcı devreleri kayıpsız olmalıdır. Çevremizde yoğun olarak kullanılan RF enerji kaynakları Çizelge 1.2’de gösterilmiştir [7].

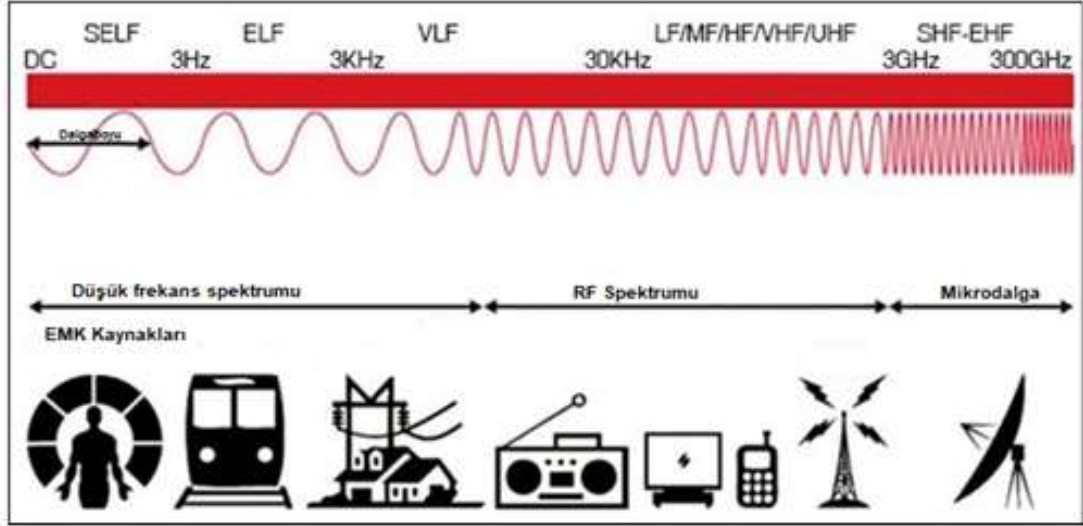
Çizelge 1.2. RF enerji üreteç kaynakları [7].

RF Enerji Üreteç Kaynakları	
FM	87,5 MHz – 108 MHz
Telsiz	370 MHz – 450 MHz
VHF	174 MHz – 230 MHz
UHF	470 MHz – 854 MHz
GSM 900	935 MHz – 960 MHz
GSM 1800	1805 MHz – 1880 MHz
Wi – Fi	2400 MHz – 2483,5 MHz
3G	2110 MHz – 2200 MHz
Wi – Max	2500 MHz – 2690 MHz ve 3400 MHz – 3600 MHz

Şehirlerde ve çok kalabalık bölgelerde, radyo ve TV yayınları, cep telefonları, baz istasyonları ve kablosuz ağlar gibi çok sayıda RF kaynağı bulunmaktadır. Enerjilerinin bir bölümünü toplamak ve onu yararlı enerjiye dönüştürmek mümkündür.

Haberleşme cihazları, 10 kHz ila 30 kHz arasındaki farklı frekans spektrumlarını kullanarak veri iletimi ve/veya alımı için anten kullanır. RF enerji hasadı için mevcut maksimum teorik güç, 40 m'lik serbest mesafede sırasıyla 2,4 GHz ve 900 MHz frekansları için 7,0 μ W ve 1,0 μ W'tır. Boş alan dışındaki ortamlarda sinyallerin yol kaybı farklı olacaktır [8].

Farklı frekans bantlarının farklı uygulamaları vardır. Şekil 1.2'de, bizi çevreleyen farklı uygulamalarla birlikte elektromanyetik spektrum gösterilmektedir [9].

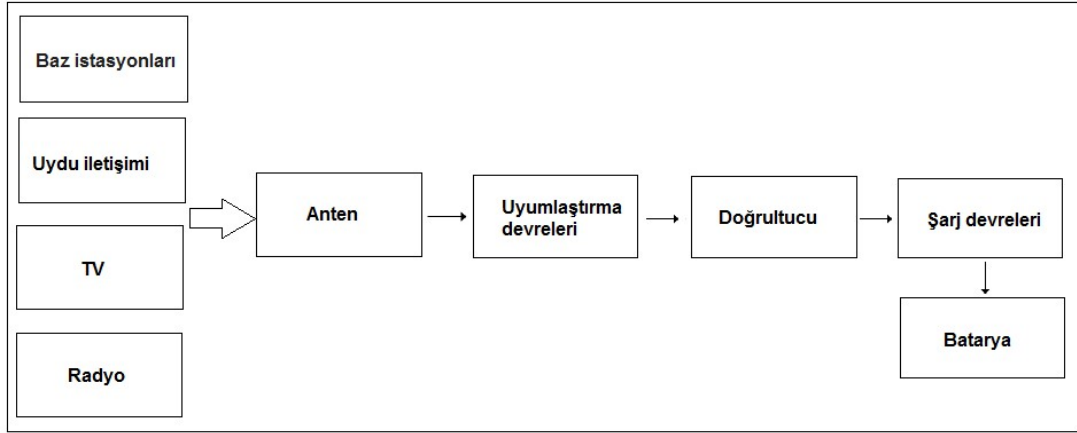


Şekil 1.2. Elektromanyetik spektrum ve uygulamaları [9].

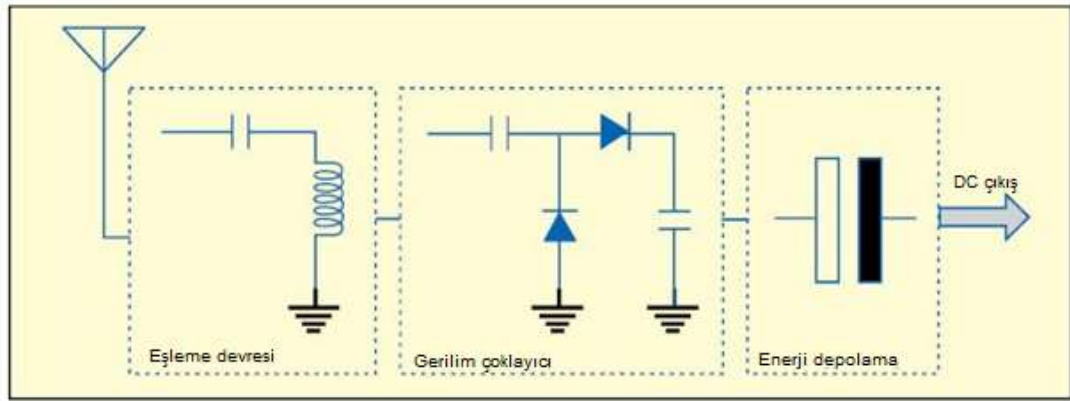
Kablosuz enerji hasadı veya RF enerji hasadı teknolojisinde son zamanlarda önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Bu teknolojik gelişmeler sayesinde kablosuz sensör ağları ve IoT gibi birçok uygulama için RF enerji hasadı uygun bir kablosuz enerji kaynağı olmuştur. Batarya değişiminin çok zor ve riskli olduğu veya fiziksel erişimin sorunlu olduğu cihazlarda RF enerji hasatlama sistemlerinden elde edilen enerji bu cihazların beslenmesinde kullanılabilir.

Bir RF enerji hasatlama devresi genel olarak anten, doğrultucu, gerilim çoklayıcı, empedans eşleme ve enerji depolama gibi bölümlerden oluşmaktadır. RF enerji hasatlama devresinde kullanılan anten ortamdaki elektrik alan şiddetini gerilim farkına dönüştüren bir elemandır. Doğrultucu bölümü antenden gelen RF sinyali içinde barındırdığı diyot sayesinde doğrultur ve kondansatör ile regüle eder. Böylece RF sinyalini DC sinyale dönüştürmüş olur. Genellikle RF enerji hasatlama devresinin doğrultucu çıkışındaki DC gerilim seviyesi düşük değerli olmaktadır. Hasatlama devresinin gerilim çoklayıcı bölümü bu düşük DC gerilim seviyesini daha yüksek değerli DC gerilim seviyesine çıkarmakta kullanılır. Tüm bu devre bölümleri arasında maksimum güç transferi için empedans uyumu olması gerekmektedir. Empedans uyumunun olmadığı kısımlarda çeşitli tekniklerle empedans uyumu sağlanabilmektedir. RF enerji hasatlama devresi ile elde edilen enerji son olarak süper kapasitör veya bataryada depolanabilmekte veya doğrudan beslenecek olan cihaza bağlanabilmektedir.

Şekil 1.3'te RF hasatlama sistemine ait blok şema ve Şekil 1.4'te ise RF hasatlama sisteminin bileşenleri gösterilmektedir [9].



Şekil 1.3. RF hasat sistemine ait blok şema [9].

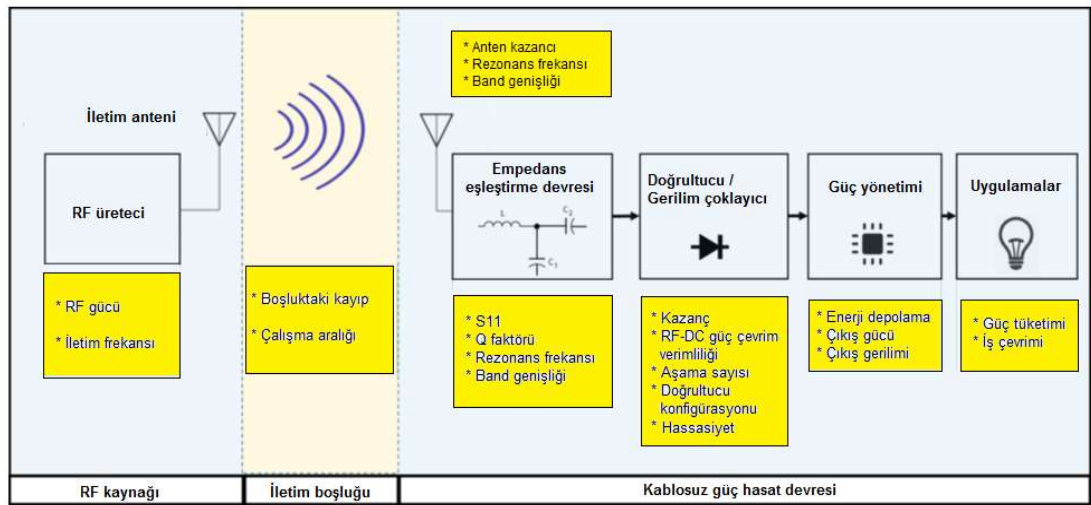


Şekil 1.4. RF hasat sisteminin temel bileşenleri [9].

Güç çevrimindeki en önemli husus; yükseltici ve doğrultucu devresine gelen mikrodalga enerjisinin nasıl büyütülüp, yükseltici ve doğrultucu devresinin verimliliğinin nasıl artırılacağıdır. Boşluktan yüksek miktarda RF enerjisini toplamak için anten dizileri, dairesel polarizasyona sahip antenler ve geniş bantlı antenler kullanılır [7]. Anten dizileri yükseltici ve doğrultucu devresine girecek olan gücü artırarak sistemin kazancını artırır. Dairesel antenler ise toplanan güçteki polarizasyon kayıplarını en aza indirerek alınmasını sağlar. Geniş bantlı antenler ise birden çok kaynaktan RF enerjisi toplayarak yüksek DC güç üretilmesine imkan sağlar. Sistemin hassasiyetinin artırılması için yükseltici ve doğrultucu devresinde değişik elemanlara ihtiyaç duyulur. Anten ile yükseltici/doğrultucu devre arasına bant geçiren filtre yerleştirilir. İlave olarak da DC bölümdeki alçak geçiren filtre yüke RF gücün

akmasını engellemek için kullanılır. Antenler aynı zamanda harmonik etkilerin bastırılmasında da kullanılmak üzere tasarlanmalıdır. Sistemin verimliliği, çıkıştaki DC geriliminin havadan sağlanan RF gücüne oranına eşittir. Giriş gücü arttıkça verimlilik artış gösterir [7].

Kablosuz bir güç iletim sistemi başlangıçta, bir yerden elektrik enerjisi yayan ve kablo veya herhangi bir destekleyici ortam kullanmadan Dünya atmosferindeki başka bir yerde bu enerjiyi yakalayan bir birim olarak tanımlanmıştır [10]. Boş alandaki RF güç hasadı, 1950'lerin sonlarında mikrodalga ile çalışan bir helikopter sistemi ile ortaya çıkmıştır [11]. Daha sonra güç hasadı veya enerji süpürme kavramı; termoelektrik dönüşüm, titreşim uyarımı, güneş enerjisi dönüşümü ve basınç gradyanları gibi farklı yöntemler kullanılarak dış ortamdan enerji elde etmek için bir teknik olarak açıklanmıştır. Bu teknik, düşük güçlü elektrikli cihazlarda ve sistemlerde küçük bataryaların değiştirilmesi için muazzam bir kapsam vaat etmektedir. Şekil 1.5'te, bir RF enerji hasat sisteminin yapısı ve tüm sistemin performansına etki eden faktörler gösterilmektedir [12].

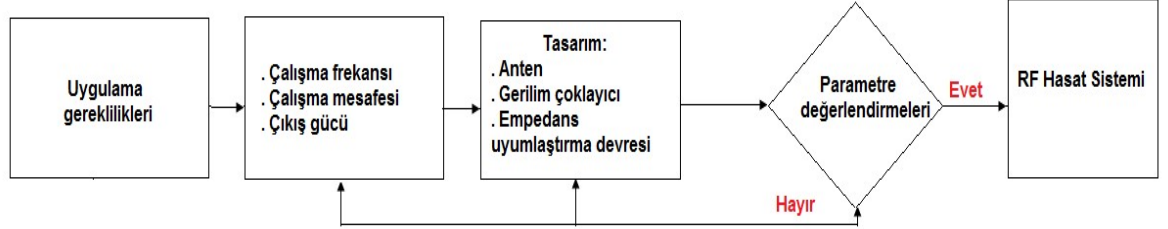


Şekil 1.5. RF güç hasat sisteminin kavramsal blok şeması [12].

1.2 Kablosuz Güç Hasatlama Sistemini Tasarlama ve Optimize Etme

Bireysel modüllerin verimliliği ve tüm modüllerin birlikte entegrasyonu bir kablosuz güç hasatlama sisteminin toplam verimliliğini oluşturur. Sonuç olarak, toplam verimliliği optimize etmenin tek yolu, her bir modülün verimliliğini en üst düzeye çıkarmak ve uyum içinde bir araya getirmektir. Genel olarak, optimize edilmiş bir

kablosuz güç hasatlama sistemi elde etmek için birkaç test ve ayar yapılması gerekir. Bir kablosuz güç hasatlama sisteminin tasarlanmasına ilişkin iş akışı Şekil 1.6'da verilmiştir [12].



Şekil 1.6. Kablosuz güç hasat sisteminin tasarım protokolü [12].

İlk olarak, kablosuz güç hasatlama sisteminin verimliliğini önemli oranda belirleyen uygulamanın gereksinimine uygun çalışma sıklığı seçilir. İkinci olarak, çalışma aralığının belirtilmesi gereklidir. Uzun menzilli (uzak alan) güç hasadı veya iletimi, 2,45, 5,24 GHz gibi yüksek frekans gerektirir. Kısa menzilli (yakın alan) uygulamalar ise megahertz aralığında frekanslarda elektromanyetik dalgalar gerektirir. İlave olarak, havadan farklı yoğun ortamlarda güç hasadı için çok düşük frekans (~ kHz) tercih edilir. Çalışma frekansı ve mesafesinin yanı sıra, istenen çıkış gücü ve gerilim, gerilim çoklayıcının uygun topolojisini belirler [12].

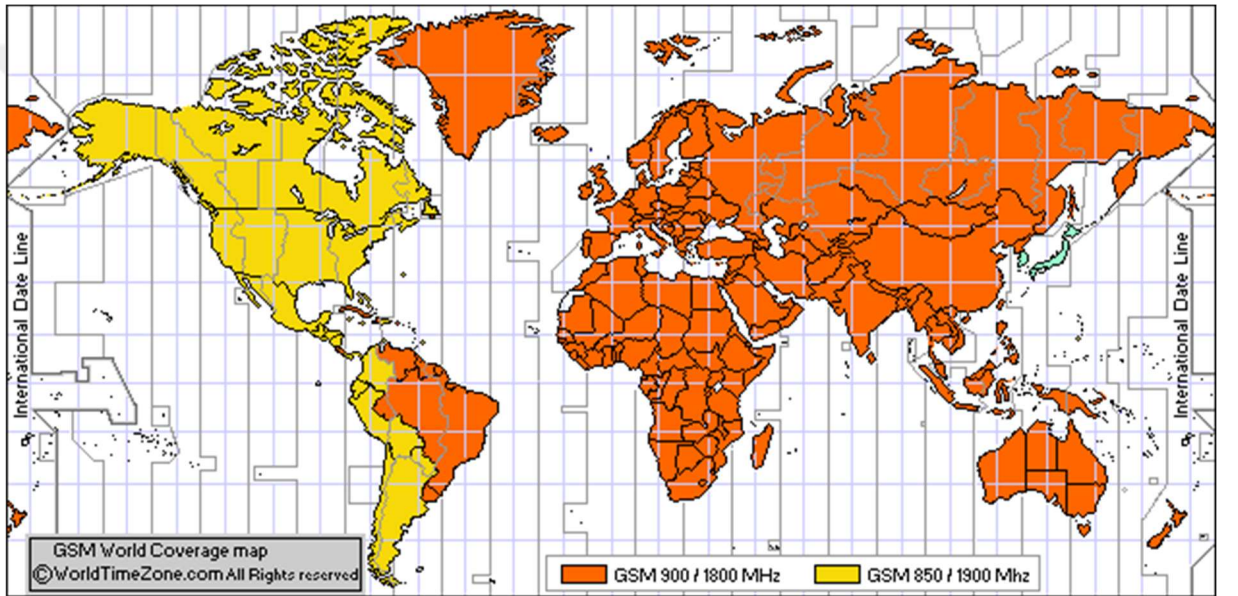
Çalışma ve uygulamaya bağlı olarak, anten tasarımının kazanç, frekans ve boyut ile eşleşmesi gerekir. Doğru doğrultucu elemanın seçilmesi de çok önemlidir. İlave olarak, kablosuz güç hasatlama devresinde maksimum güç aktarımı için doğru ayarlanmış bir empedans eşleme devresine sahip olmak gereklidir.

1.3 GSM 900 ve GSM 1800

GSM (Global System for Mobile Communications), mobil ses ve veri hizmetlerini iletmek için kullanılan açık, dijital bir hücreli teknolojidir. GSM, dijital teknoloji ve TDMA (Time Division Multiple Access) iletim yöntemlerini kullanması nedeniyle birinci nesil kablosuz sistemlerden farklıdır. GSM, her 200 kHz kanalı sekiz 25 kHz zaman aralığına bölen devre anahtarlama bir sistemdir. GSM, Avrupa'da 900 MHz ve 1,8 GHz bantlarında ve ABD'de 1,9 GHz ve 850 MHz bantlarında çalışır. 850 MHz bant ayrıca Avustralya, Kanada ve birçok Güney Amerika ülkesinde GSM ve 3GSM

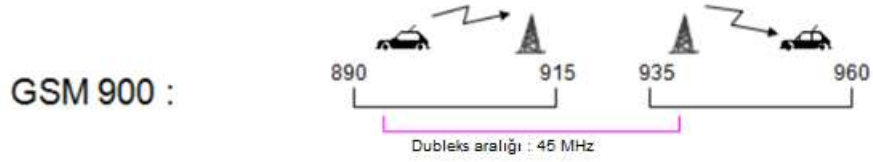
için kullanılır. GSM, 9,6 kbit/s'ye kadar veri aktarım hızlarını destekleyerek SMS (Short Message Service) gibi temel veri servislerinin iletimine izin verir. Bir diğerk önemli avantaj, uluslararası dolaşım kabiliyetidir ve kullanıcıların yurtiçinde olduğu gibi yurtdişında seyahat ederken de aynı hizmetlere erişmelerine olanak tanır. Bu, tüketicilere 210'dan fazla ülkede kesintisiz ve aynı sayıda bağlantı sağlar. GSM uydu dolaşımını, karasal kapsama alanı olmayan alanlara da hizmet erişimini genişletmiştir [13].

