



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

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**Wi-Fi FREKANSINDA RF ENERJİ HASADI İÇİN PARAMETRE
ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sertaç Kaan TOKYAY

DANIŞMAN

Doç. Dr. Filiz SARI

AKSARAY, 2024

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 212363401 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Sertaç Kaan TOKYAY tarafından hazırlanan “**Wi-Fi FREKANSINDA RF ENERJİ HASADI İÇİN PARAMETRE ANALİZİ**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Filiz SARI

Aksaray Üniversitesi

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

Üye: Doç. Dr. Bahadır AKBAL

Aksaray Üniversitesi

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

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Selçuk TAŞCIOĞLU

Ankara Üniversitesi

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

Tez Savunma Tarihi: 29/01/2024

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

.....

Prof. Dr. Mehmet Ali HINIS

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

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

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

Sertaç Kaan TOKYAY

TEŞEKKÜR

Canım oğlum Tuğra'm, ben rahmetli babamın şahsıyla ve yaptıklarıyla her zaman gurur duydum. Nur içinde yatsın. Dilerim O da benimle gururlanmıştır. İstedim ki, senin de benimle her zaman gurur duyabileceğin bir eserim olsun. Ve işte bu ürün ortaya çıktı. Sen bilmesen de bana verdiğin manevi destek için sana çok teşekkür ederim.

Yoğun çalışmalarımın otürü sabır gösterip, bana katlanan eşim Miray, teşekkür ederim.

Kıymetli hocam Sayın Doçent Doktor Filiz SARI Hanımefendi, ne mutlu bana ve bunca öğrencinize ki, sizin gibi bir akademisyenin bilgilerinden faydalanabildik. Sizin bana olan güveniniz, verdiğiniz ümit ve desteğiniz olmasa başaramazdım. Sizin başarılarınıza şahit olmak en büyük dileklerimdir. Varolunuz, hiç eksik olmayınız. Minnettarım.

Sertaç Kaan TOKYAY
AKSARAY, 2024

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 RF Sinyallerinden Enerji Hasadının Tarihçesi	2
1.2 Wi-Fi Protokolü.....	4
1.3 Çalışmanın Amacı ve Önemi	4
2. RF SİNYALLERİNDEN ENERJİ HASAT EDİLMESİ.....	7
2.1 Anten	8
2.2 Gerilim Çoklayıcı	8
2.3 Empedans Uyumlama Devresi	13
2.4 DC Geçiş Filtresi	14
2.5 Yük Direnci	14
3. DEVRE TASARIM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ	16
3.1 Doğrultucu Devrenin Oluşturulması	17
3.2 Empedans Uyumlama Devresi Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi.....	18
3.3 Devre Elemanlarının Murata Devre Elemanları İle Değiştirilmesi.....	20
3.4 Murata Devre Elemanları İle Oluşturulan Devreye İletim Hattı Eklenmesi	22
3.5 Maksimum Verimi Veren Yük Direncinin Belirlenmesi	23
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	26
4.1 Enerji Hasat Devresi Tasarım Parametrelerinin 2,45 GHz Frekansında Çalışan Bir Kademeli Devre İçin Belirlenmesi.....	26
4.2 Kademe Sayısının 2,45 GHz Frekansında Çalışan Gerilim Çoklayıcı Devre Üzerindeki Etkisi	30
4.3 Enerji Hasat Devresi Tasarım Parametrelerinin 5,8 GHz Frekansında Çalışan Bir Kademeli Devre İçin Belirlenmesi.....	41
4.4 Kademe Sayısının 2,45 GHz Frekansında Çalışan Gerilim Çoklayıcı Devre Üzerindeki Etkisi	46
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	57
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ.....	65

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Wi-Fi FREKANSINDA RF ENERJİ HASADI İÇİN PARAMETRE ANALİZİ

Sertaç Kaan TOKYAY

Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Filiz SARI

ÖZET

Bu çalışmada, üretici firmalar tarafından üretilmiş olan toplu elemanların (Lumped Components) kullanımı göz önünde bulundurularak 2,45 GHz ve 5,8 GHz frekanslarında 1. kademeden 6. kademeye kadar RF Enerji Hasadı devreleri incelenmiştir. Bütün analizler simülasyon yoluyla yapıp simülasyonlar, Advanced Design System (ADS) 2016 programı kullanılarak yapılmıştır. Sistem 50 Ω iç dirence sahip bir antenden, 2,450 GHz ve 5,8 GHz (Wi-Fi) frekansında çalışacak şekilde düşünülmüştür. Doğrultma devresi için HSMS2850, HSMS2852, HSMS285B, HSMS285C, HSMS2860, HSMS2862, HSMS286B, HSMS2820, HSMS2822, HSMS2810 ve SMS7630 Schottky diyotlarının kullanımı göz önünde bulundurulmuştur. Her bir diyot için bu frekansta sistemin veriminin en yüksek olduğu yük direnci -30 dBm ile 0 dBm aralığındaki giriş gücü için incelenmiştir. Verimi yükseltmek amacıyla L tipi (L-C) empedans uyumlama devresi tasarımı yapılmış, elde edilen değerlere yakın değerleri veren Murata firmasının ürünlerinin parametreleri kullanılmıştır. Son olarak, üretici firma ürünlerinin kullanılmasıyla ideal değerlerden uzaklaşan verimi ideale yaklaştırabilmek için açık – seri iletim hattı (Transmission Line (TL)) kullanılarak, elde edilen sistemin çıkış gerilimi ve verimi analiz edilmiştir. İncelenen diyotlar arasında 2,45 GHz frekansında en yüksek verim SMS7630 diyotu için 2,7 k Ω yük direncinde -1 dBm giriş gücünde % 46 olarak, en yüksek çıkış gerilimi ise HSMS286B diyotu için 3. kademede 36,6 k Ω yük direncinde 0 dBm giriş gücünde 3 V olarak elde edilmiştir. 5,8 GHz frekansında en yüksek verim SMS 7630 diyotu için 2 k Ω yük direncinde 0 dBm giriş gücünde % 35 olarak, en yüksek çıkış gerilimi ise SMS7630 diyotu için 6. kademede 15,3 k Ω yük direncinde 0 dBm giriş gücünde 1,67 V olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji Hasadı, Gerilim Çoklayıcı, Empedans Uyumlama, Schottky Diyot, Düşük Güç Uygulamaları.

Ocak, 2024; 64 sayfa

M.Sc. THESIS

PARAMETER ANALYSIS FOR RF ENERGY HARVESTING AT Wi-Fi FREQUENCY

Sertaç Kaan TOKYAY

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical-Electronics Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Filiz SARI

ABSTRACT

In this study, circuit of 2.45 GHz and 5,8 GHz RF energy harvesting from 1st stage to 6th stage which is considered that use of lumped components that produced by manufacturing companies, has been studied. All analyzes have been made through simulation using the Advanced Design System (ADS) 2016 program. The system was designed to operate at a frequency of 2.450 GHz and 5,8 GHz (Wi-Fi) with a 50 Ω internal resistance antenna. For the rectification circuit, the use of HSMS2850, HSMS2852, HSMS285B, HSMS285C, HSMS2860, HSMS2862, HSMS286B, HSMS2820, HSMS2822, HSMS2810, and SMS7630 Schottky diodes have been considered. The load resistance at which the system efficiency is highest at this frequency and the input power ranging from -30 dBm to 0 dBm were determined, for each diode. An L-type (L-C) impedance matching circuit design was developed to enhance the efficiency, and Murata products parameters that closely match the obtained values were used. Finally, the output voltage and efficiency of the resulting system were analyzed by using an open-serial transmission line (TL) in order to bring the efficiency, which is away from ideal values by using the manufacturer's products, closer to the ideal. Among the examined diodes, the highest efficiency was obtained for SMS7630 diode as 46% at a load resistance of 2.7 k Ω and -1 dBm input power. The highest output voltage was obtained for HSMS286B diode as 3 V at 3rd stage, a load resistance of 36.6 k Ω and 0 dBm input power with 2,45 GHz frequency. The highest efficiency was obtained for SMS7630 diode as 35% at a load resistance of 2 k Ω and 0 dBm input power. The highest output voltage was obtained for SMS7630 diode as 1,67 V at 6th stage, a load resistance of 15,3 k Ω and 0 dBm input power with 5,8 GHz frequency.

Keywords: Energy Harvesting, Voltage Multiplier, Impedance Matching, Schottky Diode, Low Power Applications.

January, 2024; 64 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	RF enerji hasat sisteminin temel bileşenleri.....	2
Şekil 1.2.	Tesla Kulesi.....	3
Şekil 1.3.	Kablosuz enerji iletimi ile çalışan ilk helikopter.....	3
Şekil 2.1.	RF enerji hasat sistemi blok diyagramı.	7
Şekil 2.2.	Gerilim doğrultucu devrenin genel yapısı.....	8
Şekil 2.3.	Altı kademeli gerilim çoklayıcı devre	10
Şekil 2.4.	a. Tekli diyot yapısı, b. Çiftli diyot Yapısı, c. Spice modellenli diyot yapısı	11
Şekil 2.5.	Empedans uyumlama devreleri a. L tipi, b. Pi tipi, c. T tipi	14
Şekil 3.1.	Akış şeması	16
Şekil 3.2.	a. İdeal gerilim çoklayıcı devre, b. Frekansa göre yansıma katsayısı, c. Giriş gücüne göre çıkış gerilimi, d. Smith çizelgesi, e. Giriş gücüne göre verim değişimi	17
Şekil 3.3.	Smith çizelgesi ile L tipi (L-C) empedans uyumlama devresi	18
Şekil 3.4.	a. Empedans uyumlaması yapılmış gerilim çoklayıcı devre, b. Frekansa göre yansıma katsayısı, c. Giriş gücüne göre çıkış gerilimi, d. Smith çizelgesi, e. Giriş gücüne göre verim değişimi	19
Şekil 3.5.	a. Murata devre elemanları ile oluşturulan gerilim çoklayıcı devre, b. Frekansa göre yansıma katsayısı, c. Smith çizelgesi.....	21
Şekil 3.6.	Smith çizelgesi ile TLOC + TLIN hesabı ve TLOC + TLIN devresi	22
Şekil 3.7.	a. Murata + İletim hattı devre elemanları ile oluşturulan gerilim çoklayıcı devre, b. Frekansa göre yansıma katsayısı, c. Giriş gücüne göre çıkış gerilimi, d. Smith çizelgesi, e. Giriş gücüne göre verim değişimi	22
Şekil 3.8.	Direnç ayar parametresi	24
Şekil 3.9.	HSMS285C diyotu, Murata + İletim hattı devre elemanları ve $R_{yük} = 3,4 \text{ k}\Omega$ ile oluşturulan bir kademeli gerilim çoklayıcı devrenin, a. Giriş gücüne göre verim değişimi, b. Giriş gücüne göre çıkış gerilimi.....	24
Şekil 4.1.	HSMS285C diyotuyla ve $R_{yük} = 10 \text{ k}\Omega$ yük direnciyle oluşturulan Murata + İletim hattı devresinin, a. Frekansa göre yansıma katsayısı, b. Giriş gücüne göre çıkış gerilimi, c. Smith çizelgesi, d. Giriş gücüne göre verim değişimi	31
Şekil 4.2.	Maksimum verimlerin elde edildiği $R_{yük}$ değerleri için, a. Giriş güçlerine göre verim değişimleri, b. Giriş güçlerine göre çıkış gerilimleri	32
Şekil 4.3.	HSMS286B diyotuyla ve $R_{yük} = 10 \text{ k}\Omega$ yük direnciyle oluşturulan Murata + İletim hattı devresinin, a. Frekansa göre yansıma katsayısı, b. Giriş gücüne göre çıkış gerilimi, c. Smith çizelgesi, d. Giriş gücüne göre verim değişimi	35
Şekil 4.4.	Maksimum verimlerin elde edildiği $R_{yük}$ değerleri için a. Giriş güçlerine göre verim değişimleri, b. Giriş güçlerine göre çıkış gerilimleri	36
Şekil 4.5.	SMS7630 diyotuyla ve $R_{yük} = 10 \text{ k}\Omega$ yük direnciyle oluşturulan Murata + İletim hattı devresinin, a. Frekansa göre yansıma katsayısı, b. Giriş gücüne göre çıkış gerilimi, c. Smith çizelgesi, d. Giriş gücüne göre verim değişimi	38

Şekil 4.6.	Maksimum verimlerin elde edildiği $R_{yük}$ değerleri için a. Giriş güçlerine göre verim değişimleri, b. Giriş güçlerine göre çıkış gerilimleri	39
Şekil 4.7.	a. 2,45 GHz frekansında kullanılan uyumlama devresi, b. 5,8 GHz frekansında kullanılan uyumlama devresi	41
Şekil 4.8.	HSMS285B diyotuyla ve $R_{yük} = 10\text{ k}\Omega$ yük direnciyle oluşturulan Murata + İletim hattı devresinin, a. Frekansa göre yansıma katsayısı, b. Giriş gücüne göre çıkış gerilimi, c. Smith çizelgesi, d. Giriş gücüne göre verim değişimi	47
Şekil 4.9.	Maksimum verimlerin elde edildiği $R_{yük}$ değerleri için a. Giriş güçlerine göre verim değişimleri, b. Giriş güçlerine göre çıkış gerilimleri	48
Şekil 4.10.	HSMS286B diyotuyla ve $R_{yük} = 10\text{ k}\Omega$ yük direnciyle oluşturulan Murata + İletim hattı devresinin, a. Frekansa göre yansıma katsayısı, b. Giriş gücüne göre çıkış gerilimi, c. Smith çizelgesi, d. Giriş gücüne göre verim değişimi	51
Şekil 4.11.	Maksimum verimlerin elde edildiği $R_{yük}$ değerleri için a. Giriş güçlerine göre verim değişimleri, b. Giriş güçlerine göre çıkış gerilimleri	52
Şekil 4.12.	SMS7630 diyotuyla ve $R_{yük} = 10\text{ k}\Omega$ yük direnciyle oluşturulan Murata + İletim hattı devresinin, a. Frekansa göre yansıma katsayısı, b. Giriş gücüne göre çıkış gerilimi, c. Smith çizelgesi, d. Giriş gücüne göre verim değişimi	54
Şekil 4.13.	Maksimum verimlerin elde edildiği $R_{yük}$ değerleri için a. Giriş güçlerine göre verim değişimleri, b. Giriş güçlerine göre çıkış gerilimleri	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1.	Wi-Fi Standartlarına ait hız ve frekans bilgileri	4
Çizelge 4.1.	Bir kademeli 2,45 GHz frekansında çalışan devrelerde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü için empedans uyumlamadan önce elde edilen veriler	26
Çizelge 4.2.	Bir kademeli 2,45 GHz frekansında çalışan devrelerde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü için empedans uyumlamadan sonra elde edilen veriler	27
Çizelge 4.3.	Bir kademeli 2,45 GHz frekansında çalışan devrelerde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü için Murata ürünleri ile elde edilen veriler	27
Çizelge 4.4.	Bir kademeli 2,45 GHz frekansında çalışan devrelerde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü için en yüksek verimi sağlayan yük direnci ve elde edilen verim	28
Çizelge 4.5.	Bir kademeli 2,45 GHz frekansında çalışan devrelerde kullanılan devre elemanları ve değerleri	29
Çizelge 4.6.	Bir kademeli 2,45 GHz frekansında çalışan devrelerde Murata + İletim hattı yapısı için giriş güçlerine göre verim değerleri	29
Çizelge 4.7.	Bir kademeli 2,45 GHz frekansında çalışan devrelerde Murata + İletim hattı yapısı için maksimum verim değerini veren giriş güçleri ve verimler	30
Çizelge 4.8.	HSMS285C diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü ve $R_{yük} = 10$ k Ω yük direnci için elde edilen veriler	31
Çizelge 4.9.	HSMS285C diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe analizlerinde en verimin yüksek olduğu yük dirençleri, giriş güçleri için elde edilen veriler	33
Çizelge 4.10.	HSMS286B diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü ve $R_{yük} = 10$ k Ω yük direnci için elde edilen veriler	34
Çizelge 4.11.	HSMS286B diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü ve $R_{yük} = 10$ k Ω yük direnci için elde edilen veriler	37
Çizelge 4.12.	SMS7630 diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü ve $R_{yük} = 10$ k Ω yük direnci için elde edilen veriler	37
Çizelge 4.13.	SMS7630 diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü ve $R_{yük} = 10$ k Ω yük direnci için elde edilen veriler	40
Çizelge 4.14.	Bir kademeli 5,8 GHz frekansında çalışan devrelerde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü için empedans uyumlamadan önce elde edilen veriler	42
Çizelge 4.15.	Bir kademeli 5,8 GHz frekansında çalışan devrelerde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü için empedans uyumlamadan sonra elde edilen veriler	42
Çizelge 4.16.	Bir kademeli 5,8 GHz frekansında çalışan devrelerde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü için Murata ürünleri ile elde edilen veriler	43
Çizelge 4.17.	Bir kademeli 5,8 GHz frekansında çalışan devrelerde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü için en yüksek verimi sağlayan yük direnci ve elde edilen verim	44
Çizelge 4.18.	Bir kademeli 5,8 GHz frekansında çalışan devrelerde kullanılan devre elemanları ve değerleri	45

Çizelge 4.19.	Bir kademeli 5,8 GHz frekansında çalışan devrelerde Murata + İletim hattı yapısı için giriş güçlerine göre verim değerleri	45
Çizelge 4.20.	Bir kademeli 5,8 GHz frekansında çalışan devrelerde Murata + İletim hattı yapısı için maksimum verim değerini veren giriş güçleri ve verimler.....	46
Çizelge 4.21.	HSMS285B diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü ve $R_{yük} = 10$ k Ω yük direnci için elde edilen veriler	47
Çizelge 4.22.	HSMS285B diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe analizlerinde en verimin yüksek olduğu yük dirençleri, giriş güçleri için elde edilen veriler	49
Çizelge 4.23.	HSMS286B diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü ve $R_{yük} = 10$ k Ω yük direnci için elde edilen veriler	50
Çizelge 4.24.	HSMS286B diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü ve $R_{yük} = 10$ k Ω yük direnci için elde edilen veriler	53
Çizelge 4.25.	SMS7630 diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü ve $R_{yük} = 10$ k Ω yük direnci için elde edilen veriler	53
Çizelge 4.26.	SMS7630 diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü ve $R_{yük} = 10$ k Ω yük direnci için elde edilen veriler	56

SİMGELER VE KISALTMALAR

ADS	Advanced Design System Programı
C_{jo}	Diyotun eklem kondansatörü
C_s	Diyotun parazitik kondansatörü
dB	Desibel
dBm	Desibel miliwatt
DC	Doğru Akım – Direct Current
E-TLIN	Lineer iletim hattının elektrik alanı - Electric Field of Transmission Line Lineer
E-TLOC	Açık devre iletim hattının elektrik alanı - Electric Field of Transmission Line Open Circuit
Gbps	Gigabit per second
GHz	Gigahertz
H	Henry
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü - Institute of Electrical and Electronics Engineer
IoT	Nesnelerin interneti – Internet of Things
I_s	Diyotun doyma akımı
kW	Kilowatt
LED	Light-Emitting Diode
L_p	Diyotun parazitik bobini
Mbps	Megabit per second
MHz	Megahertz
N	Kademe Sayısı
nF	Nano Farad
P_{diyot}	Diyot üzerinde harcanan güç
P_{in}	Giriş gücü
pF	Pikofarad
RF	Radyo Frekansı
R_s	Diyotun iç direnci
TL	Transmisyon Hattı - Transmission Line
TLIN	Lineer İletim Hattı - Transmission Line Lineer
TLOC	Açık Devre İletim Hattı - Transmission Line Open Circuit
V	Volt
V_{br}	Diyotun kırılma gerilimi
V_t	Giriş sinyali geriliminin tepe değeri
V_{Th}	Diyotun eşik gerilimi
WLAN	Kablosuz Yerel Alan Ağı - Wireless Local Area Network
Z_o	Normalize Empedans
Ω	Ohm
μ	Verim

1. GİRİŞ

Enerji elde etmek amacıyla güneş panelleri, rüzgâr tribünleri, hidroelektrik santraller ve nükleer enerji santralleri uzun yıllardır kullanılmaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte düşük güçle çalışan elektronik cihazların ihtiyaç duyduğu enerjiyi sağlamak için enerji hasat etme sistemleri yaygınlaşmaktadır. Enerji üretiminde temel amaç şebekeyi besleyebilmektir. Enerji hasadında ise titreşim, ısı, basınç, hareket, biyolojik kaynaklar ve elektromanyetik dalgalar gibi ortamda mevcut olan az miktarda enerji toplanarak kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürülür. Doğadan daha çok enerji üretilebildiği için ticari olarak geliştirilen güneş ve rüzgârdan elektrik üreten sistemlerin performansları hava ve zemin koşullarına göre değişebildiği gibi, kurulum ve bakım maliyetleri de yüksektir. Ayrıca rüzgâr türbinlerinin veya güneş panellerinin monte edilmesinin verimsiz olduğu yerler de bulunmaktadır. Bu tür uygulamalar için alternatif bir güç kaynağı olarak enerji hasat sistemleri kullanılır.

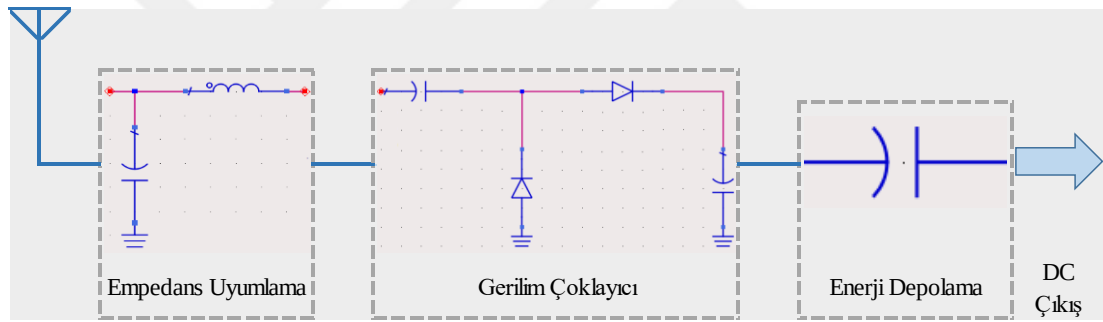
Verimli enerjiyi elde edebilmek için düşük maliyetli, sürekliliği olan, hızlı ve kendi kendine yetebilen cihazların geliştirilmesine yönelik araştırmalar yapılmaktadır. Radyo frekansı (RF) sinyallerinden enerji hasat etme de bu araştırmalardandır [1].

RF enerji hasadı, radyo frekansı sinyallerinden enerji elde etme sürecidir. Enerji hasadında kullanılan bu kaynağın sağladığı güç yaklaşık olarak $0,001 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 'dir [1-3]. Elektromanyetik dalgalardan kaynaklanan kablosuz enerji, mobil iletişim sistemleri ve kablosuz yerel erişim ağları WLAN (Wireless Local Area Network) gibi farklı iletişim sistemlerinden yayılır. Bu sistemler insanın günlük yaşamında sürekli olarak bulunmakta ve kullanımları giderek artmaktadır. RF enerji hasadı, çevresel RF sinyallerini yakalayıp doğru akım (DC) formatındaki elektriğe dönüştürür. Böylece düşük güç tüketen cihazların enerji ihtiyaçlarını karşılamak, çevresel enerji kaynaklarını daha etkin bir şekilde değerlendirmek, pil değişimi veya şarj gereksinimini azaltmak ayrıca uzun pil ömrü sağlamak ve kablo bağlantılarından kaçınmak, kablosuz iletişim sistemlerinde bağımsızlık ve sürdürülebilir enerji çözümleri gibi avantajlar sunar [4]. Bu teknoloji, sadece çevre dostu değil, aynı zamanda giderek artan bir şekilde birbirine bağlı dünyamızda enerji verimli çözümlere yönelik artan talebe de cevap verir.

RF enerji hasadı uygulama alanları, cep telefonları, radar sistemleri, uydu vericileri, kablosuz yönlendiriciler, baz istasyonları, sensörlerin beslenmesi, kablosuz şarj istasyonları, giyilebilir cihazlara, nesnelerin interneti (IoT) cihazlarına ve iletişim ağlarına güç sağlar [5-12]. Bu kaynakların yaydığı RF sinyallerin enerjisi hasat edilebilir ve böylece düşük ya da çok düşük güçle çalışan cihazlar şarj edilebilir.

RF sinyalleri ortamda sürekli bulunsun da düşük güç seviyesi, iletim mesafesinden etkilenmesi ve ortamda bulunan farklı frekanslardaki sinyaller ile dalga girişim problemleri başlıca dezavantajlarıdır.

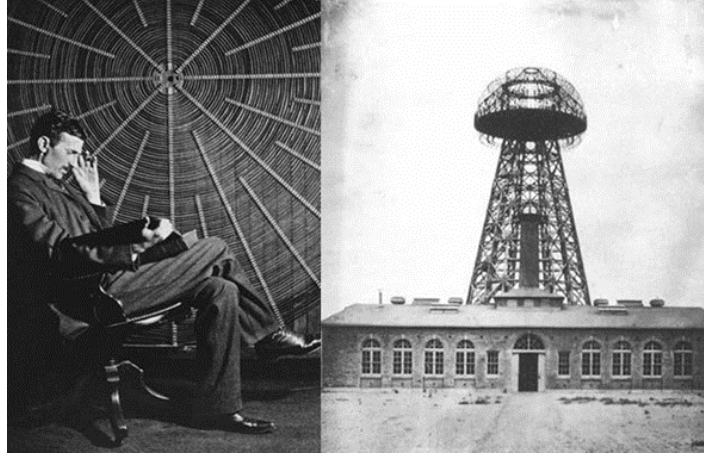
Bir RF enerji hasat devresini oluşturan elemanlar, anten, uyumlama (matching) devresi, gerilim çoklayıcı devre ve DC filtredir [13]. Anten ortamdaki RF enerjisini almak ve elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılmaktadır. Şekil 1.1. RF toplama sisteminin temel bileşenlerini göstermektedir.



Şekil 1.1. RF enerji hasat sisteminin temel bileşenleri.

1.1 RF Sinyallerinden Enerji Hasadının Tarihçesi

Elektromanyetik ışımanın bir türü olan radyo dalgalarının keşfi 1888 yılında Heinrich Hertz tarafından yapıldı [14]. Bundan üç yıl sonra Nikola Tesla, Hertz'in deneylerini tekrarladı. Hertz'in deneyinde kullanılan Ruhmkorff bobininin birincil ve ikincil sarımları arasındaki yalıtkanın yüksek frekanslı akımdan kaynaklı ısıdan dolayı eridiğini fark etti [15]. Buradan yola çıkarak 150 kHz merkez frekansında rezonansa giren ve 300kW'dan düşük güçle beslenebilen Tesla bobinini geliştirdi. Tesla, 1900'lü yılların başında, iyonosferden kablo olmaksızın elektrik enerjisi aktarmak maksadıyla Tesla Kulesi olarak da bilinen ve Şekil 1.2.'de gösterilen Wardencllyffe Kulesi'ni inşa etti [16].



Şekil 1.2. Tesla Kulesi.

William C. Brown, 1964 yılında mikrodalga frekanslarındaki elektromanyetik dalgaların bir anten vasıtasıyla elektrik sinyaline dönüştürülebileceğini fark etti. Bu sayede kablosuz güç aktarımı ile çalışan Şekil 1.3.'te gösterilen antenli bir helikopter icat etti [17]. Bu uygulama ile RF sinyallerinin taşıdığı güçlerin DC güçlere dönüştürülmesinin mümkün olduğunu gösterdi. Böylece kablosuz enerji transferi konusundaki araştırmalar arttı.



