

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



MATRİS DİZİLİMLİ PLAZMA ANTEN DİZİSİ TASARIMI

Atalay KOCAKUŞAK

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

AĞUSTOS 2023

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



MATRİS DİZİLİMLİ PLAZMA ANTEN DİZİSİ TASARIMI

Atalay KOCAKUŞAK

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

AĞUSTOS 2023

ANTALYA

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

MATRİS DİZİLİMLİ PLAZMA ANTEN DİZİSİ TASARIMI

**Atalay KOCAKUŞAK
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

**Bu tez TÜBİTAK tarafından BİDEB/2211-C/1649B032001000 nolu proje ile ve
TÜBİTAK tarafından BİDEB/2214-A/1059B142000191 nolu proje ile
desteklenmiştir.**

AĞUSTOS 2023

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MATRİS DİZİLİMLİ PLAZMA ANTEN DİZİSİ TASARIMI

Atalay KOCAKUŞAK
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Bu tez 01/08/2023 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Selçuk HELHEL(Danışman)
Prof. Dr. Şükrü ÖZEN
Prof. Dr. S. Cumhur BAŞARAN
Doç. Dr. Bektaş ÇOLAK
Doç. Dr. İ. Bahadır BAŞYİĞİT

ÖZET

MATRİS DİZİLİMLİ PLAZMA ANTEN DİZİSİ TASARIMI

Atalay KOCAKUŞAK

Doktora Tezi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Ağustos 2023; 54 sayfa

Maddenin dördüncü hali olarak da tanımlanan plazma ile oluşturulmuş antenler, klasik metalik antenlerin yerine kullanılabilen, çoğunlukla çubuk anten formundaki plazma tüpleridir. Plazma tüpleri içerisinde plazma aktif durumda iken, iletken gibi davranmakta ancak plazma uyarımı durdurulup pasif hale getirildiğinde neredeyse transparan veya bir diğer deyişle radar görünmez olmaktadır. Bu özellik, plazma antenlerin özellikle son yıllarda kullanım sıklığını arttırmış ve radar gizlilik özelliği ihtiyacı olan alanlar için bir çözüm haline getirmiştir.

Bu tez çalışması plazma çubuk anten ve bu çubuk antenlerden oluşan bir anten dizisi elde etmeyi amaçlamıştır. Plazma elemanı olarak, aydınlatma amaçlı üretilmiş plazma tüpleri olan floresan tüpleri kullanılmıştır. İlgili plazma elemanına RF güç uygulanabilmesi için bir bağdaştırıcı tasarımı yapılmış ve benzetimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen plazma elemanı bir anten dizisinin elemanı olarak kullanılarak 4 elemandan oluşan çizgisel bir anten dizisi tasarımı yapılarak benzetim sonuçları elde edilmiştir.

Anten dizisinin ışıma örüntüsünü kontrol edebilmek için, RF beslemesi bulunmayan yansıtıcı/saptırıcı plazma tüpleri, aktif dizi elemanlarının etrafında matris dizilimi ile yerleştirilerek örüntü kontrolü elde edilmiştir. Yansıtıcı/saptırıcı plazma tüpleri pasif durumda iken, dizi ışıma örüntüsü neredeyse hiç etkilenmezken, bir yönde aktif hale getirilen plazma tüpler ile örüntü bastırma elde edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Anten, Bağdaştırıcı, Örüntü Kontrolü, Plazma Anten, Plazma Anten Dizisi

JÜRİ: Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Prof. Dr. S. Cumhur BAŞARAN

Doç. Dr. Bektaş ÇOLAK

Doç. Dr. İ. Bahadır BAŞYİĞİT

ABSTRACT

PLASMA ANTENNA ARRAY DESIGN WITH MATRIX FORM

Atalay KOCAKUŞAK

PhD Thesis in Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Selçuk HELHEL

August 2023; 54 pages

Antennas formed with plasma, which is also defined as the fourth state of matter, are plasma tubes mostly in the form of rod antennas, that can be used instead of classical metallic antennas. While the plasma is active in the plasma tubes, it behaves like a conductor, but when the plasma excitation is stopped and plasma turned to passive, it becomes almost transparent, or in other words, invisible to the radar. This feature has increased the frequency of use of plasma antennas, especially in recent years, and has made it a solution for areas that need radar stealth features.

This thesis study aimed to obtain a plasma rod antenna and an antenna array consisting of these rod antennas. Fluorescent tubes, which are plasma tubes produced for lighting purposes, were used as the plasma element. A coupler has been designed and simulated so that RF power can be applied to the related plasma element. By using the obtained plasma element as an element of an antenna array, a linear antenna array consisting of 4 elements was designed and simulation results were obtained.

In order to control the radiation pattern of the antenna array, the pattern reconfiguration/beamforming is obtained by placing the reflector/deflecting plasma tubes without RF feed with a matrix array around the active array elements. Pattern suppression is achieved with plasma tubes activated in one direction, while the array radiation pattern is almost unaffected when the reflective/deflective plasma tubes are in the passive state.

KEYWORDS: Antenna, Beamforming, Coupler, Plasma Antenna, Plasma Antenna Array

COMMITTEE: Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Prof. Dr. S. Cumhur BAŞARAN

Assoc. Prof. Dr. Bektaş ÇOLAK

Assoc. Prof. Dr. İ. Bahadır BAŞYİĞİT

ÖNSÖZ

Bu doktora çalışması başta olmak üzere, akademik hayatımın her adımında beni destekleyen, aktardığı bilgi birikimi ile beni gelecek akademik yaşamıma özgüvenli bir şekilde hazırlayan, tez çalışması boyunca motivasyonumun ve moralimin kötü olduğu dönemlerde hedefe tekrar yönelmemi sağlayan, sadece akademik danışmanlık ile değil hayat bilgi birikimi ile öz gelişimime büyük katkı sunan, kıymetli hocam Prof. Dr. Selçuk HELHEL'e saygı ve sevgilerimi sunar, teşekkür ederim.

Bugüne kadarki eğitim öğrenim hayatımın her aşamasında üzerime emeği geçen tüm hocalarıma, bana gösterdikleri ilgi, alaka ve destekler için teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Bu doktora çalışmasının yapılmasında ve günlük hayatımda manevi olarak desteklerini esirgemeyen, sorgusuz sualsiz bana ve çalışmama maddi/manevi destek veren, kendilerinin varlığıyla hem onur duyduğum hem güven hissettiğim sevgili arkadaşlarım, Dr. Fatih YILMAZ ve Dr. Fatih UÇAR'a teşekkür ederim.

Aynı birimde çalıştığım, tez çalışmam süresince yükümü hafifleten, manevi desteklerini esirgemeyen tüm çalışma arkadaşlarıma ve doktora çalışmam süresince beni manevi olarak ayakta tutan tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu tezi BİDEB2211C/ 1649B032001000 ve BİDEB2214A/ 1059B142000191 numaralı projeler ile destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Beni tek başına yetiştiren, ömrünü bana adayan, hayatımın her aşamasında koşulsuz beni destekleyen, hakkını ömrüm boyunca ödeyemeyeceğim, bana hem anne hem baba olarak, tek başına bana koca bir aile olan annem, Meral EYİLER'e, sonsuz sevgi ve saygılarımla teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
AKADEMİK BEYAN	v
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	4
2.1. Plazmanın Anten Olarak Kullanımı	4
3. MATERYAL VE METOT.....	11
3.1. Plazma Tanımı.....	11
3.2. Plazma ve Enerji.....	13
3.3. Plazma Frekansı ve Elektriksel Özellikleri	15
3.4. Ticari Plazma Tüpler	20
3.5. Antenler ve Yayılma	20
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	26
4.1. Bağdaştırıcı Tasarımı ve Benzetim Sonuçları	26
4.2. Temel Çubuk Anten Benzetimleri.....	28
4.3. Susturuculu Anten Benzetimleri	34
4.3. 4 Elemanlı Dizi Benzetimleri	36
4.4. 4 Elemanlı Dizi ve 5 Yansıtıcılı Matris Yapısı Benzetimleri.....	38
4.5. 4 Elemanlı Dizi ve 9 Yansıtıcılı Matris Yapısı Benzetimleri.....	40
4.6. Bağdaştırıcı Tasarımı ve Benzetim	43
4.7. Monopol Anten Ölçümü.....	45
4.8. 4 Elemanlı Anten Dizisi Ölçümü	46
4.9. 4 Elemanlı 9 Yansıtıcılı Anten Dizisi Ölçümleri	47
5. SONUÇLAR	50
6. KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Matris Diziliimli Plazma Anten Dizisi Tasarımı” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

...../...../20....

Atalay KOCAKUŞAK

İmzası

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

B	: Manyetik Akı yoğunluğu
D	: Anten Açıklığı
E	: Elektrik Alan Şiddeti
F, f	: Frekans
H	: Manyetik Alan Şiddeti
J	: Akım yoğunluğu
P	: Güç
S_{ij}	: Saçılma parametresi
V	: Gerilim
c	: Işık hızı
ε_r	: Dielektrik sabiti
ε_m	: Bağlı geçirgenlik sabiti
ε₀	: Boşluğun geçirgenlik değeri
β	: Dalga Sayısı
σ	: İletkenlik
λ	: Dalga boyu
ω_p	: Plazma Frekansı

Tezde ondalık yazımlarda “1.01” şeklinde nokta ayracı kullanılmıştır. Tezde verilen eşitliklerde aksi belirtilmediği sürece “**B**” şeklindeki kalın harfler vektörel büyüklükleri temsil etmektedir.

Kısaltmalar

AÜ : Akdeniz Üniversitesi

DDO : Duran Dalga Oranı

EM : Elektromanyetik

GHz : Gigahertz

MHz : Megahertz

RF : Radyo Frekans

RAM : Radiation Absorber Material (Soğurucu)

VNA : Vektör Network Analizör

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Plazma Olayı Yaklaşım Modelleri	13
Şekil 3.2. Hertz Dipolü	22
Şekil 3.3. Hertz Dipolü Örüntüsü	23
Şekil 3.4. Plazma frekansı kontrol parametreleri.....	25
Şekil 4.1. Bağdaştırıcı perspektif görünümü	26
Şekil 4.2. Bağdaştırıcı Elektrik Alan Dağılımı	27
Şekil 4.3. Bağdaştırıcı Plazma Tüp Olmadan S11 Sonuçları.....	28
Şekil 4.4. Temel Çubuk Anten Tasarımı	28
Şekil 4.5. Temel Plazma Çubuk Anten S11 Sonucu.....	29
Şekil 4.6. Temel Plazma Çubuk Anten Örüntü Sonuçları	29
Şekil 4.7. Temel Plazma Çubuk Anten 3-Boyutlu Örüntü Sonuçları.....	30
Şekil 4.8. Bağdaştırıcı Genişliğinin Etkisi.....	31
Şekil 4.9. Plazma Frekansının S11'e Etkisi.....	32
Şekil 4.10. Çarpışma Frekansının S11'e Etkisi	33
Şekil 4.11. Bağdaştırıcı Konumunun S11'e Etkisi	34
Şekil 4.12. 4 Susturuculu Çubuk Anten Dizisi	35
Şekil 4.13. 4 Susturuculu Çubuk Anten Dizisi Örüntüsü	35
Şekil 4.14. 4 Elemanlı Anten Dizisi.....	36
Şekil 4.15. 4 Elemanlı Dizi 2 Boyutlu Örüntü Benzetim Sonuçları	37
Şekil 4.16. 4 Elemanlı Anten 3 Boyutlu Örüntü Benzetim Sonuçları	37
Şekil 4.17. 4 Elemanlı 5 Yansıtıcı Yerleşim.....	38
Şekil 4.18. 4x5 Yansıtıcılar Pasif 2 Boyutlu Benzetim	38
Şekil 4.19. 4x5 3 Boyutlu Benzetim Sonuçları- Pasif	39
Şekil 4.20. 4x5 Yansıtıcılar Aktif 2 Boyutlu Benzetim	39
Şekil 4.21. 4x5 3 Boyutlu Benzetim Sonuçları- Aktif.....	40

Şekil 4.22. 4 Elemanlı 9 Yansıtıcı Yerleşim.....	40
Şekil 4.23. 4x9 Yansıtıcılar Pasif 2 Boyutlu Benzetim	41
Şekil 4.24. 4x9 3 Boyutlu Benzetim Sonuçları – Pasif.....	41
Şekil 4.25. 4x9 Yansıtıcılar Aktif 2 Boyutlu Benzetim	42
Şekil 4.26. 4x9 3 Boyutlu Benzetim Sonuçları – Aktif	42
Şekil 4.27. Bağdaştırıcı Üretimi.....	43
Şekil 4.28. Bağdaştırıcı S11 Ölçümleri.....	44
Şekil 4.29. Bağdaştırıcı ve Plazma Tüp Ölçümü	44
Şekil 4.30. Monopol Plazma Anten Örüntü Ölçümleri	45
Şekil 4.31. Monopol Anten Ölçüm Sonuçları.....	45
Şekil 4.32. 4 Elemanlı Anten Dizisi Ölçümleri	46
Şekil 4.33. 4 Elemanlı Plazma Anten Dizisi Ölçümü.....	47
Şekil 4.34. 4x9 Anten Dizisi Üretimi	47
Şekil 4.35. 4x9 Anten Dizisi Ölçümleri.....	48
Şekil 4.36. 4x9 Anten Dizisi Ölçüm Sonuçları.....	48

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Anten tasarımların ait yönlülük ve kazanç değerleri.....	49
---	----



1. GİRİŞ

Maddenin dördüncü hali olarak çok geniş kitlelerce bilinen plazma, 20.yüzyılın başında iyonize olmuş gazları tanımlamak için kullanılan bir tanımdır. İlk ortaya çıkışından itibaren sadece iyonize gazlar şeklinde değil farklı şekiller ile de plazma davranışı elde edilmiştir. Plazma fiziği ve tekniği parçacıkların çok yüksek enerji seviyelerine çıkarıp, bu seviyelerde uygun süreler boyunca kararlı halde tutmakla ilgilenir. Doğası gereği kaotik olan bu yapıların incelenmesi ve davranışının ön görülebilmesi için yıllar içinde birçok çalışma yapılmıştır. İlk uygulamalarda plazma oluşturmak için yüksek elektrik ve manyetik alan veya yüksek sıcaklıkların elde edilmesine çalışılırken devam eden süreçte plazmanın kararlılığı ve özellikleri daha ilginç araştırma konuları olmuştur.

Yapılan çalışmalar neticesinde, plazma uygulamaları evlere kadar giren, floresan lambalar olarak kendilerine günlük hayatta yer bulabilmişlerdir. Floresan lambalar, içlerinde bulunan çeşitli soy gazlar ve cıva gibi dengeleyici yan bileşenler ile saatlerce stabil bir plazma üretimi gerçekleştiren ürünlerdir. Yüklü parçacıkların çarpışması sonucu ortaya çıkan ışığın aydınlatma amacı ile kullanılması oldukça yenilikçi bir yaklaşım olmakla birlikte her eve girebilecek seviyelerde ucuz ve çok sayıda florsan tüpü üretilmesi plazma tekniğinin de gelişimini hızlandırmıştır.

Plazmaların, parçacık yoğunluğu, plazma frekansı, çarpışma frekansı gibi parametrelerinin değişimi sonucunda, çeşitli elektriksel özellikler göstermektedirler. Teorik olarak tek bir plazma tüpünün, ilgili parametrelerini değiştirerek neredeyse sonsuz varyasyonlu elektriksel özellik elde edilebilmektedir. Özel üretim plazma tüpleri veya florsan tüpler, plazma oluşturabilmek için belirli bir vakum altında ilgili gazlar ile doldurulurlar. Vakum altında olmayan gazların plazmaya dönüşebilmesi (atmosferik plazma) oldukça zor ve farklı hedefleri olan bir çalışma alanıdır. Plazma tüplerin uyarımı durdurulduğunda vakum altında oldukları yani neredeyse serbest uzay özellikleri gösterdikleri için elektromanyetik dalgaların yayılımı açısından neredeyse transparan özellikler gösterirler.

Plazmaların hem değişken elektriksel özelliklerde üretilmesi hem de plazma tüplerin kapalı diğer bir deyişle uyarım kaldırılmış konumdayken neredeyse elektromanyetik açıdan transparan olmaları son çeyrek asırda gittikçe artan bir biçimde elektromanyetik ve radyo frekans (RF) alanlarında çalışan araştırmacıları kendine çekmiştir. Plazma tüplerinin şekil itibarıyla bir çubuk(monopol) antene denk düşmesi ve plazmanın uygun frekanslarda iletken olarak davranması, plazma tüplerin klasik metalik çubuk antenler yerine kullanabilmesini akıllara getirmiştir. Yapılan ilk çalışmalarda görece düşük frekanslarda neredeyse eşlenik metalik çubuk antenler ile aynı özellikler elde edilmiştir.

İlerleyen çalışmalarda plazma tüpü olarak, floresan lambaların kullanılmasına başlanmıştır. Bu adım ile hem ucuz hem de kolay bir şekilde plazma anten ve anten dizileri elde edilmiştir. Araştırmacılar çoğunlukla plazma antenlerin gizlilik, radar görünmezlik, hafiflik gibi özelliklerine vurgu yapmışlar ve bu yönde araştırmalarını yapmışlardır. Son yıllardaki çalışmalarda teorik olarak mümkün olan ancak henüz gerçekleşmemiş plazma şekilleri ile çeşitli yansıtıcı yüzeyler, frekans seçici yüzeyler, değişken özellikli ekranlama uygulamaları gibi çeşitli alanların önü açılmıştır.

Bu tez çalışması, araştırmaları ve kullanım alanları gittikçe artan plazma tüplerinin birer anten ve/veya yansıtıcı olarak kullanarak plazma tabanlı anten ve anten dizi yapısı ortaya çıkarmayı amaçlamıştır. Çalışmanın başlangıcından itibaren, plazma tüpü olarak ticari olarak kolaylıkla bulunabilen floresan tüplerinin temel plazma tüpü olarak kullanılması kararlaştırılmıştır.

Tez çalışması kapsamında, öncelikle plazma tüplerinin anten olarak kullanılabilmesi için bağdaştırıcı tasarımı benzetimleri yapılmıştır. İkinci adım olarak tekil plazma tüp benzetim programında bağdaştırıcı ile kullanılarak, çalışma frekansı, bağdaştırıcı konumunun ve bağdaştırıcının genişliğinin çalışma frekansına etkisi gibi faktörler incelenmiştir. Bu adımda, literatürde daha önce çalışılmayan L(1-2 GHz), S(2-4 GHz) veya C(4-8 GHz) bantlarından birisine denk düşen karakteristik çalışma frekansı hedeflenmiştir. Son adım olarak kullanılmaya karar verilen kombinasyonda plazma tüp ve bağdaştırıcı plazma dizisi olarak incelenmiştir. İlgili aşamalarda daha önce literatürde görülmeyen 3.2 GHz karakteristik frekansında çalışan kombinasyonlar elde edilebilmiştir. Ayrıca tez kapsamına elde edilen plazma tüp dizisinin etrafına üzerinde bağdaştırıcı olmayan pasif plazma tüpleri yerleştirilerek hem matris yapılı bir plazma dizisi elde edilmiş hem de pasif plazma tüplerinin uyarımları açık/kapalı arasında anahtarlanarak anten dizisinin örüntüsü kontrol edilmiştir.

Çalışma kapsamında bağdaştırıcı tasarımından nihai matris dizilimli plazma anten dizisi elde edilene kadar 60'tan fazla kombinasyon ile 1000 saatin üzerinde benzetim yapılmıştır. Benzetim ile elde edilen sonuçlardan gerçeklenmeye uygun olanları üretilerek ölçümleri yapılmıştır.

İlerleyen bölümlerde kaynak taraması başlığında, plazmanın ilk tanımlandığı çalışmadan başlayarak plazmaların özelliklerinin zaman içerisinde nasıl araştırıldığı, plazma tüplerinin ilk kez anten olarak kullanılması ve avantajları kaynaklar aracılığı ile açıklanmıştır. Yine aynı bölümde plazma antenlerin dizi anten, yansıtıcı anten veya örüntü manipülatörü olarak kullanımına örnekler verilmiştir.

Üçüncü bölümde, plazmanın tanımı, plazma fiziği, plazmanın elektriksel özellikleri ve tanım parametreleri irdelenmiştir. İlgili kısım ilk kez bu kısmı okuyan araştırmacılar için temel bir referans olarak hazırlanmış ve literatürdeki önemli kaynaklardan faydalanmıştır. Bölümün ikinci kısmında, floresan tüpler, floresan tüplerin özellikleri incelenmiştir. Son olarak plazmaların benzetim programında tanımlanması ve benzetiminin yapılması açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, öncelikle benzetim programı ile elde edilen bulgular sunulmuştur. Sırasıyla, plazma tüp, bağdaştırıcı, bağdaştırıcı konumu, bağdaştırıcı boyutu incelenmiş ve plazma tüpünün anten olarak kullanılmasına olan etkisi sunulmuştur. Elde edilen plazma anten, dizi anten olarak 4'lü dizi halinde benzetim programında kullanılmış ve dizi sonuçları elde edilmiştir. Son olarak, ölçümü laboratuvar imkanları dahilinde olan ölçümler ve sonuçları verilerek benzetim programı sonuçları ile karşılaştırılarak tartışılmıştır.

Son bölümde, tezin sonuçları açıklanarak, elde edilen veriler ışığında değerlendirilmiştir.

Tezin bu kısmından itibaren verilen tüm eşitlik ifadelerinde birimler metrik sistem ile verilmiştir. Vektörel büyüklükler kalın harfler ve ondalık ifadeleri “.” (nokta) ayrımı ile gösterilmiştir. Aksi belirtilmediği durumlarda tüm simgeler ve kısaltmaların açıklaması, “Simgeler ve Kısaltmalar” bölümündeki anlamları ile kullanılmıştır.



2. KAYNAK TARAMASI

Plazma monopol anten ve anten dizileri hakkındaki araştırma ve geliştirmeler özellikle son çeyrek asırda aratarak devam etmektedir. Plazma tekniğinin bu amaçla kullanımı birçok alanda yeni fırsatları göz önüne çıkarmıştır. Bu bölümde hem tarihsel olarak plazma antenlerin gelişimi hem de gelecek çalışmalarda beklenen gelişmeler ve araştırma yolları irdelenmiştir.

2.1. Plazmanın Anten Olarak Kullanımı

Moisan vd. (1982), plazma yüzey dalgalarının 1958 yılındaki keşfinden başlayarak çalışmalarının tarihine kadar geçen sürede ortaya konan gelişmeleri incelemişlerdir. Burada yarı-sonsuz elastik bir ortamdaki sonlu boyutlu kaynağın, plazmanın yüzeyi boyunca yüzey dalgası olarak veya uzayda her yöne uzay dalgası olarak enerji yaydığı gösterilmiştir(Schelkunoff 1959). Ayrıca, yüzey dalgaları ve soğuk plazma ilişkisi (2.1) eşitliği ile sunulmuştur(Moisan vd. 1982).

$$\varepsilon_p = 1 - \omega_{pe}^2/\omega^2 \quad (2.1)$$

Verilen (2.1) eşitliğinde, ε_p göreceli dielektrik geçirgenliği, ω_{pe} plazmanın açılal frekansını ve ω dalgalının açılal frekansını temsil etmektedir. Eşitlik incelendiğinde, dalgalının frekansının, plazma frekansından küçük olduğu durumlarda plazmanın dielektrik geçirgenliğinin negatif olduğu görülmüştür. Bu özellik kaynak gösterilen çalışmaların yapıldığı dönemde sadece plazmanın sahip olabildiği bir özelliktir. Daha sonraki çalışmalarda çeşitli yapıların da negatif dielektrik geçirgenliğe sahip olabildiği görülmüştür.

Vakum altında oluşturulan plazmalar ile yapılan çalışmaların aksine, Dwyer vd. (1984) atmosferik (hava ortamında) plazmanın anten olarak kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Lazer rehberliğinde atmosferde oluşturulan elektrik boşalma, 112 MHz karakteristik frekansında çalışabilen bir monopol anten şeklini almıştır. Anten çalıştırıldığı sürece verici ve alıcı olarak veri aktarımı sağlanmıştır. Aynı boyuttaki standart bir bakır anten ile kıyaslandığında ± 1 dB değerinde bir işaret gücü farkı olduğu görülmüştür.

Gelişen teknolojik ihtiyaçlar, radar görünmez anten yapılarına ihtiyaç doğurmuştur. Bu amaçla plazma antenlerin sahip olduğu, plazma kapalı durumda vakum altında bulunan plazma tüplerinin neredeyse radar görünmez özelliklerinin önemi ortaya çıkmıştır. Plazma tüpü içinde bulunan gazın iyonize veya de-iyonize edilerek aktif olarak radar görünürlüğünün değiştirilebildiği gösterilmiştir(Kang vd. 1995). Bu özelliği kullanarak aynı araştırmacı grubu, konsept bir görünmez(stealth) plazma anten tasarlamışlardır. Ve bu çalışmada floresan tüpler, içlerinde kontrollü bir soğuk plazma oluşturarak ışık yayan aydınlatma elemanlarıdır, plazma anten olarak kullanılmıştır. Bu sayede oldukça kolay kontrol edilebilir bir plazma anten ve bu antenin de-iyonize durumda görünmezliği ortaya konmuştur(Kang vd. 1996).

Plazma sütunları(tüpleri)'nin radyo frekans (RF) anteni olarak kullanılmasına yönelik çalışmada, antenlerin düşük radar kesit alanı özelliklerine vurgu yapılmış ve plazma antenin metal antenler yerine kullanılabileceği belirtilmiştir(Borg vd. 1999).

Çalışmada, %50 verimle çalışan plazma anten için ölçümler ve örüntüler sunulmuştur. Ortaya çıkan sonuçlar, plazma yoğunluğunun kontrolü ile anten boyunca oluşan akım dağılımının kontrol edilebileceğini göstermektedir.

Borg vd. (2000), yüzey dalgaları ile kullanılan plazma sütunlarının, metaller yerine anten olarak kullanılabileceğini belirtmiştir. Ayrıca çalışmalarında, plazma tüplerinin RF besleme ile uyarılmalarına yönelik tasarımları sunmuşlardır. Elde ettikleri tasarım ile 600 MHz karakteristik frekansta çalışan bir monopol anten ve huzme kontrolü için bir adet parazit plazma tüpü kullanmışlardır. Bu tasarım ile plazma tüplerinin, metal karışıkları olduğu gibi huzme kontrolü amaçlı da kullanılabileceği gösterilmiştir.

Liu vd. (2000a) ve Liu vd. (2000b), plazma ve mikrodalga etkileşimini akışkanlar mekaniği ve kinetik mekanik açısından incelemiştir. Akışkan modeli yaklaşımı ile arka plan elektron siklonunun çok önemli bir rol oynadığı sonucu elde edilmiştir. Bu etki, TE veya TM modunun bağdaşımını arttırmaktadır. Aynı zamanda paralel veya dik gelen elektrik alanın birbirinden farklı olduğu görülmüştür. Kinetik teori ile yapılan çalışma da akışkanlar mekaniğini doğrular sonuçlar elde etmiştir.