şekil 1.7'de gösterildiği gibi GSM 900 ve GSM 1800 dünyanın birçok yerinde kullanılmaktadır.



şekil 1.7. GSM 900 ve GSM 1800'n dünyada kullanımı [14].

GSM 900, şekil 1.8'de de gösterildiği gibi yukarı bağlantı için kullanılan 890 - 915 MHz arası, yani Mobil İstasyonlardan Temel Alıcı-Verici İstasyonlarına bilgi gönderme ve 935 - 960 MHz arası, Baz Alıcı-Verici İstasyonlarından Mobil İstasyonlara aşağı bağlantı bilgi almak için kullanılır. Her yukarı bağlantı / aşağı bağlantı bandı 124 radyo frekansı kanalından oluşur, her kanal 200 kHz bant genişliğine sahiptir. Yukarı bağlantı ile aşağı bağlantı arasındaki boşluk (dubleks aralığı) her iki uçta 45 MHz banttır [13].



Şekil 1.8. GSM 900 yukarı bağlantı ve aşağı bağlantı [15].

GSM-1800, Şekil 1.9'da da gösterildiği gibi Mobil İstasyondan Baz Alıcı-Verici İstasyonuna bilgi göndermek için 1710 - 1785 MHz, diğer yönde 1805-1880 MHz kullanarak 374 kanal (kanal numaraları 512 - 885) içerir. Dupleks aralığı 95 MHz'dir [13].



Şekil 1.9. GSM 1800 yukarı bağlantı ve aşağı bağlantı [15].

1.4 Wi-Fi (Wireless Fidelity)

Wi-Fi, bilgisayarların ve diğer cihazların kablosuz bir sinyal üzerinden iletişim kurmasını sağlayan bir kablosuz ağ teknolojisidir. IEEE (Institute of Engineers and Everyone Else) tarafından geliştirilen ve Wi-Fi Alliance tarafından benimsenen 802.11 standartlarından birine dayanan ağ bileşenlerini açıklar. Wi-Fi standartlarına kronolojik sırayla örnekler: 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac.

Wi-Fi, bilgisayarların kablosuz ağlara bağlanma biçimidir. Neredeyse tüm modern bilgisayarlarda, kullanıcıların kablosuz yönlendiricileri bulmasını ve bunlara bağlanmasını sağlayan yerleşik Wi-Fi yongaları vardır. Çoğu mobil cihaz, video oyun sistemi ve diğer bağımsız cihazlar Wi-Fi'yi de destekleyerek kablosuz ağlara da bağlanabilmelerini sağlar. Bir aygıt bir yönlendiriciyle bir Wi-Fi bağlantısı kurduğunda, yönlendiriciyle ve ağdaki diğer aygıtlarla iletişim kurabilir. Ancak, bağlı cihazlara İnternet erişimi sağlamak için yönlendiricinin İnternet'e (DSL (Digital Subscriber Line) veya kablolu modem aracılığıyla) bağlı olması gerekir. Bu nedenle, bir Wi-Fi bağlantısına sahip olmak mümkündür, ancak İnternet erişimi yoktur.

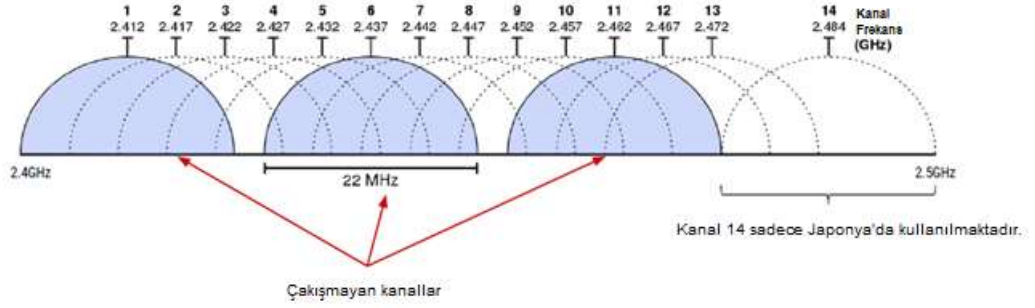
Wi-Fi bir kablosuz ağ standardı olduğundan, "Wi-Fi Sertifikalı" kablosuz kartı olan herhangi bir cihaz herhangi bir "Wi-Fi Sertifikalı" erişim noktası tarafından tanınmalıdır ve bunun tersi de geçerlidir. Ancak, kablosuz yönlendiriciler yalnızca belirli bir 802.11 standardıyla çalışacak şekilde yapılandırılabilir, bu da eski ekipmanın yönlendiriciyle iletişim kurmasını engelleyebilir. Örneğin, bir 802.11n yönlendirici yalnızca 802.11n aygıtlarıyla çalışacak şekilde yapılandırılabilir. Bu seçenek belirlenirse, 802.11g Wi-Fi yongaları olan cihazlar Wi-Fi sertifikalı olmalarına rağmen yönlendiriciye bağlanamaz [16].

Çizelge 1.3. WLAN (Wireless Local Area Network) frekansları [17].

		Alt frekans MHz	Üst frekans MHz
WLAN	802.11 (b ve g)	2400	2484
WLAN	802.11a (kapalı alan)	5150	5350
WLAN	802.11 (açık alan)	5725	5875

Genellikle 2,4 GHz bant olarak adlandırılan bu spektrum, Wi-Fi için mevcut olan bantların en yaygın kullanılanıdır. 802.11b, g, & n tarafından kullanılır. Maksimum üç çakışmayan kanal taşıyabilir. Bu bant, mikrodalga fırınlar, Bluetooth vb. dahil olmak üzere diğer birçok lisanssız ürün tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır [18].

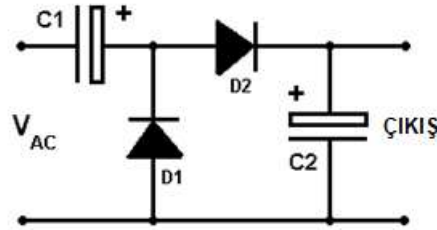
Hiçbir koşulda parazit olmaması için Wi-Fi protokolü 16,25 ila 22 MHz kanal ayırmayı gerektirir (aşağıda gösterildiği gibi). Geri kalan 2 MHz boşluk, kenar kanalları boyunca yeterli zayıflamayı sağlamak için koruma bandı olarak kullanılır. Şekil 1.10'da 2,4 GHz bandında çakışan ve çakışmayan kanalların grafik gösterimi verilmiştir [19].



Şekil 1.10. 2,4 GHz bandında çakışan ve çakışmayan kanalların grafik gösterimi [19].

1.5 Gerilim Çoklayıcı Devre (Doğrultucu)

Şekil 1.11’de de basit haliyle gösterildiği gibi diyotlar (D1 ve D2) ve kapasitörlerden (C1 ve C2) oluşan gerilim çoklayıcı devre, enerji hasadının vazgeçilmez bir parçasıdır, çünkü bu aşamada yakalanan sinyal güçlendirilir ve minimum kayıplarla DC gerilime dönüştürülür. Aslında, gerilim çoklayıcı diyot doğrultucu devredir ve AC’yi DC’ye dönüştürür, bu da giriş geriliminden daha büyük bir çıkış gerilimi üretebilir. Cockcroft –Walton (CWVM), Villard ve Dickson gibi çeşitli sayıda gerilim çoklayıcı mevcuttur.



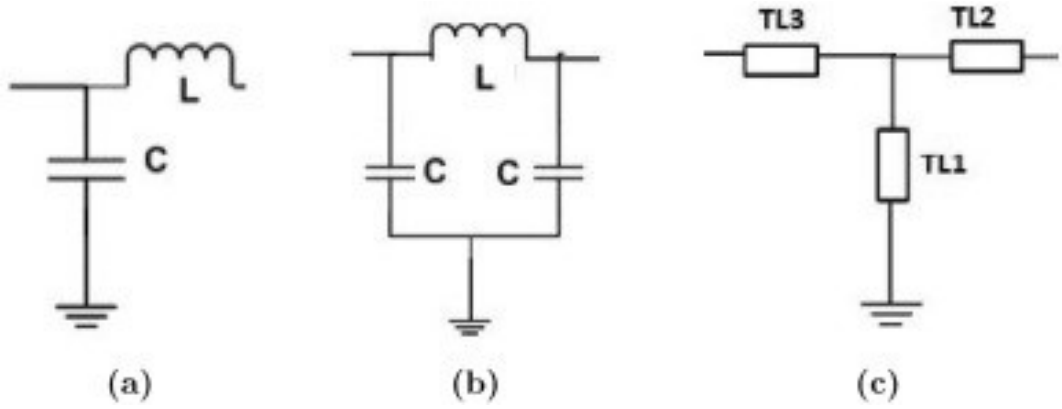
Şekil 1.11. Basit bir doğrultucu devre.

1.6 Empedans Eşleme Devresi

Kaynak empedansı ve yük empedansı eşit olmadığında, alınan sinyal yükten kaynağa doğru yansımaktadır. Bu nedenle, alınan sinyalde güç kaybı olacaktır. Eşleme devresi ile yük empedansının kaynak empedansı ile dengelenmesi sağlanır ve böylece bu tür bir güç kaybı önlenir. Yani, bu empedansların eşitlenmesi yükten kaynağa yansıyan sinyalleri önler. Sinyal yansıtılmaz ve maksimum güç aktarımı kaynaktan yüke yapılabilir [20].

Empedans uyumu, hasat sisteminin ikinci önemli bileşenidir. L tipi, T tipi ve π tipi tipi empedans eşleme ağları, Şekil 1.12’de gösterildiği gibi empedans eşleme ağ

topolojilerinden bazılarıdır [20].



Şekil 1.12. (a) L tipi (b) π tipi (c) T tipi empedans eşleme ağları [21].

1.7 Kapsam ve Hedefler

Bu tezde, çok bantlı RF enerji hasatlama sisteminin tasarımı yapılmıştır. 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz çalışma frekansları için yük direnci belirlenmiştir. Her bir frekans ve her bir eşleme tipi için maksimum çıkış gücünü elde edebilmek amacıyla farklı kademelerdeki gerilim çoklayıcı devrelere tasarlanan empedans eşleme devreleri uygulanmıştır. Son olarak her bir eşleme tipi için birleştirilmiş devrelerin çıkış gerilimi ve verimi hesaplanmıştır.

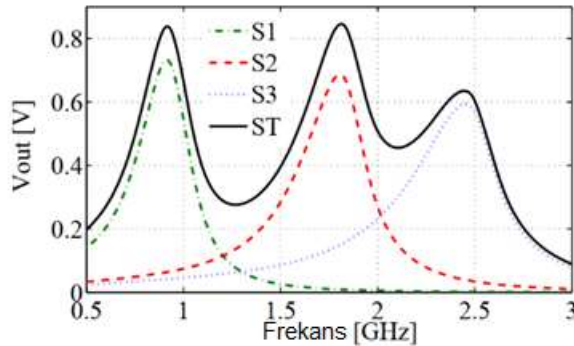
2. KAYNAK ÖZETLERİ

Birçok araştırmacı, RF enerji hasatlama yöntemleri, empedans eşleme devreleri ve gerilim çoklayıcılar ile ilgili çeşitli çalışmalar yapmıştır. Oluşturdukları devrelerin çıkış gerilimleri, güçleri ve verimleri tasarladıkları hasatlama devrelerinin yapısına göre değişiklik göstermektedir.

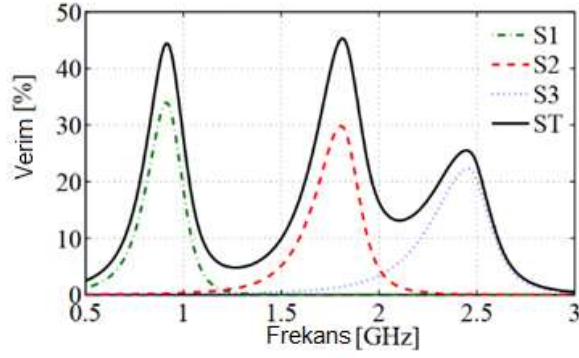
2.1 Yapılan Çalışmalar

Uzun yıllardır RF hasat sistemleri üzerinde çalışılmaktadır. Ancak yalnızca sınırlı RF kaynakları, düşük güç uygulamaları için uygun bir kaynak olarak kullanılabilecek yeterli gücü sağlayabilmiştir. Bununla birlikte, enerji yönetim sistemlerinin çoğu, yönetim devrelerinde güç beslemesi nedeniyle, RF kaynakları gibi ultra düşük güç kaynaklarında verimli değildir. Bu sorunun çözümü, ya güç tüketiminin azaltılması, ya fiziksel sınırlamalarla ya da yüke doğru aktarılacak yeterli gücü elde etmek için farklı bir enerji kaynağı ile olabilir.

[22]'de 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz olmak üzere üç farklı frekansta enerji hasatlama sistemi tasarımı yapılmıştır. Giriş gücü - 15 dBm'e ayarlanarak diyot olarak HSMS 2852 Schottky diyot seçilmiştir. Yük direnci 50 k Ω olarak alınmıştır. Simülasyonlar için ADS yazılımı kullanılmıştır. Belirlenen yük direnci ve giriş gücünde münferit her bir sistemde maksimum çıkış gerilimini elde etmek amacıyla 900 MHz için 10, 1800 MHz için 6 ve 2450 MHz için 4 kademeli gerilim çoklayıcı devre kullanılmıştır.



(a)

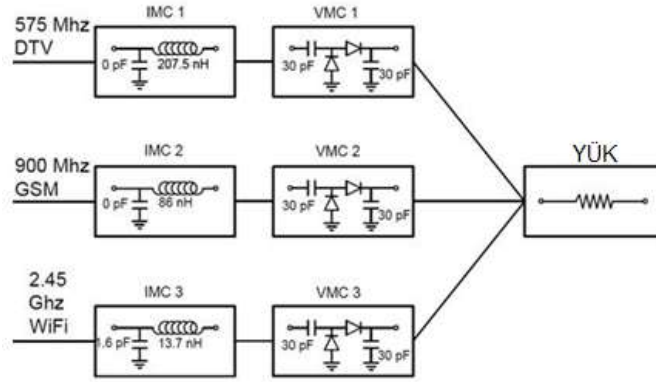


(b)

Şekil 2.1. a) Frekansın bir fonksiyonu olarak alt sistemlerin ve tüm sistemin çıkış gerilimi b) Frekansın bir fonksiyonu olarak alt sistemlerin ve tüm sistemin verimi [22].

Şekil 2.1’de frekansın bir fonksiyonu olarak alt sistemlerin (900 MHz için S1, 1800 MHz için S2 ve 2450 MHz için S3) ve tüm sistemin (ST) çıkış gerilimi ile verimi gösterilmiştir. Tek frekanslı sistemle karşılaştırıldığında birleştirilmiş sistemin %15 daha fazla verimliliğe sahip olduğu görülmektedir.

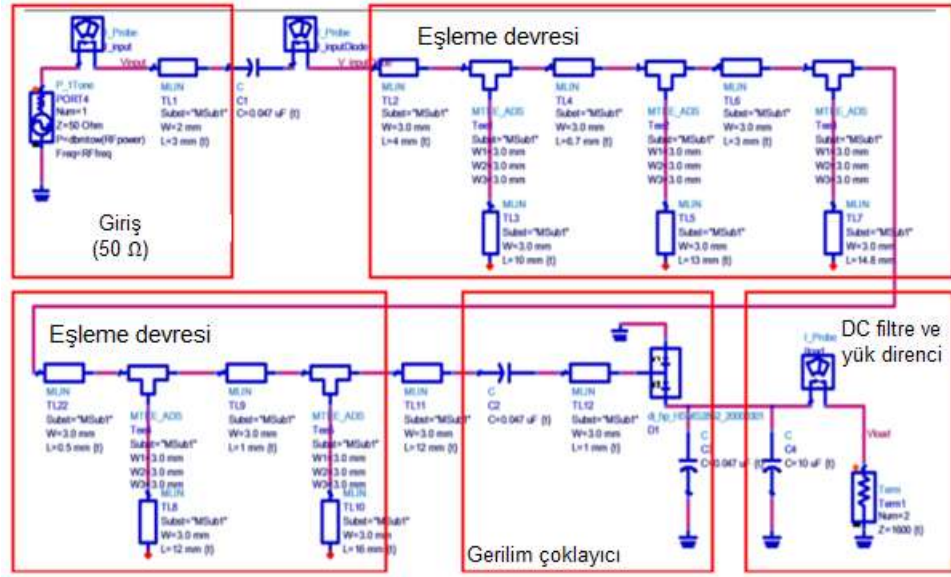
[23]’te DTV 575 MHz, GSM 900 MHz ve Wi-Fi 2450 MHz frekanslarında değişen RF giriş gücü, yük direnci ve gerilim çoklayıcı kademesinde ADS yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Simülasyonlar 575 MHz, 900 MHz, 2450 MHz ve üç bantlı birleştirilmiş sistem için yapılmıştır. 0,2 k Ω ile 60 k Ω arasında değişen yük direnci için - 50 dBm ile 20 dBm arasında değişen RF giriş gücü uygulanmıştır. Basit ve çok yer kaplamadığı için L tipi empedans eşleme devresi kullanılmıştır. Aynı zamanda yüksek anahtarlama hızı, düşük ileri gerilim, düşük alt tabaka sızıntısı ve nispeten düşük bağlantı kapasitansına sahip olması nedeniyle HSMS-2852 Schottky diyot kullanılmıştır.



Şekil 2.2. Önerilen üç bantlı RF enerji hasatlama sistemine ait blok diyagram [23].

Şekil 2.2’de gösterilen önerilen üç bantlı RF enerji hasatlama sistemi kullanıldığında üç farklı frekansa sahip geleneksel münferit sistemlerle kıyaslandığında verimi %58 oranında artmıştır.

