



**RADYO FREKANSLI İŞARETLERDEN ENERJİ HASADI İÇİN VİLLARD  
GERİLİM KATLAYICI DEVRE TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**Bahanur GÜLCAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2020**

Bahanur GÜLCAN tarafından hazırlanan “RADYO FREKANSLI İŞARETLERDEN ENERJİ HASADI İÇİN VİLLARD GERİLİM KATLAYICI DEVRE TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. M. Timur AYDEMİR

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

**Başkan:** Doç. Dr. H. Murat ÜNVER

Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi

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

**Üye:** Doç. Dr. Bünyamin TAMYÜREK

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Tez Savunma Tarihi: 14/01/2020

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

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
  - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
  - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
  - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
  - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Bahanur GÜLCAN

14/01/2020

# RADYO FREKANSLI İŞARETLERDEN ENERJİ HASADI İÇİN VİLLARD GERİLİM KATLAYICI DEVRE TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Bahanur GÜLCAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2020

## ÖZET

Geleneksel enerji üretim yöntemlerinin kaynaklarının azalması ve enerji ihtiyacının her geçen sürede artması sebebiyle, alternatif enerji kaynaklarının kullanımına oluşan talep her gün artmakta ve bu kaynakların verimli şekilde kullanılması önem kazanmaktadır. Güneş enerjisi, rüzgar gücü enerjisi, yel değirmenleri, su değirmenleri uzun zamandır enerji üretiminde alternatif kaynak olarak kullanılmaktadır. Bu kaynakların en önemli özelliği ise kısa vadede tükenmez oluşlarından kaynaklanmaktadır. Ayrıca fosil yakıt kullanılan üretim tesislerine kıyasla çevreye karşı yüksek duyarlı olmalarıyla beraber çevreci bir yapılanma imkanı sağlamaktadır. Çalışabilmesi için ihtiyaç duyduğu enerjiyi kendi üreten, kendi üretmese bile enerji kaynağını yanında bulunduran mobiliteye sahip elektrikli cihazlara talep her geçen gün artmaktadır. Elektronik cihazlar mevcut durumda ihtiyaç duydukları enerjiyi kendilerine entegre halde bulunan bataryalardan sağlamaktadır. Ancak mevcut teknolojik koşullar sebebiyle bataryaların uzun ömürlü olmadığı görülmektedir. Ömürleri sınırları olan bataryaların şarj edilerek kullanılması gerekmekte, kimi cihaz için bu şarj süresi içerisinde cihaz kullanılamamaktadır. Söz konusu problemi ortadan kaldırmak için aktif olarak enerji üretimi yapabilecek teknolojilerin geliştirilme ihtiyacı kaçınılmazdır. Kullanılan elektrikli cihazın bulunduğu ortamdaki alternatif enerji kaynaklarını elektrik enerjisine çevirme fikri ile aktif olarak enerji sağlamak mümkün olmakla birlikte, enerji seviyesinin regüle edilmesiyle bataryaların şarj edilmesi de mümkün olmaktadır. Bu çalışma kapsamında cihazın bulunduğu ortamda fazlaca bulunan radyo frekanslarını Villard Gerilim Katlayıcı devre ile Doğru Akıma (DA) çevirerek depolamak ve daha sonra enerji gerektiğinde depolanan enerjiden kullanmak amaçlanmaktadır.

Bilim Kodu : 90503

Anahtar Kelimeler : Elektrik, Enerji hasadı, Mikro enerji hasadı, Radyo frekansı

Sayfa Adedi : 59

Danışman : Prof. Dr. Mehmet Timur AYDEMİR

VILLARD VOLTAGE MULTIPLIER CIRCUIT DESIGN AND IMPLEMENTATION  
FOR ENERGY HARVESTING FROM RADIO FREQUENCY SIGNALS

(M. Sc. Thesis)

Bahanur GÜLCAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2020

ABSTRACT

As the sources of traditional energy production methods decrease and the energy demand increases with each passing time, the demand for the use of alternative energy sources increases day by day and it becomes important to use these resources efficiently. Solar energy, wind power energy, “wind mills, “water mills” have been used as alternative resources in energy production. The most important feature of these alternative resources is that they are inexhaustible in the short term. Together with being environmental friendly compared to production facilities using fossil fuels, these alternative resources provide an environment-friendly structure. The demand for electrical devices which produce its own energy to operate or which keep its own energy resources is increasing day by day. Electronic devices provide the energy they need from the batteries integrated to them. However, due to the current technological conditions, the batteries are not long lasting. The limited lifetime batteries has to be charged, some of the devices could not be used while battery charging. In order to overcome this problem, there is an inevitable need to develop technologies that can actively produce energy. With the idea of converting alternative energy sources into electrical energy in the environment of the used electrical device it is possible to provide energy actively, it is also possible to charge the batteries by regulating the energy level. In this study, it is aimed to store the excess radio frequencies in the environment where the device is located by converting them to the Direct Current (DC) with Villard Voltage Doubler Circuit and then use the energy from the stored energy when necessary.

Science Code : 90503

Key Words : Electricity, Energy harvesting, Micro energy harvesting, Radio frequency

Page Number : 59

Supervisor : Prof. Dr. Mehmet Timur AYDEMİR

## TEŞEKKÜR

Bu alıőmanın gerçekleőtirilmesinde, yüksek lisans boyunca değerli bilgilerini benimle paylaőan, bilgi ve tecrübeleri ile bana sürekli destek olan, kullandığı her kelimenin hayatıma kattığı önemi asla unutmayaağım saygıdeğer danışman hocam; Prof. Dr. Mehmet Timur AYDEMİR'e sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunuyorum.

Çalıőmalarım boyunca benden bir an olsun yardımlarımı esirgemeyen, çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan değerli aileme sonsuz teőekkürlerimi sunarım.



**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. MİKRO ENERJİ HASADI .....	7
2.1. Isıl Enerji Hasadı.....	8
2.2. Titreşimden Enerji Hasadı.....	9
2.2.1 Piezoelektrik enerji hasadı.....	10
2.2.2. Elektromanyetik enerji hasadı.....	10
2.2.3. Elektrostatik enerji hasadı.....	11
2.3. Radyo Frekansından Enerji Hasadı.....	12
3. RADYO FREKANS SİNYALLERDEN ENERJİ HASADI.....	15
3.1. RF Enerji Kaynakları ve Çalışma Frekansları .....	17
3.2. Radyo Frekansı-Doğru Akım Dönüştürücü Devresi .....	19
3.2.1. Villard gerilim katlayıcı.....	19
3.2.2. Dickson gerilim katlayıcı.....	21
3.2.3. Greinacher gerilim katlayıcı.....	22



4. GERİLİM KATLAYICILARIN KARŞILAŞTIRILMASI VE KAT SAYISININ BELİRLENMESİ .....	27
4.1. Gerilim Katlayıcı Çeşitlerinin Karşılaştırılması.....	27
4.2. Gerilim Katlayıcının Kat Sayısının Belirlenmesi.....	33
5. DEVRE ELEMANLARININ SEÇİMİ, TASARIM, BENZETİM VE UYGULAMA .....	35
5.1. Devre Elemanlarının Seçimi.....	35
5.1.1. Diyot seçimi.....	35
5.1.2. Kapasitör seçimi.....	37
5.2. Empedans Uyumlaştırma.....	38
5.3. RF-DA Dönüştürücünün LTSpice Benzetimi.....	39
5.4. Devrenin Gerçeklenmesi ve Ölçümler.....	43
5.5. Benzetim Devresi ile Prototip Devrenin Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	51
6. SONUÇ.....	55
KAYNAKLAR.....	57
ÖZGEÇMİŞ .....	59

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 1.1. Düşük güçle çalışan elektronik cihazlar ve güç gereksinimleri.....	2
Çizelge 1.2. Enerji hasat teknolojilerine güç sağlayan kaynaklar ve güç miktarları.....	3
Çizelge 1.3. Alternatif enerji kaynaklarının avantaj ve dezavantajları .....	4
Çizelge 2.1. Titreşim tabanlı enerji dönüşüm metotlarının avantajları ve dezavantajları .....	12
Çizelge 3.1. Radyo sinyali kaynakları ve çalışma frekansları .....	17
Çizelge 3.2. Gerilim katlayıcıların karşılaştırılması.....	24
Çizelge 4.1. LTSpice uygulamasından elde edilen verilerin karşılaştırılması.....	32
Çizelge 5.1. Diyotun spice parametreleri .....	36
Çizelge 5.2. Çıkış değerlerinin karşılaştırılması.....	43
Çizelge 5.3. Prototip devre çıkış gerilimleri.....	48
Çizelge 5.4. Ölçülen çıkış gerilimleri.....	51

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Enerji hasadı sistemi.....	7
Şekil 2.2. Mikro enerji hasadı çeşitleri .....	7
Şekil 2.3. Tek ucu sabit ankastre giriş yapısı.....	11
Şekil 2.4. Radyo frekansından enerji hasadının temel şeması.....	13
Şekil 3.1. Radyo frekansından enerji hasadının devre şeması.....	15
Şekil 3.2. Radyo sinyali kaynaklarının güç yoğunlukları .....	18
Şekil 3.3. Tek ve N katlı Villard gerilim katlayıcı devre şeması.....	20
Şekil 3.4. Tek ve N katlı Dickson gerilim katlayıcı devre şeması.....	21
Şekil 3.5. Tek ve N katlı Greinacher gerilim katlayıcı devre şeması .....	23
Şekil 4.1. Beş katlı Villard gerilim katlayıcının LTSpice benzetimi.....	28
Şekil 4.2. Beş katlı Villard gerilim katlayıcının ölçüm sonucu grafikleri (zaman-gerilim).....	28
Şekil 4.3. D1 ve D2 diyotları üzerinden geçen akım (zaman-akım).....	29
Şekil 4.4. Beş katlı Dickson gerilim katlayıcının LTSpice benzetimi.....	29
Şekil 4.5. Beş katlı Dickson gerilim katlayıcının ölçüm sonucu grafikleri (zaman-gerilim).....	30
Şekil 4.6. D1 ve D2 diyotları üzerinden geçen akım (zaman-akım).....	30
Şekil 4.7. İki katlı Greinacher gerilim katlayıcının LTSpice benzetimi .....	31
Şekil 4.8. İki katlı Greinacher gerilim katlayıcının ölçüm sonucu grafikleri (zaman-gerilim).....	31
Şekil 4.9. D1 ve D2 diyotları üzerinden geçen akım (zaman-akım).....	32
Şekil 4.10. Villard gerilim katlayıcının kat sayısı artışına karşı verdiği çıkış gerilimleri (kat sayısı-gerilim).....	34
Şekil 5.1. Diyotun devre modeli .....	36
Şekil 5.2. Kondansatörün frekans-ESR grafiği.....	38

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.3. AppCAD arayüzünde uyumlandırma için yapılan hesaplama ekranı.....	39
Şekil 5.4. Yedi katlı Villard gerilim katlayıcının LTSpice benzetimi .....	40
Şekil 5.5. Villard gerilim katlayıcının çıkış gerilimi grafiği (0 dBm) (zaman-gerilim).....	40
Şekil 5.6. Villard gerilim katlayıcının kısa zaman aralığında çıkış gerilimi grafiği (0 dBm) (zaman-gerilim).....	41
Şekil 5.7. Villard gerilim katlayıcının çıkış gerilimi grafiği (4 dBm) (zaman-gerilim).....	41
Şekil 5.8. Villard gerilim katlayıcının kısa zaman aralığında çıkış gerilimi grafiği (4 dBm) (zaman-gerilim).....	42
Şekil 5.9. Villard gerilim katlayıcının çıkış gerilimi grafiği (10 dBm) (zaman-gerilim).....	42
Şekil 5.10. Villard gerilim katlayıcının kısa zaman aralığında çıkış gerilimi grafiği (10 dBm) (zaman-gerilim).....	43
Şekil 5.11. $Z_0 = 50 \Omega$ , 0 dBm ölçümleri (kat sayısı-gerilim).....	46
Şekil 5.12. $Z_0 = 50 \Omega$ , 4 dBm ölçümleri (kat sayısı-gerilim).....	47
Şekil 5.13. $Z_0 = 50 \Omega$ , 10 dBm ölçümleri (kat sayısı-gerilim).....	48
Şekil 5.14. 100 MHz'de 0 dBm, 4 dBm ve 10 dBm'in karşılaştırılması (kat sayısı-gerilim).....	49
Şekil 5.15. 200 MHz'de 0 dBm, 4 dBm ve 10 dBm'in karşılaştırılması (kat sayısı-gerilim).....	49
Şekil 5.16. 300 MHz'de 0 dBm, 4 dBm ve 10 dBm'in karşılaştırılması (kat sayısı-gerilim).....	50
Şekil 5.17. 400 MHz'de 0 dBm, 4 dBm ve 10 dBm'in karşılaştırılması (kat sayısı-gerilim).....	51
Şekil 5.18. Çıkış gerilimlerinin karşılaştırılması .....	52
Şekil 5.19. Çıkış gerilimlerinin oranlanması .....	52

**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 5.1. Prototip devre .....	44
Resim 5.2. Sinyal jeneratörü .....	44
Resim 5.3. Osiloskop .....	45
Resim 5.4. Prototip devre üzerinden ölçüm yapılması .....	45



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>Hz</b>	Hertz
<b>kHz</b>	Kilohertz
<b>MHz</b>	Megahertz
<b>GHz</b>	Gigahertz
<b>mW</b>	Miliwatt
<b>cm<sup>2</sup></b>	Santimetrekare
<b>m</b>	Metre
<b>s<sup>2</sup></b>	Saniyekare
<b>μW</b>	Mikrowatt
<b>nW</b>	Nanowatt
<b>W</b>	Watt
<b>C</b>	Santigrat
<b>°</b>	Derece
<b>V</b>	Volt
<b>mJ</b>	Milijoule
<b>cm<sup>3</sup></b>	Santimetreküp
<b>mΩ</b>	Miliohm
<b>Ω</b>	Ohm
<b>kΩ</b>	Kiloohm
<b>pF</b>	Pikofarad
<b>dBm</b>	Bir miliwatta göre desibel
<b>km</b>	Kilometre

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>3G</b>	Üçüncü Nesil
<b>AA</b>	Alternatif Akım
<b>DA</b>	Doğru Akım
<b>dB</b>	Desibel
<b>ESR</b>	Eşdeğer Seri Direnç
<b>FM</b>	Frekans Modülasyonu
<b>GSM</b>	Mobil İletişim İçin Küresel Sistem
<b>MEMS</b>	Mikro Elektronik Mekanik Sistemler
<b>MP3</b>	Film Uzmanlar Grubu Ses Katmanı III
<b>RF</b>	Radyo Frekansı
<b>RFID</b>	Radyo Frekansı Kimliği
<b>TV/DTV</b>	Televizyon/Dijital Televizyon
<b>UHF</b>	Ultra Yüksek Frekans
<b>VHF</b>	Çok Yüksek Frekans
<b>Wi-Fi</b>	Kablosuz Bağlantı Alanı
<b>Wi-max</b>	Dünya Çapında Birlikte İşleyen Mikrodalga Erişimi

## 1. GİRİŞ

Enerji hasadı, her türlü enerjinin üretimi için kullanılabilir bir terimdir. Örneğin termik santraller, hidroelektrik santraller gibi yüksek güç üretiminin olduğu tesislerde enerji üretimi için de bu kavram kullanılabilir. Ancak bu tür makro kaynaklardan enerji hasadının yanında mikro kaynaklardan da enerji hasadı yapılması mümkündür.

Mikro enerji hasadı etrafta doğal yollardan var olan enerjinin yakalanması, elektronik cihazlar için kullanılabilir bir enerjiye dönüştürülmesi ve daha sonra kullanılmak üzere saklanması işlemidir. Bu işlem, küçük güçlü elektronik araçlara sınırsız bir yaşam süresi sağlamaktadır [1].

Hayatımızın her alanında kullandığımız elektronik cihazların ve kablosuz sensör ağlarının teknolojinin gelişimi ile beraber çalışması için ihtiyaç duyduğu enerji azalmaktadır. Bu azalmanın aksine taşınabilir elektronik cihazlara olan talep her geçen gün artmaktadır. Bahse konu cihazların büyük çoğunluğunun ortak yanı ise elektrik enerjisi için kendilerine entegre bataryaları kullanmalarıdır. Ancak bu ortak nokta beraberinde ortak bir problemi de getirmektedir ki bu da bataryalarının ömrünün sınırlı olması ve bataryanın elektrik enerjisini sağlayamadığı noktada insan müdahalesi ile değiştirilmeye veya yeniden şarj edilmeye ihtiyaç duymasıdır. Bataryaların ömrünü uzatmaya yönelik çalışmaların yanında cihazın bulunduğu ortamda var olan alternatif enerji kaynakları aracılığıyla elektrik enerjisi üreterek cihaza doğrudan enerji sağlama veya elektrik enerji seviyesinin regüle edilerek bataryanın şarj edilmesine yönelik üretim teknikleri üzerinde araştırmalara başlanmıştır. Bu çalışmalar ile cihazların bağımlı olduğu harici güç kaynaklarından bağımsız hale gelmesi ve batarya değişimine duyulan ihtiyacın ortadan kalkması amaçlanmaktadır [2].

Mikro enerji hasadı ile üretilecek elektrik enerjisi düşük seviyelerde olacağından, üretilen bu enerjinin düşük enerji ile çalışan cihazlarda kullanılması sürdürülebilir bir cihaz kullanımına imkan verecektir. Çizelge 1.1 düşük güç seviyelerinde operasyon imkanı sağlayan cihazları ve yaklaşık olarak ihtiyaç duydukları enerji miktarlarını göstermektedir. Mikro enerji hasadında yapılacak çalışmaların bu cihazlara yönelik olması kısa vadede olumlu sonuçları sağlayacaktır.



Çizelge 1.1. Düşük güçle çalışan elektronik cihazlar ve güç gereksinimleri [2]

Elektronik Sistem	Güç Gereksinimi
Bekleme Konumu	10 nW
32 kHz kuvars osilatör	100 nW
Elektronik saat, hesap makinesi	1 $\mu$ W
Radyo frekans ile tanımlama (RFID) etiketi	10 $\mu$ W
İşitme cihazı	100 $\mu$ W
Minyatür FM Alıcı	1 mW
Bluetooth alıcı-verici	10 mW
MP3	100 mW
GSM	1 W
Diz üstü bilgisayar mikroişlemci, bisiklet ampulü	10 W
Masa üstü bilgisayar mikroişlemci	100 W

Teknolojinin gelişimi ile beraber kullandığımız kablosuz sensör ağları ve çalışması için ihtiyacı olan enerjiyle beraber boyutları da küçülen elektronik cihazlar hayatımızın her alanında yanımızda olmaya başladılar. Yakın gelecekte de bu cihazların kullanım alanları ve cihazlardan taleplerimiz artmaya devam edecektir.

Mikro enerji hasadı, hesap makinesi, saat, bluetooth kulaklıklar gibi mevcut olarak kullanılan sistemlerin yanında tıbbi uygulamalar, uzaktan algılama gibi yeni ve gelişmeye açık alanlarda da kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde kullanımı gittikçe artan kablosuz enerji ağları, mikro enerji hasadına en fazla gereksinim duyan uygulamalar arasındadır [3].

Çizelge 1.2 alternatif enerji kaynaklarından elde edilebilecek güç miktarlarını göstermektedir.

Çizelge 1.2. Enerji hasat teknolojilerine güç sağlayan kaynaklar ve güç miktarları [3]

Enerji Kaynağı	Enerji Kaynağı Ortamı	Kaynak Özellikleri	Hasat Edilen Güç
Fotovoltaik	Ofis	0,1 mW/cm <sup>2</sup>	10µW/cm <sup>2</sup>
	Dış Ortam	100 mW/cm <sup>2</sup>	10mW/cm <sup>2</sup>
Titreşim/Hareket	İnsan	0,5 m @ 1 Hz 1 m/s <sup>2</sup> @ 50 Hz	4 µW/cm <sup>2</sup>
	Endüstri	1 m @ 5 Hz 10 m/s <sup>2</sup> @ 1 kHz	100µW/cm <sup>2</sup>
Termal Enerji	İnsan	20mW/cm <sup>2</sup>	25 µW/cm <sup>2</sup>
	Endüstri	100 mW/cm <sup>2</sup>	1-10 mW/cm <sup>2</sup>
RF	GSM 900MHz	0,03-0,3 µW/cm <sup>2</sup>	0,1uW/cm <sup>2</sup>
	1800MHz	0,01-0,1 µW/cm <sup>2</sup>	
	WiFi 2.4GHz	0,001-0,01 mW/cm <sup>2</sup>	0,01 µW/cm <sup>2</sup>

Enerji hasadında kaynak olarak kullanılabilen güneş, rüzgar, ısı, radyo frekans radyasyonu ve mekanik titreşimler çevremizde bulunan kaynakların başlıcaları olarak sıralanabilir. Çizelge 1.3'te her bir kaynağın avantaj ve dezavantajları belirtilmiştir [2].

