

**ASKERİ GİZLEME UYGULAMALARI İÇİN PLAZMA
KAPLAMALARIN TASARIMI**

**DESIGN OF PLASMA COATINGS FOR STEALTH
APPLICATIONS**

ÖZKAN KILIÇ

PROF. DR. ÇİĞDEM SEÇKİN GÜREL

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2017

ÖZKAN KILIÇ' ın hazırladığı “Askeri Gizleme Uygulamaları için Plazma Kaplamaların Tasarımı” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI' nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Hamza KURT
Başkan


.....

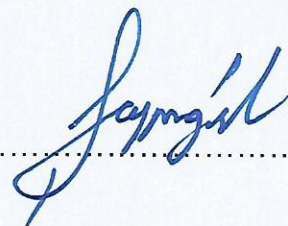
Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL
Danışman


.....

Prof. Dr. Elif URAY AYDIN
Üye


.....

Doç. Dr. Şeyda ÇOLAK
Üye


.....

Doç. Dr. Özlem ÖZGÜN
Üye


.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

29/11/2017


(İmza)

Öğrencinin Adı Soyadı

Özkay KILIÇ

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

23 /11/2017



ÖZKAN KILIÇ

ÖZET

ASKERİ GİZLEME UYGULAMALARI İÇİN PLAZMA KAPLAMALARIN TASARIMI

Özkan KILIÇ

Yüksek Lisans, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL

Kasım 2017, 106 sayfa

Bu tez çalışmasında elektromanyetik dalganın homojen olmayan plazma ortamında yayılımı farklı elektron dağılımları ile dik ve eğik açı geliş durumları için incelenmiştir. İncelemelerde plazmanın hem havada olduğu hem de mükemmel iletkeni kapladığı durumlar ele alınmıştır. Plazma kaplamasının sağladığı soğurma bandını askeri gizleme uygulamaları için genişletebilmek üzere çarpışma frekansı, elektron yoğunluğu, plazma kalınlığı gibi plazma parametreleri ile dış dc manyetik alan değeri belirlenmiştir.

İncelemelerde literatürde mevcut çalışmalarda yer alan bazı elektron dağılım fonksiyonlarına ek olarak Fibonacci serileri, Fibonacci sayıları ve altın orana göre değişen yoğunluk değişimleri ele alınmış ve sonuçların getirileri tartışılmıştır. İncelenen plazma kaplamalarının çoğu, ilgili frekanslarda geniş soğurma bandı sağladığından ileriye dönük geniş yutulma oranı gerektiren gizleme uygulamaları için önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Homojen olmayan plazma, elektromanyetik dalga yayılımı, geniş bantlı soğurma, elektron yoğunluğu, askeri gizleme uygulamaları.

ABSTRACT

DESIGN OF PLASMA COATINGS FOR STEALTH APPLICATIONS

Özkan KILIÇ

**Master of Science, Department of Electrical and Electronics
Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL

November 2017, 106 pages

In this study, propagation of electromagnetic wave in inhomogeneous plasma slab is analyzed for different electron distributions and for normal and oblique incidence cases. Plasma slab is considered in air and also it considered as a cover layer on perfect conductor. In order to get wide absorption band in military stealth applications, proper plasma parameters such as electron density function, collision frequency and plasma thickness, and also external dc magnetic field value are determined.

In the study, in addition to some electron density distribution functions in literature, new functions depending on Fibonacci series, Fibonacci numbers and golden ratio are also proposed and applied to plasmas used in coating applications and results are discussed. According to the results, most of the proposed plasma coatings are proposed for wide band stealth applications requiring high absorption rate in future.

Keywords: Inhomogenous plasma, propagation electromagnetic wave, wideband absorption, electron density, military stealth applications.

TEŐEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren çok kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Çiğdem Seçkin Gürel'e,

Manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan annem Ayla KILIÇ, babam Kaptan KILIÇ ve kız kardeşim şule KILIÇ'a,

Tez süresince desteğini esirgemeyen ve yol arkadaşlığı yapan dostum Ahmet Selim KARADAĞ'a ve tez konusunda yardımcı olan arkadaşlarım Ahmet DEMİRYÜREK ve Ahmet YANIK'a,

İş yerimde bana tez konusunda yardımlarını ve desteğini esirgemeyen başta Kenan BOZDAş, Kenan BOZKAYA, Deniz ÖZTÖRÜN ve Kutay ÇETİN olmak üzere, tüm çalışma arkadaşlarıma

teőekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iv
ÇİZELGELER	vi
ŞEKİLLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Plazmanın Kullanım Alanları	3
1.2. Askeri Gizleme Uygulamaları	4
1.3. Literatürde Plazma İle İlgili Yapılan Çalışmalar.....	8
1.4. Tezin Amacı	11
1.5. Tez Kapsamında Yapılan Çalışmalar	13
2. FORMÜLASYON	15
2.1. Plazma Parametrelerinin Belirlenmesi	16
2.2. Modellenen Plazmanın Yansıma, İletim ve Soğurma Gücü Formülleri	26
2.3. Mükemmel İletkeni Kaplamış Plazma için Formülasyon	33
3. ELEKTROMANYETİK DALGANIN FARKLI PLAZMA ORTAMLARI İÇİNDEKİ YAYILIMI	34
3.1. Dik ve Eğik Açılarda Gelen Elektromanyetik Dalganın Havadaki Plazma Ortamı İçerisindeki Yayılımı	34
3.1.1. Elektron Yoğunluğu Doğrusal Artan Plazma Ortamı.....	35
3.1.2. Doğrusal Artan ve Sinüsel Değişen Elektron Yoğunluğuna Sahip Plazma Ortamı	37
3.1.3. Elektron Yoğunluğu Çeyrek Sinüs Değişen Plazma Ortamı.....	40
3.1.4. Elektron Yoğunluğu Yarım Sinüs Değişen Plazma Ortamı.....	42
3.2. Dik ve Eğik Açılarda Gelen Elektromanyetik Dalganın Plazma Kaplı Mükemmel İletken Yüzey İçerisindeki Yayılımı.....	45
3.2.1. Elektron Yoğunluğu Doğrusal Artan Plazma Kaplaması	45
3.2.2. Elektron Yoğunluğu Doğrusal Artan ve Sinüsel Değişen Plazma Kaplaması	46
3.2.3. Elektron Yoğunluğu Çeyrek Sinüs Değişen Plazma Kaplaması	47
3.2.4. Elektron Yoğunluğu Yarım Sinüs Değişen Plazma Kaplaması.....	48
3.3. Sonuçların Karşılaştırılması.....	49
4. FİBONACCİ SAYILARI VE FİBONACCİ SERİLERİ ŞEKLİNDE ELEKTRON YOĞUNLUĞA SAHİP PLAZMALARIN ELEKTROMANYETİK DALGA İLE ETKİLEŞİMİ...53	
4.1. Fibonacci Sayı Dizisiyle Değişen Elektron Yoğunluğuna Sahip Plazma Kaplaması ..53	

4.1.1. Elektron Yoğunluğu Fibonacci Sayı Dizisi (F_1-F_{24}) Şeklinde Artarak Değişen Plazma Kaplaması.....	54
4.1.2. Elektron Yoğunluğu Fibonacci Sayı Dizisi ($F_{24}-F_1$) Şeklinde Azalarak Değişen Plazma Kaplaması.....	57
4.1.3. Elektron Yoğunluğu Fibonacci Sayı Dizisi (F_5-F_{16}) ² Şeklinde Değişen Plazma Kaplaması.....	59
4.1.4. Elektron Yoğunluğu Fibonacci Sayı Dizisi (F_5-F_{16}) ⁴ Şeklinde Değişen Plazma Kaplaması.....	61
4.1.5. Elektron Yoğunluğu Fibonacci Sayı Dizisi $((F_5-F_{16})(F_{16}-F_5))^2$ Şeklinde Değişen Plazma Kaplaması.....	64
4.1.6. Elektron Yoğunluğu Fibonacci Sayı Dizisi $((F_5-F_{16})(F_{16}-F_5))^4$ Şeklinde Değişen Plazma Kaplaması.....	66
4.1.7. Elektron Yoğunluğu Fibonacci Sayı Dizisi ($F_{16}-F_5$) ² Şeklinde Değişen Plazma Kaplaması.....	68
4.1.8. Elektron Yoğunluğu Fibonacci Sayı Dizisi ($F_{16}-F_5$) ⁴ Şeklinde Değişen Plazma Kaplaması.....	70
4.1.9. Sonuçların Değerlendirilmesi.....	72
4.2. Farklı Fibonacci Dizilimli Elektron Yoğunluğu Profiline Sahip Plazma Kaplaması ..	76
4.3. Farklı Sayıda S5 Fibonacci Dizilimli Elektron Yoğunluğuna Sahip Plazma Kaplaması.....	81
4.4. Genel Değerlendirme	87
5. ELEKTRON YOĞUNLUĞU VE ÇARPIŞMA FREKANSI DEĞİŞKEN OLAN PLAZMA KAPLAMALARININ İNCELENMESİ	88
5.1. Farklı Sinüs Değişimli Elektron Yoğunluğu ve Çarpışma Frekansı Profillerine Sahip Plazma Kaplaması.....	88
5.2. Farklı Fibonacci Sayı Dizilimli Elektron Yoğunluğu ve Çarpışma Frekansı Profillerine Sahip Plazma Kaplaması	90
6. EMPEDANS DÖNÜŞÜM YÖNTEMİ İLE YAPILAN KALINLIK İNCELEMELERİ.....	93
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	101
KAYNAKLAR	103
ÖZGEÇMİŞ	106

ÇİZELGELER

Sayfa

Çizelge 1.1. Radar frekans bantları.....	11
Çizelge 3.1. Modellenen plazma yapılarının farklı açılara göre soğurma bantları	49
Çizelge 4.1. Farklı Fibonacci sayı dizisine göre elektron yoğunluğu değişen plazma kaplamalarının farklı dış manyetik alan ve çarpışma frekansına göre soğurma bantları ...	72
Çizelge 4.2. Fibonacci dizilim elektron yoğunluğuna sahip plazma kaplamaların farklı açılara göre soğurma bantları	80
Çizelge 4.3. S ₅ Fibonacci dizilimli elektron yoğunluğuna sahip plazma kaplamalarının farklı açılarda soğurma bantları	86
Çizelge 5.1. Farklı sinüs değişimli elektron yoğunluğu ve çarpışma frekansı profillerine sahip plazma kaplamalarının soğurma bantları	90
Çizelge 5.2. Farklı Fibonacci sayı dizilimli elektron yoğunluğu ve çarpışma frekansı profillerine sahip plazma kaplamalarının soğurma bantları.....	92

ŞEKİLLER

Sayfa

Şekil 1.1. Doğal ve soğuk plazma (Yıldırım) [2].....	1
Şekil 1.2. Plazma özelliklerinin sınıflandırılması.....	2
Şekil 1.3. Farklı cisimler için saçılan radar dalgaları [3].....	4
Şekil 1.4. Radar soğurucu malzeme yapısı [3].....	5
Şekil 1.5. Su-27IB savaş uçağının plazma kaplı olduğu durum-1 [3].....	6
Şekil 1.6. Su-27IB savaş uçağının plazma kaplı olduğu durum-2 [3].....	7
Şekil 1.7. F-117 Nighthawk askeri uçağı [27].....	7
Şekil 1.8. B-2 Bomber savaş uçağı [27].....	7
Şekil 2.1. Çok katmanlı plazma yapısı.....	26
Şekil 2.2. Plazma katmanının elektromanyetik dalga ile etkileşimi.....	27
Şekil 2.3. Eğik açı ile gelen elektromanyetik dalganın çok katmanlı plazma ortamı içerisindeki yayılımı.....	28
Şekil 2.4. Çoklu yansımaların katkısı.....	29
Şekil 2.5. Plazma yapısının mükemmel iletken yüzeyi kapladığı durum.....	33
Şekil 3.1. Plazma kaplaması boyunca elektron yoğunluğunun doğrusal artan değişimi, $N_{min} = 2.083 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$, $N_{maks} = 1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$	35
Şekil 3.2. Doğrusal artan elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açlarına göre normalize soğurma gücü, $B = 0.5 \text{ T}$, $v_{en} = 20 \text{ GHz}$	36
Şekil 3.3. Doğrusal artan elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açlarına göre normalize yansıma gücü, $B = 0.5 \text{ T}$, $v_{en} = 20 \text{ GHz}$	36
Şekil 3.4. Doğrusal artan elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açlarına göre normalize iletim gücü, $B = 0.5 \text{ T}$, $v_{en} = 20 \text{ GHz}$	37
Şekil 3.5. Plazma kaplaması boyunca elektron yoğunluğunun doğrusal artması ve sinüsel değişimi, $N_{min} = 5 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$, $N_{maks} = 1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$	38
Şekil 3.6. Doğrusal artan ve sinüsel değişen elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açlarına göre normalize soğurma gücü, $B = 0.5 \text{ T}$, $v_{en} = 20 \text{ GHz}$	38
Şekil 3.7. Doğrusal artan ve sinüsel değişen elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açlarına göre normalize yansıma gücü, $B = 0.5 \text{ T}$, $v_{en} = 20 \text{ GHz}$	39
Şekil 3.8. Doğrusal artan ve sinüsel değişen elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açlarına göre normalize iletim gücü, $B = 0.5 \text{ T}$, $v_{en} = 20 \text{ GHz}$	40
Şekil 3.9. Plazma kaplaması boyunca elektron yoğunluğunun çeyrek sinüs değişmesi, $N_{min} = 1.071 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, $N_{maks} = 1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$	40
Şekil 3.10. Çeyrek sinüs elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açlarına göre normalize soğurma gücü, $B = 0.5 \text{ T}$, $v_{en} = 20 \text{ GHz}$	41

Şekil 3.11. Çeyrek sinüs elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılarına göre normalize yansıma gücü, $B= 0.5 \text{ T}$, $\nu_{\text{en}} = 20 \text{ GHz}$	41
Şekil 3.12. Çeyrek sinüs elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılarına göre normalize iletim gücü, $B= 0.5 \text{ T}$, $\nu_{\text{en}} = 20 \text{ GHz}$	42
Şekil 3.13. Plazma kaplaması boyunca elektron yoğunluğunun yarım sinüs değişmesi, $N_{\text{min}} = 4.278 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, $N_{\text{maks}} = 1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$	43
Şekil 3.14. Yarım sinüs değişen elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılarına göre normalize soğurma gücü, $B= 0.5 \text{ T}$, $\nu_{\text{en}} = 20 \text{ GHz}$	43
Şekil 3.15. Yarım sinüs değişen elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılarına göre normalize yansıma gücü, $B= 0.5 \text{ T}$, $\nu_{\text{en}} = 20 \text{ GHz}$	44
Şekil 3.16. Yarım sinüs değişen elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılarına göre normalize iletim gücü, $B= 0.5 \text{ T}$, $\nu_{\text{en}} = 20 \text{ GHz}$	44
Şekil 3.17. Doğrusal artan elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılarına göre mükemmel iletken yüzeyi kapladığı durumda normalize soğurma gücü, $B= 0.5 \text{ T}$, $\nu_{\text{en}} = 20 \text{ GHz}$	45
Şekil 3.18. Doğrusal artan ve sinüsel değişen elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılarına göre normalize soğurma gücü, $B= 0.5 \text{ T}$, $\nu_{\text{en}} = 20 \text{ GHz}$	46
Şekil 3.19. Çeyrek sinüs elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılarına göre normalize soğurma gücü, $B= 0.5 \text{ T}$, $\nu_{\text{en}} = 20 \text{ GHz}$	47
Şekil 3.20. Yarım sinüs elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılarına göre normalize soğurma gücü, $B= 0.5 \text{ T}$, $\nu_{\text{en}} = 20 \text{ GHz}$	48
Şekil 3.21. Mükemmel iletkeni kaplayan plazma kaplamasında elektromanyetik dalganın yayılımı.....	51
Şekil 3.22. Havadaki plazma kaplamasında elektromanyetik dalganın yayılımı.....	52
Şekil 4.1. Plazma elektron yoğunluğunun Fibonacci sayı dizisine göre artarak değişimi, $N_1 = 10^{15} \text{ m}^{-3}$, $N_{24} = 75025 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$	54
Şekil 4.2. Elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine göre artarak değişen plazmanın mükemmel iletken yüzeyi kapladığı durum.....	55
Şekil 4.3. Farklı dış manyetik alan değerleri için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine göre artarak değişen plazmanın soğurduğu güç, $\nu_{\text{en}} = 20 \text{ GHz}$	55
Şekil 4.4. Farklı çarpışma frekansı değerleri için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine göre artarak değişen plazmanın soğurduğu güç, $B= 0.5 \text{ T}$	56
Şekil 4.5. Plazma elektron yoğunluğunun Fibonacci sayı dizisine göre azalan değişimi, $N_1 = 75025 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, $N_{24} = 10^{15} \text{ m}^{-3}$	57
Şekil 4.6. Elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine göre azalarak değişen plazmanın soğurduğu güç, $B= 0.5 \text{ T}$	58

Şekil 4.7. Elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine göre azalarak değişen plazmanın yansıttığı güç, $B = 0.5 \text{ T}$	58
Şekil 4.8. Elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine göre değişen plazmanın mükemmel iletken yüzeyi kapladığı durum.....	59
Şekil 4.9. Plazma elektron yoğunluğunun Fibonacci sayı dizisine $(F_5 - F_{16})^2$ göre değişimi, $N_{\min} = 8 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, $N_{\max} = 1597 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$	60
Şekil 4.10. Farklı dış manyetik alan değerleri için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $(F_5 - F_{16})^2$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $\nu_{\text{en}} = 20 \text{ GHz}$	60
Şekil 4.11. Farklı çarpışma frekansları için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $(F_5 - F_{16})^2$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $B = 0.5 \text{ T}$	61
Şekil 4.12. Plazma elektron yoğunluğunun Fibonacci sayı dizisine $(F_5 - F_{16})^4$ göre değişimi, $N_{\min} = 8 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, $N_{\max} = 1597 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$	62
Şekil 4.13. Elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $(F_5 - F_{16})^4$ göre değişen plazmanın iletken yüzeyi kapladığı durum.....	62
Şekil 4.14. Farklı manyetik alan değerleri için elektron yoğunluğu Fibonacci dizisine $(F_5 - F_{16})^4$ göre değişen plazmanın yansıttığı güç, $\nu_{\text{en}} = 20 \text{ GHz}$	63
Şekil 4.15. Farklı çarpışma frekansları için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $(F_5 - F_{16})^4$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $B = 0.5 \text{ T}$	63
Şekil 4.16. Plazma elektron yoğunluğunun Fibonacci sayı dizisine $((F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5))^2$ göre değişimi, $N_{\min} = 8 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, $N_{\max} = 1597 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$	64
Şekil 4.17. Farklı manyetik alan değerleri için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $((F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5))^2$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $\nu_{\text{en}} = 20 \text{ GHz}$	65
Şekil 4.18. Farklı çarpışma frekansları için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $((F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5))^2$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $B = 0.5 \text{ T}$	65
Şekil 4.19. Plazma elektron yoğunluğunun Fibonacci sayı dizisine $((F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5))^4$ göre değişimi, $N_{\min} = 8 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, $N_{\max} = 1597 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$	66
Şekil 4.20. Farklı manyetik alan değerleri için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $((F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5))^4$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $\nu_{\text{en}} = 20 \text{ GHz}$	67
Şekil 4.21. Farklı çarpışma frekansları için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $((F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5))^4$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $B = 0.5 \text{ T}$	67
Şekil 4.22. Plazma elektron yoğunluğunun Fibonacci sayı dizisine $((F_{16} - F_5)(F_{16} - F_5))^2$ göre değişimi, $N_{\min} = 8 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, $N_{\max} = 1597 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$	68
Şekil 4.23. Farklı manyetik alan değerleri için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $((F_{16} - F_5)(F_{16} - F_5))^2$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $\nu_{\text{en}} = 20 \text{ GHz}$	69
Şekil 4.24. Farklı çarpışma frekansları için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $((F_{16} - F_5)(F_{16} - F_5))^2$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $B = 0.5 \text{ T}$	69

Şekil 4.25. Plazma elektron yoğunluğunun Fibonacci sayı dizisine $((F_{16}-F_5)(F_{16}-F_5))^4$ göre değişimi, $N_{\min} = 8 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, $N_{\max} = 1597 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$	70
Şekil 4.26. Farklı manyetik alan değerleri için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $((F_{16}-F_5)(F_{16}-F_5))^4$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $v_{en} = 20 \text{ GHz}$	71
Şekil 4.27. Farklı çarpışma frekansları için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $((F_{16}-F_5)(F_{16}-F_5))^4$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $B = 0.5 \text{ T}$	71
Şekil 4.28. Plazmanın Fibonacci S5 dizilimine göre değişen elektron yoğunluğu profili....	77
Şekil 4.29. Elektron yoğunluğu Fibonacci dizilimlerine göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $N_H = 10^{18} \text{ m}^{-3}$, $N_L = 10^{17} \text{ m}^{-3}$	77
Şekil 4.30. Elektron yoğunluğu Fibonacci dizilimlerine göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $N_H = 1.618 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, $N_L = 10^{17} \text{ m}^{-3}$	78
Şekil 4.31. Elektron yoğunluğu Fibonacci dizilimlerine göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $N_H = 1.618 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, $N_L = 10^{18} \text{ m}^{-3}$	79
Şekil 4.32. 3 tane S5 Fibonacci dizilimli elektron yoğunluğu profili (24 Katman).....	81
Şekil 4.33. Elektron yoğunluğu farklı sayıda S5 Fibonacci dizilimli değişen plazmanın soğurduğu güç, $N_H = 1.618 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, $N_L = 10^{17} \text{ m}^{-3}$, $\theta = 0^\circ$	82
Şekil 4.34. Elektron yoğunluğu farklı sayıda S5 Fibonacci dizilimli değişen plazmanın soğurduğu güç, $N_H = 1.618 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, $N_L = 10^{17} \text{ m}^{-3}$, $\theta = 45^\circ$	83
Şekil 4.35. Elektron yoğunluğu farklı sayıda S5 Fibonacci dizilimli değişen plazmanın soğurduğu güç, $N_H = 1.618 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, $N_L = 10^{18} \text{ m}^{-3}$, $\theta = 0^\circ$	84
Şekil 4.36. Elektron yoğunluğu farklı sayıda S5 Fibonacci dizilimli değişen plazmanın soğurduğu güç, $N_H = 1.618 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, $N_L = 10^{18} \text{ m}^{-3}$, $\theta = 45^\circ$	85
Şekil 5.1. Plazma kaplaması boyunca çarpışma frekansının değişimi, $v_{enm} = 20 \text{ GHz}$	89
Şekil 5.2. Mükemmel iletken yüzey plazma ile kaplı iken soğurulan güç, $B = 0.5 \text{ T}$, $v_{enm} = 20 \text{ GHz}$, $N_{\max} = 10^{18} \text{ m}^{-3}$	89
Şekil 5.3. Plazma kaplaması boyunca farklı Fibonacci sayı dizilerine göre çarpışma frekansının değişimi.....	91
Şekil 5.4. Mükemmel iletken yüzeyi kaplayan plazmanın soğurduğu güç, $B = 0.5 \text{ T}$, $v_{enm} = 16 \text{ GHz}$, $N_{\max} = 1597 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$	91
Şekil 6.1. Mükemmel iletkeni kaplayan ve plastik plaka (P) ile sonlandırılan sabit elektron yoğunluğuna sahip plazma kaplaması.....	93
Şekil 6.2. Kullanılan empedans dönüşüm yönteminin literatürdeki [15] bir çalışma ile doğrulanması.....	97
Şekil 6.3. Plazmanın soğurduğu gücün kalınlığına göre değişmesi, $v_{en} = 20 \text{ GHz}$, $B = 0.5 \text{ T}$, $N = 1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$	98

Şekil 6.4. Plazmanın soğurduğu gücün kalınlığına göre değişmesi, $f = 10$ GHz, $B = 0.5$ T, $N = 1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$	99
Şekil 6.5. Plazmanın soğurduğu gücün kalınlığına göre değişmesi, $\nu_{en} = 10$ GHz, $B = 0.5$ T, $N = 1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$	99

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

\vec{B}	Dış Manyetik Alan Vektörü
c	Işığın Havadaki Yayılma Hızı
\vec{E}	Elektrik Alan Vektörü
\vec{k}	Elektromanyetik Dalganın Yayılım Vektörü
\vec{r}	Uzaklık Vektörü
μ	Manyetik Geçirgenlik
\vec{J}	Elektrik Akım Yoğunluğu Vektörü
ϵ	Elektriksel Geçirgenlik
$\tilde{\epsilon}_r$	Plazmanın Karmaşık Dielektrik Sabiti
ω_p	Plazma Frekansı
ω_{ce}	Elektron Jiro Frekansı
ν_{en}	Plazma İçerisindeki Çarpışma Frekansı
ω	Gelen Elektromanyetik Dalganın Açısal Frekansı
n	Serbest Elektron Yoğunluğunu
N	Plazma Elektron Yoğunluğu
e	Elektron yükü
m	Elektron Kütlesi
ϵ_0	Havanın Elektriksel Geçirgenliği
γ	Yayılma Sabiti
α	Zayıflama Katsayısı
Γ	Yansıma Katsayısı
n_r	Plazma Kırılma İndisi

Kısaltmalar

dB	Desibel
RKA	Radar Kesit Alanı
RSM	Radar Soğurucu Malzeme

1. GİRİŞ

Plazma, pozitif ve negatif yüklü iyonlarla birlikte nötr parçacıkları bir arada bulduran iyonize gazdan oluşur. Ancak her iyonize gaz plazma olarak adlandırılmamaktadır. Çünkü plazmanın oluşabilmesi için yüksek enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle yüksek enerji seviyesine sahip iyonize gaz plazmayı oluşturur.

Fizikte plazma, maddenin dördüncü hali olarak kabul edilir. Evrende yer alan materyallerin yaklaşık %99'unun plazma durumunda olduğu bilinmektedir [1]. Plazmayı gaz halinden ayıran en önemli özelliği çok iyi bir iletken oluşudur. Plazmanın içerisindeki serbest elektronlar sayesinde iletkenlik üst seviyededir. Manyetik alan ve elektrik alan ile etkileşebilmesi, plazmayı maddenin diğer hallerinden ayıran bir diğer önemli özelliktir. Plazmaların çoğu; bulutlarda, yıldızlarda ve güneşte bulunmaktadır. Günlük hayatta plazma, yıldırım parlamasında (Şekil 1.1), floresan tüpün içindeki iletken gaz içerisinde, ışıklı reklam tabelalarında vb. yerlerde sıklıkla görülmektedir.

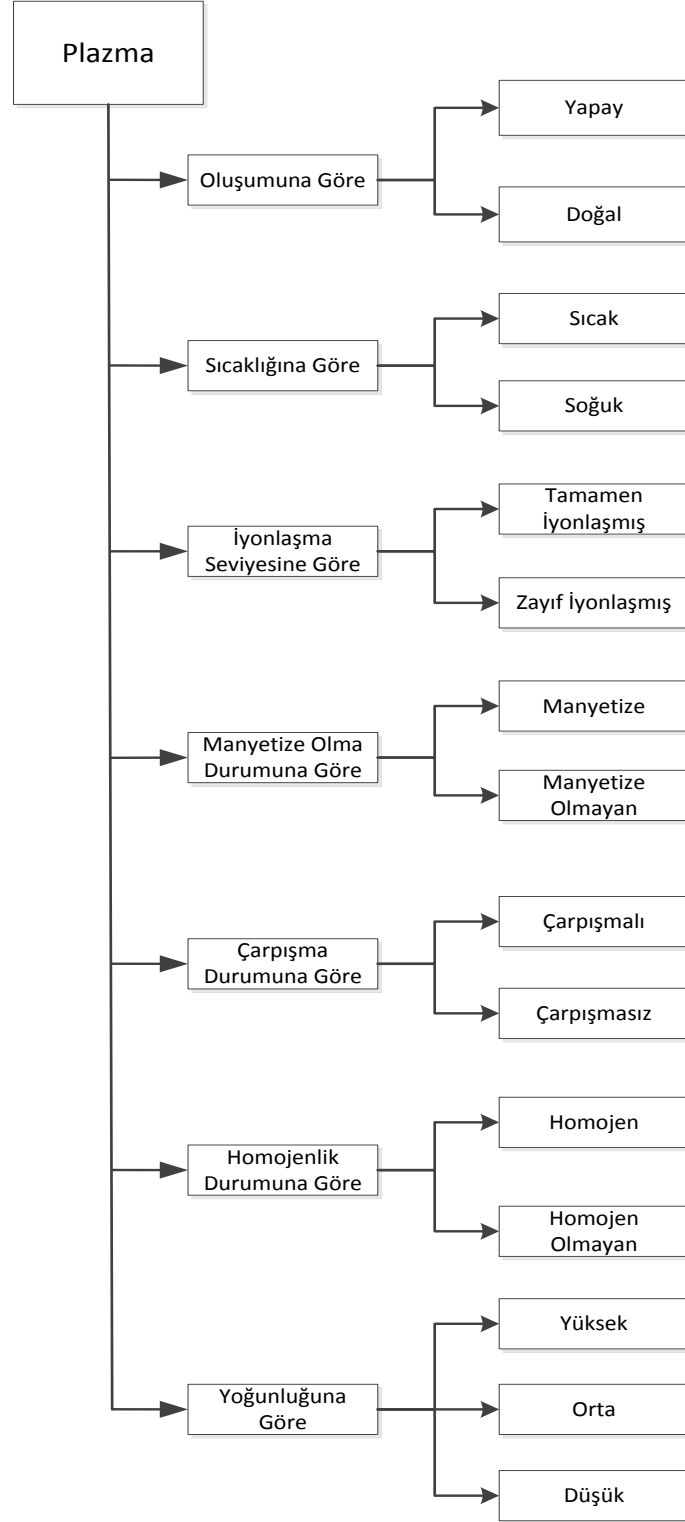


Şekil 1.1. Doğal ve soğuk plazma (Yıldırım) [2]

Plazmalar, Şekil 1.2'de gösterildiği gibi birden fazla kategoriye göre sınıflandırılmaktadır. Oluşumuna göre plazma, doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılır. Doğal plazma doğada kendiliğinden oluşurken, yapay plazma insan tarafından üretilmektedir [2].

Sıcaklık seviyesine göre plazmalar, sıcak ve soğuk plazma olarak ikiye ayrılmaktadır. Sıcak plazma gaz ortamının ısıtılarak iyonlaşması sonucu elde

edilirken, soğuk plazma gaz ortamını ısıtmadan yüksek veya düşük basınçlandırma sonucu elde edilir [2]. Soğuk plazma yapısında iyonların ısı hareketleri, basınç kuvveti ve manyetik kuvvetler ihmal edilir. Yalnızca elektrik kuvvetinin parçacıklar üzerinde etkisi olduğu kabul edilir [28].



Şekil 1.2. Plazma özelliklerinin sınıflandırılması

Bir plazmanın hangi seviyede iyonize olduğunu belirlemek için iyonlaşma derecesine bakılır. İyonlaşma derecesi, yüklü parçacıkların yoğunluğunun plazmanın doğal yoğunluğuna (pozitif, nötr ve iyonlar dâhil toplam yoğunluk) oranına eşittir [28]. Eğer bir plazmanın iyonlaşma derecesi 1'e yakınsa, o plazma tamamen iyonlaşmış demektir. Eğer iyonlaşma derecesi 1'den çok küçükse zayıf iyonlaşmış bir plazmadır. Genellikle sıcak plazmalar tamamen iyonlaşırken, soğuk plazmalar zayıf iyonlaşmaktadır. Bunun nedeni ise plazmanın iyonlaşma derecesi, iyonlaşma enerjisine ve elektron sıcaklığına bağlıdır. Elektron sıcaklığının yüksek olması iyonlaşma seviyesinin de yüksek olmasına neden olmaktadır.

Coulomb kuvvetinin etkisi ile plazma içerisinde yer alan yüklü parçacıkların birbirleri ile çarpışması sonucu çarpışmalı plazma elde edilmektedir. Çarpışmasız plazmada yer alan yüklü parçacıklar ise durağandır [29].

Bir plazmanın homojenliği, sahip olduğu parçacıkların (iyon, elektron, nötr parçacıklar) yoğunluğunun ve sıcaklığının kendi yapısı içinde eşit bir dağılım gösterip göstermemesine bağlıdır. Eğer plazma içerisinde parçacıkların yoğunluk ve sıcaklık değerleri plazma içerisinde her bir noktada eşit bir dağılım gösteriyorsa homojen, göstermiyorsa homojen olmayan bir plazma olarak tanımlanmaktadır.

Bir plazmanın manyetize olup olmaması dışarıdan uygulanan manyetik alan ile ilgilidir. Eğer plazma ortamına dışarıdan bir manyetik alan uygulanıyorsa o plazma, manyetize plazma olarak tanımlanmaktadır. Manyetize plazmalar izotropik olmayıp, dışarıdan uygulanan manyetik alandan kaynaklanan paralel ve dik kuvvetlere farklı şekilde tepki vermektedirler [29].

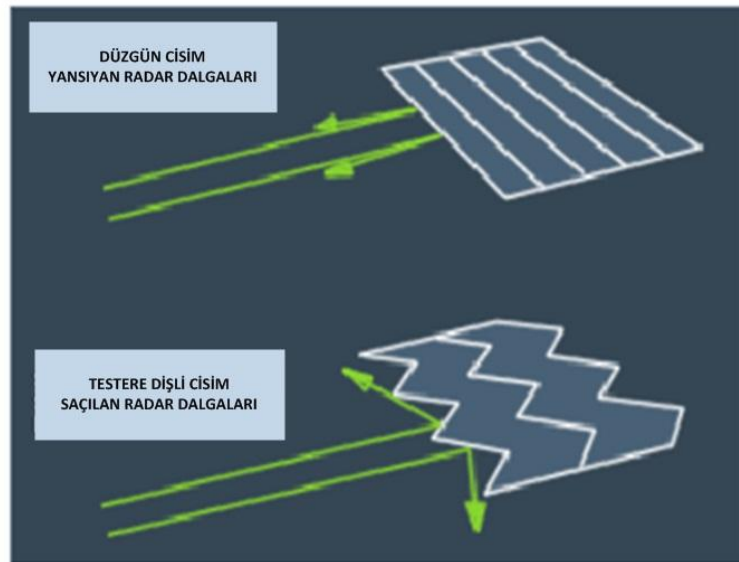
1.1. Plazmanın Kullanım Alanları

Plazma ileriye dönük çoğu bilimsel araştırmada kullanılmasının yanı sıra günümüzde enerji, tıp, otomotiv sanayi, uzay, tekstil sanayi, kimya, savunma sanayi vb. pek çok alan içerisinde aktif olarak kullanılmaktadır. Özellikle savunma sanayi içerisinde askeri gizleme uygulamaları kapsamında plazma kullanımı ile ilgili çalışmalar yürütülmektedir.

1.2. Askeri Gizleme Uygulamaları

Gizleme teknolojisi ya da diğer bir adıyla düşük görünürlük teknolojisi alanında yapılan çalışmalarda hava aracı, gemi, helikopter, füze ve diğer askeri hedeflerde düşük tespit edilebilirlik sağlanmaya çalışılmaktadır. Bu nedenle radar alıcılarının bu hedefleri tespit edememesini sağlamak, askeri gizleme teknolojisinin esas amacıdır. Bu amacı gerçekleştirebilmek için de yapılacak en önemli işlerden biri hedeften yansıyan sinyalin gücünü, radar alıcılarının hedefi tespit edecek seviyenin de altına düşürmektir.

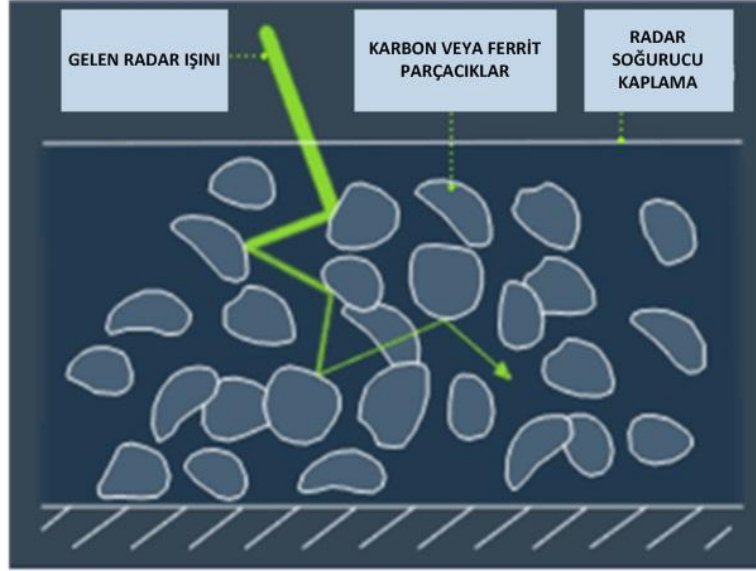
Literatürde cisimden yansıyan sinyalin gücünü azaltmak için bazı teknikler mevcuttur. Bunlardan birkaçı, cismin şeklini değiştirmek (şekillendirme), cismin bir kısmını veya tamamını radar soğurucu malzeme (RSM) ve boya ile kaplamak veya plazma kaplaması kullanmaktır. şekillendirme, hedeften yansıyan radar dalgalarının dalga kaynağından farklı yönlere yönlendirilmesi işlemi veya yüzey sürekliliğini sağlayarak kırınım etkilerinden dolayı süreksiz yüzeylerin kaynak olarak davranmasını engelleme işlemidir [3]. şekil 1.3'te gösterilen şekillendirme sayesinde radardan gelen dalgalar, radar kaynağından farklı yönlere doğru iletilmektedir.



şekil 1.3. Farklı cisimler için saçılan radar dalgaları [3]

RSM, içerisinde yer alan parçacıklar sayesinde üzerine gelen elektromanyetik dalganın bir kısmını ısı enerjisine dönüştüren, kalan kısmının ise her yönde saçılmasını sağlayan malzemedir. RSM, genelde karbon tabanlı dielektrikler ve

kayıplı dielektriklerden oluşur. İnce veya kalın, hafif veya ağır olabilirken üretim maliyeti yüksektir [4].



Şekil 1.4. Radar soğurucu malzeme yapısı [3]

Şekil 1.4 ile gösterildiği gibi gelen radar sinyali RSM içerisinde yer alan karbon ve ferrit parçacıklar sayesinde güç kaybetmekte ve soğurulmaktadır. Bu soğurma miktarı RSM'nin yapısına, kalınlığına, gelen elektromanyetik dalganın frekansına vb. parametrelere bağlıdır.

Günümüzde çok fazla sayıda soğurucu malzeme, boya geliştirilmiş ve cisimler üzerine uygulanarak performansları değerlendirilmiştir. Her ne kadar RSM düşük görünürlüğü sağlama adına katkı yapsa da hiçbir zaman mükemmel sonuç vermemektedir. Örneğin; hava aracının belli bir kısmı RSM ile kaplandığı zaman dar bir frekans bandında istenilen performans sağlanırken geniş bant aralığında aynı performans sağlanamamaktadır. RSM kaplamaların büyük çoğunluğu sadece belli bir frekans ve belli bir açıda gelen radar sinyallerini soğurabilmektedir. Ayrıca, kalınlığı ve yoğunluğu fazla olan RSM kaplamalar ve boyalar hem ağır olmakta hem de kaplandığı cismin genel performansını olumsuz etkilemektedir. Son zamanlarda, gerek RSM kaplamaların geniş bantta istenilen sonucu vermemesi gerekse şekillendirme işleminin her zaman yapılamamasından dolayı araştırmacılar yeni çalışmalar başlatmışlardır. Bu çalışmaların neticesinde askeri gizleme uygulamalarında kullanılmak üzere farklı plazma modelleri ortaya çıkmıştır.

Askeri gizleme uygulamaları kapsamında cismin şeklini değiştirmeden, radar soğurucu malzeme (RSM) kullanılmadan, plazma yapısı kullanılmasının birkaç önemli sebebi vardır. Bunlar; plazmanın yüksek soğurma performansı, hafiflik ve kolay kullanım sağlamasıdır. Bununla birlikte plazma kaplaması düşük maliyetli olmaktadır. Son zamanlarda, askeri gizleme teknolojisinde plazmanın kullanımına yönelik birçok araştırma yapılmakta ve elektromanyetik dalganın plazma içerisinde yayılımı ve soğurulması incelenmektedir. Karmaşık elektriksel geçirgenliğe sahip çarpışmalı plazma yapıları, geniş frekans bant aralığında elektromanyetik dalga soğurma için kullanılmaktadır. Bu soğurma sayesinde plazma kaplı cismin radar kesit alanı (RKA), geniş frekans bant aralığında dūřürülebilmektedir. Plazmanın bununla birlikte getirdiği avantajlardan bir diğeri ağırlılığının ihmal edilebilir seviyede oluşudur. Plazma kaplama ile ilgili özellikle Rusya ve ABD'nin teorik ve pratik çalışmalar yaptığı bilinmektedir.

Rusya Hava Savunma Sanayi, plazma yapısını kullanarak gizleme teknolojileri kapsamında çalışmalar yapmaktadır. Yakın zamanda Rus yetkilileri radar dalgalarını samak ve soğurmak için plazma kaplaması ile ilgili çalışmalar yapıldığını belirtmişlerdir [5]. Plazma kaplamasının bazı hava araçlarına ve gemilere uygulanabildiği belirtilmiştir. Su-7, Su-27IB ve MiG-35 gibi Rus savaş uçaklarında RKA'yı dūřürmek için plazma kaplaması kullanılmıştır. Su-27IB savaş uçağının RKA'sı plazma kaplaması sayesinde normalden iki kat daha fazla dūřürölmesi mümkün olmuştur. Aynı zamanda, Rus Su-27IB uçağı plazma ile kaplanan ilk gizli savaş uçağı olma özelliğine sahiptir [5].



şekil 1.5. Su-27IB savaş uçağının plazma kaplı olduğu durum-1 [3]



Şekil 1.6. Su-27IB savaş uçağının plazma kaplı olduğu durum-2 [3]

ABD, plazma ile ilgili çalışmalarını gizli yürüttüğü için literatürde erişilebilir kayda değer bilgi bulunmamaktadır. Literatürde daha çok ABD tarafından kullanılan “hayalet uçak” olarak tabir edilen F-117 Nighthawk ve B-2 Bomber uçakları ile ilgili bilgiler mevcuttur [6]. Bu uçaklar şekillendirme yöntemi sayesinde RKA’sı ciddi oranda düşürülmektedir. RKA’sı belli bir seviyenin üstünde olan bölgeler için RSM uygulandığı bilinmektedir. Bu uçakların RKA değerleri bir kuşun tespit edilebilirliğinden daha düşük olmasına rağmen maliyetleri milyar dolar seviyesindedir.