İlk plazma anten fikrinin ortaya atılmasından yaklaşık 20 yıl sonra bu konudaki ilk büyük raporlama ve bir el kitabı niteliğindeki çalışma yayınlanmıştır(Jenn 2003). Yayın tarihine kadar yapılan çalışmaların bir derlemesi ve özellikle askeri alandaki uygulamaların önemine yer verilmiştir. Neon veya floresan tüplerin, ucuz ve hızlı üretilen plazma tüpler olarak kullanıldığı reflektörlerin özellikleri sunulmuştur. Neon veya floresan tüp kullanılması ile oldukça büyük boyutlu ve yüksek yönlülüğe sahip yansıtıcı antenler elde edilmiştir. Yayınlanan rapor, askeri okul ve dolayısıyla askeri teknolojiye yönelik bir rapor olması sebebiyle, elde edilen anten veya yansıtıcıların özellikle gizlilik uygulamaları üzerine yoğunlaşmıştır.

Plazma antenlerin hakkındaki ilk çalışmalardan itibaren genel olarak eşdeğer metalik çubuk antenlerin yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır. 1 metre uzunluğunda 100 MHz karakteristik frekanstaki metalik ve plazma tabanlı antenlerin karşılaştırılması yapılmıştır(Rayner vd. 2004). Ayrıca dalga kaynağından plazma tüpünün sonuna doğru doğrusal olarak plazma yoğunluğu düşerken, plazma tüpünün uzunluğunun uygulanan gücün karekökü ile arttığı görülmüştür.

Alexeff vd. (2006) ile plazma antenlerin sadece megahertzler mertebesinde değil, 20GHz'e kadar kullanım alanı olduğu ortaya konmuştur. Ancak düşük frekanslarda alıcı ve verici anten olarak kullanılabilirken, görece yüksek frekanslarda yansıtıcı anten olarak kullanılmalarının daha uygun olduğu sunulmuştur. Yüksek frekansta elektronik savaş, gizlilik vb. amaçlarla kullanılmalarının uygun olduğu belirtilmiştir.

Plazma antenlerin yüksek frekanslardaki yansıtıcı özellikleri kullanılarak ayarlanabilir köşe-yansıtıcı anten dizisi önerilmiştir(Jusoh vd. 2013). Köşe yansıtıcı anten dizisi tasarlanırken, piyasada çok ucuza ve kolay bulunabilen floresan ampulleri, plazma elemanları olarak kullanılmıştır. Köşe yansıtıcının odağına bir monopol anten yerleştirilerek, 24 elemanlı yansıtıcı dizinin elemanlarının açık/kapalı durumları çeşitli

konfigürasyonlar ile çalıştırılmıştır. Bu işlemler neticesinde 2.4GHz’de 3 adet farklı yönlülük değerleri ve örüntü şekilleri elde edilmiştir.

Plazma tüplerinin aktif alıcı ve verici olarak kullanıldığı ve tüp içerisindeki plazma yoğunluğunun değiştirilmesi ile örüntünün kontrol edilebildiği gösterilmiştir(Kallel vd. 2014). Bu çalışma, 10 GHz gibi önceki çalışmalara göre yüksek frekans mertebelerinde plazma antenlerin aktif anten olarak kullanıldığı ilk çalışmalardan biri olduğu için literatürde önemli bir yere sahiptir.

Zainud-Deen vd. (2014) aydınlatma amaçlı üretilen, dairesel formdaki floresan tüplerin RFID (radyo frekans tanımlama) uygulamalarında plazma anten olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Kullanılan dairesel floresan tüp, yaklaşık 8 dB kazanç ve 160 MHz bant genişliğine sahiptir. Genelde akademik tartışma boyutunda kalan plazma antenler, bu çalışmada problem odaklı uygulama alanında kullanılmıştır.

Zamanda sonlu farklar yöntemi olarak bilinen FDTD yöntemi plazma anten ışımasını elde etmek için kullanılabiliirliği ortaya konmuştur(Zhou vd. 2014). Benzetim için oluşturulan program, yakın alandaki ışıma sonuçlarını elde etmiştir. Bu sonuçlar yakın alandan uzak alana dönüşüm yöntemleri kullanılarak uzak alan sonuçları elde edilmiştir.

Plazma antenlerin düzlemsel bir yansıtıcı dizi olarak kullanıldığı daha eski çalışmalarda sunulmuştur. Malhat vd. (2015), önceki çalışmalara yeni bir bakış açısı getirerek hem yansıtıcı hem iletim dizisi olarak plazma antenleri kullanmayı önermiştir. Bu amaçla, yansıtıcı dizi elemanlarının istenen bölgelere iletimi sağlaması için, ilgili bölgedeki plazma elemanlarının plazma frekansını değiştirmeyi önermişlerdir. Sonuçta elde edilen dizi, bir bölümü yansıtıcı bir bölümü iletim/geçirgen modda çalışarak iki modlu bir dizi olabileceği gösterilmiştir.

Barro vd. (2016), standartlaşmış bir yama antenin ışımasının, kompakt floresan ampulün ihtiva ettiği plazmanın Faraday ekranlama özelliğini kullanarak şekillendirilebileceğini göstermiştir. 2.45 GHz ’de çalışan dairesel yama anten, ampulün merkezine yerleştirilerek, silindirik bir Faraday kafesi ile çevrelenmiştir. Plazmanın aktif veya pasif olması durumuna göre, çalışma frekansı görece hiç değişmezken, ışıma örüntüsü şekil itibari ile değişmese de merkez açısında 20 dB’e varan zayıflamalara uğramıştır.

Plazmaların üzerinde indüklenebilen yüzey dalgaları ile anten olarak kullanılabiliirliğini ve ışıma örüntüsünün özelliklerinin elektron yoğunluğu ile kontrol edilebiliirliği gösterilmiştir(Siahpoush ve Shokri 2016). Klasik metalik antenlere kıyasla bu özellik oldukça yenilikçi bir kullanım alanını ortaya çıkarmaktadır.

Standart floresan tüpün bir monopol anten olarak kullanılması ve performans analizi Barro vd. (2017) tarafından incelenmiştir. Bir bağdaştırıcı tasarımı yapılarak, floresan tüpün ortasından bu bağdaştırıcı ile RF beslemesi yapılmıştır. Bağdaştırıcının benzetime nazaran bazı eksiklikleri olduğu ve bu sebeple ölçüm sonuçlarının benzetim sonuçları ile bazı noktalarda örtüşmediği görülmüştür.

Ghaderi ve Moradi (2018a), dairesel bir plazma anten tasarımının nümerik analizini ve ayarlanabilir manyetizasyonunu incelemiştir. Kullanılan plazma elemanın, dairesel floresan ampullere olan benzerliği düşünüldüğünde gerçekleştirilebilirliği oldukça yüksektir. Antenin manyetizasyonun değiştirilmesi ile örüntünün şekillendirilebileceği öne sürülmüştür.

Ghaderi ve Moradi (2018b), plazma antenlerin simülasyonu için yeni bir zamanda sonlu farklar metodu önermişlerdir. Çalışmada Boltzmann momentumu ile Maxwell denklemlerinin ilişkisi kullanılmıştır. Ortaya koydukları yöntem ile hem çarpışma olmayan hem de manyetizasyonsuz çarpışmalı plazma için kullanılabilecek bir lineer cebir yaklaşımı sunulmuştur.

Dairesel bir plazma antende kullanılabilecek, iç içe halkalardan oluşan bir bağdaştırıcının, iç halka malzemesinin değişiminin antenin çalışma frekansına etkisi Golazari vd. (2018) tarafından gösterilmiştir. Alüminyum ve bakır olarak iki adet iç halka malzemesi ile tasarımlar benzetime tabi tutulmuştur. Farklı malzemelerin kullanımı ile hem 300 MHz mertebelerinde çalışma frekansının kaydığı hem de örüntünün değiştiği gözlemlenmiştir.

Silindirik bir plazma antenin, plazma frekansı, çarpışma frekansı elektron yoğunluğu gibi parametreleri, antenin performansını etkiler(Ja'afar vd. 2018). Çalışmada, plazmayı oluşturan argon, neon gibi çeşitli moleküller için, çeşitli basınçlarda analiz edilerek performansa etkisi gözlemlenmiştir. Yüksek frekanslarda, tüm plazma çeşitlerinin birbirine yakınsadığı görülmüştür.

Jusoh vd. (2018), plazma antenler ile klasik metalik antenlerin benzer amaçlar için kullanılabilişliğini karşılaştırmışlardır. Merkezinde bir monopol bulunan dairesel bir plazma yansıtıcı dizisi oluşturulmuştur. Yapılan incelemelerde, plazmaların içinde olduğu dielektrik tüplerin çalışma karakteristiğine etkisinin göz ardı edilebilir olduğu görülmüştür. Oluşturulan dizinin eleman sayısına ve yerleşimine göre 8.65 dBi seviyelerinde kazanç ulaşılmıştır.

Plazma anten boyutlarının en iyileştirmesi için Kumar ve Kumar (2018a) tarafından plazma parametreleri incelenmiştir. 5 adet farklı konfigürasyon, benzetim programı ile tasarlanarak, plazma parametrelerinin kazanç, yönlülük, çalışma frekansı gibi anten özelliklerine etkisi gözlemlenmiştir. Plazma tüpünün uzunluğunun çalışma frekansına doğrudan etki ettiği ancak yarı çapının çalışma frekansında kayda değer bir farka sebep olmadığı görülmüştür. Antenlerin, yüksek frekanstaki çalışma bölgelerinde daha yüksek bir yönlülüğe sahip olduğu belirtilmiştir.

Kumar ve Kumar (2018b), daha önce hiç denenmeyen bir şekilde, tek bir plazma tüpünün içinde plazma parametrelerini değiştirerek, plazmanın tüp içinde birden fazla parçaya bölünerek dizi oluşturmalarını sağlamışlardır. Elde edilen tek tüp içindeki dizi, 0.30 GHz ile 2.45 GHz'e kadar oldukça geniş bir aralıkta değişen çalışma frekansına sahiptir. En yüksek kazanç 16.71 dBi olarak 1 numaralı konfigürasyonda 2.45 GHz için elde edilmiştir.

Gaz plazma anten dizisi tanımı ile önceki çalışmalara benzer şekilde, merkezinde bir dipol bulunan dairesel plazma anten dizisi önerilmiştir(Melazzi vd.

2018). 1.45 GHz karakteristik frekansa sahip dipol antenin etrafına 2 sıra halinde dairesel şekilde plazma tüpleri yerleştirilmiştir. Çeşitli konfigürasyonlar ile hem örüntü kontrolü hem de kazanç artışı sağlanmıştır.

Vyas ve Chaudhury (2018) soğuk plazma tabanlı bir konfigüre edilebilir bir mikroşerit anteni incelemişlerdir. Frekansı ayarlanabilir ve güç verimli bir antene ulaşmak için, alt taş olarak hava-plazma kombinasyonunu kullanmışlardır. Maksimum %14'lük bir frekans ayarlama seviyesine, ki bu çalışma frekansı bölgesi için yaklaşık 1 GHz genişliğinde bir kaymaya denk düşmektedir, ulaşılmıştır.

Plazma sütunlarını bir Yagi antenin yansıtıcı elemanı olarak kullanan ve merkezine bir dipol yerleştirilmiş dairesel bir dizi Yin ve Zhang (2018) tarafından önerilmiştir. 6 adet yansıtıcı ve 1 adet merkez dipolden oluşan dizi, 60'ar derecelik adımlarla 360 derecelik örüntü kontrolü başarı ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 2.4 GHz gibi görece yüksek bir frekansta çalışması, çalışmanın önemini arttırmıştır.

Anderson (2019), diyot vericilerin ışıma yönüne yerleştirilmiş plazma kolonları ile ışıma örüntüsünün yönlendirmesini araştırmıştır. Ayrıca çalışmanın ikinci aşaması olarak 44 GHz çalışma frekansında deneyleri tekrarlayarak, plazmaların çok yüksek frekanslarda da kullanılabilirliğini göstermiştir. İyonizasyon akımını değiştirerek, yönlendirmeyi kontrol edildiği görülmüştür.

Dairesel plazma dizilerinin gelişmiş bir versiyonu olarak, en içte iki sütunlu plazmaların bulunduğu dış halkalarda metalik yapıların bulunduğu iç içe 3 adet yansıtıcı halkadan oluşan bir yapı kurulmuştur(Armaki ve Armaki 2019). Merkeze yerleştirilmiş monopol, çevresindeki plazmaların açık veya kapalı olması durumuna göre yeni bir Yagi-Uda anteni oluşturarak örüntü kontrol edilmektedir.

Bogachev vd. (2019) asimetrik plazma antenlerin metalik antenler ile karşılaştırmasının deneysel sonuçlarını sunmuşlardır. Çalışmada, hem örüntünün karşılaştırılması hem de harmonik rezonans frekanslarındaki davranışlar karşılaştırılmıştır. Plazma tabanlı antende yönlülük yüksek ancak ana huzmenin genliği düşük olurken, metal tabanlı antende bu tersidir. Rezonans frekansının harmonik dağılımı incelendiğinde ise, plazma tabanlı antenin kazancının lineer bir zayıflama ile çalışırken, metal tabanlı antenin harmonik frekanslarda azalan ve artan bir kazançla sahip olduğu görülmüştür.

Genel olarak plazma antenlerde kullanılan plazmaların izotropik veya izotropiğe yakın olması beklenir. Ancak daha gerçekçi ve yeni bir araştırma alanı olarak izotropik olmayan plazmaların anten olarak kullanılması araştırılmıştır(He vd. 2019). Ortaya çıkan sonuçlar incelendiğinde, izotropik olmayan plazma, plazma parametrelerinin değişimine daha duyarlı hale geldiği görülmüştür.

Plazma anten olarak, floresan tüplerin kullanıldığı gibi, kompakt floresan ampuller de kullanılabilir. Jusoh vd. (2019), "u" şekilli kompakt floresan ampulleri çeşitli yapılar şeklinde yerleştirildiği yansıtıcı diziler elde etmiştir. Teorik olarak, standart bir monopol veya dipolün örüntüsünü manipüle etmek için kullanıldığından, çok geniş bir frekans aralığında örüntü kontrolü elde edilebilmektedir.

Metal yansıtıcılar ile karşılaştırıldığında, oldukça yakın sonuçlar elde edilmekle birlikte, plazma elemanların kapalı konumda radar görünmez olması vurgulanmıştır.

Plazma anten olarak kullanılan, ticari floresan tüplerinin plazma parametrelerinin ölçülmesi için, iki adet boynuz antenin alıcı verici olarak kullanıldığı ve iletim yolu üzerine floresanların yerleştirildiği bir ölçüm sistemi önerilmiştir(Liu ve Hou 2019). Elde edilen iletim saçılma parametresi S21 üzerinden, plazmanın dielektrik geçirgenliği hesaplanarak, çarpışma frekansı ve plazma frekansı elde edilmiştir. Benzetim programında elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılan ölçüm sonuçlarında frekansa bağlı hatalar görülmüştür.

Ters F şekilli, ayarlanabilir plazma tabanlı antenler Sadeghikia vd. (2019) tarafından önerilmiştir. 2 adet bağdaştırıcı kullanılan sistemde, bir bağdaştırıcı uyarım diğeri ise RF besleme amaçlı kullanılmıştır. Uyarım gücünün değişikliğine bağlı olarak plazma parametrelerinin değişimi ve nihayetinde karakteristik frekansın kontrolü sağlanmıştır.

Zhao vd. (2019), 2.45 GHz frekansa sahip güç kaynağı ile sürülen esnek plazma antenlerin özellikleri hem nitelik hem de nicelik bakımından incelemiştir. Klasik plazma tüpünün, esnek bir malzemeden yapılması ile elde edilecek antenin, spiral bir şekilde kıvrılarak düzlemsel bir anten elde edilebileceği öngörülmüştür. Bu hali ile, düzlemsel bir kılıf veya bariyer görevi görürken, tekrardan eski haline getirilip monopol halinde de kullanılabilir.

Gaz basıncının ve karışımın değişimi ile kontrol edilen bir plazma anten önerilmiştir(Podolsky vd. 2020). Değişken güçlerde uyarıma ve basınçlara maruz bırakıldığında, kazancın değişimi incelenmiştir, güç artarken kazanç her zaman artmamakta, hatta kritik düşüşler yaşamaktadır. Uygulanan en yüksek güçte, metalik antenlerin kazanç değerlerine 2-3 dB kadar yaklaşılabilmektedir. Araştırmacılar, plazma parametrelerinin en iyileştirmenin önemini vurgulamışlardır.

Kamboj vd. (2021), klasik bir plazma tüpünün içinde plazmayı özel bir durumda tutarak, parçalı bir plazma durumu oluşturmuşlardır. Bu haliyle yan yana dizilmiş küçük plazma elemanlarından oluşan bir anten dizisi elde edilmektedir. Uygulanan plazma parametresine bağlı olarak, birim eleman boyutu veya elemanlar arası mesafe değiştirilerek, antenin örüntüsü kontrol edilebilmiştir. Ayrıca karakteristik frekans üzerine parametrelerin etkisi de incelenmiştir.

Plazma anten olarak floresan lambaların kullanılmasının belki de en büyük zorluğu, bağdaştırıcı mekanizmasıdır. Hadaegh ve Mohajeri (2021), 3 adet çok kullanılan bağdaştırıcı metodunu karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Bunlar, kapasitif, doğrudan ve çift kelepçe(sleeve) olarak verilmiştir. Bu tez çalışması kapsamında da, sahip olunan imkanlar neticesinde üretiminin daha kolay ve hızlı olması sebebiyle kapasitif bağdaştırıcı metodu seçilmiştir. Ancak, dipole benzerlik amacı ile bir tasarım yapılmak istendiğinde, doğrudan plazmayı besleyen bağdaştırıcı metodu kullanılması önerilmektedir.

Bu tez çalışmasını hedeflediğine benzer matris yapılı bir plazma anten dizisi çok yakın geçmişte elde edilmiştir(Papadimopoulos ve Di Iorio 2022). Ancak sadece 2x2

formunda 4 adet elemandan oluşan bir anten dizisi önerilmiştir. Önerilen dizinin benzetimi yapılmış ama gerçek ölçümleri yapılamamıştır. Yine bu tez çalışmasından farklı olarak, 600 MHz mertebelerinde görece düşük frekans bölgesinde çalışmalar tamamlanmıştır.



3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında kullanılmış olan plazma fiziği, elektromanyetik dalgalar ve antenler hakkında kuramsal bilgiler sunulmuştur. Ayrıca çalışma kapsamında kullanılan, benzetim programı, ölçüm aletleri, plazma tüpleri hakkında detaylı bilgiler sunulmuştur.

3.1. Plazma Tanımı

Plazma kelimesi ilk olarak kanın bir bölümünü tanımlamak için kullanılmaya başlansa da, Langmuir (1929) ile birlikte özellikleri gaz, sıvı veya katıya benzemeyen, maddenin dördüncü halini tanımlamak için kullanılmaya başlanmıştır. Bu tanım aslen iyonize olmayan(normal) gazlara göre büyük elektron sayısı ve iyonize atom ve moleküllerden oluşan gazlar için kullanılmaktadır(İnan ve Gelkowski 2011). Plazma ile normal gazlar arasındaki en önemli ayrım, yüklü parçacıklar arasındaki Coulomb etkileşimlerinin plazmanın göz ardı edilemez bir özelliği olmasıdır. Gazlar, yeterli derecede yüksek sıcaklıklara çıktıklarında veya yeterli yoğunlukta elektrik alanına maruz bırakıldıklarında, elektronlar artan termal çalkalanma sonucunda çarpışmalar ile kopabilirler ve gazı oluşturan atom ve moleküller iyonize olurlar(İnan ve Gelkowski 2011). Gazların iyonizasyonu, ultraviyole veya X-ray ışınları ile uyarılmaları ile de elde edilebilmektedir.

İyonize olmuş gazdaki yüklü parçacıklar elektromanyetik alanlara maruz kaldıklarında etkileşime girerler ve yüklü parçacıkların, akım, yük yoğunluğu dalgalanması gibi hareketleri sonucunda elektromanyetik alanlar üretebilirler. İyonize bir gazın, elektrik akımını sürdürme becerisi, ortamdaki bir manyetik alan varlığı durumunda (3.1) ile verilen Lorentz kuvvetini oluşturacağı için önemlidir. Eşitlikte, q parçacık yükünü, v parçacık hızını ve B manyetik akı yoğunluğunu temsil etmektedir.

$$qv = B \quad (3.1)$$

Yüklü parçacık grubu ele alındığında bu kuvvetler (3.2) ile verilen kuvvet F 'e dönüşür. Eşitlikte J , yüklü parçacıkların hareketinin karşılığı olan elektrik akı yoğunluğu olarak gösterilmiştir. Bu kuvvet gaz dinamiklerini domine eder ve sonuç olarak, plazmaların manyetik alan etkileşimlerinin temelini oluşturmaktadır.

$$F = J \times B \quad (3.2)$$

Bu bilgiler ışığında, plazmaların incelenmesi, Maxwell denklemleri ile klasik elektromanyetik teori ve Lorentz kuvvet eşitliği ile oldukça basit görünmektedir(Tonks ve Langmuir 1929). Ancak plazma etkilerinin incelenmesi bir çok sebeple bundan daha karmaşıktır(İnan ve Gelkowski 2011). Bu sebeplerden ilki, hareketleri içinde hareket ettikleri elektromanyetik alan ile yönetilen parçacıkların, yine bu elektromanyetik alanı değiştirmeleridir. Devreye giren atomik sebepler, parçacıkların enerjilerine ve yoğunluğuna karmaşık bir biçimde rekabet eder. Bir diğer sebep, hareket eden parçacıkların yakın veya uzak mesafeli Coulomb etkileşimlerinden oluşan taşınma olaylarıdır. Özellikle uzun menzilli kuvvetler, elektrostatik salınımlar ve dengesizlikler ile çeşitli olaylara sonuç verir. Ve son olarak, plazmaların çoğu özellikle de sıcak plazmalar, güçlü bir şekilde bağdaştıkları manyetik alan içine hapsedilirler. Ancak yine

de her bir parçacık için hareket denkleminin çözülmesi teorik olarak mümkündür.

Maxwell denklemlerini, sistemdeki tüm parçacıkların hız ve konum vektörlerini, yük yoğunluğu ρ ve akım yoğunluğu $\mathbf{J}$ kullanarak, uzay ve zamana bağlı elektrik ve manyetik alan fonksiyonlarını çözmekte kullanabiliriz. Bu yaklaşım günümüzde bilgisayar benzetimlerinin de temel aldığı yaklaşımdır. İlgili yaklaşımı oluşturan, serbestçe hareket eden, göreceli olmayan parçacıkların davranışlarını yöneten temel eşitlikler (3.3) ile verilmiştir.

$$\left[\begin{array}{c} \text{Başlangıç} \\ \text{ve} \\ \text{Sınır} \\ \text{Koşulları} \end{array} \right] \rightarrow \left[\begin{array}{l} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \\ \mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \end{array} \right] \xrightarrow[\leftarrow]{\begin{array}{c} \mathbf{E}, \mathbf{B} \\ \mathbf{J}, \rho \end{array}} \left[\begin{array}{l} \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \frac{q_i}{m_i} (\mathbf{E} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{B}) \\ \rho = \frac{1}{\Delta V} \sum_{\Delta V} q_i \\ \mathbf{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{\Delta V} q_i \mathbf{V}_i \end{array} \right] \leftarrow \left[\begin{array}{c} \text{Başlangıç} \\ \text{Koşulları} \end{array} \right] \quad (3.3)$$

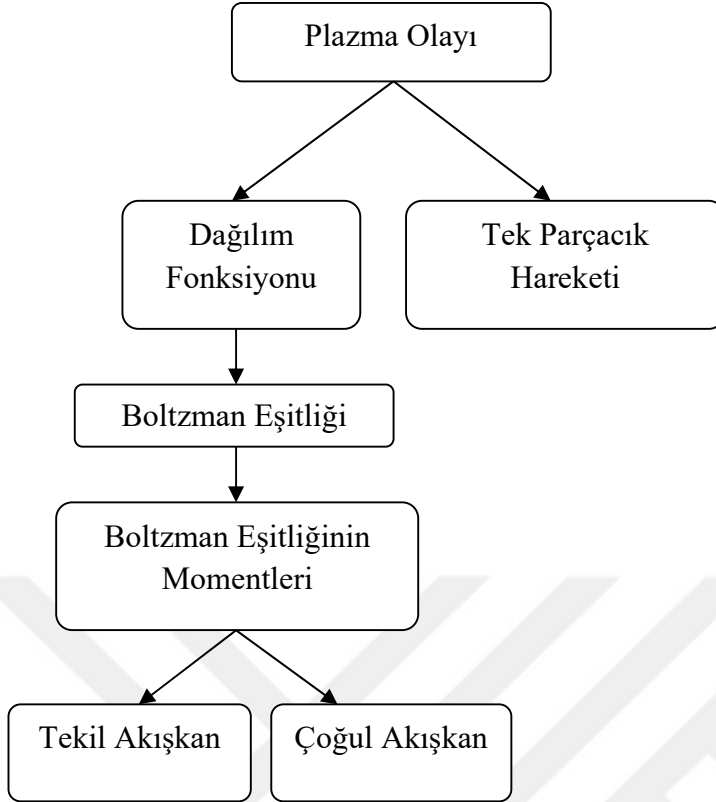
Eşitlik (3.3) incelenirken, gaz plazmalar için ortamın temel olarak serbest uzay ortamı olduğu düşünüldüğünde, manyetik geçirgenlik ve elektriksel geçirgenlik sırasıyla (3.4) ve (3.5) olarak kabul edilebilir.

$$\mu = \mu_0 \quad (3.4)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \quad (3.5)$$

Plazmadaki her bir yüklü parçacık için hızlanmaya ilişkin bileşen $d\mathbf{v}_i/dt$, $\mathbf{E}$ ve $\mathbf{B}$ alanları cinsinden elde edilebilir. Hesaplama, elektrik ve manyetik alanın başlangıç koşullarına bağlı olarak yapılabilir. Bununla birlikte, parçacıkların hareketi ve konumları bilinen elektrik ve manyetik alanı değiştirecek etkiye sahip, yük yoğunluğu ρ ve akım yoğunluğunun $\mathbf{J}$ oluşmasına sebep olurlar. Akım ve yük yoğunlukları, çok küçük ΔV diferansiyel hacminin ortalaması alınarak elde edilir, ancak hala çok sayıda bağımsız parçacık içerdiği için yoğunluğun sürekliliği düşünülmelidir.

