

**PLAZMA ANTENLERİN MODELLENMESİ VE
UYGULAMA ALANLARI**

**MODELING OF PLASMA ANTENNAS AND THEIR
APPLICATIONS**

GAMZE KILIÇERKAN BAŞLAR

PROF. DR. MEHMET EMRE TAŞGIN

Tez Danışmanı

PROF. DR. SERHAT ÇAKIR

Eş Danışman

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı için Öngördüğü

DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2024

ÖZET

PLAZMA ANTEN MODELLENMESİ VE UYGULAMA ALANLARI

Gamze Kılıçerkan Başlar

Doktora, Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Emre TAŞGIN

Eş Danışman: Prof. Dr. Serhat ÇAKIR

2024, 104 sayfa

Bu tez kapsamında çok yüksek frekans (VHF) bandında çalışan dipol plazma antenleri ve geleneksel dipol metal antenlerin çalışma prensiplerini ve karşılaştırmalı performansını araştırmaktadır. Plazma antenleri, geleneksel metal iletkenlerin aksine soylu gazları kullanarak çalışır. Araştırma, geri dönüş kaybı, kazanç ve empedans gibi anahtar parametreleri değerlendirmek için kapsamlı simülasyonlar ve deneyler içermektedir. Dipol plazma anteni, standart bir metal dipolün kolları olarak konumlandırılmış iki özel yapılandırılmış plazma kaynağı ile tasarlanmıştır. Başlangıçta, plazma parametrelerini belirlemek ve dielektrik geçirgenliğini hesaplamak için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Gaz dolu plazma tüpü, elektrotlara doğrudan bağlanarak bir AC güç kaynağı (10 kV, 30 mA) ile enerjilendirilmiştir. Hem deneysel hem de simülasyon sonuçları, dipol plazma anteninin metal muadili ile karşılaştırıldığında üstün empedans, Voltaj Duran Dalga Oranı (VSWR) ve kazanç özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, plazma antenlerinin metal antenlerde mümkün olmayan hızlı açma/kapama işlevselliği, onları radar sistemleri gibi gizli uygulamalar için önemli bir avantaj haline getirmektedir. Bulgular, plazma antenlerinin VHF bandında iletişim sistemlerinin performansını ve esnekliğini artırma potansiyelini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dipol Plazma Anten, Plazma Anten, CST Microwave Studio®, Drude Model, Plazma Anten Simülasyonu

ABSTRACT

MODELING OF PLASMA ANTENNAS AND THEIR APPLICATIONS

Gamze Kılıçerkan Başlar

Doctor of Philosophy, Department of Nanotechnology and Nanomedicine

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Emre TAŞGIN

2nd Supervisor: Prof. Dr. Serhat ÇAKIR

2024, 104 pages

This thesis investigates the operational principles and comparative performance of dipole plasma antennas and conventional dipole metal antennas operating within the Very High Frequency (VHF) band. Unlike conventional metal conductors, plasma antennas operate using noble gases. The research includes comprehensive simulations and experiments to evaluate key parameters such as return loss, gain, and impedance. The dipole plasma antenna was designed with two specially configured plasma sources positioned as the arms of a standard metal dipole. Initially, simulations were conducted to determine the plasma parameters and calculate the dielectric permittivity. The gas-filled plasma tube was energized by directly connecting it to electrodes using an AC power supply (10 kV, 30 mA). Both experimental and simulation results demonstrated that the dipole plasma antenna possesses superior impedance, Voltage Standing Wave Ratio (VSWR), and gain characteristics compared to its metal counterpart. Additionally, the rapid on/off functionality of plasma antennas, which is not achievable with metal antennas, makes them a significant advantage for stealth applications such as radar systems. The findings highlight the potential of plasma antennas to enhance the performance and versatility of communication systems in the VHF band.

Keywords: Dipole Plasma Antenna Diagnostics, Plasma Antenna, CST Microwave Studio®, Drude Model, Plasma Antenna Simulation,

TEŞEKKÜR

Doktora tezim süresince desteğini esirgemeyen birçok kişiye teşekkür etmek istiyorum. Öncelikle, danışmanım Prof. Dr. Mehmet Emre Taşgın'a, yol gösterici bilgisi, sabrı ve desteği için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eş danışmanım Prof. Dr. Serhat Çakır'a, kıymetli önerileri ve katkıları için minnettarım. Onun yapıcı eleştirileri ve motivasyonu, tezimi daha iyi bir seviyeye taşımamda büyük rol oynadı. Rehberliği ve vizyonu olmasaydı bu çalışma mümkün olamazdı.

Ailem, özellikle de sevgili eşim İsmail Başlar ve oğlum Alp Erman Başlar, bu uzun ve zorlu süreçte her zaman yanımda oldular. Eşimin sabrı, anlayışı ve desteği, bu yolculuğun her adımında bana güç verdi. Çocuğumun varlığı ise her zaman motivasyon kaynağım oldu. Onların sevgisi ve desteği, bu tezin arkasındaki en büyük güçtür.

Canım annem ve babama, hayatım boyunca verdikleri sevgi, destek ve emekleri için minnettarım. Onların inancı ve teşviki olmadan bugünlere gelmem mümkün olmazdı. Kardeşlerim Talha Kılıçerkan ve Emrah Kılıçerkan'a, her zaman yanımda oldukları ve bana verdikleri her türlü destek için teşekkür ederim.

Ayrıca, bu çalışmanın bir parçası olan ve katkı sağlayan tüm arkadaşlarıma ve meslektaşlarıma çok teşekkür ederim. Doktora sürecine birlikte başladığımız ve bu süreci tüm zorluklara rağmen birlikte üstesinden geldiğimiz kıymetli arkadaşım Dilek Güngör'e teşekkür ederim.

Son olarak, Yükseköğretim Kurulu (YÖK) 100/2000 Doktora Burs Programı'na verdiği destekten dolayı teşekkür ederim. Bu destek, akademik yolculuğumda önemli bir rol oynamıştır.

İÇİNDEKİLER

	<u>Page</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇERİK	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler	1
1.2. Araştırmanın Amacı ve Hedefi.....	2
1.3. Tezin Düzeni	3
2. GENEL BİLGİLER.....	5
2.1. Elektromanyetik Spektrum: VHF Bandı ve Uygulama Alanları	8
2.1.1. VHF Band Özellikleri	9
2.1.2. VHF Bandının Uygulama Alanları	10
2.2. Plazma Antenlerin Özellikleri ve Geleneksel Antenler Arasındaki Farklar	10
2.3. Plazma Anten Teknolojisindeki Gelişmeler	13
2.4. Plazma Antenlerin Çalışma Prensipleri	16
3. TEMEL KAVRAMLAR ve TEORİK ÇALIŞMA.....	18
3.1. Plazma Temelleri ve Özellikleri	18
3.2. Plazma Frekansı ve Elektron Yoğunluğu	19
3.3. Çarpışma Frekansı	20
3.4. Bağlı Geçirgenlik	21
3.5. Elektriksel İletkenlik	22
3.6. İyonizasyon Derecesi.....	22
3.7. Debye Uzunluğu ve Plazma Sıcaklığı	23

3.8. Anten Teorisi	24
3.8.1. Dipol Anten	25
3.8.2. Dipol Anten Tipleri	26
3.9. Anten Parametreleri	26
3.9.1. Giriş Empedansı ve Yansıma Katsayısı (S11)	26
3.9.2. Duran Dalga Oranı (VSWR)	27
3.9.3. Radyasyon Örüntüsü ve Yönlülük	28
3.9.4. Smith Chart.....	29
4. PLAZMA ANTEN TASARIMI ve SİMÜLASYONU	30
4.1. Drude Model	30
4.1.1. Gazların Kinetik Teorisi	31
4.1.2. Klasik Elektron Gazı Kavramında Kinetik Teorinin Uygulanması	31
4.2. Dipol Plazma Anten Tasarımı	35
4.3. Sayısal Simülasyon	36
4.4. Comsol Multiphysics Plazma Sütunu Simülasyonu	42
4.4.1. DC Parıltı Deşarj Teorisi İle Pozitif Plazma Kolon Oluşturma	42
4.5. Kavramsal Tasarım ve Simülasyon Parametreleri.....	44
4.6. Sonuçların Analizi	45
5. ÜRETİM ve DENEYSEL ARAŞTIRMA	49
5.1. Plazma Oluşturma Sistemi Tasarımı ve İnşası	49
5.2. Deneysel Setup ve Ölçüm Metodolojisi	52
5.3. Deneysel Kurulumun Kalibrasyonu ve Doğrulaması	56
6. PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ ve ANALİZİ	57
6.1. Ağ Parametrelerinin Simülasyon Analizleri.....	57
6.1.1. Radyasyon Örüntüsü, Kazanç, Yönlülük	58
6.1.2. Dipol Plazma Anteninin Etkin Uzunluğu	67
6.2. Basıncın Plazma Anten Üzerine Etkisi	68
6.2.1. Farklı Basınçların Plazma Parametreleri Üzerindeki Etkisi.....	69
6.2.2. Farklı Basınçların S11 ve VSWR Üzerindeki Etkisi	69
6.3. Deneysel Sonuçlar	71

7. SONUÇ ve TARTIŞMA	75
7.1. Ana Bulgular	76
7.2. Araştırmanın Katkıları ve Sınırlamaları	77
7.3. Gelecekteki Çalışmalar için Öneriler	78

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Page</u>
Çizelge 4.1 Dipol plazma anten tasarım parametreleri	35
Çizelge 4.2 Tüm plazma anten tipleri için karmaşık geçirgenlik parametreleri	38
Çizelge 4.3 Farklı gazlar için hesaplanmış drude parametreleri.....	41
Çizelge 4.4 Plazma değişkenleri	44
Çizelge 6.1 Tüm dipol antenler(plazma ve metal) için Rezonans Frekansı, S11 ve VSWR değerleri.....	57
Çizelge 6.2 Dipol Plazma ve Metal Anten Tasarımlarının Eş ve Çapraz Polarizasyon Değerleri.....	65
Çizelge 6.3 Tüm dipol antenler (plazma ve metal) için performans parametreleri ...	67
Çizelge 6.4 Farklı Basınçların Dipol Plazma Anten(Ar-Ne Karışımı) Üzerine Etki Parametrelerinin Analizi	69

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Page</u>
Şekil 2.1 Elektromanyetik Spektrum: Radyo Dalgaları [1]	8
Şekil 4.1 Dipol plazma anteninin tasarımının şematik temsili.....	35
Şekil 4.2 Dipol plazma anten dielektrik ve geçirgenlik grafikleri; (a) Argon (b) Neon (c) Argon-Neon	39
Şekil 4.3 CST Microwave Studio®’da anten tasarımı; (a) dipol plazma anteni. (b) dipol metal anteni	41
Şekil 4.4 DC deşarj ve harici devre tasarımının şematik temsili [2]......	43
Şekil 4.5 Plazma sütunu 2B elektron yoğunluğu.....	45
Şekil 4.6 Plazma sütunu eksenel uzunluğu boyunca elektron sıcaklığı (2B)	46
Şekil 4.7 Comsol Multiphysics plazma kolonu yoğunluk grafikleri ; (a) elektron yoğunluğu (b) argon iyonize atom yoğunluğu (c) uyarılmış argon atomlarının iyon yoğunluğu.	47
Şekil 5.1 Dipol Plazma Anten Kavramsal Mimarisi	49
Şekil 5.2 3D kelepçe tasarımı	50
Şekil 5.3 Dipol plazma anten için tasarlanan kapasitif bağlama	50
Şekil 5.4 Dipol plazma antenin deneysel düzeneği. (a) ön-görünüm. (b) üst-görünüm. (c) yan-görünüm.	51
Şekil 5.5 Yüksek Geçiren Filtre (HP 11668A)	52
Şekil 5.6 Network Analizör (NanoVNA-H)	52
Şekil 5.7 (a) Guanella akım bal-un(1:4) (b) Şematik gösterimi.....	53
Şekil 5.8 Uyumlandırma Devresi	55
Şekil 5.9 Toroid	55
Şekil 6.1 Tüm dipol antenler için geri dönüş kaybı (S11) simülasyon sonuçları	57
Şekil 6.2 Tüm dipol antenler için duran dalga oranı (VSWR) simülasyon sonuçları	58

Şekil 6.3	Dipol antenlerin rezonans frekansında 2B kazanç değerleri için simülasyon sonuçları; (a) Argon $f=115.72$ MHz, (b) Neon $f=117.26$ MHz, (c) Ar-Ne $f=116.42$ MHz, (d) Metal $f=119.22$ MHz.....	60
Şekil 6.4	Dipol antenlerin rezonans frekansında 3B kazanç değerleri için simülasyon sonuçları; (a) Argon $f=115.72$ MHz, (b) Neon $f=117.26$ MHz, (c) Ar-Ne $f=116.42$ MHz, (d) Metal $f=119.22$ MHz.....	62
Şekil 6.5	Dipol antenlerin rezonans frekansında 2B radyasyon deseni için Co-polarizasyon (Copol) ve Cros-polarizasyon (Cros-pol) değerleri şu şekildedir; (a) Argon $f=115.72$ MHz, (b) Neon $f=117.26$ MHz, (c) Ar-Ne $f=116.42$ MHz, (d) Metal $f=119.22$ MHz.....	64
Şekil 6.6	Dipol antenlerin, kazanç ve radyasyon verimliliği desenleri için simülasyon sonuçları şu şekildedir; (a) Argon, (b) Neon, (c) Ar-Ne, (d) Metal.	66
Şekil 6.7	Ar-Ne plazma dipol anteni farklı basınç değerleri için geri dönüş kaybı (S11) simülasyon verileri	70
Şekil 6.8	Ar-Ne plazma dipol anteni farklı basınç değerleri için VSWR simülasyon verileri	70
Şekil 6.9	Ar-Ne plazma dipol anteni geri dönüş kaybı (S11) için deneysel sonuçlar	72
Şekil 6.10	Ar-Ne plazma dipol anteni duran dalga oranı (VSWR) için deneysel sonuçlar	72
Şekil 6.11	Plazma dipol anten kapalı durumda iken deneysel sonuçlar	73
Şekil 6.12	Plazma dipol anten açık durumda iken deneysel sonuçlar	73
Şekil 6.13	Plazma dipol anten açık durumda iken deneysel sonuçlar	74

SİMGELELER VE KISALTMALAR

AC	: Alternating Current
DC	: Direct Current
ECM	: Electronic CounterMeasures
ELF	: Extremely Low Frequency
EMI	: Electromagnetic Interference
FM	: Frekans Modülasyonu
IFF	: Identification Friend or Foe
LF	: Low Frequency
MW	: MicroWave
RCS	: RadarMachine Cross Section
RF	: Radio Frequency
SMA	: SubMiniAture
SNR	: Signal Noise Ratio
UHF	: Ultra High Frequency
VHF	: Very High Frequency
VNA	: Vector Network Analyzer
VLF	: Very Low Frequency
VSWR	: Voltage Standing Wave Ratio

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler

Elektromanyetik dalga yayılımı ve alımı, günümüzün iletişim sistemlerinde kritik bir etkiye sahiptir. Elektromanyetik alanın dalga özelliklerinin ilk deneysel doğrulaması 'Heinrich Hertz' tarafından 1888 yılında yapılmıştır [3]. Bu durum, Maxwell denklemlerinin tam olarak oluşturulmasından yaklaşık 23 yıl sonra gerçekleşmiştir. 'Guglielmo Marconi Cornwall' ise, İngiltere'den Kanada'ya kablosuz radyo sinyali başarılı bir şekilde iletmeyi başarmıştır. Bu deney, iyonosferin radyo dalgasını dış uzaydan yeryüzüne geri yansıtarak Marconi'ye yardımcı olduğu tesadüfi bir keşiftir. Marconi'nin bu başarısı, günlük yaşantımızın her alanında bulunan kablosuz iletişim teknolojisinin temellerini atmıştır. Bu nedenle, radyasyonun farklı kaynaklar tarafından nasıl üretildiği ve yayıldığı, antenler ve kablosuz iletişim sistemleri açısından önemli bir araştırma konusudur [4]. Bu sistemlerde kullanılan antenlerin performansı, yayılan sinyal gücü, verimlilik ve bant genişliği gibi faktörlerin yanı sıra, fiziksel boyut, ağırlık ve maliyet gibi tasarım parametreleri de büyük önem taşımaktadır. Plazma antenler, bu tür talepleri karşılayabilen, esnek ve yenilikçi bir anten türü olarak son zamanlarda oldukça dikkat çekmektedir. Plazma antenler, gazın iyonlaşması sonucu oluşan plazma ortamını kullanarak elektromanyetik dalgaların iletilmesini ve alınmasını sağlamaktadır.

Bu tez kapsamında, VHF bandında çalışan plazma dipol antenlerin simülasyonu ve deneysel set-up'ının oluşturulması üzerine odaklanılmıştır. Bu çalışmada, plazma antenlerin farklı gaz ortamlarındaki performansı incelenmiştir. Özellikle, argon, neon ve argon-neon karışımı gazlar kullanılarak oluşturulan plazma antenlerin elektromanyetik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Aynı zamanda, aynı geometriye sahip metal antenin CST Microwave Studio® (Computer Simulation Technology) simülasyonları da gerçekleştirilerek, plazma antenlerle karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır.

Simülasyon çalışmaları için CST Microwave Studio® programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, plazma antenlerin kazanç, yönlülük(direktivite)

ve radyasyon verimliliği gibi temel performans metriklerini değerlendirmek için kullanılmıştır. Ayrıca, deneysel set-up oluşturulmuş ve argon-neon gaz karışımını içeren plazma anten üretimi yapılarak, deneysel ve simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Bu tezin amacı, plazma antenlerin elektromanyetik özelliklerini anlamak, optimize etmek ve gerçek dünya uygulamaları için uygun hale getirmektir. Tezin ilerleyen bölümlerinde, bu amaç doğrultusunda gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışmaların detaylı analizleri sunulacaktır.

1.2. Araştırmanın Amacı ve Hedefi

Bu tezin ana amacı, VHF bandında çalışan dipol plazma antenlerin simülasyonunu gerçekleştirmek ve deneysel set-up'ının oluşturulmasını sağlamaktır. Plazma antenler, elektron yoğunluğunun dalga boyu boyunca değiştiği ve geniş bir frekans bandında etkin bir şekilde çalışabilen esnek anten yapılarıdır. Bu çalışma, plazma antenlerin bu özelliklerini ve elektromanyetik davranışlarını derinlemesine incelemeyi, optimize etmeyi ve gerçek dünya uygulamaları için uygun hale getirmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, farklı gaz ortamlarının plazma antenin elektromanyetik performansına etkilerini anlamak ve en uygun gaz ortamını belirlemek de bu çalışmanın diğer önemli bir amacıdır.

Plazma Anten Simülasyonu:

Argon, neon ve argon-neon karışımı gazlar için CST Microwave Studio® ile simülasyonların gerçekleştirilmesi,

Aynı geometriye sahip metal anten için CST Microwave Studio® ile simülasyonların yapılması,

Kazanç, yönlülük ve radyasyon verimliliği gibi temel performans metriklerinin simülasyon sonuçlarıyla değerlendirilmesi,

Deneysel Düzenek(Set-up) Oluşturma:

Argon-neon gaz karışımını içeren plazma antenin deneysel düzeneğin oluşturulması,

Deneysel düzenek ile elde edilen verilerin analizi ve değerlendirilmesi,

Karşılaştırmalı Analiz:

Simülasyon ve deneysel sonuçların karşılaştırmalı olarak incelenmesi,

Farklı gaz ortamlarındaki plazma antenlerin elektromanyetik performanslarının karşılaştırılması,

Optimizasyon ve İyileştirme:

Plazma antenlerin performansını optimize etmek için gerekli düzenlemelerin yapılması,

Gerçek dünya uygulamaları için uygun hale getirilmesi,

Bu listelenen öğeler, plazma antenlerin elektromanyetik özelliklerinin anlaşılması, optimize edilmesi ve gerçek dünya uygulamaları için uygun hale getirilmesi hedeflenmektedir. Tezin ilerleyen bölümlerinde, bu amaç ve hedefler doğrultusunda gerçekleştirilen çalışmaların detaylı analizleri sunulacaktır.

1.3. Tezin Düzeni

Tezin organizasyonu aşağıdaki sırayla ele alınmıştır:

- **Bölüm 1**'de plazma antenlerin tanımı, önemi ve bu alanda yapılan önceki çalışmalar özetlenir. Tezin amacı ve odak noktası ifade edilere, araştırma probleminin tanımlanması ve tezde ele alınacak ana konular da vurgulanmıştır.
- **Bölüm 2**'de plazma antenler ve VHF bantta çalışan antenler üzerine yapılan önceki çalışmaları içerir. Konuyla ilgili önemli makaleler ve araştırmalar özetlenir. plazmanın fiziksel özellikleri, bağıl geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik kavramı gibi plazma parametreleri detaylı bir şekilde açıklanır. Plazma frekansı, çarpışma frekansı ve bağıl geçirgenlik arasındaki ilişkiler teorik olarak incelenir. Ayrıca, plazma antenlerin çalışma prensipleri ve elektromanyetik dalga yayılımı üzerindeki etkileri ele alınır. Literatürdeki boşluklar ve bu tezin bu boşlukları nasıl doldurmayı amaçladığı tartışılır.

- **Bölüm 3**'de plazmanın temel ve fiziksel özellikleri ve anten teorisi detaylı bir şekilde açıklanır. Ayrıca, plazma antenlerin çalışma prensipleri ve elektromanyetik dalga yayılımı üzerindeki etkileri ele alınır.
- **Bölüm 4**'te plazma anten tasarımı ve simülasyonu için hesaplamalı yöntemler açıklanır. Plazma antenlerin performansını analiz etmek için kullanılan simülasyon araçları detaylandırılır. CST Microwave Studio gibi yazılımların nasıl kullanıldığı anlatılır. Farklı gazlarla yapılan simülasyonlar ve etkileri hakkında bilgiler verilir.
- **Bölüm 5**'te plazma anten üretimi ve deneysel düzeneğin kurulumu detaylı bir şekilde açıklanır. Argon-neon gaz bileşimi ile yapılan deneysel ölçümler ve optimizasyonu hakkında bilgiler verilir.
- **Bölüm 6**'da farklı gazlarla yapılan simülasyon ve deneysel sonuçların performans etkisi ve analizi açıklanır. simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılır.
- **Bölüm 7**'de tezde elde edilen ana bulgular özetlenir ve araştırmanın genel sonuçları tartışılır. Plazma antenlerin gelecekteki araştırma ve uygulamaları için öneriler sunulur. Ayrıca, bu çalışmanın potansiyel etkileri ve uygulama alanları vurgulanır.

Bu tez organizasyon, tezin akıcı ve sistematik bir şekilde sunulmasını sağlar. Her bölüm, okuyucunun konuyu daha iyi anlaması ve tezin ana bulgularını takip edebilmesi için gerekli bilgileri sağlar. Bu yapı, tezin bütünlüğünü koruyarak, farklı gazlarla dipol plazma antenlerin ve aynı geometriye sahip metal antenlerin karşılaştırılmasını ve argon-neon gaz bileşimi ile yapılan deneysel ölçümleri detaylandırır.

2. GENEL BİLGİLER

Plazma durumu, iyonlaşmış pozitif partiküller ve serbest hareket eden negatif yüklü elektronlardan oluşan bir ortamdır. Maddenin dördüncü hali olarak bilinen plazma, evrende en yaygın bulunan madde formudur ve çeşitli alanlarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Örneğin, yıldırım oluşumu, neon reklam tabelaları ve plazma gravür, bu kullanım alanlarından bazılarıdır [5]. Plazma oluşturma süreci, doğru akım (DC), alternatif akım (AC), RF ve mikrodalga uyarımı gibi çeşitli yöntemlerle başarıyla gerçekleştirilebilir [6–8]. Bu çalışmanın deneysel düzeneği, AC kullanılarak oluşturulan dipol plazma anten parametrelerini incelemiştir. Plazma antenlerinin konsepti, tamamen yeni olmamakla birlikte, son zamanlarda yeni bir anten sınıfı olarak değerlendirilmiş ve önemli bir popülerlik kazanmıştır [9]. Bu antenler genellikle düşük basınçta bir nötr gaz (Ar, Ne, vb.) ile doldurulmuş bir veya birden fazla dielektrik tüpten (örn. kuvars) oluşur ve bu gaz, uyarım devresi olarak adlandırılan özel bir devre ile enerjilendirilir [10, 11]. Şekil 5.1’de görüldüğü gibi, plazma antenleri genellikle sinyal birleştirme yöntemleri olarak adlandırılan özel birleştirme yöntemleri kullanılarak çalıştırılır. Plazma antenleri, belirli koşullar altında reflektör olarak işlev gösterebilirken, aynı zamanda alıcı ve verici işlevselliğini de sergiler. Belirli frekans aralıklarında, plazma elektromanyetik dalgaları yansıtma kapasitesine sahiptir. Özellikle, plazma frekansından daha düşük frekanstaki dalgalar plazma içerisinde yansımaya tetikleyebilir. Bu, plazma antenlerinin belirli frekans aralıklarında reflektör olarak çalışabilme potansiyelini ortaya koymaktadır. Plazma antenlerinin esnek yetenekleri, elektromanyetik iletişimde frekans seçiciliği, geniş bant performansı ve hızlı tarama gibi avantajlar sunmaktadır [12]. Plazma antenlerinin operasyonel dinamikleri, hem aktif hem de pasif durumlarda çeşitli avantajlar sunar. Aktif durumda, plazma anteninin belirgin özellikleri şunlardır: (i) Elektromanyetik dalga iletimini kolaylaştırarak yüksek plazma frekansını aşan frekanslarda şeffaf ortamlar olarak işlev görür, bu sayede müdahaleleri azaltır. (ii) Plazma anteni, frekans, kazanç ve ışın genişliği gibi parametrelerde uyum sağlayabilen adaptif özelliklere sahiptir, bu da yeniden yapılandırma kapasitesi sunar. (iii) Elektriksel olarak gerçekleşen yeniden yapılandırma, mikrosaniyelerden

milisaniyelere kadar hızlı ayarlamaları mümkün kılar ve bu, mekanik yeniden yapılandırma mekanizmalarıyla karşılaştırıldığında avantaj sağlar. (iv) Farklı frekanslarda çalışan birden fazla plazma anteni, çakışma olmadan dizilere istiflenebilir, bu da esnekliği artırır.

