İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜRÜYEN DALGALI TÜP KUVVETLENDİRİCİLERİNDE TEK HELİSLİ YAVAŞ DALGALI YAPILARIN ANALİZİ, TASARIMI VE İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Agah Oktay ERTAY

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜRÜYEN DALGALI TÜP KUVVETLENDİRİCİLERİNDE TEK HELİSLİ YAVAŞ DALGALI YAPILARIN ANALİZİ, TASARIMI VE İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Agah Oktay ERTAY
(504132312)

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Serkan ŞİMŞEK

TEMMUZ 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504132312 numaralı Doktora Öğrencisi Agah Oktay ERTAY, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "YÜRÜYEN DALGALI TÜP KUVVETLENDİRİCİLERİNDE TEK HELİSLİ YAVAŞ DALGALI YAPILARIN ANALİZİ, TASARIMI VE İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Doç. Dr. Serkan ŞİMŞEK** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Cevdet IŞIK** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Mehmet ÇAYÖREN İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Hülya ŞAHİNTÜRK Yıldız Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Tanju YELKENCİ Marmara Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **27 Mayıs 2019**
Savunma Tarihi : **08 Temmuz 2019**

Beni, ailemi ve sevdiklerini gördüğüne inanıyorum. Senin sevgin, özverin ve yetiştirmen hayat yolunda bana ışık tuttu. Aramızdan ani bir şekilde ayrılmış olsan da sen hep yüreğimdesin ve manevi olarak hayatımda olmaya devam edeceksin. Bu çalışmayı yakın bir zamanda kaybettiğim, Babam, Ömer ERTAY'ın anısına ithaf ediyorum. Nur içinde uyu, mekanın cennet olsun.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması boyunca kıymetli bilgi ve tecrübesini, etkili görüşlerini, yardımseverliğini ve iş yoğunluğuna rağmen değerli zamanını benden esirgemeyen saygıdeğer danışman Hocam Doç. Dr. Serkan ŞİMŞEK'e teşekkürlerimi sunarım. Doktora çalışmaları boyunca tezden türetilen ve literatüre kazandırılan yeni yaklaşımların ortaya çıkmasında değerli Hocamın sağladığı motivasyon ve iş disiplini büyük rol oynamıştır. Doç. Dr. Serkan ŞİMŞEK'e periyodik yapılar, vakum tabanlı teknolojiler, yürüyen dalgalı tüp kuvvetlendiricleri ve yavaş dalgalı yapılar konusunda bilgi ve deneyim sahibi olmamı sağladığı için ayrıca şükranlarımı sunarım. Tezin kapsamının belirlenmesinde ve tez ilerleme süreçlerinde dile getirdiği değerli görüşlerinden ve etkili yönlendirmelerinden dolayı Prof. Dr. Cevdet IŞIK'a, doktora eğitimim boyunca sağladığı çalışma imkanlarından dolayı Prof. Dr. İbrahim AKDUMAN'a, akademik çalışma motivasyonu kazandırdıkları için Prof. Dr. Ali YAPAR'a ve Prof. Dr. Funda AKLEMAN-YAPAR'a, tezden üretilen yayınların hazırlanması ve gerekli revizyonların yapılarak ortaya çıkarılması esnasında, zamanlarını ayırarak değerli görüşlerini paylaşan Doç. Dr. Ender Mete EKŞİOĞLU'na ve Doç. Dr. Mehmet ÇAYÖREN'e ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım. Bu tezin oluşmasında benim için ciddi motivasyon kaynağı olan değerli arkadaşım, meslektaşım, güzel insan Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Nuri AKINCI'ya özellikle teşekkür ederim, iyi ki varsın! Elektromagnetik benzetim ortamlarının kullanımı konusunda bana vizyon kazandıran değerli arkadaşım Dr. Müh. Mehmet ABBAK'a, tez ilerleme süresince gerek modelleme gerekse kodlama işlemlerinde zamanını benden eksik etmeyen Dr. Müh. Egemen BİLGİN'e, gerek akademik faaliyetlerde gerekse tez çalışmalarımda maddi/manevi desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarım Araş. Gör. Yük. Müh. İsmail DİLMAN'a, Araş Gör. Yük. Müh. Semih DOĞU'a, Yük. Müh. Muhammed Lütfi YARAR'a ve Yük. Müh. Lida KOUHALVANDİ'ye ayrı ayrı teşekkür ederim. Hayat tecrübelerini benimle paylaştığı, akademik faaliyetlerde bana yön verdiği için, çalışma azmimi ve motivasyonumu her zaman manevi olarak yükseltmemde verdiği paha biçilmez öğütlerinden dolayı meslektaşım, Abim, Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Mustafa ERTAY'a özellikle teşekkür ederim. Çalışmalarımda manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen annem Fatma ERTAY'a, abim Öner ERTAY'a, kardeşim Yeşim ALKAYIŞ'a ayrı ayrı teşekkür ederim. Bu tez çalışmasının tamamı Öğretim Üyesi Yetiştirme Programı (ÖYP) kapsamında maddi olarak desteklenmiştir. Emeği geçen herkese teşekkür ederim.