Şekil 1.3. Kablosuz enerji iletimi ile çalışan ilk helikopter.

1975 yılında Brown, Richard Dickinson ve ekibi, 26 metre çapında parabolik bir anten kullanarak, 2,388 GHz frekansında 450 kW değerinde bir gücü 1600 metre mesafede bulunan bir anten dizisine aktarabildiler [18].

Peter Glaser tasarladığı güneş enerjisi uydusu ile güneş ışığını toplayıp çok büyük antenler vasıtasıyla, mikrodalga sinyal formatında yeryüzüne gönderip, elektrik şebekesine dâhil edecekti [19]. Japon araştırmacılar bu düşünceden ilham alarak 2,45

GHz frekansta, iyonosferde doğrusal olmayan mikrodalga etkileşim deneyini gerçekleştirdi [20].

2000’li yılların başında araştırmacıların yaptıkları yakın mesafeden kablosuz enerji iletimi üzerine çalışmalar sonucunda, 2 metre uzaktaki bir lambaya %40 verimle 60 watt güç iletilebildiği gösterilmiştir [21].

Bu çalışmalar, ortamda bulunan RF enerjisini kullanarak enerji hasat etme teknolojisinin önünü açmıştır.

1.2 Wi-Fi Protokolü

Wi-Fi, internete açılabilen cihazların kablosuz olarak iletişim kurmasını sağlayan bir kablosuz ağ teknolojisidir. Wi-Fi teknolojisinde IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineer) tarafından geliştirilen standartlara dayalı protokoller kullanılmaktadır. Birçok farklı Wi-Fi standardı bulunur. Cihazlar internete bağlanmak için farklı kablosuz standartları destekler ve kullanır. Kablosuz ağ standartları ortalama birkaç yılda bir değişir. Yaygın kullanılan bazı Wi-Fi standartları 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac ve 802.11ax’dır. Her güncellemede yeni bir standart oluşturulur. Çizelge 1.1.’de Wi-Fi standartlarına göre saniyede ne kadar veri iletilebileceği ve ağın hangi frekans bölgesinde çalıştığı gösterilmiştir.

Çizelge 1.1. Wi-Fi Standartlarına ait hız ve frekans bilgileri.

Wi-Fi Standardı	Hız	Frekans
802.11a	54 Mbps	5 GHz
802.11b	11 Mbps	2,4 GHz
802.11g	54 Mbps	2,4 GHz
802.11n	600 Mbps	2,4 GHz ve 5 GHz
802.11ac	1,3 Gbps	2,4 GHz ve 5 GHz
802.11ax	10-12 Gbps	2,4 GHz ve 5 GHz

1.3 Çalışmanın Amacı ve Önemi

Bu çalışmada Wi-Fi frekansında RF enerji hasadı için parametre analizi hedeflenmiştir. Advanced Design System (ADS) simülasyon programı kullanılarak tasarımlar yapılmış ve sonuçlar incelenmiştir.

Öncelikle ADS programında 2,45 GHz ve 5,8 GHz frekansları için 50 Ω iç dirence sahip anten kullanımı göz önünde bulundurulmuştur. Ortamdan toplanan giriş güç seviyeleri -30 dBm ile 0 dBm aralığında kabul edilmiştir.

RF enerji hasadında kullanılan gerilim çoklayıcı devrelerde yüksek anahtarlama hızı ve düşük ileri kutuplama geriliminde çalışabilmesi nedeniyle genellikle Schottky diyotlar kullanılır. Bu çalışmada, gerilim çoklayıcı devreler için yüksek frekanslarda çalışabilen HSMS2850, HSMS2852, HSMS285B, HSMS285C, HSMS2860, HSMS2862, HSMS286B, HSMS2820, HSMS2822, HSMS2810 ve SMS7630 Schottky diyotlarının etkisi analiz edilmiştir.

Şekil 1.1’de sunulan gerilim çoklayıcı ve uyumlama yapısındaki pasif elemanlar için Murata firmasının devre elemanlarının kullanımı göz önünde bulundurulmuştur. Yapılan literatür araştırmasında ADS kullanılarak yapılan simülasyon çalışmalarının ideal değerler üzerinden yapıldığı gözlemlenmiştir. Bu amaçla Murata firmasının ADS programı için hazırladığı kütüphane, simülasyon programına eklenmiştir. Gerilim çoklayıcıda, Murata GJM033C serisi kondansatörler seçilmiştir. Maksimum güç aktarımını sağlamak için tasarlanan uyumlama devresinde ise ideal pasif devre elemanlarından faydalanılarak Murata firmasının devre elemanlarının seçimi gerçekleştirilmiştir. Ancak yüksek frekanslarda indüktör ve kapasitördeki küçük bir değişim devrenin empedansını etkilediği için uyumlama devresi Murata devre elemanları için yeniden tasarlanmıştır. Bu amaçla, empedansı 50 Ω ve elektriksel büyüklüğü uyumlamaya bağlı değişim gösteren iletim hattı eklenmiştir.

Yapılan tez çalışmasında, 2,45 GHz ve 5,8 GHz frekansları için her bir Schottky diyotun etkisi Murata firmasının devre elemanlarının kullanımı göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Yapılan simülasyonlarda, giriş gücüne bağlı olarak maksimum verimi sağlayan yük dirençleri bulunmuştur ve bulunan verim değerleri karşılaştırılmıştır. Bir kademeli gerilim çoklayıcı devre yapısı için en yüksek verimi veren Schottky diyotlar için altı kademeli gerilim çoklayıcı devre yapısına kadar çıkış gerilimi ve verim analizleri yapılmıştır.

2,45 GHz frekansı için en yüksek verim, bir kademeli gerilim çoklayıcı devresinde SMS7630 diyotu kullanılarak 2,7 k Ω yük direncinde -1 dBm giriş gücünde %46,053 olarak elde edilmiştir. 2,45 GHz frekansı için en yüksek çıkış gerilimi ise 3 kademeli

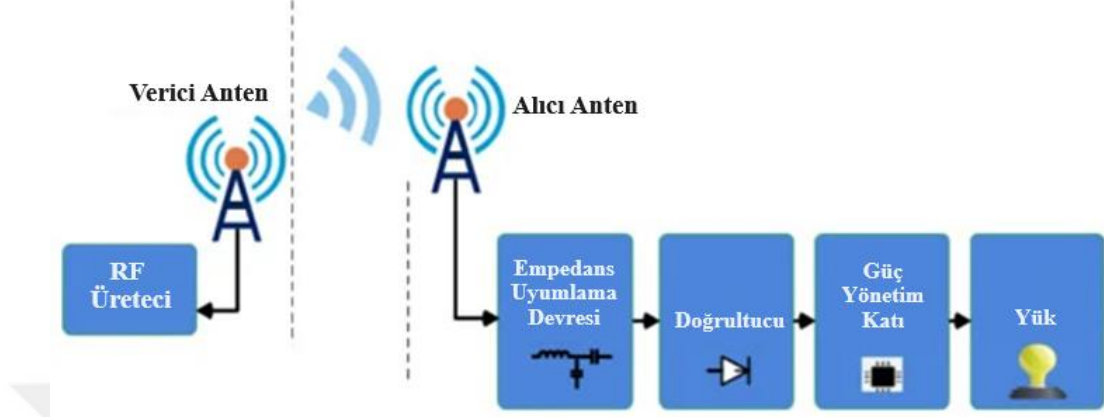
gerilim çoklayıcı devresinde HSMS286B diyotu kullanılarak 36,6 k Ω yük direncinde 0 dBm giriş gücünde 3 V olarak elde edilmiştir.

5,8 GHz frekansı için en yüksek verim, bir kademeli gerilim çoklayıcı devresinde SMS7630 diyotu kullanılarak 2 k Ω yük direncinde 0 dBm giriş gücünde %35,233 olarak elde edilmiştir. 5,8 GHz frekansı için en yüksek çıkış gerilimi ise 6 kademeli gerilim çoklayıcı devresinde SMS7630 diyotu kullanılarak 15,3 k Ω yük direncinde 0 dBm giriş gücünde 1,67 V olarak elde edilmiştir.



2. RF SİNYALLERİNDEN ENERJİ HASAT EDİLMESİ

Temel bir RF hasat etme tekniği Şekil 2.1.'de gösterilmiştir. Sistem anten, empedans uyumlama, doğrultma, güç yönetimi ve enerji depolama birimlerinden oluşmaktadır.



Şekil 2.1. RF enerji hasat sistemi blok diyagramı.

Doğrultucu devre girişteki AC sinyali DC sinyale çevirir, bu çalışmada kullanılan doğrultucu devre için Schottky diyot ve kondansatör kullanılmıştır. Antenden gelen sinyalden maksimum güç elde etmek için anten ile doğrultucu devre arasına empedans uyumlama devresi yerleştirmek gerekmektedir, böylece maksimum güç transferi sağlanmış olur. Elde edilecek enerji miktarı, gerilim çoklayıcı devresindeki Schottky diyot, kondansatör, uyumlama devresi ve yüke göre farklılık göstermektedir.

[22]'de 915 MHz için HSMS2822 ve HSMS2852 diyotlarının etkisi yük dirençleri ve uyumlama yapılarına göre karşılaştırılmıştır ve belirtilen frekans için en uygun diyot HSMS2852 olarak belirlenmiştir. [23]'te 0,9 GHz ve 2,45 GHz çift band frekansları için 7 kademeli gerilim çoklayıcı devre, 1,8 nF kondansatör ve SMS7630 diyotu kullanılarak tasarlanmıştır, uyumlama devresinde iletim hattı (Transmission Line) kullanılmıştır ve 10 dBm giriş gücünde 1,3 V çıkış gerilimi elde edilmiştir. [24]'de gerilim çoklayıcı devre için HSMS2862 diyotu ve 100 pF kondansatör kullanılmış, uyumlama devresi için iletim hattı kullanılarak yapılan simülasyonlarda 0 dBm de 2,45 GHz için, %55,8 verim elde edilmiştir. [25]'te SMS7630 diyotu ile gerçekleştirilen hasat devresinde 8 dBm giriş gücü için elde edilen verim, %50'den yüksektir. [26]'da HSMS2852 diyotu ile yapılan simülasyonlarda ideal devre elemanları kullanılarak 7 dBm giriş gücünde %66 verim elde edilmiştir. [27]'de 2,45 GHz için SMS7630 diyotu kullanılarak uzaklığın etkisi analiz edilmiştir.

Öncelikli olarak, iyi bir doğrultma devresi düşük güç tüketimine ve iyi güç işleme kapasitesine sahip olmalıdır. [31]. Bir doğrultma devresinin normal koşullarda antenden gelen gücü en az kayıpla iletebilmesi için iyi bir empedans uyumlama devresine, iyi parametrelere sahip bir diyota, dalgalanmaları süzebilmek için iyi bir doğru akım (DC) bant geçiren filtreye ve yük direncine ihtiyacı vardır [32].

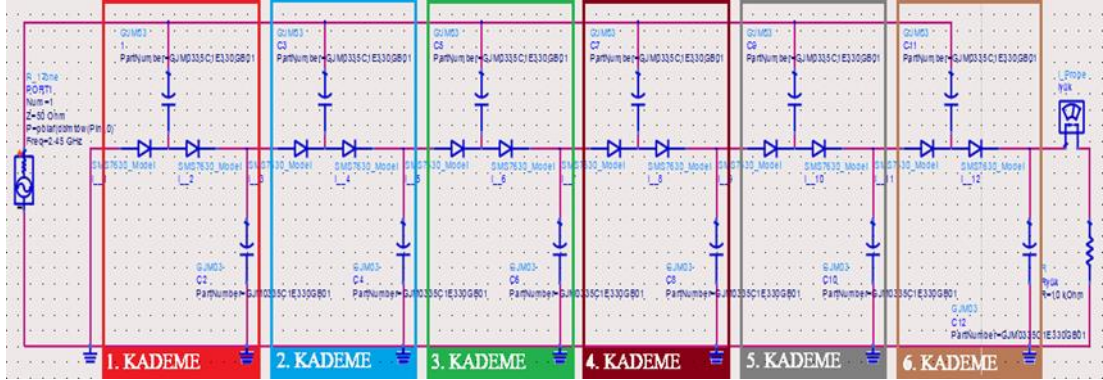
RF sinyalinin sinüzoidal bir dalga biçimi vardır dolayısıyla sinyal Alternatif Akım (AC) formundadır. Bilindiği üzere elektronik cihazlar da DC ile çalışırlar. Gerilim doğrultucu devre, AC giriş sinyalini DC formuna dönüştürür. Antenden alınan AC sinyalin tepe genliği, gerilim çoklayıcı devresinin çıkış değerini belirler [32]. Uygun bir empedans uyumlama devresi ile doğrultma devresine gönderilen AC sinyal, yükün ihtiyaç duyduğu enerjiyi sağlayabilmek için maksimum güç transferini sağlar böylece düşük güç girişlerinde daha yüksek çıkış gerilimi ve verim elde edilir. [33]'te gerilim çoklayıcı topolojisi tasarımı, [34]'te RF sinyal doğrultucusu ve tasarımı üzerine çalışmalar yapılmış, güç kaybının en yüksek olduğu kısmın doğrultma kademesi olduğu sonucuna varılmıştır. [33]'te bunun sebebinin, devre elemanlarının yüksek frekanslarda doğrusallıktan sapan etkileri olabileceğini belirtilmiştir. Dolayısıyla doğrultma devresi elemanlarının parametrelerinin hassasiyetle belirlenmesi önemlidir.

Gerilim doğrultucu devresinde yüksek anahtarlama hızı ve düşük ileri kutuplama geriliminde çalışması nedeniyle Schottky diyotlar kullanılır. Şekil 2.2.'deki gerilim doğrultucu devrede AC giriş geriliminin negatif alternansında C1 kondansatörü, D1 diyotu aracılığıyla giriş gerilimine kadar şarj olur. Giriş gerilimi pozitif alternansa geçtiğinde şarj edilmiş olan C1 kondansatörü D2 diyotu vasıtasıyla C2 kondansatörünü şarj eder ve C2 kondansatörünün üzerindeki gerilim iki katına çıkar. Kısaca ideal durumda AC giriş sinyalinin maksimum genliğinin 2 katı, çıkışta DC gerilim olarak elde edilir [32]. Şekil 2.2.'deki gerilim doğrultucu devrede, çıkış gerilimi eşitlik (2.1)'deki gibi hesaplanır.

$$V_{\text{çıkış}} = 2 \times (V_t - V_{Th}) \quad (2.1)$$

Eşitlik (2.1)'de $V_{\text{çıkış}}$ çıkış gerilimi, V_t giriş sinyali geriliminin tepe değeri, V_{Th} diyotun eşik gerilimidir. Gerilim çoklayıcı devresinde kademe sayısı arttıkça, her bir kademede gerilim iki katına çıkar ve bir gerilim basamağı oluşur. Tüm kondansatörlerin

gerilimleri toplandığında çıkış gerilimi elde edilir. N kademeli gerilim çoklayıcı devreye örnek olarak $N=6$ kademeli gerilim çoklayıcı devre Şekil 2.3.'te sunulmuştur.



Şekil 2.3. Altı kademeli gerilim çoklayıcı devre.

Gerilim çoklayıcı devreler ile farklı kademe sayılarında devre tasarımları yapılarak yük geriliminin istenilen düzeye getirilmesi mümkün olabilir. N kademeli gerilim çoklayıcı devrenin çıkış gerilimi eşitlik (2.2)'deki gibi bulunabilir.

$$V_{\text{çıkış}} = 2 \times N \times (V_t - V_{Th}) \quad (2.2)$$

Eşitlik (2.2)'de $V_{\text{çıkış}}$ çıkış gerilimi, N kademe sayısı, V_t giriş sinyali geriliminin tepe değeri, V_{Th} diyotun eşik gerilimidir.

Tam dalga doğrultma devrelerinin yarım dalga doğrultma devrelerine göre daha iyi performansa sahip olduğu söylenebilir ayrıca, bir RF enerji hasat devresinde kullanılacak yüke göre çok düşük güç değerlerine sahip bir RF sinyalin gerilim değerini, kademe sayısı fazlaca arttırılmış bir doğrultma devresi ile sağlayabileceğimiz düşünülebilir. Fakat tam dalga doğrultma devrelerinde de, çok yüksek kademe sayısı ile oluşturulan devrelerde de devre eleman sayısındaki artışa bağlı olarak kaybolan güç artabilir [35]. Kademe sayısı arttırılmış olan bir devrede, daha fazla doğrultma elemanı bulunduğu için akım, serideki tüm diyotlardan geçmek zorundadır. Bu geçiş sırasında diyotların çalışabilmesi için her bir diyotta güç harcanmaktadır. Yük üzerinde harcanan güç eşitlik (2.3) ile hesaplanır.

$$P_{\text{yük}} = V_{\text{yük}} \times I_{\text{yük}} \quad (2.3)$$

Eşitlik (2.3)'te $P_{yük}$ yük üzerinde harcanan güç, $V_{yük}$ yük üzerindeki gerilim ve $I_{yük}$ yük üzerindeki akımdır. Çok kademeli gerilim çoklayıcıda kullanılan diyotlar üzerinde harcanan güç eşitlik (2.4) ile hesaplanır.

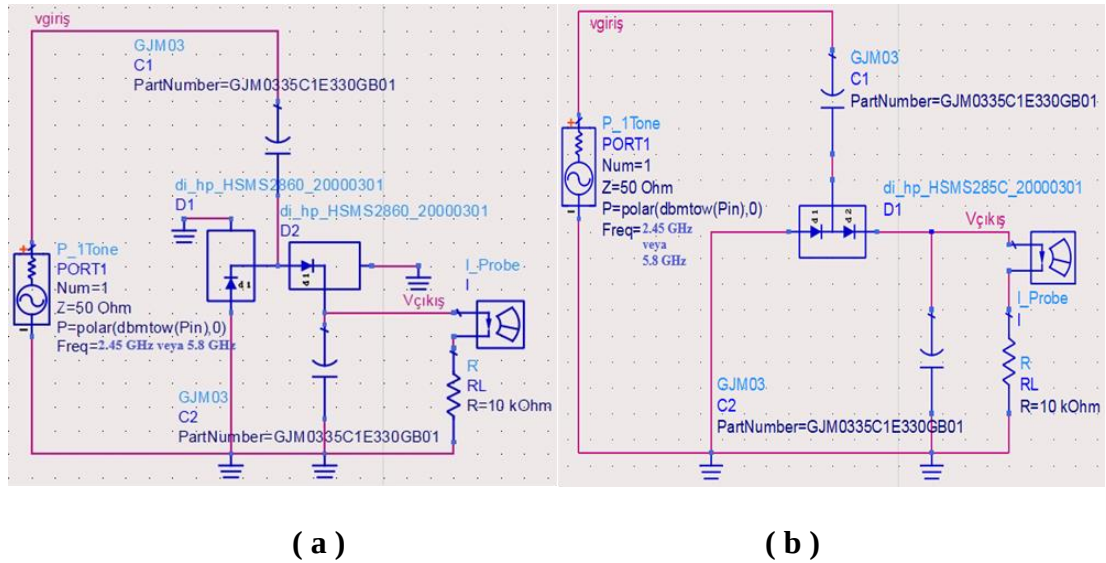
$$P_{diyot} = 2 \times N \times V_{Th} \times I_{yük} \quad (2.4)$$

Eşitlik (2.4)'de P_{diyot} diyot üzerinde harcanan güç, N kademe sayısı, V_{Th} diyotun eşik gerilimi ve $I_{yük}$ yük üzerindeki akımdır. Bu sebeple doğrultma kademesindeki güç dönüştürme verimliliği kademe sayısının artması ile azalacaktır. N kademeli gerilim çoklayıcı devrenin verimi eşitlik (2.5) ile hesaplanır.

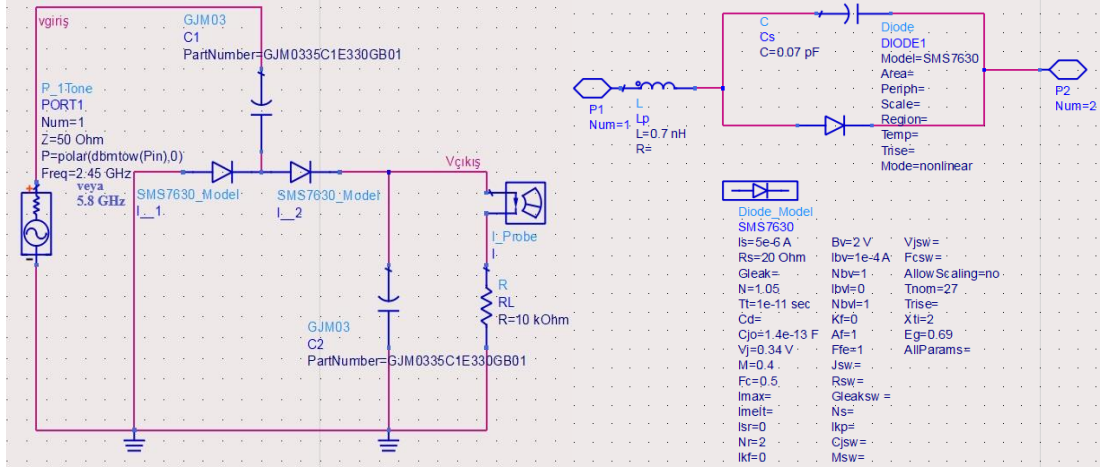
$$\mu = \frac{P_{çıkış}}{P_{giriş}} \times 100 = \frac{V_{yük} \times I_{yük}}{P_{giriş}} \times 100 \quad (2.5)$$

Eşitlik (2.5)'te μ gerilim çoklayıcı devrenin verimi, $P_{çıkış}$ yük üzerinde harcanan güç, $P_{giriş}$ anten tarafından sağlanan giriş gücü, $V_{yük}$ yük üzerindeki gerilim, $I_{yük}$ yük üzerindeki akımdır.

Kademe sayısındaki artışın doğrultma devrelerinde verim değerini doğrudan etkilediği gözlemlenmiştir. Bu sebeple bir doğrultma devresi tasarımında yüksek verim elde edebilmek için doğrultma kademe sayısının hangi giriş gücü aralığında en iyi performansı gösterdiğini bilmek gerekmektedir [36].



Şekil 2.4. Gerilim çoklayıcı devre yapıları **a.** Tekli diyot yapısı **b.** Çiftli diyot yapısı.



Şekil 2.4 (devam). Gerilim çoklayıcı devre yapıları c. Spice modelli diyot yapısı.

Bu çalışmada ADS programı kullanılarak 2,45 GHz ve 5,8 GHz bandında kullanıma uygun olan, Şekil 2.4.a., Şekil 2.4.b. ve Şekil 2.4.c.’de görülen 3 farklı yapıda toplam 11 adet diyot kullanımı göz önünde bulundurulmuştur. Tasarlanan doğrultma devreleri üzerinden bazı diyot parametreleri, yük direnci, farklı malzemelerin kullanımı ve kademe sayısı değişimi gibi analizler yapılarak doğrultma devresinin verim değerindeki değişimler incelenmiştir.

Şekil 2.4.a.’da görülen diyotlar tekli yapıda olup bu diyotlar sırasıyla HSMS2850, HSMS285B, HSMS2860, HSMS286B, HSMS2820 ve HSMS2810’dur. Şekil 2.4.b.’de görülen diyotlar çiftli yapıda olup bu diyotlar sırasıyla HSMS2852, HSMS285C, HSMS2862 ve HSMS2822 diyotlarıdır. Son olarak Şekil 2.4.c.’de görülen SMS7630 diyotunun ADS programında kütüphanesi bulunmamaktadır. Bu yüzden Spice parametreleri dışarıdan girilmiştir [39].

Şekil 2.4.c.’de SMS 7630 diyotunun eşdeğer devresi ve eşdeğer devreyi oluşturan devre elemanları bulunmaktadır. Diyotun eklem kondansatörü C_{jo} , diyotun empedans elemanları R_s , L_p , ve C_s , diyotun doyma akımı I_s ve diyotun kırılma gerilimi V_{br} gibi diyotun dâhili parametrelerini doğrudan etkileyen önemli devre elemanlarıdır.

Kırılma gerilimi sebebi ile belirli bir giriş gücü sınırından sonra ani verim düşüşleri meydana gelmektedir. Diyotun V_{br} değerini değiştirmek mümkün değildir. Bunun için ortam güç seviyeleri düşünülerek doğrultma devresinde kullanılacak diyot tercihi V_{br} değerine göre kolaylıkla yapılabilir.

Diyotun doyma akımı aslında diyot kırılma gerilimi ile doğrudan ilişkili ve verim değerini belirlemede önemli bir parametredir. Özellikle düşük güç seviyelerinin hasatlanabilmesi için yüksek doyma akımına sahip diyotların tercih edilmesi gerekmektedir. Dolayısıyla RF güç seviyesinin düşük olduğu ortamlarda yüksek doyma akımı değerine sahip diyotlar tercih edilir. Aslında, bu iki parametre V_{br} ve I_s doğrultma verimliliğini etkileyen en önemli parametreler olarak kabul edilir. Diyotta arıza meydana geldiğinde yani kırılma geriliminin üstüne çıkıldığında gerilim sabit kalırken akım ani bir şekilde artacaktır. Dolayısıyla DC sinyalin gücünde ciddi bir düşüş meydana gelecektir.

Düşük giriş gücündeki verimlilik, kırılma gerilimi maksimum değerine ulaşınca kadar artar, daha sonra diyotun kırılma gerilimini aşması sebebiyle giriş gücü yükseldikçe, önemli ölçüde düşer. Çünkü bu aşamada doyma akımı artar. Verim değerini etkileyen diğer bir parametre de diyotun iç direncidir ve R_s ile gösterilir. R_s değerinin artması verimin azalmasına sebep olur çünkü yük üzerinden geçen akım azalmış olur.

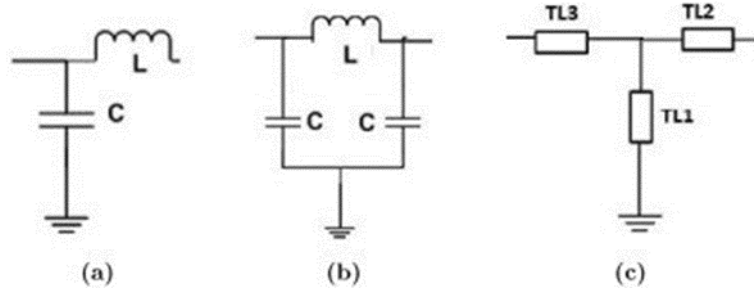
Genel olarak diyot parametrelerinden V_{br} ve I_s değerlerinin artmasına bağlı olarak yük üzerindeki DC güç artar. Böylece verimin arttığı gözlenebilir. Fakat yük direncini doğrudan etkileyen diyot iç direnci R_s değerinin artmasına bağlı olarak yük üzerine düşen DC güç azalmaktadır. Bu yüzden doğrultma verimi de azalır. Sonuç olarak tasarlanacak olan RF enerji hasadı devresinde Schottky diyot seçimi önemli bir rol oynamaktadır.

2.3 Empedans Uyumlama Devresi

RF sinyalin gücünün en az kayıpla doğrultma devresine ulaştırılabilmesi için anten ile doğrultma devresi arasında empedans uyumlama devresi bulunur. Kaynak empedansı ve yük empedansı eşit olmadığında, alınan sinyal yükten kaynağa doğru yansımaktadır ve alınan sinyalde güç kaybı olacaktır. Uyumlama devresi ile yük empedansının kaynak empedansı ile aynı olması sağlanır böylece yükten kaynağa yansıyan sinyallerde azalma gözlemlenerek güç kaybı önlenir [37].

