

**T.C.
NUH NACİ YAZGAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BİLGİSAYAR KONTROLLÜ KAZANCI
AYARLANABİLİR MİKRODALGA KUVVETLENDİRİCİ
TASARIMI VE PROTOTİP UYGULAMA SONUÇLARININ
ANALİZİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Ahmet BÖRKLÜ**

**Danışman
Prof. Dr. Serhan YAMAÇLI**

**Ocak 2023
KAYSERİ**

T.C.
NUH NACİ YAZGAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BİLGİSAYAR KONTROLLÜ KAZANCI
AYARLANABİLİR MİKRODALGA KUVVETLENDİRİCİ
TASARIMI VE PROTOTİP UYGULAMA SONUÇLARININ
ANALİZİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Ahmet BÖRKLÜ

Danışman
Prof. Dr. Serhan YAMAÇLI

Ocak 2023
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Ahmet BÖRKLÜ

YÖNERGEYE UYGUNLUK ONAYI

“Bilgisayar Kontrollü Kazancı Ayarlanabilir Mikrodalga Kuvvetlendirici Tasarımı ve Prototip Uygulama Sonuçlarının Analizi” adlı Yüksek Lisans tezi, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Lisansüstü Tez Yazım Yönergesi ’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Tez Danışmanı

Ahmet BÖRKLÜ

Prof. Dr. Serhan YAMAÇLI

İmza

İmza

KABUL VE ONAY SAYFASI

Prof. Dr. Serhan YAMAÇLI danışmanlığında Ahmet BÖRKLÜ tarafından hazırlanan “Bilgisayar Kontrollü Kazancı Ayarlanabilir Mikrodalga Kuvvetlendirici Tasarımı ve Prototip Uygulama Sonuçlarının Analizi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

.../.../2023

JÜRİ:

Danışman : Prof. Dr. Serhan YAMAÇLI

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Asuman SAVAŞÇIHABEŞ

Üye : Dr. Öğr. Üyesi M. Bahadır ÇETİNKAYA

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Kurulunun tarih vesayılı kararı ile onaylanmıştır.

..... /...../

Prof. Dr. Serhan YAMAÇLI

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR

Bilgisayar Kontrollü Kazancı Ayarlanabilir Mikrodalga Kuvvetlendirici Tasarımı ve Prototip Uygulama Sonuçlarının Analizi adlı tez çalışması Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği tezli yüksek lisans kapsamında hazırlanmıştır.

Tez sürecim boyunca bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan ve desteklerini esirgemeyen tez danışmanım değerli hocam Prof. Dr. Serhan Yamaçlı başta olmak üzere Elektrik Elektronik Mühendisliği yüksek lisans dönemim boyunca bana yardımcı olan tüm Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümündeki hocalarıma, tüm yaşamım boyunca maddi manevi her türlü desteğini esirgemeyen annem, babam ve kardeşime çok teşekkür ederim (Kayseri, 06/01/2023).

Ahmet BÖRKLÜ

Kayseri, Ocak 2023

BİLGİSAYAR KONTROLLÜ KAZANCI AYARLANABİLİR MİKRODALGA KUVVETLENDİRİCİ TASARIMI VE PROTOTİP UYGULAMA SONUÇLARININ ANALİZİ

Ahmet BÖRKLÜ

Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Ocak 2023

Danışman: Prof. Dr. Serhan YAMAÇLI

ÖZET

Mikrodalga tekniği alanında yapılan çalışmalar, haberleşme sistemleri başta olmak üzere birçok uygulamada önem arz etmektedir. Kazancı ayarlanabilir mikrodalga kuvvetlendirici tasarımları ise özellikle dizi anten sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, kazancı dijital olarak ayarlanabilen bir mikrodalga kuvvetlendirici tasarımı yapılmış ve prototip olarak gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga kuvvetlendirici için monolitik mikrodalga entegre devre (MMIC) olan SPF5189Z tercih edilerek 50 Hz - 4000 MHz aralığında çalışan kazancı bilgisayar kontrollü olarak ayarlanabilen bir kuvvetlendirici tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Tasarımı yapılan mikrodalga kuvvetlendirici sistemi ilk olarak breadboard üzerine kurulmuştur. Devrenin düzgün çalıştığı doğrulanarak PCB çizimleri yapılmış ve devre kazıma makinesi ile prototip üretim aşamaları tamamlanmıştır.

Gerçekleştirilen mikrodalga kuvvetlendirici sistemi için besleme gerilimini 0.58 ile 1.78 volt arasında değiştiren farklı PWM değerleri bilgisayar kontrollü olarak uygulanarak vektör devre analizörü (VNA) ile kuvvetlendiricinin S-parametrelerinin ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre 2.4 GHz frekansında -2.31 dB ile 9.02 dB aralığında kazanç ayarı yapılabilen bir mikrodalga kuvvetlendirici tasarımı elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Mikrodalga kuvvetlendirici, kuvvetlendirici kazanç ayarı, MMIC, PWM kontrollü mikrodalga

COMPUTER CONTROLLED GAIN ADJUSTABLE MICROWAVE AMPLIFIER DESIGN AND ANALYSIS OF THE PROTOTYPE APPLICATION RESULTS

Ahmet BÖRKLÜ

Nuh Naci Yazgan University, Institute of Sciences

Master of Science Thesis, February 2023

Supervisor: Prof. Dr. Serhan YAMAÇLI

ABSTRACT

Studies in the field of microwave technology are important in many applications, especially in communication systems. Adjustable-gain microwave amplifier designs are frequently used in antenna array systems.

In this study, a microwave amplifier whose gain can be adjusted digitally was designed and realized as a prototype. Employing the SPF5189Z as the monolithic microwave integrated circuit (MMIC), an amplifier design operating in the 50 Hz - 4000 MHz range, whose gain can be adjusted by computer control, has been realized.

The designed microwave amplifier system was first installed on a breadboard. After verifying that the circuit works properly, PCB drawings were made and prototype production stages were completed with a circuit scraping machine.

Different PWM values that change the supply voltage between 0.58 and 1.78 volts were applied under computer control for the implemented microwave amplifier system and then the S-parameters of the amplifier were measured with a vector network analyzer (VNA). According to the measurement results, a microwave amplifier design with gain adjustment between -2.31 dB and 9.02 dB at 2.4 GHz frequency was obtained.

Keywords: Microwave amplifier, amplifier gain adjustment, MMIC, PWM controlled microwave

İÇİNDEKİLER

BİLGİSAYAR KONTROLLÜ KAZANCI AYARLANABİLİR MİKRODALGA KUVVETLENDİRİCİ TASARIMI VE PROTOTİP UYGULAMA SONUÇLARININ ANALİZİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK ONAYI	ii
KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR	iv
ÖZET	v
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMA VE SİMGELER	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
3. MATERYAL VE METOT	10
3.1. Kullanılan Devre Elemanları	10
3.1.1. Arduino Nano.....	10
3.2. LM358 İşlemsel Kuvvetlendirici.....	11
3.2.1. LM317 Gerilim Regülatörü.....	14
3.2.2. SPF5189Z Mikrodalga Tümlerişik Devre (MMIC)	14
3.3. Tasarlanan ve Prototip Olarak Üretilen Güç Kaynağı Devresi	17

3.3.1.	Devre Şeması	17
3.3.2.	Sistemin Breadboard'da Test Edilmesi	18
3.3.3.	Devrenin PCB Çizimi	19
3.3.4.	Devrenin LPKF Devre Kazıma Makinesi ile Üretimi.....	19
3.3.5.	Devrenin Son Hali	20
3.4.	Bilgisayar Kontrollü Mikrodalga Kuvvetlendirici Sistemi	23
3.4.1.	SPF5189Z 50-4000 MHz RF Kuvvetlendirici Devresinin Modları ve Farklı Uygulama Örnekleri	23
3.4.2.	Mikrodalga Kuvvetlendirici Sistemin Son Hali	25
3.4.3.	Arduino Yazılımı	27
3.4.4.	Bilgisayardaki Kontrol Arayüzü Yazılımı	29
3.5.	Rohde-Schwarz ZVH8 Vektör Devre Analizörü (VNA)	29
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA	33
4.1.	SPF5189Z Mikrodalga Kuvvetlendirici Ölçümüne Başlamadan Önce VNA Cihazının Kalibre Edilmesi	33
4.2.	Tasarlanan ve Prototip Olarak Üretilen Mikrodalga Kuvvetlendirici Sisteminin Mikrodalga Karakteristiklerinin Ölçülmesi	34
4.3.	PWM İş Çevrimi Parametresinin Besleme Gerilimine ve Mikrodalga Kuvvetlendiricinin Kazancına Etkisi	77
5.	SONUÇLAR	79
6.	KAYNAKÇA	81

KISALTMA VE SİMGELER

Bu tez çalışmasında kullanılan bazı kısaltmalar ve semboller aşağıda verilmiştir.

Simgeler	Açıklamalar
AM	Genlik modülasyonu
Balun	Uyumlama trafosu
DA	Dağıtılmış amplifikatör
EM	Elektromanyetik
FET	Alan etkili transistör
GaN	Galyum nitrit
GaN	Galyum nitrid
GND	Toprak
HEMT	Yüksek elektron hareketlilik transistör
GaN tHEMT	Galyum nitrit yüksek elektron mobiliteli transistör
HPA	Yüksek güçlü amplifikatör
I/V	Akım/Gerilim
IIP3	Üçüncü sıra kesme noktası
IMD	Üçüncü devre modülasyon
L2NTWA	Beş aşamalı lineer düşük gürültülü düzgün yürüyen dalga amplifikatörleri
LNA	Düşük gürültülü kuvvetlendirici
MIC	Mikrodalga tümleşik devre
MMIC	Monolitik mikrodalga entegre devre
OEIC	Opto-elektronik entegre devre
PA	Güç amplifikatörü
PAE	Güç eklenmiş verim
PE	Güç verimliliği
pHEMT	Psödomorfik yüksek elektron hareketli transistör
PM	Faz modülasyonu
SiC	Silisyum karbür

SRFT	Basitleştirilmiş gerçek frekans tekniği
TVS	Özel geçici gerilim bastırma
UHF	Ultra yüksek frekans
VCC+	Artı besleme
VNA	Vektör devre analizörü
VSAT	Çok küçük diyagram açıklığı



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Arduino Nano Devre Kartının Teknik Özellikleri.....	10
Tablo 2. SPF5189Z Pin Adları ve Açıklamaları.....	17



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1 Arduino Nano pin diyagramı	11
Şekil 3.2 LM358 entegresinin görünümü	12
Şekil 3.3 LM358 pin yapısı.....	13
Şekil 3.4 LM317 pin bağlantısı.....	14
Şekil 3.5 SPF5189Z entegresinin pin bağlantısı	16
Şekil 3.6 Tasarlanan devre şemasının çizilmesi	17
Şekil 3.7 İsis programında çizilmiş devre şeması.....	18
Şekil 3.8 Ares programında çizilmiş PCB baskı devre görünümü	18
Şekil 3.9 Ares programında çizilmiş PCB baskı devre görünümü	19
Şekil 3.10 LPKF ile üretimi sırasındaki devre kartının resmi	20
Şekil 3.11 PCB devre kartı	21
Şekil 3.12 Prototip devre kartı	22
Şekil 3.13 SPF5189Z Devre şeması	23
Şekil 3.14 Alçak geçiren filtre korumalı SPF5189Z LNA	24
Şekil 3.15 Diyot giriş korumalı SPF5189Z LNA	24
Şekil 3.16 300 ohm dengeli girişli SPF5189Z LNA.....	25
Şekil 3.17 Arduino Nano ile kazanç ayarlama devresi ve SPF5189Z MMIC devresinin çalışma prototipi	26
Şekil 3.18 Arduino arayüz programında tanımlamaların yapılması	27
Şekil 3.19 Arduino arayüz programında gerekli kodların yazılması	28
Şekil 3.20 Bilgisayar kontrol arayüzü yazılımı	29
Şekil 3.21 İki kapı girişli S parametrelili devre modeli	30
Şekil 3.22 İki kapılı bir devre modeli için sinyal akış grafiği.....	31
Şekil 4.1 VNA cihazının ZVH-Z135 kalibrasyonunun yapılması.....	33
Şekil 4.2 VNA cihazının kalibre edilmesi	34
Şekil 4.3 PWM=20 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması.....	35
Şekil 4.4 PWM=20 için S21 karakteristiği	35
Şekil 4.5 PWM=20 için S11 karakteristiği	36
Şekil 4.6 PWM=20 için S22 karakteristiği	36
Şekil 4.7 PWM=20 için S12 karakteristiği	36
Şekil 4.8 PWM=22 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması.....	37
Şekil 4.9 PWM=22 için S21 karakteristiği	37

Şekil 4.10 PWM=22 için S11 karakteristiği	38
Şekil 4.11 PWM=22 için S22 karakteristiği	38
Şekil 4.12 PWM=22 için S12 karakteristiği	38
Şekil 4.13 PWM=24 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması.....	39
Şekil 4.14 PWM=24 için S21 karakteristiği	39
Şekil 4.15 PWM=24 için S11 karakteristiği	40
Şekil 4.16 PWM=24 için S22 karakteristiği	40
Şekil 4.17 PWM=24 için S12 karakteristiği	40
Şekil 4.18 PWM=26 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması.....	41
Şekil 4.19 PWM=26 için S21 karakteristiği	41
Şekil 4.20 PWM=26 için S11 karakteristiği	42
Şekil 4.21 PWM=26 için S22 karakteristiği	42
Şekil 4.22 PWM=26 için S12 karakteristiği	42
Şekil 4.23 PWM=28 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması.....	43
Şekil 4.24 PWM=28 için S21 karakteristiği	43
Şekil 4.25 PWM=28 için S11 karakteristiği	44
Şekil 4.26 PWM=28 için S22 karakteristiği	44
Şekil 4.27 PWM=28 için S12 karakteristiği	44
Şekil 4.28 PWM=30 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması.....	45
Şekil 4.29 PWM=30 için S21 karakteristiği	45
Şekil 4.30 PWM=30 için S11 karakteristiği	46
Şekil 4.31 PWM=30 için S22 karakteristiği	46
Şekil 4.32 PWM=30 için S12 karakteristiği	46
Şekil 4.33 PWM=32 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması.....	47
Şekil 4.34 PWM=32 için S21 karakteristiği	47
Şekil 4.35 PWM=32 için S11 karakteristiği	48
Şekil 4.36 PWM=32 için S22 karakteristiği	48
Şekil 4.37 PWM=32 için S12 karakteristiği	48
Şekil 4.38 PWM=34 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması.....	49
Şekil 4.39 PWM=34 için S21 karakteristiği	49
Şekil 4.40 PWM=34 için S11 karakteristiği	50
Şekil 4.41 PWM=34 için S22 karakteristiği	50
Şekil 4.42 PWM=34 için S12 karakteristiği	50
Şekil 4.43 PWM=36 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması.....	51

Şekil 4.44 PWM=36 için S21 karakteristiği	51
Şekil 4.45 PWM=36 için S11 karakteristiği	52
Şekil 4.46 PWM=36 için S22 karakteristiği	52
Şekil 4.47 PWM=36 için S12 karakteristiği	52
Şekil 4.48 PWM=38 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması.....	53
Şekil 4.49 PWM=38 için S21 karakteristiği	53
Şekil 4.50 PWM=38 için S11 karakteristiği	54
Şekil 4.51 PWM=38 için S22 karakteristiği	54
Şekil 4.52 PWM=38 için S12 karakteristiği	54
Şekil 4.53 PWM=40 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması.....	55
Şekil 4.54 PWM=40 için S21 karakteristiği	55
Şekil 4.55 PWM=40 için S11 karakteristiği	56
Şekil 4.56 PWM=40 için S22 karakteristiği	56
Şekil 4.57 PWM=40 için S12 karakteristiği	56
Şekil 4.58 PWM=42 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması.....	57
Şekil 4.59 PWM=42 için S21 karakteristiği	57
Şekil 4.60 PWM=42 için S11 karakteristiği	58
Şekil 4.61 PWM=42 için S22 karakteristiği	58
Şekil 4.62 PWM=42 için S12 karakteristiği	58
Şekil 4.63 PWM=44 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması.....	59
Şekil 4.64 PWM=44 için S21 karakteristiği	59
Şekil 4.65 PWM=44 için S11 karakteristiği	60
Şekil 4.66 PWM=44 için S22 karakteristiği	60
Şekil 4.67 PWM=44 için S12 karakteristiği	60
Şekil 4.68 PWM=46 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması.....	61
Şekil 4.69 PWM=46 için S21 karakteristiği	61
Şekil 4.70 PWM=46 için S11 karakteristiği	62
Şekil 4.71 PWM=46 için S22 karakteristiği	62
Şekil 4.72 PWM=46 için S12 karakteristiği	62
Şekil 4.73 PWM=48 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması.....	63
Şekil 4.74 PWM=48 için S21 karakteristiği	63
Şekil 4.75 PWM=48 için S11 karakteristiği	64
Şekil 4.76 PWM=48 için S22 karakteristiği	64
Şekil 4.77 PWM=48 için S12 karakteristiği	64

Şekil 4.78 PWM=50 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması.....	65
Şekil 4.79 PWM=50 için S21 karakteristiği	65
Şekil 4.80 PWM=50 için S11 karakteristiği	66
Şekil 4.81 PWM=50 için S22 karakteristiği	66
Şekil 4.82 PWM=50 için S12 karakteristiği	66
Şekil 4.83 PWM=52 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması.....	67
Şekil 4.84 PWM=52 için S21 karakteristiği	67
Şekil 4.85 PWM=52 için S11 karakteristiği	68
Şekil 4.86 PWM=52 için S22 karakteristiği	68
Şekil 4.87 PWM=52 için S12 karakteristiği	68
Şekil 4.88 PWM=54 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması.....	69
Şekil 4.89 PWM=54 için S21 karakteristiği.	69
Şekil 4.90 PWM=54 için S11 karakteristiği	70
Şekil 4.91 PWM=54 için S22 karakteristiği	70
Şekil 4.92 PWM=54 için S12 karakteristiği	70
Şekil 4.93 PWM=56 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması.....	71
Şekil 4.94 PWM=56 için S21 karakteristiği	71
Şekil 4.95 PWM=56 için S11 karakteristiği	72
Şekil 4.96 PWM=56 için S22 karakteristiği	72
Şekil 4.97 PWM=56 için S12 karakteristiği	72
Şekil 4.98 PWM=58 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması.....	73
Şekil 4.99 PWM=58 için S21 karakteristiği	73
Şekil 4.100 PWM=58 için S11 karakteristiği	74
Şekil 4.101 PWM=58 için S22 karakteristiği	74
Şekil 4.102 PWM=58 için S12 karakteristiği	74
Şekil 4.103 PWM=60 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması.....	75
Şekil 4.104 PWM=60 için S21 karakteristiği	75
Şekil 4.105 PWM=60 için S11 karakteristiği	76
Şekil 4.106 PWM=60 için S22 karakteristiği	76
Şekil 4.107 PWM=60 için S12 karakteristiği	76
Şekil 4.108 PWM iş çevrim parametresine göre besleme gerilim grafiği	77
Şekil 4.109 Besleme gerilimine göre kuvvetlendirici kazanç grafiği	77
Şekil 4.110 PWM iş çevrim parametresine göre kuvvetlendirici kazanç grafiği	78

1. GİRİŞ

Kazancı değıştirilebilen kuvvetlendiricilere dizi anten sistemlerinde ihtiyaç duyulmaktadır. Dizi anten sistemleri birden fazla antenin bir düzlem veya plakanın üzerinde yan yana bulundurulmasıyla kazançlarının ve fazlarının birbirinden farklı yapılması sayesinde istenilen bir ışma paterni elde edilmesine imkân sağlamaktadır.

Dizi antenlerin beslenmesinde kazancı ayarlanabilir kuvvetlendiriciler kullanılmaktadır. Bu anten sistemleri askeri uygulamalarda ve iletişim sistemlerinde tercih edilmektedir. Ayarlanabilir kuvvetlendiriciler, kazanç ayarı ve faz ayarı olarak iki özelliğı ayarlayabilmektedir.

Bu tezde yapılan araştırmalar mikrodnetleyici yardımı ile PWM ayarlı kazancı ayarlanabilir bir mikrodalga kuvvetlendirici tasarımı üzerine yapılmıştır. Mikrodalga kuvvetlendirici kazancı bilgisayar yardımı ile ayarlanabilir şekilde yapılmıştır. Tasarımı yapılan kuvvetlendiricinin prototipi oluşturularak üretimi yapılmış ve ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Kuvvetlendirici entegre devresi olarak monolitik mikrodalga entegre devre (MMIC) olan SPF5189Z tercih edilerek 50 Hz - 4000 MHz aralığında çalışan ve kazancı ayarlanabilen bir kuvvetlendirici sistemi oluşturulmuştur. Kuvvetlendirici devresinin tasarımı bilgisayar ortamında benzetime tabi tutularak breadboard üzerinde denenmiştir. Devrenin düzgün çalışması gözlemlendikten sonra PCB baskı devresi çizilmiş ve devre kazıma makinesi ile üretimi gerçekleştirilmiştir.

Oluşturulan devre tasarımında mikrodalga kuvvetlendirici kazancının dijital olarak ayarlanabilmesi için mikrodnetleyicili bir PWM yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem bilgisayar sisteminde bulunan kontrol arayüz programı ile istenilen kazanç değışimini kuvvetlendirici sistemine USB bağlantısı üzerinden aktarmaktadır.

Son olarak da, gerçekleştirilen kazancı bilgisayar kontrollü olarak ayarlanabilir mikrodalga kuvvetlendirici devresi prototipinin Rohde-Schwarz ZVH8 vektör devre analizörü (VNA) kullanılarak S-parametreleri ölçölmüş ve analiz edilmiştir.



2. LİTERATÜR ÖZETİ

Mikrodalga güç kuvvetlendiricileri haberleşme, askeri uygulamalar, iletişim, tıbbi görüntüleme cihazlarında ve endüstri uygulamalarında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [1]. Bu nedenle, mikrodalga kuvvetlendiriciler konusunda gerek ulusal gerekse de uluslararası literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğin bir çalışmada, analog güç kuvvetlendiricilerde analog sinyal kullanılırken bir darbe dizisinde kodlanması ve çıkışta bant geçiren devre ile tekrar filtre edilmesi çalışılmıştır. Genlikteki süzgeçleme ile bu yöntem S sınıfı olarak isimlendirilmiştir. Bu yöntem aslında ses frekanslarında sıklıkla kullanılırken, mikrodalga frekanslarında son 5 yılda kullanılmaya başlanmıştır [2]. Diğer bir çalışmada ise, mikrodalga frekans sinyallerinin faz kaydırmasını kontrol etmek için yarıiletken optik kuvvetlendiricilerde doğrusal olmayan kazanç ve kırılma indisi dinamiklerden kaynaklı iletim hızları denenmiştir. Araştırmanın sonuçlarına göre ayarlanabilir mikrodalga filtreler ve optoelektronik osilatörler ile birlikte faz kaydırmalı uygulamalar yapılmıştır [3]. Diğer taraftan, medikal uygulamalarda kullanılan mikrodalga devreler için galyum nitrit (GaN) yapısında bir E sınıfı 5 W kuvvetlendirici tasarlanmış ve çıkış seviyesinde %70'in üzerinde güç verimliliği (PE) elde edilmiştir [4].

Diğer bir çalışmada ise, düşük güçlü güç yükseltecinin yüksek güçlü mikrodalga frekansındaki devre yapıları incelenmiştir. İlk olarak devre simülasyonu yapılmış ve düşük güç yükselteci tasarlanmış ve mikrodalga frekansında devre ile simülasyon yapılması için düşük gürültülü kuvvetlendirici (LNA) devresi yüksek frekans simülasyon programına aktarılmıştır. LNA'da LNA transistörünün kapı ve çıkış pinlerinin gerilimi referans alınmıştır. Gerilim bir referans sinyal kabul edilerek çıkış pinleri ile birleştirilir. İlk sinyal ile çıkış sinyallerinin kazanç ve gürültü grafiklerindeki değişimler analiz edilir. Çalışma sonucunda giriş pinlerine özel koruma uygulaması gerektiği sonucuna varılmıştır [5]. Başka bir çalışmada ise, silisyum karbür (SiC)

işleminde 0.25 μm galyum nitrür (GaN) içinde bir X-Band anahtarsız çift yönlü amplifikatör araştırması yapılmıştır. Araştırma yapılan çift yönlü amplifikatör, herhangi bir anahtar yardımına ihtiyaç duymadan faz dizili sistemlerin T/R modülleri için 1 W güç amplifikatörü (PA) ve düşük bir amplifikatörlerden (LNA) oluşur. Tasarımda performansın yüksek olması için transistörler bir kapalı kılıf içine alınarak eleman seçiminde parazit kondansatörler tercih edilmiştir. Oluşturulan çip boyutu lehim pedleri dahil 2,5 mm $\times$ 1,87 mm boyutunda olmuştur [6].