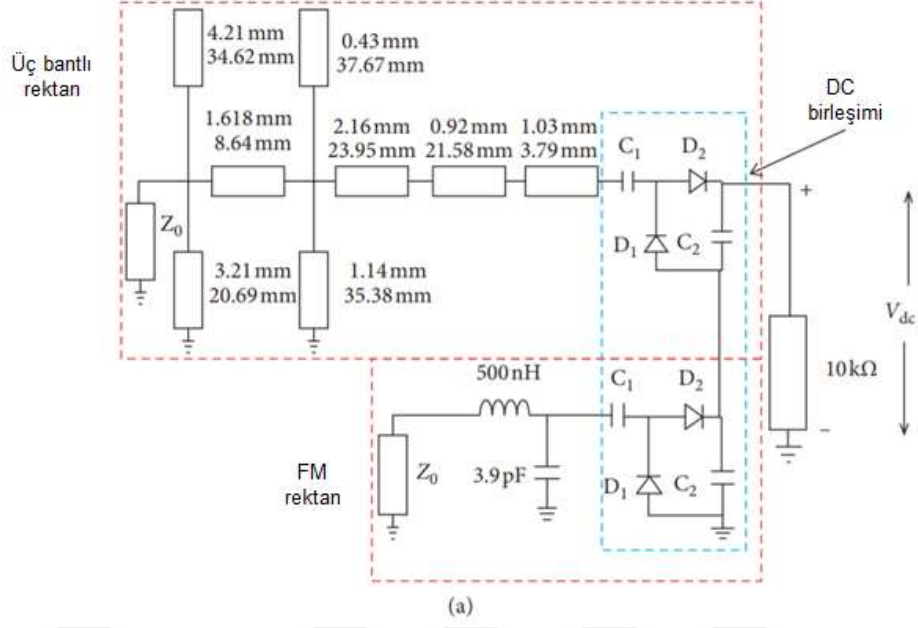
[24]’te 2100 MHz ve 2450 MHz frekanslarında çift bantlı enerji hasatlama sistemine ait bir çalışma yapılmıştır. Doğrultucu devresi Greinacher gerilim çoklayıcı kullanılarak tasarlanmıştır. Diyot olarak Schottky diyot HSMS 285C kullanılmıştır. Tasarımlar için ADS programı kullanılmıştır. 1,6 k Ω yük direncinde - 40 dBm ile 10 dBm giriş gücünde tasarım gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan sistem 10 dBm giriş gücünde 2100 MHz’te 1,9 V çıkış gücü, 1,245 mA yük akımı ve %24 maksimum verimlilik sağlarken 10 dBm giriş gücünde 2450 MHz’te 1,7 V çıkış gücü, 1,081 mA yük akımı ve %18 maksimum verimlilik sağlamaktadır.



Şekil 2.3. Çift bantlı doğrultucu devrenin ADS simülasyon gösterimi [24].

Şekil 2.3'te 2100 MHz ve 2450 MHz frekanslarında çalışan çift bantlı doğrultucu devrenin ADS simülasyon gösterimi yer almaktadır.

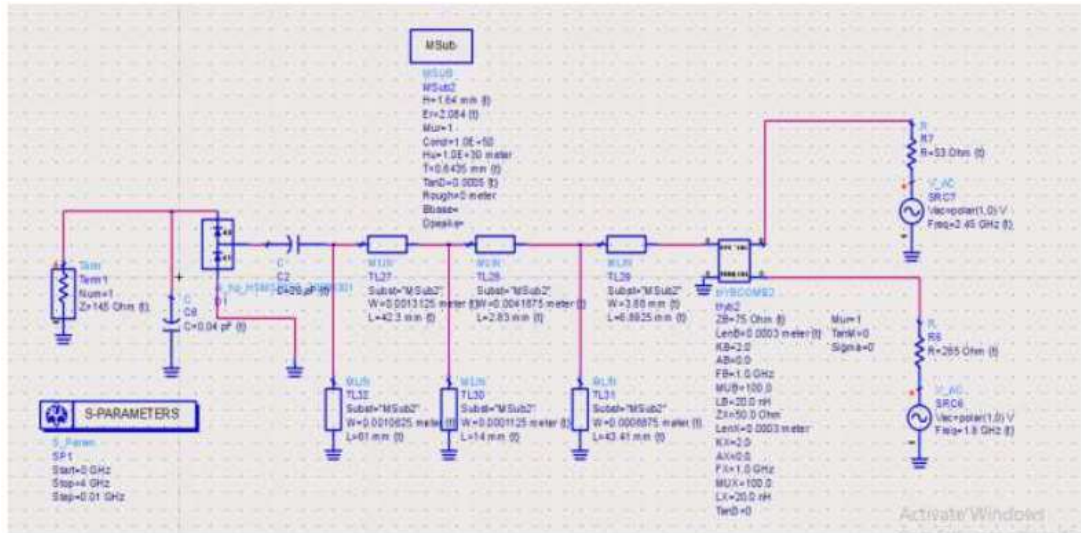
[25]'te 98 MHz FM bant, GSM900, GSM1800 ve Wi-Fi 2,4 GHz frekanslarında dört bantlı sistem için enerji hasatlama sistemi tasarımı yapılmıştır. Bu çalışmada, yeni bir empedans eşleme ağına sahip üç boyutlu çok bantlı bir rektan kullanılmıştır. Rektan, doğrultucuyu besleyen RF çıkışı ile GSM900, GSM1800 ve 2,4 GHz'i kapsayan çok bantlı anten kullanılmıştır. Eşleme ağı, - 30 dBm kadar düşük giriş gücü seviyeleri için kapalı form denklemleri kullanılarak tasarlanmıştır. 98 MHz'de ayrı bir FM rektan tasarlanmış ve doğrultucu çıkışlarının DC kombinasyonu kullanılarak çok bantlı rektan ile entegre edilmiştir. Üç bant ve FM doğrultucunun simüle edilmiş dönüşüm verimliliği, - 6 dBm giriş gücünde sırasıyla %77 ve %80'e kadar çıkmaktadır.



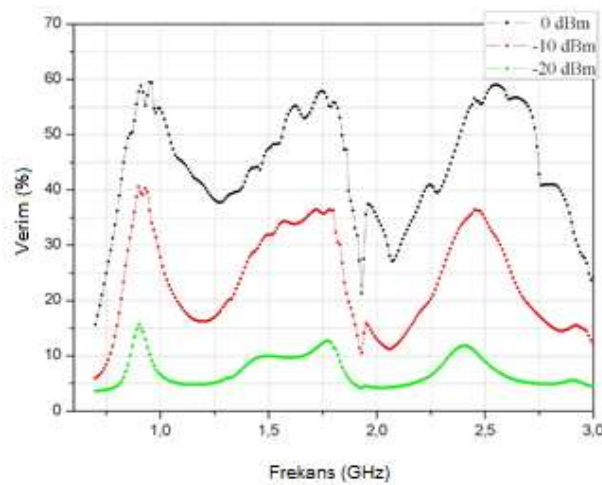
Şekil 2.4. Çok bantlı doğrultucu devrenin gösterimi [25].

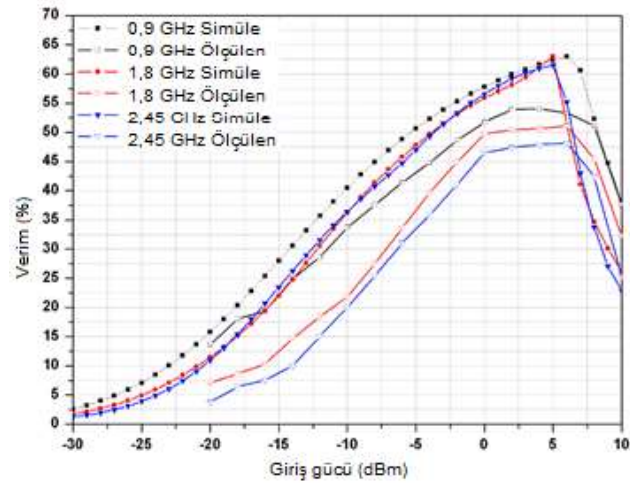
Şekil 2.4'te üç bantlı doğrultucu devre ile FM doğrultucu devrenin birleştirilmiş hali gösterilmektedir.

[26]'da yapılan çalışmada, tek bantlı ve çift bantlı doğrultucu devre tasarımı ve analizi yapılmıştır. Tasarımda, tek ve çift bantlı antenlerle birlikte, tek bant Wi-Fi (2,45 GHz) ve çift bant GSM (1 GHz) ve Wi-Fi (2,45 GHz) için 180° hibrit bağlantıya dayalı yeni bir doğrultucu yapılandırması öngörülmektedir. Tek bandın olası doğrultucusu, giriş sinyalinin doğrultma yolunda sadece bir diyot kullanır ve bu %56'lık bir verimlilik verir. Tasarlanan çift bantlı doğrultucu devresinde tek kademeli Villard gerilim çoklayıcı devresi ve HSMS285C Schottky diyot kullanılmıştır. Sonuç olarak GSM için %48 (1 GHz) ve Wi-Fi (2,45 GHz) için %31 verimlilik elde edilmiştir.



[27]'de yapılan çalışmada, GSM-900, GSM-1800 ve Wi-Fi-2450 bantlarından eş zamanlı olarak RF enerjisi hasatlayabilen bir sistem tasarımı yapılmıştır. Yüksek verimli üç bantlı doğrultucu, üç paralel koldan oluşmaktadır. Her kol, doğrultucu diyotlara aktarılan maksimum RF gücü sağlamak için tasarlanmış bir giriş eşleme devresi, Schottky diyot HSMS-2852 kullanan tek bir gerilim katlayıcı ve DC çıkış gerilimini yumuşatmak için bir DC geçiren filtre içermektedir. -10 dBm giriş gücünde 3,8 k Ω 'luk optimum yük direnci ile ölçülen RF'den DC'ye dönüşüm verimliliği 0,9, 1,8 ve 2,45 GHz'de sırasıyla %33,7, %21,8 ve %20'ye ulaşmaktadır. 0 dBm'de simüle edilmiş dönüştürme verimleri sırasıyla 0,9, 1,8 ve 2,45 GHz'lik üç frekansta sırasıyla %57,8, %55,8 ve %56,5'tir.





(b)

Şekil 2.6. (a) Frekans değişimine bağlı verim (b) Giriş gücü değişimine bağlı verim [27].

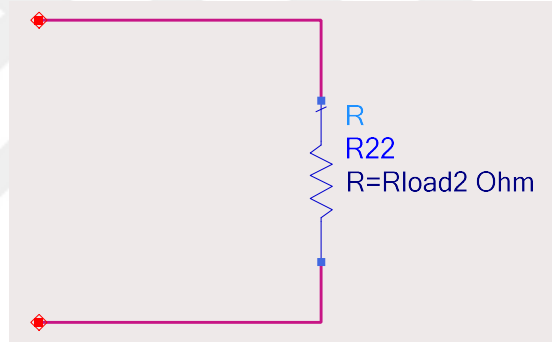
Şekil 2.6'da frekans değişimine bağlı verim grafiği ile giriş gücü değişimine bağlı verim grafiği görülmektedir.

3. ENERJİ HASAT DEVRESİNİN TASARIMI

Tezin bu bölümünde, yük direncinin seçiminden başlayarak tüm tasarım, ardından Dickson gerilim çoklayıcı, empedans eşleme devresi ve diyotlarla ilgili hususlar ele alınacaktır.

3.1 Yük

Tasarımın ilk aşamasında, giriş empedansı ve hasat sistemlerinin verimliliğini etkileyen yük direnci belirlenmiştir. Bu nedenle, 5 k Ω ile 100 k Ω aralığındaki yük direncinin etkisi incelenmiştir. Değişen direnç değerleri için, çıkış güçleri analiz edilerek maksimum çıkış gücünün elde edildiği yük direnci bulunmuştur. Her üç frekans için (900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz) bu işlemler yapılmıştır. Şekil 3.1, ADS 2017'de R yükünü göstermektedir.

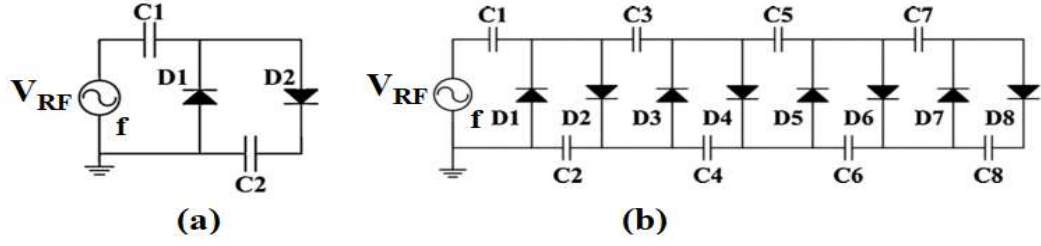


Şekil 3.1. Yük direncine ait gösterim (Rload2).

3.2 Gerilim Çoklayıcı

Gerilim çoklayıcılar alınan AC sinyalini DC sinyaline çevirmek ve ayrıca alınan düşük seviyeli sinyali yükseltmek için kullanılmaktadır.

Cockcroft-Walton gerilim çoklayıcı olarak da adlandırılan Villard gerilim çoklayıcı [28], [29], [30] tek kademeli ve n kademeli olarak Şekil 3.2 (a) ve (b)'de sırasıyla gösterilmiştir [31].



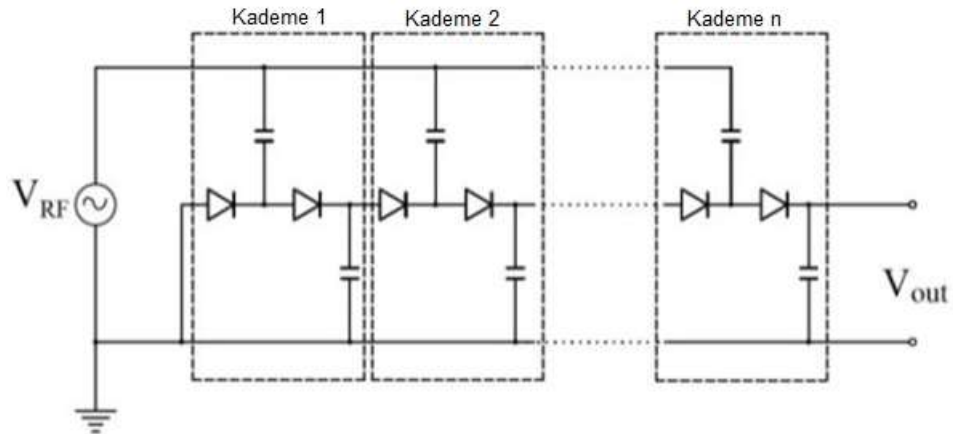
Şekil 3.2. Villard Gerilim Çoklayıcıya ait temel devre gösterimi [31]

Şekil 3.2 (a)'da iki diyot ve iki kapasitörden oluşan temel gerilim çoklayıcı devresi sunulmuştur. Çalışma prensibi, V_{RF} negatif döngüde olduğunda D1 diyodu çalışır D2 diyodu çalışmaz ve C1 kapasitörü negatif döngüde şarj olur, V_{RF} pozitif döngüde olduğunda ise D1 diyodu çalışmaz D2 diyodu çalışır ve C2 diyodu şarj olur. Böylece giriş yükseltilerek doğrultulur ve çıkışta DC voltaj elde edilir [31]. n kademeli gerilim çoklayıcının çıkışı Eşitlik (3.1) 'de verilmiştir.

$$V_{DC} = \frac{nV_0}{nR_0 + R_L} \quad (3.1)$$

Burada, V_0 , tek kademenin açık devre çıkış gerilimi ve R_0 , tek kademenin iç direnci ve R_L ise yük direncidir.

Şekil 3.3'te gösterilen Dickson gerilim çoklayıcı her kademedeki kapasitörlerin paralel konfigürasyonu devre empedansını azaltır ve bu nedenle eşleme görevini Villard gerilim çoklayıcı ile karşılaştırıldığında daha basit hale getirir [23,28,32].



Şekil 3.3. Dickson Gerilim Çoklayıcıya ait n kademeli temel devre gösterimi [23].

n kademeli Dickson gerilim çoklayıcının çıkış gerilimi Eşitlik (3.2)'de verilmiştir [33].

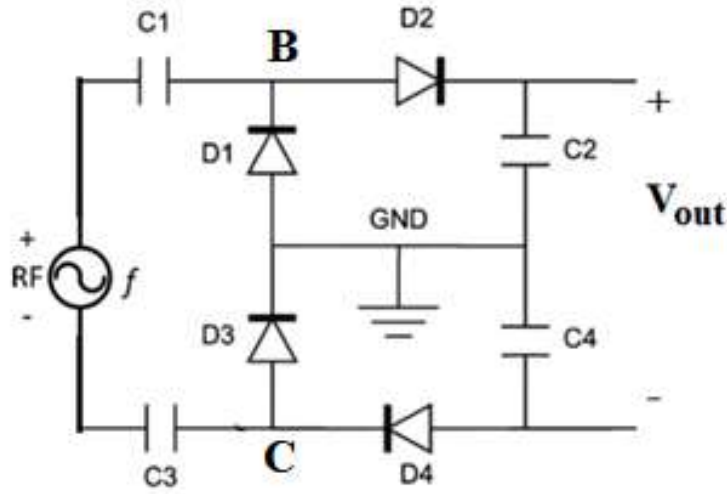
$$V_{DC} = n(V_m - V_T) \quad (3.2)$$

Burada n kademe sayısı, V_m giriş geriliminin tepe genliği ve V_T diyotların ileri iletim gerilimidir.

Greinacher gerilim çoklayıcı devresi Şekil 3.4'te gösterilmiştir. C1 ve D1, D2, C3 ve D3 tarafından düzeltilmek üzere B düğümündeki giriş gerilimini yukarı kaydırır, D4 ve C4 tarafından düzeltilmek üzere C düğümündeki gerilimi düşürür. Dengeye ulaştıktan sonra devre, yüke [34, 35] sabit bir çıkış akımı ve gerilimi sağlar. Greinacher gerilim çoklayıcının çıkış gerilimi Eşitlik (3.3)'te verilmiştir [36].

$$V_{DC} = 2nV_m \quad (3.3)$$

Burada; n kademe sayısı ve V_m 'de giriş geriliminin tepe genliğidir.



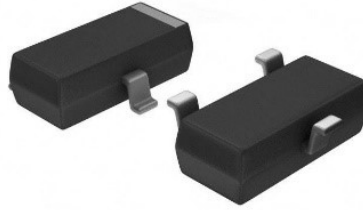
Şekil 3.4. Greinacher Gerilim Çoklayıcıya ait n -kademeli temel devre gösterimi [37]

[37]'de 10 MHz gibi düşük giriş frekanslarında gerilim çoklayıcı seçiminin çok önemli olduğu ancak 1000 MHz ve daha yüksek frekanslarda bu seçimin önemli olmadığı belirtildiğinden tasarım yapılırken Dickson gerilim çoklayıcı kullanılmıştır.

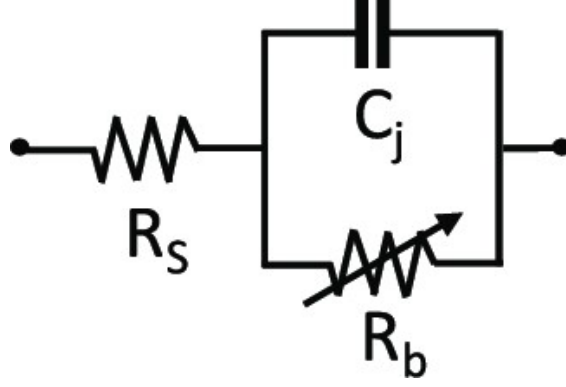
3.3 Diyot Seçimi

Düşük giriş gücü ve UHF ile RF bantlarındaki yüksek frekanslara tepki verebilecek malzemelerin seçimi hasat sistemleri için çok önemli bir parametredir. Hasat sistemi çok yüksek frekansla çalışma anlamına gelen RF sinyalleri ile çalışır, bu nedenle diyot yüksek hızlı anahtarlama süresinde çalışmalıdır. Bu nedenle yukarıda belirtilen şartlarda çalışabilecek diyot modellerinin seçimine özen gösterilmelidir. Bu tezde, Şekil 3.5'te gösterilen Schottky diyotlar, yarı iletken-yarı iletken birleşimi yerine metal yarı iletken bağlantısı kullanan üretim tekniği nedeniyle seçilmiştir. Bu teknik, bağlantının yüksek hızlı anahtarlama süresinde çalışmasına izin verir ve çalışmak için 0,15 V'tan daha düşük ileri gerilim düşüşüne ihtiyaç duyar. Şekil 3.6'da seri direnç (R_s) ve paralel bağlantı kapasitansı (C_j) ve bariyer direnci (R_b)'nden oluşan eşdeğer devresi gösterilen Schottky diyotlar yeterli ileri gerilim uygulandığında ileriye doğru bir akım akar [39]. Çok hızlı olarak ilettime geçen, iletimi kesen diyotlardır. Ayrıca Schottky diyotların ilettime geçme gerilimleri çok düşüktür.