Pasif durumda ise, plazma anteni minimal radar kesit alanına sahip dielektrik tüplere dönüşür [13], bu da onları gizli iletişim için uygun hale getirir [14]. Özellikle, plazma antenleri, co-site ve parazitik müdahaleleri önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu, pasif plazma anteninin hızlı bir şekilde deaktive edilmesiyle, plazmanın mikrosaniyelerden milisaniyelere kadar bir süre içinde söndürülmesiyle sağlanmaktadır [15]. Plazma antenlerinin özellikleri, özellikle uzay iletişimde önemli avantajlar sunmaktadır [16]. Elektriksel adaptasyon kabiliyetleri, sınırlı alanlarda istiflenebilirlikleri ve müdahale azaltma yetenekleri, ileri iletişim sistemleri için potansiyellerini göstermektedir. Plazma antenleri, metal antenlere göre üstün özelliklere sahiptir. Son yıllarda savunma sektöründe umut vadeden bir teknoloji olarak özellikle ilgi görmüşlerdir [17]. Plazma ortamını kullanarak elektromanyetik dalga yayılmasını kontrol eden bu antenler, yeniden yapılandırılabilirlik, ayarlanabilirlik ve geniş bantlı çalışma gibi benzersiz avantajlar sunmaktadırlar. Dipol plazma antenlerinin performansını tam olarak anlamak ve optimize etmek için, CST Microwave Studio® programı gibi avantajlı yazılım araçları kullanılarak kapsamlı araştırmalar ve simülasyonlar yapılmıştır [18, 19]. CST Microwave Studio® programını kullanarak yapılan simülasyon temelli çalışmalar, dipol plazma antenlerinin davranışlarını ve özelliklerini incelemekte önemli bir rol oynamıştır. Karmaşık sayısal teknikler kullanarak araştırmacılar, anten yapısı içinde ve çevredeki plazma ortamında elektromanyetik etkileşimleri analiz edebilmişlerdir. CST Microwave Studio® programı, araştırmacılara çeşitli tasarım parametreleri, çalışma koşulları ve plazma konfigürasyonları üzerinde araştırma yapma olanağı sunar [20]. Örneğin, Mansutti ve ark. [21], CST Microwave Studio® programını L-bandında çalışan çapraz plazma dipol antenini incelemek için kullanmışlardır. Simülasyonları, plazma parametrelerinin anten parametreleri üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Başka bir çalışmada, Carlo ve ark. [10], ideal plazma dipol anteni için giriş empedansını ve yansıma katsayısını analiz etmek için CST Microwave Studio® araçlarını kullanmışlardır. Simülasyonlar, ideal plazma dipolü ile gerçekçi plazma dipolü arasındaki karşılaştırmayı göstermiştir. Ayrıca, Shahmohamadi

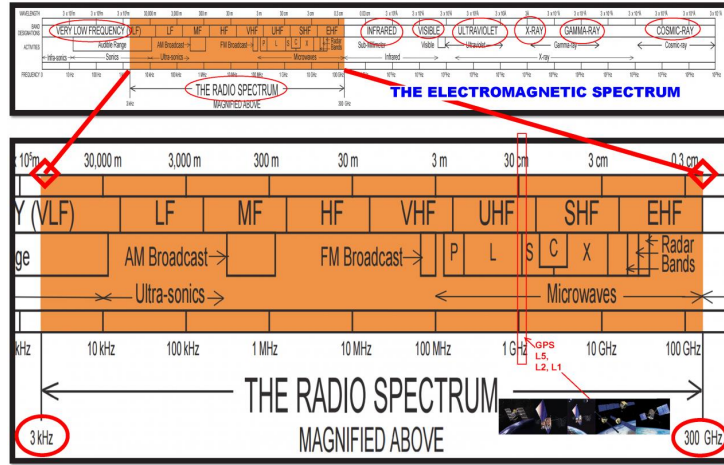
ve ark. [22], dipol plazma anteninin bant genişliği ve doğrultusuna plazma özelliklerinin etkisini incelemek için CST Microwave Studio® programını kullanarak simülasyonlar yapmışlardır. Bulguları, bant genişliği ve radyasyon özellikleri açısından istenen anten performansını elde etmede plazma parametrelerinin önemini vurgulamıştır. Floresan lambalar [23], genellikle ekonomik ve ticari olarak kolayca bulunabilir olduklarından, bir dizi deneysel çalışmada kullanılmıştır. Özel gaz kombinasyonlarının ve özel üretilmiş cam tüplerin kullanımı sınırlıdır. Örneğin, Podolsky ve ark. [24], gaz bileşimi ve farklı bir bağlantı yöntemine odaklanarak araştırmalarını hem deneysel hem de simülasyon temelli yaklaşımlarla yürütmüşlerdir. Plazma anteni deneylerinin maliyet ve zaman etkinlikleri nedeniyle, bu alanda genellikle sayısal ve simülasyon temelli çalışmalar tercih edilmektedir. Örneğin, Ghaderi ve ark. [25], sadece simülasyonlara dayanarak VHF bandında çalışan bir dipol anteninin parametrik bir değerlendirmesini sunmuşlardır.

Bu makalenin temel amacı, farklı gazlar ve gaz karışımlarından oluşan VHF bandında çalışan dipol plazma antenlerinin performansını incelemektir. Plazma antenlerinin, özellikle EMI (Elektromanyetik Müdahale) direnci açısından gösterdikleri özel dayanıklılık, savunma endüstrisindeki uygulanabilirliklerini vurgulamaktadır. Seçilen frekans aralığının amatör bantlar etrafında olması, hem sivil hem de askeri havacılık iletişim sistemleri için kullanıldığından, bu çalışma VHF bandı için özelleştirilmiştir. Ayrıca, yüksek frekans aralıklarında optimal performans elde etmek için plazma kolonunun fiziksel boyutlarını ayarlamak ve hedeflenen frekansta işlevselliğini sağlamak için daha hassas teknik çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Dahası, seçilen frekans aralığının daha duyarlı olan daha düşük frekanslara denk düşmesi nedeniyle, AC Plazma sistemi gürültüsü açısından hem olumlu hem de olumsuz etkilerin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, bu çalışma sadece VHF bandı uygulamalarının belirli gereksinimlerini ele almamakta, aynı zamanda bu frekans aralığında plazma antenlerinin işletilmesi tarafından ortaya konulan avantajlar ve zorluklar arasındaki karmaşık dengeyi anlamaya katkıda bulunmaktadır. Argon, neon ve ticari olarak mevcut argon-neon tüpleri kullanan bir dipol plazma anteninin tasarımını ve simülasyonunu sunuyoruz ve aynı boyutlara sahip bir metal antenle karşılaştırıyoruz. Ardından, deneysel ve simülasyon sonuçları, geri dönüş kaybı,

kazanç ve empedans olarak sunulmaktadır.

2.1. Elektromanyetik Spektrum: VHF Bandı ve Uygulama Alanları

Radyo iletişim bağlantılarının etkinliğini tahmin etmek için, frekans bandı anahtar bir özelliktir. Optimal frekans bandı, her iletişim sisteminin teknik gereksinimleri ve radyo yayılmasının koşulları tarafından belirlenir ve sınırlandırılmaktadır [26]. ELF, 3 kHz'nin altındaki frekansları ifade eder ve VLF, 3 kHz ile 30 kHz arasındaki frekansları kapsamaktadır. VLF bandı, dünya yüzeyi ve iyonosfer tarafından oluşturulan dalga kılavuzu aracılığıyla, uzun mesafelerde düşük bir zayıflama oranıyla (1000 km başına 0.1–0.5 decibel (dB) [27, 28] yayılmaktadırlar.



Şekil 2.1 Elektromanyetik Spektrum: Radyo Dalgaları [1]

LF, 30 kHz ile 3 MHz arasındaki frekansları kapsamaktadır. 1950'ler ve 1960'lar boyunca gemi ve uçak iletişimi için kullanılmış olsalar da, günümüzde genellikle yayın istasyonlarıyla kullanılmaktadırlar. Yere paralel olarak yayılan bu tür radyo dalgaları "yüzey" dalgaları olarak adlandırılmaktadır [27, 28].

HF, 3 MHz ile 30 MHz arasındaki frekansları kapsamaktadır. Bu spektrumdaki sinyaller, iyonosfer tabakaları tarafından oluşturulan yansımalar aracılığıyla yayılır ve uçaklar, uydu

iletişimi ve uzun mesafeli kara iletişimi için yayın istasyonları kullanılarak iletişimde sıklıkla kullanılmaktadırlar.

VHF bandı, 30 MHz ile 300 MHz arasındaki frekansları kapsamaktadır. Genellikle TV iletişimleri, uzun menzilli radar sistemleri ve radyo-navigasyon sistemleri için kullanılmaktadırlar.

UHF bandı, 300 MHz ile 3 GHz arasındaki frekansları kapsamaktadır. Bu frekans bandı, kablosuz mikrodalga bağlantıları, hücreli sistemlerin (sabit ve mobil), mobil-uydu iletişim kanalları, orta menzilli radarlar ve diğer uygulamalar için oldukça etkilidir.

Son yıllarda, 3 GHz'den daha yüksek frekansta radyo dalgaları (C-, X-, K-bantları olarak da bilinir, literatürde mikrodalga ve milimetre dalgaları olarak adlandırılır) modern kablosuz iletişim kanallarının oluşturulması ve yürütülmesi için yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır.

2.1.1. VHF Band Özellikleri

Uzun Menzil: VHF dalgaları, radyo dalgaları arasında daha uzun menzile sahiptir. Özellikle düz arazilerde ve deniz üzerinde etkili bir iletişim sağlar.

Düşük Enerji Kaybı: VHF dalgaları, daha düşük enerji kaybıyla yayılır, bu da daha uzun mesafelerde etkili bir iletişim sağlar.

Daha Yüksek Band Genişliği: VHF bandı, geniş bir frekans bandını kapsar, bu da birden fazla kanalın aynı anda yayın yapabildiğini mümkün kılar.

Çoklu Uygulamalar: Radyo yayınları, televizyon yayınları, amatör telsiz, askeri telsiz, hava trafik kontrolü ve radar gibi birçok uygulama için kullanılır.

2.1.2. VHF Bandının Uygulama Alanları

VHF bandı, FM (Frekans Modülasyonu) radyo yayınları için sıkça kullanılır. Radyo istasyonları, müzik, haber ve diğer içerikleri bu band üzerinden yayın yapmaktadırlar. Televizyon yayınlarının eski ve yaygın bir frekans bandıdır. Özellikle analog televizyon yayıncılığında bu bandın alt ve üst kısımları kullanılmaktadır. Amatör telsizciler için VHF bandı, geniş bant genişliği ve uzun menzili nedeniyle popüler bir seçenektir. Amatör telsizcilik, hobi olarak veya acil durumlarda iletişim sağlamak için dünyada oldukça yaygın kullanılmaktadır. Askeri telsiz ve radar sistemlerinde, VHF bandı yüksek performanslı ve güvenilir iletim ve alım sağlar. Askeri uygulamalarda düşük interferans ve yüksek güvenilirlik önemlidir, bu nedenle VHF bandı tercih edilmektedir. Hava trafik kontrolü, VHF bandı kullanarak uçaklarla yer istasyonları arasında iletişim sağlar. Bu bandın uzun menzili ve yüksek iletim kalitesi, hava güvenliği için kritik öneme sahiptir.

VHF bandı, elektromanyetik spektrumda önemli bir yer tutan ve birçok uygulama için kullanılan bir radyo frekans bandıdır. Yüksek frekans esnekliği, geniş bant genişliği, polarizasyon çeşitliliği ve düşük interferans gibi özellikleriyle, VHF bandındaki uygulamalarda plazma antenleri gibi modern anten teknolojileri içinde önemli avantajlar sunmaktadır.

2.2. Plazma Antenlerin Özellikleri ve Geleneksel Antenler Arasındaki Farklar

Son yıllarda hem kablosuz iletişimde hem de radar sistemlerindeki hızlı büyüme, antenlerin olası uygulamalarında ve gereksinimlerinde eşzamanlı bir büyümeye yol açmıştır. Bu yeni gereksinimler, kompaktlık, uygunluk, yönlülük ve frekans çevikliği için hızlı yeniden yapılandırılabilirliği içermektedir. Antenlerde bu gereksinimleri karşılayabilecek iletken ortam olarak iyonize gazların veya plazmaların kullanılması üzerine son zamanlarda araştırmalar hız kazanmıştır. Plazma antenler metal antenlerin tüm işlevlerini yerine getirebilir olup, radyo sinyallerin iletilmesi ve alınması için kullanılabilmesinin yanı sıra

metal antene göre birçok avantaja sahiptir. Plazma antenlerin metal antenlere göre sahip olduğu avantajlar;

1. Plazmanın enerjisi kapatılır kapatılmaz, plazma iletken olmayan haline geri döner ve bu nedenle radarda görünmez hale gelir.

2. Plazma aktif olduğu durumlarda bile çalışma frekansının dinamik olarak ayarlanması sonucu (Cut-off frekansı) Radar Cross Section (RCS) açısından büyüklük açısından denk metal antenlere göre 20-25 dB daha zayıf bir yansıma yapmaktadır.

3. Dinamik olarak ayarlanıp yeniden yapılandırılabilirler, böylece birden fazla anten ihtiyacını ortadan kaldırmaktadırlar.

4. Plazma antenler, metal antenlerde özellikle radar gibi kısa zamanlı yüksek güçlü pulse sinyallerde görünen “ringing effect”ten etkilenmez böylece anten resistif yapıya gerek duymaksızın kayıpsız kullanılabilir. Bu da radar menzili üzerinde iyileştirici etkiye sahiptir.

5. Plazma antenler yüksek güçlerde çalışabilmektedir.

6. Tek bir anten içinde birden fazla anten koyulmasına (Nested Antenna) olanak sağlayabildiklerinden anten kurulum alanını küçültebilirler ve co-site etkisi plazma antenlerde görülmez.

7. Metal antenlere kıyasla noise floor’u daha düşüktür. (Bu amaçla kullanıldığı frekansa uygun olarak *AC*, *DC*, *RF* Coupling yada lazer gibi yöntemler ile oluşturulan farklı plazmalar oluşturulabilir)

8. Elektronik harbe dirençlidirler, çok daha az termal gürültüye sahiptirler ve bu sayede daha iyi bir SNR ile daha hızlı veri hızları sağlayabilmektedirler.

9. Çok elemanlı plazma antenlerde elemanların farklı sıralamalarda açılıp kapanabilmesi ile yönlü anten olarak kullanılabilirler. Plazma antenler, benzersiz özellikleri, karakteristikleri ve geleneksel metal antenlere göre avantajları nedeniyle farklı alanlarda kullanılabilir;

Askeri Uygulamalarda; Plazma antenleri kapatıldığında ya da çalışma frekansından daha yüksek bir radar sinyali ile karşılaştıklarında geçirgen olur. Yani radarda görünmez hale gelmektedir. Gelecek askeri uygulamalar için plazma anten çok büyük bir potansiyele sahiptir.

Daha hızlı internet: Plazma antenler düşük termal gürültüleri nedeniyle daha hızlı veri aktarımı sağlayabilir ve bu nedenle Wi-Fi'den daha hızlı olan Wi-Gig (Wireless Gigabit Alliance) gibi yüksek hızlı internet sağlamak için kullanılabilir.

Radyo ve televizyon yayını: Plazma antenler tarafından yayılan sinyallerin sinyal gücü, geleneksel olarak kullanılan normal metal antenlerden nispeten daha güçlüdür, bu yüzden sönmülmeyen daha uzun süre dayanır, dolayısıyla yayın şirketleri sinyalleri başka alanlara iletmek için daha az röle istasyonuna ihtiyaç duyabilir. Plazma antenlerin varlığı hizmet sağlayıcı şirketler için yayın sisteminin maliyetini düşürebilir.

Uzay iletişimi: Plazma antenleri metal antenlerden daha hafiftir ve bu nedenle jet uçakları, ticari uçaklar gibi uzay araçlarında, hatta uzay mekiklerinde ve ayrıca insansız hava aracı sensör antenlerinde iletişim cihazları olarak kullanılabilir.

Plazma antenleri ayrıca gemilerde ve denizaltılarda mürettebatının gizli görevini tamamlamak için ve ayrıca balıkçı gemilerinin derin denizdeki balıkların yerini tespit etmesi, balistik füzelerin tespiti ve takibi, araç çarpışmasından kaçınma sistemi vb. gibi çeşitli uygulamalarda da kullanılabilir.

Ayrıca Plazma antenler metal antenlere göre özellikle uydu frekanslarında daha düşük bir termal gürültüye sahip olduğu için, uydu haberleşmesinde tercih edilebilir. Bunun yanında çoklu bir plazma anten seti elektronik olarak yönlendirilebileceği için, faz dizili(phased array) antenler yerine de tercih edilebilir.

Plazma antenler, metal antenler gibi su ile oksidasyon, iletkenlik vb. etkileşime girmediği için deniz ortamında özellikle denizaltı VLF alma/göndermede kullanılabileceği ile ilgili yurtdışı deniz kuvvetlerinin ciddi çalışmaları bulunmaktadır.

2.3. Plazma Anten Teknolojisindeki Gelişmeler

Radyo frekansı ("RF") iletiminin keşfinden bu yana, anten tasarımı neredeyse her iletişim ve radar uygulamasının ayrılmaz bir parçası olmuştur. Teknoloji, genel radyo frekansı sinyallerinin halka yayılmasından karmaşık silah sistemlerine kadar değişen uygulamalar için benzersiz anten tasarımları sağlamak için ilerlemiştir. En yaygın biçiminde, bir anten, bir veya daha fazla seçilmiş frekansta radyasyon yayınlamak için boyutlandırılmış iletken bir metal yüzeyi temsil eder. Antenler verimli olmalıdır, böylece en fazla miktarda sinyal gücü, yayılan dalga içinde harcanır ve anten yansımasında boşa harcanmaz.

Plazma anten teknolojisi, bir antenin iletken elemanı olarak bir tüp içinde (veya diğer muhafazada) iyonlaştırılmış gazı kullanır. Bu, genellikle iletken eleman olarak katı metal teller kullanan geleneksel anten tasarımından temel bir değişikliktir. İyonlaştırılmış gaz, birkaç önemli avantaja sahip verimli bir iletken elemandır. Gaz sadece iletim veya alım süresi için iyonlaştırıldığından, katı tel anten tasarımının "çınılama" ve ilişkili etkileri ortadan kaldırılır. Tasarım, çok kısa darbelerin yapılabilirdiği, birçok dijital iletişim ve radar formu için önemlidir. Tasarım ayrıca, frekans, yön, bant genişliği, kazanç ve ışın genişliği için kompakt ve dinamik olarak yeniden yapılandırılabilen bir anten oluşturma fırsatı sağlar. Plazma anten teknolojisi, geleneksel katı tel antenlerden daha verimli, daha hafif ve daha küçük boyutlu antenlerin tasarlanmasını sağlayacaktır.

Gaz elektriksel olarak şarjlandığında veya plazma durumuna iyonlaştığında iletken hale gelir, böylece radyo frekansı (RF) sinyallerinin iletilmesine veya alınmasına izin verir. Bir antenin iletken elemanı olarak bir tüp içinde iyonlaştırılmış gazı kullanırız. Gaz iyonlaşmadığında, anten elemanı var olmaz. Bu, genellikle katı metal telleri iletken eleman olarak kullanan geleneksel anten tasarımından temel bir değişikliktir. Plazma antenimizin askeri uygulamalarda gizlilik ve ticari uygulamalarda daha yüksek dijital performans gibi birçok avantaj sunduğuna inanıyoruz. Ayrıca, teknolojimizin birçok metal anten uygulamasında rekabet edebileceğine inanıyoruz. Plazma antenler, çoğu metal anten uygulamasıyla rekabet edebilecek belirgin avantajlar sunar. Plazma anteninin geleneksel metal elemanlara göre avantajları en belirgin şekilde, gizlilik ve elektronik harp gibi ana

endişelerin olduğu askeri uygulamalarda görülür. Diğer önemli askeri faktörler ağırlık, boyut ve yeniden yapılandırma yeteneğidir. Potansiyel askeri uygulamalar şunları içerir [29]:

1. Gemide/denizaltı antenlerinin değiştirilmesi.
2. İnsansız hava aracı sensör antenleri.
3. Kara tabanlı araçlar için IFF ("dost-düşman tanımlama") antenleri.
4. Gizli uçak anteni değişimleri.
5. Yayılma spektrumu vericileri de dahil olmak üzere geniş bantlı karıştırma ekipmanı.
6. ECM (elektronik karşı önlem) antenleri.
7. Faz dizisi elemanı değişimleri.
8. EMI (elektromanyetik girişim) azaltma
9. Balistik füzelerin tespit ve takibi
10. Yan ve arka lob azaltma

Askeri anten kurulumları oldukça sofistike olabilir ve gemi veya denizaltıdaki bir iletişim veya radar kurulumunun sadece anten kısmı milyonlarca dolara mal olabilir.

Plazma anten teknolojisinin ticari uygulamaları, telemetri, geniş bantlı iletişim, yer altı radarı, navigasyon, hava radarı, rüzgar kesimi tespiti ve çarpışma önleme, yüksek hızlı veri (örneğin İnternet) iletişimi, yayılma spektrumu iletişimi ve hücrel radyasyon korumasını içerir.

Daha Yüksek Güç \implies Plazma antenleri, metal antenlere göre daha düşük Ohmik kayıplar nedeniyle daha yüksek güce ulaşabilir. Plazmalar, düşük güçlü floresan lambalardaki plazmadan Princeton Üniversitesi'ndeki deneysel füzyon reaktörlerindeki son derece yüksek

güçlü plazmalara kadar geniş bir güç aralığına sahiptir. Bu aralıkta, yüksek güçlü bir plazma anteni hala düşük güçlü plazmadır. Plazmaların erimemesi nedeniyle, plazma antenleri ısıya ve ateşe dayanıklıdır. Daha yüksek elde edilebilir güç ve yönlülük, hedef ayırımı artırabilir ve S ve X bantlarında balistik füzelerin izlenmesine yardımcı olabilir.

Artırılmış Bant Genişliği \implies Elektrotlar veya lazerler kullanılarak plazma yoğunluğu kontrol edilebilir. Uzayda ve zamanda plazma yoğunluğunun kontrol edilmesine yönelik teorik hesaplamalar, aynı geometrideki karşılık gelen metal antenden daha geniş bir bant genişliğinin plazma anteni ile elde edilebileceğini öne sürmektedir. Bu artırılmış bant genişliği, ayırımı geliştirebilir.

EMI \implies Plazma anteni, düşük yoğunluklu veya kapalı modda gelen elektromanyetik sinyallere şeffaftır. Bu durum, EMI'yı ortadan kaldırarak veya azaltarak gizlilik sağlamaktadır. Birkaç plazma anteni, elektron yoğunluklarının ayarlanmasıyla yakın mesafede çalışabilir ve bir anten diğerlerine görünmez bir şekilde çalışabilir. Bu fiziksel düzenlemede, karşılıklı yan lop ve arka lop karmaşası büyük ölçüde azaltılır ve dolayısıyla karıştırma azalır.

Daha Yüksek Verimlilik ve Kazanç \implies Plazma anteninde, plazmadaki daha düşük omik kayıplar nedeniyle radyasyon verimliliği daha yüksektir. Duran dalga verimliliği, plazma yoğunluğunu ayarlayarak anten beslemeleri ile faz kombine eşleşmesinin sağlanabileceği ve yeniden yapılandırma sırasında korunabileceği için daha yüksektir. Tahminlere göre, anten verimliliğinde 20 dB'lik bir iyileşme sağlanabilir.