Şekil 1.7. F-117 Nighthawk askeri uçağı [27]



Şekil 1.8. B-2 Bomber savaş uçağı [27]

Plazma kaplamasının askeri gizleme çalışmalarında kullanılması birçok getiri sağlamıştır. Ancak mühendisler ve araştırmacılar için plazma, yeni bir çalışma alanı olmasından dolayı bazı zorlukları da beraberinde getirmiştir [5]. Bunlar;

- Hava aracı yüksek hızlarda hareket halinde ilerlerken radar soğurucu plazma yapısının üretilebilirliği göz önünde tutulmalıdır. Plazmanın kendi ağırlığı hafif hatta analizlerde ihmal edilebilir olmasına rağmen plazma üretici ağır ve hantal bir yapıya sahiptir. Bununla birlikte plazma üreticinin ihtiyaç duyduğu güç çok fazladır. Buna çözüm olarak sadece plazma kaplamasına ihtiyaç olması durumunda çalıştırılmakta diğer durumlarda kapatılmaktadır. Ayrıca plazma kaplamasını tüm cisme uygulamak yerine sadece RKA'sı düşük olması istenilen bölgeyi kaplaması verimlilik açısından daha uygun olmaktadır.
- Plazmanın hava aracının etrafında yoğunluğunu ve gücünü kaybetmeden kalabilmesi için gereken güç miktarı önemlidir. Gereken yoğunluk ve güç miktarı yapılacak analizlere göre belirlenmektedir. Analizler sonucunda belirlenen güç ve yoğunluk sağlandığı takdirde plazma yapısı dağılmadan cismin üzerinde kalabilmektedir.

1.3. Literatürde Plazma İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Plazma yapısının elektromanyetik dalgalar ile etkileşimi üzerine literatürde çalışmalar yer almaktadır [7-22]. Bu çalışmalarda farklı özelliklere sahip plazma ortamlarının yansıma, iletim ve soğurma karakteristikleri incelenmiştir.

Askeri gizleme uygulamaları kapsamında plazma ile ilgili önemli sayılabilecek ilk çalışma Vidmar tarafından 90'lı yılların başında gerçekleştirilmiştir. Atmosfer basıncında helyum ve hava içerisinde ürettiği soğuk ve çarpışmalı plazmaların, VHF (30-300 MHz frekans bant aralığı) ile S-bant (2-4 GHz frekans bant aralığı) arasındaki geniş bant aralığında gelen elektromanyetik dalgaları soğurabileceği ortaya çıkmıştır [9]. Vidmar, yaptığı çalışmalar neticesinde çalıştığı bant aralığında iyi bir soğurma performansı gösteren bir plazma üretmeyi başarmıştır.

Bu çalışmanın ardından, radar sinyalleri ile yüksek atmosfer basınçlı plazmanın etkileşimini inceleyebilmek için bazı nümerik çalışmalar yapılmıştır [10]. Bu çalışmalarda belli bir elektron yoğunluğuna sahip homojen olmayan ve manyetize plazma kullanılmıştır. Elektromanyetik dalganın dik açı ile plazma kaplamasına

geldiği göz önünde tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar ışığında çarpışma frekansının ve elektron yoğunluğunun plazmanın karakteristiğini etkileyen en önemli iki parametre olduğu belirlenmiştir.

Elektromanyetik dalganın geniş bant aralığında soğurulmasını sağlamak için farklı plazma parametrelerine (çarpışma frekansı, elektron jiro frekansına ve plazma elektron yoğunluğu) göre analizler yapılmıştır [11]. Plazma katmanına elektromanyetik dalganın dik açı ile geldiği durum için çalışma yapılmıştır. 12 cm kalınlığa sahip homojen olmayan ve manyetize plazma katmanı kullanılmıştır. Plazmanın 1 GHz ile 20 GHz arasındaki bant aralığında plazma kaplamasına gelen elektromanyetik dalganın gücünü %90'nın üzerinde soğurabildiği gözlemlenmiştir.

Plazma kalınlığının, plazmanın davranışına olan etkisini incelemek adına empedans dönüşüm yöntemi kullanılarak farklı kalınlık ve frekans değerleri için plazma yapısının yansıma kaybı incelenmiştir [15]. Yapılan hesaplamalar sonucunda plazma kalınlığının artması gelen elektromanyetik dalganın sönümlenmesini arttırdığı görülmüştür.

Literatürde yer alan çoğu çalışmada elektron yoğunluğu plazma katmanı boyunca sabit alınıyordu. Plazma katmanı boyunca elektron yoğunluğu değişiminin plazma performansını nasıl değiştirdiğini gözlemek adına plazmanın farklı elektron yoğunluğu sahip olduğu durumlar için çalışmalar yapılmıştır [13,14]. Plazma kaplaması boyunca plazmanın elektron yoğunluğu değiştirilerek plazmanın yansıma, iletim ve soğurma karakteristiklerine olan etkisi 20 GHz ve altındaki frekanslar için incelenmiştir. İncelemeler sonucunda plazmanın davranışının elektron yoğunluğu profiline göre değiştiği görülmüştür.

Literatürde yer alan başka bir çalışmada RKA'yı düşürmek için kullanılan RSM ile birlikte plazma mükemmel iletken bir yüzeyi kaplayarak bir model oluşturulmuş ve bu modelin gelen elektromanyetik dalganın gücünü hangi oranda zayıflatabildiğinin analizi empedans dönüşüm yöntemi kullanılarak yapılmıştır [16]. Farklı plazma ve RSM parametreleri kullanılarak hem frekansa hem de kalınlığa göre RSM ve plazmanın kıyası yapılmıştır. Analizler neticesinde, plazmanın RSM ile birlikte kullanılmasının plazma ve RSM'nin tek başına kullanılmasından daha iyi sonuç

verdiği görülmüştür. Plazma ve RSM içeren çok katmanlı yapının kullanılması durumunda askeri donanımları daha az görünür yapacağı belirlenmiştir.

Bir başka çalışmada homojen olmayan manyetize plazma kaplamasının elektromanyetik dalga ile etkileşimi nümerik analiz ile incelenmiştir [17]. Yansıma ve soğurma performansı incelenen plazma modeli homojen olmayan, soğuk, çarpışmalı ve manyetizedir. Manyetize plazma, plazma kaplamasına dışarıdan bir manyetik alan uygulanarak oluşmaktadır. Literatürde yer alan bu çalışmada farklı çarpışma frekansı, dış manyetik alan ve plazmanın elektron yoğunluğu değerlerine göre plazmanın yansıma ve soğurma karakteristikleri incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda plazma kalınlığının radar sinyallerinin yansıtılmasında etkisi oldukça az iken, soğurma bandının genişlemesine ve daralmasına etkisi olabildiği gözlenmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar genellikle plazma yapısının performansını GHz seviyesindeki frekans bandında incelemiştir. Ancak son zamanlarda THz gibi daha yüksek frekanslarda plazmanın elektromanyetik dalgalarla etkileşimi incelenmiştir [19,20]. Bu çalışmalarda plazma elektron yoğunluğu, polarizasyon, çarpışma frekansı ve plazma kalınlığı değiştirilerek plazmanın yansıma, iletim ve soğurma karakteristiği elde edilmiştir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalarda elektromanyetik dalgalar plazmaya dik geliş açısıyla geldiği varsayılmış ve buna göre plazmanın karakteristikleri analiz edilmiştir. Plazma ortamına eğik açılarda gelen elektromanyetik dalganın nasıl etkileşim gösterdiği ile ilgili literatürde çalışmalar az da olsa mevcuttur. Manyetize olmayan, soğuk, çarpışmalı ve homojen olan plazma yapısının, eğik açılarda gelen elektromanyetik dalga ile nasıl etkileşim gösterdiğine bakılan bir çalışmada ince alt katmanlara bölünmüş plazmanın farklı plazma sıcaklığı ve çarpışma frekansına göre yansıma karakteristiği incelenmiştir [12,22]. Yapılan analizlere bakıldığında, enine elektrik (İng. Transverse Electric) alanda gelen elektromanyetik dalga için açı arttıkça yansıma kaybı maksimum olurken enine manyetik (İng. Transverse Magnetic) alanda gelen elektromanyetik dalga için açı arttıkça yansıma kaybının minimum olduğu görülmüştür.

Bir başka çalışmada homojen olmayan, çarpışmalı, manyetize olmayan, soğuk plazma yapısının elektromanyetik dalga ile etkileşimi, zaman uzayında sonlu farklar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir [18]. Plazma modeli iletken bir düzlemi kapladığı zaman farklı açılar için RKA değerinin nasıl değiştiğine bakılmıştır. Çıkan sonuçlar incelendiğinde iletken yüzey plazma kaplı iken, plazma kaplı olmadığı durumuna göre 0° ile 30° aralığında yaklaşık 10 dB'lik bir düşüş sağlanırken, 30° ile 150° arasında yaklaşık 5 dB'lik bir RKA düşümü sağlanmıştır.

Genel olarak geçmişten günümüze literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde ilk başta plazma yapısının elektromanyetik dalga ile etkileşimindeki davranışı tespit edilmeye çalışılmıştır. Günümüzde ise düşük görünürlüğü ve düşük radar kesit alanını sağlamak için plazma kaplamaların test ve doğrulama faaliyetleri halen devam etmektedir.

1.4. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, askeri amaçlı kullanım için en uygun ve en iyi hizmeti sunacak plazma kaplaması belirlemektir. Bunu sağlayabilmek için plazma kaplamasının geçmişten günümüze hangi askeri alanlarda kullanıldığına bakmak gerekmektedir. Bölüm 1.1'de belirtildiği gibi plazma yapısı genellikle savaş uçaklarında ve gemilerde kullanılmaktadır. Bu platformlar için en önemli tehdit ise radarlardır. Bu yüzden iyi bir plazma kaplaması, kaplandığı platforma gelen radar sinyallerini soğurabilmelidir.

İyi bir radar soğurucu plazma kaplaması elde edebilmek için radarların çalışma frekanslarını göz önünde tutmak gerekir. Günümüzde kullanılan radarların bantları, frekans aralığı ve kullanım alanları Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Radar frekans bantları

Band Adı	Frekans Aralığı	Kullanım Alanı
HF	3-30 MHz	Ufuk ötesi gözetleme
VHF	30-300 MHz	Çok uzun menzilli gözetleme
		Erken ikaz radarı
UHF	300-1000 MHz	Uydu ve takip sınıflandırma radarı
L	1-2 GHz	Uzun menzilli gözetleme (Askeri uygulamalar)

Band Adı	Frekans Aralığı	Kullanım Alanı
		Hava arama ve trafik kontrol radarı
S	2-4 GHz	Orta menzilli gözetleme (Askeri uygulamalar)
		Hava arama, takip ve atış kontrol radarı
		Uzun menzilli hava tahmini
C	4-8 GHz	Yakın mesafe tespit
		Uçuş hava tahmini
X	8-12 GHz	Kısa mesafe takibi
		Roket yön gösterimi (Askeri harp uygulamaları)
		Haritacılık, Deniz radarı
Ku	12-18 GHz	Yüksek çözünürlük haritacılık
		Uydu altimetresi (Yapay Açıklıklı Radar)
K	18-27 GHz	Az kullanım (su buharı)
Ka	27-40 GHz	Havaalanı yer kontrol radarı
		Çok yüksek çözünürlük haritacılık
V	40-75 GHz	Deneyisel (Laboratuvar)
W	75-110+ GHz	Kara taşıtlarında park etme, frenleme ve kaza önleme sensörü
		Deneyisel (Laboratuvar)

Çizelge 1.1’de gösterildiği gibi günümüzdeki radar frekansları, 3 MHz’den başlayarak 110 GHz’e kadar bir aralıkta değişmektedir. Günümüzde radarlar HF bandından Ka bandına kadar olan frekans bantlarını aktif olarak kullanmaktadır. V ve W bantlarında ise laboratuvar ortamlarında radar çalışmaları devam etmektedir. Bu tez çalışmasında modellenen plazma kaplamalarının Çizelge 1.1’de belirtilen frekans aralığındaki radar sinyallerini soğurabilmesi amaçlanmıştır.

1.5. Tez Kapsamında Yapılan Çalışmalar

Bu tez çalışması kapsamında askeri amaçlı kullanım için plazma kaplamaları modellenmiş ve modellenen plazma kaplamalarının karakteristik özellikleri MATLAB programı ile hesaplanarak detaylı incelenmiştir. Plazma kaplamalarının yansıma ve iletim performanslarına bakılmış ve özellikle soğurma performansı çıktıları detaylı incelenip yorumlanmıştır. Elektromanyetik dalganın plazma katmanına hem dik hem de eğik açılarda gelmesi durumunda plazmanın nasıl bir davranış gösterdiği incelenmiştir. İnce katmanlara bölünen plazma yapısının elektron yoğunluğu, plazma katmanları boyunca dinamik olarak değiştirilmiş ve plazma yüzeyine gelen elektromanyetik dalganın soğurulabilirliği araştırılmıştır. Farklı elektron yoğunluğuna sahip plazma kaplamasının parametrelerini değiştirerek olabildiğince geniş soğurma bandı elde edilmeye çalışılmıştır. Mükemmel iletken yüzeyi kaplayan plazma yapısı modellenirken yansıtma performansını en aza indirmek amaçlanmış ve elektromanyetik dalganın tamamına yakınının plazma yapısı içinde soğurulması hedeflenmiştir.

Askeri uygulamalarda kullanılacak ve geniş bir bant aralığında radar sinyallerini soğurabilecek bir plazma kaplaması elde etmek için plazmanın hem havada olduğu hem de iletken yüzeyi kapladığı her iki duruma da bakılmıştır. Tez kapsamında kullanılan plazma ortamı; soğuk, manyetize, homojen olmayan, çarpışmalı ve zayıf iyonlaşmıştır. Çarpışma frekansı, elektron yoğunluğu, kalınlığı gibi bazı plazma parametreleri ve dış manyetik alan incelemeler sırasında farklı değerler almıştır.

Bölüm 2’de plazmanın karmaşık elektriksel geçirgenliğini hesaplayabilmek için Maxwell denklemleri ve Newton kuvvet yasası esas alınmıştır. Elde edilen dielektrik sabiti denkleminde yer alan parametreler eşitliklerle ifade edilmiştir. Plazma ortamından yansıyan, iletilen ve soğurulan güç eşitlikleri hem dik açı hem de eğik açılarda gelen elektromanyetik dalga için tanımlanmıştır.

Bölüm 3’te doğrusal veya sinüsel değişen farklı elektron yoğunluğuna sahip plazma kaplamalarının iletken yüzeyi kapladığı ve havada olduğu durumlarda dik ve eğik açılarda gelen elektromanyetik dalga ile etkileşimi incelenmiş ve MATLAB programı ile hesaplanan sonuçlar değerlendirilmiştir.

Bölüm 4'te plazmanın elektron yoğunluğu literatürde bir ilk olarak Fibonacci serileri ve Fibonacci sayıları şeklinde oluşturulmuş ve bu durumda plazma kaplamasının elektromanyetik dalga ile etkileşimine bakılmıştır. Bu kısımda sadece plazma kaplamasının iletken yüzeyi kapladığı durum için çalışma yapılmıştır. Plazma kaplaması boyunca farklı Fibonacci diziliimli elektron yoğunluğu profilleri için yapılan incelemelerden ortaya çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bölüm 5'te plazmanın çarpışma frekansı sabit alınmayıp plazma kalınlığı boyunca değişen bir fonksiyon kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda çarpışma frekansının değişim fonksiyonu ile plazmanın elektron yoğunluğunun değişim fonksiyonu aynı alınmıştır.

Bölüm 6'da plazma kalınlığının, homojen plazmanın soğurduğu güce olan etkisi incelenmiştir. Bu kısımda Bölüm 2'de belirtilen formülasyondan farklı olarak empedans dönüşüm yöntemi kullanılmıştır. Bu bölümde farklı çarpışma frekansı ve farklı radar frekans değerleri için modellenen plazma ortamlarının soğurma performanslarına bakılmıştır.

2. FORMÜLASYON

Plazmanın elektromanyetik dalga ile etkileşimi incelenirken Maxwell denklem seti içerisinde yer alan Faraday ve Amper yasalarının göz önünde tutulması gerekmektedir.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2-1)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2-2)$$

Eş.(2-1) ile gösterilen \vec{E} elektrik alan vektörünü, \vec{B} manyetik alan vektörünü ifade etmektedir. Eş.(2-2) ile gösterilen \vec{J} elektrik akım yoğunluğu vektörünü, μ_0 havadaki manyetik geçirgenliği, ε_0 havadaki elektriksel geçirgenliği tanımlamaktadır. Plazma ortamını uzayda ve zaman alanında tanımlamak için Fourier analizi kullanılabilir. Bu durumda manyetik alan şu şekilde tanımlanabilir:

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = B e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \quad (2-3)$$

Elektrik akım yoğunluğunu aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\vec{J} = -ne\vec{v} \quad (2-4)$$

Eş.(2-3)'te \vec{k} elektromanyetik dalga yayılım vektörünü, \vec{r} ise uzaklık vektörünü, Eş.(2-4)'te n serbest elektron yoğunluğunu, e birim elektron yükünü, \vec{v} hız vektörünü belirtir. Dalga vektörü ile uzaklık vektörünün çarpımı $\vec{k} \cdot \vec{r} = k_x x + k_y y + k_z z$ şeklinde tanımlandığı için üç yönü içermektedir. Euler teoremine göre $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$ olduğu için $e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$ terimi şu şekilde ifade edilir:

$$e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} = \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) + i \sin(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \quad (2-5)$$

Eş.(2-1) ile Eş.(2-2)'de belirtilen $\frac{\partial}{\partial t}$ yerine $i\omega$, \vec{J} yerine Eş.(2-4)'te tanımlanan ifade yazılırsa yeni eşitlikler elde edilir:

$$i\vec{k} \times \vec{E} = -i\omega \vec{B}, \quad \vec{k} \times \vec{E} = -\omega \vec{B} \quad (2-6)$$

$$i\vec{k} \times \vec{B} = \mu_0(-ne\vec{v}) + i\omega \mu_0 \varepsilon_0 \vec{E} \quad (2-7)$$

Şu ana kadar Maxwell denklemleri kullanılarak plazma ortamı için temel elektromanyetik dalga denklemleri çıkarılmıştır. Modellenen plazmanın formülasyon aşamaları iki bölümde gösterilmiştir. Bölüm 2.1’de çıkarılan Maxwell denklemleri esas alınarak plazma parametrelerinin çıkarımı yapılmıştır. Bölüm 2.2’de havadaki plazmanın, dik açı ve eğik açılarda gelen elektromanyetik dalgaya göre yansıma, soğurma ve iletim gücü eşitlikleri elde edilmiştir. Bölüm 2.3’te ise mükemmel iletkeni kaplamış plazmanın soğurma gücü eşitliği gösterilmiştir.

2.1. Plazma Parametrelerinin Belirlenmesi

Bir düzlem dalga, plazma gibi kayıplı bir ortamda ilerliyorsa Bölüm 2’de tanımlanmış Maxwell denklemlerini sağlamak zorundadır. Bu denklemler göz önünde tutularak plazmanın karmaşık dielektrik sabitinin bulunabilmesi için Newton’un kuvvet yasası kullanılmaktadır. Newton kuvvet yasası plazma ortamı için kullanıldığı zaman, plazma içerisindeki elektron hareketleri aşağıdaki denklem ile tanımlanabilir [30]:

$$m \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) - \nabla p - m v_{en} \vec{v} \quad (2-8)$$

Eş.(2-8)’de m elektron kütlelerini, v_{en} plazmanın çarpışma frekansını ve ∇p basınç gradyentini tanımlamaktadır. Eş.(2-8)’in sağ tarafı incelendiğinde plazma ortamını etkileyen üç baskın kuvvetin olduğu görülebilir. Bunlar; elektrik alan ve manyetik alanın oluşturduğu Lorentz kuvveti, basınç kuvveti, çarpışmadan kaynaklı momentum kuvvetidir. Eş.(2-8)’in sol tarafında geçen $(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}$ terimi, hız alanındaki konumsal değişimden kaynaklanan kuvvetin bir kısmını tanımlamaktadır. Ancak bu terim, diğer terimlerden oldukça küçük olduğu için ihmal edilmektedir [30]. Bu durumda Eş.(2-8) yeniden düzenlenirse:

$$m \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \right) = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) - \nabla p - m v_{en} \vec{v} \quad (2-9)$$

elde edilir. Tez çalışması kapsamında soğuk plazma yapısı incelendiği için soğuk plazma içerisindeki herhangi bir yerden başka bir yere basınç farkı oluşmayacaktır. Bu nedenle $\nabla p = 0$ alınmaktadır. Bu durumda Eş.(2-9) yeniden yazılırsa:

$$m \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \right) = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) - m v_{en} \vec{v} \quad (2-10)$$

elde edilir. Eş.(2-10)'a Fourier analizi uygulanıp $\frac{\partial}{\partial t}$ yerine $i\omega$ yazılırsa yeni eşitlik şu şekilde olacaktır:

$$i\omega m\vec{v} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) - mv_{en}\vec{v} \quad (2-11)$$

Bu eşitliğin çözülebilmesi için Eş.(2-6) ile Eş.(2-7)'nin kullanılması gerekmektedir. Eş.(2-6) yeniden düzenlenirse aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\vec{k} \times \vec{E} = -\omega\vec{B} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{-\omega}\vec{k} \times \vec{E} = \vec{B} \quad (2-12)$$

Eş.(2-7)'de yer alan \vec{B} ifadesi yerine Eş.(2-12)'deki \vec{B} ifadesi konulduğunda Eş.(2-13) elde edilir:

$$i\vec{k} \times \underbrace{\frac{1}{-\omega}\vec{k} \times \vec{E}}_{\vec{B}} = \mu_o(-ne\vec{v}) + i\omega\mu_o\epsilon_o\vec{E} \quad (2-13)$$

ω terimi sağ tarafa atılıp, Eş.(2-13) yeniden yazıldığında Eş.(2-14) elde edilir.

$$i(\vec{k} \times (\vec{k} \times \vec{E})) = \omega\mu_o(-ne\vec{v}) - i\omega^2\mu_o\epsilon_o\vec{E} \quad (2-14)$$

Eş.(2-14)'ü basitleştirmek adına çift çarpaz çarpım vektör eşitliği olarak bilinen $\vec{A} \times (\vec{B} \times \vec{C}) = \vec{B}(\vec{A} \cdot \vec{C}) - \vec{C}(\vec{A} \cdot \vec{B})$ eşitliği kullanılabilir [30]. Bu eşitlik, Eş.(2-14)'ün sol tarafı için uygulandığında Eş.(2-15) elde edilir.

$$\vec{k} \times (\vec{k} \times \vec{E}) = \vec{k}(\vec{k} \cdot \vec{E}) - k^2\vec{E} \quad (2-15)$$

$$i\vec{k}(\vec{k} \cdot \vec{E}) - ik^2\vec{E} = \omega\mu_o(-ne\vec{v}) - i\omega^2\mu_o\epsilon_o\vec{E} \quad (2-16)$$

Boş uzayda dalga hızı, $c^2 = \frac{1}{\mu_o\epsilon_o}$ şeklinde ifade edilir. Bu ifade, Eş.(2-16)'da yerine koyulursa:

$$\left(\frac{i\omega en\vec{v}}{\epsilon_o c^2}\right) = \frac{\omega^2}{c^2}\vec{E} + \vec{k}(\vec{k} \cdot \vec{E}) - k^2\vec{E} \quad (2-17)$$

elde edilir. Bundan sonra hız vektörünün (\vec{v}) x, y ve z bileşenlerinin tanımlanması gerekmektedir. Hız vektörünü ifade edebilmek için, dalga yayılım vektörü (\vec{k})

tanımlanır. Tez çalışmasında dalga x-z düzleminde yayılım gösterdiğinden dalga yayılım vektörü Eş.(2-18)'deki gibi gösterilebilir:

$$\vec{k} = k \sin \theta \hat{x} + k \cos \theta \hat{z} \quad (2-18)$$

Eş.(2-18) kullanılarak Eş(2.17)'de yer alan $\vec{k}(\vec{k} \cdot \vec{E}) - k^2 \vec{E}$ terim aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} \vec{k}(\vec{k} \cdot \vec{E}) - k^2 \vec{E} &= (k \sin \theta \hat{x} + k \cos \theta \hat{z}) \{ (k \sin \theta \hat{x} + k \cos \theta \hat{z}) \cdot (E_x \hat{x} + E_y \hat{y} + E_z \hat{z}) \} \\ &- k^2 (E_x \hat{x} + E_y \hat{y} + E_z \hat{z}) \end{aligned} \quad (2-19)$$

Eş.(2-19)'un sağ tarafında kalan eşitlikler birbirleriyle çarpılırsa yeni eşitlik elde edilir.

$$\begin{aligned} \vec{k}(\vec{k} \cdot \vec{E}) - k^2 \vec{E} &= (k^2 \sin^2 \theta E_x \hat{x} + k^2 \sin \theta \cos \theta E_z \hat{x}) - k^2 E_y \hat{y} \\ &- k^2 (E_z + E_x \cos \theta \sin \theta + E_z \cos^2 \theta) \hat{z} \end{aligned} \quad (2-20)$$

Eş.(2-20) elde edildikten sonra hız vektörlerinin x, y ve z bileşenleri tanımlanabilir.

$$\left(\frac{ienv_x}{\varepsilon_0 \omega} \right) = E_x \left(1 - \frac{k^2 c^2}{\omega^2} \cos^2 \theta \right) + \frac{k^2 c^2}{\omega^2} \cos \theta \sin \theta E_z \quad (2-21)$$

$$\left(\frac{ienv_y}{\varepsilon_0 \omega} \right) = \left(1 - \frac{k^2 c^2}{\omega^2} \right) E_y \quad (2-22)$$

$$\left(\frac{ienv_z}{\varepsilon_0 \omega} \right) = E_z + \frac{k^2 c^2}{\omega^2} (\sin \theta E_x - \sin \theta E_z) \quad (2-23)$$

Hız vektörünün x (Eş.2-21), y (Eş.2-22) ve z (Eş.2-23) bileşenleri elde edildikten sonra matris formunda yazılabilir. Matris formunda yazılmasından önce kırılma indisi $\eta = \frac{kc}{\omega}$ olduğu için $\frac{k^2 c^2}{\omega^2}$ ifadesi yerine η^2 ifadesi kullanılmıştır.

$$\left(\frac{ien}{\varepsilon_0 \omega} \right) \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1 - \eta^2 \cos^2 \theta) & 0 & \eta^2 \sin \theta \cos \theta \\ 0 & (1 - \eta^2) & 0 \\ \eta^2 \sin \theta \cos \theta & 0 & (1 - \eta^2 \sin^2 \theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \quad (2-24)$$

Hız vektörü matrisini elde edildikten sonra manyetik alan ifadesi tanımlanır. Plazma içerisindeki toplam manyetik alan:

$$B(\vec{r}, t) = \vec{B}_0 + \vec{B}_w(\vec{r}, t) \quad \vec{B}_w \ll \vec{B}_0 \quad (2-25)$$

elde edilir. Dalganın manyetik alanı (\vec{B}_w), dışarıdan uygulanan manyetik alandan (\vec{B}_0) oldukça küçük olduğu için ihmal edilebilir. Bu nedenle Eş.(2-25) şu şekilde ifade edilebilir:

$$B(\vec{r}, t) = \vec{B}_0 \quad (2-26)$$

Eş.(2-26), Eş.(2-11)'de yerine konulduğu zaman aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$i\omega m \vec{v} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}_0) - m v_{en} \vec{v} \quad (2-27)$$

Eş.(2-27)'nin sağ tarafında yer alan plazma çarpışma frekansı (v_{en}) her yönde aynı olacağı varsayıldığı için skaler bir değerdir.

Dışarıdan uygulanan manyetik alan tez çalışması kapsamında sadece +z yönünde olduğu varsayıldığı için $\vec{B}_0 = B_0(0, 0, 1)$ şeklinde ifade edilebilir. Bu durumda, Eş.(2-27)'deki $\vec{v} \times \vec{B}_0$ vektör çarpımını şu şekilde hesaplanabilir:

$$\vec{v} \times \vec{B}_0 = \begin{pmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ v_x & v_y & v_z \\ 0 & 0 & B_0 \end{pmatrix} = B_0(v_y \hat{x} - v_x \hat{y}) \quad (2-28)$$

Eş.(2-28)'nin x bileşeni, Eş.(2-29) ile gösterilebilir:

$$i\omega m v_x = e(\vec{E} + v_y B_0) - m v_{en} v_x \quad (2-29)$$

Eşitliğin her iki tarafı i ile çarpılırsa Eş.(2-30) elde edilir:

$$\omega m v_x = -ie(\vec{E} + v_y B_0) + i m v_{en} v_x \quad (2-30)$$

Eş.(2-30)'un her iki tarafı ωm bölünürse Eş.(2-31) elde edilir:

$$\left(1 - \frac{i v_{en}}{\omega}\right) v_x + i \frac{e B_0}{\omega m} v_y = -\frac{ie}{\omega m} E_x \quad (2-31)$$

Eş.(2-28)'nin y bileşeni ve z bileşeni elde edilir [30]:

$$\left(-i \frac{e B_0}{\omega m}\right) v_x + \left(1 - \frac{i v_{en}}{\omega}\right) v_y = -\frac{ie}{\omega m} E_y \quad (2-32)$$

$$\left(1 - \frac{iv_{en}}{\omega}\right)v_z = -\frac{ie}{\omega m}E_z \quad (2-33)$$

Bundan sonra yapılacak hesaplamaların daha kolay yapılabilmesi için bazı eşitlikler harflerle tanımlanmıştır:

$$U = \left(1 - \frac{iv_{en}}{\omega}\right); \quad Y = \frac{eB_0}{\omega m} = \frac{\omega_{ce}}{\omega}; \quad X = \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (2-34)$$

Y , manyetik alan etrafındaki elektron jiro frekansının (ω_{ce}) dalga frekansına oranıdır. X , plazma frekansının (ω_p) karesinin dalga frekansının karesine oranıdır. U ifadesinin denkleminde yer alan i karmaşık sayısı dalganın sönümlendiğini göstermektedir. Çünkü çarpışmalar gelen dalganın enerjisini harcamaktadır. Eş.(2-31), Eş.(2-32), Eş.(2-33) ile tanımlanan ifadelerle U , Y ve X değerleri yerleştirildiğinde şu denklemler elde edilir:

$$Uv_x + iYv_y = -\frac{ie}{\omega m}E_x \quad (2-35)$$

$$-iYv_x + Uv_y = -\frac{ie}{\omega m}E_y \quad (2-36)$$

$$Uv_z = -\frac{ie}{\omega m}E_z \quad (2-37)$$

Bu eşitlikler kullanılarak kuvvet denklemi yazılır:

$$\begin{pmatrix} U & iY & 0 \\ -iY & U & 0 \\ 0 & 0 & U \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = -\frac{ie}{\omega m} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \quad (2-38)$$

Çıkan matris formundan sonuca gidebilmesi için v matrisi yalnız bırakılabilir. Bu işlemi yapmak için matris formunun her iki tarafı U ve Y matrisine bölünür:

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = -\frac{ie}{\omega m U(U^2 - Y^2)} \begin{pmatrix} U^2 & -iUY & 0 \\ iUY & U^2 & 0 \\ 0 & 0 & (U^2 - Y^2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \quad (2-39)$$

Eş.(2-39)'da yer alan v matrisi yerine Eş.(2-24)'teki matris formu yazılırsa Eş.(2-40) elde edilir.

$$\begin{aligned}
& \begin{pmatrix} (1 - \eta^2 \cos^2 \theta) & 0 & \eta^2 \sin \theta \cos \theta \\ 0 & (1 - \eta^2) & 0 \\ \eta^2 \sin \theta \cos \theta & 0 & (1 - \eta^2 \sin^2 \theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \\
& = - \left(\frac{ien}{\epsilon_0 \omega} \right) \left(\frac{-ie}{\omega m U (U^2 - Y^2)} \right) \begin{pmatrix} U^2 & -iUY & 0 \\ iUY & U^2 & 0 \\ 0 & 0 & (U^2 - Y^2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{2-40}$$

Eş.(2-40)'da $\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{m\epsilon_0}}$ ifadesi yazılırsa matris formunun yeni hali aşağıdaki gibi olacaktır:

$$\begin{pmatrix} (1 - \eta^2 \cos^2 \theta) & 0 & \eta^2 \sin \theta \cos \theta \\ 0 & (1 - \eta^2) & 0 \\ \eta^2 \sin \theta \cos \theta & 0 & (1 - \eta^2 \sin^2 \theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2 U (U^2 - Y^2)} \right) \begin{pmatrix} U^2 & -iUY & 0 \\ iUY & U^2 & 0 \\ 0 & 0 & (U^2 - Y^2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \tag{2-41}$$

$\frac{\omega_p^2}{\omega^2} = X$ eşitliği Eş.(2-41)'de yazılırsa matris formunun yeni hali aşağıdaki gibi olacaktır:

$$\begin{pmatrix} (1 - \eta^2 \cos^2 \theta) & 0 & \eta^2 \sin \theta \cos \theta \\ 0 & (1 - \eta^2) & 0 \\ \eta^2 \sin \theta \cos \theta & 0 & (1 - \eta^2 \sin^2 \theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = \left(\frac{X}{U (U^2 - Y^2)} \right) \begin{pmatrix} U^2 & -iUY & 0 \\ iUY & U^2 & 0 \\ 0 & 0 & (U^2 - Y^2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \tag{2-42}$$

Eş.(2-42) E_x, E_y, E_z cinsinden toplanabilir:

$$\begin{pmatrix} (1 - \eta^2 \cos^2 \theta) - \frac{XU}{(U^2 - Y^2)} & -\frac{iXY}{(U^2 - Y^2)} & \eta^2 \sin \theta \cos \theta \\ -\frac{iXY}{(U^2 - Y^2)} & \left(1 - \eta^2 - \frac{XU}{(U^2 - Y^2)} \right) & 0 \\ \eta^2 \sin \theta \cos \theta & 0 & \left(1 - \eta^2 \sin^2 \theta - \frac{X}{U} \right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = 0 \tag{2-43}$$

Matrisi yapısını daha basit hale getirmek için bazı eşitlikler yine harflerle tanımlanır [30]:

$$S = 1 - \frac{XU}{(U^2 - Y^2)}, \quad D = -\frac{XY}{(U^2 - Y^2)}, \quad P = 1 - \frac{X}{U} \tag{2-44}$$

S, P ve D ifadeleri matris formunun içerisinde yazıldıktan sonra Eş.(2-43)'ün yeni hali aşağıdaki gibi olacaktır:

$$\begin{pmatrix} (S - \eta^2 \cos^2 \theta) & 0 & \eta^2 \sin \theta \cos \theta \\ -iD & (S - \eta^2) & 0 \\ \eta^2 \sin \theta \cos \theta & 0 & (P - \eta^2 \sin^2 \theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = 0 \quad (2-45)$$

Elde edilen bu matrisin determinantı alınıp sıfıra eşitlenir.

$$(S - \eta^2 \cos^2 \theta)[(S - \eta^2)(P - \eta^2 \sin^2 \theta)] + iD(iD)(P - \eta^2 \sin^2 \theta) + \eta^2 \sin \theta \cos \theta (S - \eta^2 \sin^2 \theta) = 0 \quad (2-46)$$

Elde edilen eşitlikteki çarpanlar çarpılıp yeniden yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilir:

$$(S - \eta^2 \cos^2 \theta)(SP - S\eta^2 \sin^2 \theta - P\eta^2 + \eta^4 \sin^2 \theta) - D^2 P + D^2 \eta^2 \sin^2 \theta - \eta^4 \sin^2 \theta \cos^2 \theta (S - \eta^2) = 0 \quad (2-47)$$

Bu denklem açıldığında koyu renkli terimler birbirini götürmektedir:

$$(S^2 P - S^2 \eta^2 \sin^2 \theta - SP\eta^2 + S\eta^4 \sin^2 \theta) - SP\eta^2 \cos^2 \theta + S\eta^4 \sin^2 \theta \cos^2 \theta + P\eta^4 \cos^2 \theta - \eta^6 \sin^2 \theta \cos^2 \theta - D^2 P + D^2 \eta^2 \sin^2 \theta - S\eta^4 \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \eta^6 \sin^2 \theta \cos^2 \theta = 0 \quad (2-48)$$

Elde edilen denklem düzenlenirse aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\eta^4 (P \cos^2 \theta + S \sin^2 \theta) - \eta^2 (S^2 \sin^2 \theta + SP(1 + \cos \theta) - D^2 \sin^2 \theta) + P(S^2 - D^2) = 0 \quad (2-49)$$

$$\eta^4 (P \cos^2 \theta + S \sin^2 \theta) - \eta^2 ((S^2 - D^2) \sin^2 \theta + SP(1 + \cos \theta)) + P(S^2 - D^2) = 0 \quad (2-50)$$

Elde edilen bu denklem için kırılma indisini (η) bulmak için yukarıda S , P ve D 'ye ilaveten $R=S+D$ ve $L=S-D$ ifadeleri katılarak Eş.(2-50) daha basit hale getirilebilir. R ve L ifadelerinin çarpımı Eş.(2-50)'de yer alan $(S^2 - D^2)$ eşit olacaktır.

$$\eta^4 (P \cos^2 \theta + S \sin^2 \theta) - \eta^2 (RL \sin^2 \theta + SP(1 + \cos \theta)) + PRL = 0 \quad (2-51)$$

Elde edilen eşitlik 4. dereceden bir denklemdir. Eş.(2-51)'i daha basit hale getirmek için $A = (P \cos^2 \theta + S \sin^2 \theta)$, $B = (RL \sin^2 \theta + SP(1 + \cos \theta))$, $C = PRL$ eşitlikleri kullanıp eşitlik yeniden yazıldığında yeni denklem şu şekilde olacaktır:

$$A\eta^4 - B\eta^2 + C = 0 \quad (2-52)$$

Eş.(2-52)'nin her iki tarafı $A\eta^2$ ile toplandığında;

$$A\eta^4 - B\eta^2 + A\eta^2 + C = A\eta^2 \quad (2-53)$$

elde edilir. Bu durumda η^2 terimini bulabilmek için $\eta^2 = \frac{B}{2A} \pm \frac{1}{2A} \sqrt{B^2 - 4AC}$ kuadratik çözümü kullanılabilir [30]. Bu çözüm Eş.(2-53)'te yerine konulursa;

$$\eta^2 = \frac{A\eta^2 - C}{A\eta^2 + A - B} = \frac{[B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}] - 2C}{[\pm \sqrt{B^2 - 4AC}] + 2A - B} \quad (2-54)$$

elde edilir. Eş.(2-54) düzenlenirse;

$$\eta^2 = 1 - \frac{2(A-B+C)}{2A-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}} \quad (2-55)$$

elde edilir. Kırılma indisi değerinden plazmanın karmaşık dielektrik sabiti şu şekilde gösterilebilir.

$$\eta^2 = \tilde{\epsilon}_r \quad (2-56)$$

Eş.(2-55) ve Eş.(2-56) kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\tilde{\epsilon}_r = 1 - \frac{2(A-B+C)}{2A-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}} \quad (2-57)$$

A , B ve C denklemlerinde yer alan $S = 1 - \frac{XU}{(U^2 - Y^2)}$, $D = -\frac{XY}{(U^2 - Y^2)}$, $P = 1 - \frac{X}{U}$ eşitlikleri Eş.(2-44)'te tanımlanmıştı. S , P ve D denklemlerinde yer alan $U = \left(1 - \frac{iv_{en}}{\omega}\right)$; $Y = \frac{\omega_{ce}}{\omega}$; $X = \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$ eşitlikleri ise Eş.(2-34)'te belirtilmişti. Önce U , Y ve X denklemleri, S , P ve D içerisine yazılıp, S , P ve D elde edilir. Sonra elde edilen S , P ve D denklemleri A , B ve C denklemleri içerisinde yazılır. Matematiksel işlemler yapıldıktan sonra düzlem dalganın plazma katmanına geldiği durumda plazmanın sahip olduğu karmaşık dielektrik sabiti (Appleton formülü) elde edilir [8]:

$$\tilde{\epsilon}_r = 1 - \frac{(\omega_p / \omega)^2}{\left[1 - j \frac{v_{en}}{\omega} - \frac{(\omega_{ce} / \omega)^2 \sin^2 \theta}{2 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} - j \frac{v_{en}}{\omega} \right)} \right] \pm \left[\frac{(\omega_{ce} / \omega)^4 \sin^4 \theta}{4 \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} - j \frac{v_{en}}{\omega} \right)^2} + \frac{\omega_{ce}^2}{\omega^2} \cos^2 \theta \right]^{1/2}} \quad (2-58)$$

Eş.(2-58)'de yer alan parametreler şu şekilde tanımlanabilir:

$\tilde{\epsilon}_r$ plazmanın karmaşık dielektrik sabitini,

ω_p plazma frekansını,

ω_{ce} elektron jiro frekansını,

ν_{en} plazma içerisindeki çarpışma frekansını,

ω gelen dalganın açısal frekansını,

θ ise elektromanyetik dalganın geliş açısını

tanımlamaktadır.

Plazma çarpışma frekansı (ν_{en}), plazma içerisinde yer alan elektronlar ile nötr gazların çarpışma hızını tanımlamaktadır. Plazma içerisinde elektron çarpışması gerçekleştiği zaman, elektromanyetik dalga plazma içerisinde yayılırken sönmülmeye başlamaktadır. Bu yüzden, plazmanın çarpışma frekansı artıca, yansıyan gücün azalması beklenmektedir. Bununla birlikte elektromanyetik dalga plazma içerisine girdikten sonra, plazma içerisindeki çarpışma sayısı artmaktadır.

Plazmanın sahip olduğu hacim içinde elektronlar ve iyonlar eşit dağılıma sahiptir. Ancak herhangi bir sebepten dolayı plazmanın dengesi değişirse, güçlü bir elektrostatik kuvvet ortaya çıkacak ve bu durum elektronları harekete geçireceğinden plazma içerisinde bir dalgalanma meydana gelecektir. Bu dalgalanma kısa bir süre sonra plazma denge durumuna geçeceğinden sona erecektir. Plazma içerisinde bu ve buna benzer meydana gelebilecek dalgalanmaların frekansı, plazma frekansı (ω_p) olarak tanımlanmıştır. Plazma frekansı nümerik olarak şu şekilde tanımlanmıştır [7]:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_0 e^2}{m \epsilon_0}} \quad (2-59)$$

Eş.(2-59) ile gösterilen n_0 plazmanın denge durumundaki elektron yoğunluğunu ifade etmektedir.