GaN teknolojisi ile düşük frekanslı I/V (Akım/Gerilim) yük hattı ile karakterizasyonuna sahip cihaz kapasitansyonlarının model tanıma dayalı bir "hibrit" yaklaşım ile mikrodalga frekansında çalışan doğrusal olmayan ölçüm düzeneklerinden aynı bilgilerin elde edilmesi sağlanabilir [7]. Mikrodalga devrelerin iletişimi ve güç iletim uygulamalarında çift çıkış gücüne sahip çok aşamalı GaN kuvvetlendiricileri kullanılmaktadır. Yüksek frekanslarda kullanılan çıkış gücünde %55,4 civarında güç eklenmiş verim (PAE), düşük frekanslarda ise %35 PAE elde edilmektedir. Alıcıda çok kademeli doğrultucu devresi tasarlanarak kompakt mikrodalga iletişim ve güç iletimi gerçekleştirilebilir [8].

Beş aşamalı lineer düşük gürültülü düzgün yürüyen dalga amplifikatörleri (L2NTWA) AlGaIn/GaN 0.025 μm monolitik mikrodalga entegre devre (MMIC) yapılarında kullanılmaktadır. Amplifikatörün en uygun elektriksel ve termal performansını elde etmek için özel entegreyi özel SMD kılıfa ve dış ölçülerinin özel yapıda olan PCB'ye monte edilmesi gerekmektedir [9]. Diğer bir araştırmada ise AlGaIn/GaN teknolojisi ile tasarlanmış olan iki kademeli geniş bant geri beslemeli güç amplifikatörü ile yüksek verimli amplifikatör oluşturulurken elektronik kompazisyonun yanı sıra frekans kalibrasyonu da yapılabildiği belirtilmiştir [10].

Farklı bir çalışmada ise, yüksek sinyal frekansında çalışan mikrodalga kuvvetlendiricilerde elektriksel gürültü ve kararlılık iki farklı yöntem ile ele alınmıştır. İlk yaklaşım, ölçülen kapalı döngü frekans yanıtlarının kutup-sıfır analizi yoluyla amplifikatör kararlılık eşik değerlerinin belirlenmesidir. İkinci yaklaşım ise doğrusal olmayan rejimde genlik modülasyonu (AM) ve faz modülasyonu (PM) kuvvetlendirici gürültüsünün ölçümlerinin belirlenmesidir ve doğrusal durumda olan temel farklılıklarının karşılaştırmasıdır [11].

Literatürde yapılan araştırmada mikrodalga kuvvetlendiricilerde üretilen üçüncü devre modülasyon arası bozulmayı (IMD) azaltmak için bağımsız bir devre

hazırlanmıştır. Devre amplifikatörün çıkışını ikiye ayırır. Birinci kolda güçlendirilmiş sinyal ve IMD tonları çıkışa doğru geçer. İkinci kolda ise pinchoff'a yakın önyargılı bir yardımcı olan alan etkili transistör (FET) cihazı ve ayarlanabilir bir faz kaydırıcı, amplifikatörün IMD sinyalleri yeniden üretirken orijinal sinyaller zıt faz ile iletilir. Her iki koldaki IMD sinyalleri birleştirildiğinde çıkış amplifikatörün giriş üçüncü sıra kesme noktası(IIP3) iyileşir. Devrede iki ayar gerilimi gerekir. Birinci FET için diğeri ise faz kaydırıcı tasarım için kullanılır. Bu oluşturulan devre olumlu sonuç vermiş olup ticari alanda da kullanımı için öneride bulunulmuştur [12].

Hibrit bir Ku-band mikrodalga entegre devre (MIC) güç yükseltici ile 50W'lık yüksek çıkış gücünde, çok küçük diyagram açıklığına (VSAT) sahip uydu baz istasyonları için yeterli bir sürücü devresi oluşturulabilir [13]. Farklı devre elemanları kullanılarak karmaşık empedansların geniş bir bant eşleştirilmesi için tasarım yapılmak istendiğinde kümelenmiş eleman eşleştirme ağları için klasik analitik ağ teorisi yaklaşımının ve sayısal optimizasyon tekniklerinin birleşmesi ile bir tasarım yapılabilmektedir. Geniş bantlı kuvvetlendiricileri sistematik bir şekilde tasarlamak için Rf transistörler dağıtılmış eşleştirme ağları yöntemi tercih edilmelidir. Yöntem ile 1-2 GHz frekanslarında çalışan bir amplifikatör devre tasarlanmıştır [14].

AESA radar sistemleri için 68 ila 200 Watt çıkış darbe gücüne ve minimum PAE %40-55'e sahip bir L-, S- ve C-bant GaN transistörler ile amplifikatör tasarlanabilmektedir [15]. Diğer bir çalışmada ise paketlenmiş GaN-HEMT cihazlarda parazitleri ayırtmak için geniş bantlı, yüksek verimli güç kuvvetlendiriciler kullanılmıştır. Bu devrenin çıkışındaki parazittik etkiyi azaltmak için basit bir iki eleman ile kompanzasyon uygulanır ve parazittik etkinin azaldığı görülmüştür [16]. Benzer bir araştırmada da uygun yük empedansını elde etmek için düşük frekanslı aktif çoklu harmonik yöntemi ile yüksek verimli mikrodalga güç amplifikatörü tasarım yöntemi yapılmıştır. Doğrusal olmayan kapasiteler ve transistörlerdeki parazittik etkiler, lineer kapasiteler ile birleştirilerek uygun yük empedansında kararlılığını geliştirmek için dikkate alınır. Önerilen yöntem ile tasarlanan ve uygulanan GaN HEMT amplifikatörü 2.13 GHz'de 30 dBm çıkış gücü ile %74'lük bir çıkış gücüne sahip maksimum güce sahip PAE elde edilmiştir. Önceki yöntemlere göre tasarlanan ve üretilen GaN HEMT amplifikatörü 2.14 GHz'de 31 dBm çıkış gücüne ve %64'lük maksimum PAE verimliliğine sahip olduğu görülmüştür [17]. Diğer bir çalışmada ise 6.5 GHz hibrit GaN Doherty güç amplifikatörleri ile bir noktadan diğer bir noktaya

plastik bir üst kılıf içinde QFN 9×9 paketinde paketlenmiştir ve ayrı GaN transistörleriyle devre tasarlanabilmektedir. Oluşan tasarımda entegre pasif GaAs ayırma, eşleştirme ve birleştirici ağırları içerir. Bu yöntem hibrit yapıda ve uygun maliyet sağlamaktadır [18].

Araştırmalara göre ultra yüksek frekans (UHF) ve mikrodalga frekans bandında E sınıfı güç amplifikatörü kullanıldığı görülmektedir. E sınıfı güç amplifikatörü düşük anahtarlama ile yüksek frekanslarda anahtarlama ölçeklendirmesi cihazın ve devre tasarımlarında parazittik etkilerin azalmasında bir takım zorluklar sunar. UHF aralığında doğru ve temel harmonik empedansları elde etmek için parazittik etkiyi azaltıcı farklı sayıda 10 GHz üzerindeki frekanslarda iletim hattı uygulamaları tercih edilmektedir [19]. Bant genişliği, verici anten tarafından yayılan Gauss darbe sinyalinin süresini oluşturmaktadır. Bant genişliği arttıkça Gauss darbe sinyali azalmakta, bant genişliği azaldıkça darbe sinyali genişlemektedir [20].

ISM-Band yüksek güçlü ve yüksek verimli GaN amplifikatörlerinde hem giriş hem de çıkış kısmına ikinci bir harmonik yansıma kullanımlarının tercih edilmesi kuvvetlendiricilerde yüksek performans verimliliği sağlamaktadır [21]. Bununla ilgili yapılan araştırmada 2-8 GHz geniş bantlı ve 14 W çıkış gücünde verici modülü için GaN transistör kuvvetlendiricileri kullanılarak tasarım yapılmıştır [22]. Yüksek verimlilik ve geniş bant genişliği tercih edilen mikrodalga uygulamalarında düşük frekanslı doğrusal olmayan elektron eleman karakterizasyonundan yararlanarak GaN FET'ler tercih edilerek tasarımlar yapılabilir [23]. Diğer bir araştırmada ise FET yapısının tercih edildiği güç ayarlı geniş bant gücü yapılandırılabilir dağıtılmış amplifikatör (DA) tasarlanabilmektedir. Devrenin çıkış güçleri FET kullanımına göre tasarlanabilmektedir. Çıkış gücü analog ayarlanabilmekte iken verimlilik düşüşü çok düşük seviyededir [24].

Düşük maliyet sunan GaAs transistörü tercih edilerek tasarlanmış olan giriş/çıkış eşleştirme yapısına sahip 27 dBm orta güçlü amplifikatör tasarımı yapılmıştır. Giriş eşleştirmesi için 1,3 GHz ile 2,6 GHz frekans bandında ayarlanabilir frekans elde edilmiştir. Oluşturulan frekans için $|Γ_{IN}| \leq 0,3$ ve güç kazancı 13 dBm'den yüksektir. Devre yapısı iki gerilim kontrolü aracılığıyla frekans ayarı ve çıkış gücü seviyesi optimizasyonu sağlar. Oluşturulan cihaz çok bantlı radyo frekanslarında tercih edilebilir [25].

Sıfır taraflı optik yansıma tipi elektro soğurucu yoğunluk modülatörü ve bir foto taraflı foto diyot ve mikrodalga yükselticileri fiber optik bağlantı sistemleri kullanılarak 40 GHz'e kadar alıcı antendeki mikrodalga sinyalleri ölçebilmektedir [26]. Monolitik mikrodalga tümleşik devre (MMIC) amplifikatör devrelerinin simülasyonlarında mikro şerit (MS) tipi transistörler kullanıldığında teknik dokümanına göre bariz farklılıklar olabilmektedir. Bu durum geleneksel elektromanyetik (EM) yerleşim simülasyonları hariç MS tipi modeldeki delik kısmı ve arka taraf yollardaki kublaj etkisinden kaynaklı olabilmektedir. MMIC amplifikatörler için bu çok önemli olan farklılık EM simülasyonunda bir delik aracılığıyla transistör kaynağı ilave edildiğinde EM simülasyon doğruluğunu önemli ölçüde geliştirdiğini kanıtlamaktadır [27]. Benzer bir çalışmada monolitik mikrodalga entegre devresi (MMIC) 0.25- μ m dayalı bir C-bant 50-W yüksek güçlü amplifikatör (HPA) devre yapısı tasarlanmıştır. Yapıda μ m galyum nitrid (GaN) yüksek elektron hareketlilik transistör (HEMT) olarak kullanılmıştır [28].

Uydu sistemlerinde S-bant mikrodalga kuvvetlendiricileri kullanıldığında çıkış performansının uzun ömürlü ve yüksek güvenilirlikli olduğu gözlemlenmiştir [29]. Basitleştirilmiş Gerçek Frekans Tekniğine (SRFT) tekniğine dayanan geniş bant mikrodalga sinyal yükseltici uygulamasında tasarım olarak elemanların toplu olarak tasarlanması giriş ve çıkış devre eşleştirmesi açısından avantaj sağlamıştır [30]. Diğer bir çalışmada ise mikrodalga transistör kuvvetlendiriciler için iki kapılı amplifikasyon devresinin evrensel modeli, devre mantığı olarak rasyonel teknik çözümlerin otomatik olarak üretilmesini sağlamakla birlikte arama motoru optimizasyonu kullanılarak mikrodalga amplifikatörlerin yapısal ve parametrik sentezi için tercih edilebilmektedir [31].

Wilkinson güç birleştirici kullanılarak osilatör çıkış gücü yüksek ve ayarlanabilen bir güç yükseltici elde edilebilir. Devreye bir izolasyon direnci eklenmediğinden devrenin genliği ve fazı istenilen değerde ayarlanabilmektedir. Amplifikatör çıkışı yüksek verimliliğe sahiptir. Tasarımda gürültüleri azaltmak için osilatör ve amplifikatör arasına ekranlama paket kullanılmaktadır [32]. 1-42 GHz arasında çalışan kazanç ve değişken dağıtılmış amplifikatör yönteminde galyum nitrid (GaN) yöntemi kullanılarak gerilim kontrollü anahtarlama sağlatılarak yaklaşık 3 dB'lik kazanç ayarı elde edilebilir. Kullanılan çip alanı oldukça küçüktür (yaklaşık 1.9×1.1 mm²). Amplifikatörün tüm bant genişliği aralığında çıkış gücü 27,5 dBm'den fazladır. Bu yöntemle gerilim kontrollü anahtar eklenerek daha geniş kazanç ayar aralığı elde

etmek mümkündür [33]. pHEMT dağıtılmış güç amplifikatör tasarımlarında ise kutupsız tanımlama yolu ile kararlılık analizi ve yüksek sinyallerde kontrol edilebilir sürekli stabil sonuç elde edilmektedir [34].

DC ~ 1.6 GHz frekans bant genişliğinde bulunan dağıtılmış parametrelili kuvvetlendiricide elde edilen performans (S-) parametreleri ölçüldüğünde benzetim değerleri ile uyumlu olduğu görülmektedir [35]. C-bant mikro şerit LNA devreleri anahtarlı düşük gürültü amplifikatörleri ile iletişim sistemlerinde giriş sinyalinin yüksek seviye ve geniş aralık sorunlarını çözebilmektedir [36]. Kablosuz haberleşme sistemlerinde alıcı kısmında düşük gürültü kuvvetlendiricileri (LNA) sistemin genel performansı için çok önemlidir. LNA'lar sistem girişindeki sinyalleri alarak olabildiğince düşük gürültü ile yükseltirler. BFP720 SiGe transistörlü LNA tasarımı ile 5.6 GHz WLAN uygulamalarına uyumlu, FR4 baskı devre kartına tasarlanmış bir tasarım yapılmıştır. Devrenin ölçüm sonuçlarına göre transistör beslemesi 2.8 volt ve 10 miliamper ile beslenmiş, 5.6 GHz frekans bandında 13 dB kazanç, $S_{11} < -10$ dB çıkış vermiştir [37].

Sumitomo Electric firmasının SGNE010MK GaN HEMT'i kullanılarak 2.4 GHz frekans bandında 5 W çıkış gücüne sahip AB sınıfı bir güç kuvvetlendirici oluşturulduğunda AB sınıfı benzer kuvvetlendiricilere kıyasla daha yüksek frekansta daha yüksek verime sahip olduğu görülmüştür [38].

Mikro şerit yama anten kullanılarak mikro şerit görüntüleyici elde etmek mümkündür. Silindirik yapılara ait anten modelleri belli açılarda mikro şeritlerden oluşmaktadır. Mikrodalga görüntüleyici devrelerin içindeki şerit yama antenleri hem alıcı olarak hem de verici olarak çalışır. Kendi aralarındaki haberleşmeleri (S_{21} , S_{31} , S_{41} , S_{21} vb.) gerekli algoritmalar yardımı ile üç boyutlu yapıda modellenebilmektedir. Oluşturulan antenler tıbbi görüntüleme ve inşaat sektöründe sıklıkla tercih edilmektedir. Antenlerin düşük maliyetli olması avantaj sağlamaktadır [39].

Yoğun uzay elemanları dizilerinin aşırı büyük güç sinyallerini yaymak için güçlü elektro manyetik elemanlı dizi antenler kullanılmaktadır [40]. Optik haberleşme sistemlerinde yüksek hızda veri iletişimi sağlamak amacıyla veriler mikrodalga yöntemleriyle verinin elektrik sinyale çevrilme yöntemi kullanılmaktadır [41]. Tıbbi mikrodalga uygulamalarında ise verici anten bloğu ile sinyal hedefteki devre yapısına yollar ve yayılan sinyal alıcı anten bloğu ile alınarak işlenir. Tercih edilecek anten seçimi ölçüm sonuçlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Kullanılan devre yapıları hafif,

küçük boyutlu, mevcut sistemlere kolay uyum sağlayabilme, küçük profilli yüzeysel görünüme ve optimum üretim maliyetine sahip olan mikro şerit yama antenlerin kullanımı tıbbi mikrodalga uygulamalarında yaygın olarak tercih edildiği görülmektedir [42].

Hızlı birçok boş yönlendirme tekniği ve doğrusal olarak polarize edilmiş bir doğrusal dizi anten sistemlerinde güç aktarım verimliliği ile desen sınıfları kontrol edilebilmektedir [43]. 5G mm Wave uygulamalarında ultra ince anten seçimi yapılması gerekmektedir. Fakat ince anten tasarımı için anten giriş empedansını eşleştirmek çok zordur [44]. Literatürde 5G uygulamalarında $0,16 \lambda_0 \times 0,34 \lambda_0$ eleman boyutuna sahip anten dizileri önerilmektedir. 1-8 tabaka arasına entegre edilmiş koaksiyel hat (SICL) yapısından oluşan bir anten dizisi ile oluşturulan devrede geniş bantlı, küçük boyutlu ve iyi ışın tarama performansı elde etmek mümkündür [45].

Galyum Nitrit Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör (High Electron Mobility Transistor, GaN tHEMT) kullanılarak doğrusal olmayan transistör modeli ile X bandında çalışan F sınıfı yüksek güç kuvvetlendirici tasarlanmıştır. Tasarlanan devre yapısının daha geniş frekans bandında çalışması için kapasitif devre elemanları radyal yapıli mikro şerit devre yolları ile oluşturulmuştur. Yapılan çalışma ile GaN HEMT kullanılarak yüksek çıkış gücünde verimli bir kuvvetlendirici tasarımı olduğu gözlemlenmiştir [46].

Mikrodalga devre uygulamalarında dielektrik tabanların iletkenlik özellikleri çok önemlidir. Araştırmalara göre en az güç kaybı RT/Duroid 5880 devre kartında, en çok güç kaybı ise FR4 devre kartında olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda frekans bandı yükseldikçe tüm dielektrik alanlarda güç kayıpları artmaktadır [47].

3. MATERYAL VE METOT

3.1.Kullanılan Devre Elemanları

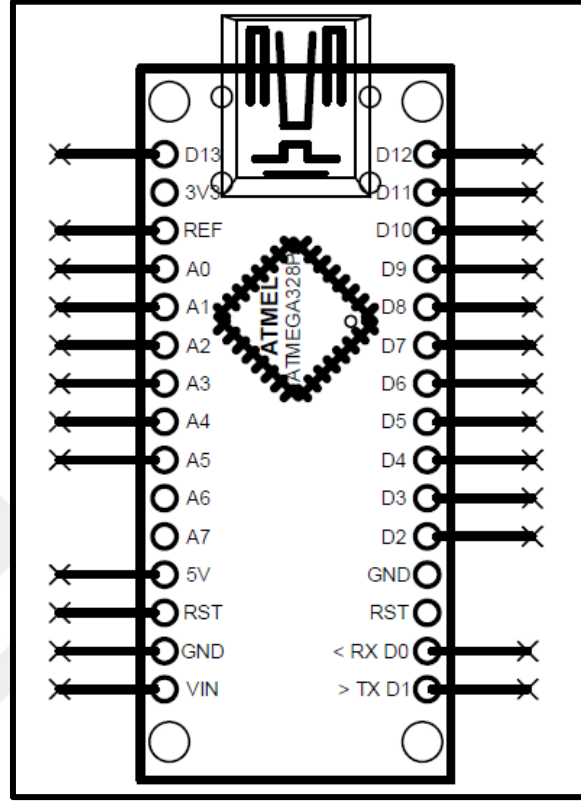
3.1.1. Arduino Nano

Arduino Nano, Atmega328 mikroişlemcisine sahip küçük yapıda, breadboard uygulamaları içinde kullanım kolaylığı sağlayan bir Arduino kartıdır. Birden fazla DC güç girişinin uygulanmasına imkân sağlamaktadır. USB bağlantısı Mini-B USB olarak sağlanmaktadır. Devre kartının teknik özellikleri;

Tablo 1. Arduino Nano Devre Kartının Teknik Özellikleri

Mikro Denetleyici	Atmega328
Çalışma Gerilimi	DC +5 Volt
Tavsiye Edilen Çalışma Gerilimi	DC 7-12 Volt
Besleme Gerilim Aralığı	DC 6-20 Volt
Dijital Giriş-Çıkış Pinleri	14 Adet (6 Adet PWM desteği mevcut)
Analog Giriş Pinleri	8 Adet
Giriş ve Çıkış Pin Akımları	40 mA
Flash Hafıza	32 KB
Saat Frekansı	16 MHz
EEPROM	1 KB
Kart Boyutları	18x45 mm
Ağırlığı	7 gr

Arduino Nano kartı 14 adet dijital giriş ve 8 adet analog giriş uygulanmasına imkân sağlamaktadır. Dijital girişlerden 6 tanesinde PWM desteği mevcuttur. Aşağıda Arduino Nano devre kartının pin diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Arduino Nano pin diyagramı

Devre kartının mikro işlemcili olarak hazır şekilde tasarlanması ve boyutlarının küçük olması nedeniyle kullanım açısından avantaj sağlamaktadır.

3.2.LM358 İşlemsel Kuvvetlendirici

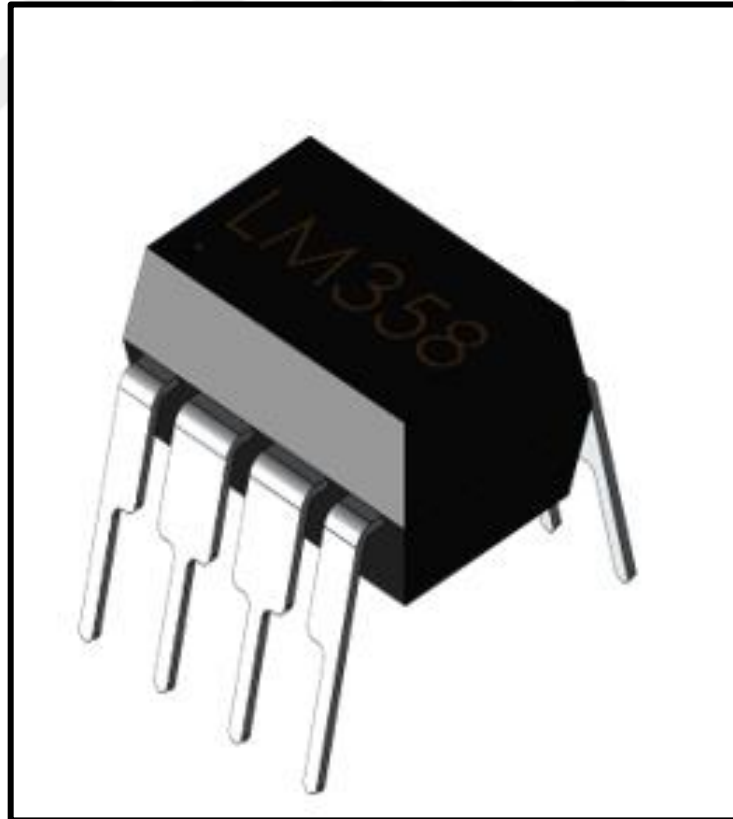
LM358 tek beslemeli ve çift kuvvetlendirici olarak kullanılan bir işlemsel kuvvetlendirici entegresidir. LM358 entegresi düşük güç tüketimi sağlayan, yüksek kazançlı bir devre yapısındadır.

LM358 geniş bir gerilim aralığında tek bir besleme kaynağından çalışabilmek üzere özel olarak tasarlanmıştır. DC kazanç bloğu, aktif filtre ve geleneksel işlemsel kuvvetlendirici devre tasarımlarında sıklıkla tercih edilmektedir. LM358 IC, kanal başına 20 mA'ya kadar 3V-32 DC kaynağı ayarlayabilmektedir.