Temmuz 2019

Agah Oktay ERTAY
Elektronik ve Haberleşme Yüksek Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xvii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xix**
ÖZET ..... **xxiii**
SUMMARY ..... **xxv**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Literatür Araştırması 3
1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı 4
2. TEK HELİSLİ YÜRÜYEN DALGALI TÜBÜN KÜÇÜK İŞARET KAZANCI ANALİZİNİN PİERCE PARAMETRELERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ **7**
2.1 Giriş 7
2.2 YDT'nin Pierce Küçük İşaret Teorisi 8
2.2.1 Devre denklemi 9
2.2.2 Elektronik denklemi 11
2.2.3 Genel denklem 12
2.2.4 YDT'nin gerilim kazacının hesaplanması 16
2.3 Sonuç 21
3. PERİYODİK YAPILARIN DURDURMA BANDI KARAKTERİSTİKLERİNİN BULUNMASI İÇİN KAPSAMLI BİR YARDIMCI FONKSİYONLU GENELLEŞTİRİLMİŞ SAÇILMA MATRİSİ YÖNTEMİ **23**
3.1 Giriş 23
3.2 Teori 25
3.3 Bazı Periyodik Yapıların Durdurma Bandı Analizi Üzerine Sayısal Örnekler 29
3.3.1 Dikdörtgen dalgakılavuzları 29
3.3.2 Bir boyutlu fotonik kristaller 31
3.3.3 Tek helisli yürüyen dalgalı tüpler 33
3.4 Sonuç 37
4. YARDIMCI FONKSİYONLU GENELLEŞTİRİLMİŞ SAÇILMA MATRİSİ (YFGSM) YÖNTEMİ İLE ASİMETRİK YÜKLÜ TEK HELİSLİ YAVAŞ DALGALI YAPILARIN DURDURMA BANDI KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ **39**
4.1 Giriş 40
4.2 Helisli YDY'ler için YFGSM Teorisi 43

4.3 Helisli YDY'nin GSM gösterimi 45
4.3.1 1. Durum: dielektrik destek çubuklarının açısal asimetrisi 46
4.3.2 2. Durum: dielektrik çubukların dielektrik sabiti değerinin değişimleri 48
4.3.3 3. Durum: dielektrik destek çubuk genişliğinin değişimleri 49
4.3.4 4. Durum: metal segmentlerin açısal kaydırımı 49
4.3.5 5. Durum: helis ve metal segment arasındaki boşluğun değişimleri 50
4.3.6 6. Durum: metal segment genişliğinin değişimleri 51
4.4 Sayısal Örnekler 51
4.5 Sonuç 56
5. YÜRÜYEN DALGALI TÜPLERDE HELİSLİ YAVAŞ DALGALI YAPILARIN Π-NOKTASI FREKANSI VE DURDURMA BANDI İÇİN OLDUKÇA HIZLI VE BASİT BİR TASARIM PROSEDÜRÜ 59
5.1 Giriş 59
5.2 Helisli Yavaş Dalgalı Yapıların π-noktası Frekansı Analiz Teknikleri 63
5.2.1 Kuple mod analizi 63
5.2.2 Kesin Floquet yaklaşımı 64
5.2.3 Yardımcı fonksiyonlu genelleştirilmiş saçılma matrisi yöntemi 66
5.3 Helisli Yavaş Dalgalı Yapıların π-noktası Frekansı Tasarımı 68
5.4 Sonuçlar ve Değerlendirmeler 69
5.4.1 Π-noktası frekansı analizi 69
5.4.2 Π-noktası frekansı tasarımı 75
5.5 Sonuç 80
6. KESİN FLOQUET YAKLAŞIMI İLE GENİŞBANDLI YÜRÜYEN DALGALI TÜPLER İÇİN HELİS TİPİ YAVAŞ DALGALI YAPILARIN DİSPERSİYON KARAKTERİSTİĞİNİN ANALİZİ 83
6.1 Giriş 83
6.2 Kesin Floquet Yaklaşımı 84
6.3 Helisli YDY Örnekleri ve Faz Hızı Sonuçları 85
6.3.1 Dikdörtgen dielektrik destek çubukları ile yüklü helis: YDY-I 87
6.3.2 Dairesel destek çubuk yüklü helis:YDY-II 87
6.3.3 T-biçimli dielektrik yüklü helis: YDY-III 88
6.3.4 Dikdörtgen dielektrik ve metal segment yüklü helis: YDY-IV 90
6.4 Sonuç 91
7. SONUÇLAR VE GENEL DEĞERLENDİRMELER 93
KAYNAKLAR 97
ÖZGEÇMİŞ 106