Bu tezde, yüksek anahtarlama hızı, düşük ileri gerilim, düşük substrat kaçağı ve nispeten düşük bağlantı kapasitansına sahip olmaları nedeniyle Avago Technologies'e ait HSMS-2852 Schottky diyot [38] kullanılmıştır. Ayrıca bu diyot paketleri iki seri diyot içerdiğinden sistem hantal değildir. Bu nedenle gerilim çoğaltıcı devreler için uygundurlar.



Şekil 3.5. HSMS 2852 Schottky diyot.



Şekil 3.6. Schottky diyot için eşdeğer devre.

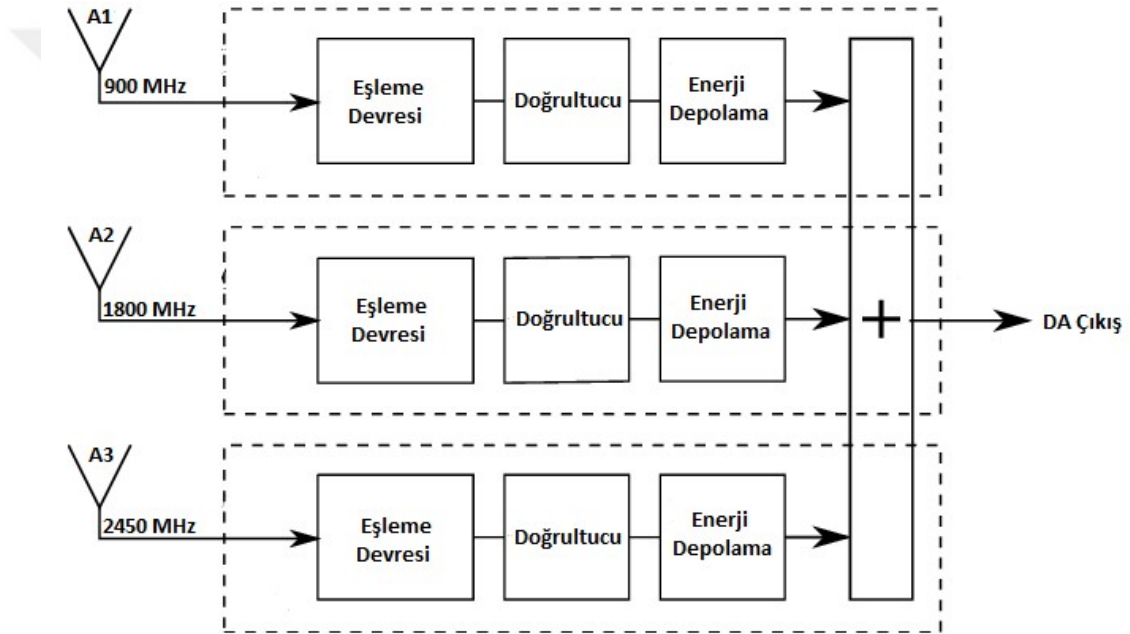
HSMS-2852, düşük RF ortamında kullanılan düşük giriş gücü tasarımı için uygundur [40]. Hasat devresindeki bir diğer kritik parametre, diyot verimliliği üzerindeki etkilerinden dolayı doyma akımıdır. Doygunluk akımı yüksek, eşdeğer direnci küçük, bağlantı kapasitesi düşük diyotların kullanılması tercih edilir. Ayrıca, daha yüksek doyma/akıma sahip diyotlar, yüksek ileri doğru akım üretir. Bununla birlikte, daha büyük diyotlar, alt tabaka kapasitansına ve daha yüksek bağlantı noktasına sahip yüksek bir doyma/akıma sahiptir.

3.4 Hasat Sistemi Tasarımı ve Simülasyon

Çok kademeli ve iki diyot modlu bir DVM tasarlamak ve simüle etmek için ADS, harmonik dengeleme teknikleri kullanılmıştır. Özellikle, Avago Technologies'ten HSMS-2852 Schottky diyot modeli ve LC, LL ve π tipi eşleme devreleri kullanılarak her üç frekansta da (900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz) çok kademeli bir DVM kullanılacak ve öncelikle yük direnci seçimi yapılacaktır. Yük direncini belirlemek amacıyla ilk aşamada giriş gücü - 15 dBm seçilmiştir. Çıkış gerilimi Schottky diyotlarının ters kırılma gerilimi aşıldıkça artan giriş gücü ile artar ve daha sonra çıkış gerilim eğrilerinin kalan güç seviyeleri için nispeten sabittir. Ayrıca, maksimum DC çıkış gerilimi, kademe sayısı arttıkça artar. Bununla birlikte, kademe sayısının artırılması, daha düşük düzeltilmiş çıkış gerilimlerine yol açar. Bu, ek aşamalarda kullanılan Schottky diyotları ileri kutuplamak için daha büyük giriş gerilimlerinin gerekli olduğu gerçeğinin bir yansımasıdır. Eşleme ağı bir kazanç sağladığından, eşleşen bir ağı kullanımının düşük güç seviyeleri için gerilim çarpanlarının çıkış gerilimini iyileştirmesi beklenir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu tezdeki tüm simülasyonlar ADS 2017 programı kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.1’de çok bantlı RF enerji hasat sistemi gösterilmektedir. Her bir frekans için maksimum gücü veren yük direnci tespit edilmiş ve her üç frekans için de uygun olan yük seçilmiştir. Daha sonra bu yük kullanılarak her bir frekans için 2 kademeden 6 kademeye kadar her bir kademe için eşleme devresi tasarlanmıştır. Her bir frekans için maksimum çıkış gücünü veren kademe sayısı belirlenmiştir. Daha sonra bu frekanslar için oluşturulan üç sistem birleştirilerek çıkış gerilimi ve sistemin verimi analiz edilmiştir.

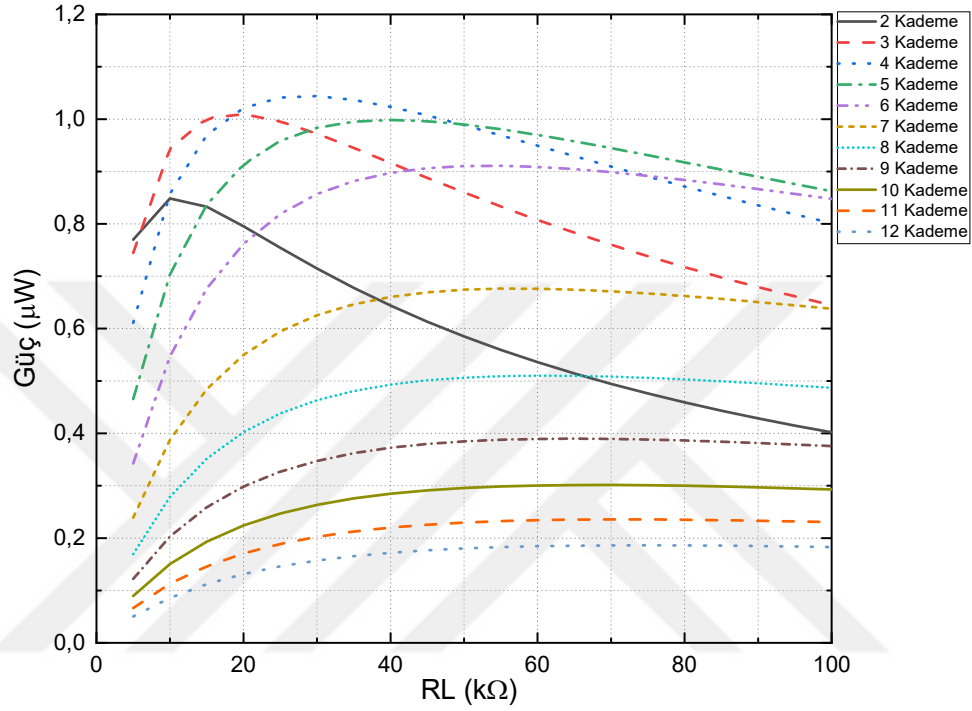


Şekil 4.1. Çok bantlı RF enerji hasat sistemi konfigürasyonu.

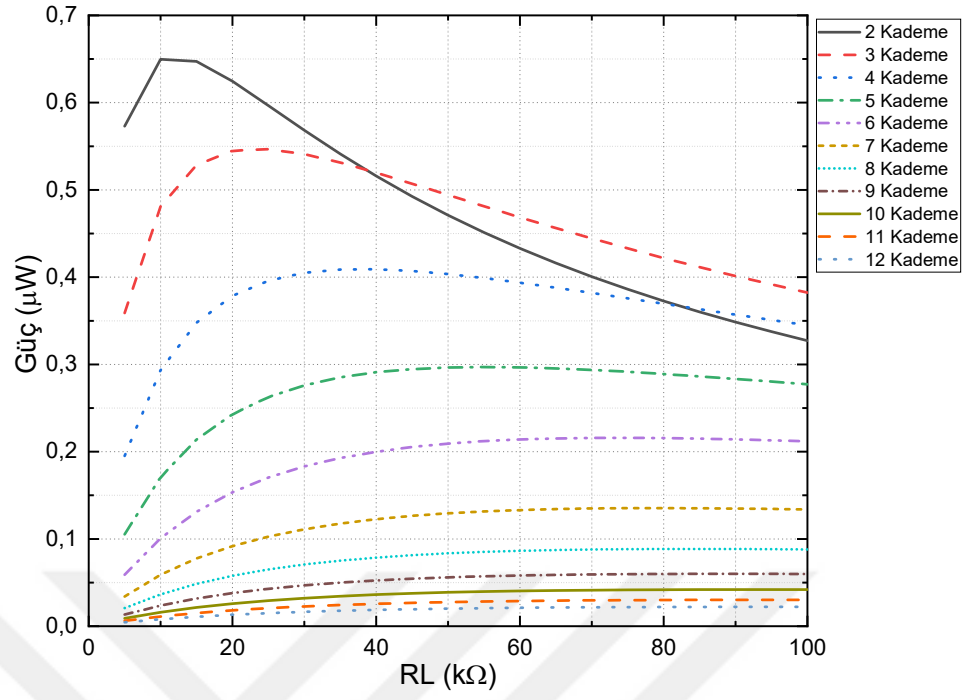
4.1 Yük Seçimi

Tasarıma başlamak için öncelikle yük değerinin seçilmesi gerekmektedir. Hasat sistemlerinin giriş empedansı ve verimliliği esas olarak yük direncinden etkilenmektedir. Bu nedenle tasarımımda küçük bir dirençten (5 kΩ) büyük bir dirence (100 kΩ) kadar geniş bir aralık seçiyoruz. Değişen direnç değerleri ile çıkış güçleri arasındaki ilişkiye bakarak, maksimum çıkış gücünü elde etmek için hangi yük direncinin seçileceğine karar veriyoruz. Bunu her üç frekansta da tekrarlıyoruz.

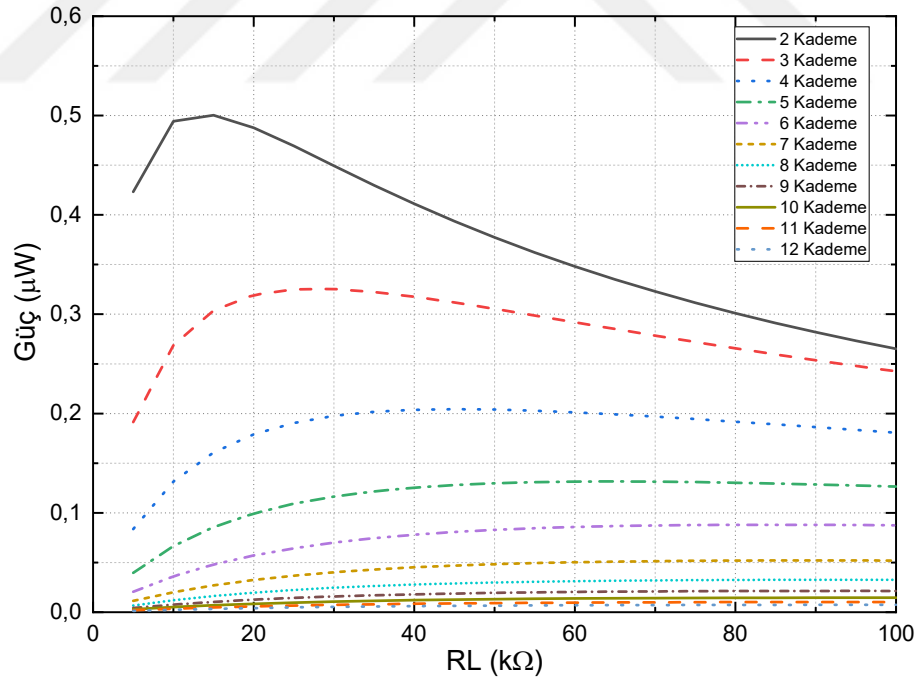
DVM kullanarak oluşturduğumuz devrede kapasitörleri 100 pF'a ve giriş gücünü - 15 dBm'e ayarlıyoruz. 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz'de 2 kademeden 12 kademeye kadar olan devreleri çalıştırıyoruz. Maksimum çıkışı hangi yük değerinde elde edebileceğimizi tespit etmek için çizdirilen farklı yük değerlerine karşılık gelen güç grafiği her bir frekans için sırasıyla Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.2. Yük direncine karşılık güç değerlerinin gösterimi (900 MHz).



Şekil 4.3. Yük direncine karşılık güç değerlerinin gösterimi (1800 MHz).



Şekil 4.4. Yük direncine karşılık güç değerlerinin gösterimi (2450 MHz).

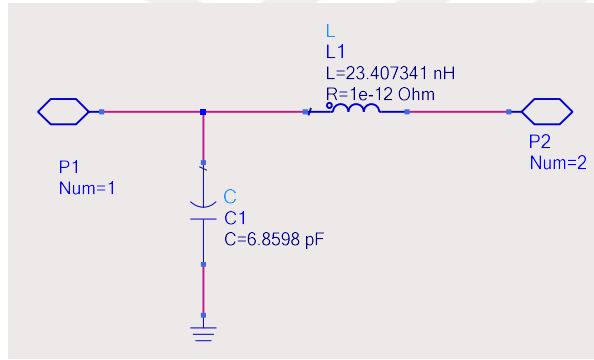
3 ayrı frekansta elde edilen verilerden ortak bir çıkarım yapıldığında maksimum çıkış gücünü elde edebilmek için tasarımımızın her aşamasında kullanılmak üzere $20\text{ k}\Omega$ değerinin seçilmesinin uygun olacağı değerlendirilmiş olup bundan sonraki tasarım aşamasında $20\text{ k}\Omega$ değerinin kullanılmasına karar verilmiştir.

4.2 LC Empedans Eşleme

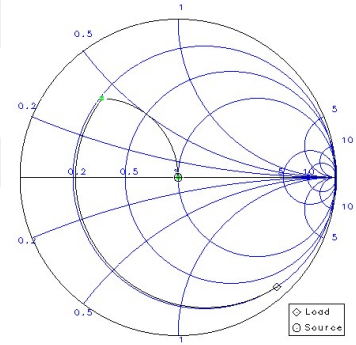
Bu çalışmada $20\text{ k}\Omega$ yük direncinde 2 kademeden 6 kademeye kadar olan DVM devrelerine LC tipi eşleme devreleri uygulanmıştır.

Daha sonra LL ve π tipi eşleme devreleri de kullanılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

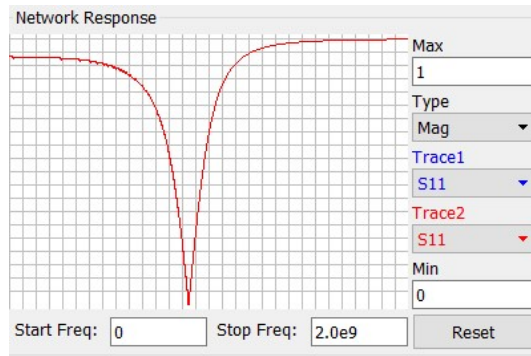
Şekil 4.5'te 900 MHz 'te 3 kademeli DVM için ADS'de yapılan LC empedans eşleme devresi örnek olarak verilmiştir.



(a)



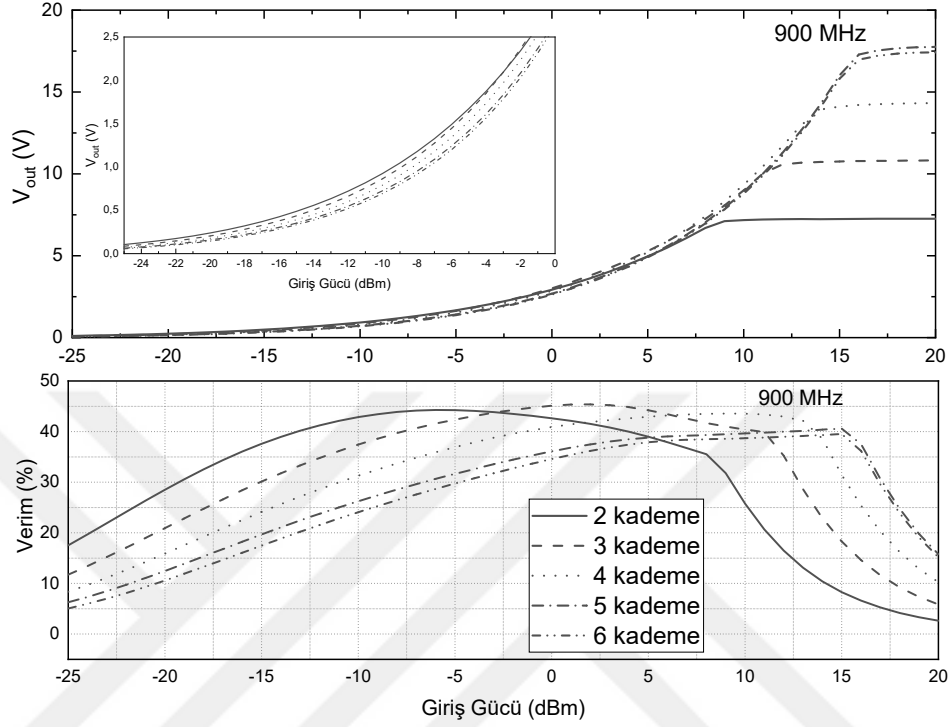
(b)



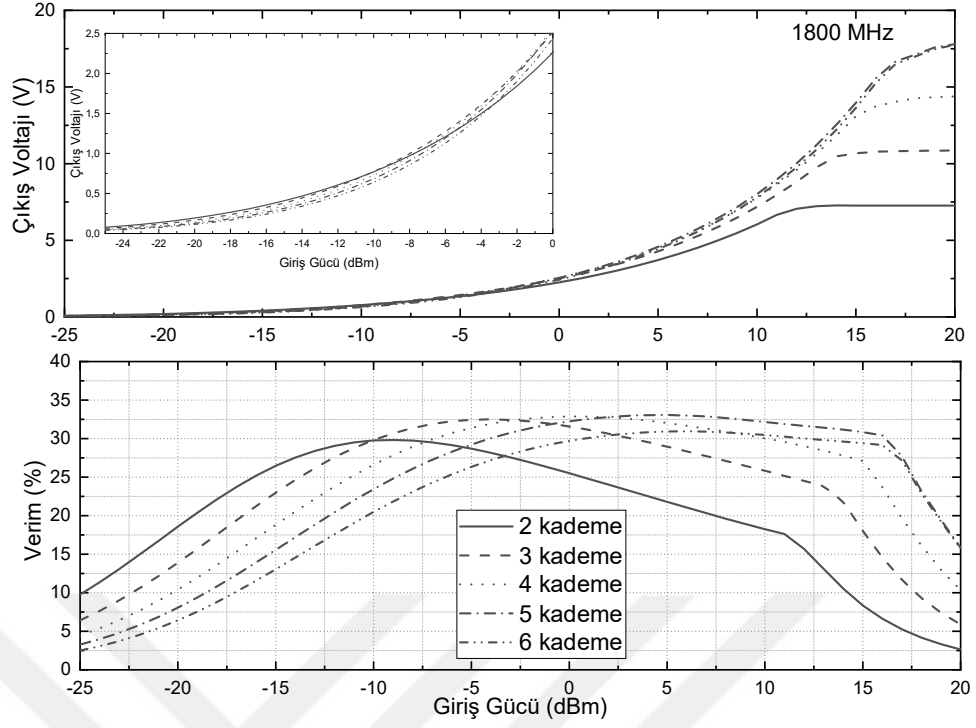
(c)

Şekil 4.5. (a) LC eşleme devresi (b) Smith diyagramı (c) Eşleme devresi tepkisi (900 MHz).