Yeniden Yapılandırma ve Çok Fonksiyonluluk \implies Plazma anteni, uzayda ve zamanda plazma yoğunluğunun kontrol edilerek uçuş sırasında yeniden yapılandırılabilir ve bu, herhangi bir metal anten düzenlemesinden çok daha esneklik sağlar. Bu, gemi üstü antenlerin boyutunu ve ağırlığını azaltarak gerekli elemanların sayısını azaltır. Bir seçenek, plazma antenlerinin etrafında kontrol edilen yoğunluk plazma battaniyeleri oluşturmaktır, böylece ana lop iletimi veya alımı için pencereler (battaniyenin düşük yoğunluklu bölümleri) ve pencereleri kapatılarak (plazma battaniyenin yüksek yoğunluklu bölgeleri) oluşturulur. Plazma pencereleme etkisi, bir tek plazma anten elemanında yönlülüğü ve kazancı artırır,

bu da bir diziye karşılık gelen metal anten dizisinden daha az elemana sahip olmasını sağlar. Arka lob ve yan loplara varsa plazma pencerelerini kapatmak, bunları ortadan kaldırır ve karıştırmayı ve karmaşayı azaltır. Bu 40 dB'nin altındaki yan lob azaltma, yönlülüğü ve ayırımı artırır. Ayrıca, plazma yoğunluklarını değiştirerek, tek bir anten bir bant genişliğinde çalışabilir (örneğin, iletişim) ve diğer bir bant genişliğini (örneğin, radar) bastırabilir.

Daha Düşük Gürültü \implies Plazma anteni, yük taşıyıcıları arasındaki çarpışma oranının metal antenden daha düşük olması nedeniyle daha az gürültüye sahiptir.

Mükemmel Yansıtıcı \implies Plazma yoğunluğu yüksek olduğunda, plazma kayıpsız bir mükemmel yansıtıcı haline gelir. Bu nedenle, geniş bir yelpazede hafif plazma yansıtıcı antenlerin olasılığı vardır.

2.4. Plazma Antenlerin Çalışma Prensipleri

Plazma antenlerin çalışma prensipleri, plazma ortamının özelliklerinden yararlanarak elektromanyetik dalgaların iletilmesi veya alınması amacıyla tasarlanmış antenlerdir. Bu antenlerin çalışma prensipleri, plazmanın karakteristiklerine dayanmaktadır.

Plazma antenlerinin çalışma prensiplerini anlamak için, öncelikle plazmanın temel özelliklerini anlamak önemlidir. Plazma, pozitif yüklü iyonlar, negatif yüklü elektronlar ve nötr parçacıkların bir arada bulunduğu, yüksek sıcaklık ve/veya düşük basınç altında iyonlaşmış bir gazdır. Elektronlar, yüksek hareket kabiliyetine sahip oldukları için elektromanyetik dalgaları iletebilirler. Bu özellik, plazma ortamının anten olarak kullanılabilmesini sağlamaktadır.

Plazma antenleri, plazma ortamını bir anten elemanı olarak kullanarak elektromanyetik dalgaları iletebilir veya alabilir. Plazma, hızlı değişen elektrik alanlarına maruz kaldığında elektronları hızlandırarak elektromanyetik dalgaları üretir. Bu durum, antenin plazma ortamındaki elektronların hareketinden kaynaklanan elektromanyetik dalgaları yaymasına neden olur. Aynı şekilde, plazma antenleri, dış elektromanyetik alanlara maruz kalan elektronlar aracılığıyla elektromanyetik dalgaları algılamak için kullanılabilir.

Plazma antenlerinin çalışma prensibi, plazma ortamının özellikleri ile elektromanyetik alanların etkileşimlerini içerir. Antenin tasarımı ve performansı, plazma ortamının özelliklerine, anten geometrisine ve çalışma frekansına [30].

3. TEMEL KAVRAMLAR ve TEORİK ÇALIŞMA

3.1. Plazma Temelleri ve Özellikleri

Plazma, geleneksel gaz, sıvı ve katı maddelerden oldukça farklı bir dördüncü haldir. 1920'lerde, I. Langmuir ve ekibi, nötr veya neredeyse nötr iyonlaşmış bir gazın içinde çok yüksek frekanslı elektriksel salınımların var olabileceğini keşfettiler ve bu duruma "plazma" ve "plazma salınımları" adını vermişlerdir. Maddelerin farklı halleri, belirli bağ enerjisi değerlerine karşılık gelen farklı enerji düzeylerini temsil etmektedir. Örneğin, katı halde moleküllerin kristal kafesindeki bağ enerjisi önemlidir. Bir molekülün ortalama kinetik enerjisi, bağ enerjisini aşarsa kristal yapısı bozulur ve sıvıya yada gaza dönüşür. Plazma haline elde etmek için her plazma parçacığının kinetik enerjisi, atomların iyonlaşma enerjisini aşmalıdır. Dolayısıyla, maddenin dördüncü hali, temel olarak her parçacığın sahip olduğu ortalama kinetik enerjiye bağlıdır [31].

Plazmalar, moleküllerinin bir kısmının uyarılmasıyla iyonlaşma sürecine geçen gaz kümelerinden oluşmaktadır. Serbest elektronlar ve iyonların varlığı, plazmayı elektriksel olarak iletken kılar. Plazma, evrende en bol bulunan maddenin halidir. Örneğin, yıldızlar, dahil olmak üzere güneşimiz, iyonlaşmış gaz kümelerinden oluşmaktadır.

Plazma oluşturmak ve sürdürmek için birçok yöntem mevcuttur. Sürdürme yöntemleri uygulama alanlarına ve istenen plazma özelliklerine göre çeşitlilik göstermektedir. Elektriksel boşaltma (DC, RF ve Mikrodalga boşaltma) [32] , termal yöntemler (ark boşaltma, indüksiyonlu ısıtma) [33] ve optik yöntemler [34] olarak sınıflandırılabilir.

Plazmanın Temel Özellikleri: iyonizasyon derecesi, elektriksel iletkenlik, bağlı geçirgenlik, debye uzunluğu ve plazma frekansı olarak sınıflandırılabilir.

Plazmanın Fiziksel Prensipleri: dalga-yayımlı özellikleri, manyetik alan etkileri çarpışma frekansı ve plazma sıcaklığı olarak sınıflandırılabilir. plazmanın temel özellikleri ve fiziksel prensipleri için belirtilen parametreler alt başlıklar altında genel özellikleri ile açıklanacaktır.

3.2. Plazma Frekansı ve Elektron Yoğunluğu

Plazma frekansı, plazmadaki elektronların iyonlara göre doğal olarak salındığı frekanstır ve dünya'nın iyonosferindeki koşullar için tipik olarak 2-20 MHz arasında değerlere sahiptir. Denklem 22 göre elektron sayısı n_e göre değişir ve dolayısıyla plazma frekansında (ω_p) elektron sayısına bağlı olarak değişmektedir. Plazma frekansı altındaki radyo dalgaları plazma boyunca yayılmazlar. Bu durumda plazma frekansı altında olan olan dalgalar yansıtılacaktır. Plazmadan yansıtılarak çalışan iletişim ve radar sistemleri için önemli bir etkiye sahiptir [35].

Plazma soğuk ve elektronların termal hareketleri göz ardı edilirse, elektron yoğunluğunun plazma frekansında salınım yaptığı varsayılmaktadır.

Elektron yoğunluğu, bir plazma içindeki belirli bir hacimde bulunan elektron sayısını ifade eder. Benzer şekilde, iyonlar ve nötral atomlar gibi diğer türler için de benzer sayı yoğunlukları tanımlanabilir. Bu tür parçacıkların her biri, belirli bir hız dağılımını izlemektedir. Örneğin, elektronlar Maxwell dağılımını takip ederse, bu dağılımın sıcaklığı elektron sıcaklığı (T_e) olarak adlandırılır.

Plazma içindeki nötral halde bulunan yüklü parçacıklar iyonize olmaya başladığında salınım hareketi yapmaya başlar. Yüklü bir parçacık üzerine etki eden kuvveti Newton kanunu kullanılarak Denklem 1'de gösterildiği gibi yazılabilir.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + eE = 0 \quad (1)$$

Tek boyut için Maxwell denklemlerinden $\frac{dE}{dx} = \frac{n_e}{\epsilon_0}$ kullanılarak $E = \frac{n_e}{\epsilon_0}x$ elde edilir, elektrik alan Denklem 1'de yerine konulursa $m \frac{d^2x}{dt^2} = -e \frac{n_e}{\epsilon_0}x$ elde edilir.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{ne^2}{\epsilon_0 m}x = 0 \quad (2)$$

İkinci dereceden Denklem 2'in çözümü, $x(t) = x_0 e^{i\omega t}$ şeklindedir. Burada ω_p Denklem 22 verilmiş olup plazma açılmal frekansı olarak adlandırılır.

3.3. Çarpışma Frekansı

Argon, neon gibi soy gazlarda elektron-nötr çarpışma sıklığının bilinmesi, özellikle hem temel hem de uygulama açılarından plazma süreçlerinin çeşitli yönlerini anlamak için son derece önemlidir. Bu tür çarpışma sıklığı, parçacıklar arasındaki enerji transferini değerlendirmek için sıklıkla kullanılır ve RF alanında kritik bir rol oynar. Çarpışmalı plazmalar, kısmen iyonlaşmış ve tamamen iyonlaşmış olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Kısmen iyonlaşmış plazmaların incelendiği durumlarda, ana çarpışma süreci genellikle elektronlar ve nötr atomlar arasındaki etkileşimdir. Özellikle düşük basınçlı plazmalarda, bu tür nötr parçacık çarpışmaları, diğer elastik süreçleri baskın hale getirir. Bu nedenle, bu çarpışma sıklığının doğru bir şekilde karakterize edilmesi, plazma etkileşimlerinin doğası hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır.

Plazma çarpışma frekansı (V_c), plazmadaki parçacıkların birbiriyle çarpışma sıklığını ifade eden önemli bir parametredir. Bu frekans, plazmanın elektriksel iletkenliği, enerji dağılımı ve transport özellikleri gibi kritik özelliklerini belirlemektedir. Çarpışma frekansları, elektronlar arası, iyonlar arası ve elektron-iyon çarpışmaları olmak üzere farklı türlerde olabilir. İyon-iyon çarpışma frekansı, plazmanın viskozite ve ısı iletimi gibi transport özelliklerini belirler. Bu frekans, iyonların birbirleriyle çarpışma sıklığını ifade etmektedir [36]. Elektron-elektron çarpışma frekansı, plazmanın termal iletkenliği ve enerji dağılımını etkilemektedir. Bu frekans, elektronların birbirleriyle çarpışma sıklığını ifade etmektedir [37]. Elektron-iyon çarpışma frekansı, plazmanın elektriksel iletkenliğini ve direnç özelliklerini belirlemektedir. Bu frekans, elektronların iyonlarla etkileşim sıklığını ifade etmektedir [38].

3.4. Bağıl Geçirgenlik

Plazma antenler, geleneksel metal antenlerden farklı olarak, plazmanın elektriksel ve manyetik özelliklerinden yararlanarak elektromanyetik dalgaları yaymak ve almak için kullanılır. Plazma antenlerde bağıl geçirgenlik (ϵ_r), antenin performansını etkileyen kritik bir parametredir (Denklem 25). Bağıl geçirgenlik, bir malzemenin elektrik alanını ne kadar iyi yönlendirdiğini ve enerjiyi nasıl ilettiğini belirler. Bağıl geçirgenlik, gerçek veya kompleks değerli olabilir ve malzemenin elektrik alanına karşı gösterdiği kayıpları temsil edebilir.

Meta malzemelerin sıfır veya negatif indeksi, elektromanyetik enerjiyi belirli bir alana odaklayarak dar ışın genişliği ile yüksek radyasyon kazancı elde edebilir. Bu yöntemin geleneksel yaklaşımlara göre belirgin avantajları vardır. Benzer şekilde, plazma belirli durumlarda negatif geçirgenliğe sahip özel bir tür meta malzeme olarak kabul edilebilir [39]. İyonlar ve elektronlardan oluşan plazma ortamı, elektriksel iletkenlik, elektriksel geçirgenlik ve manyetik geçirgenlik gibi elektriksel özelliklere sahip dağıtıcı bir malzemedir ve plazma Drude dağılım modeline uyar [40]. Bu çalışma kapsamında kullandığımız Drude modeli, metalik malzemelerin frekansa bağlı iletkenlik ve bağıl geçirgenlik özelliklerini tanımlamak için kullanılmıştır.

Negatif bağıl geçirgenlik ($\epsilon_r < 0$) plazmanın özel bir özelliğidir ve bu, plazmanın elektromanyetik dalgaları absorbe etmek yerine yansıtma veya yayma yeteneği sağlar. Bu özellik, plazma antenlerin tasarımında ve performansında büyük rol oynar.

Plazma antenlerin performansı, plazmanın bağıl geçirgenliğindeki değişikliklere oldukça duyarlıdır. Negatif bağıl geçirgenlik, plazma antenlerin rezonans frekansını etkiler ve bu da antenin verimliliğini artırır. Yüksek elektron yoğunluğu ve düşük çarpışma frekansı, bağıl geçirgenliğin negatif olmasını sağlar, bu da plazma antenlerin daha etkin bir şekilde çalışmasını sağlar. Negatif bağıl geçirgenlik, bu antenlerin daha geniş bir frekans aralığında etkin çalışmasını sağlar. Ayrıca antenin rezonans frekansını artırır ve radyasyon performansını iyileştirir.

3.5. Elektriksel İletkenlik

Elektriksel iletkenlik, bir malzemenin elektrik akımını ne kadar etkin bir şekilde ilettiğini belirten bir ölçümdür; elektriksel direncin tersidir. Herhangi bir malzeme, sıfır olmayan bir iletkenliğe sahip olduğunda, uygulanan bir elektrik alanında akım iletebilir ve bu süreçte enerjiyi dağıtarak, Joule ısıtması olarak bilinen dirençli bir kayba dönüştürür. Bu genellikle malzemenin sıcaklığında ölçülebilir bir artışa neden olur ve dolayısıyla malzemenin iletkenliğini değiştirir. İletkenlik, gerçek bir sayı olarak ifade edilir ancak malzeme anizotropik olabilir, yani iletkenliğinin farklı koordinat yönlerinde değiştiği anlamına gelir [41]. Plazmada elektriksel iletkenlik, elektronların hareketi ile belirlenir, çünkü elektronlar iyonlardan çok daha hafif ve hareketlidir. Genellikle Siemens/metre (S/m) birimiyle ifade edilir.

Metal antenlerle benzer şekilde, plazma antenlerinde de anten elemanı üzerindeki akımın dağılımı ve akışı, antenin yönlendirilmesini ve gücünü belirler. Yeterli bir akımın sürdürülebilmesi için, hem metallerin hem de plazmaların yeterince yüksek iletkenliğe sahip olması gerekir, ki bu da elektron yoğunluğuna (n_e) bağlıdır. Plazma iletkenliğinin gerçek bileşeni, elektron yoğunluğu ile doğru orantılıdır ve elektron-nötr çarpışma frekansı (ν_c) ile gelen elektromanyetik dalganın açısal frekansı ters orantılıdır (Denklem 28).

3.6. İyonizasyon Derecesi

Plazmanın temel tanımı, maddenin kısmen veya tamamen iyonize olduğu durumlarda geçerlidir. İyonizasyon derecesi, plazmadaki iyonların ve serbest elektronların yoğunluğunu tanımlar. Yüksek sıcaklıklarda veya güçlü elektromanyetik alanlarda, gaz molekülleri elektronlarını kaybederek iyonize olur. İyonizasyon derecesi, plazmanın temel bir özelliği olup, plazmadaki atomların ne kadarının iyonize olduğunu belirtir. İyonizasyon derecesi, plazmanın fiziksel ve kimyasal özelliklerini, dolayısıyla uygulama alanlarını belirleyen önemli bir parametredir [42].

İyonizasyon derecesi (α), plazmadaki iyonize olmuş parçacıkların toplam parçacık sayısına oranıdır ve şu şekilde tanımlanır:

$$\alpha = \frac{n_i}{n_n + n_i} \quad (3)$$

burada n_i iyon yoğunluğu ve n_n nötr atomların yoğunluğu belirtir.

iyonizasyon derecesi ile arasında bir değer alır. $\alpha=0$ ise tüm atomların nötr olduğunu, $\alpha=1$ ise tüm atomların iyonize olduğunu belirtir.

İyonizasyon derecesi, aşağıda belirtilen denklem kullanılarak hesaplanabilir. Bu denklem, termal denge durumundaki plazmanın iyonizasyon derecesini verir:

$$\frac{n_i^2}{n_n} = \left(\frac{2e kT}{h^2}\right)^{3/2} e^{-\frac{E_i}{kT}} \quad (4)$$

burada h planck sabiti ve E_i iyonizasyon derecesidir .

Sıcaklık, yoğunluk, enerji kaynağı ve basınç iyonizasyon derecesini etkileyen faktörlerdir [37].

3.7. Debye Uzunluğu ve Plazma Sıcaklığı

Plazmanın temel tanımı, maddenin kısmen veya tamamen iyonize olduğu durumlarda geçerlidir. İyonizasyon derecesi, plazmadaki iyonların ve serbest elektronların yoğunluğunu tanımlar. Yüksek sıcaklıklarda veya güçlü elektromanyetik alanlarda, gaz molekülleri elektronlarını kaybederek iyonize olur.

Debye uzunluğu, plazmanın elektriksel nötrlüğünü koruduğu mesafeyi tanımlar. Bu uzunluk, serbest elektronların ve iyonların birbirini etkilediği mesafedir ve şu şekilde hesaplanır [38]:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n_e e^2}} \quad (5)$$

burada k_B Boltzmann sabiti, n_e elektron yoğunluğu, m elektronların kütlesi, ϵ_0 boşluğun geçirgenliği e elektron yükü ve T_e elektron sıcaklığıdır.

Plazma sıcaklığı, serbest elektronların kinetik enerjisi ile ilgilidir. Yüksek sıcaklıklar, plazmanın iyonizasyon derecesini ve elektriksel iletkenliğini artırır. Plazma sıcaklığı, antenlerin performansını doğrudan etkileyebilir.

3.8. Anten Teorisi

Antenler, elektrik-elektronik mühendisliği, telekomünikasyon ve radyo frekansı alanlarında temel bir role sahiptir ve kablosuz iletişim sistemlerinin anahtar bileşenlerindedir. Temel işlevi, elektriksel enerjiyi elektromanyetik dalgalar halinde yaymak veya toplamak için kullanılan elektromanyetik aygıtlardır. Antenler, iletişim sistemlerinde veri iletimi, radyo yayını, radar uygulamaları, uzaktan algılama ve diğer birçok uygulama alanında kullanılmaktadır [43].

Bir antenin çalışma prensibi, elektrik sinyallerini elektromanyetik dalgalar şeklinde dışarıya yaymak veya elektromanyetik dalgaları toplamak ve bunları elektrik sinyallerine dönüştürmekten ibarettir. Gönderim modunda, anten bir elektrik sinyalini elektromanyetik dalgalar halinde yayarak serbest uzaya iletilmesini sağlar. Alım modunda ise, anten, elektromanyetik dalgaları toplar ve bunları bir alıcı cihaza aktarır.

Antenlerin tasarımı, birçok faktörü dikkate almayı gerektirir. Bu faktörler arasında frekans aralığı, bant genişliği, kazanç, verimlilik, polarizasyon ve çevresel koşullar gibi parametreler bulunmaktadır. Her uygulama için optimum performansı sağlamak için anten tasarımı, bu faktörlerin dikkatlice analiz edilmesini ve uygun bir şekilde optimize edilmesini gerektirir.

Anten tasarımı, genellikle elektromanyetik teorisinin ve anten teorisinin karmaşık prensiplerine dayanmaktadır. Bu prensipler, antenin geometrisi, malzemesi ve çalışma frekansı gibi faktörlere göre belirlenir. Gelişmiş bilgisayar destekli tasarım (Örneğin CST) yazılımları ve simülasyon araçları, anten tasarım sürecini kolaylaştırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Antenler, kablosuz iletişim sistemlerinin temel taşlarıdır ve modern iletişim teknolojilerinin gelişimi için hayati öneme sahiptirler. Antenlerin doğru tasarımı ve uygulanması, iletişim sistemlerinin performansını artırabilir ve güvenilirliğini sağlayabilir. Bu nedenle, anten tasarımı ve geliştirilmesi, elektrik mühendisliği ve telekomünikasyon alanlarında sürekli olarak araştırılan ve geliştirilen bir konudur.

3.8.1. Dipol Anten

Dipol anten, kablosuz iletişim sistemlerinde kullanılan temel bir anten türüdür. Adını, yapısının iki yarı dalgadan oluşmasından almaktadır. Her yarı dalga, antenin ortasındaki bir besleme noktasından itibaren uzanır ve antenin her iki ucunda sonlanmaktadır.

Dipol antenin temel çalışma prensibi, yarı dalgalar arasındaki elektriksel akımın dalga boyu boyunca titreşmesine dayanır. Bu titreşimler, antenin uçlarından elektromanyetik dalgaların yayılmasını sağlar. Genellikle, dipol antenler yatay olarak yerleştirilir ve yaydıkları elektromanyetik dalgalar dikey bir düzlemde en güçlü halindedir.

Dipol antenlerin boyutu, çalışma frekansına göre belirlenmektedir. Bir dipol antenin uzunluğu, kullanılan frekansın yarısı olan yarı dalga boyu uzunluğunda olmalıdır. Bu nedenle, dipol antenler, belirli bir frekans aralığında en etkili performansı sergilerler.

Dipol antenlerin en yaygın kullanım alanlarından biri, radyo frekansı iletişim sistemleridir. Televizyon, radyo yayını, kablosuz internet ve cep telefonu iletişimi gibi birçok uygulamada dipol antenler kullanılmaktadır. Ayrıca, radar sistemleri, uzaktan algılama ve bilimsel araştırmalarda da dipol antenler sıkça kullanılmaktadırlar.

Dipol antenlerin avantajları arasında basit yapısı, geniş bant genişliği ve doğrusal polarizasyonunun sağladığı kolaylık yer alır. Bununla birlikte, dipol antenlerin etkinliği, boyutları ve yerleşimleri gibi faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle, antenin tasarımı ve uygun konumlandırılması, en iyi performansın elde edilmesi için önemlidir.

3.8.2. Dipol Anten Tipleri

Yarım dalga dipol anteni: En yaygın olarak kullanılan türdür ve yarım dalga uzunluğundadır, bu nedenle rezonans anteni olarak adlandırılmaktadır.

Çoklu yarım dalga dipol anteni: Tek sayıda yarım dalga uzunluğunda olan bir anten veya anten türüdür.

Katlanmış dipol anteni: Uçlar arasındaki yarım dalga uzunluğunu korurken, ek bir iletken uzunluk iki ucu etkili bir şekilde birbirine bağlamaktadır.

Kısa dipol: Uzunluğu yarım dalga uzunluğundan çok daha kısadır. Yarım dalga uzunluğunun altında bir anten, besleme empedansının yükselmesine ve frekans değişikliklerine daha az bağımlı bir tepki göstermesine neden olur. Bu tip antenlerin akım profili genellikle üçgen bir dağılıma sahiptir.

Rezonans olmayan dipol: Rezonans frekansından uzakta çalıştırılabilir ve yüksek bir empedans besleyici ile beslenebilir. Bu, çok daha geniş bir bant aralığında çalışmasını sağlamaktadır.

3.9. Anten Parametreleri

Kablosuz bir cihaz için anten seçerken dikkate alınması gereken çeşitli parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler arasında, antenin etrafındaki farklı yönlere göre radyasyon dağılımı, antenin verimliliği, istenen performans için gereken bant genişliği ve maksimum güç transferi için anten eşleştirmesi gibi faktörler öne çıkmaktadır. Bu özelliklerin tanımlanması ve değerlendirilmesi hakkında detaylı bilgi alt başlıklar halinde sunulmaktadır.

3.9.1. Giriş Empedansı ve Yansıma Katsayısı (S11)

Bir antenin giriş empedansı, anten iletim modundayken terminallerine uygulanan voltaj ile akım arasındaki oran olarak tanımlanır. Giriş empedansı (Z_L), giriş direnci (R) ve

giriş reaktansı (X) olarak adlandırılan sanal bir kısımdan oluşur(Denklem 6). Anten giriş empedansı başka bir temel parametre olan yansıma katsayısı Γ ile ilgilidir.

$$Z_L = R + jX \quad (6)$$

Geri dönüş kaybı, antene iletilen sinyalin ne kadarının geri döndüğünün ölçümü olarak nitelendirilir. İdeal olan antene ilettiğimiz sinyalin tamamının antenden yayılması olmasına rağmen iletim hattı uyumsuzlukları, anten uyumsuzluğu, bağlantı noktalarındaki hatalar gibi sebepler ile antene gönderilen sinyalin bir kısmı geri döner. İdeal olarak gönderilen sinyalden -10 dB ve daha düşük değerlerin geri dönmesi kabul edilebilir ve nicel bir değer olarak ele alınır. Geri dönen sinyal ne kadar düşük ise, o kadar çok sinyalin antenden çıkış yapacağı varsayılmaktadır. S11 matematiksel olarak Denklem 7 'de verilmiştir. Burada Γ yansıma katsayısı, Z_L giriş empedansı(antenin empedansı) ve Z_0 ise çıkış empedansıdır. [44].

$$\Gamma = (Z_L - Z_0)/(Z_L + Z_0) \quad (7)$$

Yansıma katsayısını dB olarak ifade ederek geri dönüş kaybı (Return loss) Denklem 8 'de gösterildiği hesaplanmaktadır.

$$-20x\log_{10}(\Gamma) \quad (8)$$

3.9.2. Duran Dalga Oranı (VSWR)

VSWR (Voltage Standing Wave Ratio), bir iletim hattındaki veya bir antende meydana gelen enerji yansımalarını ifade eden ve bir oranı ölçen parametredir. Bu oran, genellikle bir antenin veya iletim hattının elektriksel eşleşme ve uyumluluk durumunu değerlendirmek için kullanılmaktadır.