KISALTMALAR

AFGSM : Auxiliary Functions of Generalized Scattering Matrix
APBN : Anizotropik Prolitik Boron Nitrit
BeO : Berilyum Oksit
BH : Birim Hücre
CST : Computer Simulation Technology
FK : Fotonik Kristal
GSM : Genelleştirilmiş Saçılma Matrisi
HFSS : High Frequency Structure Simulator
KFY : Kesin Floquet Yaklaşımı
KMA : Kuple Mod Analizi
MAT : Modal Açılım Tekniği
MY : Momentler Yöntemi
MZ : Metal Zarf
PY : Periyodik Yapı
RAM : Random Access Memory
SEY : Sonlu Elemanlar Yöntemi
ŞH : Şerit Helis
TE : Enine Elektrik (Transverse Electric)
TM : Enine Magnetik (Transverse Magnetic)
YDY : Yavaş Dalgalı Yapı
YDT : Yürüyen Dalgalı Tüp
YFGSM : Yardımcı Fonksiyonlu Genelleştirilmiş Saçılma Matrisi
ZDSFY : Zaman Domeninde Sonlu Farklar Yöntemi
1B : Bir Boyutlu

SEMBOLLER

b	**:** Hız senkronizasyon parametresi
QC	**:** Uzay yükü parametresi
d	**:** Yavaş dalga devre kaybı
ω	**:** Açısal frekans
t	**:** Zaman parametresi
ζ	**:** Yürüyen dalgalı tübün yayılım sabiti
ϑ	**:** Elektron demet hızının alternatif akım bileşeni
u_0	**:** Elektron demet hızının doğru akım bileşeni
η	**:** Elektron yük-kütle oranı
V_0	**:** Elektron demetini hızlandırmak için uygulanan dc gerilim
i_{eks}	**:** Elektron konveksiyon akımının ac bileşeni
L	**:** Birim uzunluk başına seri indüktans
C_c	**:** Birim uzunluk başına paralel kapasitans
V	**:** Birim uzunluk başına paralel kapasitanstaki gerilim
I_L	**:** Birim uzunluk başına seri indüktanstaki akım
I_C	**:** Birim uzunluk başına paralel kapasitansın akım ifadesi
J	**:** Yer değiştirme akımı
ζ_0	**:** Yavaş dalga devresinin yayılım sabiti
Z_0	**:** Kayıpsız ietim hattının karakteristik empedansı
E_z	**:** Eksenel yöndeki elektrik alan
β_e	**:** Elektron demetine ait yayılım faz sabiti
I_0	**:** Ortalama elektron konveksiyon akımı
ρ_0	**:** dc yük yoğunluğu
ρ	**:** ac lineer yük yoğunluğu
E_{za}	**:** Uzay yükü etkileri yokken oluşan elektrik alan
E_{zuy}	**:** Uzay yükü etkileri altında oluşan elektrik alan
C_1	**:** Uzay yükü etkileri altında elektron demeti ile yavaş dalga devresi arasındaki birim uzunluk başına kapasite
C	**:** Pierce kazanç parametresi
β_y	**:** Yavaş dalga devresine ait yayılım faz sabiti
P	**:** Yavaş dalga devresindeki güç akışı
ϑ_f	**:** Yavaş dalga devresinin faz hızı
α	**:** Yavaş dalga devre kaybı
$\delta_1, \delta_2, \delta_3$	**:** Üçüncü dereceden YDT dispersiyon denkleminin çözümünden elde edilen artırılmış yayılım sabitleri
x, y	**:** Artırılmış yayılım sabitinin reel ve sanal bileşenleri
Q	**:** Pierce uzay yükü parametresi

V_1, V_2, V_3 : YDT içinde oluşan devre gerilimleri
V_{gir} : YDT'nin girişindeki devre gerilimi
$V_{çık}$: YDT'nin çıkışındaki devre gerilimi
L_u : YDT'de yer alan etkileşim bölgesi uzunluğu
N : YDT'de yer alan etkileşim bölgesinin dalgaboyu cinsinden ifadesi
G_{toplam} : YDT'deki toplam gerilim kazancı
G_{artan} : YDT'deki artan gerilim kazancı
H, R : Devre ve uzay yükünden ileri gelen kayıp ve artan dalga parametreleri
J_{+1}, J_{-1} : Periyodik yapılarda band ucu frekanslarının bulunmasını sağlayan yardımcı fonksiyonlar
$\boldsymbol{a_1}, \boldsymbol{a_2}, \boldsymbol{b_1}, \boldsymbol{b_2}$: Periyodik yapının birim hücresindeki referans düzlemlerinden gelen ve yansıyan kompleks genlikler
$\boldsymbol{S_{11}}, \boldsymbol{S_{12}}, \boldsymbol{S_{21}}, \boldsymbol{S_{22}}$: Genelleştirilmiş saçılma matrislerinin blok alt matrisleri
λ : Periyodik yapının özdeğeri
$S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$: Tek Floquet moduna ait genelleştirilmiş saçılma matrisinin elemanları
$\boldsymbol{I}$: Birim matris
β : Floquet faz faktörü
p : Periyodik yapının periyodu, helis hatvesi
$\boldsymbol{\Psi}$: Periyodik yapının birim hücresinde depo edilen kompleks güç
$^t, ^*$: Üstünde bulunan ifadenin transpozu ve kompleks eşleniği
$\boldsymbol{U}$: $N \times N$'lik köşegen matris
$\Psi_{\pm 1}$: Tek Floquet modunda periyodik yapının birim hücresinde depo edilen kompleks güç
A, B : Dikdörtgen dalga kılavuzunun geniş ve dar kenarı
p_1, p_2, d_x : Dikdörtgen dalga kılavuzunda ve fotonik kristalde yüklenen ilgili malzemelerin z yönündeki fiziksel uzunlukları
ε_r : Dielektrik maddenin bağıl dielektrik sabiti
t_a, t_b : Dielektrik malzemenin kesitteki konumları
θ_{gel} : Düzlem dalganın yüzey normali ile yaptığı açı
n_n : İlgili ortama ilişkin kırılma inidisi
a : Helis ortalama yarıçapı
$\Delta\phi$: Helisli YDY'de uygulanan açısal asimetri değeri
c_z : Metal zarf yarıçapı
w^r : Dielektrik destek çubuk genişliği
Z_{min}, Z_{max} : CST'de ilgili yapı için periyodik sınır koşulunun uygulandığı xy düzlemleri
$\overline{J}_{\pm 1}, \overline{R}_{\pm 1}$: Periyodik yapılarda band ucu frekanslarının bulunmasını sağlayan yeniden formüle edilmiş yardımcı fonksiyonlar
b_s : Metal segment yarıçapı
Z_v, Z_d, Z_s : Vakum, dielektrik destek çubuk ve metal segment bölgelerine ilişkin karakteristik empedanslar
ε_{eff} : Helisin dielektrik destek çubuğu bölgesindeki etkin bağıl dielektrik sabiti
$w_{şerit}$: Şerit helise ilişkin şerit genişliği