Plazmanın dielektrik sabitini hesaplamak için kullanılan bir parametre olan elektron jiro frekansı (ω_{ce}) aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir [7]:

$$\omega_{ce} = \frac{eB_0}{m} \quad (2-60)$$

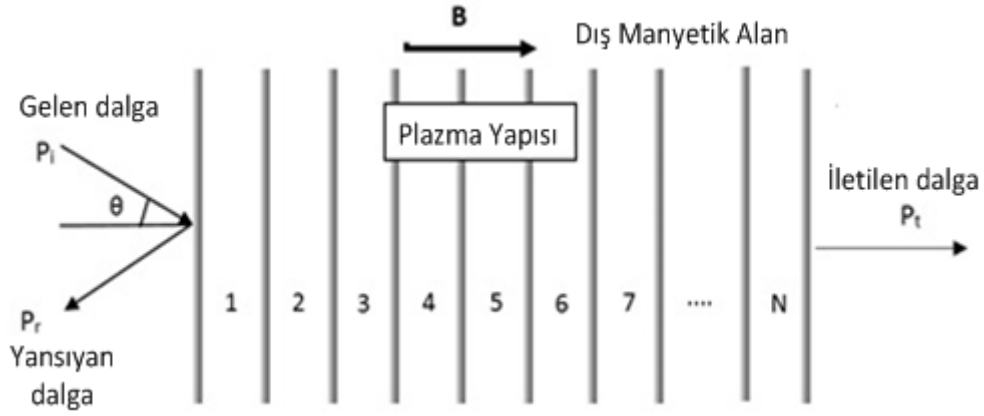
Eş.(2-60) ile gösterilen B_0 dış manyetik alan şiddetini tanımlamaktadır. Manyetik alan uygulanmış bölgede hareket eden elektronlar, gelen bir elektromanyetik dalga olmasa bile elektron jiro frekansı sayesinde dönebilmektedir. Plazma ortamına manyetik alan uygulanması elektron jiro frekansını ortaya çıkarmakta ve bu durum manyetik alan uygulanmayan durumlara göre elektron jiro frekansını plazmayı kontrol etmek veya modellemek için kullanılan bir parametre haline getirmektedir.

Eş.(2-58)'de yer alan \pm işareti, polarizasyon durumuna göre iki farklı çözüm olabileceğini belirtmektedir. '-' işareti, sağ-el polarizasyon için kullanılırken, '+' işaret sol-el polarizasyon için kullanılmaktadır. Dış manyetik alanın plazmaya dik uygulanması durumunda sol-el polarizasyon oluşurken, plazmaya paralel uygulanması durumunda sağ-el polarizasyon oluşmaktadır. Bu çalışmada dış manyetik alan plazma boyunca paralel uygulandığından sağ-el polarizasyon kullanılmıştır.

Dik geliş açısına sahip düzlem dalga için plazmanın karmaşık dielektrik sabiti Eş.(2-58) formülünde $\theta = 0^\circ$ yazılarak elde edilebilir:

$$\tilde{\epsilon}_r = 1 - \frac{(\omega_p / \omega)^2}{1 - j \frac{\nu_{en}}{\omega} - \frac{\omega_{ce}}{\omega}} \quad (2-61)$$

Bu tez çalışmasında ince alt katmanlara ayrılmış plazma yapısı irdelenmiştir. Her bir alt katmanın elektron yoğunluğunun farklı olabileceği göz önüne alınmıştır. Plazma yapısına dışarıdan uygulanan manyetik alanın yönü ve çok katmanlı plazma yapısı Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Dış manyetik alan plazma yapısına paralel alınırken, düzlem dalganın plazma yapısına dik açı ve eğik açılarda geldiği varsayılmıştır.



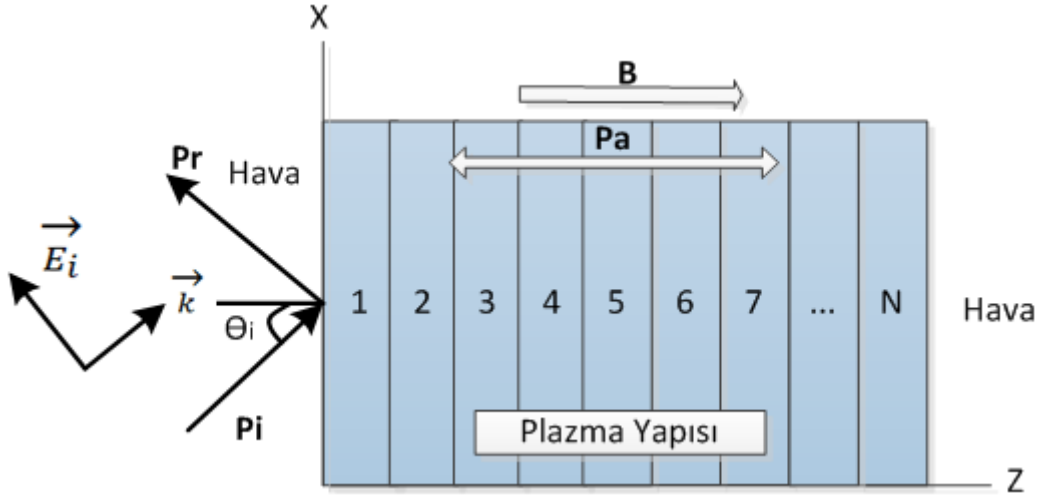
Şekil 2.1. Çok katmanlı plazma yapısı

Plazma yapısına gelen elektromanyetik dalganın bir kısmı alt katman arayüzlerinden yansırken bir kısmı iletimine devam etmektedir. Yansıyan elektromanyetik dalga plazma kalınlığı boyunca sönmümlenerek, plazma ortamının dışına çıkmaktadır. Plazma kalınlığı boyunca ilerleyen elektromanyetik dalga ise her alt katman arayüzünde zayıflamaya devam ederek en son arayüzden düşük bir güç seviyesi ile ayrılmaktadır. Yansıyan ve iletilen dalga dışında geriye kalan dalga ise plazma tarafından soğurulmaktadır.

Literatür araştırmalarında plazma yapılarının karakteristik özellikleri incelenirken plazmaya özel kritik parametreler mevcuttur. Bu tez çalışması kapsamında çarpışma frekansı, plazma elektron yoğunluğu, plazma frekansı ve elektron jiro frekansı parametreleri için farklı değerler kullanılarak nümerik analizler yapılmıştır.

2.2. Modellenen Plazmanın Yansıma, İletim ve Soğurma Gücü Formülleri

Plazmanın karmaşık dielektrik sabiti belirlendikten sonra hem dik hem de eğik açılarda gelen düzlem dalganın plazma ile etkileşimi incelenmiştir. Plazma içerisindeki düzlem dalga etkileşimini görebilmek adına plazmanın yansıma, iletim ve soğurma karakteristiklerinin ortaya çıkarılması gerekmektedir. Bu karakteristikleri görebilmek adına soğuk, çarpışmalı, zayıf iyonize, homojen olmayan ve manyetize plazma ortamı modellenmiş ve ilgili formüller çıkarılmıştır.



Şekil 2.2. Plazma katmanının elektromanyetik dalga ile etkileşimi

Şekil 2.2 ile gösterildiği gibi P_i gelen elektromanyetik dalganın gücünü, P_r yansıyan elektromanyetik dalganın gücünü, P_a soğurulan elektromanyetik dalganın gücünü, P_t ise iletilen elektromanyetik dalganın gücünü göstermektedir. \vec{E}_i gelen elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşeni gösterirken, \vec{k} gelen elektromanyetik dalganın yayılım vektörünü tanımlamaktadır. Plazma içerisinde yansıyan dalganın gücünün bulunabilmesi için her bir arayüzdeki yansımaya katsayıları hesaplanmalıdır. Bu çalışmada gelen elektromanyetik dalganın elektrik alan vektörü plazma katmanına dik olacak şekilde yayılım yapacağı varsayılmıştır. Bu durumda s-kutuplaşması oluşacaktır. Oluşan s-kutuplaşmasına göre yansımaya katsayısı Fresnel formülü [31] kullanılarak hesaplanabilir:

$$\Gamma(i+1) = \frac{n_i \cos \theta_i - \left(n_{i+1} \times \left(1 - \frac{n_i}{n_{i+1}} \sin^2 \theta_i \right)^{1/2} \right)}{n_i \cos \theta_i + \left(n_{i+1} \times \left(1 - \frac{n_i}{n_{i+1}} \sin^2 \theta_i \right)^{1/2} \right)} \quad (2-62)$$

Eş.(2-62)'de yer alan n_i ortamın i . kırılma indisini tanımlarken, θ_i gelen elektromanyetik dalganın plazma katmanı ile yaptığı açığı tanımlamaktadır. Kırılma indisi değeri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$n_i = \sqrt{\mu_i \epsilon_i} \quad (2-63)$$

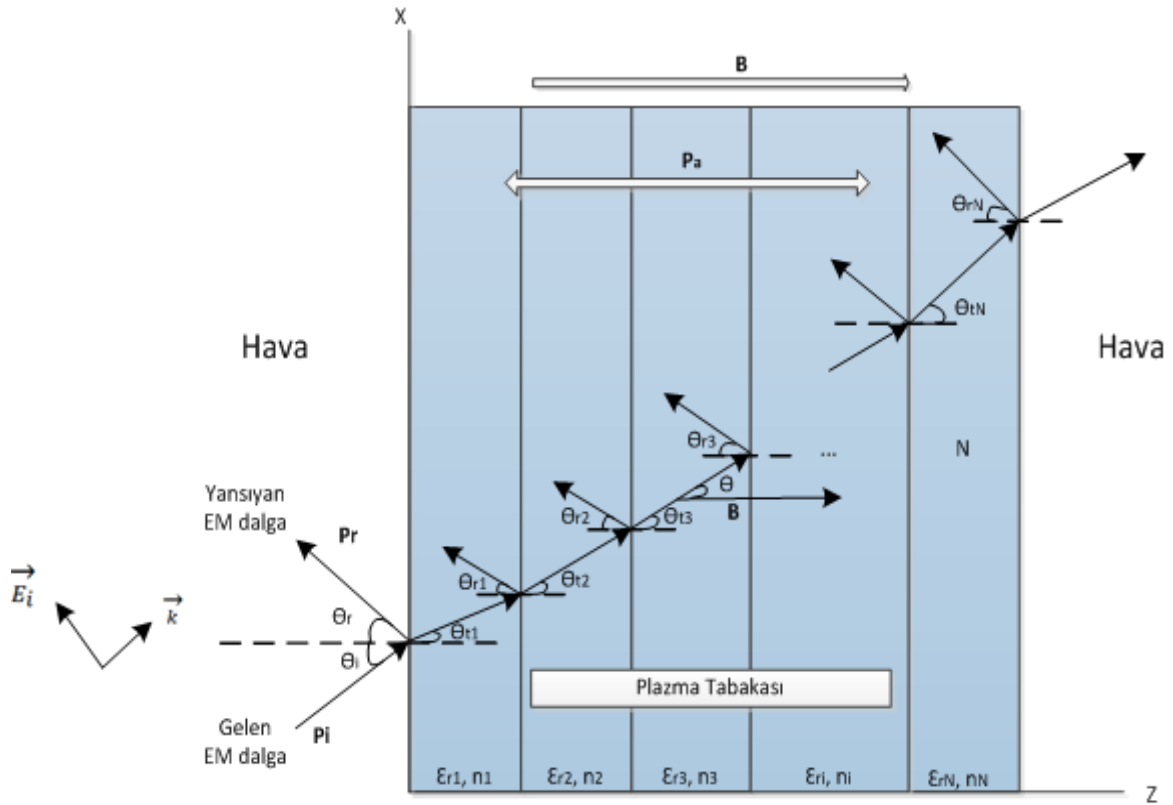
Kırılma indis değeri hava için 1'e eşittir. Plazmanın manyetik geçirgenliği de 1 olarak alınmıştır. Bu durumda Eş.(2-63)'te $\mu_r = 1$ yazılarak plazma için yeni kırılma indisi değeri şu şekilde olacaktır:

$$n_r = \sqrt{\tilde{\epsilon}_r} \quad (2-64)$$

Elde edilen bu bilgiler ışığında Eş.(2-64)'ü Eş.(2-62)'de tanımlanan Fresnel formülü içerisine yerleştirilirse plazma ortamı için yansımaya katsayısı formülü elde edilir:

$$\Gamma(i+1) = \frac{\sqrt{\tilde{\epsilon}_r(i)} \cos \theta_i - \left(\sqrt{\tilde{\epsilon}_r(i+1)} \times \left(1 - \frac{\tilde{\epsilon}_r(i)}{\tilde{\epsilon}_r(i+1)} \sin^2 \theta_i \right)^{1/2} \right)}{\sqrt{\tilde{\epsilon}_r(i)} \cos \theta_i + \left(\sqrt{\tilde{\epsilon}_r(i+1)} \times \left(1 - \frac{\tilde{\epsilon}_r(i)}{\tilde{\epsilon}_r(i+1)} \sin^2 \theta_i \right)^{1/2} \right)} \quad (2-65)$$

(i+1). arayüzdeki yansımaya katsayısı bulunmak istenirse Eş.(2-65) kullanılarak elde edilebilir.



Şekil 2.3. Eğik açı ile gelen elektromanyetik dalganın çok katmanlı plazma ortamı içerisindeki yayılımı

Elektromanyetik dalga plazma katmanları içerisinde yayılım gösterirken, her bir alt katman arayüzünde Şekil 2.3'te gösterildiği gibi yansımalar ve kırılmalar gerçekleşecektir. Havadan gelen elektromanyetik dalga, ilk plazma ortamı içerisine girmeyecek ve sönmülmmeden yansıyıp tekrar havada yayılmaya devam edecektir. Her bir alt katman arayüzünde yansımalar olacaktır. Her bir alt katmanın

zayıflama katsayısı dalganın yayılma sabitinden bulunur. Dalganın yayılma sabitini hesaplamak için Eş.(2-66) kullanılabilir:

$$\gamma^2 = \tilde{\epsilon}_r \frac{\omega^2}{c^2} \quad (2-66)$$

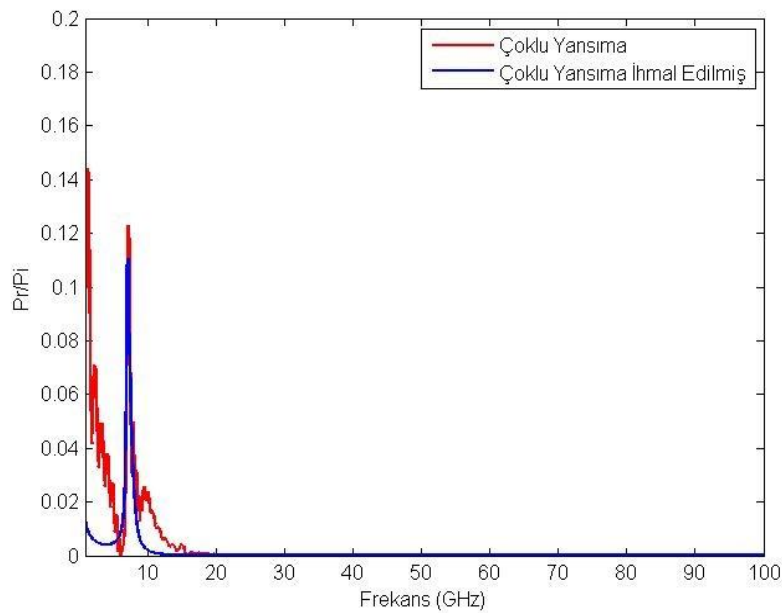
Zayıflama katsayısı dalganın yayılma sabitinin reel kısmına eşittir.

$$\alpha = Re(\gamma) \quad (2-67)$$

Homojen olmayan plazma modellenirken N tane özdeş katmana bölünmüştür. Her bir alt katmanın dielektrik sabiti ve elektron yoğunluğu katman kalınlığı boyunca sabit alınmıştır.

Elektromanyetik dalganın geçtiği arayüz sayısı arttıkça yansımalar sayısı artacaktır. Ancak bu yansımaların sayısı arttıkça toplam yansımaya katkısı oldukça düşük olacaktır. Çünkü çoklu yansımaların sayısı arttıkça toplam yansımaya katkı yapan terimler oldukça küçülmektedir. Çoklu yansımaların sayısı sonsuza yaklaştığında ise toplam yansımaya etkileri sıfıra yakın olmaktadır.

Tez kapsamında plazmanın kalınlığı 12 cm, elektron yoğunluğu $5 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, çarpışma frekansı 20 GHz, dış manyetik alan değeri 0.5 T olduğu durum için çoklu yansımalar etkisi incelenmiş ve Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Çoklu yansımaların katkısı

Kullanılan plazma parametreleri ışığında çoklu yansımanın 5-15 GHz arasındaki frekanslarda toplam yansımaya katkısının en fazla %2 olduğu görülmüştür. 1 GHz ile 5 GHz arasında bu katkı %2 ile %5 arasında değişirken, 1 GHz ve altındaki frekanslarda frekans azaldıkça çoklu yansımaya katkısı artmakta ve yaklaşık %13'ü bulmaktadır. 15 GHz ve üzeri frekanslarda ise çoklu yansımaların etkisi yok denecek kadar azdır. Elde edilen bu veriler ışığında çoklu yansımaya katkısının özellikle 1 GHz ve üzeri frekanslarda ihmal edilebilecek seviyede olduğu değerlendirildiği için bu tez çalışmasında göz ardı edilmiştir.

Çoklu yansımaların etkisi olmadan yapılacak hesaplamalara plazmanın ilk arayüzünden yansıyan dalganın gücü bulunarak başlanabilir:

$$P_{r1} = P_i \times \Gamma(1)^2 \quad (2-68)$$

İletilen dalganın gücü, gelen ve yansıyan güçlerin farkından bulunabilir:

$$P_{t1} = P_i - P_{r1} = P_i - P_i \times \Gamma(1)^2 = P_i(1 - \Gamma(1)^2) \quad (2-69)$$

Gelen dalga plazma yapısı içerisindeki ikinci katman arayüzüne ulaştığında iletilen dalganın gücü:

$$P_{t2} = e^{\frac{-2\alpha(1)d}{\cos \theta_{t,j}}} P_i(1 - \Gamma(1)^2) \quad (2-70)$$

elde edilir. Eş.(2-70)'te α zayıflama katsayısını, d her bir özdeş alt katmanın kalınlığını ifade etmektedir. $\cos \theta_{t,j}$, gelen dalganın j . plazma katmanı ile yaptığı kırılma açısıdır. Snell yasası uygulanarak $\cos \theta_{t,j}$ değeri aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\frac{\sin \theta_{t,j}}{\sin \theta_{t,j+1}} = \frac{n_{j+1}}{n_j} \quad (2-71)$$

$\theta_{t,j}$, gelen dalganın j . katmanın normali ile yaptığı açı iken, n_j j . katmanın kırılma indisine eşittir. Eş.(2-64) kullanılarak Eş.(2-71)'de yerine konulduğunda Eş.(2-72) elde edilir.

$$\frac{\sin \theta_{t,j}}{\sin \theta_{t,j+1}} = \frac{\sqrt{\tilde{\epsilon}_r(j+1)}}{\sqrt{\tilde{\epsilon}_r(j)}} \quad (2-72)$$

Hava ile plazma arayüzünde Snell yasası uygulandığında Eş.(2-73) yazılabilir:

$$1 \times \sin \theta_0 = \sqrt{\tilde{\epsilon}_r(1)} \times \sin \theta_{t1} = \sqrt{\tilde{\epsilon}_r(2)} \times \sin \theta_{t2} = \dots = \sqrt{\tilde{\epsilon}_r(j)} \times \sin \theta_{t,j} = \sqrt{\tilde{\epsilon}_r(j+1)} \times \sin \theta_{t,j+1} \quad (2-73)$$

Havanın kırılma indisi 1 olarak alınıp Snell yasası her bir katman için uygulandığında Eş.(2-73)'te gösterildiği gibi bir eşitlik ortaya çıkacaktır. Bu eşitlik kullanılarak $\cos \theta_{t,j}$ değeri aşağıdaki işlemlerin sırayla uygulanmasıyla elde edilir.

$$\sin \theta_0 = \sqrt{\tilde{\epsilon}_r(j)} \times \sin \theta_{t,j} \quad (2-74)$$

$$\sin^2 \theta_0 = \tilde{\epsilon}_r(j) \times \underbrace{\sin^2 \theta_{t,j}}_{(1-\cos^2 \theta_{t,j})} \quad (2-75)$$

$$\cos^2 \theta_{t,j} = 1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{\tilde{\epsilon}_r(j)} \quad (2-76)$$

$$\cos \theta_{t,j} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{\tilde{\epsilon}_r(j)}} \quad (2-77)$$

Plazma içerisinde iletilen elektromanyetik dalga gücü şu şekilde yazılabilir:

$$P_{r2} = P_{t2} \Gamma(2)^2 = e^{-\frac{4\alpha(1)d}{\cos \theta_{t,2}}} P_i (1 - \Gamma(1)^2) \Gamma(2)^2 \quad (2-78)$$

Dalga'nın yansıyan kısmı en sondaki hava katmanına ulaşana kadar plazma içerisinde sönmülmeye devam eder. Üçüncü arayüzden yansıyıp havaya ulaşan dalga'nın gücü hesaplanır:

$$P_{r3} = P_i e^{-\frac{4\alpha(1)d}{\cos \theta_{t,3}}} (1 - \Gamma(1)^2) e^{-\frac{4\alpha(2)d}{\cos \theta_{t,3}}} (1 - \Gamma(2)^2) \Gamma(3)^2 \quad (2-79)$$

Sonraki arayüzler için benzer şekilde hesaplamalar yapılabilir. Ancak plazmadan yansıyan toplam dalga'nın gücünü her birini tek tek hesaplamak yerine toplamı alınarak Eş.(2-80)'de belirtildiği şekilde hesaplanabilir:

$$P_r = P_{r1} + P_{r2} + P_{r3} + \dots + P_{rn} \quad (2-80)$$

Eş.(2-68), Eş.(2-78) ve Eş.(2-79)'da elde edilen eşitlikler Eş.(2-80)'de yerine konulduğunda toplam yansımanın bir çarpım serisinin toplamı olarak hesaplanabileceği görülmektedir.

$$P_r = P_i \times \Gamma(1)^2 + e^{\frac{-4\alpha(1)d}{\cos\theta_{t,2}}} P_i (1 - \Gamma(1)^2) \Gamma(2)^2 + P_i e^{\frac{-4\alpha(1)d}{\cos\theta_{t,3}}} (1 - \Gamma(1)^2) e^{\frac{-4\alpha(2)d}{\cos\theta_{t,3}}} (1 - \Gamma(2)^2) \Gamma(3)^2 + \dots + P_{rn} \quad (2-81)$$

Eş.(2-81)'i bir çarpım serisinin toplamı olarak ifade edildiğinde Eş.(2-82) elde edilir:

$$P_r = P_i \left\{ |\Gamma(1)|^2 + \left(\sum_{j=2}^n |\Gamma(j)|^2 \prod_{i=1}^{j-1} (1 - \Gamma(i)^2) \exp\left(\frac{-4\alpha(i)d}{\cos\theta_{t,i}}\right) \right) \right\} \quad (2-82)$$

$\cos\theta_{t,i}$, yerine Eş.(2-77) elde edilen ifade yazılırsa toplam yansıyan güç bulunur [12]:

$$P_r = P_i \left\{ |\Gamma(1)|^2 + \left(\sum_{j=2}^n |\Gamma(j)|^2 \prod_{i=1}^{j-1} (1 - \Gamma(i)^2) \exp\left(\frac{-4\alpha(i)d}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2\theta_0}{\epsilon_r(i)}}}\right) \right) \right\} \quad (2-83)$$

Burada d , her bir alt katmanın kalınlığını belirtirken, θ_0 gelen dalganın plazma ile yaptığı açığı ifade etmektedir. Düzlem dalga dik açı ile gelmesi durumunda ($\theta_0 = 0$) aşağıdaki toplam yansıyan güç ifadesi elde edilir:

$$P_r = P_i \left\{ |\Gamma(1)|^2 + \left(\sum_{j=2}^n |\Gamma(j)|^2 \prod_{i=1}^{j-1} (1 - \Gamma(i)^2) \exp(-4\alpha(i)d) \right) \right\} \quad (2-84)$$

Toplam yansıyan gücü ifadesini hem dik açı ile gelen düzlem dalga hem de farklı açılarda gelen düzlem dalga için tanımladıktan sonra, toplam iletilen güç aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$P_t = P_i e^{\frac{-2\alpha(1)d}{\cos\theta_{t,1}}} (1 - \Gamma(1)^2) e^{\frac{-2\alpha(2)d}{\cos\theta_{t,2}}} (1 - \Gamma(2)^2) e^{\frac{-2\alpha(3)d}{\cos\theta_{t,3}}} (1 - \Gamma(3)^2) \dots e^{\frac{-2\alpha(n)d}{\cos\theta_{t,n}}} (1 - \Gamma(n)^2) \quad (2-85)$$

Eş.(2-85) düzenlenirse iletilen güç aşağıdaki gibi ifade edilebilir [11]:

$$P_t = P_i \prod_{i=1}^n \left\{ \exp\left(\frac{-2\alpha(i)d}{\cos\theta_{t,i}}\right) (1 - |\Gamma(i)|^2) \right\} \quad (2-86)$$

Burada $\cos \theta_{t,i}$, yerine Eş.(2-77)'den elde edilen eşitlik yazılırsa toplam iletilen güç aşağıdaki gibi bulunur:

$$P_t = P_i \prod_{i=1}^n \left\{ \exp \left(\frac{-2\alpha(i)d}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{\tilde{\epsilon}_r(i)}}} \right) (1 - |\Gamma(i)|^2) \right\} \quad (2-87)$$

Düzlem dalga dik açı ile gelmesi durumunda ($\theta_0 = 0$) toplam iletilen güç aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

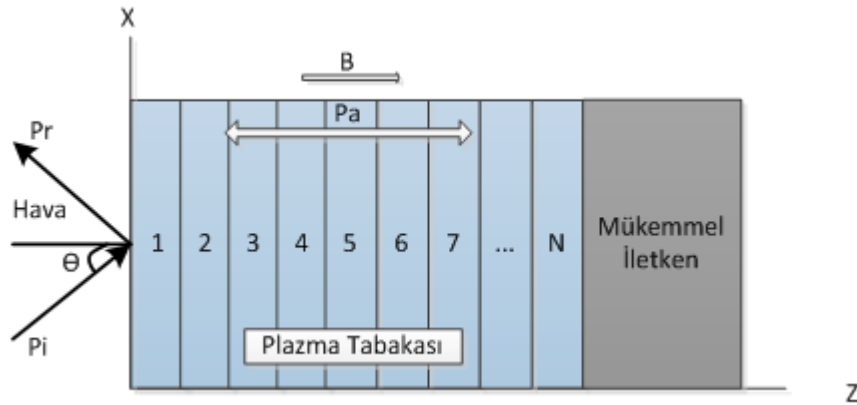
$$P_t = P_i \prod_{i=1}^n \{ \exp(-2\alpha(i)d) (1 - |\Gamma(i)|^2) \} \quad (2-88)$$

Hem dik açı ile gelen düzlem dalga hem de farklı açılarda gelen düzlem dalga için iletilen ve yansıyan elektromanyetik dalgaların güç değerleri bulunduktan sonra plazma katmanı tarafından soğurulan güç aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir:

$$P_a = P_i - P_r - P_t \quad (2-89)$$

2.3. Mükemmel İletkeni Kaplamış Plazma için Formülasyon

Plazma tabakasının mükemmel iletken bir yüzeyi kapladığı durum içinde çalışma yapılmış ve mükemmel iletken yüzeyi kapladığı durum Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Plazma yapısının mükemmel iletken yüzeyi kapladığı durum

Mükemmel iletken, plazma tabakası ile kaplandığı durumda iletilen güç mükemmel iletken içinde sıfır olacaktır. Bu sebeple Eş.(2-87) ile bulunan iletilen güç $P_t = 0$ olacağından soğurulan güç denklemi aşağıdaki gibi olacaktır.

$$P_a = P_i - P_r \quad (2-90)$$

3. ELEKTROMANYETİK DALGANIN FARKLI PLAZMA ORTAMLARI İÇİNDEKİ YAYILIMI

Literatürde sabit elektron yoğunluğuna sahip plazma ortamının farklı açılarda gelen elektromanyetik dalga ile etkileşimine bakıldığı görülmüş ve özellikle plazmanın yansıtma ve iletim performansları irdelenmiştir [12,22]. Tez çalışmasının bu bölümünde ise farklı elektron yoğunluğuna sahip plazma ortamları ile dik ve eğik açılarda plazmaya gelen elektromanyetik dalga etkileşimi ele alınmış ve plazma ortamının soğurma, yansıtma ve iletim özelliklerinin nasıl değiştiği incelenmiştir.

Soğuk, çarpışmalı, zayıf iyonize, homojen olmayan ve manyetize plazma kaplamaları tasarlanmış ve plazma kaplamalarının yansıtma, iletim ve soğurma özellikleri incelenmiştir. Ancak askeri gizleme teknolojisine uygun bir kaplama tasarlanması hedeflendiğinden plazmanın soğurma performansı daha detaylı incelenmiştir. Bu bölümde modellenen farklı plazma kaplamaların karakteristik özellikleri Bölüm 2’de tanımlanan eşitlikler kullanılarak elde edilmiştir.

Farklı elektron yoğunluğuna sahip plazma yapısının hem havadaki hem de mükemmel iletken yüzeyi kapladığı durumlar Bölüm 3.1 ve Bölüm 3.2’de detaylı olarak ele alınmıştır. Bölüm 3.3’te ise elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.1. Dik ve Eğik Açılarda Gelen Elektromanyetik Dalganın Havadaki Plazma Ortamı İçerisindeki Yayılımı

Bu bölümde dik ve eğik açılarda gelen elektromanyetik dalganın havadaki plazma ortamı içerisindeki yayılımı incelenmiştir. Plazma boyunca değişen dört farklı elektron yoğunluğu profili seçilmiştir:

1. Doğrusal artan
2. Doğrusal artan ve sinüsel değişen
3. Çeyrek sinüs ($T/4$)
4. Yarım sinüs ($T/2$)

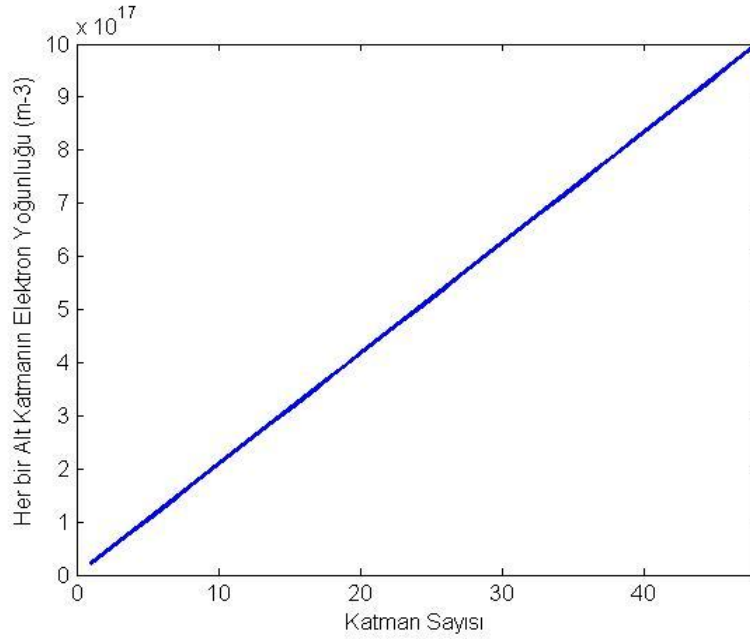
Plazma kalınlığı 12 cm olarak alınmış ve 48 eşit katmana bölünmüştür. Plazmanın çarpışma frekansı 20 GHz olarak seçilmiştir. Dış manyetik alan ise 0.5 T olarak belirlenmiştir.

3.1.1. Elektron Yoğunluğu Doğrusal Artan Plazma Ortamı

Doğrusal artan elektron yoğunluğuna sahip plazmanın en düşük elektron yoğunluğu, $N_{\min} = 2.083 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ 'e eşitken en yüksek elektron yoğunluğu son katmanında olup değeri, $N_{\max} = 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 'e eşittir. Plazma ortamının elektron yoğunluğu değişim fonksiyonu Eş.(3-1) ile ifade edilmiştir:

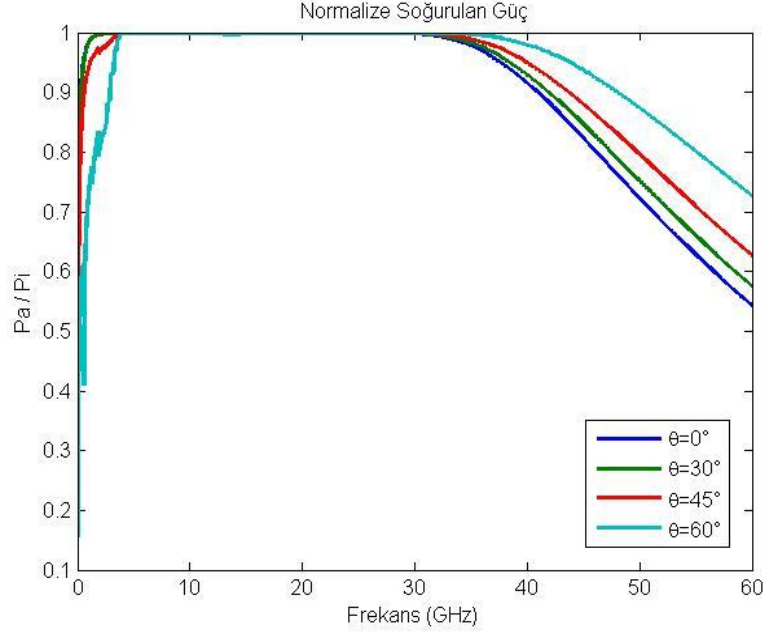
$$N(z) = N_{\max} z/L \quad z \leq L \quad (3-1)$$

Eş.(3-1)'de N ilgili alt katmanın elektron yoğunluğu fonksiyonunu, N_{\max} maksimum elektron yoğunluğunu, L plazma yapısının kalınlığını, z her bir alt katman arayüzünün plazma yüzeyine olan uzaklığı belirtmektedir. Plazma boyunca elektron yoğunluğu değişimi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

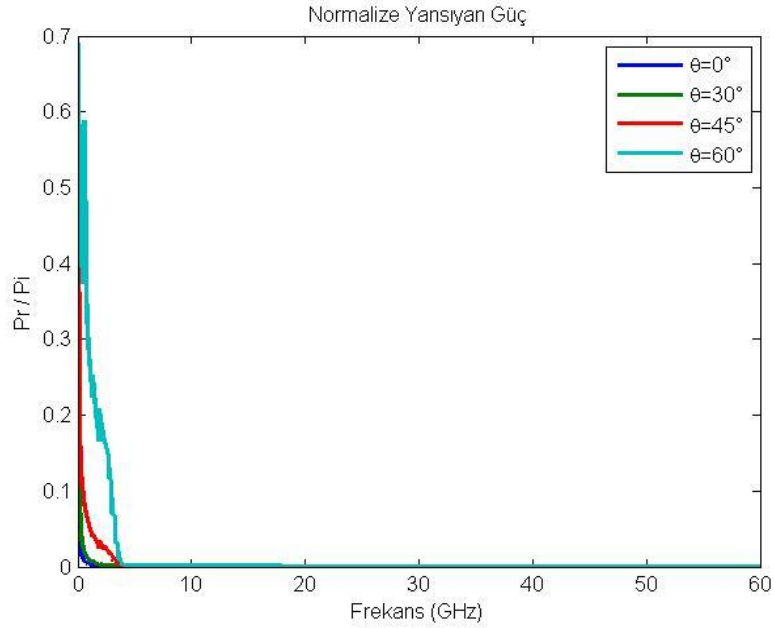


Şekil 3.1. Plazma yapısı boyunca elektron yoğunluğunun doğrusal artan değişimi, $N_{\min} = 2.083 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$, $N_{\max} = 10^{18} \text{ m}^{-3}$

Şekil 3.2 ile elde edilen sonuçlar ışığında gelen elektromanyetik dalganın plazma ile yaptığı açı arttıkça plazmanın soğurduğu gücün yaklaşık 30 GHz ve üzeri frekanslarda arttığı söylenebilir. Plazma ortamı, 3 GHz ile 48 GHz frekans bandı içinde 60°'lik açı ile gelen dalganın gücünü %90 üzerinde soğurmaktadır. 600 MHz ve altındaki frekanslarda ise gelen dalganın plazma ile yaptığı açı arttıkça soğurulan güç azalmaktadır.

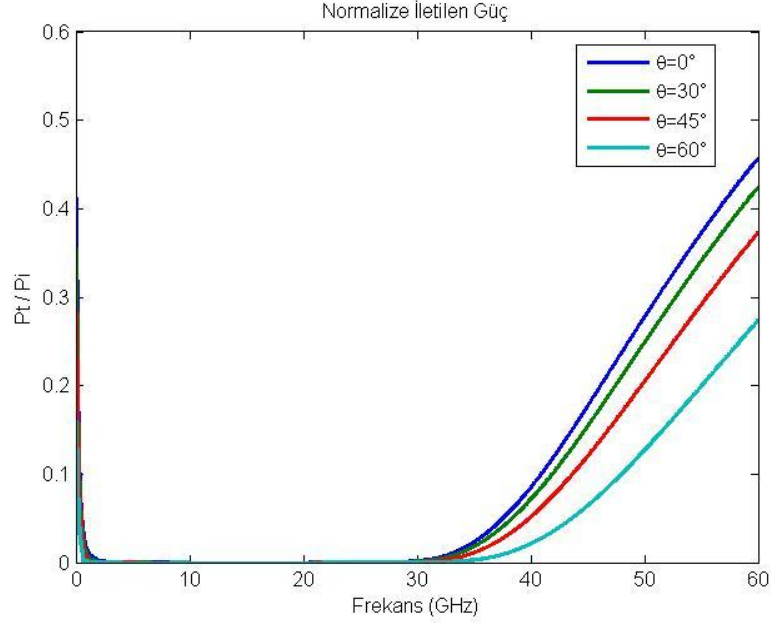


Şekil 3.2. Doğrusal artan elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılarına göre normalize soğurulan güç, $B= 0.5 \text{ T}$, $\nu_{en} = 20 \text{ GHz}$



Şekil 3.3. Doğrusal artan elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılarına göre normalize yansıyan güç, $B= 0.5 \text{ T}$, $\nu_{en} = 20 \text{ GHz}$

Şekil 3.3 ile görüldüğü gibi 5 GHz ve üzeri frekanslarda plazma yapısı gelen dalgayı hemen hemen hiç yansıtmamaktadır. 1 GHz ve altındaki frekanslarda ise açı arttıkça yansıyan güç artmakta ancak çok yüksek seviyelere ulaşmamaktadır.



Şekil 3.4. Doğrusal artan elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılarına göre normalize iletilen güç, $B= 0.5 \text{ T}$, $\nu_{en} = 20 \text{ GHz}$

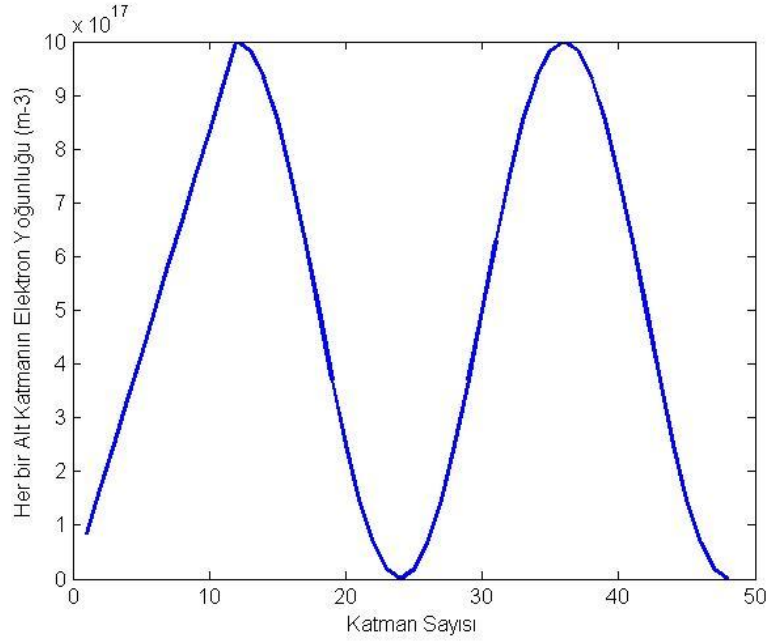
30 GHz ve üzeri frekanslarda iletilen güç, gelen dalganın plazma ile yaptığı açı arttıkça azalmaktadır. 1 GHz ve altındaki frekanslarda ise iletilen güç artmakta ancak düşük seviyelerde olmaktadır.

3.1.2. Doğrusal Artan ve Sinüsel Değişen Elektron Yoğunluğuna Sahip Plazma Ortamı

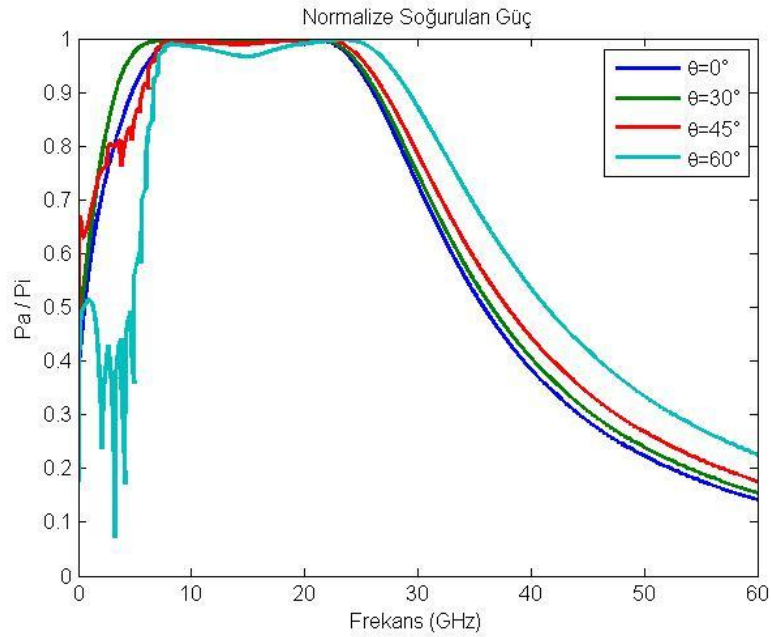
Doğrusal artan ve sinüsel değişen elektron yoğunluğuna sahip plazmanın en düşük elektron yoğunluğu, plazmanın merkezinde ve son katmanında olup değeri $N_{\min} = 5 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ 'e eşittir. Plazmanın en yüksek elektron yoğunluğu plazma kalınlığının dörtte birinde ($N = 12$) ve dörtte üçünde ($N = 36$) olup değeri $N_{\max} = 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 'e eşittir. Plazma ortamının elektron yoğunluğu değişim fonksiyonu Eş.(3-2)'de ifade edilmiştir.

$$N(z) = \begin{cases} N_{\max} z/L' & z < L' \\ N_{\max} (0.5 + 0.5 \sin(\pi(z - L')/(L - L'))) & z > L' \end{cases} \quad (3-2)$$

Eşitlikte tanımlanan L' terimi plazma yapısının dörtte birlik kalınlığını ifade etmektedir. Plazma yapısı boyunca elektron yoğunluğu plazma kalınlığının dörtte birine kadar doğrusal artarken, diğer kısımlarda sinüsel olarak değişmektedir. Plazma yapısı boyunca elektron yoğunluğu değişimi Şekil 3.5 ile gösterilmiştir.