Empedans uyumu, hasat sisteminin ikinci önemli bileşenidir. Şekil 2.5.'te görüldüğü üzere L tipi, T tipi ve π tipi olmak üzere 3 çeşit empedans eşleme devresi vardır.

[32]'de 2,45 GHz frekansında çok küçük bir farkla en iyi verimin L Tipi empedans eşleme devresinden alındığı belirtilmiştir.



Şekil 2.5. Empedans uyumlama devreleri **a.** L tipi **b.** Pi tipi **c.** T tipi.

Alınan RF sinyalin gücü bir yükün kullanabilmesi için, bir doğrultma devresi ile DC güce dönüştürülür. Sonuç olarak RF enerji hasadı süreci tamamlanmış olur [38]. Böylece RF güç, düşük güçle çalışan elektronik cihazlar için kullanılabilir hale getirilir.

2.4 DC Geçiş Filtresi

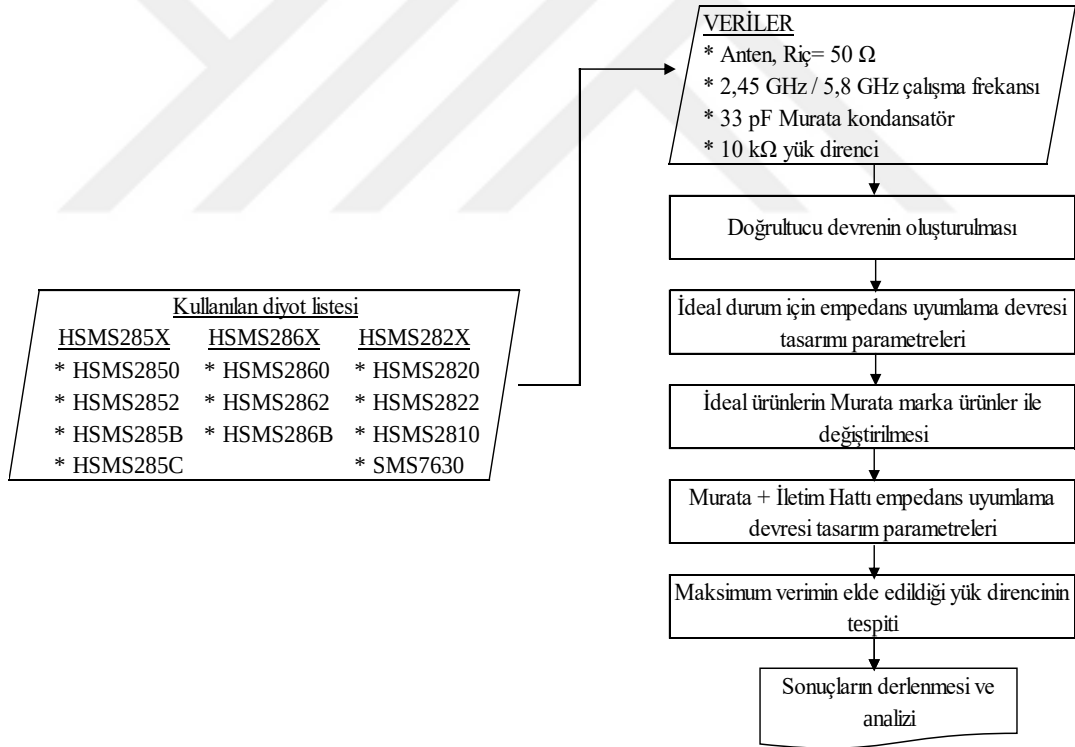
Bütün diyotlar için, oluşan harmonikleri ortadan kaldırmak amacıyla yükten önce DC geçiş filtresi olarak, Murata GJM0335C1E330GB01 kodlu, 33 pF $\pm$ 2% kapasiteye sahip kondansatörler kullanılmış olup, üretici firma tarafından bu kondansatörlerin, -55°C ile 125°C arasında ve 100 MHz ile 8,5 GHz arasında çalışabildiği raporlanmıştır. [4-7, 8-12, 22-30]'da DC geçiş filtresi olarak kullanılan devre elemanları idealdir, bu makalede Murata firması tarafından üretilen kondansatör ve bobinlerin parametreleri kullanılmıştır.

2.5 Yük Direnci

Verim, yüke aktarılan gücün anten tarafından alınan güce oranıdır. Yükün durumuna bakılarak çıkış gücü üzerinden sistemin performansı analiz edilebilir. Yük üzerindeki gerilimin, akımdan ya da akımın, gerilimden daha önemli olduğu yükler bulunmaktadır. Yükün direnç değeri, çıkış gerilimi ve verim değerini doğrudan ve önemli ölçüde etkilemektedir. Dolayısıyla yük direnci değeri bir RF enerji hasat devresinde kritik rol oynar. Bu nedenle maksimum verim ve çıkış gerilim değerleri için yük direncinin belirlenmesi gerekmektedir.

3. DEVRE TASARIM PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Tasarım parametrelerinin belirlenmesi için yapılan simülasyonlarda devrelerin, 50Ω iç direncine sahip 2 farklı antenden birisinin 2,45 GHz, diğerinin 5,8 GHz frekanslarında, -30 dBm ile 0 dBm giriş güçlerinde çalıştıkları düşünülmüştür. 2,45 GHz ve 5,8 GHz frekansları için yapılan çalışmalar ayrı başlıklar altında incelenmiştir. Çalışmada empedans uyumlama devresinin ideal elemanları Smith çizelgesinden yararlanmak suretiyle belirlenmiştir. Belirlenen ideal devre elemanları, ideal değere yakın değerde Murata marka ürünler ile değiştirilmiştir. Murata ürünlerinin parametrelerinden dolayı bir elektromanyetik dalganın bir ortamdan diğerine geçerken sinyalin ne kadarını yansıttığını ölçen bir terim olarak nitelendirilen yansıma katsayısı ve empedans uyumu değişmiştir. İletim hattı elemanları kullanılarak Murata devre elemanlarına tekrar empedans uyumu yapılmıştır. Bir kablosuz güç hasat sisteminin tasarlanmasına ilişkin akış şeması, Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.

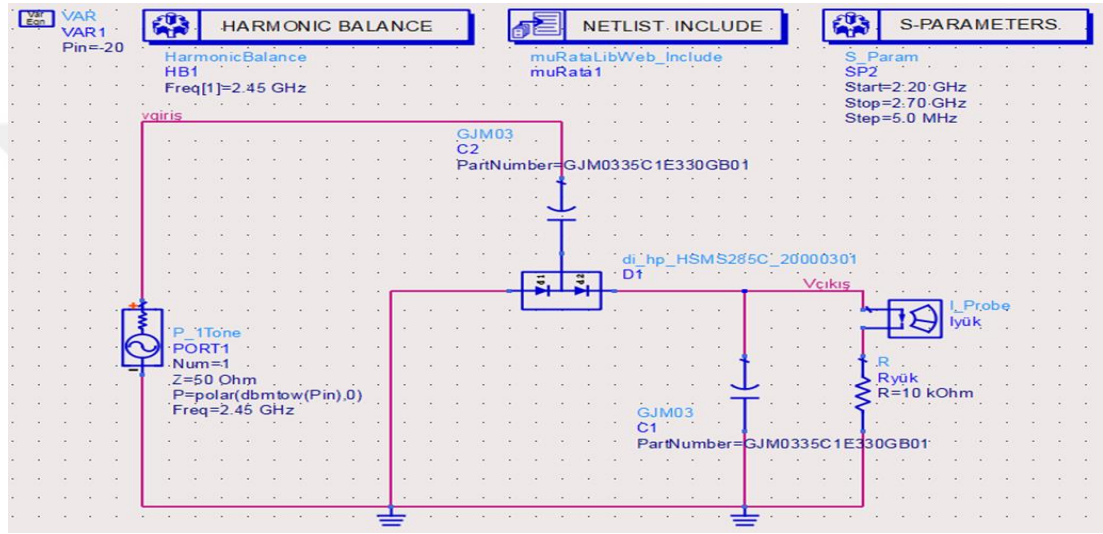


Şekil 3.1. Akış şeması.

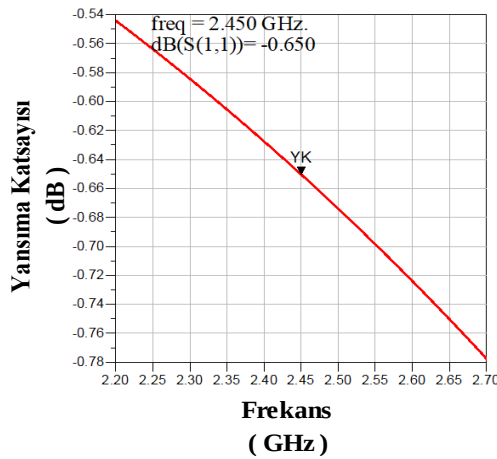
3.1 Doğrultucu Devrenin Oluşturulması

Şekil 3.1.'de sunulan akış şemasına göre, HSMS285C diyotunun parametreleri göz önünde bulundurularak 2,45 GHz frekansında çalışan bir kademeli gerilim çoklayıcı devre için yapılan inceleme aşamaları örnek olarak gösterilmiştir.

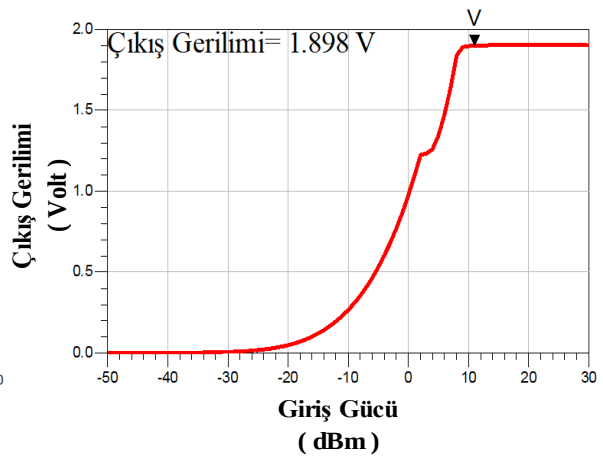
HSMS285C diyotu ile oluşturulan ideal halde bir kademeli gerilim çoklayıcı devre Şekil 3.2.a.'da, bu devrenin yansıma katsayısı Şekil 3.2.b.'de, çıkış gerilimi Şekil 3.2.c.'de, empedansı Şekil 3.2.d.'de ve verimi Şekil 3.2.e.'de sunulmuştur.



(a)

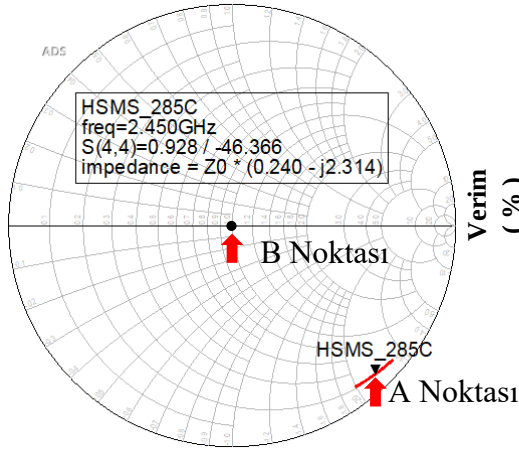


(b)

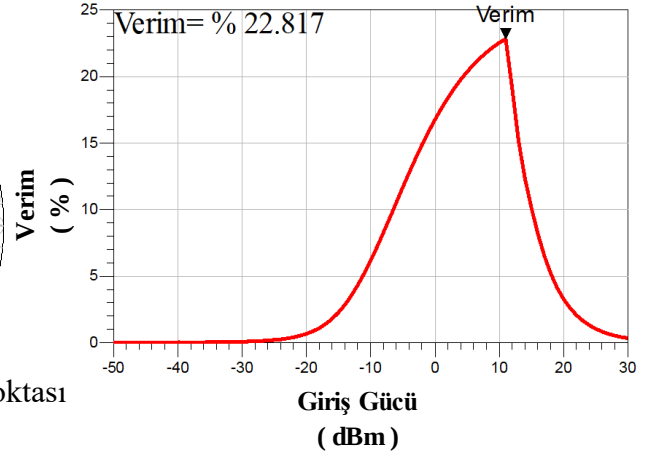


(c)

Şekil 3.2. a. İdeal gerilim çoklayıcı devre, b. Frekansa göre yansıma katsayısı, c. Giriş gücüne göre çıkış gerilimi.



(d)

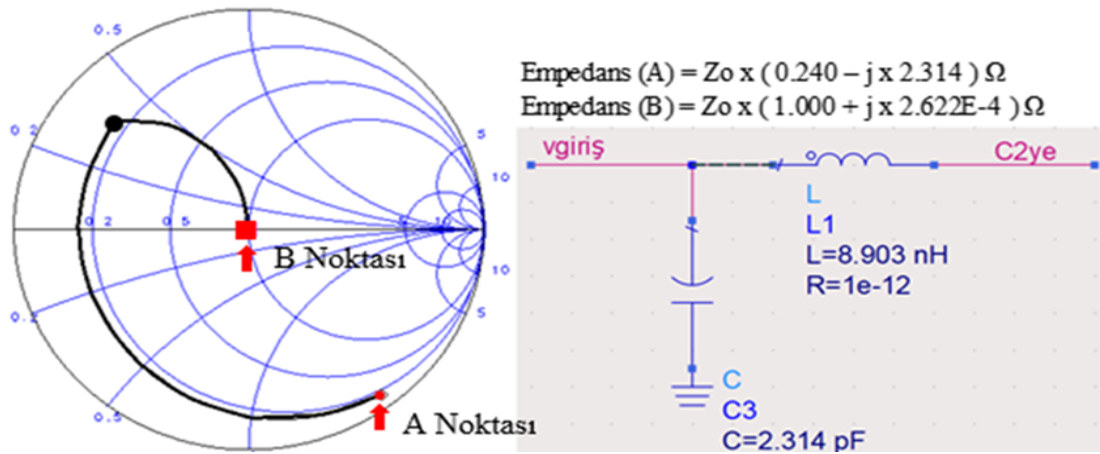


(e)

Şekil 3.2 (devam). d. Smith çizelgesi, e. Giriş gücüne göre verim değişimi.

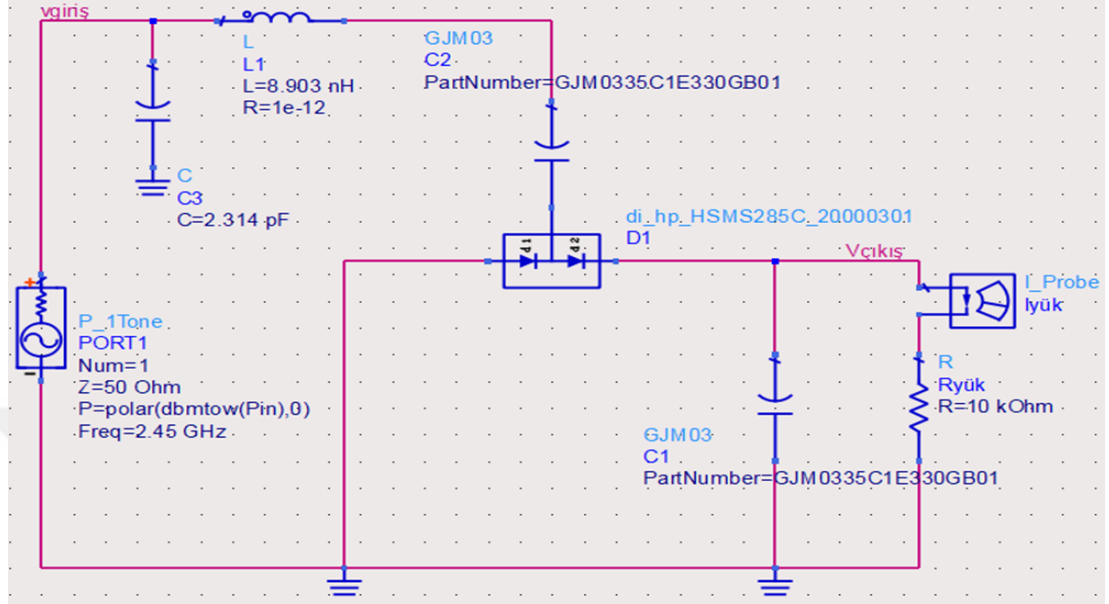
3.2 Empedans Uyumlama Devresi Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi

Yük direnci bağlanmış durumdaki gerilim çoklayıcı devrenin empedansının, anten empedansına uyumlanması için gerekli yapı uyumlama devresidir. Böylece maksimum güç aktarımı sağlanmış olur ve yükten kaynağa sinyal yansıması olmaz. Örneğin, Şekil 3.2.d.'de ideal devrenin empedansı, $Z_0 \times (0,240 - j2,314) \Omega$ olarak elde edilmiş olup, bu empedansı $Z_0 = 50 \Omega$ 'a eşitlemek için Şekil 3.3.'te görüldüğü gibi Smith çizelgesinden faydalanılmıştır. Şekil 3.3.'te verilen L tipi ideal (L-C) uyumlama devresi tasarlanarak devrenin empedansı, A noktasındaki $Z_0 \times (0,240 - j2,314) \Omega$ empedansından B noktasındaki $Z_0 \times (1,000 + j2,622E-4) \Omega$ 'a uyumlanmıştır.

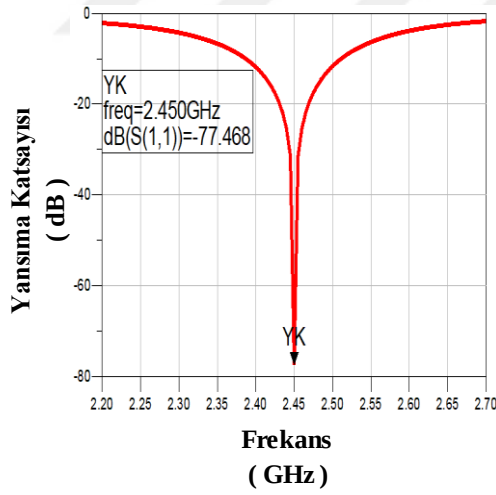


Şekil 3.3. Smith çizelgesi ile L tipi (L-C) empedans uyumlama devresi.

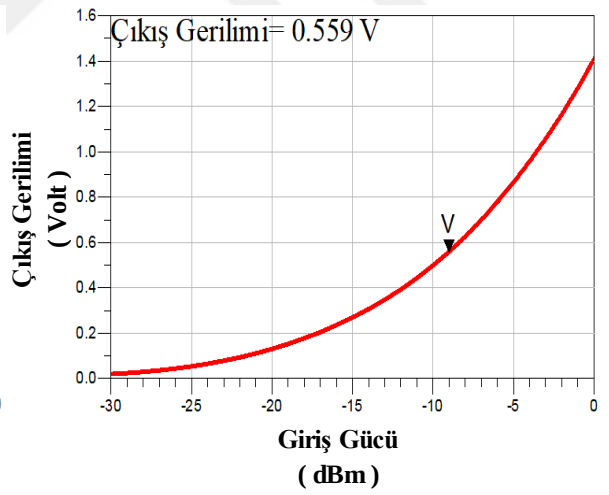
Uyumlama yapıldıktan sonra elde edilen gerilim çoklayıcı devre Şekil 3.4.a.'da, bu devrenin yansıma katsayısı Şekil 3.4.b.'de, çıkış gerilimi Şekil 3.4.c.'de, empedansı Şekil 3.4.d.'de ve verimi Şekil 3.4.e.'de sunulmuştur.



(a)

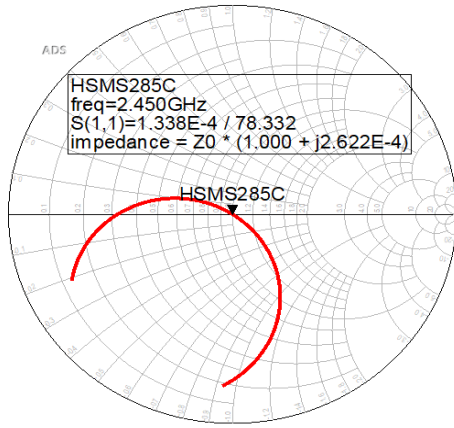


(b)

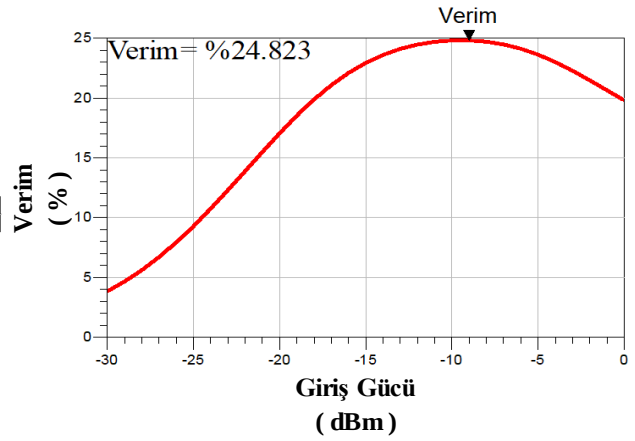


(c)

Şekil 3.4. a. Empedans uyumlaması yapılmış gerilim çoklayıcı devre, b. Frekansa göre yansıma katsayısı, c. Giriş gücüne göre çıkış gerilimi.



(d)



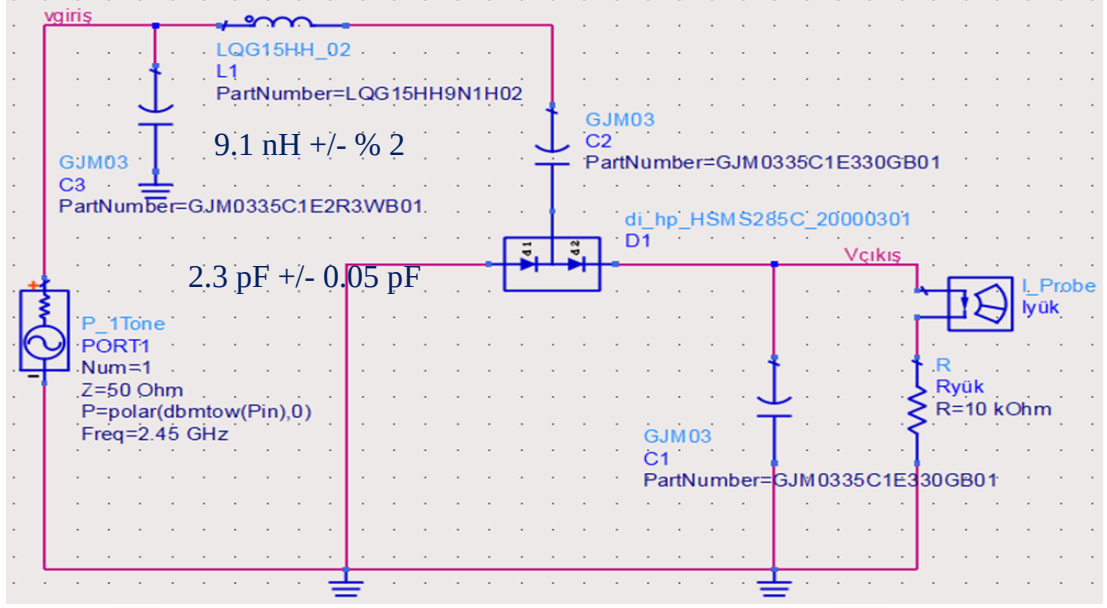
(e)

Şekil 3.4 (devam). d. Smith çizelgesi, **e.** Giriş gücüne göre verim değişimi.

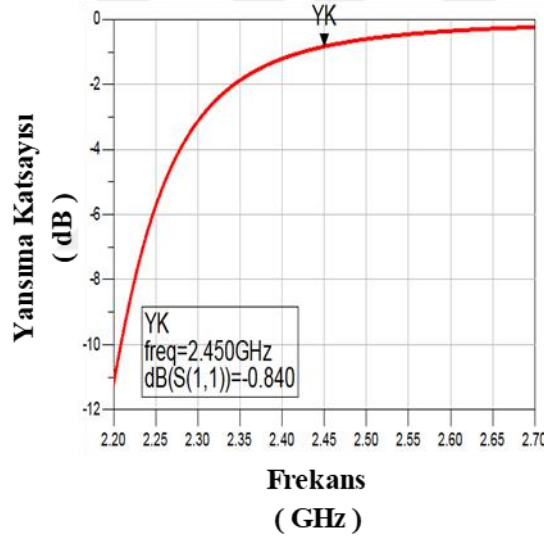
Şekil 3.2.b.'de uyumlama yapılmadığı durumda yansımaya katsayısı -0,650 dB iken Şekil 3.4.b.'de uyumlama yapıldığında 2,45 GHz frekansında yansımaya katsayısı -77,468 dB olarak elde edilmiştir. Bu, iletilen sinyal gücünün yük tarafından geri yansımadağının, yani belirtilen frekansta güç aktarımının iyi olduğunun göstergesidir. Şekil 3.4.c.'de ve Şekil 3.4.e.'de görüleceği üzere empedans uyumlaması ile düşük giriş güç seviyelerinde gerilim ve verimde artış gözlemlenmiştir. Uyumlama devresi olmadığı durumda maksimum verim 11 dBm giriş gücünde % 22,817 olarak elde edilirken, uyumlama ile -9 dBm giriş gücünde % 24,823 verim elde edilmiştir.

3.3 Devre Elemanlarının Murata Marka Devre Elemanları İle Değiştirilmesi

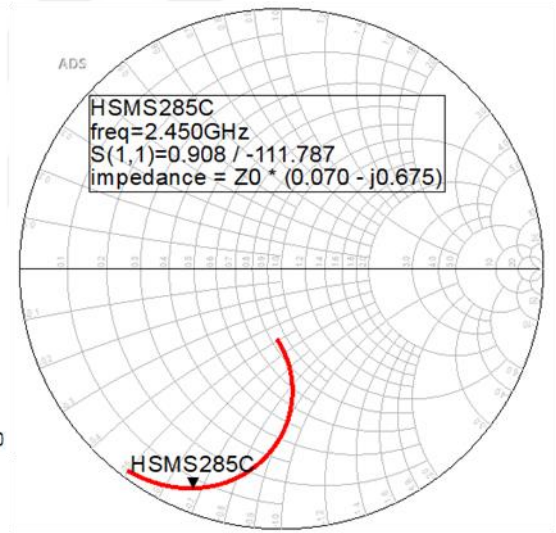
Yapılan simülasyonlarda kondansatörler için Murata GJM0335C1E serisi, bobinler için ise Murata LQG15HH serisi devre elemanlarının kullanımı göz önünde bulundurulmuştur. Uygun ürün seçimi yapılırken Şekil 3.3.'te elde edilen L tipi (L-C) uyumlama devre elemanlarının sayısal değerlerine yakın değerde ürünler seçilmiştir. Bu ürünler devreye katıldıktan sonra elde edilen gerilim çoklayıcı devre Şekil 3.5.a.'da, bu devrenin yansımaya katsayısı Şekil 3.5.b.'de ve empedansı Şekil 3.5.c.'de sunulmuştur. Şekil 3.5.a.'da görüldüğü üzere empedans uyumlama devresinde elde edilen ideal devre elemanlarının yerine C3 kondansatörü için Murata'nın, 2,3 pF +/- 0,05 pF değerinde GJM0335C1E2R3WB01 tipindeki ürünü, L1 bobini için ise Murata'nın, 9,1 nH +/- %2 değerinde LQG15HH9N1H02 tipindeki ürünü kullanılmıştır.