Çizelge 1.3. Alternatif enerji kaynaklarının avantaj ve dezavantajları

Enerji Kaynağı	Avantajlar	Dezavantajlar
Güneş Enerjisi	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Bolca bulunur,</li> <li>-Maliyeti yoktur,</li> <li>-Elektronik cihazlar ile yüksek uyumluluğa sahiptir,</li> <li>-Geniş dalga boyu aralıklarında yüksek verimliliğe sahiptir,</li> <li>-Hareketsiz parçalardan oluşur,</li> <li>-Uzun ömürlüdür.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Yerleştirmede kısıtlamaları bulunur,</li> <li>-Üretim birimi ve güneş arasında engel olmamalıdır,</li> <li>-Üretim birimi temiz olmalıdır,</li> <li>-Güneşlenme süresi dışında üretim yapılamaz,</li> <li>-Küçük ölçekli uygulamalar için uygun değildir,</li> <li>-Güç çıkışı direkt yüzey alanına bağlıdır,</li> <li>-Enerji, enlem ve atmosfere bağlıdır.</li> </ul>
Rüzgar Enerjisi	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Doğada bol bulunur,</li> <li>-Maliyeti yoktur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-küçük rüzgâr türbinlerinin verimleri düşüktür,</li> <li>-Rulmanlı uygulamaların sürtünmeden dolayı kayıpları fazladır,</li> <li>-Hareketli parça sayısı fazladır,</li> <li>-Karmaşık bir yapıya sahiptir,</li> <li>-Kolaylıkla küçük yapıda üretilmez.</li> </ul>
Isıl Enerji	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Hareketsiz parçalardan oluşur,</li> <li>-Basit bir yapıya sahiptir,</li> <li>-Küçük boyutlarda tasarlanabilir.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Kaynak ve üretim biriminin ısıl direncinden etkilenir,</li> <li>-Enerji dönüşüm verimliliği Carnot verimliliği ile sınırlıdır,</li> <li>-Küçük boyutlu uygulamalarda sıcaklık farkı az miktarlarda olduğundan yüksek verimli üretim olmamaktadır,</li> <li>-Uygulama maliyeti yüksektir.</li> </ul>
Radyo Frekansı Radyasyonu	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Güç seviyesi kontrol edilebilir,</li> <li>-Güç seviyesi tahmin edilebilir,</li> <li>-Kaynak ve üretim arası mesafe uzun olabilir,</li> <li>-Hareketsiz parçalardan oluşur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Özel bir radyasyon kaynağı olmadan, çevre seviyeleri çok düşük kalır ve geniş bir spektrumda yayılır,</li> <li>-Kaynakla üretim birimi arasındaki mesafe arttıkça alan gücü düşer,</li> <li>-Ultra yüksek frekanslarda yüksek güç kaybı olmaktadır,</li> <li>-Biyolojik sistemlere olumsuz etkilerinden dolayı yayım için güç limiti vardır.</li> </ul>
Mekanik Titreşimler	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Doğada bolca bulunur,</li> <li>-İnsan kaynaklı hasat uygulamalarında çıkış gücü artma eğilimi gösterir.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Genliğe ve frekansa göre değişir,</li> <li>-Titreşim olmadığı zamanlarda güç üretiminde kesintiler olur,</li> <li>-Boyut küçüldükçe, düşük titreşim frekansında hasat zorlaşır.</li> </ul>

Bu tezin amacı mikro enerji hasadı çeşitlerinin incelenmesini, bunlar arasından radyo frekansından enerji hasadının detaylı araştırılmasını, radyo frekansından enerji hasat etmek için önce benzetim programı ile benzetim yapılmasını ve devrenin uygun devre elemanları ile gerçekleştirilerek bu prototip devre ile havada serbest yayını yapan radyo frekansından enerji hasat edilmesini kapsamaktadır. Buradan yola çıkarak düşük güç tüketimi ile çalışan elektronik cihazların sürekli olarak kullanımının veya bataryalarının şarj edilmesinin mümkün olduğunu göstermekte bu çalışmanın dolaylı amacı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Çalışmanın ikinci bölümünde mikro enerji hasadı çeşitleri anlatılarak, üçüncü bölümde bu çeşitlerden olan radyo frekansından enerji hasadı irdelenmiştir. Dördüncü bölümde mikro enerji hasadında kullanılacak gerilim katlayıcı devrenin ve kat sayısının belirlenmesine yönelik çalışma yapılmıştır. Dördüncü bölümden elde edilen veriler ışığında beşinci bölümde devre önce benzetim programında kurularak ölçümler yapıldı, ardından uygun devre elemanları seçilerek devre gerçekleştirildi. Prototip devreden elde edilen sonuçlar benzetim programı sonuçları ile karşılaştırıldıktan sonra son bölümde sonuçlar, öneriler ve tartışma konuları verildi.



## 2. MİKRO ENERJİ HASADI

Çalışmanın bu bölümünde mikro enerji hasadı çeşitleri, bunların enerji hasadı için kaynak olarak kullandığı çevresel etmenler, bu yöntemlerle hasat edilen enerjinin hangi alanlarda kullanımının daha elverişli olduğu hakkında bilgi verilmektedir.

Enerji hasat sistemi çevreden aldıkları enerjisi hasat edip daha sonra kullanmak üzere doğru şekilde depolanmasını sağlar. Şekil 2.1’de görüldüğü üzere üç bölümden oluşmaktadır. Enerji kaynağından alıp elektrik enerjisine çeviren mikro enerji üreteçleri, mikro enerjiyi yükseltecek gerilim yükseltici ve daha sonra kullanmak için depoladıkları enerji depolama üniteleri bu üç bölümü oluşturmaktadır.



Şekil 2.1. Enerji hasadı sistemi

Mikro enerji hasat sistemleri Şekil 2.2’de gösterildiği gibi “Radyo Frekanslı Dalgalardan Enerji Hasadı”, “Titreşim Kaynağından Enerji Hasadı” ve “Isı Kaynağından Enerji Hasadı” gibi üç ana gruba ayrılabilir. Titreşim kaynaklı enerji hasadı da “Piezoelektrik”, “Elektromanyetik” ve “Elektrostatik” temelinde çalışabilir.



Şekil 2.2. Mikro enerji hasadı çeşitleri

Bölümün devamında mikro enerji hasadı çeşitleri olan ısı enerji hasadı, titreşim kaynaklı enerji hasadı ve radyo frekansından enerji hasadı anlatılmaktadır.

## 2.1. Isı Enerji Hasadı

Temel termodinamik yasaları iş yapılan noktada oluşan sıcaklık farkının bir güç israfı ile bağlantılı olduğunu belirtmektedir. İş yapan objelerin çevresi ile arasında sıcaklık değişimi olmaktadır ve sıcak olarak hissedilen yüzeyden elektrik üretimi yapılabilir. Dolayısıyla çalışan birimin ne olduğu fark etmeksizin çalışma esnasında ortaya ısı enerjisi çıkaran sistemler termal enerjiden elektrik enerjisi üretimi uygulamaları için ideal ortam sağlamaktadır [3].

Sıcaklık farklarının ve ısı akışının olduğu ortamlarda termal enerjinin elektrik enerjisine dönüşerek üretim yapılma potansiyeli vardır. Sıcaklık farkı enerjinin verimli şekilde dönüşümü için imkan sağlarken, ısı akışının var olması ise gücü sağlar. Uzak kablosuz sensörler gibi düşük güç gereksinimi olan sistemlerde termoelektrik enerji hasadı ile bu sistemlere elektrik enerjisini sağlamak mümkündür. Ayrıca bu sistemlerin güç gereksinimleri gelişen teknolojiler ile azalırken termoelektrik enerjinin bu sistemlere entegre edilerek yaygınlaşması yakın gelecekte daha çok karşılaşılabilecek uygulamalardan olacaktır.

Doğal ve insan yapımı ortamlarda sıcaklık gradyanları ve ısı akışı her zaman mevcuttur ve çevrede oluşan ısı kaynaklı enerjiyi hasat etme fırsatı sunar. Bu başlık altında en çekici çalışmalar, tıbbi cihazlara veya implantlara, kişisel kablosuz ağlara veya diğer güç tüketici cihazlarına güç sağlayabilecek vücut ısısından elektrik üretme alanında yapılmaktadır [4].

Termoelektrik hasat yapan cihazlar Seebeck etkisinden faydalanarak enerji üretimi yaparlar. Seebeck etkisi ise temel olarak 2 farklı metal veya yarı iletken arasındaki sıcaklık farkından dolayı bir gerilim oluşması olarak tanımlanabilir. Termal olarak paralel, elektriksel olarak seri bağlanan termoelektrik piller ile termoelektrik jeneratör yapısı oluşturulur. Termoelektrik jeneratörler farklı çıkış gerilimlerine sahip olsa da yakın geçmişte tasarlanan ve üretimi yapılan jeneratörlerde bu değer 0,7 Volt olduğu görülmektedir. Çıkış gerilimini başlıca etkileyen faktörler ise jeneratörün boyutu ve bulunduğu ortamın sıcaklığıdır. Termoelektrik enerjinin insan üzerinde

uygulamaları da olmakla beraber buradaki temel değişken ise kişinin metabolik aktivitesidir [3].

Yarı iletkenler fiziği kullanılarak termoelektrik cihazlar sıcaklık derecelerini başka herhangi bir cihaz kullanmadan direkt elektrik enerjisine çevirebilir. Günümüzde standart olarak kullanılan motorlara kıyasla termoelektrik araçlar yüksek verimde değildir. Verimin yükselmesi için mekanik çözümlerde ek parçalara ihtiyaç duyulur.

Sıcak bir yüzey ve kaliteli bir ısı emici yapı, termoelektrik enerji hasadı için temel iki ihtiyaçtır. Termoelektrik elemanların standart maddesi "bizmut telluride"dir. Bu maddenin maksimum çalışma sıcaklığı 175 C°'dir. Termoelektrik maddesinin bir ucundan diğer ucuna geçen sıcaklık miktarı mutlaka maksimum değerden düşük olmalıdır. Bu yapılarda maksimum güç elde etmek için iyi bir ısı emicisi tasarımının varlığı büyük önem taşır [3].

## **2.2. Titreşimden Enerji Hasadı**

Titreşimden enerji hasadı, farklı etkenler sebebiyle kinetik enerji yayabilen sistemlerin yaydığı enerjiiyi giriş kaynağı olarak kullanarak miliwatt seviyelerinde güç üretimi yapmayı kapsamaktadır. Bu sistemlerde kinetik enerji çoğunlukla salınım yapan bir ağırlık tarafından üretilir. Düzenli bir salınımın olması ise hasadın sürekli ve verimli olması için büyük önem taşımaktadır. Titreşimsel enerji hasadına uygun alanlar, araç geçişi olan köprüler, yüksek titreşime sebep olacak motor vb. cihazların çalıştığı fabrikalar ve rüzgar sebebi ile salınıma açık olan geçitler olarak sıralanabilir.

Titreşimden elde edilecek enerji özellikle mobil uygulamalar için cazip görülmekle birlikte hız değişikliği ve gürültü, bu uygulamalarda verimi olumsuz etkilediği için kullanımı zorlaştırmaktadır [5].

Titreşen veya hareket eden araçların sahip olduğu mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi genel olarak üç farklı mekanizma ile gerçekleştirilebilir: elektromanyetik, elektrostatik ve piezoelektrik [6].



### 2.2.1 Piezoelektrik enerji hasadı

Piezoelektrik malzemeler, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine direkt dönüştürebilmesi, enerji dönüşümü için harici bir güç kaynağı gerektirmemesi, makro ve mikro boyutlarda üretilebilmesi, belirli koşullar altında sınırsız bir ömre sahip olması ve yüksek güç yoğunluğuna sahip olması gibi özellikleri sayesinde, günümüzde özellikle kendi gücünü sağlayan elektronik cihazların tasarımında kullanılmaktadır.

Piezoelektrik enerji hasadı sistemleri iki örtülü giriş yapısında üretilmektedir. Bu yapıda genellikle iki piezoelektrik katmanın arasına elastik bir katman sıkıştırılması ile kurulmaktadır. Enerji hasadı için bu noktada gerek şartlar enerji hasadı yapacak sistemin titreşen ana yapı üzerine entegre edilmesi ve ana yapının tahrik frekansının hasat sisteminin doğal frekansıyla eşleşmesidir. Bu şartların sağlanması ile beraber enerji hasadı mümkün olmaktadır [2].

Piezoelektrik malzemelere örnek olarak verilebilecek kuvarsın yardımı ile titreşim kaynağının bulunduğu yerlerde enerji hasadı uygulamaları yapılabilir. Arazide bulunan bir askerin telsiz pilinin bu tarz uygulamalarla şarj edilebildiği yapılan çalışmalarla görülmüştür [7].

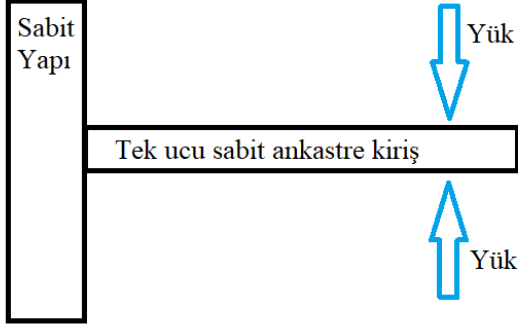
Parmak hareketleri, adımlar, nefes alma ve kan basıncı gibi günlük hareketler Piezoelektrik sistemler ile elektrik enerjisine dönüştürülürler [8].

### 2.2.2. Elektromanyetik enerji hasadı

Elektromanyetik enerji hasadı elektromanyetik indüksiyon ilkesine dayanmaktadır. Elektromanyetik indüksiyon, bir iletken çevresindeki manyetik alanın değişimi sonucu iletkende elektrik akımı oluşması olarak tanımlanır. Mıknatıs ve bobin arasındaki bağıl hareket veya manyetik alan değişimi sonucunda elektrik üretilir. Elektromanyetik indüksiyon ile enerji hasadı sabit mıknatıslar, bir bobin ve bir ankastre giriş kullanılarak gerçekleştirilebilir [9].

Yukarıda bahsedilen ankastre giriş kavramı inşaat ve mimarlık alanında kullanılan bir kavram olmasına karşın elektromanyetik enerji hasadını açıklamaya çalışırken yardımcı

olarak kullanılabilen bir yapıyı ifade etmektedir. Tek ucu sabit bir yapıya bağlanan ve diğer ucun yük altında hareketine imkan veren bu yapı Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3. Tek ucu sabit ankastre kiriş yapısı

Elektromanyetik enerji hasadında ise manyetik yüklerin kirişi hareket ettirmesi ile enerji hasadı mümkün olmaktadır.

### 2.2.3. Elektrostatik enerji hasadı

Elektrostatik enerji hasadı, değişken kondansatörlerin kapasitanslarındaki değişim sonucu sağlanır. Değişken yüklü kondansatörlerin iki paralel metal tabakasının arasındaki bağımlı hareket vasıtasıyla mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Enerji hasadı metal tabakaların arasındaki elektrostatik kuvvete karşı yapılan iş ile meydana gelir [10].

Piezoelektrik enerji hasadı yöntemi ile elektromanyetik ve elektrostatik enerji hasadına kıyasla yüksek enerji yoğunluğunda hasat yapıldığı gözlemlenmiştir. Piezoelektrik malzemelerin esnek bir yapıda kullanılabilmesi ve aynı güç yoğunluğunda elektromanyetik hasat yöntemine göre küçük boyutlu devre ile sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir. Bununla beraber elektromanyetik hasat yöntemi yüksek frekanslarda tercih edilirken piezoelektrik sistemlerin daha düşük frekanslarda da enerji üretimine imkan vermektedir [11-13].

Çizelge 2.1'de piezoelektrik, elektrostatik ve elektromanyetik enerji hasadı metodlarının birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları ile teorik ve maksimum enerji yoğunluğu değerleri gösterilmektedir.

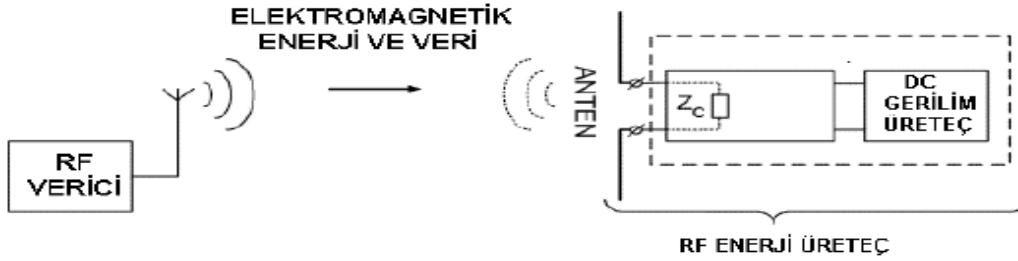
Çizelge 2.1. Titreşim tabanlı enerji dönüşüm metotlarının avantajları ve dezavantajları [2]

Metot	Avantajlar	Dezavantajlar
Piezoelektrik	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ayrı bir güç kaynağına ihtiyaç duymaz,</li> <li>- Yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir,</li> <li>- Mekanik duraklama yoktur,</li> <li>- Çıkış Gerilimi 2-10 V seviyelerindedir,</li> <li>- Küçük boyutlarda tasarlanabilir,</li> <li>- Elektromanyetik yöntemlere göre MEMS ile daha uyumludur,</li> <li>- Enerji Yoğunluğu; Maksimum: 35.4 mJ/cm<sup>3</sup> Teorik: 335 mJ/cm<sup>3</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Çıkış empedansının yüksek olması eğilimi verimi düşürebilir,</li> <li>- Kullanılan malzeme kaplin faktörünü değiştirmektedir,</li> <li>- Yüksek maliyetlidir,</li> <li>- Seramik yapıları malzemeler kırılabilir.</li> </ul>
Elektromanyetik	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ayrı bir güç kaynağına ihtiyaç duymaz,</li> <li>- Mekanik duraklama yoktur,</li> <li>- Sönümlenme oranı düşüktür,</li> <li>- Enerji Yoğunluğu; Maksimum: 24.8 mJ/cm<sup>3</sup> Teorik: 400 mJ/cm<sup>3</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Çıkış Gerilimi 0.1 V seviyelerindedir,</li> <li>- MEMS ile entegrasyonu zordur,</li> <li>- Küçük boyut ve düşük frekanslarda kullanışsızdır,</li> <li>- Üretim ve montaj aşaması oldukça kompleks.</li> </ul>
Elektrostatik	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diğer yöntemlere kıyasla MEMS ile kolay entegrasyon sağlanabilir,</li> <li>- Çıkış Gerilimi 2-10 V seviyelerindedir,</li> <li>- Kaplin faktörü yüksektir,</li> <li>- Küçük boyutlarda tasarlanabilir,</li> <li>- Enerji Yoğunluğu; Maksimum: 4 mJ/cm<sup>3</sup> Teorik: 44 mJ/cm<sup>3</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Ayrı bir güç kaynağına ihtiyaç duyar,</li> <li>- Mekanik duraklamaya ihtiyaç duyar,</li> <li>- Devre sistemi karmaşık yapıdadır.</li> </ul>

### 2.3. Radyo Frekansından Enerji Hasadı

Radyo frekanslı kaynaklardan enerji hasadında havada serbest olarak yayınım yapan elektromanyetik dalgaların enerjisinden yararlanılmaya çalışılır. Bu dalgalar radyo frekanslarında veya mikrodalga frekanslarında olabilir. Dalgaları yakalayabilmek için uygun boyutta antenlerin kullanılması gereklidir. Antenlerin yakaladığı dalgalar yüksek verimli doğrultucularla doğru gerilime çevrilir ve gerilimin genliği uygun bir düzeye çıkartılarak sistemi beslemekte veya bir bataryayı doldurmada kullanılır [14].

Şekil 2.4 radyo frekansından enerji hasadının temel olarak nasıl işlediğini ve hangi aşamalardan geçerek elektrik enerjisi üretildiğini göstermektedir.



Şekil 2.4. Radyo frekansından enerji hasadının temel şeması [1]

Güneş, titreşim ve rüzgar gibi alternatif potansiyel enerji hasadı yöntemlerinin yanında radyo frekanslarının toplanması ile üretim fikri de bir hasat türüdür. Radyo frekansından enerji hasadı, alıcı ve verici arasında iletim halinde olan sinyallerin ortamdan yakalanarak ya doğrudan düşük güç ile çalışan devreyi beslemek amacıyla veya daha sonra kullanılmak üzere bataryalar aracılığı ile saklanmasını amaçlamaktadır. Bu amacın gerçekleştirilmesine yönelik olarak kullanılan konsept, yayınım halindeki sinyali verimli şekilde toplayan bir anten ve toplanan RF sinyallerin DA gerilime dönüştüren bir devreyi kapsamaktadır. Antenin verimli çalışabilmesi anten empedansının ile enerji dönüşümünü yapacak devrenin empedansı ile olan ilişkisine bağlıdır. Bahse konu iki empedansın eşleşmemesi durumunda devrenin çalışması istenen frekans aralığındaki boş alandan gücün tamamı alınmaz. Empedansların eşleştirilmesi, antenin empedansı ile devre empedansının karmaşık konjugatı olduğu anlamına gelir [15].

Karmaşık konjugat; gerçek ve sanal kısımlardan oluşan  $x + iy$  karmaşık sayısının sanal kısmının işareti değiştirilerek bulunan  $x - iy$  karmaşık sayısını ifade etmektedir. Burada sayının büyüklüğü değişmez, polar kısmının işareti değişir.

Enerji üretiminde, üretim birimini kaynağını sürekli olarak beslemek sürdürülebilir bir elektrik kaynağı elde etmek açısından çok önemlidir. Aksi halde elektrik üretimi kesintiye uğrayacak ve o elektrik enerjisi ile çalışan cihazın kullanılabilirliği olumsuz yönde etkilenecektir. Çevremizde bulunan enerji kaynakları arasında en düşük enerji yoğunluğu olan kaynaklardan biri radyo frekansındaki elektromanyetik dalgalardır. Ancak, bu

dalgalar çok geniş bir alana yayılı olduklarından ve çok geniş bir frekans aralığında bulunabildiklerinden önemli bir kaynak oluşturmaktadır [16].

Sürdürülebilir enerji kaynağı açısından bakılırsa mikro enerji hasadı çeşitleri arasında radyo frekansları ile enerji üretimi tasarımcı açısından oldukça elverişlidir. Şehir merkezleri, radyo alıcı-verici istasyon çevreleri gibi radyo frekanslarının havada yoğun şekilde serbest dolaşımının söz konusu olduğu noktalarda enerji hasadı için gereken kaynağın oldukça fazla olduğu söylenebilir. Dolayısıyla böyle büyük miktarlardaki enerji kaynağının değerlendirilerek enerji üretilmesi büyük önem arz etmektedir. Ayrıca havada serbest dolaşan frekans çeşitliliği göz önüne alınırsa tasarım aşamasında farklı kaynaklar için farklı tasarımlar yapmak mümkün olacaktır. Bu nedenle radyo frekansından enerji hasadı konusu gelişmeye oldukça açık bir enerji üretim alternatifidir.