k : Alan ekranlama faktörü

Γ : Vakumdan dielektrik destek çubuk bölgesine geçişteki süreksizliğin jonksiyon yansıma katsayısı

Γ_s : Vakumdan metal segmente geçişteki süreksizliğin jonksiyon yansıma katsayısı

$g, \Delta g$: Helis ile metal segment arasındaki boşluk ve bu boşluğa uygulanan asimetri aralığı

$\Delta\varepsilon_r$: Helisli YDY'deki dielektrik destek çubuklarının dielektrik sabitine ait değişim

ψ : Helis hatve açısı

$\beta^h_{1,2}$: Helisli YDY'deki hibrid modlara ilişkin yayılım faz sabitleri

β^{bh}_0, β^{bh}_{-1} : Helisli YDY'deki kuple olmayan ileri ve geri dalgalara ilişkin yayılım faz sabitleri

K^C : Helisli YDY'deki asimetri sonucu oluşabilen kuplaj katsayısı

s_k : π-noktası frekansında temel ileri dalgaya ait dispersiyon eğrisinin eğimi

a_{etk} : Etkin helis yarıçapı

$l_{0a_{etk}}, l_{1a_{etk}}$: Etkin helis yarıçapında yüklü ilgili elemanın eğri uzunluğu

$X_\pm$: Simetrik birim hücreli periyodik yapının iletim durdurma band bölgelerini bulabilen fonksiyonlar

N_d : Helisli YDY'deki dielektrik destek çubuğu sayısı

$w_{çubuk}$, $r_{çubuk}$: Helisli YDY'deki dikdörtgen dielektrik destek çubuk genişliği ve dairesel dielektrik destek çubuk yarıçapı

t_n : T biçimli dielektrik destek çubuğuna ilişkin ilgili parametreler

x_n, y_n : Artırılmış yayılım sabitlerinin sırasıyla reel ve sanal kısımları

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1: İncelenen her iki asimetrik dikdörtgen dalga kılavuzu konfigürasyonları için ÖZD ve YFGSM yöntemleri ile CST benzetimlerinin band ucu frekans sonuçları. **31**

Çizelge 3.2: 1B FK'ların her iki asimetrik konfigürasyonları için ÖZD, YFGSM yöntemlerine ve HFSS benzetimine ait band ucu frekans sonuçları. **33**

Çizelge 3.3: Tek helisli YDY'nin π-modu frekansına ait ölçülen ve hesaplanan sonuçların karşılaştırılması. **35**

Çizelge 3.4: Tek helisli YDY'nin asimetrik konfigürasyonu için ÖZD ve YFGSM yöntemleri ile CST benzetimlerine ait band ucu frekans sonuçları. **36**

Çizelge 3.5: YFGSM ve CST/HFSS sonuçları için gerekli toplam hesaplama ve benzetim sürelerinin karşılaştırılması. **37**

Çizelge 4.1: Ele alınan helisli YDY'ler ve ilgili parametre değerleri..... **52**

Çizelge 4.2: YDY-I'in çubuk açısal asimetrisi için yeniden formüle edilmiş YFGSM yöntemine ait band ucu frekansları ve bağıl durdurma bandı sonuçları. **53**