(a)



(b)



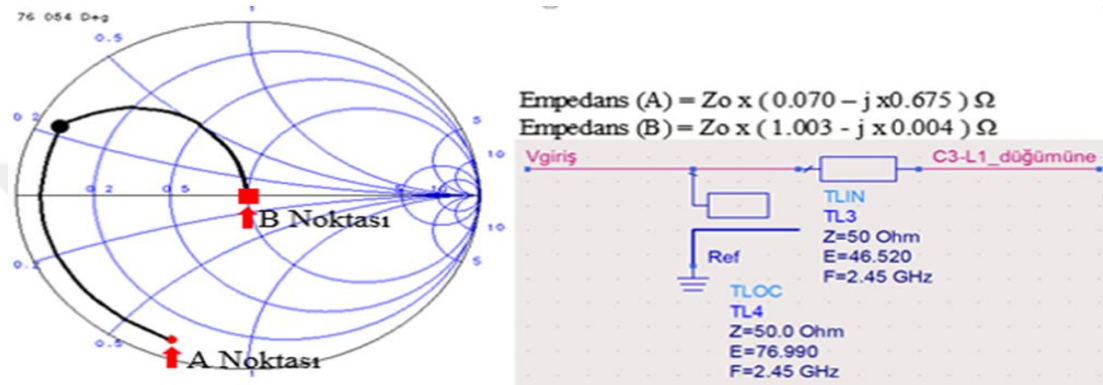
(c)

Şekil 3.5. a. Murata devre elemanları ile oluşturulan gerilim çoklayıcı devre, b. Frekansa göre yansım katsayısı, c. Smith çizelgesi.

Murata ürünleri kullanıldıktan sonra 2,45 GHz frekansında yansım katsayısı değeri, -0,840 dB, devrenin empedans değeri ise $Z_0 \times (0,070 - j0,675) \Omega$ olarak elde edilmiştir. Yansım katsayısındaki bozulma Şekil 3.5.b.'de ve empedanstaki bozulma Şekil 3.5.c.'de belirgin olarak görülmektedir.

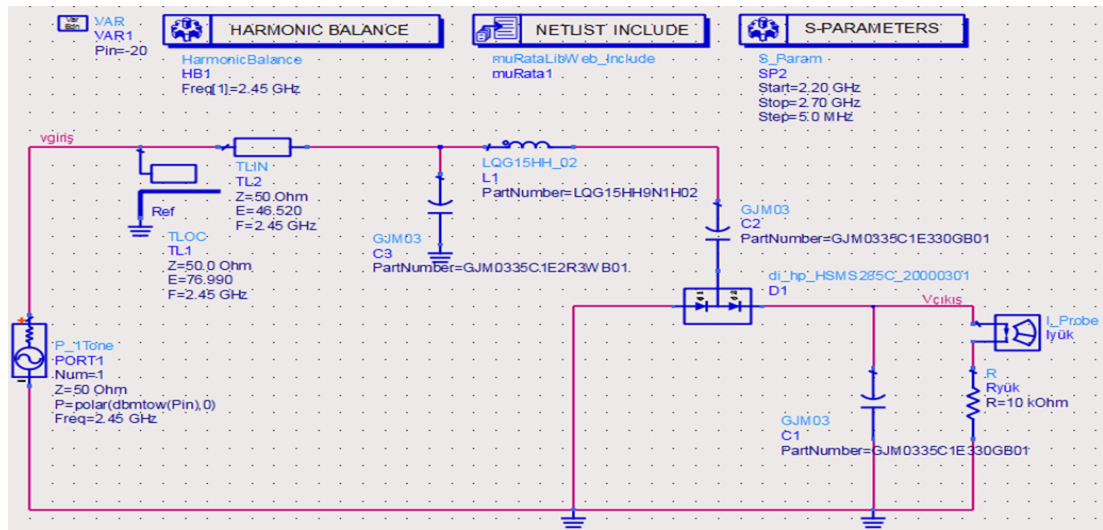
3.4 Murata Devre Elemanları İle Oluşturulan Devreye İletim Hattı Eklenmesi

Murata devre elemanların parametrelerinden kaynaklanan bu bozulmayı gidermek için Şekil 3.6.'da görüldüğü gibi Smith çizelgesinden faydalanılmıştır. Şekil 3.6.'da verilen açık-seri iletim hattı devresi tasarlanarak devrenin empedansı, A noktasındaki $Z_0 \times (0,070 - j0,675) \Omega$ 'dan B noktasındaki $Z_0 \times (1,003 - j0,004) \Omega$ 'a uyumlanmıştır. Uyumlama yapılırken $Z = 50 \Omega$ sabit alınarak E (Elektriksel Alan) değerleri ayarlanmıştır.



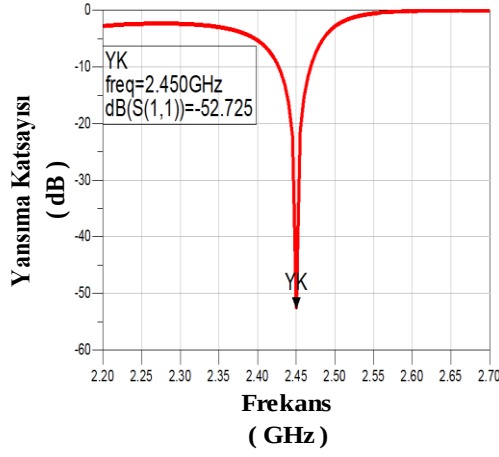
Şekil 3.6. Smith çizelgesi ile TLOC + TLIN hesabı ve TLOC + TLIN devresi.

Bu ürünler devreye katıldıktan sonra elde edilen gerilim çoklayıcı devre Şekil 3.7.a.'da, bu devrenin yansıma katsayısı Şekil 3.7.b.'de, çıkış gerilimi, Şekil 3.7.c.'de, empedansı Şekil 3.7.d.'de ve verimi Şekil 3.7.e.'de sunulmuştur.

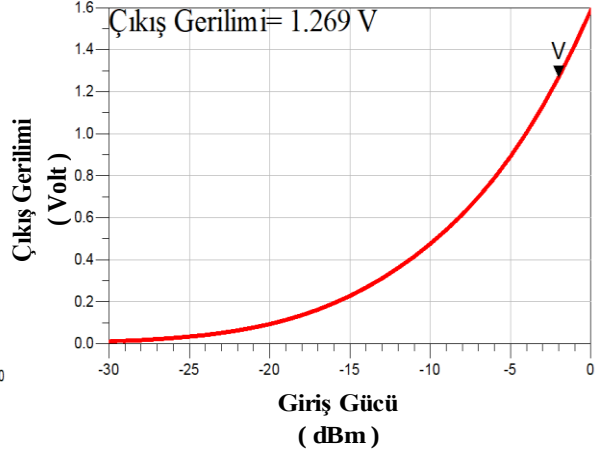


(a)

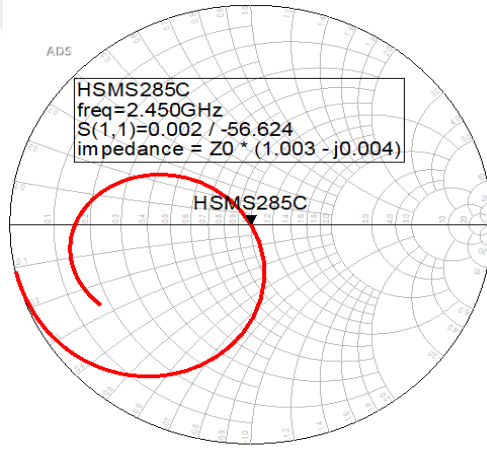
Şekil 3.7. a. Murata + İletim hattı devre elemanları ile oluşturulan gerilim çoklayıcı devre.



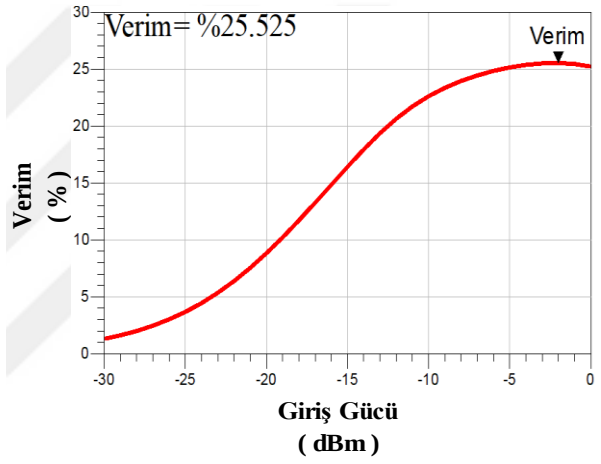
(b)



(c)



(d)



(e)

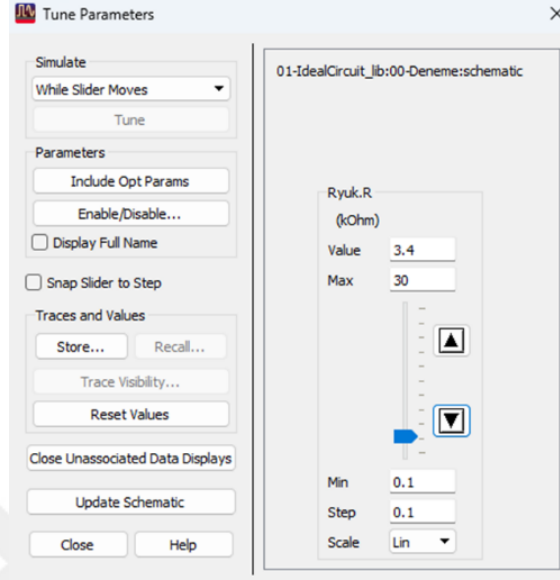
Şekil 3.7 (devam). b. Frekansa göre yansıma katsayısı, c. Giriş gücüne göre çıkış gerilimi, d. Smith çizelgesi, e. Giriş gücüne göre verim değişimi.

Şekil 3.4.b.'de empedans uyumlaması yapıldığında yansıma katsayısı -77,468 dB iken, Murata devre elemanlarının kullanımı ile ideal değerinden sapan yansıma katsayısı, Şekil 3.7.b.'de iletim hattı elemanları ile uyumlama yapıldığında 2,45 GHz frekansında -52,725 dB olarak elde edilmiştir. Şekil 3.7.c.'de ve Şekil 3.7.e.'de görüleceği üzere gerilim ve verim değeri, ideal durumdaki değerden yüksektir.

3.5 Maksimum Verimi Veren Yük Direncinin Belirlenmesi

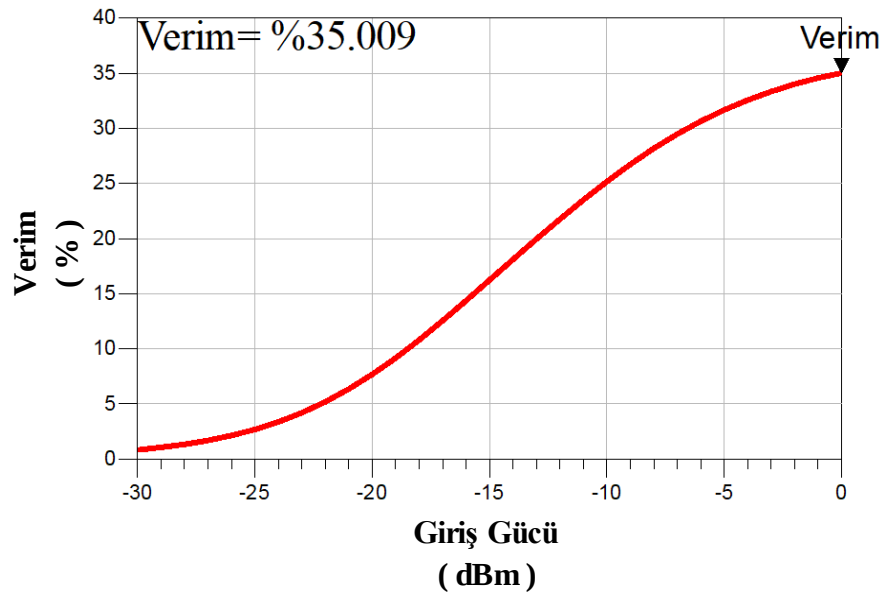
Enerji hasat sistemlerinin verimi, yük direncinden önemli ölçüde etkilenir. Bu nedenle, tasarımda Şekil 3.8.'de görülen ADS programının direnç ayar parametresi özelliğinden

faaydalanarak 0,1 k Ω ile 30 k Ω arasinda 0,1 k Ω artisla yuik direnci deuerine goere verim durumu analiz edilmiş olup, HSMS285C diyotu iuin 0 dBm giriş gucuinde maksimum verimi veren yuik direnci 3,4 k Ω olarak belirlenmiştir.

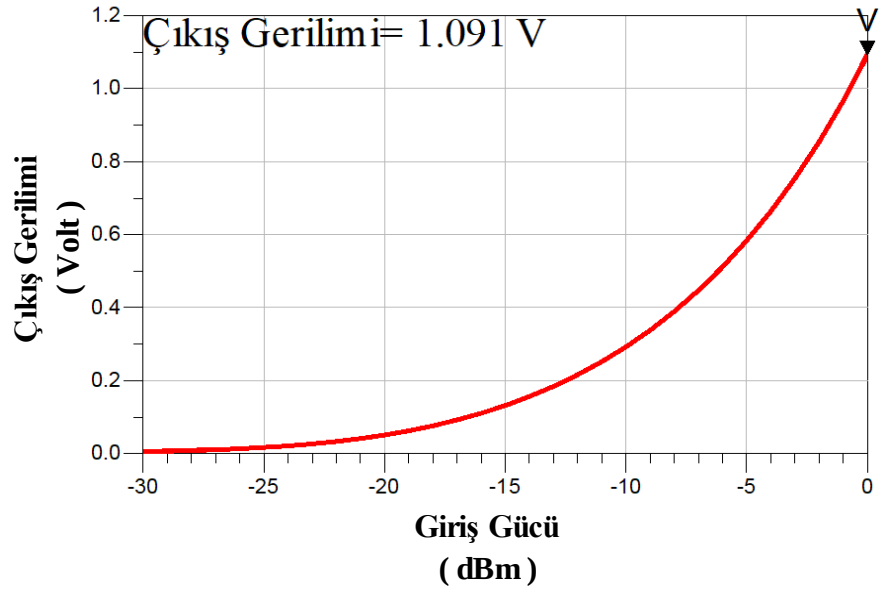


Ŗekil 3.8. Direnui ayar parametresi.

3,4 k Ω yuik direncinde HSMS285C diyotu ile oluşturulan bir kademeli gerilim uoklayici devrenin verim grafiui Ŗekil 3.9.a.'da, uikiŝ gerilimi Ŗekil 3.9.b.'de sunulmuştur.



Ŗekil 3.9.a. HSMS285C diyotu, Murata + İletim hattı devre elemanları ve $R_{yuik} = 3,4$ k Ω ile oluşturulan bir kademeli gerilim uoklayici devrenin giriş gucuine goere verim deuiŝimi,



Şekil 3.9.b. HSMS285C diyotu, Murata + İletim hattı devre elemanları ve $R_{yük} = 3,4 \text{ k}\Omega$ ile oluşturulan bir kademeli gerilim çoklayıcı devrenin giriş gücüne göre çıkış gerilimi.

Yük direnci değiştirildiğinde HSMS285C diyotu için verim %35,009, çıkış gerilimi ise 1,091 Volt olarak elde edilmiştir. Yük direncinin değişimi verimde önemli bir artışa neden olurken, çıkış geriliminde düşüş gözlenmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde çalışmalardan elde edilen sonuçlar, tablolar ve şekillerle sunulmuştur.

4.1 Enerji Hasat Devresi Tasarım Parametrelerinin 2,45 GHz Frekansında Çalışan Bir Kademeli Devre İçin Belirlenmesi

Bir kademeli gerilim çoklayıcı devre tasarımında kullanılan diğer diyotların analizleri de tıpkı HSMS285C diyotunun analizi gibi yapılmıştır. İdeal bir gerilim çoklayıcı devrede incelenen diyotlarla elde edilen veriler, Çizelge 4.1.'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.1.'de görüleceği üzere ideal durumda 33 pF Murata kondansatörler kullanılarak tasarlanan bir kademeli gerilim çoklayıcı devrelerde, 10 k Ω yük direncinde ve -2 dBm giriş gücünde en yüksek çıkış gerilimi 0,771 V ve verim % 9,424 olmak üzere SMS7630 diyotunda elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. Bir kademeli 2,45 GHz frekansında çalışan devrelerde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü için empedans uyumlamadan önce elde edilen veriler.

Diyotlar	Yansımaya Katsayısı (dB)	Empedanslar ($Z_0 = 50\Omega$)	$R_{yük} = 10\text{ k}\Omega$ için	
			$V_{ÇIKIŞ}$ (Volt)	Verim (%)
HSMS2850	-0,556	$Z_0 \times (0,161 - j2,000)$	0,671	7,138
HSMS2852	-0,605	$Z_0 \times (0,197 - j2,152)$	0,692	7,581
HSMS285B	-0,579	$Z_0 \times (0,176 - j2,061)$	0,687	7,470
HSMS285C	-0,650	$Z_0 \times (0,240 - j2,314)$	0,712	8,025
HSMS2860	-0,085	$Z_0 \times (0,024 - j1,995)$	0,491	3,829
HSMS2862	-0,091	$Z_0 \times (0,029 - j2,149)$	0,515	4,203
HSMS286B	-0,087	$Z_0 \times (0,026 - j2,057)$	0,511	4,140
HSMS2820	-0,851	$Z_0 \times (0,064 - j0,548)$	0,131	0,271
HSMS2822	-0,946	$Z_0 \times (0,068 - j0,492)$	0,362	2,077
HSMS2810	-1,517	$Z_0 \times (0,091 - j0,212)$	0,021	0,007
SMS7630	-0,910	$Z_0 \times (0,184 - j1,580)$	0,771	9,424

Empedans uyumlama yapıldıktan sonra Çizelge 4.2.'de görüleceği üzere bütün gerilim çoklayıcı devrelerin yansımaya katsayıları yükselmiştir. Empedans değerleri $Z_0 = 50\Omega$ değerine yaklaşmıştır. Özellikle SMS7630 diyotunun yansımaya katsayısı uyumlamadan önce -0,910 dB iken, uyumlamadan sonra -81,008 dB olmuştur. 10 k Ω yük direncinde ve -2 dBm giriş gücünde en yüksek çıkış gerilimi 1,222 V ve verim de %23,673 olmak üzere yine SMS7630 diyotunda elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. Bir kademeli 2,45 GHz frekansında çalışan devrelerde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü için empedans uyumlamadan sonra elde edilen veriler.

Diyotlar	Yansım Katsayısı (dB)	Empedanslar ($Z_0 = 50\Omega$)	$R_{yük} = 10\text{ k}\Omega$ için	
			$V_{ÇIKIŞ}$ (Volt)	Verim (%)
HSMS2850	-80,449	$Z_0 \times (1,000 + j1,764E-4)$	1,177	21,952
HSMS2852	-67,540	$Z_0 \times (0,999 + j6,739E-4)$	1,172	21,782
HSMS285B	-67,438	$Z_0 \times (1,000 - j6,940E-4)$	1,181	22,104
HSMS285C	-77,468	$Z_0 \times (1,000 + j2,622E-4)$	1,164	21,484
HSMS2860	-50,234	$Z_0 \times (1,002 - j0,006)$	0,710	7,996
HSMS2862	-56,763	$Z_0 \times (1,001 - j0,003)$	0,715	8,093
HSMS286B	-53,722	$Z_0 \times (1,001 - j0,004)$	0,708	7,934
HSMS2820	-73,051	$Z_0 \times (1,000 - j2,245E-4)$	0,388	2,389
HSMS2822	-72,485	$Z_0 \times (1,000 - j4,558E-4)$	0,696	7,687
HSMS2810	-61,085	$Z_0 \times (1,001 - j0,001)$	0,233	0,857
SMS7630	-81,008	$Z_0 \times (1,000 - j1,589E-4)$	1,222	23,673

Empedans uyumlama sonucunda elde edilen ideal değerlerdeki devre elemanları, ideal değerlere yakın değerlerdeki Murata kondansatör ve bobinlerle değiştirilmiş olup, devrelerin yansım katsayılarında ve empedanslarında Çizelge 4.3.'te görüldüğü gibi kaymalar oluşmuştur.

Çizelge 4.3. Bir kademeli 2,45 GHz frekansında çalışan devrelerde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü için Murata ürünleri ile elde edilen veriler.

Diyotlar	Yansım Katsayısı (dB)	Empedanslar ($Z_0 = 50\Omega$)	$R_{yük} = 10\text{ k}\Omega$ için	
			$V_{ÇIKIŞ}$ (Volt)	Verim (%)
HSMS2850	-0,949	$Z_0 \times (0,069 - j0,512)$	1,382	30,262
HSMS2852	-0,719	$Z_0 \times (0,056 - j0,587)$	1,303	26,898
HSMS285B	-1,444	$Z_0 \times (0,114 - j0,613)$	1,402	31,170
HSMS285C	-0,840	$Z_0 \times (0,070 - j0,675)$	1,409	31,445
HSMS2860	-0,114	$Z_0 \times (0,007 - j0,084)$	0,030	0,014
HSMS2862	-0,091	$Z_0 \times (0,005 - j0,099)$	0,011	0,002
HSMS286B	-0,079	$Z_0 \times (0,005 - j0,086)$	0,004	0,000
HSMS2820	-1,117	$Z_0 \times (0,071 - j0,323)$	0,244	0,945
HSMS2822	-1,898	$Z_0 \times (0,124 - j0,370)$	0,645	6,595
HSMS2810	-3,426	$Z_0 \times (0,243 - j0,489)$	0,071	0,080
SMS7630	-2,774	$Z_0 \times (0,245 - j0,725)$	1,279	25,909

Çizelge 4.3.'te görüldüğü gibi Murata devre elemanların kullanılmasından dolayı ortaya çıkan empedans uyumsuzluğunu gidermek için açık-seri iletim hattı devresi tasarlanarak devrelerin empedansları $Z_0 = 50 \Omega$ değerine yaklaştırılmıştır.

Murata + İletim hattı devreleri de gerilim çoklayıcı devreye eklendikten sonra Çizelge 4.4.'de görüleceği gibi bütün gerilim çoklayıcı devrelerin yansıma katsayılarında düzelme gözlenmiştir. En iyi yansıma katsayısı HSMS2820 diyotuna aittir ve -63,544 dB'dir. İletim hattı eklenmeden önce bu değer HSMS2820 diyotu için -1,117 dB olarak gözlenmişti. 10 k Ω yük direncinde ve -2 dBm giriş gücünde en yüksek çıkış gerilimi 1,290 V ve en iyi verim de %26,387 olmak üzere HSMS2860 diyotuna aittir. Yük direncinin değişimi ile birlikte HSMS2860 diyotunun geriliminde düşüş gözlenirken, veriminde yükselme gözlenmiştir. SMS7630 diyotunun verimi 2,7 k Ω yük direncinde, %45,414 değeri ile incelenen bütün diyotların verimlerinin arasında en iyi verimi elde etmiştir.

Çizelge 4.4. Bir kademeli 2,45 GHz frekansında çalışan devrelerde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü için en yüksek verimi sağlayan yük direnci ve elde edilen verim.

Diyotlar	Yansıma Katsayısı (dB)	$R_{yük} = 10 \text{ K}$		Maksimum Değerler		
		$V_{ÇIKIŞ}$ (Volt)	Verim (%)	$V_{ÇIKIŞ}$ (Volt)	Verim (%)	$R_{yük}$ (k Ω)
HSMS2850	-43,717	1,267	25,433	0,860	33,487	3,5
HSMS2852	-46,524	1,259	25,110	0,861	33,570	3,5
HSMS285B	-46,219	1,263	25,283	0,887	33,680	3,7
HSMS285C	-52,723	1,269	25,525	0,879	34,022	3,6
HSMS2860	-29,120	1,290	26,387	1,054	27,927	6,3
HSMS2862	-31,603	1,252	24,862	0,994	27,023	5,8
HSMS286B	-14,853	1,251	24,813	0,973	26,806	5,6
HSMS2820	-63,544	0,380	2,292	0,188	6,255	0,9
HSMS2822	-32,760	0,662	6,955	0,459	11,111	3
HSMS2810	-53,993	0,106	0,178	0,111	0,179	11
SMS7630	-62,015	1,229	23,934	0,880	45,414	2,7

Tasarımda, seçilen 10 k Ω yük direncine göre Çizelge 4.5.'te görüldüğü gibi, her bir diyot için uyumlama devresi elemanları belirlenmiştir. Murata ürünlerinin seçimi yapılırken bu ideal devre elemanlarından faydalanılmıştır. Murata ürünlerin empedans uyumlama üzerindeki negatif etkisini gidermek amacıyla devreye açık-seri iletim hattı devre elemanları eklenmiştir. Elemanların değerleri Çizelge 4.5.'te sunulmuştur.

Çizelge 4.5. Bir kademeli 2,45 GHz frekansında çalışan devrelerde kullanılan devre elemanları ve değerleri.

Diyotlar	Empedans Uyumlama					
	İdeal Durum		Murata + İletim hattı ürünleri			
	L(nH)	C(pF)	LQG15HH Serisi L	GJM0335C1E Serisi C	E-TLOC	E-TLIN
HSMS2850	7,688	2,969	7N5H02	3R0WB01	76,100	40,400
HSMS2852	8,283	2,622	8N2G02	2R6WB01	77,980	42,010
HSMS285B	7,931	2,815	7N5J02	2R8WB01	72,660	47,730
HSMS285C	8,903	2,314	9N1H02	2R3WB01	76,990	46,520
HSMS2860	6,983	8,215	6N8J02	8R2WB01	85,210	9,557
HSMS2862	7,528	7,471	7N5G02	7R5WB01	85,920	9,719
HSMS286B	7,201	7,912	7N5J02	7R9WB01	85,910	8,891
HSMS2820	2,574	4,981	2N7C02	5R0WB01	74,840	32,200
HSMS2822	2,415	4,825	2N4B02	4R8CB01	69,950	38,850
HSMS2810	1,624	4,105	1N6B02	4R1WB01	26,680	88,560
SMS7630	6,392	2,734	6N2C02	2R7WB01	64,720	58,690

Çizelge 4.6.'da 0 dBm, -5 dBm, -10 dBm, -15 dBm, -20 dBm, -25 dBm ve -30 dBm giriş güçleri için, incelenen bütün diyotların verimi görülmektedir. HSMS2820, HSMS2822, HSMS2810 diyotlarının verimi çok düşüktür. Düşük giriş gücü seviyeleri için en yüksek verimler sırasıyla SMS7630, HSMS285C ve -10 dBm ve daha düşük giriş güçleri için HSMS2860 diyotunda, 0 dBm ve -5 dBm giriş güçlerinde HSMS286B diyotunda elde edilmiştir.

Çizelge 4.6. Bir kademeli 2,45 GHz frekansında çalışan devrelerde Murata + İletim hattı yapısı için giriş güçlerine göre verim değerleri.

Diyotlar	Murata + İletim hattı devresindeki verim (%)						
	-30 dBm	-25 dBm	-20 dBm	-15 dBm	-10 dBm	-5 dBm	0 dBm
HSMS2850	0,836	2,696	7,677	16,144	24,929	31,225	34,449
HSMS2852	0,750	2,438	7,130	15,567	24,642	31,239	34,617
HSMS285B	0,990	3,128	8,534	17,145	25,822	31,762	34,355
HSMS285C	0,860	2,760	7,821	16,436	25,411	31,776	34,973
HSMS2860	0,001	0,005	0,074	1,995	11,806	16,881	29,937
HSMS2862	0,000	0,002	0,028	0,906	8,131	21,563	29,191
HSMS286B	0,000	0,001	0,005	0,151	3,522	23,995	31,383
HSMS2820	0,000	0,000	0,000	0,001	0,088	2,726	8,444
HSMS2822	0,000	0,000	0,000	0,004	0,300	4,956	13,481
HSMS2810	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,722
SMS7630	2,535	6,560	13,712	22,813	31,714	41,040	45,710

Çizelge 4.7.'de HSMS285C, HSMS2860, HSMS286B ve SMS7630 diyotları için elde edilen maksimum verim değerleri ve bu değerlerdeki giriş güçleri sunulmuştur. Çizelge 4.7.'de inceleneceği üzere, 2,45 GHz için en yüksek verim SMS7630 diyotunda 2,7 k Ω yük direncinde, -1 dBm giriş gücünde %46,053 olarak elde edilmiştir. Maksimum çıkış gerilimi ise 1,373 V olarak 0 dBm de HSMS2860 diyotu için elde edilmiştir.