VSWR, bir elektriksel dalganın bir iletken sistemde nasıl seyahat ettiğini ve yansıma olup olmadığını ölçer. Yüksek bir VSWR değeri, enerji yansımalarını ve antenin çalışma frekansında düzensizlikleri gösterir, bu da antenin veya iletim hattının verimliliğini düşürdüğü anlamına gelmektedir. İdeal bir durumda, VSWR değeri 1 olacaktır, bu durumda tüm enerji aktarılır ve yansıma olması beklenmez.

VSWR, Denklem 9 ile ifade edilir:

$$VSWR = (1 - \Gamma)/(1 + \Gamma) \quad (9)$$

Burada: VSWR, Duran Dalga Oranını ifade etmektedir. Γ , yansıma katsayısıdır ve enerjinin ne kadarının anten veya iletim hattına geri yansıdığını belirlemektedir.

Γ değeri, genellikle S11 parametresi ile ilişkilidir, ki bu, bir antenin yansıma katsayısını gösteren bir başka önemli parametredir.

VSWR değerleri şu şekilde yorumlanır:

VSWR=1 :İdeal durumu ifade etmektedir. Tam eşleşme ve hiçbir enerji yansıması olmadığı anlamına gelir.

VSWR>1:Yüksek değerler, enerji yansımalarını ve düşük verimliliği göstermektedir.

VSWR<1:Bu durum pratikte mümkün değildir, çünkü bir iletken sisteminde her zaman bir miktar enerji yansıması olacaktır.

VSWR değerleri, özellikle RF (Radyo Frekans) ve mikrodalga uygulamalarında, anten tasarımı ve iletim hattı karakterizasyonunda önemli bir role sahiptir.

3.9.3. Radyasyon Örüntüsü ve Yönlülük

Anten güç deseni, elektromanyetik enerjinin uzayda nasıl yayıldığını gösterir. Antenler, telekomünikasyon sistemlerinde hayati bir rol oynar ve ışınma deseni genellikle uzak alan

mesafelerde incelenir. Radyasyon örüntüsü, anten tarafından yayılan elektromanyetik alanın, antenin belirli bir uzaklıkta, açısal olarak nasıl dağıldığını gösteren bir grafikdir. Antenin ışınma deseni, ana lob ve yan loblar adı verilen farklı bileşenlerden oluşur. Ana loblar, ışınmanın en yoğun olduğu yönde bulunan bileşenlerdir. Yan loblar ise ana loblardan farklı yönlerde doğru yayılan ve genellikle istenmeyen yönlerde ışınma gösteren bileşenlerdir [45].

3.9.4. Smith Chart

Smith Chart, mühendis Phillip H. Smith tarafından 1939'da geliştirilmiş bir grafikdir. Bu grafik, kompleks empedans ve yansıma katsayılarını dönüştürmek ve görselleştirmek için logaritmik bir ölçek kullanır. Smith Chart, empedans (Z) ve admittans (Y) grafiklerini dairesel bir düzlemde temsil eder ve empedans dönüşümleri, yük eşleştirme ve devre analizi gibi birçok uygulamada kullanılır [46].

Smith Chart, gerçek ve sanal eksenlerin birleşimi ile oluşturulan bir dizi daireden oluşur:

Gerçek (Re) Ekseni: Smith Chart'ın yatay eksenidir ve saf direnç (real) bileşenlerini gösterir.

Sanal (Im) Ekseni: Smith Chart'ın dikey eksenidir ve saf reaktans (imaginary) bileşenlerini gösterir.

Konstant Reaktans Daireleri: Sabit reaktans değerlerine sahip noktaları temsil eder ve yatay eksene dik daireler şeklinde çizilir.

Konstant Direnç Daireleri: Sabit direnç değerlerine sahip noktaları temsil eder ve yatay eksene paralel daireler şeklinde çizilir [47].

4. PLAZMA ANTEN TASARIMI ve SİMÜLASYONU

Plazmanın kinetik tanımı, Liouville denklemini temel alan birçok parçacık tanımıyla yapılabilir. Liouville denkleminin temel alınmasıyla, Boltzmann Taşıma denklemi ve çarpışmasız Boltzmann denklemi veya Vlasov denklemi elde edilerek plazmanın kinetik bir tanımı elde edilebilir. Plazma anten özellikleri, plazmanın akışkan modeli ile çok daha iyi açıklanır. Plazmanın akışkan modelinde, plazmanın makroskopik değişkenleri bulunur. Bu makroskopik değişkenler arasında yoğunluk, parçacık akısı, hız, akım yoğunluğu, ısı akısı ve basınç yer almaktadır. Klasik akışkan dinamiğinin Navier-Stokes ve süreklilik denklemleri ile verilen bir tanımına benzer şekilde, plazmanın akışkan modeli momentum denklemleri, süreklilik denklemleri ve Maxwell denklemleri ile verilir. Plazma fiziğinin iki-akışkan modeli, elektronları ve iyonları momentum transfer çarpışmaları ve Maxwell denklemleri aracılığıyla birbirine bağlı iletken akışkanlar olarak tanımlar. İlgili denklem kümesi süreklilik, momentum ve Maxwell denklemlerini içerir. İki akışkan denklemlerinde iyonlar ve elektronlar ayrı türler olarak tanımlanır. Plazma fiziksinin bir-akışkan modeli, elektronların ve iyonların yoğunluğunu ve hızını birleştirir [48].

Plazma antenleri, yeniden yapılandırılabilir, uyarlanabilir ve benzersiz elektromanyetik özelliklere sahip oldukları için geleneksel metal antenlere alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Bu bölüm, plazma antenlerinin tasarım prensiplerini, yapılandırmalarını ve parametrelerini, simülasyonları odak noktası olarak ele alacaktır.

4.1. Drude Model

Drude modeli, metallerin elektriksel ve termal iletim özelliklerini tanımlamak için kullanılan klasik bir modeldir. 1900 yılında Paul Drude tarafından geliştirilmiştir ve bir metaldeki serbest elektronların bir elektrik alanının etkisi altında hareket eden bir sıvı olarak ele alınabileceği fikrine dayanmaktadır. Drude modelinde, bir metaldeki serbest elektronların, pozitif iyonlarla çarpışmalar yoluyla etkileşime girdiği varsayılır. Bu çarpışmalar elektronların enerji kaybetmesine neden olur, bu durum hızlarının düşmesine

ve sıcaklıklarının artmasına neden olur. Model, bu süreçleri tanımlamanın ve bir metalin elektriksel ve termal iletkenliğini hesaplamının basit bir yolunu sunar. Drude modelinin temel varsayımlarından biri, serbest elektronların kafesteki belirli bir iyonla bağlantılı olmadığı ve bu nedenle metaller boyunca serbestçe hareket edebildiğidir. Bu varsayım, metallerin yüksek sıcaklıklarda kafesin nispeten düzensiz olduğu ve elektronların tek tek iyonlara güçlü bir şekilde bağlı olmadığı durumlarda geçerlidir. Ancak, düşük sıcaklıklarda kafes daha düzenli hale gelir ve elektronlar iyonlara daha güçlü bir şekilde bağlanır, bu da Drude modelinin tahminlerinden sapmalara yol açar.

4.1.1. Gazların Kinetik Teorisi

Bu teori, gaz moleküllerini nötr katı küreler olarak ele alır; bu moleküller, çarpışma olana kadar düz bir çizgide hareket ederler ve bu süreçte üzerlerine herhangi bir kuvvet etkilemez. Ortalama serbest zaman veya gevşeme zamanı olarak adlandırılan kavram, bir molekülün çarpışma yaşamadan önce seyahat ettiği ortalama süreyi ifade eder. Çarpışmalar, moleküllerin hızını tamamen rastgele hale getirir ve tüm önceki hafızayı siler. Moleküller, çarpışmadan sonra, çarpışmanın gerçekleştiği bölgenin sıcaklığına uygun bir hızla ortaya çıkarlar.

4.1.2. Klasik Elektron Gazı Kavramında Kinetik Teorinin Uygulanması

Atomların iyon çekirdekleri hareketsizdir (çekirdek elektronları nükleusa sıkıca bağlı kalırken); değerlik elektronları ise gevşek bir şekilde bağlanmıştır ve metallerde tüm metal boyunca serbestçe hareket edebilirler - bu elektronlar iletken elektronlar olarak bilinir. Not: Elektronlar (gaz molekülleri gibi) yüklüdür ve diğer yüklü varlıkların arka planında hareket ederler; elektron yoğunlukları da oldukça yüksektir ($\sim 10^{28}/\text{cm}^3$); ancak Drude, metaller için bu kinetik teoriyi (nötr seyrek klasik gazlar için geçerli olan) uygulamıştır.

Drude modelinin temel varsayımı:

Çarpışmalar arasında, elektronlar herhangi bir elektromanyetik alanın olmadığı durumlarda düz bir çizgide hareket ederler. Bu durumda elektron-elektron etkileşiminin etkisi göz ardı edilir, ancak bağımsız elektron yaklaşımı kabul edilebilir düzeydedir. Elektron-iyon etkisi de göz ardı edilir ve bağımsız elektron yaklaşımı bu durumda tamamen geçersizdir.

Çarpışmalar arasındaki ortalama serbest zaman τ 'dur. Bu, birim zamanda çarpışma olasılığını ifade eder ve sonsuz derecede küçük bir zaman aralığında dt için çarpışma olma olasılığı dt/τ 'dur. Bu varsayıma göre, τ elektronun pozisyonu veya hızından bağımsızdır ve kabul edilebilir bir varsayımdır.

Elektronlar, ızgara ile çarpışmalar yoluyla termal dengeye ulaşırlar. Çarpışmadan sonra, elektronlar rastgele bir yönde ve çarpışmanın gerçekleştiği bölgenin sıcaklığına uygun bir hızda ortaya çıkarlar. Bölgenin sıcaklığı arttıkça, ortaya çıkan elektronların hızı da artar.

Modelin ele almaya çalıştığı konular:

1. Metal ve yalıtkan arasındaki ayırım,
2. Metallerde elektrik iletimi,
3. Metallerin termal iletkenliği,

Elektromanyetik dalgaların metallerde yayılmasına uygulama, metaldeki elektriksel ve manyetik alanların nasıl davrandığını anlamak için önemlidir. Metaller, elektriksel iletkenlikleri nedeniyle elektromanyetik dalgaları hızla iletirler. Bu uygulama, Maxwell denklemleri gibi temel elektromanyetizma prensiplerini kullanarak metaldeki elektromanyetik dalgaların davranışını analiz eder. Bu analiz, metallerin optik özelliklerini, yani yansıma, absorpsiyon ve iletkenlik gibi özelliklerini incelemek için kullanılır. Ayrıca, elektromanyetik dalgaların farklı frekanslarda nasıl davrandığını ve plazma frekansının önemini araştırmak için de kullanılır.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (10)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (11)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{d\mathbf{B}}{dt} \quad (12)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\mathbf{E}}{dt} \quad (13)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\frac{d(\nabla \times \mathbf{B})}{dt} \quad (14)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\frac{d(\mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\mathbf{E}}{dt})}{dt} \quad (15)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\frac{d(\mu_0 \sigma \mathbf{E} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\mathbf{E}}{dt})}{dt} \quad (16)$$

Yukarıdaki denklemlerin çözümü için Denklem 17 kullanılarak Denklem 18 elde edilir.

$$E(t) = E(x)^{-i\omega t} \quad (17)$$

$$\nabla^2 E + (\omega^2/c^2)(\epsilon(\omega)E) = 0 \quad (18)$$

burada $\epsilon(\omega)$ metalin karmaşık dielektrik sabitidir ve Denklem 19 ile ifade edilir.

$$\epsilon(\omega) = (1 + i\sigma/\omega\epsilon_0) \quad (19)$$

$\omega\tau \gg 1$ olduğu durumda,

İlk yaklaşıma göre

$$\epsilon_r(\omega) \sim 1 - \omega_p^2/\omega^2 \quad (20)$$

burada ω_p plazma frekansı olarak adlandırılır ve denklem 22'de matematiksel ifadesi verilmiştir. Buna göre $E(x) = E_0 \exp(i\kappa x)$ uzaydaki E'nin x'e bağımlılığının dalga denklemini denklem 18 çözersek;

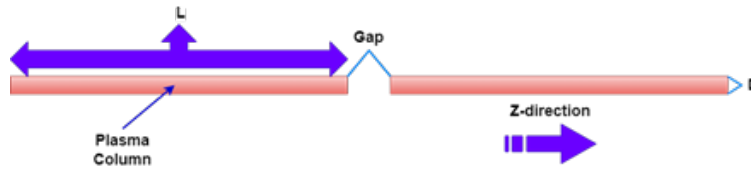
$$\kappa^2 = (\omega^2/c^2)\epsilon(\omega) \quad (21)$$

1. $\omega \ll \omega_p$: $\epsilon(\omega)$ gerçekte ve negatif olur, κ hayali ve metal içinde uzaklıkla üstel olarak azalır.
2. $\omega \gg \omega_p$: $\epsilon(\omega)$ gerçekte ve pozitif olur, κ gerçekte ve metal içinden azalmadan yayılır - metal elektromanyetik dalgaya karşı şeffaf hale gelir.

Bu durumda, plazma frekansının üzerindeki frekanslar için metaller elektromanyetik radyasyona karşı şeffaf hale gelmelidir. Metal için ω_p 'nin tahmini değeri yaklaşık 10^{15} Hz'dir; alkali metaller bu frekansın üzerinde şeffaf hale gelirken, diğer metaller drude teorisinin göz ardı ettiği dielektrik sabitin farklı katkıları nedeniyle şeffaf olmazlar [49]. İdeal metaller için kullanılan drude model yaklaşımı serbest elektron gazları içinde kullanılan bir yöntemdir. "Serbest elektron gazı", bir maddenin elektriksel iletkenliği ve diğer elektriksel özelliklerinin bazı yönlerini açıklamak için kullanılan bir terimdir. Bu terim genellikle metallerdeki elektron davranışını tanımlamak için kullanılır. Serbest elektron gazı modeli, metallerdeki iletkenlik gibi fenomenleri açıklamak için Drude modeli gibi yaklaşımlarla birleştirilir. Bu model, metaldeki elektronların atomlardan serbestçe hareket eden bir gaz gibi davrandığını ve bu elektronların davranışının, elektriksel iletkenlik ve diğer elektriksel özelliklerin anlaşılmasına yardımcı olduğunu öne sürer. Bu model, elektronların termal ve elektriksel iletkenlik gibi özelliklerini tahmin etmek için kullanılır ve metalik sistemlerin birçok özelliğini açıklamak için önemli bir araçtır. Bu çalışma kapsamında drude modeli yaklaşımı kullanılmıştır.

4.2. Dipol Plazma Anten Tasarımı

Dipol plazma anteni, VHF bandında çalışan ve 1 Torr basınç ile 300 Kelvin plazma sıcaklığında simüle edilen, uzunluğu 104 cm ve yarıçapı 1.5 cm olan bir silindir olarak modellenmiştir. Antenin $z = -52$ cm'den $z = +52$ cm'ye kadar uzandığı gözlemlenmiştir, bu konumlandırma Şekil 4.1'de gösterilmektedir. RF portu, $z = 0$ konumunda yer almakta olup, iletilen sinyali bağlamak için 10 cm bir boşluk bırakılmıştır. RF portu, 100–125 MHz frekans aralığında 70Ω empedans ile çalışmaktadır. İki kolu arasında, anten tarafından gönderilecek RF sinyalini uyarabilmek için 70Ω empedansa sahip bir diskret port oluşturulmuştur. Tüm plazma anteni simülasyonları, belirtilen basınç ve sıcaklık koşulları altında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1 Dipol plazma antenin tasarımının şematik temsili

Bu geometri ve tüm tasarım parametreleri, tüm gaz tipleri (argon, neon ve argon-neon karışımı) ve metal anten için aynıdır. Tablo 4.1, dipol plazma anteni ve metal antenin tasarım parametrelerini göstermektedir.

Parametre	Değer	Birim
Dipol antenin kollarının uzunluğu (L)	52	cm
Dipol antenin çapı (D)	3	cm
Dipol anten kolları arasındaki boşluk (Boşluk)	10	cm
Empedans	70	Ω

Çizelge 4.1 Dipol plazma anten tasarım parametreleri

Plazma kolları, homojen "Dispersif Drude Modeli" kullanılarak iki silindir olarak modellenmiştir. Dielektrik tüpler ve plazma üretim bileşenleri, dielektrik silindirin kenarlarına monte edilmiş metal elektrotlar gibi, bu çalışmada dikkate alınmamıştır. CST

programında plazma anten parametrelerinin analizi için aşağıda verilen sıralama ile plazma parametreleri drude model yaklaşımı ile hesaplanmıştır.

İlk olarak yeni malzeme aşağıdaki sırayla tanımlanır.

Malzemeler \Rightarrow Yeni Malzeme \Rightarrow Dispersion \Rightarrow Drude Model

İkinci adım olarak malzemenin gaz türü ve iyonizasyon derecesi girilir. Ardından plazma parametreleri olan çarpışma frekansı ve plazma frekansı elde edilir.

Bizim çalışmamız kapsamında argon, neon ve argon-neon karışımını içeren gaz karışımları kullanılmıştır. Her bir gazın iyonlaşma derecesi sırasıyla argon için 0.000291 neon için 0.006 ve argon-neon karışımı için 0.00457275 olarak alınmıştır.

Bu araştırmada, çeşitli gaz tipleriyle (argon, neon ve argon-neon karışımı) tasarlanmış ve simüle edilmiş bir dipol plazma anteni ile aynı zamanda bir dipol metal anteni detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, bu dört tasarım arasında S11, VSWR, kazanç ve yönlendirme değerlerini dikkate alarak kapsamlı karşılaştırmalı analizler gerçekleştirilmiştir.

4.3. Sayısal Simülasyon

Plazma dipol antenin performansının simülasyonu için CST Microwave Studio® yazılımı, sonlu integral tekniği kullanılmıştır. Bu simülasyon aracında, plazmanın davranışı Drude Dispersiyon Modeli ile tanımlanmıştır. Soğuk plazma modeli, Drude Dispersiyon Modeli olarak da bilinen özel materyal davranışlarını açıklamaktadır. Bu model, iki tür yük taşıyıcısı olan ortamların özelliklerini tanımlar. İlk tür yük taşıyıcıları (genellikle metaldeki sabit iyonlar veya plazmadaki yavaş iyonlar) sabit kabul edilirken, diğer tür yük taşıyıcıları (elektronlar) serbestçe hareket edebilirler. Plazma frekansı ve çarpışma frekansı, Drude parametreleri olarak adlandırılırlar. Denklem 22, plazma frekansını (ω_p); Denklem 24, çarpışma frekansını (ν_c) göstermektedir. Denklem 23, elektron plazma frekansı (f_p) için sayısal bir formül sunmaktadır [50].

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}} \quad (22)$$

$$f_P = \frac{\omega_P}{2\pi} \approx 9\sqrt{n_e} \quad (23)$$

$$v_c = n_e K(Te) \quad (24)$$

burada, n_e elektron sayı yoğunluğunu [m^{-3}], e elektronun yükünü [C], m_e elektron kütesini [kg] ve ϵ_0 ise boşluk permittivitesini [F/m] ifade etmektedir.

Plazma oluşturmak için kullanılan çeşitli inert gazlar bulunmaktadır. Dolayısıyla, her gazın plazma frekansı farklılık göstermektedir. Plazma frekansı, çalışma frekansından(ω) farklıdır ve plazma içerisindeki iyonlaşma derecesini temsil etmektedir. Bu nedenle, bir plazma antenin çalışma frekansı bir metal antenin çalışma frekansıyla örtüşmektedir. Çalışma frekansı plazma frekansından büyük olduğunda ($\omega > \omega_P$), plazma klasik bir dielektrik ortam olarak hareket ederken, ($\omega < \omega_P$) olduğunda plazma bir metal gibi davranır [30]. Bu bağlamda, plazmanın elektromanyetik radyasyonu iletebilmesi veya yansıtabilmesi, plazma frekansına bağlıdır. Plazma antenlerde kullanılan permitivite (dielectric permittivity) kavramı, tipik olarak plazma frekansını da içerecek şekilde ifade edilmektedir. Plazma frekansı, plazma ortamındaki serbest elektronların titreşme frekansını ifade eder ve plazmanın karakteristik bir özelliğidir. Dolayısıyla, permitivite genellikle kompleks bir sayıdır ve elektromanyetik alanın plazma içindeki davranışını tanımlamaktadır. Belirli bir plazma frekansı için, ilgili permitivite (göreceli geçirgenlik) aşağıdaki formülle verilmektedir [51].

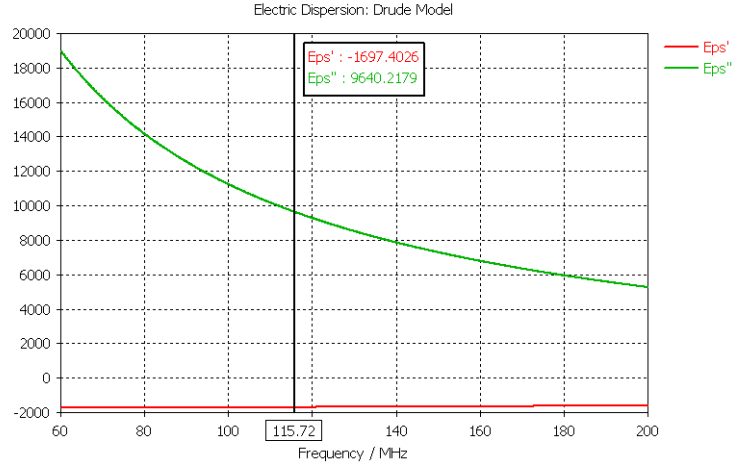
$$\epsilon(\omega) = \epsilon_0 \left[\epsilon_\infty - \frac{\omega_P^2}{\omega(\omega - iv_c)} \right] \quad (25)$$

$$\epsilon_r(\omega) = \epsilon_r' - i\epsilon_r'' \quad (26)$$

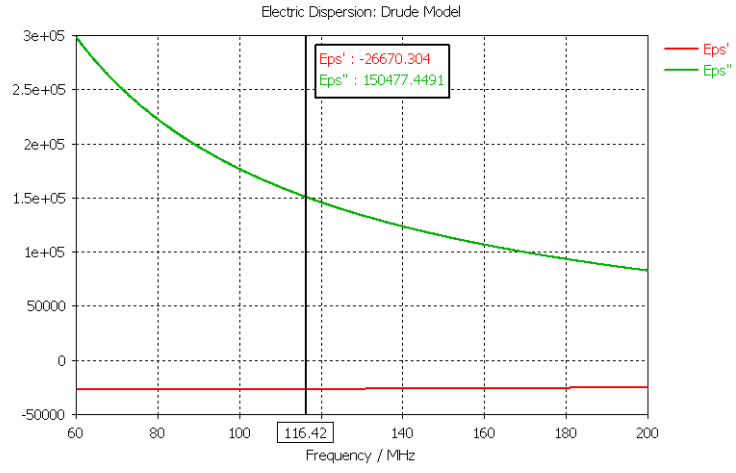
Burada ϵ_∞ sonsuz frekansta göreceli dielektrik sabit olarak belirtilmektedir. Genellikle, Denklem 26 karmaşık göreceli geçirgenliği ifade eder; burada ϵ_r' geçirgenliğin gerçek kısmını, ϵ_r'' ise geçirgenliğin sanal (imajiner) kısmını temsil eder. Plazma ortamındaki gerçek kısım dielektrik sabitini ifade ederken sanal kısım plazmanın kayıplarını (absorpsiyon, saçılma vb.) temsil etmektedir. Karmaşık geçirgenlik ifadesi, plazma antenlerin elektromanyetik davranışını doğru bir şekilde modellemek için kullanılmaktadır. Tablo 4.2, tüm plazma anten tipleri için hesaplanmış karmaşık geçirgenlik parametrelerini sunmaktadır.