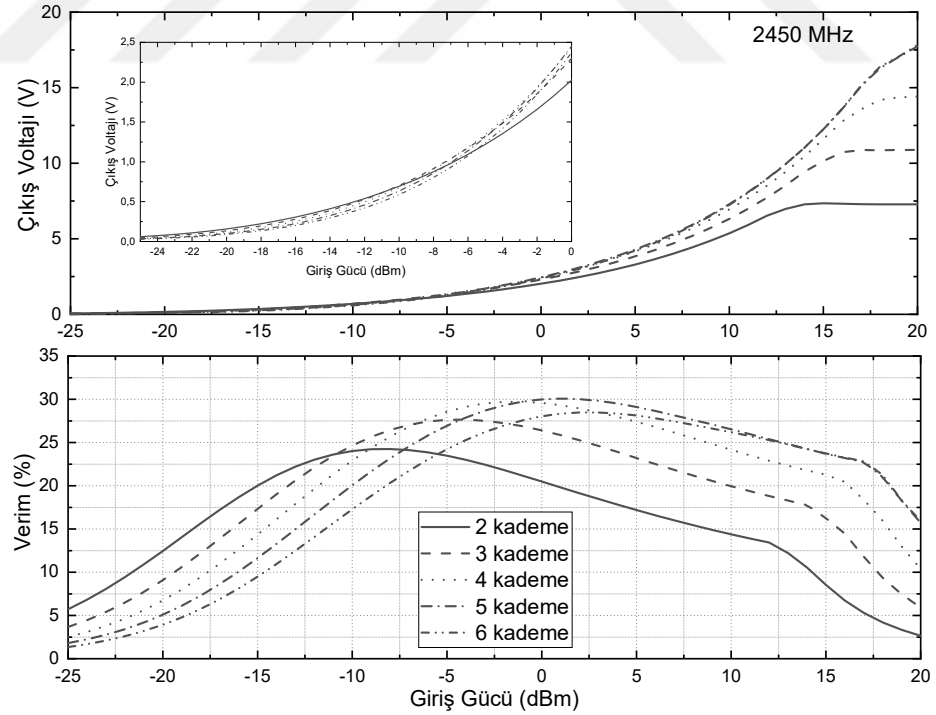
Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de 20 k Ω yükte, 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz frekanslarında 2 ila 6 kademeli DVM’ye LC empedans eşlemesi uygulanarak elde edilen çıkış gerilimleri ve verimleri verilmektedir.



Şekil 4.6. 900MHz için 2 - 6 kademe DVM LC eşleme devresinin çıkış gerilimi ve verimi.



Şekil 4.7. 1800 MHz için 2 - 6 kademe DVM LC eşleme devresinin çıkış gerilimi ve verimi.



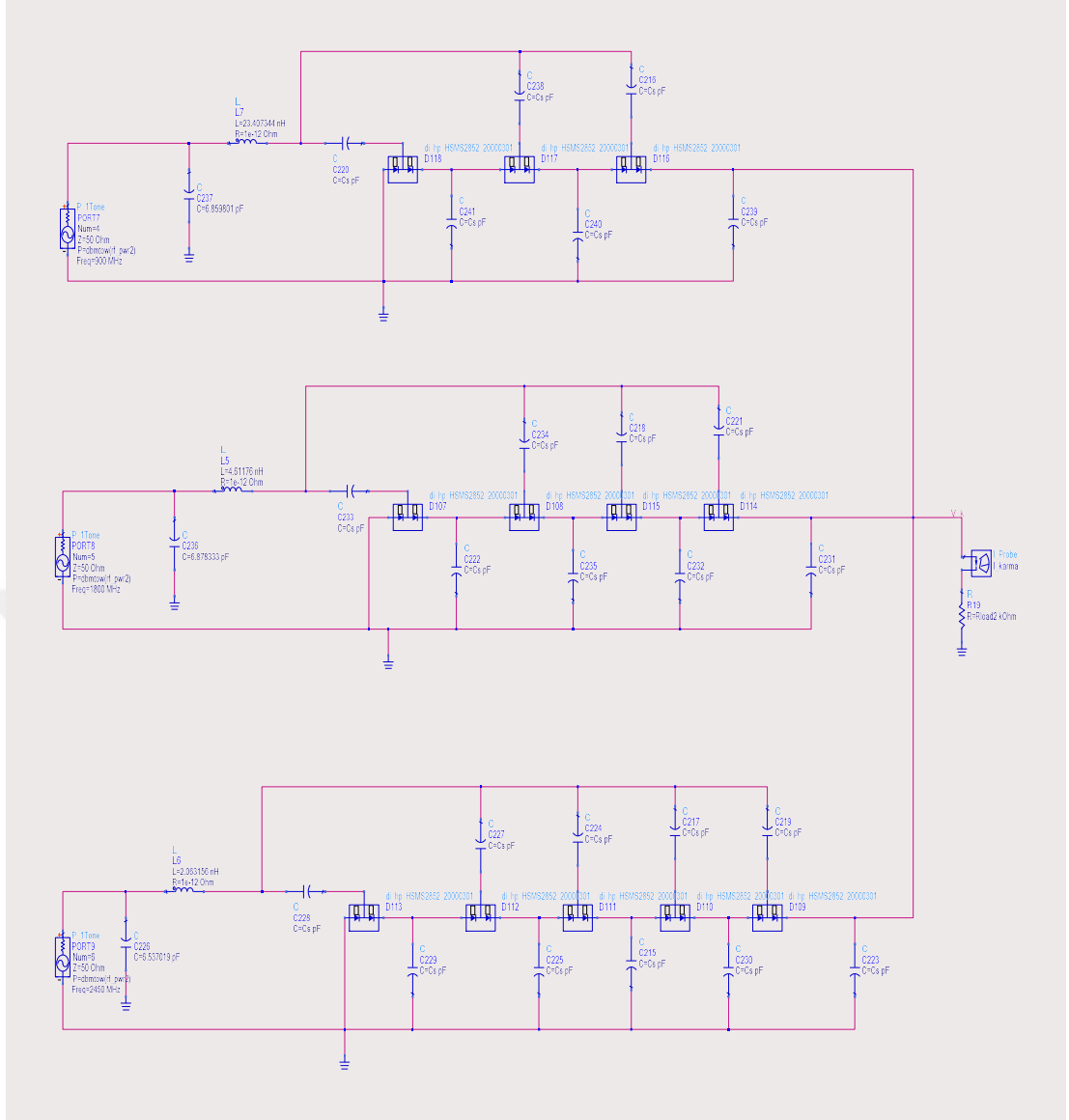
Şekil 4.8. 2450 MHz için 2 - 6 kademe DVM LC eşleme devresinin çıkış gerilimi ve verimi.

900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz için çıkış gerilimleri incelendiğinde düşük güç seviyelerinde, - 25 ila 0 dBm, kademe artışından çok etkilenmediği, belirgin bir gerilim farkı olmadığı, gözlemlenmiştir. O dBm'den daha yüksek giriş gücünde DVM'nin kademe sayısı arttıkça çıkış geriliminde belirgin bir artış gözlemlenmiştir ve yaklaşık olarak 12 dBm giriş gücünden sonra her üç bant için çıkış gerilimleri kademeye bağlı olarak doyuma ulaşmıştır.

Kademeye bağlı olarak verim yüzdeleri analiz edildiğinde ise, 900 MHz için 2 dBm giriş gücünde %45,382 olarak 3 kademede, 1800 MHz'te 0 dBm giriş gücünde %32,882 olarak 4 kademede ve 2450 MHz de ise 1 dBm giriş gücünde %30 verim 5 kademede maksimum verim elde edilmiştir.

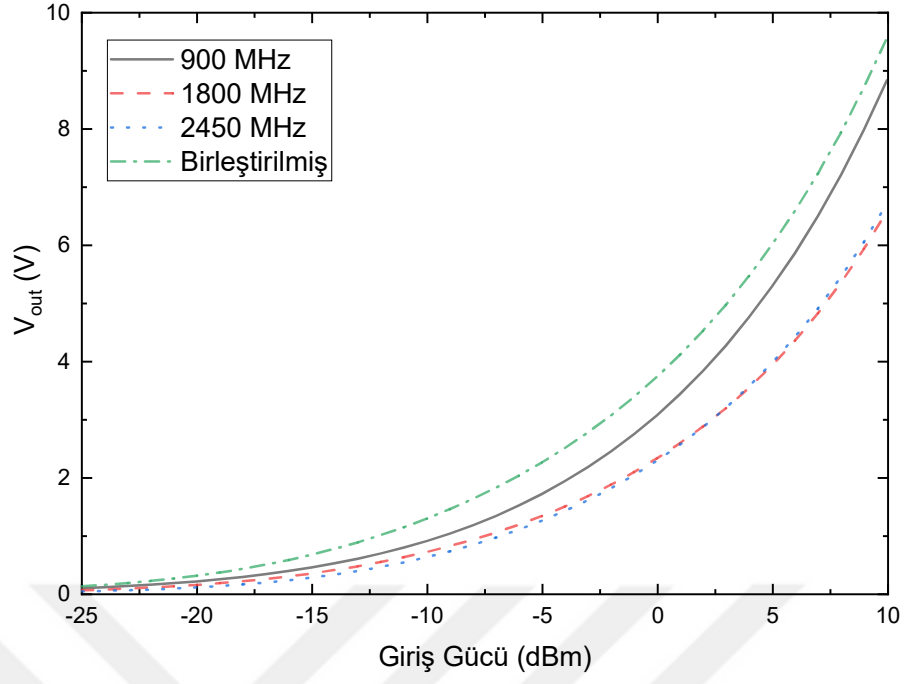
4.3 Çok Bantlı RF Hasatlama Devresi (LC Eşleme)

20 k Ω yük direncinde maksimum verimi elde ettiğimiz 900 MHz için 3 kademeli, 1800 MHz için 4 kademeli ve 2450 MHz için 5 kademeli devreleri birleştiriyoruz. Bu üç devreyi birleştirdikten sonra Şekil 4.9'da da gösterildiği gibi tasarımıımızın son halini elde ediyoruz.

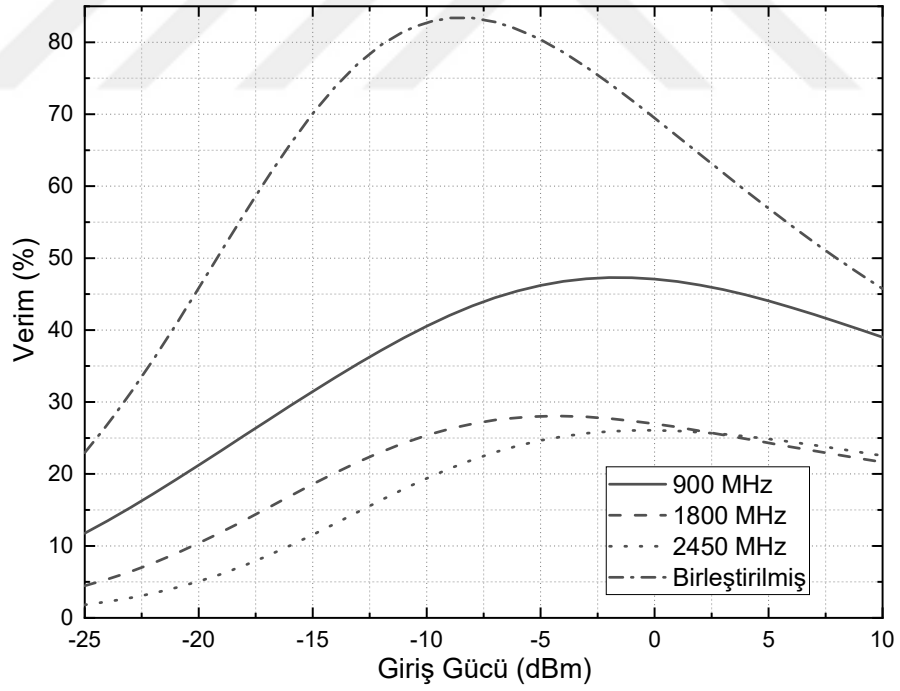


Şekil 4.9. Birleştirilmiş devre.

Şekil 4.10’da 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz devreleri ile birleştirilmiş üç bantlı devrenin verim karşılaştırılması yapılmıştır.



(a)



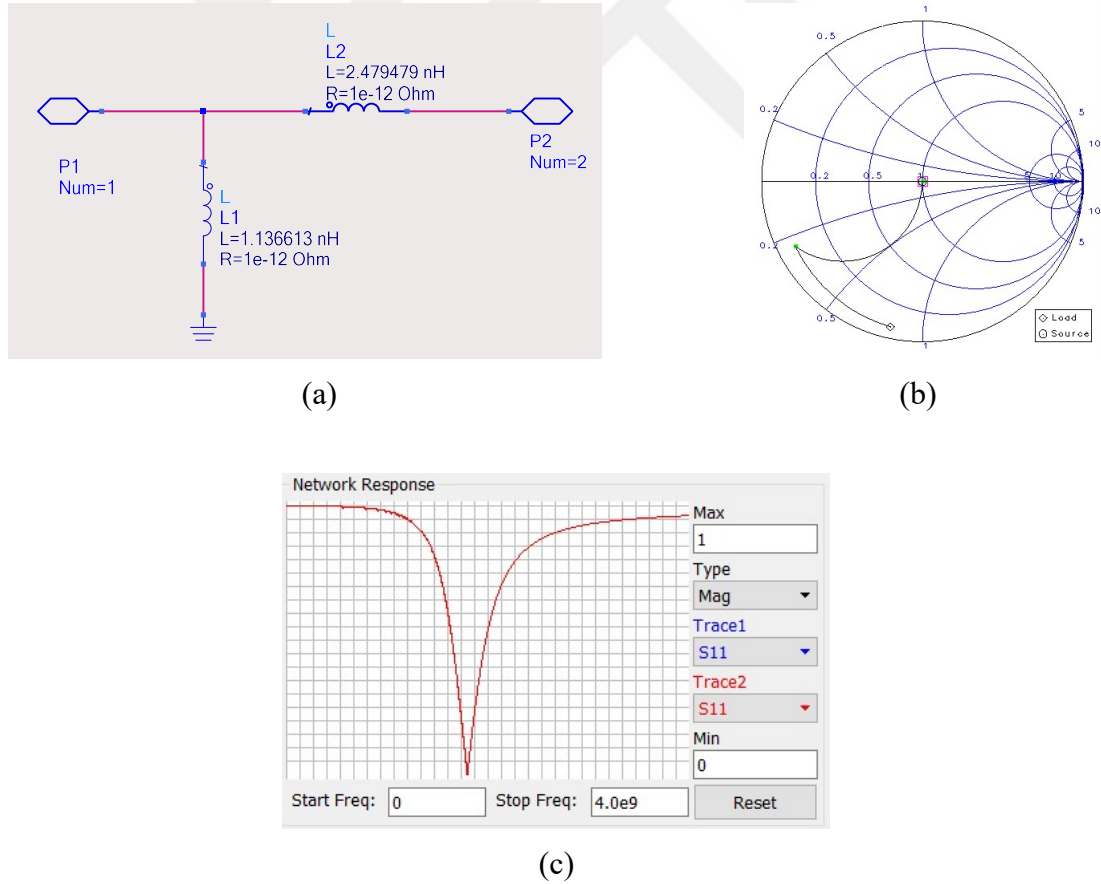
(b)

Şekil 4.10. LC empedans eşlemesi için giriş gücüne karşılık (a) Çıkış gerilimi (b) verim

Şekil 4.10 incelendiğinde birleştirilmiş devrenin çıkış geriliminin tek bantlı RF hasat devrelerine göre daha yüksek olduğu, 1800 MHz ve 2450 MHz bantlarında ise çıkış gerilimlerinin birbirine yakın ve en düşük olduğu gözlemlenmiştir. Verim analiz edildiğinde ise tek bantlı devrelerde maksimum verim 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz için sırasıyla 2 dBm, 0 dBm ve 1 dBm’de gözlemlenirken birleştirilmiş devrede - 9 dBm’de maksimum verim %83,373 olarak elde edilmiştir. Böylece düşük güç seviyelerinde maksimum verim sağlanmıştır.

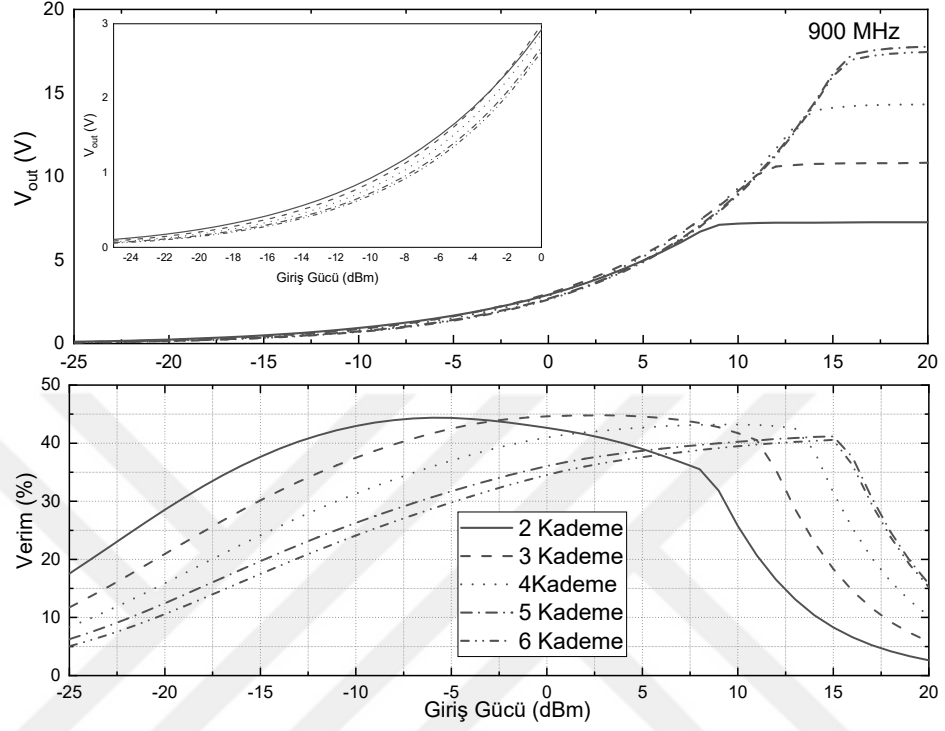
4.4 LL Empedans Eşleme

Bu bölümde 20 k Ω yük direncinde 2 kademeden 6 kademeye kadar olan DVM devrelerine LL tipi eşleme devreleri uygulanmıştır. Şekil 4.11’de 1800 MHz’te 4 kademeli DVM için ADS’de yapılan LL empedans eşleme devresi örnek olarak verilmiştir.