Çizelge 4.7. Bir kademeli 2,45 GHz frekansında çalışan devrelerde Murata + İletim hattı yapısı için maksimum verim değerlerini veren giriş güçleri, gerilimler ve verimler.

Diyotlar	Maksimum değerler		
	Verim (%)	Gerilim (Volt)	P _{in} (dBm)
HSMS285C	34,973	1,122	0
HSMS2860	29,937	1,373	0
HSMS286B	31,383	1,326	0
SMS7630	46,053	0,994	-1

Çizelge 4.7.'den yola çıkarak, N kademeli gerilim çoklayıcı devresi analizi için HSMS285C, HSMS286B ve SMS7630 diyotlarından faydalanılmıştır.

4.2 Kademe Sayısının 2,45 GHz Frekansında Çalışan Gerilim Çoklayıcı Devre Üzerindeki Etkisi

Bir kademeli gerilim çoklayıcı devre analizinde en iyi verimi veren HSMS285C, HSMS286B ve SMS7630 diyotları kullanılarak, gerilim çoklayıcı devrelerde kademe artışının etkilerine dair inceleme yapılmıştır. Diğer diyotların kademe artışındaki durumda analizlerine gerek görülmemiştir.

HSMS285C, HSMS286B ve SMS7630 diyotları ile oluşturulan N kademeli devrelerde oluşan harmonikleri ortadan kaldırmak amacıyla yükten önce DC geçiş filtresi olarak, Murata GJM0335C1E330GB01 kodlu, 33 pF $\pm$ 2% kapasiteye sahip kondansatörler kullanılmıştır.

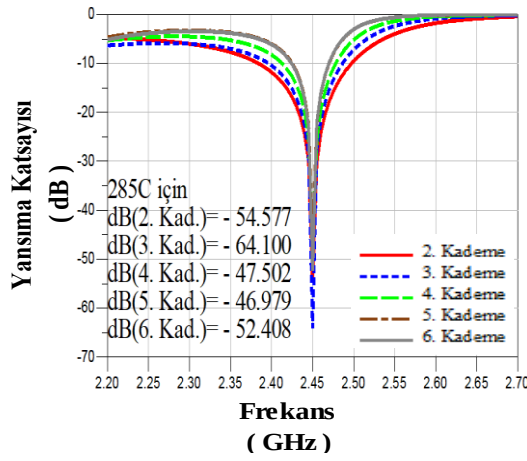
HSMS285C diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde elde edilen veriler Çizelge 4.8.'de sunulmuştur.

Çizelge 4.8. HSMS285C diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü ve $R_{yük} = 10$ k Ω yük direnci için elde edilen veriler.

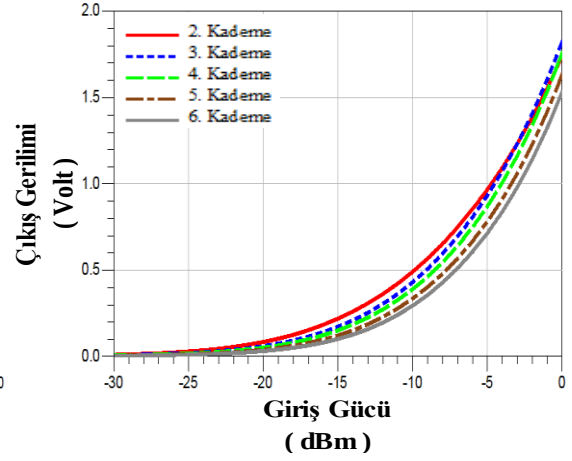
Devre Tipi	ÖZELLİK	2. Kademe	3. Kademe	4. Kademe	5. Kademe	6. Kademe
İdeal Devre	Empedans (Ω)	$Z_o \times (0,120 - j0,152)$	$Z_o \times (0,080 - j0,767)$	$Z_o \times (0,006 - j0,574)$	$Z_o \times (0,048 - j0,459)$	$Z_o \times (0,040 - j0,383)$
Empedans Uyumlama Devresi	Yansım Katsayısı (dB)	-67,446	-49,718	-48,124	-46,140	-43,010
	Verim (%)	28,827	29,132	27,172	24,229	21,420
	Bobin (nH)	4,797	3,372	2,636	2,185	1,881
	Kondansatör (pF)	3,512	4,406	5,143	5,786	6,365
Murata Ürünlü Devre	Empedans (Ω)	$Z_o \times (0,249 - j0,542)$	$Z_o \times (0,119 - j0,382)$	$Z_o \times (0,079 - j0,322)$	$Z_o \times (0,045 - j0,246)$	$Z_o \times (0,042 - j0,213)$
	Bobin	LQG15HH 4N7B02	LQG15HH 3N3B02	LQG15HH 2N7B02	LQG15HH 2N2B02	LQG15HH 1N8B02
	Kondansatör	GJM0335C1 E3R5WB01	GJM0335C1 E4R4WB01	GJM0335C1 E5R1WB01	GJM0335C1 E5R8WB01	GJM0335C1 E6R4WB01
TL Devre	E-TLOC	61,72	70,27	73,93	77,88	78,18
	E-TLIN	53,16	38,95	32,91	25,47	23,40

Çizelge 4.8.'de HSMS285C diyotu ile oluşturulan enerji hasat devrelerinde empedans uyumlamadan sonra, kademe sayısı arttıkça yansım katsayısının düştüğü, verimin ise 2. kademedeki düştüğü, 3. kademedeki arttığı, 4. kademedeki düştüğü görülmüştür.

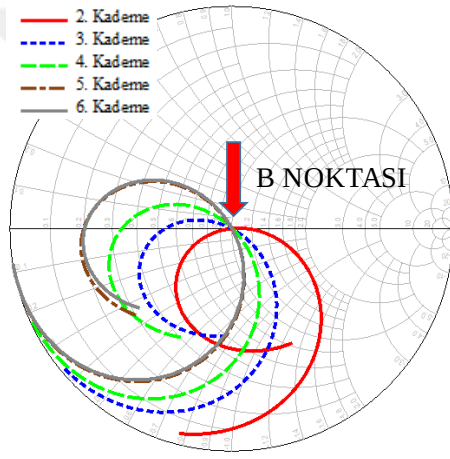
Murata + İletim hattı devresinde kademe sayısının artmasına bağlı olarak $R_{yük} = 10$ k Ω yük direnci için yansım katsayılarının değişimi Şekil 4.1.a.'da, çıkış gerilimlerinin değişimi Şekil 4.1.b.'de, empedanslarının değişimi Şekil 4.1.c'de ve maksimum verimlerinin değişimi Şekil 4.1.d.'de sunulmuştur.



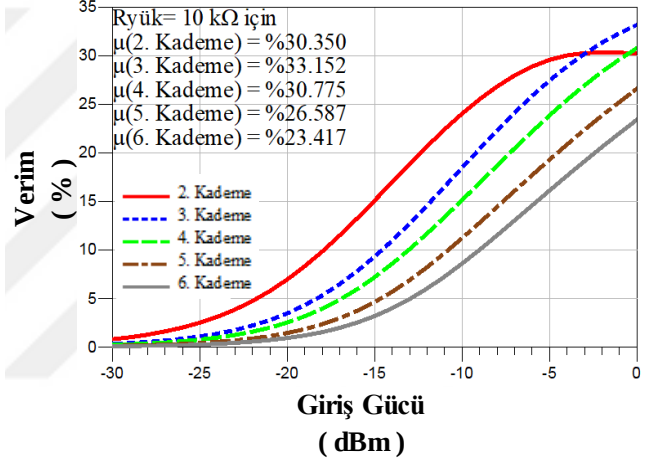
(a)



(b)



(c)

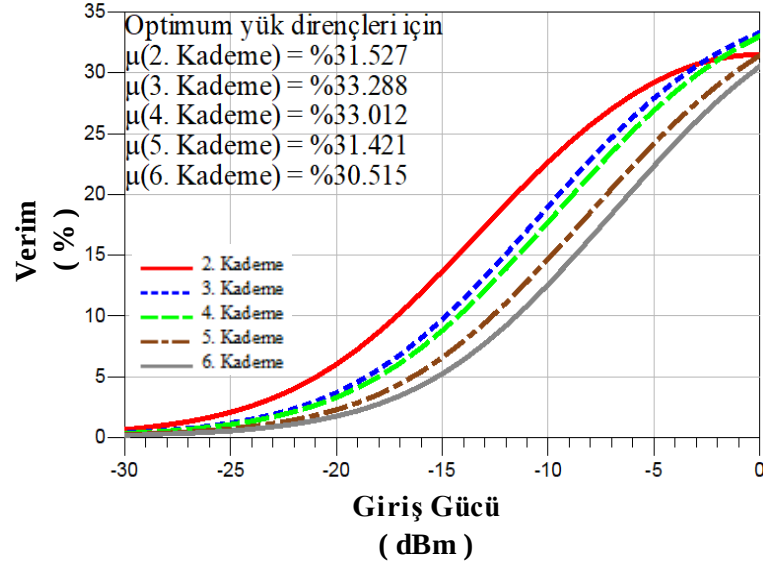


(d)

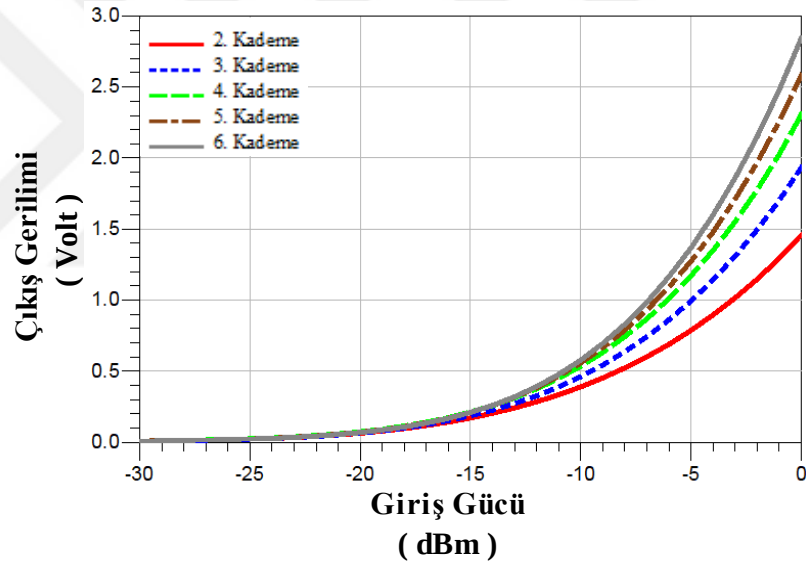
Şekil 4.1. HSMS285C diyotuyla ve $R_{yük} = 10 \text{ k}\Omega$ yük direnciyle oluşturulan Murata + İletim hattı devresinin, **a.** Frekansa göre yansıma katsayısı, **b.** Giriş gücüne göre çıkış gerilimi, **c.** Smith çizelgesi, **d.** Giriş gücüne göre verim değişimi.

Şekil 4.1.d.'de kademeler arasında en yüksek verim, 3. kademede 0 dBm giriş gücünde ve 10 kΩ yük direncinde % 33,152 olarak elde edilmiştir. Bu değer Çizelge 3.7.'de sunulan bir kademeli devrenin verim değerinden düşüktür.

Yük direnci ayarı yapıldıktan sonra en yüksek verimler Şekil 4.2.a.'da, en yüksek verim değerlerine bağlı olarak gerilim değerleri de Şekil 4.2.b.'de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.2. Maksimum verimlerin elde edildiği $R_{yük}$ değerleri için **a.** Giriş güçlerine göre verim değişimleri, **b.** Giriş güçlerine göre çıkış gerilimleri.

Çizelge 4.9.'da verimin en yüksek olduğu yük direnci değerleri 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe için sunulmuştur. Her bir kademe artışıyla çıkış geriliminde artış gözlenirken, verim değerlerinde 3. kademedan sonra düşük oranlarda düşüşler gözlenmektedir.

Çizelge 4.9. HSMS285C diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe analizlerinde verimin en yüksek olduğu yük dirençleri ve giriş güçleri için elde edilen veriler.

Kademeler	Giriş Gücü (dBm)	$R_{yük}$ (k Ω)	Çıkış Gerilimi (Volt)	Verim (%)
2. Kademe	0	6,7	1,453	31,527
3. Kademe	0	11,2	1,931	33,288
4. Kademe	0	16,1	2,305	33,012
5. Kademe	0	21,2	2,581	31,421
6. Kademe	0	26,5	2,844	30,515

Çizelge 4.9.'da görüleceği üzere -30 dBm ile 0 dBm giriş güçleri aralığında en yüksek verim, her kademe için 0 dBm giriş gücünde elde edilmiştir. Kademe sayısı arttıkça en yüksek verimin elde edildiği yük direnci ve gerilim değerlerinde de artış gözlenmiştir.

HSMS286B diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde elde edilen veriler Çizelge 4.10.'da sunulmuştur.

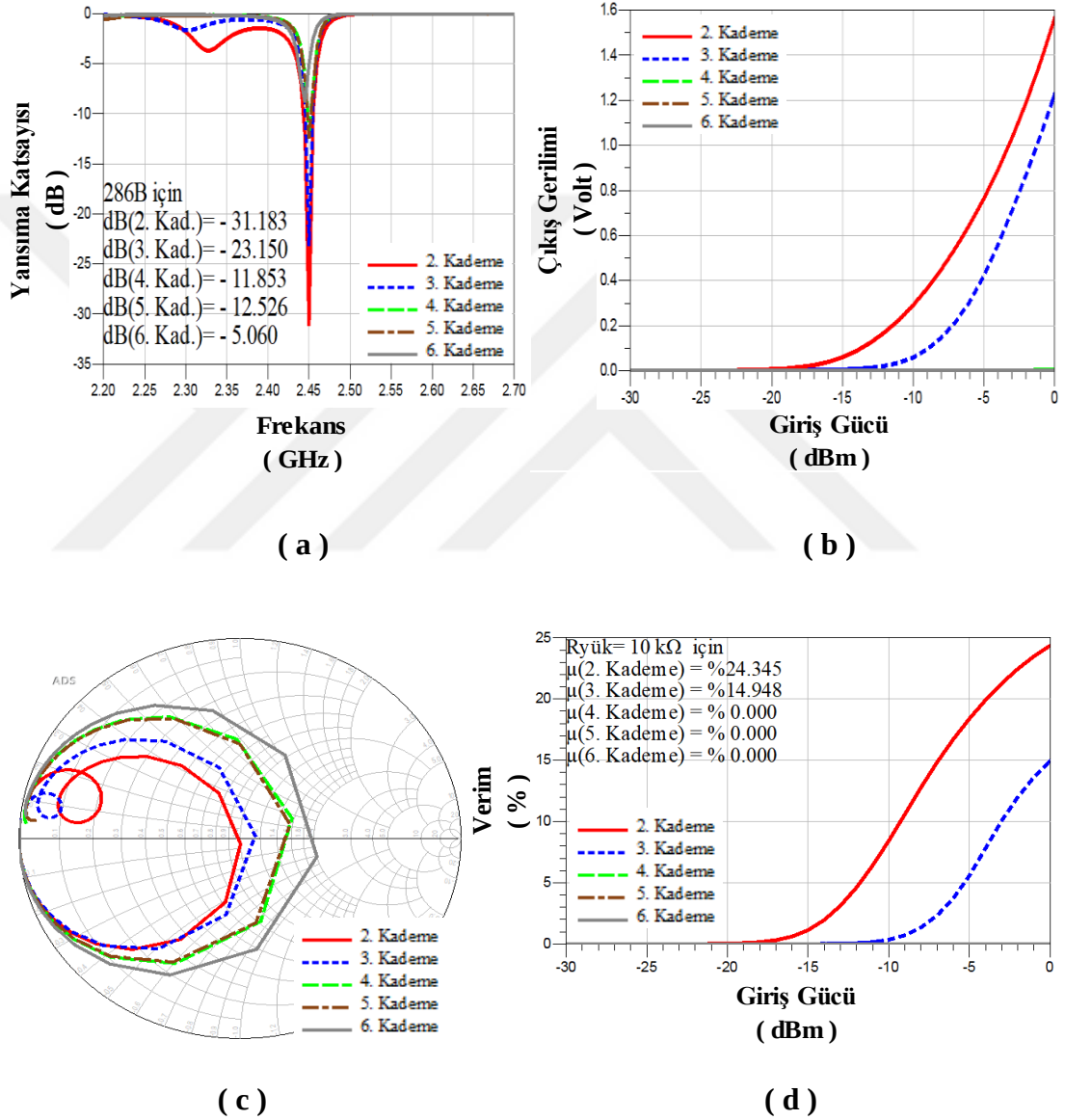
Çizelge 4.10. HSMS286B diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü ve $R_{yük} = 10$ k Ω yük direnci için elde edilen veri.

Devre Tipi	ÖZELLİK	2. Kademe	3. Kademe	4. Kademe	5. Kademe	6. Kademe
İdeal Devre	Empedans (Ω)	$Z_0 \times (0,013 - j1,024)$	$Z_0 \times (0,009 - j0,682)$	$Z_0 \times (0,007 - j0,511)$	$Z_0 \times (0,005 - j0,409)$	$Z_0 \times (0,005 - j0,341)$
Empedans Uyumlama Devresi	Yansım Katsayısı (dB)	-32,238	-46,564	-37,236	-26,822	-19,365
	Verim (%)	11,452	9,954	8,068	6,760	6,324
	Bobin (nH)	3,694	2,522	1,931	1,577	1,350
	Kondansatör (pF)	11,321	13,633	15,474	16,914	17,298
Murata Ürünlü Devre	Empedans (Ω)	$Z_0 \times (0,007 - j0,046)$	$Z_0 \times (0,004 - j0,023)$	$Z_0 \times (0,003 - j0,007)$	$Z_0 \times (0,003 - j0,002)$	$Z_0 \times (0,003 - j0,002)$
	Bobin	LQG15HH 3N6B02	LQG15HH 2N4C02	LQG15HH 2N0B02	LQG15HH 1N6B02	LQG15HH 1N3B02
	Kondansatör	GJM0335C1 E110JB01	GJM0335C1 E130JB01	GJM0335C1 E150JB01	GJM0335C1 E160JB01	GJM0335C1 E180JB01
TL Devre	E-TLOC	85,19	85,91	85,93	85,93	85,92
	E-TLIN	7,41	5,38	4,45	4,16	4,18

Çizelge 4.10.'da HSMS286B diyotu ile oluşturulan enerji hasat devrelerinde empedans uyumlamadan sonra, kademe sayısı arttıkça yansım katsayısının, 2.

kademede düştüğü, 3. kademede arttığı, 4. kademededen itibaren düştüğü, verimin ise düştüğü görülmüştür.

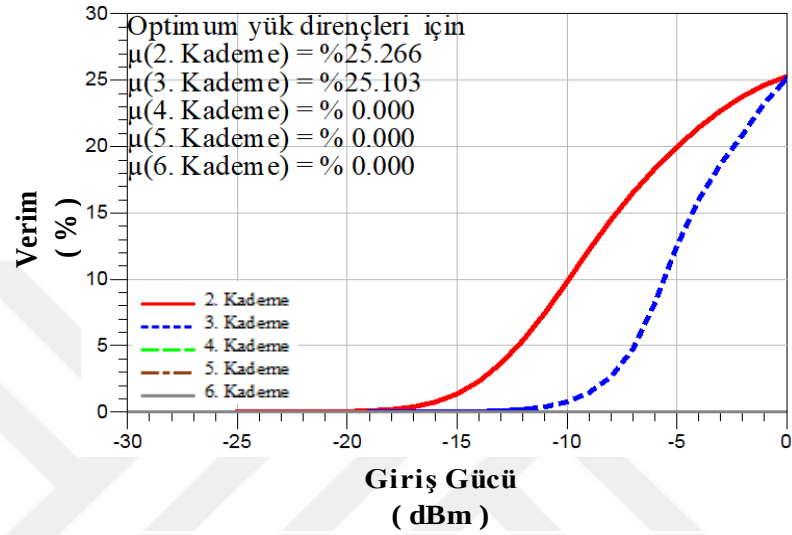
Murata + İletim hattı devresinde kademe sayısının artışına bağlı olarak $R_{yük} = 10\text{ k}\Omega$ yük direnci için yansıma katsayılarının değişimi şekil 4.3.a.'da, çıkış gerilimlerinin değişimi şekil 4.3.b.'de, empedanslarının değişimi şekil 4.3.c.'de ve maksimum verimlerinin değişimi şekil 4.3.d.'de sunulmuştur.



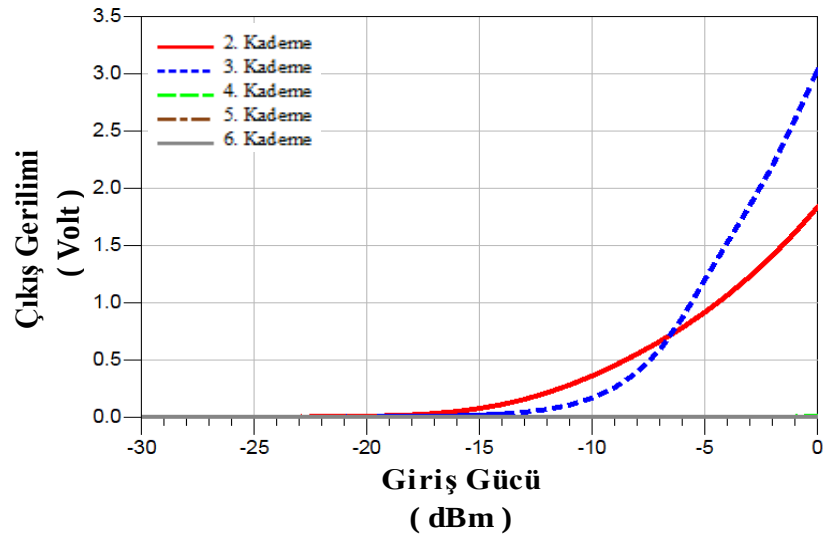
şekil 4.3. HSMS286B diyotuyla ve $R_{yük} = 10\text{ k}\Omega$ yük direnciyle oluşturulan Murata + İletim hattı devresinin, **a.** Frekansa göre yansıma katsayısı, **b.** Giriş gücüne göre çıkış gerilimi, **c.** Smith çizelgesi, **d.** Giriş gücüne göre verim değişimi.

Şekil 4.3.d.'de kademeler arasında en yüksek verim 2. kademede 0 dBm giriş gücünde, $R_{yük} = 10\text{ k}\Omega$ yük direncinde % 24,345 olarak elde edilmiştir. Bu değer Çizelge 3.7.'de sunulan verim değerinden düşüktür.

Yük direnci ayarı yapıldıktan sonra en yüksek verimler Şekil 4.4.a.'da, en yüksek verim değerlerine bağlı olarak gerilim değerleri de Şekil 4.4.b.'de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.4. Maksimum verimlerin elde edildiği $R_{yük}$ değerleri için **a.** Giriş güçlerine göre verim değişimleri, **b.** Giriş güçlerine göre çıkış gerilimleri.

Çizelge 4.11.'de verimin en yüksek olduğu yük direnci değerleri 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe için sunulmuştur.

Çizelge 4.11. HSMS286B diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe analizlerinde verimin en yüksek olduğu yük dirençleri ve giriş güçleri için elde edilen veriler.

Kademeler	Giriş Gücü (dBm)	$R_{yük}$ (k Ω)	Çıkış Gerilimi (Volt)	Verim (%)
2. Kademe	0	13,3	1,833	25,266
3. Kademe	0	36,6	3,031	25,103
4. Kademe	0	10.0	0,004	0,000
5. Kademe	0	10.0	0,001	0,000
6. Kademe	0	10.0	0,000	0,000

Çizelge 4.11.'de görüleceği üzere -30 dBm ile 0 dBm giriş güçleri aralığında en yüksek verim ve çıkış gerilimi değerleri, 2. ve 3. kademe değerleri için 0 dBm değerinde elde edilmiştir. 4., 5. ve 6. kademede diyotun verimi aniden düşerek 0 olmuştur. Bunun sebebi diyotun kırılma gerilimi ve doyma akımıdır.

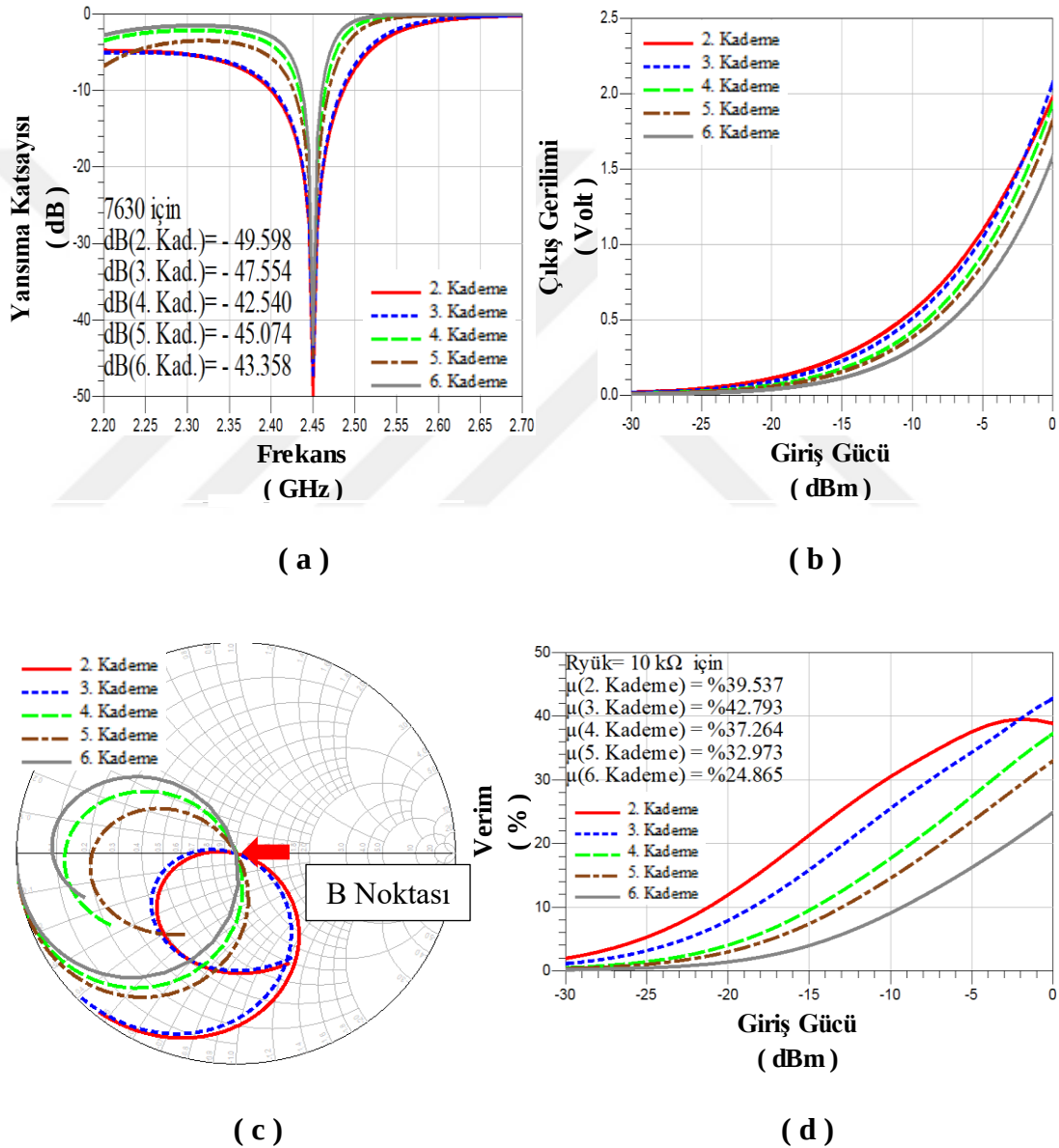
SMS7630 diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde elde edilen veriler Çizelge 4.12.'de sunulmuştur.