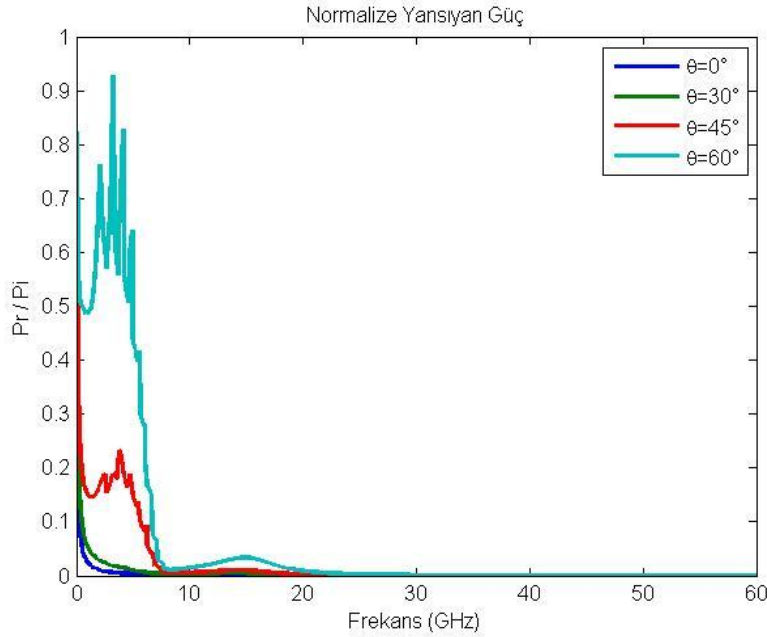
Şekil 3.5. Plazma yapısı boyunca elektron yoğunluğunun doğrusal artması ve sinüsel değişimi, $N_{\min} = 5 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$, $N_{\max} = 10^{18} \text{ m}^{-3}$



Şekil 3.6. Doğrusal artan ve sinüsel değişen elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılarına göre normalize soğurulan güç, $B = 0.5 \text{ T}$, $v_{\text{en}} = 20 \text{ GHz}$

Şekil 3.6'da görüldüğü gibi gelen elektromanyetik dalganın plazma ile yaptığı açı arttıkça plazma tarafından soğurulan gücün yaklaşık 25 GHz ve üzeri frekanslarda artmaya başladığı söylenebilir. Dalganın 60° açı ile gelmesi durumunda plazma ortamının 7 GHz ile 29 GHz arasında %90 üzerinde soğurma sağladığı görülmektedir. 10 GHz ve altındaki frekanslarda ise açı 0° ile 30° arasında iken açı

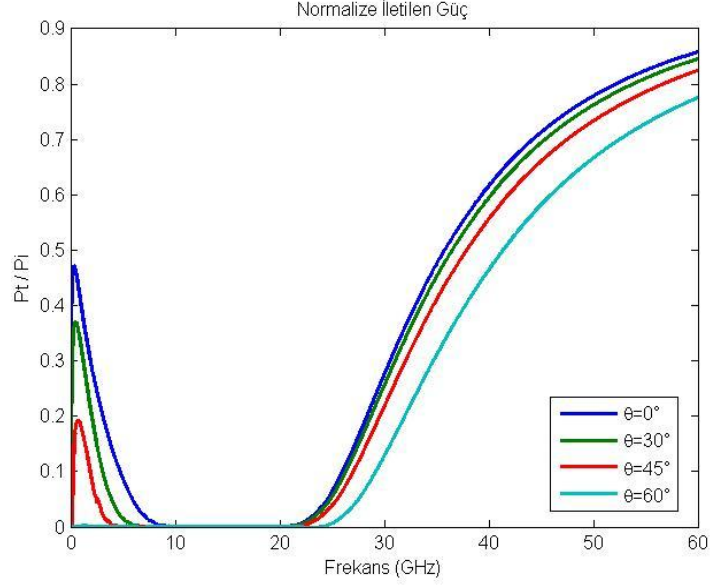
artıkça plazmanın soğurduğu güç çok azda olsa artmaktadır. Ancak 30°'den sonra soğurulan güç azalmakta hatta açı 45 ° üzerine çıktığında ciddi anlamda düşmektedir. Özellikle elektromanyetik dalganın plazma ile yaptığı açı 60° olduğu zaman 7 GHz ve altındaki frekanslar için plazma ortamı tarafından soğurulan güç %50 seviyelerinin altına düşmektedir.



Şekil 3.7. Doğrusal artan ve sinüsel değişen elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılarına göre normalize yansıyan güç, $B= 0.5 \text{ T}$, $V_{en} = 20 \text{ GHz}$

Şekil 3.7 ile gösterildiği gibi 10 GHz ve üzeri frekanslarda plazmanın yansıttığı güç tüm açılar için sıfıra yakındır. Ancak 10 GHz ve altındaki frekans aralığında özellikle 60° için yansıyan güç %90 seviyesine kadar çıkmaktadır. Gelen dalganın plazma ile yaptığı açı arttıkça yansıyan güç artmakta ancak 0° ile 45° arasında gelen dalga için plazma ortamının iyi bir yansıtıcı özelliğine sahip olmadığı görülmektedir.

Şekil 3.8 incelendiğinde 8 GHz ve 22 GHz arasındaki frekanslarda iletilen güç sıfıra yakındır. 22 GHz'den sonra açığa bağlı değişimle birlikte iletilen güç artmaktadır. 60 GHz ve üzeri frekanslar için iletilen güç, 0°- 45° açı ile gelen dalga için %80 seviyesinin üzerine çıkmaktadır. 8 GHz ve altındaki frekanslar için iletilen güç, açı arttıkça azalmaktadır.

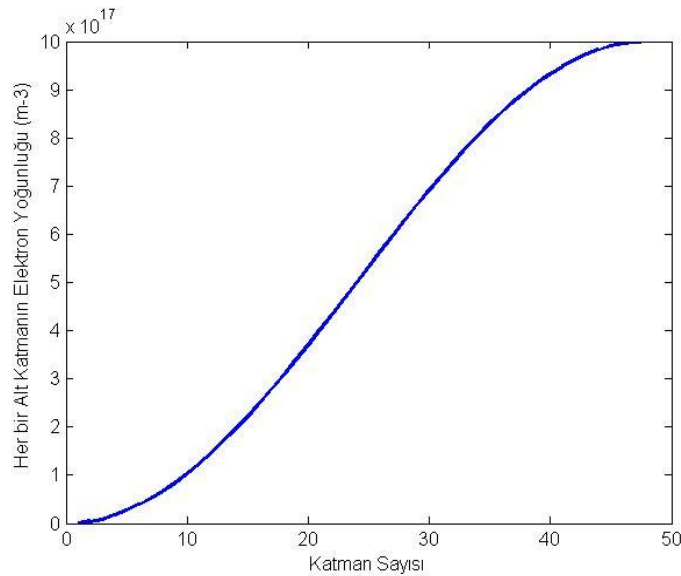


Şekil 3.8. Doğrusal artan ve sinüsel değişen elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılarına göre normalize iletilen güç, $B= 0.5 \text{ T}$, $V_{en} = 20 \text{ GHz}$

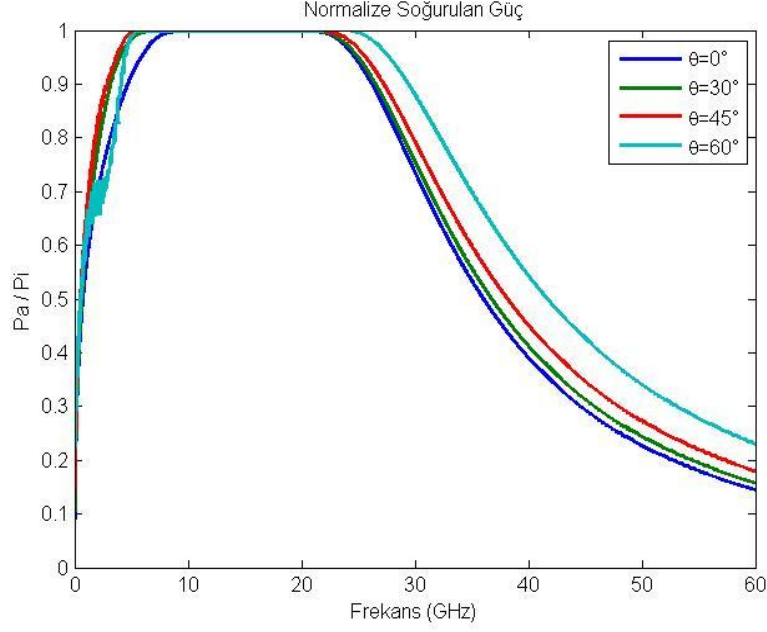
3.1.3. Elektron Yoğunluğu Çeyrek Sinüs Değişen Plazma Ortamı

Plazma ortamı boyunca elektron yoğunluğu değişimi ile Şekil 3.9 ile gösterilmiştir. En düşük elektron yoğunluğu plazmanın ilk katmanında olup değeri, $N_{\min} = 1.071 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 'e eşittir. En yüksek elektron yoğunluğu plazmanın son katmanında olup değeri, $N_{\max} = 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 'e eşittir. Plazmanın elektron yoğunluğu değişimi Eş.(3-3) ile ifade edilmiştir.

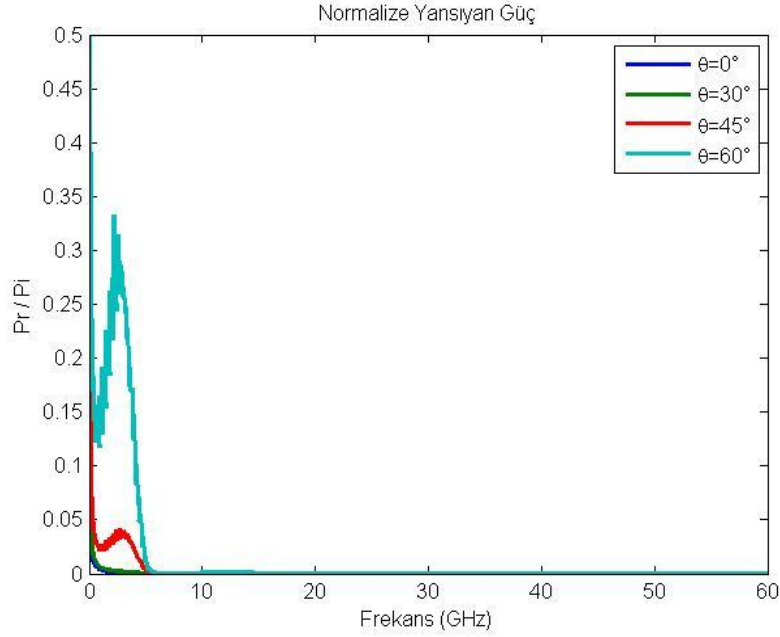
$$N(z) = N_{maks} (0.5 + 0.5 \sin(\pi(z - L')/(L - L'))) \quad z > L' \quad (3-3)$$



Şekil 3.9. Plazma yapısı boyunca elektron yoğunluğunun çeyrek sinüs değişmesi, $N_{\min} = 1.071 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, $N_{\max} = 10^{18} \text{ m}^{-3}$



Şekil 3.10. Çeyrek sinüs elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılarına göre normalize soğurulan güç, $B= 0.5 \text{ T}$, $v_{en} = 20 \text{ GHz}$

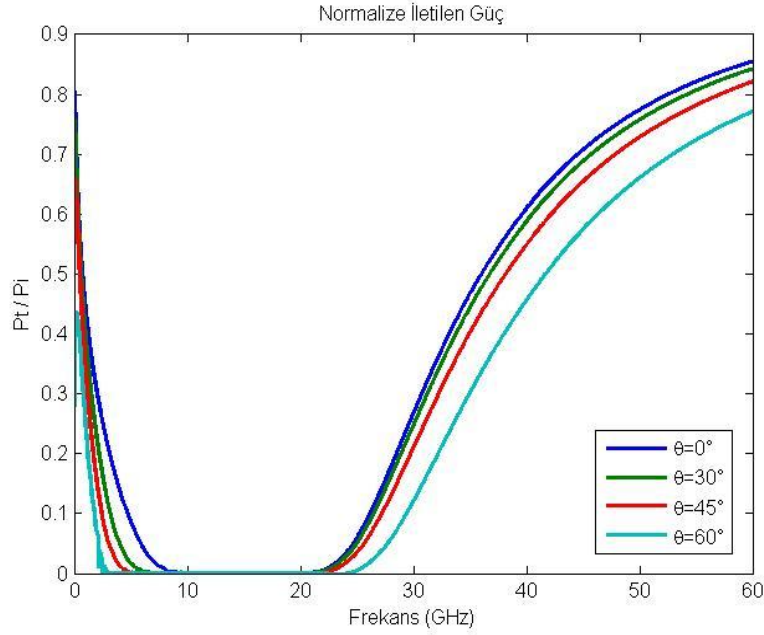


Şekil 3.11. Çeyrek sinüs elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılarına göre normalize yansıyan güç, $B= 0.5 \text{ T}$, $v_{en} = 20 \text{ GHz}$

Gelen elektromanyetik dalganın plazma ortamı ile yaptığı açı arttıkça plazmanın soğurduğu gücün, 20 GHz ve üzeri frekanslarda arttığı Şekil 3.10'a bakıldığında söylenebilir. Yaklaşık 5 ile 26 GHz arasında 60° açiya kadar plazma yapısı %90'ın üzerinde dalga gücünü soğururken 10 GHz ve altındaki frekanslarda ise gelen dalganın plazma ile yaptığı açı 0° ile 45° arasında iken açı arttıkça plazmanın

soğurduğu güç çok az artmaktadır. Özellikle 3 GHz ve altındaki frekanslarda açıdan bağımsız olarak plazma ortamı tarafından soğurulan güç oldukça düşüktür.

5 GHz ve üzeri frekanslarda plazmanın yansıttığı güç sifıra yakındır. 5 GHz ve altındaki frekans aralığında ise yansıyan güç çok az artmaktadır. 60° için 2-4 GHz arasında gelen dalganın yaklaşık %30'u plazma tarafından geri yansıtılmaktadır.



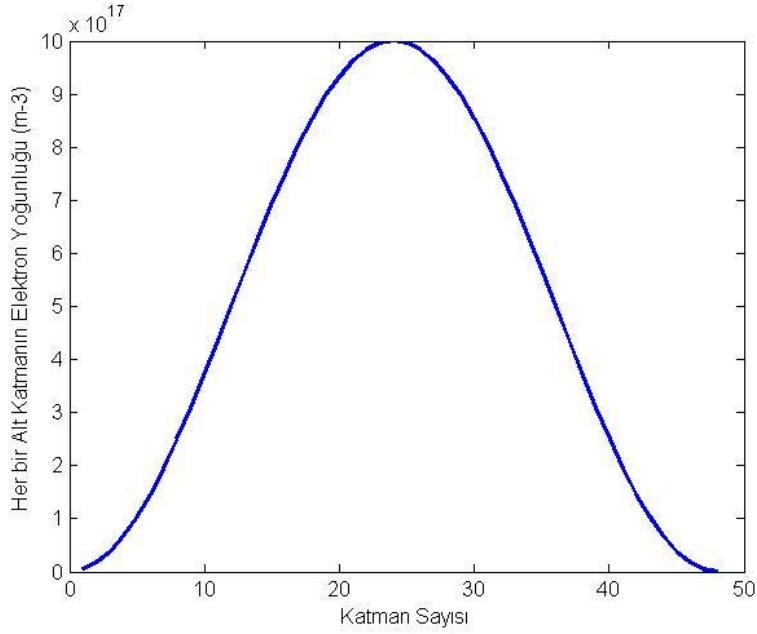
Şekil 3.12. Çeyrek sinüs elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılarına göre normalize iletilen güç, $B= 0.5 \text{ T}$, $\nu_{en} = 20 \text{ GHz}$

Şekil 3.12 ile plazma ortamı tarafından normalize iletilen güç gösterilmiştir. Yaklaşık 4 GHz'den daha düşük frekanslarda iletilen güç artmaya başlarken 3 GHz ile 22 GHz arasındaki frekanslarda iletilen güç sifıra yakındır. 22 GHz'den sonra açıya bağlı değişmekle birlikte iletilen güç artmakta 0° - 45° için %80 seviyesinin üzerine çıkmaktadır.

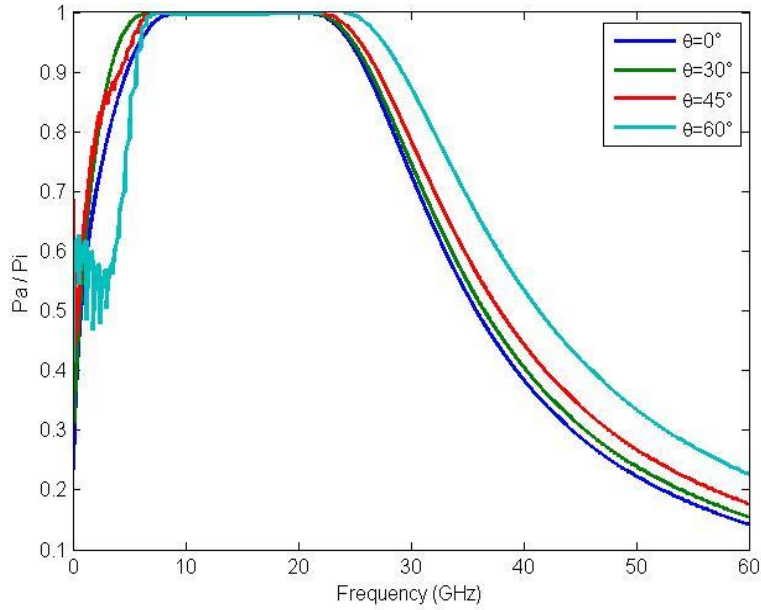
3.1.4. Elektron Yoğunluğu Yarım Sinüs Değişen Plazma Ortamı

Elektron yoğunluğu yarım sinüs değişen plazma ortamının en düşük elektron yoğunluğu plazmanın ilk ve son katmanında olup değeri, $N_{\min} = 4.278 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ eşittir. En yüksek elektron yoğunluğu plazmanın merkezinde olup değeri, $N_{\max} = 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 'e eşittir. Plazmanın elektron yoğunluğu değişim fonksiyonu Eş.(3-4) ile ifade edilmiştir.

$$N = N_{maks}(0.5 + 0.5 \sin(\pi(z - L')/(L - 2L'))) \quad z > L' \quad (3-4)$$



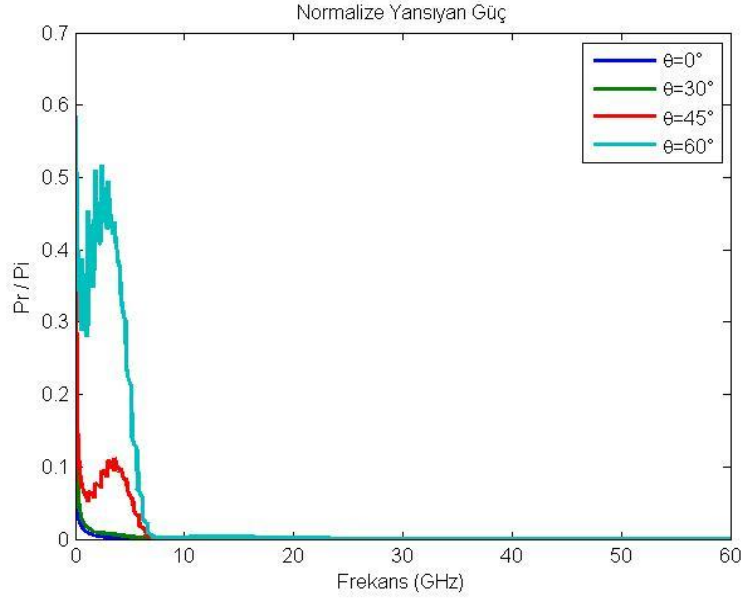
Şekil 3.13. Plazma yapısı boyunca elektron yoğunluğunun yarım sinüs değişmesi,
 $N_{\min} = 4.278 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, $N_{\max} = 10^{18} \text{ m}^{-3}$



Şekil 3.14. Yarım sinüs değişen elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılara göre normalize soğurulan güç, $B = 0.5 \text{ T}$, $\nu_{\text{en}} = 20 \text{ GHz}$

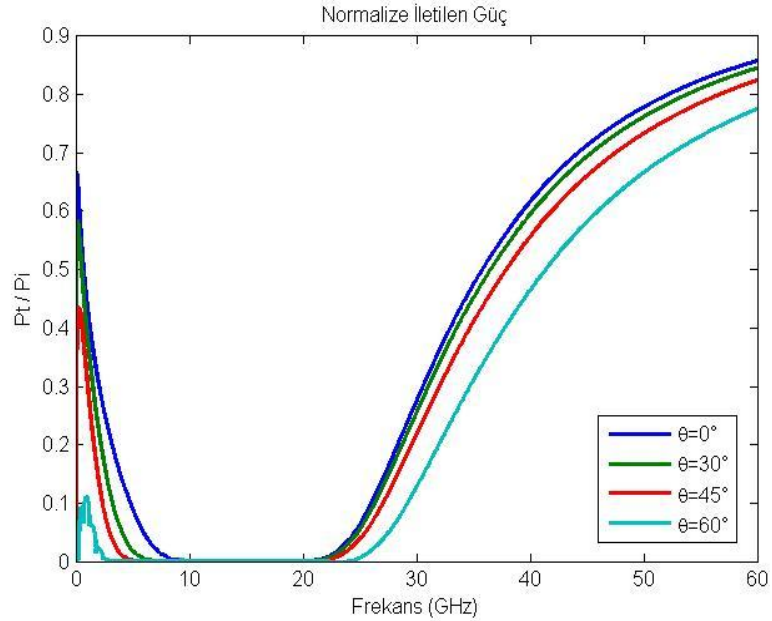
Plazma ortamı tarafından soğurulan güç Şekil 3.14'te görüldüğü gibi 25 GHz ve üzeri frekanslarda açı küçüldükçe azalmaktadır. 60° 'de soğurulan güç diğer geliş açılara nazaran daha yavaş düşüş göstermektedir. Yaklaşık 6 ile 29 GHz arasında 60° açiya kadar plazma ortamı gelen dalga gücünü %90'ın üzerinde soğurmaktadır. 10 GHz ve altındaki frekanslarda ise gelen dalganın plazma yaptığı 0° ile 30° arasında açı artıka soğurulan güç çok az artmaktadır. 4 GHz ve

altındaki frekanslar için plazma tarafından soğurulan güç hızlı bir şekilde düşmektedir.



Şekil 3.15. Yarı sinüs değişen elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılara göre normalize yansıyan güç, $B= 0.5 \text{ T}$, $v_{en} = 20 \text{ GHz}$

Şekil 3.15 incelendiğinde 45° ve üzeri açılar için yansıyan güç 7 GHz ve üzeri frekanslarda sıfıra yakınken 0° ile 30° arasındaki açılar için yansıyan güç 2 GHz ve üzeri frekanslarda sıfıra yakındır. Düşük frekanslarda yansıyan güç çok az artmaktadır. 60° için 2-4 GHz arasında gelen dalganın en fazla %50'si geri yansıtılmaktadır.



Şekil 3.16. Yarı sinüs değişen elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılara göre normalize iletilen güç, $B= 0.5 \text{ T}$, $v_{en} = 20 \text{ GHz}$

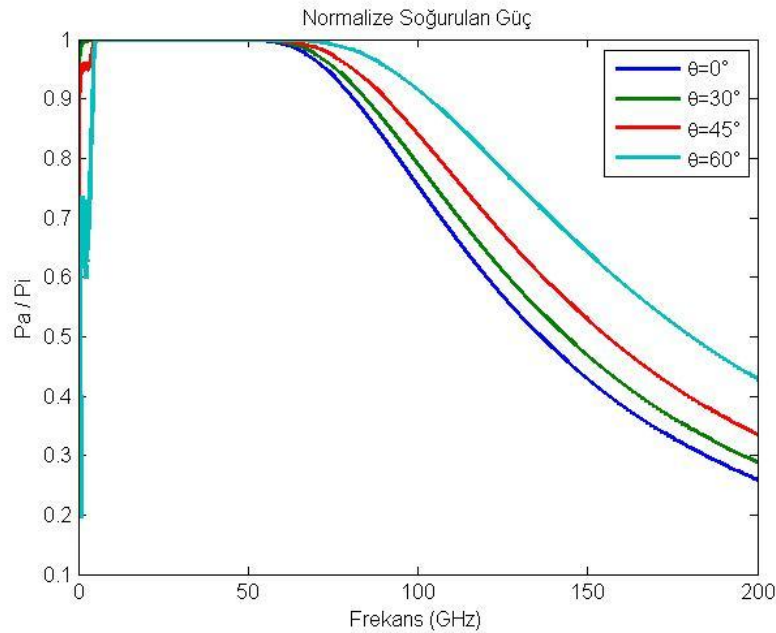
8 GHz ile 21 GHz arasındaki frekanslarda iletilen gücün sıfıra yakın olduğu Şekil 3.16'da görülmektedir. 0° için 8 GHz ve altındaki frekanslarda iletilen güç artmakta ve %60 seviyesinin üzerine çıkmaktadır. 22 GHz'den sonra açığa bağlı değişimle birlikte iletilen güç, 0° - 45° açılar için %80 seviyesinin üzerine çıkmaktadır.

3.2. Dik ve Eğik Açılarda Gelen Elektromanyetik Dalganın Plazma Kaplı Mükemmel İletken Yüzey İçerisindeki Yayılımı

Bölüm 3.1'de dik ve eğik açılarda gelen elektromanyetik dalganın havada yer alan plazma ortamı içerisindeki yayılımı irdelenmiştir. Bu kısımda Şekil 2.5 ile gösterilen farklı elektron yoğunluğuna sahip plazma yapısının mükemmel iletken yüzeyi kapladığı durum için inceleme yapılmıştır. Bölüm 3.1'de elde edilen sonuçlar ile bu bölümde elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi için Bölüm 3.1 kısmında modellenen plazma ortamı için kullanılan plazma parametreleri, elektron yoğunluğu değişimleri ve gelen elektromanyetik dalganın plazma ile yaptığı açılar aynı alınmıştır.

3.2.1. Elektron Yoğunluğu Doğrusal Artan Plazma Kaplaması

Mükemmel iletken yüzeyi kaplayan plazmanın elektromanyetik dalgayla etkileşimi sonucu soğurduğu gücün değişimi Şekil 3.17 ile gösterilmiştir.

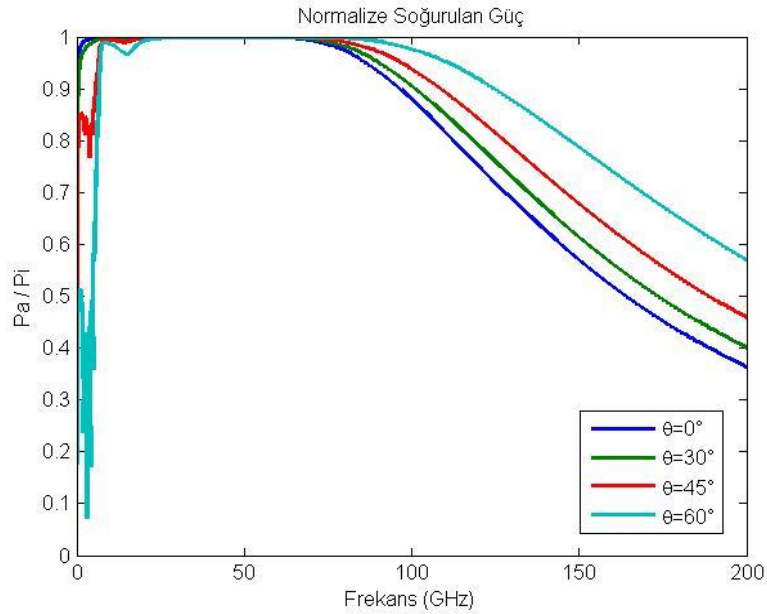


Şekil 3.17. Doğrusal artan elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılara göre mükemmel iletken yüzeyi kapladığı durumda normalize soğurulan güç, $B= 0.5$ T, $\nu_{en} = 20$ GHz

Yüksek frekanslarda gelen elektromanyetik dalganın plazma ile yaptığı açı artıkcı soğurulan gücün arttığı görölmektedir. Dik açı ($\theta = 0^\circ$) ile dalganın plazmaya gelmesi durumunda soğurulan güc 60 GHz'den sonra yaklaşık %100 seviyesinin altına inmektedir. Ancak soğurulan güc hızlı düşmemekte ve 100 GHz'de bile gelen dalganın %75'i plazma tarafından soğurulmaktadır. Açının 30° olması durumunda %90 seviyesinin üzerinde soğurulan güc yaklaşık 110 MHz ile 84 GHz bandında olurken açı 45° olduğu zaman bu değer yaklaşık 350 MHz ile 90 GHz, 60° içinse yaklaşık 5 GHz ile 102 GHz arasında olmaktadır. 0° - 60° açı aralığında gelen elektromanyetik dalganın gücünü plazma yapısı 5 GHz ile 80 GHz arasındaki frekans bandında %90 üzerinde soğurmaktadır. 5 GHz ve altındaki frekanslarda ise gelen dalganın plazma yaptığı açı 60° olduğunda soğurulan güc havadaki plazma çalışmasında olduğu gibi oldukça hızlı düşmektedir. Ancak gelen dalganın plazma ile yaptığı açı 0° - 45° arasında iken soğurulan güc 350 MHz'e kadar %90'ın üzerindedir.

3.2.2. Elektron Yoğunluğu Doğrusal Artan ve Sinüsel Değişen Plazma Kaplaması

Elektron yoğunluğu doğrusal artan ve sinüsel olarak değişen plazma ile elektromanyetik dalganın etkileşimi sonucu soğurulan güc Şekil 3.18 ile gösterilmiştir.

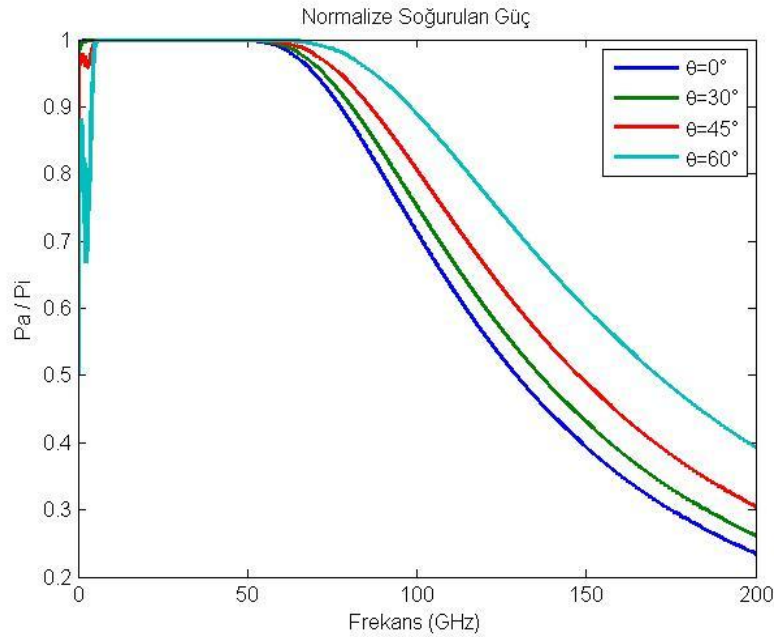


Şekil 3.18. Doğrusal artan ve sinüsel değişen elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılara göre normalize soğurulan güc, $B = 0.5 \text{ T}$, $v_{en} = 20 \text{ GHz}$

Elektromanyetik dalganın plazmaya dik açı ile gelmesi durumunda soğurulan güç 71 GHz'den sonra %100 seviyesinin altına düşmektedir. Ancak 100 GHz'de gelen dalganın %90'na yakını plazma tarafından soğurilmaya devam ettiği için hızlı bir düşüş söz konusu değildir. Açının 30° olması durumunda %90 seviyesinin üzerinde soğurulan güç yaklaşık 500 MHz ile 100 GHz bandında olurken açı 45° olduğu zaman bu değer yaklaşık 6 GHz ile 108 GHz, 60° içinse yaklaşık 7 GHz ile 123 GHz arasında olmaktadır. 0° - 60° açı aralığında gelen elektromanyetik dalganın gücünü plazma yapısı 7 GHz ile 95 GHz arasındaki frekans bandında %90 üzerinde soğurmaktadır. 6 GHz ve altındaki frekanslarda ise gelen dalganın plazma yaptığı açı 45° - 60° arasında olduğunda soğurulan güç oldukça hızlı düşmektedir. Ancak gelen dalganın plazma ile yaptığı açı 0° - 45° arasında iken soğurulan güç 500 MHz'e kadar %90'ın üzerindedir.

3.2.3. Elektron Yoğunluğu Çeyrek Sinüs Değişen Plazma Kaplaması

Elektron yoğunluğu çeyrek sinüs değişen plazmanın elektromanyetik dalgaya ile etkileşimi sonucu soğurulan güç Şekil 3.19 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.19. Çeyrek sinüs elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılarına göre normalize soğurulan güç, $B=0.5$ T, $v_{en}=20$ GHz

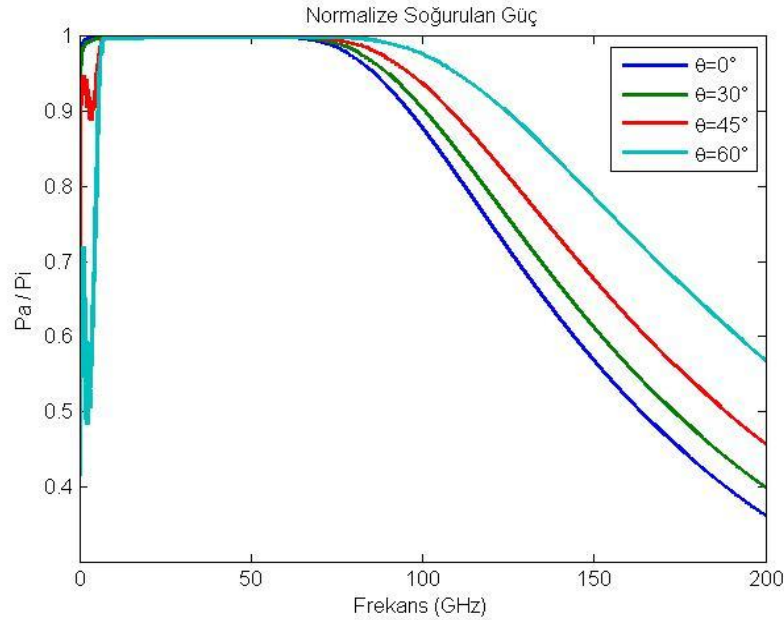
Dik açı ile düzlem dalganın plazmaya gelmesi durumunda soğurulan güç 55 GHz'e kadar %100'e olmakta ve 77 GHz'den sonra ise %90 seviyesinin altına düşmeye başlamaktadır. Buradaki düşüş ise ilk iki çalışmaya göre daha hızlı olmaktadır. Açının 30° olması durumunda %90 seviyesinin üzerinde soğurulan güç yaklaşık 30

MHz ile 80 GHz bandında olurken açı 45° olduğu zaman bu değer yaklaşık 110 MHz ile 85 GHz, 60° içinse yaklaşık 5 GHz ile 97 GHz arasında olmaktadır. 0° - 60° açı aralığında gelen elektromanyetik dalganın gücünü plazma yapısı 5 GHz ile 77 GHz arasındaki frekans bandında %90 üzerinde soğurmaktadır. 5 GHz ve altındaki frekanslarda ise gelen dalganın plazma yaptığı açı 60° olduğunda soğurulan güç keskin şekilde düşmektedir. Ancak gelen dalganın plazma ile yaptığı açı 0° - 45° arasında iken soğurulan güç 110 MHz'e kadar %90'ın üzerindedir.

Bu bilgiler ışığında plazma kaplamasının 0° ile 45° arasında gelen elektromanyetik dalganın tamamına yakını yaklaşık 110 MHz ile 75 GHz gibi hem düşük hem de yüksek frekanslarda geniş bir bant aralığında soğurabildiği görülmektedir. Yüksek frekanslarda açı arttıkça plazmanın soğurma bandı genişlemekte ve kararlı bir yapıya sahip olmayı sürdürmektedir.

3.2.4. Elektron Yoğunluğu Yarım Sinüs Değişen Plazma Kaplaması

Elektron yoğunluğu yarım sinüs değişen plazmanın elektromanyetik dalga ile etkileşimi sonucu soğurulan güç Şekil 3.20 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.20. Yarım sinüs elektron yoğunluğuna sahip plazmanın dik ve eğik geliş açılara göre normalize soğurulan güç, $B= 0.5$ T, $v_{en} = 20$ GHz

Elektromanyetik dalga plazmaya dik açı ile gelmesi durumunda soğurulan güç 68 GHz'den sonra %100 seviyesinin altına düşmektedir. Açının 30° olması durumunda

%90 seviyesinin üzerinde soğurulan güç yaklaşık 110 MHz ile 100 GHz bandında olurken açı 45° olduğu zaman bu değer yaklaşık 350 MHz ile 108 GHz, 60° içinse yaklaşık 6 GHz ile 123 GHz arasında olmaktadır. 0°-60° açı aralığında gelen elektromanyetik dalganın gücünü plazma kaplaması 6 GHz ile 95 GHz arasındaki frekans bandında %90 üzerinde soğurmaktadır. 5 GHz ve altındaki frekanslarda ise gelen dalganın plazma yaptığı açı 60° olduğunda soğurulan güç keskin şekilde düşmektedir. Ancak gelen dalganın plazma ile yaptığı açı 0°-45° arasında iken soğurulan güç 350 MHz'e kadar %90'ın üzerindedir.

3.3. Sonuçların Karşılaştırılması

Hava ortamındaki plazma ile mükemmel iletken yüzeyi kaplayan plazma yapısı karşılaştırıldığında soğurulan güç bakımından benzerliklerin ve farkların olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar, Çizelge 3.1 ile gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Modellenen plazma yapılarının farklı açılara göre soğurma bantları

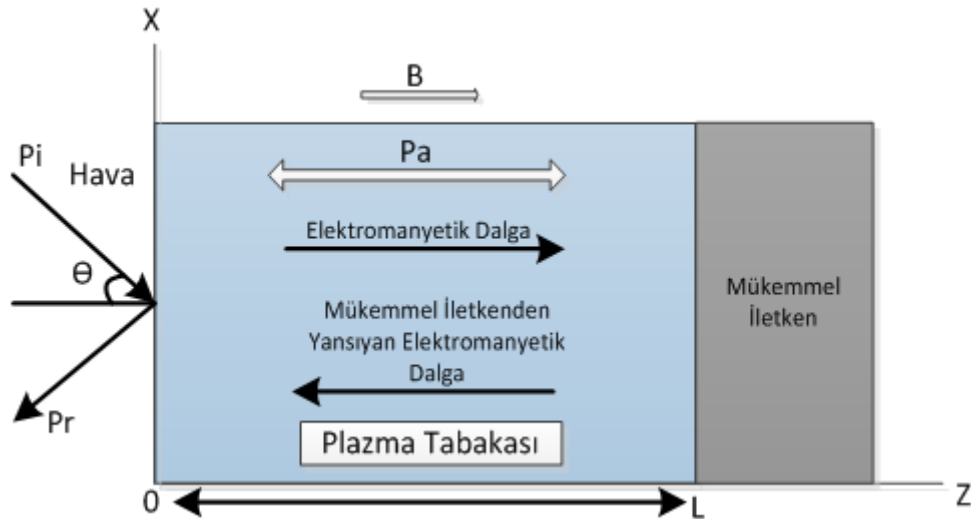
Plazma Elektron Yoğunluğu	Açı	Soğurma Bandı (%90)	Soğurulan Radar Sinyalinin Frekans Bandı
Doğrusal Artan (Hava)	0°	350 MHz – 40 GHz	UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka
	30°	400 MHz – 41 GHz	UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka
	45°	600 MHz – 43 GHz	UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V
	60°	3 GHz – 48 GHz	S, C, X, Ku, K, Ka, V
Doğrusal Artan (Mükemmel İletken)	0°	70 MHz – 80 GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	30°	110 MHz – 84 GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V,W
	45°	350 MHz – 90 GHz	UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V,W
	60°	5 GHz – 102 GHz	C, X, Ku, K, Ka, V,W
Doğrusal Artan ve Sinüsel Değişen (Hava)	0°	5 GHz – 26 GHz	C, X, Ku, K
	30°	4 GHz – 24 GHz	C, X, Ku, K
	45°	6 GHz – 27 GHz	C, X, Ku, K
	60°	7 GHz – 29 GHz	C, X, Ku, K

Plazma Elektron Yoğunluğu	Açı	Soğurma Bandı (%90)	Soğurulan Radar Sinyalinin Frekans Bandı
Doğrusal Artan ve Sinüsel Değişen (Mükemmel İletken)	0°	300 MHz – 95 GHz	UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	30°	500 MHz – 100 GHz	UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	45°	6 GHz – 108 GHz	C, X, Ku, K, Ka, V, W
	60°	7 GHz – 123 GHz	C, X, Ku, K, Ka, V, W
Çeyrek Sinüs (Hava)	0°	5 GHz – 26 GHz	C, X, Ku, K
	30°	3 GHz – 26 GHz	S, C, X, Ku, K
	45°	3 GHz – 27 GHz	S, C, X, Ku, K
	60°	5 GHz – 29 GHz	C, X, Ku, K, Ka
Çeyrek Sinüs (Mükemmel İletken)	0°	20 MHz – 77 GHz	HF, VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	30°	30 MHz – 80 GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	45°	110 MHz – 85 GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	60°	5 GHz – 97 GHz	C, X, Ku, K, Ka, V, W
Yarım Sinüs (Hava)	0°	5 GHz – 26 GHz	C, X, Ku, K
	30°	4 GHz – 26 GHz	C, X, Ku, K
	45°	4 GHz – 26 GHz	C, X, Ku, K
	60°	6 GHz – 29 GHz	C, X, Ku, K, Ka
Yarım Sinüs (Mükemmel İletken)	0°	100 MHz – 95 GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	30°	110 MHz – 100 GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	45°	350 MHz – 3 GHz 5 GHz – 108 GHz	UHF, S, L, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	60°	6 GHz – 123 GHz	C, X, Ku, K, Ka, V, W

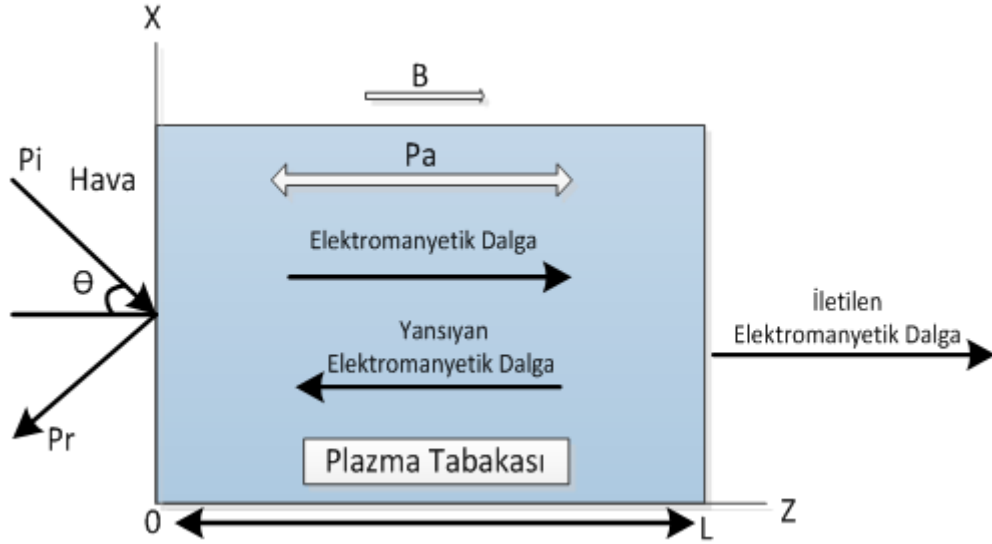
Havada yer alan plazma ortamları elektron yoğunluklarına göre değerlendirildiğinde en iyi sonucu doğrusal artan elektron yoğunluğuna sahip plazma yapısının verdiği görülmektedir. Bu plazma ortamı, 0° - 60° arasında gelen radar sinyalleri için 40 GHz üzerinde soğurma bandına sahiptir. Bununla birlikte doğrusal artan elektron yoğunluğuna sahip plazma yapısı UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka bantlarındaki radar sinyallerini soğurabilmektedir. Diğer üç profile sahip havadaki plazma yapıları incelendiğinde ise soğurma bantlarının birbirine yakın çıktığı söylenebilir.