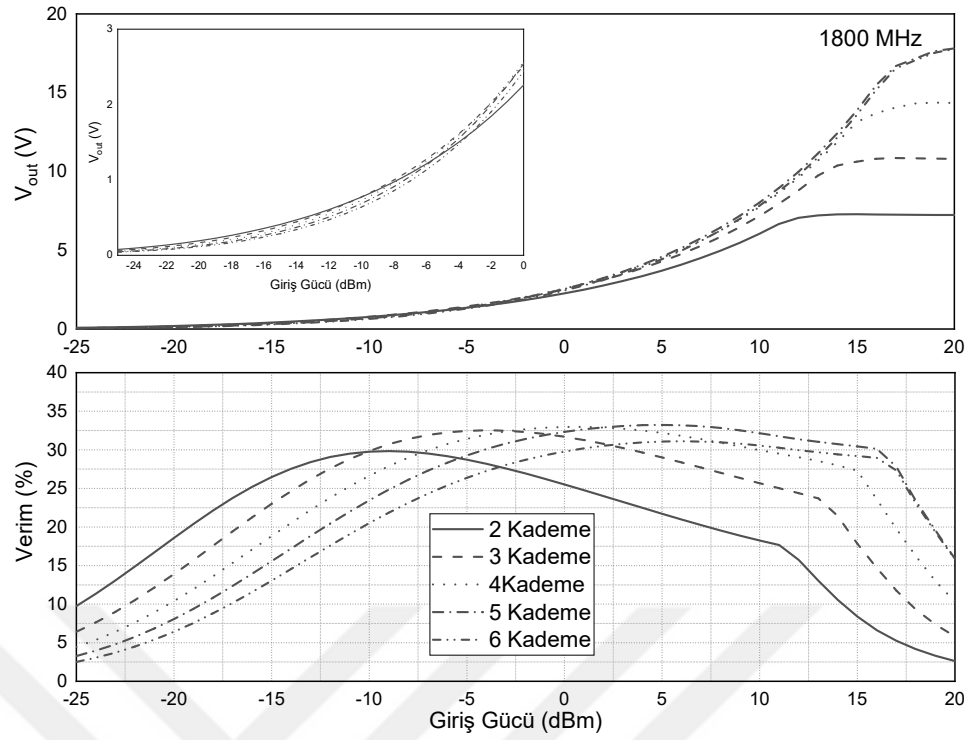


Şekil 4.11. (a) LL eşleme devresi (b) Smith diyagramı (c) Eşleme devresi tepkisi (1800 MHz).

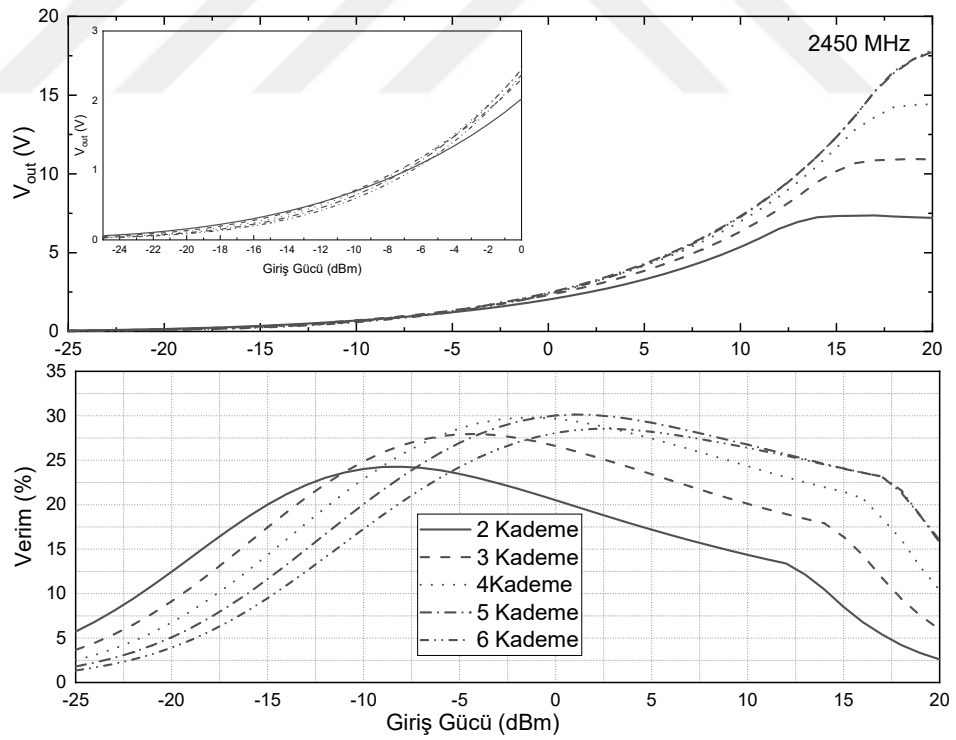
Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te 20 k Ω yükte, 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz frekanslarında 2 ila 6 kademeli DVM'ye LL empedans eşlemesi uygulanarak elde edilen çıkış gerilimleri ve verimleri verilmektedir.



Şekil 4.12. 900MHz için 2 - 6 kademe DVM LL eşleme devresinin çıkış gerilimi ve verimi.



Şekil 4.13. 1800 MHz için 2 - 6 kademe DVM LL eşleme devresinin çıkış gerilimi ve verimi.



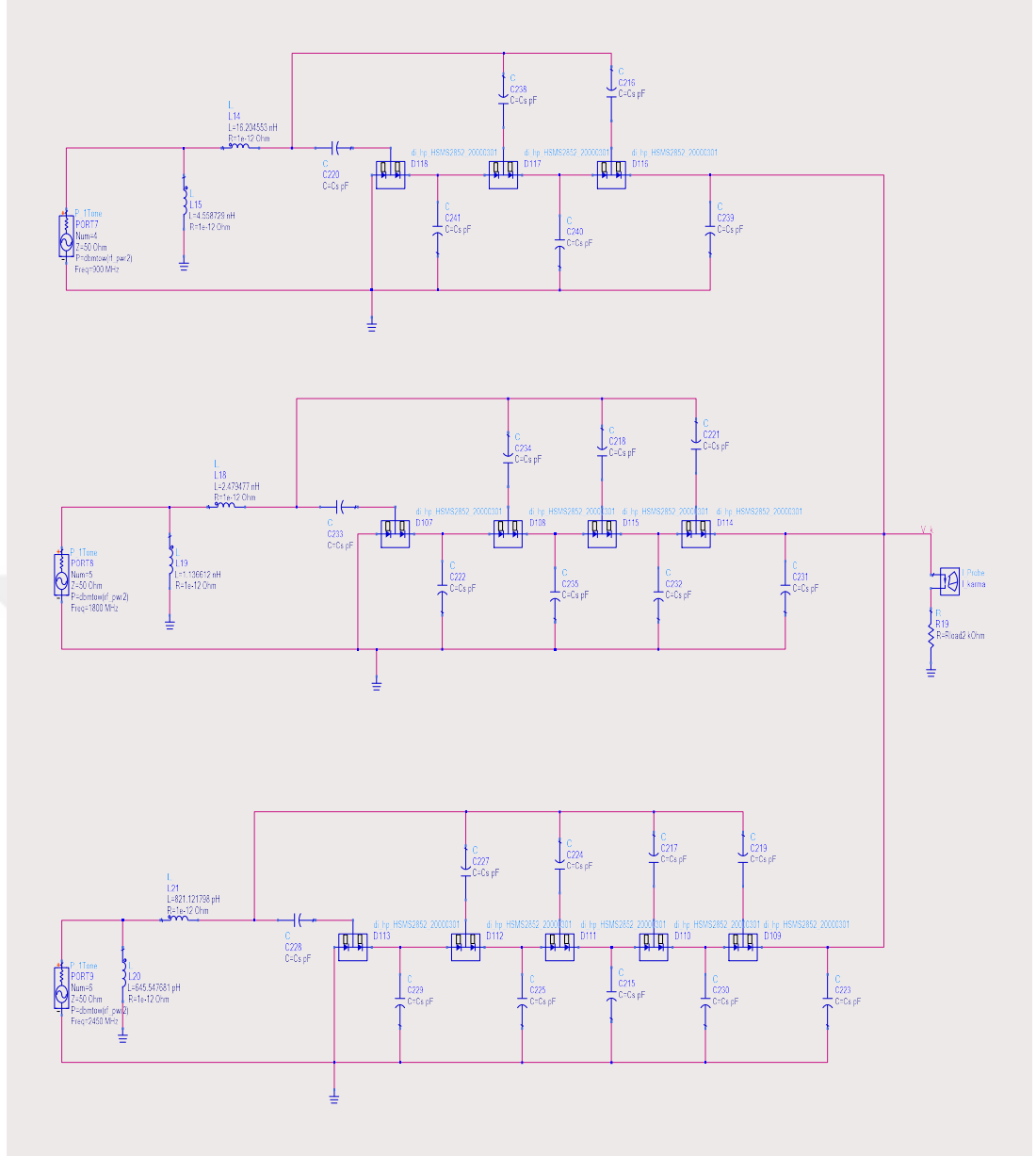
Şekil 4.14. 2450 MHz için 2 - 6 kademe DVM LL eşleme devresinin çıkış gerilimi ve verimi.

900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz için çıkış gerilimleri incelendiğinde düşük güç seviyelerinde kademe artışından çok etkilenmediği, belirgin bir gerilim farkı olmadığı, gözlemlenmiştir. 10 dBm güç seviyesinden sonra çıkış gerilimlerinin kademeye bağlı olarak doyuma ulaştığı gözlemlenmiştir.

Kademeye bağlı olarak verim yüzdeleri analiz edildiğinde ise, 900 MHz için 3 dBm giriş gücünde %44,792 olarak 3 kademede, 1800 MHz’te 1 dBm giriş gücünde %32,975 olarak 4 kademede ve 2450 MHz de ise 1 dBm giriş gücünde %30,144 verim 5 kademede maksimum verim elde edilmiştir.

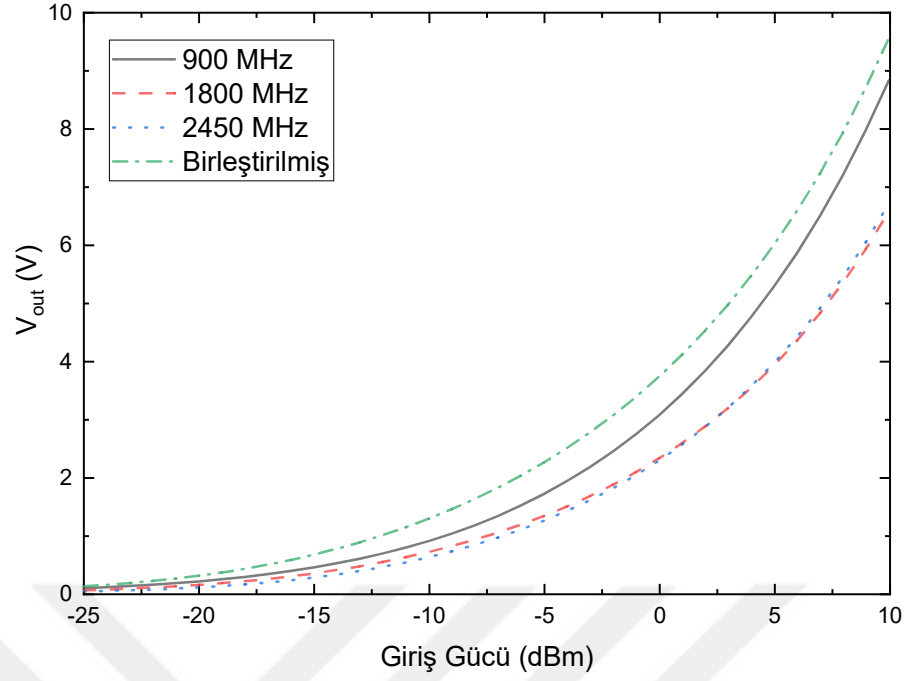
4.5 Çok Banlı RF Hasatlama Devresi (LL Eşleme)

20 k Ω yük direncinde maksimum çıkışı elde ettiğimiz 900 MHz için 3 kademeli, 1800 MHz için 4 kademeli ve 2450 MHz için 5 kademeli devreleri birleştiriyoruz. Bu üç devreyi birleştirdikten sonra Şekil 4.15’te de gösterildiği gibi tasarımımızın son halini elde ediyoruz.

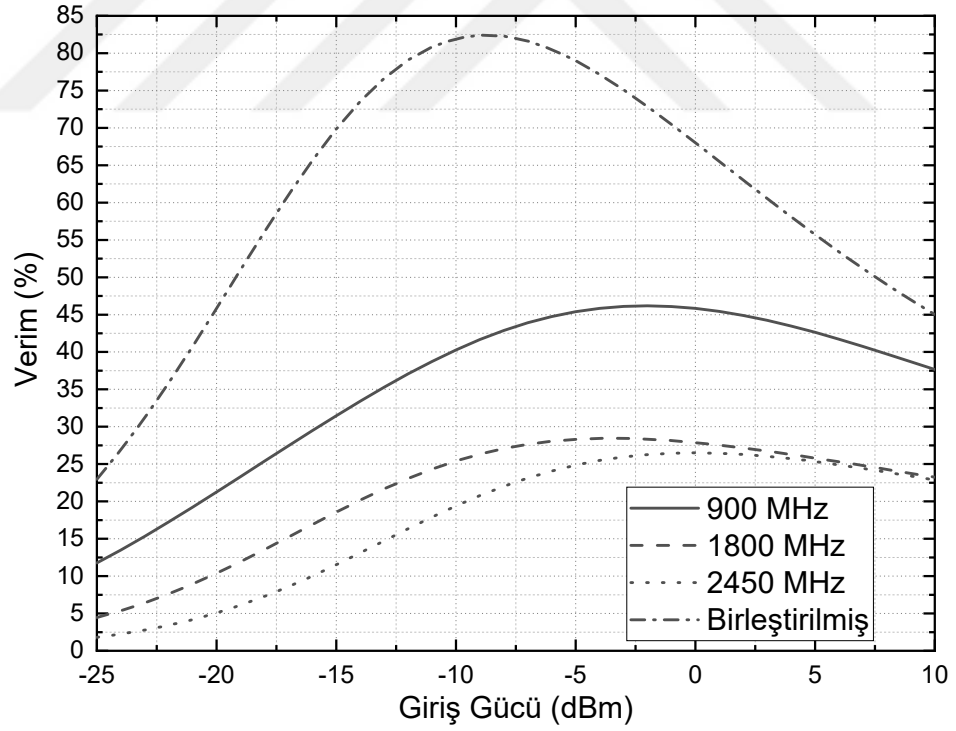


Şekil 4.15. Birleştirilmiş devre.

Şekil 4.16’da LL empedans uyumlama yapılmış 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz devreleri ile birleştirilmiş üç bantlı devrenin çıkış gerilimi ve verim karşılaştırılması sunulmuştur.



(a)



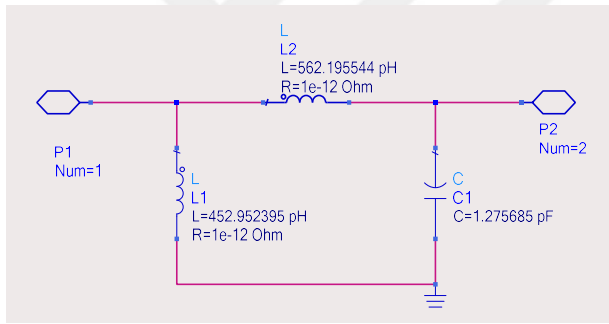
(b)

Şekil 4.16. LL Eşleme ile 900 MHz, 1800 MHz, 2450 MHz ve birleştirilmiş devrenin (a) Çıkış Gerilimi (b) Verimi

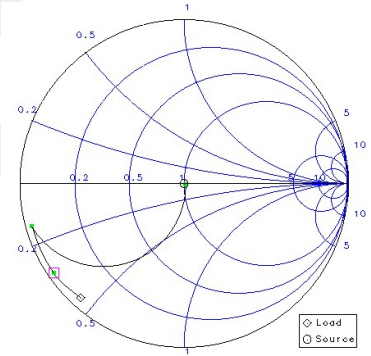
Şekil 4.16 incelendiğinde birleştirilmiş devrenin çıkış geriliminin tek bantlı RF hasat devrelerine göre daha yüksek olduğu, 1800 MHz ve 2450 MHz bantlarında ise çıkış gerilimlerinin birbirine yakın ve en düşük olduğu gözlemlenmiştir. Verim analiz edildiğinde ise tek bantlı devrelerde maksimum verim 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz için sırasıyla 3 dBm, 1 dBm ve 1 dBm’de gözlemlenirken birleştirilmiş devrede - 9 dBm’de maksimum verim %82,925 olarak elde edilmiştir. Böylece düşük güç seviyelerinde maksimum verim sağlanmıştır.

4.6 π Empedans Eşleme

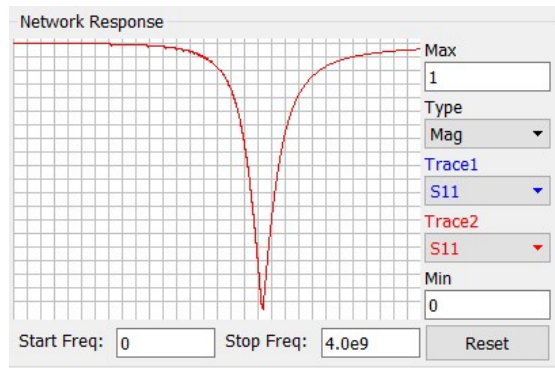
Bu bölümde 20 k Ω yük direncinde 2 kademeden 6 kademeye kadar olan DVM devrelerine π tipi eşleme devreleri uygulanmıştır. Şekil 4.17’de 2450 MHz’te 5 kademeli DVM için ADS’de yapılan π empedans eşleme devresi örnek olarak verilmiştir.