RF enerji hasadında üretilen gerilimlerin genlikleri düşük olduğundan, enerjiyi kullanılabilir hale getirmek için genliğin verimli bir biçimde yükseltilmesi gereklidir. Bu nedenle, depolanabilir DA sinyali elde etmek için dönüştürücü olarak gerilim katlayıcılar kullanılmaktadır. Gerilim katlayıcıların yaygın olarak kullanılan üç modeli bulunmaktadır: Villard, Dickson ve Greinacher tipi gerilim katlayıcılar.

Bu bölümde mikro enerji hasadı ile ilgili bilgi verilmiş olup, çeşitlerine değinilmiştir. Farklı kaynaklar ile enerji hasat etmek mümkün iken hasat edilen enerjinin tüketimi için uygun olan yerler ile ilgili de fikirler sunulmuştur. Bu çalışmada söz konusu çeşitler arasında radyo frekanslı sinyallerden enerji hasadı yapmak için kullanılacak bir sistemin tasarımı ele alınmıştır. Tasarım için bu bölümde bahsedilen gerilim katlayıcılar ile ilgili detaylı bilgi verilerek tasarım aşamasında kullanılmak üzere aralarından seçim yapılmıştır.

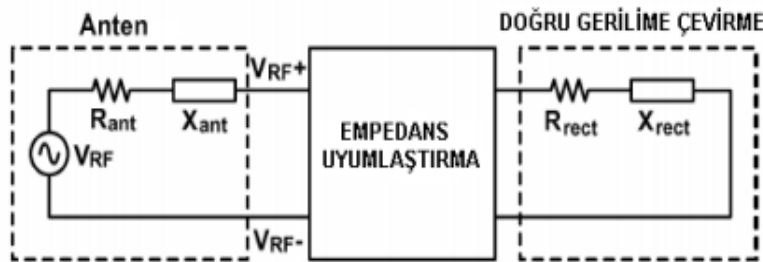
### 3. RADYO FREKANS SİNYALLERDEN ENERJİ HASADI

Çalışmanın bu bölümünde enerji hasat çeşitlerinden olan radyo frekansından enerji hasadının detaylı araştırması yapılmıştır. Enerji hasadı için kullanılan malzemeler, temel çalışma prensibi ve çalışmayı etkileyen etmenlerden bahsedilmiştir.

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 radyo frekansından enerji hasat edilmesi olarak adlandırılmaktadır.

RF enerji hasadı temel olarak havada bulunan elektromanyetik dalgalardan enerji elde etmektir. Bu yöntemle enerji hasadı yapılırken, havadaki elektromanyetik dalgaları toplamak için özel hassas antenler kullanılır. Antenler aracılığıyla toplanan elektromanyetik dalgalar söz konusu çok düşük mertebelerdeki enerjiyi yükseltici ve doğrultucu devreye aktarırken arada empedans uyumlaştırma kullanılması gerekmektedir. Bu sistemlerin verimliliğini etkileyen başlıca etkenler ise enerjinin süreç boyunca uğradığı kayıplar ve empedans uyumlaştırmasıdır [14].

Anten yapıları, empedans uyumlaştırma devreleri bu çalışmanın kapsamı dışında olduğu için burada tartışılmamaktadır.



Şekil 3.1. Radyo frekansından enerji hasadının devre şeması [14]

Elektromanyetik dalgalardan enerji hasat eden sistemlerin genel yapısı Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Şekilde görülen devrelerin temel amacı, oldukça düşük genlik seviyelerinde toplanan radyo frekanslı işaretlerden sabit ve kullanıma elverişli yüksek bir DA gerilim üretmektir. Anten aracılığıyla toplanan RF sinyalleri, empedans eşleme devresi

aracılığıyla sisteme mümkün olan maksimum güç olarak girer. Empedans uyumlaştırma devresinin çıkışındaki AA gerilim, doğrultucu bir devre ile DA gerilime dönüştürülür. İstenen gerilim seviyesindeki DA gerilim bu noktada depolanabilir durumdadır. Kullanılacak cihazın çalışması sağlayacak uygun elektrik enerjisi depolayacak ünite DA gerilim ile şarj edilerek, istenilen anda kullanılabilir.

Radyo frekansından elektrik enerji hasat edilmesindeki süreçte dönüşüm hassasiyetinin artırılmasında ki ön koşul devrenin giriş geriliminin mümkün olan en yüksek seviyeye çıkarılmasıdır. Giriş geriliminin yükseltilmesi için alıcı anten ile yükseltici ve doğrultucu devre arasındaki kalite faktörünün yüksek olması gerekir. Yüksek kalite faktörü sayesinde RF sinyali pasif olarak yükselir. Alıcı anten ile devrenin giriş empedansının eşleşmesi durumunda yükseltici ve doğrultucu devreye giren güç miktarı maksimum seviyeye çıkacaktır [17].

Verici kaynaktan yayınıma başlayan elektromanyetik dalgalar alıcıya ulaşana kadar aldığı yolda zayıflamaya, saçılmaya ve yansımaya uğrar. Elektromanyetik dalgalar efektif ışınma açıklığı içerisinde havadaki yayınıma devam ederken bu yolun sonunda alıcı anten ile etkileşime girerek analog işarete dönüşürler. Antenler tarafından toplanan enerji empedans uyumlaştırma ile yükseltici ve doğrultucu devrelere iletilir. Üzerinde çalışılan güç seviyeleri düşük olduğundan bu iletim sırasında kullanılan empedans uyumlaştırma, filtre ve gerilimin yükseltilmesini sağlayan akım pompalarının mümkün mertebe kayıpsız veya en düşük kayıp seviyelerinde olması gerekmektedir. Aksi takdirde hasat edilmeye çalışılan düşük güçler kayıplar ile yok olacaktır [14].

$$\eta_0 = \frac{\text{da çıkış gücü}}{\text{RF güç}} = \frac{V^2 / R_{yük}}{P_A} \quad (3.1)$$

Radyasyon kaynakları veya baz istasyonlarının havaya yoğun olarak RF sinyalleri yayması RF güçle beslenen cihazların söz konusu gücü sistemlerine alabilmeleri için çok önemlidir. Alıcı ve verici arasındaki mesafe az olduğunda verimli bir hasat imkanı olmakla beraber mesafesinin artması durumunda threshold gerilimi düşürülerek sistemin enerji dönüşümü noktasındaki hassasiyeti artırılır. Sistemin güç verimliliğini artırmak içinde bu nokta kritik öneme sahiptir. RF-DA çevirici sistemin temel tasarlanma amacı da gerilim yükselmesi için gerekli olan yüksek Q (kalite faktörü) elde etmektir. Yüksek Q elde edilmesi ile

devreye çok düşük gelen RF güçten sabit ve sürekli ve bağlı olunan devrenin ihtiyacını karşılayacak seviyede DA gerilim üretimi de sağlanmış olmaktadır. Yüksek DA gerilim üretimi için mümkün olan en yüksek miktar ve uygun frekansta RF dalgaları anten ile alınarak eşleme devresiyle sisteme güç girişi sağlanır [14].

Yüksek kalite faktörlü sistem pasif olarak gerilim yükseltici olarak davranır. Bu çalışma yükseltici ve doğrultucunun girişine gerilimi güç israfı olmadan artırmaktadır. Yüksek kalite faktörünün bu yönüyle çok olumlu bir çalışma ortamı sağlamakla beraber operasyon bant genişliğini daraltması sebebiyle de olumsuz bir özelliğe sahiptir.

### 3.1. Radyo Frekansı Enerji Kaynakları ve Çalışma Frekansları

Çevremizdeki birçok elektronik cihaz radyo sinyalleri ile çalışmakta ve bu çalışmanın sürekli olabilmesi için elektronik cihazlara sinyal sağlayan kaynaklar bulunmaktadır. Bu kaynaklar sürekli olarak yayınımlar yapmaktadırlar. Alıcı ve vericinin aynı bantta olduğu durumda yapılması arzulanan telekomünikasyon işlemi yerine getirilmiş olup, aynı bant aralığında olmaması durumunda ise vericiden çıkan radyo sinyali havada yansımalar yaparak zayıflar ve kullanılmadan kaybolur [18].

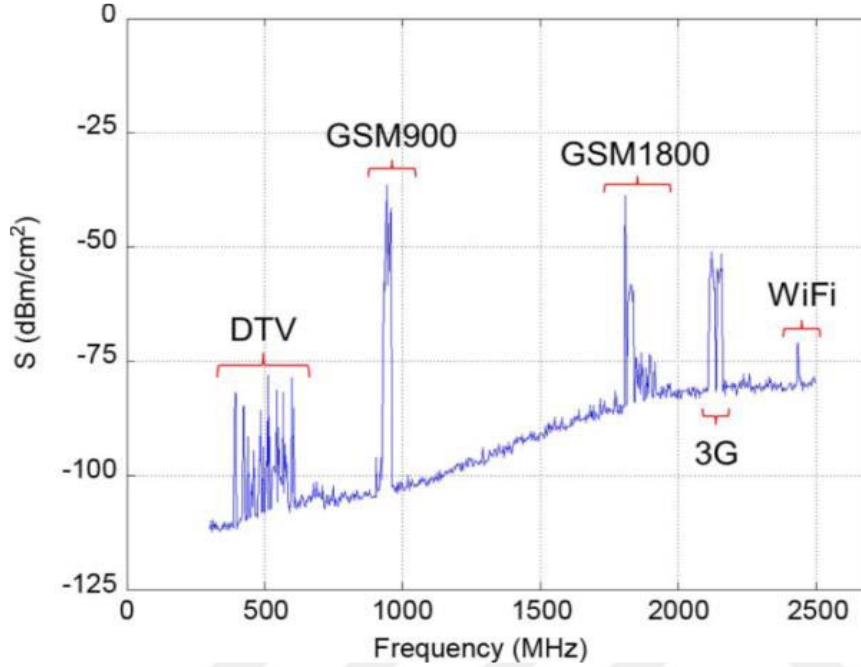
Çizelge 3.1'de mikro enerji hasadı için kaynak olarak kullanabilecek çevremizde yoğunlukla bulunan radyo frekansı kaynakları ve operasyon aralıkları belirtilmektedir.

Çizelge 3.1. Radyo sinyali kaynakları ve çalışma frekansları [18]

Frekans Kaynağı	Çalışma Aralığı
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



Sürekli yayınının olması ve çalışma frekanslarının enerji hasadı için diğer kaynaklara oranla daha elverişli olması sebebiyle Wi-Fi, GSM ve TV/DTV kaynakları radyo frekansından enerji hasadı yapılmasında başlıca kaynaklar olarak sıralanmaktadır.



Şekil 3.2. Radyo sinyali kaynaklarının güç yoğunlukları [18]

Kişisel bilgisayarlar, akıllı telefonlar ve bunlar gibi diğer küçük mobil elektronik cihazların yakın mesafeler içerisinde birbiriyle bağlantısını sağlamak için kullanılan kablosuz iletim teknolojisi Wi-Fi olarak adlandırılmaktadır. Wi-Fi 2.8 GHz ile 5 GHz frekans aralığındaki lisanssız ISM bandını kullanır. Wi-Fi teknolojisi temelde yaklaşık 100 metre kapsama mesafesi ile iç ortamlarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. İnternet kullanımına olan talep, mobil cihazların birbiriyle kablosuz iletişiminin sağladığı birçok kolaylık nedeniyle gelişen Wi-Fi teknolojisi ile hotspot (sıcak nokta) olarak adlandırılan yerlerde Wi-Fi internet erişimi halka açıktır. Bu noktalarda da yoğun şekilde radyo frekansları havada yayının yapmakta ve enerji hasadı için kaynak oluşturmaktadır.

1983 yılında satışa sunulan ve sayılı miktarda insanın kullandığı ilk cep telefonlarından bu yana geçen yaklaşık 25 yıllık süreçte bugün 7 milyarın üzerinde cep telefonu abonesinden söz edebiliyoruz. Abone sayısının artışı, abonelerin mobil cihazlarından taleplerini değiştirmiş, sürekli bağlantı halinde olma ve bu bağlantı hızının yüksek olması yönünde istekler bu teknolojinin gelişmesine yön vermiştir. Cep telefonlarının teknolojik olarak

gelişmesi ise bu talebi tek başına karşılamamaktadır. Talebin karşılanmasının diğer ayağı olan baz istasyonlarının gücü, sayısı ve kullandığı teknolojide gelişerek değişmektedir. Baz istasyonlar bu iletişim görevini yerine getirmek için radyo frekansı yayını yaparlar. Cep telefonları ile baz istasyonları farklı çalışma frekansları paylaşırlar. Global Mobil Sisteminin (GSM) çalıştığı ana frekanslar 900 MHz ve 1800 MHz'dir. Bunlarda GSM 900 bandı ise daha yüksek frekanslarda çalışan 3G ve Wi-Fi teknolojilerine kıyasla RF enerji hasadı için daha uygun bir çalışma aralığı olmakla birlikte yaygın olarak kullanılmaktadır. 900 MHz frekansa yakın değerlerdeki radyo frekansları yayını sırasında daha az kayıpla uzun mesafelere taşınabilmektedir. Bu sayede baz istasyonundan uzaklaşılsa bile verimli bir enerji hasadı yapmak mümkün olacaktır.

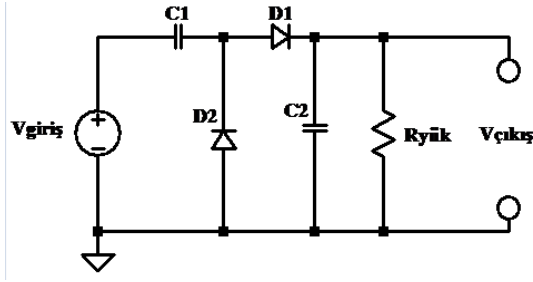
Radyo frekansından enerji hasadı için bir başka kaynak TV-DTV'dir. 2009 yılında İntel araştırmacıları 4 km uzaklıktaki 960 KW TV yayın kulesinden 90  $\mu$ W enerji hasadı yapabilmişlerdir. TV ve DTV sinyalleri yapay olarak üretilir ve bu sinyallerin yayını hava koşullarından bağımsız şekilde 24 saat sürerken bu özelliğiyle sürdürülebilir bir enerji kaynağı olma imkanı sunar [18].

### **3.2. Radyo Frekansı-Doğru Akım Dönüştürücü Devresi**

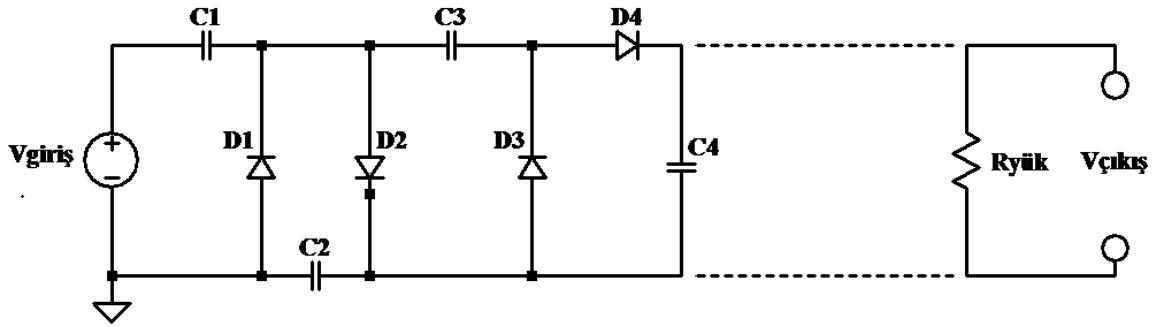
Radyo frekansından enerji hasat edilirken devreye uygulanan giriş gerilimi oldukça düşük seviyelerdedir. Bu gerilim direkt olarak hasat sonrası enerjinin verileceği cihaza yönlendirilir ise bu cihazın çalışması için yeterli seviyede bir enerji kaynağı olmayacaktır. Bu sebeple düşük seviyede ki bu giriş geriliminin gerilim katlayıcılar ile yükseltmesi gerekmektedir. Yaygın olarak kullanılan gerilim katlayıcılar ise Villard, Dickson ve Greinacher tipi gerilim katlayıcılarıdır. Alt başlıklar ile bu gerilim katlayıcılar tanıtılmaktadır.

#### **3.2.1. Villard gerilim katlayıcı**

Villard Gerilim Katlayıcı devresi temel olarak uygun değerlerde seçilmiş kapasitör ve diyotlardan ikişer tane kullanılarak elde edilir. Ancak, ihtiyaç duyulan gerilim düzeyine çıkabilmek için devrede bulunan kat sayısı artırılabilir.



(a)



(b)

Şekil 3.3. Tek ve N katlı Villard gerilim katlayıcı devre şeması

Şekil 3.3 (a)'da Villard Gerilim Katlayıcısının bir katı gösterilmektedir. AA giriş geriliminin yönüne göre ters yönlü diyotlardan biri ilettime geçerek kondansatörlerin dolmasını sağlar. Giriş geriliminin negatif olduğu yarı periyotta, D1 diyotu iletim yönünde kutuplanır ve C1 kondansatörü giriş gerilimi ile doldurulmaya başlar. Kondansatör gerilimi giriş geriliminin tepe değerine ulaştığında bu süreç sona erer. Kondansatörün boşalacağı bir yol olmadığı için gerilim tepe değerinde sabit kalır. Giriş gerilimi pozitif olduğunda bu kez D2 diyotu ilettime girer ve C2 kondansatörü dolmaya başlar. Dolum yolu üzerinde C1 gerilimi de olduğu için C2 kondansatörü giriş geriliminin tepe değerinin iki katına ulaşır. Böylece, C2 kondansatörünün uçları arasından alınan çıkış gerilimi, her zaman giriş geriliminin tepe değerinin iki katına eşittir.

Gerilim seviyesinin çıkarılması istenen seviyeye ulaşmak için devredeki kat sayısının artırılması gerekmektedir. Villard Gerilim Katlayıcının çıkış gerilimi ise aşağıdaki denklem ile bulunabilir.

$$V_{\text{çıkış}} = V_o \frac{1}{\frac{R_o}{R_L} + \frac{1}{n}} \quad (3.2)$$

$$V_{\text{çıkış}} = R_L \frac{nV_o}{nR_o + R_L} \quad (3.3)$$

Denklemden;

$V_o$ : Tek katlı devrenin açık devre çıkış gerilimini,

$R_o$ : Tek katlı devrenin iç direncini,

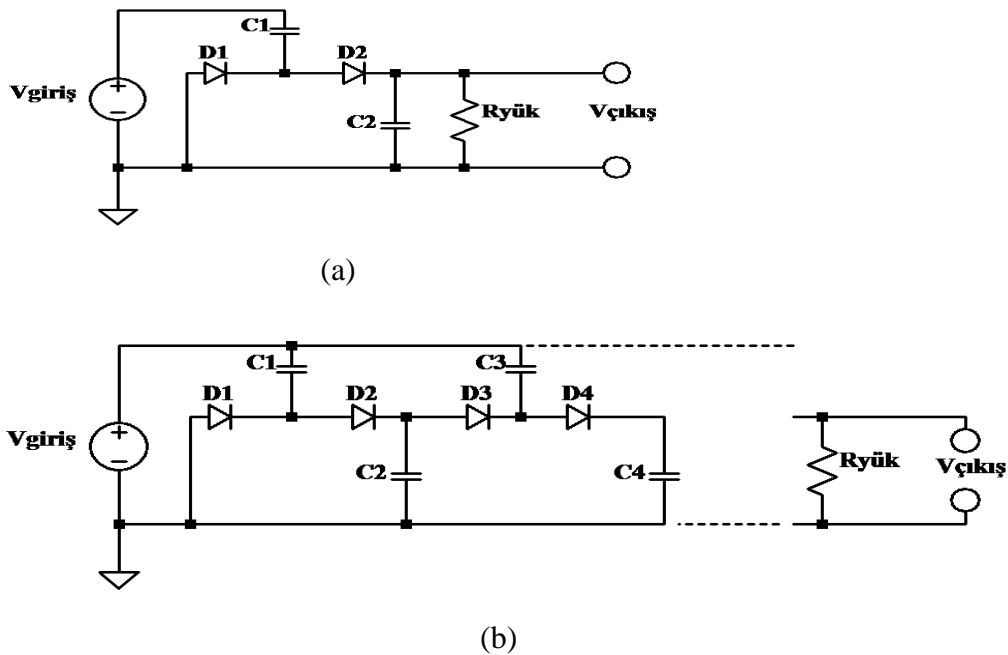
$R_L$ : Yük direncini,

n: Devrede kaç kat bulunduğunu göstermektedir.

Çıkış gerilimini veren denklem incelendiğinde, sonucun sadece devredeki kat sayısı ile alakalı değil, iç direncinde önemli rol oynadığını görmek mümkündür. Bu sebeple Villard Gerilim Katlayıcı tasarlanırken kullanılacak devre elemanlarının seçimi de çok önemlidir.

### 3.2.2. Dickson gerilim katlayıcı

Villard Gerilim Katlayıcı ile benzer şekilde Dickson Gerilim Katlayıcı da her bir katında iki adet kapasitör ve iki adet diyot bulundurmaktadır. Villard Gerilim Katlayıcıdan farklı olarak her devre katında kapasitörlerin paralel konfigürasyonu ile devre empedansı düşürülür. Bu sebeple eşleştirme görevini Villard Gerilim Katlayıcıya göre daha basit hale getirir.



Şekil 3.4. Tek ve N katlı Dickson gerilim katlayıcı devre şeması

N katlı Dickson Gerilim Katlayıcı devrenin çıkış gücü ise aşağıdaki denklem ile bulunmaktadır;

$$V_{\text{çıkış}} = n (V_m - V_T) \quad (3.4)$$

Denklemden;

n: Kat sayısını,

$V_m$ : Giriş geriliminin tepe genliğini,

$V_T$ : Diyotların iletme gerilimini göstermektedir.