Gaz	Frekans (ω)	ϵ_r'	ϵ_r''
Argon	115.72 MHz	-1697.40	9640.21
Neon	117.26 MHz	-34687.36	196002.04
Argon-Neon	116.42 MHz	-26670.30	150477.45

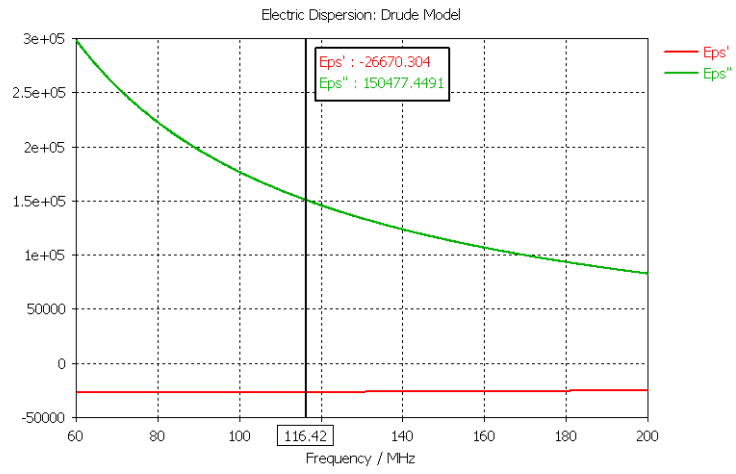
Çizelge 4.2 Tüm plazma anten tipleri için karmaşık geçirgenlik parametreleri



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.2 Dipol plazma anten dielektrik ve geçirgenlik grafikleri; (a) Argon (b) Neon (c) Argon-Neon

Plazma sütununun hacminde elektronların homojen bir dağılıma sahip olduğu ve elektron yoğunluğunun sabit kaldığı varsayılmıştır. Ayrıca, plazma içerisindeki elektronların diğer parçacıklarla çarpışma hızını temsil eden çarpışma frekansı da sütun boyunca sabit olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım, plazma davranışının matematiksel modellemesini basitleştirir ve bir dipol plazma anteni tasarımı ve simülasyonu gibi plazmanın elektromanyetik tepkisinin doğrudan analizine olanak tanımaktadır. Drude modeline göre, plazmadaki elektronlar birbirleriyle ve plazmadaki iyonlarla etkileşen yüklü parçacıklar gazı olarak kabul edilir. Elektronlar plazmada rastgele hareket eder ve diğer parçacıklarla çarpışır, bu da onların enerji kaybetmelerine ve yön değiştirmelerine neden olur. Ancak, çarpışmaların elastik olduğu varsayılır, yani her çarpışma sırasında sistem toplam enerjisi korunur. Drude modeli, plazmanın iletkenliğini, akı yoğunluğunun elektrik alan şiddetine oranı olarak tanımlar. Matematiksel olarak, şu şekilde ifade edilebilir:

$$\sigma = \frac{n_e e^2 \tau}{m_e} \quad (27)$$

Burada σ plazma iletkenliğini, n_e elektron sayı yoğunluğunu, e elektron yükünü, τ çarpışmalar arası ortalama zamanı (gevşeme zamanı olarak da bilinir) ve m_e elektron kütlesini ifade eder (Denklem 27). Plazma iletkenliği, plazma anteni tasarımı için kritik bir parametredir. Denklem 28, plazma iletkenliğinin farklı matematiksel ifade şekillerini sunmaktadır. Plazma iletkenliği (σ), plazma frekansı (ω_p) ve çarpışma frekansı (ν_c) ile ilişkilendirilir [52]. Bu bağlamda, plazma bir metal gibi davranmaktadır [53].

$$\sigma = \frac{\epsilon_0 \omega_p^2}{\nu_c} \quad (28)$$

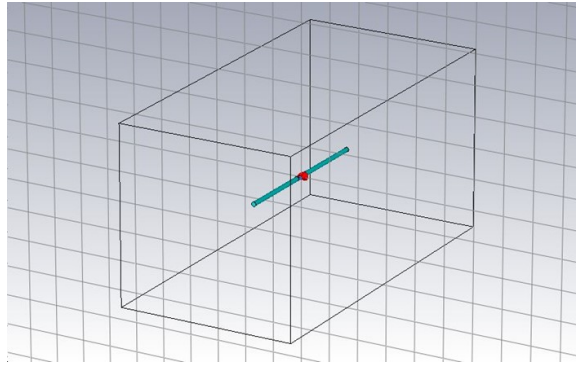
Tablo 4.3, bir plazma dipol anteni tasarımında kullanılan argon, neon ve argon-neon karışımı için hesaplanan parametreleri göstermektedir; argon, neon ve argon-neon karışımı gazları için plazma frekansı ve çarpışma frekansı değerleri sunulmaktadır.

CST Microwave Studio® ile tasarlanmış metal dipol antenin tasarım parametreleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Şekil 4.3 (a-b), sırasıyla CST Microwave Studio®'da dipol plazma

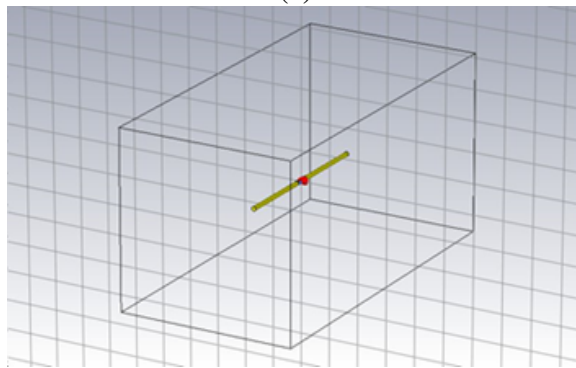
Gaz	Plazma Frekansı, ω_p , [rad/s]	Çarpışma Frekansı, v_c , [1/s]
Argon	1.727e+11	4.127e+09
Neon	7.874e+11	4.163e+09
Argon-Neon	6.845e+11	4.127e+09

Çizelge 4.3 Farklı gazlar için hesaplanmış drude parametreleri

anteninin ve dipol metal anteninin geometrisini göstermektedir. Simülasyonlar, 60-200 MHz frekans aralığında yapılmıştır. Simülasyonların daha hızlı ve doğru olması için CST’de yaygın olarak kullanılan altı yüzlü ağ (hexahedral mesh) yapısı kullanılmıştır. Dalga boyu başına hücre sayısı 25 olup, en büyük hücre 5.8442 cm ve en küçük hücre 0.0599 cm ölçülerindedir. Bakır malzeme seçilerek dipol metal anten tasarımı da yapılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4.3 CST Microwave Studio®’da anten tasarımı; (a) dipol plazma anteni. (b) dipol metal anteni

Farklı tasarım parametreleri, anten geometrisi, plazma özellikleri ve çalışma frekansı detaylı bir şekilde incelenmiş ve sonuçlar bölümünde aynı geometriye sahip metal bir antenle

karşılaştırılmıştır. Ayrıca, plazma ortamı olarak farklı gazların kullanılmasının iyonlaşmış gazın davranışı üzerindeki etkileri ve anten performansına olan etkileri aynı bölümde detaylı bir şekilde araştırılmış ve değerlendirilmiştir.

4.4. Comsol Multiphysics Plazma Sütunu Simülasyonu

Laboratuvar ortamında maddenin dördüncü hali olan plazmayı üretmenin en basit yolu, bir gazı iyonize etmektir. Bu işlem için çeşitli yöntemler mevcuttur; gaz üzerinden doğru veya alternatif elektrik akımı geçirmek, yüksek frekanslı radyo dalgaları (RF) veya mikrodalga (MW) elektromanyetik dalgaları kullanarak gazı uyarmak, kısa süreli yüksek güçlü elektromanyetik alanlar uygulamak, alternatif akımı bir dielektrik üzerinden gaza iletmek ve yüksek enerjili yüklü parçacıkları gazla etkileştirmek gibi. Bu yöntemlerin herhangi biriyle gazın iyonize edilerek plazma haline getirilmesi genellikle "gaz deşarjı" olarak adlandırılır ve kullanılan yönteme göre farklı isimler alır. Örneğin, bir gazın içinden doğru akım geçirilmesi "doğru akım gaz deşarjı" olarak adlandırılırken, "akıntı deşarjı", "alternatif akım deşarjı", "radyo frekansı deşarjı", "mikrodalga deşarjı", "puls deşarjı", "atmosferik deşarjı", "magnetron deşarjı" ve "bariyer deşarjı" gibi çeşitli gaz deşarj türleri bulunmaktadır.

DC gaz deşarjı; karanlık deşarj, korona deşarjı, Townsend rejimi, glow deşarj ve ark deşarjı gibi farklı deşarj akımları ve katot voltaj düşümleri ile karakterize edilen çeşitli deşarj tiplerini kapsar. Ark deşarjı yüksek basınç altında meydana gelirken, diğer deşarjlar genellikle düşük basınç koşullarında gerçekleşir. Düşük basınç altında bir gaz deşarj tüpünde parıltı (glow) deşarj oluşmadan önce, korona deşarjı hariç yukarıda belirtilen tüm rejimler sırasıyla ortaya çıkar.

4.4.1. DC Parıltı Deşarj Teorisi İle Pozitif Plazma Kolon Oluşturma

Plazma anten tasarımı yapmanın ilk adımı, pozitif plazma sütununun oluşturulması ve plazmaya ilişkin parametrelerin elde edilmesidir. Bu amaçla, plazma üretimini

gerçekleştirmek için "Comsol Multiphysics" Plazma modülü kullanılmıştır. Comsol Multiphysics kullanılarak DC parıltı deşarj plazma simülasyonu, gaz akışı, enerji dağılımı, elektromanyetik alan etkileşimleri ve parçacık davranışlarını içeren karmaşık bir sistemdir. Denklemler, plazmanın fiziksel ve elektriksel davranışlarını ayrıntılı olarak modellemek için çözülür. Giriş parametreleri simülasyonun yapılandırılmasında kritik öneme sahiptir, çünkü bu parametreler plazma kolonunun karakteristik özelliklerini belirlemektedir.



Şekil 4.4 DC deşarj ve harici devre tasarımının şematik temsili [2].

DC deşarjı, biri güçlendirilmiş (anot) ve diğeri topraklanmış (katot) olmak üzere iki elektrottan oluşmaktadır. Deşarj katotta ikincil elektronların emisyonu ile sürdürülür. Pozitif sütun harici bir devreye bağlanmıştır. Bu durum gerilimdeki gürültüyü azaltmayı amaçlamaktadır. Comsol Multiphysics'te doğru akım parıltılı deşarj plazma simülasyonu yapmak için Drift Difüzyon denklemleri çözülerek elektron yoğunluğu ve ortalama elektron enerjisi hesaplanmaktadır.

RF deşarjlardan farklı olarak, deşarj sürdürme mekanizması katot yüzeyinden ikincil elektron emisyonu ile sağlanır. Bir iyon, katot yüzeyine çarptığında belirli bir olasılıkla bir elektron yayılır. Bu elektronlar, daha sonra katoda yakın güçlü elektrik alan tarafından hızlandırılarak iyonizasyon sürecini başlatmak için yeterli enerjiyi kazanırlar. Sonuç olarak, genellikle katot düşüşü (Crookes Dark Space) olarak bilinen bir bölgede, katoda yakın elektron yoğunluğunda hızlı bir artış gözlenir.

Elektronlar, duvarla rastgele hareket ettikleri için birkaç serbest yol içinde enerji kaybederler ve ikincil emisyon etkileri nedeniyle tekrar kazanırlar.

4.5. Kavramsal Tasarım ve Simülasyon Parametreleri

Bu çalışmada, plazma anteni oluşturmak için plazma pozitif sütunu oluşturmak amaçlanmıştır ve Argon gazı bu simülasyon için seçilmiş inert gazdır. Argon gazı, düşük kimyasal reaktivitesi ve iyi karakterize edilmiş fiziksel özellikleri nedeniyle plazma simülasyonlarında sıklıkla kullanıldığından tercih edilmiştir. Plazma anteni silindirik cam tüp olarak düşünülmüş ancak plazma sütununu 3B simülasyonları gerçekleştirmek oldukça zor olduğundan özel olarak tasarlanmış dikdörtgen yapı modeliyle, 2 boyutlu olarak simüle edilmiştir. Yapının yüksekliği 50 cm, genişliği ise 5 cm olarak belirlenmiştir. Bu ölçüler, antenin Very High Frequency (VHF) bandında etkin bir şekilde çalışması hedefiyle seçilmiştir.

Argon gazı kullanılarak oluşturulan plazma, düşük basınç ve elektrik alan altında iyonize olur. Comsol Multiphysics simülasyon yazılımı kullanılarak yapılan çalışmada, pozitif plazma kolunun fiziksel olarak modellenmiş ve elektron yoğunluğu, sıcaklık gibi plazma frekansını elde edeceğimiz parametreler analiz edilmiştir.

İsim	Tanım	Birim	Açıklama
muEN	1E25	$\frac{1}{V.m.s}$	elektron hızı
V_0	200	V	uygulanan voltaj
ω_f	7	Sabit değer	iş fonksiyonu
p_0	1.5	Torr	gaz basıncı

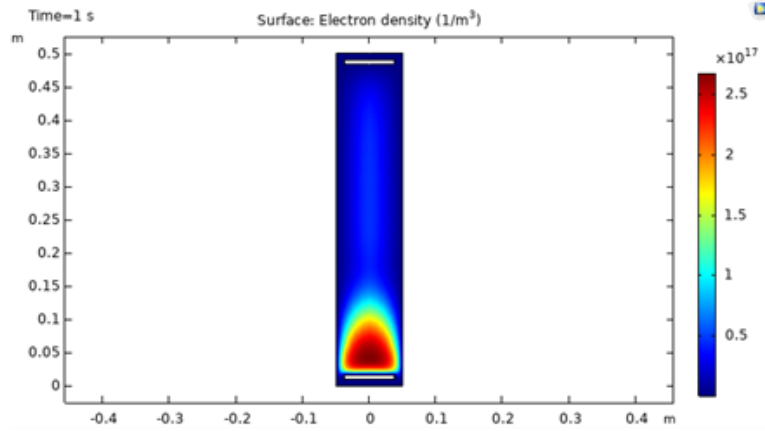
Çizelge 4.4 Plazma değişkenleri

Tablo 4.4’de plazma değişkenleri verilmiştir. Burada elektron hızı ve iş fonksiyonu deneysel olarak yapılan çalışmalardan alınmıştır. Basınç değeri değişik aralıklarla denenmiş en optimum değeri sonuçlar kısmında tartışılmıştır.

4.6. Sonuçların Analizi

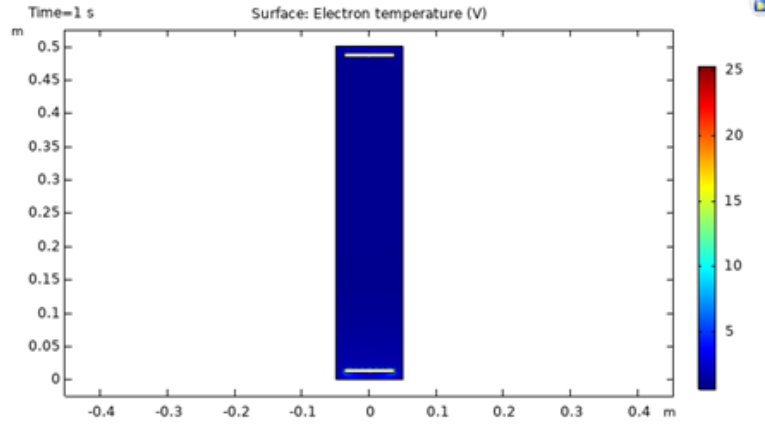
Deşarj tüpü içerisindeki argon gazı, metal çubukları taklit etmek için kullanılmıştır. Comsol plazma modülünde elektron yoğunluğu ve ortalama enerji Drift Diffüsyon arayüzü kullanılarak drift diffüsyon denklemleri çözülerek hesaplanmaktadır. Argon gazı için reaksiyon kesitlerinin hesaplanması için Maxwellian elektron enerji dağılımı fonksiyonları kullanılmaktadır [54]. Bu çalışmada, DC plazma deşarjı, argon gazı 0.5 ile 1.5 Torr arasında değişen gaz basınçlarında modellenmiş en iyi elektron yoğunluğu 1.5 torr'da görülmüştür. Burada hem 1B hem de 2B simetrik modeller ele alınmıştır.

Şekil 4.4'de gösterilen şematik model düzeni, eksen simetrik bir deşarj tüpünde katot ve anotun karşıt uçlarında yer alırken harici bir elektrik devresini içermektedir.



Şekil 4.5 Plazma sütunu 2B elektron yoğunluğu

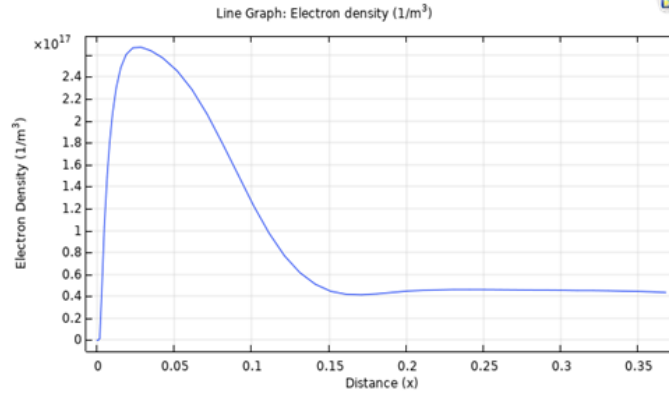
Şekil 4.5'de görüldüğü gibi plazma sütunu simetrik ekseninde modellenmiştir. Genel olarak homojen bir yapı dağılımı görülmemekle beraber plazma elektron yoğunluğunun en yüksek olduğu bölge katot bölgesidir.



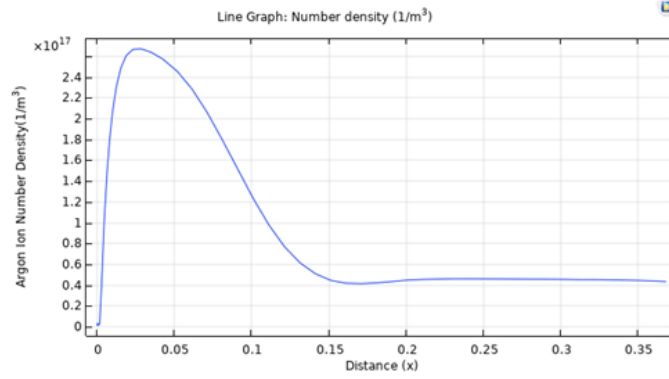
Şekil 4.6 Plazma sütunu aksenal uzunluğu boyunca elektron sıcaklığı (2B)

Şekil 4.6’de görüldüğü gibi plazmanın elektron sıcaklığı homojen bir dağılım göstermektedir. Elektron sıcaklığı genellikle elektron-volt (eV) cinsinden ölçülür. 1 eV, bir elektronun potansiyel enerjisinin bir elektrik alanı içinde 1 volt potansiyel farkı olan bir noktadan diğerine hareket etmesiyle kazandığı enerjiye eşittir. Simülasyon sonuçlarına göre ortalama yaklaşık değeri 5 eV’tur. Elektron sıcaklığı, plazma içindeki elektronların ortalama kinetik enerjisini ifade eder. Elektronlar, termal hareketleri nedeniyle rastgele yönlerde doğru hareket ederler ve bu hareketin enerjisi sıcaklıkla ilişkilidir. Plazma içindeki elektronlar genellikle Maxwell-Boltzmann dağılımına uyar. Bu dağılım, elektronların farklı enerji seviyelerinde bulunabileceğini ve belirli bir ortalama sıcaklıkla hareket ettiklerini göstermektedir. Yüksek elektron sıcaklığı daha yoğun iyonlaşma ve daha hızlı kimyasal reaksiyonlar gibi etkilere yol açabilir. Plazmanın ışınma özelliklerini, elektron-iyon çarpışmalarını, iyonizasyon oranlarını ve kimyasal reaksiyonları doğrudan etkilemektedir.

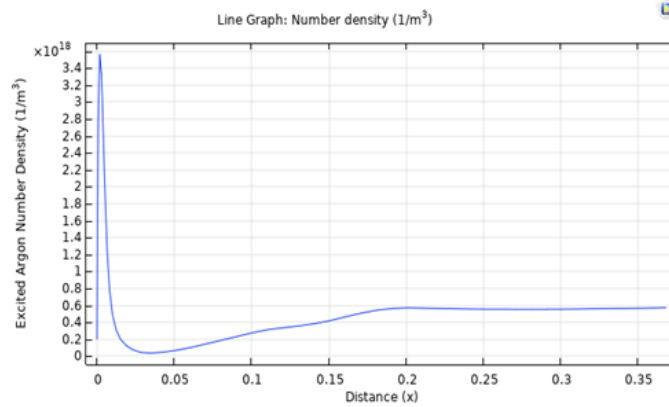
Şekil 4.7 (a,b,c) sırasıyla elektron, argon iyonize atom yoğunluğunu ve uyarılmış argon atomunun yoğunluğunu göstermektedir. Elektron yoğunluğu en yüksek $2.4 \times 10^{17} \text{ 1/m}^3$ ’tür. Bu değer, plazma kolonunda bulunan elektron sayısını ifade eder. Yüksek bir elektron yoğunluğu, plazmanın güçlü bir şekilde iyonize olduğunu gösterir. Bu, plazma kolonunun potansiyel uygulandığında aktif hale geldiği ve yüksek miktarda serbest elektron içerdiği anlamına gelmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.7 Comsol Multiphysics plazma kolonu yoğunluk grafikleri ; (a) elektron yoğunluğu (b) argon iyonize atom yoğunluğu (c) uyarılmış argon atomlarının iyon yoğunluğu.

Argon atomunun iyon yoğunluğu elektron yoğunluğu ile aynı değere sahiptir ($2.4 \times 10^{17} \text{ 1/m}^3$). Argon gazının iyonize olmuş hali olan Ar^+ iyonlarının yoğunluğu, plazmanın

iyonize olmuş halinin göstergesidir. Bu değer, plazma içindeki iyonize atom sayısını ifade etmektedir. İyonize atomlar plazmanın elektriksel ve termal iletkenliğini sağlamaktadırlar.

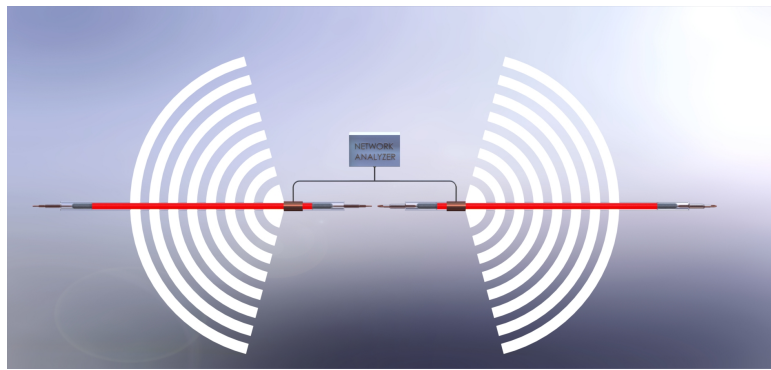
Uyarılmış argon atomunun iyon yoğunluğu en yüksek $3.5 \times 10^{17} \text{ 1/m}^3$ 'tür. Uyarılmış atomlar, normal temel halinin dışındaki enerji seviyelerine sahip olan atomlardır. Bu enerji seviyelerine, yüksek enerjili çarpışmalar veya elektromanyetik uyarım sonucu geçiş yapabilirler. Uyarılmış atomlar, plazma içinde özellikle emisyon spektrumunda belirgin olan çeşitli enerji seviyelerine sahiptirler. Bu enerji seviyeleri, plazma tarafından emilen veya yayılan ışığın dalga boylarını etkilemektedir. Genellikle belirli dalga boylarında emisyon yaparlar. Bu durum, plazma antenin yaydığı veya emdiği elektromanyetik radyasyonun spektral özelliklerini etkiler. Yüksek uyarılmış atom yoğunluğu, antenin emisyon spektrumunu zenginleştirebilir veya belirli frekanslarda daha güçlü radyasyon sağlayabileceği anlamına gelmektedir.

5. ÜRETİM ve DENEYSEL ARAŞTIRMA

5.1. Plazma Oluşturma Sistemi Tasarımı ve İnşası

Bu bölümde, simüle edilen sonuçlar temel alınarak argon-neon gaz karışımını içeren deneysel düzenek kurulumu yapılmıştır. Plazma tüpleri, anten elemanı olarak kullanılmıştır. Her plazma tüpü borosilikat cam malzemesinden yapılmış olup uzunluğu 52 cm'dir. Plazma tüpünün iç çapı 1.2 cm, dış çapı ise 1.5 cm'dir. Plazma tüpleri, 1 Torr basınçta %25 Argon (Ar) ve %75 Neon (Ne) gaz karışımı ile doldurulmuştur. Yapısal olarak, anten silindirik bir formda olup iki elektrot içermektedir. Plazma sütunlarını oluşturmak için iki AC güç kaynağı (5-20 kHz, 10 kV, 30 mA) kullanılmıştır. Sinyal bağlantısı için kapasitif bağlama tekniği kullanılmıştır. Bakır şerit plazma tüpüne sarılmış ve sabitlenmiştir (Şekil 5.3). Topraklama kalkanı üzerine yerleştirilmiş Alt-Minyatür tip A (SMA) konektörünün merkezi iletkeni iç bakır yüzükle lehimlenmiş, SMA konektörünün dış iletkeni ise topraklama kalkanına lehimlenmiştir [55]. Bakırdan kaynaklanan elektromanyetik radyasyonu azaltmak için 3B yazıcıyla üretilen bir kelepçe, beyaz pleksiglas malzemesinden yapılmış, 40 mm uzunluğunda ve 20 mm çapındadır (Şekil 5.2).