Mükemmel iletkeni kaplayan plazma kaplamaları elektron yoğunluklarına göre değerlendirildiğinde en geniş soğurma bandı doğrusal artan ve sinüsel değişen ve yarım sinüs elektron yoğunluklarına sahip plazmaların olduğu belirtilebilir. Bu profiller, 0° - 60° arasında gelen radar sinyalleri için 95 GHz üzeri soğurma bandına sahiptirler ve VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W bantlarındaki radar sinyallerini soğurmaktadırlar.

Çizelge 3.1 incelendiğinde mükemmel iletkeni kaplayan plazmanın havadaki plazmaya göre daha geniş bir soğurma bandı sağladığı görülmektedir. Bu durumun oluşmasının sebebi Şekil 3.21 ve Şekil 3.22 üzerinden anlatılabilir.



Şekil 3.21. Mükemmel iletkeni kaplayan plazma yapısında elektromanyetik dalganın yayılımı



Şekil 3.22. Havadaki plazma yapısında elektromanyetik dalganın yayılımı

Şekil 3.21 ile gösterilen mükemmel iletken üzerine kaplanmış plazma yapısında elektromanyetik dalganın yayılımı gösterilmiştir. Mükemmel iletken, yüzeyine gelen elektromanyetik dalganın tamamını yansıttığı varsayılmıştır. Bu nedenle plazmanın yüzeyine gelen elektromanyetik dalga mükemmel iletkene kadar plazma boyunca yol alacak ve dalganın tamamı iletken yüzeyden tekrar yansyacağı varsayıldığından yine plazma boyunca geri yayılımına devam edecektir. Bu durumda düzlem dalga, plazma kalınlığını iki kere katedeceğinden $2L$ kadar yol alacaktır. Ancak Şekil 3.22 ile gösterildiği gibi havadaki plazmaya giren elektromanyetik dalga plazma kalınlığı boyunca yani L kadar mesafe katettikten sonra tekrar havaya çıkmaktadır. Bu nedenle plazma içerisinde gelen dalganın soğurulma ve sönümlenme miktarının mükemmel iletkeni kaplayan plazma yapısına göre daha düşük olması beklenen bir sonuçtur.

4. FİBONACCİ SAYILARI VE FİBONACCİ SERİLERİ ŞEKLİNDE ELEKTRON YOĞUNLUĞA SAHİP PLAZMALARIN ELEKTROMANYETİK DALGA İLE ETKİLEŞİMİ

Bu bölümde Fibonacci sayıları ve Fibonacci serilerine göre elektron yoğunluğu değişen plazmaların elektromanyetik dalga ile nasıl bir etkileşim gösterdiği incelenmiştir. Literatürde Fibonacci serileri, daha çok fotonik kristal [23,24] ve çok katmanlı optik filtre [25,26] tasarımlarında kullanılmakta ancak plazma uygulamalarında benzer bir çalışma yer almamaktadır.

Bu bölümdeki çalışmalarda plazma ortamı mükemmel iletken yüzeyi kaplamış ve elektromanyetik dalganın plazmaya dik geldiği varsayılmıştır. Fibonacci diziliimli elektron yoğunluğuna sahip plazma kaplamaların gösterdiği soğurma performansı üç farklı bölümde incelenmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

4.1. Fibonacci Sayı Dizisiyle Değişen Elektron Yoğunluğuna Sahip Plazma Kaplaması

Bu bölümde plazma kaplamasının elektron yoğunluğu değişimi Fibonacci sayı dizisi olarak değişmektedir. Fibonacci sayı dizisi; 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377, 610, 987 şeklinde kendinden bir önceki terim ile toplanarak devam eden sayı dizisi olarak tanımlanmaktadır. Bu sayı dizisinin her adımda artış oranı “Altın Oran” değerini verir. Altın Oran değeri, Fibonacci dizisinde yer alan her terimin kendinden bir önceki terime bölünmesi ile elde edilmektedir.

$$F_0 = 0, F_1 = 1, F_2 = 1, F_3 = 2, \dots, F_{16} = 987, \dots$$

$$F_n = F_{n-1} + F_{n-2} \quad n > 2, \quad \text{Altın Oran} = \frac{F_{n-1}}{F_{n-2}} \quad n > 3 \quad (4-1)$$

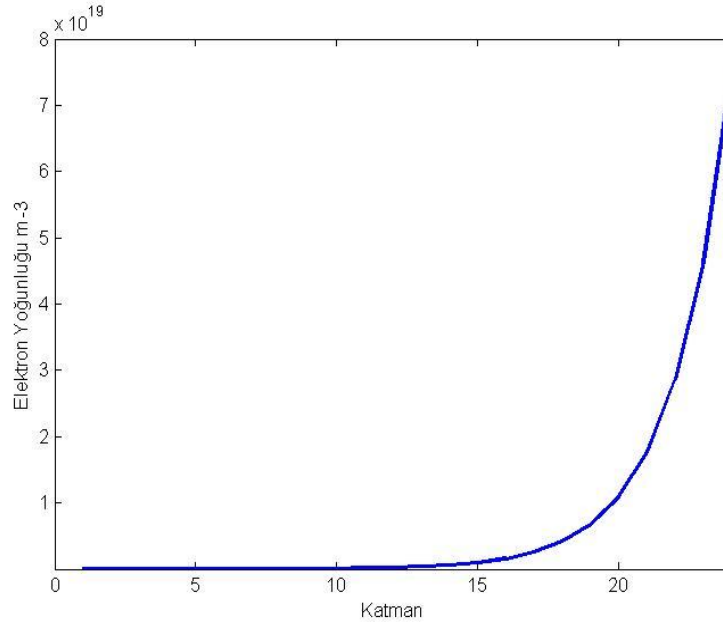
Eş.(4-1)'de yer alan altın oran değeri, n sayısı artıkça 1.618 değerine yakınsamaktadır. Bu değer, diğer bölümlerde de yapılan incelemelerde kullanılmış ve plazma kaplamasının karakteristiğine olan etkisi değerlendirilmiştir. Bu kısımda Fibonacci sayı dizisi kullanılarak sekiz farklı elektron yoğunluğu değişim profili oluşturulmuştur. Her bir profil önce kendi içerisinde değerlendirilmiş ve sonrasında tüm profillerin plazmanın güç yutucu davranışına olan etkisi karşılaştırılmıştır.

4.1.1. Elektron Yoğunluğu Fibonacci Sayı Dizisi (F_1 - F_{24}) Şeklinde Artarak Değişen Plazma Kaplaması

Bu incelemede Fibonacci sayı dizisi 1'den başlayarak 1, 2, 3, 5, 8, ... , 75025 sayısına kadar artarak ilerlemiştir.

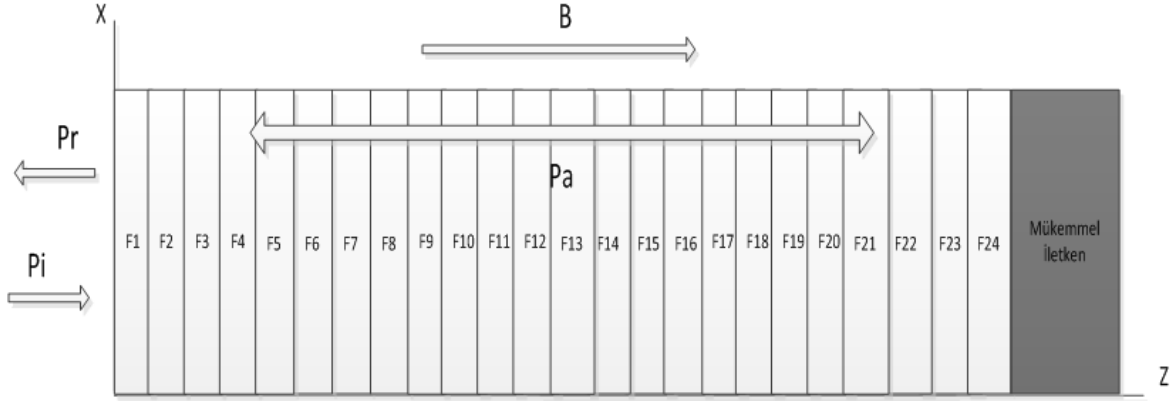
$$F_1 = 1, F_2 = 2, F_3 = 3, F_4 = 5, F_5 = 8, \dots, F_{24} = 75025$$

Plazmanın kalınlığı 12 cm olarak alınmış ve 24 özdeş alt katmana ayrılmıştır. Her bir dizi elemanı 10^{15} ile çarpılarak plazma içerisindeki elektron yoğunluğu profili oluşturulmuştur. Oluşturulan profile göre plazmanın elektron yoğunluğu değişimi Şekil 4.1 ile gösterilmiştir.

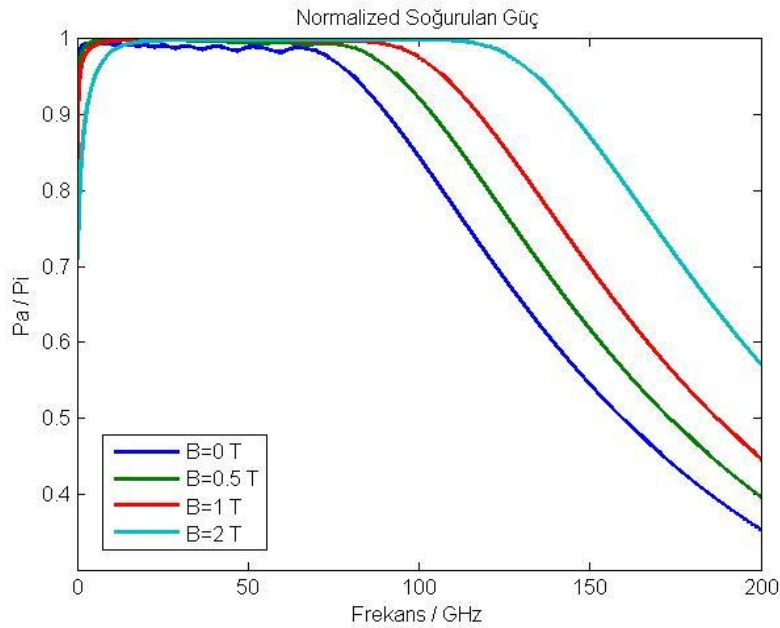


Şekil 4.1. Plazma elektron yoğunluğunun Fibonacci sayı dizisine göre artarak değişimi, $N_1 = 10^{15} \text{ m}^{-3}$, $N_{24} = 75025 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$

En düşük elektron yoğunluğu plazmanın ilk katmanında olup değeri, $N_1 = F_1 \times 10^{15} \text{ m}^{-3} = 1 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ iken, en yüksek elektron yoğunluğu plazmanın son katmanında olup değeri, $N_{24} = F_{24} \times 10^{15} \text{ m}^{-3} = 75025 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 'e eşittir. Fibonacci sayı dizisinin plazma boyunca değişimi Şekil 4.2 ile gösterilmiştir.



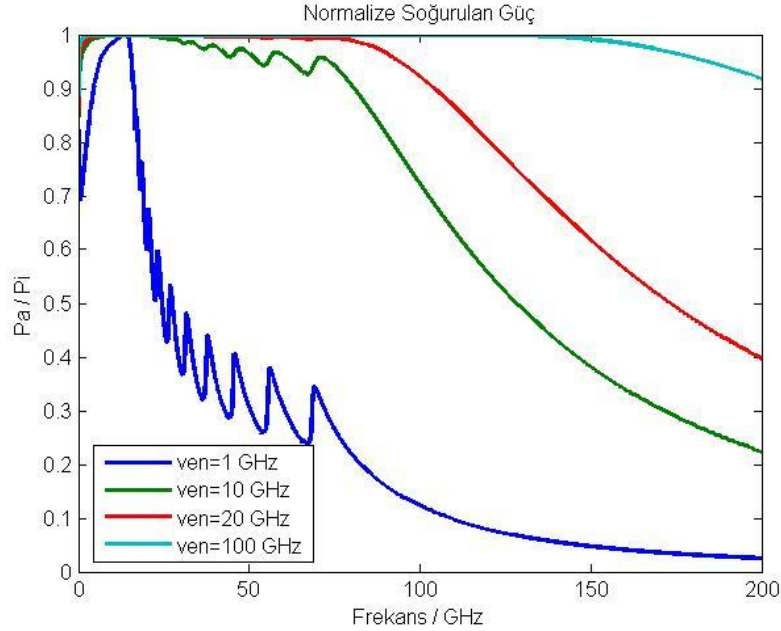
Şekil 4.2. Elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine göre artarak değişen plazmanın mükemmel iletken yüzeyi kapladığı durum



Şekil 4.3. Farklı dış manyetik alan değerleri için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine göre artarak değişen plazmanın soğurduğu güç, $\nu_{en} = 20$ GHz

Plazma kaplaması boyunca dışarıdan uygulanan farklı manyetik alan değerleri için plazmanın soğurduğu güç gözlenirken plazmanın çarpışma frekansı 20 GHz olarak alınmıştır. Şekil 4.3 ile gösterildiği gibi dış manyetik alan değeri arttıkça soğurma bandı genişlemektedir. 300 MHz ve üzeri frekanslarda dış manyetik alan 0 T ile 1 T arasında olduğunda soğurulan güç %90 seviyelerinin üzerinde iken dış manyetik alan 2 T olduğu zaman 3 GHz'den sonra soğurulan güç %90 seviyelerinin üzerine çıkmaktadır. Ancak dış manyetik alan 2 T değerinde olduğu zaman 144 GHz'e kadar plazma yapısı gelen elektromanyetik dalgayı %90'nın üzerinde soğurmaktadır. 1 T için 117 GHz'e, 0.5 T için 103 GHz'e ve 0 T için 90 GHz'e kadar gelen elektromanyetik dalgayı plazma kaplaması %90'nın üzerinde

soğurmaktadır. Dış manyetik alanın sıfır alınması ($B = 0$ T), elektron jiro frekansının (ω_{ce}) sıfır olmasına neden olacaktır. Bu durumda plazma, manyetize olmayan bir yapıda olacaktır. Bu sebeple dışarıdan uygulanan bir manyetik alan olmadığı durumda manyetize olmayan bir plazma ortamı olacağından bu ortamın da karakteristik özellikleri incelenmiştir.



Şekil 4.4. Farklı çarpışma frekansı değerleri için elektron yoğunluğu Fibonacci dizisine göre artarak değişen plazmanın soğurduğu güç, $B=0.5$ T

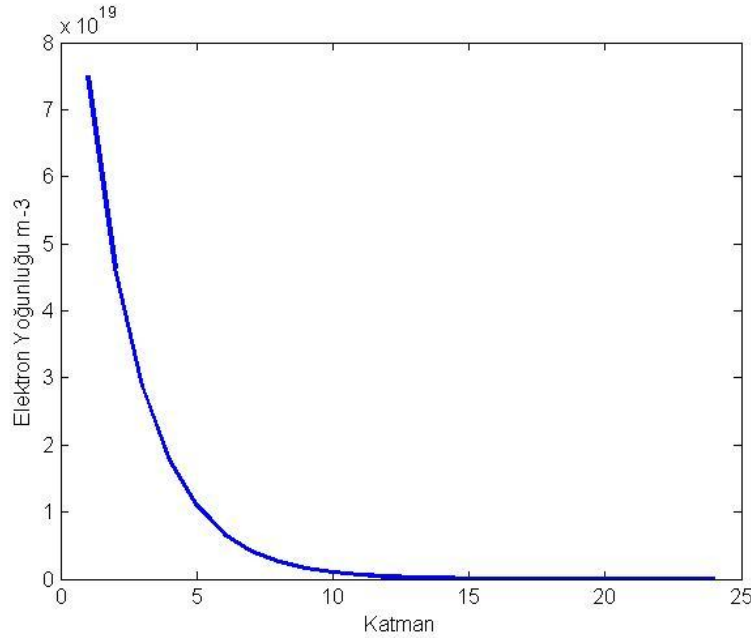
Bu incelemede ise dış manyetik alan 0.5 T olarak sabit bir değer alırken farklı çarpışma frekansı değerleri için plazmanın soğurduğu güç irdelenmiştir. Şekil 4.4 ile gösterildiği gibi çarpışma frekansı artıkça soğurma bandı ciddi oranda genişlemektedir. Çarpışma frekansı 10 GHz ile 100 GHz arasında olduğunda düşük frekanslarda (200 MHz ve üzeri) soğurulan güç, %90 seviyelerinin üzerinde iken çarpışma frekansı 1 GHz değerinde olduğu zaman plazmanın soğurduğu güç 5-16 GHz frekans aralığında %90 seviyelerinin üzerinde olmaktadır. Çarpışma frekansı 100 GHz olduğu zaman plazma ortamı, 200 GHz'e kadar gelen elektromanyetik dalgayı en az %92'nin üzerinde soğururken, çarpışma frekansı azaldıkça plazma tarafından yutulan güç hızlıca düşmektedir. Çarpışma frekansı 20 GHz olduğu zaman 103 GHz'e, 10 GHz olduğu zaman 80 GHz'e kadar gelen elektromanyetik dalgayı plazma kaplaması %90'nın üzerinde soğurmaktadır. Ancak çarpışma frekansı 1 GHz olan plazma ortamının soğurma bandı 5-16 GHz frekans aralığında olduğu için diğer plazma ortamlarına göre daha dar bantlı bir soğurucu olduğu görülmüştür.

4.1.2. Elektron Yoğunluğu Fibonacci Sayı Dizisi (F_{24} - F_1) Şeklinde Azalarak Değişen Plazma Kaplaması

Bu kısımda bir önceki çalışmanın tam tersi işlem yapılmıştır. Fibonacci dizisi bu sefer 75025'den başlayarak 75025, 46368, 28657, ... , 8, 5, 3, 2, 1 sayısına kadar azalarak ilerlemiştir.

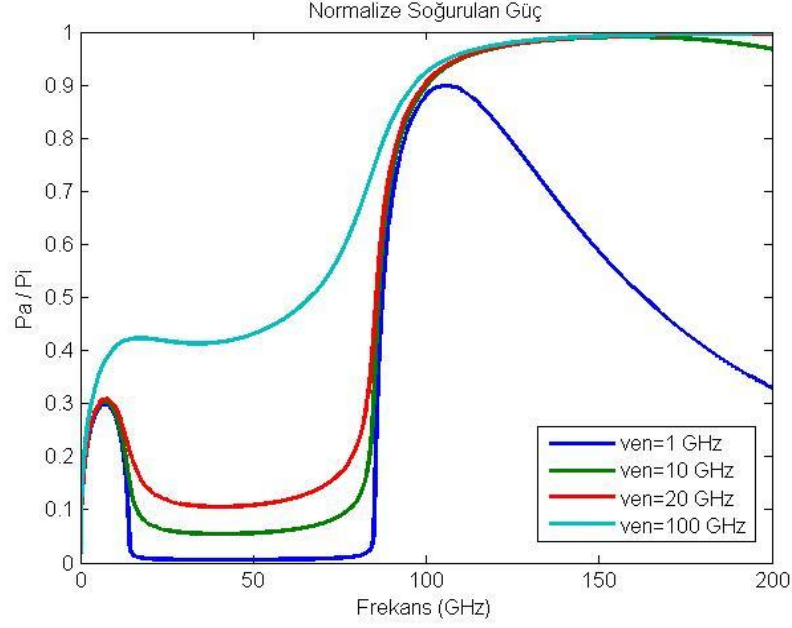
$$F_{24} = 75025, F_{23} = 46368, F_{22} = 28657, \dots, F_3 = 3, F_2 = 2, F_1 = 1$$

Plazma yapısının kalınlığı sabit tutulup bir önceki çalışmada olduğu gibi 24 özdeş alt katmana ayrılmıştır. Her bir dizi elemanı 10^{15} ile çarpılarak her bir katmanın elektron yoğunluğu belirlenmiştir. Plazma içerisindeki elektron yoğunluğu değişimi Şekil 4.5 ile gösterilmiştir.

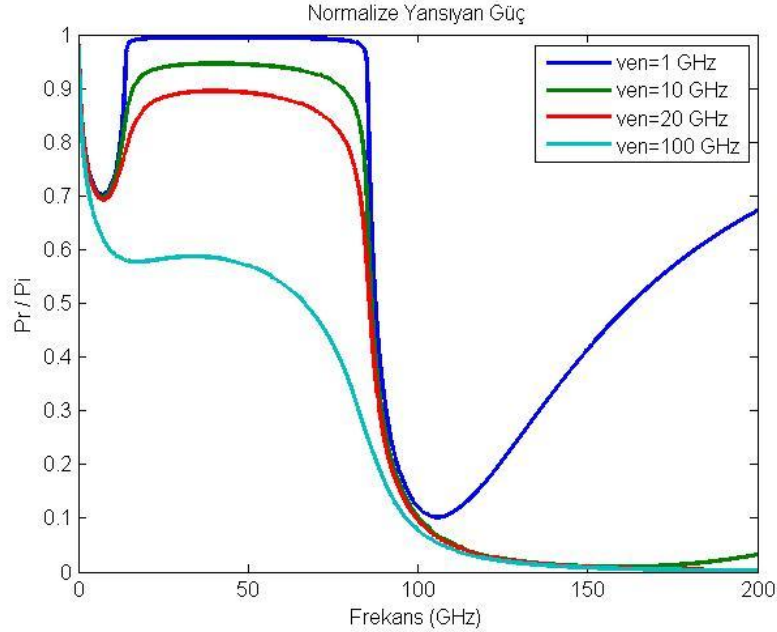


Şekil 4.5. Plazma elektron yoğunluğunun Fibonacci sayı dizisine göre azalan değişimi, $N_1 = 75025 \times 10^{15} m^{-3}$, $N_{24} = 10^{15} m^{-3}$

Plazma katmanı boyunca en düşük elektron yoğunluğu son katmanda olup değeri, $N_{24} = F_1 \times 10^{15} m^{-3} = 1 \times 10^{15}$ iken, en yüksek elektron yoğunluğu plazmanın ilk katmanında olup değeri, $N_1 = F_{24} \times 10^{15} m^{-3} = 75025 \times 10^{15} m^{-3}$ 'tür.



Şekil 4.6 Elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine göre azalarak değişen plazmanın soğurduğu güç, $B= 0.5 \text{ T}$



Şekil 4.7. Elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine göre azalarak değişen plazmanın yansıttığı güç, $B = 0.5 \text{ T}$

Şekil 4.6 incelendiğinde çarpışma frekansı 10 GHz'den büyük olan plazma yapısının 120 GHz ve üzeri frekansa sahip elektromanyetik dalgayı %100'e yakın soğurduğu gözlenmiştir. Şekil 4.7'ye bakıldığında çarpışma frekansı 20 GHz'den düşük olan plazma yapısının 20 GHz ile 80 GHz frekans aralığındaki elektromanyetik dalgayı %85 ile %100 aralığında yansıttığı gözlenmiştir. Bu bilgiler ışığında elektron yoğunluğu Fibonacci dizilimli olarak azalan plazma katmanının

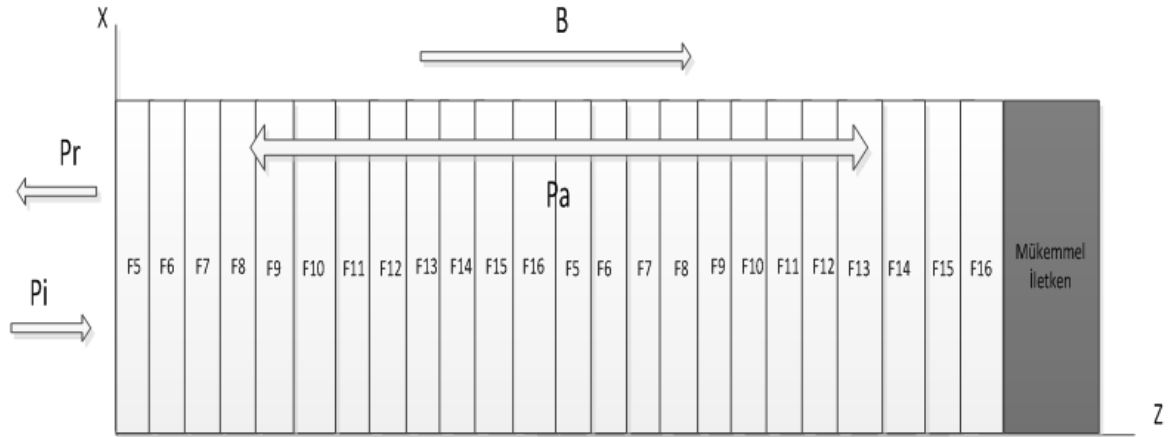
80 GHz ve altındaki frekanslarda iyi bir yansıtıcı, 120 GHz ile 200 GHz arasındaki frekanslarda iyi bir soğurucu olarak kullanılabilmesinin mümkün olduğu görülmektedir.

4.1.3. Elektron Yoğunluğu Fibonacci Sayı Dizisi ($F_5 - F_{16}$)² Şeklinde Değişen Plazma Kaplaması

Bu kısımda Fibonacci sayı dizisinin beşinci teriminden başlayarak on altıncı terimine kadar olan kısım kullanılmıştır. Kullanılan Fibonacci dizisi; 8, 13, 21, 34, ... , 610, 987, 1597 şeklinde artarak ilerlemektedir.

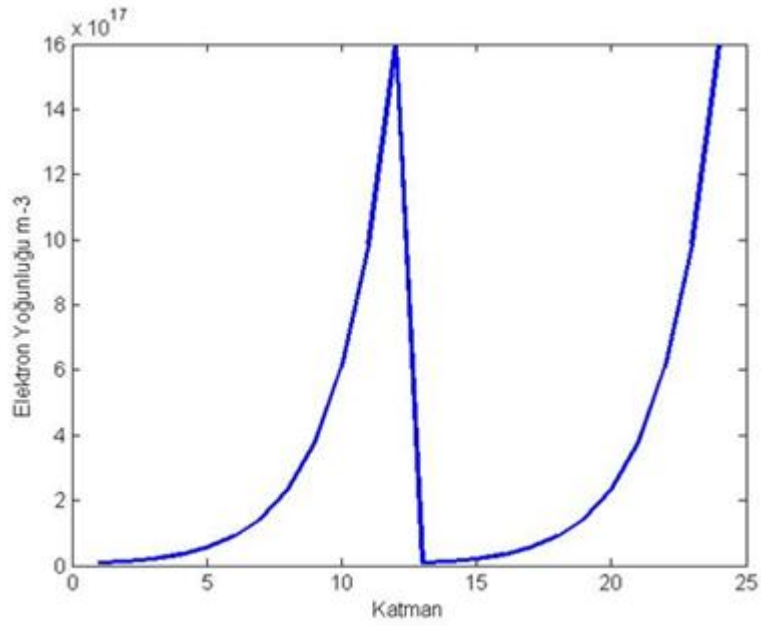
$$F_5 = 8, F_6 = 13, F_7 = 21, \dots, F_{14} = 610, F_{15} = 987, F_{16} = 1597$$

İlk iki incelemede olduğu gibi plazma yapısının kalınlığı sabit tutulup 24 özdeş alt katmana ayrılmıştır. $(F_5 - F_{16})^2$ ifadesi üzerinde yer alan 2 sayısı dizinin tekrarlama sayısını ifade etmektedir. Kullanılan Fibonacci sayı dizisi 12 terimli olduğu için iki tane 12 terimli sayı dizisi yan yana getirilerek elektron yoğunluğu profili oluşturulmuştur.

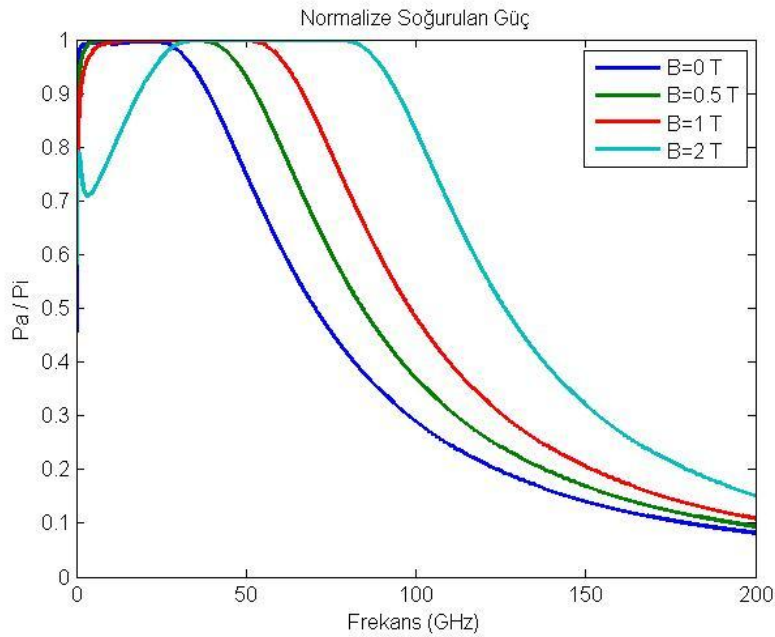


Şekil 4.8. Elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine göre değişen plazmanın mükemmel iletken yüzeyi kapladığı durum

Her bir dizi elemanı 10^{15} ile çarpılarak plazma içerisindeki elektron yoğunluğu değişimi elde edilmiştir (Şekil 4.9). Plazma katmanı boyunca en düşük elektron yoğunluğu 1. ve 13. katmanda olup değeri, $N_{\min} = F_5 \times 10^{15} \text{ m}^{-3} = 8 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ iken, en yüksek elektron yoğunluğu plazmanın 12. ve son katmanında olup değeri, $N_{\max} = F_{16} \times 10^{15} \text{ m}^{-3} = 1597 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 'tür.



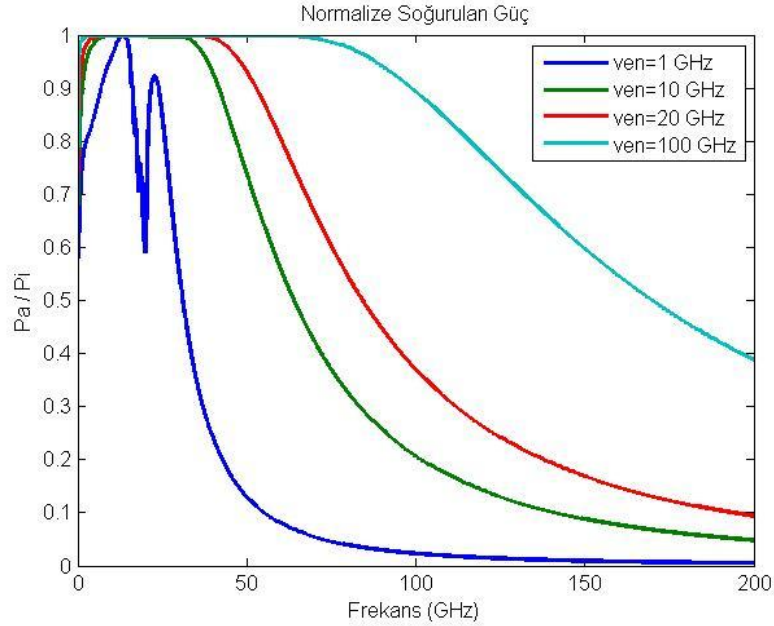
Şekil 4.9. Plazma elektron yoğunluğunun Fibonacci sayı dizisine $(F_5 - F_{16})^2$ göre değişimi, $N_{\min} = 8 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, $N_{\max} = 1597 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$



Şekil 4.10. Farklı dış manyetik alan değerleri için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $(F_5 - F_{16})^2$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $\nu_{\text{en}} = 20 \text{ GHz}$

Şekil 4.10 incelendiğinde dış manyetik alan arttıkça soğurma bandınının hem genişlediği hem de yüksek frekanslara doğru kaydığı görülmüştür. Dış manyetik alan 0-1 T arasında iken 1-38 GHz aralığında soğurulan güç %90 seviyelerinin üzerinde iken dış manyetik alan 2 T olduğu zaman 19 GHz'den 94 GHz'e kadar olan aralıkta soğurulan güç %90 seviyelerinin üzerinde olmaktadır. Dış manyetik alan 1 T olduğu zaman 66 GHz'e, 0.5 T olduğu zaman 52 GHz'e ve 0 T olduğu

zaman 38 GHz'e kadar gelen elektromanyetik dalgayı plazma kaplaması %90'nın üzerinde soğurmaktadır.

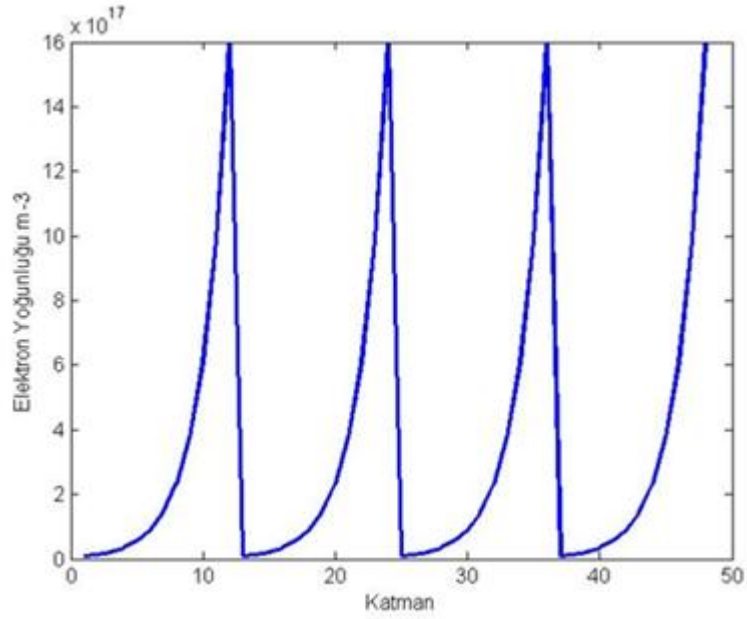


Şekil 4.11. Farklı çarpışma frekansları için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $(F_5 - F_{16})^2$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $B = 0.5$ T

Dış manyetik alan sabit, çarpışma frekansı 1 GHz değerinde olduğunda plazma kaplamasının soğurduğu güç, 7-16 GHz ve 21.5-23.5 GHz frekans aralıklarında %90 seviyelerinin üzerinde olmaktadır. Çarpışma frekansı 100 GHz olduğu zaman 98 GHz'e kadar, 10 GHz olduğunda 41 GHz'e kadar gelen elektromanyetik dalga plazma kaplaması tarafından %90'nın üzerinde soğurulmaktadır. Çarpışma frekansı azaldıkça plazma kaplamasının soğurma bandının daraldığı görülmüştür.

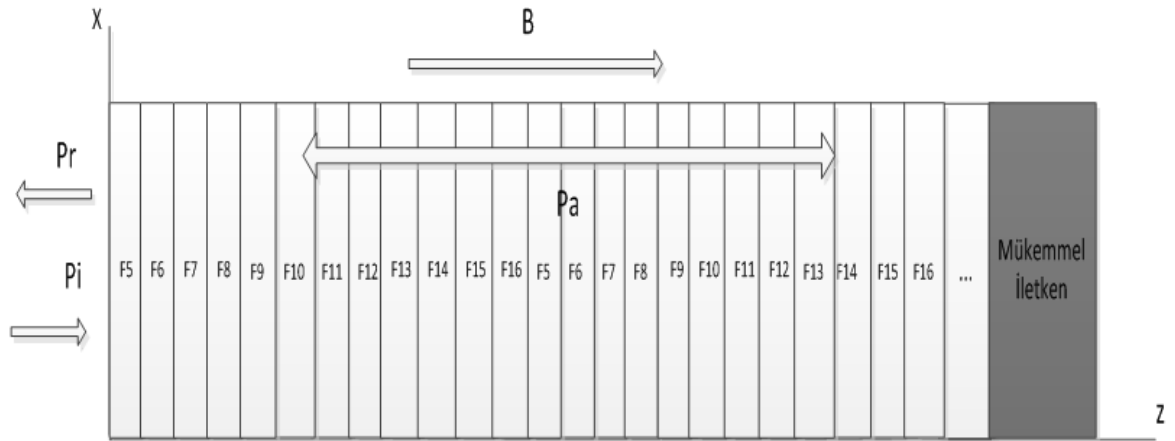
4.1.4. Elektron Yoğunluğu Fibonacci Sayı Dizisi $(F_5 - F_{16})^4$ Şeklinde Değişen Plazma Kaplaması

Bu kısımda Bölüm 4.1.3'te kullanılan Fibonacci sayı dizisi kullanılmış ancak 12 terimli olan dizi, dördü olarak kullanılarak elektron yoğunluğu profili oluşturulmuştur. Bu nedenle önceki incelemelerden farklı olarak plazma kaplaması, 24 yerine 48 özdeş alt katmana ayrılmıştır. Ancak plazma kalınlığı sabit tutulmuş olup her bir katman kalınlığı, bundan önceki incelemelerdeki katman kalınlığına göre yarıya düşürülmüştür. Her bir dizi elemanı 10^{15} ile çarpılarak plazma içerisindeki elektron yoğunluğu profili oluşturulmuş. Plazma kaplamasının elektron yoğunluğu değişimi Şekil 4.12 ile gösterilmiştir.

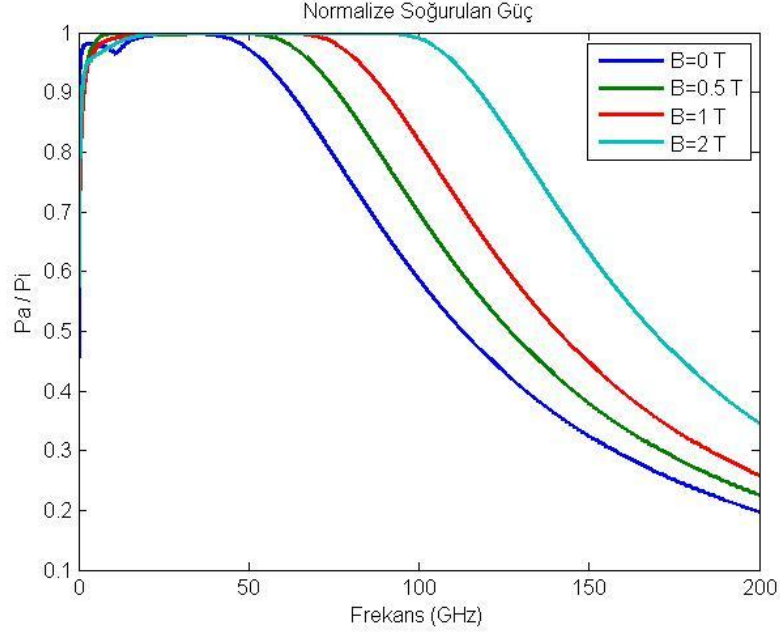


Şekil 4.12. Plazma elektron yoğunluğunun Fibonacci sayı dizisine ($F_5 - F_{16}$)⁴ göre değişimi, $N_{\min} = 8 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, $N_{\max} = 1597 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$

Plazma katmanı boyunca en düşük elektron yoğunluğu $N_{\min} = 8 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ iken, en yüksek elektron yoğunluğu $N_{\max} = 1597 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 'tür. Şekil 4.13 ile her bir katman için plazmanın elektron yoğunluğu değişimi gösterilmiştir.

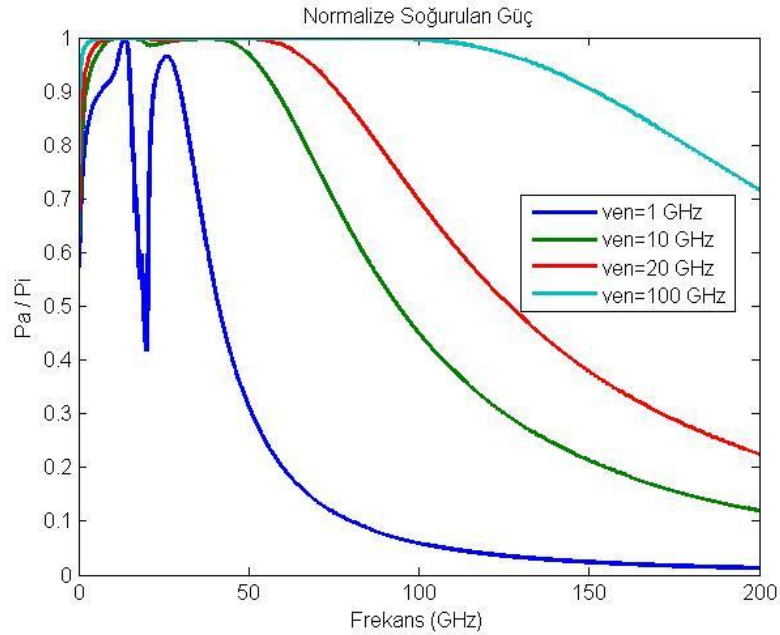


Şekil 4.13. Elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine ($F_5 - F_{16}$)⁴ göre değişen plazmanın iletken yüzeyi kapladığı durum



Şekil 4.14. Farklı manyetik alan değerleri için elektron yoğunluğu Fibonacci dizisine $(F_5 - F_{16})^4$ göre değişen plazmanın yansıttığı güç, $\nu_{en} = 20$ GHz

Şekil 4.14'te gösterildiği gibi dış manyetik alan arttıkça soğurma bandı ciddi oranda genişlemektedir. Düşük frekanslarda (2 GHz ve üzeri) dış manyetik alan 0 T ile 2 T arasında olduğunda soğurulan güç, %90 seviyelerinin üzerindedir. Plazma kaplaması, dış manyetik alan 2 T olduğu zaman 117 GHz'e, 1 T olduğu zaman 89 GHz'e, 0.5 T olduğu zaman 75 GHz'e ve 0 T olduğu zaman 62 GHz'e kadar gelen elektromanyetik dalgayı %90'nın üzerinde soğurmaktadır.