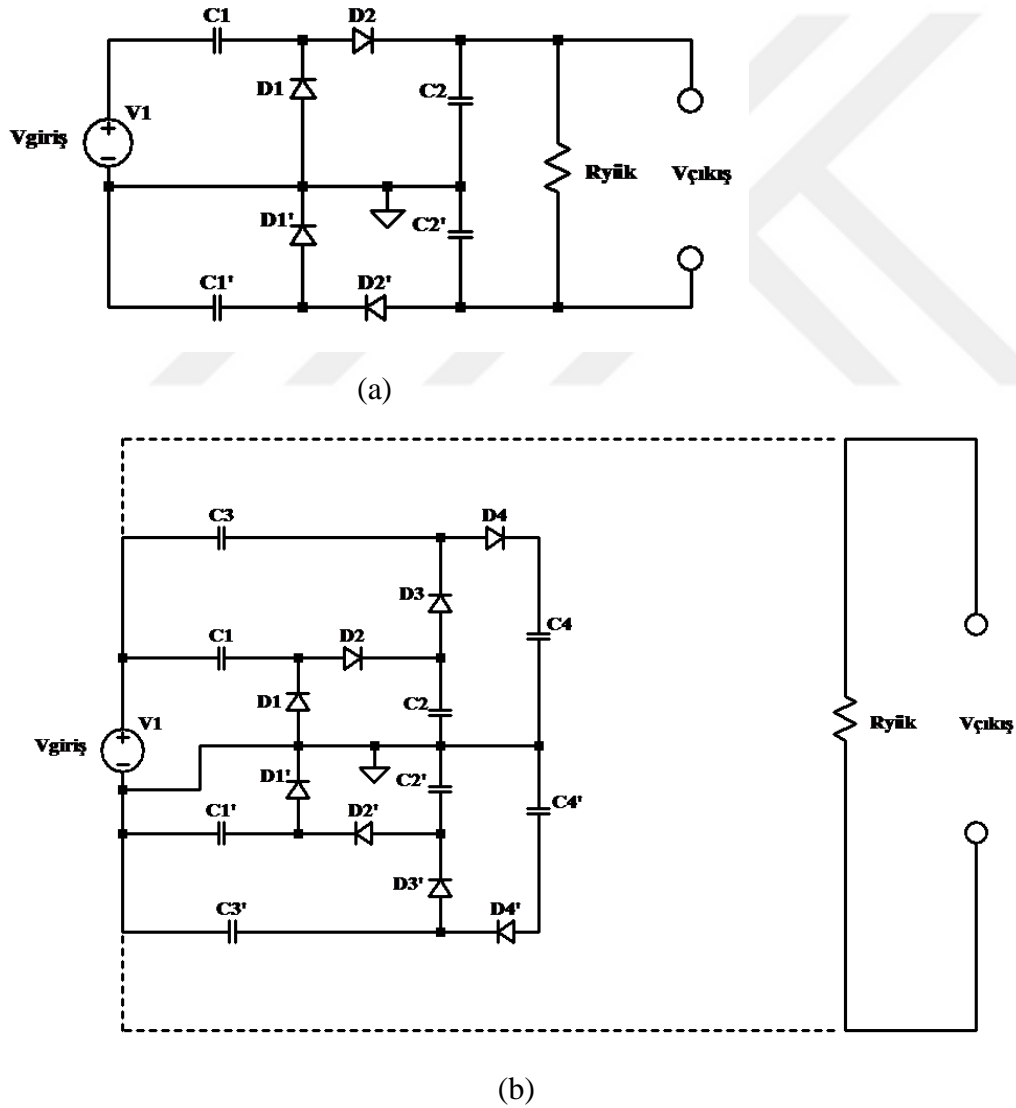
Yine görüldüğü üzere bu gerilim katlayıcı tipinde de devre elemanlarının seçimi önemli rol oynamaktadır. İletim gerilim düşümü yüksek diyotların kullanılması durumunda devrenin verimi oldukça düşer. Düşük iletim gerilim düşümüne sahip diyotlar ve kat sayısının artması ile yüksek çıkış gerilimi elde etmek mümkündür.

### 3.2.3. Greinacher gerilim katlayıcı

Villard ve Dickson'dan farklı olarak Greinacher Gerilim Katlayıcı her bir katında dört adet diyot ve dört adet kapasitör barındırmaktadır. Şekil 3.5'te gösterilen N katlı Greinacher Gerilim Katlayıcı incelendiğinde; AA giriş geriliminin yönüne göre ters yönlü diyotlardan biri iletme geçerek kondansatörün dolmasını sağlar. Giriş geriliminin negatif işaretli olduğu periyotta D1 diyotu iletim yönünde kutuplanır ve C1 kondansatörü dolmaya başlar. Kondansatör gerilimi giriş geriliminin tepe değerine ulaştığında bu süreç sona erer. Kondansatörün üzerindeki enerjiyi aktaracağı bir yol olmadığı için gerilim tepe değerinde sabit kalır. Giriş gerilimi pozitif işaretli olduğunda bu kez D2 diyotu iletime girer ve C2 kondansatörü dolmaya başlar. Akımın izlediği bu yol üzerinde C1 kondansatörü de şarj olmuş halde bulunduğu için C2 kondansatörü giriş geriliminin tepe değerinin iki katına ulaşır. Bu şekilde C2 kondansatörünün uçları arasında alınan çıkış gerilimi giriş geriliminin tepe değerinin iki katın eşit olacaktır. Bunun paralelinde giriş gerilimi pozitif olduğunda D1' diyotu iletim yönünde kutuplanır ve C1' kondansatörü giriş gerilimiyle dolmaya başlar. Kondansatör gerilimi giriş geriliminin tepe değerine ulaştığında bu süreç sona erer. Kondansatörün yükünü boşaltacağı bir yol olmaması sebebiyle gerilimi tepe değerinde sabit kalır. Giriş gerilimi negatif işaretli olduğunda bu defa D2' diyotu iletime

girerek  $C2'$  kondansatörünü doldurur ve bu akım yolu üzerinde  $C1$  kondansatörü olduğundan  $C2'$  kondansatörü giriş geriliminin negatif işaretli miktarının iki katına ulaşır. Bu şekilde  $C2'$  kondansatörünün uçları arasından alınan çıkış gerilimi, giriş geriliminin tepe değerinin negatif işaretli olarak iki katına eşittir.

Greinacher Gerilim Katlayıcı devresi teorik olarak Villard Gerilim Katlayıcısının iki katı çıkış gerilimi vermektedir. Bunun sebebi devre yapısının oluşmasında Villard Gerilim Katlayıcıya ek olarak Villard Gerilim Katlayıcının simetriğinin de bu devreye bağlı olmasıdır [19].



Şekil 3.5. Tek ve N katlı Greinacher gerilim katlayıcı devre şeması

Greinacher Gerilim Katlayıcının çıkış akımı sabittir. Giriş geriliminin tepe değerinin  $V_m$  olduğu  $n$  katlı Greinacher Gerilim Katlayıcı devrenin çıkış gerilimi ise aşağıdaki denklem ile bulunabilir;

$$V_{\text{çıkış}} = 4 n V_m \quad (3.5)$$

Denklemden;

$n$ : Kat sayısını,

$V_m$ : Giriş geriliminin tepe genliğini,

Temel çalışma prensipleri, devre şemaları ve çıkış gerilimleri ile ilgili bilgiler verilen gerilim katlayıcılarının birbirlerine göre üstün ve zayıf yanları Çizelge 3.2’de verilmektedir.

Çizelge 3.2. Gerilim katlayıcıların karşılaştırılması

Tip	Üstün Yanları	Zayıf Yanları
Villard Gerilim Katlayıcı	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Devre eleman sayısı azdır.</li> <li>• Gerilim düşümü düşük seviyelerde.</li> <li>• Az yer kaplamaktadır.</li> <li>• Uygulamada yüksek verimle çalışmaktadır.</li> </ul>	
Dickson Gerilim Katlayıcı	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Devre eleman sayısı azdır.</li> <li>• Gerilim düşümü düşük seviyelerde.</li> <li>• Az yer kaplamaktadır.</li> <li>• Empedans eşleştirmesi daha basittir.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gerek teorik, gerek pratik çalışmalarda verimin düşük olduğu görülmüştür.</li> </ul>
Greinacher Gerilim Katlayıcı	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teorik hesaplamalara göre verimi en yüksek gerilim katlayıcıdır, en verimli gözükmektedir.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Devre eleman sayısı fazladır.</li> <li>• Yüksek gerilim düşümü söz konusu.</li> <li>• Boyut olarak diğerlerinden daha fazla yer kaplamaktadır.</li> </ul>

Bu bölümde radyo frekansından enerji hasadı ile ilgili bilgiler verilmiştir. Temel çalışma prensibi, kullanılabilir kaynaklar, verimli bir hasat için gerekliliklerden bahsedilerek tasarım aşamasında kullanılacak olan gerilim katlayıcının hangi alternatifler arasından belirlenebileceğine ilişkin gerilim katlayıcı çeşitleri anlatılmıştır. Son olarak gerilim katlayıcıların karşılaştırılması yapılarak bölüm tamamlanmıştır.







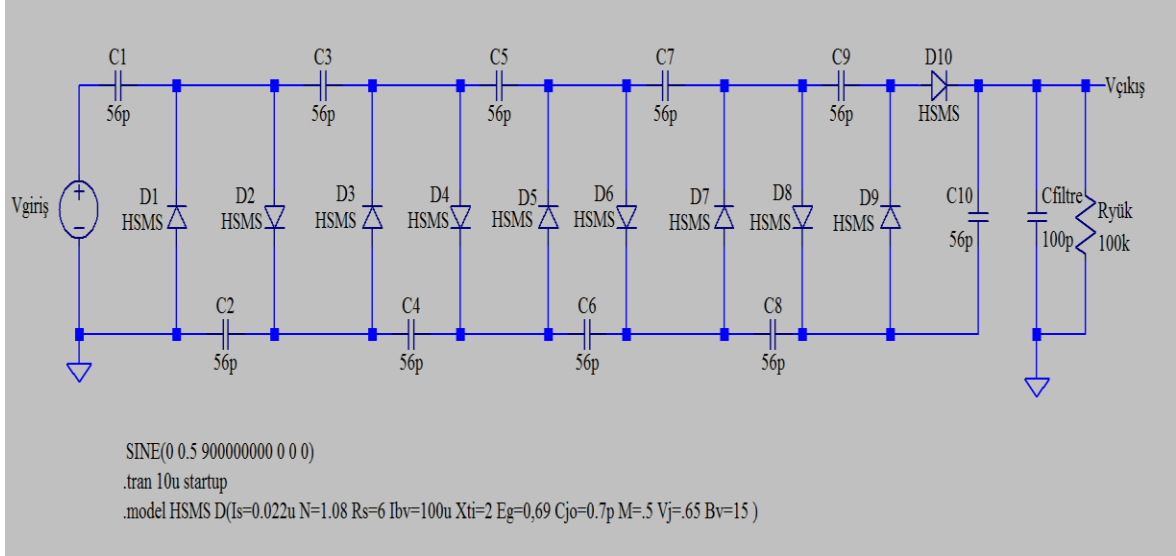
## 4. GERİLİM KATLAYICILARIN KARŞILAŞTIRILMASI VE KAT SAYISININ BELİRLENMESİ

Bu bölümde düşük seviyelerde olan giriş geriliminin hangi gerilim katlayıcı kullanılarak yükseltileceğinin belirlenmesine yönelik çalışma yapılmıştır. Önceki bölümde çalışma prensipleri, tek ve N katlı devre şemaları ve birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarının verildiği Villard, Dickson ve Greinacher Gerilim Katlayıcıların benzetim programı ile aynı giriş değerlerine karşılık birçok pilin şarj edilmesi için yeterli olan 3,3 Volt DA gerilim elde edilmesi için tasarımı yapılarak verimleri karşılaştırılmıştır. En verimli gerilim katlayıcının tespitinin ardından, gerilim katlayıcının kat sayısının artışına karşılık olarak verdiği çıkış gerilimi izlenerek kaç katlı olacağı ile ilgili çalışma yapılmıştır. Tüm bu çalışmaların sonunda elde edilen veriler ile bir sonraki bölümde devre kurulumu gerçekleştirilmiştir.

### 4.1. Gerilim Katlayıcı Çeşitlerinin Karşılaştırılması

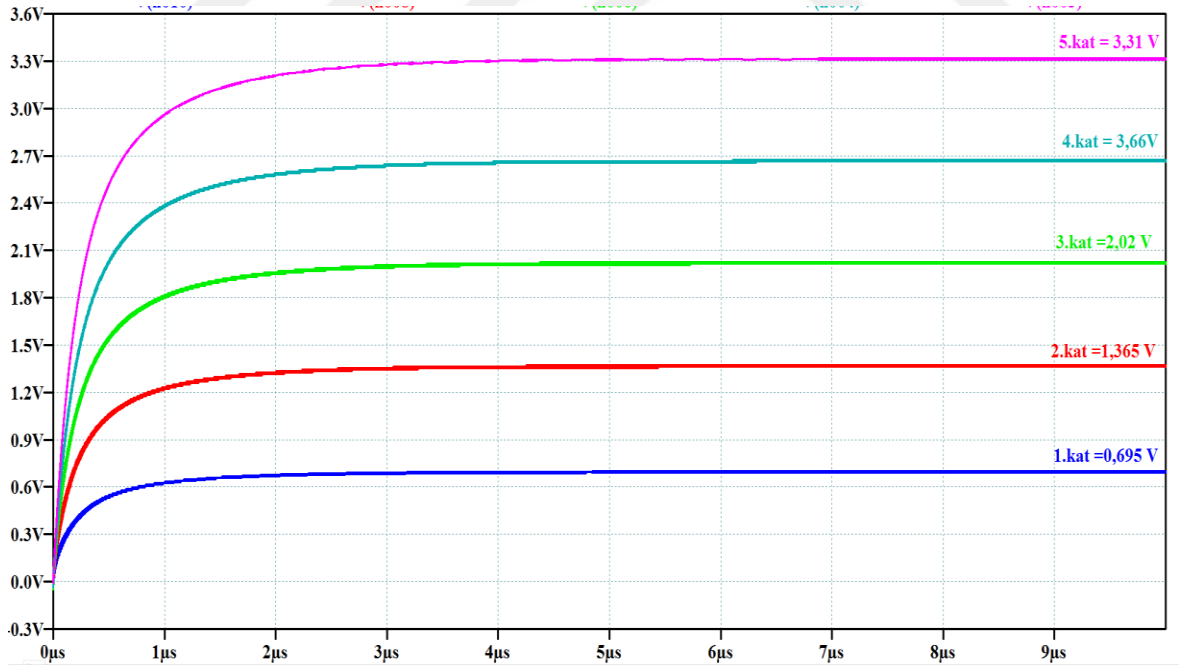
Önceki bölümde tanıtılan ve enerji hasadı uygulamalarında yaygın olarak kullanılan üç gerilim katlayıcı devrenin LTSpice benzetim programında ikişer katlı yapılarının benzetimi yapıldı. Devrelere aynı giriş gerilimi (0,5 V, 900 MHz) uygulandı ve çıkış gerilimleri ölçüldü. Her ne kadar benzetim modelleri gerçek uygulamalarda kullanılan malzemeleri %100 doğru yansıtmasa da, üç uygulamada da aynı elemanların kullanılmış olması nedeniyle bir karşılaştırma yapılması söz konusu olabilmektedir.

Başlangıç olarak 5 katlı Villard Gerilim Katlayıcı tasarlanarak 0,5 V giriş gerilimi 900 MHz ile devreye uygulandı ve ölçümler yapıldı.

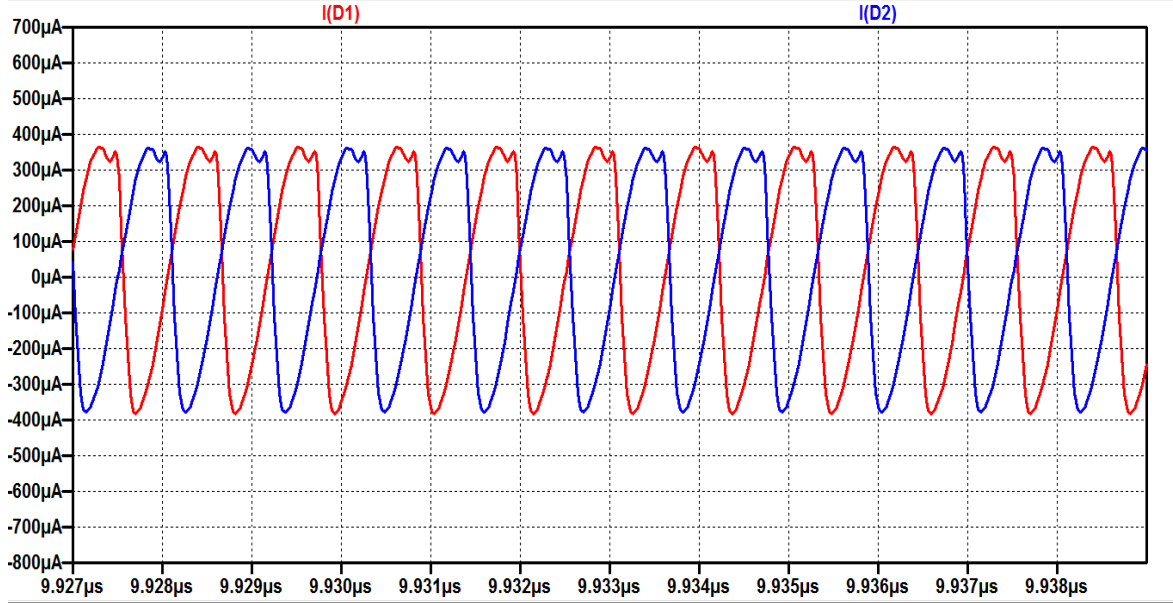


Şekil 4.1. Beş katlı Villard gerilim katlayıcının LTSpice benzetimi

Bu giriş değerlerine karşılık olarak devrenin çıkışında gerilim 3,31 Volt olarak ölçülmüştür. Giriş gücü 345,26  $\mu$ W iken çıkış gücünün 102,42  $\mu$ W olduğu görülmüştür. Bu da devrenin %29,7 verimle çalıştığını göstermektedir.



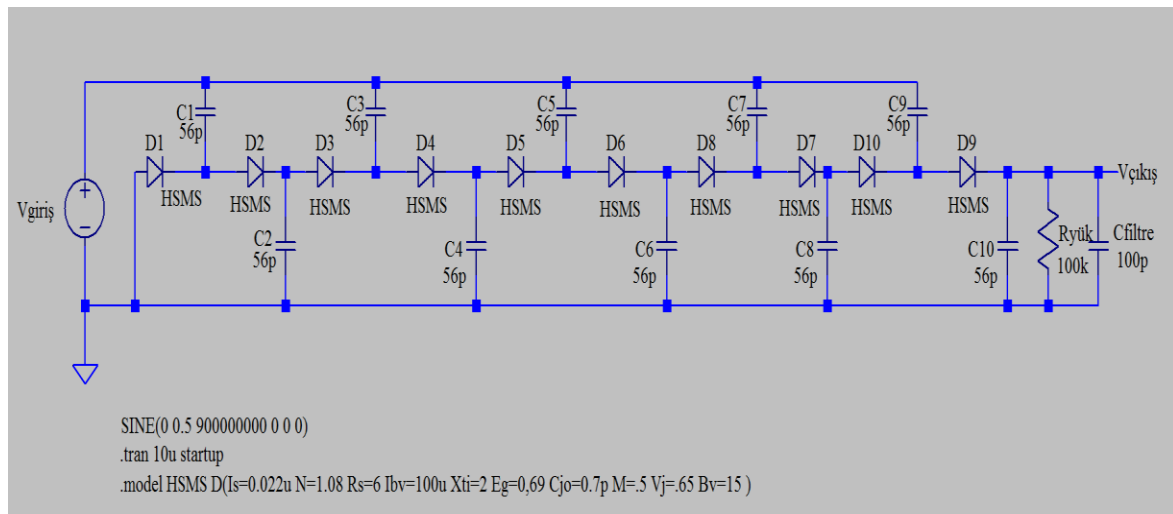
Şekil 4.2. Beş katlı Villard gerilim katlayıcının ölçüm sonucu grafikleri (zaman-gerilim)



Şekil 4.3. D1 ve D2 diyotları üzerinden geçen akım (zaman-akım)

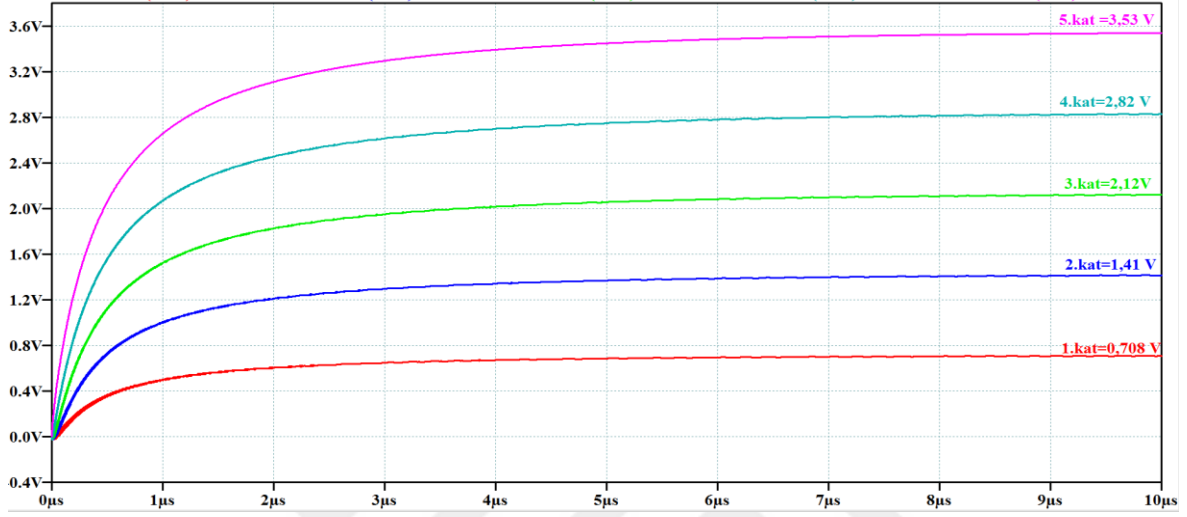
Şekil 4.3'te D1 ve D2 diyotları üzerinden geçen akım grafiği verilmiştir. HSMS diyotun özelliğinden dolayı bu diyotlar üzerinden geçen akım çok düşük olmaktadır. Bu sebeple hesaplamalarda ihmal edilebilirler.