Plazma davranışının detayları verilen karmaşıklığından ötürü, plazma olayını incelerken bazı sınırlamalara, yaklaşımlara ve kabullere sahip birbiri ile örtüşen modeller kullanılmaktadır. Plazma davranışlarını incelerken plazma olayını genel hatlarıyla incelenmek istenirse Şekil 3.1’de verilen modeller ve yol izlenebilir (İnan ve Gelkowski 2011).



Şekil 3.1. Plazma Olayı Yaklaşım Modelleri

Tek parçacık hareketi, elektrik ve manyetik alan altındaki tek başına parçacıkların yörüngelerinin belirlenmesinde kullanılır. Bu yöntem ile plazma içindeki çok sayıdaki parçacığın davranışı kinetik teori gibi istatistiksel teknikler ile elde edilebilir. Ancak plazmayı zaman-uzay dağılım fonksiyonu olarak tanımlayan kinetik teori çok sayıda bilginin hesaplanabilmesini sağlar. Çoğunlukla bu bilgilerin önemli bir kısmı mühendislik uygulamaları için göz ardı edilebilir veya işlevsiz bilgilerdir. akışkan yaklaşımı genelde uygulamalarda daha kullanışlı ve ihtiyaç duyulan, yoğunluk, sıcaklık ve basınç gibi bilgileri elde etmeyi sağlar. Maxwell denklemleri ile akışkan teorisinin birlikte kullanılması ile, Magnetohidrodinamik(MHD) yaklaşımına varılır. MHD sıklıkla plazmaların toplu özelliklerini ve kolektif davranışını açıklamak için kullanılır(İnan ve Gelkowski 2011).

3.2. Plazma ve Enerji

Parçacıkların sahip olduğu kinetik enerji E , parçacığın kütlesi m , hızı u olduğu durumda, (3.6) şeklinde ifade edilir.

$$E = \frac{1}{2}mu^2 \quad (3.6)$$

Birbirinden farklı kinetik enerjilere sahip N adet parçacığın ortalama enerjisi E_{av} (3.7) ile gösterilmiştir.

$$E_{av} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N m_i u_i^2 \quad (3.7)$$

Termal denge sıcaklığında bulunan herhangi bir gaz için, parçacık başına düşen enerji (3.8) ile elde edilir. Eşitlikte, Boltzmann sabiti $k_B = 1.38 \times 10^{-23} J K^{-1}$ ve T mutlak sıcaklıktır. Denge noktasındaki gaz, bütün hızlarda parçacıklara sahiptir ve bunların parçacık dağılımı (3.9) ile verilen Maxwell-Boltzmann dağılımıdır.

$$E = 3k_B T / 2 \quad (3.8)$$

$$f(u) = A e^{-\frac{1}{2} \frac{mu^2}{k_B T}} \quad (3.9)$$

Eşitlik ile verilen A katsayısı, N adet parçacığın toplam yoğunluğu, $f(u)$ kullanılarak bulunabilir. Bu adım (3.10) ile gösterilmiştir.

$$N = \int_{-\infty}^{\infty} f(u) du \rightarrow A = N \sqrt{\frac{m}{2\pi k_B T}} \quad (3.10)$$

Burada, $f(u)du$ birim hacim başına denk düşen, hızı u ve $u+du$ arasında olan parçacık sayısıdır. Parçacıkların ortalama kinetik enerjisi $f(u)$, (3.11) ile hesaplanır.

$$E_{av} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} mu^2 f(u) du}{\int_{-\infty}^{\infty} f(u) du} \quad (3.11)$$

Elde edilen enerji, üç boyutta numaratör toplamı ile genişletildiğinde, serbestlik derecesi başına $E_{av} = \frac{3}{2} k_B T$ veya $E_{av} = \frac{1}{2} k_B T$ olarak hesaplanır. $E_{av} = \frac{3}{2} k_B T$ durumunda ve 1 Kelvin sıcaklığında gaz, ortalama olarak parçacık başına $2.07 \times 10^{-23} J$ (joule) enerjiye karşılık gelir. Parçacık enerjileri genellikle eV cinsinden gösterilmektedir. Bir parçacığın yükü $q_e = -1.602 \times 10^{-19} C$ elektron yüküne eşit büyüklükteyse ve 1V potansiyel farkı ile hızlanıyorsa, $-1.602 \times 10^{-19} J$ enerjiye sahiptir. Bu birim elektron volt(eV) olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla enerjiyi eV cinsinden belirtmek için, Joule cinsinden kinetik enerji ifadesi elektron yükünün mutlak değeri ile bölünmelidir(3.12).

$$E = \frac{mu^2}{2|q_e|} \text{ eV} \quad (3.12)$$

Termal dengedeki plazma enerjisinden bahsederken genelde gaz sıcaklığından bahsetmek yaygındır. $k_B T = 1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$, kullanıldığında $1 \text{ eV} = 11600 \text{ K}$ dönüşüm sayısına ulaşılır. Bu dönüşüm katsayısı ile plazma enerjisi ve sıcaklığı arasında kolay bir dönüşüm sağlanabilir. Önceki kısımda açıklandığı üzere, malzemelerin iyonlaşması için yeterince yüksek sıcaklıklarda oluşan plazma durumu açıklanmıştır. Termal denge durumunda, saf elementler ile plazma oluşturulmak istendiğinde gereken sıcaklık, Langmuir tarafından da kullanılan sezyum için $\sim 4000K$ 'den helyum gibi görece zor iyonize edilen elementler için $20000K$ 'e kadar değişir. Buradaki sıcaklık kinetik sıcaklık olmak ile birlikte, enerjiye karşılık düştüğü unutulmamalıdır. Yüksek sıcaklık değeri(temperature), çok yüksek ısı(heat) anlamına gelmez. Sıcaklık ortalama bir değerler iken, ısıtma parçacıkların sayısına ve ısı kapasitene bağlı olarak değişmektedir. Aydınlatma için kullanılan floresan lambalar, yaklaşık $11000K$ elektron kinetik sıcaklığına sahipken, floresan tüpünün yüzeyi neredeyse hiç ısınmamaktadır. Çünkü tüp içindeki serbest elektron yoğunluğu,

atmosferik basınçtaki gaz parçacıkları sayısından kat be kat düşüktür. Dolayısıyla tüpün yüzeyine çarpan elektron aracılığıyla aktarılan enerji oldukça düşüktür.

3.3. Plazma Frekansı ve Elektriksel Özellikleri

Plazma özellikleri ile ilgili bir diğer önemli parametre plazmanın salınımı veya plazma frekansıdır. Bu tanımı anlamak için öncelikle plazma içindeki parçacıkların elektriksel özelliği incelenmelidir. Plazma, elektriksel olarak nötr kalmaya eğilimlidir (İnan ve Gelkowski 2011). Bu sebeple yük ayrımından kaynaklanan elektron hareketi sonucunda oluşan elektrik alanı elektronu orijinal konumuna geri çekmektedir. Ancak bu çekim elektronların eylemsizliği sebebiyle, yüklü bölge etrafında bir salınımına sebep olur. Diğer bir deyişle, plazma pozitif ve negatif durum arasında salınır ve ortalamada nötr konumunu korur. Bu salınımın frekansını elde etmek istediğimizde, bu salınımın geri getiren elektrik kuvveti ve dolayısıyla yer değiştiren yük yani q_e ve eylemsizliği gerekçesi ile yer değiştiren parçacığın kütlesi m_e ile ilişkili olduğu açıktır. Tek bir elektronun hareketi E_x elektrik alanı altında (3.13) ile açıklanabilir.

$$m_e \frac{d^2x}{dt^2} = q_e E_x \quad (3.13)$$

Eşitlikte x elektrik alan ile paralel olan yöndür. Elektrik alan kapalı, dikdörtgen ve kutu şeklindeki bir yüzeyde Gauss kanunu uygulayarak çözüldüğünde (3.14) elde edilir.

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (3.14)$$

Burada Q , kapalı yüzeyde depolanmış toplam yükü ifade etmektedir. Denge yoğunluğundaki elektron yoğunluğu N_e olarak kabul edilirse, $Q = AxN_eq_e$ elde edilir, burada A kesit alanını ve x elektronların yer değiştirmesini gösterir. Temel olarak alınan dikdörtgensel kutu yüzeyinin boyutunun a , derinliği Δz ve y yönünde olduğu kabul edilirse Gauss kanunu (3.15) şeklinde ifade edilebilir.

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -a\Delta z E_x = \frac{Q}{\epsilon_0} = \frac{ax\Delta z N_e q_e}{\epsilon_0} \rightarrow E_z = -\frac{xN_e q_e}{\epsilon_0} \quad (3.15)$$

(3.15) ile verilen eşitlik, (3.13)'de yerine konulursa (3.16) ile verilen eşitlik elde edilir.

$$m_e \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{N_e q_e^2}{\epsilon_0 m_e} x = 0 \rightarrow \frac{d^2x}{dt^2} + \omega_p^2 x = 0 \quad (3.16)$$

Verilen (3.16) eşitliğinin çözümü zamanda harmoniktir ve (3.17) ile verilen plazma frekansına ulaşılır.

$$\omega_p = \sqrt{\frac{N_e q_e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (3.17)$$

Plazmanın iletkenliğini bulmak için, daha önce açılan (3.3) eşitliklerini kullanan tek parçacık modelinden yola çıkılabilir (Jusoh Tajudin 2014). Tek parçacık

olarak q yüküne sahip elektron ele alındığında, bu elektron (3.18) ile görüldüğü gibi Lorentz kuvvetine uygun davranacaktır.

$$m_e \frac{dv}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (3.18)$$

Verilen eşitlikte, $\mathbf{v}$ elektron hızını, $\mathbf{E}$ ve $\mathbf{B}$ sırasıyla elektrona etkiyen elektrik alanı ve manyetik alan yoğunluğunu temsil etmektedir. En genel durumda incelemek için, elektrik alanın x , manyetik alanın y yönünde kutuplandığı enine elektromanyetik dalgayı ele alırsak, elektrik alan ve manyetik alan yoğunluğu ifadeler, (3.19) ve (3.20) ile gösterilebilir. (3.20)'de c serbest uzayda elektromanyetik dalgaın yayılım hızıdır.

$$\mathbf{E} = E_0 e^{j\omega t} \mathbf{a}_x \quad (3.19)$$

$$\mathbf{B} = \frac{E_0}{c} e^{j\omega t} \mathbf{a}_y \quad (3.20)$$

Elektron verilen alanlar ile etkileşime geçerek hızı değişecektir ve bu değişim elektronun ivmesi $\mathbf{a}$ ile ifade edilir. Bu etkilenmeyi (3.18)'de elektrik ve manyetik alan ifadelerini kullanarak (3.21) ile açıklamak mümkündür.

$$\mathbf{a} = \frac{dv}{dt} = \frac{q}{m_e} (E_0 e^{j\omega t} \mathbf{a}_x + [\mathbf{v} \times \frac{E_0}{c} e^{j\omega t} \mathbf{a}_y]) \quad (3.21)$$

İvmeye ait eşitlik, diferansiyel formda yazılmak istenirse, (3.22) şeklinde açıklanabilir.

$$\frac{d^2 x}{dt^2} \mathbf{a}_x + \frac{d^2 y}{dt^2} \mathbf{a}_y + \frac{d^2 z}{dt^2} \mathbf{a}_z = \frac{q}{m_e} (E_0 e^{j\omega t} \mathbf{a}_x - \frac{E_0}{c} \frac{dz}{dt} e^{j\omega t} \mathbf{a}_x + \frac{E_0}{c} \frac{dx}{dt} e^{j\omega t} \mathbf{a}_z) \quad (3.22)$$

Ve tüm yönlerde ait hızlanmalar (3.23), (3.24) ve (3.25) ile yazılabilir.

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{q}{m_e} (1 - \frac{1}{c} \frac{dz}{dt}) E_0 e^{j\omega t} \quad (3.23)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = 0 \quad (3.24)$$

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{q}{m_e} \frac{E_0}{c} \frac{dz}{dt} e^{j\omega t} \quad (3.25)$$

Tek bir parçacığa ait hız bileşenleri verilen eşitlikler ile üretilebilir. Göreli olmayan hareket ile işleme devam edilirse, yayılma yönündeki hız boş uzaydaki yayılma hızından (ışık hızı) daha az olur. Bu durumda x yönündeki ivme (3.26) şekline gelir.

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{q}{m_e} E_0 e^{j\omega t} \quad (3.26)$$

x yönündeki hız ve yer değiştirme (3.27) ve (3.28) olarak elde edilir.

$$\frac{dx}{dt} = \frac{q}{m_e} E_0 \frac{1}{j\omega} e^{j\omega t} \quad (3.27)$$

$$x = \frac{q}{m_e} E_0 \frac{1}{(j\omega)^2} e^{j\omega t} = - \frac{qE_0}{m_e \omega^2} e^{j\omega t} \quad (3.28)$$

Bu aşamaya kadar türetilen hız ve yer değiştirme x yönündeki tek bir elektron için geçerlidir. Plazma birçok parçacığın birleşimi olduğu için, parçacıkları etkileyen elektrik ve manyetik alanların topluca incelenmesi gereklidir. Tüm parçacıkların kolektif olarak oluşturduğu akım yoğunluğu (3.29) şeklinde ifade edilebilir. İlgili eşitlikte n_e elektron veya yüklü parçacık sayısını temsil etmektedir. (3.29) eşitliğinde v hız parametresi, (3.28) ile elde edilen yer değiştirme cinsinden tekrar yazıldığında (3.30) elde edilir.

$$J_E = qn_e v a_x \quad (3.29)$$

$$J_E = qn_e \left[\frac{q}{m_e} E_0 \frac{1}{j\omega} e^{j\omega t} \right] a_x \quad (3.30)$$

Akım yoğunluğu ile elektrik alan ilişkisi iletken bir ortam için (3.31) şeklinde klasik olarak tanımlanır. İlgili eşitlikte, σ ortamın dolayısı ile ilgilenilen problem için plazmanın iletkenliğini temsil etmektedir.

$$J_E = \sigma E \quad (3.31)$$

Daha önce verilen (3.30) eşitliği ışığında, parçacıkların sadece x yönünde hareket ettiği kabulü ile akım yoğunluğu ifadesine ait (3.30) ve (3.31) eşitlikleri birbirine eşitlenerek tekrar fazör formunda yazıldığında (3.32) elde edilir.

$$\sigma E_0 e^{j\omega t} = qn_e \left[\frac{q}{m_e} E_0 \frac{1}{j\omega} e^{j\omega t} \right] \quad (3.32)$$

Plazmaya ait iletkenlik σ , eşitlikte tek başına bırakılarak gereken sadeleştirmeler yapıldığında (3.33) ile elde edilir.

$$\sigma = -j \frac{n_e q^2}{\omega m_e} \quad (3.33)$$

Verilen (3.33), m_e çarpışma olmayan durumda tek bir parçacığa aitken, çarpışma olduğu durumda birden fazla parçacığın çarpışma durumunda olduğunu göstermek için m olarak gösterilecektir. Çarpışma gerçekleştiği anda, elektronun tüm enerjisini kaybettiği kabulü ile (3.18) eşitliği (3.34) halini alacaktır. Yeni eşitlikte $v_{\text{çarp}}$, çarpışma efektini veya diğer bir isimle çarpışma frekansını göstermektedir. Bu aşamada, iletkenliğin skaler olduğu ve dolayısıyla $\mathbf{B} = 0$ olarak ortamda manyetik alan bulunmadığı göz ardı edilmemelidir.

$$m \frac{dv}{dt} + m v v_{\text{çarp}} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (3.34)$$

Elde edilen eşitliğe zaman değişkeni olarak $e^{j\omega t}$ kabul edilirse ve türev ifadelerinde kullanılırsa eşitlik (3.35) halini alır.

$$j\omega m v \left(1 + \frac{v_{\text{çarp}}}{j\omega} \right) = j\omega m v \left(\frac{\omega - jv_{\text{çarp}}}{\omega} \right) \quad (3.35)$$

Eşitliğin iki tarafında ilgili sadeleştirmeler yapıldığında (3.33)'deki m_e , $m \left(\frac{\omega - jv_{\text{carg}}}{\omega} \right)$ ile değiştirilebilir. Ve böylece iletkenlik ifadesi (3.36) olarak elde edilir.

$$\sigma = -j \frac{n_e q^2}{m(\omega - jv_{\text{carg}})} \quad (3.36)$$

Kabul olarak sadece DC elektrik alanı ve manyetize olmamış izotropik plazma durumu ele alınırsa iletkenlik (3.37) haline dönüşür (İnan ve Gelkowski 2011).

$$\sigma = \frac{n_e q^2}{mv_{\text{carg}}} \quad (3.37)$$

Plazmayı oluşturan serbest yüklü taşıyıcılar, termal ve elektriksel dalgalanmalara bağlı olarak titreşim/salınım gösterirler. Ancak özellikle plazmayı oluşturan iyonların etrafındaki elektronların harmonik titreşimleri, plazmayı anlamak ve kullanmak için daha önemlidir. İyonların etrafında harmonik salınım yapan elektronlar nedeniyle, elektron yoğunluğu ω_p açısal frekansı ile salınım yapar. Elektrik alan yoğunluğunun salınımı ile bağlı olarak $\mathbf{E}$ elektrik alan da aynı frekansta salınım yapacaktır. Yoğunluk salınımları, toplam serbest yük yoğunluğunu artırır. ρ , serbest yük yoğunluğu, klasik olarak hacimsel yük yoğunluğu $\mathbf{J}$ ile ilişkilidir ve bu (3.38) süreklilik eşitliği ile verilmiştir.

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{d\rho}{dt} \neq 0 \quad (3.38)$$

Önceki adımlarda verilen akım yoğunluğu ifadesini (3.38) de yerine koyarak (3.39) elde edilir.

$$\nabla \cdot (\sigma \mathbf{E}) = \sigma (\nabla \cdot \mathbf{E}) = -\frac{d\rho}{dt} \quad (3.39)$$

Maxwell denklemlerinden biri olan (3.40) , (3.39)'da kullanıldığında (3.41) ile verilen eşitliğine ulaşılır. Verilen (3.39)'de elektrik alan ifadesi, daha önceki aşamalarda (3.37) ile elde edilen iletkenlik cinsinden yazılarak (3.41)'e ulaşılmaktadır burada, ρ , serbest yük yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3.40)$$

$$-j \frac{n_e q^2}{\omega_p m_e \epsilon_0} \frac{\rho}{\epsilon_0} = -\frac{d\rho}{dt} \quad (3.41)$$

Verilen eşitlikten, serbest yük yoğunluğu tek başına bırakılarak, eşitlik sadeleştirildiğinde (3.42) elde edilir. Eşitliğin sahip olduğu türev ifadesi çözülürken, başlangıç durumuna ait serbest yük yoğunluğu ρ_0 olarak tanımlanır. Açısal frekans ω_p önceki adımlarda tanımlandığı üzere serbest yük yoğunluğu ρ ile özdeş ifadedir ve (3.42)'de sunulmuştur.

$$\rho = \rho_0 e^{j \frac{n_e q^2}{\omega_p m_e \epsilon_0}} \quad (3.42)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e q^2}{m_e \epsilon_0}} \quad (3.43)$$

Elektromanyetik açıdan bir ortam veya malzemeyi değerlendirirken, ilgili malzemeye ait göreceli dielektrik geçirgenliğin bilinmesi elzemdir. Plazmanın dielektrik geçirgenliğini elde etmek için, önceki adımlarda elde edilen elektrik alan ifadeleri, Maxwell eşitliklerinde yerine konarak denklemler çözülmelidir. Kayıplı bir ortam ve $e^{j\omega t}$ zaman faktörü kabulleri ile Manyetik alan $\mathbf{H}$ 'in döneli ile elektrik alan $\mathbf{E}$ arasındaki bağıntı (3.44) ve (3.45) ile verilir.

$$\nabla \times \mathbf{H} = (j\omega\epsilon_0 + \sigma)\mathbf{E} \quad (3.44)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\epsilon_0 \left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0}\right)\mathbf{E} \quad (3.45)$$

(3.45)'de elde edilen, akım yoğunluğuna denk gelen tanımlama, (3.33) ile verilen iletkenlik tanımına ilişkin eşitlikle karşılıklı olarak eşitlendiğinde (3.46) sonucuna ulaşılır.

$$j\omega\epsilon_0 \left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0}\right)\mathbf{E} = j\omega\epsilon_0 \left(1 - \frac{n_e q^2}{\omega^2 \epsilon_0 m_e}\right)\mathbf{E} \quad (3.46)$$

Verilen (3.46), $v = 0$ koşulu altında, dielektrik sabiti için çözüldüğünde (3.47) olarak elde edilir. (3.46)'ın içerdiği iletkenlik sabiti, (3.36) ile genişletildiğinde (3.48) adımına ulaşılır.

$$\epsilon_r = \left(1 - \frac{n_e q^2}{\omega^2 \epsilon_0 m_e}\right) = \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right) \quad (3.47)$$

$$j\omega\epsilon_0 \left(1 + \frac{\sigma}{j\omega\epsilon_0}\right)\mathbf{E} = j\omega\epsilon_0 \left(1 - \frac{n_e q^2}{\omega\epsilon_0 m_e(\omega - jv_{\text{çarp}})}\right)\mathbf{E} \quad (3.48)$$

Ulaşılan son nokta tekrar (3.47) formunda incelendiğinde, çarpışma etkisini de içeren göreceli dielektrik geçirgenlik sabiti (3.49) olarak elde edilir.

$$\epsilon_r = \left(1 - \frac{n_e q^2}{\omega\epsilon_0 m_e(\omega - jv_{\text{çarp}})}\right) = \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - jv_{\text{çarp}})}\right) \quad (3.49)$$

Helmholtz dalga denkleminde yola çıkarak, k^2 , $\omega^2 \epsilon_0$ 'e eşit olacaktır ve sırasıyla çarpışmasız ve çarpışmalı durum için sırasıyla, yayılım sabitlerine ait dalga numaraları (3.50) ve (3.51) ile gösterilir.

$$k = \sqrt{\omega^2 \epsilon_0 m_e \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right)} \quad (3.50)$$

$$k = \sqrt{\omega^2 \epsilon_0 m_e \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - jv_{\text{çarp}})}\right)} \quad (3.51)$$

Verilen eşitlikler incelendiğinde, (3.50) pozitif değerler aldığı sürece, k reel bir sayı olacaktır ve düzlem elektromanyetik dalga, $k = \omega/v_p$ iken v_p yayılım hızı ile

plazma içerisinde yayılabilecektir. Başka bir deyişle, ω_p^2/ω^2 ifadesinin 1'den büyük veya küçük olma durumu, elektromanyetik dalganın plazma içerisinde yayılıp yayılmadığını tayin etmektedir. Plazma frekansının çok büyük olduğu durumda plazma içerisinde elektromanyetik dalga yayılamamakta yani plazma iletkenlik özelliğini arttırmaktadır ve plazma elektron nötral çarpışma frekansına bağlı olarak iletken gibi gelen dalgayı yansıtacak veya soğuracaktır. Plazma frekansının, elektromanyetik dalga frekansına göre düşük olduğu durumda ise, (3.49) ve (3.47) ışığında, plazma kompleks dielektrik özellikler göstermeye başlayacaktır. Plazma içerisinde, elektromanyetik dalga yayılım hızı ise (3.52) ile gösterilir.

$$v_p = \frac{1}{(\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r)^{0.5}} \quad (3.52)$$

Plazmaya ait dielektrik özellikler incelenirken, sıklıkla plazma çarpışma frekansı ifadesi kullanılmıştır. Plazmayı oluşturan soy gazla bağlı efektif elektron nötral çarpışmanın bağıllık bilgisi, plazma üretim sürecinin ve kullanımının önemli bir parçasıdır. Bu çarpışma frekansı, parçacıklar arasındaki enerji transferini anlatmak için kullanılır. Çarpışmalı plazmalar İnan ve Gelkowski (2011)'a göre, parçalı ve tam iyonize olarak iki kısımda incelenebilir. Genel olarak, parçalı iyonize plazmalar düşük basınçlı plazmalardır ve çarpışmaları nötr parçacıklar domine eder. Soy gazlar için çarpışma frekansının nümerik olarak analizi (Baillet vd. 1981) ve çarpışma frekansının basınç, uyartım gibi parametrelere bağlı olarak değişimi (Elghazaly vd. 2007) literatürde daha önce gösterilmiştir.

3.4. Ticari Plazma Tüpler

Plazma oluşması için gereken yüksek sıcaklık ve iyonizasyon, uygun gazların bir tüp içinde tutulması ile kontrollü şekilde elde edilebilir (Jusoh Tajudin 2014). Aydınlatma amaçlı üretilen plazma tüplerinde, genelde plazma oluşturmak için, helyum(He), neon(Ne), argon(Ar) gibi soy gazlar kullanılmaktadır. Bu gazlar, düşük seviyeli reaktiviteye sahip olmalarından ötürü, ticari/sivil kullanımda güvenli kabul edilmektedirler. Ancak doğası gereği, her bir gazın atomunun değişik enerji seviyelerine sahip olması sebebiyle, plazma oluşturmak için de farklı enerjilere ihtiyaç duymaktadır. Plazma tüplerinin çoğunda gazların yanında, plazma kontrolünü sağlamak için yardımcı kimyasallar da bulunmaktadır. En çok kullanılan yan ürünlerden biri cıva buharıdır. Ev tipi floresan lambalarda kullanılan cıva buharı basıncı, elektron yoğunluğunun belirlenmesini sağlar (Lister vd. 2004).

3.5. Antenler ve Yayılma

Antenler en klasik tanımı ile elektromanyetik enerjiyi etkili biçimde yaymak üzerine tasarlanmış yapılardır (Cheng 1989). Diğer bir klasik tanımlama ile besleme uçlarına uygulanan gerilimi bulunduğu ortamda elektromanyetik dalga olarak yayılmasını sağlayan veya bulunduğu ortamda üzerine düşen elektromanyetik dalgaları besleme uçlarından gerilim olarak ileten yapılardır. Antenler, sadece bir adet iletken tel gibi basit yapılar olabileceği gibi, yansıtıcı parabolikler, dalga kılavuzlarının kesitleri, dairesel yapılar, mikro şerit yama, çok geniş bantlı boynuz yapıları gibi çok çeşitli yapılarda da tasarlanabilirler. Antenlerin tarihsel süreç içinde, ihtiyaç duyulan karakteristik çalışma frekansı, verimlilik, bant genişliği, huzme şekli vb.

parametrelerine bağlı çok farklı yapılar ve malzemeler kullanılmıştır. Bu tez kapsamında, özellikle radar görünmez özelliklerinin öne çıktığı plazma malzemeler, çubuk anten yapısında kullanılmıştır.