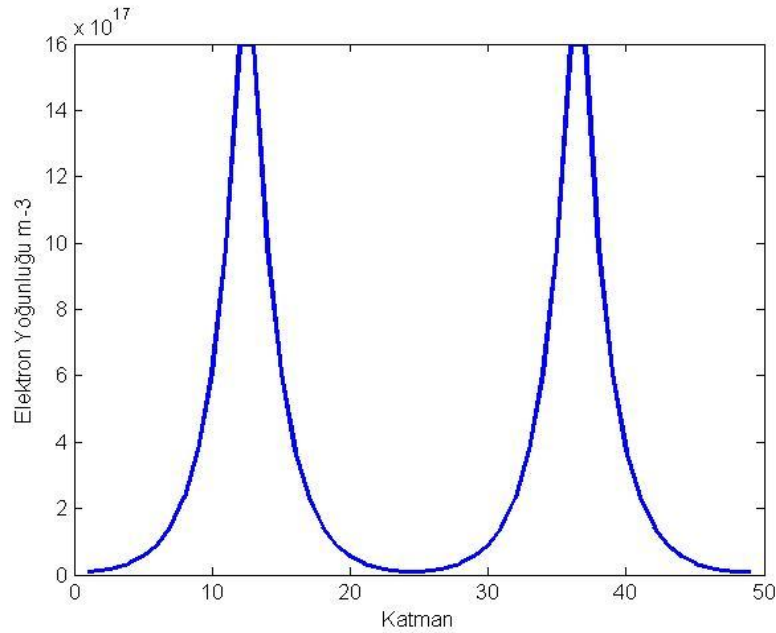


Şekil 4.15. Farklı çarpışma frekansları için elektron yoğunluğu Fibonacci dizisine $(F_5 - F_{16})^4$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $B = 0.5$ T

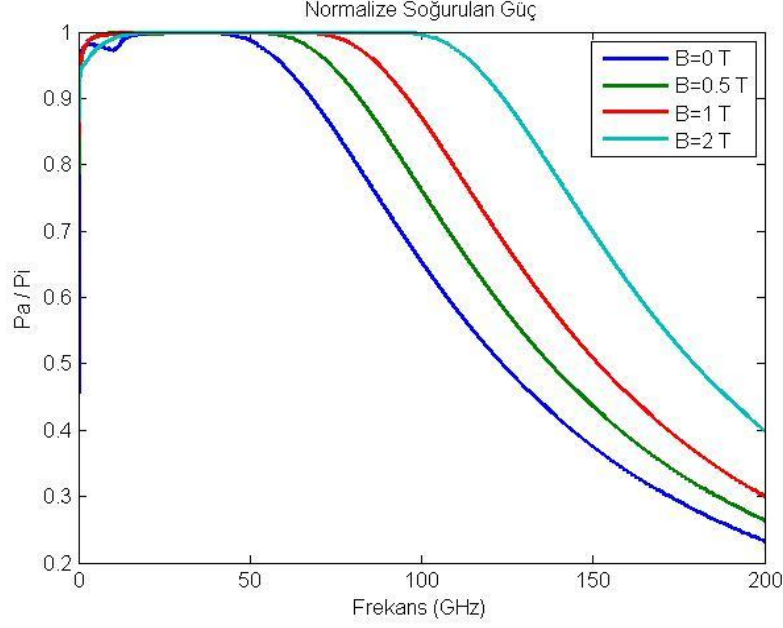
Şekil 4.15 detaylı incelendiğinde plazma ortamı, çarpışma frekansı 100 GHz olduğu zaman 151 GHz'e, 10 GHz olduğu zaman 58 GHz'e kadar gelen elektromanyetik dalganın gücünü %90'nın üzerinde soğurmaktadır. Çarpışma frekansı 1 GHz değerinde olduğu zaman plazma ortamı tarafından soğurulan güç, 7-15 GHz ile 22-30 GHz frekans aralığında %90 seviyelerinin üzerinde olduğu görülmektedir. Çarpışma frekansı 1 GHz olduğu durumda plazma ortamı, 7 GHz altında gelen radar sinyallerini istenilen seviyede soğuramamaktadır. Çarpışma frekansının 100 GHz olması durumunda plazma, 380 MHz ve üzerinde gelen tehdit sinyallerini %90 üzerinde soğurmaktadır.

4.1.5. Elektron Yoğunluğu Fibonacci Sayı Dizisi $((F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5))^2$ Şeklinde Değişen Plazma Kaplaması

Bu kısımda Fibonacci sayı dizisi olarak $(F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5)(F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5) = ((F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5))^2$ kullanılmıştır. Bu nedenle plazmanın elektron yoğunluğu çarpanları 8, 13, 21, 34, ... , 1597, 1597, ... , 34, 21, 13, 8 şeklinde değişmektedir. Her bir dizi elemanı 10^{15} ile çarpılarak plazma içerisindeki elektron yoğunluğu değişimi Şekil 4.16 gösterildiği şekilde elde edilmiştir. Plazma katmanı boyunca en düşük elektron yoğunluğu $N_{\min} = 8 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ iken, en yüksek elektron yoğunluğu $N_{\max} = 1597 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 'tür.

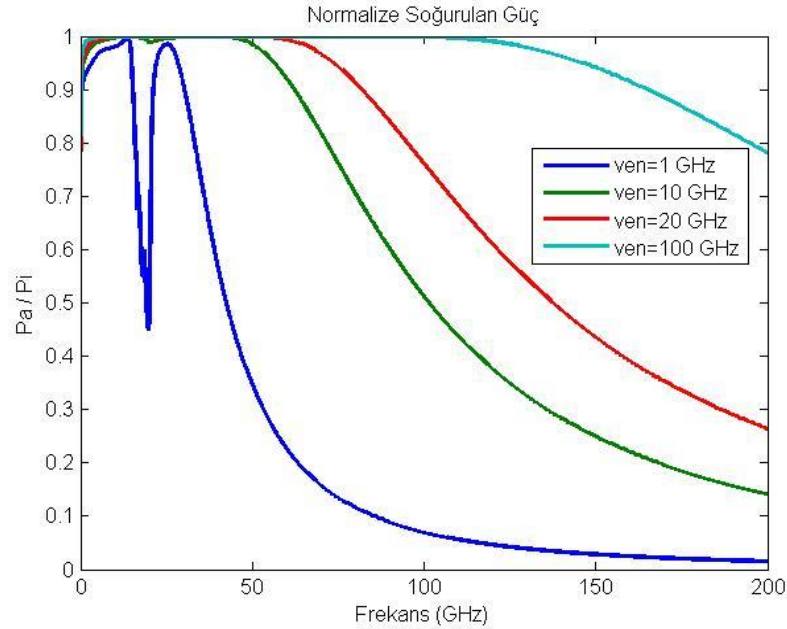


Şekil 4.16. Plazma elektron yoğunluğunun Fibonacci sayı dizisine $((F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5))^2$ göre değişimi, $N_{\min} = 8 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, $N_{\max} = 1597 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$



Şekil 4.17. Farklı manyetik alan değerleri için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $((F_5-F_{16})(F_{16}-F_5))^2$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $\nu_{en} = 20$ GHz

1 GHz ve üzeri frekanslarda dış manyetik alan 0 T ile 2 T arasında olduğunda plazma kaplamasının soğurma performansı %95 seviyelerinin üzerine çıkmaktadır. Plazma kaplaması, dış manyetik alan 2 T olduğu zaman 123 GHz'e, 1 T olduğu zaman 95 GHz'e, 0.5 T olduğu zaman 81 GHz'e ve 0 T olduğu zaman 67 GHz'e kadar gelen elektromanyetik dalganın gücünü %90'nın üzerinde soğurmaktadır.



Şekil 4.18. Farklı çarpışma frekansları için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $((F_5-F_{16})(F_{16}-F_5))^2$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $B = 0.5$ T

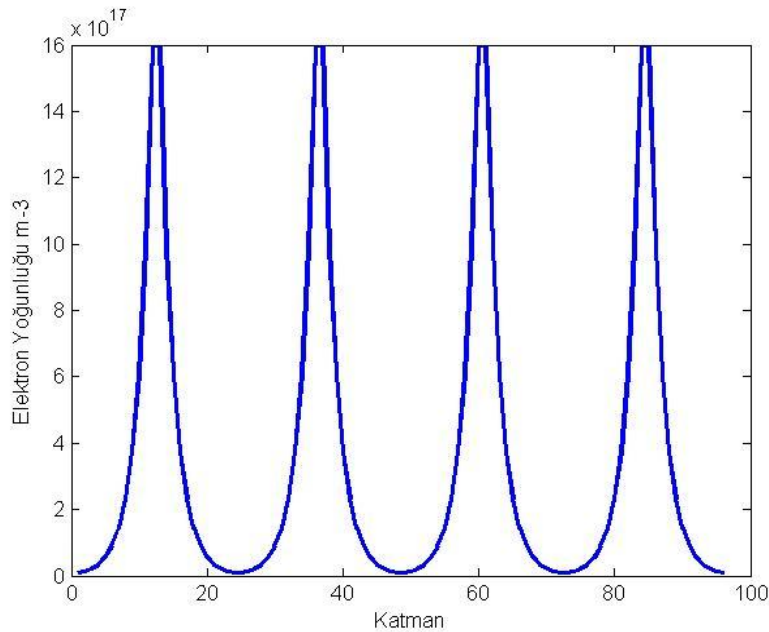
Şekil 4.18 ile gösterildiği gibi çarpışma frekansı arttıkça plazmanın soğurma bandı kayda değer oranda genişlemektedir. Çarpışma frekansı 10 GHz ile 100 GHz arasında olduğunda soğurulan güç 170 MHz'dan itibaren %90 seviyelerinin üzerine çıkarken çarpışma frekansı 1 GHz olduğu zaman plazma tarafından soğurulan güç, 500 MHz'den itibaren %90 seviyelerinin üzerinde olmaya başlamaktadır. Plazma kaplaması, çarpışma frekansı 100 GHz olduğu zaman 160 GHz'e, çarpışma frekansı 20 GHz olduğu zaman 81 GHz'e ve çarpışma frekansı 10 GHz olduğu zaman 62 GHz'e kadar gelen radar sinyallerini %90'nın üzerinde soğurmaktadır.

4.1.6. Elektron Yoğunluğu Fibonacci Sayı Dizisi $((F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5))^4$ Şeklinde Değişen Plazma Kaplaması

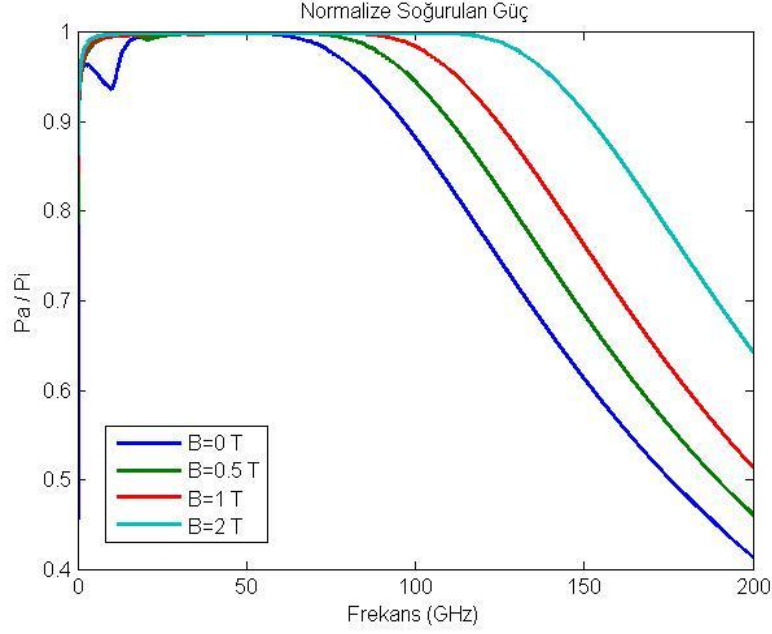
Bu incelemede Bölüm 4.1.5'teki incelemeden farklı olarak plazma yapısının kalınlığı sabit tutulup, plazma kaplaması 48 yerine 96 özdeş alt katmana ayrılmıştır. Bu incelemedeki Fibonacci dizilimi aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

$$\begin{aligned} & (F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5)(F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5)(F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5)(F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5) \\ & = ((F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5))^4 \end{aligned}$$

Bu dizilim sayesinde plazma katmanı boyunca elektron yoğunluğu değişim hızı, bir önceki çalışmaya göre iki katına çıkarılmıştır. Her bir dizi elemanı 10^{15} ile çarpılarak plazma içerisindeki elektron yoğunluğu değişimi Şekil 4.19 ile gösterildiği gibi elde edilmiştir.

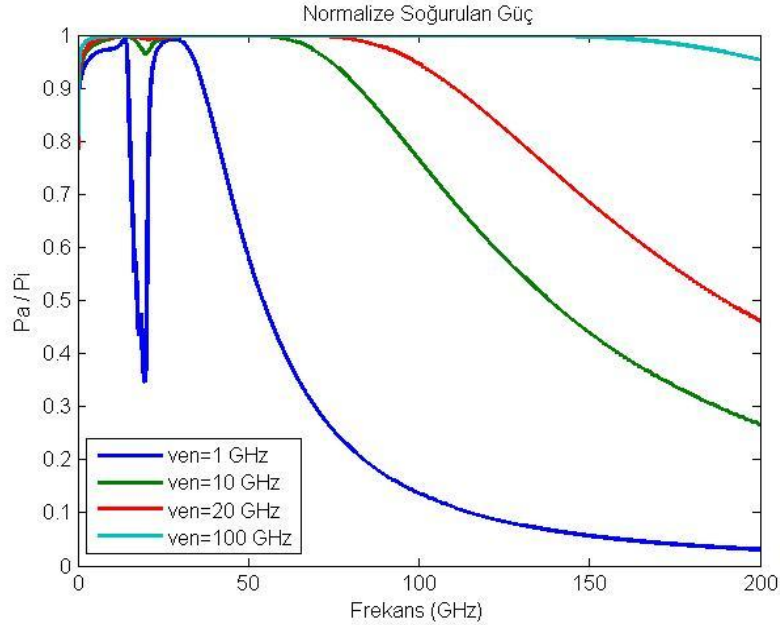


Şekil 4.19. Plazma elektron yoğunluğunun Fibonacci sayı dizisine $((F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5))^4$ göre değişimi, $N_{\min} = 8 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, $N_{\max} = 1597 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$



Şekil 4.20. Farklı manyetik alan değerleri için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $((F_5-F_{16})(F_{16}-F_5))^4$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $v_{en} = 20$ GHz

Şekil 4.20 ile gösterildiği gibi dış manyetik alan arttıkça soğurma bandı genişlemektedir. 250 MHz ve üzeri frekanslarda dış manyetik alan 0 T ile 2 T arasında olduğunda plazmanın soğurma performansı %90 seviyelerinin üzerine çıkmaktadır. Plazma kaplaması, dış manyetik alan 2 T olduğu zaman 152 GHz'e, 1 T olduğu zaman 124 GHz'e, 0.5 T için 110 GHz'e ve 0 T için 96 GHz'e kadar gelen elektromanyetik dalganın gücünü %90'nın üzerinde soğurmaktadır.

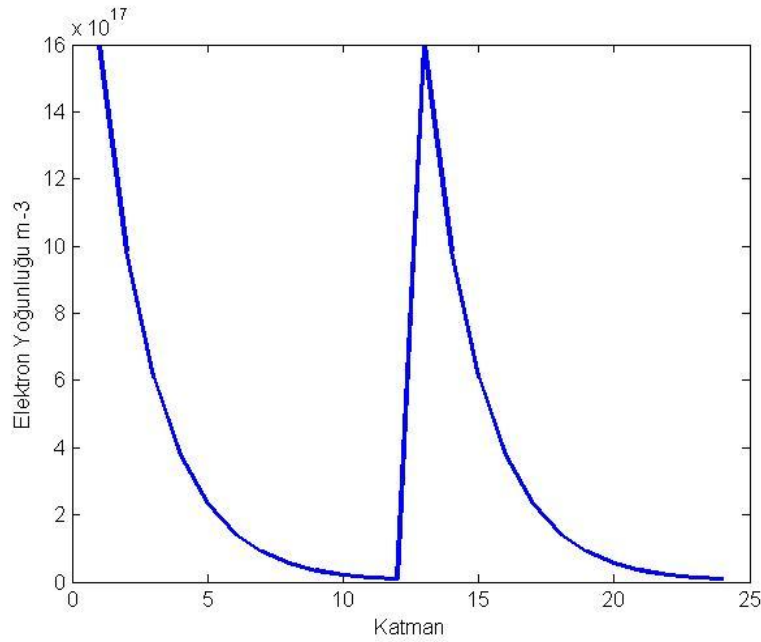


Şekil 4.21. Farklı çarpışma frekansları için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $((F_5-F_{16})(F_{16}-F_5))^4$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $B = 0.5$ T

Plazma kaplaması tarafından soğurulan güç çarpışma frekansı 10 GHz olduğunda 250 MHz'den itibaren, 100 GHz olduğunda 80 MHz'den itibaren %90 seviyelerinin üzerine çıkmaktadır. Çarpışma frekansı 100 GHz olduğu zaman 155 GHz'e kadar, 20 GHz olduğu zaman 79 GHz'e ve 10 GHz olduğu zaman 57 GHz'e kadar gelen dalganın gücü plazma tarafından %100'e yakın soğurulmaktadır. Çarpışma frekansı 1 GHz olan plazma ortamının ise 500 MHz – 14.5 GHz ile 21.5 - 36 GHz frekans aralığında gelen dalgayı %90 seviyesinin üzerinde soğurduğu görülmektedir.

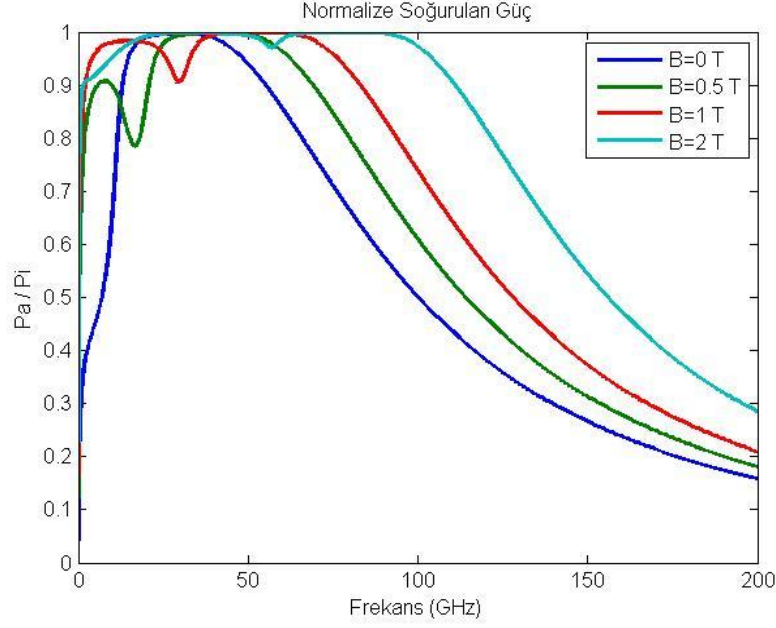
4.1.7. Elektron Yoğunluğu Fibonacci Sayı Dizisi $(F_{16} - F_5)^2$ Şeklinde Değişen Plazma Kaplaması

Bu bölümde yapılan çalışmada Fibonacci sayılarının 16. terimi olan 1597'den başlayarak 987, 610, ... , 13, 8 sayısına yani dizinin 5. terimine kadar ilerlenmiştir. Bu dizilimden iki tanesinin yan yana getirilmesiyle 24 terimli yeni bir dizilim oluşturulmuştur. Bu dizilimde yer alan her bir dizi elemanı 10^{15} ile çarpıldığı zaman plazma içerisindeki elektron yoğunluğu değişimi Şekil 4.22 ile gösterildiği gibi olmaktadır.

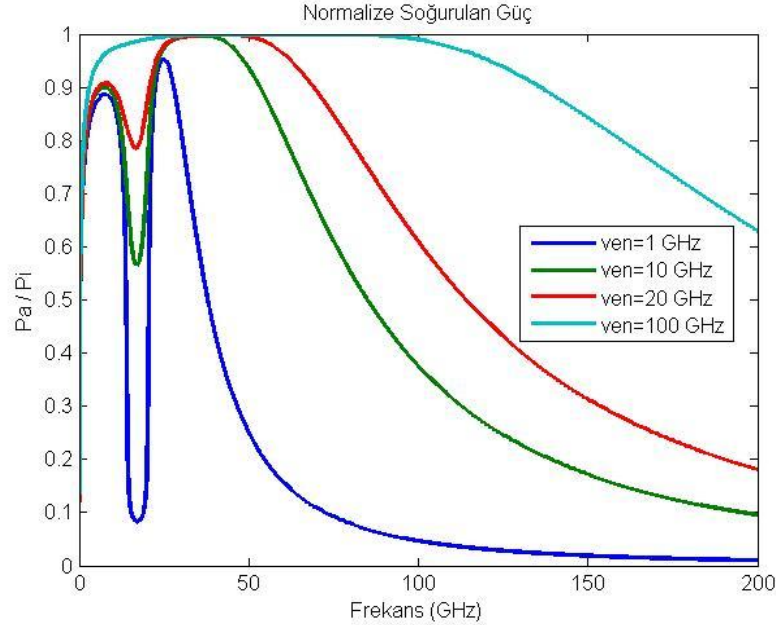


Şekil 4.22. Plazma elektron yoğunluğunun Fibonacci sayı dizisine $(F_{16}-F_5)^2$ göre değişimi, $N_{\min} = 8 \times 10^{15} m^{-3}$, $N_{\max} = 1597 \times 10^{15} m^{-3}$

Plazma boyunca en düşük elektron yoğunluğu 12. ve 24. katmanda olup değeri, $N_{\min} = 8 \times 10^{15} m^{-3}$ iken, en yüksek elektron yoğunluğu plazmanın 1. ve 13. katmanında olup değeri, $N_{\max} = 1597 \times 10^{15} m^{-3}$ 'tür.



Şekil 4.23. Farklı manyetik alan değerleri için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $(F_{16}-F_5)^2$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $\nu_{en} = 20$ GHz



Şekil 4.24. Farklı çarpışma frekansları için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $(F_{16}-F_5)^2$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $B = 0.5$ T

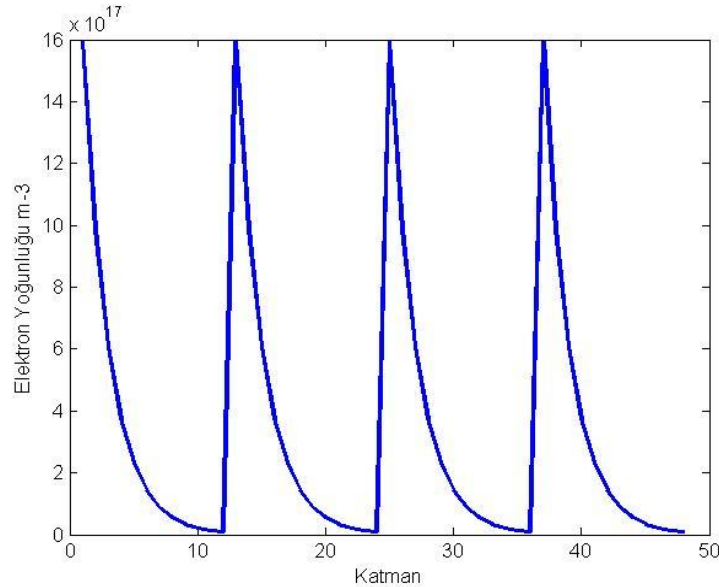
Şekil 4.23'te dış manyetik alan 0.5 T ile 2 T arasında olduğunda soğurma performansı 6 GHz'den itibaren %90 seviyelerinin üzerine çıkmaktadır. Dış manyetik alan 2 T olduğu zaman plazma yapısı, 110 GHz'e kadar gelen elektromanyetik dalgayı %90'nın üzerinde soğururken, dış manyetik alan şiddeti azaldıkça plazmanın soğurma bandı daralmakta ve soğurucu özelliği kötüleşmektedir. Plazma kaplaması, dış manyetik alan 1 T için 82 GHz'e, 0.5 T

için 68 GHz'e ve 0 T için 54 GHz'e kadar gelen elektromanyetik dalganın gücünü %90'nın üzerinde soğurmaktadır.

Şekil 4.24'te ise plazma ortamının soğurucu özelliği çarpışma frekansının artması ile hızlı bir şekilde iyileşmektedir. Çarpışma frekansı 20 GHz ve altında olduğu zaman 22 GHz ve altındaki frekanslarda soğurulan güç %90 seviyelerinin altında olmaktadır. Plazma, çarpışma frekansı 100 GHz olduğu zaman 135 GHz'e, çarpışma frekansı 10 GHz'e eşitken 53 GHz'e kadar elektromanyetik dalganın gücü %90'nın üzerinde soğurmaktadır. Plazma ortamının çarpışma frekansı 1 GHz olduğu zaman soğurulan güç 23-28 GHz frekans aralığında %90 seviyelerinin üzerinde olmaktadır.

4.1.8. Elektron Yoğunluğu Fibonacci Sayı Dizisi $(F_{16} - F_5)^4$ Şeklinde Değişen Plazma Kaplaması

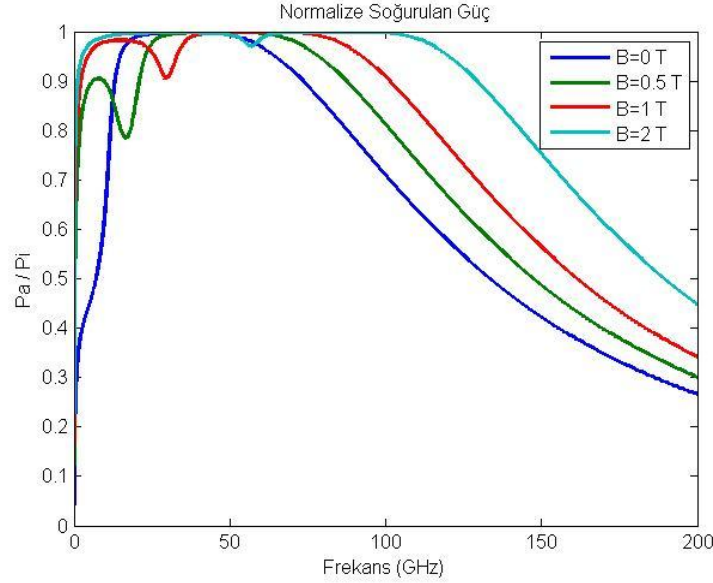
Fibonacci sayılarının 16. teriminden başlayarak (1597, 987, 610, ... , 13, 8) 5. terimine kadar azalarak devam eden dizilimin dört kez yan yana getirilmesiyle yeni bir dizilim oluşturulmuştur. Plazma kaplamasının kalınlığı sabit tutulup 48 özdeş alt katmana ayrılmıştır. Her bir dizi elemanı 10^{15} ile çarpıldıktan sonra plazma içerisindeki elektron yoğunluğu değişimi elde edilmiştir (Şekil 4.25).



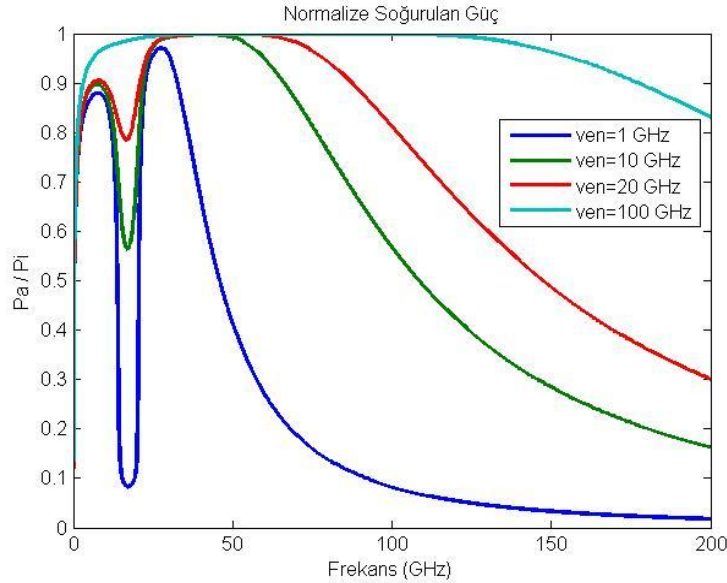
Şekil 4.25. Plazma elektron yoğunluğunun Fibonacci sayı dizisine $(F_{16}-F_5)^4$ göre değişimi, $N_{\min} = 8 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, $N_{\max} = 1597 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$

Şekil 4.26 ile gösterildiği dış manyetik alan 1 T ile 2 T arasında olduğunda soğurulan güç, 3 GHz'den itibaren %90 seviyelerinin üzerine çıkmaktadır. Dış manyetik alan 2 T olduğu zaman 128 GHz'e, 1 T olduğu zaman 101 GHz'e, 0.5 T

için 87 GHz'e ve 0 T için 72 GHz'e kadar gelen dalganın gücünü plazma yapısı %90'nın üzerinde soğurmaktadır.



Şekil 4.26. Farklı manyetik alan değerleri için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $(F_{16}-F_5)^4$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $\nu_{en} = 20$ GHz



Şekil 4.27. Farklı çarpışma frekansları için elektron yoğunluğu Fibonacci sayı dizisine $(F_{16}-F_5)^4$ göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $B = 0.5$ T

Şekil 4.27'de çarpışma frekansı 100 GHz olduğu zaman 175 GHz'e kadar plazma yapısı gelen elektromanyetik dalgayı %90'nın üzerinde soğururken, çarpışma frekansı azaldıkça bu değer hızıca düşmektedir. Çarpışma frekansı 10 GHz'e eşitken 66 GHz'e kadar, çarpışma frekansı 1 GHz değerinde olduğu zaman 23-32 GHz frekans aralığında gelen dalganın gücünün %90'ı plazma tarafından soğurulmaktadır.

4.1.9. Sonuçların Değerlendirilmesi

Bölüm 4.1’de yapılan tüm çalışmalar neticesinde elde sonuçlarını birlikte görebilmek için Çizelge 4.1 oluşturulmuştur. Bu çizelge ile sonuçlar birbiriyle karşılaştırılarak askeri uygulamalarda en iyi sonucu verebilecek elektron yoğunluğu profilleri değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.1. Farklı Fibonacci sayı dizisine göre elektron yoğunluğu değişen plazma kaplamalarının farklı dış manyetik alan ve çarpışma frekansına göre soğurma bantları

Plazma Elektron Yoğunluğu	Dış Manyetik Alan ve Çarpışma Frekansı	Soğurma Bandı (%90)	Soğurulan Radar Sinyalinin Frekans Bandı
$(F_1 - F_{24})$	0 T, 20 GHz	50 MHz – 90 GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	0.5 T, 20 GHz	80 MHz – 103 GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	1 T, 20 GHz	300 MHz – 117 GHz	UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	2 T, 20 GHz	3 GHz – 144 GHz	S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	0.5 T, 1 GHz	5 GHz – 16 GHz	C, X, Ku
	0.5 T, 10 GHz	170 MHz – 80 GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	0.5 T, 100 GHz	200 MHz – 200+ GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
$(F_{24} - F_1)$	0.5 T, 1 GHz	–	–
	0.5 T, 10 GHz	100 GHz – 200+ GHz	W
			W

	0.5 T, 20 GHz	100 GHz – 200+ GHz	
	0.5 T, 100 GHz	97 GHz – 200+ GHz	W
$(F_5 - F_{16})^2$	0 T, 20 GHz	90 MHz – 38 GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka
	0.5 T, 20 GHz	650 MHz – 52 GHz	UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V
	1 T, 20 GHz	1.5 GHz – 66 GHz	L, S, C, X, Ku, K, Ka, V
	2 T, 20 GHz	19 GHz – 94 GHz	K, Ka, V, W
	0.5 T, 1 GHz	7 GHz – 16 GHz 21.5 GHz – 23.5 GHz	C, X, Ku, K
	0.5 T, 10 GHz	1.5 GHz – 41 GHz	L, S, C, X, Ku, K, Ka
	0.5 T, 100 GHz	130 MHz – 98 GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
$(F_5 - F_{16})^4$	0 T, 20 GHz	200 MHz – 62 GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V
	0.5 T, 20 GHz	1.5 GHz – 75 GHz	L, S, C, X, Ku, K, Ka, V
	1 T, 20 GHz	2 GHz – 89 GHz	S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	2 T, 20 GHz	1 GHz – 117 GHz	L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	0.5 T, 1 GHz	7 GHz – 15 GHz ve 22 GHz – 30 GHz	C, X, Ku, K, Ka
	0.5 T, 10 GHz	2.5 GHz – 58 GHz	S, C, X, Ku, K, Ka, V

	0.5 T, 100 GHz	380 MHz – 151 GHz	UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
$((F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5))^2$	0 T, 20 GHz	210 MHz – 67 GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V
	0.5 T, 20 GHz	120 MHz – 81 GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	1 T, 20 GHz	120 MHz – 95 GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	2 T, 20 GHz	110 MHz – 123 GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	0.5 T, 1 GHz	500 MHz – 15 GHz 21 GHz – 30 GHz	UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka
	0.5 T, 10 GHz	170 MHz – 62 GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V
	0.5 T, 100 GHz	50 MHz – 160 GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	$((F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5))^4$	0 T, 20 GHz	250 MHz – 96 GHz
0.5 T, 20 GHz		190 MHz – 110 GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
1 T, 20 GHz		190 MHz – 124 GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
2 T, 20 GHz		120 MHz -152 GHz	VHF, UHF, L,

			S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	0.5 T, 1 GHz	500MHz – 14.5 GHz 21.5 GHz – 36 GHz	UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka
	0.5 T, 10 GHz	250 MHz – 82 GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	0.5 T, 100 GHz	80 MHz – 200+ GHz	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
$(F_{16} - F_5)^2$	0 T, 20 GHz	13 GHz – 54 GHz	Ku, K, Ka, V
	0.5 T, 20 GHz	6 GHz – 9 GHz 21 GHz – 68 GHz	C, K, Ka, V
	1 T, 20 GHz	2 GHz – 82 GHz	S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	2 T, 20 GHz	2 GHz – 110 GHz	S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	0.5 T, 1 GHz	23 GHz – 28 GHz	K
	0.5 T, 10 GHz	22 GHz – 53 GHz	K, Ka, V
	0.5 T, 100 GHz	3 GHz – 135 GHz	S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
$(F_{16} - F_5)^4$	0 T, 20 GHz	13 GHz – 72 GHz	Ku, K, Ka, V
	0.5 T, 20 GHz	7 GHz – 9 GHz 21 GHz – 87 GHz	C, X, K, Ka, V, W
	1 T, 20 GHz	3 GHz – 101 GHz	S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	2 T, 20 GHz	2 GHz – 128 GHz	S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
	0.5 T, 1 GHz	23 GHz – 32 GHz	K, Ka
	0.5 T, 10 GHz	22 GHz – 66 GHz	K, Ka, V
	0.5 T, 100 GHz	3 GHz- 175 GHz	S, C, X, Ku, K, Ka, V, W

Çizelge 4.1 incelendiğinde $(F_1 - F_{24})$ ve $((F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5))^4$ profiline sahip plazma kaplamalarının en geniş soğurma bandı sağladıkları görülmektedir. Bu iki profil, dış manyetik alan 0.5 T ve çarpışma frekansı 100 GHz için yaklaşık 200 GHz genişliğinde soğurma bandı sağlamaktadırlar. Bu profiller içerisinde diğerlerinden farklı özelliğe sahip profil ise $(F_{24} - F_1)$ profilidir. $(F_{24} - F_1)$ Fibonacci sayı dizili elektron yoğunluğuna sahip plazma kaplaması, 100 GHz altında iyi bir yansıtıcı olurken 100 GHz üzerindeki frekanslarda gelen sinyalleri %90 üzerinde soğurarak iyi bir soğurucu olarak davranmaktadır. Bu sayede bu profilin diğerlerinden farklı olarak çok yüksek frekanslarda çalışan radar vb. askeri tehditlere karşı kullanılmasını mümkün kılmaktadır.

4.2. Farklı Fibonacci Dizilimli Elektron Yoğunluğu Profiline Sahip Plazma Kaplaması

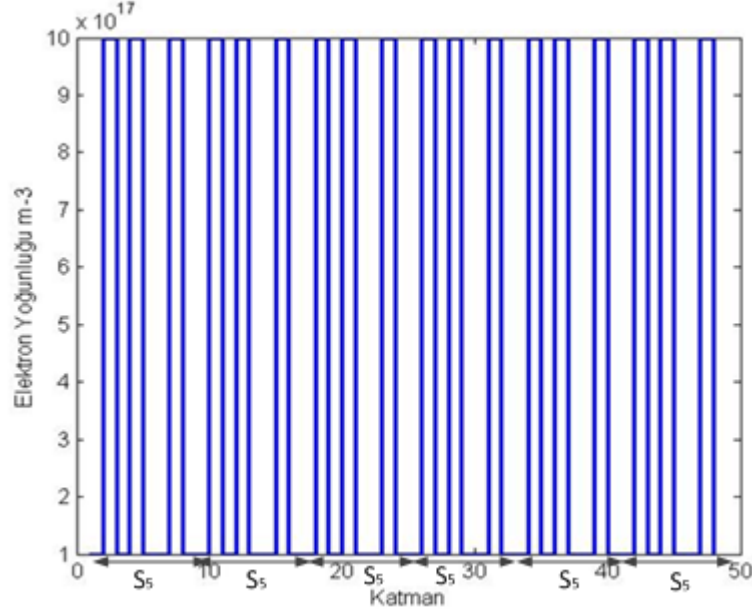
Fibonacci diziliminde seri elemanları, kendinden bir önceki dizi elemanlarının bir araya gelmesiyle elde edilmektedir. Örneğin; S_3 dizisi, S_1 ve S_2 dizisinin yan yana gelmesiyle ($S_3 = S_1S_2 = LHL$) oluşmaktadır. (4-2) ile Fibonacci dizilerinin elde edilişi gösterilmiştir:

$$\begin{aligned}
 S_0 &= H \\
 S_1 &= L \\
 S_2 &= HL \\
 S_3 &= LHL \\
 S_4 &= HLLHL \\
 S_5 &= LHLHLLHL
 \end{aligned}
 \tag{4-2}$$

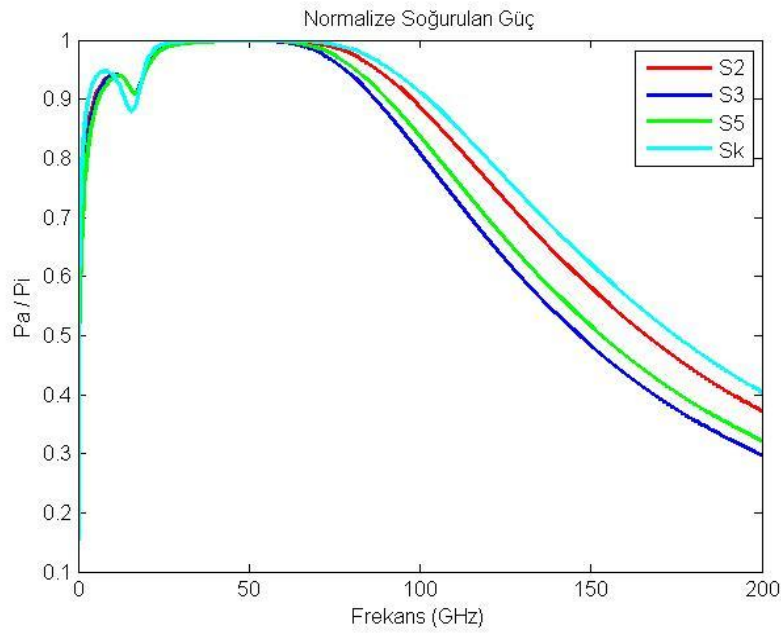
Bu tez çalışmasında H , yüksek elektron yoğunluğuna sahip plazma alt katmanını, L , düşük elektron yoğunluğuna sahip plazma alt katmanını ifade etmektedir. Plazma için elektron yoğunluğu profillerinin oluşturulması için dört farklı dizilim kullanılmıştır. Bunlar; S_2 , S_3 , S_5 ve S_k dizilimleridir. Kare dalga dizilimi (S_k) ise $S_k = HHHLLLLL$ katmanlı yapı ile sağlanmıştır. Plazma kalınlığı 48 özdeş alt katmana bölüldüğü için 24 tane S_2 diziliminin bir araya gelmesi birinci profil, 16 tane S_3 diziliminin bir araya gelmesi ikinci profil, 6 tane S_5 diziliminin bir araya gelmesi üçüncü profil, 6 tane S_k diziliminin bir araya gelmesi dördüncü profil oluşmaktadır. Bu kısımda yapılan tüm çalışmalarda plazma kalınlığı 12 cm, dış manyetik alan 0.5 T, plazma çarpışma frekansı 20 GHz olarak alınmıştır.

Elektromanyetik dalganın plazmaya dik açı ($\theta = 0^\circ$) ile geldiği varsayılmıştır. Plazmanın mükemmel iletken yüzeyi kapladığı durum göz önünde tutulmuştur.

İlk incelemede yüksek elektron yoğunluğu (N_H) 10^{18} m^{-3} alınırken, düşük elektron yoğunluğu (N_L) 10^{17} m^{-3} olarak alınmıştır. Şekil 4.28 S_5 dizimli elektron yoğunluğu profiline plazma boyunca değişimi gösterilmiştir.