Çizelge 4.12. SMS7630 diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü ve $R_{yük} = 10$ k Ω yük direnci için elde edilen veriler.

Devre Tipi	ÖZELLİK	2. Kademe	3. Kademe	4. Kademe	5. Kademe	6. Kademe
İdeal Devre	Empedans (Ω)	$Z_o \times (0,093 - j0,783)$	$Z_o \times (0,062 - j0,521)$	$Z_o \times (0,046 - j0,390)$	$Z_o \times (0,037 - j0,312)$	$Z_o \times (0,031 - j0,260)$
Empedans Uyumlama Devresi	Yansıma Katsayısı (dB)	-51,365	-51,430	-45,575	-45,661	-51,161
	Verim (%)	40,140	44,993	39,676	33,694	29,086
	Bobin (nH)	3,487	2,476	1,947	1,627	1,407
	Kondansatör (pF)	4,057	5,054	5,917	6,628	7,264
Murata Ürünlü Devre	Empedans (Ω)	$Z_o \times (0,155 - j0,440)$	$Z_o \times (0,123 - j0,348)$	$Z_o \times (0,029 - j0,224)$	$Z_o \times (0,040 - j0,199)$	$Z_o \times (0,018 - j0,137)$
	Bobin	LQG15HH 3N6C02	LQG15HH 2N4B02	LQG15HH 2N0B02	LQG15HH 1N6B02	LQG15HH 1N5B02
	Kondansatör	GJM0335C1 E4R1WB01	GJM0335C1 E5R1WB01	GJM0335C1 E5R9WB01	GJM0335C1 E6R6WB01	GJM0335C1 E7R3WB01
TL Devre	E-TLOC	67,59	69,65	80,28	78,47	82,30
	E-TLIN	43,92	37,70	22,09	22,37	15,37

Çizelge 4.12.'de SMS7630 diyotu ile oluşturulan enerji hasat devrelerinde empedans uyumlamadan sonra, kademe sayısı arttıkça verimin, 2. kademedeki düştüğü, 3. kademedeki arttığı, 4. kademedeki düştüğü görülmüştür.

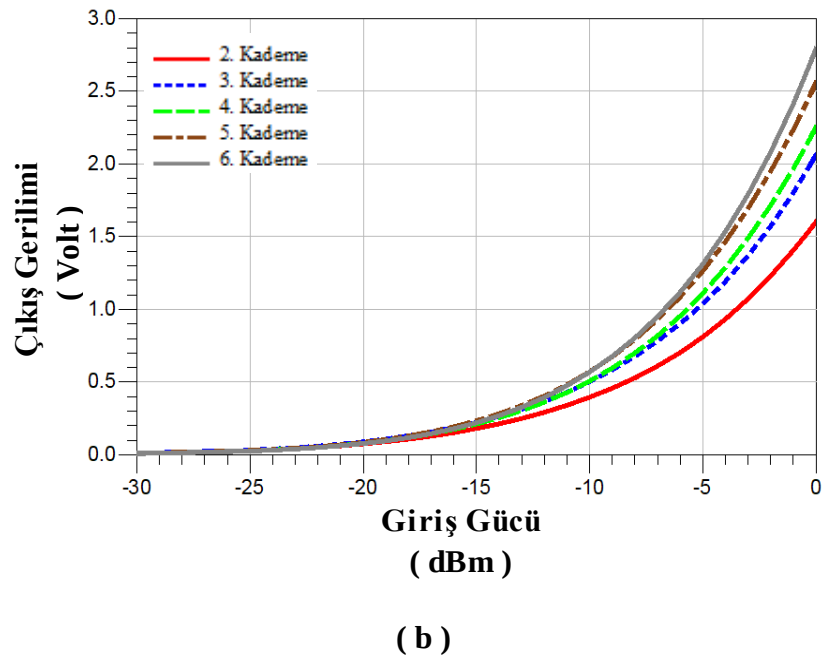
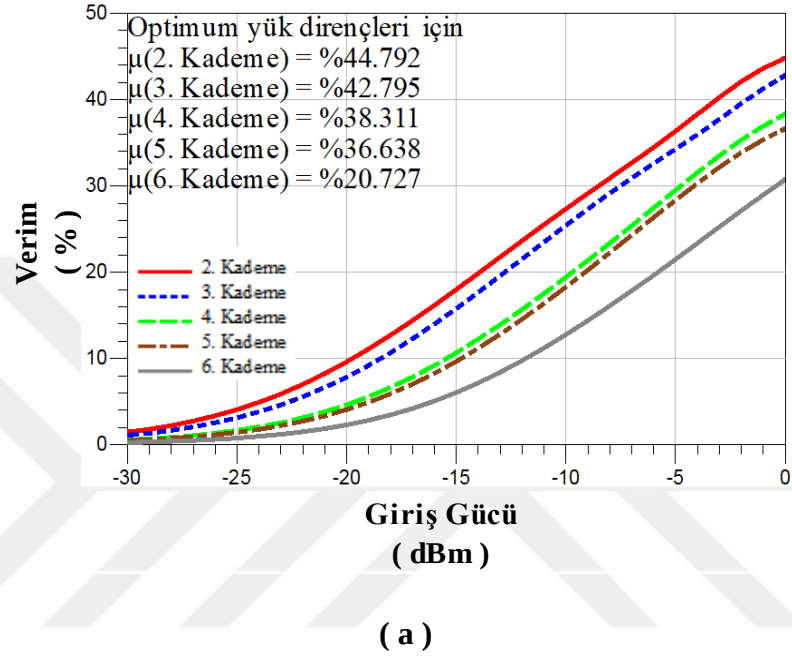
Murata + İletim hattı devresinde kademe sayısının artışına bağlı olarak $R_{yük} = 10 \text{ k}\Omega$ yük direnci için yansımaya katsayılarının değişimi Şekil 4.5.a.'da, çıkış gerilimlerinin değişimi Şekil 4.5.b.'de, empedanslarının değişimi Şekil 4.5.c.'de ve maksimum verimlerinin değişimi Şekil 4.5.d.'de sunulmuştur.



Şekil 4.5. SMS7630 diyotuyla ve $R_{yük} = 10 \text{ k}\Omega$ yük direnciyle oluşturulan Murata + İletim hattı devresinin, **a.** Frekansa göre yansımaya katsayısı, **b.** Giriş gücüne göre çıkış gerilimi, **c.** Smith çizelgesi, **d.** Giriş gücüne göre verim değişimi.

Şekil 4.5.d.'de kademeler arasında en yüksek verim 3. kademede 0 dBm giriş gücünde, $R_{yük}= 10\text{ k}\Omega$ yük direncinde % 42,793 olarak elde edilmiştir. Bu değer Çizelge 4.7.'de sunulan verim değerinden düşüktür.

Yük direnci ayarı yapıldıktan sonra en yüksek verimler Şekil 4.6.a.'da, en yüksek verim değerlerine bağlı olarak gerilim değerleri de Şekil 4.6.b.'de görülmektedir.



Şekil 4.6. Maksimum verimlerin elde edildiği $R_{yük}$ değerleri için **a.** Giriş güçlerine göre verim değişimleri, **b.** Giriş güçlerine göre çıkış gerilimleri.

Çizelge 4.13.'de verimin en yüksek olduğu yük direnci değerleri 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe için sunulmuştur.

Çizelge 4.13. SMS7630 diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe analizlerinde verimin en yüksek olduğu yük dirençleri ve giriş güçleri için elde edilen veriler.

Kademeler	Giriş Gücü (dBm)	$R_{yük}$ (k Ω)	Çıkış Gerilimi (Volt)	Verim (%)
2. Kademe	0	5,7	1,598	44,792
3. Kademe	0	9,9	2,058	42,795
4. Kademe	0	13,2	2,249	38,311
5. Kademe	0	12,8	2,554	36,638
6. Kademe	0	25,3	2,788	30,727

Çizelge 4.13.'de görüleceği üzere -30 dBm ile 0 dBm giriş güçleri aralığında en yüksek verim değerleri, her kademe için 0 dBm değerinde elde edilmiştir. Kademe sayısı arttıkça çıkış gerilimi değerinde ve en yüksek verimin elde edildiği yük direnci değerinde artış, verim değerinde ise azalma gözlenmiştir.

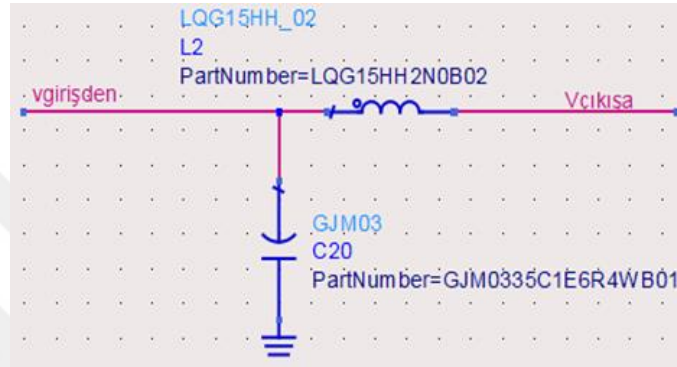
2,45 GHz frekansında çalışan gerilim çoklayıcı devrede kullanılan 11 adet diyot içerisinde, 1. kademeden 6. kademeye kadar yapılan analizler sonucunda en iyi verim Murata ürünleri ve iletim hattı yapıları devrelerden elde edilmiştir. Murata ürünleri ve iletim hattı yapıları devreler içerisinde en iyi verim SMS7630 diyotu ile 2,7 k Ω yük direncinde, -1 dBm giriş gücünde 1. kademede elde edilmiş olup, verim değeri % 46,053'tür. HSMS285C diyotu ile 3,6 k Ω yük direncinde 0 dBm giriş gücünde 1. kademede % 34,973 verim elde edilmiştir. HSMS286B diyotu ile 1. kademede 5,6 k Ω yük direncinde 0 dBm giriş gücünde % 31,383 verim elde edilmiştir.

Çıkış geriliminin en yüksek olduğu değer, 3,031 V olup, HSMS286B diyotu ile tasarlanan 3. kademe devrede elde edilmiştir. Bu değer 1. kademe devrede 1,326 V olarak elde edilmiştir. Gerilim artışının en yüksek olduğu devre SMS7630 ile tasarlanan devre olup, 1. kademe 0,994 V, 6. kademede ise 2,788 V elde edilmiştir. HSMS285C diyotunda ise 1. Kademede 1,122 V elde edilirken 6. kademede 2,844 V çıkış gerilimi elde edilmiştir.

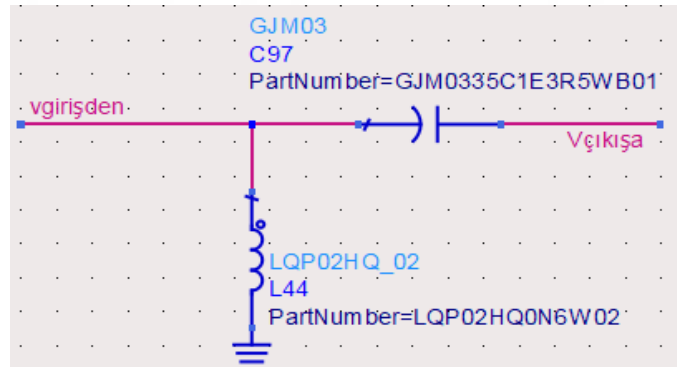
4.3 Enerji Hasat Devresi Tasarım Parametrelerinin 5,8 GHz Frekansında Çalışan Bir Kademeli Devre İçin Belirlenmesi

5,8 GHz frekansında çalışan bir kademeli enerji hasat devrelerinin tasarımı da 2,45 GHz frekansında çalışan enerji hasat devrelerinin tasarımı gibi yapılmıştır.

5,8 GHz frekansında çalışan enerji hasat sistemleri için tasarlanan uyumlama devreleri Şekil 4.7.a.'da görüldüğü gibi olup, Şekil 4.7.b.'de görülen 2,45 GHz frekansında çalışan enerji hasat devresinde kullanılan uyumlama devresinden farklıdır.



Şekil 4.7.a. 2,45 GHz frekansında kullanılan uyumlama devresi.



Şekil 4.7.b. 5,8 GHz frekansında kullanılan uyumlama devresi.

5,8 GHz frekansında çalışan enerji hasat sistemleri için tasarlanan uyumlama devrelerinin bobin değerleri pH mertebesinde olduğundan, Murata ürünü olarak 2,45 GHz frekansında kullanılan bobinlerden farklı olarak, Murata LQP02HQ serisi bobinler kullanılmıştır. Kondansatörler 2,45 GHz frekansında kullanılan Murata ürünler ile aynı seriden ürünlerdir.

İdeal devre halinde 11 farklı diyot kullanılarak oluşturulan gerilim çoklayıcı devrelerin verileri Çizelge 4.14.'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.14. Bir kademeli 5,8 GHz frekansında çalışan devrelerde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü için empedans uyumlamadan önce elde edilen veriler.

Diyotlar	Yansım Katsayısı (dB)	Empedanslar ($Z_0 = 50\Omega$)	$R_{yük} = 10\text{ k}\Omega$ için	
			$V_{ÇIKIŞ}$ (Volt)	Verim (%)
HSMS2850	-2,658	$Z_0 \times (0,159 - j0,211)$	0,560	4,963
HSMS2852	-3,138	$Z_0 \times (0,180 - j0,075)$	0,580	5,324
HSMS285B	-3,042	$Z_0 \times (0,177 - j0,143)$	0,631	6,305
HSMS285C	-3,725	$Z_0 \times (0,212 - j0,076)$	0,708	7,939
HSMS2860	-0,824	$Z_0 \times (0,049 - j0,201)$	0,416	2,738
HSMS2862	-0,930	$Z_0 \times (0,054 - j0,066)$	0,436	3,010
HSMS286B	-0,900	$Z_0 \times (0,053 - j0,131)$	0,479	3,643
HSMS2820	-1,368	$Z_0 \times (0,103 + j0,556)$	0,009	0,001
HSMS2822	-1,167	$Z_0 \times (0,102 + j0,723)$	0,007	0,001
HSMS2810	-1,574	$Z_0 \times (0,141 + j0,743)$	0,000	0,000
SMS7630	-0,520	$Z_0 \times (0,112 + j1,652)$	0,372	2,195

Çizelge 4.14.'de görüldüğü üzere ideal durumda 33 pF Murata kondansatörler kullanılarak tasarlanan bir kademeli gerilim çoklayıcı devrelerde, 10 k Ω yük direncinde ve -2 dBm giriş gücünde en yüksek çıkış gerilimi ve verim HSMS285C diyotunda elde edilmiştir.

Çizelge 4.15. Bir kademeli 5,8 GHz frekansında çalışan devrelerde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü için empedans uyumlamadan sonra elde edilen veriler.

Diyotlar	Yansım Katsayısı (dB)	Empedanslar ($Z_0 = 50\Omega$)	$R_{yük} = 10\text{ k}\Omega$ için	
			$V_{ÇIKIŞ}$ (Volt)	Verim (%)
HSMS2852	-56,393	$Z_0 \times (1,003 + j8,052E-4)$	0,734	8,544
HSMS2852	-58,180	$Z_0 \times (1,002 + j2,866E-4)$	0,661	6,922
HSMS285B	-58,466	$Z_0 \times (0,998 - j0,002)$	0,772	9,451
HSMS285C	-58,673	$Z_0 \times (0,999 + j0,002)$	0,721	8,236
HSMS2860	-42,927	$Z_0 \times (1,002 - j0,010)$	0,686	7,458
HSMS2862	-38,395	$Z_0 \times (1,011 - j0,010)$	0,600	5,706
HSMS286B	-46,236	$Z_0 \times (1,023 - j0,008)$	0,689	7,533
HSMS2820	-52,221	$Z_0 \times (0,997 - j0,003)$	0,144	0,329
HSMS2822	-55,128	$Z_0 \times (0,998 + j0,003)$	0,128	0,262
HSMS2810	-61,523	$Z_0 \times (1,002 - j2,204E-4)$	0,004	0,000
SMS7630	-46,324	$Z_0 \times (1,006 - j0,008)$	1,020	16,503

Empedans uyumlama yapıldıktan sonra Çizelge 4.15.'de görüldüğü gibi bütün gerilim çoklayıcı devrelerin yansımaya katsayıları yükselmiştir. Empedans değerleri $Z_0 = 50 \Omega$ değerine yaklaşmıştır. Özellikle HSMS2810 diyotunun yansımaya katsayısı uyumlamadan önce -1,574 dB iken, uyumlamadan sonra -61,523 dB olmuştur. 10 k Ω yük direncinde ve -2 dBm giriş gücünde en yüksek çıkış gerilimi 1,020 V ve verim de %16,503 olmak üzere SMS7630 diyotunda elde edilmiştir.

Empedans uyumlama sonucunda elde edilen ideal değerlerdeki devre elemanları, ideal değerlere yakın değerlerdeki Murata kondansatörler ve bobinlerle değiştirilmiş olup, devrelerin yansımaya katsayılarında ve empedanslarında Çizelge 4.16.'da görüldüğü gibi kaymalar oluşmuştur.

Çizelge 4.16. Bir kademeli 5,8 GHz frekansında çalışan devrelerde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü için Murata ile elde edilen veriler.

Diyotlar	Yansımaya Katsayısı (dB)	Empedanslar ($Z_0 = 50\Omega$)	$R_{yük} = 10 \text{ k}\Omega$ için	
			$V_{ÇIKIŞ}$ (Volt)	Verim (%)
HSMS2850	-5,127	$Z_0 \times (0,291 - j0,122)$	0,935	13,850
HSMS2852	-6,283	$Z_0 \times (0,353 - j0,122)$	0,877	12,202
HSMS285B	-6,253	$Z_0 \times (0,352 - j0,130)$	0,990	15,538
HSMS285C	-7,528	$Z_0 \times (0,415 - j0,122)$	0,879	12,235
HSMS2860	-1,165	$Z_0 \times (0,067 + j0,010)$	0,721	8,234
HSMS2862	-1,204	$Z_0 \times (0,069 - j0,025)$	1,013	16,262
HSMS286B	-1,179	$Z_0 \times (0,068 - j0,022)$	1,166	21,545
HSMS2820	-3,169	$Z_0 \times (0,182 - j0,100)$	0,036	0,021
HSMS2822	-3,289	$Z_0 \times (0,189 - j0,108)$	0,040	0,026
HSMS2810	-3,609	$Z_0 \times (0,206 - j0,061)$	0,001	0,000
SMS7630	-1,540	$Z_0 \times (0,089 + j0,077)$	0,961	14,627

Murata ürünlerin kullanımından sonra Çizelge 4.16.'da görüldüğü gibi bütün gerilim çoklayıcı devrelerin yansımaya katsayıları düşmüştür. Ortaya çıkan empedans uyumsuzluğunu gidermek için açık-seri iletim hattı devresi tasarlanarak devrelerin empedansları $Z_0 = 50 \Omega$ değerine yaklaştırılmıştır.

Çizelge 4.17. Bir kademeli 5,8 GHz frekansında çalışan devrelerde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü için en yüksek verimi sağlayan yük direnci ve elde edilen verim.

Diyotlar	Yansım Katsayısı (dB)	$R_{yük} = 10$ K		Maksimum Değerler		
		$V_{ÇIKIŞ}$ (Volt)	Verim (%)	$V_{ÇIKIŞ}$ (Volt)	Verim (%)	$R_{yük}$ (k Ω)
HSMS2850	-25,856	0,739	8,649	0,379	22,707	1
HSMS2852	-24,511	0,676	7,237	0,318	19,997	0,8
HSMS285B	-59,872	0,764	9,247	0,426	23,914	1,2
HSMS285C	-55,728	0,713	8,058	0,372	21,912	1
HSMS2860	-54,736	0,699	7,750	0,440	19,220	1,6
HSMS2862	-49,358	0,607	5,831	0,365	17,553	1,2
HSMS286B	-50,905	0,708	7,946	0,449	19,987	1,6
HSMS2820	-62,360	0,129	0,264	0,077	0,310	3
HSMS2822	-54,383	0,112	0,199	0,066	0,233	3
HSMS2810	-55,848	0,003	0,000	0,012	0,001	40
SMS7630	-54,865	1,012	16,232	0,639	32,326	2

Murata ürünler ve iletim hattı devreleri de gerilim çoklayıcı devreye eklendikten sonra Çizelge 4.17.'de görüldüğü gibi bütün gerilim çoklayıcı devrelerin yansım katsayılarında düzelme gözlenmiştir. En iyi yansım katsayısı HSMS2820 diyotuna aittir ve -62,360 dB'dir. İletim hattı eklenmeden önce bu değer HSMS2820 diyotu için -3,169 dB olarak edilmiştir. 10 k Ω yük direncinde ve -2 dBm giriş gücünde en yüksek çıkış gerilimi 1,012 V ve en iyi verim de %16,232 olmak üzere SMS7630 diyotuna aittir. Yük direncinin değişimi ile birlikte SMS7630 diyotunun verimi 2 k Ω yük direncinde, 0,639 V çıkış gerilimi ve %32,326 verim değeri ile incelenen bütün diyotların verimlerinin arasında en iyi çıkış gerilimini ve verimi elde etmiştir.

Tasarımda ilk aşamada 10 k Ω değerinde yük direnci seçilmiştir. Seçilen bu yük direncine göre Çizelge 3.18.'de görüldüğü gibi, her bir diyot için uyumlama devresi elemanları belirlenmiştir. Üretici firmanın ürünlerinin seçimi yapılırken değerleri belirlenen ideal devre elemanlarından faydalanılmıştır. Murata ürünlerinin empedans uyumlama üzerindeki negatif etkisini gidermek amacıyla devreye açık-seri iletim hattı devre elemanları eklenmiştir. Bütün bu devre elemanlarının değerleri Çizelge 4.18.'de sunulmuştur.

Çizelge 4.18. Bir kademeli 5,8 GHz frekansında çalışan devrelerde kullanılan devre elemanları ve değerleri.

Diyotlar	Empedans Uyumlama					
	İdeal Durum		Murata + İletim hattı ürünleri			
	L(pH)	C(pF)	LQP02HQ Serisi L	GJM0335 Serisi C	E- TLOC	E-TLIN
HSMS2850	596,572	3,548	0N6W02	C1E3R5WB01	51,380	35,040
HSMS2852	642,823	1,775	0N6W02	C1E1R8WB01	46,080	36,710
HSMS285B	636,281	2,300	0N6W02	C1E2R3WB01	48,030	38,880
HSMS285C	711,651	1,132	0N7W02	C1E1R1WB01	42,820	40,830
HSMS2860	314,764	32,388	0N4B02	C0J330GB01	74,480	13,950
HSMS2862	331,000	3,388	0N4B02	C1E3R4WB01	74,110	16,270
HSMS286B	324,583	0,639	0N4B02	C1E5R9WB01	74,380	15,870
HSMS2820	464,927	4,981	0N5W02	C1ER60WB01	62,610	28,920
HSMS2822	462,407	0,535	0N5W02	C1ER50WB01	61,940	29,790
HSMS2810	555,872	0,503	0N6W02	C1ER50WB01	60,350	27,970
SMS7630	489,711	0,279	0N5W02	C1ER30WB01	71,930	12,120

Çizelge 4.19.'da 0 dBm, -5 dBm, -10 dBm, -15 dBm, -20 dBm, -25 dBm ve -30 dBm giriş güçleri için, incelenen bütün diyotların verimi görülmektedir. HSMS2820, HSMS2822, HSMS2810 diyotlarının verimi çok düşüktür. Düşük giriş gücü seviyeleri için en yüksek verimler sırasıyla SMS7630, HSMS285B ve HSMS286B diyotlarında elde edilmiştir.

Çizelge 4.19. Bir kademeli 5,8 GHz frekansında çalışan devrelerde Murata + İletim hattı yapısı için giriş güçlerine göre verim değerleri.

Diyotlar	Murata + İletim hattı devresindeki verim (%)						
	-30 dBm	-25 dBm	-20 dBm	-15 dBm	-10 dBm	-5 dBm	0 dBm
HSMS2850	0,045	0,160	0,666	2,958	9,132	17,269	24,696
HSMS2852	0,038	0,136	0,568	2,521	7,703	14,798	21,422
HSMS285B	0,056	0,198	0,814	3,461	10,197	18,972	26,832
HSMS285C	0,049	0,175	0,724	3,134	9,235	17,259	24,467
HSMS2860	0,000	0,001	0,010	0,408	5,170	14,219	21,764
HSMS2862	0,000	0,001	0,019	0,720	5,650	13,573	18,925
HSMS286B	0,000	0,002	0,029	1,047	7,038	15,811	21,791
HSMS2820	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,018	1,063
HSMS2822	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,014	0,742
HSMS2810	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003
SMS7630	0,350	1,154	3,690	9,621	18,337	27,291	35,233

Çizelge 4.20.'de HSMS 285B, HSMS 286B ve SMS 7630 diyotları için elde edilen maksimum verim değerleri ve bu değerlerdeki giriş güçleri sunulmuştur. Çizelge 4.20.'de inceleneceği üzere, 5,8 GHz için en yüksek verim SMS7630 diyotunda 2 kΩ yük direncinde, 0 dBm giriş gücünde %35,233 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.20. Bir kademeli 5,8 GHz frekansında çalışan devrelerde Murata + İletim hattı yapısı için maksimum verim değerlerini veren giriş güçleri ve verimler.

Diyotlar	Maksimum değerler		
	Verim (%)	Çıkış Gerilimi (Volt)	P _{in} (dBm)
HSMS285B	26,832	0,567	0
HSMS286B	21,791	0,590	0
SMS7630	35,233	0,839	0

Çizelge 4.20.'ye göre N kademeli gerilim çoklayıcı devresi analizi için HSMS285B, HSMS286B ve SMS7630 diyotlarından faydalanılmıştır.

4.4 Kademe Sayısının 5,8 GHz Frekansında Çalışan Gerilim Çoklayıcı Devre Üzerindeki Etkisi

Bir kademeli gerilim çoklayıcı devre analizinde en iyi verimi veren diyotlar kullanılarak, gerilim çoklayıcı devrelerde kademe artışının etkilerine dair inceleme yapılmıştır.

HSMS285B, HSMS286B ve SMS7630 diyotları ile oluşturulan N kademeli devrelerde oluşan harmonikleri ortadan kaldırmak amacıyla yükten önce DC geçiş filtresi olarak, Murata GJM0335C1E330GB01 kodlu, 33 pF $\pm$ 2% kapasiteye sahip kondansatörler kullanılmıştır.