Antenlerin yapıları ve malzemeleri ne olursa olsun, performanslarının ölçülebilmesi için temel tanımlamalar bilinmelidir. Antenlerin çalışması hakkında bilgi veren, etkin açıklık, kazanç, verim gibi parametreleri hesaplamak için en temel anten yapısı olarak diferansiyel uzunluğa ve çapa sahip tel anten için, Maxwell denklemlerini çözmek iyi bir başlangıç noktasıdır(Cheng 2009).

Maxwell denklemlerini birbirleri ile kombine ederek, homojenize olmayan dalga eşitliklerini çözümlenmelidir. Öncelikle anten üzerindeki ölçülen veya var olduğu kabul edilen $\mathbf{J}$ akım dağılımından manyetik vektör potansiyel $\mathbf{A}$ hesaplanır. Zamanda harmonik durum için gecikmeye ilişkin fazör eklentisi ile birlikte manyetik vektör potansiyel (3.53) ile verilir. Verilen eşitlikte, R mesafeyi, k dalga numarasını ve v' diferansiyel hacim ifade etmektedir.

$$\mathbf{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_{v'} \frac{J e^{-jkR}}{R} dv' \quad (3.53)$$

Manyetik vektör potansiyelini, manyetik alan şiddetini hesaplamak için (3.54) kullanılır.

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \quad (3.54)$$

Manyetik alan şiddetini elde ettikten sonra, Maxwell denklemleri kullanılarak, elektrik alan şiddeti (3.55) ile bulunur.

$$\mathbf{E} = \frac{1}{j\omega\epsilon} \nabla \times \mathbf{H} \quad (3.55)$$

$\mathbf{E}$ ve $\mathbf{H}$ alan ifadeleri elde edildikten sonra, antene ait diğer tüm parametrelere elde edilebilir. Önceki kısımda da bahsedildiği üzere, başlangıç noktası olarak diferansiyel dl uzunluğunda (çalışılan dalga boyuna göre çok kısa), ince bir yapı üzerinde, (3.56) ile verilen akım dağılımı kabulü yapılarak, telin yayılma karakteristiği incelenir. Eşitlikte, I akımın genliğini, Re ise kompleks ifadenin reelini gösteren operatördür.

$$i(t) = I \cos(\omega t) = Re[I e^{j\omega t}] \quad (3.56)$$

Verilen tanımlara sahip anten, Hertz dipolü olarak tanımlanmaktadır ve doğrusal antenlerin yapı taşı olarak kullanılır. Hertz dipolü için (3.53) tekrar çözüldüğünde (3.57) ile verilen manyetik vektör potansiyeline ulaşılır. Burada β , k_0 dalga numarasıdır. Diğer bir gösterimle $k_0 = \frac{\omega}{c} = 2\pi/\lambda$ olarak gösterilebilir.

$$\mathbf{A} = \mathbf{a}_z \frac{\mu_0 I dl}{4\pi} \left(\frac{e^{-j\beta R}}{R} \right) \quad (3.57)$$

Manyetik vektör potansiyeli, küresel koordinat sistemindeki bileşenlerini elde etmek için sırasıyla (3.58), (3.59), (3.60), (3.61) ve (3.62) adımları takip edilir.

$$\mathbf{a}_z = \mathbf{a}_R \cos(\theta) - \mathbf{a}_\theta \sin(\theta) \quad (3.58)$$

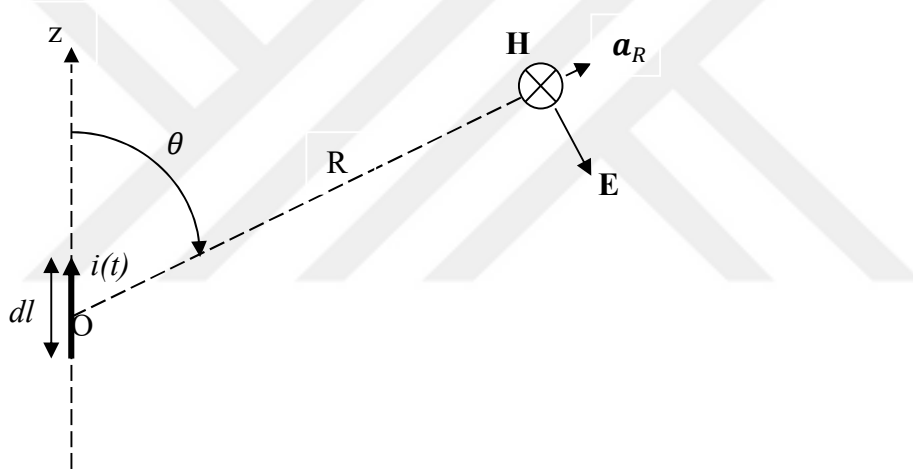
$$\mathbf{A} = \mathbf{a}_R A_R + \mathbf{a}_\theta A_\theta + \mathbf{a}_\phi A_\phi \quad (3.59)$$

$$A_R = A_z \cos(\theta) = \frac{\mu_0 I dl}{4\pi} \left(\frac{e^{-j\beta R}}{R} \right) \cos(\theta) \quad (3.60)$$

$$A_\theta = -A_z \sin(\theta) = -\frac{\mu_0 I dl}{4\pi} \left(\frac{e^{-j\beta R}}{R} \right) \sin(\theta) \quad (3.61)$$

$$A_\phi = 0 \quad (3.62)$$

Sıradaki adım olarak Hertz dipolünün uzaydaki konumlanmasına ve yayılmanın hesaplandığı konuma göre durumunu incelemek gerekir. Şekil 3.2’de görüleceği üzere, Hertz dipolü bir diferansiyel yapı olarak orijinde konumlanmıştır, üzerinde $i(t)$ akım yoğunluğu bulunmaktadır. R mesafe uzaklıktaki bir konum için elektrik alan ve manyetik alan yönleri gösterilmiştir. Manyetik vektör potansiyelinden, manyetik alan şiddeti hesaplanırken, ϕ koordinatında bir değişim olması beklenir.



Şekil 3.2. Hertz Dipolü

Şekil 3.2.’de verilen yerleşime göre manyetik alan şiddeti (3.63) ile hesaplanır.

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{a}_\phi \frac{1}{\mu_0 R} \left[\frac{\partial}{\partial R} (R A_\theta) - \frac{\partial A_R}{\partial \theta} \right] \quad (3.63)$$

Gereken işlemler yapıp, fazör formatta yeniden (3.64) şeklinde gösterilebilir.

$$\mathbf{H} = -\mathbf{a}_\phi \frac{I dl}{4\pi} \beta^2 \sin(\theta) \left[\frac{1}{j\beta R} + \frac{1}{(j\beta R)^2} \right] e^{-j\beta R} \quad (3.64)$$

Manyetik alan şiddeti (3.55) kullanılarak, elektrik alan şiddetine (3.65) ile geçiş yapılır.

$$\mathbf{E} = \frac{1}{j\omega \epsilon_0} \left[\mathbf{a}_R \frac{1}{R \sin(\theta)} \frac{\partial}{\partial \theta} (H_\phi \sin(\theta)) - \mathbf{a}_\theta \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (R H_\phi) \right] \quad (3.65)$$

Elde edilen ifade, bileşenlerine ayırarak (3.66) ve (3.67) şeklinde yazılabilir.

Eşitliklerde kullanılan η_0 hava ortamının empedansıdır ve $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \cong 120\Omega$ değerindedir. $E_\phi = 0$ olarak elde edilir.

$$E_R = -\frac{Idl}{4\pi}\eta_0\beta^2 2\cos(\theta) \left[\frac{1}{(j\beta R)^2} + \frac{1}{(j\beta R)^3} \right] e^{-j\beta R} \quad (3.66)$$

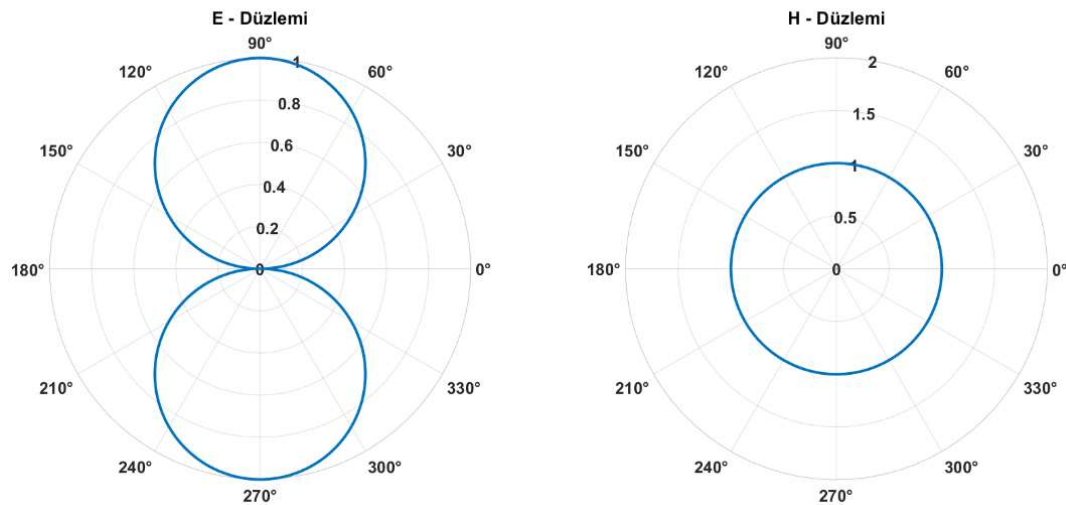
$$E_\theta = -\frac{Idl}{4\pi}\eta_0\beta^2 \sin(\theta) \left[\frac{1}{j\beta R} + \frac{1}{(j\beta R)^2} + \frac{1}{(j\beta R)^3} \right] e^{-j\beta R} \quad (3.67)$$

Hertz dipolünün elektrik ve manyetik alan şiddetleri ilgili eşitliklerden de görüleceği üzere karmaşıktır. Antenler genelde uzak mesafelerdeki alanları ile kullanılmaktadır ve bu bölge $R \gg 2\pi$ veya $\beta R = 2\pi R/\lambda \gg 1$ olduğu mesafedir. Bu nedenle $(\beta R)^2$ ve $(j\beta R)^3$ bileşenleri ihmal ederek dipole ait uzak alanı ve ışıma alanını (3.68) ve (3.69) şeklinde yazılır. Diğer alan bileşenleri ihmal edilebilir.

$$H_\phi = j \frac{Idl}{4\pi} \left(\frac{e^{-j\beta R}}{R} \right) \beta \sin(\theta) \quad (A/m) \quad (3.68)$$

$$E_\theta = j \frac{Idl}{4\pi} \left(\frac{e^{-j\beta R}}{R} \right) \eta_0 \beta \sin(\theta) = \eta_0 H_\phi \quad (V/m) \quad (3.69)$$

Antenlere ait belki de en çok ilgilenilen parametreler, örüntü ve yönlülüktür. Antenin sabit bir uzaklıkta, yöne bağlı uzak alan şiddetinin grafik haline getirilerek elde edilen sonuç ışıma örüntüsü veya anten örüntüsü olarak tanımlanır. Anten örüntüsü doğası gereği 3 boyutludur ancak grafik çiziminin ve anlaşılmanın kolaylaştırılması için θ veya ϕ düzlemlerinden birisi sabit tutularak, diğerine bağlı 2 boyutlu grafikler çizdirilerek kullanılır. Bu çizim işleminde, tepe değere göre normalizasyon uygulanarak diğer değerler elde edilir. θ 'ya göre değişimine E-düzlemi örüntüsü ve $\theta = \pi/2$ için normalleştirilmiş ϕ 'ye göre değişimine H-düzlemi örüntüsü denir. Önceki kısımda incelenen Hertz dipolü için alan bilgilerine bağlı olarak örüntüler çizdirilirse Şekil 3.3.'deki örüntü şekilleri elde edilir. Alanlar birbirine bağlı olduğu için sadece elektrik alanın çizdirilmesi yeterlidir.



Şekil 3.3. Hertz Dipolü Örüntüsü

Verilen şekilde E-düzlemi θ 'ya bağlı olarak sinüsoidal bir değişim göstermekte ve 3 boyutlu düşünüldüğünde ortasında boşluğu bulunmayan bir simit görünümündedir. E-düzleminde bu simitten bir kesit görülebilir. H-düzlemi ise, simit görünümü düşünüldüğünde ve $\theta = \pi/2$ için simidin en dışındaki ekvatorial çizgi üzerindeki alan değeridir.

Antenlerin bir diğer önemli parametresi, ışıdıkları gücü yönlendirme becerisini ölçmek için kullanılan yönlü kazançtır. Işıma şiddeti cinsinden gösterilir. Işıma şiddeti, açılı başına düşen, zamana bağlı ortalama güçtür. Katı açı için SI birimi steradyandır ve sr ile gösterilir. Işıma şiddetinin birimi ise (W/sr) olarak gösterilir. Işıma şiddeti (3.70) ile ifade edilebilir. Burada U ışıma şiddetini, R^2 yarıçapa bağlı alan ifadesini, $\mathcal{P}_{ort}$ ise poynting vektörünün zamanda ortalamasını ifade etmektedir.

$$U = R^2 \mathcal{P}_{ort} \text{ (W/sr)} \quad (3.70)$$

Yine zamanda ortalama yayılan toplam güç ise (3.71) ile gösterilir. Burada P_r ışıyan ortalama gücü temsil etmektedir. Diferansiyel alan operatörü ds , ışıma şiddeti ifadesinde $d\Omega = \sin(\theta)d\theta d\phi$ olarak yazılabilir.

$$P_r = \oint \mathcal{P}_{ort} \cdot ds = \oint U d\Omega \text{ (W)} \quad (3.71)$$

Antene ait yönlü kazanç G_D , ilgili yöndeki ışıma şiddetinin, ortalama ışıma şiddetine oranıdır. (3.72) ile verildiği üzere (θ, ϕ) yönündeki kazanç ışıma şiddetinin, ortalama ışıma şiddetine bölümü ile hesaplanabilir.

$$G_D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{\frac{P_r}{4\pi}} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{\oint U d\Omega} \quad (3.72)$$

İzotropik veya yön bağımsız bir anten olması durumunda, yönlü kazancın bire eşit olması beklenir, ancak bu şekilde bir anten sadece teorik olarak mümkün olup pratikte mümkün değildir.

Antenin en yüksek yönlü kazancı, antenin yönlülüğü olarak tanımlanır. Yönlülük, elde edilen en yüksek ışıma şiddetinin, ışıma şiddetinin ortalamasına oranı olarak (3.73) ile gösterilir. D , yönlülüğü, U_{Maks} maksimum ışıma şiddetini ve U_{ort} ortalama ışıma şiddetini belirtmek için kullanılmaktadır. Yönlülük genelde desibel cinsi ifade edilir.

$$D = \frac{U_{Maks}}{U_{ort}} = \frac{4\pi U_{Maks}}{P_r} \quad (3.73)$$

Yönlülük elektrik alan cinsinden gösterilmek istenirse (3.74) ile verildiği gibi gösterilebilir. E_{Maks} elektrik alan şiddetinin maksimum değerini göstermektedir. İntegral ifadeleri, küresel koordinatlarda tam bir küreyi tamamlayacak şekilde 2 aksisin birleşimi şeklinde ifade edilir.

$$D = \frac{4\pi |E_{Maks}|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi E(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi} \quad (3.74)$$

Antenlere ait bir diğer önemli parametre, antenin güç kazancıdır. Güç kazancı

veya sadece kazanç G_P , antenin belirli bir giriş gücünde en yüksek ışıma şiddetinin, izotropik bir kaynağa aynı giriş gücü uygulandığında sahip olduğu ışıma şiddetine oranıdır. Işıyan güç P_r cinsinden bir oran verilse de bu güç P_i giriş gücü ve P_l toplam güç kaybı ifadeleri ile anlamlıdır. Güçler arasındaki ilişki (3.75) ile verilir.

$$P_i = P_r + P_l \quad (3.75)$$

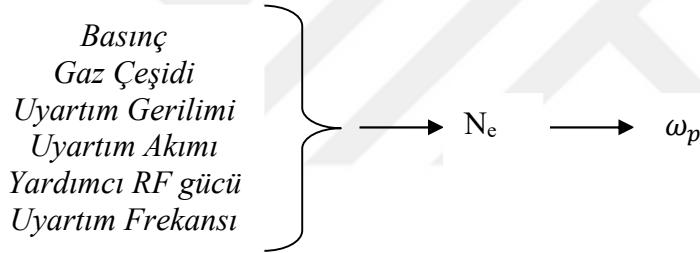
Verilen eşitlik güç kazancını hesaplamak için kullanıldığında (3.76) elde edilir.

$$G_P = \frac{4\pi U_{Maks}}{P_i} \quad (3.76)$$

Antenin girişindeki gücü, ışıyan güce çevirme oranı antenin verimi olarak tanımlanır ve (3.77) ile verilmiştir ve verim ζ ile gösterilmiştir.

$$\zeta_r = \frac{G_P}{D} = \frac{P_r}{P_i} \quad (3.77)$$

Tüm verilen teorik bilgiler ışığında, plazma tüplerini anten olarak kullanmak için dikkat edilmesi gereken en önemli parametrenin plazma frekansı olduğu görülmektedir. Plazma frekansının kontrol edilmesi için toplam yüklü parçacık sayısını kontrol edebilecek diğer parametreler Şekil 3.4. ile özetlenmiştir.



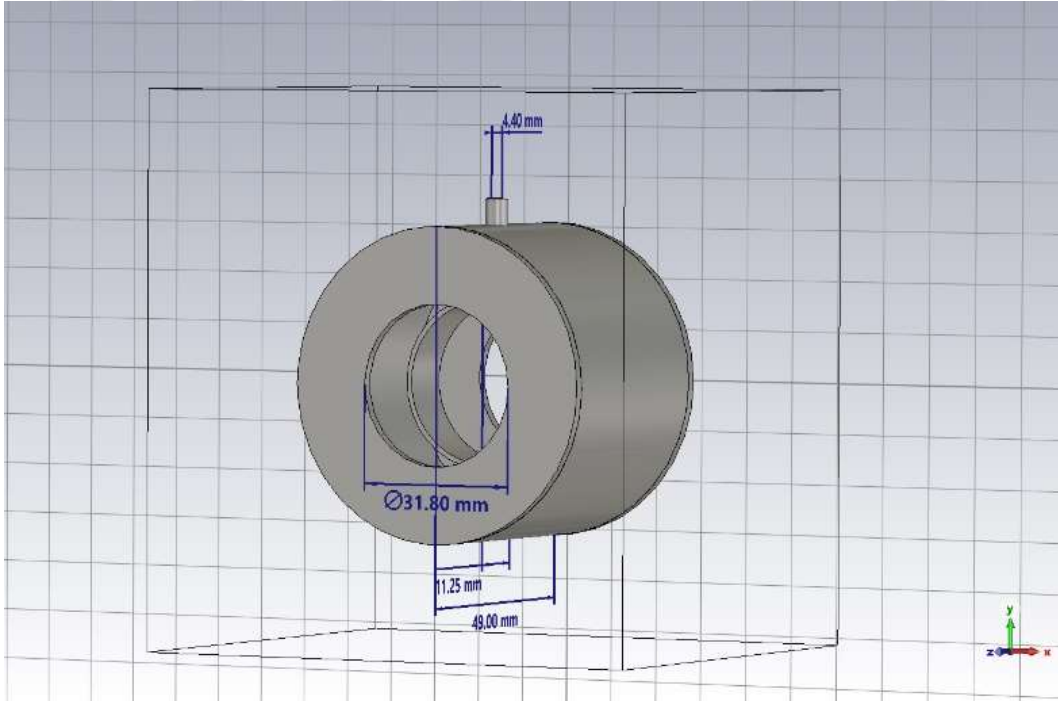
Şekil 3.4. Plazma frekansı kontrol parametreleri

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde sırasıyla, bağdaştırıcı tasarımı, bağdaştırıcının plazma tüp ile etkileşimi ile elde edilen temel çubuk anten olarak plazma anten, elde edilen tekil plazma anteni kullanarak dizi anten ve en sonunda plazma anten dizisi ve örüntü yönlendirici yardımcı plazma tüplerin benzetim sonuçları incelenmiştir. Benzetim programı olarak CST Microwave Studio ve plazma malzemenin üretimi için aynı programın sunduğu Drude modelini temel alan araç kullanılmıştır.

4.1. Bağdaştırıcı Tasarımı ve Benzetim Sonuçları

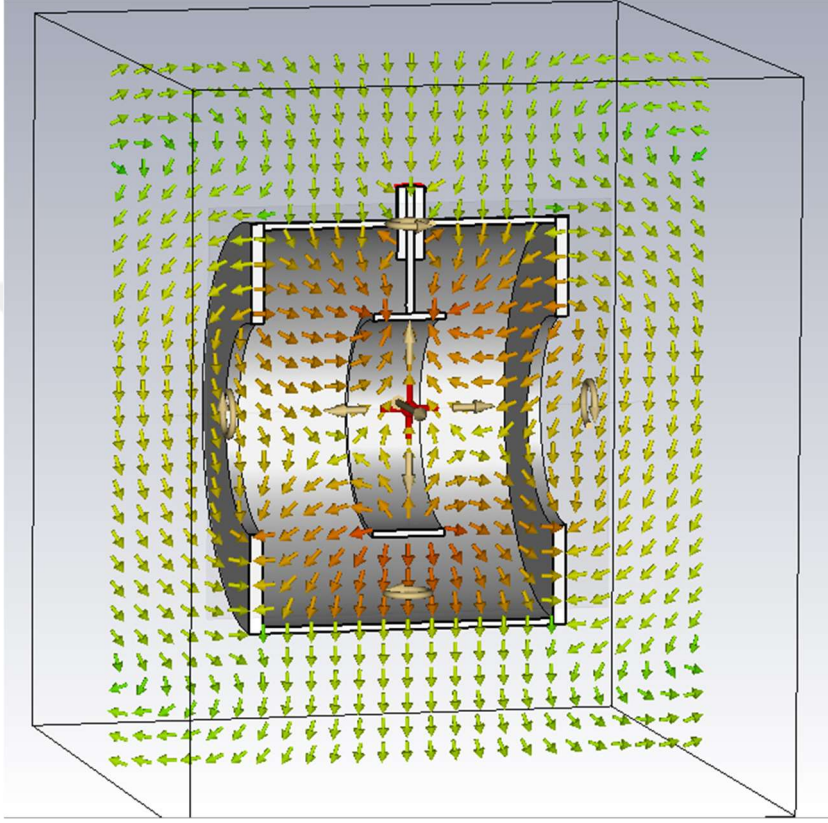
Plazma tüplerinin anten olarak kullanılabilmesi için bir bağdaştırıcı ya ihtiyaçları vardır. Bağdaştırıcı, üzerinde bulunan sma port ile kaynaktan gelen işareti, plazma tüpün etrafında oluşturduğu bir rezonans boşluğu ile plazma üzerinde yüzey dalgasına dönüştürmek için kullanılmaktadır. Bağdaştırıcı mekanizması olarak birçok seçenek olmakla birlikte, önceki bölümlerde açıklanan gerekçelerle kapasitif özellikli bir iç ve bir dış halkadan oluşan bağdaştırıcı tipi seçilmiştir(Hadaegh ve Mohajeri 2021). Bağdaştırıcının iç halkasının çapı, kullanılmasına karar verilen floresan tüplerin dış yüzeyine sıkı oturacak şekilde 31.8 mm ve dış çapı 60mm olarak seçilmiştir. Bağdaştırıcının iç ve dış halkası arasındaki uzaklık, dış halkanın genişliği ve dış halkanın çapı ilerleyen bölümlerde açıklanacağı üzere çeşitli kombinasyonlar ile benzetim programında analiz edilerek, hedeflenen frekans bandında çalışacak bir kombinasyon elde edilmiştir. Nihai bağdaştırıcının diğer boyutları Şekil 4.1’de gösterildiği gibi dış halkanın genişliği 40 mm ve iç halkanın genişliği dış halkanın çeyrek kalınlığında olacak şekilde, 11.25 mm verilmiştir.



Şekil 4.1. Bağdaştırıcı perspektif görünümü

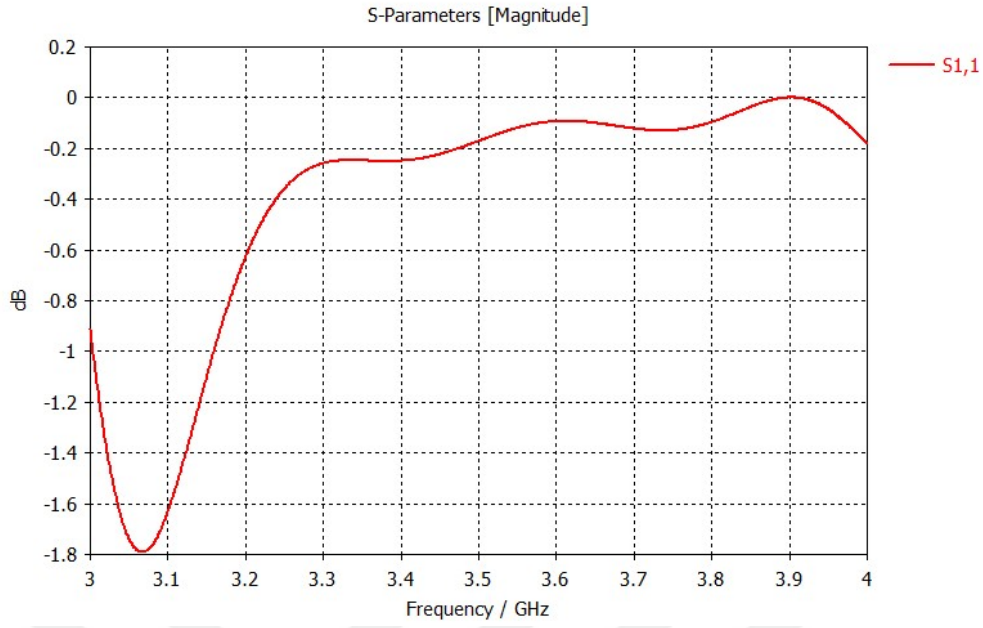
Bağdaştırıcının kesiti ve benzetim sonucunda elde edilen elektrik alan dağılımı

Şekil 4.2.'de verilmiştir. Tasarımda görüleceği üzere, dış halkada açılan delikten içeriye doğru eş eksenli sma konnektörü, iç halkaya canlı ucu temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Eş eksenli konnektörün toprak iletkeni dış halkaya temas ederek devreyi tamamlamaktadır. Bu sayede iç halkadan dış halkaya doğru bir elektrik alan oluşması sağlanmıştır. Bağdaştırıcı, plazma tüpü ile birlikte kullanıldığında daha farklı bir çalışma karakteristiğine sahip olacağı unutulmamalıdır. Şekil 4.2.'de görülen elektrik alan dağılımı, 3.2 GHz için elde edilmiştir.