Çizelge 5.1: Ele alınan helisli YDY'lerin parametre değerleri. **70**

Çizelge 5.2: $\Delta\phi = 0^\circ$ durumunda ilgili helisli YDY'ler için farklı yöntemlerin ve CST benzetim sonuçlarının raporlanmış sonuçlar ile karşılaştırılması. **74**

Çizelge 5.3: $\Delta\phi \neq 0^\circ$ durumunda ilgili helisli YDY'ler için farklı yöntemlerin ve CST benzetim sonuçlarının karşılaştırılması. **74**

Çizelge 5.4: Farklı helisli YDY'ler için KMA, CST ve YFGSM yöntemleri ile elde edilen π noktası frekansı hesaplama süreleri. **75**

Çizelge 5.5: $w_{çubuk,İF}$, $r_{çubuk,İF}$ değerleri için KMA'ya ve KFY'ye ilişkin π noktası frekanslarının karşılaştırılması. **77**

Çizelge 5.6: Seçilen $\Delta\phi$ ve tasarlanan $w_{çubuk,İF}$, $r_{çubuk,İF}$ değerleri için KMA, KFY sonuçları ile CST benzetim sonuçlarına ait band ucu frekanslarının karşılaştırılması. **81**

Çizelge 5.7: Farklı helisli YDY'ler için KMA, CST ve YFGSM yöntemleri ile π-noktası frekansı tasarım eğrilerinin(Şekil 5.7'den görülebilir) bulunması için gerekli hesaplama süreleri. **81**

Çizelge 6.1: Ele alınan helisli YDY'lere ait yapı parametreleri. **86**

Çizelge 6.2: Farklı helisli YDY'ler için Şekiller 6.2 ve 6.5'de elde edilen sonuçlar için gerekli hesaplama sürelerinin karşılaştırılması. **91**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Tipik bir YDT'nin ana düzenleri ile şematik gösterimi. **1**

Şekil 2.1 : Tipik bir YDT analizi için eşdeğer devre gösterimi. **9**

Şekil 2.2 : $d = 0$, $QC = 0.05$ için tüp yayılım sabitlerinin kök değişimleri. **15**

Şekil 2.3 : $d = 0.25$, $QC = 0.125$ için tüp yayılım sabitlerinin kök değişimleri. **15**

Şekil 2.4 : $d = 0.5$, $QC = 1$ için tüp yayılım sabitlerinin kök değişimleri. **16**

Şekil 2.5 : Kompleks δ düzleminde $d = 0.5$, $QC = 1$ için tüp yayılım sabitlerinin kök değişimleri..... **16**

Şekil 2.6 : Kompleks δ düzleminde $d = 0.25$, $QC = 0.125$ için tüp yayılım sabitlerinin kök değişimleri. **17**

Şekil 2.7 : Kompleks δ düzleminde $d = 0.5$, $QC = 1$ için tüp yayılım sabitlerinin kök değişimleri. **17**

Şekil 2.8 : $d = 0$ ve farklı QC değerleri için CN parametresine göre YDT'nin artan dalgasına ait maksimum kazanç değişimi. **19**

Şekil 2.9 : $d = 0$ ve farklı QC değerleri için CN parametresine göre YDT'nin toplam dalgasına ait maksimum kazanç değişimi. **19**

Şekil 2.10 : $d = 0.5$ ve farklı QC değerleri için CN parametresine göre YDT'nin artan dalgasına ait maksimum kazanç değişimi. **20**

Şekil 2.11 : $d = 0.5$ ve farklı QC değerleri için CN parametresine göre YDT'nin toplam dalgasına ait maksimum kazanç değişimi. **20**

Şekil 3.1 : Bir periyodik yapının GSM gösterimi. **25**

Şekil 3.2 : Asimetrik BH'li kısmi dielektrik yüklü dikdörtgen dalgakılavuzunun kesit görünümü..... **29**

Şekil 3.3 : $\varepsilon_{r1} = 1$, $\varepsilon_{r2} = 2.56$, $d_x = 1.09A$, $p_1 = A/8$, $p_2 = A/16$, $t_a = 0$, $t_b = A$ parametre değerleri için homojen dielektrik yüklü dükdörtgen dalgakılavuzunun durdurma band diyagramı. **30**

Şekil 3.4 : $\varepsilon_{r1} = 1$, $\varepsilon_{r2} = 2.56$, $d_x = 0.88A$, $p_1 = A/8$, $p_2 = A/16$, $t_a = A/16$, $t_b = 15A/16$ parametre değerleri için inhomojen dielektrik yüklü dükdörtgen dalgakılavuzunun iletim durdurma band diyagramı. **30**

Şekil 3.5 : Asimetrik birim hücreli 1B FK'nın kesit görünümü. **31**

Şekil 3.6 : $p = A = 200$ nm, $p_1 = 0.2A$, $p_2 = 0.8A$, $\theta_1 = k_1 p_1/2$, $\theta_2 = k_2 p_2$, $\theta_3 = k_1 p_1/5$ ve $\theta_{gel} = 0^\circ$ değerleri için (k_1 and k_2 dalga vektörünün z bileşeni olmak üzere) 1B FK'nın fotonik iletim/durdurma band diyagramı. **32**