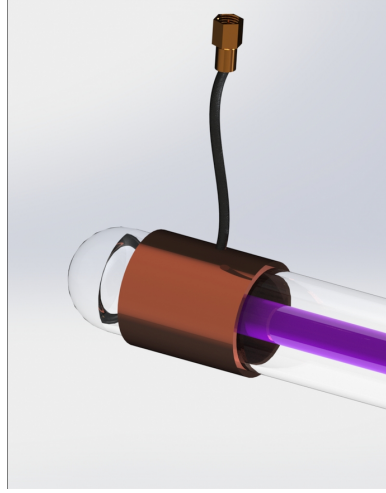
Dipol plazma antenin kavramsal mimarisi Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1 Dipol Plazma Anten Kavramsal Mimarisi

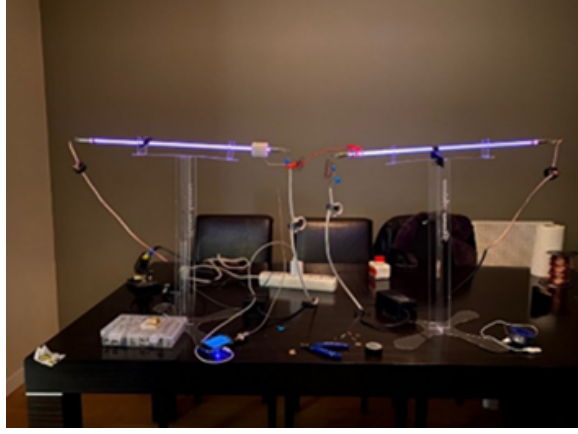


Şekil 5.2 3D kelepçe tasarımı

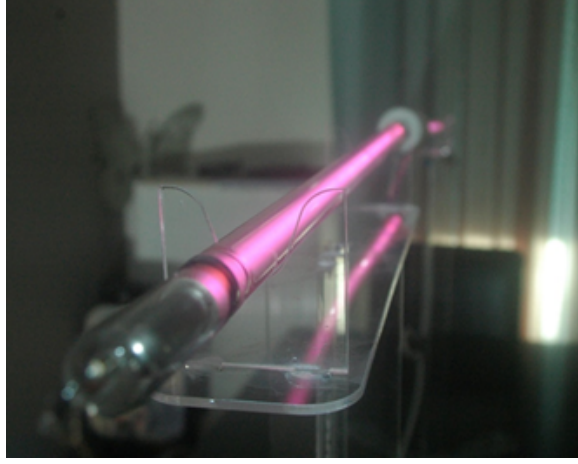


Şekil 5.3 Dipol plazma anten için tasarlanan kapasitif bağlama

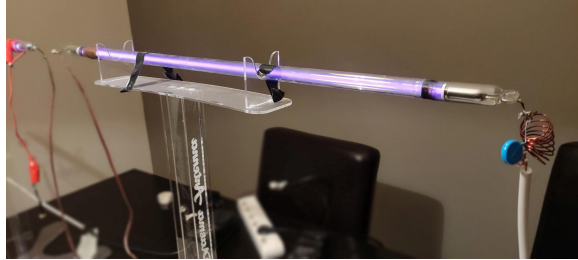
Dipol plazma anteninin deneysel kurgusu Şekil 5.4 (a-c)'de gösterilmiştir. Bu bölüm alt başlıklarda detaylandırılmıştır.



(a)



(b)



(c)

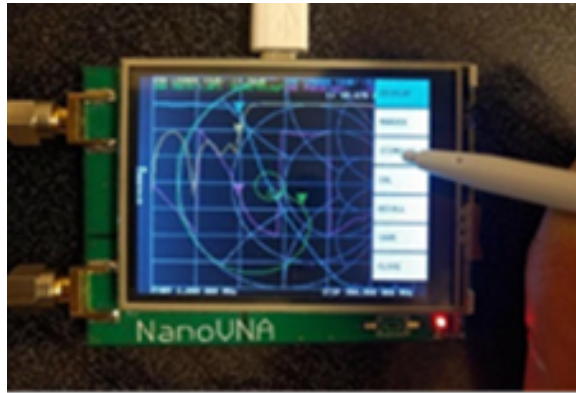
Şekil 5.4 Dipol plazma antenin deneysel düzeneği. (a) ön-görünüm. (b) üst-görünüm. (c) yan-görünüm.

5.2. Deneysel Setup ve Ölçüm Metodolojisi

Şekil 5.4'te görüldüğü gibi deneysel kurgu kurulmuş ve anten parametreleri ölçümleri planlanmıştır. Ağ analizörü (NanoVNA-H), Şekil 5.6'te gösterildiği gibi VSWR ve yansıma katsayısı (S11) parametrelerini ölçmek için kullanılmıştır. NanoVNA-H, başlangıçta 50 kHz-900 MHz aralığında çalışmak üzere tasarlanmış, ancak bu çalışma için özellikle 120-150 MHz aralığında çalışacak şekilde kalibre edilmiştir. Ayrıca, iletim hattındaki gürültü seviyelerini azaltmak için bir yüksek geçiren filtre (HP 11668A) kullanılmıştır (Şekil 5.5). Bu filtre 50 MHz'nin altındaki sinyalleri baskılar, böylece beklenen Sinyal-Gürültü Oranı (SNR) artırılmış olması beklenmektedir.



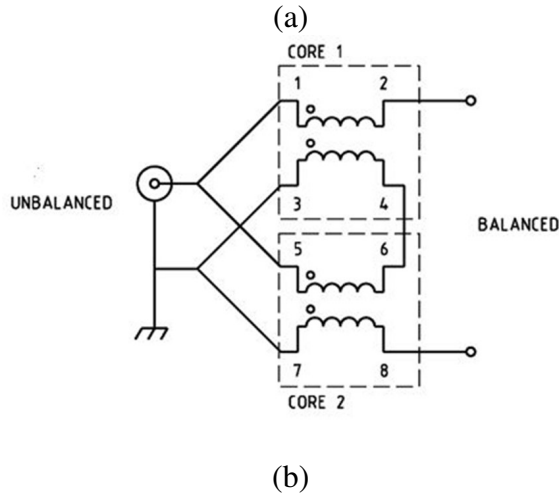
Şekil 5.5 Yüksek Geçiren Filtre (HP 11668A)



Şekil 5.6 Network Analizör (NanoVNA-H)

Bu çalışmada bal-un, empedans uyumsuzluğunu düzeltmek, sinyal yansımalarını azaltmak ve güç kaybını en aza indirmek için kullanılmıştır. Ba-lun olmadan yapılan ilk ölçümlerde,

ölçülen empedans yaklaşık 200 Ω 'dur. Empedansı değerini 70 Ω 'a düşürmek için 1:4 Guanella bal-un kullanılmıştır. Guanella akım balununda (Şekil 5.7 (a) (b)), dengesiz tarafta her bir dengeli taraftaki dört dönüş bulunmaktadır. Bu dönüş oranı, belirli antenlerin ve iletim hatlarının empedans dönüşüm ihtiyaçlarını karşılamak için seçilmiştir. Bu kurulum, güç iletimini etkili hale getirmeyi ve sinyal yansımalarını en aza indirmeyi amaçlamaktadır.



Şekil 5.7 (a) Guanella akım bal-un(1:4) (b) Şematik gösterimi.

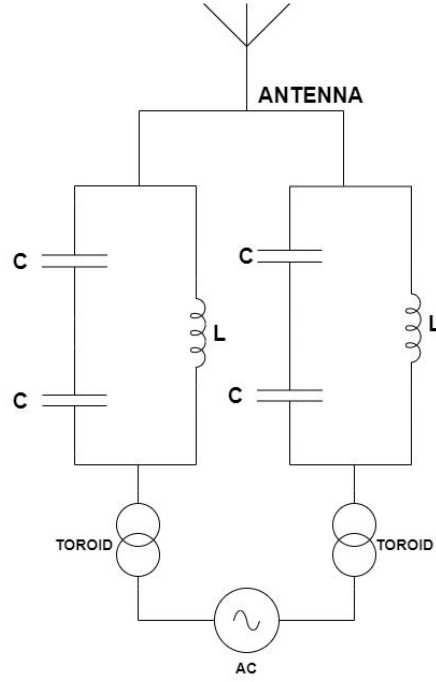
Plazma durumunu oluşturmak için AC güç kaynağına ve sürücü devreye ihtiyaç vardır, söz konusu devre bu tez kapsamında tasarlanıp üretilmiştir. Sürücü devre, toroid ve LC devresinden oluşup iletim hattına entegre çalışmaktadır. Bu yapı, öncelikle yaygın mod akımlarını ve düşük frekanslı güç kaynağı gürültüsünü baskılamak için kullanılan yaygın

mod filtresi olarak işlev görmektedir. LC elektromanyetik girişim (EMI) filtresi, AC güç hattından kaynaklanan EMI etkilerini azaltmak için uygulanmıştır. Bu iletim hattındaki dipol plazma anten sistemi üzerindeki olumsuz etkisini önlemektedir. İndüktörler (L) ve kapasitörlerden (C) oluşan bu filtre, istenmeyen gürültü frekanslarını etkili bir şekilde baskılar, antene daha temiz bir güç kaynağı sağlar ve sinyal bozulmasını en aza indirir [56].

RF iletim hattına yüksek geçiş filtresinin eklenmesiyle, hedef rezonans frekansının daha düşük frekans bandındaki sinyallere ek bir zayıflama uygulanmıştır. EMI filtresinin zayıflaması, özellikle paralel bir LC devresi olmak üzere, filtre transfer fonksiyonu formülü kullanılarak hesaplanabilir. Transfer fonksiyonu ($H(f)$), sinyalin filtre üzerinden frekansla nasıl değiştiğini ölçmektedir. Paralel bir LC devresi için transfer fonksiyonu $H(f)$ şu şekilde ifade edilebilir:

$$H(f) = \frac{1}{1 + j\left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)} \quad (29)$$

burada f sinyalin frekansı f_0 LC devresinin rezonans frekansı ve j ise sanal birimdir (Denklemler 29). Şekil 5.8'de gösterilen uyumlandırma ağı devresindeki indüktans değeri 1195.5 nH, kapasitans değeri ise 10 nF olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.8 Uyumlandırma Devresi

Bir miktar gürültü taşıyan güç kablosunun her iki ucuna iki FT140-43 toroidi (Şekil 5.9) bağlanmış ve kablo bu toroidlerin etrafında dört kez sarılmıştır. Bu toroidler, güç kablosundan yayılan gürültüyü azaltmak için kullanılmıştır. Ayrıca, sinyalin yaklaşık 130 MHz civarında güç hattı boyunca yayılmasını önlemek için seçilmişlerdir. Bu çalışmada, Radyo Frekans Girişimi (RFI) azaltmak için kullanılmışlardır. Her bir toroidin 130 MHz'de yaklaşık olarak 14049.2 ohm direnç uyguladığı hesaplanmıştır.



Şekil 5.9 Toroid

5.3. Deneysel Kurulumun Kalibrasyonu ve Doğrulaması

Vektör Network Analizörleri (VNA), yüksek hassasiyet gerektiren RF ve MW frekans aralıklarındaki sinyallerle ölçümler yapmaktadır. Bu frekans aralıklarında, doğru ve güvenilir ölçümler elde etmek için kalibrasyon işlemi büyük önem taşır. NanoVNA gibi taşınabilir VNA cihazlarında da ölçüm koşullarının değişmesi durumunda kalibrasyonun yapılması zorunludur. Bu, cihazın doğru ölçüm sonuçları üretebilmesi ve ölçülen verilerin güvenilirliğini sağlamak için kritik bir adımdır. Dolayısıyla, NanoVNA gibi cihazlarda da kalibrasyon işlemi, doğru ve güvenilir ölçüm sonuçları elde etmek için temel bir gerekliliktir.

Ölçüm şartlarının değişmesi, VNA cihazlarıyla yapılan ölçümlerde bağlantı koşullarının veya ölçüm ortamının farklılaşması anlamına gelmektedir. Örneğin, bir cihazın NanoVNA'ya bağlanması sırasında kullanılan bağlantılar arasına bir kablo eklenirse veya farklı bir ortamda ölçüm yapılacaksa, ölçüm şartları değişir. Bu durumda, eklenen kablo veya farklı ortamın etkileri göz önüne alınmalı ve doğru sonuçlar elde edebilmek için kalibrasyon yapılmalıdır. Kalibrasyon işlemi, eklenen kablo veya değişen ortamın etkilerini ortadan kaldırarak ölçüm sonuçlarının güvenilirliğini artırmaya yöneliktir. Dolayısıyla, ölçüm şartlarının değişmesi durumunda, kalibrasyon yapılması ölçüm doğruluğu ve güvenilirliği açısından gereklidir.

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen S11 ve VSWR ölçümleri için NanoVNA kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon yapmadan önce, cihazın çalışma frekans aralığını simülasyondan aldığımız veriler girilerek daha dar bir frekans aralığı seçilmiştir bu durum bize daha doğru bir kalibrasyon sağlamaktadır. VHF bandında ölçüm yaptığımız için, frekans aralığımızı 110-200 MHz alınarak kalibrasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir.

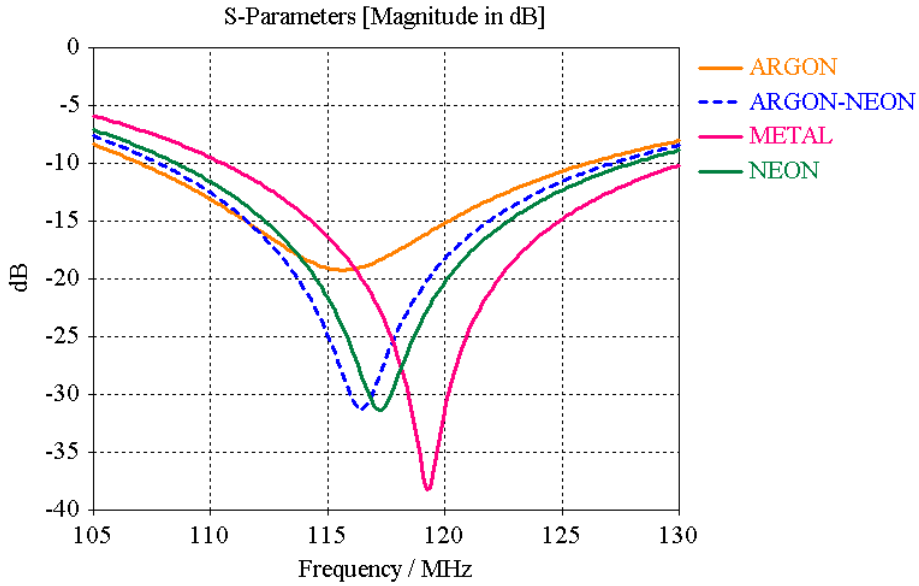
6. PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ ve ANALİZİ

6.1. Ağ Parametrelerinin Simülasyon Analizleri

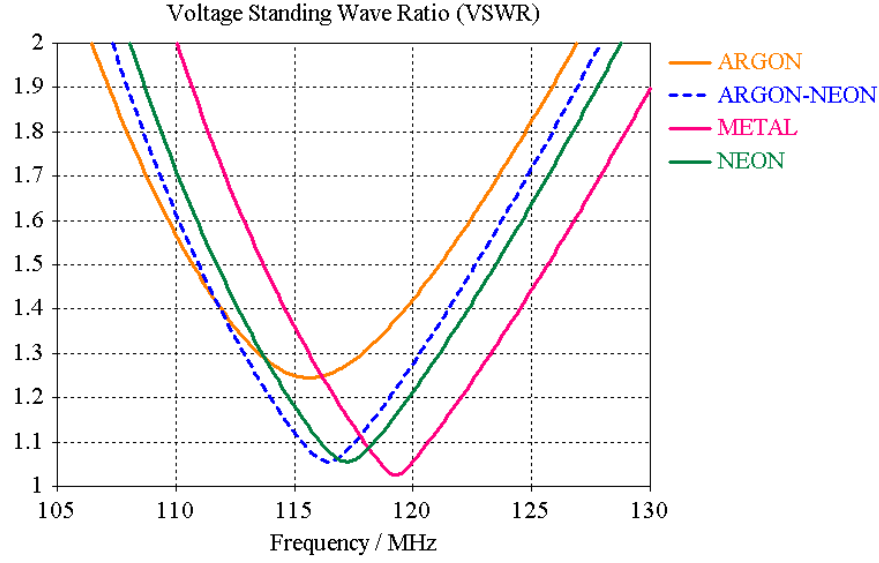
Metal ve plazma dipol antenlerde kullanılan üç farklı gaz türü için detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.1 ve Şekil 6.2 gösterildiği gibi, tüm dipol antenler için simüle edilen S11 ve VSWR değerleri göstermektedir. Tablo 6.1 ise, plazma antenlerinin ve metal antenin rezonans frekansı ile ilişkili VSWR ve geri dönüş kaybı değerlerini sunmaktadır.

Gaz	Rezonans Frekansı (MHz)	Geri Dönüş Kaybı (dBi)	VSWR
Argon	115.72	-19.22	1.24
Neon	117.26	-31.33	1.05
Argon-Neon	116.42	-31.31	1.05
Metal	119.22	-38.17	1.02

Çizelge 6.1 Tüm dipol antenler(plazma ve metal) için Rezonans Frekansı, S11 ve VSWR değerleri



Şekil 6.1 Tüm dipol antenler için geri dönüş kaybı (S11) simülasyon sonuçları



Şekil 6.2 Tüm dipol antenler için duran dalga oranı (VSWR) simülasyon sonuçları

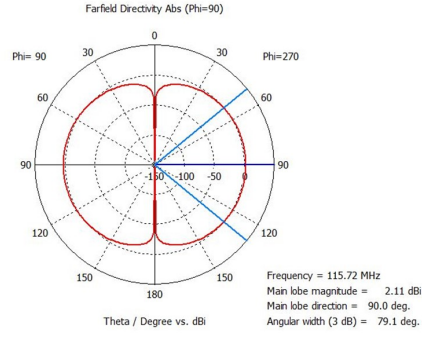
Bu sonuçlar, farklı anten tiplerindeki geri dönüş kaybı ve VSWR değerleri hakkında kritik bilgiler sağlamaktadır. Geri dönüş kaybı, antenden geriye yansıyan gücün miktarını ifade eder ve daha düşük değerler, daha iyi bir eşleşme ve daha az güç kaybı anlamına gelmektedir. VSWR ise, anten ile iletim hattı arasındaki empedans eşleşmesini ölçer ve daha düşük değerler, daha iyi bir eşleşmeyi işaret etmektedir. Elde edilen verilere dayanarak, neon, argon-neon ve metal antenlerin, argon antene göre daha iyi geri dönüş kaybı değerleri ve daha düşük VSWR değerleri gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, bu antenlerin daha iyi bir empedans eşleşmesi ve daha yüksek verimlilik sağladığını işaret etmektedir.

6.1.1. Radyasyon Örüntüsü, Kazanç, Yönlülük

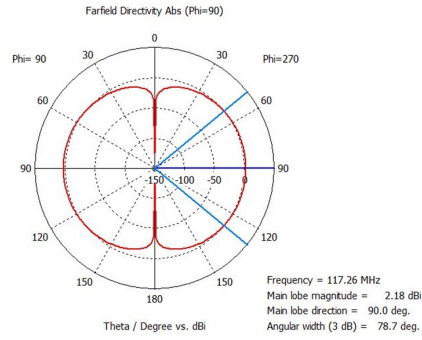
Tablo 6.3, tüm plazma ve metal anten tasarımları için kazanç ve yönlülük değerlerini sunmaktadır. Tablo 6.3'e göre, metal anten en yüksek yönlülüğe ve kazanç değerlerine sahiptir; bu değerler sırasıyla 2.20 dBi ve 78.5° olarak ölçülmüştür. Argon-neon ve neon antenler metal anteni yakından takip etmektedir, en düşük yönlülük ve kazanç değerlerini ise argon anteni sergilemektedir.

Bir radyasyon deseni, sabit bir mesafede anten sisteminden yönden bağımsız olarak gerçek veya göreceli yoğunluğu gösteren bir grafiği ifade etmektedir. Bu desen genellikle uzak alanda değerlendirilir ve radyasyon deseni olarak adlandırılmaktadır [57]. Uzak alanda, hem yayılan alanlar baskın olup hem de açısal alan dağılımı antenden uzaklıktan bağımsız hale gelmektedir [58].

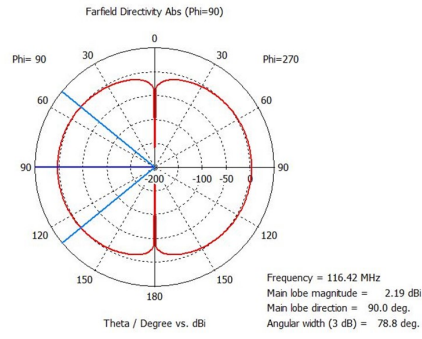
Şekil 6.3 (a-d); sırasıyla argon, neon, argon-neon karışımı gazlar ve metal anten için dipol plazma antenin etkinleştirildiğindeki 3B radyasyon desenini göstermektedir. En yüksek güç $\theta = 90^\circ$ 'de yayılırken, en az g $\theta = 0^\circ$ 'de gözlenmiştir. Yayılma genişliği (beamwidth), belirli bir antenin radyasyon deseninin yönlülük ve açısal kapsamını belirten bir ölçüttür. Daha dar bir yayılma genişliği (3 dB noktaları arasındaki daha küçük açısal fark), daha odaklanmış veya yönlendirilmiş bir radyasyon desenini gösterirken, daha geniş bir yayılma genişliği (3 dB noktaları arasındaki daha büyük açısal fark), daha geniş bir kapsama alanını ancak potansiyel olarak daha düşük bir doğrultuluk sağlar. Dipol antenler için tipik olarak düşük kazanç ve yaklaşık 90° 'lik 3 dB yayılma genişliği bulunmaktadır.



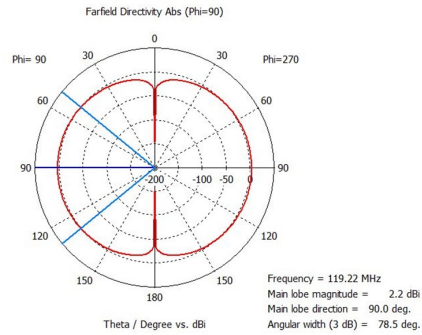
(a)



(b)



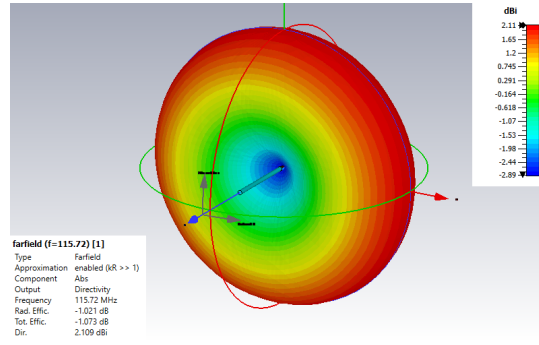
(c)



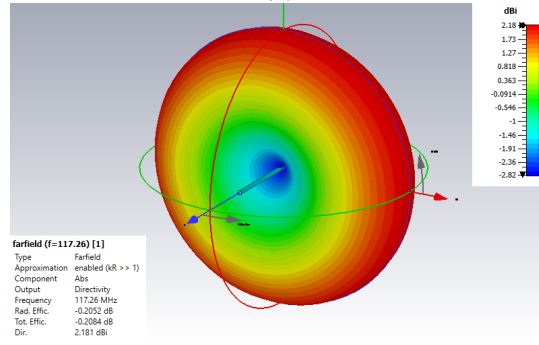
(d)

Şekil 6.3 Dipol antenlerin rezonans frekansında 2B kazanç değerleri için simülasyon sonuçları;
(a) Argon $f=115.72$ MHz, (b) Neon $f=117.26$ MHz, (c) Ar-Ne $f=116.42$ MHz, (d) Metal $f=119.22$ MHz.

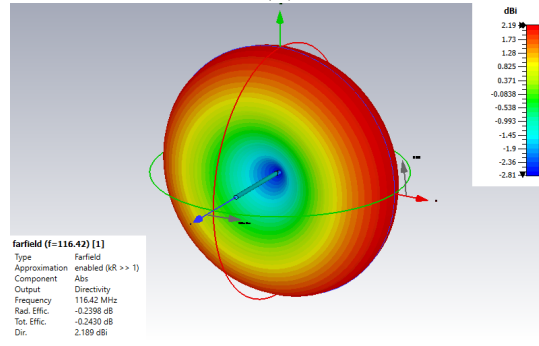
Şekil 6.4 (a-d) sırasıyla argon, neon, argon-neon karışımı gazlar, ve metal anten için anten etkinleştirildiğindeki 3B radyasyon desenini göstermektedir. Bu sonuçlar, antenlerin rezonans frekanslarını ve bunlara karşılık gelen ana lob özelliklerini, büyüklüğü ve genişliği içermektedir. Genel olarak, argon, neon, argon-neon ve metal antenler, ana lob büyüklüğü ve genişliği açısından benzer performans göstermektedirler. Plazma antenlerinin benzersiz özellikleri nedeniyle, askeri ve sivil uygulamalarda kullanımları umut vaat etmektedir. Plazma antenleri, geleneksel metal antenlere göre hafif yapıları, kolayca yeniden yapılandırılabilme yetenekleri ve geniş frekans aralığında çalışabilme kabiliyetleri gibi birçok avantaja sahiptir.