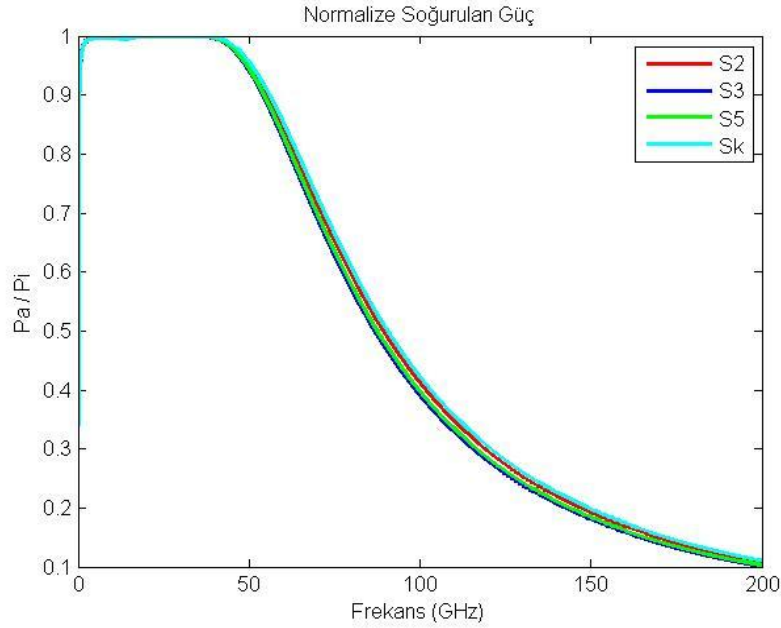
Şekil 4.28. Plazmanın Fibonacci S_5 dizilimine göre değişen elektron yoğunluğu profili



Şekil 4.29. Elektron yoğunluğu Fibonacci dizilimlerine göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $N_H = 10^{18} \text{ m}^{-3}$, $N_L = 10^{17} \text{ m}^{-3}$

Şekil 4.29'da dört farklı elektron yoğunluğuna sahip plazma kaplamalarının soğurduğu güç gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde yaklaşık 70 GHz'e kadar plazma kaplamaların soğurduğu güç birbirine yakın olurken 70 GHz'den sonra dizilime göre plazmanın soğurduğu güçte değişim gözlenmeye başlanmaktadır. 17 GHz ile 86 GHz arasında tüm profiller için soğurulan güç %90'nın üzerinde çıkmaktadır. 86 GHz'den daha yüksek frekanslarda plazmanın soğurduğu güç elektron yoğunluğu değişiminden bağımsız olarak azalmakta ve 200 GHz için soğurulan güç %30 ile %40 arasında değişmektedir. 1 GHz'den düşük frekanslarda tüm profiller için plazmanın soğurduğu güç %70 seviyelerinin altına düşmektedir.

İkinci incelemede yüksek elektron yoğunluğu $1.618 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ alınırken, düşük elektron yoğunluğu 10^{17} m^{-3} olarak alınmıştır. İlk incelemeye göre sadece yüksek elektron yoğunluğu 10^{18} m^{-3} değerinden $1.618 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ değerine düşürülerek yüksek ve düşük yoğunluk arasındaki değişim farkı azaltılmıştır. Bunun dışında kullanılan diğer parametreler aynı kalmıştır.

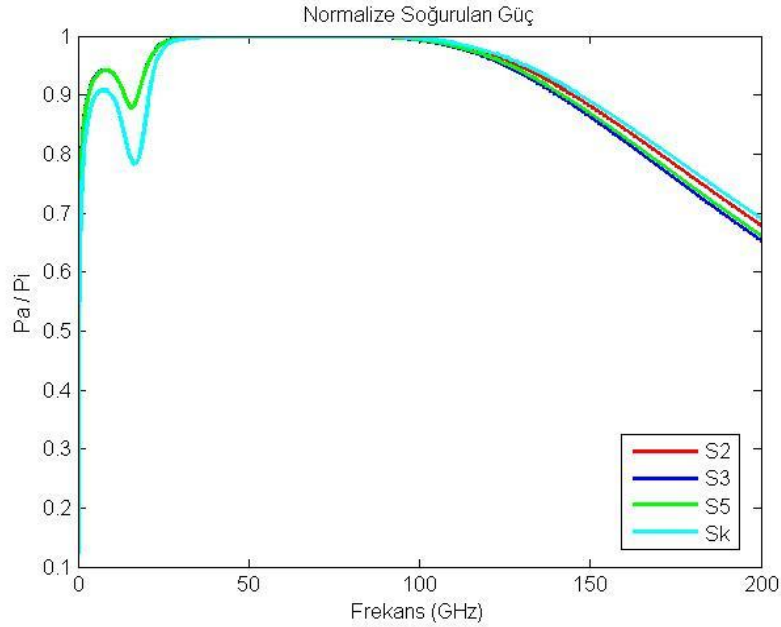


Şekil 4.30. Elektron yoğunluğu Fibonacci dizilimlerine göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $N_H = 1.618 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, $N_L = 10^{17} \text{ m}^{-3}$

Şekil 4.30 incelendiğinde kullanılan parametrelere göre dizilimlerin plazma kaplamalarının karakteristik özelliklerini etkilemediği görülmüştür. Ancak bir önceki incelemeye göre soğurma bandı daha düşük frekanslara kaymıştır. İlk incelemede 20 GHz altında soğurulan güç %90 seviyelerinde iken bu incelemede %100

seviyelerine çıkmıştır. Bu nedenle bir önceki çalışmaya göre daha düşük frekanslarda bu seviyelerdeki elektron yoğunluğunun daha iyi sonuç verdiği söylenebilir. Yüksek frekanslarda ise ilk incelemede plazma kaplaması 86 GHz'e kadar %90 seviyesinin üzerinde gücü soğururken bu incelemede plazma kaplaması 140 GHz'e kadar %90 seviyesinin üzerinde gücü soğurmaktadır. Bu nedenle bir önceki kısma göre soğurma bandının daraldığı söylenebilir. 86 GHz ve üzeri frekanslar ile 6 GHz ve altındaki frekanslarda gelen elektromanyetik dalgalar için plazma tarafından soğurulan güç azalmaktadır.

Üçüncü incelemede yüksek elektron yoğunluğu $1.618 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ alınırken, düşük elektron yoğunluğu 10^{18} m^{-3} olarak alınmıştır. İkinci incelemeye göre bu incelemede yüksek ve düşük elektron yoğunlukları 10 kat daha yüksek seçilmiştir.



Şekil 4.31. Elektron yoğunluğu Fibonacci dizilimlerine göre değişen plazmanın soğurduğu güç, $N_H = 1.618 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, $N_L = 10^{18} \text{ m}^{-3}$

Şekil 4.31 incelendiğinde 25 GHz ile 100 GHz arasında tüm profiller için soğurulan güç %100'e yakın olmaktadır. 100 GHz'den daha yüksek frekanslarda elektron yoğunluğundan bağımsız olarak soğurulan güç azalmakta ve 200 GHz için %65 ile %70 arasında değişmektedir. 1 GHz'den düşük frekanslarda plazmanın soğurduğu güç, %10 seviyelerine kadar düşmektedir. 10 GHz ile 20 GHz arasında gelen elektromanyetik dalgalar içinse S_2 ve S_k dizilimli elektron yoğunluğuna sahip plazma kaplamalarının soğurduğu güç, S_3 ve S_5 dizilimli elektron yoğunluğuna sahip plazma kaplamalara göre %10 daha düşüktür.

Üç farklı çalışmadan elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2 ile gösterilmiştir. Çizelge 4.2'ye bakıldığında en geniş soğurma bandı üçüncü profil olan $N_H = 1.618 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, $N_L = 10^{18} \text{ m}^{-3}$ elektron yoğunluğuna sahip plazma olduğu görülmektedir. Bu profil, 100 GHz ve 145 GHz arasındaki radar sinyallerini %90 üzerinde soğurarak diğer profillere göre yüksek frekanslarda daha iyi bir soğurucu olmaktadır. İkinci profilin ($N_H = 1.618 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, $N_L = 10^{17} \text{ m}^{-3}$) diğer iki profile göre en büyük artışı ise 5 GHz ve altındaki frekanslarda gelen dalganın gücünü %90'ın üzerinde soğurmasıdır. Birinci ve üçüncü profillerde 5 GHz ve altındaki frekanslarda plazma tarafından soğurulan güç %80 seviyesine düşmesine rağmen yüksek frekanslardaki yüksek soğurma kabiliyetlerinden dolayı bu bölümde yer alan profillere sahip plazma kaplamaların iyi birer soğurucu oldukları söylenebilir.

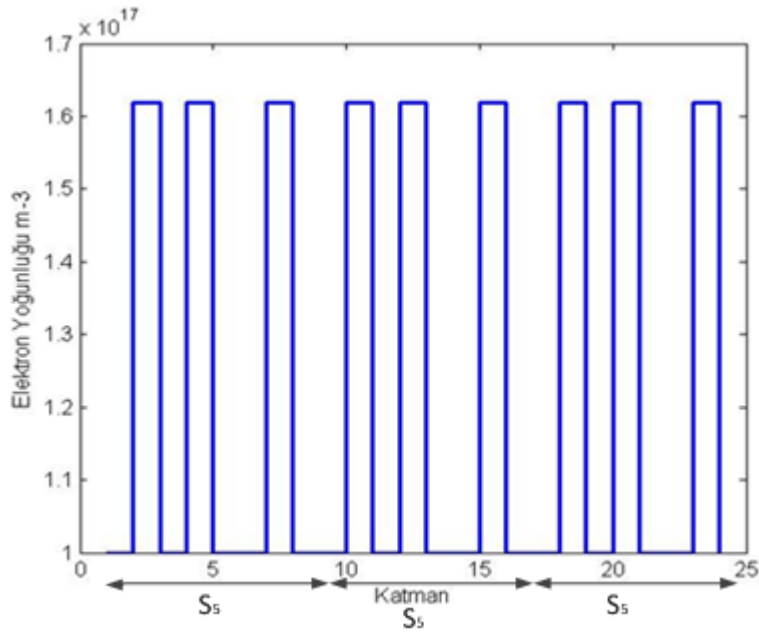
Çizelge 4.2. Fibonacci dizilim elektron yoğunluğuna sahip plazma kaplamaların farklı açılara göre soğurma bantları

Plazma Elektron Yoğunluğu	Dizilim	Soğurma Bandı (%90)	Soğurulan Radar Sinyalinin Frekans Bandı
$N_H = 10^{18} \text{ m}^{-3}$ $N_L = 10^{17} \text{ m}^{-3}$	S2	5 GHz – 97 GHz	C, X, Ku, K, Ka, V, W
	S3	6 GHz – 86 GHz	C, X, Ku, K, Ka, V, W
	S5	7 GHz – 90 GHz	C, X, Ku, K, Ka, V, W
	Sk	3 GHz – 14 GHz 17 GHz – 101GHz	S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
$N_H = 1.618 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ $N_L = 10^{17} \text{ m}^{-3}$	S2	300 MHz – 54 GHz	UHF, L, S, C, X, Ku, Ka, V
	S3	350 MHz – 53 GHz	UHF, L, S, C, X, Ku, Ka, V
	S5	350 MHz – 54 GHz	UHF, L, S, C, X, Ku, Ka, V
	Sk	400 MHz – 55 GHz	UHF, L, S, C, X, Ku, Ka, V
$N_H = 1.618 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ $N_L = 10^{18} \text{ m}^{-3}$	S2	6 GHz – 9 GHz 21 GHz – 144 GHz	C, K, Ka, V, W
	S3	4 GHz – 13 GHz 18 GHz – 139 GHz	C, X, K, Ka, V, W
	S5	4 GHz – 13 GHz 18 GHz – 140 GHz	C, X, K, Ka, V, W
	Sk	6 GHz – 9 GHz 21 GHz – 146 GHz	C, K, Ka, V, W

4.3. Farklı Sayıda S₅ Fibonacci Dizilimli Elektron Yoğunluğuna Sahip Plazma Kaplaması

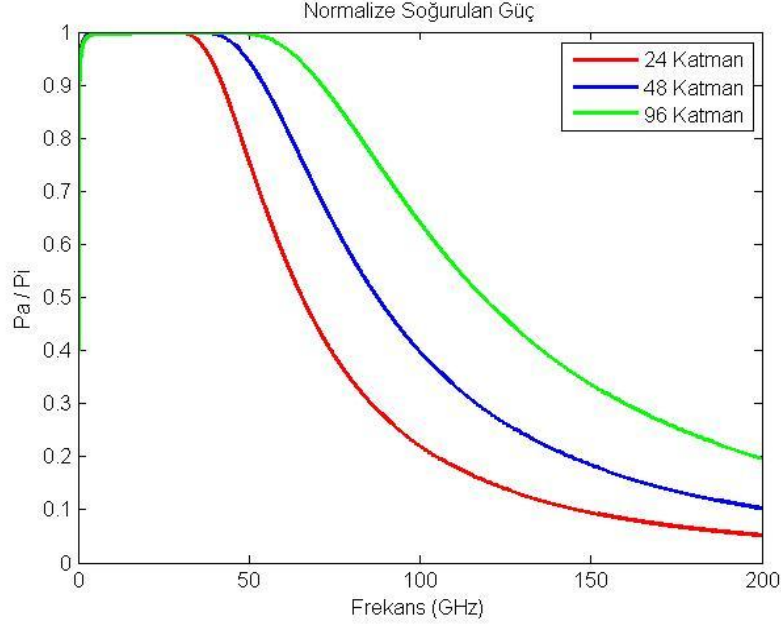
Bu kısımda bir önceki bölümde yer alan S₅ (LHLHLLHL) Fibonacci dizisi kullanılmıştır. Bölüm 4.2'de art arda 6 tane S₅ Fibonacci dizisinin bir araya gelmesiyle oluşan elektron yoğunluğu profili incelenmişti. Bu incelemede ise bu profil dâhil olmak üzere iki tane yeni profil daha eklenmiştir. Bunlar, art arda 3 tane S₅ Fibonacci dizisinin bir araya gelmesiyle oluşan elektron yoğunluğu profili ve art arda 12 tane S₅ Fibonacci dizisinin bir araya gelmesiyle oluşan elektron yoğunluğu profilidir. Her üç profil içinde plazma kalınlığı 12 cm olarak alınmıştır.

Plazma kaplamasının mükemmel iletkeni kapladığı durum için inceleme yapılırken dış manyetik alan 0.5 T ve plazmanın çarpışma frekansı 20 GHz olarak alınmıştır. Elektromanyetik dalganın plazmaya hem 0° hem de 45° geldiği durumlara bakılmıştır. Plazmanın yüksek elektron yoğunluğu $1.618 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ alınırken, düşük elektron yoğunluğu 10^{17} m^{-3} olarak alınmıştır.



Şekil 4.32. 3 tane S₅ Fibonacci dizilimli elektron yoğunluğu profili (24 Katman)

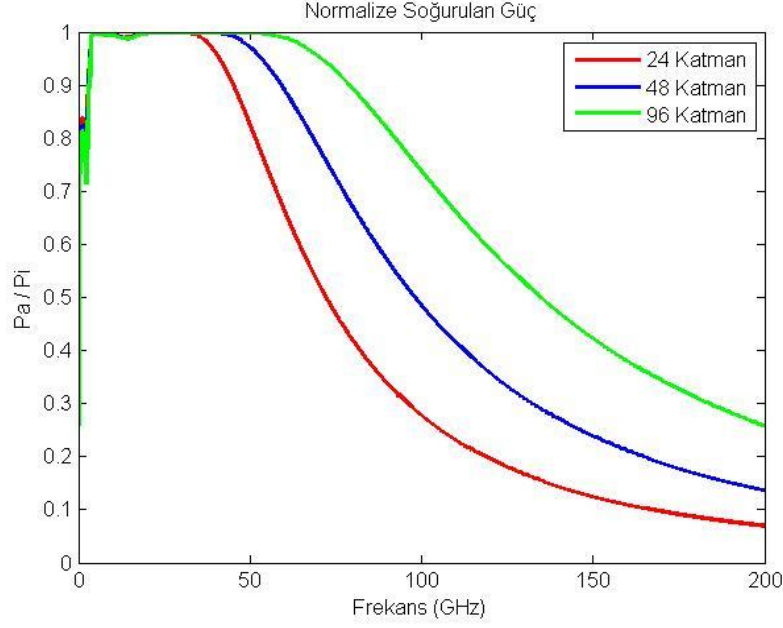
Şekil 4.32'de görüldüğü üzere plazma kalınlığı 24 katmana ayrılmıştır. Bu bölümde, plazma kalınlığı değiştirilmeden katman sayısı artırılarak elektron yoğunluğu değişim hızı artırılmış ve bu değişim hızının plazmanın soğurduğu güce olan etkisi incelenmiştir.



Şekil 4.33. Elektron yoğunluğu farklı sayıda S_5 Fibonacci dizilimli değişen plazmanın soğurduğu güç, $N_H = 1.618 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, $N_L = 10^{17} \text{ m}^{-3}$, $\theta=0^\circ$

Şekil 4.33'te elde edilen sonuçlar incelendiğinde aynı kalınlıkta kullanılan S_5 Fibonacci dizilim tekrar sayısı arttıkça soğurma bandı genişlemektedir. 3 tane art arda S_5 Fibonacci dizilimli (24 katman) elektron yoğunluğuna sahip plazma ortamı, yaklaşık 320 MHz ile 42 GHz arasında gelen elektromanyetik dalgayı %90'nın üzerinde soğurmaktadır. 6 tane art arda S_5 Fibonacci dizilimli (48 katman) elektron yoğunluğuna sahip plazma ortamı, yaklaşık 340 MHz ile 54 GHz arasında gelen elektromanyetik dalgayı %90'nın üzerinde soğurmaktadır. 12 tane art arda S_5 Fibonacci dizilimli (96 katman) elektron yoğunluğuna sahip plazma ortamı, yaklaşık 350 MHz ile 71 GHz arasında gelen elektromanyetik dalgayı %90'nın üzerinde soğurmaktadır.

50 GHz ve üzeri yüksek frekanslarda frekans 200 GHz'e gittikçe plazma kaplaması tarafından soğurulan güç ciddi oranda azalmakta en iyi %30 soğurma olmaktadır. Düşük frekanslar içinse plazma yapısı, yaklaşık 320 MHz'e kadar gelen elektromanyetik dalgaları %90 üzerinde soğurmaktadır. Ancak 320 MHz altında gelen dalga içinse plazmanın soğurduğu güç %40 seviyelerine düşmektedir.

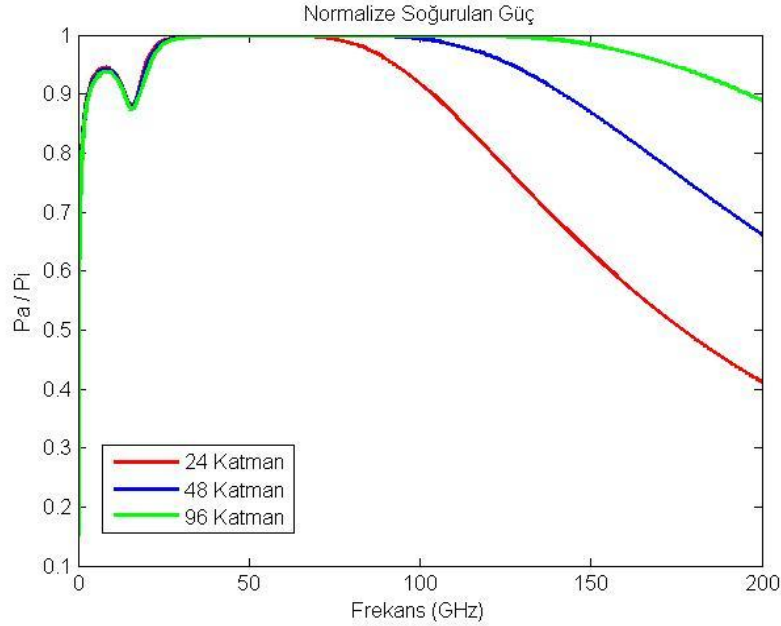


Şekil 4.34. Elektron yoğunluğu farklı sayıda S_5 Fibonacci dizilimli değişen plazmanın soğurduğu güç, $N_H = 1.618 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, $N_L = 10^{17} \text{ m}^{-3}$, $\theta=45^\circ$

Şekil 4.34'te elektromanyetik dalga plazmaya 0° yerine 45° açı ile geldiğinde plazma kaplamasında kullanılan S_5 Fibonacci dizilim tekrar sayısı arttıkça bir önceki incelemeye göre soğurma bandının genişlediği görülmektedir. Ancak bir önceki çalışmaya göre 4 GHz ve altındaki frekanslar için plazmanın soğurduğu güç daha düşük olmaktadır. Üç profilin soğurma bant aralığı incelendiğinde 3 tane art arda S_5 Fibonacci dizilimli (24 katman) elektron yoğunluğuna sahip plazma yapısı, yaklaşık 3 GHz ile 45 GHz arasında gelen elektromanyetik dalgayı, 6 tane art arda S_5 Fibonacci dizilimli (48 katman) elektron yoğunluğuna sahip plazma yapısı yaklaşık 3 GHz ile 58 GHz arasında gelen elektromanyetik dalgayı, 12 tane art arda S_5 Fibonacci dizilimli (96 katman) elektron yoğunluğuna sahip plazma yapısı yaklaşık 4 GHz ile 78 GHz arasında gelen elektromanyetik dalgayı %90 üzerinde soğurmaktadır. Bu bilgiler ışığında bir önceki çalışmaya göre soğurma bandının çok değişmediği ancak düşük frekanslardan yüksek frekanslara doğru kaydığı gözlenmiştir. Plazma yapısının soğurduğu güç çok yüksek frekanslarda hızlı bir düşüş göstermektedir.

İkinci incelemede düşük elektron yoğunluğu 10^{18} m^{-3} ve yüksek elektron yoğunluğu $1.618 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ alınarak bir önceki çalışmaya göre yoğunluk seviyeleri 10 katına çıkarılmıştır. Elektromanyetik dalganın plazmaya hem 0° hem de 45° geldiği

durumlara bakılmıştır. Plazmanın kalınlığı, dış manyetik alan ve plazmanın çarpışma frekansı değerleri ise değiştirilmemiştir.

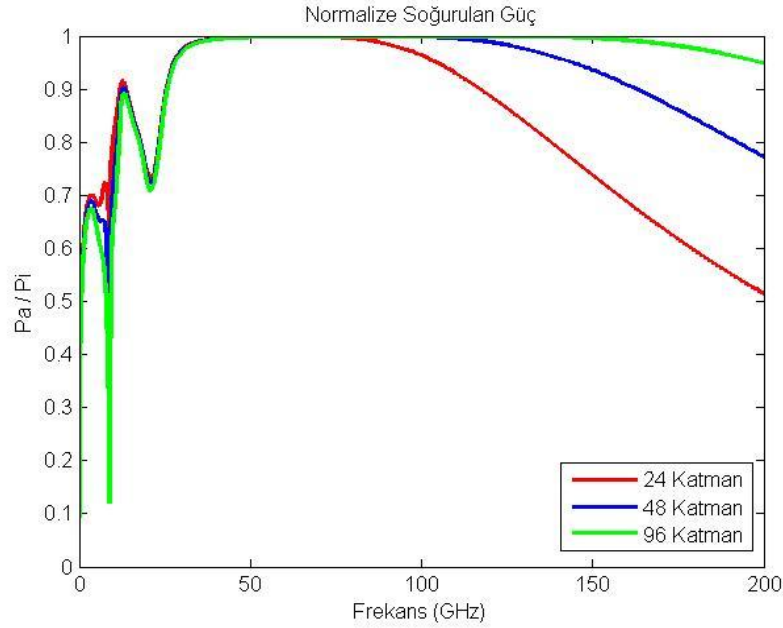


Şekil 4.35. Elektron yoğunluğu farklı sayıda S_5 Fibonacci dizilimli değişen plazmanın soğurduğu güç, $N_H = 1.618 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, $N_L = 10^{18} \text{ m}^{-3}$, $\theta=0^\circ$

Şekil 4.35 incelendiğinde 3 tane art arda S_5 Fibonacci dizilimli (24 katman) elektron yoğunluğuna sahip plazma yapısı, 4-13 GHz ile 18-103 GHz arasında gelen elektromanyetik dalgayı %90 üzerinde soğurmaktadır. 6 tane art arda S_5 Fibonacci dizilimli (48 katman) elektron yoğunluğuna sahip plazma yapısı, 4-13 GHz ile 18-141 GHz arasında gelen elektromanyetik dalgayı %90 üzerinde soğurmaktadır. 12 tane art arda S_5 Fibonacci dizilimli (96 katman) elektron yoğunluğuna sahip plazma yapısı, 4-13 GHz ile 18-194 GHz arasında gelen elektromanyetik dalgayı %90 üzerinde soğurmaktadır. Özellikle 12 tane art arda S_5 Fibonacci dizilimli plazma yapısı 194 GHz'e kadar %90'ın üzerinde elektromanyetik dalganın gücünü soğurarak geniş bir bantta gayet iyi bir soğurucu olarak kullanılabilir.

12 tane art arda S_5 Fibonacci dizilimli (96 katman) elektron yoğunluğuna sahip plazma yapısı ile 3 tane art arda S_5 Fibonacci dizilimli (24 katman) elektron yoğunluğuna sahip plazma yapısının soğurma bandı arasındaki fark 91 GHz'dir. Bu da plazmanın kalınlığı değiştirilmeden elektron yoğunluğu değişim hızının arttırmanın daha geniş bir soğurma bandı sağlayacağını göstermektedir. Bu incelemede elde edilen soğurma bandının, bir önceki incelemede elde edilen soğurma bandının iki katından daha geniş olduğu görülmektedir. Bu nedenle

plazma kaplamasının daha yüksek bir elektron yoğunluğuna sahip olması daha iyi bir soğurucu elde etmeye olanak sağladığı söylenebilir.



Şekil 4.36. Elektron yoğunluğu farklı sayıda S_5 Fibonacci dizilimli değişen plazmanın soğurduğu güç, $N_H = 1.618 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, $N_L = 10^{18} \text{ m}^{-3}$, $\theta=45^\circ$

Elektromanyetik dalga 45° açı ile plazma yapısına gelmesi durumunda 50 GHz ve üzeri yüksek frekanslarda soğurma bandının genişlediği ancak yaklaşık 27 GHz ve altındaki frekanslarda soğurulan gücün ciddi oranda azaldığı görülmektedir. Bu nedenle plazma ortamı 27 GHz ve altındaki frekanslarda 45° açı ile gelen radar sinyalleri için iyi bir soğurucu olarak tercih edilmeyecektir. Ancak yüksek frekanslarda açının artması plazmanın güç yutucu özelliğini iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

Bu kısımda yapılan incelemeleri daha detaylı görebilmek ve yorumlayabilmek adına elde edilen tüm sonuçlar Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. S_5 Fibonacci dizilimli elektron yoğunluğuna sahip plazma kaplamalarının farklı açılarda soğurma bandları

Plazma Elektron Yoğunluğu ve Açısı	Katman Sayısı	Soğurma Bandı (%90)	Soğurulan Radar Sinyalinin Frekans Bandı
$N_H = 1.618 \times 10^{17} m^{-3}$ $N_L = 1 \times 10^{17} m^{-3}$ $\theta = 0^\circ$	24	320 MHz – 42 GHz	UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka
	48	340 MHz – 54 GHz	UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V
	96	350 MHz – 71 GHz	UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V
$N_H = 1.618 \times 10^{17} m^{-3}$ $N_L = 1 \times 10^{17} m^{-3}$ $\theta = 45^\circ$	24	3 GHz – 45 GHz	S, C, X, Ku, K, Ka
	48	3 GHz – 58 GHz	S, C, X, Ku, K, Ka, V
	96	4 GHz – 78 GHz	C, X, Ku, K, Ka, V, W
$N_H = 1.618 \times 10^{18} m^{-3}$ $N_L = 1 \times 10^{18} m^{-3}$ $\theta = 0^\circ$	24	4 GHz – 13 GHz 18 GHz – 103 GHz	C, X, K, Ka, V, W
	48	4 GHz – 13 GHz 18 GHz – 141 GHz	C, X, K, Ka, V, W
	96	4 GHz – 13 GHz 18 GHz – 194 GHz	Ku, K, Ka, V, W
$N_H = 1.618 \times 10^{18} m^{-3}$ $N_L = 1 \times 10^{18} m^{-3}$ $\theta = 45^\circ$	24	12 GHz – 13 GHz 27 GHz – 116 GHz	X, K, Ka, V, W
	48	27 GHz – 162 GHz	Ka, V, W
	96	27 GHz – 200+ GHz	Ka, V, W

0° açısı ile plazma kaplamasına gelen radar sinyalleri için ilk profil ($N_H = 1.618 \times 10^{17} m^{-3}$, $N_L = 10^{17} m^{-3}$), ikinci profile ($N_H = 1.618 \times 10^{18} m^{-3}$, $N_L = 10^{18} m^{-3}$) göre 4 GHz'den 300 MHz'e kadar olan frekanslar için %90 üzerinde soğurma sağladığı görülmektedir. İkinci profile sahip plazma kaplaması, ilk profile sahip plazma kaplamasına göre 70 GHz ve üzeri frekanslarda %90 üzerinde soğurma

sağlamaktadır. Bu nedenle ilk profile sahip plazma kaplaması UHF, L, S, C bantlarında gelebilecek radar sinyallerini soğurmak için tercih edilebilir. İkinci profil sahip plazma kaplaması ise yüksek frekanslarda iyi bir soğurucu olarak davrandığı için özellikle milimetre bantlarındaki radar tehditlerini soğurması için kullanılabilir.

Elektromanyetik dalganın ikinci profil ile değişen ($N_H = 1.618 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, $N_L = 10^{18} \text{ m}^{-3}$) plazma ile yaptığı açının 0° 'den 45° 'ye gelmesi durumunda 27 GHz ve altındaki frekanslarda plazmanın soğurma performansı olumsuz etkilenmektedir. Ancak 27 GHz ve üzeri frekanslarda plazmanın soğurma bandının genişlediği gözlenmiştir. Açının artması ile plazmanın düşük frekanslarda soğurma performansı bozulduğu için düşük frekanslarda çalışan radar tehditlerine karşı tercih edilmemesine neden olacaktır. Ancak açı arttıkça yüksek frekanslarda plazma kaplamalarının sağladığı geniş soğurma bandı sayesinde Ka ve milimetre bantlarındaki radar tehditlerine karşı kullanılabilir.

4.4. Genel Değerlendirme

Bölüm 4'te yapılan çalışmalardan elde edilen genel sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Plazma boyunca paralel uygulanan dış manyetik alan şiddeti arttıkça soğurma bandı genişlemiştir.
- Plazmanın çarpışma frekansı arttıkça soğurma bandı genişlemiştir.
- Yaklaşık 1 GHz ve altındaki frekanslarda çarpışma frekansı ve dış manyetik alan değeri ne olursa olsun plazma tarafından soğurulan güç, frekans azaldıkça azalmıştır.
- Plazma kalınlığı sabit tutulup plazma kaplamasının katman sayısı arttıkça soğurma bandı genişlemiştir.

5. ELEKTRON YOĞUNLUĞU VE ÇARPIŞMA FREKANSI DEĞİŞKEN OLAN PLAZMA KAPLAMALARININ İNCELENMESİ

Beşinci bölümde bundan önceki bölümlerde yapılan çalışmalardan farklı olarak çarpışma frekansı sabit alınmayıp, kalınlık boyunca değişen bir çarpışma frekansı göz önünde tutulmuş ve bu durum için hesaplamalar yapılmıştır. Çarpışma frekansının değişimi, plazmanın elektron yoğunluğunun kalınlık boyunca değişimiyle aynı alınmıştır. Örneğin; plazma elektron yoğunluğu kalınlık boyunca sinüsel değişiyorsa, çarpışma frekansı da sinüsel değişecektir.

Literatürde yer alan yeni iki çalışmada da elektron yoğunluğu ve çarpışma frekansı farklı değişken plazma ortamlarının THz bandındaki EM dalga ile etkileşimi incelenmiştir [19,20].

5.1. Farklı Sinüs Değişimli Elektron Yoğunluğu ve Çarpışma Frekansı Profillerine Sahip Plazma Kaplaması

Bu incelemede Bölüm 3'te kullanılan dört farklı elektron yoğunluğu profillerinin her biri göz önünde tutulmuştur. Plazma kalınlığı 12 cm, dış manyetik alan 0.5 T olarak alınmıştır. Her bir profil için çarpışma frekansı ve elektron yoğunluğu fonksiyonları tanımlanmıştır. Bu kısımda mükemmel iletken yüzeyi kaplamış plazma ortamı incelenmiştir.

Doğrusal artan ve sinüsel değişen profil için fonksiyonlar Eş.(5-1)'de, çeyrek sinüs profili için fonksiyonlar Eş.(5-2)'de, yarım sinüs profili için fonksiyonlar Eş.(5-3)'te, iki tam sinüs profili için fonksiyonlar Eş.(5-4)'te gösterilmiştir.

$$v_{en}(z) = \begin{cases} v_{enm}z/L' & z < L' \\ v_{enm}(0.5 + 0.5 \sin(\pi(z - L')/(L - L'))) & z > L' \end{cases}$$
$$N(z) = \begin{cases} N_m z/L' & z < L' \\ N_{maks}(0.5 + 0.5 \sin(\pi(z - L')/(L - L'))) & z > L' \end{cases} \quad (5-1)$$

$$v_{en}(z) = v_{enm}(0.5 + 0.5 \sin(\pi(z - L')/(L - L'))) \quad z > L'$$
$$N(z) = N_{maks}(0.5 + 0.5 \sin(\pi(z - L')/(L - L'))) \quad z > L' \quad (5-2)$$

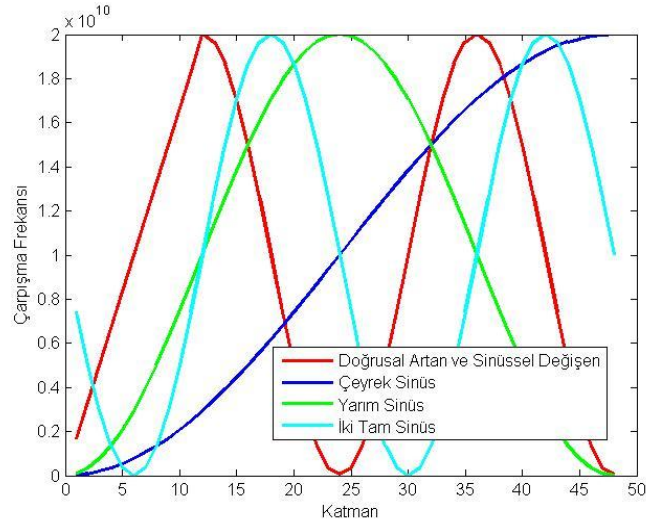
$$v_{en}(z) = v_{enm}(0.5 + 0.5 \sin(\pi(z - L')/(L - 2L'))) \quad z > L'$$
$$N(z) = N_{maks}(0.5 + 0.5 \sin(\pi(z - L')/(L - 2L'))) \quad z > L' \quad (5-3)$$

$$v_{en}(z) = v_{enm}(0.5 + 0.5 \sin(\pi(z - L')/(L - 3L'))) \quad z > L'$$

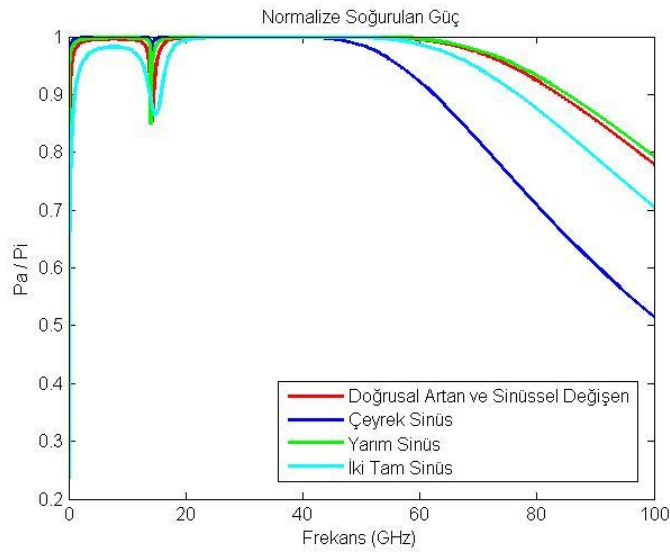
$$N(z) = N_{maks}(0.5 + 0.5 \sin(\pi(z - L')/(L - 3L'))) \quad z > L' \quad (5-4)$$

v_{enm} , maksimum çarpışma frekansını ifade etmektedir. Bu çalışmada tüm durumlar için v_{enm} , 20 GHz olarak alınmıştır. z her bir alt katman arayüzünün plazma başlangıcından olan uzaklığı, L plazma kalınlığını, L' plazmanın dörtte bir kalınlığını tanımlamaktadır.

Elektron yoğunluğu değişimi, çarpışma frekansı değişimi ile aynı alınmıştır. En yüksek elektron yoğunluğu $N_{maks} = 1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ olarak alınmıştır. Şekil 5.1'de plazma kaplaması boyunca çarpışma frekansı değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Plazma kaplaması boyunca çarpışma frekansının değişimi, $v_{enm} = 20 \text{ GHz}$



Şekil 5.2. Mükemmel iletken yüzey plazma ile kaplı iken soğurulan güç, $B=0.5 \text{ T}$, $v_{enm} = 20 \text{ GHz}$, $N_{maks} = 10^{18} \text{ m}^{-3}$

Çizelge 5.1. Farklı sinüs değişimli elektron yoğunluğu ve çarpışma frekansı profillerine sahip plazma kaplamalarının soğurma bantları

Plazma Elektron Yoğunluğu ve Çarpışma Frekansı	Dış Manyetik Alan	Soğurma Bandı (%90)	Soğurulan Radar Sinyalinin Frekans Bandı
Doğrusal Artan ve Sinüsel Değişen	0.5 T	300 MHz – 83 GHz (14 GHz hariç)	UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
Çeyrek Sinüs	0.5 T	30 MHz – 62 GHz (14 GHz hariç)	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V
Yarım Sinüs	0.5 T	50 MHz – 85 GHz (14 GHz hariç)	VHF, UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V, W
İki Tam Sinüs	0.5 T	1 GHz – 13.5 GHz 16 GHz – 75 GHz	L, S, C, X, Ku, K, Ka, V

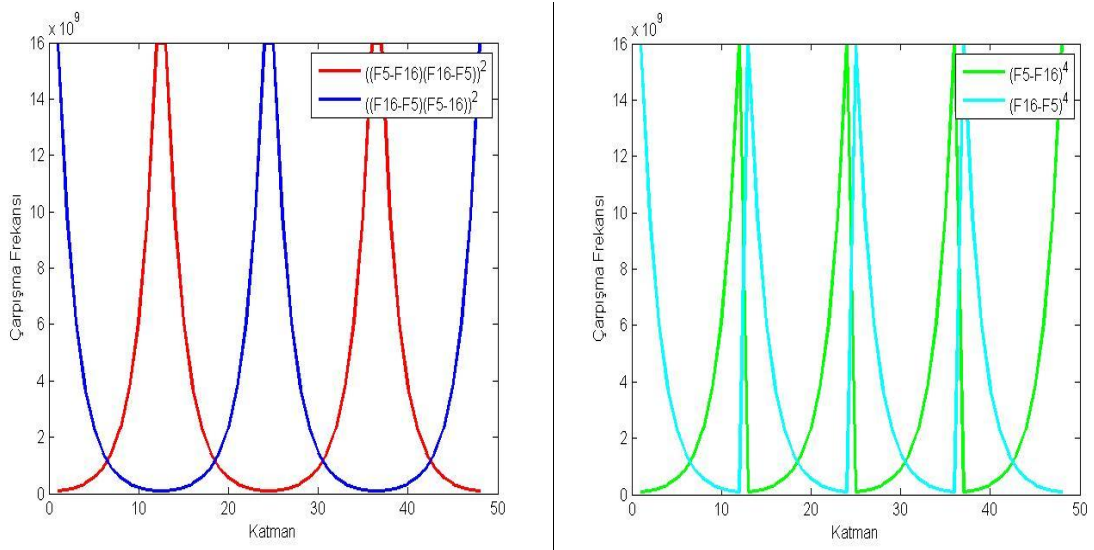
Bu kısımda elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1 ile gösterilmiştir. Doğrusal artan ve sinüsel değişen profil ile birlikte yarım sinüs profile sahip plazma kaplamaları diğer iki profile göre daha geniş soğurma bandına sahip oldukları görülmektedir.

Bu kısımda modellenen plazma kaplamalarının soğurma bandı genişliği, bir önceki çalışmalarda sabit çarpışma frekansına sahip plazma kaplamalarının soğurma bandı ile karşılaştırıldığında bazı profillere göre daha geniş ya da daha dar olduğu görülmektedir. Ancak 14 GHz seviyesindeki soğurma performansı düşüşü ihmal edilirse, bu profillere sahip plazma kaplamalarının askeri uygulamalarda kullanılabilecek iyi birer soğurucu oldukları söylenebilir.

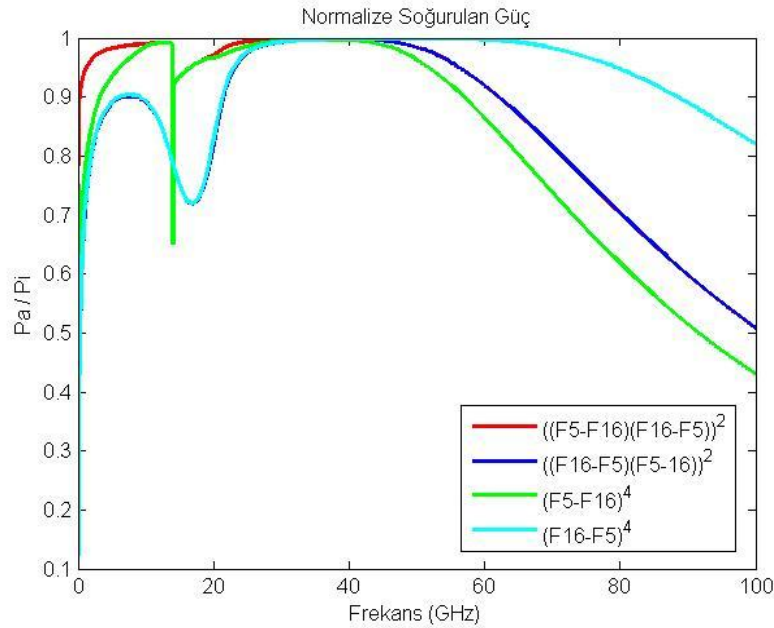
5.2. Farklı Fibonacci Sayı Dizilimli Elektron Yoğunluğu ve Çarpışma Frekansı Profillerine Sahip Plazma Kaplaması

İkinci kısımda Fibonacci dizilimli değişimlere sahip plazmanın soğurma performansı incelenmiştir. Bu inceleme kapsamında kullanılan Fibonacci dizilimleri; $((F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5))^2$, $((F_{16} - F_5)(F_5 - F_{16}))^2$, $(F_5 - F_{16})^4$, $(F_{16} - F_5)^4$ 'tür.

Plazmanın çarpışma frekansı değeri 80 MHz ile 16 GHz arasında değişirken, elektron yoğunluğu $8 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ ile $1597 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ arasında değişmektedir. Şekil 5.3 ile plazma kaplaması boyunca çarpışma frekansı değişimi gösterilmektedir.