Şekil 3.7 : $p = A = 200$ nm, $p_1 = 0.2A$, $p_2 = 0.8A$, $\theta_1 = k_1 p_1/2$, $\theta_2 = k_2 p_2$, $\theta_3 = k_1 p_1/5$ ve $\theta_{gel} = 30^\circ$ değerleri için (k_1 and k_2 dalga vektörünün z bileşeni olmak üzere) 1B FK'nın fotonik iletim/durdurma band diyagramı. **32**

Şekil 3.8 : (a) $\Delta\phi = 15^\circ$ için 1. dielektrik destek çubuğunda asimetri içeren tek helisli YDY'nin kesit görünümü (b) Şekil 3.8(a)'da verilen tek helisli YDY'nin tek bir sarımına ait merdiven devre gösterimi. **34**
Şekil 3.9 : $\Delta\phi = 15^\circ$ için 1. dielektrik destek çubuğunda meydana gelen açısal asimetriden dolayı tek helisli YDT'de oluşan durdurma band karakteristikleri. **35**
Şekil 4.1 : YDT'deki tipik bir helis yavaş dalgalı yapıya ait kesit görünümü. ... **40**
Şekil 4.2 : π-noktası frekansında helisli YDY'nin merdiven devre gösterimi.... **45**
Şekil 4.3 : a)π-noktası frekansında dielektrik destek çubuklarından birinin açısal asimetrisi için merdiven devre gösterimi (1. durum) b) Açısal asimetri durumunda helisli YDY'ye ait eşdeğer iletim hattı gösterimi. **46**
Şekil 4.4 : 1. durum için genelleştirilmiş saçılma matrisi gösterimi. **47**
Şekil 4.5 : Kaskat bağlı süreksizliklerin ve devrelerin GSM gösterimi. **48**
Şekil 4.6 : π-noktası frekansında dielektrik destek çubuk genişliklerinin değişimleri ($w^r \pm \Delta w^r$) için helisli YDY'nin eşdeğer iletim hattı gösterimi (3. durum). **49**
Şekil 4.7 : π-noktası frekansında metal segmentlerden birinin açısal kaydırımı için helisli YDY'nin eşdeğer iletim hattı gösterimi (4. durum). **50**
Şekil 4.8 : Helis ile metal segment arasındaki boşluğun değişimi (g $\pm$ Δg) için helisli YDY'nin eşdeğer iletim hattı gösterimi (5. durum)..... **51**
Şekil 4.9 : Metal segment genişliğindeki değişimler için helisli YDY'nin eşdeğer iletim hattı gösterimi (6. durum). **51**
Şekil 4.10 : YDY-I'in dielektrik destek çubuklarından birinin $\Delta\phi = 0^\circ$ ve $\Delta\phi = 10^\circ$ açısal değişiminden ileri gelen durdurma bandı diyagramı. **52**
Şekil 4.11 : YDY-I'de dielektrik destek çubuklarından birine ait açısal asimetriden ileri gelen bağıl durdurma band genişliğinin değişimi. . **54**
Şekil 4.12 : YDY-I'de dielektrik çubuklardan birinin dielektrik sabiti değerlerinin değişiminden ileri gelen bağıl durdurma bandının değişimi. .. **54**
Şekil 4.13 : YDY-I'de dielektrik destek çubuk genişliğinin değişiminden ($w^r \pm \Delta w^r$) ileri gelen bağıl durdurma bandının değişimi..... **55**
Şekil 4.14 : YDY-II'de metal segmentlerden birinin açısal değişiminden ileri gelen bağıl durdurma bandı değişimi..... **55**
Şekil 4.15 : YDY-II'de metal segmentlerden biri ile helis arasındaki boşluktan ileri gelen bağıl durdurma bandı değişimi. **56**
Şekil 4.16 : YDY-II'de metal segment genişliklerinden birinin değişiminden $w^s \pm \Delta w^s$ ileri gelen bağıl durdurma bandı değişimi. **56**
Şekil 5.1 : (a) Dikdörtgen ve (b) dairesel dielektrik destek çubuklu helisli YDY'lerin kesin görünümleri. **60**
Şekil 5.2 : Helisli YDY gösterimleri: helis birim hücresinin (a) GSM gösterimi (b) merdiven devre gösterimi ($l_{0,1} = l_{0a_{etk},1a_{etk}} \times cos(\varphi)$ olarak verilmektedir ve bu ifade ile şekilde yer alan $l_{0a_{etk},1a_{etk}}$, ψ, ŞH ve MZ sırasıyla etkin helis yarıçapında yüklü ilgili elemanın eğri uzunluğu, helis hatve açısı, şerit helis ve metal zarf olarak ifade edilmektedir.) **64**
Şekil 5.3 : İlgili (a) dikdörtgen ve (b) dairesel destek çubuklu helisli YDY'lere ilişkin CST konfigürasyonları. **70**