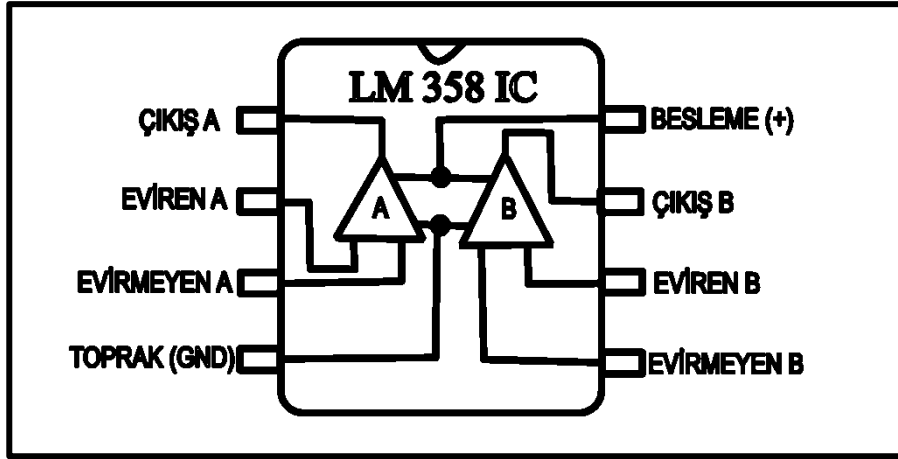
LM358 entegresinin diğerk teknik özellikleri;

- Tek bir paket kılıfında iki kuvvetlendirici entegresi bulundurmaktadır.
- Geniş güç kaynağı aralığına sahiptir.
- Tek kaynak besleme gerilimi 3-32 Volt aralığındadır.
- Çift kaynak besleme gerilimi 1.5-16 Volt aralığındadır.
- 1 MHz’de yüksek bant genişliği sağlamaktadır.
- Düşük besleme akımına (700 uA) sahiptir.
- Çıkışta kısa devre koruması mevcuttur.
- Çalışma ortamı sıcaklığı 0-70 °C arasındadır.
- Lehimleme pimi sıcaklığı 260 °C’dır.
- TO-99, SOIC, CDIP, PDIP, DSBGA, DSBGA paket yapılarında üretilebilmektedir.

LM358 entegresinin gerçek görüntüsü ve pin yapısı aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 3.2 LM358 entegresinin görünümü



Şekil 3.3 LM358 pin yapısı

LM358 farklı işlevselerde 8 adet pinden oluşmaktadır. Pin 1 ve pin 8 karşılaştırıcının çıkışıdır. Pin 2 ve pin 6 girişi tersine çevirmektedir. Pin 3 ve pin 5 ters çevirmeyen girişlerdir. Pin 4 toprak (GND) terminalidir. Pin 8 artı beslemedir (VCC+).

LM358 entegresinin bağlantı şeklini açıklayacak olursak pin 8 ana güç kaynağı girişidir. LM358 entegresini karşılaştırıcı olarak kullanmak istediğimizde 3V'tan 32V'a kadar giriş gerilimi uygulamak mümkündür. LM358 entegresini kuvvetlendirici olarak kullanmak istediğimizde ise besleme geriliminin $\pm 1.5V$ ile $\pm 16V$ arasında uygulanması gerekmektedir. LM358'de birinci (A) kuvvetlendiriciyi kullanmak istediğimizde girişlerin pin 2 ve pin 3, çıkış ise pin 1 olarak seçilmelidir. İkinci (B) kuvvetlendirici kullanılmak istendiğinde ise girişlerin pin 5 ve pin 6, çıkış ise pin 7 olarak seçilmelidir.

LM358'in diğer işlemsel kuvvetlendirici göre başlıca kullanım avantajları karşılaştırılacak olunur ise;

- İşlemsel kuvvetlendirici için ayrı bir beslemeye gerek olmaması,
- Kılıf içinde bulunan iki farklı işlemsel kuvvetlendiricinin aynı anda veya tek olarak kullanılması,
- Pil ile kullanımına uygun olması,
- Düşük güç tüketimi sağlaması,
- Genel sinyal konuşlandırma özelliği nedeniyle karşılaştırıcı olarak kullanılabildiğinden iki sinyali karşılaştırıyor olması,
- Sinyallerdeki gürültüyü kaldırdığı için aktif filtre olarak kullanılması,
- RF sinyallerde düşük parazite sahip olması nedeniyle DC kazanç bloğu olarak kullanılması,

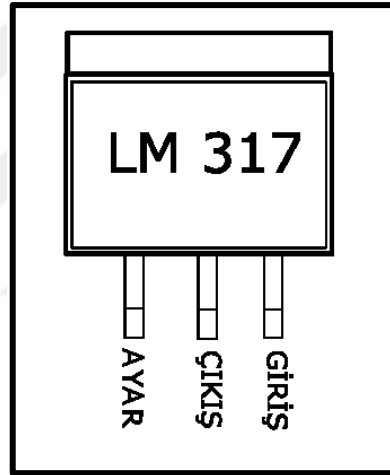
nedeniyle devre tasarımlarında sıklıkla tercih edilmektedir.

3.2.1. LM317 Gerilim Regülatörü

LM317 ayarlanabilir gerilim regülatör entegresidir. Ayarlanabilir ve kolay devre tasarımı sağladığı için elektronik devrelerde sıklıkla tercih edilmektedir.

LM317 entegresi 3 terminalli pozitif ayarlanabilir gerilim regülatörüdür. Çıkış gerilimi 1.25 V ile 37 V arasında ayarlanabilmektedir. Çıkış akımı 1.5 A'dır. En yüksek giriş-çıkış arası gerilimi farkı 40 V'dur. Önerilen besleme gerilimi 15 V'dur. Giriş gerilimi 15 V olduğunda çıkış akımı 2.2 A'dır. To-220, TO263, SOT223 paket yapılarında üretilebilmektedir.

LM317 gerilim regülatörü entegresinin pin bağlantısı aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 3.4 LM317 pin bağlantısı

Bağlantı uçlarına bakıldığında pin 1 çıkış gerilimini ayarlar, pin 2 ayar pimi tarafından regüle edilmiş çıkış gerilimi sağlar, pin 3 besleme gerilim pimidir.

LM317 gerilim regülatörü pozitif gerilimini ayarlama devrelerinde, değişken güç kaynağı uygulamalarında, akım sınırlayıcı devrelerde, ters polarite devrelerinde, motor kontrol devrelerinde ve birçok elektronik cihazda sıklıkla kullanılmaktadır.

3.2.2. SPF5189Z Mikrodalga Tümlşik Devre (MMIC)

Gelişmekte olan elektronik teknolojilerinin hedefi devre boyutlarının küçük olması, ağırlıklarının oldukça hafif olması, güç tüketiminin az olması, düşük maliyet sağlaması ve daha karmaşık kapsamlı yapılardan oluşmasıdır. Mikrodalga teknolojisi

mikrodalga tümleşik devrelerin (MIC'ler) gelişmesiyle birlikte son 30 yılda oldukça çok gelişme sağlamıştır. Bu teknoloji hantal, büyük ve pahalı olan dalga kılavuzu ve eş eksenli bileşenleri küçük ve ucuz olan düzlemsel bileşenlerle değiştirmeye çalışmakta ve bilgisayar sistemlerinin hızla karmaşıklaşmasına yol açan sayısal tümleşik devrelere benzemektedir. Mikrodalga tümleşik devreler iletim hatlarını, ayırık dirençleri, kapasitörleri, indüktörleri ve bunların yanı sıra diyot ve transistör gibi yarı iletkenleri birleştirerek bir bütün devre yapısı haline getirmektedir. MIC teknolojisi, alıcı ön bölümleri ve radar alıcı/verici modülleri gibi karmaşık mikrodalga devre sistemlerini çok küçük bir devre yapısı içerisinde birleştiren bir devre bloğu olarak gelişen bir teknoloji olmuştur. Mikrodalga tümleşik devreler karma ve monolitik mikrodalga tümleşik devreler olarak iki çeşide ayrılır.

Karma mikrodalga tümleşik devreler ilk defa 1960'lı yıllarda geliştirilmiş olan bir devre yapısına sahiptir. Monolitik mikrodalga tümleşik devreler (MMIC) ise daha yeni bir teknolojiye sahiptir.

MMIC'ler, aktif, pasif ve ara bağlantı bileşenlerini içeren ve yüzlerce MHz ile yüzlerce GHz arasındaki frekanslarda çalışmak üzere tasarlanmış entegrelerdir. Günümüzün MMIC'lerinin çoğu, GaAs, InP ve GaN gibi 3-5 bileşik yapı üzerinde üretilirler. Ayrıca özellikle karmaşık ve karışık sinyal sistemlerinin aynı çip üzerinde entegre edilmesi gereken devre yapılarında MMIC'ler silikon ve SiGe yapılarından oluşmaktadır.

1970'lerin ortalarından itibaren, güvenilir yüksek frekans devrelerine yönelik askeri ve ticari talepteki artış, esas olarak MMIC yapılarını geliştirmeyi amaçlayan GaAs üretimleri için büyük bir yatırım yapılmasına neden olmuştur. Son zamanlarda, MMIC'ler çok aşamalı dizilerden ve saniyede çok Gbit optik iletişim bileşenlerinden cep telefonlarına ve ev uydusu alıcılarına kadar uzanan uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzün MMIC'lerinin üst frekans performansı THz frekans aralığına yaklaşmaktadır.

MMIC'lerde kullanılan anahtar aktif cihaz türleri MESFET'ler, HEMT'ler ve HBT'lerdir. Opto-elektronik entegre devreler (OEIC'ler), adından da anlaşılacağı gibi, opto-elektronik cihazlara entegre edilmiş MMIC'lerdir ve yüksek hızlı optik iletişim sistemlerinde giderek daha fazla kullanılmaktadır.

MMIC'ler, günümüzün yüksek frekanslı uygulamalarının çoğu için tercih edilen bileşenlerdir. Ayırık veya hibrit muadillerine göre küçük boyutta, düşük maliyetli, yüksek tekrarlanabilirlik ve tekrarlanabilir performans gibi çeşitli avantajları vardır.

Bu tez çalışmasında tasarlanacak olan mikrodalga kuvvetlendiricide SPF5189Z MMIC entegresi tercih edilmiştir.

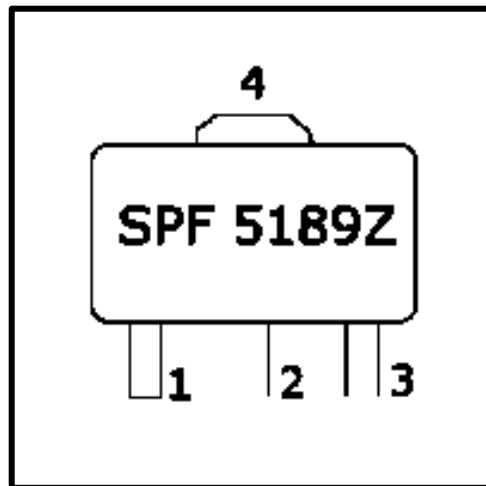
SPF5189Z entegresi 50 Hz ve 4000 MHz aralığında çalışan GaAs yapısında qHEMT yapıda düşük gürültülü MMIC kuvvetlendiricidir. Çip yapısına bağlı olarak ultra düşük gürültülü ve doğrusal çıkış sağlamaktadır.

SPF5189Z entegresinin teknik özellikleri;

- 50 Hz ile 4000 MHz frekans aralığına sahiptir.
- 900 MHz frekansında 0.68 dB seviyelerinde ultra düşük gürültü oluşmaktadır.
- 900 MHz frekansında 18.7 dB kazanca sahiptir.
- Sabit olarak 5 Volt besleme geriliminde 90 mA akım çekmektedir.
- 3 Volt ile 5 Volt arasında değişken giriş gerilimleri uygulanabilir.
- Piyasada uygulama devrelerine ulaşmak mümkündür.
- Geniş bant dahili eşleştirme özelliğine sahiptir.

SPF5189Z entegresi hücresel, PCS, SIM, A-CDMA, WİMAX alıcılarında, PA sürücü kuvvetlendiricilerinde, düşük gürültü, yüksek doğrusal kazanımlı blok devre uygulamalarında kullanılmaktadır.

SPF5189Z entegresinin pin bağlantısı aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 3.5 SPF5189Z entegresinin pin bağlantısı

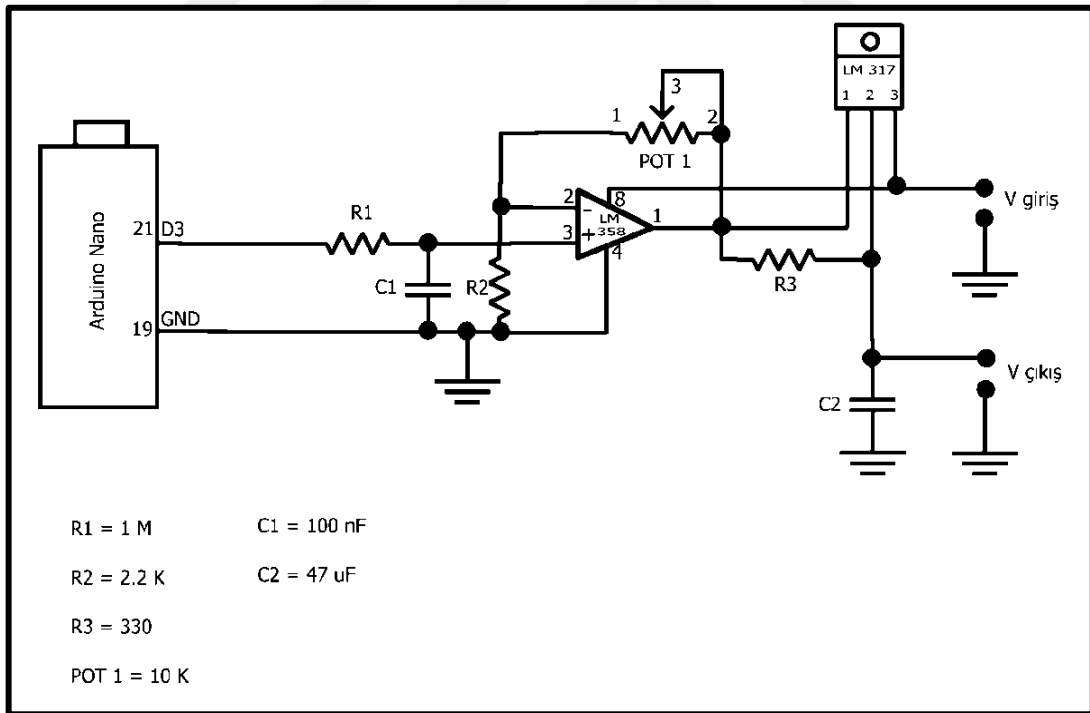
Tablo 2. SPF5189Z Pin Adları ve Açıklamaları

PİN	GÖREV	AÇIKLAMA
1	RF GİRİŞ	RF giriş pimi. Bu pim girişinde, frekans için seçilen harici bir DC bloke edici kapasitörün kullanılmasını gerekmektedir.
2	TOPRAK (GND)	Toprak bağlantısı. Devre kartında alanı azaltmak için cihaz topraklama uçlarına mümkün olduğunca yakın delikler aracılığıyla kullanılır.
3	RF ÇIKIŞ / DC BIAS	RF çıkışı ve önyargı pimi. Bu pim için seçilen harici bir DC bloke edici kapasitörün kullanılması gerekmektedir.
4	TOPRAK (GND)	Toprak bağlantısı. Zemini azaltmak için cihaz topraklama uçlarına mümkün olduğunca yakın delikler aracılığıyla kullanılır.

3.3. Tasarlanan ve Prototip Olarak Üretilen Güç Kaynağı Devresi

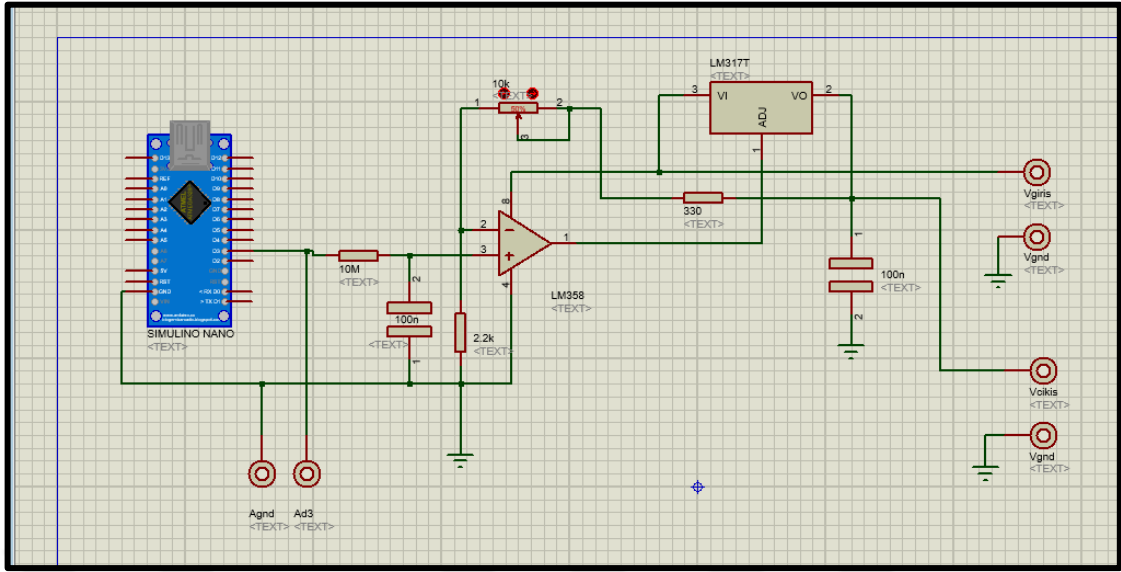
3.3.1. Devre Şeması

Mikrodalga kuvvetlendirici devresi devre şeması oluşturularak Inkscape programında taslak olarak çizilmiştir.



Şekil 3.6 Tasarlanan devre şemasının çizilmesi

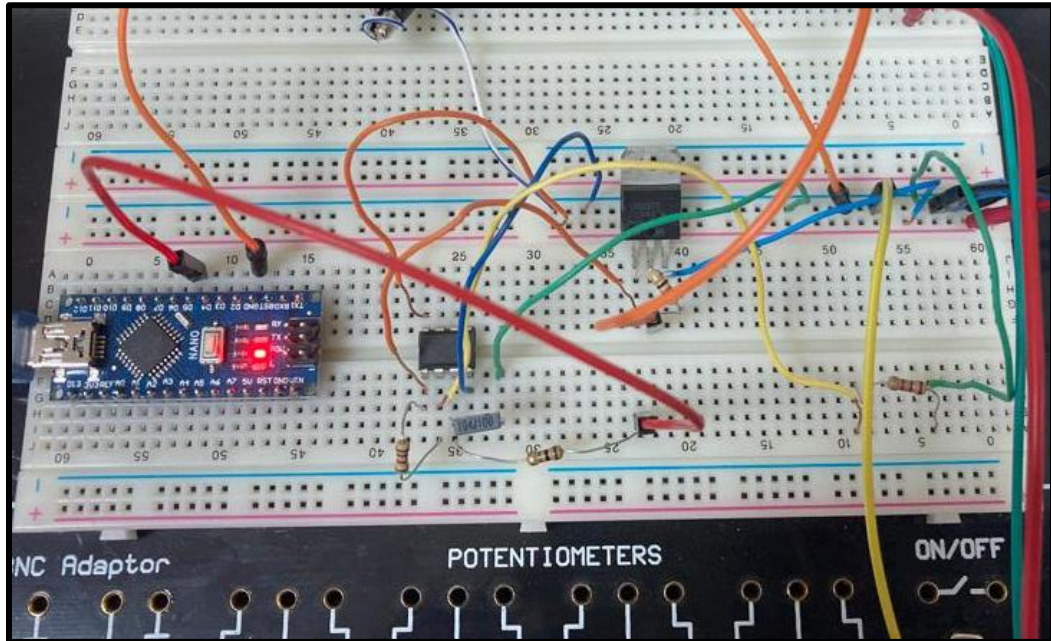
Tasarımı yapılan mikrodalga kuvvetlendirici devresi daha sonra bilgisayar programında benzetime tabi tutulmak üzere çizilmiştir.



Şekil 3.7 İsis programında çizilmiş devre şeması

3.3.2. Sistemin Breadboard'da Test Edilmesi

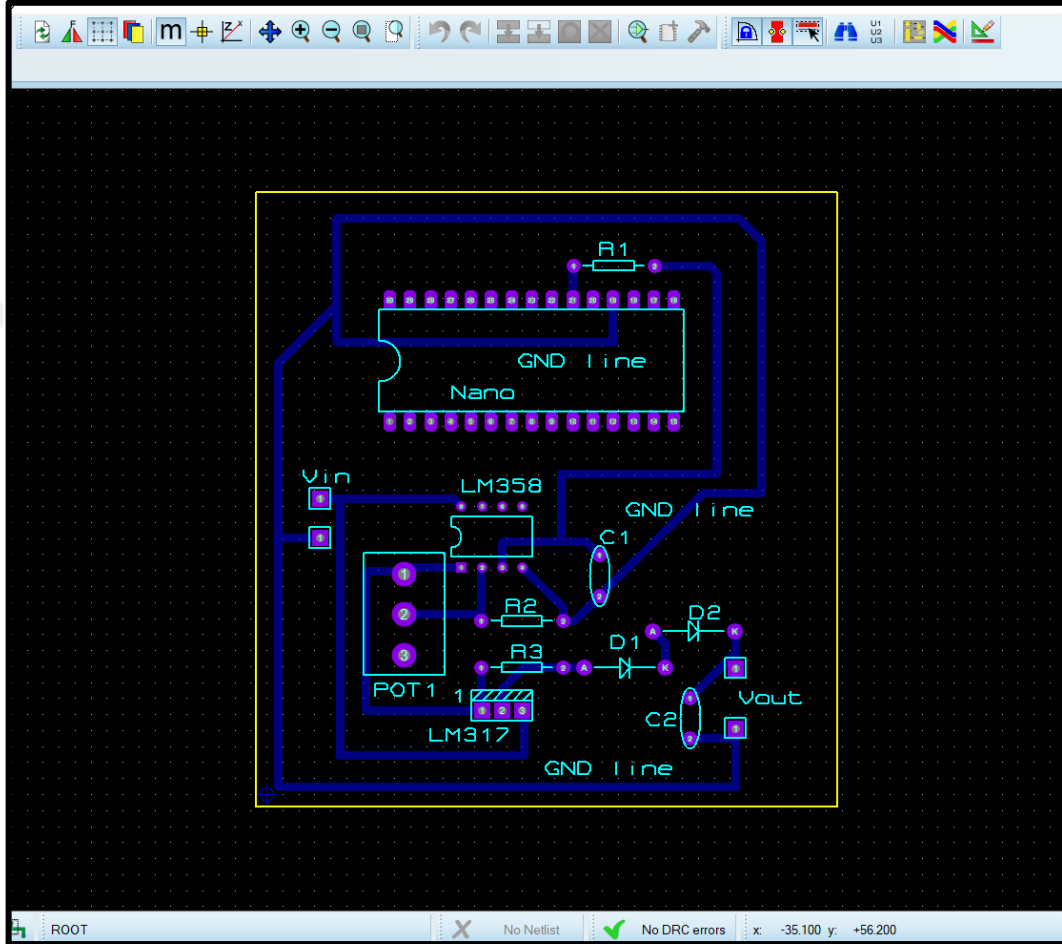
Bilgisayar ortamında tasarlanarak İsis programında simülasyonu yapılmış olan devre bloğu Breadboard'da test edilmek üzere kurulmuştur. Kurulmuş olan devre yapısı istenilen sonuçları verdiği için PCB üretim aşamasına geçilmiştir.



Şekil 3.8 Ares programında çizilmiş PCB baskı devre görünümü

3.3.3. Devrenin PCB Çizimi

Bilgisayar ortamında simülasyon edilmiş ve devre yapısı Breadboard'da istenen verileri sağladığı, prototip üretim aşamasında devrenin baskı devresini PCB'ye aktarmak üzere çizimi gerçekleştirilmiştir. PCB baskı devre çizimi için ARES programı kullanılmıştır.