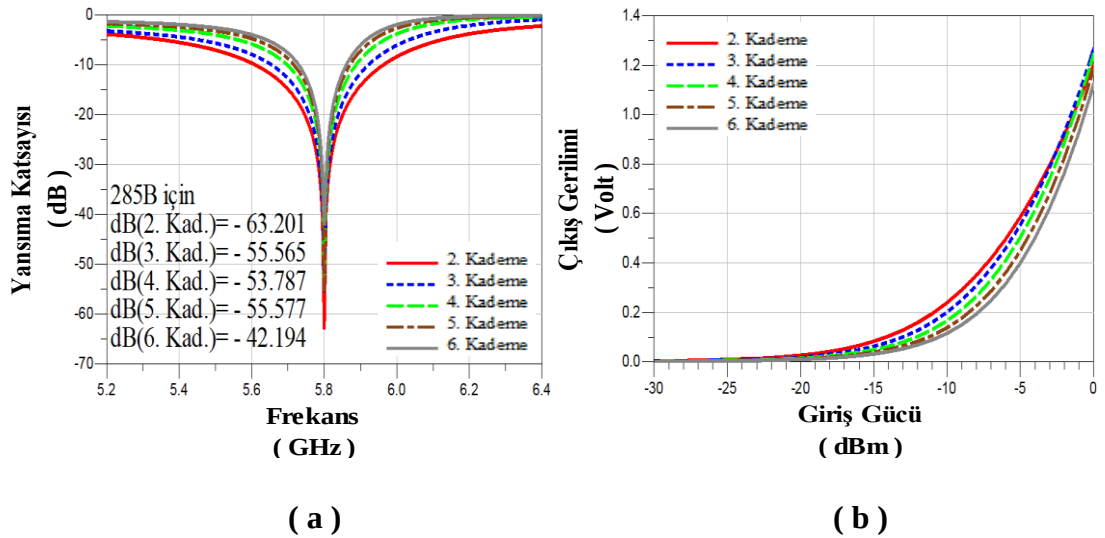
HSMS285B diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde elde edilen veriler Çizelge 4.21.'de sunulmuştur.

Çizelge 4.21.'de HSMS285B diyotu ile oluşturulan enerji hasat devrelerinde empedans uyumlamadan sonra, kademe sayısı arttıkça yansıma katsayısının 5. kademeye kadar düştüğü, 6. kademe arttığı, verimin ise 2. kademe düştüğü, 3. kademe arttığı, 4. kademedan itibaren düştüğü gösterilmiştir.

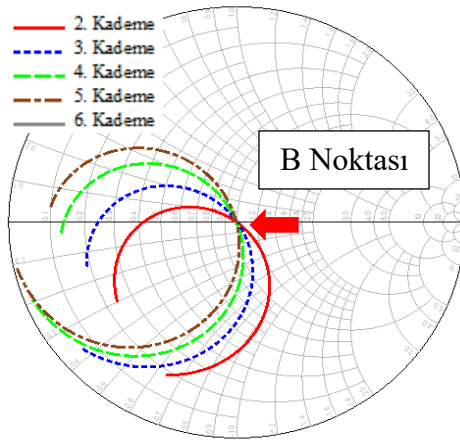
Çizelge 4.21. HSMS285B diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü ve $R_{yük} = 10$ k Ω yük direnci için elde edilen veriler.

Devre Tipi	ÖZELLİK	2. Kademe	3. Kademe	4. Kademe	5. Kademe	6. Kademe
İdeal Devre	Empedans (Ω)	$Z_o \times (0,100 - j0,034)$	$Z_o \times (0,068 - j0,016)$	$Z_o \times (0,051 - j0,010)$	$Z_o \times (0,041 - j0,007)$	$Z_o \times (0,034 - j0,005)$
Empedans Uyumlama Devresi	Yansım Katsayısı (dB)	-51,955	-50,309	-48,502	-48,071	-54,450
	Verim (%)	13,943	14,699	13,871	12,509	11,015
	Bobin (pH)	0,457	0,371	2,613	2,869	3,114
	Kondansatör (pF)	2,063	2,328	0,318	0,284	0,257
Murata ürünli Devre	Empedans (Ω)	$Z_o \times (0,175 - j0,107)$	$Z_o \times (0,106 - j0,066)$	$Z_o \times (0,066 - j0,027)$	$Z_o \times (0,047 - j9,302E-4)$	$Z_o \times (0,038 - j0,011)$
	Bobin	LQP02HQ 0N5W02	LQP02HQ 0N4W02	LQP02HQ 0N4B02	LQP02HQ 0N4C02	LQP02HQ 0N4C02
	Kondansatör	GJM0335C1 E2R1WB01	GJM0335C1 ER3WB01	GJM0335C1 E2R6WB01	GJM0335C1 E2R9WB01	GJM0335C1 E3R1WB01
TL Devre	E-TLOC	63,26	70,04	74,64	77,19	78,53
	E-TLIN	28,94	21,82	15,94	12,28	10,42

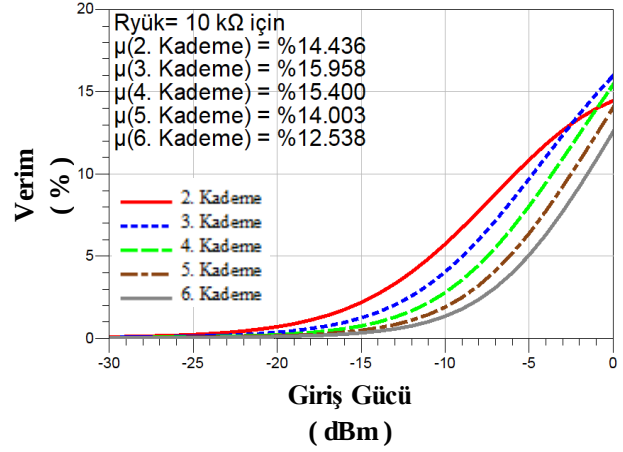
Murata + İletim hattı devresinde kademe sayısının artışına bağlı olarak $R_{yük} = 10$ k Ω yük direnci için yansım katsayılarının değişimi Şekil 4.8.a.'da, çıkış gerilimlerinin değişimi Şekil 4.8.b.'de, empedanslarının değişimi Şekil 4.8.c.'de ve maksimum verimlerinin değişimi Şekil 4.8.d.'de sunulmuştur.



Şekil 4.8. HSMS285B diyotuyla ve $R_{yük} = 10$ k Ω yük direnciyle oluşturulan Murata + İletim hattı devresinin, **a.** Frekansa göre yansım katsayısı, **b.** Giriş gücüne göre çıkış gerilimi



(c)

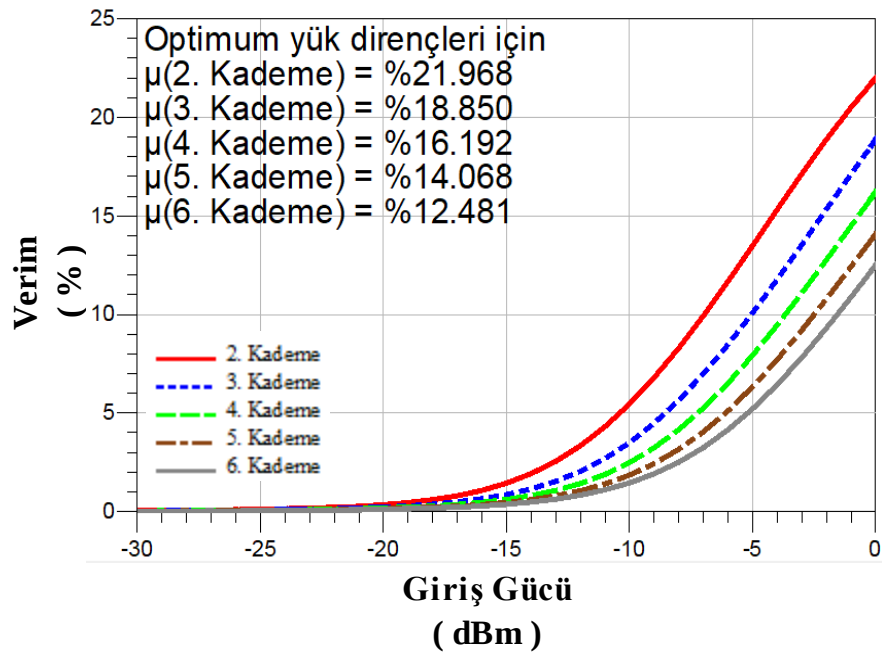


(d)

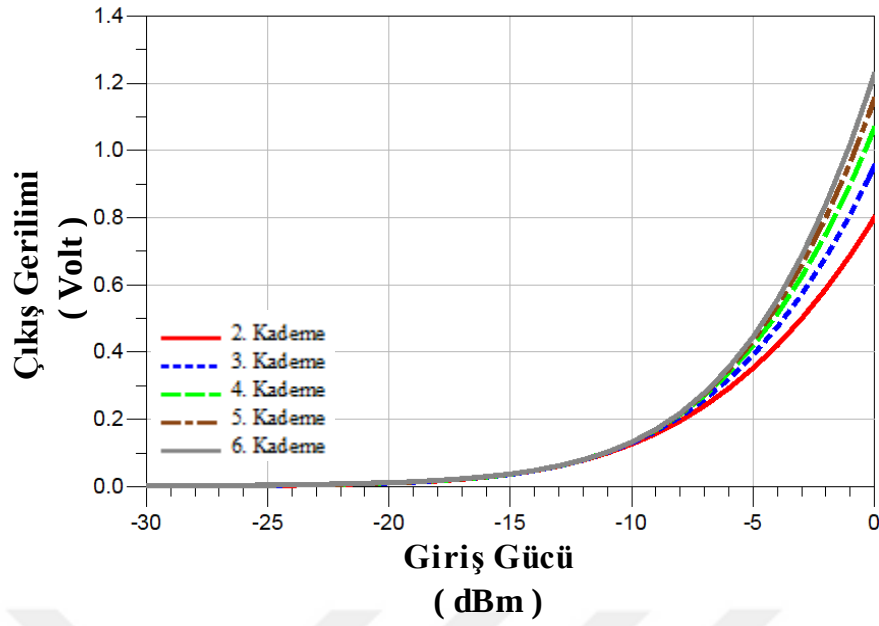
Şekil 4.8 (devam). HSMS285B diyotuyla ve $R_{y\ddot{u}k} = 10 \text{ k}\Omega$ yük direnciyle oluşturulan Murata + İletim hattı devresinin, **c.** Smith çizelgesi, **d.** Giriş gücüne göre verim değişimi.

Şekil 4.8.d.'de kademeler arasında en yüksek verim 3. kademede 0 dBm giriş gücünde, $R_{y\ddot{u}k} = 10 \text{ k}\Omega$ yük direncinde % 15.958 olarak elde edilmiştir. Bu değer Çizelge 3.20.'de sunulan bir kademeli devrenin verim değerinden düşüktür.

Yük direnci ayarı yapıldıktan sonra en yüksek verimler Şekil 4.9.a.'da, en yüksek verim değerlerine bağlı olarak gerilim değerleri de Şekil 4.9.b.'de görülmektedir.



Şekil 4.9.a. Maksimum verimlerin elde edildiği $R_{y\ddot{u}k}$ değerleri için giriş güçlerine göre verim değişimleri.



Şekil 4.9.b. Maksimum verimlerin elde edildiği $R_{yük}$ değerleri için giriş güçlerine göre çıkış gerilimleri.

Çizelge 4.22.'de verimin en yüksek olduğu yük direnci değerleri 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe için sunulmuştur. Her bir kademe artışında çıkış geriliminde artış gözlenirken, verim değerlerinde 3. kademedan sonra düşük oranlarda düşüşler gözlenmektedir.

Çizelge 4.22. HSMS285B diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe analizlerinde verimin en yüksek olduğu yük dirençleri ve giriş güçleri için elde edilen veriler.

Kademeler	Giriş Gücü (dBm)	$R_{yük}$ (k Ω)	Çıkış Gerilimi (Volt)	Verim (%)
2. Kademe	0	2,9	0,798	21,968
3. Kademe	0	4,8	0,951	18,850
4. Kademe	0	7,0	1,065	16,192
5. Kademe	0	9,4	1,150	14,068
6. Kademe	0	12,0	1,224	12,481

Çizelge 4.22.'de görüleceği üzere -30 dBm ile 0 dBm giriş güçleri aralığında en yüksek verim değerleri, her kademe için 0 dBm değerinde elde edilmiştir. Kademe sayısı arttıkça çıkış geriliminde artış, verimde ise düşüş gözlenmiştir.

HSMS286B diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde elde edilen veriler Çizelge 4.23.'da sunulmuştur.

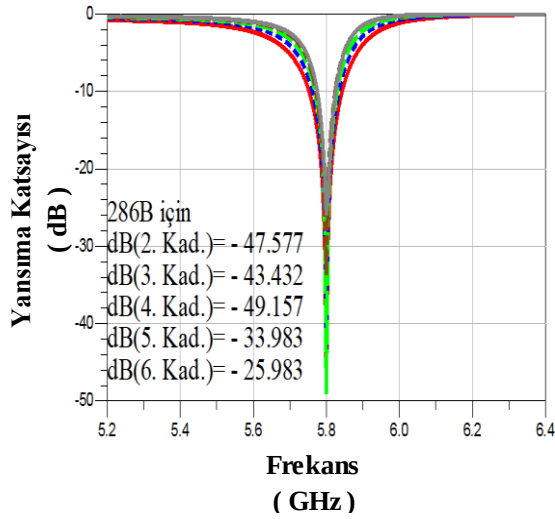
Çizelge 4.23. HSMS286B diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü ve $R_{yük} = 10$ k Ω yük direnci için elde edilen veriler.

Devre Tipi	ÖZELLİK	2. Kademe	3. Kademe	4. Kademe	5. Kademe	6. Kademe
İdeal Devre	Empedans (Ω)	$Z_o \times (0,034 - j0,024)$	$Z_o \times (0,024 - j0,009)$	$Z_o \times (0,018 - j0,004)$	$Z_o \times (0,015 - j0,003)$	$Z_o \times (0,012 - j0,002)$
Empedans Uyumlama Devresi	Yansım Katsayısı (dB)	-43,226	-45,155	-36,066	-31,392	-38,867
	Verim (%)	12,363	13,024	11,215	9,182	7,431
	Bobin (pH)	257,403	215,151	185,756	163,489	151,208
	Kondansatör (pF)	3,491	3,810	4,256	4,794	5,135
Murata Ürünlü Devre	Empedans (Ω)	$Z_o \times (0,036 + j0,018)$	$Z_o \times (0,024 + j0,044)$	$Z_o \times (0,018 + j0,056)$	$Z_o \times (0,014 + j0,064)$	$Z_o \times (0,013 + j0,073)$
	Bobin	LQP02HQ 0N4C02	LQP02HQ 0N4C02	LQP02HQ 0N4B02	LQP02HQ 0N4B02	LQP02HQ 0N4B02
	Kondansatör	GJM0335C1 E3R5WB01	GJM0335C1 E3R8WB01	GJM0335C1 E4R3WB01	GJM0335C1 E4R8WB01	GJM0335C1 E5R1WB01
TL Devre	E-TLOC	78,88	81,01	82,22	83,17	83,18
	E-TLIN	9,696	6,257	4,435	3,074	2,548

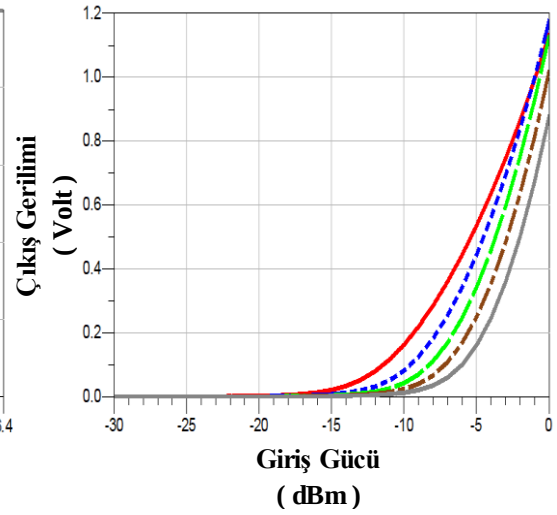
Çizelge 4.23.'de HSMS286B diyotu ile oluşturulan enerji hasat devrelerinde empedans uyumlamadan sonra, kademe sayısı arttıkça verimin, 2. kademede düştüğü, 3. kademede arttığı, 4. kademedan itibaren düştüğü görülmüştür.

Murata + İletim hattı devresinde kademe sayısının artışına bağlı olarak $R_{yük} = 10$ k Ω yük direnci için yansım katsayılarının değişimi Şekil 4.10.a.'da, çıkış gerilimlerinin değişimi Şekil 4.10.b.'de, empedanslarının değişimi Şekil 4.10.c.'de ve maksimum verimlerinin değişimi Şekil 4.10.d.'de sunulmuştur.

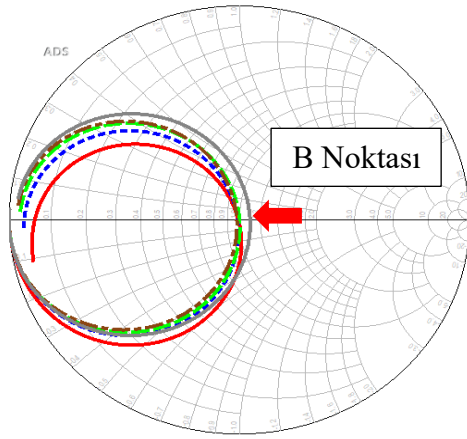
Şekil 4.10.d.'de görüleceği üzere kademeler arasında en yüksek verim 3. kademede 0 dBm giriş gücünde, $R_{yük} = 10$ k Ω yük direncinde % 13.776 olarak elde edilmiştir. Bu değer Çizelge 4.20.'de sunulan bir kademeli devrenin verim değerinden düşüktür.



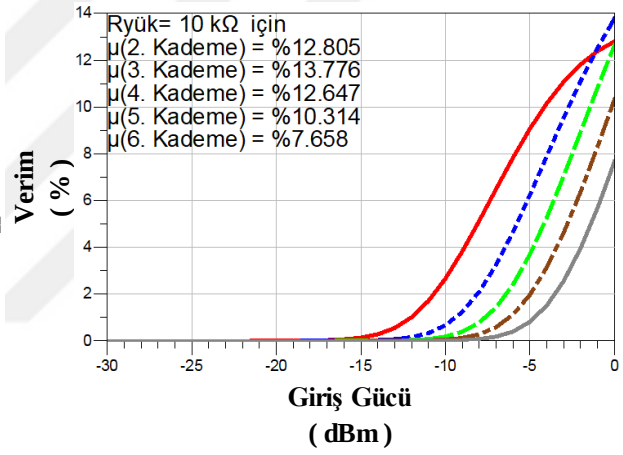
(a)



(b)



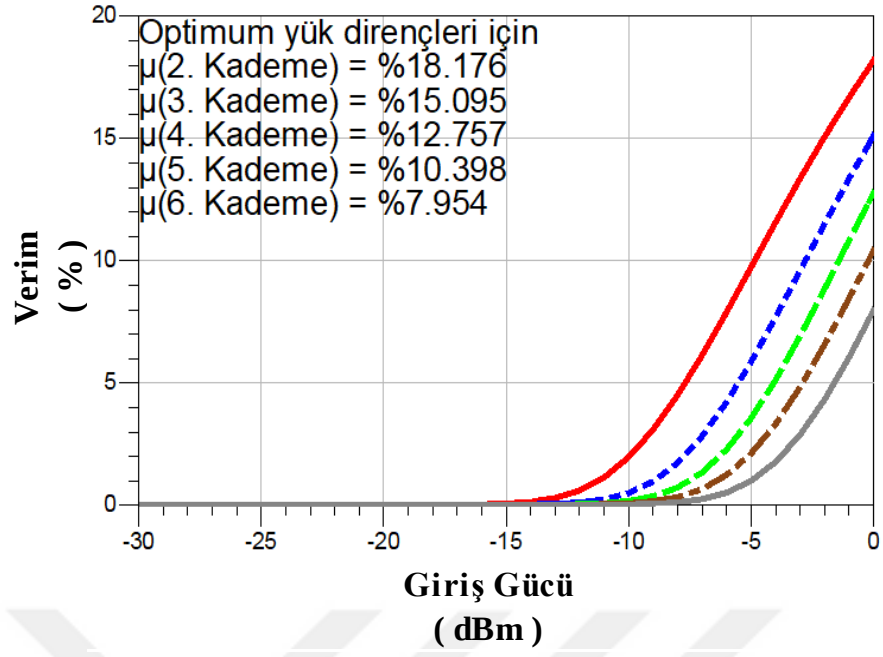
(c)



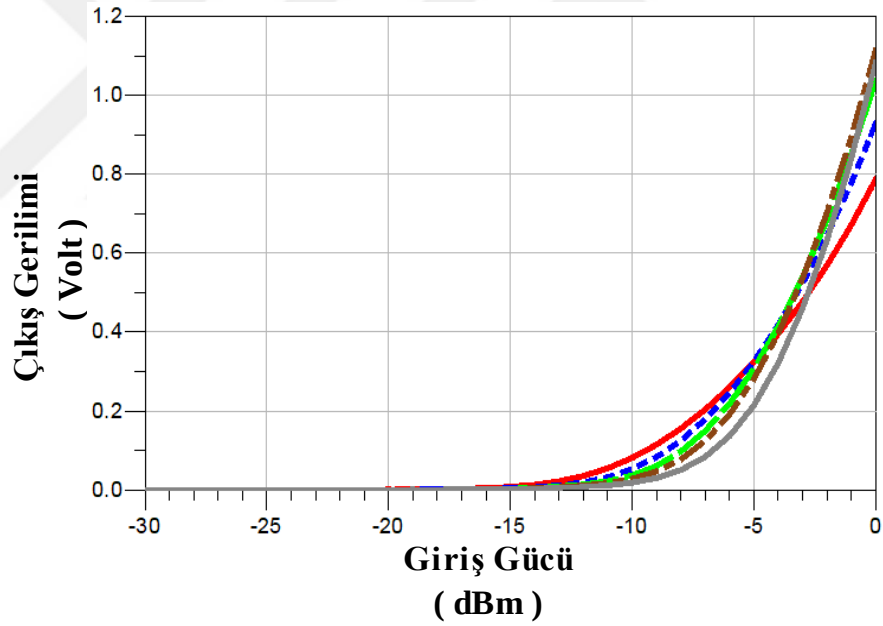
(d)

Şekil 4.10. HSMS286B diyotuyla ve $R_{yük} = 10 \text{ k}\Omega$ yük direnciyle oluşturulan Murata + İletim hattı devresinin, **a.** Frekansa göre yansıma katsayısı, **b.** Giriş gücüne göre çıkış gerilimi, **c.** Smith çizelgesi, **d.** Giriş gücüne göre verim değişimi.

ADS programının direnç ayar parametresi özelliğinden faydalananarak 0,1 kΩ ile 30 kΩ arasında 0,1 kΩ artışla yük direnci değerine göre verimlilik durumu analiz edilmiştir. En yüksek verim Şekil 4.11.a.'da, en yüksek verim değerlerine bağlı olarak gerilim değerleri de Şekil 4.11.b.'de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.11. Maksimum verimlerin elde edildiği $R_{yük}$ değerleri için **a.** Giriş güçlerine göre verim değişimleri, **b.** Giriş güçlerine göre çıkış gerilimleri.

Çizelge 4.24.'de verimin en yüksek olduğu yük direnci değerleri 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe için sunulmuştur.

Çizelge 4.24. HSMS286B diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe analizlerinde verimin en yüksek olduğu yük dirençleri ve giriş güçleri için elde edilen veriler.

Kademeler	Giriş Gücü (dBm)	$R_{yük}$ (k Ω)	Çıkış Gerilimi (Volt)	Verim (%)
2. Kademe	0	3,4	0,786	18,176
3. Kademe	0	5,7	0,928	15,095
4. Kademe	0	8,4	1,035	12,757
5. Kademe	0	11,9	1,112	10,398
6. Kademe	0	14,7	1,081	7,954

Çizelge 4.24.'de görüleceği üzere -30 dBm ile 0 dBm giriş güçleri aralığında en yüksek verim değerleri, her kademe için 0 dBm değerinde elde edilmiştir. Kademe sayısı arttıkça 5. kademeye kadar çıkış geriliminde artış gözlenmiştir. Kademe sayısı arttıkça verimde ise düşüş gözlenmiştir. En yüksek verimin elde edildiği yük direnci her kademe artışında artmıştır.

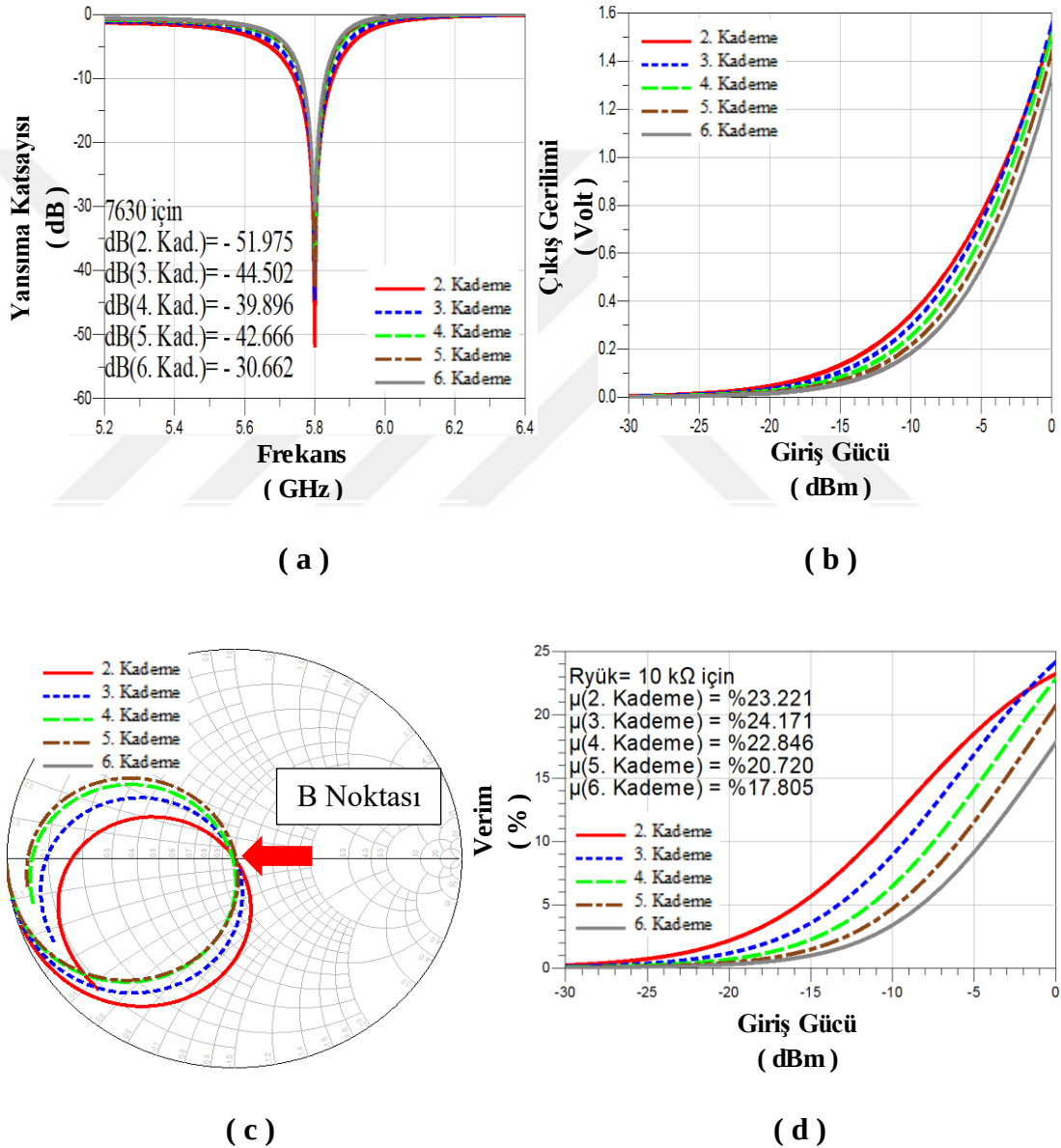
SMS7630 diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde elde edilen veriler Çizelge 4.25.'de sunulmuştur.