Şekil 4.2. Bağdaştırıcı Elektrik Alan Dağılımı

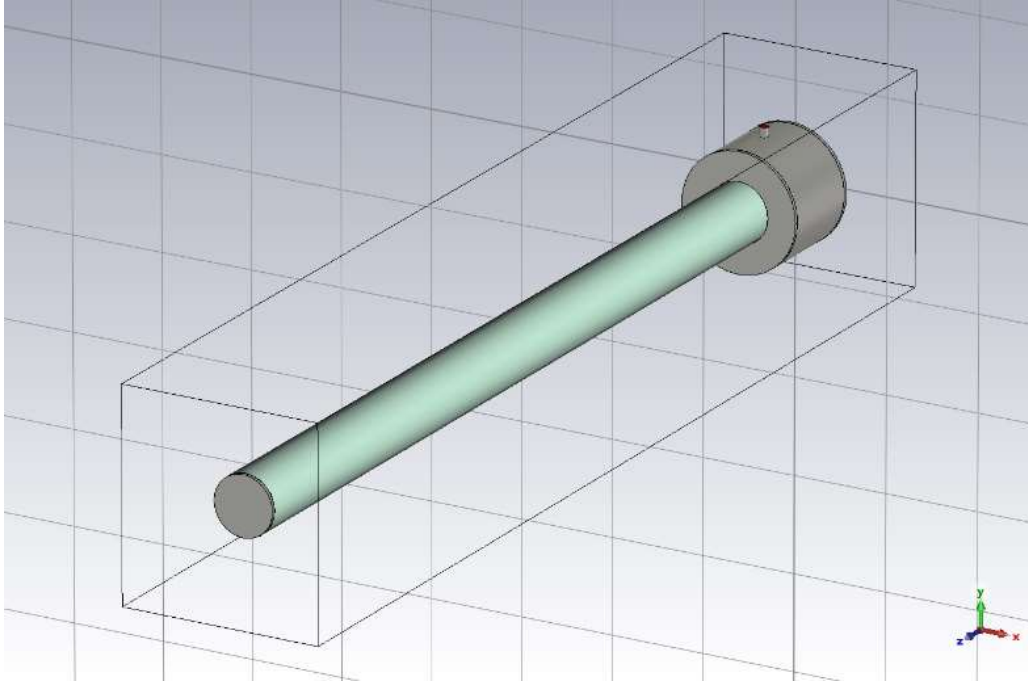
Bağdaştırıcının benzetimi tek başına yapıldığında, üzerine yerleştirilen 1 numaralı porttan elde edilen S11 sonuçları Şekil 4.3. ile verilmiştir. Grafik incelendiğinde, yaklaşık 3.05 GHz mertebelerinde görece düşük bir S11 değeri elde edilmiştir. Her ne kadar bu değerler -1dB civarında neredeyse ihmal edilebilir olsa da bağdaştırıcının plazma tüp olmadan tam karakteristiğini vermediği akılda tutulmalıdır.



Şekil 4.3. Bağdaştırıcı Plazma Tüp Olmadan S11 Sonuçları

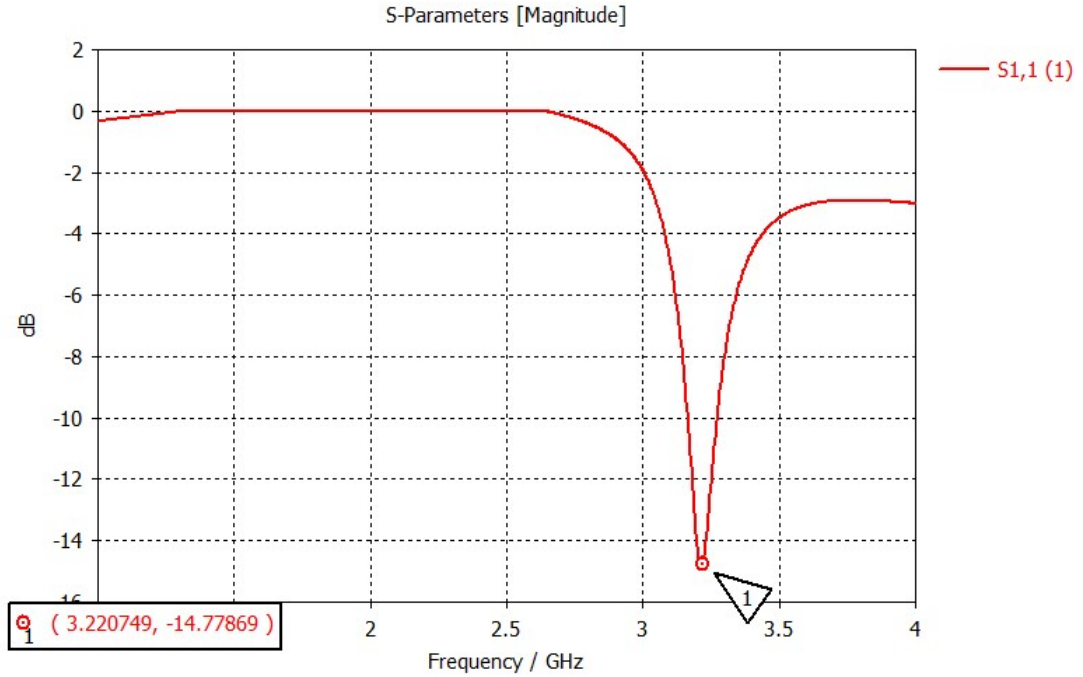
4.2. Temel Çubuk Anten Benzetimleri

Elde edilen bağdaştırıcının tek başına çalışma ile plazma tüp ile etkileşime girerek çalışması arasında farklılık kaçınılmazdır. Tasarlanan bağdaştırıcı, benzetim programında tasarlanan floresan tüpün elektrot başlığında 3 cm yukarıda merkezlenecek şekilde yerleştirilerek benzetime tabi tutulmuştur. Benzetimde plazma, Drude model ile üretilmiştir.



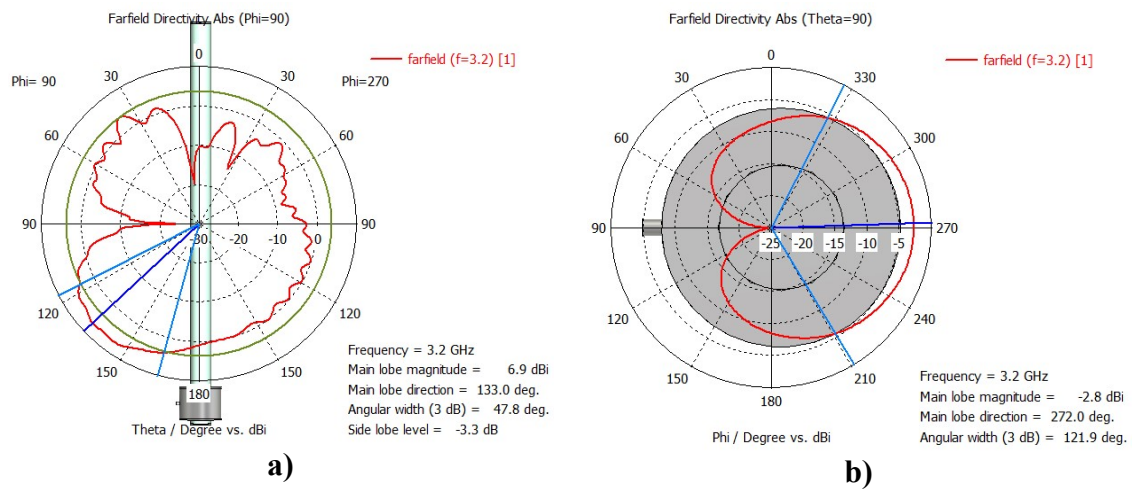
Şekil 4.4. Temel Çubuk Anten Tasarımı

Plazma parametreleri, plazma frekansı 4.4×10^{10} rad/s ve çarpışma frekansı 900 MHz olacak şekilde daha önce floresanlar için literatürde kullanılan değerler olarak seçilmiştir (Barro vd. 2018). Benzetime tabi tutulan temel çubuk anten Şekil 4.4. ile sunulmuştur. Elde edilen temel çubuk anten benzetim programında çalıştırılmıştır. Bağdaştırıcı beklendiği üzere plazma tüp ile etkileşime geçerek hedeflenen karakteristik frekansta çalışmaya başlamıştır.



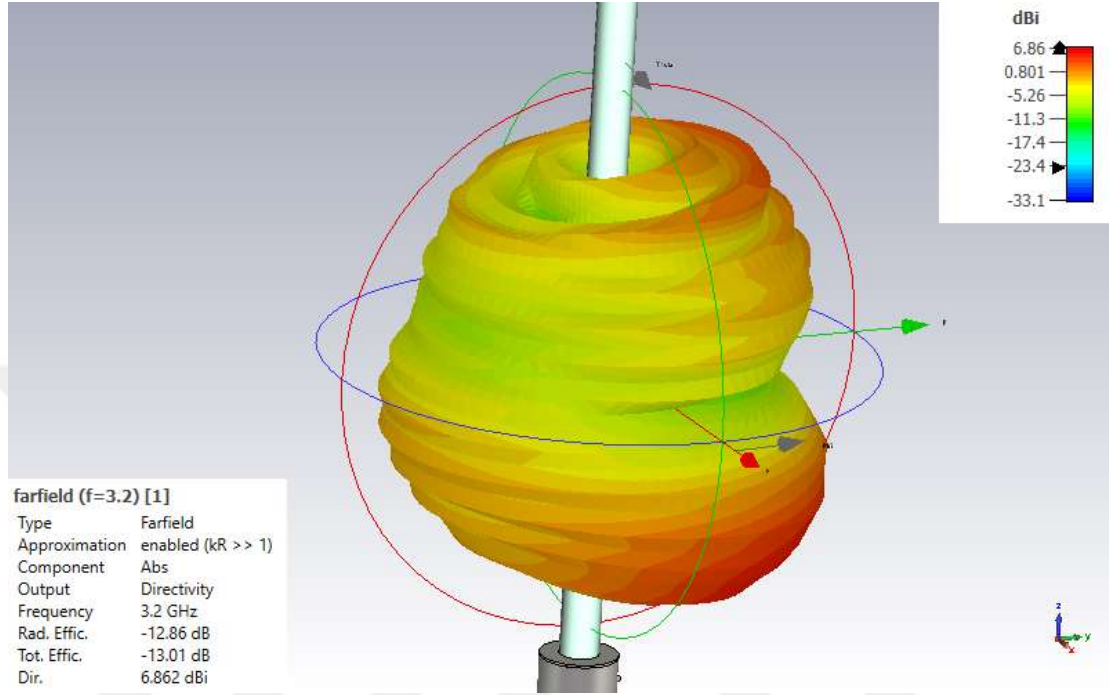
Şekil 4.5. Temel Plazma Çubuk Anten S11 Sonucu

Temel çubuk antenin benzetim ile elde edilen S11 sonucu Şekil 4.5.'de verilmiştir. Bağdaştırıcının, plazma tüpü ile bir araya gelmesi ile beklendiği gibi 3.2 GHz rezonans frekansına sahip bir anten elde edilmiştir. Çubuk antene ait ışıma örüntüleri Şekil 4.6 ile sunulmuştur.



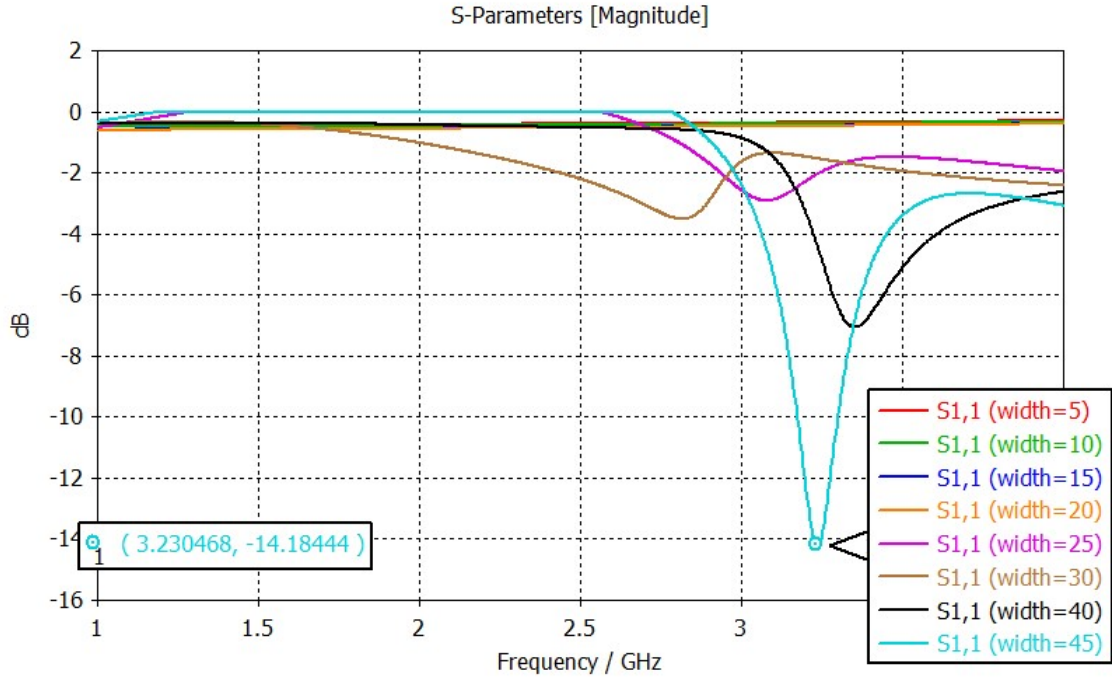
Şekil 4.6. Temel Plazma Çubuk Anten Örüntü Sonuçları

Şekil 4.6.a. ile theta düzleminde, b ile phi düzleminde elde edilen yönlülük örüntüleri görülmektedir. Theta düzleminde Phi 90 derece kesitinde, en yüksek 6.9 dBi yönlülük ve 48 derecelik yarı güç huzme genişliği elde edilmiştir. Phi düzleminde ve 90 derecelik theta kesitinde ise, -2.8 dBi yönlülük ve yaklaşık 120 derecelik yarı güç huzme genişliği elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Temel Plazma Çubuk Anten 3-Boyutlu Örüntü Sonuçları

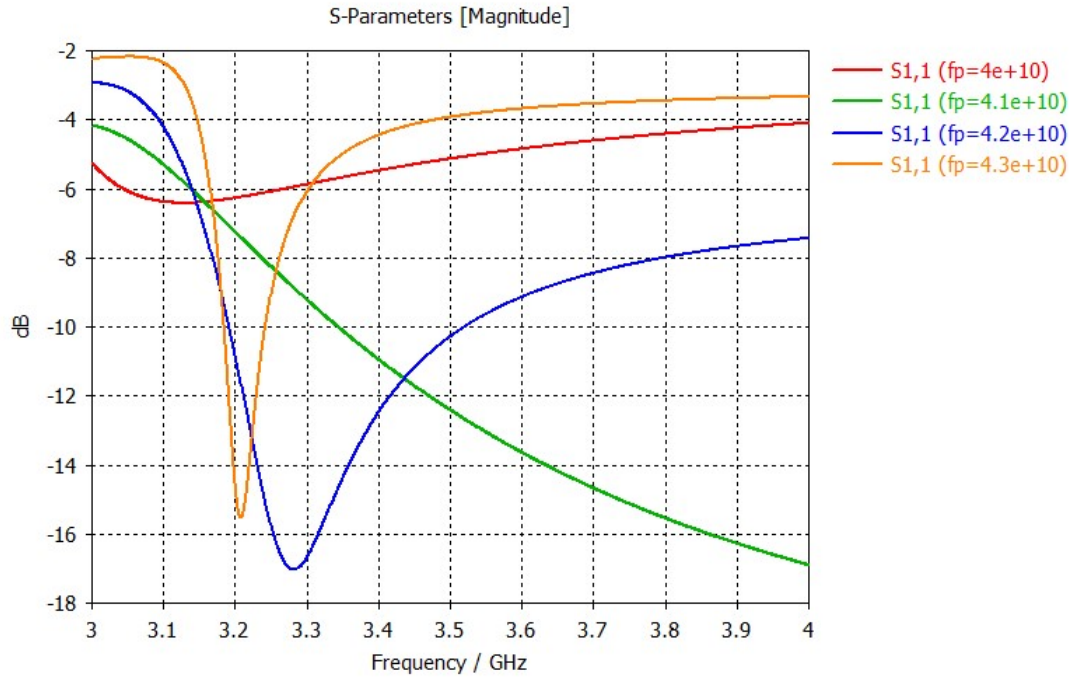
Temel çubuk antenin 3-boyutlu örüntü sonuçları Şekil 4.7. ile verilmiştir. Antenin iki adet büyük huzme şeklinde ışıma örüntüsüne sahip olduğu görülmüştür. Ana huzme genişliği, bağdaştırıcının port bağlantısının olduğu y yönünde oluşmuştur. Antenin huzmesinin, bağdaştırıcıya yakın oluşması, plazmanın üzerinde oluşan yüzey dalgalarının plazma boyunca zayıflamasının sebep olduğu sonucu görünmektedir. Tez çalışmasının amacı, plazma tüpünün bir anten olarak kullanılabilirliğini kanıtlamak olduğu için, örüntü şekli, yönü ve antenin yönlülüğü ileri çalışmalarda incelenmek üzere detaylı olarak irdelenmemiştir.



Şekil 4.8. Bağdaştırıcı Genişliğinin Etkisi

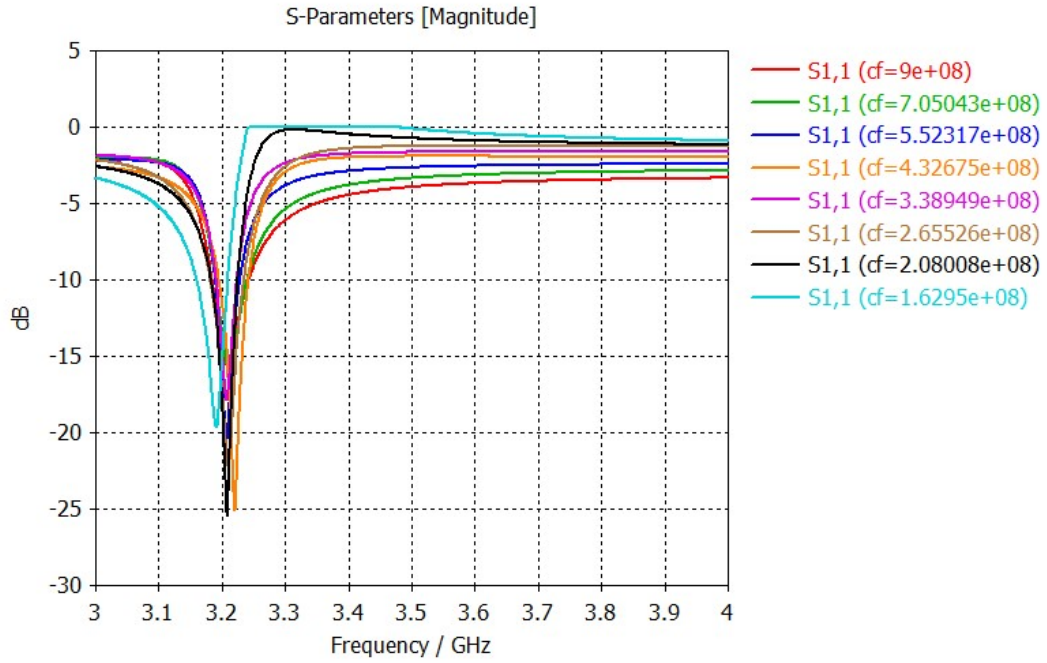
Bağdaştırıcının, plazma tüpü boyunca uzanan dış halkasının genişliğinin rezonans frekansına etkisi, Şekil 4.8. ile verilen S11 benzetim sonucu ile incelenmiştir. Bu benzetim çalışmasının amacı en küçük boyuta sahip işlevsel bağdaştırıcı genişliğini belirlemektir. İç halka genişliğinin, dış halkanın çeyreği genişliğinde olacak şekilde, parametrik olarak değiştirildiği benzetimde, bağdaştırıcının hesaplanan genişliğinden daha küçük değerlerin kullanıldığı durumda hem iç halkanın çok küçülmesi hem de bağdaştırıcı içinde kalan boşluğun boyutunun değişmesi, antenin rezonans frekansını doğrudan etkilemiştir. Bağdaştırıcının üretim kolaylığı, yan etkilerinin azalması gibi sebeplerle olabildiğince küçük boyutlu olması gerektiği aşıkardır. Bu kısıt altında, benzetimlerde kullanılan 45mm'lik genişlik limit boyut olarak kabul edilmiştir.

Tez çalışmasında temel olarak floresan tüpler kullanılması kararlaştırılmış olsa da floresan tüplerin teorik olarak plazma frekansının değiştirilebilmesi halinde çalışmaya olan etkisi vereceği bilgilerin önemli olması sebebiyle, Şekil 4.9.'de incelenmiştir. Plazma frekansının istenerek kontrollü bir biçimde veya bilinmeyen bir sebepten istemsiz değişmesi halinde, antenin karakteristik frekansında oluşacak kaçınılmaz değişimin bilinmesi hem akademik anlamlı veri ortaya koymakta hem de olası uygulama alanlarında tersine hata bulma amaçlı kullanılabilecek bilgiler vermektedir.



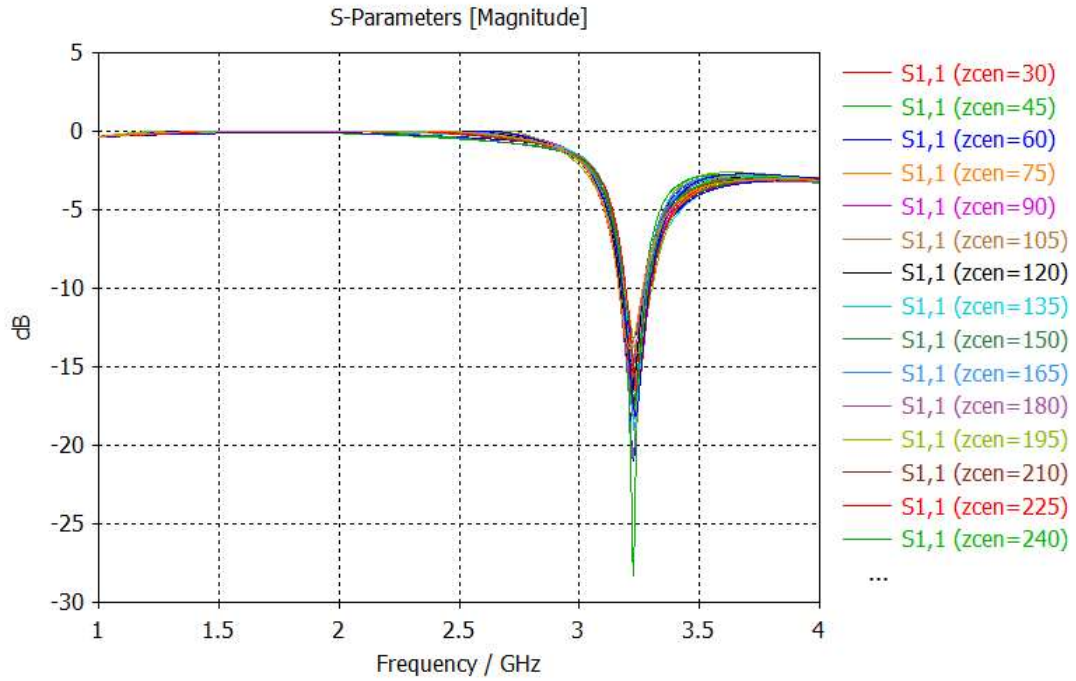
Şekil 4.9. Plazma Frekansının S11'e Etkisi

Şekil 4.9.'de görüldüğü üzere, çarpışma frekansı 900 MHz olarak sabit tutulup, plazma frekansı normalde kullanılan 4.4×10^{10} rad/s yerine sırasıyla, 4.0, 4.1, 4.2, 4.3 $\times 10^{10}$ rad/s olacak şekilde benzetim tamamlanmıştır. Beklendiği üzere, görece yakın plazma frekans değerlerinde karakteristik çalışma frekansı, standart karakteristik frekansa göre 100 MHz mertebelerinde kayarken, 4.1 $\times 10^{10}$ rad/s plazma frekansında daha yüksek frekanslarda ve geniş bantta rezonans özelliği göstermiştir. Plazma frekansı daha düşük değerlere düştüğünde, neredeyse hiç rezonans özelliği göstermeyerek, anten olarak kullanılabilme kabiliyetini kaybetmiştir.



Şekil 4.10. Çarpışma Frekansının S11'e Etkisi

Tekil çubuk plazma anten için gerçekleştirilen son benzetim, bağdaştırıcının plazma tüpü üzerinde yerleştirileceği konumun etkisini görmek için yapılmıştır. Şekil 4.11.'da verilen grafik, bağdaştırıcının merkezinin, plazma tüpünün elektrot ucundan 30mm uzaklıkta olduğu ilk konumdan, diğer ucundaki elektrota 30mm uzaklıkta kalana kadar, adım adım ilerletilmesi ile ortaya çıkarılmıştır. Bu benzetim sonuçlarında şekilde de görülebileceği üzere neredeyse hiçbir anlamlı fark elde edilememiştir. Bu sonuç, hem benzetim programında plazma tüpünün olması gerektiği gibi tasarlanıp simetrik davranış gösterdiği hem de bağdaştırıcı-plazma konfigürasyonunun doğru şekilde yapıldığını doğrulamaktadır. 515mm uzunluğundaki tüpün yaklaşık olarak ortasına denk gelen 240mm uzaklıktaki konumda, diğer sonuçlardan farklı olarak, yaklaşık 10dB daha düşük S11 değeri elde edilmiştir.