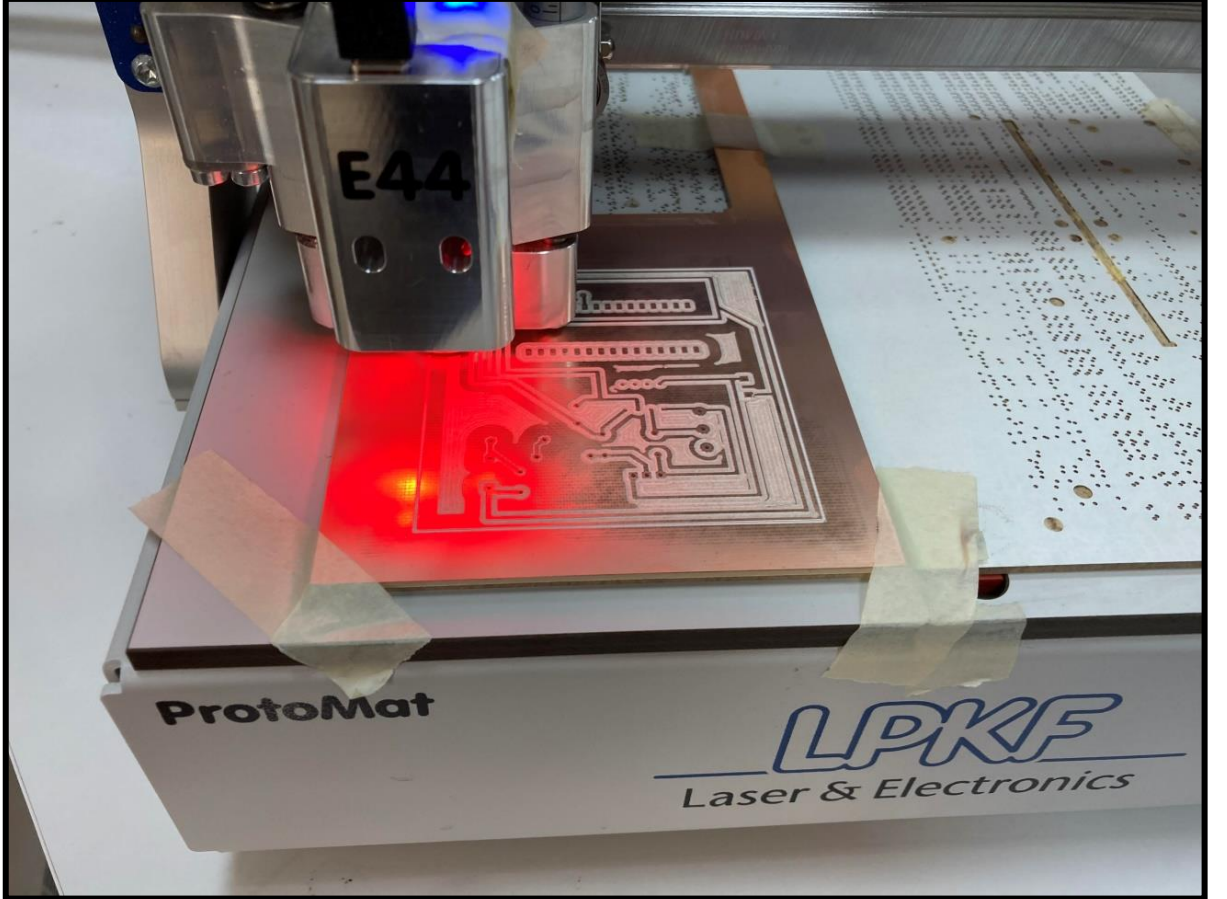
Şekil 3.9 Ares programında çizilmiş PCB baskı devre görünümü

3.3.4. Devrenin LPKF Devre Kazıma Makinesi ile Üretimi

LPKF devre kazıma makinesi cihazı tasarımı hazırlanan baskı devre çizimlerini PCB ye aktarmaya yarayan bir cihazdır. RF ve mikrodalga devrelerin, tek taraflı ve çift taraflı PCB'lerin devre kartı olarak üretilmesi için kullanılmaktadır. Cihaz yapısında bulunan mekanik ve lazer sistemler, tek ve çift taraflı devre kartları üzerindeki bakır katmanları seçici olarak kaldırır, böylece gerekli iletken izleri ve tamponları tam olarak belirleyen yalıtım kanalları oluşturur. Devre kartı çizicileri ayrıca kartlarda gerekli tüm

delikleri deler. LPKF cihazı devrelerin profesyonel ve kolayca oluşturulması açısından çok büyük avantaj sağlamaktadır.

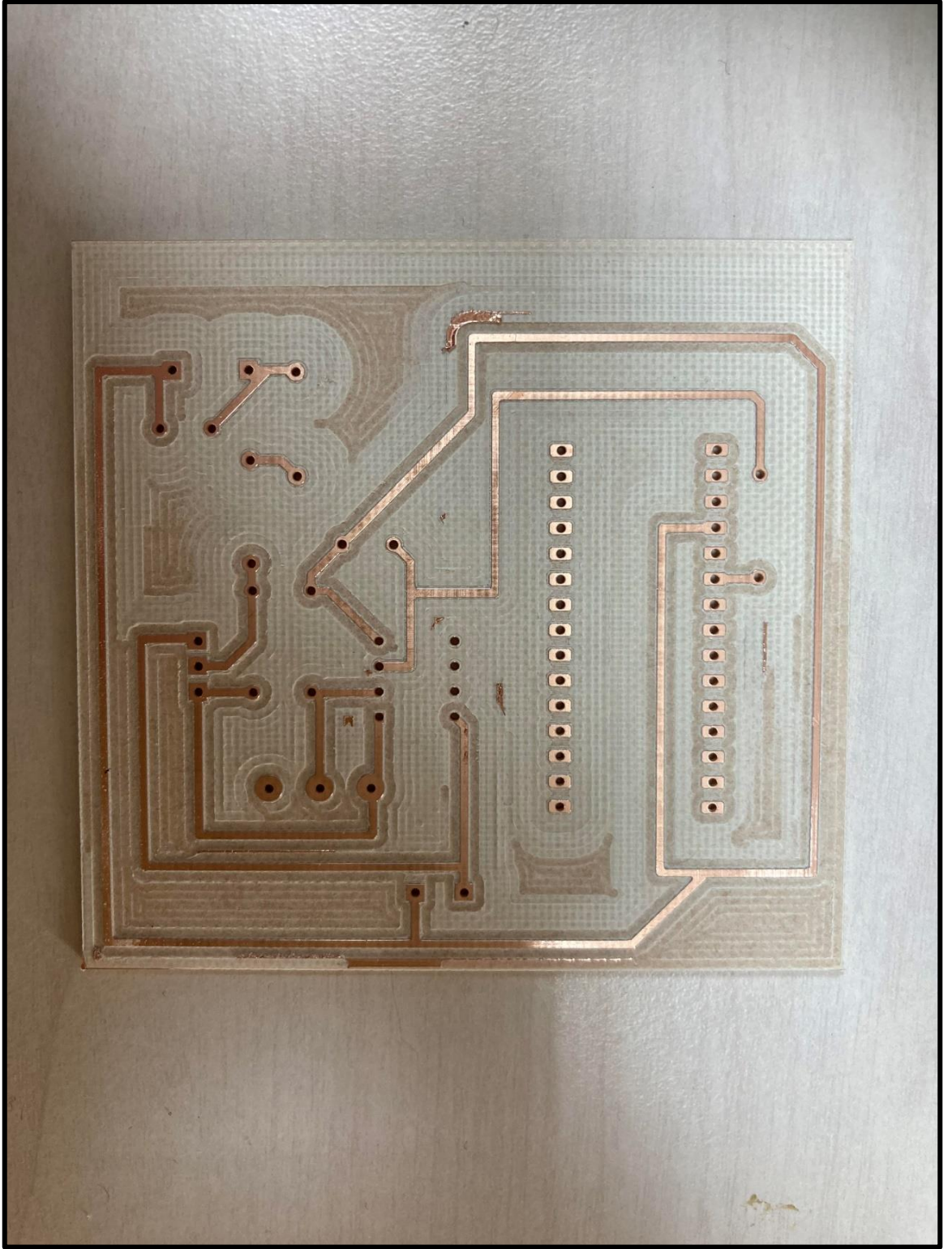
Ares programında baskı devresini çizmiş olduğumuz tasarımı PCB'ye aktarmak için LPKF cihazı kullanılmıştır. LPKF ile üretimi sırasındaki devre kartının resmi aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.10 LPKF ile üretimi sırasındaki devre kartının resmi

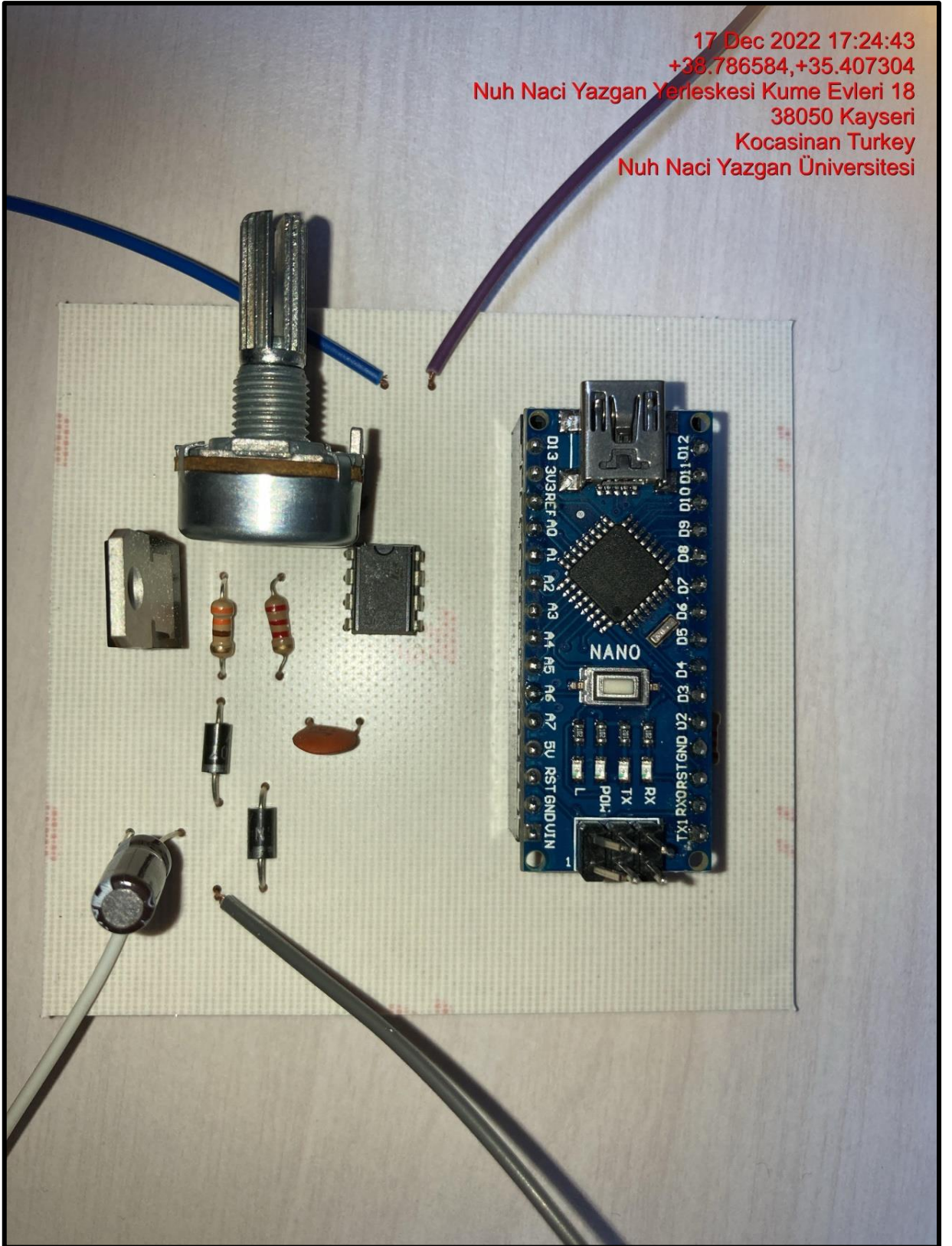
3.3.5. Devrenin Son Hali

LPKF cihazı ile üretilmiş olan PCB devre kartı elektronik devre elemanlarının monte edilmesi için hazır hale getirilmiştir. PCB devre kartı aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 3.11 PCB devre kartı

PCB devre kartı hazırlandıktan sonra elektronik devre elemanlarının lehimleme işlemleri yapılarak prototip devre kartının üretimi tamamlanmıştır. Prototip devre kartı aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.12 Prototip devre kartı

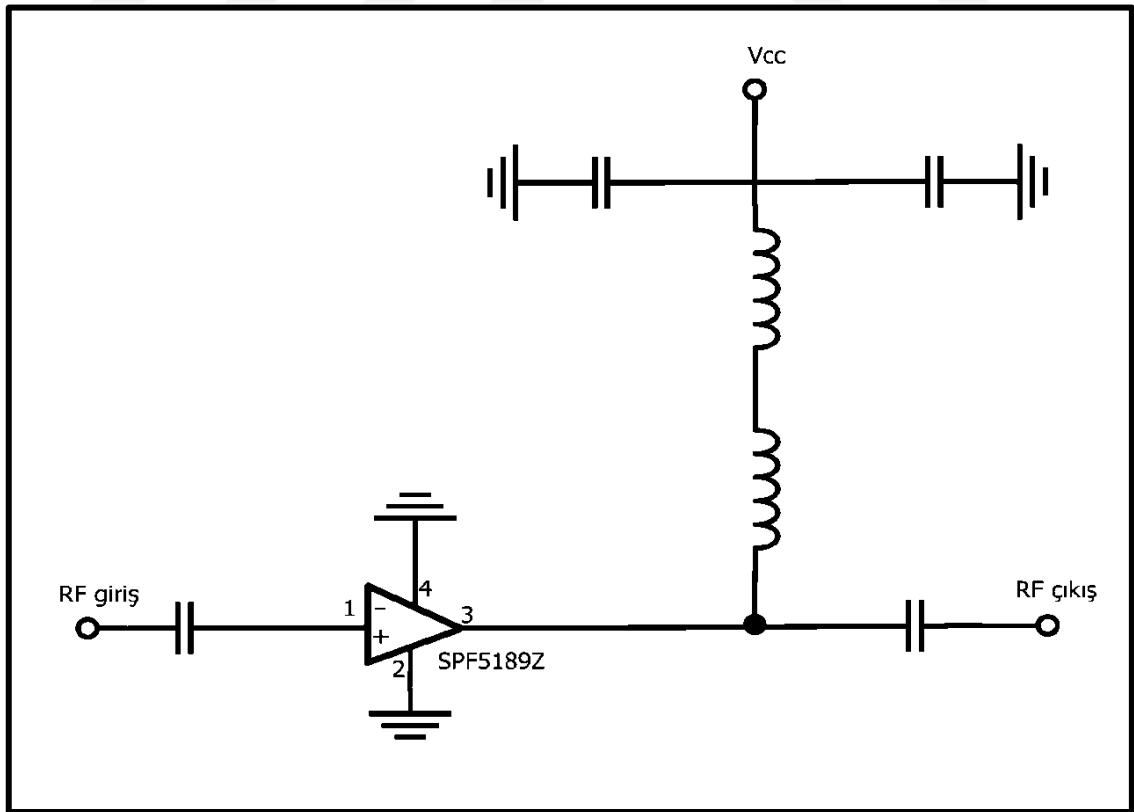
3.4.Bilgisayar Kontrollü Mikrodalga Kuvvetlendirici Sistemi

3.4.1. SPF5189Z 50-4000 MHz RF Kuvvetlendirici Devresinin Modları ve Farklı Uygulama Örnekleri

SPF5189Z çipi 50 MHz ile 4000 MHz frekans aralığında çalışmaktadır. SPF5189Z devre yapısı yüksek performanslı bir psödomorfik yüksek elektron hareketli transistörlerden (pHEMT) oluşan mikrodalga elektronik devre (MMIC) yapısına sahip düşük gürültülü kuvvetlendiricidir (LNA).

Devre yapısı oldukça küçük SMD bir devre yapısına sahiptir. Wi-Fi, FM ve TV sinyallerinin güçlendirilmesinde kullanılabilmektedir. Devre tasarımında en iyi çıkış gücünü elde etmek için mümkün olduğu kadar antene yakın montaj edilmesi gerekmektedir.

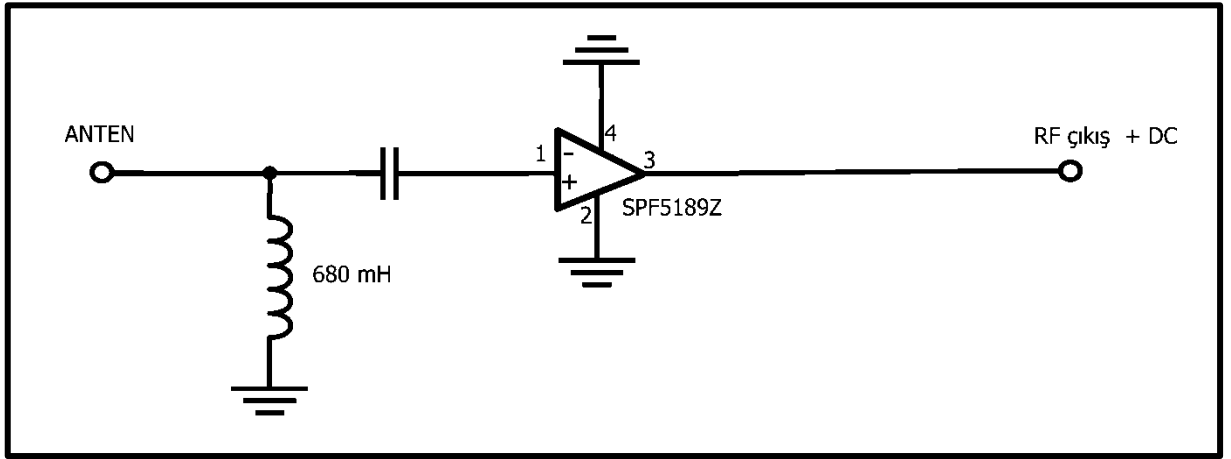
SPF5189Z devresinin giriş ve çıkışlarında koaksiyel kabloların bağlantısının yapılabilmesi için F konektör bulunmaktadır. Giriş ve çıkışlarda parazittik etkiyi azaltmak için blokaj kondansatörleri kullanılmaktadır. Aşağıdaki şekilde SPF5189Z devre şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.13 SPF5189Z Devre şeması

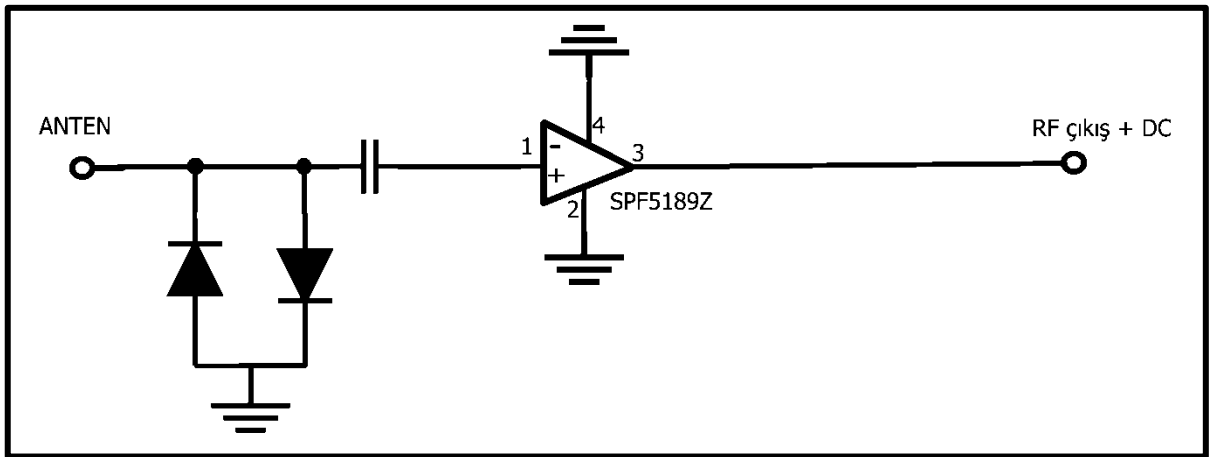
SPF5189Z devresinde V_{cc} gerilimi uygulamadan sadece frekans devresi uygulanmak istendiğinde bobin veya diyot devrelerinden oluşan devre yapıları tercih edilebilir.

50 mHz'den büyük sinyaller için bir ucu toprağa bağlanmış olan 680 mH'lik bobin yardımı ile bir tasarım yapılabilir. Bobin yardımı ile girişte alçak geçiren filtre oluşturabilmek mümkündür. Alçak geçiren filtre korumalı SPF5189Z LNA aşağıda gösterilmiştir.



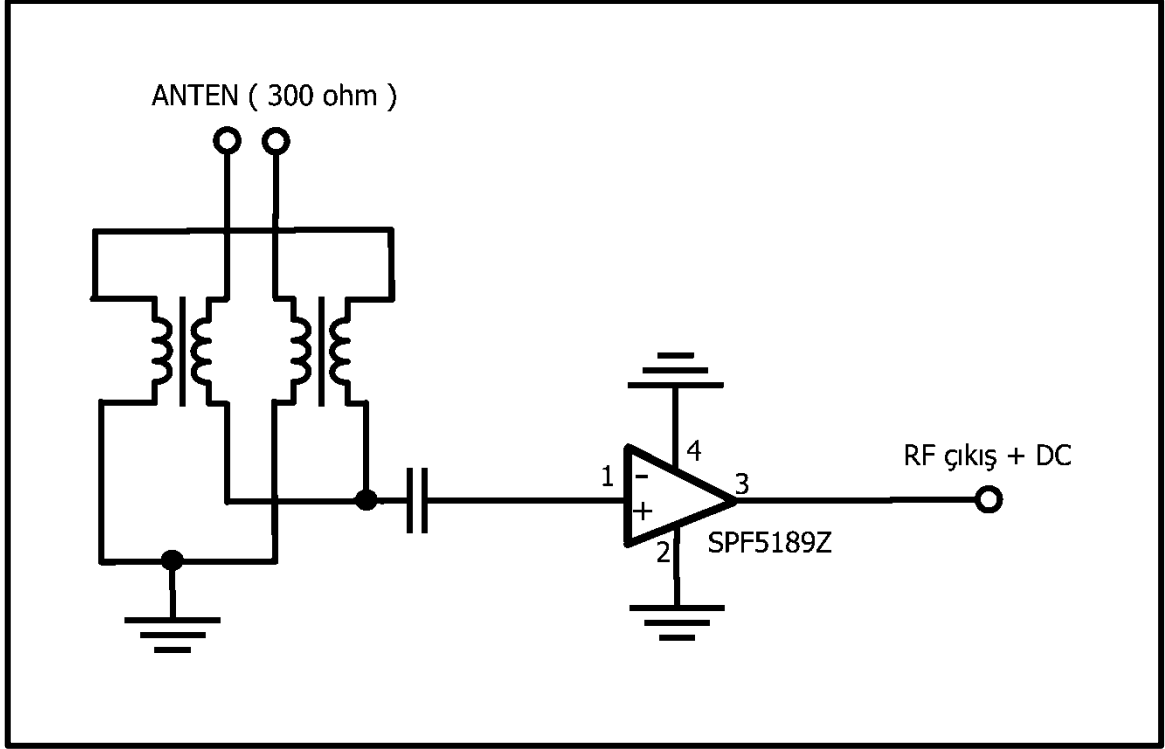
Şekil 3.14 Alçak geçiren filtre korumalı SPF5189Z LNA

Devre tasarımlarında ayrıca özel geçici gerilim bastırma (TVS) diyotlarını tercih etme imkânı da mevcuttur. LNA'nın performansı üzerinde minimum etkiye sahip olmak için bu tür diyotların kapasitansı düşük olmalıdır. Korumayı sağlamak için hızlı yanıt süresi gerekmektedir. Diyot giriş korumalı SPF5189Z LNA aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.15 Diyot giriş korumalı SPF5189Z LNA

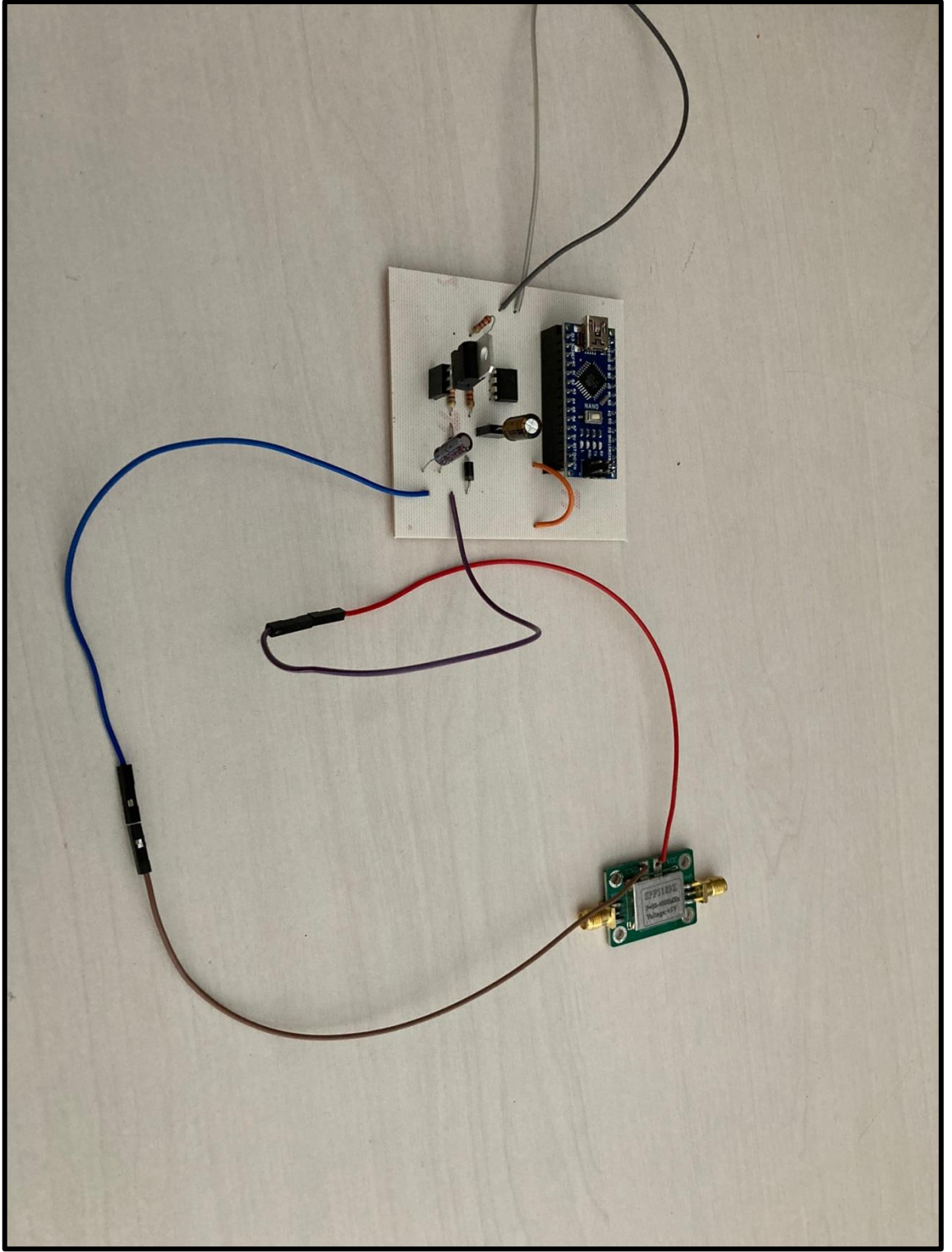
Başka bir kullanım örneği, 300 ohm'luk dengeli bir antenle TV alıcısı için olabilir. Giriş diyotlarını uyumlama trafosu (balun) ile değiştirmek mümkündür. Aşağıda şekilde belirtildiği üzere her iki anten bağlantısı da RF trafosu aracılığıyla toprağa bağlanmıştır. 300 ohm dengeli girişli SPF5189 LNA aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.16 300 ohm dengeli girişli SPF5189Z LNA

3.4.2. Mikrodalga Kuvvetlendirici Sistemin Son Hali

Baskı devre kartı üzerine yapılmış olan Arduino Nano ile kazanç ayarlama devresi ve SPF5189Z MMIC devresinin çalışma prototipi aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.17 Arduino Nano ile kazanç ayarlama devresi ve SPF5189Z MMIC devresinin çalışma prototipi

3.4.3. Arduino Yazılımı

Arduino ile darbe genişlik modülasyonu (PWM) farklı şekillerde oluşturulabilmektedir. Darbe genişlik modülasyonu dijital sinyaller ile analog sinyaller elde edilmesine imkân sağlar. Dijital kontrol, açık ve kapalı arasında değişen sinyallerin modeli ile bir kare dalga sinyal elde etmek için kullanılır. Bu açma-kapama modeli ile analog bir gerilim elde edilir. Değişken analog değerler elde etmek için darbe genişliği değiştirilir veya modüle edilebilir. PWM'in kullanım alanları, bir ledi açma-kapama uygulamaları, dijital çıkış filtreleme uygulamalarında yüzdelik olarak analog gerilim ayarlamak istendiğinde, ses sinyallerinin oluşturulmasında, motorlar için hız kontrolü sağlanmasında, kızılötesi uzaktan kumandalarda bulunan led'lerin kontrol edilmesinde kullanılmaktadır.