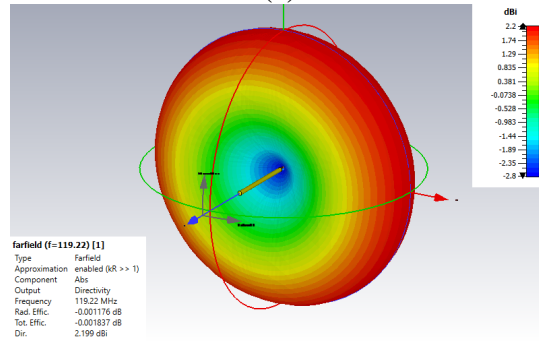
(a)



(b)



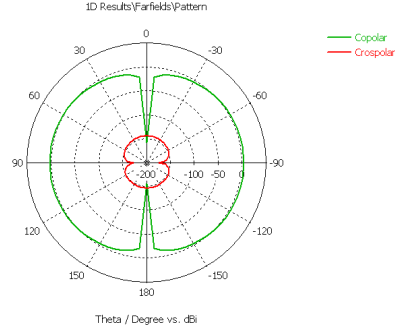
(c)



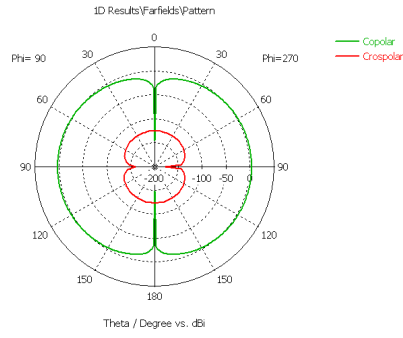
(d)

Şekil 6.4 Dipol antenlerin rezonans frekansında 3B kazanç değerleri için simülasyon sonuçları; (a) Argon $f=115.72$ MHz, (b) Neon $f=117.26$ MHz, (c) Ar-Ne $f=116.42$ MHz, (d) Metal $f=119.22$ MHz.

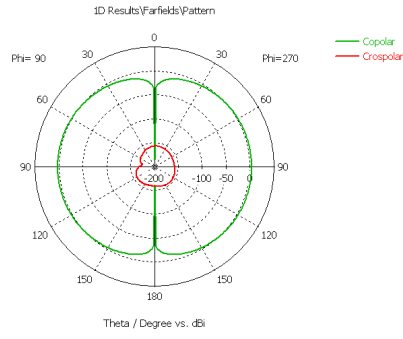
Şekil 6.5 (a-d) sırasıyla argon, neon, argon-neon karışımı gazlar ve metal anten için dipol plazma antenin etkinleştirildiğinde copol ve croscol olarak adlandırılan 2B radyasyon desenini göstermektedir. Copol değerlerine bakıldığında, tüm anten tipleri benzer ve yüksek değerler sergilemektedir. Tablo 6.2'da gösterildiği gibi, neon için 2.18 dBi, argon-neon için 2.19 dBi ve metal anten için 2.20 dBi'dır. Croscol değerleri, argon-neon dipol plazma antenin en düşük değere sahip olduğunu göstermektedir. Ar-Ne gaz karışımını içeren dipol plazma anten için -153.4 dBi, neon dipol plazma anteni -124.7 dBi ve metal anteni için -134.4 dBi değerleri takip etmektedir. Bu sonuçlar, argon-neon plazma antenin giriş gücünün bir kısmının radyasyon dışında kaybolduğunu göstermesine rağmen, yüksek copol değerleri nedeniyle ana radyasyon yöneliminde hala etkili olduğunu belirtmektedir. Neon dipol plazma anteni için radyasyon verimliliği düşük olmasına rağmen, metal antene göre daha iyi performans gösterdiği de sonuçlarda açıkça görülmektedir.



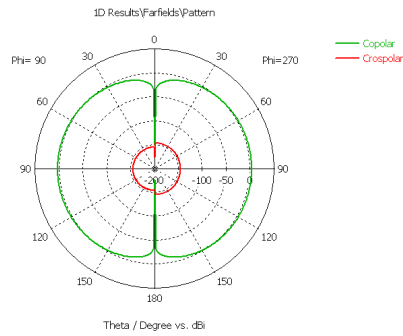
(a)



(b)



(c)



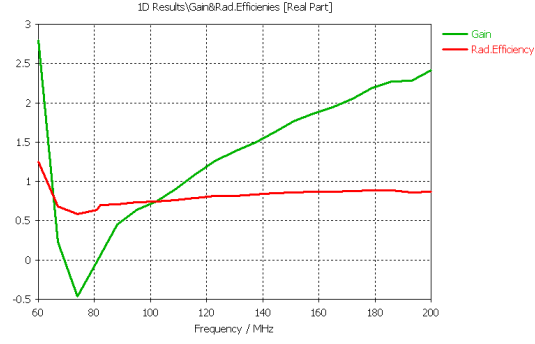
(d)

Şekil 6.5 Dipol antenlerin rezonans frekansında 2B radyasyon deseni için Co-polarizasyon (Copol) ve Cros-polarizasyon (Crospol) değerleri şu şekildedir; (a) Argon $f=115.72$ MHz, (b) Neon $f=117.26$ MHz, (c) Ar-Ne $f=116.42$ MHz, (d) Metal $f=119.22$ MHz.

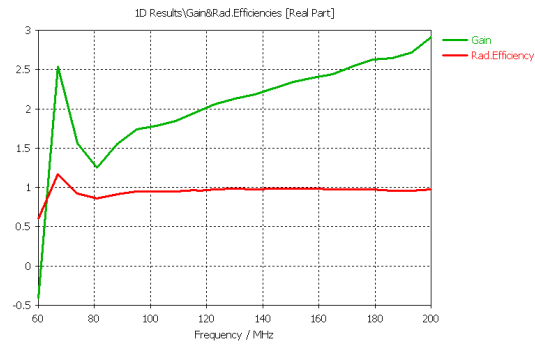
Şekil 6.6 (a-d), sırasıyla argon, neon, argon-neon karışımı gazlar ve metal anten için dipol plazma antenin frekansa göre kazanç ve radyasyon verimliliğini grafiğini göstermektedir. Radyasyon verimliliği, bir antenin giriş gücünü ne kadar etkili bir şekilde yaydığını gösteren kritik bir ölçüttür. Tablo 6.2'e göre, argon-neon dipol plazma anteni için radyasyon verimliliği en düşük değere sahiptir ve -0.2398 dB olarak ölçülmüştür. Neon plazma anteni için bu değer -0.2052 dB iken, metal anten için radyasyon verimliliği -0.001213 dB olarak belirlenmiştir.

Gaz	Rezonans Frekansı (MHz)	Copol (dBi)	Crospol (dBi)	Rad.Verimliliği (dB)
Argon	115.72	2.11	-143.6	-1.021
Neon	117.26	2.18	-124.7	-0.2052
Argon-Neon	116.42	2.19	-153.4	-0.2398
Metal	119.22	2.20	-134.4	-0.001213

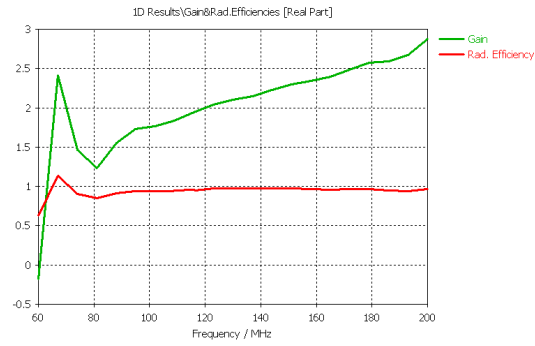
Çizelge 6.2 Dipol Plazma ve Metal Anten Tasarımlarının Eş ve Çapraz Polarizasyon Değerleri



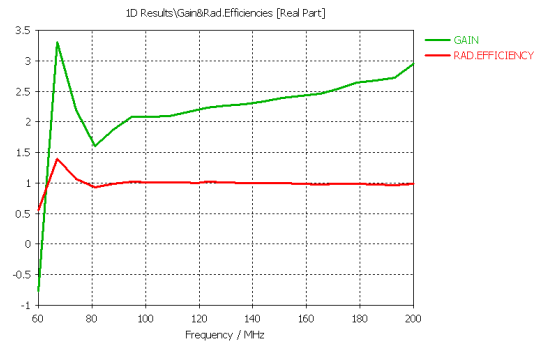
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 6.6 Dipol antenlerin, kazanç ve radyasyon verimliliği desenleri için simülasyon sonuçları şu şekildedir; (a) Argon, (b) Neon, (c) Ar-Ne, (d) Metal.

Tüm plazma dipol antenlerinin ve metal dipol antenlerinin çeşitli performans parametreleri için genel bir karşılaştırması, Tablo 6.3'te özetlenmiştir. Dönüş kaybı açısından, metal anten tüm plazma antenlere üstün gelmektedir. Bununla birlikte, ana lob seviyesi ve ana lob genişliği göz önüne alındığında, hem tüm plazma dipol antenleri hem de metal dipol antenleri benzer bir performans sergilemektedir. Ayrıca, her iki anten türü de neredeyse aynı radyasyon verimliliği, toplam radyasyon verimliliği ve yönlülük göstermektedir, bu da onları uyumlu uygulamalar için uygun kılmaktadır.

Gaz	Rezonans Frekansı (MHz)	Ana Lob Büyüklüğü (dBi)	Ana Lob Genişliği (3dB)
Argon	115.72	2.11	79.1°
Neon	117.26	2.18	78.7°
Argon-Neon	116.42	2.19	78.8°
Metal	119.22	2.20	78.5°

Çizelge 6.3 Tüm dipol antenler (plazma ve metal) için performans parametreleri

6.1.2. Dipol Plazma Anteninin Etkin Uzunluğu

Plazma antenlerde, antenin etkin uzunluğu tıpkı metal antenlerde olduğu gibi antenin çalıştığı frekansın dalga boyuna (λ) bağlı olarak hesaplanmaktadır. Frekans (f) ve ışık hızı (c) arasındaki ilişki kullanılarak dalga boyu Denklem 30 'de verilen formülle elde edilir.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (30)$$

Burada (c) ışık hızı ve (f) frekansı temsil etmektedir.

Plazma antenlerin etkin uzunluğu, antenin elektromanyetik dalgaları etkin bir şekilde iletebilmesi veya alabilmesi için kritik bir parametredir. Yüksek frekanslarda çalıştıkları için dalga boyları küçüktür ve bu da etkin uzunluğun antenin fiziksel boyutundan önemli ölçüde farklı olmasına neden olabilir. Bu özellikler, plazma antenlerin tasarımı ve performansının anlaşılmasında önemlidir.

Ar-Ne gaz bileşimi için dipol plazma antenin etkin uzunluğu hesaplanmıştır.

Simülasyon verilerinden elde edilen Ar-Ne gaz bileşimini içeren dipol plazma anten 116.42 MHz'de frekansında yayın yapmaktadır. Antenin etkin uzunluğu $L_{et}=\frac{\lambda}{4}$ olarak hesaplanır. Plazma antenin etkin uzunluğu fiziksel uzunluğunun %62.825 kadardır [59]. $L_{et}= 64.375$ cm'dir.

Hız faktörü, elektromanyetik dalgaların bir ortamda yayılma hızının vakum hızına oranını ifade eden önemli bir parametredir. Plazma ortamındaki elektron yoğunluğu, manyetik alanlar ve plazma sıcaklığı gibi faktörler, hız faktörünü etkileyen parametrelerdir. Bu nedenle, plazma antenlerin tasarımı ve performansının değerlendirilmesinde hız faktörü dikkate alınmalıdır. Doğru bir şekilde hesaplanması, tasarımın doğruluğunu ve performansını belirlemektedir. Hız faktörü burada 0.81 alınarak antenin etkin uzunluğu yaklaşık 52 cm'dir. Plazma antenin etkin uzunluğu fiziksel uzunluğu ise yaklaşık 32.31 cm'dir.

6.2. Basıncın Plazma Anten Üzerine Etkisi

Gaz basıncı, plazma antenlerin performansını ve özelliklerini etkileyen önemli bir parametredir. Düşük gaz basıncında, gaz moleküllerinin çarpışmaları azalır ve serbest yol mesafesi uzamaktadır. Bu durum, plazma antenin daha yüksek bir elektron yoğunluğuna sahip olmasını sağlar. Yüksek elektron yoğunluğu, antenin daha geniş bir frekans bandında çalışabilmesini ve daha fazla sinyal iletebilmesini mümkün kılmaktadır. Diğer taraftan, yüksek gaz basıncı durumunda, gaz moleküllerinin çarpışmaları artar ve serbest yol mesafesi azalmaktadır. Bu durum, plazma antenin elektron yoğunluğunu düşürür ve iletim kapasitesini azaltır. Ayrıca, yüksek gaz basıncı, plazma antenin çalışma frekansını da kısıtlayabilir.

Bu tez kapsamında argon-neon karışımını içeren silindirik dipol plazma anteni tasarlanmıştır. Deşarj tüpleri, Ar-Ne (%25 argon ve %75 neon karışımı) ile 1 Torr, 10 Torr, 100 Torr ve 1000 Torr basınç değerleri temel alınarak simülasyonları ve analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu doğrultuda gaz basıncı değiştirilerek aşağıda alt başlıklar altında detayları verilen plazma ve anten parametreleri incelenmiştir.

6.2.1. Farklı Basınçların Plazma Parametreleri Üzerindeki Etkisi

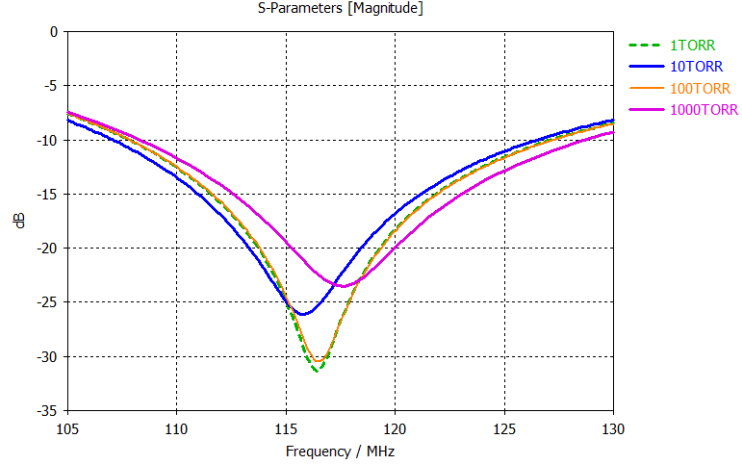
Gaz basıncı, plazma antenlerin performansını ve karakteristiklerini etkiler. Düşük gaz basıncında, gaz moleküllerinin çarpışmaları azalır ve daha uzun serbest yol mesafesi sağlanır. Bu, plazma antenin daha yüksek bir elektron yoğunluğuna sahip olmasını sağlar. Yüksek elektron yoğunluğu, antenin daha geniş bir frekans bandında çalışabilmesini ve daha fazla sinyal iletebilmesini sağlar. Öte yandan, yüksek gaz basıncı durumunda, gaz moleküllerinin çarpışmaları artar ve serbest yol mesafesi azalır. Bu, plazma antenin elektron yoğunluğunu azaltır ve iletim kapasitesini düşürür. Ayrıca, yüksek gaz basıncı, plazma antenin çalışma frekansını da sınırlayabilir. Gaz basıncı değiştirilerek plazma parametreleri ve anten parametreleri incelenmiştir (Tablo 6.4).

Basınc (Torr)	Elektron Yoğunluğu($1/m^3$)	Plazma Frekansı (rad/s)	Çarpışma Frekansı (1/s)	Rezonans Frekansı (MHz)	S11 (dBi)	VSWR
1	1.472e20	6.845e11	4.127e09	116.42	-31.31	1.05
10	1.472e21	2.164e12	4.127e10	115.86	-26.09	1.10
100	1.472e22	6.845e12	4.127e11	116.42	-30.47	1.06
1000	1.472e23	2.164e13	4.127e12	117.64	-23.51	1.14

Çizelge 6.4 Farklı Basınçların Dipol Plazma Anten(Ar-Ne Karışımı) Üzerine Etki Parametrelerinin Analizi

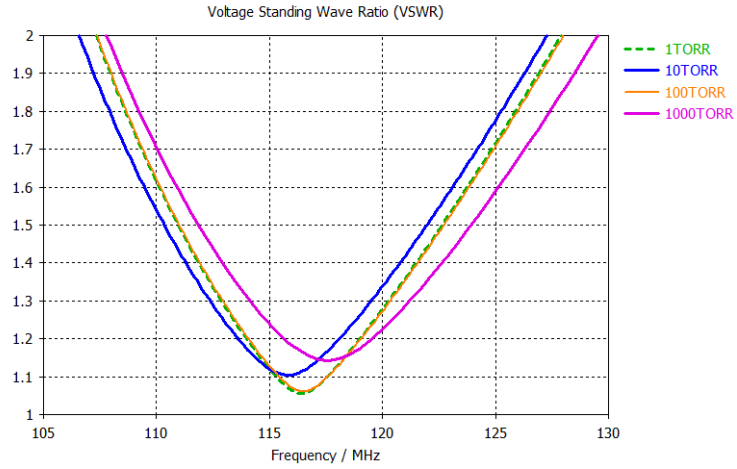
6.2.2. Farklı Basınçların S11 ve VSWR Üzerindeki Etkisi

Tablo 6.4 göre plazma basıncı arttıkça, bir dizi değişiklik gözlemlenir. Öncelikle, plazmanın elektron yoğunluğu artar. Bununla birlikte, plazma frekansı da artar (Denklem 22). Ayrıca, rezonans frekansında küçük yukarı yönlü kaymalar meydana gelir. Şekil 6.7’de gösterildiği gibi basınç değeri arttıkça S11 değerinin kayde değer ölçüde arttığı, bu durum anten performansı için istenmeyen bir şekilde antenin yansıma kaybının arttığını gösterir ve anten performansını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir.



Şekil 6.7 Ar-Ne plazma dipol anteni farklı basınç değerleri için geri dönüş kaybı (S11) simülasyon verileri

1 Torr basınç değerinde Ar-Ne gaz karışımını içeren dipol anten en optimum performansta olduğu hem Şekil 6.7 hem de Şekil 6.8 görülmüştür.



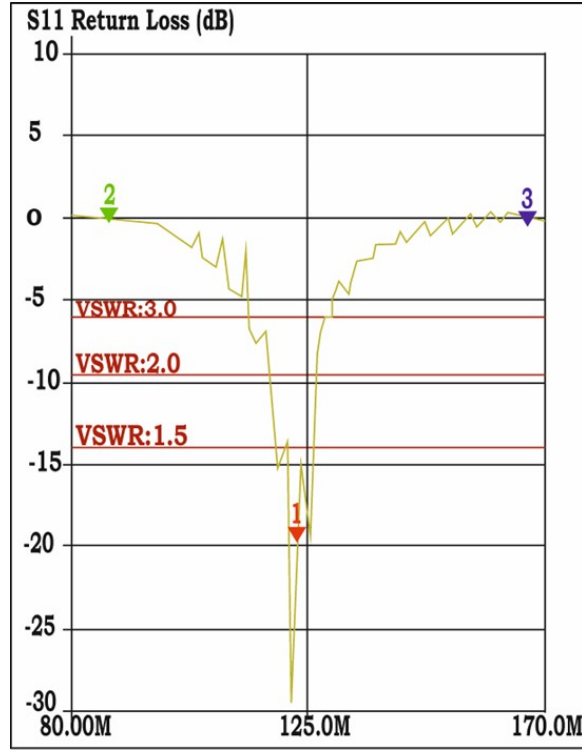
Şekil 6.8 Ar-Ne plazma dipol anteni farklı basınç değerleri için VSWR simülasyon verileri

Bu çalışmada elde edilen bulgular, plazma basıncının artmasıyla antenin performansının olumsuz yönde etkilendiğini bilgisini verirken optimum basınç değerinin önemini de vurgulamaktadır. Literatür ile de uyumlu olarak düşük basınç değerlerinin plazma antenin çalışma performansı için uygun olduğunu da kanıtlamaktadır [60].

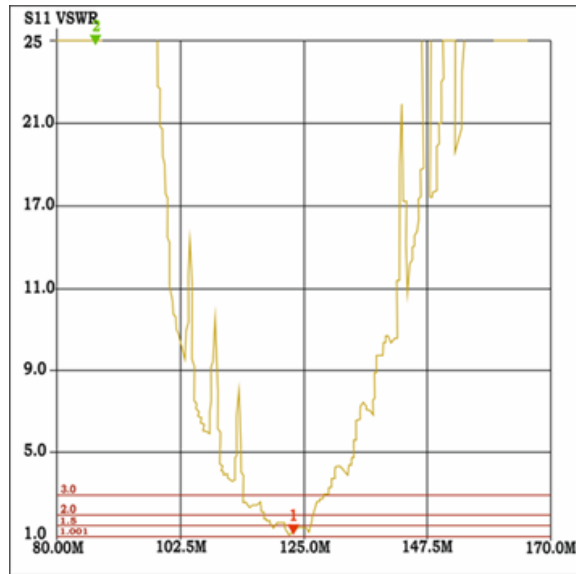
6.3. Deneysel Sonuçlar

Plazma anten terminalinin deneysel olarak S11 ve VSWR lümleri, sinyal frekans aralığında bir ağ analizörü kullanılarak gerçekleştirildi. Şekil 6.9 ve Şekil 6.10, S11 ve VSWR sonuçlarını göstermektedir. Bu sonuçlara dayanarak, rezonans frekansının 122.3 MHz olduğu belirlendi, S11 parametreleri 29.392 dB, empedans değeri 64 Ω ve VSWR değeri 1.070 olarak tespit edildi. Ar-Ne gaz karışımını içeren deneysel sonuçlar, -29.392 dB geri dönüş kaybı, 1.070 VSWR değeri ve 122.3 MHz rezonans frekansında 63 Ω empedans gösterdi. Aynı parametrelerle yapılan simülasyon sonuçları, 116.42 MHz rezonans frekansında -31.31 dB; S11, 1.05 VSWR ve 70 Ω empedans gösterdi. Deneysel ve teorik bulguların değerlendirilmesinde, rezonans frekansında yaklaşık 6 MHz frekans kayması olduğu ve geri dönüş kaybının neredeyse benzer olduğu gözlemlendi. Frekans kayması, geri dönüş kaybı ve VSWR'deki gözlemlenen farkların, empedans uyumsuzluklarından kaynaklandığı öngörülmektedir. Simülasyon ve ölçülen empedans değerleri arasında yaklaşık 6 Ω 'luk bir fark fark edildi; bu, deneysel kurulumda kullanılan bağlantılarda veya koaksiyel kabloların kayıplarından kaynaklanabilecek ve ihmal edilebilir bir seviyede göz ardı edilebilir.

Tüm deneysel ve simülasyon sonuçlarının kapsamlı bir değerlendirmesi sonucunda, dipol plazma anteninin VHF bandında etkili bir Şekilde çalıştığı açıktır. Plazma antenin, metal antene göre üstün özelliklerine bakılarak, savunma sektörü için cazip bir seçenek olmaya devam ettiği görülmektedir.

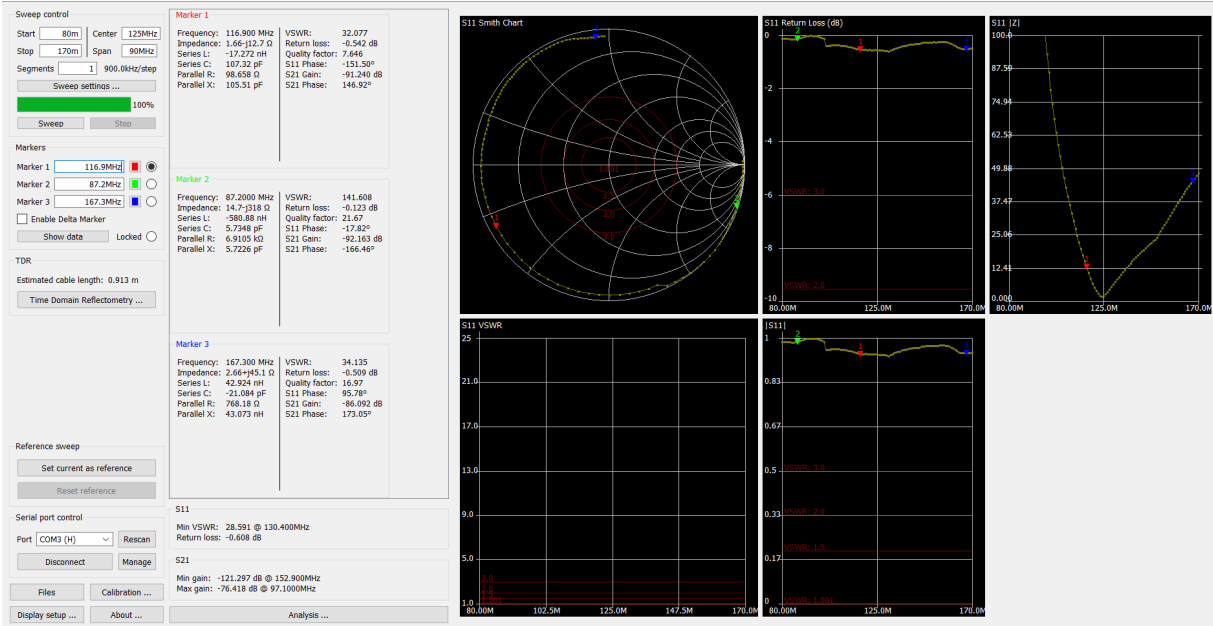


Şekil 6.9 Ar-Ne plazma dipol anteni geri dönüş kaybı (S11) için deneysel sonuçlar



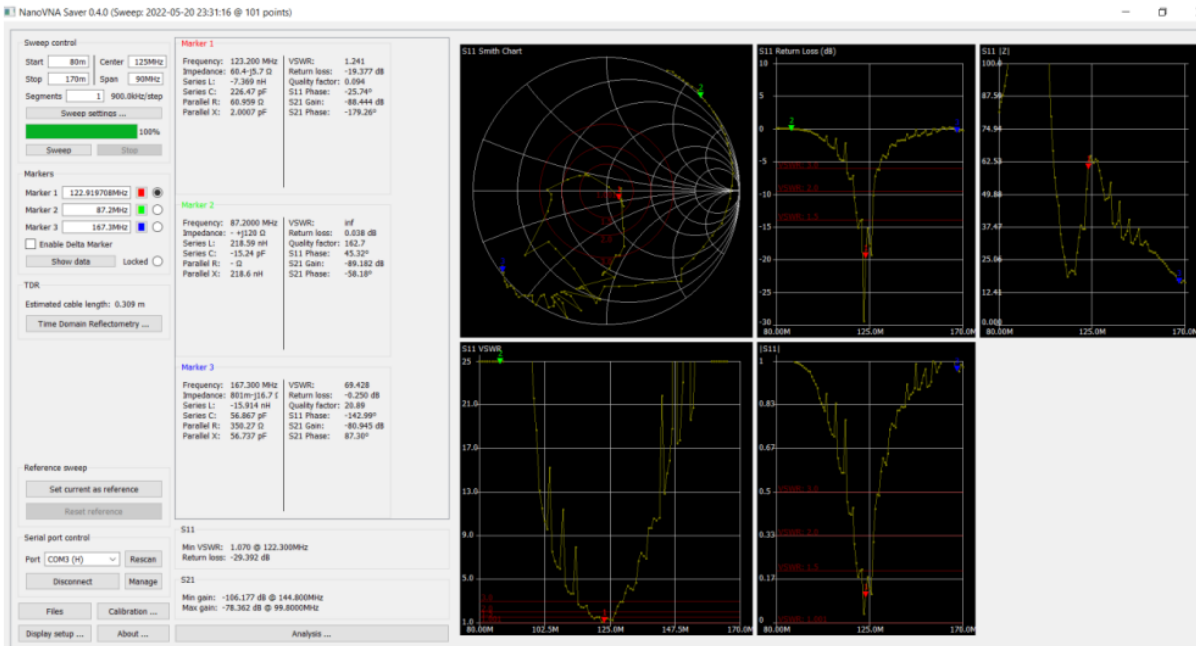
Şekil 6.10 Ar-Ne plazma dipol anteni duran dalga oranı (VSWR) için deneysel sonuçlar

Plazma anten çalışmadığı durumdaki deneysel ölçüm sonuçları Şekil 6.11’de verilmiştir.