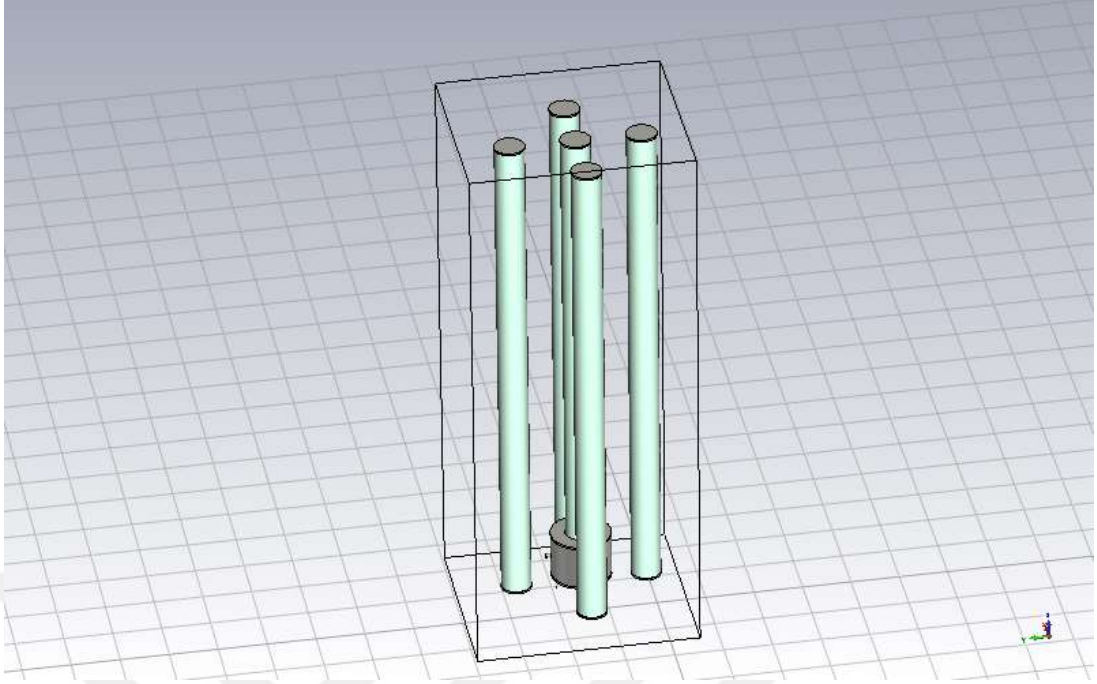


Şekil 4.11. Bağdaştırıcı Konumunun S11’e Etkisi

Bir tüp içindeki plazmanın çarpışma frekansının değişmesi için, tüp içerisindeki gaz miktarı veya plazma sıcaklığının değişmesi gerekmektedir. Vakum altında ve sızdırmaz bir şekilde üretilen floresan tüplerinde, çarpışma frekansının değişmesi beklenmese de üretim hataları veya gelecekte üretilebilecek özelleştirilmiş tüplerdeki davranışları öngörebilmek için, plazma frekansı 4.4×10^{10} rad/s olarak sabit tutulup, çarpışma frekansı 160-900 MHz arasında değiştirilerek benzetimler gerçekleştirilmiştir. Bu benzetimlerin sonucu Şekil 4.10. aracılığıyla sunulmuştur. Şekilde açıkça görüleceği üzere, plazma frekansı sabit kaldığı sürece, çarpışma frekansının azalması yani tüp içerisindeki madde miktarının azalması veya sıcaklığın düşmesi çalışma frekansına neredeyse hiç etki etmemektedir. Elde edilen sonuçlar arasında, rezonans frekansı için maksimum 10 MHz mertebelerinde kayma şeklindedir. Bazı değerler için, daha düşük bir S11 değeri yani daha yüksek oranda rezonans elde edilmiş olsa da antenin çalışmasında majör bir değişiklik olmadı görülmüştür.

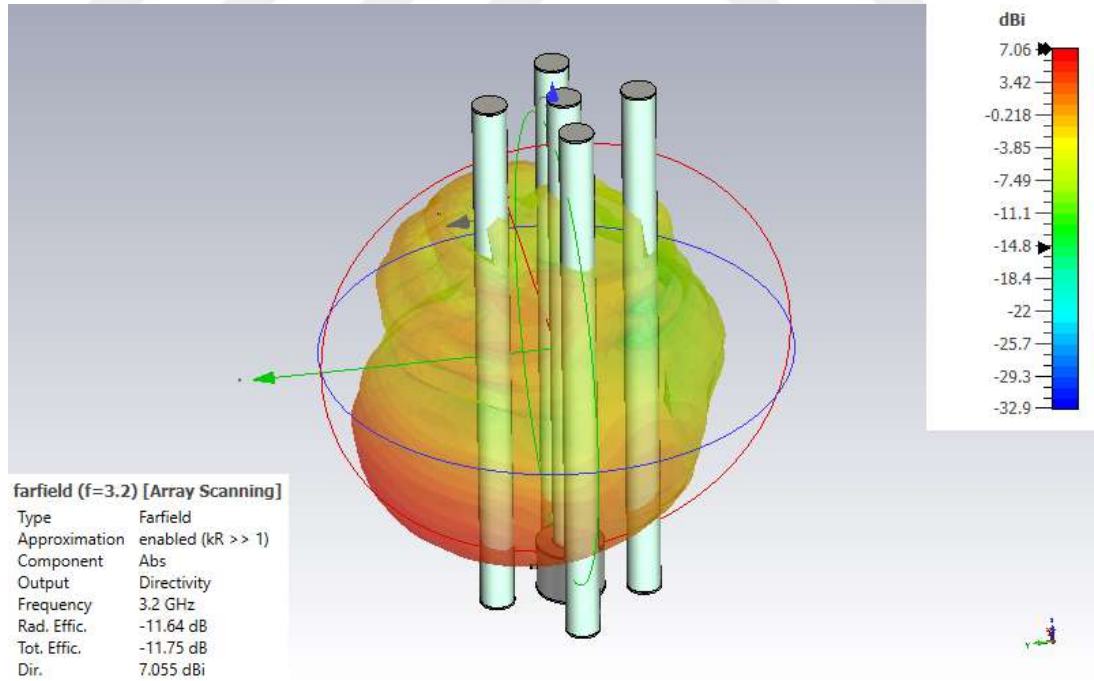
4.3. Susturuculu Anten Benzetimleri

Önceki bölümde tamamlanan tek elemana ait benzetim sonuçları ile temel çubuk antenin çalışma karakteristiği sunulmuştur. Tez çalışmasının amaçları doğrultusunda, temel çubuk antenin etrafına susturucu/saptırıcı plazma tüpleri yerleştirilerek, plazma tüplerin örüntü şekillendirme amaçlı kullanılması incelenmiştir. Şekil. 4.12. ile verilen benzetim programı görünümünde, aktif olarak RF beslemesi bulunan temel çubuk antenin etrafında 90 derecelik yerleşim ile 4 adet plazma tüpü yerleştirilmiştir. Saptırıcılar, antenden $\lambda/4$ uzaklıkta konumlandırılmıştır.



Şekil 4.12. 4 Susturuculu Çubuk Anten Dizisi

Oluşturulan, bir adet çubuk anten ve dört adet susturucudan oluşan anten dizisi benzetimi gerçekleştirilmiştir. Temel çubuk antenin örüntüsünün susturucu plazma tüpler ile manipüle edilmesi amaçlanmıştır.



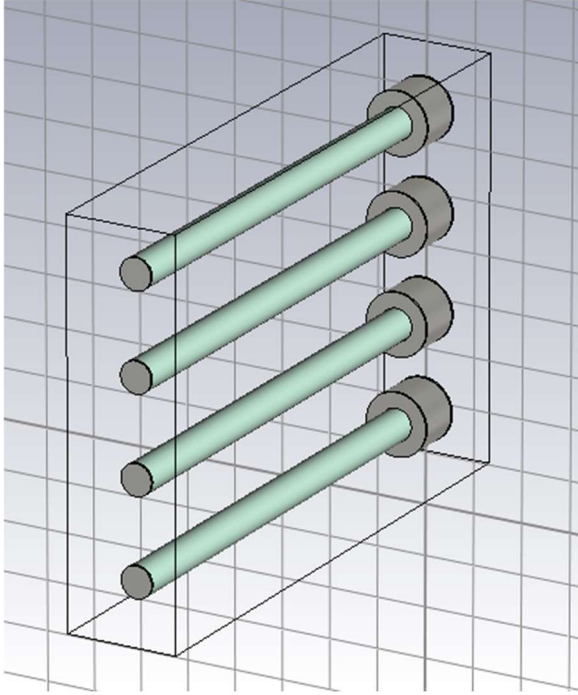
Şekil 4.13. 4 Susturuculu Çubuk Anten Dizisi Örüntüsü

Bu benzetimin sonuçları Şekil 4.13. ile verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, susturucu antenlerin, bağdaştırıcıya yakın olan huzmeyi güçlendirerek

7dBi'nin üzerinde yönlülük değerine sahip olurken, bağdaştırıcıdan uzak huzmenin bastırıldığı görülmüştür. Aynı şekilde, bağdaştırıcının port girişinin tersi yönündeki örüntü de bariz bir şekilde bastırılabilmiştir. İlgili plazma susturucuların, pasif hale getirilmesi ile çubuk anten kendi davranışını göstermeye devam etmektedir. Bu sonuçlarla, plazma tüplerin örüntü şekillendirme, susturma, ekranlama vb. amaçla kullanılabileceği ortaya konmuştur. Bu benzetim sonuçlarında tartışılması ve başka çalışmalarda detaylı incelenmesi gereken konu, bağdaştırıcının port bağlantısının olduğu yöndeki örüntüsünün bastırılmamasıdır. Bunun çözümü için, susturucu plazma tüplerinin sayısının artırılması, yerleşiminin değiştirilmesi veya boyutlarının değiştirilmesi öngörülmüştür. Bu bölümde elde edilen sonuçlar bir bildiri haline getirilerek, Kocakusak ve Helhel (2023) olarak sunulmuştur.

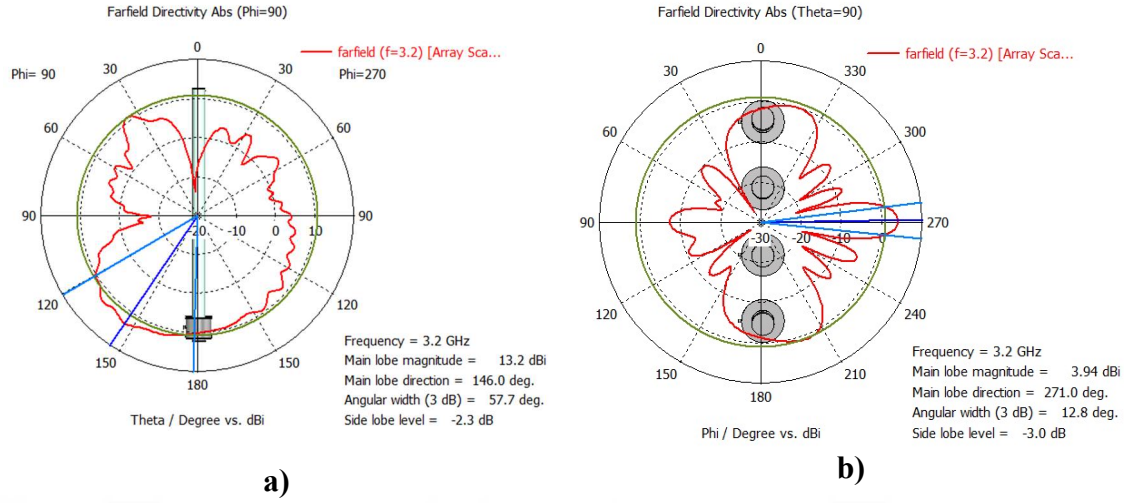
4.3. 4 Elemanlı Dizi Benzetimleri

Önceki bölümlerde gerçekleştirilen benzetim sonuçlarına yeni bir adım olarak, nihai diziyeye ulaşmak için 4 Elemanlı, doğrusal bir anten dizisi tasarımı yapılarak benzetimi gerçekleştirilmiştir. Her bir eleman arasında $\lambda/2$ yani yaklaşık 9.4 cm mesafe bulunmaktadır. Her bir anten ayrı ayrı beslenen bağdaştırıcılara sahiptir. İlgili dizinin tasarımı Şekil 4.14. ile gösterilmektedir.



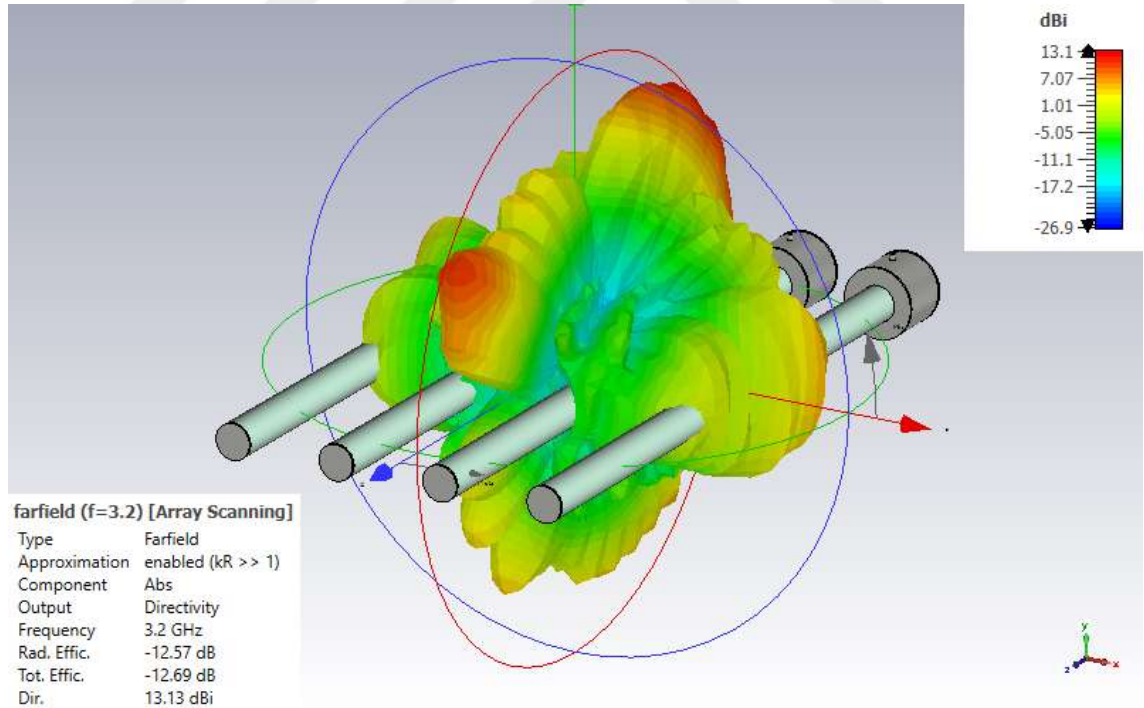
Şekil 4.14. 4 Elemanlı Anten Dizisi

Benzetim sonuçları incelendiğinde, beklendiği üzere tek bir elemana nazaran daha yüksek yönlülüğe sahip bir yapı elde edilmiştir. Benzetim sonucunun 2 Boyutlu olarak, theta ve phi düzlemindeki örüntü grafikleri Şekil 14.5. ile verilmiştir. Şekil 14.5.a.'da verilen theta'ya bağlı kesitte, anten dizisinin huzmenin, tekli antene benzediği, ana huzme yönünün yine besleme portları tarafında, yaklaşık 146 derecede ve 13.2 dBi olarak elde edildiği görülmüştür. Şekil 14.5.b'de verilen phi açısına bağlı kesitte ise, örüntünün tekli antene nazaran daha dar bir huzme genişliğine sahip olduğu, ana huzmenin, 270 derece yönünde yaklaşık 3.9 dBi olduğu görülmüştür.



Şekil 4.15. 4 Elemanlı Dizi 2 Boyutlu Örüntü Benzetim Sonuçları

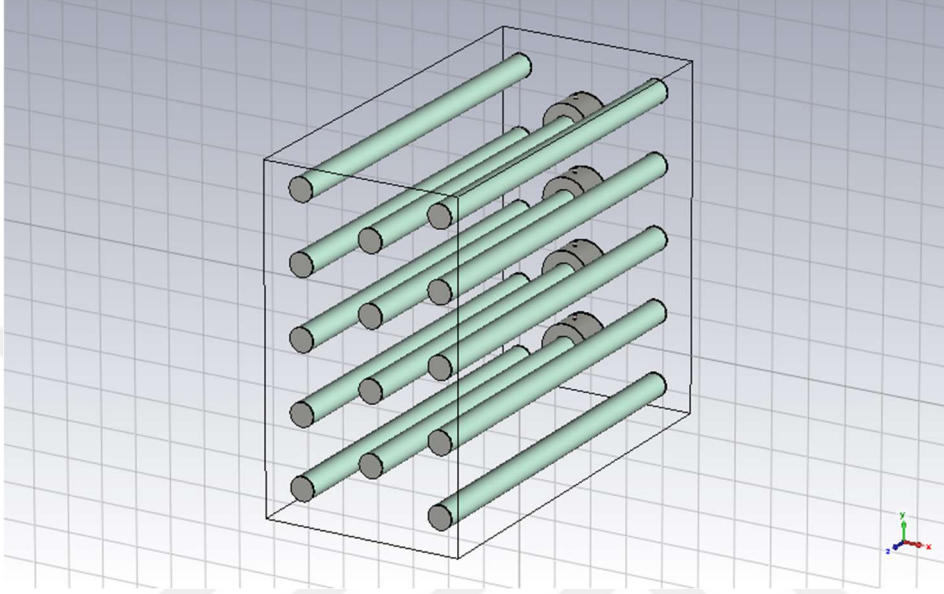
4 Elemanlı dizi antenin çalışma karakteristiğini daha iyi anlamak için, Şekil 14.5 ile verilen 3 Boyutlu örüntü kullanılabilir. Örüntü incelendiğinde, beklendiği üzere dizinin yerleşim yönünü dik kesen düzlemdeki örüntü davranışı oldukça dar bir huzme halindedir. Tüm yönler içinde en yüksek yönlülük yaklaşık 13 dBi olarak elde edilebilmiştir.



Şekil 4.16. 4 Elemanlı Anten 3 Boyutlu Örüntü Benzetim Sonuçları

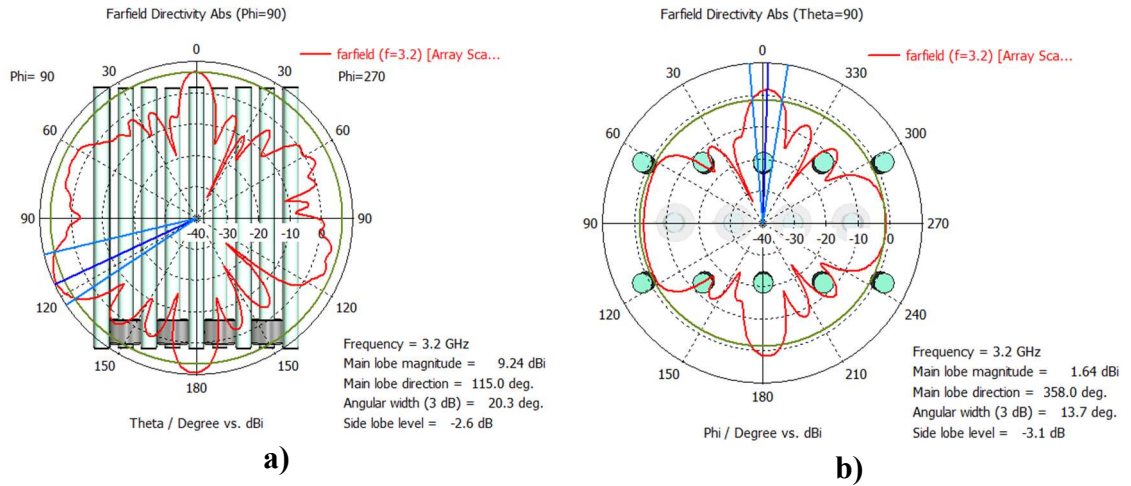
4.4. 4 Elemanlı Dizi ve 5 Yansıtıcı Matris Yapısı Benzetimleri

Tez çalışmasının nihai hedefi olarak matris yapılı bir anten dizisi elde etmek için ilk olarak, 4 Elemanlı anten dizisinin iki yanında 5 yansıtıcı elemandan oluşan ilk matris dizilimli yapı elde edilmiştir. Yapının 3 boyutlu genel görünümü ve yerleşimi Şekil 4.17. ile verilmiştir.



Şekil 4.17. 4 Elemanlı 5 Yansıtıcı Yerleşim

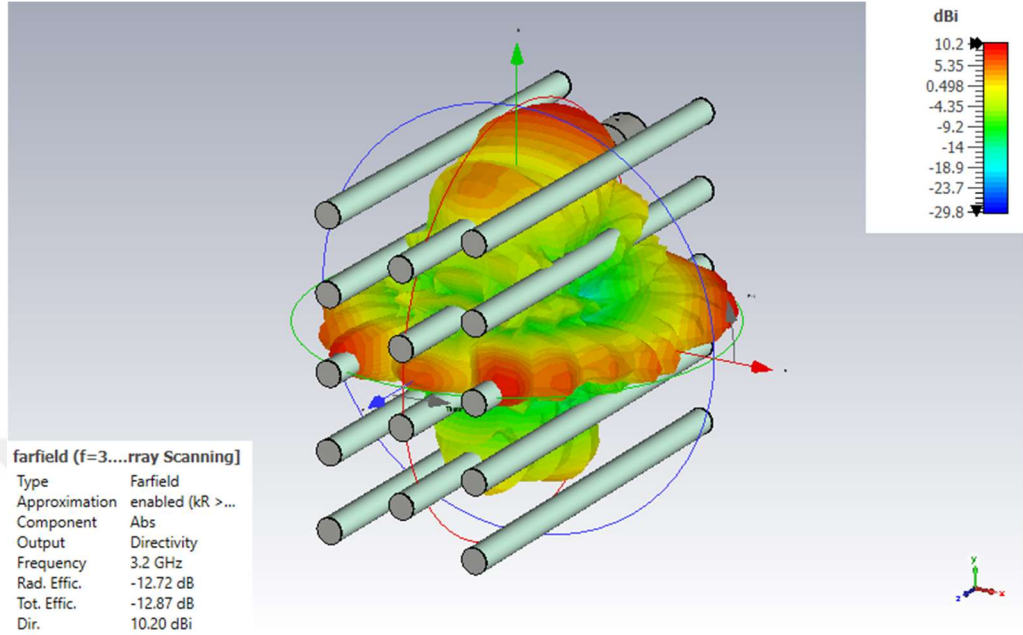
Şekil 4.17. incelendiğinde, merkezde yerleşmiş bulunan 4 elemanlı dizinin, dizilim yönüne göre sağ ve sol yanına sıra halinde yansıtıcılar yerleştirilmiştir. Yansıtıcı dizileri, merkez diziye $\lambda/2$ ve elemanlar arası da yine aynı uzaklığa sahiptir. Bu aşamadan sonra bu dizi için 4x5 kodu kullanılacaktır.



Şekil 4.18. 4x5 Yansıtıcılar Pasif 2 Boyutlu Benzetim

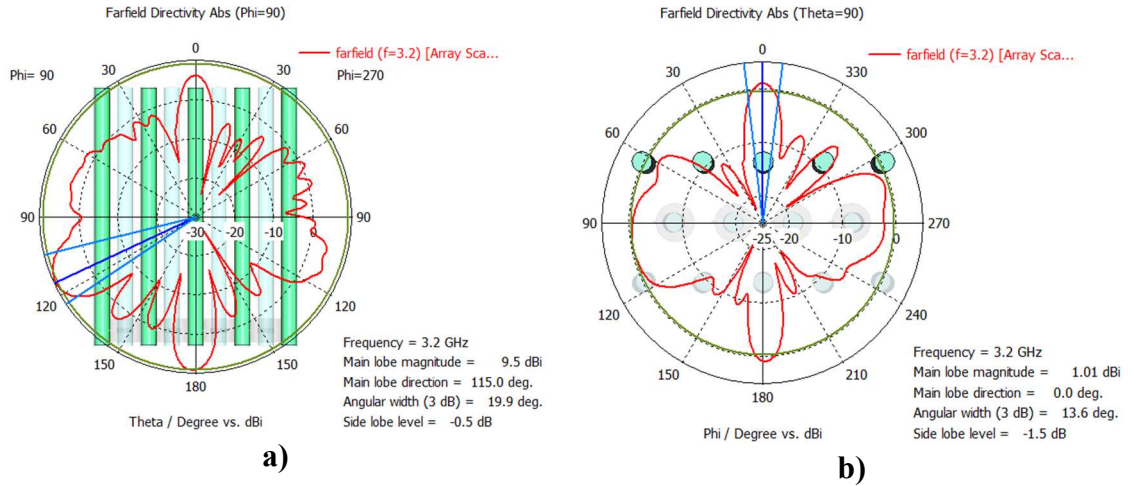
Şekil 4.18. ile 4x5 kodlu dizinin 2 boyutlu örüntü sonuçları verilmiştir. Yansıtıcılar floresan tüplerin kapalı konumda yani plazmanın pasif/deiyonize

durumdadır. İlgili benzetim sonuçları 4 elemanlı dizi ile karşılaştırıldığında, yönlülük değerlerinde theta düzlemi için 4, phi düzlemi için 1.5 dB civarında bir zayıflama mevcuttur.



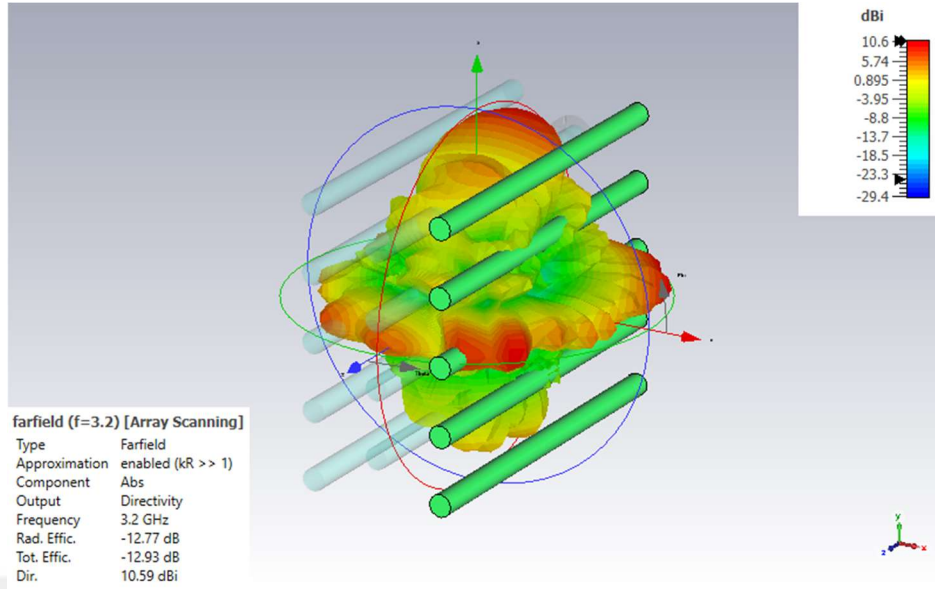
Şekil 4.19. 4x5 3 Boyutlu Benzetim Sonuçları- Pasif

Şekil 4.19., 4x5 dizisinin, yansıtıcıların pasif olduğu durumdaki 3 boyutlu örüntü karakteristiğini göstermektedir. Görüleceği üzere, her iki yönde de ışına benzer özellikler göstererek, simetri taşımaktadır.