Şekil 5.4 : YDY-I'te $\Delta\phi = 0^\circ$ ve $\Delta\phi = 15^\circ$ değerleri için sırasıyla (a) π-noktası frekansı ve (b) durdurma bandının belirlenmesi..... **71**
Şekil 5.5 : YDY-II'te $\Delta\phi = 0^\circ$ ve $\Delta\phi = 10^\circ$ değerleri için sırasıyla (a) π-noktası frekansı ve (b) durdurma bandının belirlenmesi..... **72**
Şekil 5.6 : YDY-III'te $\Delta\phi = 0^\circ$ ve $\Delta\phi = 15^\circ$ değerleri için sırasıyla (a) π-noktası frekansı ve (b) durdurma bandının belirlenmesi. **73**
Şekil 5.7 : YFGSM yöntemi ile π-noktası frekansının $w_{çubuk}$ ve $r_{çubuk}$'ye bağlılığının (a) YDY-I, YDY-II (b) YDY-III, YDY-IV (c) YDY-V, YDY-VI için incelenmesi. **76**
Şekil 5.8 : Arzu edilen π-noktası 8.52GHz frekansı için YFGSM yöntemi kullanılarak YDY-IV'in (a) π-noktası frekansı ($\Delta\phi = 0^\circ$) (b) durdurma bandı ($\Delta\phi = 5^\circ$)..... **77**
Şekil 5.9 : Arzu edilen π-noktası 23.11GHz frekansı için YFGSM yöntemi kullanılarak YDY-V'in (a) π-noktası frekansı ($\Delta\phi = 0^\circ$) (b) durdurma bandı ($\Delta\phi = 5^\circ$). **78**
Şekil 5.10 : Arzu edilen π-noktası 43.5GHz frekansı için YFGSM yöntemi kullanılarak milimetre dalga çalışma frekanslarını içeren YDY-VI'in (a) π-noktası frekansı ($\Delta\phi = 0^\circ$) (b) durdurma bandı ($\Delta\phi = 20^\circ$). **79**

YÜRÜYEN DALGALI TÜP KUVVETLENDİRİCİLERİNDE TEK HELİSLİ YAVAŞ DALGALI YAPILARIN ANALİZİ, TASARIMI VE İNCELENMESİ

ÖZET

Haberleşme uydularının vazgeçilmez elemanlarından biri olan yürüyen dalgalı tüp kuvvetlendiricileri, on yıllardır askeri ve sivil sistemlerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Belirtilen cihazlar istenen bilgi işaretlerinin istenen bölgeye arzu edilen kuvvetlendirme isterlerine sahip genlik ve fazda gönderilmesini sağlamaktadır. Yapısında birçok alt sistem bulunan ve her bir alt sisteminin oldukça karmaşık bir yapıya sahip olduğu bu cihazlar sadece haberleşme uydularında değil aynı zamanda radar ve elektronik harp sistemlerinde de geniş ölçüde kullanılmaktadır. Yürüyen dalgalı tüplerin çalışma mekanizmasındaki en önemli bileşenlerinden biri de yavaş dalgalı yapı düzenidir. Bu düzen içerisinde kullanılan periyodik yavaş dalga devresi olarak, çalışma isterlerine göre değişiklik göstermekle beraber, geniş band gerektiren uygulamalar için çoğunlukla helis tipinde devreler tercih edilmektedir. Bu tipteki devrelerin dispersiyon karakteristikleri, farklı formdaki dielektrik ve metal segment yüklemeleri ile kontrol edilebilmektedir. Arzu edilen frekans karakteristiğinin korunması açısından helisli yavaş dalgalı yapıların simetrik biçimde yüklenmesi oldukça önemlidir. Aksi durumda, belirtilen yükleme işlemleri sırasında malzeme özellikleri ve açısal yerleşimlerin farklılıklarından dolayı asimetrik yükleme durumları oluşabilmektedir. Oluşan asimetri sebebi ile, belirtilen yapıların π-noktası frekansı civarında durdurma bandı oluşabilmektedir. Bu durum, band ucu osilasyonlarına ve band içi güç boşluklarının oluşmasına yol açmaktadır. Bu sebeple, belirtilen helisli yavaş dalgalı yapıların π-noktası frekansı ve durdurma bandı analizleri ile amaca uygun π-noktası frekansı ve durdurma bandı tasarımları oldukça önemli bir durum haline gelmektedir.

Asimetrik yüklü helisli yavaş dalgalı yapıların π-noktası frekansı ve durdurma bandlarının belirlenmesi için literatüre, tezden üretilen ve özgün yardımcı fonksiyonlar kazandırılmıştır. Önerilen yeni yöntem, farklı tipteki simetrik /asimetrik birim hücreli periyodik yapıların iletim/durdurma band bölgelerinin belirlenmesinde de kullanılabilmektedir. Bu bağlamda, belirtilen kapsamlı yöntem, dikdörtgen dalgakılavuzlarında ve fotonik kristallerde başarı ile uygulanmıştır. Ele alınan örneklerde, önerilen yeni yönteme ait sonuçlar, literatür ve lisanslı elektromagnetik benzetim programlarına ait sonuçlar ile doğrulanmıştır ve uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Tek Floquet modlu özdeğer denklemine band ucu koşullarının zorlanmasıyla yeniden formüle edilmiş ve ilk olarak asimetrik/simetrik birim hücreli helisli yavaş dalgalı yapıların π-noktası ve durdurma bandlarının belirlenmesinde kullanılan yeni bir bilimsel yöntem önerilmiştir. Mümkün olabilen tüm asimetrik durumlar sırasıyla dielektrik yüklü, dielektrik ve metal segment yüklü helisli yavaş dalgalı yapılar için analiz edilmiştir. Ele alınan örneklerde uygulanan yeniden formüle edilmiş yöntem