(a)



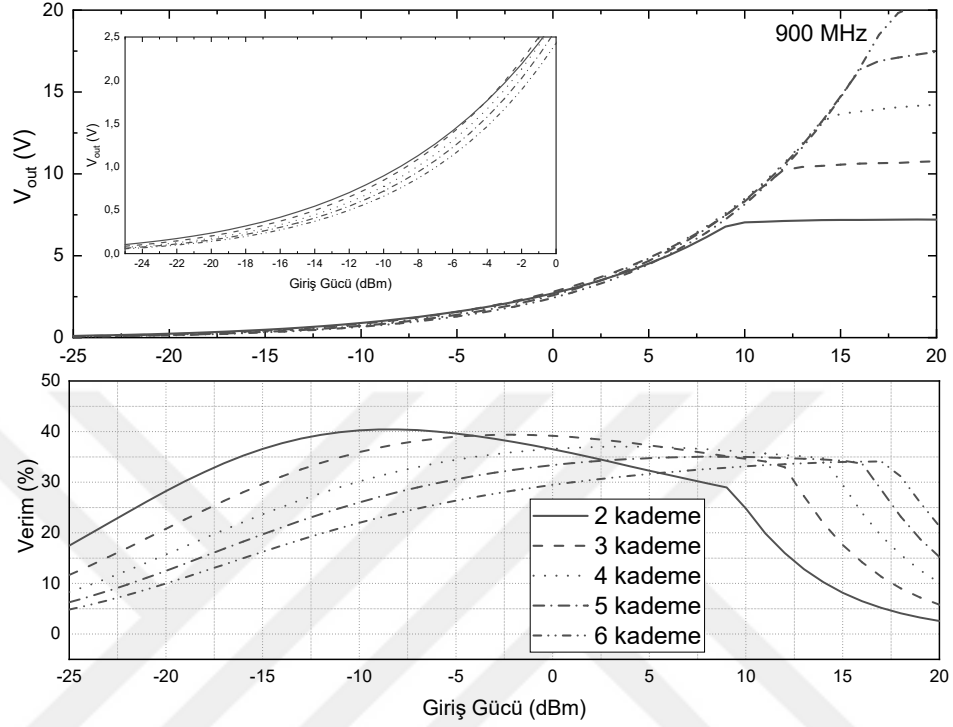
(b)



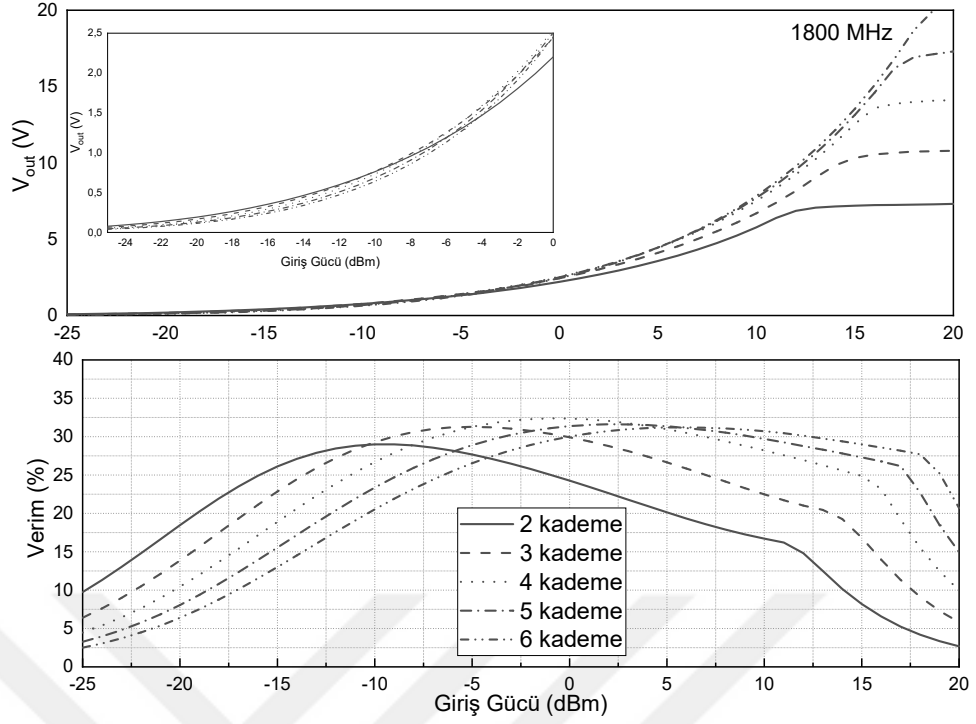
(c)

Şekil 4.17. (a) π eşleme devresi (b) Smith diyagramı (c) Eşleme devresi tepkisi (2450 MHz)

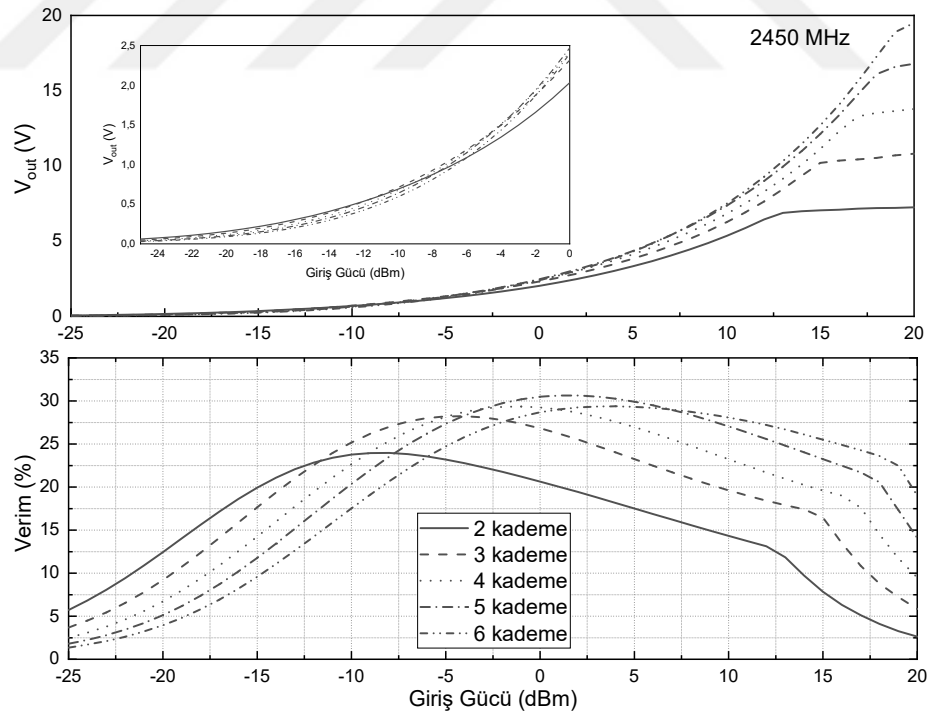
Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de 20 k Ω yükte, 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz frekanslarında 2 ila 6 kademeli DVM’ye π empedans eşlemesi uygulanarak elde edilen çıkış gerilimleri ve verimleri verilmektedir.



Şekil 4.18. 900MHz için 2 - 6 kademe DVM π eşleme devresinin çıkış gerilimi ve verimi.



Şekil 4.19. 1800MHz için 2 - 6 kademe DVM π eşleme devresinin çıkış gerilimi ve verimi.



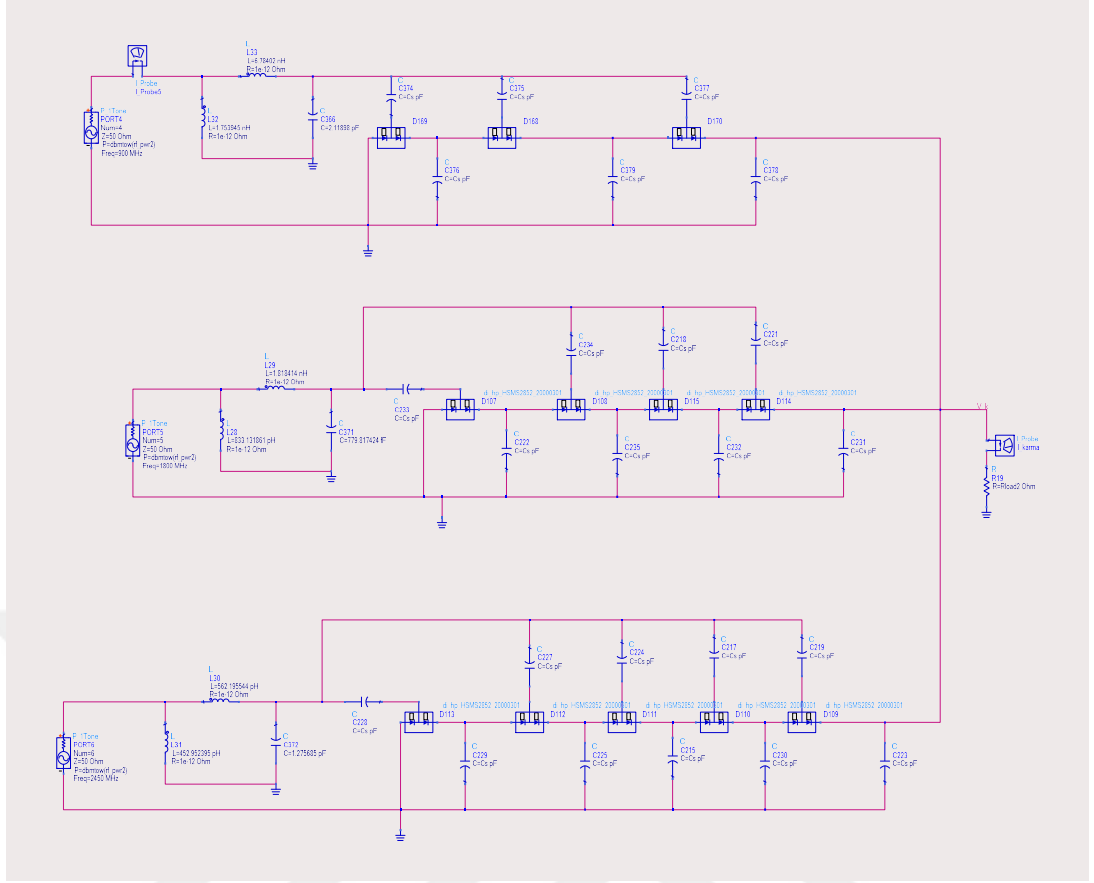
Şekil 4.20. 2450 MHz için 2 - 6 kademe DVM π eşleme devresinin çıkış gerilimi ve verimi.

900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz için çıkış gerilimleri incelendiğinde düşük güç seviyelerinde çıkış gerilimleri arasında belirgin bir fark gözlemlenmemekle birlikte düşük kademe DVM'lerin gerilim seviyelerinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin, 2 kademeli gerilim çoklayıcının çıkışı 900 MHz'de - 4 dBm'e kadar en yüksekken, 1800 MHz ve 2450 MHz de - 8 dBm'e kadar en yüksek çıkışı vermiştir. 10 dBm güç seviyesinden sonra çıkış gerilimlerinin kademeye bağlı olarak doyuma ulaştığı gözlemlenmiştir.

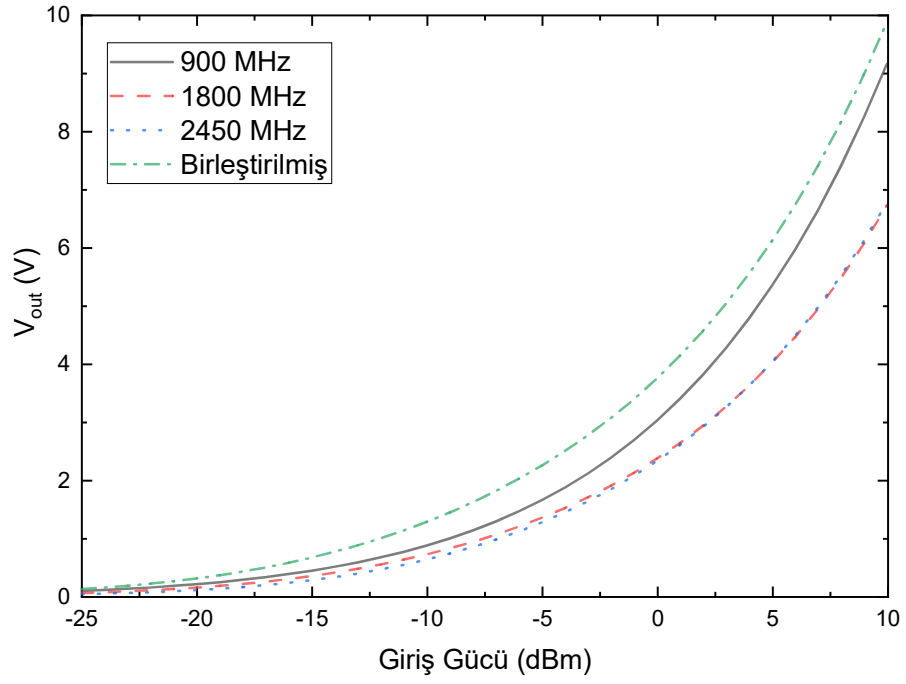
Kademeye bağlı olarak verim yüzdeleri analiz edildiğinde ise, 900 MHz için - 8 dBm giriş gücünde %40,426 olarak 2 kademede, 3 kademede ise -2 dBm de %39,4, 1800 MHz'te 5 dBm giriş gücünde %32,384 olarak 4 kademede ve 2450 MHz de ise 2 dBm giriş gücünde %30,638 verim 5 kademede maksimum verim elde edilmiştir.

4.7 Çok Bantlı RF Hasatlama Devresi (π Eşleme)

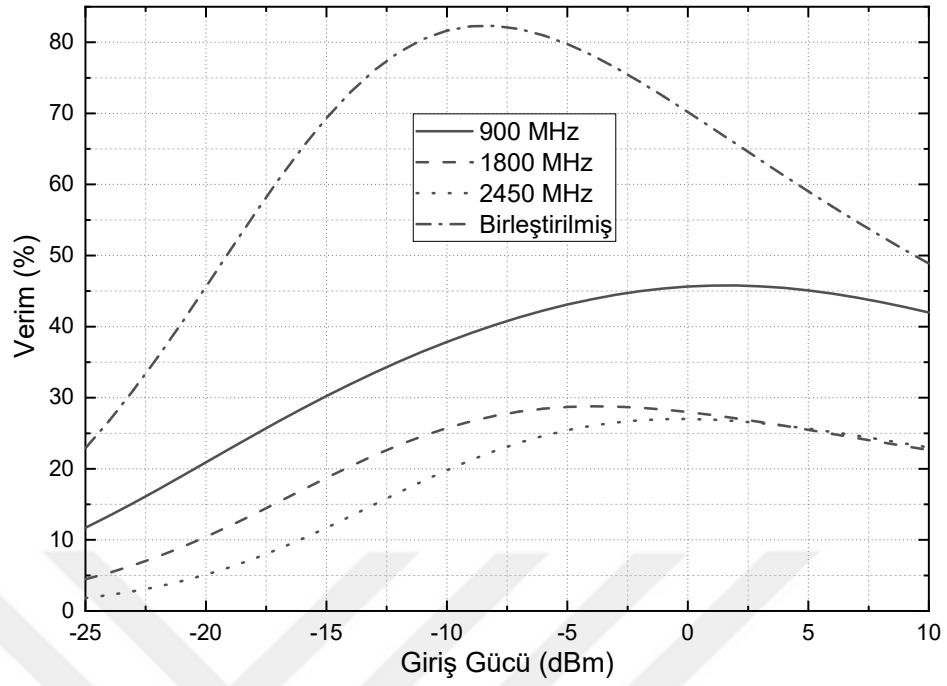
20 k Ω yük direncinde maksimum çıkışı elde ettiğimiz 900 MHz için 3 kademeli (900 MHz için normalde 2 kademede maksimum çıkışı elde etmiş olmamıza rağmen tüm eşleme tiplerinde birliktelik olması açısından 3 kademe seçilmiştir), 1800 MHz için 4 kademeli ve 2450 MHz için 5 kademeli devreleri birleştiriyoruz. Bu üç devreyi birleştirdikten sonra Şekil 4.21'de de gösterildiği gibi tasarımıımızın son halini elde ediyoruz.



Şekil 4.21. Birleştirilmiş devre.



(a)

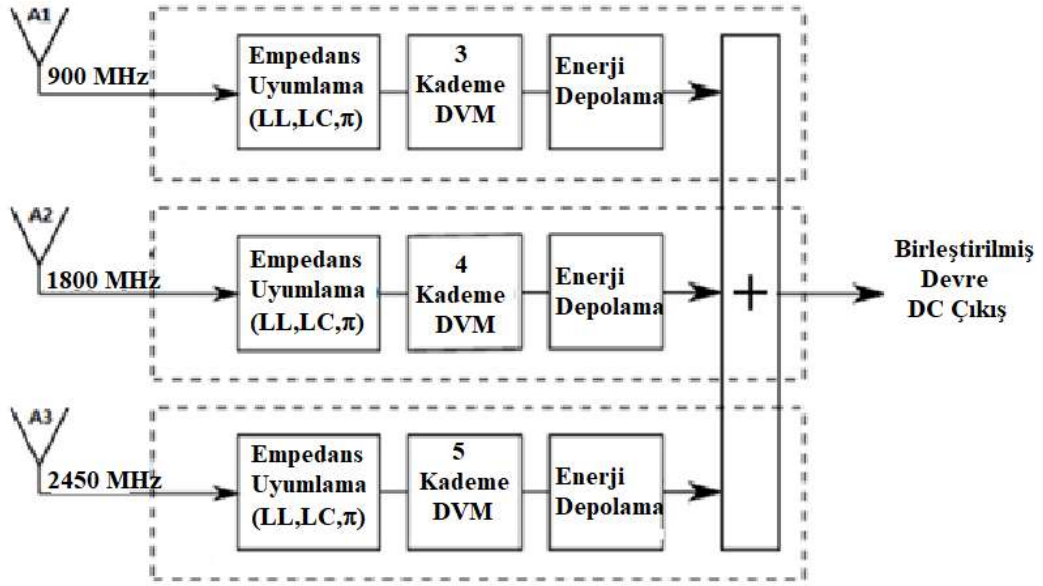


(b)

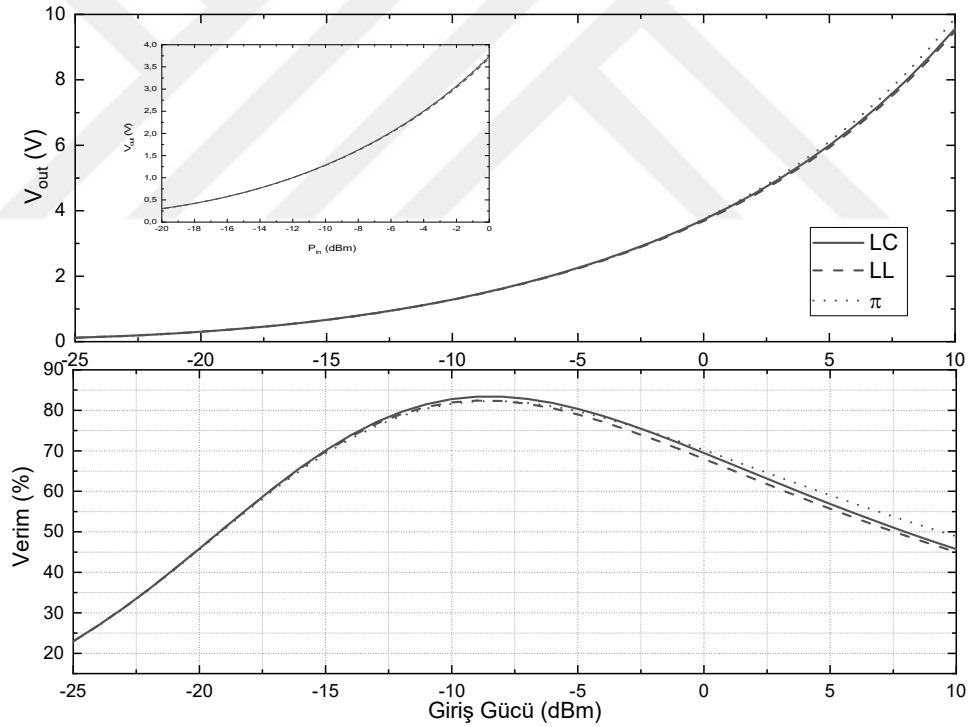
Şekil 4.22. 900 MHz, 1800 MHz, 2450 MHz ve birleştirilmiş devrenin π uyumlama için (a) Çıkış gerilimi (b) verimi.