İkinci olarak Dickson Gerilim Katlayıcısının benzetim programında 5 katlı bir şeması kurularak Villard Gerilim Katlayıcıya uygulanan aynı giriş gerilimleri uygulanarak ölçümler gerçekleştirilmiştir.

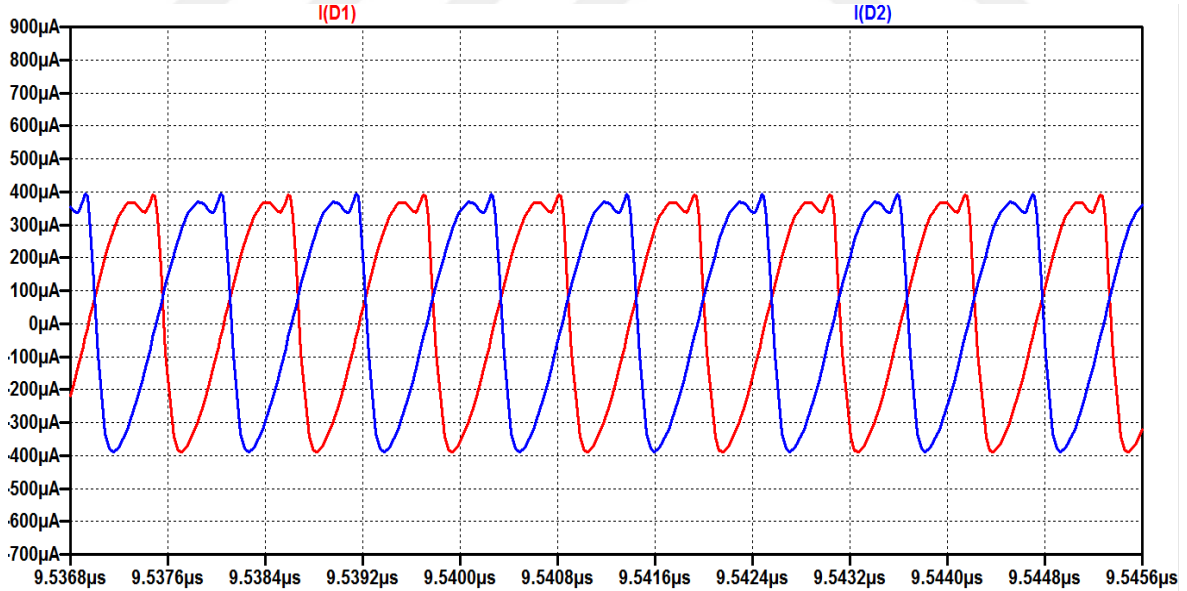


Şekil 4.4. Beş katlı Dickson gerilim katlayıcının LTSpice benzetimi

Dickson gerilim katlayıcı söz konusu giriş değerlerine karşılık olarak 3,53 Volt çıkış gerilimi vermesine karşın giriş gücünün  $694,29 \mu\text{W}$  ve çıkış gücünün  $107,24 \mu\text{W}$  olmasından kaynaklı olarak %15,4'lük bir verimle çalışmıştır. Bu da Villard Gerilim Katlayıcıya kıyasla daha verimsiz bir çalışma değeridir.



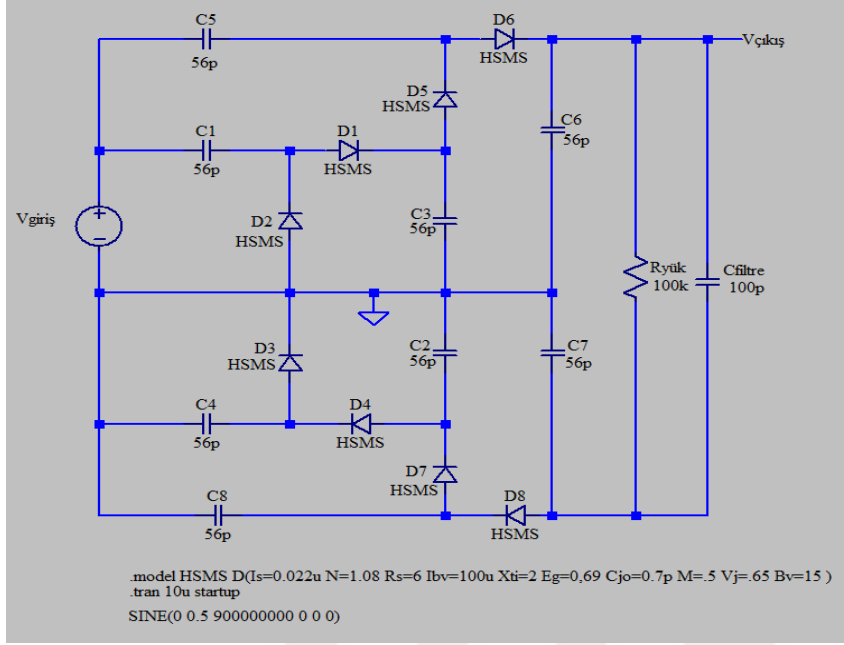
Şekil 4.5. Beş katlı Dickson gerilim katlayıcının ölçüm sonucu grafikleri (zaman-gerilim)



Şekil 4.6. D1 ve D2 diyotları üzerinden geçen akım (zaman-akım)

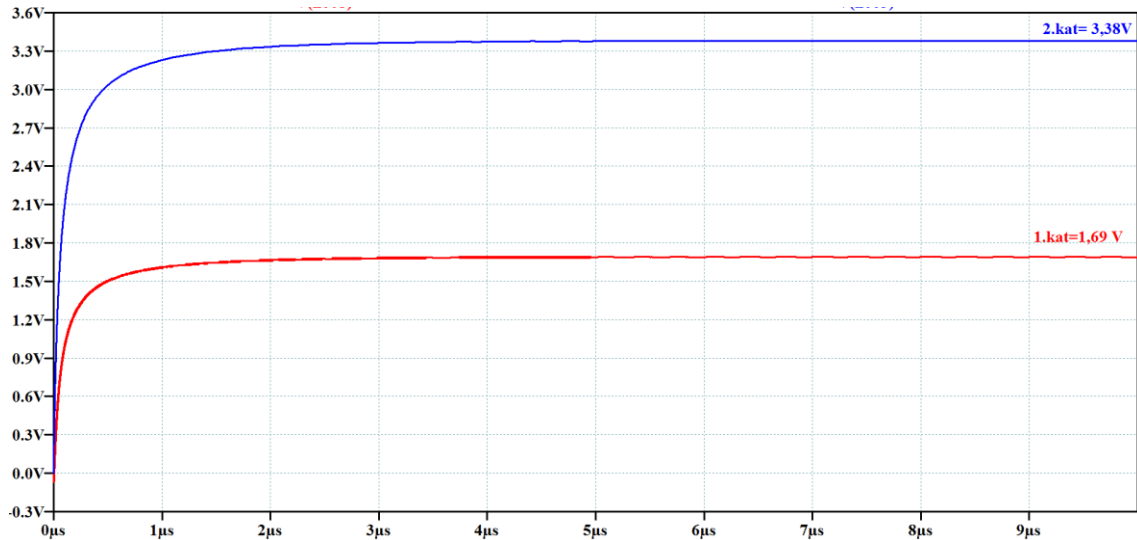
Şekil 4.6'da D1 ve D2 diyotları üzerinden geçen akım grafikleri verilmiştir. Villard gerilim katlayıcı ile benzer şekilde bu akımlar çok düşük olduğundan hesaplamalarda ihmal edilebilirler.

Son olarak Greinacher Gerilim Katlayıcısının benzetim programında 2 katlı bir formasyonu kurularak ölçümler yapılmıştır.

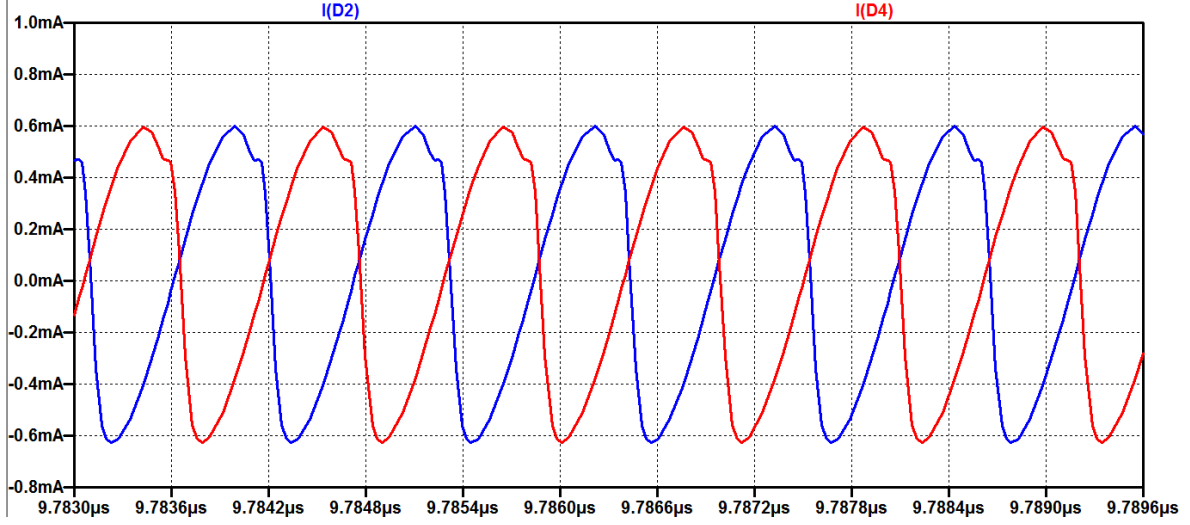


Şekil 4.7. İki katlı Greinacher gerilim katlayıcının LTSpice benzetim devresi

Greinacher Gerilim Katlayıcı ise diğer iki devreye kıyasla daha verimsiz bir sonuç vermiştir. 3,38 Volt çıkış geriliminin ölçüldüğü noktada giriş gücü 386,85  $\mu$ W iken çıkış gücü 91,53  $\mu$ W olarak tespit edilmiştir Bu değer gerilim katlayıcılar arasındaki en düşük verim değeri olan %23,7'ye denk gelmektedir.



Şekil 4.8. İki katlı Greinacher gerilim katlayıcının ölçüm sonucu grafikleri (zaman-gerilim)



Şekil 4.9. D2 ve D4 diyotları üzerinden geçen akım (zaman-akım)

Şekil 4.9’da D2 ve D4 diyotları üzerinden geçen akım grafikleri verilmiştir. Villard ve Dickson gerilim katlayıcıların aksine diyotlar üzerinden geçen akım bu katlayıcıda oldukça yüksek olduğundan ihmal edilmemelidir. Çıkış gerilimi hesaplanırken diyotların gerilim düşümü hesaba katılmalıdır.

Çalışma konusu olan tüm gerilim katlayıcıların karşılaştırılmasına yönelik olarak yapılan ölçüm sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. LTSpice uygulamasından elde edilen verilerin karşılaştırılması

	$V_{\text{çıkış}}$ (V)	$P_{\text{giriş}}$ ( $\mu\text{W}$ )	$P_{\text{çıkış}}$ ( $\mu\text{W}$ )	Verim (%)
Villard Gerilim Katlayıcı	3,31	345,26	102,42	%29,7
Dickson Gerilim Katlayıcı	3,53	694,29	107,24	%15,4
Greinacher Gerilim Katlayıcı	3,38	386,85	91,53	%23,7

Sonuçlardan görüldüğü üzere Villard Gerilim Katlayıcı en verimli devre olarak çalıştı. Bu sebepten ötürü tasarlanacak devrede Villard gerilim Katlayıcı kullanılmasına karar verildi. Ancak kullanılacak gerilim katlayıcıya karar verilmiş olmasına rağmen gerilim katlayıcının kaç katlı olacağının belirlenmesi gerekmektedir.

## 4.2. Gerilim Katlayıcının Kat Sayısının Belirlenmesi

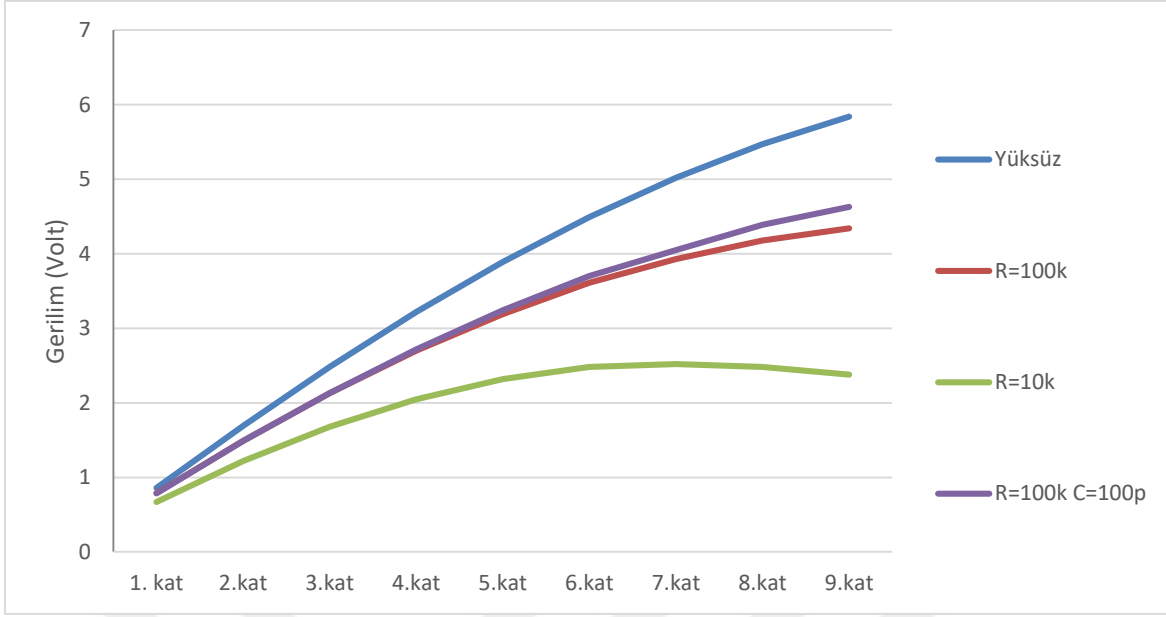
Gerilim katlayıcının kaç katlı olacağı belirlenirken izlenen yol, ardışık olarak kat sayısını artırarak devre girişine aynı değerleri uygulayıp çıkışta elde edilen verilerin karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Farklı kat sayılarındaki sonuçlar kat sayısının artışı ile hep artan bir grafik çizecek olmasına rağmen belli bir noktadan sonra bu artışın şiddeti azalacak ve yatay seyredene yakın bir grafik elde edilmesine sebep olacaktır. Bu yataylaşmanın başladığı nokta ise kullanılacak gerilim katlayıcının kaç katlı olacağına ilişkin olarak bize ipucu vermektedir.

Benzetim programında yapılan tasarım çalışmasında bir çok pili şarj etmeye yeterli olan 3 Voltluk gerilim elde etmenin amaçlandığı belirtilmesine karşın prototip devre tasarlanırken kullanılacak kat sayısının maksimum çıkış gerilimini elde etmeye yönelik olarak belirlenmesine karar verilmiştir.

Yüksüz,  $10k\Omega$ ,  $100k\Omega$ ,  $100k\Omega // 100pF$  yükleri altında gerilim katlayıcının iki katlı şemasından dokuz katlı şemasına kadar her bir kat için aynı giriş değerlerine karşılık çıkış için ölçümler yapılmıştır. Tüm yük durumlarında 7 kata kadar çıkış için kat sayısı ile doğru orantılıya yakın denilebilecek seviyede bir çıkış gerilimi ölçülmekte iken, yedinci kattan sonra çıkışta ölçülen gerilimin artışındaki lineer durum kaybolmaktadır.

Şekil 4.10'da Villard Gerilim Katlayıcıya farklı yükler bağlanarak kat sayısının artışına göre ölçülen çıkış gerilimleri karşılaştırılmaktadır.





Şekil 4.10. Villard gerilim katlayıcının kat sayısı artışına karşı verdiği çıkış gerilimleri (kat sayısı-gerilim)

Şekil 4.10'a göre benzetimde ve prototipte kullanılacak gerilim katlayıcının yedi katlı olmasına karar verilmiştir.

Bir önceki bölümde tanıtılan Villard, Dickson ve Greinacher Gerilim Katlayıcı çeşitleri bu bölümde benzetim programında kurularak aynı giriş değerleri altında ölçüme tabi tutulmuşlardır. Elde edilen sonuçlara bakarak Villard Gerilim Katlayıcının kullanılmasına karar verilmiştir. Sonraki aşamada gerilim katlayıcının kat sayısını belirlemeye yönelik çalışma yapılarak yedi katlı gerilim katlayıcı kullanılmasına karar verilmiştir.

## 5. DEVRE ELEMANLARININ SEÇİMİ, TASARIM, BENZETİM VE UYGULAMA

Çalışmanın önceki bölümünde yedi katlı Villard Gerilim Katlayıcı kullanılmasına karar verilmişti. Bu bölüm ise devrede hangi elemanların hangi sebepler ile kullanılacağıyla başlanarak, seçilen elemanlar ile önce benzetim programında devrenin kurulumu ve ölçümlerin yapılmasını, ardından prototip devrenin kurularak ölçümlerin yapılmasını kapsamaktadır. Bölümün sonunda benzetim programı ile prototip devreden elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

### 5.1. Devre Elemanlarının Seçimi

Villard Gerilim Katlayıcının anlatıldığı bölümde devre şemasına bakıldığında, devrenin kapasitör ve diyotlardan oluştuğu görülmektedir. Çalışmada en verimli sonuca ulaşabilmek için devre elemanlarının bu çalışma için en uygun elemanlar olması gerekmektedir.

#### 5.1.1. Diyot seçimi

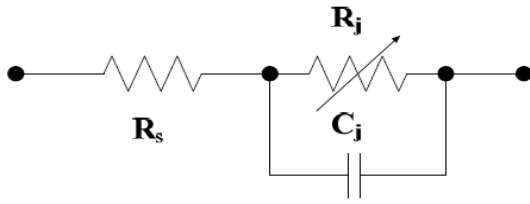
Devrenin uygulamasında HSMS2825 Schottky Diyot kullanılmıştır. Bu diyot hem analog hem de dijital uygulamalar için üretilmiştir. Bu yönüyle tasarım yapan kişiye birçok kullanım alternatifi sunmaktadır. Genel uygulama alanları olarak karıştırma, tespit etme, anahtarlama, örnekleme, sıkıştırma ve dalga şekillendirme sayılabilir. Genellikle düşük seri direnç, tüm akım seviyelerinde düşük gerilim düşümü ve iyi RF karakteristikleri içeren en iyi diyot seçimi olarak karşımıza çıkmaktadır.

1,5 GHz altındaki küçük sinyallerde  $P_{in} > -20$  dB uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanan HSMS 2825 Schottky diyot bu özellikleri sebebiyle RF sinyal uygulamalarında kullanmak için idealdir. Farklı paket tipleri olmakla beraber tasarımcıya çok çeşitli düşük maliyetli çözümler sunmaktadır.

Çizelge 5.1. Diyotun spice parametreleri

Parametre	Birim	HSMS-282x
$B_V$	V	15
$C_{J0}$	PF	0.7
$E_G$	EV	0.69
$I_{BV}$	A	1E-4
$I_S$	A	2.2E-8
$N$		1.08
$R_S$	$\Omega$	6.0
$P_B$	V	0.65
$P_T$		2
$M$		0.5

HSMS-282X diyotunun temel özellikleri düşük ileri gerilimi ve düşük sızıntı sağlayarak çalışmasıdır. Ayrıca İdeal koşullar altında tek yönlü akım akışına izin veren bir diyotun simetrik olmayan özelliklerini kullanmaktadır.



Şekil 5.1. Diyotun devre modeli

Diyot iç etkisinin ihmal edilmesi ile diyotun iç şeması Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Diyotlar üzerinde optimizasyona yönelik şekilde ayarlama yapma imkanı yoktur. Diyotlar sabit özelliklere sahip olup buldukları devre içerisinde bu özelliklerini yansıtarak çalışmaktadırlar. Bu nedenle sonradan ayarlanabilir düşüncesi ile herhangi bir diyot seçmek hatalı olacaktır. Yapılan çalışmaya en uygun diyot seçilerek kurulum ve yapım gerçekleştirilmelidir. Aşağıda verilen denklemlerde diyotların bu şekildeki çalışma prensipleri açıklanmıştır.

Diyotun empedansını bulmak için;

$$Y_Z = Y_{C_j} + Y_{R_j} \quad (5.1)$$

$$Y_Z = j\omega C_j + \frac{1}{R_j} \quad (5.2)$$

$$Y_Z = \frac{j\omega C_j R_j + 1}{R_j} \quad (5.3)$$

formülü kullanılarak buradan doğrusal modelin empedansı Z;

$$Z = \frac{R_j}{1 + j\omega R_j C_j} \quad (5.4)$$

olarak bulunur. Bu durumda toplam empedans Z<sub>T</sub>;

$$Z_T = R_S + \frac{R_j}{1 + j\omega R_j C_j} \quad (5.5)$$

olacaktır. Burada R<sub>S</sub> devrenin seri direncidir. I<sub>b</sub>; Bias akımı (uA), I<sub>S</sub>; Doyma akımı, T; sıcaklık ve N; İdealite faktörü olmak üzere R<sub>j</sub> ise aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$R_j = \frac{8.33 \times 10^{-5} \times N \times T}{I_b + I_s} \quad (5.6)$$

Yukarıda belirtilen formüllerde diyotun hangi değerler ile çalıştığı gösterilirken burada R<sub>j</sub> ve C<sub>j</sub> değerleri sabittir. Değişken olan parametre frekans değeri olup frekans yükseldikçe Z'nin değeri seri direnç değeri olan R<sub>S</sub>'nin yanında ihmal edilebilecek kadar küçülecektir. Buradan hareketle diyotun çalışmasının frekanstan bağımsız olduğunu söylemek mümkündür.