Arduinonun programlama dili PWM kullanımını oldukça kolaylaştırmaktadır. Programlama yapılırken “analogWrite()” komutu kullanılmıştır. Mikrodenetleyicide PWM çıkış pinleri olarak 3, 5, 6, 9, 10 veya 11 olmak üzere 6 ayrı pin kullanılabilir.

Arduino Nano ile 0-255 arasında PWM sinyal oluşturmak mümkündür. Oluşturulan devre kartında PWM sinyal Arduino Nano'nun 3 nolu dijital çıkışından sağlanmaktadır. PWM değerleri 0-255 arasında değiştirildiğinde oluşan sinyal değerine göre 0 ile 5 Volt arasında çıkış gerilimi elde edilmektedir. PC PORT bağlantısı olarak 9600 kullanılmaktadır. Arduino üzerindeki ADC çıkış değeri A0 portu üzerinden tekrar ölçülerek bilgisayarda yazılmış olan arayüz programına aktarılmaktadır.

Arduino programa arayüz programında ilk olarak tanımlamalar yapılarak, PWM çıkış piminin 3 nolu dijital çıkış olduğu ve PWM sayma sayısının 255'e kadar olduğu belirtilmiştir.

```
/*3 nolu pwm pini ledin bağlanacağı pin olarak seçildi*/  
int PWM_Pin = 3;  
int duty_cycle = 255;  
String incomingByte = ""; // for incoming serial data  
int x;  
int sensorValue = 0;  
float voltage = 0;
```

Şekil 3.18 Arduino arayüz programında tanımlamaların yapılması

Arduino arayüz programında void setup () ve void loop () döngülerinde gerekli kodlar yazılmıştır.

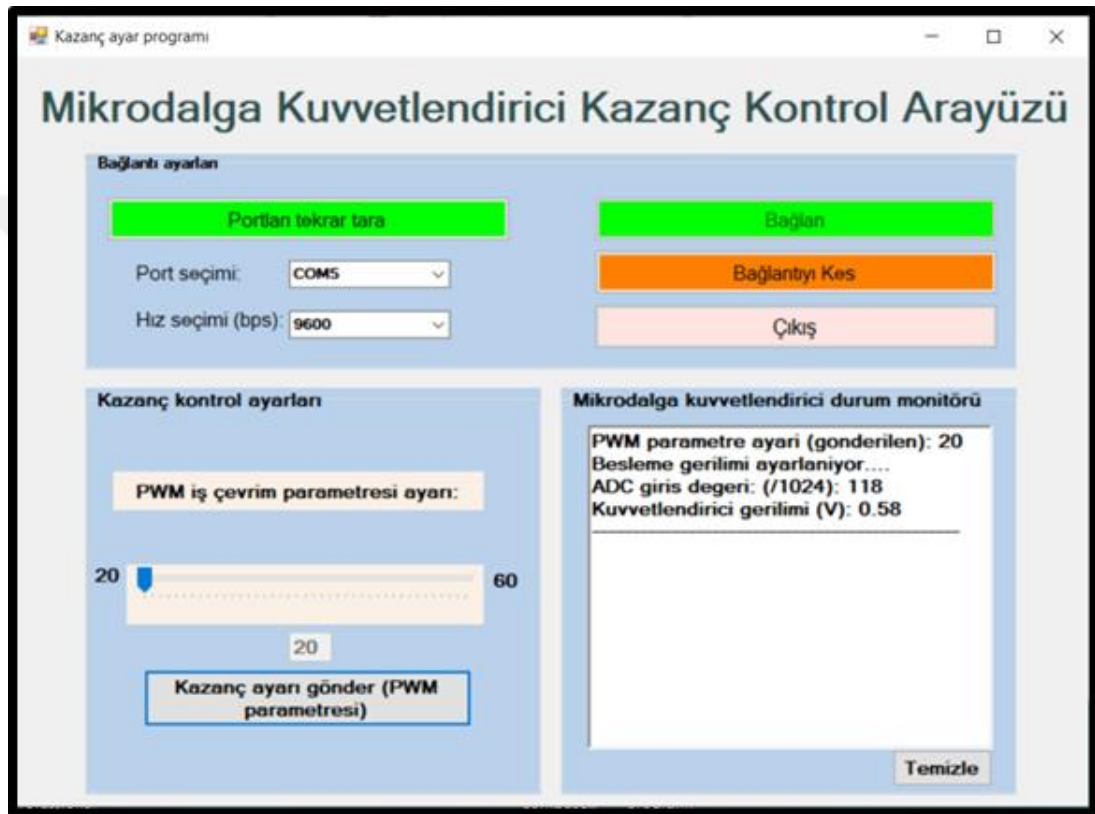
```
void setup() {  
  
    pinMode(PWM_Pin, OUTPUT);  
    Serial.begin(9600);  
    analogWrite(PWM_Pin, duty_cycle);  
}  
void loop() {  
    if (Serial.available() > 0) {  
        // read the incoming byte:  
        incomingByte = Serial.readString();  
        x = incomingByte.toInt();  
    }
```

```
        // say what you got:  
        Serial.print("PWM parametre ayari (gonderilen): ");  
        Serial.println(x);  
        analogWrite(PWM_Pin, 0);  
        delay(1000);  
        analogWrite(PWM_Pin, x);  
        Serial.println("Besleme gerilimi ayarlanıyor....");  
  
        delay(1000);  
  
        sensorValue = analogRead(A0);  
        voltage = 5.00* (sensorValue / 1024.00);  
        Serial.print("ADC giris degeri: (/1024): ");  
        Serial.println(String(sensorValue));  
        Serial.print("Kuvvetlendirici gerilimi (V): ");  
        Serial.println(voltage);  
        Serial.println("-----");  
    }  
}
```

Şekil 3.19 Arduino arayüz programında gerekli kodların yazılması

3.4.4 Bilgisayardaki Kontrol Arayüzü Yazılımı

Gerçekleştirilen mikrodalga kuvvetlendirici sisteminin bilgisayar üzerinden kontrol edilebilmesi için Visual Basic .NET ortamında bir kontrol arayüz programı geliştirilmiştir. Programda karta gönderilmesi gereken bağlantı ayarları, kazanç kontrol ayarları ve mikrodalga kuvvetlendirici durum monitörü yer almaktadır. Aşağıda arayüz programının ekran görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3.20 Bilgisayar kontrol arayüzü yazılımı

3.5.Rohde-Schwarz ZVH8 Vektör Devre Analizörü (VNA)

Rohde-Schwarz ZVH8 cihazı üretici firma tarafından taşınabilir kablo ve anten analizörü olarak üretilmiştir. Fakat satıcı firma tarafından sunulan yazılım sayesinde cihaz vektör devre analizörü (VNA) olarak da kullanılmaktadır.

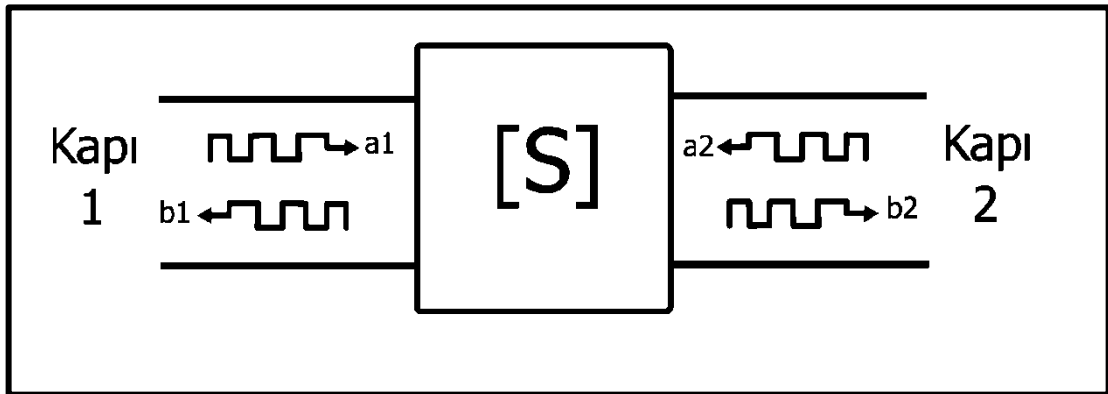
Rohde-Schwarz ZVH8 saha kullanımı için tasarlanmış sağlam, kullanışlı bir kablo ve anten analizörüdür. Düşük ağırlığı, ergonomik tasarımı, pratik tutma kolu ve basit kullanımı, sahada anten sistemlerinin kurulumu ve bakımı için ölçüm cihazına ihtiyaç duyulan herkes için tercih edilmektedir.

Cihaz 100 kHz ile 8 GHz frekans aralığına sahiptir. Analizörde bulunan sihirbaz programı ile daha önce programlanan ölçüm programlarını sahada tekrar uygulamak mümkündür. Ölçülen sonuçların grafiklerini bilgisayar ortamına aktarmaya imkân sağlamaktadır.

Rohde-Schwarz ZVH8'in özellikleri ve kullanım alanları şunları içermektedir:

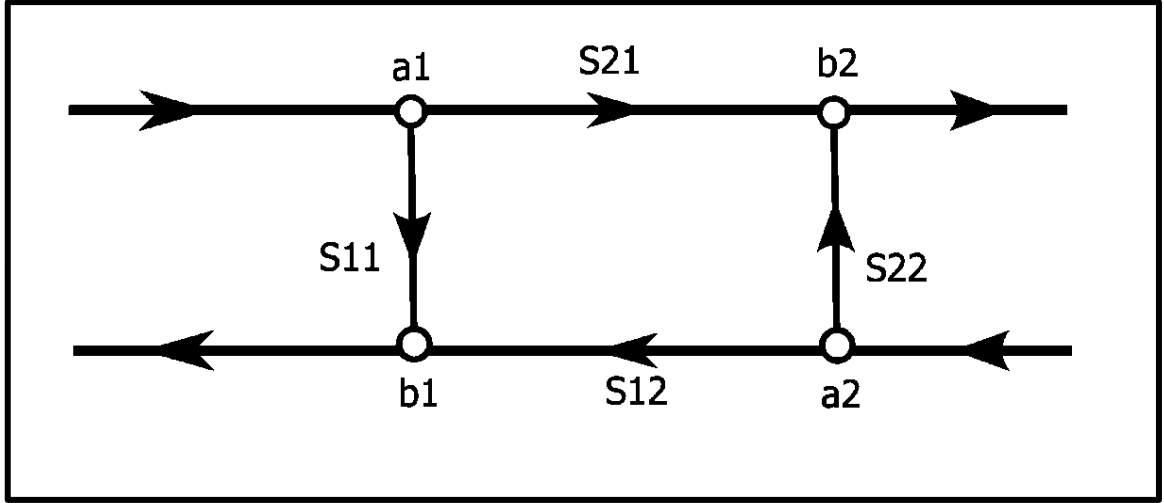
- 100 kHz ile 8 GHz frekans aralığında çalışır.
- Filtre ve anten izolasyon ölçümleri için 100 dB dinamik karakteristiğe sahiptir.
- Yükselteç devreleri için DC besleme çıkış özelliğine sahiptir.
- Güç ölçer seçeneği vardır.
- Ölçüm sonuçları SD hafıza kartı veya USB belleğe kayıt edilebilmektedir.
- Kullanıcı tarafından yapılandırılabilir test modları mevcuttur.
- 4,5 saate kadar kullanım imkânı sunan Li-ion pile sahiptir.
- Düşük ağırlığı (3 kg) ile saha kullanımlarında avantaj sağlamaktadır.
- Arıza mesafe ölçümlerinde kullanılabilir.
- Tek bağlantılı kablo kayıpları ölçülebilir.
- Yansıma ölçümü yapılabilir.

Mikrodalga frekanslarda gerilim ve akım değerlerini ölçmek için bazı pratik yöntemler vardır. Mikrodalga frekanslarda direkt olarak yapılan ölçümlerde genellikle bir yönde ilerleyen veya duran dalga verileri alınarak genlik ve faz değerleri ölçülmektedir. Ölçülen değerler yüksek frekans devreleri için eşdeğer gerilim ve akımlar ile ilişkili empedans ve admitanslar ile gösterilmektedir. Yapılacak doğrudan ölçümlerde gelen, yansıyan, iletilen dalga grafikleri ile uyumlu gösterimi saçılma matrisi ile ifade edilmektedir.



Şekil 3.21 İki kapı girişli S parametreli devre modeli

Şekilde S parametresiyle ifade edilen iki kapılı bir devre modeli için sinyal akış grafiği gösterilmiştir. Kapı-1'de (Devrenin giriş kısmında) oluşan yansıma S_{11} , Kapı-2'de (Devrenin çıkış kısmında) oluşan yansıma S_{22} , Kapı-1'den Kapı-2'ye doğru oluşan yansıma (Girişten çıkışa doğru) S_{21} olarak, Kapı-2'den Kapı-1'e doğru oluşan yansıma (Çıkıştan girişe doğru) S_{12} olarak tanımlanır.



Şekil 3.22 İki kapılı bir devre modeli için sinyal akış grafiği

İki kapılı bir devre için sinyal akış grafiği incelendiğinde S parametreleri şunları ifade eder;

S_{11} : Giriş kapısı gerilim yansıma katsayısını,

S_{12} : Geri yönde gerilim kazancını,

S_{22} : Çıkış kapısı gerilim yansıma katsayısını,

S_{21} : İleri yönde gerilim kazancını,

ifade etmektedir. Devre tasarımlarında S_{11} , S_{12} ve S_{22} olabildiğince düşük olması istenirken S_{21} devre kazancını belirlediği için olabildiğince yüksek olması istenir.

Mikrodalga devrenin kazanç hesabı;

$$KAZANÇ = \frac{\text{ÇIKIŞ GÜCÜ}}{\text{GİRİŞ GÜCÜ}} \quad (1)$$

olarak hesaplanır.

VNA cihazı ile mikrodalga devrelerin kazancının ölçülmesi istendiğinde S_{21} parametreleri ölçülmelidir. S_{21} kazanç grafiği ölçümünde x eksenini frekans, y eksenini desibel oranını göstermektedir.

N kapılı bir devrenin empedans ve admitans matrisleri gibi saçılma matrisi de devreyi N kapısından görüldüğü şekli ile tam olarak tanımlar. Empedans ve admitans matrisleri kapılardaki toplam gerilim ve akımları ilişkilendirirken, saçılma matrisi kapılara gelen ve yansıyan gerilim dalgalarını ilişkilendirir. Bazı bileşen ve devreler için saçılma parametreleri devre analizi teknikleriyle hesaplanabilir. Aksi durumda, saçılma parametreleri vektör devre çözümleyicileri ile ölçülebilmektedir. Ayrıca bir devrenin saçılma parametreleri mevcut ve ihtiyaç duyulur ise diğer matris parametreleri de hesaplanabilmektedir.

N kapılı devrede V_{n+} n-yinci kapıya gelen gerilim dalgasının genliği, V_{n-} ise n-yinci kapıdan yansıyan gerilim dalgasının genliğidir. Saçılma matrisi $[S]$ ise bu gelen ve yansıyan gerilim dalgaları ile ilişkilendirilerek;

$$\begin{bmatrix} V_{1-} \\ V_{2-} \\ \vdots \\ V_{N-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & & & \vdots \\ S_{N1} & \cdots & & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1+} \\ V_{2+} \\ \vdots \\ V_{N+} \end{bmatrix} \quad (2)$$

veya

$$[V^-] = [S] [V^+] \quad (3)$$

halinde yazılır. Saçılma matrisindeki belirli bir eleman ise;

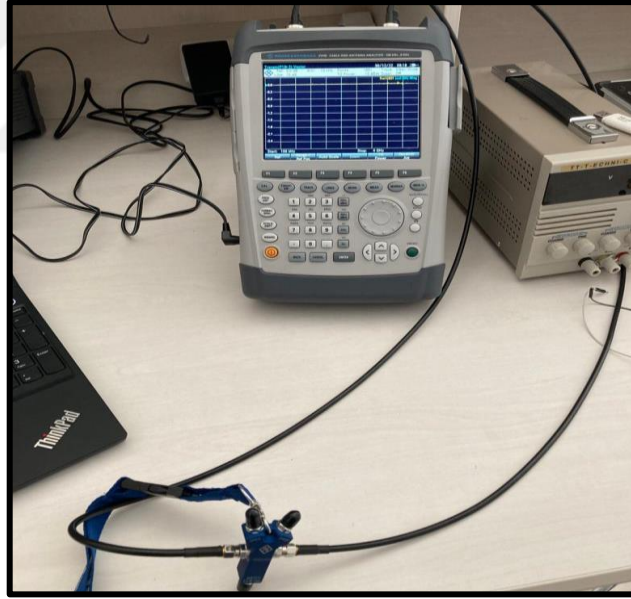
$$S_{ij} = \left. \frac{V_{i-}}{V_{j+}} \right|_{V_{k+}=0 \text{ } k \neq j \text{ için}} \quad (4)$$

olarak hesaplanır. Formülü açıklamak gerekirse j kapısını V_j^+ gerilimindeki bir gelen dalga ile sürüp, i kapısından yansıyan V_i^- genliğindeki dalgayı ölçerek S_{ij} 'yi bulabilmek mümkündür.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1.SPF5189Z Mikrodalga Kuvvetlendirici Ölçümüne Başlamadan Önce VNA Cihazının Kalibre Edilmesi

Ölçüme başlamadan önce VNA cihazı ZVH-Z135 kalibrasyon kiti ile kalibre edilmiştir.



Şekil 4.1 VNA cihazının ZVH-Z135 kalibrasyonunun yapılması

Kalibre yapıldıktan sonra sıfırlama işleminin gerçekleştiği VNA ekranında görülmüştür.

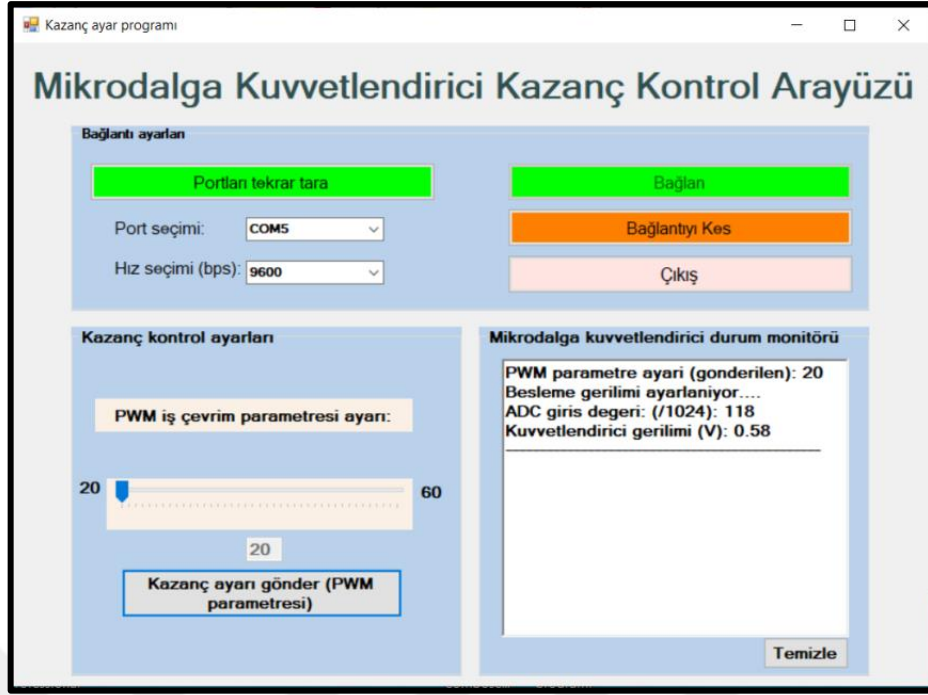


Şekil 4.2 VNA cihazının kalibre edilmesi

4.2. Tasarlanan ve Prototip Olarak Üretilen Mikrodalga Kuvvetlendirici Sisteminin Mikrodalga Karakteristiklerinin Ölçülmesi

Prototip olarak üretilen mikrodalga kuvvetlendirici sistemine 20 ile 60 arasında değişen 21 ayrı PWM sinyali gönderilmiş olup ölçüm sonuçları tek tek incelenmiştir. PWM değerleri bilgisayar yazılımı üzerinden Arduino'ya ikiyeşerli olacak şekilde artırımlı olarak uygulanmıştır.