Şekil 4.22 incelendiğinde birleştirilmiş devrenin çıkış geriliminin tek bantlı RF hasat devrelerine göre daha yüksek olduğu, 1800 MHz ve 2450 MHz bantlarında ise çıkış gerilimlerinin birbirine yakın ve en düşük olduğu gözlemlenmiştir. Verim analiz edildiğinde ise tek bantlı devrelerde maksimum verim 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz için sırasıyla -2 dBm, 5 dBm ve 2 dBm’de gözlemlenirken birleştirilmiş devrede - 8 dBm’de maksimum verim %82,308 olarak elde edilmiştir. Böylece düşük güç seviyelerinde maksimum verim sağlanmıştır.

Her bir eşleme tipindeki birleştirilmiş devrelerin karşılaştırılması amacıyla tüm sistemlerde 900 MHz için 3 kademeli, 1800 MHz için 4 kademeli ve 2450 MHz için 5 kademeli devre seçilmiştir. Üç bantlı enerji hasatlama sisteminin birleştirilmiş tasarımı Şekil 4.23’te gösterilmiştir.



Şekil 4.23. Üç bantlı enerji hasatlama sisteminin gösterimi.



Şekil 4.24. Birleştirilmiş devrede eşleme tipinin gerilim ve verim üzerindeki etkisi.

Şekil 4.24'te birleştirilmiş devrede eşleme tipinin gerilim ve verim üzerindeki etkisini gösteren grafik verilmiştir. Eşleme tipine bağlı olarak çıkış gerilimi ve verimde önemli bir farklılık gözlenmemektedir. Maksimum verimlilik LC eşleme tipi için -9 dBm'de %83,373 olarak elde edilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde çok bantlı RF hasatlama sistemi tasarlanmıştır. Verim ve çıkış gerilimi bu tasarımların çıktılarıdır.

İlk olarak her bir frekans için maksimum çıkış gücünü verecek gerilim çoklayıcı devrelerin seçimi amacıyla 2 kademeli devreden 12 kademeli devreye kadar DVM kullanarak oluşturduğumuz devrenin ADS 2017 kullanarak çıktılarına baktığımızda tüm tasarımda 20 k Ω yük direncinin kullanılmasına karar verilmiştir.

Ardından, her frekans için DVM devrelerine LC, LL ve π tipi eşleme türleri uygulanmıştır. Her bir frekans için kademe sayısı, maksimum verimliliğe bağlı olarak belirlenmiştir. Birleştirilmiş devrede LC ve LL eşleme için 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz için sırasıyla 3 kademeli, 4 kademeli ve 5 kademeli DVM seçilmiştir. π eşleme tipinde 900 MHz için maksimum çıkış gücü 2 kademeli devrede elde edilmiş olmasına rağmen bütünlük sağlamak amacıyla 3 kademeli devre seçilmiştir.

LC eşleme tipinde; 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz için çıkış gerilimleri incelendiğinde düşük güç seviyelerinde, - 25 ila 0 dBm, kademe artışından çok etkilenmediği, belirgin bir gerilim farkı olmadığı, gözlemlenmiştir. O dBm'den daha yüksek giriş gücünde DVM'nin kademe sayısı arttıkça çıkış geriliminde belirgin bir artış gözlemlenmiştir ve yaklaşık olarak 12 dBm giriş gücünden sonra her üç bant için çıkış gerilimleri kademeye bağlı olarak doyuma ulaşmıştır.

Kademeye bağlı olarak verim yüzdeleri analiz edildiğinde ise, 900 MHz için 2 dBm giriş gücünde %45,382 olarak 3 kademede, 1800 MHz'te 0 dBm giriş gücünde %32,882 olarak 4 kademede ve 2450 MHz de ise 1 dBm giriş gücünde %30 verim 5 kademede maksimum verim elde edilmiştir.

Birleştirilmiş devrenin çıkış geriliminin tek bantlı RF hasat devrelerine göre daha yüksek olduğu, 1800 MHz ve 2450 MHz bantlarında ise çıkış gerilimlerinin birbirine yakın ve en düşük olduğu gözlemlenmiştir. Verim analiz edildiğinde ise tek bantlı devrelerde maksimum verim 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz için sırasıyla 2 dBm, 0 dBm ve 1 dBm'de gözlemlenirken birleştirilmiş devrede - 9 dBm'de maksimum verim %83,373 olarak elde edilmiştir. Böylece düşük güç seviyelerinde maksimum verim sağlanmıştır.

LL eşleme tipinde; 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz için çıkış gerilimleri incelendiğinde düşük güç seviyelerinde kademe artışından çok etkilenmediği, belirgin bir gerilim farkı olmadığı, gözlemlenmiştir. 10 dBm güç seviyesinden sonra çıkış gerilimlerinin kademeye bağlı olarak doyuma ulaştığı gözlemlenmiştir.

Kademeye bağlı olarak verim yüzdeleri analiz edildiğinde ise, 900 MHz için 3 dBm giriş gücünde %44,792 olarak 3 kademedede, 1800 MHz'te 1 dBm giriş gücünde %32,975 olarak 4 kademedede ve 2450 MHz de ise 1 dBm giriş gücünde %30,144 verim 5 kademedede maksimum verim elde edilmiştir.

Birleştirilmiş devrenin çıkış geriliminin tek bantlı RF hasat devrelerine göre daha yüksek olduğu, 1800 MHz ve 2450 MHz bantlarında ise çıkış gerilimlerinin birbirine yakın ve en düşük olduğu gözlemlenmiştir. Verim analiz edildiğinde ise tek bantlı devrelerde maksimum verim 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz için sırasıyla 3 dBm, 1 dBm ve 1 dBm'de gözlemlenirken birleştirilmiş devrede - 9 dBm'de maksimum verim %82,925 olarak elde edilmiştir. Böylece düşük güç seviyelerinde maksimum verim sağlanmıştır.

π eşleme tipinde; 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz için çıkış gerilimleri incelendiğinde düşük güç seviyelerinde çıkış gerilimleri arasında belirgin bir fark gözlemlenmemekle birlikte düşük kademe DVM'lerin gerilim seviyelerinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin, 2 kademeli gerilim çoklayıcının çıkışı 900 MHz'de - 4 dBm'e kadar en yüksekken, 1800 MHz ve 2450 MHz de - 8 dBm'e kadar en yüksek çıkışı vermiştir. 10 dBm güç seviyesinden sonra çıkış gerilimlerinin kademeye bağlı olarak doyuma ulaştığı gözlemlenmiştir.

Kademeye bağlı olarak verim yüzdeleri analiz edildiğinde ise, 900 MHz için - 8 dBm giriş gücünde %40,426 olarak 2 kademedede, 3 kademedede ise -2 dBm de %39,4, 1800 MHz'te 5 dBm giriş gücünde %32,384 olarak 4 kademedede ve 2450 MHz de ise 2 dBm giriş gücünde %30,638 verim 5 kademedede maksimum verim elde edilmiştir.

Birleştirilmiş devrenin çıkış geriliminin tek bantlı RF hasat devrelerine göre daha yüksek olduğu, 1800 MHz ve 2450 MHz bantlarında ise çıkış gerilimlerinin birbirine yakın ve en düşük olduğu gözlemlenmiştir. Verim analiz edildiğinde ise tek bantlı devrelerde maksimum verim 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz için sırasıyla -2 dBm,

5 dBm ve 2 dBm’de gözlemlenirken birleştirilmiş devrede - 8 dBm’de maksimum verim %82,308 olarak elde edilmiştir. Böylece düşük güç seviyelerinde maksimum verim sağlanmıştır.

Her bir eşleme tipindeki birleştirilmiş devrelerin karşılaştırılması amacıyla tüm sistemlerde 900 MHz için 3 kademeli, 1800 MHz için 4 kademeli ve 2450 MHz için 5 kademeli devre seçilmiştir. Birleştirilmiş devrelerde eşleme tipinin gerilim ve verim üzerindeki etkisini gösteren grafik incelendiğine eşleme tipine bağlı olarak çıkış gerilimi ve verimde önemli bir farklılığın olmadığı gözlenmektedir. Üç eşleme tipi karşılaştırıldığında maksimum verim LC eşleme tipinde - 9 dBm’de %83,373 olarak elde edilmiştir.

[22]’de yapılan çalışmada - 15 dBm giriş gücünde 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz olmak üzere üç farklı frekansta enerji hasatlama sistemi tasarımı yapılmış ve yük direnci 50 k Ω olarak alınmıştır. Bu tezde tasarlanmış olan sistemde ise yük direnci sabit bir değer olarak seçilmemiş, her üç frekansta da azami gücü elde edebilmek için küçük bir dirençten (5 k Ω) büyük bir dirence (100 k Ω) kadar geniş bir aralıktaki direnç değerleri taranarak azami çıkış gücünü veren ortak yük değeri seçilmiştir. Bu değer 20 k Ω olarak belirlenmiştir. Söz konusu çalışmada her bir sistemde maksimum çıkış gerilimini elde etmek amacıyla 900 MHz için 10, 1800 MHz için 6 ve 2450 MHz için 4 kademeli gerilim çoklayıcı devre kullanılmıştır. Bu tezde yapılan çalışmada ise 900 MHz için 3, 1800 MHz için 4 ve 2450 MHz için 5 kademeli gerilim çoklayıcı devre kullanılmıştır. Anılan çalışmada LL tipi eşleme devresi kullanılmış ve toplam sistemin verimi %45’ler seviyesindedir. Bu tezde yapılan çalışmada ise LC, LL ve π tipi eşleme tipleri kullanılmıştır. Elde edilen birleştirilmiş sistemin - 15 dBm’deki verimi %70’ler seviyesindedir. [22]’de yapılan çalışma ile kıyaslandığında daha düşük gerilim çoklayıcı kademelerinde daha yüksek verime ulaşılmıştır.

[27]’de yapılan çalışmada, GSM-900, GSM-1800 ve Wi Fi-2450 bantlarından eş zamanlı olarak RF enerjisi hasatlayabilen bir sistem tasarımı yapılmıştır. Önerilen yüksek verimli üç bantlı doğrultucu, üç paralel koldan oluşmaktadır. Her kol, doğrultucu diyotlara aktarılan maksimum RF gücü sağlamak için tasarlanmış bir giriş eşleme devresi, Schottky diyot HSMS-2852 kullanan tek bir gerilim katlayıcı ve DC çıkış gerilimini yumuşatmak için bir DC geçiren filtre içermektedir. - 10 dBm giriş gücünde 3,8 k Ω ’luk optimum yük direnci ile ölçülen RF’den DC’ye dönüşüm

verimliliği 900 MHz, 1800 MHz ve 2450 MHz'de sırasıyla %33,7, %21,8 ve %20'ye ulaşmaktadır. Söz konusu çalışma ile kıyaslandığında bu tezde yapılan çalışmada aynı frekanslarda çalışan hasat sisteminin tasarımı yapılmış ve farklı olarak bu üç sistem birleştirilerek verim ve gerilimde iyileşme sağlanmıştır. %55'ler seviyesinde elde edilen verim bu tezde yapılan devrelerin birleştirilmesi neticesinde - 9 dBm giriş gücünde %80'ler seviyesine çıkarılmıştır.

Bu tezde yapılan çalışmaların farklı teknikler kullanılarak geliştirilebileceği çıkış geriliminin ve verimin farklı uygulamalarla daha yüksek değerlere çıkarılabileceği düşünülmektedir. Bunu yaparken bu tezde yapmış olduğumuz çalışmadan farklı olarak her bir frekans için ayrı ayrı eşleme devreleri oluşturmak yerine çoklu frekans uygulamaları (örneğin, iki frekans veya üç frekans) için ortak eşleme devreleri oluşturularak sistemin tasarımın yapılabileceği değerlendirilmektedir. İlave olarak L ve π tipi eşleme devreleri yerine T tipi eşleme devreleri ile çalışmanın daha da genişletilebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Dey, K., 2018. Design of dual band rectifiers for energy harvesting applications, Yüksek Lisans Tezi, Purdue Üniversitesi, Fort Wayne, Hindistan.
2. URL-1<<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/how-why-ofenergy-harvesting-for-low-power-applications> >, Erişim tarihi: 10.03.2020.
3. Divakaran S. K. ve Nasimuddin D. D. K, 2018. RF energy harvesting systems: An overview and design issues, Int J RF Microw Comput Aided Eng, 29, e21633.
4. Vullers R. J. M., Van Schaijk R., Doms I., Van Hoof C., Mertens R., 2009. Micropower energy harvesting. Solid-State Electronics, 53,7, 684–693.
5. Akhtar F. ve Rehmani M. H., 2015. Energy replenishment using renewable and traditional energy resources for sustainable wireless sensor networks: a review, Renewable Sustainable Energy Reviews, 45, 769–784.
6. Kuralay A., Ertürk E., Yıldırım H., 2018. Mikrodalga ve Radyo Dalga Enerji Hasadı, ETÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Öğrenci Dergisi.
7. Tekir, O., 2009. Havada yayınım yapan elektromanyetik dalgalardan enerji hasat etmede verimliliği etkileyen faktörlerin analizi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
8. Zungeru A. M., Ang L. M., Prabakaran S. R. S., Seng K. P., 2012. Radio Frequency Energy Harvesting and Management for Wireless Sensor Networks. Green Mobile Devices and Networks: Energy Optimization and Scavenging Techniques (CRC Press, Taylor and Francis Group, 2011) pp. 341-368.
9. URL-2<<https://www.electronicsforu.com/market-verticals/powerelectronics/harvesting-radio-frequency-energy> >, Erişim tarihi: 12.03.2020.
10. Brown W. C., 1996. The history of wireless power transmission, Solar Energy, 56, 3–21.
11. Brown W. C., 1969. Experiments involving a microwave beam to power and position a helicopter, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-5, 692–702.
12. Tran L. G., Cha H. K., Park W. T., 2017. RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications, Micro and Nano Systems Letters, 5,14,1-16.
13. URL-3 <<https://ecee.colorado.edu/~ecen4242/gsm/index.htm>>, Erişim tarihi: 20.03.2020.
14. URL-4 < <https://www.worldtimezone.com/gsm.html> >, Erişim tarihi:20.03.2020.

15. URL-5 <<https://telecom-hyb.blogspot.com/2016/12/frequency-resource-ofgsm-system.html>>, Erişim tarihi: 20.03.2020.
16. URL-6 <<https://techterms.com/definition/wi-fi>>, Erişim tarihi: 03.04.2020.
17. Manafi S., Nikmehr S., Bemani M., 2012. Planar Reconfigurable Multifunctional Antenna for WLAN/Wimax/UWB/Pcsdcs/UMTS Applications, Progress In Electromagnetics Research C, 26, 123-137.
18. URL-7 <<https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/wifi-ieee-802-11/channelsfrequencies-bands-bandwidth.php>>, Erişim tarihi: 03.04.2020.
19. URL-8 <https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_WLAN_channels>, Erişim tarihi: 07.04.2020.
20. Khonsari Z., Björninen T., Tentzeris M. M., Sydänheimo L., Ukkonen L., 2015. 2.4 GHz inkjetprinted RF energy harvester on bulk cardboard substrate, 2015 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), 153–155.
21. Agrawal S., Pandey S. K., Singh J., Parihar M. S., 2014. Realization of efficient RF energy harvesting circuits employing different matching technique, 15th IEEE International Symposium on Quality Electronic Design, 754-761.
22. Keyrouz S., Visser H. J., Tijhuis A. G., 2013. Multi-band Simultaneous Radio Frequency Energy Harvesting, 7th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP 2013),3058-3061.
23. Uzun Y., 2015. Design of an efficient triple band RF energy harvester, Aces Journal, 30,12, 1286-1293.
24. Khansalee E.,Zhao Y.,Leelarasme E., Nuanyai K., 2015. A dual-band rectifier for RF energy harvesting systems, Engineering Journal, 19,5,189-197.
25. Khalid F., Saeed W., Shoaib N., Khan M. U., Cheema H. M., 2020. Quad-Band 3D Rectenna Array for Ambient RF Energy Harvesting, International Journal of Antennas and Propagation , 2020,7169846.
26. Shukla G., Verma S., Sao A., Srivastava S., Tripathi S., Mukherjee S. P., 2020. RF Energy Harvesting for GSM and Wi-Fi Band, URSI RCRS 2020, IIT (BHU), Varanasi, India.
27. Tafekirt H., Sebastia J. P., Bouajaj A., Reda B. M., 2020. A Sensitive Triple - Band Rectifier for Energy Harvesting Applications, IEEE Access, 8, 73659-73664.
28. Nintanavongsa P., Muncuk U., Lewis D. R., 2012. Design Optimization and Implementation for RF Energy Harvesting, IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2,1, 24–33.

29. Jabbar H., Song Y.S., Jeong T. T., 2010. RF energy harvesting system and circuits for charging of mobile devices, *IEEE Transaction on Consumer Electronics*, 56,1, 247–253.
30. Yan H., Macias Montero J. G., Akhnoukh A., de Vreede L. C. N., Burghart J. N., 2005. An Integration Scheme for RF Power Harvesting, 8th Annual Workshop on Semiconductor Advances for Future Electronics and Sensors, Veldhoven, the Netherlands, (2005) 64-66.
31. Giusa F., Maiorca F., Noto A., Trigona C., Andò B., Baglio S., 2014. A diode-less mechanical voltage multiplier: A novel transducer for vibration energy harvesting, *Sensors Actuators A: Physical*, 212, 34–41.
32. Axelrod B., Golan G., Berkovich Y., Shenkman A., 2012. Diode–capacitor voltage multipliers combined with boost-converters: topologies and characteristics, *IET Power Electronics*, 5,6, 873–884.
33. Yuan F., 2011. CMOS circuits for passive wireless microsystems, Springer, New York.
34. Al-Husseini M., Haskou A., Rishani N., Kabalan K.Y., 2015. Textile-Based Rectennas, *WIT Transactions on State-of-the-art in Science and Engineering*, 82, 187-215.
35. Olgun U., Chen C.C., Volakis J. L., 2011. Investigation of rectenna array configurations for enhanced RF power harvesting, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter*, 10 (2), 262–265.
36. Van Breussegem T. ve Steyaert M., 2013. CMOS Integrated Capacitive DC–DC Converters, 39 – 64, *Analog Circuits and Signal Processing*, Springer (Science+Business Media New York)
37. Sari F ve Uzun Y., 2019. A Comparative Study:Voltage Multipliers For Energy Harvesting System, *Commun.Fac.Sci.Univ.Ank.Series A2-A3*, 61,1, 12-23.
38. Semple J., Georgiadou D., Wyatt-Moon G., Anthopoulos T., 2017. Flexible diodes for radio frequency (RF) electronics: a materials perspective. *Semiconductor Science and Technology*, 32,12, 123002.
39. URL-8 < <https://www.snapeda.com/parts/HSMS-2852-BLKG/Avago/view-part/> >, Erişim tarihi: 15.04.2020.
40. Zhou, Y., Froppier, B., Razban, T., 2012. Schottky diode rectifier for power harvesting application, 2012 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA), 429-432.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Aziz Burak YALÇIN

Adres : Ankara

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans :Ankara Üniversitesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü,
1997-2001

Yüksek Lisans :Aksaray Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Anabilim Dalı, 2019-2021

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Milli Savunma Bakanlığı (2007-2012)
2. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı (2012-)

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. Yalçın, A. B. and Sari F., 2021. Efficiency Analysis For Triple Band Rf Energy Harvesting, Aksaray University Journal of Science and Engineering, 5,1, 36-45.