Çizelge 4.25. SMS7630 diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe devre analizlerinde $P_{in} = -2$ dBm giriş gücü ve $R_{yük} = 10$ k Ω yük direnci için elde edilen veriler.

Devre Tipi	ÖZELLİK	2. Kademe	3. Kademe	4. Kademe	5. Kademe	6. Kademe
İdeal Devre	Empedans (Ω)	$Z_o \times (0,060 - j0,862)$	$Z_o \times (0,041 - j0,583)$	$Z_o \times (0,031 - j0,441)$	$Z_o \times (0,025 - j0,354)$	$Z_o \times (0,021 - j0,296)$
Empedans Uyumlama Devresi	Yansım Katsayısı (dB)	-45,864	-42,576	-41,480	-43,053	-41,103
	Verim (%)	23,884	24,590	22,745	20,489	18,271
	Bobin (pH)	0,347	0,284	0,245	0,220	0,201
	Kondansatör (pF)	0,499	0,702	0,893	1,076	1,249
Murata Ürünli Devre	Empedans (Ω)	$Z_o \times (0,062 - j0,023)$	$Z_o \times (0,042 - j0,029)$	$Z_o \times (0,028 - j0,052)$	$Z_o \times (0,025 - j0,046)$	$Z_o \times (0,023 - j0,032)$
	Bobin	LQP02HQ 0N4W02	LQP02HQ 0N4C02	LQP02HQ 0N4C02	LQP02HQ 0N4C02	LQP02HQ 0N4C02
	Kondansatör	GJM0335C1 ER50WB01	GJM0335C1 ER70WB01	GJM0335C1 ER90WB01	GJM0335C1 E1R1WB01	GJM0335C1 E1R2WB01
TL Devre	E-TLOC	75,11	77,95	80,23	80,80	81,39
	E-TLIN	12,68	9,895	6,524	6,341	6,587

Çizelge 4.25.'de SMS7630 diyotu ile oluşturulan enerji hasat devrelerinde empedans uyumlamadan sonra, kademe sayısı arttıkça verimin, 2. kademedede düştüğü, 3. kademedede arttığı, 4. kademededen itibaren düştüğü görülmüştür.

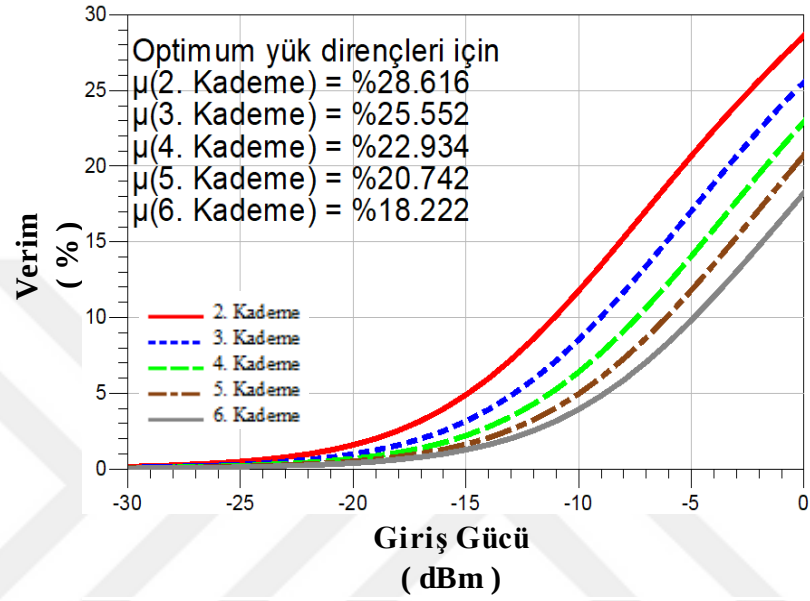
Murata + İletim hattı devresinde kademe sayısının artışına bağlı olarak $R_{yük} = 10 \text{ k}\Omega$ yük direnci için yansımada katsayılarının değişimi Şekil 4.12.a.'da, çıkış gerilimlerinin değişimi Şekil 4.12.b.'de, empedanslarının değişimi Şekil 4.12.c.'de ve maksimum verimlerinin değişimi Şekil 4.12.d.'de sunulmuştur.



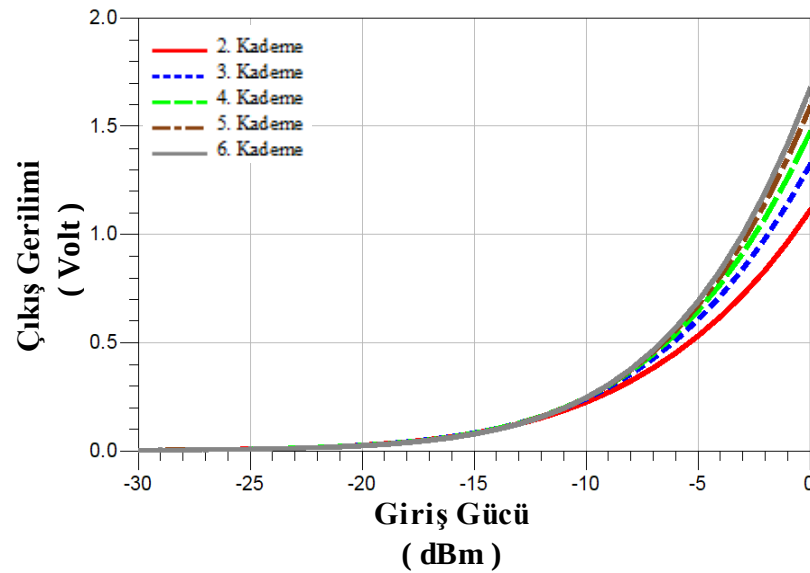
Şekil 4.12. SMS7630 diyotuyla ve $R_{yük} = 10 \text{ k}\Omega$ yük direnciyle oluşturulan Murata + İletim hattı devresinin, **a.** Frekansa göre yansımada katsayısı, **b.** Giriş gücüne göre çıkış gerilimi, **c.** Smith çizelgesi, **d.** Giriş gücüne göre verim değişimi.

Şekil 4.12.d.'de görüleceği üzere kademeler arasında en yüksek verim 3. kademede 0 dBm giriş gücünde, $R_{yük} = 10\text{ k}\Omega$ yük direncinde % 24.171 olarak elde edilmiştir. Bu değer Çizelge 4.20.'de sunulan bir kademeli devrenin verim değerinden düşüktür.

Yük direnci ayarı yapıldıktan sonra en yüksek verimler Şekil 4.13.a.'da, en yüksek verim değerlerine bağlı olarak gerilim değerleri de Şekil 4.13.b.'de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.13. Maksimum verimlerin elde edildiği $R_{yük}$ değerleri için **a.** Giriş güçlerine göre verim değişimleri, **b.** Giriş güçlerine göre çıkış gerilimleri.

Çizelge 4.26.'da verimin en yüksek olduğu yük direnci değerleri 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe için sunulmuştur.

Çizelge 4.26. SMS7630 diyotunun 2., 3., 4., 5. ve 6. kademe analizlerinde verimin en yüksek olduğu yük dirençleri ve giriş güçleri için elde edilen veriler.

Kademeler	Giriş Gücü (dBm)	$R_{yük}$ ($k\Omega$)	Çıkış Gerilimi (Volt)	Verim (%)
2. Kademe	0	4,3	1,109	28,616
3. Kademe	0	6,8	1,318	25,552
4. Kademe	0	9,4	1,468	22,934
5. Kademe	0	12,1	1,584	20,742
6. Kademe	0	15,3	1,670	18,222

Çizelge 4.26.'da görüleceği üzere -30 dBm ile 0 dBm giriş güçleri aralığında en yüksek verim değerleri, her kademe için 0 dBm değerinde elde edilmiştir. Kademe sayısı arttıkça çıkış gerilimi değerinde ve en yüksek verimin elde edildiği yük direnci değerinde artış, verim değerinde ise azalma gözlenmiştir.

5,8 GHz frekansında çalışan gerilim çoklayıcı devrede kullanılan 11 adet diyot içerisinde, 1. kademeden 6. kademeye kadar yapılan analizler sonucunda en iyi verim Murata ürünleri ve iletim hattı yapıları devrelerden elde edilmiştir. Murata ürünleri ve iletim hattı yapıları devreler içerisinde en iyi verim SMS7630 diyotu ile 2 $k\Omega$ yük direncinde, 0 dBm giriş gücünde 1. kademede elde edilmiş olup, verim değeri % 35,233'tür. HSMS285B diyotu ile 1,2 $k\Omega$ yük direncinde 0 dBm giriş gücünde 1. kademede % 26,832 verim elde edilmiştir. HSMS286B diyotu ile 1. kademede 1,6 $k\Omega$ yük direncinde 0 dBm giriş gücünde % 21,791 verim elde edilmiştir.

Çıkış geriliminin en yüksek olduğu değer, 1,670 V olup, SMS7630 diyotu ile tasarlanan 6. kademe devrede elde edilmiştir. Bu değer 1. kademe devrede 0,839 V olarak elde edilmiştir. Gerilim artışının en yüksek olduğu devre HSMS285B ile tasarlanan devre olup, 1. kademe 0,567 V, 6. kademede ise 1,224 V elde edilmiştir. HSMS286B diyotunda ise 1. kademede 0,590 V elde edilirken 5. kademede 1,112 V çıkış gerilimi elde edilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada HSMS2850, HSMS2852, HSMS285B, HSMS285C, HSMS2860, HSMS2862, HSMS286B, HSMS2820, HSMS2822, HSMS2810 ve SMS7630 diyotlarının her biriyle, 2,45 GHz ve 5,8 GHz frekansları için öncelikle ADS programıyla 10 k Ω yük direncine sahip olan gerilim çoklayıcı devre çizimi yapılmıştır. Gerilim çoklayıcı devrelerin tamamı için, oluşan harmonikleri ortadan kaldırmak amacıyla yükten önce DC geçiş filtresi olarak, Murata GJM0335C1E330GB01 Kodlu, 33 pF $\pm$ 2% kapasiteye sahip kondansatörler kullanılmış olup, üretici firma tarafından bu kondansatörlerin -55°C ile 125°C arasında ve 100 MHz ile 8,5 GHz arasında çalışabildiği raporlanmıştır. Bu çalışmada gerçek ürünlerin parametre değerleri hesaba katılmıştır.

Empedans uyumlama devresinin parametreleri ideal olarak belirlendikten sonra, elde edilen değerlere en yakın değerde olan Murata marka GJM0335C1E serisi kondansatörler ve 2,45 GHz için LQG15HH serisi, 5,8 GHz için LQP02HQ serisi bobinler ile ideal devre elemanları değiştirilmiştir. Oluşturulan devrelerin yansıma katsayıları, empedans değerleri, çıkış gerilimleri ve verimleri incelenmiş, bu değerlerde ideal değerlerden sapmalar gözlenmiştir. Sorun ürün parametrelerinden kaynaklanmaktadır.

İdealden sapan değerleri, ideale yaklaştırmak amacıyla devreye açık-seri iletim hattı eklenmiş ve değerler ideale yaklaştırılmıştır. İletim hattında $Z_0 = 50 \Omega$ sabit alınarak E, elektriksel alan değerleri değiştirilmiştir.

Enerji hasat sistemlerinin giriş empedansı verimliliği, yük direncinden önemli ölçüde etkilenir. Bu nedenle, tasarımda ADS programının direnç ayar parametresi özelliğinden faydalanarak 0,1 k Ω ile 30 k Ω arasında 0,1 k Ω artışla yük direnci değerine göre verimlilik durumu analiz edilmiş olup, -30 dBm ile 0 dBm giriş gücü aralığında maksimum verimi veren yük dirençleri her bir diyot için belirlenmiştir.

Bir kademeli gerilim çoklayıcı devrelerin sonuçları ışığında HSMS285X gurubundan en iyi verimi veren, HSMS286X gurubundan en iyi verimi veren ve SMS7630 diyotu ile sırasıyla 2, 3, 4, 5 ve 6 kademeli gerilim çoklayıcı devreler oluşturulmuştur. Oluşturulan devrelerin yansıma katsayıları, empedans değerleri, çıkış gerilimleri ve verimleri incelenmiş, elde edilen değerler çizelgeler vasıtasıyla sunulmuştur.

2,45 GHz frekansında yapılan simülasyonlarda kondansatörler için Murata GJM0335C1E serisi, bobinler için ise Murata LQG15HH serisinin kullanımı göz önünde bulundurulmuştur. Uygun ürün seçimi yapılırken empedans uyumlama analizi ile elde edilen L tipi (L-C) uyumlama devresinin sayısal değerine yakın değerlerde ürünler seçilmiştir. Ancak ideal durum değerlerine tam olarak yaklaşamadığı için, devreye açık devre iletim hattı (TLOC) ve seri devre iletim hattı (TLIN) eklenerek uyumlama sağlanmıştır. İletim hattında $Z_0 = 50 \Omega$ sabit alınarak E, elektriksel alan değerleri değiştirilmiştir.

2,45 GHz frekansında çalışan gerilim çoklayıcı devrede kullanılan 11 adet diyot içerisinde, 1. kademedan 6. kademeye kadar yapılan analizler sonucunda en iyi verim Murata ürünleri ve iletim hattı yapılı devrelerden elde edilmiştir. Murata ürünleri ve iletim hattı yapılı devreler içerisinde en iyi verim SMS7630 diyotu ile 2,7 k Ω yük direncinde, -1 dBm giriş gücünde 1. kademede elde edilmiş olup, verim değeri % 46,053'tür. HSMS285C diyotu ile 3,6 k Ω yük direncinde 0 dBm giriş gücünde 1. kademede % 34,973 verim elde edilmiştir. HSMS286B diyotu ile 1. kademede 5,6 k Ω yük direncinde 0 dBm giriş gücünde % 31,383 verim elde edilmiştir.

Çıkış geriliminin en yüksek olduğu değer, 3,031 V olup, HSMS286B diyotu ile tasarlanan 3. kademe devrede elde edilmiştir. Bu değer 1. kademe devrede 1,326 V olarak elde edilmiştir. Gerilim artışının en yüksek olduğu devre SMS7630 ile tasarlanan devre olup, 1. kademe 0,994 V, 6. kademede ise 2,788 V elde edilmiştir. HSMS285C diyotunda ise 1. Kademe 1,122 V elde edilirken 6. kademede 2,844 V çıkış gerilimi elde edilmiştir.

5,8 GHz frekansında yapılan simülasyonlarda kondansatörler için Murata GJM0335C1E serisi, bobinler için ise Murata LQP02HQ serisinin kullanımı göz önünde bulundurulmuştur. Uygun ürün seçimi yapılırken empedans uyumlama analizi ile elde edilen L tipi (L-C) uyumlama devresinin sayısal değerine yakın değerlerde ürünler seçilmiştir. Ancak ideal durum değerlerine tam olarak yaklaşamadığı için, devreye açık devre iletim hattı (TLOC) ve seri devre iletim hattı (TLIN) eklenerek uyumlama sağlanmıştır. İletim hattında $Z_0 = 50 \Omega$ sabit alınarak E, elektriksel alan değerleri değiştirilmiştir.

5,8 GHz frekansında çalışan gerilim çoklayıcı devrede kullanılan 11 adet diyot içerisinde, 1. kademedan 6. kademeye kadar yapılan analizler sonucunda en iyi verim Murata ürünleri ve iletim hattı yapılı devrelerden elde edilmiştir. Murata ürünleri ve iletim hattı yapılı devreler içerisinde en iyi verim SMS7630 diyotu ile 2 k Ω yük direncinde, 0 dBm giriş gücünde 1. kademe elde edilmiş olup, verim değeri % 35,233'tür. HSMS285B diyotu ile 1,2 k Ω yük direncinde 0 dBm giriş gücünde 1. kademe % 26,832 verim elde edilmiştir. HSMS286B diyotu ile 1. kademe 1,6 k Ω yük direncinde 0 dBm giriş gücünde % 21,791 verim elde edilmiştir.

Çıkış geriliminin en yüksek olduğu değer, 1,670 V olup, SMS7630 diyotu ile tasarlanan 6. kademe devrede elde edilmiştir. Bu değer 1. kademe devrede 0,839 V olarak elde edilmiştir. Gerilim artışının en yüksek olduğu devre HSMS285B ile tasarlanan devre olup, 1. kademe 0,567 V, 6. kademe ise 1,224 V elde edilmiştir. HSMS286B diyotunda ise 1. kademe 0,590 V elde edilirken 5. kademe 1,112 V çıkış gerilimi elde edilmiştir.

Yapılan analizler, sinyal üreticiden uzak bölgelerde 0 dBm giriş gücünden düşük giriş güçlerinin bulunduğu ortamlar göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Düşük giriş güçlerinde yüksek verim ve çıkış gücü elde edilmiştir. Sinyal üreticine yakın bölgelerde çok daha yüksek verim ve çıkış gerilimi elde edilebilir.

2,45 GHz ve 5,8 GHz frekansları göz önünde bulundurularak tasarlanan devrelerde, kademe sayısı arttıkça maksimum verimi veren $R_{yük}$ yük direncinde artış olmuştur. Murata ürünleri ve iletim hattı ile belirlenen $R_{yük}$ yük direnci değerleri kullanıldığında kademelerin verimlerinde artış gözlemlenmiştir.

Yapılan çalışmada Schottky diyotların enerji hasadı yapılan frekansa bağlı olarak seçiminin önemli olduğu gözlemlenmiştir. Yük direncinin seçiminin her bir frekans ve diyot için ayrı ayrı yapıldığında verimin önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. 2,45 GHz ve 5,8 GHz frekansları için en iyi performans SMS7630 diyotu ile tasarlanan Murata ürünleri ve iletim hattı devrelerinden elde edilmiştir. 2,45 GHz frekansından 5,8 GHz frekansına çıkıldığında, çıkış geriliminin ve verimin azaldığı yapılan simülasyonlarla gözlemlenmiştir.

Gerilimin akıma göre daha önemli olduğu sıcaklık, nem, basınç, vücut ve askeri sensör

uygulamaları gibi uygulamalarda çıkış geriliminin yüksek olduğu gerilim çoklayıcı devreler, akımın gerilimden daha önemli olduğu led uygulamaları, işitme cihazları gibi uygulamalarda verimin yüksek olduğu gerilim çoklayıcı devreler kullanılabilir.

5,8 GHz frekansında içinde Schottky diyotların etkisini, Murata ürünleri ile yapılan tasarımı ve farklı kademelerin sonuçlarını inceleyen bu çalışma özellikle belirtilen frekans için öncü bir çalışmadır.



KAYNAKLAR

1. Cetinkaya, O. ve Akan, O. B., 2017. Electric-field energy harvesting in wireless networks, *IEEE Wireless Communications*, 24, 2, 34-41.
2. Song, C., 2017. Broadband rectifying-antennas for ambient RF energy harvesting and wireless power transfer, PhD. Thesis, University of Liverpool, Liverpool.
3. Tekir, O., 2019. Havada yayılım yapan elektromanyetik dalgalardan enerji hasat etmede verimliliği etkileyen faktörlerin analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
4. Duong, C., 2023. Passive voltage boosting methods for wireless energy harvesting systems, PhD. Thesis, University of California, Los Angeles.
5. Bahhar, C., Baccouche, C., Mnif, F. ve Saklı, H., 2022. Optical rectenna for 2.4 GHz wireless communications, *International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, Harbin City, China, 2021, 1093-1097.
6. Benkalfate, C., Ouslimani, A., Kasbari, A.-E. ve Feham, M. A., 2022. New RF energy harvesting system based on two architectures to enhance the DC output voltage for WSN feeding, *Sensors*, 22, 9, 3576.
7. Contreras, A. ve Rodriguez, B., 2021. Optimization of a novel rectenna for RF energy harvesting at 2.45 GHz, *Wireless Personal Communications* 119, 3, 2451–2467.
8. Salleh, S., Zakariya, M.A. ve Lee, R.M.A., 2021. A comparison study of rectifier designs for 2.45 GHz EM energy harvesting, *Energy and Power Engineering*, 2021, 13, 81-89.
9. Sarı, F., 2021. Çift bantlı RF enerji hasadı için toplu eleman devre yapıları, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Özel Sayı 28*, 670-674.
10. Sarı, F. ve Uzun, Y., 2019. A comparative study: voltage multipliers for RF energy harvesting system, *Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series A2-A3*, 61, 1, 12-23.
11. Zhai, X., Song, J., Chen, H., Dai, X. ve Zhao, T., 2019. High electron mobility Ge_{1-x}Sn_x (x >10%) folding space charge zone schottky diode for microwave wireless power transfer, *IEEE Access*, 7, 127438-127452.
12. Dey, K., 2018. Design of dual band rectifiers for energy harvesting applications, master thesis, Purdue University, Fort Wayne, India.
13. Yalçın, A.B., 2021. Çok bantlı RF enerji hasadı, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
14. Baird, D., Hughes, R. ve Nordmann, A., 2013. Heinrich Hertz: classical physicist, modern philosopher, Springer Science & Business Media, 198.

15. Carlson, W. B., 2015. Tesla: Inventor of the electrical age, Princeton University Press, California, USA.
16. Garnica, J., Chinga, R. A. ve Lin, J., 2013. Wireless power transmission: From far field to near field. *Proceedings of the IEEE*, 101, 6, 1321-1331.
17. Brown, W. C., 1966. The microwave powered helicopter. *Journal of Microwave Power*, 1, 1, 1-20.
18. Strassner, B. ve Chang, K., 2013. Microwave power transmission: Historical milestones and system components. *Proceedings of the IEEE*, 101, 6, 1379-1396.
19. Glaser, P. E., 1968. Power from the sun: Its future, *Science*, 162, 3856, 857-861.
20. Kaya, N., Matsumoto, H., Miyatake, S., Kimura, I. ve Nagatomo, M., 1986. Nonlinear interaction of strong microwave beam with the ionosphere MINIX rocket experiment. Institute of Electronics and Communications Engineers of Japan, IEEE, and URSI, International Symposium on Antennas and Propagation /ISAP '85/, Kyoto, Japan, Aug. 20-22, 1985, *Space Power*, 6, 3, 1986, 181-186.
21. Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., Joannopoulos, J. D., Fisher, P. ve Soljačić, M., 2007. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances, *Science*, 317, 5834, 83-86.33.
22. Jasim, M.M., 2019. Impedance matching and it is quality factor investigation for RF energy harvesting, Master Thesis, Aksaray University, Institute of Science, Aksaray.
23. Ang, M.J., Nasimuddin, N., Muhammad, F.K. ve Karthik, T.C., 2019. A Dual-Band efficient circularly polarized rectenna for RF energy harvesting systems, *Int J RF Microw Comput Aided Eng*. 2019, 29, 21665.
24. Halimi, A., Surender, D. ve Khan, T., 2021. Design of a 2.45 GHz operated rectifier with 81.5% PCE at 13 dBm input power for RFEH/WPT applications, 2021 IEEE Indian Conference on Antennas and Propagation, Jaipur, Rajasthan, India, India, 2021, 981-983.
25. Liu, W., Huang, K., Wang, T., Hou, J. ve Zhang, Z., 2022. A compact high-efficiency RF rectifier with widen bandwidth, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 30, 4, 433-436.
26. Kyrillos, K.S., Shaochuan, W., Demyana, A.S. ve Ghoneim, S.S.M., 2021. A Quad-Band RF circuit for enhancement of energy harvesting, *Electronics* 2021, 10, 1160.
27. Sibille, J., Lucas de Peslouan, P. O., Fougereux, T., Douyère, A., Chabriat, J. P. ve Genon-Catalot, D., 2023. Wireless energy harvesting performance of 2.45 GHz rectennas array inside wall, 2023 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO), Balaclava, Mauritius, 2023, 1-2.

28. MoulaA. ve Djerafi T., 2018. Multi-Stage schottky diode power harvester for UWB application, 2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), Montreal, QC, Canada, 2018, 115-119.
29. Manafi S., Nikmehr S. ve Bemani M., 2012. Planar reconfigurable multifunctional antenna for WLAN/Wimax/UWB/Pcsdcs/UMTS applications, Progress In Electromagnetics Research, 26, 123-137.
30. Hemour, S., Zhao, Y., Lorenz, C. H. P., Houssameddine, D., Gui, Y., Hu, C.-M. ve Wu, K., 2014. Towards low-power high-efficiency RF and microwave energy harvesting. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 62, 4, 965-976.
31. Song, C., Huang, Y., Zhou, J., Zhang, J., Yuan, S. ve Carter, P., 2015. A high efficiency broadband rectenna for ambient wireless energy harvesting. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 63, 8, 3486-3495.
32. Yalçın, A.B., 2021. Efficiency analysis for triple band RF energy harvesting, Journal of Science and Engineering, Aksaray University. Science, 317, 5834, 83-86.33.
33. Gözel, M.A., 2020. RF enerji hasatlama devreleri için verimi arttırılmış doğrultucu topoloji tasarımı, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
34. Garcia, J.J., 2022. Considerations for the design and implementation of ambient RF signal rectifiers in the 2.45 GHz WiFi band, Applied Sciences, 2022, 12, 7884.
35. De Vita, G. ve Iannaccone, G. 2005. Design criteria for the RF section of UHF and microwave passive RFID transponders. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 53, 9, 2978-2990.
36. Azawy, M. M. ve Sari, F., 2019. Analyses of Dickson Voltage Multiplier for RF Energy Harvesting, 2019 1st Global Power, Energy and Communication Conference, Cappadocia, Turkey, 2019, 10-14.
37. Khonsari Z., Björninen T., Tentzeris M. M., Sydänheimo L. ve Ukkonen L., 2015. 2.4 GHz inkjetprinted RF energy harvester on bulk cardboard substrate, 2015 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), 153–155.
38. Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. ve Cayirci, E. 2002. Wireless sensor networks: a survey, Computer Networks, 38, 4, 393-422.
39. URL-1 < alldatasheet.com/view_datasheet.jsp?Searchword=SMS7630&sField=2 >, Erişim Tarihi: 25.11.2023.
40. URL-2 < <https://electronicsforu.com/marketverticals/powerelectronics/harvesting-radio-frequency-energy> >, Erişim Tarihi: 13.09.2023.

41. URL-3 < <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/how-why-of-energy-harvesting-for-low-power-applications>>, Erişim Tarihi: 12.09.2023.
42. URL-4 < <https://techterms.com/definition/wi-fi> >, Erişim tarihi: 03.05.2023.
43. URL-5 < <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/wifi-ieee-802-11/channelsfrequencies-bands-bandwidth.php> >, Erişim tarihi: 03.05.2023.
44. URL-6 < https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_WLAN_channels >, Erişim tarihi: 07.04.2023.



ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Sertaç Kaan TOKYAY

EĞİTİM BİLGİLERİ (Kurum ve Yıl)

Lisans : Kocaeli Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
Bölümü, 1997-2003.

Lisans : Aksaray Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Bölümü, 2016-2019.

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Anabilim Dalı, 2021-2024.

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLERİ

1. Mercedes Benz Türk A.Ş. / Mart 2021 – Halen.
2. Tokyay Mühendislik Ltd. Şti. / Aralık 2009 – Ocak 2021.

TEZDEN ÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER

Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. TOKYAY, S. K., SARI, F. 2023. 2,45 GHz Wi-Fi RF Enerji Hasadı için Parametrelerin Belirlenmesi. Aksaray University Journal of Science and Engineering.
<https://doi.org/10.29002/asujse.1400173>