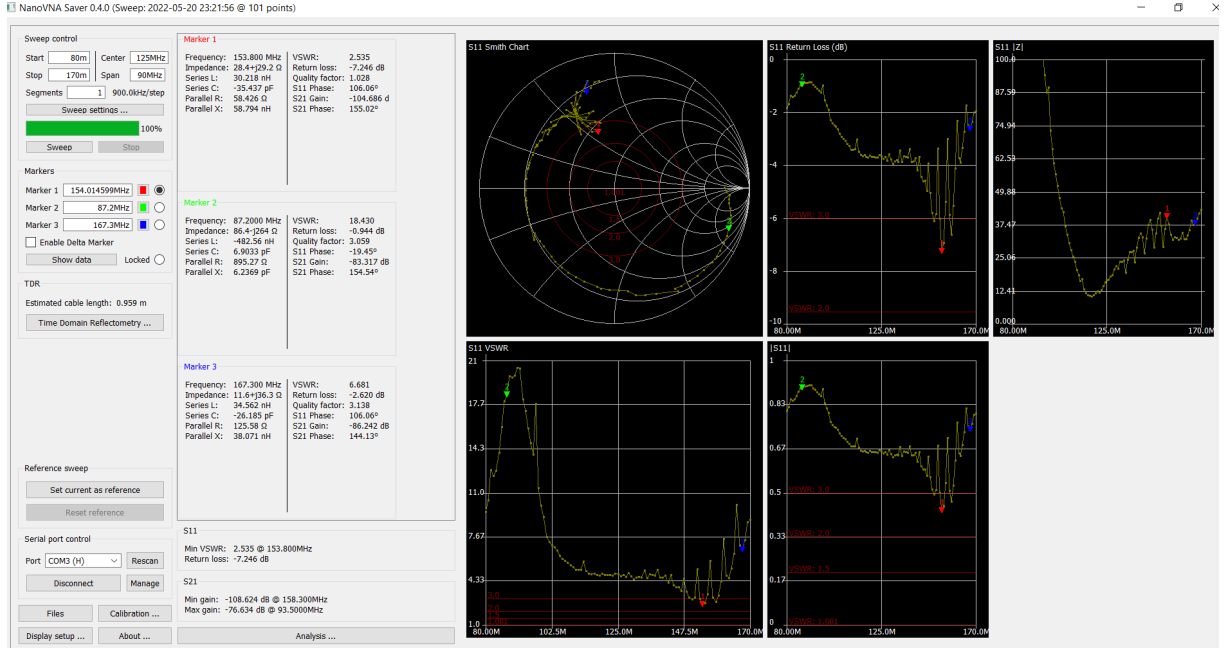
Şekil 6.11 Plazma dipol anten kapalı durumda iken deneysel sonuçlar

Plazma anten çalıştığı durumdaki deneysel ölçüm sonuçları Şekil 6.12’de verilmiştir.



Şekil 6.12 Plazma dipol anten açık durumda iken deneysel sonuçlar

Plazma anten çalıştığı durumda optimize edilmeden önceki deneysel ölçüm sonuçları Şekil 6.13’de verilmiştir. Burada hem plazma antenin enerji kısmı için LC devresinin olmadığı hem de anten parametreleri ölçtüğümüz VNA tarafında yüksek geçirgen filtre kullanmadığımızda elde ettiğimiz sonuçları içermektedir.



Şekil 6.13 Plazma dipol anten açık durumda iken deneysel sonuçlar

7. SONUÇ ve TARTIŞMA

Farklı gaz karışımları kullanılarak gerçekleştirilen testler, plazma antenlerinin RF rezonans frekansının kullanılan özel gaza bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur. Ek olarak, RF rezonansı ve anten kazancı, kullanılan gaz karışımının türüne göre farklılık göstermektedir. Radyasyon deseninin ve simülasyon sonuçlarının analizi, metal antenin en yüksek kazancı elde ettiğini göstermektedir. Ancak, sadece kazanç, bir antenin verimliliğinin tek başına yeterli bir göstergesi değildir.

Simülasyonlar sırasında, metal anten 119.22 MHz'de en yüksek rezonans frekansını göstermiş, buna karşılık 2.20 dBi toplam kazanç elde edilmiştir. Bu değer, model kazancı 2.19 dBi ölçülen bir neon-argon gaz karışımı anteninin kazancıyla neredeyse aynıdır. Simülasyonlardan elde edilen sonuçlar, hem neon gazı hem de neon-argon karışımı antenlerin sonuçlarının oldukça benzer olduğunu göstermektedir. İki anten de birbirine yakın rezonans frekansları sergilemiştir; neon gazı anteni 117.26 MHz'de rezonans gösterirken, neon-argon karışımı anteni 116.42 MHz'de rezonans göstermiştir.

Şekil 6.4 (a-d), plazma ve metal dipol antenlerinin doğrudan radyasyon desenini ilgili rezonans frekanslarında göstermektedir: argon için $f=115.72$ MHz, neon için $f=117.26$ MHz, argon-neon için $f=116.42$ MHz ve metal için $f=119.22$ MHz. Ayrıca, bu antenler benzer kazançlar göstermektedir; neon gazı anteni 2.18 dBi ve neon-argon karışımı anteni 2.19 dBi ölçülmüştür. Diğer yandan, argon anteni simülasyonlarda en düşük kazanç ve rezonans frekansını göstermiştir; 115.72 MHz frekansında 2.11 dBi kazanç elde edilmiştir. Bu simülasyon sonuçlarına dayanarak, hem neon gazı hem de argon-neon karışımı, plazma anten konfigürasyonları için uygun seçeneklerdir. Ancak, tüm plazma anten konfigürasyonlarına kıyasla argon-neon karışımı gazının gösterdiği daha yüksek kazanç göz önünde bulundurularak, neon-argon karışımı için deneysel kurulum test edilmiştir. Deneysel bulgular, neon-argon karışımının 122.3 MHz'de -29.392 dB S11 parametresine ve 1.070 VSWR değerine sahip olduğunu göstermektedir [61]. İki sonuç arasındaki fark, simülasyon çıktılarında yaklaşık 5 MHz'lik bir aşağı yönlü frekans kaymasından kaynaklanmaktadır.

Bu durum, bu karmaşık sistemdeki elektron yoğunluğu dağılımının kesinliği, etkili plazma anten uzunluğu ve ölçüm hataları gibi belirsizliklerle ilişkilendirilebilir. Bu çalışmanın sonuçları, belirli bir dipol plazma anteninin VHF bandı uygulamaları için uygun olduğunu göstermektedir. Argon-neon karışımıyla tasarlanan dipol plazma anten, radar ve denizcilik uygulamaları için önemli bir potansiyele sahip görünmektedir.

7.1. Ana Bulgular

Plazma dipol anten ve metal dipol anten için yapılan doktora çalışmasının ana bulguları:

Performans Değerlendirmesi: VHF bandında çalışan plazma ve metal dipol antenlerin çalışma frekansları belirlenmiştir. Bu kapsamda aynı geometride fakat farklı malzemeleri içeren anten tiplerinin radyasyon deseni, kazanç, S11, VSWR ve radyasyon verimliliği gibi temel performans parametreleri belirlenmiştir.

Simülasyon Sonuçları: COMSOL Multiphysics plazma modülü simülasyon araçları kullanılarak plazma parametreleri simüle edildi. CST Microwave Studio® ile anten parametreleri detaylı analiz edildi. Simülasyonlar, antenin tasarımının optimize edilmesinde ve performansının tahmin edilmesinde önemli rol oynadı.

Deneysel Sonuçları: Gerçek dünya koşullarında antenin deneysel olarak test edilmesi ve ölçümlerinin yapılması sonucunda elde edilen veriler değerlendirildi. Bu çalışmalar, simülasyon sonuçları ile karşılaştırılarak antenin gerçek performansının doğrulanmasına olanak sağladı.

Optimizasyon Çalışmaları: Antenin geometrisi, malzeme seçimi ve besleme yöntemleri gibi tasarım parametreleri üzerinde yapılan optimizasyon çalışmaları gerçekleştirildi. Bu çalışmaların sonucunda antenin verimliliği ve performansı artırılmaya çalışıldı.

7.2. Araştırmanın Katkıları ve Sınırlamaları

Katkılar

Yeni Yöntemler: Bu çalışma anten tasarımı ve optimizasyonunda yeni yöntemler sunmuştur. Örneğin, malzeme seçimi, anten geometrisi ve besleme teknikleri gibi faktörler üzerinde yapılan detaylı analizler, antenin performansını artırmak için etkili stratejiler önermiştir.

Bilimsel Literatüre Katkı: Doktora tezi, anten teknolojileri alanında yapılan bilimsel literatüre yeni veriler ve analizler sağlamıştır. Bu çalışmalar, ilgili alandaki araştırmacıların ve endüstri profesyonellerinin bilgi birikimini artırmış ve yeni araştırma yolları açmıştır.

Uygulama Alanlarına Etki: Elde edilen bulgular, iletişim sistemleri, radar sistemleri ve diğer RF uygulamaları gibi alanlarda anten teknolojilerinin gelişimine katkıda bulunmuştur. Bu teknolojilerin günlük yaşamdaki ve endüstriyel uygulamalardaki kullanım potansiyelleri üzerinde olumlu bir etki yaratması beklenmektedir.

Sınırlamalar

Deney Koşulları: Deneysel düzeneğin kurulumu ve yüksek voltaj olması sebebiyle çalışma koşullarının nispeten riskli olması. Ayrıca gerçek dünyada deneysel koşulların kontrol edilebilirliği ve tekrar edilebilirliği bazı zorluklar içerebilir. Bu nedenle, deneysel sonuçların tam doğruluğunu sağlamakta sınırlamalar getirebilir.

Malzeme ve Üretim Kısıtlamaları: Kullanılan malzemelerin ve üretim tekniklerinin sınırlamaları, anten tasarımının optimal düzeyde yapılmasına engel olabilir. Üretim teknolojilerinin geliştirilmesi bu kısıtlamaların aşılmasına yardımcı olabilir.

Teorik ve Deneysel Uyumsuzluklar: Teorik modeller ile deneysel veriler arasındaki bazı uyumsuzluklar, antenin gerçek dünya koşullarında nasıl davrandığının tam anlamıyla anlaşılmasını zorlaştırabilir. Bu durum plazma fiziğinin çok derin bir konu olduğu ve birden çok disiplini bir araya getirdiğinden gerçeğe yakın modelleme yapmak uzun zamanlar alabilir.

7.3. Gelecekteki Çalışmalar için Öneriler

Simülasyonları ve deneysel kurulumu genişletmek için aşağıdaki hedefleri gelecekte yapmayı planlıyoruz:

1. EMI/EMC testleri gerçekleştirmek,
2. Plazma dipol anten sisteminin uyumlandırma parametreleri (L,C) ile simülasyonunu ve optimizasyonunu gerçekleştirmek,
3. Deneysel düzeneği yansız odada test etmek,
4. Devre elemanı bağlantıları gibi deneysel kurulum ekipmanının kalitesini iyileştirmek,
5. Deniz platformlarında test etmek,

İç içe (Nested) geçmiş plazma anten çalışmaları gerçekleştirmek;

1. Simülasyon ve deneysel çalışmalar icraa etmek,
2. EMI/EMC testleri icraa etmek,
3. Hava platformlarında test etmek.

Dipol plazma anten sisteminin ve karmaşık deniz iletişimi uygulamalarının sürekli karakterizasyonu ve geliştirilmesi için çalışmalarımıza devam etmeyi planlıyoruz. Ayrıca hava platformları içinde nested plazma anten modeli geliştirerek savunma alanında kullanılacak yerli plazma anten ürün modeli ortaya koymak hedeflenmiştir.

REFERENCES

- [1] Radio spectrum website. <https://www.transportation.gov/pnt/what-radio-spectrum>, **2024**.
- [2] Comsol plasma module user's guide official website. <https://doc.comsol.com/6.1/doc/com.comsol.help.plasma/PlasmaModuleUsersGuide.pdf>, **2024**.
- [3] Heinrich Hertz. On the finite velocity of propagation of electromagnetic actions. *Electric Waves*, 110, **1888**.
- [4] Heinrich Hertz. Lecture 25 radiation by a hertzian dipole.
- [5] M Alharbi. High performance plasma antenna for wireless communication applications. In *2022 International Conference on Networks, Communications and Information Technology (CNCIT)*, pages 108–112. IEEE, **2022**.
- [6] Faizan Mehmood, Tariq Kamal, and Umair Ashraf. Generation and applications of plasma (an academic review). **2018**.
- [7] G. Kılıçerkan-Başlar and O. Kayhan. *Plazma Antenleri*, in *Maddenin 4.Hali: Plazma Temelleri ve Uygulamaları*, pages 306–331. Arkadas, Ankara, **2023**.
- [8] H Conrads and M Schmidt. Plasma generation and plasma sources. *Plasma sources science and technology*, 9(4):441, **2000**.
- [9] Dheeraj Rajaram Mada. Plasma antenna. *International Journal of Current Engineering and Scientific Research*, 4(11):34–38, **2017**.
- [10] Paola de Carlo, Giulia Mansutti, Mirko Magarotto, Antonio-Daniele Capobianco, Daniele Pavarin, Alberto Tuozi, and Claudia Facchinetti. Design and numerical characterization of a realistic plasma dipole. In *2019 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, pages 0811–0815. IEEE, **2019**.

- [11] John Phillip Rayner, Adrian Philip Whichello, and Andrew Desmond Cheetham. Physical characteristics of plasma antennas. *IEEE Transactions on plasma science*, 32(1):269–281, **2004**.
- [12] Igor Alexeff, Ted Anderson, Esmaeil Farshi, Naresh Karnam, and Nanditha Reddy Pulasani. Recent results for plasma antennas. *Physics of Plasmas*, 15(5), **2008**.
- [13] Chao Wang, Bin Yuan, Wenxuan Shi, and Junfa Mao. Low-profile broadband plasma antenna for naval communications in vhf and uhf bands. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 68(6):4271–4282, **2020**.
- [14] Giulia Mansutti, Davide Melazzi, and Antonio-Daniele Capobianco. A reconfigurable metal-plasma yagi-yuda antenna for microwave applications. *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst. J.*, 2(3):441–448, **2017**.
- [15] GG Borg, JH Harris, NM Martin, David Thorncraft, R Milliken, DG Miljak, Brian Kwan, T Ng, and J Kircher. Plasmas as antennas: Theory, experiment and applications. *Physics of Plasmas*, 7(5):2198–2202, **2000**.
- [16] Paola De Carlo, Mirko Magarotto, Giulia Mansutti, Antonio Selmo, Antonio-Daniele Capobianco, and Daniele Pavarin. Feasibility study of a novel class of plasma antennas for satcom navigation systems. *Acta Astronautica*, 178:846–853, **2021**.
- [17] Ruwaybih R Alsulami and Heather H Song. Plasma antennas for future advanced communication systems. In *2013 Abstracts IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS)*, pages 1–1. IEEE, **2013**.
- [18] Cst studio suit ® official website. <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite>, **2023**.
- [19] Mirko Magarotto, Paola de Carlo, Giulia Mansutti, Franco J Bosi, Nicholas E Buris, Antonio-D Capobianco, and Daniele Pavarin. Numerical suite for

- gaseous plasma antennas simulation. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 49(1):285–297, **2020**.
- [20] Mona M Badawy, Hend Abd El-Azem Malhat, Saber Helmy Zainud-Deen, and Kamal Hassan Awadalla. A simple equivalent circuit model for plasma dipole antenna. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43(12):4092–4098, **2015**.
- [21] Giulia Mansutti, Paola De Carlo, Antonio-D Capobianco, Davide Melazzi, Fabio Trezzolani, and Alberto Tuozi. L-band plasma turnstile antenna for gps applications. In *2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pages 1–5. IEEE, **2019**.
- [22] B Shahmohamadi, R Sarraf Shirazi, G Moradi, and M Ghaderi. Analysis of dipole plasma antenna using kinetic method and fdtd numerical approach. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 145:154066, **2022**.
- [23] H. M. Zali, M. T. Ali, I. Pasya, N. Ya’acob, N. A. Halili, H. Ja’afar, and A. A. Azlan. A monopole fluorescent tube antenna with wi-fi router. In *2014 21st International Conference on Telecommunications (ICT)*, pages 358–362. **2014**. doi:10.1109/ICT.2014.6845139.
- [24] Vladlen Podolsky, Abbas Semnani, and Sergey O. Macheret. Experimental and numerical studies of a tunable plasma antenna sustained by rf power. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 48(10):3524–3534, **2020**. doi:10.1109/TPS.2020.3023422.
- [25] Mohammadreza Ghaderi, Gholamreza Moradi, and Pedram Mousavi. Numerical study on a wideband plasma folded-dipole antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16:1253–1256, **2017**. doi:10.1109/LAWP.2016.2631603.
- [26] Nathan Blaunstein and Christos G. Christodoulou. *Wireless Communication Links with Fading*, pages 1–33. **2014**. doi:10.1002/9781118816707.ch1.

- [27] William C Jakes and Donald C Cox. *Microwave mobile communications*. Wiley-IEEE press, **1994**.
- [28] William Webb. *Wireless communications: The future*. John Wiley & Sons, **2007**.
- [29] Abdul Samad, Kashif Azim, and Shahzada Alamgir Khan. Comparative analysis of plasma antenna with metal antenna. *International Journal of Computer Applications*, 975:8887, **2015**.
- [30] Theodore Anderson. *Plasma antennas*. Artech House, **2020**.
- [31] Umran S Inan and Marek Golkowski. *Principles of plasma physics for engineers and scientists*. Cambridge University Press, **2010**.
- [32] Pascal Chabert and Nicholas Braithwaite. *Physics of radio-frequency plasmas*. Cambridge University Press, **2011**.
- [33] Alexander Fridman. *Plasma chemistry*. Cambridge university press, **2008**.
- [34] Hans R Griem. *Principles of plasma spectroscopy*. **2005**.
- [35] Mike Hapgood. Chapter 1 - linking space weather science to impacts—the view from the earth. In Natalia Buzulukova, editor, *Extreme Events in Geospace*, pages 3–34. Elsevier, **2018**. ISBN 978-0-12-812700-1. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812700-1.00001-7>.
- [36] José A Bittencourt. *Fundamentals of plasma physics*. Springer Science & Business Media, **2013**.
- [37] Michael A Lieberman and Allan J Lichtenberg. Principles of plasma discharges and materials processing. *MRS Bulletin*, 30(12):50–200, **1994**.
- [38] Francis F Chen. *Introduction to plasma physics*. Springer Science & Business Media, **2012**.

- [39] Fanrong Kong, Peiqi Chen, Qiuyue Nie, Xiaoning Zhang, Zhen Zhang, and Binhao Jiang. Research on radiation characteristics of dipole antenna modulation by sub-wavelength inhomogeneous plasma layer. *Aip Advances*, 8(2), **2018**.
- [40] Wenxuan Shi, Bin Yuan, Junfa Mao, and Chao Wang. Enhancement of electromagnetic energy by plasma antenna. *Nano Energy*, 76:105053, **2020**. ISSN 2211-2855. doi:<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105053>.
- [41] Modeling of materials in wave electromagnetics problems official website. <https://www.comsol.com/blogs/modeling-of-materials-in-wave-electromagnetics-problems/>, **2024**.
- [42] Yu P Raizer, JE Allen, and VI Kisin. Gas discharge physics (springer, berlin. **1991**.
- [43] Constantine A Balanis. *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, **2016**.
- [44] L. Vallozzi, C. Hertleer, and H. Rogier. 26 - latest developments in the field of textile antennas. In Vladan Koncar, editor, *Smart Textiles and their Applications*, Woodhead Publishing Series in Textiles, pages 599–626. Woodhead Publishing, Oxford, **2016**. ISBN 978-0-08-100574-3. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100574-3.00026-6>.
- [45] Nathan Blaunstein and Christos G. Christodoulou. *Antenna Fundamentals*, pages 34–53. **2014**. doi:10.1002/9781118816707.ch2.
- [46] Robert E Collin. *Foundations for microwave engineering*. John Wiley & Sons, **2007**.
- [47] David M Pozar. Microwave engineering, johnwiley & sons. *Inc., New York*, **2005**.

- [48] Theodore Anderson. Theory, measurements, and prototypes of plasma antennas. In *2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, pages 567–568. IEEE, **2014**.
- [49] Lecture-1 drude model ® official website. http://www.physics.iisc.ac.in/~aveek_bid/wp-content/uploads/2019/07/Lecture-1-Drude-model.pdf, **2024**.
- [50] Dan M Goebel, Ira Katz, and Ioannis G Mikellides. *Fundamentals of electric propulsion*. John Wiley & Sons, **2023**.
- [51] Hajar Ja’afar, Mohd Tarmizi B Ali, Ahmad Nazri B Dagang, Hanisah Mohd Zali, and Nur Aina Halili. A reconfigurable monopole antenna with fluorescent tubes using plasma windowing concepts for 4.9-ghz application. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43(3):815–820, **2015**.
- [52] Wellington Guilherme da Silva and Homero Santiago Maciel. Basic features of plasma antennas for applications in electronic warfare.
- [53] Mostafa Hadaegh and Farzad Mohajeri. Advantages and disadvantages of different coupling methods of plasma antennas. **2021**.
- [54] İsmail Rafatov and Aa Kudryavtsev. On the numerical modelling of a dc driven glow discharge plasma. **2012**.
- [55] Sharan Bonde, Vikram Ghiye, and Ashwinikumar Dhande. A study of plasma antenna parameters with different gases. In *2014 Fourth International Conference on Communication Systems and Network Technologies*, pages 16–19. **2014**. doi:10.1109/CSNT.2014.12.
- [56] Basics of noise countermeasures [lesson 7] lc compound-type emi filters. <https://article.murata.com/en-sg/article/basics-of-noise-countermeasures-lesson-7.>, **2023**.
- [57] American Radio Relay League. *The ARRL antenna book*. 15. The League, **1949**.

- [58] Hubregt J Visser. *Antenna theory and applications*. John Wiley & Sons, **2012**.
- [59] Vikram Kumar, Mrinal Mishra, and NK Joshi. Study of a fluorescent tube as plasma antenna. *Progress in electromagnetics research letters*, 24:17–26, **2011**.
- [60] H Ja'afar, R Abdullah, FNM Redzwan, and Fatemeh Sadeghikia. Analysis of cylindrical monopole plasma antenna design. In *2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, pages 1–2. IEEE, **2018**.
- [61] Gamze Kılıçerkan Başlar, Oğuzhan Kayhan, Mehmet Emre Taşgın, and Serhat Çakır. Experimental characterization and simulation of a dipole plasma antenna for vhf band and effect of ar–ne gas composition. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **2024**.