### 5.1.2. Kapasitör seçimi

Çalışmanın uygulanmasında kullanılmak üzere ESR değeri 92 mΩ olan 56 pF kapasitör seçilmiştir. Uygulamada 900 MHz gibi yüksek frekanslarda çalışma yapılacağından kapasitör seçiminde yüksek frekans altında çalışma şeklinin bozulmayacak bir devre elemanı seçilmesi gerekmektedir. Bundan dolayı çalışma frekansındaki ESR değeri tasarımcı için önemlidir. Kapasitörler yapı olarak belli frekansların üzerinde AA gerilim altında kaldığında kapasitör özelliği yerine indüktör özelliği göstermektedir. Çalışma 900 MHz gibi yüksek frekanslarda yapılacağından Kemet markasının kapasitör seçim arayüz

programı kullanılarak devre elemanı seçimi yapılmıştır. Program ile çalışma frekansındaki (900 MHz) ESR değerine bakılarak bunun 92 m $\Omega$  olduğu görülmüştür. Bu sebeple benzetim uygulamasında bu değer kullanılmıştır.



Şekil 5.2. Kondansatörün frekans-ESR grafiği (Hz- $\Omega$  eksenleri)

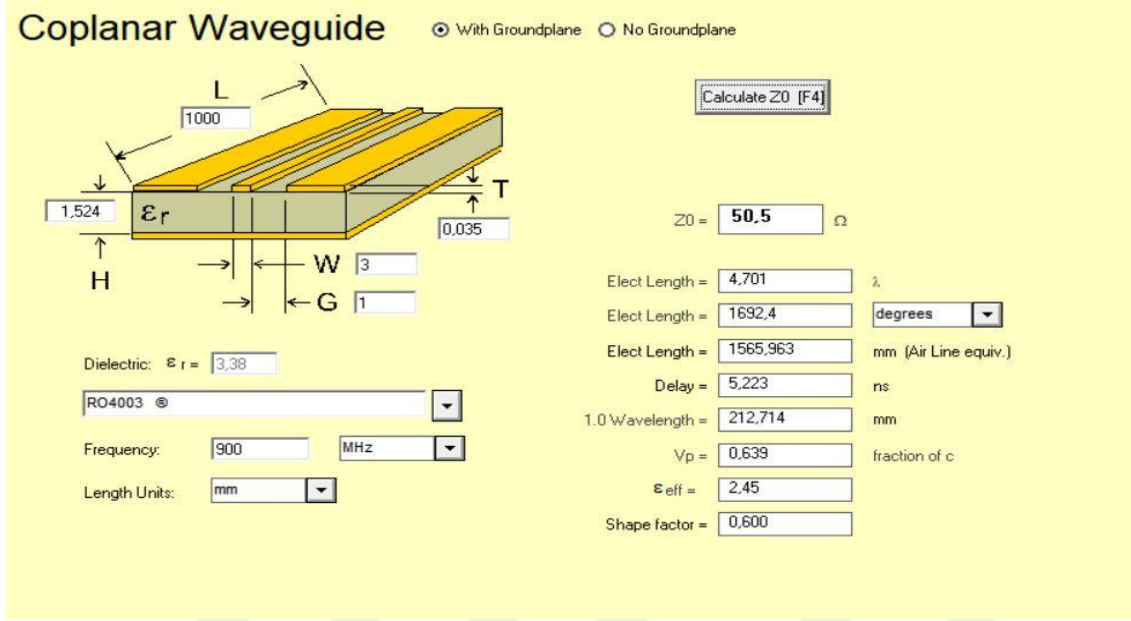
Uygulamada lehimlemenin daha kolay yapılabilmesi için 0805 paket seçilmiştir. Ayrıca çalışmanın yapılacağı yüksek frekanslarda ve RF uygulamalarında seramik kapasitör kullanıldığı yapılan araştırmalarda tespit edilmiştir. Anma gerilimi ( $V_{rated}$ ) kapasitörün çalışabileceği en yüksek gerilim olmakla birlikte seçilen kapasitörün anma gerilimi 50 Volttur. Ancak çalışmanın olacağı gerilim seviyeleri çok düşük olduğundan anma gerilimi değeri bu tip uygulamalarda devre elemanı seçiminde önemli rol oynamamaktadır.

Devrede kullanılmak üzere 100 k $\Omega$  ( $R_{load}$ ) yük ve 100 pF değerinde filtre kapasitör seçilmiştir.

## 5.2. Empedans Uyumlaştırma

Uyumlandırma devrelerinin kullanım amacı gelen sinyalin yansıma yapmadan karşı tarafa geçmesini sağlamaktır. Devrede empedans uyumlandırma amacıyla kullanılacak her bir devre elemanı çıkışta elde edilecek verimden kayba neden olacağı için empedans uyumlaştırma yollar aracılığıyla yapılmıştır.

Empedans hesaplaması için AppCAD programı kullanılmıştır. Devrede kullanılan rogers malzemesinin özellikleri programa girilerek empedans hesaplanmıştır. Daha sonra devrede değiştirilmesi mümkün olan W ve G değerleri uygun hale getirilerek  $Z_0 = 50 \Omega$  olacak şekilde hesaplandı ve devre bu değerlere göre tasarlanmıştır.



Şekil 5.3. AppCAD arayüzünde uyumlandırma için yapılan hesaplama ekranı

### 5.3. RF-DA Dönüştürücünün LTSpice Benzetimi

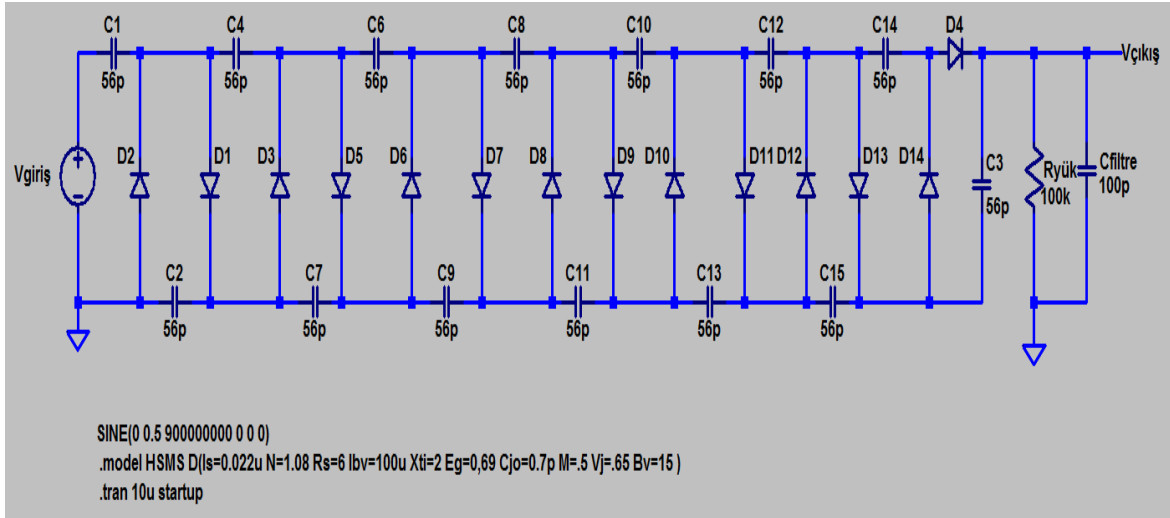
Devrenin benzetimi LTSpice programı ile yapılmıştır. Çalışmanın önceki bölümlerinde kullanılacak gerilim katlayıcının Villard Gerilim Katlayıcı olmasına karar verilmiş ve kat sayıları üzerine yapılan çalışma neticesinde gerilim katlayıcının yedi katlı olmasına karar verilmiştir. Ayrıca kullanılacak devre elemanları da belirlenmiş olduğundan benzetim programında kurulan devre prototip devreye eşdeğer olacaktır.

Benzetim programında kurulan devreye giriş gerilimi olarak 900 MHz, AA gerilim uygulanmıştır. Burada karşılaştırma yapılabilmesi adına farklı giriş gerilimleri uygulanmıştır. Sırasıyla 0 dBm, 4 dBm ve 10 dBm'e karşılık gelen gerilim değerlerinde ölçümler yapılmıştır.

Çalışmanın bu kısmında giriş gücü olarak kullanılacak miktarların birimi “dBm” olarak verilmektedir. dBm; kablosuz bir sistemin gücünü belirlemek için kullanılan bir kavramdır.

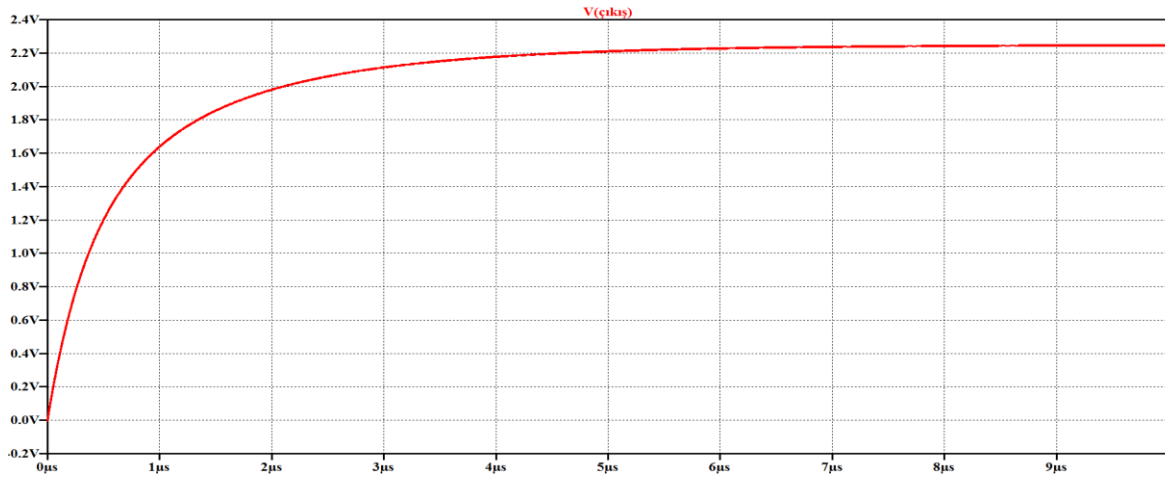
Burada “dB”; belirli bir referans güç ya da miktar seviyeye olan oranı belirten, genelde ses şiddeti için kullanılan logaritmik ve boyutsuz bir birim olan desibeli ifade ederken, “m” ise miliwattı ifade etmektedir. dBm; telekomünikasyon sistemlerinde, radyo frekans katlarında kullanılan bir seviye ölçüm birimi olmakla beraber seviyeler (+) ve (-) ile ifade edilir.

Şekil 5.4'te LTSpice programında kurulan yedi katlı Villard Gerilim Katlayıcının devre şeması gösterilmektedir. Ölçümler bu devre üzerinden yapılmıştır.



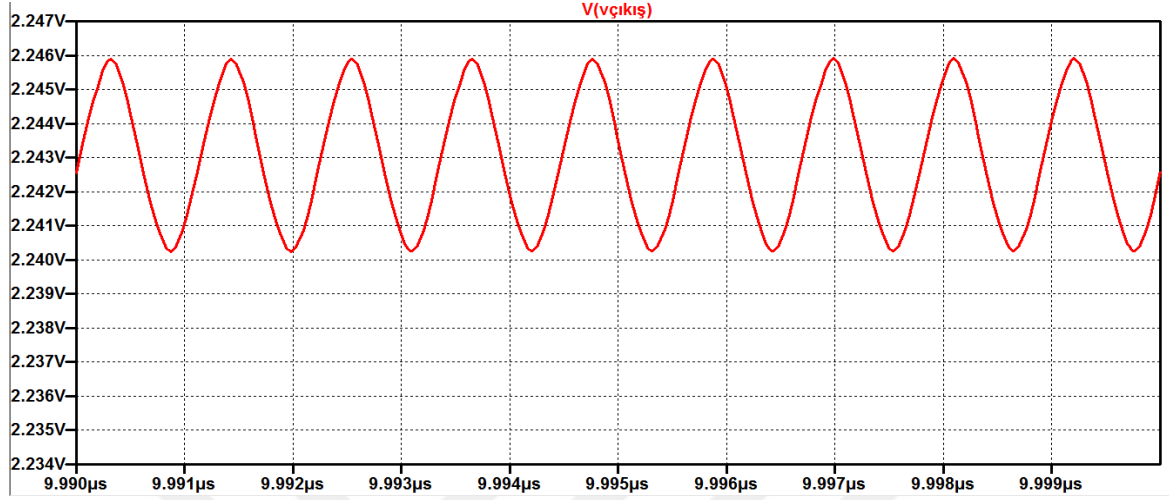
Şekil 5.4. Yedi katlı Villard gerilim katlayıcının LTSpice benzetimi

İlk olarak 0 dBm'e karşılık gelen 0,223 Volt (rms değeri) giriş gerilimi için ölçüm yapılmış karşılık olarak 2,25 Volt çıkış gerilimi ölçülmüştür. Çıkış geriliminin benzetim programı üzerinden alınan grafiği Şekil 5.5'te gösterilmektedir



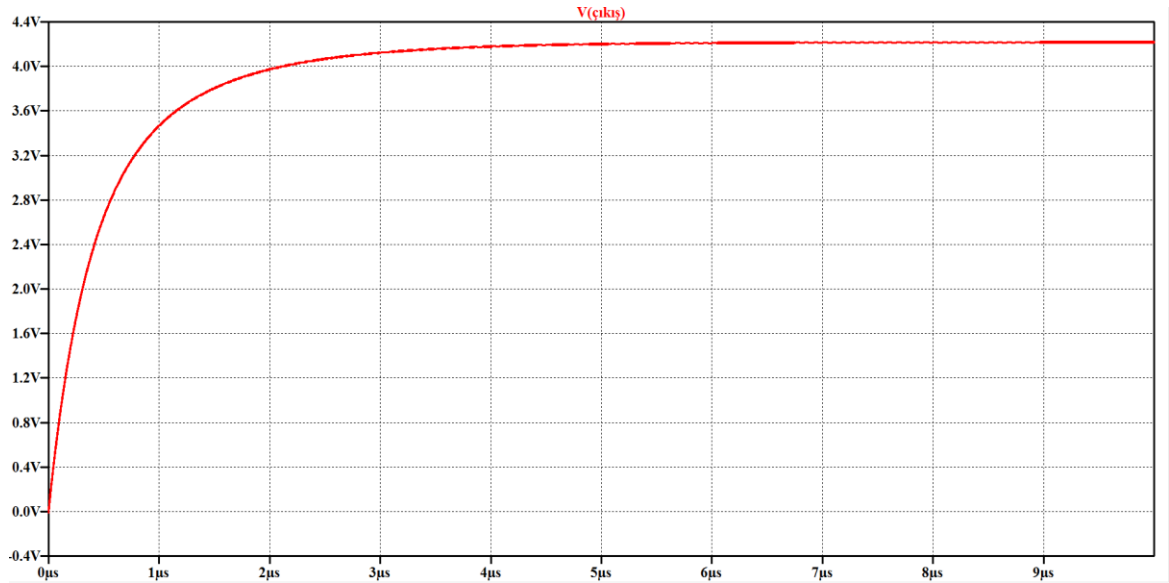
Şekil 5.5. Villard gerilim katlayıcının çıkış gerilimi grafiği (0 dBm) (zaman-gerilim)

Kapasitörlerin çıkış gerilimi üzerindeki etkisinin daha net görülebilmesi için daha kısa zaman aralığında gerilimin değişimi Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6. Villard gerilim katlayıcının kısa zaman aralığında çıkış gerilimi grafiği (0 dBm) (zaman-gerilim)

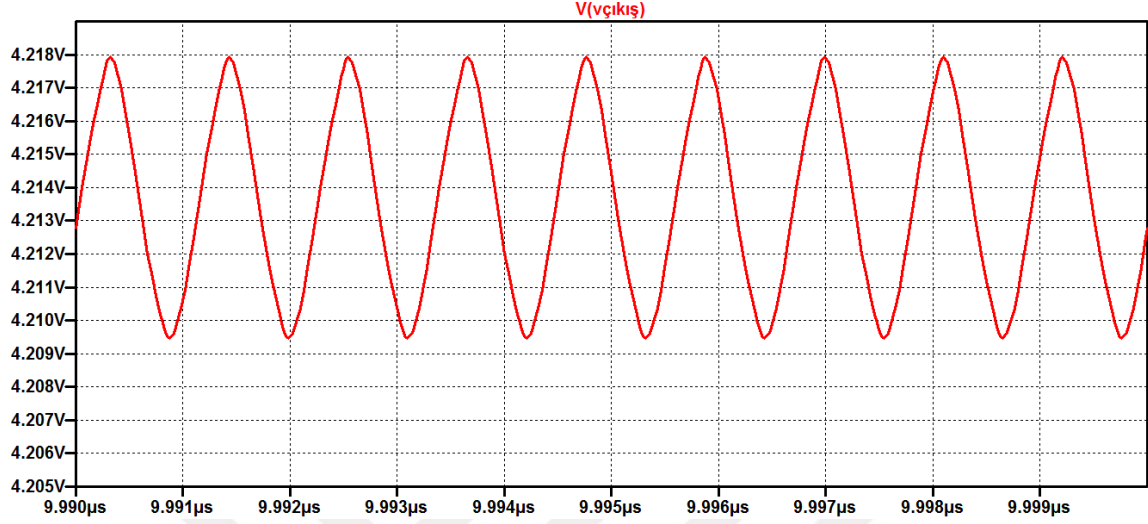
İkinci olarak giriş gerilimi aynı iken 4 dBm değerinde ölçümler gerçekleştirildi ve 4,21 Volt değerinde çıkış gerilimi ölçüldü. 4 dBm'e karşılık olarak rms değeri 0,354 Volt giriş gerilimi olarak kullanıldı. 4 dBm'de çıkış geriliminin benzetim programından elde edilen grafiği Şekil 5.7'de verilmektedir.



Şekil 5.7. Villard gerilim katlayıcının çıkış gerilimi grafiği (4 dBm) (zaman-gerilim)

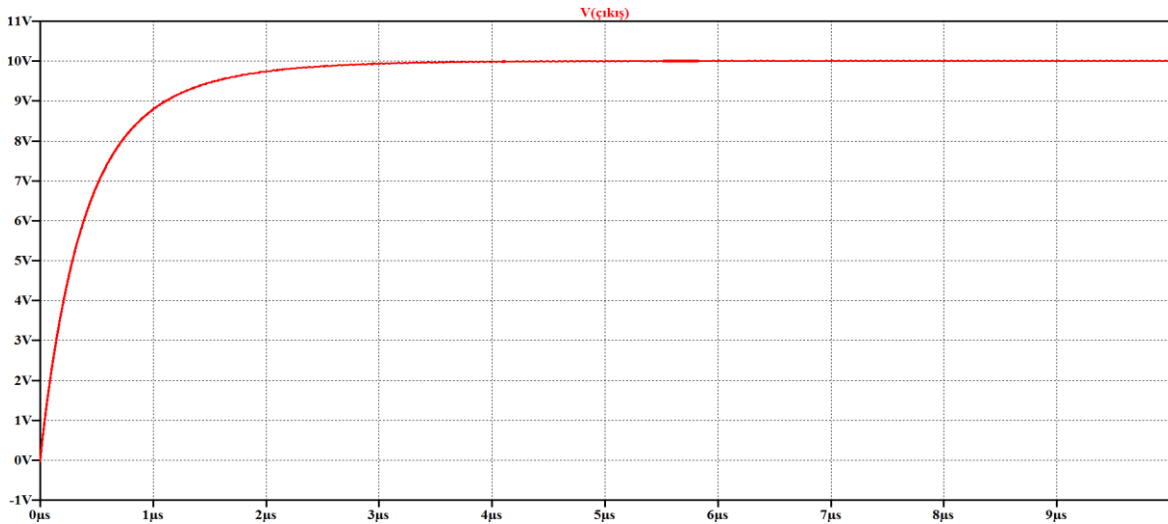


0 dBm'de yapılan çalışmaya eş şekilde 4 dBm'de de çok kısa zaman aralığında gerilimin değişimi Şekil 5.8'de verilmiştir.