Şekil 4.20. 4x5 Yansıtıcılar Aktif 2 Boyutlu Benzetim

Şekil 4.20. ile 4x5 dizisinde yansıtıcı dizilerinden 1 tanesinin aktif olduğu durum için 2 boyutlu örüntüler verilmiştir. Grafiklerde, görüleceği üzere yönlülük ve örüntünün genel şekli, pasif duruma göre büyük bir değişiklik göstermemiştir. Yine Şekil 4.21.'de verilen 4x5 Aktif durumu için 3 Boyutlu örüntüde, pasif durumdaki plazma tüpleri yeşil renk ile belirtilmiştir.

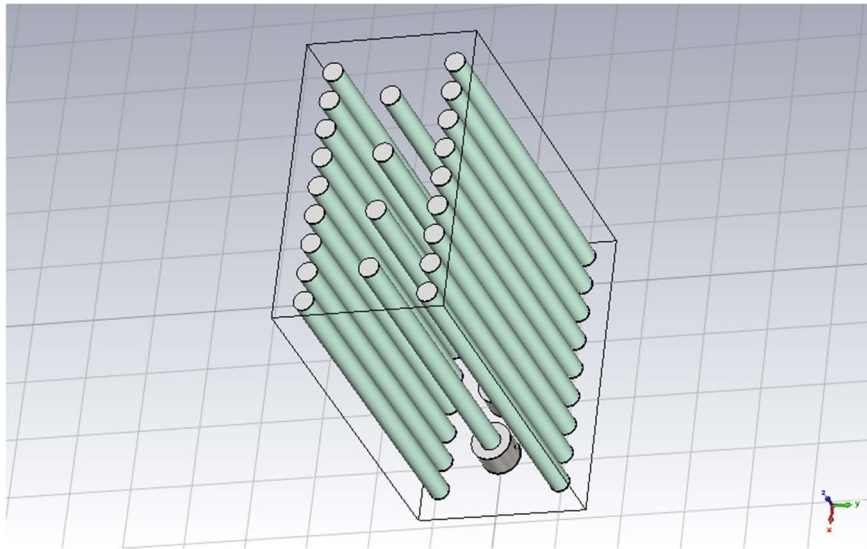


Şekil 4.21. 4x5 3 Boyutlu Benzetim Sonuçları- Aktif

Yansıtıcı dizilerden birisinin aktif hale getirilmesi, hedeflenen örüntü kontrolü için yeterli başarıya ulaşamamıştır. Bu nedenle bir sonraki aşama olarak 4x9 isimli dizi benzetimleri yapılmıştır.

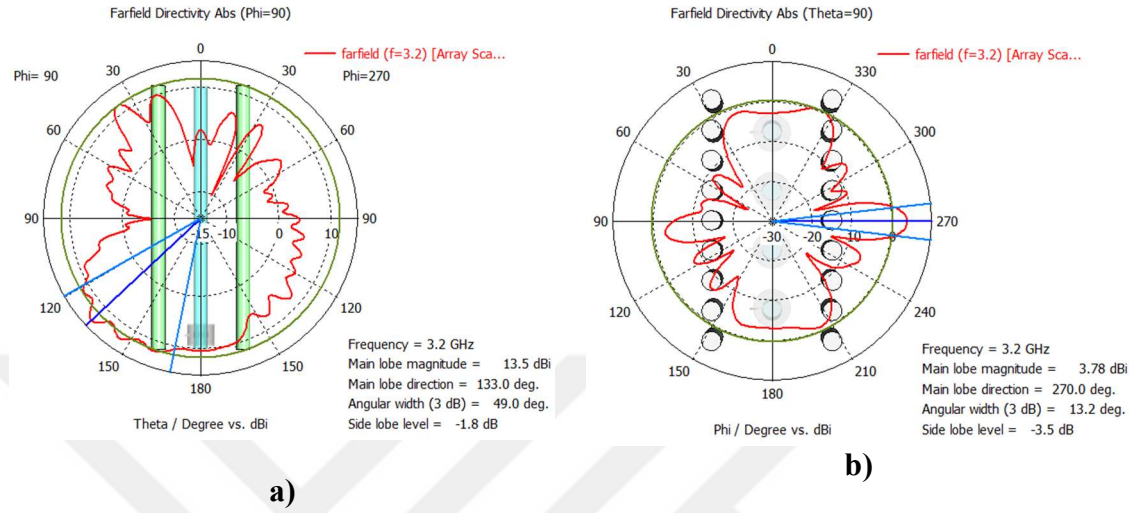
4.5. 4 Elemanlı Dizi ve 9 Yansıtıcılı Matris Yapısı Benzetimleri

4x5 kodlu dizide istenen başarının elde edilememesi sonucunda, yansıtıcı plazma tüplerinin, kendi aralarındaki mesafeyi arasında $\lambda/4$ yani yaklaşık 4.7 cm'e indirerek, neredeyse bir duvar halinde kullanımına karar verilmiştir. İlgili yapı son durumda, merkezinde 4 elemanlı plazma anten dizisi ve iki yanında 9 elemandan oluşan plazma yansıtıcı dizisi ile toplam 22 elemanlı bir matris yapıları dizi halini almıştır.



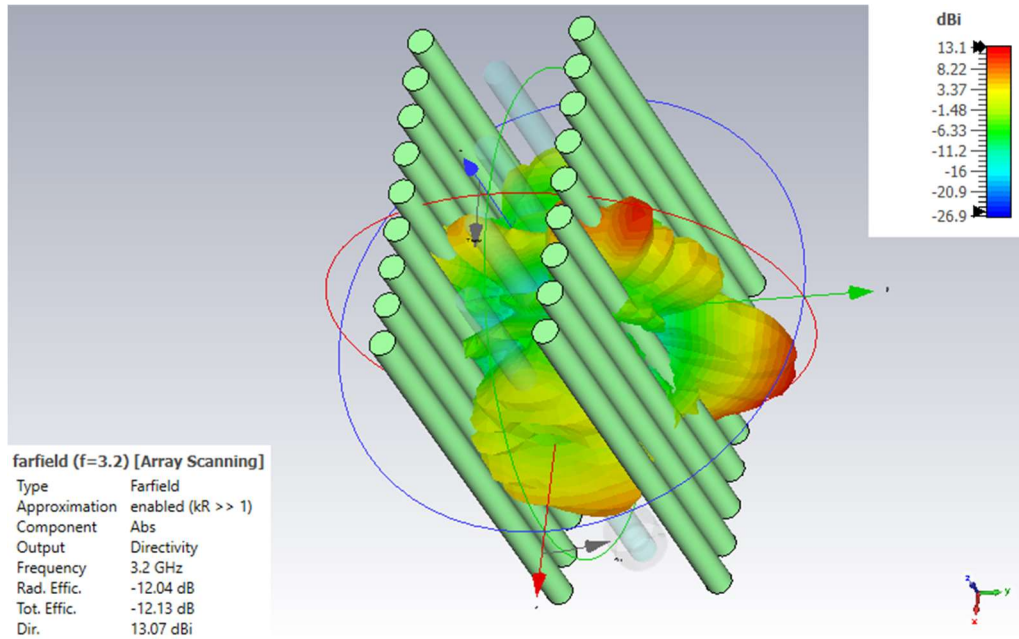
Şekil 4.22. 4 Elemanlı 9 Yansıtıcılı Yerleşim

Verilen şekilde görüleceği üzere, toplamda 22 elemandan oluşan dizinin, yansıtıcı elemanları neredeyse bir duvar gibi, aktif elemanların iki yanında bulunmaktadır. Bu yerleşim ile aktif hale getirilen yansıtıcı dizi yönünde örüntünün susturulması diğer yönde ise kuvvetlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu diziye buradan itibaren 4x9 kodu verilmiştir.



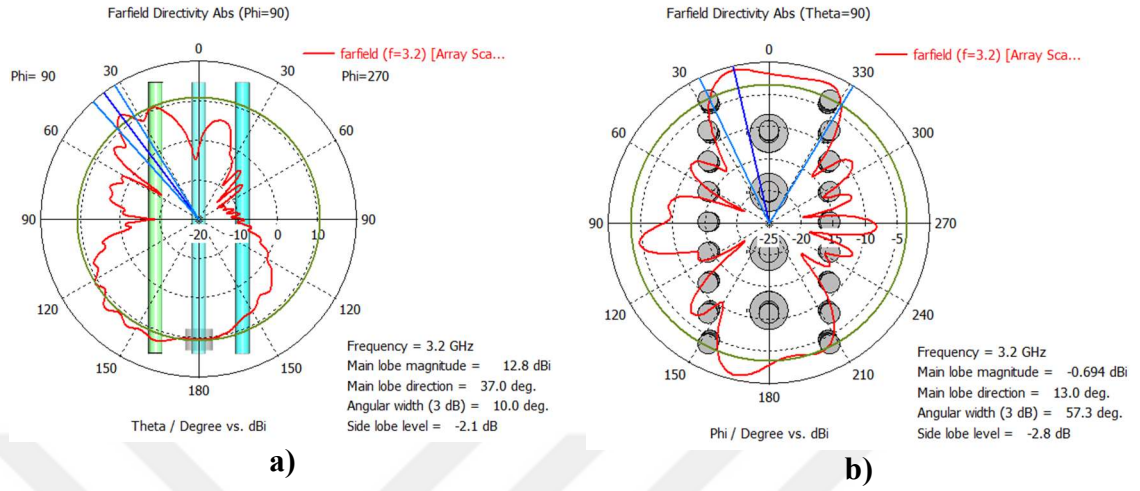
Şekil 4.23. 4x9 Yansıtıcılar Pasif 2 Boyutlu Benzetim

Şekil 4. 23., 4x9 dizisi için, yansıtıcıların pasif olduğu duruma ait theta ve phi düzlemindeki 2 boyutlu yönlülük örüntülerini göstermektedir. Theta yönünde yine monopul ve 4 elemanlı dizi anten davranışına benzer bir örüntü şekli olmak ile birlikte, phi yönünde dizi ile uyumlu sonuçlar göstermiştir. Theta'ya bağlı yönlülükte maksimum 13.5 dBi, phi'ye bağlı yönlülükte ise 3.78 dBi maksimum yönlülüğe sahiptir.



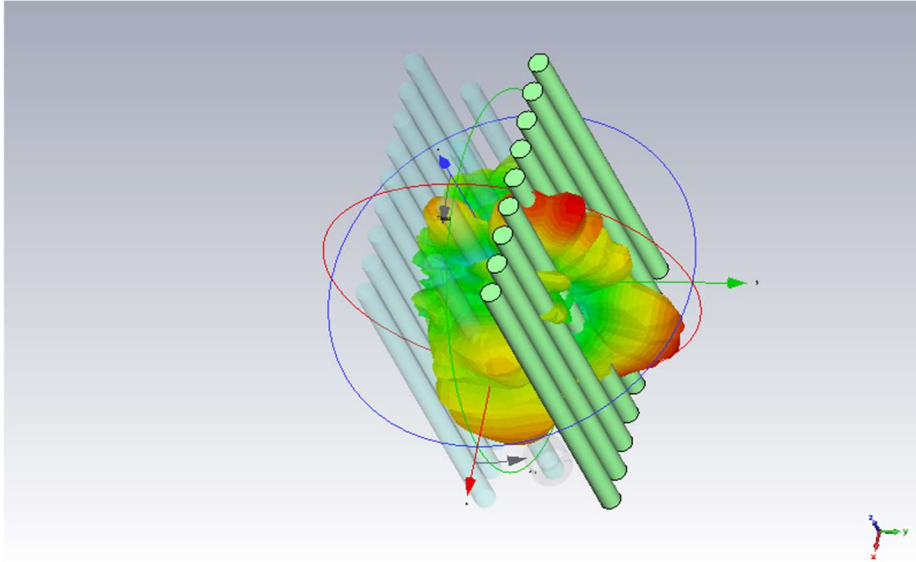
Şekil 4.24. 4x9 3 Boyutlu Benzetim Sonuçları – Pasif

Şekil 4.24. ile verilen 3 Boyutlu örüntü grafiğinde, yeşil renk ile pasif plazma tüpler temsil edilmektedir. Görüleceği üzere örüntü 4x5 e benzer şekilde simetrik bir yayılım göstermektedir.



Şekil 4.25. 4x9 Yansıtıcılar Aktif 2 Boyutlu Benzetim

Şekil 4.25. ile yansıtıcı dizilerin aktif olduğu durumdaki 2 boyutlu yönlülük örüntüleri verilmiştir. Pasif olan bölgedeki plazmalar yeşil, aktif olanlar ise merkez dizi elemanları ile aynı renkte turkuaz olarak gösterilmiştir. Pasif durum ile kıyaslandığında, theta düzleminde ana huzme genişliği daralmış ve maksimum yönlülük yaklaşık 0.7 dB zayıflamıştır. Phi düzleminde ise maksimum yönlülük yönü pasif durumda, pasif dizi yönünde iken aktif yansıtıcı durumunda yaklaşık 90 derece kayarak dizi yerleşim yönünde olmuştur. Ve maksimum yönlülük yaklaşık 4 dB zayıflatılmıştır.



Şekil 4.26. 4x9 3 Boyutlu Benzetim Sonuçları – Aktif

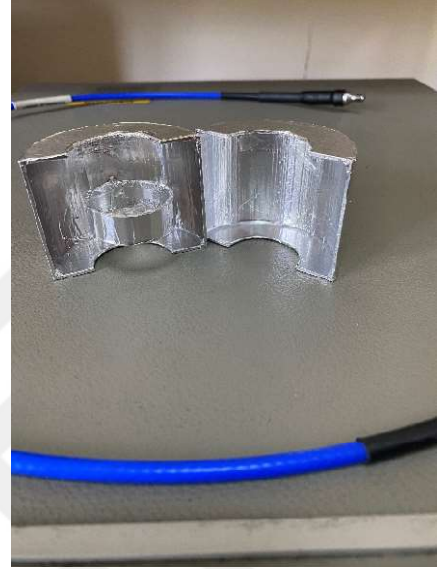
Aktif yansıtıcı 4x9 dizisi için 3 boyutlu benzetim sonuçları Şekil 4.26. için verilmiştir. Şekilde yeşil renkler pasif plazmaları temsil etmektedir. Görüleceği üzere aktif yansıtıcıların olduğu yönde örüntü oldukça bastırılmıştır.

4.6. Bağdaştırıcı Tasarımı ve Benzetim

Benzetimi yapılan bağdaştırıcı 3 Boyutlu yazıcı ile üretilerek, iletken bant ile kaplanmıştır. Bağdaştırıcının üretim aşamaları Şekil 4.27 ile verilmiştir.



a)



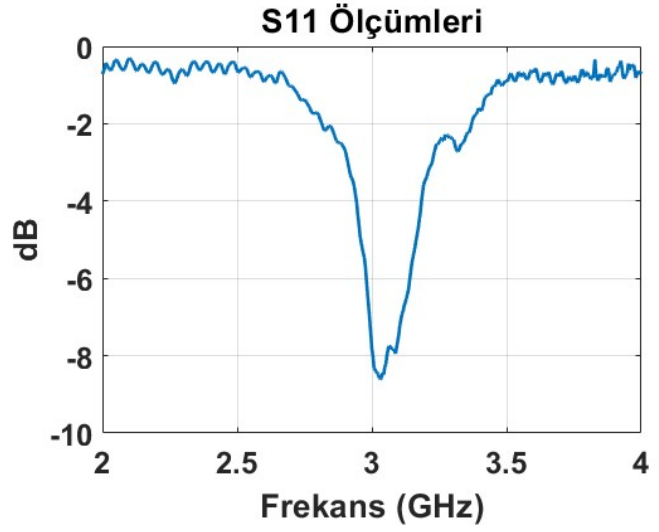
b)

Şekil 4.27. Bağdaştırıcı Üretimi

Üretilen bağdaştırıcının vektör network analizör ile S_{11} parametresi ölçülmüştür. Ölçüm sonucu ve ölçüm fotoğrafı Şekil 4.28. ile verilmiştir. Grafikten görüleceği üzere, bağdaştırıcı beklendiği gibi 3 GHz'de rezonans özelliği göstermiştir. Benzetimde yaklaşık -4dB olan minimum değeri, ölçümde -8dB civarında gerçekleşmiştir. Ancak bağdaştırıcı çalışma karakteristiği içine yerleştirilen plazma tüp ile ortaya çıktığı için bu aşamada sonuç olumlu bulunmuştur.



a)



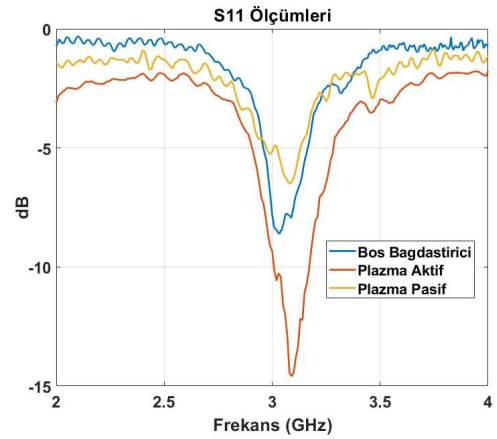
b)

Şekil 4.28. Bağdaştırıcı S11 Ölçümleri

Sıradaki adım olarak, bağdaştırıcının içerisine plazma tüp yerleştirilerek, önce pasif durumda sonrasında ise aktif durumda ölçümler alınmıştır. Aktif durumda, plazma tüpün bir manyetik balast aracılığı ile aktif tutulmasından kaynaklı dalgalanmaları engellemek için 100 adet ölçümün ortalaması alınarak elde edilen sonuç kullanılmıştır. İlgili adıma ait fotoğraf ve grafik Şekil 4.29. ile verilmiştir.



a)



b)

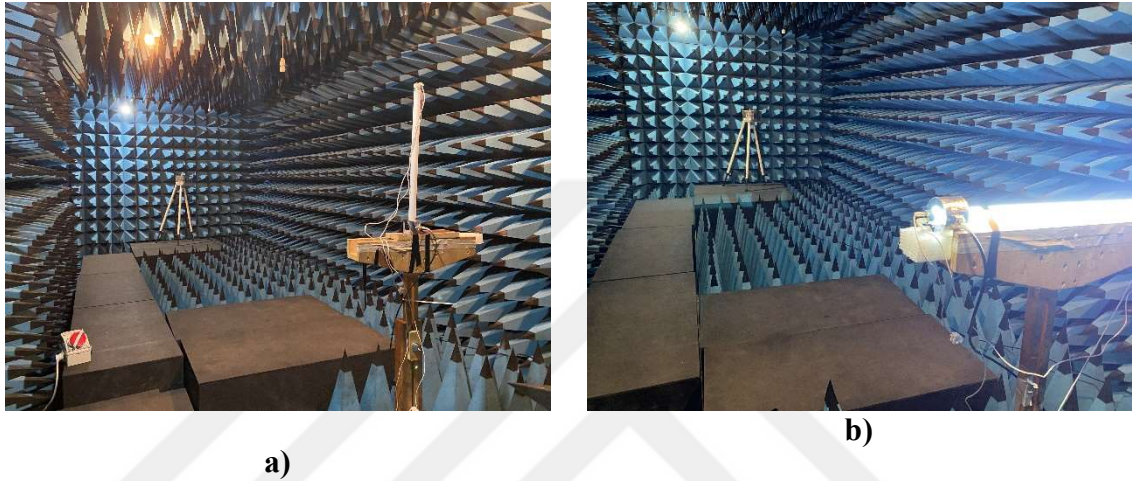
Şekil 4.29. Bağdaştırıcı ve Plazma Tüp Ölçümü

Şekil 4.29.b. ile verilen grafikte, bağdaştırıcının boş, pasif plazma ve aktif plazma durumlarında çalışma karakteristiği gösterilmiştir. Pasif plazma durumunda boş duruma göre, rezonans frekansı 3.1 GHz iken -6dB seviyelerinde gerçekleşmiştir. Aktif plazma durumunda ise, 3.1 GHz'de yaklaşık -15 dB civarında bir değer ile tasarımda ön görülen bant genişliği aralığında anten olarak çalışabilir bir yapı elde edilmiştir. Elde

edilen aktif durumdaki S_{11} sonucu, monopol antenin çalışma karakteristiğini göstermektedir. Bu aşamadaki başarı neticesinde, anten ölçümlerine geçilmiştir.

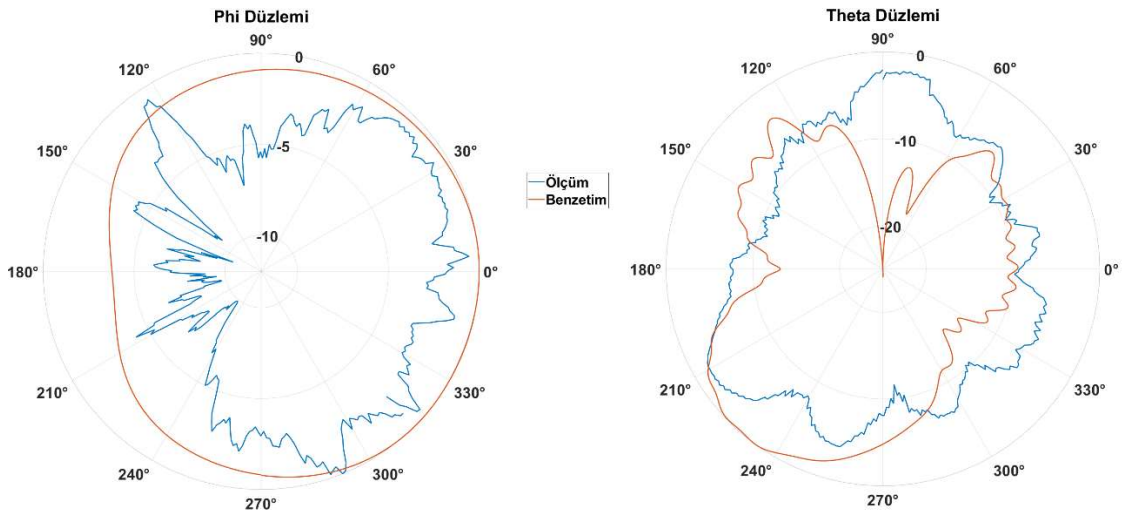
4.7. Monopol Anten Ölçümü

Plazma tüpün bağdaştırıcı ile doğru bir şekilde çalıştığı belirlendikten sonra monopol antenin, anten parametrelerinin ölçümü aşaması bu adımda yapılmıştır. Anten örüntüsü ölçümleri, EMUMAM laboratuvarları bünyesindeki, tam yansız odada yapılmıştır. Anten örüntüsü ölçümlerine ait fotoğraflar Şekil 4.30. ile verilmiştir.



Şekil 4.30. Monopol Plazma Anten Örüntü Ölçümleri

Monopol plazma antenin ölçümlerine ait yönlülük örüntüleri 2 boyutlu olarak Şekil 4.31 ile verilmiştir. Verilen örüntüler normalize değerler ile çizdirilmiştir.



Şekil 4.31. Monopol Anten Ölçüm Sonuçları

Monopol anten ölçüm sonuçları, benzetim sonuçları beraber incelendiğinde, phi düzleminde örüntünün genel olarak benzetim sonuçları ile tutarlı olduğu görülmektedir.

Bu düzlemde, bağdaştırıcının besleme yönünde bir miktar bastırılmış bir klasik monopol davranışı gösterdiği görülmektedir. Theta düzleminde ise 90 derece yönünde benzetimdeki çöküntü oluşmamıştır. Bunun sebebinin bağdaştırıcı üretimindeki beklenmeyen hatalar kaynaklı olduğu kanısına varılmıştır. Karakteristik olarak, iki sonuçta yaklaşık 240 derece yönünde hakim yönlülüğe sahiptir.

4.8. 4 Elemanlı Anten Dizisi Ölçümü

Monopol anten ölçümünde istenen sonuçlar elde edildiği için, 4 elemanlı dizi anten ölçümü aşamasına geçilmiştir. 4 Elemanlı antenin üretimi ve montajı Şekil 4.32.a ile gösterilmiştir. Montaj aşamasında antenlerin birbirine olan mesafesini korumak için strafor kılavuz hazırlanmıştır. Antenler sonrasında RF güç bölücüler ile beslenmiştir. Ölçüm sistemi ise Şekil 4.32. b ile verilmiştir.



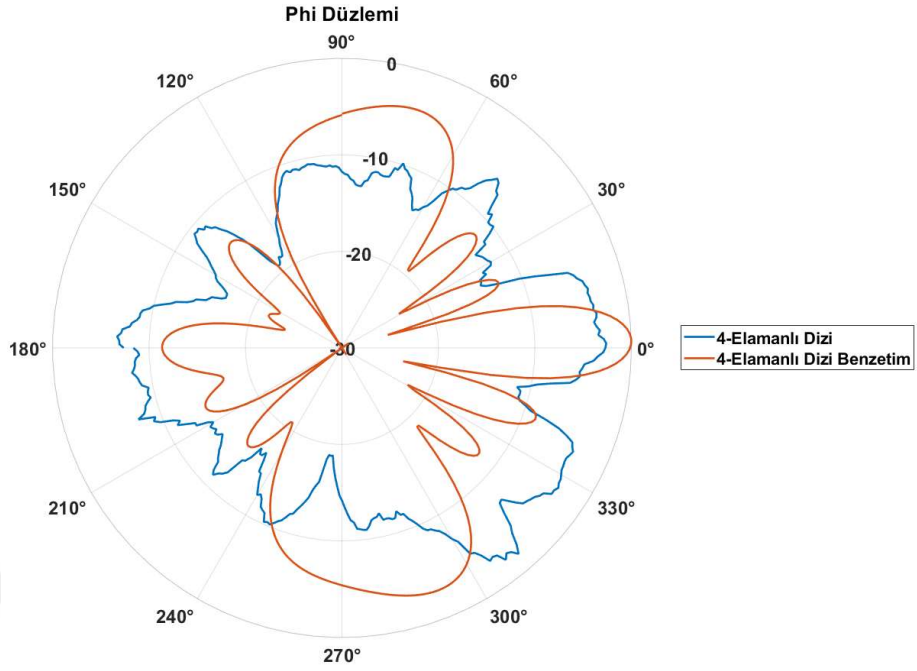
a)



b)

Şekil 4.32. 4 Elemanlı Anten Dizisi Ölçümleri

Gerçekleştirilen ölçümler sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 4.33. ile verilmiştir. Ölçüm sistemindeki zorluklar nedeni ile antenin sadece phi düzleminde örüntüsü ölçülmüştür. Normalize olarak verilen sonuçlar incelendiğinde, benzetim sonuçlarına uygun olarak en yüksek yönlülük değeri 0 derece yönünde elde edilmiştir. Ancak 90 ve 270 derecelerde yan kulakçıklar ölçümlerde, benzetimdeki kadar yüksek değerlere ulaşamamıştır.