PWM iş çevrim parametresinin 20 olması durumunda elde edilen karakteristikleri aşağıda sıralı olarak verilmiştir:



Şekil 4.3 PWM=20 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması



Şekil 4.4 PWM=20 için S21 karakteristiği



Şekil 4.5 PWM=20 için S11 karakteristiği

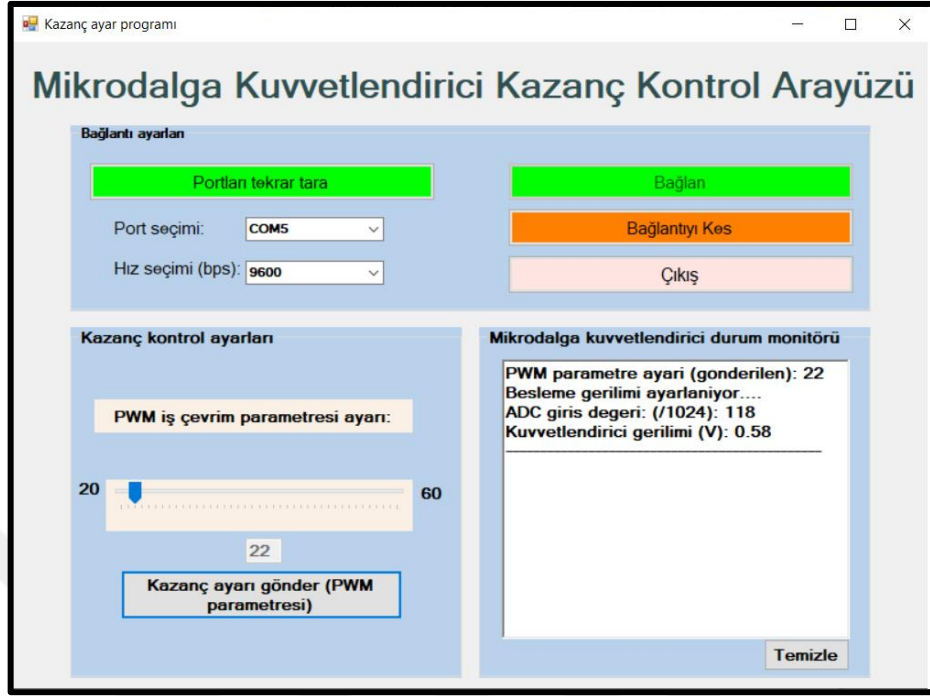


Şekil 4.6 PWM=20 için S22 karakteristiği



Şekil 4.7 PWM=20 için S12 karakteristiği

PWM iş çevrim parametresinin 22 olması durumunda elde edilen karakteristikleri aşağıda sıralı olarak verilmiştir:



Şekil 4.8 PWM=22 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması



Şekil 4.9 PWM=22 için S21 karakteristiği



Şekil 4.10 PWM=22 için S11 karakteristiği

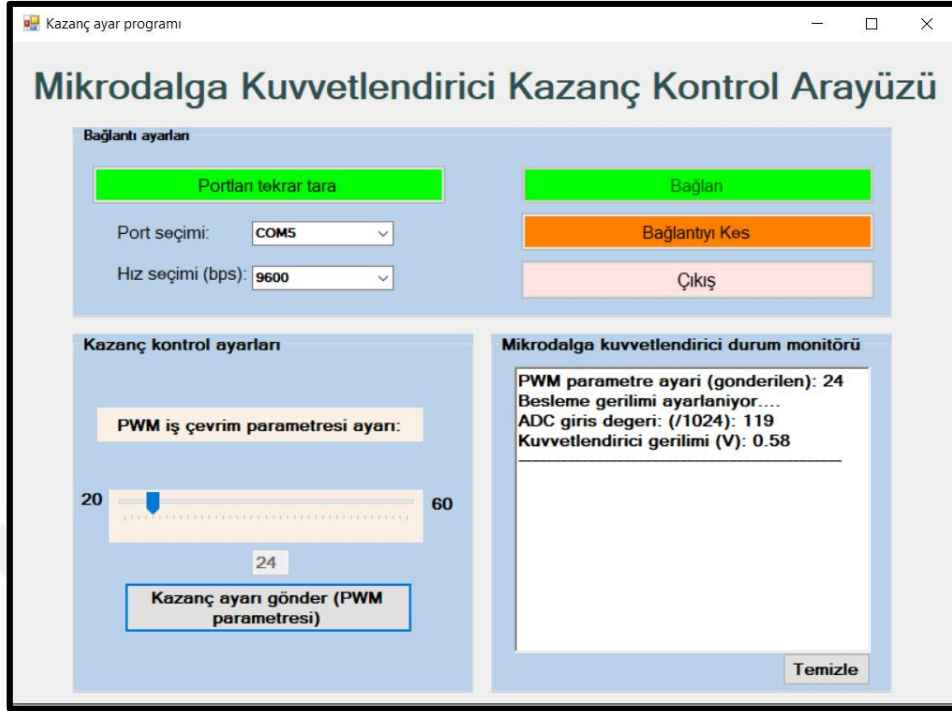


Şekil 4.11 PWM=22 için S22 karakteristiği



Şekil 4.12 PWM=22 için S12 karakteristiği

PWM iş çevrim parametresinin 24 olması durumunda elde edilen karakteristikleri aşağıda sıralı olarak verilmiştir:



Şekil 4.13 PWM=24 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması



Şekil 4.14 PWM=24 için S21 karakteristiği



Şekil 4.15 PWM=24 için S11 karakteristiği

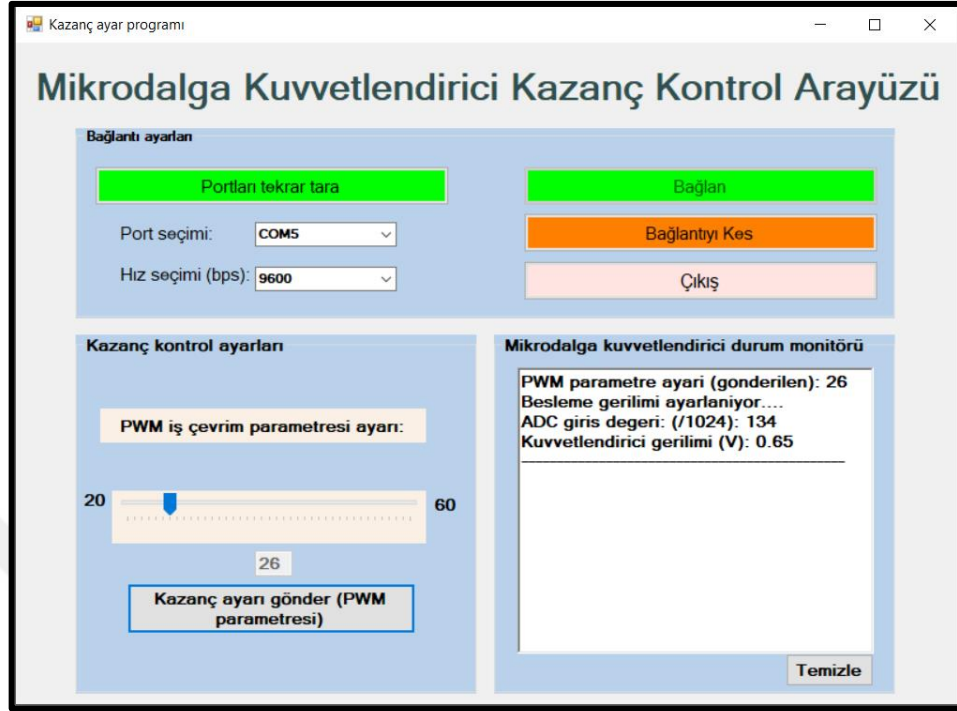


Şekil 4.16 PWM=24 için S22 karakteristiği



Şekil 4.17 PWM=24 için S12 karakteristiği

PWM iş çevrim parametresinin 26 olması durumunda elde edilen karakteristikleri aşağıda sıralı olarak verilmiştir:



Şekil 4.18 PWM=26 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması



Şekil 4.19 PWM=26 için S21 karakteristiği



Şekil 4.20 PWM=26 için S11 karakteristiği

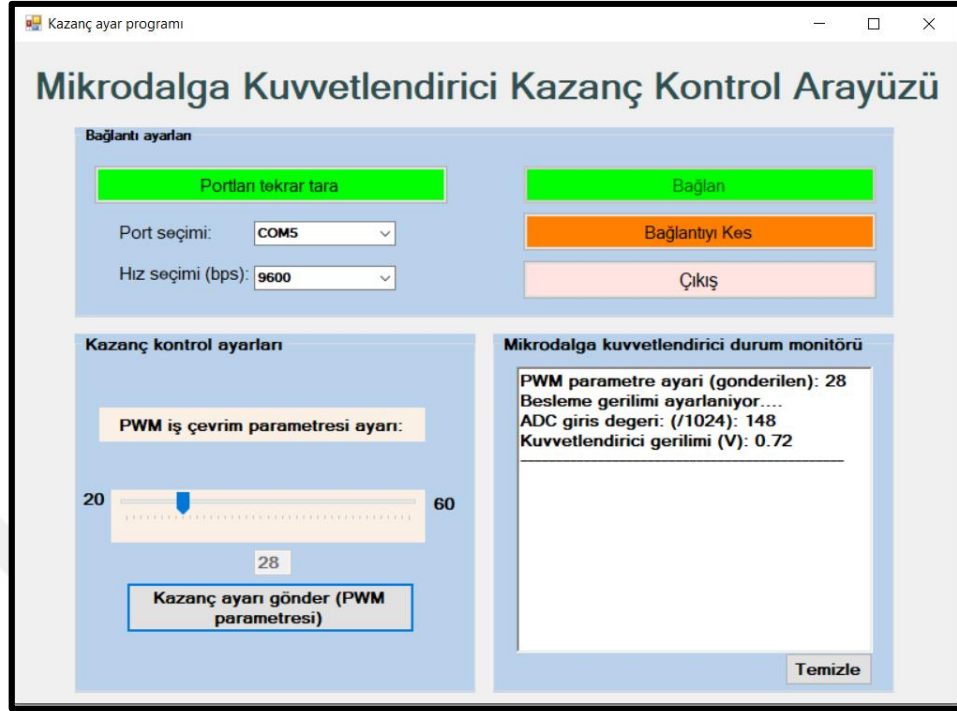


Şekil 4.21 PWM=26 için S22 karakteristiği



Şekil 4.22 PWM=26 için S12 karakteristiği

PWM iş çevrim parametresinin 28 olması durumunda elde edilen karakteristikleri aşağıda sıralı olarak verilmiştir:



Şekil 4.23 PWM=28 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması



Şekil 4.24 PWM=28 için S21 karakteristiği



Şekil 4.25 PWM=28 için S11 karakteristiği

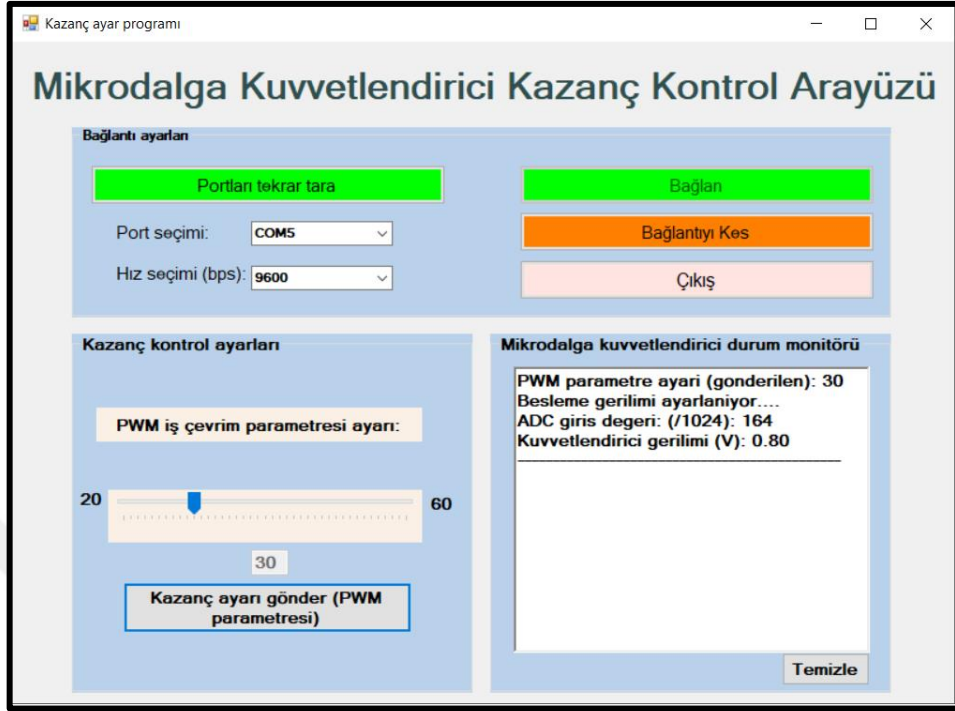


Şekil 4.26 PWM=28 için S22 karakteristiği



Şekil 4.27 PWM=28 için S12 karakteristiği

PWM iş çevrim parametresinin 30 olması durumunda elde edilen karakteristikleri aşağıda sıralı olarak verilmiştir:



Şekil 4.28 PWM=30 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması



Şekil 4.29 PWM=30 için S21 karakteristiği



Şekil 4.30 PWM=30 için S11 karakteristiği

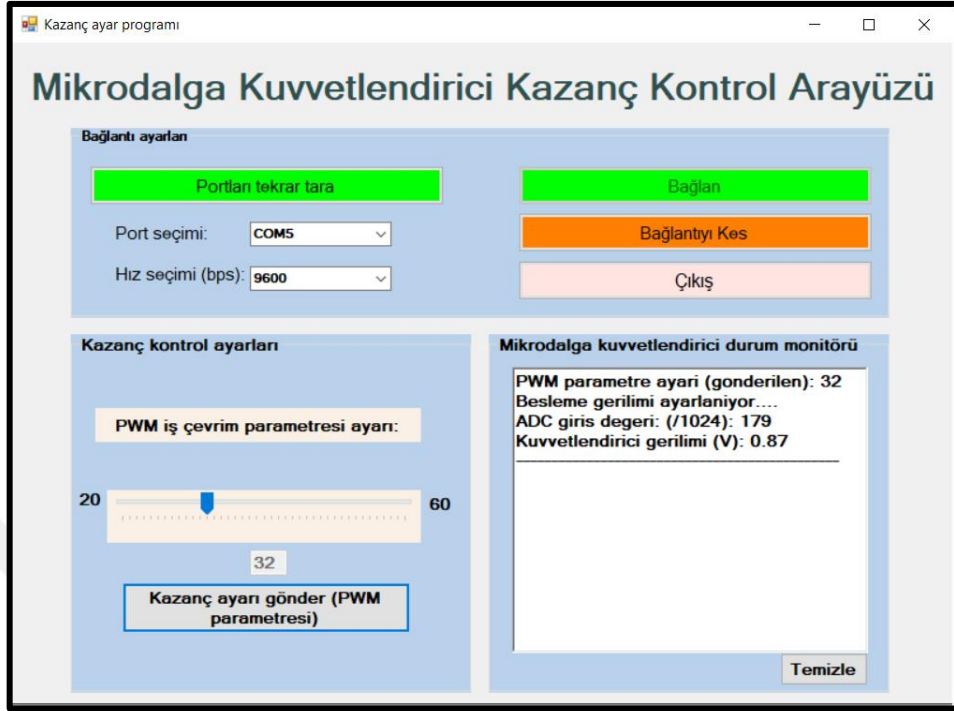


Şekil 4.31 PWM=30 için S22 karakteristiği



Şekil 4.32 PWM=30 için S12 karakteristiği

PWM iş çevrim parametresinin 32 olması durumunda elde edilen karakteristikleri aşağıda sıralı olarak verilmiştir:



Şekil 4.33 PWM=32 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması



Şekil 4.34 PWM=32 için S21 karakteristiği



Şekil 4.35 PWM=32 için S11 karakteristiği

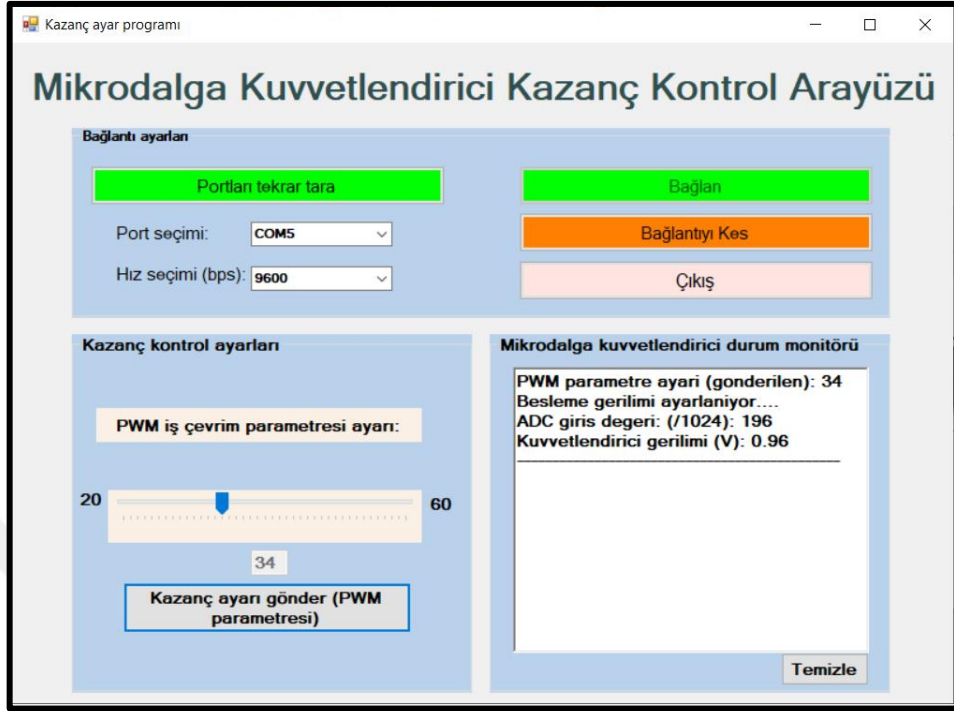


Şekil 4.36 PWM=32 için S22 karakteristiği



Şekil 4.37 PWM=32 için S12 karakteristiği

PWM iş çevrim parametresinin 34 olması durumunda elde edilen karakteristikleri aşağıda sıralı olarak verilmiştir:



Şekil 4.38 PWM=34 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması



Şekil 4.39 PWM=34 için S21 karakteristiği



Şekil 4.40 PWM=34 için S11 karakteristiği

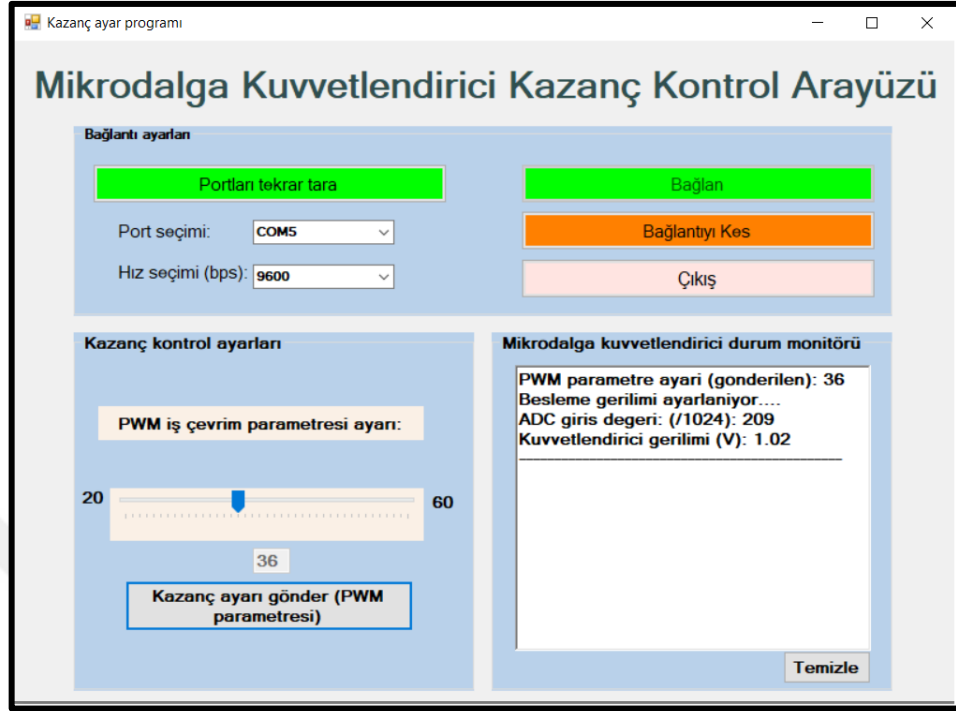


Şekil 4.41 PWM=34 için S22 karakteristiği



Şekil 4.42 PWM=34 için S12 karakteristiği

PWM iş çevrim parametresinin 36 olması durumunda elde edilen karakteristikleri aşağıda sıralı olarak verilmiştir:



Şekil 4.43 PWM=36 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması



Şekil 4.44 PWM=36 için S21 karakteristiği



Şekil 4.45 PWM=36 için S11 karakteristiği

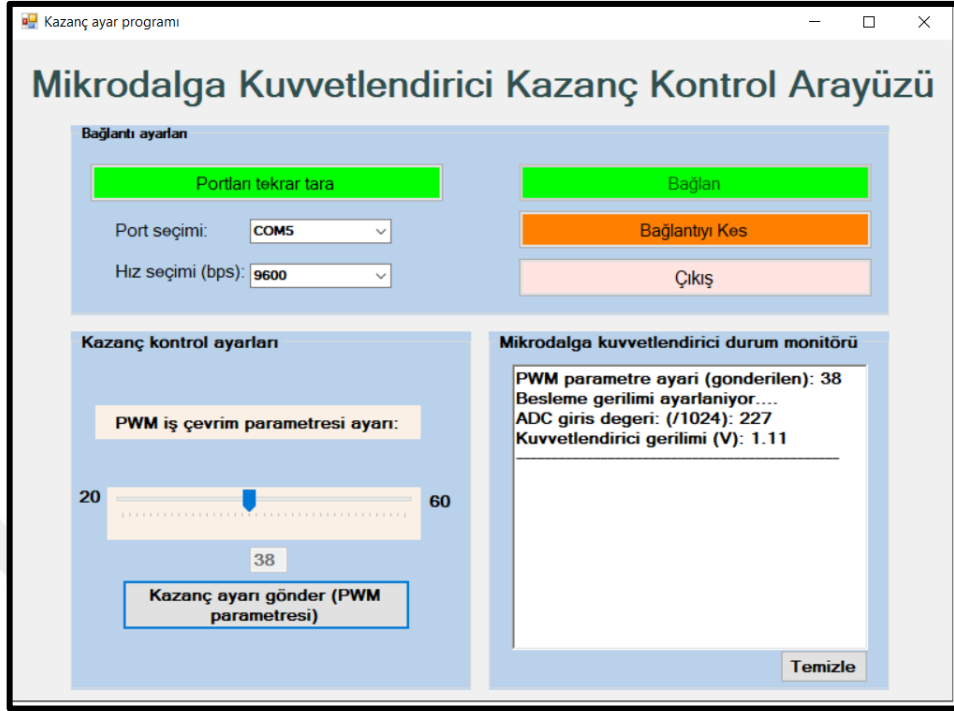


Şekil 4.46 PWM=36 için S22 karakteristiği



Şekil 4.47 PWM=36 için S12 karakteristiği

PWM iş çevrim parametresinin 38 olması durumunda elde edilen karakteristikleri aşağıda sıralı olarak verilmiştir:



Şekil 4.48 PWM=38 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması



Şekil 4.49 PWM=38 için S21 karakteristiği



Şekil 4.50 PWM=38 için S11 karakteristiği

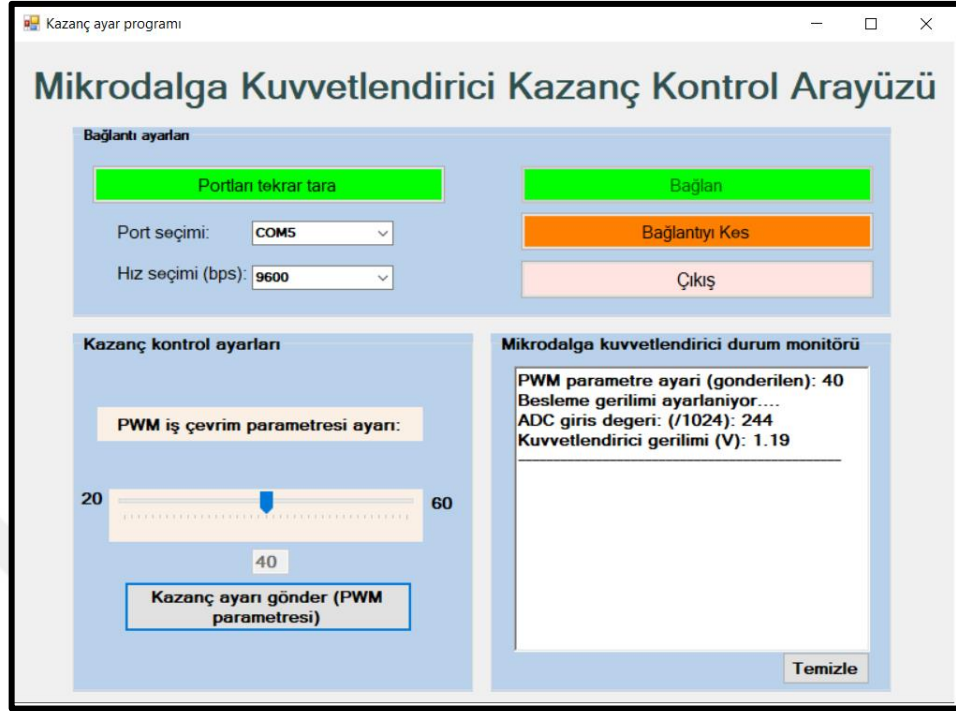


Şekil 4.51 PWM=38 için S22 karakteristiği



Şekil 4.52 PWM=38 için S12 karakteristiği

PWM iş çevrim parametresinin 40 olması durumunda elde edilen karakteristikleri aşağıda sıralı olarak verilmiştir:



Şekil 4.53 PWM=40 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması



Şekil 4.54 PWM=40 için S21 karakteristiği



Şekil 4.55 PWM=40 için S11 karakteristiği

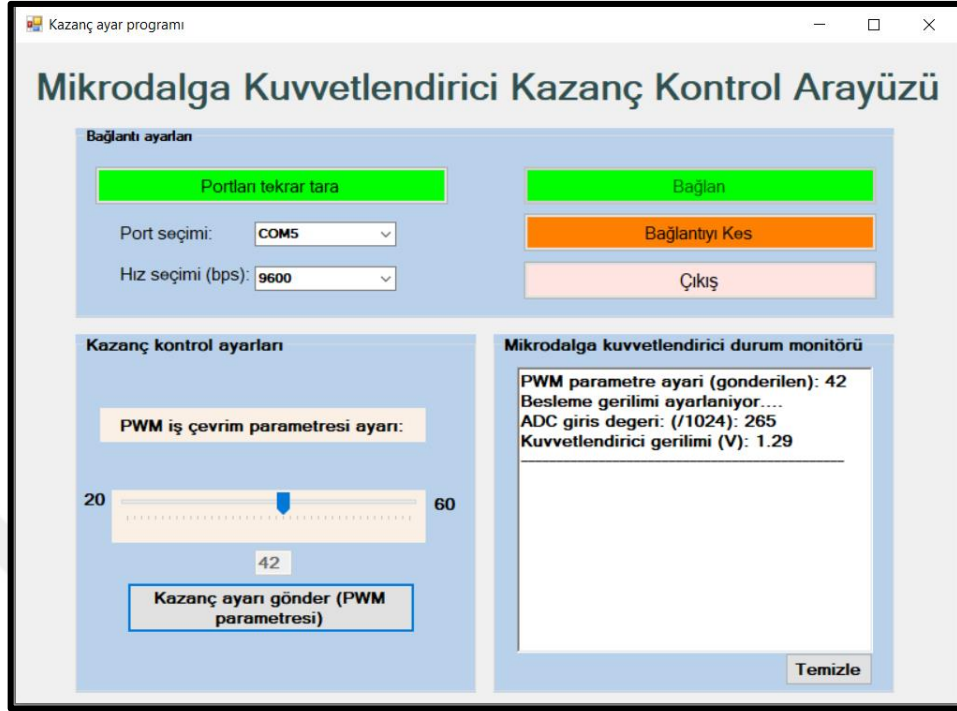


Şekil 4.56 PWM=40 için S22 karakteristiği



Şekil 4.57 PWM=40 için S12 karakteristiği

PWM iş çevrim parametresinin 42 olması durumunda elde edilen karakteristikleri aşağıda sıralı olarak verilmiştir:



Şekil 4.58 PWM=42 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması



Şekil 4.59 PWM=42 için S21 karakteristiği



Şekil 4.60 PWM=42 için S11 karakteristiği

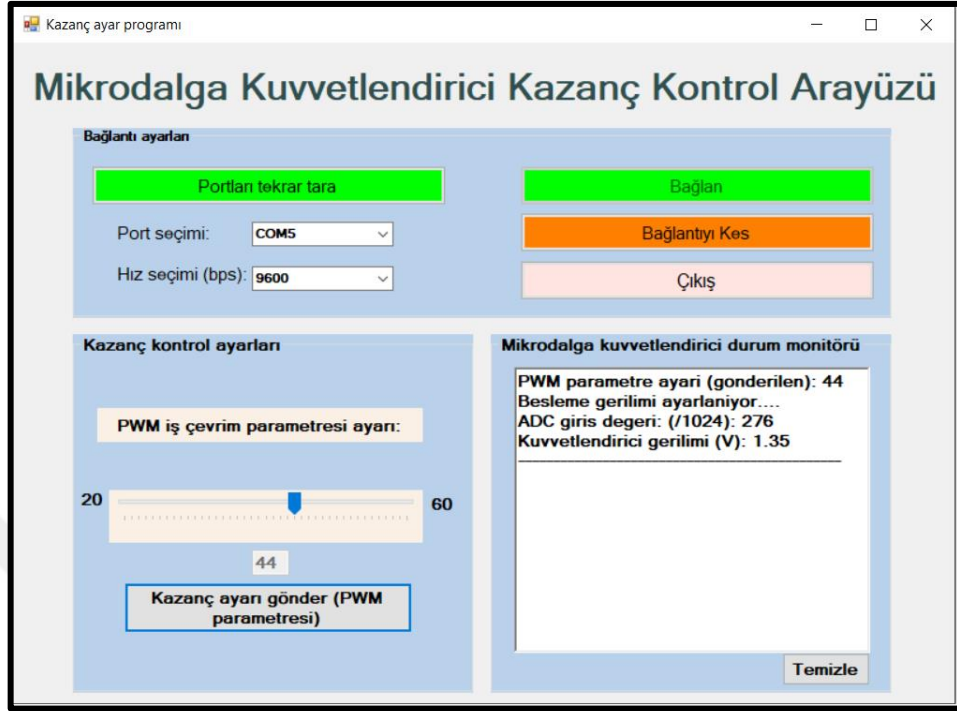


Şekil 4.61 PWM=42 için S22 karakteristiği



Şekil 4.62 PWM=42 için S12 karakteristiği

PWM iş çevrim parametresinin 44 olması durumunda elde edilen karakteristikleri aşağıda sıralı olarak verilmiştir:



Şekil 4.63 PWM=44 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması



Şekil 4.64 PWM=44 için S21 karakteristiği



Şekil 4.65 PWM=44 için S11 karakteristiği

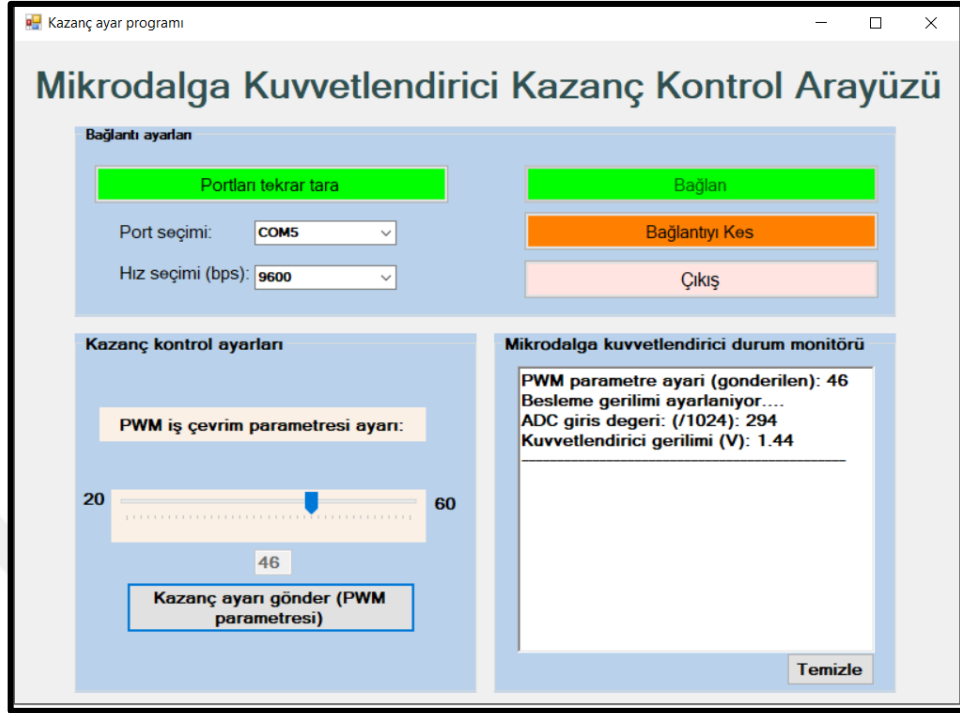


Şekil 4.66 PWM=44 için S22 karakteristiği



Şekil 4.67 PWM=44 için S12 karakteristiği

PWM iş çevrim parametresinin 46 olması durumunda elde edilen karakteristikleri aşağıda sıralı olarak verilmiştir:



Şekil 4.68 PWM=46 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması



Şekil 4.69 PWM=46 için S21 karakteristiği



Şekil 4.70 PWM=46 için S11 karakteristiği

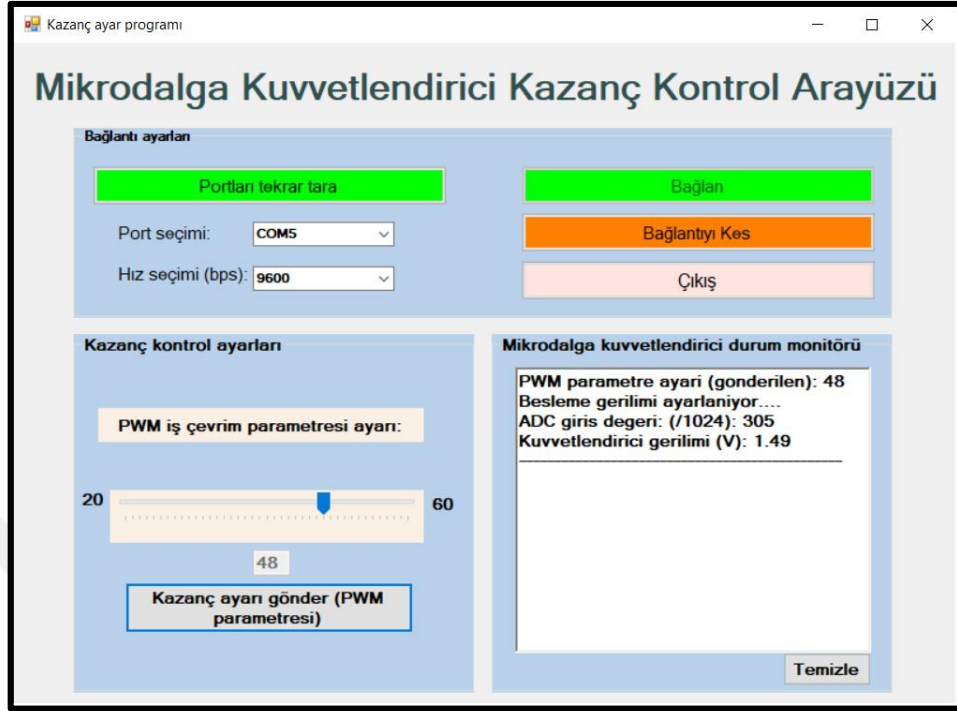


Şekil 4.71 PWM=46 için S22 karakteristiği



Şekil 4.72 PWM=46 için S12 karakteristiği

PWM iş çevrim parametresinin 48 olması durumunda elde edilen karakteristikleri aşağıda sıralı olarak verilmiştir:



Şekil 4.73 PWM=48 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması



Şekil 4.74 PWM=48 için S21 karakteristiği



Şekil 4.75 PWM=48 için S11 karakteristiği

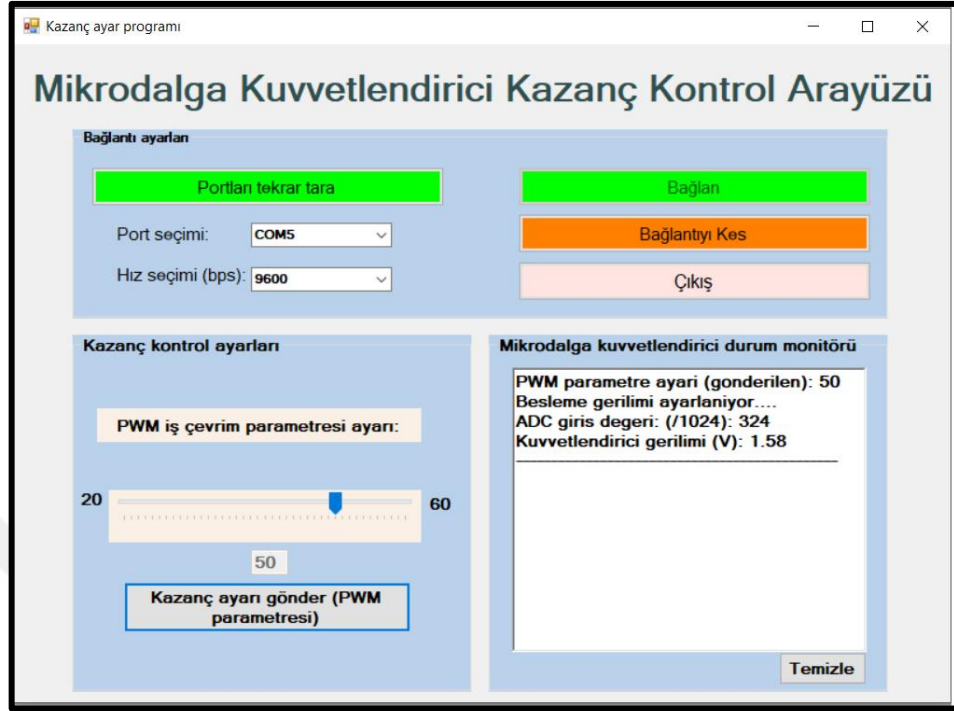


Şekil 4.76 PWM=48 için S22 karakteristiği



Şekil 4.77 PWM=48 için S12 karakteristiği

PWM iş çevrim parametresinin 50 olması durumunda elde edilen karakteristikleri aşağıda sıralı olarak verilmiştir:



Şekil 4.78 PWM=50 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması



Şekil 4.79 PWM=50 için S21 karakteristiği



Şekil 4.80 PWM=50 için S11 karakteristiği

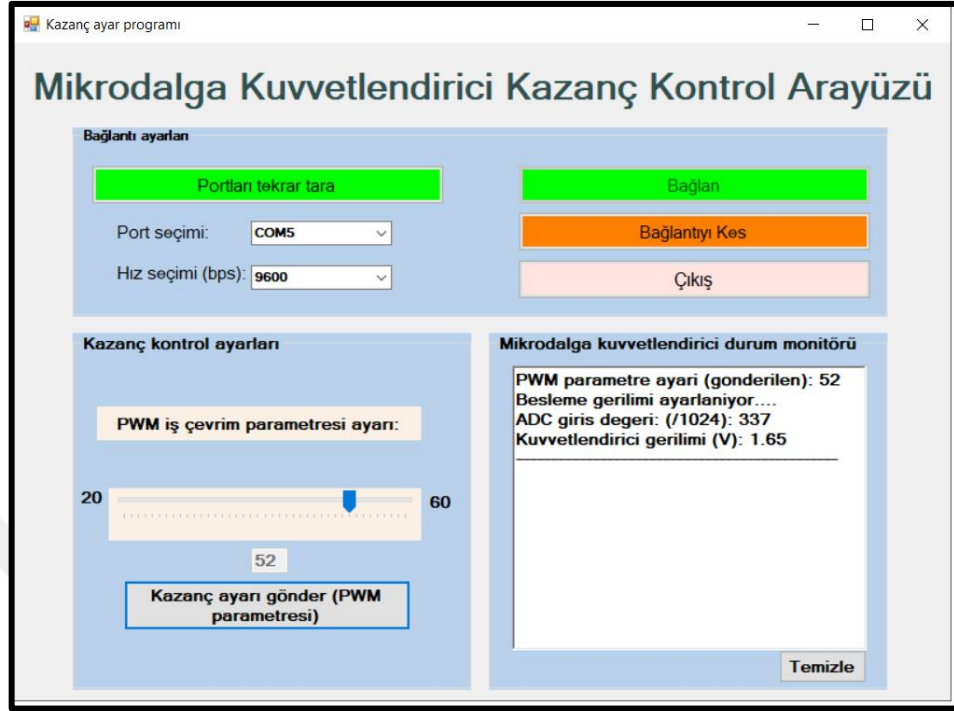


Şekil 4.81 PWM=50 için S22 karakteristiği



Şekil 4.82 PWM=50 için S12 karakteristiği

PWM iş çevrim parametresinin 52 olması durumunda elde edilen karakteristikleri aşağıda sıralı olarak verilmiştir:



Şekil 4.83 PWM=52 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması



Şekil 4.84 PWM=52 için S21 karakteristiği



Şekil 4.85 PWM=52 için S11 karakteristiği

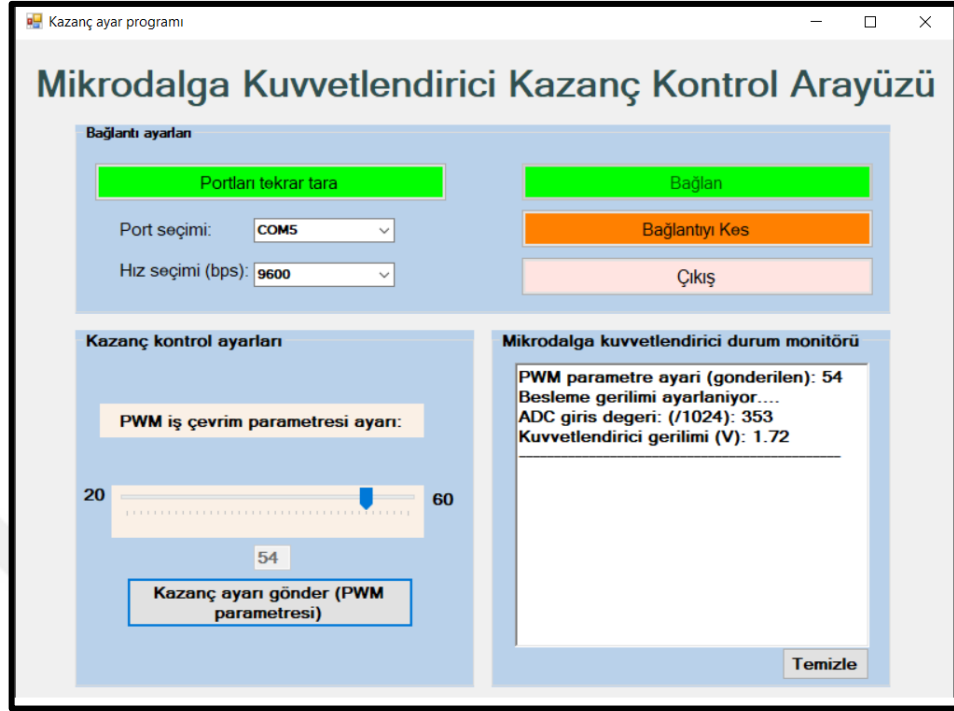


Şekil 4.86 PWM=52 için S22 karakteristiği



Şekil 4.87 PWM=52 için S12 karakteristiği

PWM iş çevrim parametresinin 54 olması durumunda elde edilen karakteristikleri aşağıda sıralı olarak verilmiştir:



Şekil 4.88 PWM=54 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması



Şekil 4.89 PWM=54 için S21 karakteristiği.



Şekil 4.90 PWM=54 için S11 karakteristiği

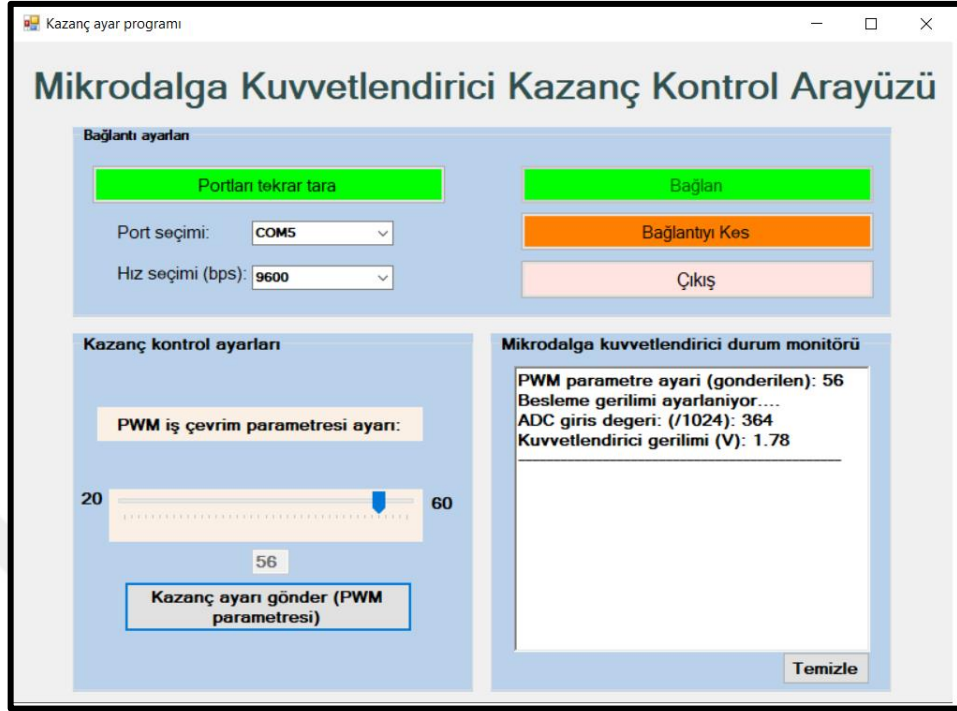


Şekil 4.91 PWM=54 için S22 karakteristiği



Şekil 4.92 PWM=54 için S12 karakteristiği

PWM iş çevrim parametresinin 56 olması durumunda elde edilen karakteristikleri aşağıda sıralı olarak verilmiştir:



Şekil 4.93 PWM=56 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması



Şekil 4.94 PWM=56 için S21 karakteristiği



Şekil 4.95 PWM=56 için S11 karakteristiği

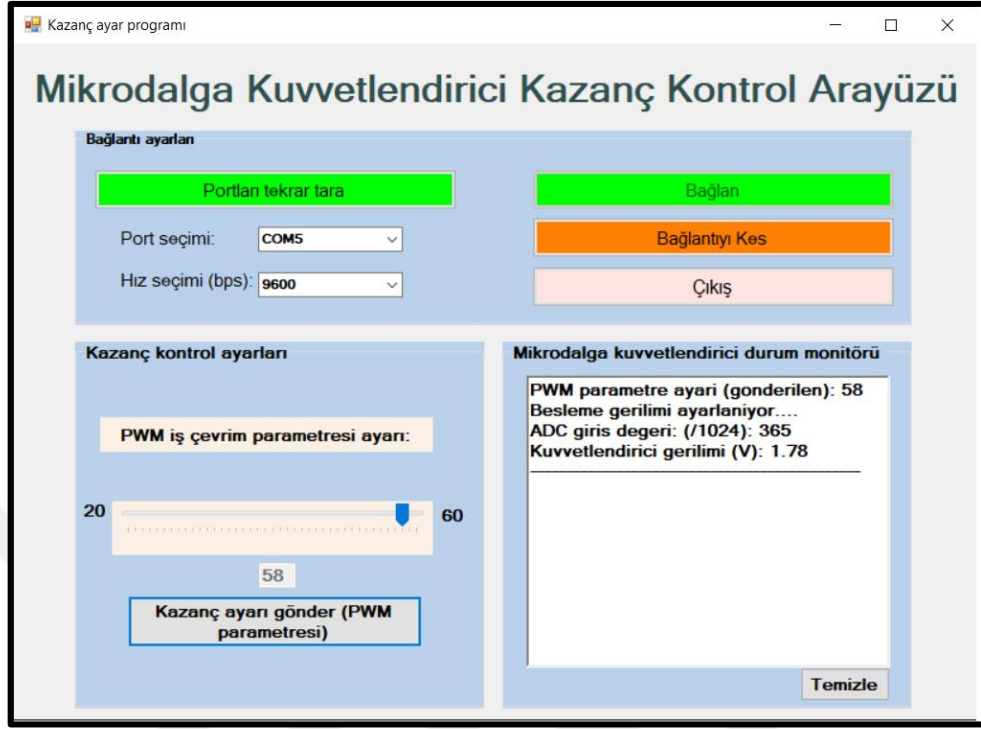


Şekil 4.96 PWM=56 için S22 karakteristiği



Şekil 4.97 PWM=56 için S12 karakteristiği

PWM iş çevrim parametresinin 58 olması durumunda elde edilen karakteristikleri aşağıda sıralı olarak verilmiştir:



Şekil 4.98 PWM=58 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması



Şekil 4.99 PWM=58 için S21 karakteristiği



Şekil 4.100 PWM=58 için S11 karakteristiği

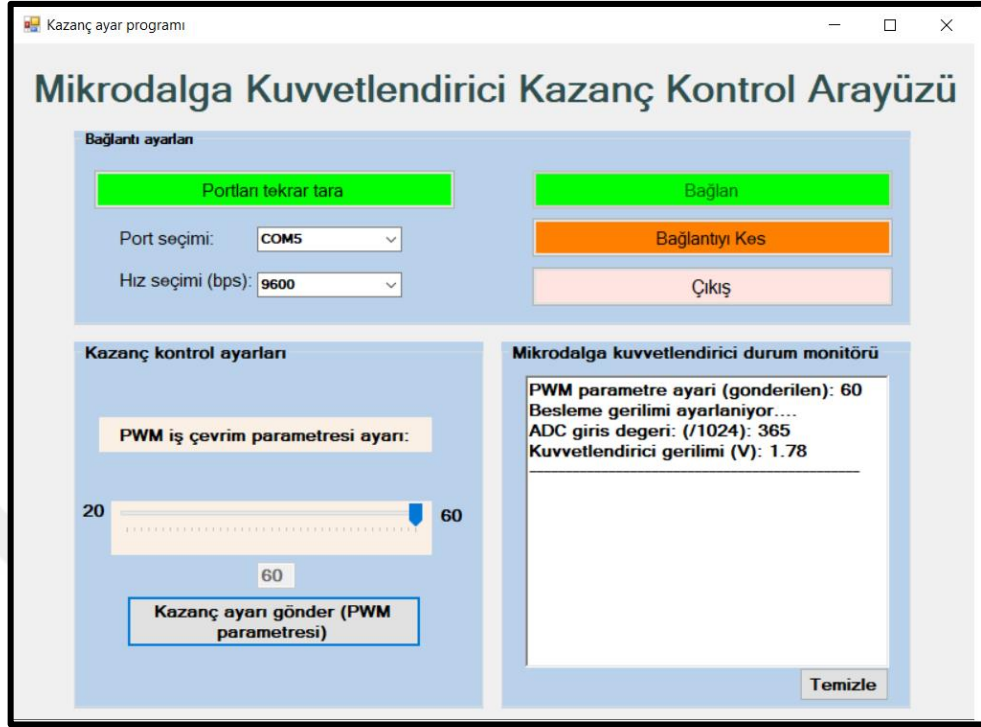


Şekil 4.101 PWM=58 için S22 karakteristiği



Şekil 4.102 PWM=58 için S12 karakteristiği

PWM iş çevrim parametresinin 60 olması durumunda elde edilen karakteristikleri aşağıda sıralı olarak verilmiştir:



Şekil 4.103 PWM=60 için kazanç arayüz parametresinin ayarlanması



Şekil 4.104 PWM=60 için S21 karakteristiği



Şekil 4.105 PWM=60 için S11 karakteristiği



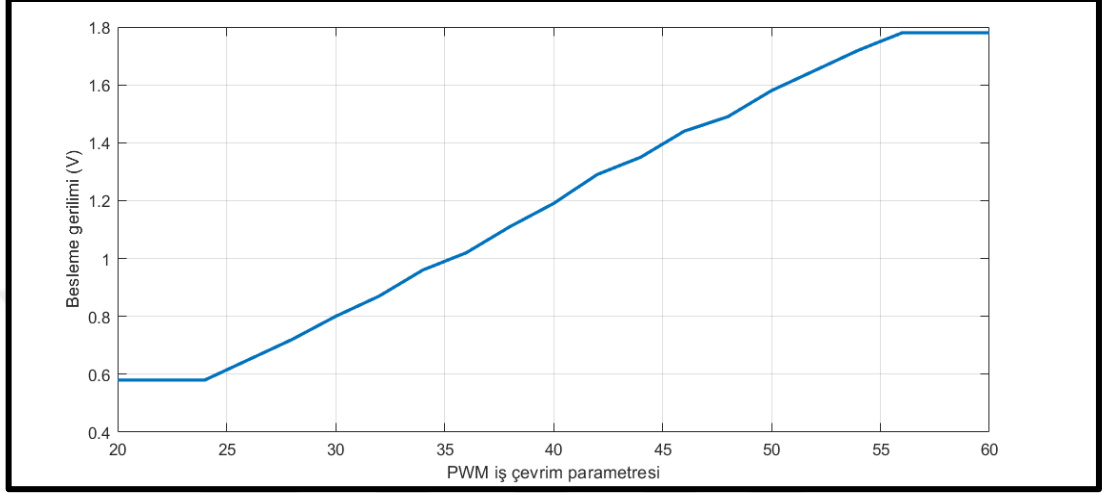
Şekil 4.106 PWM=60 için S22 karakteristiği



Şekil 4.107 PWM=60 için S12 karakteristiği

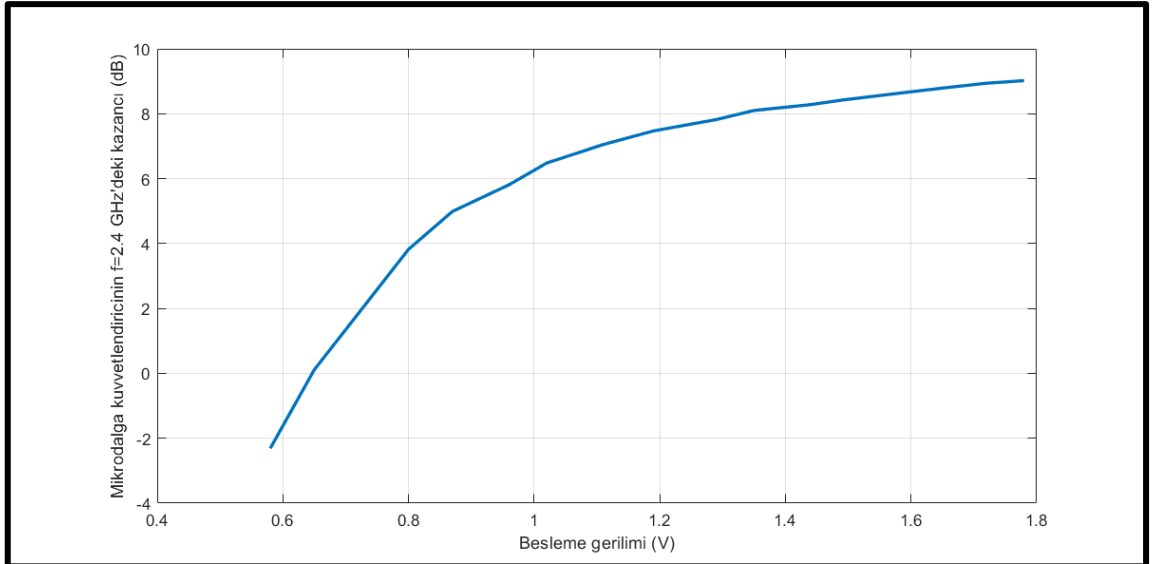
4.3.PWM İş Çevrimi Parametresinin Besleme Gerilimine ve Mikrodalga Kuvvetlendiricinin Kazancına Etkisi

Bölüm 4.2’de yapılan ölçüm sonuçlarına göre PWM iş çevrim parametresine göre besleme gerilim grafiği, besleme gerilimine göre kazanç grafiği ve PWM iş çevrim parametresine göre kazanç grafiği aşağıdaki gibi elde edilmiştir.



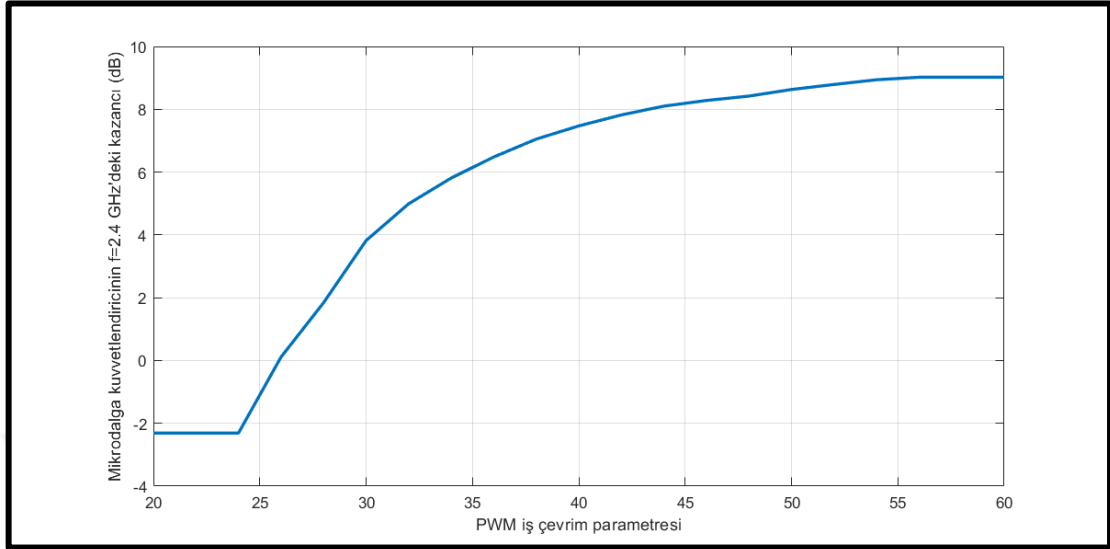
Şekil 4.108 PWM iş çevrim parametresine göre besleme gerilim grafiği

PWM değer değişimine göre besleme gerilim grafiği incelendiğinde PWM değer aralığının 24 ile 56 arasında değişmesi durumunda besleme geriliminin 0.58V ile 1.78V aralığında değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.109 Besleme gerilimine göre kuvvetlendirici kazanç grafiği

Kuvvetlendiricinin 2.4 GHz'deki kazancının besleme gerilimine göre değişimi ise şekil 4.109'da verilmiştir.



şekil 4.110 PWM iř çevrim parametresine göre kuvvetlendirici kazanç grafiği

Kuvvetlendirici kazancının 2.4 GHz'deki değerinin PWM iř çevrim parametresinin 24 ile 56 arasındaki değişimlerine göre aldığı değerler ise şekil 4.110'da gösterilmiştir.

Bu řekillerden de görüldüğü gibi, gerçekleştirilen kuvvetlendirici sisteminin kazancı hedeflendięi gibi bilgisayar kontrollü olarak değiştirilebilmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kazancı bilgisayar kontrollü olarak ayarlanabilen bir mikrodalga kuvvetlendirici sistemi tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir.

50 Hz - 4000 MHz frekans aralığında çalışan monolitik mikrodalga entegre devre (MMIC) olan SPF5189Z tabanlı olarak tasarlanan mikrodalga kuvvetlendirici sisteminin kazancı bilgisayarda geliştirilen bir arayüz programıyla görsel olarak değiştirilebilmektedir.

PWM iş çevrim parametresinin mikrodenetleyiciye gönderilmesi için bilgisayarda Visual Basic .NET programlama dilinde bir arayüz programı oluşturulmuştur. PWM iş çevrim parametresi 20 ile 60 aralığında ayarlanabilmektedir. İstenilen PWM değeri USB kablo bağlantısı üzerinden mikrodalga kuvvetlendirici sistemine aktarılmaktadır.

Tasarımı gerçekleştirilmiş olan devre yapısı ilk olarak breadboard devre kartı üzerinde kurulmuştur. Prototip üretim için bilgisayar ortamında PCB baskı devre şeması çizilerek devre kazıma makinesi ile üretimi gerçekleştirilmiştir.

PWM sinyallerin üretilmesi için Arduino Nano mikrodenetleyici kartı kullanılmıştır. Bu mikrodenetleyici devre kartının seçilme nedeni ise hazır devre kartı bloğunda olması, USB bağlantı ile kolay programlanabilir olması ve maliyetinin düşük olmasıdır.

Üretilen mikrodalga kuvvetlendirici yapısının vektör devre analizörü (VNA) ile saçılma parametrelerinin ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Farklı PWM sinyaline göre devrenin çıkış gerilimi analiz edildiğinde çıkış değerinin 0.58 volt ile 1.78 volt aralığında değiştiği, kuvvetlendiricinin kazanç değeri ise uygulanan gerilim değerine göre -2.31 dB ile 9.02 dB aralığında ayarlanabildiği görülmüştür.

Bu tezde yapılan çalışmaların dizi anten besleme ve kontrol sistemlerinde fayda sağlayacağı değerlendirilmiştir.



6. KAYNAKÇA

- [1] Komiak, J. J., 2016. Microwave and millimeter wave power amplifiers: Technology, applications, benchmarks, future trends. **2015 IEEE 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)**, 1-4. doi: 10.1109/WAMICON.2015.7120433.
- [2] Wentzel, A., Hühn, F., ve Heinrich, W., 2017. The digital power amplifier for the wireless infrastructure: Status and prospects. **In 2017 IEEE Topical Conference on RF/Microwave Power Amplifiers for Radio and Wireless Applications (PAWR)**, 14-17. doi: 10.1109/PAWR.2017.7875561.
- [3] O'Duill, S., Shumakher, E., ve Eisenstein, G., 2011. Application of slow light: Controllable microwave phase shifting using semiconductor optical amplifiers. **In 2011 13th International Conference on Transparent Optical Networks**, 1-4. doi: 10.1109/ICTON.2011.5970788.
- [4] Caverly, R., Paoletta, A., Lexa, F. J., ve Grispino, C., 2011. High efficiency amplifier and signal source module for ISM-band applications. **In 2011 IEEE Topical Conference on Power Amplifiers for Wireless and Radio Applications**, 13-16. doi: 10.1109/PAWR.2011.5725377.
- [5] Guo, C., Lv, Z., Shi, X., Xu, L., ve Cai, M., 2012. Effects of low noise amplifier under high power microwave back-door coupling. **In 2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)**, 1-4. doi: 10.1109/ICMMT.2012.6230251.
- [6] Kim, D., Lee, D. H., Sim, S., Jeon, L., ve Hong, S., 2014. An X-band switchless bidirectional GaN MMIC amplifier for phased array systems. **IEEE Microwave and Wireless Components Letters**, 24(12), 878-880. doi: 10.1109/LMWC.2014.2359366.
- [7] Raffo, A., Vadalà, V., Di Falco, S., Scappaviva, F., ve Vannini, G., 2010. "Hybrid" approach to microwave power amplifier design. **In 2010 Workshop on**

Integrated Nonlinear Microwave and Millimeter-Wave Circuits, 33-36. doi: 10.1109/INMMIC.2010.5480145.

[8] Kawasaki, S., Yoshida, S., Kobayashi, Y., Noji, T., Ono, M., Moriguchi, Y., ve Furuta, S., 2013. The S-band multi-stage amplifier for single-tone and time-division microwave communication and power transmission. **In 2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings(APMC)**, 465-467. doi: 10.1109/APMC.2013.6694832.

[9] Coers, M., ve Bösch, W., 2014. DC to 6.5 GHz highly linear low-noise AlGaIn/GaN traveling wave amplifier with diode predistortion. **In 2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)**, 1-4. doi: 10.1109/MWSYM.2014.6848449.

[10] Hu, Z., Zhang, Q., ve Ma, K., 2021. A 1–42 GHz GaN distributed amplifier with adjustable gain by voltage-controlled switch. **IEEE Microwave and Wireless Components Letters**, 32(4), 339-342. doi: 10.23919/EuMIC.2017.8230690.

[11] Collantes, J. M., Portilla, J., Anakabe, A., ve Otegi, N., 2016. Characterization techniques for stability and noise in microwave amplifiers under large-signal excitations. **In 2016 IEEE MTT-S Latin America Microwave Conference (LAMC)**, 1-3. doi: 10.1109/LAMC.2016.7851246.

[12] Li, W., ve Saavedra, C. E., 2013. A stand-alone distortion-cancelling cell for microwave amplifiers. **IEEE microwave and wireless components letters**, 23(4), 205-207. doi: 10.1109/LMWC.2013.2247752.

[13] Maassen, D., Rautschke, F., ve Boeck, G., 2018. A 50W wideband hybrid Ku-band GaN-HEMT power amplifier for satellite communication. **In 2018 11th German Microwave Conference (GeMiC)**, 5-8. doi: 10.23919/GEMIC.2018.8335014.

[14] Füzy, C., ve Zólyomy, A., 2010. Design of broadband complex impedance-matching networks and their applications for broadbanding microwave amplifiers. **In 18-th International conference on microwaves, radar and wireless communications**, 1-4.

[15] Sukhanov, D. A., ve Kishchinskiy, A. A., 2013. High efficiency L-, S-, C-band GaN power pulse amplifiers. **In 2013 23rd International Crimean Conference" Microwave & Telecommunication Technology"**, 94-95.

[16] Sayed, A. S., ve Ahmed, H. N., 2019. Wideband high efficiency power amplifier design using precise high frequency GaN-HEMT parasitics

modeling/compensation. **In 2019 IEEE Topical Conference on RF/Microwave Power Amplifiers for Radio and Wireless Applications (PAWR)**, 1-4. doi: 10.1109/PAWR.2019.8708722.

[17] Tao, Y., Ishikawa, R., ve Honjo, K., 2015. Optimum load impedance estimation for high-efficiency microwave power amplifier based on low-frequency active multi-harmonic load-pull measurement. **In 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)**, 1-3. doi: 10.1109/APMC.2015.7411814.

[18] Gustafsson, D., Andersson, K., Leidenhed, A., Malmstrom, M., Rhodin, A., ve Wegeland, T., 2016. A packaged hybrid doherty PA for microwave links. **In 2016 11th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC)**, 508-511. doi: 10.1109/EuMC.2016.7824624.

[19] Popović, Z., ve García, J. A., 2017. Microwave class-E power amplifiers. **In 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)**, 1323-1326. doi: 10.1109/MWSYM.2017.8058855.

[20] Özmen, H., ve KURT, M. B., 2020. Meme kanseri tümörlerinin radar tabanlı mikrodalga tekniği ile görüntülenmesinde bant genişliğinin çözünürlüğe etkisinin incelenmesi. **Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi**, 11(1), 151-160. doi:10.24012/dumf.687422

[21] Sugitani, T., Iyomasa, K., Hangai, M., Kawamura, Y., Nishihara, J., ve Shinjo, S., 2018. 2.45 GHz ISM-band 450W high efficiency GaN pallet amplifier for microwave heating. **In 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)**, 1621-1623. doi: 10.23919/APMC.2018.8617151.

[22] Markinov, E. G., ve Radchenko, A. V., 2013. A 2–8 GHz ultrawideband 14 W power amplifier. **In 2013 23rd International Crimean Conference" Microwave & Telecommunication Technology"**, 96-97.

[23] Di Falco, S., Raffo, A., Scappaviva, F., Resca, D., Pagani, M., ve Vannini, G., 2010. High-efficiency broadband power amplifier design technique based on a measured-load-line approach. **In 2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium**, 1106-1109. doi: 10.1109/MWSYM.2010.5517729.

[24] Kim, J., Kim, Y., Lee, S., Jeong, J., ve Kwon, Y., 2012. A broadband power-reconfigurable distributed amplifier. **In 2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest**, 1-3. doi: 10.1109/MWSYM.2012.6259761.

- [25] Rosolowski, D. W., Wojtasiak, W., ve Gryglewski, D., 2010. A 27 dBm microwave amplifier with varactors-controlled matching networks. **In 18-th International Conference On Microwaves, Radar And Wireless Communications**, 1-4.
- [26] Kurokawa, S., Hirose, M., Mitui, T., ve Arata, S., 2017. Microwave receiving system for antenna measurement using optical devices up to 40 GHz. **In 2017 European Radar Conference (EURAD)**, 481-484. doi: 10.23919/EURAD.2017.8249252.
- [27] Fu, M., Jiang, N., Bornemann, J., ve Feng, Q., 2022. Accurate simulation of high-gain MMIC amplifiers with microstrip-type transistors. **IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems**. doi: 10.1109/TCAD.2022.3174165.
- [28] Yang, F., Song, L., ve Xu, Y., 2022. C-band high harmonics suppression GaN power amplifier MMIC for multiradar network application. **IEEE Microwave and Wireless Components Letters**. doi: 10.1109/LMWC.2022.3216907.
- [29] Gui, Y. F., Ding, D. Z., Jin, L. F., Chen, G. Q., Ma, J., ve Zou, Y. Q., 2020. Development of high-performance, long-life and high-reliability microwave amplifier for satellite application. **In 2020 Cross Strait Radio Science & Wireless Technology Conference (CSRSWTC)**, 1-3. doi: 10.1109/CSRSWTC50769.2020.9372556.
- [30] Kılınç, S., Köprü, R., Aksen, A., ve Yarman, B. S., 2014. Mixed element wideband microwave amplifier design via simplified real frequency technique. **In Proceedings of 2014 Mediterranean Microwave Symposium (MMS2014)**, 1-3. doi: 10.1109/MMS.2014.7088951.
- [31] Verkhova, G. V., ve Akimov, S. V., 2017. The universal model of the amplifier two-port circuit for structural-parametric synthesis of microwave transistor amplifiers. **In 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)**, 452-454. doi: 10.1109/SCM.2017.7970615.
- [32] Ikeda, H., ve Itoh, Y., 2018. A novel power combining technique for microwave generation with a combination of injection-locked high power oscillator and power-adjustable high efficiency amplifier. **In 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)**, 1001-1003. doi: 10.23919/APMC.2018.8617251.

[33] Hu, Z., Zhang, Q., ve Ma, K., 2021. A 1–42 GHz GaN distributed amplifier with adjustable gain by voltage-controlled switch. **IEEE Microwave and Wireless Components Letters**, 32(4), 339-342. doi: 10.1109/LMWC.2021.3123947.

[34] Narendra, K., Paoloni, C., Limiti, E., ve Collantes, J. M., 2008. High performance 1.5 W pHEMT distributed power amplifier with adjustable inter-stage cascaded network for 10÷ 2000 MHz. **In 2008 14th Conference on Microwave Techniques**, 1-4. doi: 10.1109/COMITE.2008.4569946.

[35] Hiçdurmaz, B., ve Özzaim, C., 2016. Dc~ 1.6 GHz GaAs mesfet'lere sahip dağılmış parametreli kuvvetlendirici. **Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi**, 21(2), 159-170. doi: 10.17482/uujfe.81252

[36] Peng, W., Qing, H., Jian, W., ve Yaqin, C., 2007. Design of C-band low noise amplifier with switch. **In 2007 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology**, 1-3. doi: 10.1109/ICMMT.2007.381411.

[37] Belen, A., 2021. WLAN uygulamaları için düşük gürültülü kuvvetlendirici tasarımı. **Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi**, (25), 665-668. doi: 10.31590/ejosat.920045

[38] Kula, K. , Ceylan, O. ve Yağcı, H. B., 2015. 2.4 GHZ, 5W, GaN HEMT AB sınıfı güç kuvvetlendiricisi tasarımı. **Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 8(2), 143-157. doi: 10.20854/befmbd.29367

[39] Alkurt, F. O. , Karaaslan, M. , Unal, E. ve Karadağ, F., 2019. Microwave imager design with 2.46 GHz microstrip patch antennas . **Adıyaman University Journal of Science**, 9(2), 404-416 . doi: 10.37094/adyujsci.552323

[40] Esmati, Z., Powell, D. A., Skipper, M. C., Abdalla, M. D., ve Tyo, J. S., 2022. Development of an equivalent circuit model for the design of arrays of electrically small antennas. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**. doi: 10.1109/TAP.2022.3161326.

[41] Işık, T. , Ceylan, O. ve Yağcı, H. B., 2016. 2 GHz dengeli optik-mikrodalga çevirici . **Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 9(1). doi: 10.20854/bujse.258172

[42] Çelik, A. R., Kurt, M. B., ve Helhel, S., 2018. Mikrodalga görüntüleme uygulamaları için bir düzlemsel dikdörtgen monopol anten tasarımı ve optimizasyonu. **Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi**, 9(1), 1-12.

[43] Wang, S. Y., Jin, X. R., Liu, P., ve Geyi, W., 2022. Fast multinull steering of antenna array. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, **21**(12), 2512-2516. doi: 10.1109/LAWP.2022.3199078.

[44] Kim, S., ve Nam, S., 2022. Wideband and ultrathin 2×2 dipole array antenna for 5G mm wave applications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, **21**(12), 2517-2521. doi: 10.1109/LAWP.2022.3199695.

[45] Fan, F. F., Chen, Q. L., Xu, Y. X., Zhao, X. F., Feng, J. C., ve Yan, Z. H., 2022. A wideband compact printed dipole antenna array with SICL feeding network for 5g application. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**. doi: 10.1109/LAWP.2022.3209326.

[46] Ceylan, O. , Ceylan, O. , Yağcı, H. , Yağcı, H. B. ve Paker, S., 2015. GaN hemt ile yüksek verimli X band f sınıfı güç kuvvetlendiricisi tasarımı. **Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi**, **8**(1), 33-49. doi: 10.20854/befmbd.31566

[47] Kızılbaş, O., 2022. RF ve mikrodalga devre tasarımında dielektrik taban kayıp çarpanının mikroşerit hat güç kayıplarına etkisinin araştırılması. **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi**, **38**(2), 233-241.