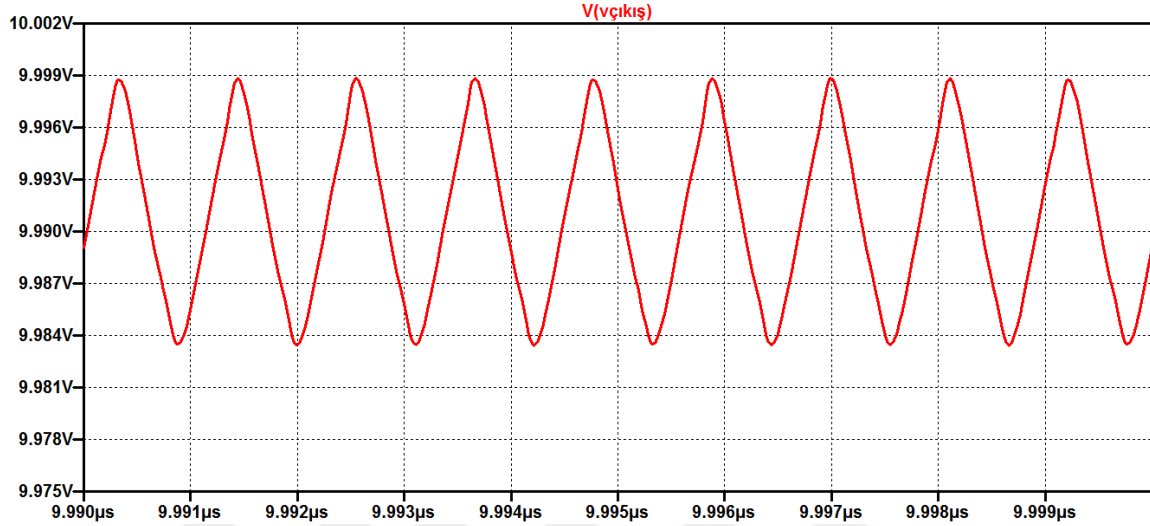
Şekil 5.8. Villard gerilim katlayıcının kısa zaman aralığında çıkış gerilimi grafiği (4 dBm) (zaman-gerilim)

Son olarak ölçümler 10 dBm'de gerçekleştirilmiştir. Benzetim programında kurulan devrede 10 dBm'de çıkış gerilimi olarak 9,98 Volt ölçülmüştür. 10 dBm'e karşılık olarak rms değeri 0,707 Volt giriş gerilimi olarak kullanıldı. Benzetim programından elde edilen çıkış gerilimi grafiği Şekil 5.9'da verilmektedir.



Şekil 5.9. Villard gerilim katlayıcının çıkış gerilimi grafiği (10 dBm) (zaman-gerilim)

Son olarak 10 dBm'de de çıkış geriliminin kısa zaman aralığında nasıl değiştiği Şekil 5.10'da verilmiştir.



Şekil 5.10. Villard gerilim katlayıcının kısa zaman aralığında çıkış gerilimi grafiği (10 dBm) (zaman-gerilim)

Çizelge 5.2'de benzetim programında yapılan ölçümlerin toplu gösterimi verilmiştir.

Çizelge 5.2. Benzetim programında farklı giriş değerlerinde çıkış gerilimleri

	0 dBm	4 dBm	10 dBm
$V_{\text{çıkış}}$	2,25 V	4,21 V	9,98 V

#### 5.4. Devrenin Gerçeklenmesi ve Ölçümler

Çalışmanın bu aşamasında prototip devre kuruldu ve benzetim programında kullanılan giriş değerleri prototip devreye uygulanarak ölçümler yapıldı. Resim 5.1'de kurulan devre görülmektedir.



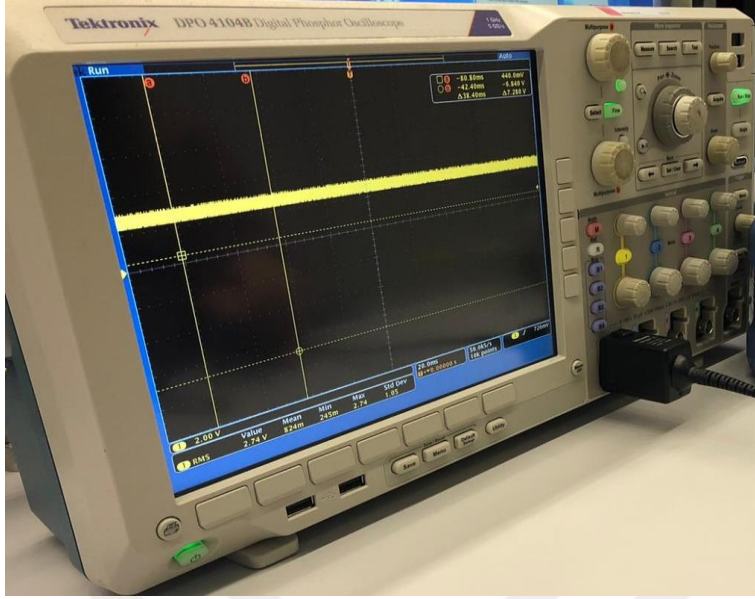
Resim 5.1. Prototip devre

Prototip devreye giriş sinyali Resim 5.2’de verilen sinyal jeneratörü ile sağlanmıştır.



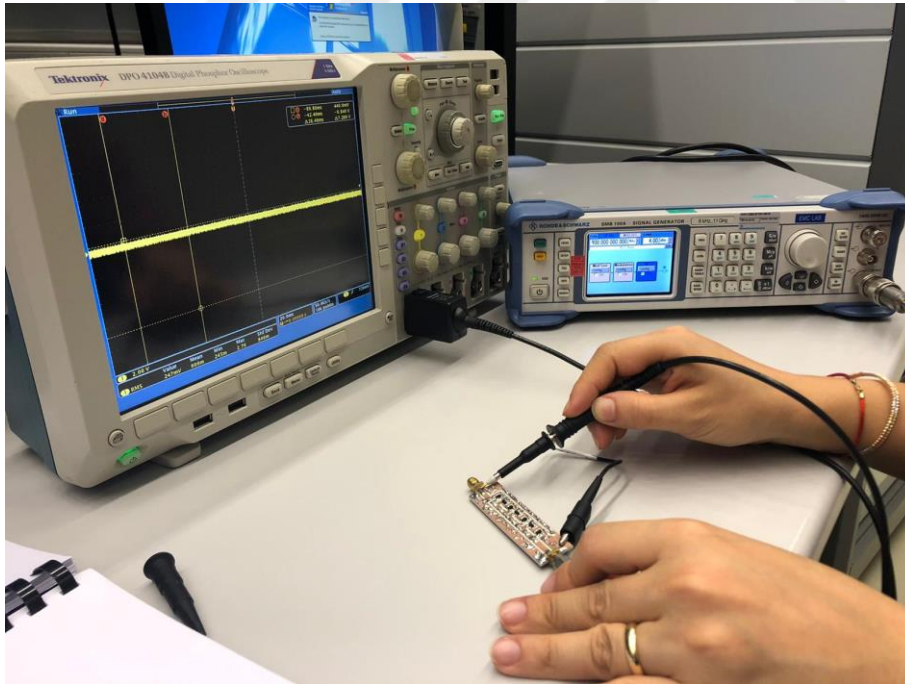
Resim 5.2. Sinyal jeneratörü

Devrenin ölçümleri için ise Resim 5.3’te verilen osiloskop kullanılmıştır.



Resim 5.3. Osiloskop

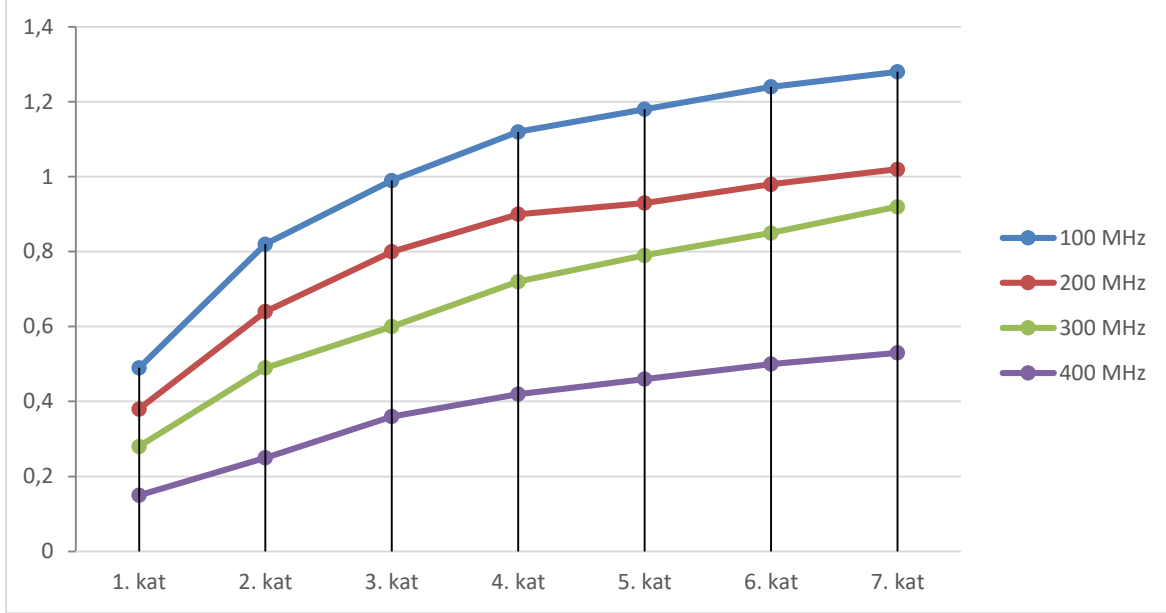
Resim 5.4'te ölçüm işleminin nasıl yapıldığı gösterilmekte olup, 900 MHz, 4 dBm giriş sinyaline karşılık devrenin çıkışından yapılan ölçüm görülmektedir.



Resim 5.4. Prototip devre üzerinden ölçüm yapılması.

İlk olarak  $Z_0 = 50\Omega$  olduğunda 0 dBm'in 0,223 Volt'a denk geldiği hesaplanmıştır. 100 MHz'den başlayarak 100 MHz'lik aralıklarla 900 MHz'e kadar ölçümler

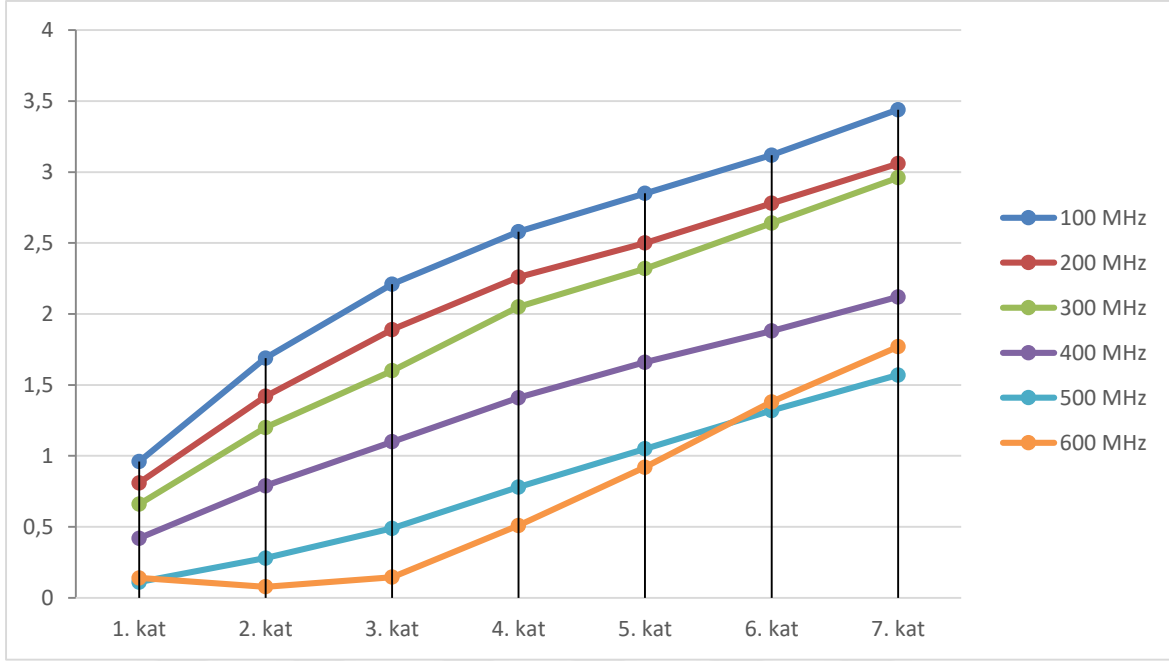
gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerde elde edilen sonuçlar Şekil 5.11'de verilen grafiğe aktarılmıştır.



Şekil 5.11.  $Z_0 = 50 \Omega$ , 0 dBm ölçümleri (kat sayısı-gerilim)

0 dBm'de prototip devre 100MHz, 200MHz, 300MHz ve 400MHz değerlerinde giriş gerilimini yükselterek doğru şekilde çalışmaktadır. 500Mhz ve daha yüksek frekanslarda ise prototip devre gerilimi yükselterek çıkış vermemektedir. Yaklaşık olarak üçüncü kattan sonra her frekans değerinde gerilim önce düşmekte sonra tekrar yükselmektedir. Ancak bu çalışma eğrisi düzenli ve sabit bir çıkış vermediğinden kullanıma elverişli değildir.

Ardından yapılan çalışmada ise  $Z_0 = 50\Omega$  değerini sabit olarak tutup 4 dBm'e karşılık gelen 0,354 Volt rms giriş geriliminde ölçümler yapılmıştır. Yine aynı frekans değerlerinde ölçümler yapılarak elde edilen sonuçlar Şekil 5.12'de verilen grafiğe aktarılmıştır.

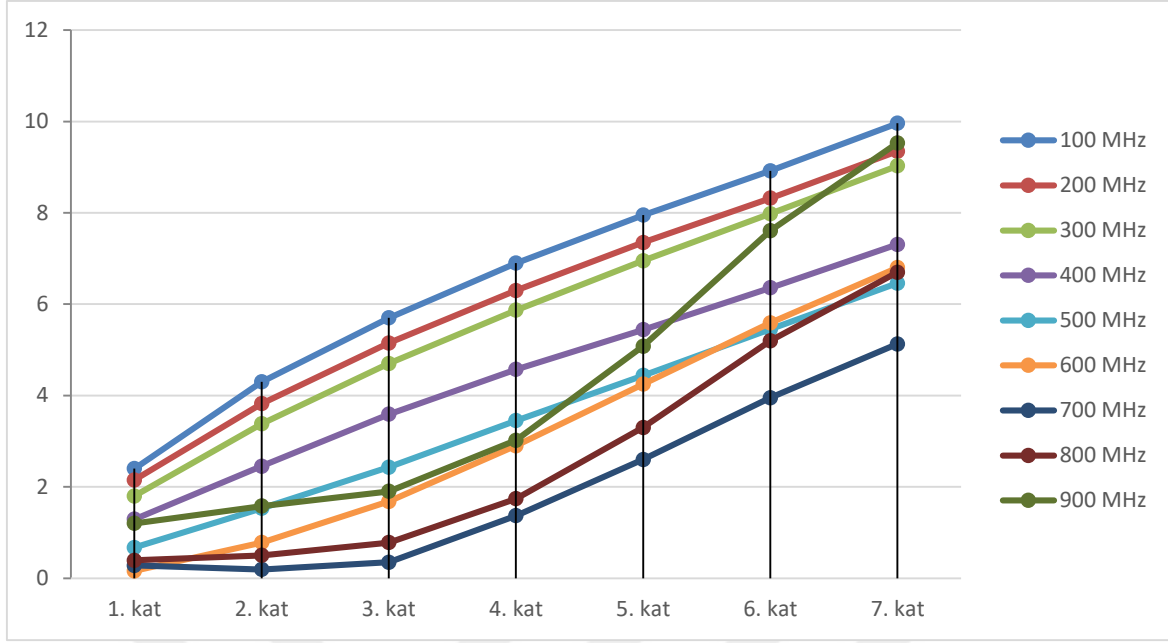


Şekil 5.12.  $Z_0 = 50 \Omega$ , 4 dBm ölçümleri (kat sayısı-gerilim)

4 dBm'de sonuç analizleri yapıldığında görülmektedir ki, prototip devre 100MHz, 200MHz, 300MHz, 400MHz ve 500MHz frekanslarında giriş gerilimini katsayısıyla orantılı şekilde yükselterek çıkış gerilimi vermektedir. 600 MHz ve daha yüksek frekanslarda çıkış geriliminin kat sayısı ile orantılı olarak artışında bozulma görülmektedir. Her ne kadar son kata gelinirken çıkış geriliminde artış görülse de ara katlarda inişli-çıkışlı sonuçlar vermesi uygulama sahasında problem yaratma potansiyeline sahiptir.

Ölçümler son olarak  $Z_0 = 50\Omega$  değerinin sabit kalması koşulu ile 10 dBm'e karşılık gelen 0,707 Volt rms giriş geriliminde yapılmıştır. Yine aynı frekans değerlerinde ölçümler yapılarak elde edilen sonuçlar Şekil 5.13'te verilen grafiğe aktarılmıştır.





Şekil 5.13.  $Z_0 = 50 \Omega$ , 10 dBm ölçümleri (kat sayısı-gerilim)

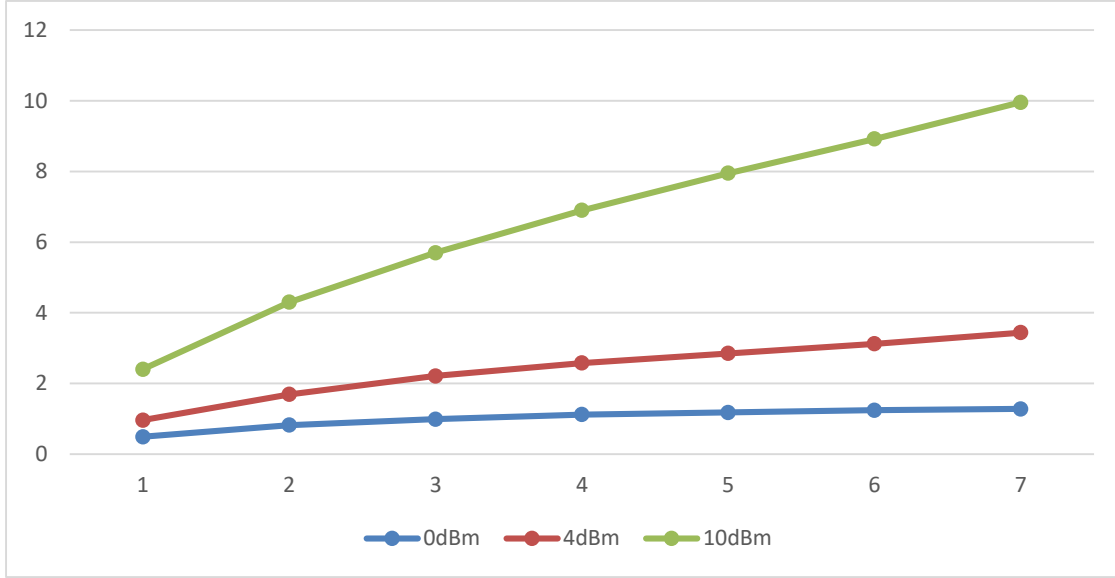
Yapılan ölçümler neticesinde görülmektedir ki, 10 dBm gibi önceki giriş gerilimlerine göre daha yüksek enerji kaynağında prototip devre istenilen çalışma eğrisini göstermiştir. Çıkış geriliminin artış eğrisinde doğrusallıklardan sapmalar olmasına rağmen, önceki ölçümlerde görülen çıkış geriliminde azalma olma durumuyla hiç bir frekans değerinde karşılaşılmamıştır.

900 MHz frekans değerinde prototip devrenin yedinci katından alınan çıkış gerilim değerleri Çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Prototip devre çıkış gerilimleri

	0 dBm	4 dBm	10 dBm
$V_{\text{çıkış}}$	1,28 V	3,30 V	9,53 V

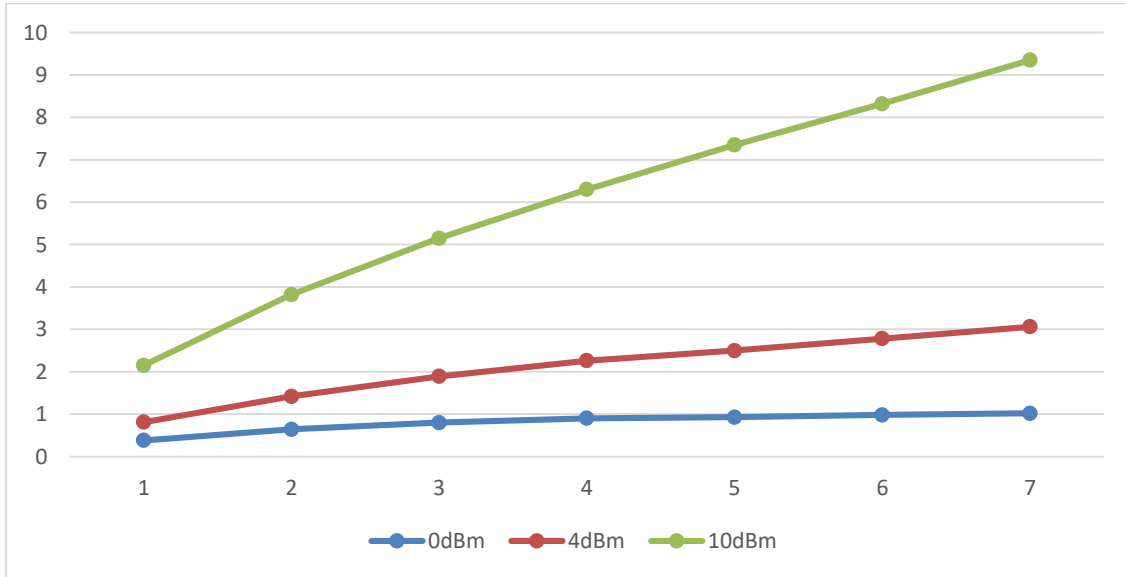
Aynı frekans değerinde ve farklı giriş gerilimlerinde elde edilen veriler karşılaştırılarak yüksek çıkış gerilimi elde edilen şartlar belirlenmeye çalışılmıştır. Öncelikli olarak Şekil 5.14'te 100 MHz'de farklı giriş gerilimlerine karşılık gelen sonuçlar gösterilmektedir.



Şekil 5.14. 100 MHz’de 0 dBm, 4 dBm ve 10 dBm’in karşılaştırılması (kat sayısı-gerilim)

Şekil 5.14’ten görüldüğü üzere düşük güç seviyelerinde kat sayısına karşılık olarak aynı lineerlikte çıkış gerilimi sonuçları elde edilemiyorken, yüksek giriş gücünden yüksek çıkış gücü elde edilebiliyor.

Ardından aynı karşılaştırma işlemi 200 MHz’de yapılmıştır. Karşılaştırma grafiği Şekil 5.15’te verilmektedir.