Şekil 5.3. Plazma kaplaması boyunca farklı Fibonacci sayı dizilerine göre çarpışma frekansının değişimi



Şekil 5.4. Mükemmel iletken yüzeyi kaplayan plazmanın soğurduğu güç, $B = 0.5 \text{ T}$, $v_{enm} = 16 \text{ GHz}$, $N_{max} = 1597 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$

Şekil 5.4'te elde edilen sonuçlar incelendiğinde $((F_{16} - F_5)(F_5 - F_{16}))^2$ ile $(F_{16} - F_5)^4$ profillerine sahip plazma yapılarının %100'e yakın soğurduğu güç 45 GHz'e kadar aynıdır. $(F_5 - F_{16})^4$ profiline sahip plazma kaplaması 56 GHz'e kadar gelen elektromanyetik dalganın gücünü %90 üzerinde soğurmaktadır. $((F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5))^2$ ve $(F_5 - F_{16})^4$ profillerine sahip plazma yapılarının soğurduğu güç, 14-15

GHz arasında %70 seviyelerine düşse bile frekans artıçça soğurulan güç tekrar %100'e yakın olmaktadır. Bu ve bir önceki çalışmada 14-15 GHz'deki bu düşüşün sebebi ise plazmanın elektron jiro frekansından kaynaklanmaktadır. Her iki çalışmada da elektron jiro frekansı 14 GHz'e eşittir. Elde edilen sonuçlar göre gelen dalganın frekansı, elektron jiro frekansına eşit olduğu zaman plazmanın soğurma performansında bir düşüş meydana geldiği görülmüştür.

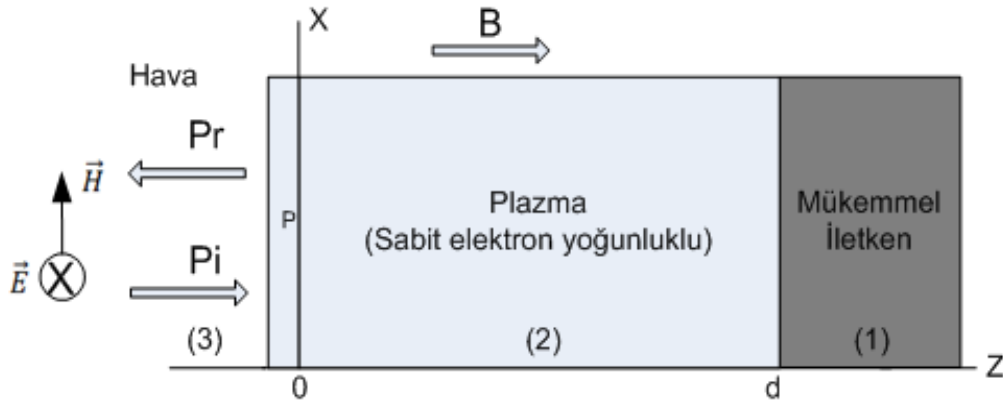
Çizelge 5.2. Farklı Fibonacci sayı dizilimli elektron yoğunluğu ve çarpışma frekansı profillerine sahip plazma kaplamalarının soğurma bantları

Plazma Elektron Yoğunluğu ve Çarpışma Frekansı	Dış Manyetik Alan	Soğurma Bandı (%90)	Soğurulan Radar Sinyalinin Frekans Bandı
$((F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5))^2$	0.5 T	300 MHz – 14 GHz 15 GHz – 62 GHz	UHF, L, S, C, X, Ku, K, Ka, V
$((F_{16} - F_5)(F_5 - F_{16}))^2$	0.5 T	22 GHz – 62 GHz	K, Ka, V
$(F_5 - F_{16})^4$	0.5 T	4 GHz – 14 GHz 15 GHz – 56 GHz	C, X, Ku, K, Ka, V
$(F_{16} - F_5)^4$	0.5 T	22 GHz – 88 GHz	K, Ka, V, W

Bu kısımda elde edilen sonuçlar Çizelge 5.2 ile gösterilmiştir. 4 GHz'den 300 MHz'e kadar olan frekanslarda %90 üzerinde soğurma yapan tek plazma kaplaması $((F_5 - F_{16})(F_{16} - F_5))^2$ profiline sahiptir. $(F_{16} - F_5)^4$ profiline sahip plazma kaplaması V bandının tamamını, W bandının ise bir kısmını kapsayacak şekilde %90 üzerinde soğurma sağlayarak yüksek frekanslarda iyi bir soğurucu olarak davrandığı görülmüştür.

6. EMPEDANS DÖNÜŞÜM YÖNTEMİ İLE YAPILAN KALINLIK İNCELEMELERİ

Bu bölümde sabit elektron yoğunluğuna sahip plazma yapısı incelenmiştir. Mükemmel iletken yüzeyi kaplayan plazma kaplaması önden plastik plaka ile sınırlandırılmıştır. Bu plazma ortamı incelenirken diğer bölümlerde kullanılan yöntemden farklı olarak empedans dönüşüm yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem literatürde sıkça kullanılan yöntemlerden biridir [15,16]. Bu yöntem sayesinde plazma kalınlığının, plazmanın soğurma performansına etkileri gözlenmiştir. Bu kısımda Şekil 6.1'de yer alan model kullanılmıştır.



Şekil 6.1. Mükemmel iletkeni kaplayan ve plastik plaka (P) ile sonlandırılan sabit elektron yoğunluğuna sahip plazma kaplaması

Önceki çalışmalarda ihmal edilen çoklu yansımalar bu bölümde dikkate alınmıştır. Plazma önünde kullanılan plastik plaka kayıpsız ve çok ince olduğu için plaka içindeki elektromanyetik dalganın yayılım etkileri ihmal edilmiştir. Bu plastik plakanın kullanım amacı, plazmanın oluşturabileceği optik izin önüne geçmektir.

Oluşturulan plazma kaplama modeli için empedans dönüşüm yöntemi formülasyonu çıkarılmıştır [15]. Plazma ortamında (2) elektromanyetik dalganın elektrik ve manyetik alan eşitlikleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\vec{E}_2 = E_{2y} = (E_2^+ e^{i\alpha_2 z} + E_2^- e^{-i\alpha_2 z}) e^{i\sigma_2 x} \quad (6-1)$$

$$\vec{H}_2 = H_{2x} = \frac{1}{Z_2} (E_2^+ e^{i\alpha_2 z} - E_2^- e^{-i\alpha_2 z}) e^{i\sigma_2 x} \quad (6-2)$$

Hava ortamında (3) elektromanyetik dalganın elektrik ve manyetik alanı şu şekilde tanımlanabilir:

$$\vec{E}_3 = E_{3y} = (E_{i0}e^{i\alpha_3(z-d)} + E_{3r}e^{-i\alpha_3(z-d)})e^{i\sigma_3x} \quad (6-3)$$

$$\vec{H}_3 = H_{3x} = \frac{1}{Z_3}(E_{i0}e^{i\alpha_3(z-d)} - E_{3r}e^{-i\alpha_3(z-d)})e^{i\sigma_3x} \quad (6-4)$$

Eş.(6-1), Eş(6-2), Eş.(6-3) ve Eş.(6-4)'teki Z_2 ortam 2'nin, Z_3 ortam 3'ün karakteristik empedans değerini, E_{i0} gelen elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşeni toplamını, E_2^+ ortam 2'deki ileriye doğru giden elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşenini, E_2^- ortam 2'deki geriye doğru giden elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşenini, E_{3r} ortam 3'den yansıyan elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşenini, d plazma ortamının kalınlığını ifade etmektedir. Bununla birlikte eşitliklerde yer alan $\alpha_2 = k_{2z}$, $\sigma_2 = k_{2x}$ eşittir. k_2 , plazma ortamının dalga numarasını tanımlamaktadır. Plazma ortamındaki dalga numarası şu şekilde tanımlanabilir:

$$k_{2z} = \frac{2\pi}{\lambda_2} = 2\pi f \sqrt{\varepsilon_2 \mu_2} / c \quad (6-5)$$

Eş.(6-5)'te λ_2 plazma ortamında elektromanyetik dalganın dalga boyunu, ε_2 plazma ortamında bağıl geçirgenliği, μ_2 plazma ortamında manyetik geçirgenliği, f gelen elektromanyetik dalganın frekansını ve c havadaki yayılım hızını tanımlamaktadır.

$z = 0$ 'da sınır koşulları uygulanırsa, mükemmel iletken olduğundan dolayı Eş.(6-1)'deki $E_{2y} = 0$ olacaktır. Bu nedenle empedans değeri de $Z_1 = 0$ 'a eşit olacaktır. $E_{2y} = 0$ 'a eşit olduğu için de $E_2^+ = E_2^-$ şeklinde belirtilebilir.

$z = d$ için sınır koşulları uygulanırsa;

$$\vec{E}_2(d) = \vec{E}_3(d) \quad (6-6)$$

$$\vec{H}_2(d) = \vec{H}_3(d) \quad (6-7)$$

elde edilir. Yukarıda tanımlanan denklemleri kullanarak Eş.(6-6) ve Eş.(6-7)'de yerine koyulduğu zaman yansıma katsayısı hesaplanabilir:

$$(E_2^+ e^{i\alpha_2 z} + E_2^- e^{-i\alpha_2 z})e^{i\sigma_2 x} = (E_{i0}e^{i\alpha_3(z-d)} + E_{3r}e^{-i\alpha_3(z-d)})e^{i\sigma_3 x} \quad (6-8)$$

$$\frac{1}{Z_2}(E_2^+ e^{i\alpha_2 z} - E_2^- e^{-i\alpha_2 z})e^{i\sigma_2 x} = \frac{1}{Z_3}(E_{i0}e^{i\alpha_3(z-d)} - E_{3r}e^{-i\alpha_3(z-d)})e^{i\sigma_3 x} \quad (6-9)$$

Eş.(6-8) ve Eş.(6-9)'da $z = d$ ve $E_2^+ = E_2^-$ yazılırsa;

$$(E_2^+ e^{i\alpha_2 d} - E_2^+ e^{-i\alpha_2 d}) e^{i\sigma_2 x} = (E_{i0} e^{i\alpha_3(d-d)} + E_{3r} e^{-i\alpha_3(d-d)}) e^{i\sigma_3 x} \quad (6-10)$$

$$\frac{1}{Z_2} (E_2^+ e^{i\alpha_2 d} + E_2^+ e^{-i\alpha_2 d}) e^{i\sigma_2 x} = \frac{1}{Z_3} (E_{i0} e^{i\alpha_3(d-d)} - E_{3r} e^{-i\alpha_3(d-d)}) e^{i\sigma_3 x} \quad (6-11)$$

elde edilir. Eş.(6-10) ve Eş.(6-11)'de koyu ile gösterilen terimler 1'e eşit olacaktır. Bununla birlikte sol tarafı E_2^+ parantezine alıp denklem yeniden yazıldığında aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$E_2^+ (e^{i\alpha_2 d} - e^{-i\alpha_2 d}) e^{i\sigma_2 x} = (E_{i0} + E_{3r}) e^{i\sigma_3 x} \quad (6-12)$$

$$\frac{1}{Z_2} E_2^+ (e^{i\alpha_2 d} + e^{-i\alpha_2 d}) e^{i\sigma_2 x} = \frac{1}{Z_3} (E_{i0} - E_{3r}) e^{i\sigma_3 x} \quad (6-13)$$

Eş.(6-12) ve Eş.(6-13)'te elde edilen denklemler birbirleri ile oranlanırsa koyu ile gösterilen terimler sadeleşir:

$$\frac{E_2^+ (e^{i\alpha_2 d} - e^{-i\alpha_2 d}) e^{i\sigma_2 x}}{\frac{1}{Z_2} E_2^+ (e^{i\alpha_2 d} + e^{-i\alpha_2 d}) e^{i\sigma_2 x}} = \frac{(E_{i0} + E_{3r}) e^{i\sigma_3 x}}{\frac{1}{Z_3} (E_{i0} - E_{3r}) e^{i\sigma_3 x}} \quad (6-14)$$

Eş.(6-14) yeniden ifade edildiğinde yeni eşitlik şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{(e^{i\alpha_2 d} - e^{-i\alpha_2 d})}{\frac{1}{Z_2} (e^{i\alpha_2 d} + e^{-i\alpha_2 d})} = \frac{(E_{i0} + E_{3r})}{\frac{1}{Z_3} (E_{i0} - E_{3r})} \quad (6-15)$$

$\frac{(e^{i\alpha_2 d} - e^{-i\alpha_2 d})}{(e^{i\alpha_2 d} + e^{-i\alpha_2 d})}$ ifadesini tanımlamak için hiperbolik fonksiyonlardan yararlanılabilir.

Tanjantın hiperbolik fonksiyonu $\tanh(z) = \frac{(e^z - e^{-z})}{(e^z + e^{-z})}$ olarak tanımlanmaktadır. Bu bilgiler ışığında;

$$\frac{(e^{i\alpha_2 d} - e^{-i\alpha_2 d})}{(e^{i\alpha_2 d} + e^{-i\alpha_2 d})} = \tanh(i \alpha_2 d) \quad (6-16)$$

elde edilir. Eş.(6-16)'daki bu ifade Eş.(6-15)'te yerine yazıldığında aşağıdaki eşitlikler bulunur:

$$\frac{\tanh(i \alpha_2 d)}{\frac{1}{Z_2}} = \frac{(E_{i0} + E_{3r})}{\frac{1}{Z_3} (E_{i0} - E_{3r})} \quad (6-17)$$

$$Z_2 \tanh(i \alpha_2 d) = Z_3 \frac{(E_{i0} + E_{3r})}{(E_{i0} - E_{3r})} \quad (6-18)$$

$$Z_2 \tanh(i\alpha_2 d)(E_{i0} - E_{3r}) = Z_3(E_{i0} + E_{3r}) \quad (6-19)$$

$$E_{i0}(Z_2 \tanh(i\alpha_2 d) - Z_3) = E_{3r}(Z_2 \tanh(i\alpha_2 d) + Z_3) \quad (6-20)$$

Yansıma katsayısı denklemini aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$r = \frac{E_{3r}}{E_{i0}} = \frac{Z_2 \tanh(i\alpha_2 d) - Z_3}{Z_2 \tanh(i\alpha_2 d) + Z_3} \quad (6-21)$$

Eş.(6-21)'de r yansıma katsayısını tanımlamaktadır. Z_2 ve Z_3 değerini hesaplayabilmek için aşağıdaki eşitlik kullanılabilir:

$$Z_j = \sqrt{\mu_0 \mu_j / \epsilon_0 \epsilon_j} = Z_0 \sqrt{\mu_j / \epsilon_j} \quad (6-22)$$

Eş.(6-22)'deki μ_0 havadaki manyetik geçirgenliği, ϵ_0 havadaki elektrik geçirgenliği, μ_j j. ortamın bağıl geçirgenliğini, ϵ_j j. ortamın bağıl geçirgenliğini, Z_0 havanın empedans değerini tanımlamaktadır. Z_3 havanın empedans değerini tanımladığı için Z_0 değerine eşittir. Ortam 2'nin empedans değeri ise şu şekilde belirtilebilir:

$$Z_2 = Z_0 \sqrt{\mu_2 / \epsilon_2} \quad (6-23)$$

Ortam 2, plazma ortamı olduğu için μ_2 plazmanın manyetik geçirgenliğini, ϵ_2 plazmanın elektriksel geçirgenliğini tanımlamaktadır. Kullanılan plazma soğuk, zayıf iyonlanmış, çarpışmalı, manyetize ve homojendir. Plazmanın manyetik geçirgenliği, $\mu_2 = 1$ olarak alınır. ϵ_2 değeri ise Eş.(2-61) ile tanımlanmış Appleton formülü ($\theta = 0$ için) kullanılarak tanımlanabilir.

$$\tilde{\epsilon}_r = \epsilon_2 = \frac{(\omega_p / \omega)^2}{1 - j \frac{v_{en}}{\omega} - \frac{\omega_{ce}}{\omega}} \quad (6-24)$$

Eş.(6-21)'de tanımlanmış yansıma katsayısı Eş.(6-24)'e göre yeniden düzenlenip yazılırsa Eş.(6-25) elde edilir:

$$r = \frac{E_{3r}}{E_{i0}} = \frac{Z_0 \sqrt{\mu_2 / \epsilon_2} \tanh(i\alpha_2 d) - Z_0}{Z_0 \sqrt{\mu_2 / \epsilon_2} \tanh(i\alpha_2 d) + Z_0} \quad (6-25)$$

Eş.(6-25)'te $\mu_2 = 1$ yazılır ve Z_0 parantezine alınırsa yeni denklem şu şekilde ifade edilebilir:

$$r = \frac{E_{3r}}{E_{i0}} = \frac{Z_0\sqrt{1/\epsilon_2} \tanh(i\alpha_2 d) - Z_0}{Z_0\sqrt{1/\epsilon_2} \tanh(i\alpha_2 d) + Z_0} = \frac{Z_0(\sqrt{1/\epsilon_2} \tanh(i\alpha_2 d) - 1)}{Z_0(\sqrt{1/\epsilon_2} \tanh(i\alpha_2 d) + 1)} = \frac{(\tanh(i\alpha_2 d) - \sqrt{\epsilon_2})}{(\tanh(i\alpha_2 d) + \sqrt{\epsilon_2})} \quad (6-26)$$

$\alpha_2 = k_{z2} = \frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_2 \mu_2}}{c} = \frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_2}}{c}$ eşit olduğu için Eş.(6-26)'da yerine yazıldığında yansımaya katsayısı denklemini nihai halini alacaktır:

$$r = \frac{(\tanh(i2\pi f \sqrt{\epsilon_2} d/c) - \sqrt{\epsilon_2})}{(\tanh(i2\pi f \sqrt{\epsilon_2} d/c) + \sqrt{\epsilon_2})} \quad (6-27)$$

Yansımaya gücü, yansımaya katsayısı ile orantılı olduğu için şu şekilde ifade edebilir:

$$P_r = |r|^2 \quad (6-28)$$

Yansımaya kaybı eşitliği;

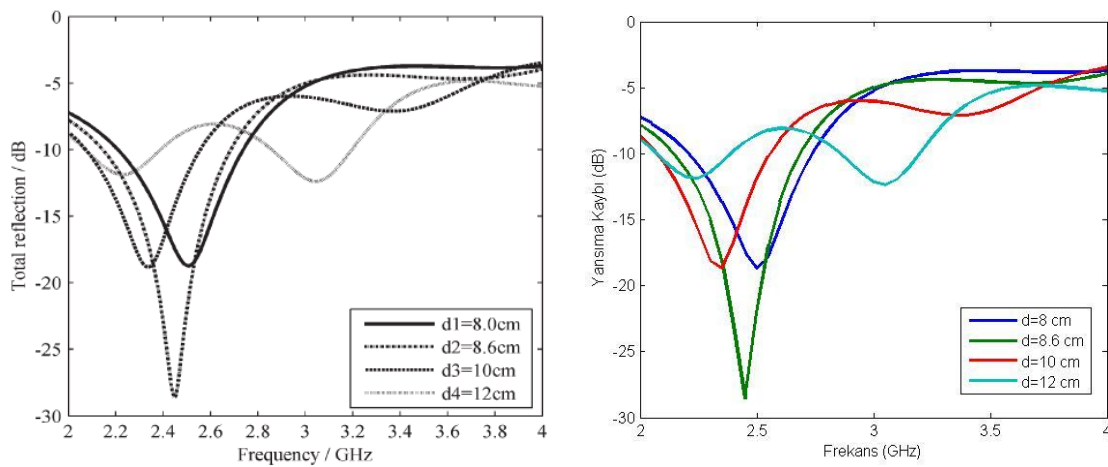
$$R(dB) = 10 \log \left(\frac{P_r}{P_i} \right) \quad (6-29)$$

ile verilir. Soğurulan güç, Bölüm 2'de yer alan Eş.(2-89) ile tanımlanan eşitlik ile bulunabilir:

$$P_a = P_i - P_r - P_t \quad (6-30)$$

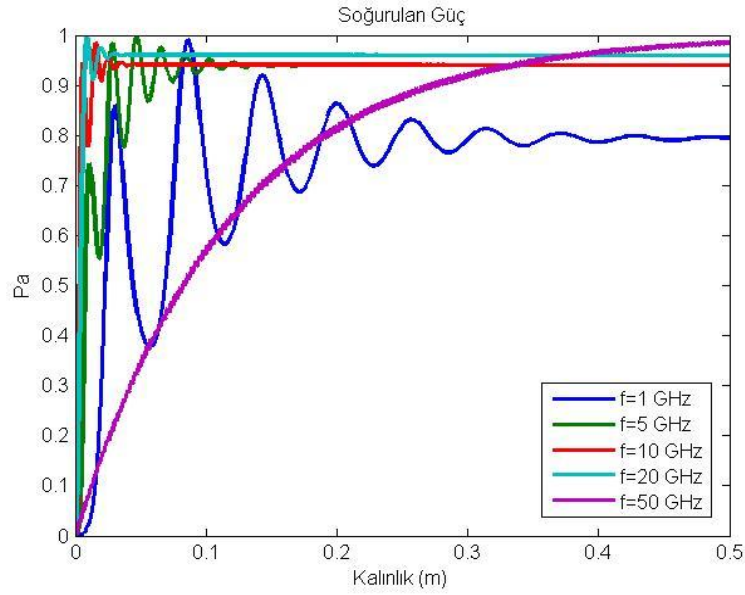
Mükemmel iletken içinde $P_t = 0$ olarak alınırsa yeni denklem aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$P_a = P_i - P_r \quad (6-31)$$



Şekil 6.2. Kullanılan empedans dönüşüm yönteminin literatürdeki [15] bir çalışma ile doğrulanması

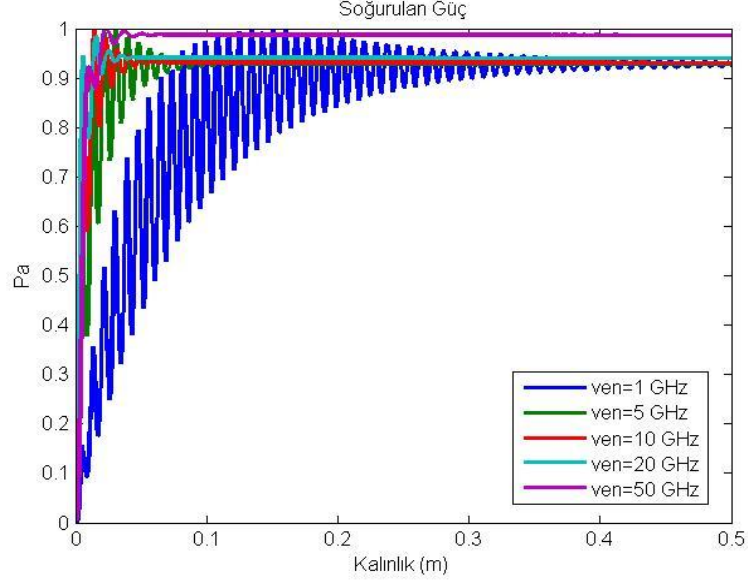
Bu kısımda kullanılan formülasyonun ve yapılan incelemelerin doğruluğunu teyit etmek için literatürde yer alan bir çalışmanın [15] sonucu çıkarılmaya çalışılmış ve hemen hemen aynı sonuç elde edilmiştir. Bu doğrulamanın ardından farklı değişkenlere göre plazma kaplaması için incelemeler gerçekleştirilmiştir. İlk olarak plazma kalınlığının değişimine göre plazmanın soğurduğu gücün nasıl değiştiği incelenmiştir. Bu çalışmada plazmanın elektron yoğunluğu sabit olup, değeri $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 'tür. Çarpışma frekansı 20 GHz ve dış manyetik alan 0.5 T olarak alınmıştır.



Şekil 6.3. Plazmanın soğurduğu gücün kalınlığına göre değişmesi, $\nu_{en} = 20 \text{ GHz}$, $B = 0.5 \text{ T}$, $N = 10^{18} \text{ m}^{-3}$

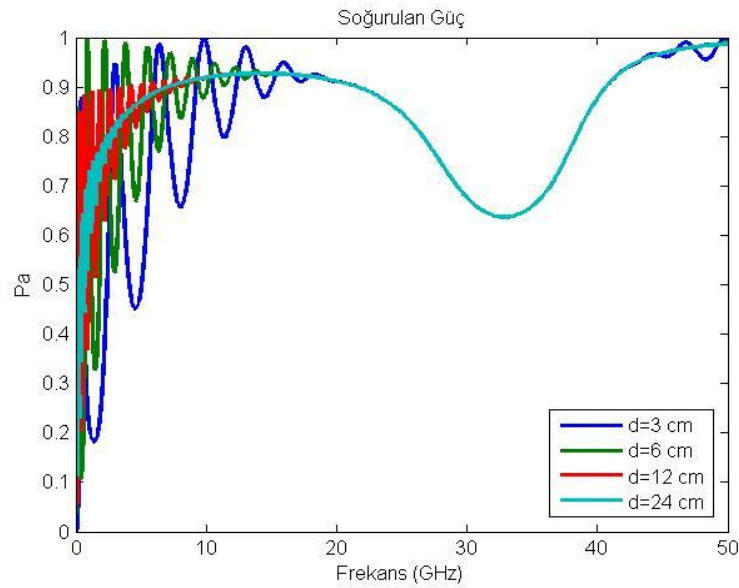
Şekil 6.3 incelendiğinde kalınlık arttıkça soğurma performansının artıp azalması gelen dalganın frekansına (f) göre değiştiği söylenebilir. 1 GHz için soğurulan güç kalınlık 30 cm'e gelene kadar artıp azalmakta sonrasında ise %80 seviyelerinde dalgalanmaktadır. 5 ve 10 GHz için kalınlık yaklaşık 8 cm olana kadar soğurulan güç artmakta sonrasında kalınlık arttıkça %93 seviyelerinde sabit kalmaktadır. 20 GHz için kalınlık 3 cm olana kadar soğurulan güç azalmakta ve kalınlık arttıkça %96 seviyesinde sabit kalmaktadır. 50 GHz içinse kalınlık 50 cm olana kadar soğurulan güç artmaktadır.

İkinci incelemede ise plazmanın elektron yoğunluğu sabit olup, değeri 10^{18} m^{-3} 'tür. Dış manyetik alan 0.5 T, gelen dalganın frekansı 10 GHz olarak alınmıştır. Bu çalışmada farklı çarpışma frekansları ve farklı plazma kalınlığına göre plazmanın soğurduğu gücün değişimi gözlenmiştir.



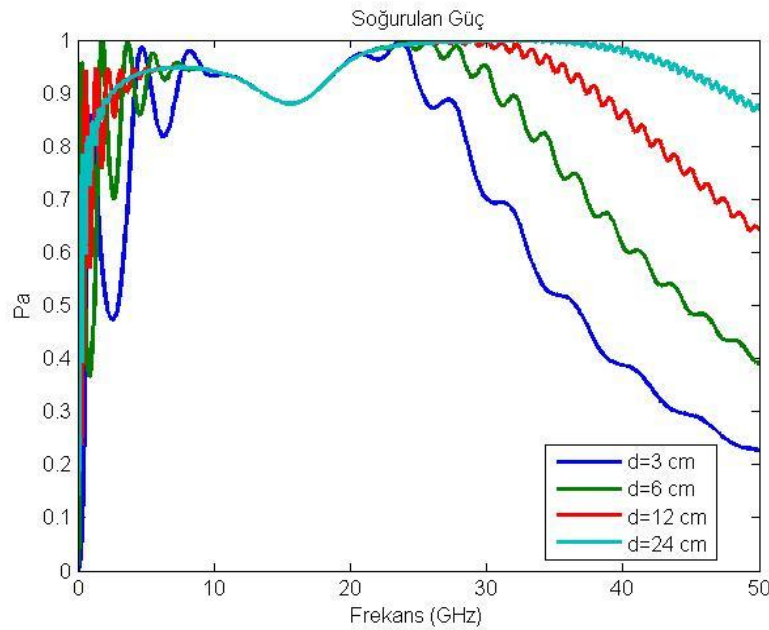
Şekil 6.4. Plazmanın soğurduğu gücün kalınlığına göre değişmesi, $f = 10 \text{ GHz}$,
 $B = 0.5 \text{ T}$, $N = 10^{18} \text{ m}^{-3}$

Şekil 6.4 incelediğinde kalınlık arttıkça soğurulan gücün artıp azalması plazmanın çarpışma frekansı değerine göre değiştiği söylenebilir. Çarpışma frekansı 1 GHz için kalınlık arttıkça soğurulan güç 30 cm'e kadar artıp azalmakta sonrasında kalınlık arttıkça %92 seviyelerinde dalgalanmaktadır. Çarpışma frekansı 5, 10 ve 20 GHz için kalınlık yaklaşık 5 cm olana kadar soğurulan güç artmakta sonrasında kalınlığın artmasıyla yaklaşık %92-93 seviyelerinde sabit kalmaktadır. 100 GHz için kalınlık 5 cm olana kadar soğurulan güç artmakta ve %99 seviyesinde sabit kalmaktadır.



Şekil 6.5. Plazmanın soğurduğu gücün kalınlığına göre değişmesi, $\nu_{en} = 20 \text{ GHz}$,
 $B = 1 \text{ T}$, $N = 5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$

Plazmanın elektron yoğunluğu $5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, çarpışma frekansı 20 GHz ve dış manyetik alan 1 T olarak alınmış ve bu parametrelere göre elde edilen sonuçlar Şekil 6.5 ile gösterilmiştir. Düşük kalınlığa sahip plazma ortamı için soğurma performansı 15 GHz'e kadar sürekli artıp azalırken kalınlık artıkça soğurma performansının değişimi daha düzenli hale gelmektedir. Ancak 15-50 GHz arasında kalınlıktan bağımsız olarak aynı performans gözlenmektedir. Bu parametrelere sahip plazma ortamının kalınlığını yüksek frekanslarda artırmanın soğurma performansını iyileştirme açısından bir seçenek olmadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 6.6. Plazmanın soğurduğu gücün kalınlığına göre değişmesi, $v_{en} = 20 \text{ GHz}$, $B = 0.5 \text{ T}$, $N = 10^{18} \text{ m}^{-3}$

Plazmanın yoğunluğunu ve dış manyetik alanı azalttığımızda bir önceki çalışmaya nazaran yüksek frekanslarda kalınlığın artması plazmanın soğurma performansını iyileştirdiği Şekil 6.6 incelendiğinde görülmektedir. 10 ile 20 GHz arasında kalınlıktan bağımsız olarak plazmanın soğurduğu güç aynı olmaktadır. Düşük frekanslarda ise kalınlığın artırması plazmanın daha kararlı bir yapı olarak davrandığı gözlemlenmiştir.

Yapılan bu çalışmalar, plazma kalınlığını artırmanın plazmanın soğurucu özelliğini kararlı duruma getirip getirmeyeceği kullanılacak parametrelerin (elektron yoğunluğu, çarpışma frekansı, dış manyetik alan vb.) değerlerine göre değişebileceğini ortaya koymuştur.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında plazma ile elektromanyetik dalganın etkileşiminin fiziksel ortama ve plazmanın parametrelerine göre değişimi incelenmiştir. Bu etkileşimde belirleyici rol oynayan parametreler plazmanın çarpışma frekansı, kalınlığı, elektron yoğunluğu ve dışarıdan uygulanan manyetik alan olduğu görülmüştür.

Plazma geniş frekans bantlarında elektriksel geçirgenliğe sahiptir. Düşük frekanslarda plazma, yansıtıcı olarak davranmaktadır. Yüksek frekanslarda plazmanın iletkenliğinden dolayı plazma ile gelen dalga arasında yüksek oranda etkileşim olmaktadır. Bu durum plazma içerisinde elektromanyetik dalganın soğurulmasına sebep olmaktadır ve bu yüzden RKA düşürme işlemi yüksek frekansta plazma kaplaması ile gerçekleştirilebilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında manyetize, zayıf iyonize, çarpışmalı, soğuk plazma kaplamaları incelenmiştir. Bu özelliklere sahip bir plazma kaplamasının tercih edilmesinin sebepleri ise literatür araştırmalarından elde edilen veriler ve yapılan analizlerin sonuçlarıdır. Analizler ve araştırmalar neticesinde askeri gizleme uygulamalarında en iyi sonucu verebilecek bir plazma kaplamasının özelliklerinin manyetize, zayıf iyonize, çarpışmalı, soğuk plazma olduğu görülmüş ve bu yapı modellenerek incelenmiştir.

Bölüm 3'te farklı elektron yoğunluğuna sahip hem havadaki plazma ortamı hem de mükemmel iletken yüzeyi kaplayan plazma ortamının dik ve eğik açılarda gelen elektromanyetik dalga ile etkileşimleri incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda mükemmel iletken yüzeyi kaplamış plazma kaplaması, 6 ile 40 GHz arasında elektromanyetik dalgayı %100'e yakın soğururken hava ortamındaki plazma kaplamasının yaklaşık 10 ile 20 GHz arasında dalganın gücünü %100'e yakın soğurduğu görülmüştür. Bu da mükemmel iletkeni kaplayan plazma kaplamasının havadaki plazma yapısına göre daha geniş bir soğurma bandı sağladığını ortaya koymuştur.

Bölüm 4'te Fibonacci serileri ve Fibonacci sayı dizisi şeklinde elektron yoğunluğuna sahip mükemmel iletkeni kaplayan plazma kaplamalarının soğurma bandının çarpışma frekansı sabit dış manyetik alan arttıkça genişlediği

görülmüştür. Dış manyetik alan sabit, çarpışma frekansı artarken soğurma bandının yine genişlediği görülmüştür. Plazma kalınlığı sabit tutularak plazma yapısı özdeş olarak bölündüğünde katman sayısı artıkça soğurma bandının genişlediği görülmüştür.

Bölüm 5'te mükemmel iletkeni kaplamış plazma ortamı tarafından soğurulan gücün değişim profillerinden bağımsız düşük frekanslarda çok değişmediği ancak frekans artıkça soğurulan gücün elektron yoğunluğu ve çarpışma frekansı değişim profillerine bağlı olarak değiştiği görülmüştür.

Bölüm 6'da ise plazma kalınlığının plazmanın soğurduğu güce olan etkileri incelenmiştir. Kalınlık artıkça soğurulan gücün değişimi gelen dalganın frekansına ve plazmanın çarpışma frekansına bağlı olduğu görülmüştür. Uygun elektron yoğunluğu, çarpışma frekansı, dış manyetik alan vb. parametrelerin seçilmesi durumunda plazma kalınlığını artırmanın plazmanın soğurucu özelliğini kararlı duruma getirebileceği görülmüştür.

Bu tez çalışması kapsamında askeri gizleme uygulamalarında kullanılacak geniş soğurma bandına sahip, düşük yansıma kaybı olan iyi birer soğurucu plazma kaplamaları elde edilmiştir. Önerilen plazma kaplamaları, farklı radar frekans bantları için soğurma sağladığından frekans seçici yüzey olarak kullanımında ve yakın zamanda çalışmalara başlanan plazma meta-malzemelerin tasarımında veya üretiminde kullanımı mümkün olabilir.

Bu tez çalışmasının devamında daha karmaşık geometriler plazma ile kaplanarak radar sinyallerinin ne oranda soğurulabileceği ile ilgili çalışmalar yapılabilir. Bununla birlikte başka özel dizilime ve yoğunluğu sahip plazma kaplamaları incelenerek plazmanın soğurma performansının artırılması sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Chen, F.F., *Introduction to plasma physics*, Springer US Publisher, New York, **1974**.
- [2] Anonim, Plazmalar, <http://fringeplazma.weebly.com> (Kasim **2017**).
- [3] Cadirci S., *RF stealth (or low observable) and counter-RF stealth technologies implications of counter-RF stealth solutions for Turkish Air Force*, Thesis, Calhoun Naval Postgraduate School, California, **2009**.
- [4] A.U. Raju, J. Balakrishnan, A novel method for RCS reduction of a complex shaped aircraft using partial RAM coating, *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, Vol.2, 52-56, **2012**.
- [5] H. Singh, S. Antony, R. M. Jha, *Plasma-based Radar Cross Section Reduction*, Springer, Singapore, **2016**.
- [6] R.E. Ball, *The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design*, 2nd Edition, American Institute of Aeronautics and Astronautics, **2003**.
- [7] V. Ginzburg, *The propagation of electromagnetic waves in plasmas*, Pergamon Press, **1970**.
- [8] Heald M. A, Wharton C. B., *Plasma diagnostics with microwaves*, 2nd Edition, Wiley, **1978**.
- [9] R. J. Vidmar, On the use of atmospheric plasmas as electromagnetic reflectors and absorbers, *IEEE Transaction On Plasma Science*, Vol. 18, pp. 733-741, **1990**.
- [10] M. Laroussi and J. Reece Roth, Numerical calculation of the reflection, absorption and transmission of microwaves by a nonuniform plasma slab, *IEEE Transaction On Plasma Science*, Vol. 21, pp. 366-372, **1993**.
- [11] D. L. Tang, A. P. Sun, X. A. Qui and P. K. Chu, Interaction of electromagnetic waves with a magnetized nonuniform plasma slab, *IEEE Transaction On Plasma Science*, Vol. 31, pp. 405-410, **2003**.
- [12] L. X. Ma, H. Zhang and C. X. Zhang, Analysis on the reflection characteristics of electromagnetic wave incidence in close non-magnetized plasma, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 22, pp. 2285-2296, **2008**.
- [13] Gurel C.S. and Oncu. E., Frequency selective characteristics of a plasma layer with sinusoidally varying electron density profile, *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Wave*, Vol. 30, pp. 589-597, **2009**.
- [14] Gurel C.S. and Oncu E., Characteristics of electromagnetic wave propagation through magnetized plasma slab with linearly varying electron density, *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol.21, pp. 385-398, **2010**.

- [15] C. X. Yuan, Z. X. Zhou, and H. G. Sun, Reflection properties of electromagnetic wave in a bounded plasma slab, *IEEE Transaction On Plasma Science*, Vol.38, No.12, pp. 3348-3355, **2010**.
- [16] C. X. Yuan, Z. X. Zhou, J. W. Zhang, X. L. Xiang, Y. Feng, and H. G. Sun, Properties of propagation of electromagnetic wave in a multilayer radar absorbing structure with plasma and radar absorbing material, *IEEE Transaction On Plasma Science*, Vol.39, No.9, pp. 1768-1775, **2011**.
- [17] Y. B. Xi and Y. Liu, Effect of electron density profile on power absorption of high frequency electromagnetic waves in plasma, *Physics of Plasmas*, Vol. 19, **2012**.
- [18] D. Cheng, H. C. Yin and H. X. Zheng, Research on minimum energy excited to plasma coating for reducing radar cross section of target, *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 59, pp. 35-42, **2016**.
- [19] L. J. Guo, L. X. Guo, and J. T. Li, Propagation of terahertz electromagnetic waves in a magnetized plasma with inhomogeneous electron density and collision frequency, *Physics of Plasmas*, Vol. 24, **2017**.
- [20] L. Zheng, Q. Zhao, S. Liu, X. Xing, and Y. Chen, Theoretical and experimental studies of terahertz wave propagation in unmagnetized plasma, *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Wave*, Vol.35, pp. 187-197, **2014**.
- [21] H. W. Yang, Y. Liu, Numerical analysis of the reflection and absorption of electromagnetic wave in nonuniform magnetized plasma slab, *Optik*, 371-375, **2012**.
- [22] H. W. Yang, Simulation and analysis of interaction between oblique incidence electromagnetic wave and plasma slab, *Optik*, 945-948, **2011**.
- [23] Zhang, H., J. Zhen, and W. He, Omnidirectional photonic band gaps enhanced by Fibonacci quasiperiodic one-dimensional ternary plasma photonic crystals, *Optik*, Vol. 124, **2013**.
- [24] Lusk D, Abdulhalim I, Placido F. Omnidirectional reflection from Fibonacci quasi-periodic onedimensional photonic crystal, *Optical Communications*, 198, 273–279, **2001**.
- [25] A. Rostami, S. Matloub, Fibonacci quasi crystals as special optical waveguides and filters, *Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings*, **2005**.
- [26] Gurel C.S., Kılıç O., Band-blocking optical filter including ultrathin metallic film, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 30, 2482-2491, **2016**.
- [27] Anonim, Intercepts, <http://intercepts.defensenews.com/2014/10/the-f-117-is-still-flying-but-why> (Kasım **2017**).
- [28] Anonim, Plasma classification (types of plasma), [https://www.plasma-universe.com/Plasma_classification_\(types_of_plasma\)](https://www.plasma-universe.com/Plasma_classification_(types_of_plasma)) (Kasım **2017**).
- [29] R. Fitzpatrick, Plasma Physics: An Introduction, 1st edition, CRC Press, **2014**.

- [30] Anonim, W. Gekelman, <http://plasma.physics.ucla.edu/laptag-website/Lectures/Appleton.pdf> (Kasım **2017**).
- [31] Anonim, Fresnel's equations for reflection and transmission, https://www.brown.edu/research/labs/mittleman/sites/brown.edu.research.labs.mittleman/files/uploads/lecture13_0.pdf (Kasım **2017**).

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Özkan KILIÇ

Doğum Yeri: Fatih / İSTANBUL

Medeni Hali: Bekâr

E-posta: ozkgs1501@hotmail.com

Adresi: Atakent Mah. K2 adası C-58/1 No:5/21 Banka Blokları Elvankent ANKARA

Eğitim

Lisans: Hacettepe Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği, 2012

Yabancı Dil ve Düzeyi: İngilizce (İyi seviyede)

İş Deneyimi: 09.2012 – 10.2013 Vestel Elektronik A.Ş

03.2015 – 06.2015 Savunma Sanayi Müsteşarlığı

06.2015'den beri TÜBİTAK SAGE

Deneyim Alanları: Tasarım doğrulama ve test prosedürleri, sistem şartnamesi, kalem şartnameleri, mühendislik dokümanları, sistem mimarileri vb. belgelerin hazırlanması, RKA analizleri.

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi : –

Tezden Üretilmiş Yayınlar : –

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar : –



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 23/11/2017

Tez Başlığı / Konusu: **Askeri Gizleme Uygulamaları İçin Plazma Kaplamaların Tasarımı**


Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam ~~106~~ sayfalık kısmına ilişkin, 23/11/2017 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 6. tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/dâhil
- 3- 5 kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

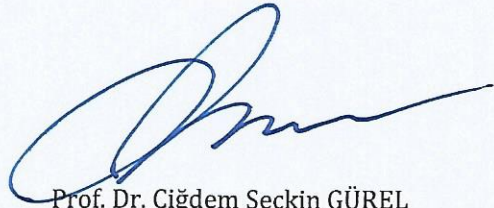
Gereğini saygılarımla arz ederim.

23.11.2017 
Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Özkan KILIÇ
Öğrenci No: N12120457
Anabilim Dalı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Programı: Tezli Yüksek Lisans
Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.



Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL

(Unvan, Ad Soyad, İmza)