Şekil 4.33. 4 Elemanlı Plazma Anten Dizisi Ölçümü

4.9. 4 Elemanlı 9 Yansıtıcı Anten Dizisi Ölçümleri

4x9 koduna sahip anten dizisinin ölçümleri önceki adımlarda açıklandığı gibi yapılmıştır. Anten dizisinin elemanlarının birbirlerine olan mesafelerini sabit tutmak için strafor bir kılavuz oluşturulmuştur. Sonrasında bir ahşap kaide üzerine oturtularak ölçümler yapılmıştır. Anten dizisinin montajına ait fotoğraflar Şekil 4.34. ile verilmiştir.



a)



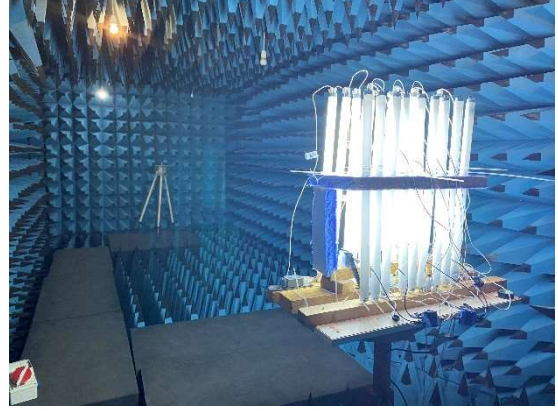
b)

Şekil 4.34. 4x9 Anten Dizisi Üretimi

Anten örüntüleri için sırasıyla, tüm yansıtıcılar pasif ve benzetimlerdeki gibi referans yönde yerleştirilmiş bulunan yansıtıcılar aktif olacak şekilde iki ölçüm yapılmıştır. İlgili ölçümlere ait fotoğraflar Şekil 4.35.'de verilmiştir.



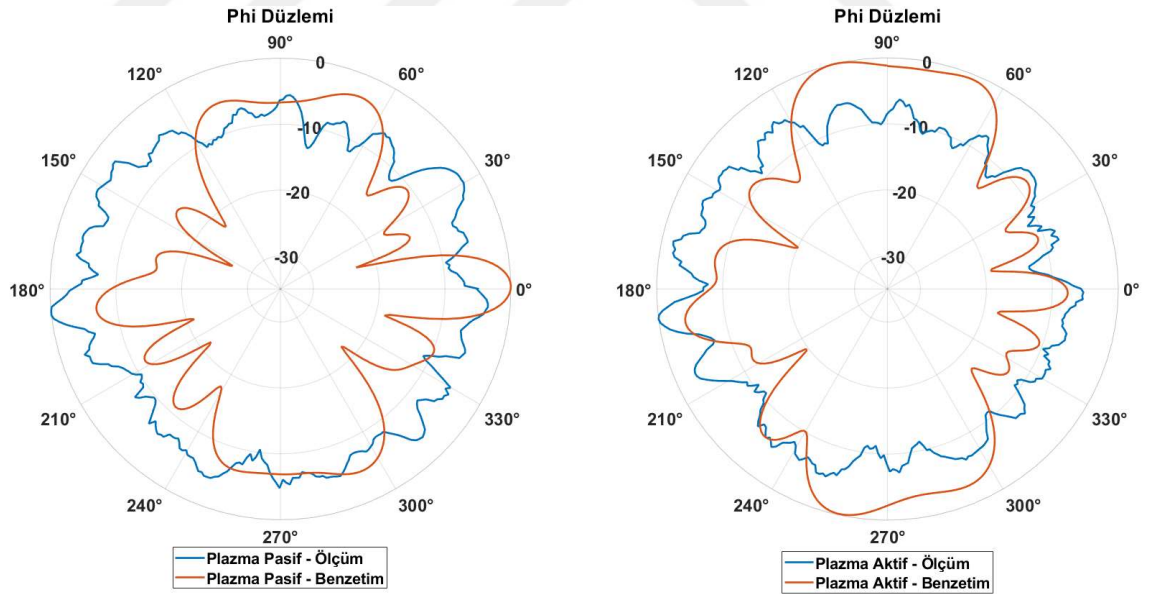
a)



b)

Şekil 4.35. 4x9 Anten Dizisi Ölçümleri

Ölçümler sonucunda elde edilen veriler, birlikte değerlendirebilmek için tek bir grafik üzerinde çizdirilerek Şekil 4.36. ile sunulmuştur. Ölçüm sonuçları normalize şekilde verilerek örüntülerin karşılaştırılması sağlanmıştır.



Şekil 4.36. 4x9 Anten Dizisi Ölçüm Sonuçları

Şekil 4.36. incelendiğinde, yansıtıcıların pasif olduğu durumda, örüntünün 35 ve 315 derecelerde huzmeleri olduğu görülmektedir. Bu yönde yerleştirilmiş olan yansıtıcı dizisi aktif hale getirilerek tekrar ölçüm yapıldığında ilgili huzmelerin maksimum değerlerinin ortalama 5dB, yer yer 10 dB seviyesinde zayıflatıldığı görülmüştür. Bu sonuç ile, tez çalışmasında hedeflenen matris yapılı bir anten dizisi elde edilmiş,

yansıtıcı plazma elemanlar ile istenmeyen kulakçıkları ortadan kaldırılarak örüntü kontrolü sağlanmıştır. İlerleyen çalışmalarda yansıtıcı plazma elemanlarının çeşitli kombinasyonlar ile aktif ve pasif duruma getirilerek örüntünün daha hassas kontrolü sağlanmaya çalışılacaktır.

Elde edilen benzetim ve ölçüm sonuçlarına ait kazanç değerleri Çizelge 4.1. ile verilmiştir. Monopol anten için, phi düzlemi ölçümleri benzetim ile tutarlıdır. Theta düzleminde beklenenden düşük bir kazanç elde edilmiştir. Bunda bağdaştırıcının yerleşiminin etkili olduğu ancak bu sonucun çok büyük olmadığı görülmüştür. Benzetim sonuçları irdelendiğinde, plazma susturucuların dizi kazancını yaklaşık 5 dB düşürdüğü görülmüştür. Bu durum ölçümde bu kadar bariz şekilde kendini göstermese de yan kulakçıkları bastırarak susturucunun görevini yaptığı gösterilmiştir. Ayrıca benzetimde huzme yönü anten 0 derece yönünde iken, gerçek ölçümlerde, beslemelerin de bulunduğu 180 derece yönüne daha yakın olarak elde edilmesi, besleme mekanizması ve bağdaştırıcıların iyileştirilmesi gerektiğini göstermiştir.

Çizelge 4.1. Anten tasarımların ait yönlülük ve kazanç değerleri

Tasarım	Benzetim En Yüksek Kazanç	Ölçüm En Yüksek Kazanç
Monopol	-13 dBi @33° Phi Düzlemi -4.16 dBi @233° Theta Düzlemi	-16 dBi@4° Phi Düzlemi -9.6 dBi @210° Theta Düzlemi
4'lü Dizi	-8.62 dBi @1° Phi Düzlemi	-9.65 dBi @306° Phi Düzlemi
4x9 Dizi Pasif	-8.25 dBi @0° Phi Düzlemi	-18 dBi@188° Phi Düzlemi
4x9 Dizi Aktif	-13.5 dBi @17° Phi Düzlemi	-17.3 dBi@187° Phi Düzlemi

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışması ile maddenin dördüncü hali olarak bilinen plazma kullanılarak anten ve anten dizisi elde edilmiştir. Plazma tüpü olarak ticari olarak kullanılan floresan aydınlatma tüpleri kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda plazma antenlerin RF beslemeleri için vazgeçilmez olan bağdaştırıcı yapıları incelenmiş, tasarımı yapılmıştır. Bağdaştırıcının boyut ve plazma tüp üzerindeki konumunun, elde edilen çubuk anten çalışma karakteristiği üzerine etkileri benzetim programı aracılığı ile incelenmiştir.

Bağdaştırıcıya ait parametrelerin hedeflenen amaçlar doğrultusunda seçilmesinin ardından, plazmaya ait parametreler irdelenerek plazma parametrelerinin çalışma karakteristiği üzerine etkileri sunulmuştur. Bağdaştırıcı ve plazma parametrelerinin optimum noktasındaki kombinasyon elde edilmesi istenen anten dizisinin temel elemanı olarak seçilmiştir.

Temel plazma çubuk anten, maksimum 6.9 dBi yönlülüğe ve 40 derecelik yarı güç örüntü genişliğine sahip olarak elde edilmiştir. Çubuk anten, çevresine aktif plazma tüpleri eklenerek örüntü değiştirilmesi hedeflenmiştir. Yapılan benzetimde, 4 adet susturucu plazma, çubuk antenin etrafına $\lambda/4$ uzaklıkta, 90 derecelik açılarla yerleştirilmiştir. Bu tasarım ile, örüntü önemli oranda bastırılmış, ana huzmenin yönlülüğü 7 dBi seviyesine çıkarılmıştır.

Çubuk anten ile 4 elemanlı bir lineer anten dizisi tasarlanmıştır. Dizi elemanları birbirlerine $\lambda/4$ uzaklıkta olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu dizi benzetime tabii tutulmuş ve yüksek değerli bir yönlülük değeri elde edilmiştir. Dizi antenlerin klasik çalışma prensibi gereği, huzme daha yönlü ve dar bir hale gelmiştir.

4 elemanlı anten dizisinin etrafına susturucu plazma tüpleri ilk olarak birbirlerine $\lambda/4$ uzaklıkta olacak şekilde yerleştirilerek, matris diziliimli bir anten dizisi elde edilmiştir. Susturucu plazma tüpler, pasif durumda iken, neredeyse transparan olarak çalışmış ve anten dizisinin örüntüsüne etkisi önemsiz düzeyde olmuştur. Susturucu yapılardan bir yöndeki sütun sırası aktif hale getirilerek benzetim tekrarlanmıştır. Bu benzetim sonucunda beklendiği üzere, örüntü şekli değiştirilmiş ancak minimal düzeylerde kalmıştır.

4 elemanlı anten dizisinin etrafına yerleştirilen susturucuların sayısı arttırılarak aralarındaki mesafe küçültülerek önceki çalışma tekrarlanmıştır. Plazma tüpler pasif durumda iken, yine önceki aşamaya benzer şekilde anten dizisinin örüntüsü üzerine etkisi olmamıştır. Susturucu sütunlarından bir tanesi aktif hale getirildiğinde, neredeyse iletken bir yansıtıcı yüzey haline gelerek, anten örüntüsünün diğer yönde yoğunlaşmasını sağlamıştır ve yan huzmeleri bastırmıştır.

Tez çalışması boyunca, plazma tüplerinin anten olarak kullanılması, bu antenlerin dizi olarak kullanılması ve dizi plazma antenler ile susturucu plazma tüplerinden oluşan matris yapılı nihai anten dizisinin oluşturulması ile tezin hedeflerine ulaşılmıştır. İlerleyen çalışmalarda, farklı boyutlarda plazma tüpleri, farklı özelliklerde plazmaların kullanıldığı veya ikisinin bir arada kullanıldığı çalışmaların yapılması planlanmıştır.

6. KAYNAKLAR

- Alexeff, I., Anderson, T., Parameswaran, S., Pradeep, E.P., Hulloli, J. and Hulloli, P. 2006. Experimental and theoretical results with plasma antennas. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 34 (2): 166-172.
- Anderson, T. 2019. Antenna Beam Focusing and Steering with Refraction Through a Plasma, 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2019), Krakow, Polonya.
- Armaki, F.S.M. and Armaki, S.a.M. 2019. Design and fabrication of plasma yagi-uda array antenna with beamforming. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 47 (5): 2567-2570.
- Baillet, P., Chang, J.-S., Claude, A., Hobson, R.M., Ogram, G.L. and Yau, A.W. 1981. Effective collision frequency of electrons in noble gases. *J. Phys. B: At. Mol. Phys*, 14: 1485-1495.
- Barro, O.A., Himdi, M. and Lafond, O. 2016. Reconfigurable patch antenna radiations using plasma faraday shield effect. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 15: 726-729.
- Barro, O.A., Himdi, M. and Lafond, O. 2017. Performances of Monopole Plasma Antenna, 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Paris, Fransa.
- Barro, O.A., Himdi, M. and Lafond, O. 2018. Reconfigurable cylindrical plasma antenna. *Progress In Electromagnetics Research M*, 66: 65-72.
- Bogachev, N.N., Gusein-Zade, N.G. and Nefedov, V.I. 2019. Radiation pattern and radiation spectrum of the plasma asymmetrical dipole antenna. *Plasma Physics Reports*, 45 (4): 372-375.
- Borg, G.G., Miljak, D.G. and Martin, N.M. 1999. Application of plasma columns to radiofrequency antennas. *Applied Physics Letters*, 74 (22): 3272-3274.
- Borg, G.G., Harris, J.H., Martin, N.M., Thorncraft, D., Milliken, R., Miljak, D.G., Kwan, B., Ng, T. and Kircher, J. 2000. Plasmas as antennas: Theory, experiment and applications. *Physics of Plasmas*, 7 (5): 2198-2202.
- Cheng, D.K. 1989. Field and wave electromagnetics. Addison-Wesley, New York, Amerika Birleşik Devletleri.
- Cheng, D.K. 2009. Mühendislik elektromanyetiğinin temelleri. Palme Yayıncılık, Ankara, s.
- Dwyer, T.J., Greig, J.R., Murphy, D.P., Perin, J.M., Pechacek, R.E. and Raleigh, M. 1984. On the feasibility of using an atmospheric discharge plasma as an rf antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 32 (2): 141-146.

- Elghazaly, M.H., Solyman, S. and Abdel Baky, A.M. 2007. Study of some basic transport coefficients in noble-gas discharge plasmas. *Egypt. J. Solids*, 30 (1).
- Ghaderi, M. and Moradi, G. 2018a. Numerical analysis of a tunable magnetized plasma loop antenna. *IEICE Transactions on Communications*, E101.B (4): 1055-1060.
- Ghaderi, M. and Moradi, G. 2018b. Von neumann stability analysis of the fdtd method applied to non-magnetised plasma antennas. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 12 (6): 885-889.
- Golazari, S.S., Amiri, N. and Kashani, F.H. 2018. Study on the material of the inside ring coupler in a loop plasma antenna with circular coupler. *Signal Processing and Renewable Energy*, 2 (1):
- Hadaegh, M. and Mohajeri, F. 2021. Advantages and disadvantages of different coupling methods of plasma antennas. 10.21203/rs.3.rs-720496/v1:
- He, T., Zhang, X.W., Pan, W.Y. and Li, K. 2019. Current distribution and input impedance of a vlf linear antenna in an anisotropic plasma. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 67 (3): 1519-1526.
- İnan, U.S. and Gelkowski, M. 2011. Principles of plasma physics for engineers and scientists. Cambridge University Press, s.
- Ja'afar, H., Abdullah, R., Redzwan, F.N.M. and Sadeghikia, F. 2018. Analysis of Cylindrical Monopole Plasma Antenna Design, International Symposium on Antennas and Propagation, Busan, Kore.
- Jenn, D.C. 2003. Plasma Antennas: Survey of Techniques and the Current State of the Art, Naval Postgraduate School.
- Jusoh, M.T., Lafond, O., Colombel, F. and Himdi, M. 2013. Performance and radiation patterns of a reconfigurable plasma corner-reflector antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12: 1137-1140.
- Jusoh, T.M.T. 2014. Study and design of reconfigurable antennas using plasma medium. Université Rennes 1, Fransa.
- Jusoh, M.T., Himdi, M., Lafond, O. and Colombel, F. 2018. Reconfigurable antenna using plasma reflector, International Conference on Engineering and Technology (IntCET 2017). Putrajaya, Malezya.
- Jusoh, M.T., Himdi, M., Lafond, O. and Colombel, F. 2019. Plasma antenna design for RCS reduction, 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2019). Krakow, Polonya.
- Kallel, A., Sokoloff, J. and Callegari, T. 2014. Leaky-wave plasma antenna with tunable radiation angle. *Microwave and Optical Technology Letters*, 56 (11): 2601-2604.

- Kamboj, G.K., Yadav, R.P. and Kaler, R.S. 2021. Development of reconfigurable plasma column antenna. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 49 (2): 656-662.
- Kang, W.L., Rader, M. and Alexeff, I. 1995. A microwave plasma closing switch and stealth plasma antennas, IEEE International Conference on Plasma Science, Madison, WI, USA.
- Kang, W.L., Rader, M. and Alexeff, I. 1996. A microwave plasma closing switch and stealth plasma antennas, IEEE International Conference on Plasma Science, Boston, MA, USA.
- Kumar, P. and Kumar, R. 2018a. Study of monopole plasma antenna parameters. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 56: 238-247.
- Kumar, R. and Kumar, P. 2018b. Study of array plasma antenna parameters. *AIP Advances*, 8 (4):
- Langmuir, I. 1929. The interaction of electron and positive ion space charges in cathode sheaths. *Physical Review*, 33 (6): 954-989.
- Lister, G.G., Lawler, J.E., Lapatovich, W.P. and Godyak, V.A. 2004. The physics of discharge lamps. *REVIEWS OF MODERN PHYSICS*, 76: 541-598.
- Liu, S., Barker, R.J., Yan, Y. and Dajun, Z. 2000a. Basic theoretical formulation of plasma microwave electronics—part ii: Kinetic theory of electron beam-wave interactions. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28 (6): 2152-2165.
- Liu, S., Barker, R.J., Zhu, D., Yan, Y. and Gao, H. 2000b. Basic theoretical formulations of plasma microwave electronics. I. A fluid model analysis of electron beam-wave interactions. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 28 (6): 2135-2151.
- Liu, Y. and Hou, Z. 2019. Diagnostics of plasma electron density and collision frequency of fluorescent lamp using microwave transmission diagnostics. *Journal of Physics: Conference Series*, 1324.
- Malhat, H.a.E.-A., Badawy, M.M., Zainud-Deen, S.H. and Awadalla, K.H. 2015. Dual-mode plasma reflectarray/ transmitarray antennas. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43 (10): 3582-3589.
- Melazzi, D., De Carlo, P., Trezzolani, F., Manente, M., Capobianco, A.D. and Boscolo, S. 2018. Beam-forming capabilities of a plasma circular reflector antenna. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 12 (15): 2301-2306.
- Moisan, M., Shivarova, A. and Trivelpie, A.W. 1982. Experimental investigations of the propagation of surface waves along a plasma column. *Plasma Physics*, 24 (11): 1331-1400.
- Papadimopoulos, A. and Di Iorio, A. 2022. Plasma monopole antenna array. *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 41 (4): 1195-1204.

- Podolsky, V., Semnani, A. and Macheret, S.O. 2020. Experimental and numerical studies of a tunable plasma antenna sustained by rf power. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 48 (10): 3524-3534.
- Rayner, J.P., Whichello, A.P. and Cheetham, A.D. 2004. Physical characteristics of plasma antennas. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 32 (1): 269-281.
- Sadeghikia, F., Dorbin, M.R., Horestani, A.K., Noghani, M.T. and Ja'afar, H. 2019. Tunable inverted-f antenna using plasma technologies. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18 (4): 702-706.
- Schelkunoff, S.A. 1959. Anatomy of "surface waves". *IRE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, 7 (5): 133-139.
- Siahpoush, V. and Shokri, B. 2016. Change of radiation pattern in a plasma monopole antenna. *Waves in Random and Complex Media*, 26 (3): 328-338.
- Tonks, L. and Langmuir, I. 1929. Oscillations in ionized gases. *Physical Review*, 33 (2): 195-210.
- Vyas, H. and Chaudhury, B. 2018. Computational investigation of power efficient plasma-based reconfigurable microstrip antenna. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 12 (9): 1587-1593.
- Yin, B. and Zhang, Z.-F. 2018. A novel reconfigurable radiating plasma antenna array based on yagi antenna technology. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 84: 221-224.
- Zainud-Deen, S.H., Malhat, H.A., Badawy, M.M. and Awadalla, K.H. 2014. Circularly polarized plasma curl antenna for 2.45 ghz portable rfid reader. *Plasmonics*, 9 (5): 1063-1069.
- Zhao, J., Sun, Z., Ren, Y., Song, L., Wang, S., Liu, W., Yu, Z. and Wei, Y. 2019. Experimental characteristics of 2.45 ghz microwave reconfigurable plasma antennas. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52 (29).
- Zhou, J., Fang, J., Lu, Q. and Liu, F. 2014. Research on radiation characteristic of plasma antenna through fdtd method. *ScientificWorldJournal*, 2014: 290148.

ÖZGEÇMİŞ

ATALAY KOCAKUŞAK

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora 2017-2023	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans 2014-2017	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2010-2014	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Antalya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Araştırma Görevlisi 2023- Devam Ediyor	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Antalya
Araştırma Görevlisi 2017- 2023	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

- 1- Genc A., Basyigit I.B., Karaman A.B., Kocakusak A., Colak B. and Helhel S. “ Experimental investigation of electromagnetic interference behavior of PCB heatsinks according to feeding point in 1-10 GHz band ”, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, vol 39, pp. 713-742, 2023.
- 2- Kocakusak A, and Helhel S. “Marble Pre-selection Chart to Suppress EMF in S-Band and SAR Reduction Capabilities of Them at 2.45 GHz”, IETE Journal of Research, 2021.
- 3- Helhel S., Karaman A.B., Kocakusak A., "Heatsinks as quasi-antennas and frog forming: frequency and feeding point effect", Journal of Electromagnetic Waves And Applications, vol. 35, iss.16, pp.2153-2162,2021.
- 4- Helhel S., Kocakusak A., Sunel M., " Determining Loss Tangent Values Of Dry Granite For Potential S Band Applications", Microwave and Optical Technology Letters, 2020, vol.62, no.11, pp.1-12, 2020 .
- 5- Çakir M., Koçkal N.U., Özen Ş., Kocakusak A., Helhel S., "Investigation of Electromagnetic Shielding and Absorbing Capabilities of Cementitious Composites with Waste Metallic Chips", Journal Of Microwave Power And Electromagnetic Energy,vol.51, pp.31-42, 2017.
- 6- Kocakusak A., Çolak B., Helhel S., "Frequency Dependent Complex Dielectric Permittivity Of Rubber And Magnolia Leaves And Leaf Water Content Relation", Journal Of Microwave Power And Electromagnetic Energy, vol.50, pp.234-237, 2016.
- 7- Helhel S., Kocakusak A., "Improved Indoor Location Systems in a Controlled Environments", TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control), vol.14, pp. 748-756 , 2016.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- 1- Kocakusak A., Helhel S., “S Band Monopole Plasma Antenna Design and Beam Forming Application by Plasma Columns”, PIERS 2023, Prag, Çek Cumhuriyeti, 3-6 Temmuz 2023.
- 2- Eren M., Menguc E., Kocakusak A., Helhel S., “Investigation of Usage Possibility FMCW Radar for Non-Destructive Corrosion Detection in Building Structures”, PIERS 2023, Prag, Çek Cumhuriyeti, 3-6 Temmuz 2023.
- 3- Menguc E., Eren M., Kocakusak A., Helhel S., “Preliminary Results of Near Field Microwave Imaging System for Dielectric Material”, PIERS 2023, Prag, Çek Cumhuriyeti, 3-6 Temmuz 2023.

- 4- Alsaadi S.S.J., Kocakusak A., Albayrak Y., Helhel S., "An Empiric Mathematical Models to Predict Electrical Properties of Natural Juniper Wood Samples by Using Non-Distractive Methods", PIERS 2023, Prag, Çek Cumhuriyeti, 3-6 Temmuz 2023.
- 5- S nel M., Kocakuşak A., Helhel S., "Investigation of Dielectric and Microwave Heating Properties of Bricks ", PIERS PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium, Roma, ITALYA, 17-20 Haziran 2019.
- 6- Karaman A.B., Kocakuşak A., Gen A., Helhel S., "The Effect of Feeding Point on Electromagnetic Emission due to Heat Sink", PIERS PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium, Roma, ITALYA, 17-20 Haziran 2019.
- 7- Kocaman Z., Kocakuşak A., Baiřyiđit B.,  zen ř., Helhel S., "Design of A Triple Band Absorber Metamaterial for C-Band Radars with Golden Ratio Approaches", International Conference on Advanced Technologies, Computer Engineering and Science (ICATCES), KARAB K, TÜRKİYE, 11-13 Mayıs 2018.
- 8- Helhel S., Kocakuşak A., Albayrak Y.,  zen ř., "Wlan Based Indoor Locating Systems Enhanced By Ultrasonic Sensors; Hybrid Indoor Locating Systems (Hilos)", 36 th Progress in Electromagnetic Research, PRAG, CEK CUM., 5-9 Haziran 2015.
- 9- Helhel S., Kocakuşak A., "WLAN Based Indoor Positioning in Building Halls by Using Trilateral Method", The 31st International Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, Virginia, ABD, 21-26 Mart 2015.
- 10- Kocakuşak A., akir M.,  zen ř., Helhel S., "Evaluation Of Electromagnetic Interference Emitted From Compact Fluorescent Lamps According To Cispr-15 And Filter Design", 36 th Progress in Electromagnetic Research, PRAG, CEK CUM., 5-9 Haziran 2015.
- 11- Helhel S., Kocakuşak A., "Algorithms For Indoor Localization On Wlan Networks Applications", PIERS 2014, Guangzau, IN HALK CUM., 25-28 Ağustos 2014.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- 1- Ciflik M., Kocakuşak A. and Helhel S. "Floresan Tüpler Kullanarak Plazma Anten Dizisi Tasarımı", URSI 2021 Gebze, TÜRKİYE, 7-9 Eylül 2021.
- 2- Kocaman Z., Kocakuşak A., Karaman A.B. , Helhel S., "C bandı Hava Durumu Radarları İçin U şeklinde Metamateryal Tabanlı Radar Soğurucu Malzme Tasarımı", URSI 2018 Türkiye, KONYA, TÜRKİYE, 6-8 Eylül 2018.
- 3- Yalın B., Kocakuşak A.,  zen ř., Helhel S., "2 Tabakalı Asfalt Yol Katman Kalınlıklarının 3GHz'de alışan YGR ve 2-Boyutlu FDTD Kullanılarak Belirlenmesi", IX.URSI-TÜRKİYE 2018 BİLİMSSEL KONGRESİ ULUSAL GENEL KURUL TOPLANTISI, KONYA, TÜRKİYE, 6-8 Eylül 2018.

4- akir M., zen Ő., Koçkal N.U., Helhel S., Kocakuşak A., "Yapı Malzemelerinin Mikrodalga Frekans Bölgesi için Dielektrik zelliklerinin Belirlenmesi ve Ekran EtkinliĐin Analizi", VIII. URSI-Türkiye 2016 Bilimsel Kongresi Ve Ulusal Genel Kurul Toplantısı, Ankara, Türkiye, 1-3 Eylül 2016.

5- Helhel S., Kocakuşak A., "Yol Kaybı İndeks Hesabı Ve Wifi Tabanlı Kontrolsüz Gezinlerden Arındırılmış Bina İçi Konum Tespit Sistemi", VII. URSI-Türkiye Bilimsel Kongresi, Kayseri, Türkiye, 28-30 AĞustos 2014.