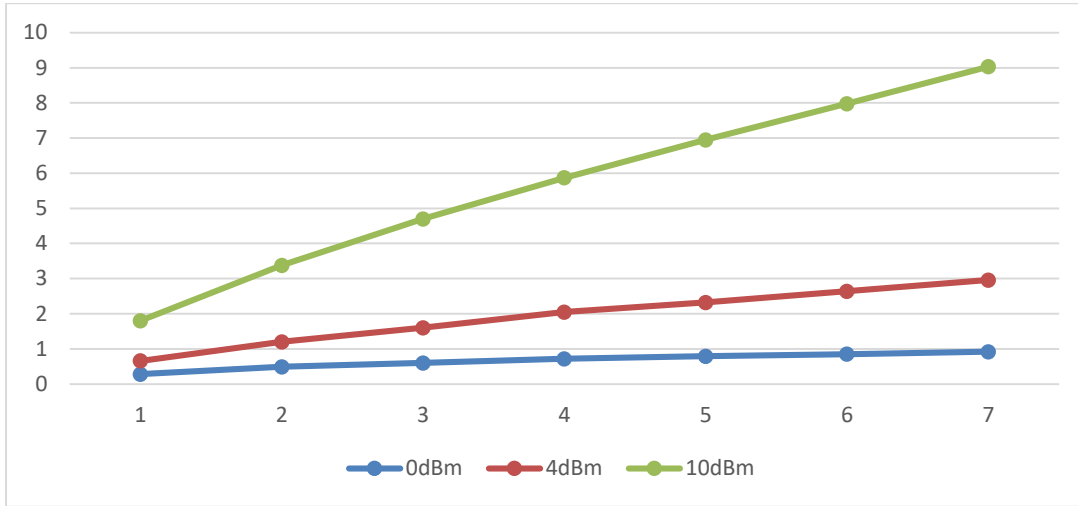


Şekil 5.15. 200 MHz’de 0 dBm, 4 dBm ve 10 dBm’in karşılaştırılması (kat sayısı-gerilim)



Şekil 5.15'ten görüldüğü üzere düşük güç seviyelerinde kat sayısına karşılık olarak aynı lineerlikte çıkış gerilimi sonuçları elde edilemiyorken, yüksek giriş gücünden yüksek çıkış gücü elde edilebiliyor. Bu durum 100 MHz'deki sonuçlar ile benzerlik göstermektedir.

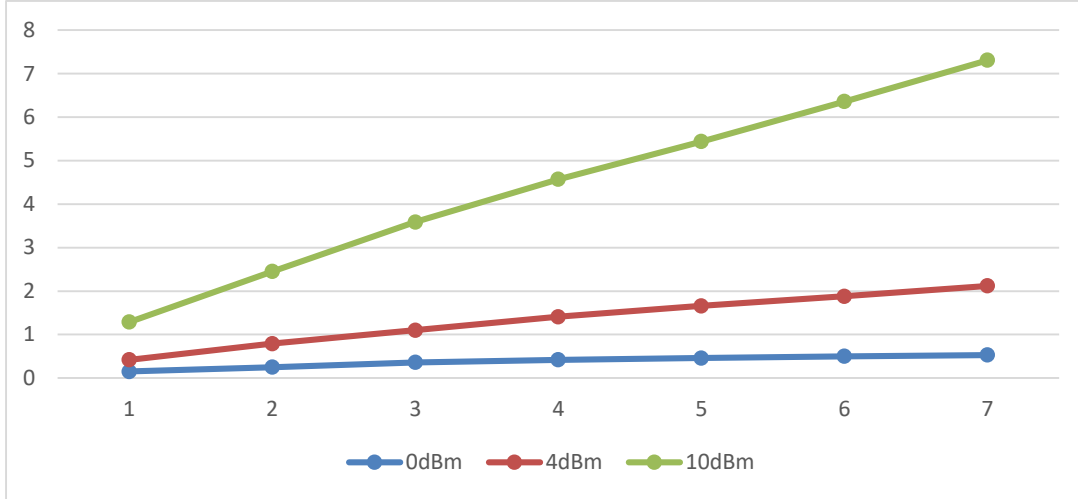
Bir sonraki aşamada karşılaştırma işlemi 300 MHz'de yapılmış ve Şekil 5.16'da karşılaştırma grafiği verilmiştir.



Şekil 5.16. 300 MHz'de 0 dBm, 4 dBm ve 10 dBm'in karşılaştırılması (kat sayısı-gerilim)

100 MHz ve 200 MHz'e benzer şekilde düşük güçlerde istenilen lineerlikte çıkış gerilimi elde edilemiyorken ölçüm yapılan en yüksek giriş gerilimi seviyesine karşılık olarak yüksek çıkış gerilimi elde edilmiştir.

Karşılaştırma son olarak 400 MHz değerinde yapılarak Şekil 5.17.'ye veriler aktarılmıştır.



Şekil 5.17. 400 MHz'de 0 dBm, 4 dBm ve 10 dBm'in karşılaştırılması (kat sayısı-V)

Prototip devre üzerinden ölçümler 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz, 800 MHz ve 900 MHz değerlerinde de yapılmasına karşın bu değerler için karşılaştırma grafikleri oluşturulmamıştır. Çünkü 500 MHz ve üzeri frekans değerlerinde devre alçak geçiren RC filtre gibi davranış sergilemiş olabileceğinde yapılan ölçümler sağlıklı sonuç vermemiştir.

### 5.5. Benzetim Devresi ile Prototip Devrenin Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

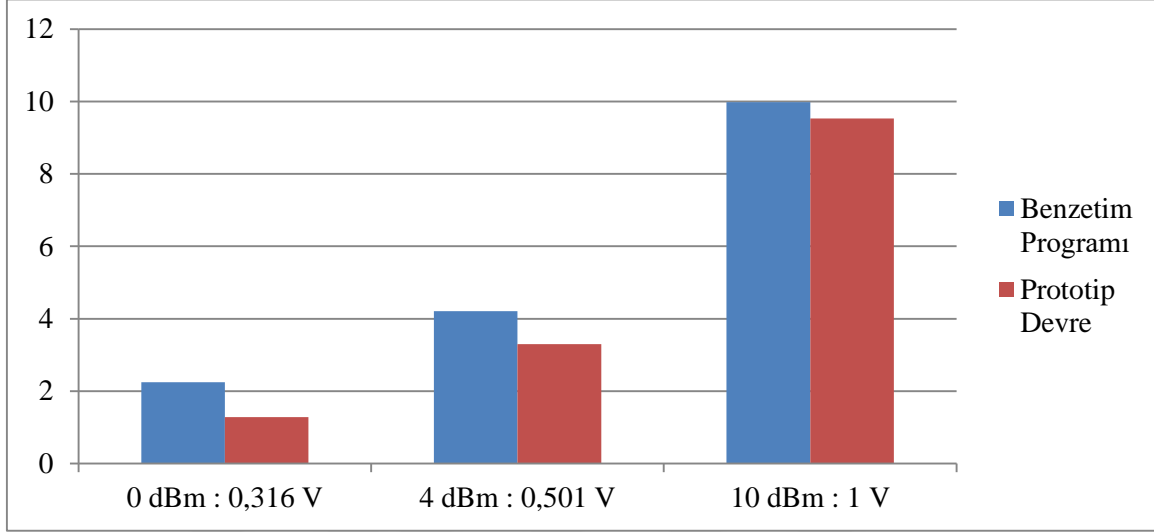
Radyo frekansından enerji hasat edilmesi amacıyla başlanılan bu çalışmanın son aşamasında sanal ve gerçek ortamda radyo frekansından enerji üretimi sağlanmış olup aralarında farklar bulunmaktadır. Anlamlı sonuçlara ulaşabilmek adına bu sonuçların karşılaştırılması gerekmektedir.

Çizelge 5.4 elde edilen çıkış gerilimlerini göstermektedir.

Çizelge 5.4. Ölçülen çıkış gerilimleri

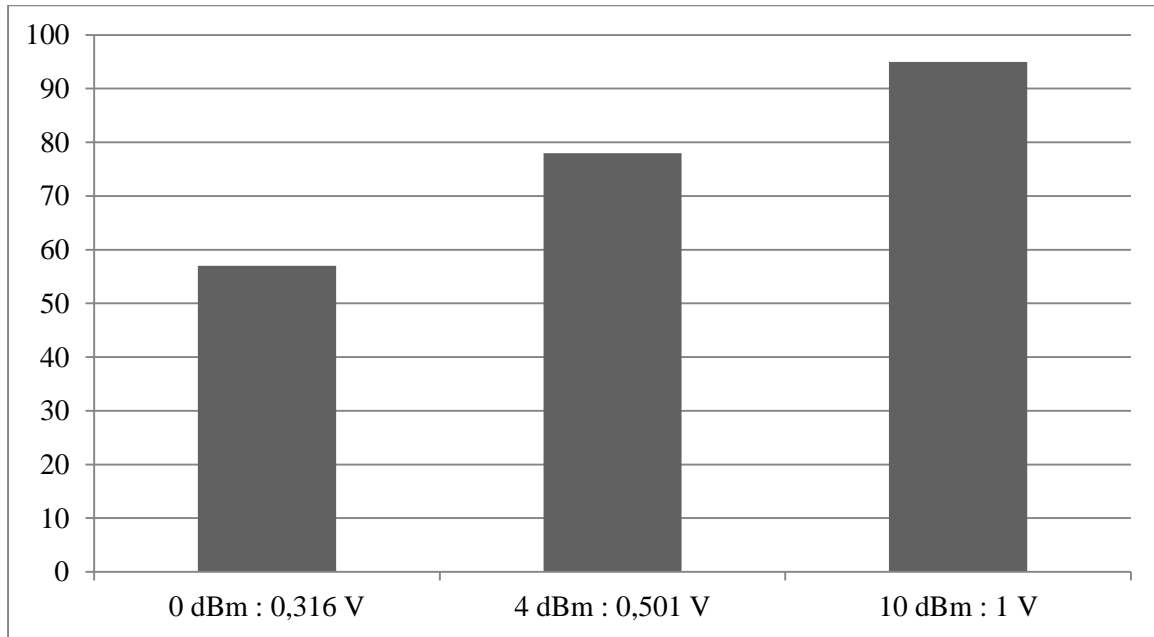
	Benzetim Uygulaması $V_{\text{çıkış}}$	Prototip Devre $V_{\text{çıkış}}$
0dBm-900 MHz	2.25 V	1.28 V
4dBm-900MHz	4.21 V	3.30 V
10dBm-900MHz	9.98 V	9.53 V

Benzetim programı ile prototip devrenin çıkış gerilimlerinin arasındaki farkın daha net görülebilmeye ilişkin olarak Şekil 5.18 kıyaslama grafiği olarak verilmiştir.



Şekil 5.18. Çıkış gerilimlerinin karşılaştırılması

Şekil 5.18'de verilen kıyaslama grafiği farklı giriş gerilimleri için ölçülen çıkış gerilimleri arasındaki farkların yakın olduğu izlenimi yaratmasına rağmen daha anlamlı bir sonuca ulaşmak adına Şekil 5.19'da çıkış gerilimlerinin birbirine oranlanması ile ulaşılan sonuçlar grafiğe aktarılmıştır.



Şekil 5.19. Çıkış gerilimlerinin oranlanması

0 dBm'de çıkış gerilimleri arasındaki fark 0,97 Volt iken, prototip devrenin çıkış gerilimi benzetim programının çıkış geriliminin yaklaşık olarak %57'sine denk gelmektedir.

4 dBm'de çıkış gerilimleri arasındaki fark 0,91 Volt iken, prototip devrenin çıkış gerilimi benzetim programının çıkış geriliminin yaklaşık olarak %78'sine denk gelmektedir.

10 dBm'de çıkış gerilimleri arasındaki fark 0,45 Volt iken, prototip devrenin çıkış gerilimi benzetim programının çıkış geriliminin yaklaşık olarak %95'sine denk gelmektedir.

Çalışmanın bu bölümünde öncelikli olarak kullanılmasına daha önceki bölümde karar verilen Villard Gerilim Katlayıcının hangi devre elemanları ile kurulacağına karar verilmiştir. Kapasitör ve diyot seçiminin ardından empedans uyumlaştırma ile ilgili olarak kullanılan yöntem ve program ile ilgili bilgi verilmiştir. Devre kurulumu için gerek şartlar sağlandıktan sonra öncelikli olarak benzetim programında devre kurularak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ardından prototip devre benzetim programında kurulan devreye eş olacak şekilde kuruldu ve benzetim programında uygulanan giriş gerilimlerinin aynısını uygulananak aynı ölçümler yapıldı. Son olarak ölçüm sonuçları arasındaki farklar çizelge ve şekiller yardımı ile gösterilmiştir.



## 6. SONUÇ

Bu çalışmada mevcut enerji üretim yöntemlerine alternatif olarak çevremizde yaygın olarak bulunan radyo frekanslarından enerji hasadı yapılması amaçlanmıştır. Bu sayede mikro seviyelerde enerji üretimi yaparak benzer seviyelerdeki enerjiyi tüketerek çalışan elektronik cihazların bataryadan bağımsız veya bataryalarının sürekli şarj edilerek kesintisiz kullanımının mümkün olduğu gösterilmek istenmiştir.

Elektronik cihazların sürekli olarak kullanılması fikrinin hayata geçirilebilmesi için mikro enerji hasadı çok önemli bir noktadadır. Kalp pili, işitme cihazı gibi medikal aygıtların değişikliğe ihtiyaç duymadan sürekli kullanılabilmesi, sabit enerji kaynağından uzak yer - yön tayini için kullanılan GPS cihazlarının sürekli kullanılabilmesi, askeri veya sivil telsizlerin sürekli olarak kullanılabilmesine imkan vermesi gibi ve daha birçok örnekle çeşitlendirilebilecek noktada mikro enerji hasadı büyük öneme sahiptir.

Bu kapsamda öncelikli olarak mikro enerji hasadı çeşitleri anlatılmıştır. Çalışmanın devamında radyo frekansından enerji hasat edilmesini temel alacak sistem tasarımı üzerine araştırma yapılmıştır. Kurulması planlanan devrede kullanılacak gerilim katlayıcının belirlenmesine yönelik olarak çalışma yapılmıştır. Ardından devrenin elemanlarının hangi gerekçeler ile seçildiği anlatılarak sırasıyla benzetim programında ve ardından prototip devre üzerinde ölçümler yapılarak sonuçlar elde edilmiştir.

Benzetim programı ile prototip devrenin ölçüm sonuçları arasında farklılıklar olduğu görülmektedir. Bu farklılığın temel sebebi prototip devrenin maruz kaldığı çevresel etkilerdir. Çevresel etkiler hem gürültü gibi devreye dışarıdan müdahale boyutunda iken ayrıca da uygulanan gerilimin kaynağı olan sinyal jeneratörünün benzetim programındaki kaynak gibi yüzde yüz doğrulukla çalışmama ihtimalidir.

Sonuçlar arasında görülen farklılıkların bir başka sebebi ise prototip devrenin kurulduğu baskı devre kartının kazıma kartı olması sebebiyle normalden fazla kayıp olmuştur. Bu kaybın ortadan kaldırılmasına ilişkin olarak önerilerle ilgili kısımda verilmiştir. Ayrıca devre elemanlarının lehimlenmesi de profesyonel olmadığından bu noktalarda kayıplar olabilmektedir.

Bu çalışmanın benzerlerinin daha sağlıklı sonuçlar verebilmesi adına çalışma süresince karşılaşılan bazı problemlerin çözümüne ilişkin önerilerde bulunmaktadır. Öncelikli olarak yukarıda belirtildiği üzere baskı devre kartının kazıma kartı olması sebebiyle oluşan kayıpların önüne geçmek için kart üretimi profesyonelce yapılan kurum veya kuruluşlara yaptırılabilir. Benzer şekilde lehim uygulamasının profesyonelce yapılması da devredeki kayıpları azaltacaktır.

Devre girişinin maruz kaldığı gürültülerin süzülebilmesi için filtre tasarlanabilir. Bu sayede yüksek frekanslardaki gürültüler süzülür ve üretim için kaynak olarak kullanılması istenen frekans aralığındaki radyo sinyalleri toplanır.

Sonuçlar incelendiğinde görülüyor ki daha yüksek giriş gücü altında benzetim programı ile prototip devrenin çıkış gerilimleri arasındaki fark azalmaktadır. Girişe ne kadar yüksek gerilim uygulanırsa devre o kadar verimli çalışacaktır. Buradan yola çıkarak tasarlanacak devrelerin havada yoğun olarak bulunan frekans aralığındaki sinyal gruplarını seçmesi önem arz etmektedir.

Bir başka geliştirilebilir nokta ise bu çalışmanın konusu olan yüksek frekanslar için LTSpice programının iyi bir benzetim programı olmadığından dolayı yüksek frekanslarda daha doğru sonuçlar verecek bir program kullanılabilir olmasıdır.

Sonuç olarak mikro enerji hasadı her ne kadar düşük seviyelerde enerji üretimi yapılmasını öngören bir alan olsa da enerji seviyesinin aksine büyük öneme sahip ve elektronik cihazların kullanım ömürlerini kritik şekilde etkileyebilecek bir elektrik üretim yöntemidir.

## KAYNAKLAR

1. Priya, S. and Inman, D.J. (Editörler). (2009). *Energy Harvesting Technologies*, New York: Springer. 355-363.
2. Çetin, H. G. (2015). *Geniş Bantlı ve Düşük Frekanslı Mekanik Titreşimler için Esnek Piezoelektrik Enerji Hasadı Sistemi Tasarımı ve Üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. 4-7.
3. Tekir, O. (2009). *Havada Yayınım Yapan Elektromanyetik Dalgalardan Enerji Hasat Etmede Verimliliği Etkileyen Faktörlerin Analizi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. 2-16.
4. Woias, P. (2015, Aralık). *Thermoelectric Energy Harvesting from Small and Variable Temperature Gradients*. 12. Dresdner Sensor Sempozyumunda sunuldu, Almanya.
5. Rabaey, J., Burghardt, F., Steingart, D., Seeman, M. and Wright, P. (2007, Aralık) *Energy Harvesting - A Systems Perspective*. Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü Uluslararası Elektron Cihazları Toplantısında sunuldu, Washington, DC.
6. Boisseau, S., Despesse, G. and Seddik, B.A. (2012). *Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting*. Small-Scale Energy Harvesting, Rijeka: InTech, 1–39.
7. Almoneef, T. S. and Ramahi, O. M. (2015). Metamaterial Electromagnetic Energy Harvester with Near Unity Efficiency. *Applied Physics Letters*, 106(15), 153902.
8. Shenck, N. S. and Paradiso, J. A. (2001). Energy Scavenging with Shoe-mounted Piezoelectrics. *Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü Micro*, 21(3), 30–42.
9. El-Hami, M., Glynne-Jones, P., White, N. M., Hill, M., Beeby, S., James, E., Brown, D. and Ross, J. N. (2001). Design and fabrication of a new vibration-based electromechanical power generator. *Sensors and Actuators A: Physical*, 92(1-3), 335–342.
10. Beeby, S., Tudor, M. and White, N. (2006). Energy Harvesting Vibration Sources for Microsystems Applications. *Measurement Science and Technology*, 17(12), 175.
11. Jiang, Y., Shiono, S., Hamada, H., Fujita, T., Higuchi, K. and Maenaka, K. (2010). Low-frequency Energy Harvesting using A Laminated PVDF Cantilever with A Magnetic Mass. *PowerMEMS*, 21(10), 375–378.
12. Roundy, S. and Wright, P. K. (2004). A Piezoelectric Vibration Based Generator for Wireless Electronics. *Smart Materials and Structures*, 13(5), 1131–1142.
13. Mitcheson, P.D., Reilly, E.K., Toh, T., Wright, P.K. and Yeatman, E.M. (2006). Transduction Mechanisms and Power Density for MEMS Inertial Energy Scavengers. *PowerMEMS*, 17(9), 275-278.



14. Karakuş, C. ve Tekir, O. (2009). *Elektromanyetik Dalgalardan Enerji Hasat Etmek*, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
15. Devi, K. K. A., Din, N. M. and Chakrabarty, C. K. (2012). Optimization of the voltage doubler stages in an RF-DC convertor module for energy harvesting. *Circuits and Systems*, 3(03), 216-222.
16. Cansiz, M., Altinel, D. and Kurt, G.K. (2019). Efficiency in RF energy harvesting systems: A comprehensive review. *Energy*, 174, 292-309.
17. Lee, T. H. (2004). *The Design of CMOS Radio Frequency Integrated Circuits* (İkinci Baskı). Birleşik Krallık: Cambridge Üniversitesi Yayınevi, 764-770.
18. Nechibvute, A., Chawanda, A., Taruvinga, N. and Luhanga, P. (2017). Radio frequency energy harvesting sources. *Acta Electrotechnica et Informatica*, 17(4), 19-27.
19. Curty, J. P., Joehl, N., Krummenacher, F., Dehollain, C. and Declercq, M. J. (2005). A model for/spl mu/-power rectifier analysis and design. *Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü Transactions on Circuits and Systems*, 52(12), 2771-2779.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : GÜLCAN, Bahanur  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 11.04.1992, Ankara  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : 0 (554) 694 40 44  
 e-mail : bahanurguven@gmail.com



### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarih
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi / Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2014
Lise	TOKİ Anadolu Lisesi	2010

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	ASELSAN	Tedarik Mühendisi
2016-2017	Endoks	Donanım-Tasarım Mühendisi
2015-2016	Süreç	Sistem Mühendisi
2014-2015	GATE Elektronik	Donanım Mühendisi

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

- Gülcán, B. (2019, Aralık) *Mikro Enerji Hasadı ve RF-DA Dönüştürücü Devre*, BİLTEK Uluslararası Bilim, Teknoloji, ve Sosyal Bilimlerde Güncel Gelişmeler Sempozyumunda sunuldu, Ankara.

### Hobiler

Tiyatro, Kitap, Seyahat



**GAZİ GELECEKTİR...**