ile elde edilen sonuçlar, literatür sonuçları ile doğrulanmıştır ve tutarlı sonuçlar elde edildiği gözlenmiştir.

Amaca uygun π-noktası frekansının belirlenmesi ve π-noktası frekansı civarındaki durdurma bandlarının tasarımı için basit ve oldukça hızlı bir tasarım prosedürü önerilmiştir. Önerilen tasarım prosedürü için literatürde mevcut farklı parametre değerlerine sahip dikdörtgen ve dairesel dielektrik yüklü helisli yavaş dalgalı yapılar ele alınmıştır. Önerilen yöntemler ile elde edilen sonuçlar, literatür ve lisanslı elektromagnetik benzetim ortamı sonuçları ile doğrulanmıştır ve uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Genişbandlı yürüyen dalgalı tüplerde kullanılan helisli yavaş dalgalı yapıların dispersiyon karakteristiklerinin belirlenmesinde hızlı ve etkili bir yöntem önerilmiştir. Belirtilen yöntem tek Floquet moduna ait özdeğer denkleminin çözümüne dayanmaktadır. Literatürde mevcut dikdörtgen, dairesel, T-çubuk ve dielektrik & metal segment yüklü helisli yavaş dalgalı yapıların dispersiyon karakteristikleri belirtilen yöntem kullanılarak elde edilmiştir. Ele alınan problemlerde önerilen yöntem ile elde edilen sonuçlar; literatürde mevcut deneysel, alan analizi sonuçları ve lisanslı elektromagnetik benzetim sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemin görece düz dispersiyon karakteristiğine sahip helisli yavaş dalgalı yapılarda daha uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.

ANALYSIS, DESIGN AND INVESTIGATION OF SINGLE HELIX SLOW-WAVE STRUCTURES IN TRAVELING WAVE TUBE AMPLIFIERS

SUMMARY

Sources of power are considerably required for design specifications of some applications such as radio and television boradcasting, microwave heating. Vacuum electron devices such as klystrons, magnetrons and traveling wave tubes are the most useful systems in order to overcome this problem. Invention of these devices can be ranging to the Second World War. The idea of interaction between electron beam and RF electromagnetic wave gave acceleration to development of vacuum electron devices especially traveling wave tubes.

Traveling wave tube amplifiers which are one of indispensable devices of communication satellites are widely used in military and civil systems for decades. Indicated devices provide sending required information signals to required region with their appropriate amplifying specifications. These devices are not only widely used communication satellites but also radar and electronic warfare systems and consist of five main sections which are called electron gun, slow-wave structure, RF input/output couplers, focusing structure and collector. Electron gun generates and forms an electron beam as uniform as possible in order to send it into the slow-wave structure block. Slow-wave structure consists of a slow-wave circuit with symmetric placement dielectric materials in order to support it. Interaction between electron beam and RF electromagnetic wave takes place in this block. RF signals can be driven by using RF input/output couplers with matched impedance. Focusing structure has a confining role for electron beam in order to provide uniformity of it and not to touch helix slow-wave structure along the interaction region. Collector block has absorption and power recovery roles in order to collect spent electron beam which has residual electron energy and improve efficiency of traveling wave tubes. These devices can operate from frequencies under 1GHz to over 100 GHz. Capabilities of power production changes from watts to megawatts. Bandwidth of traveling wave tubes depends on electron beam properties and dispersion characteristics of slow-wave structures.

Slow-wave structure system is one of the most important components of the traveling wave tubes operation mechanism. Selection of periodic slow-wave circuit which is used in these systems, which depends on operation specifications, is generally helix type circuits for broadband applications. Dispersion characteristics of such types of circuits are controlled by loading with different forms of dielectric and metal segment configurations. Symmetrically loading of helix slow-wave structures is quite important in terms of acquiring proposed design objectives. Otherwise, asymmetrically loading cases can be revealed due to differences of material properties and angular placements during indicated loading processes. Stopband behavior can be occurred near the π-point frequency of these structures due to existence of these asymmetries. These cases result in band edge oscillations and in-band power-holes in related helix traveling wave tubes. Occuring these issues restricts power capability of the traveling wave

tubes. For this reason, analyses of π-point frequency and stopbands of indicated helix slow-wave structures become a quite important case for traveling wave tubes.

Auxiliary functions of generalized scattering matrix method (AFGSM) produced from PhD studies are brought into open literature for determination of π-point frequency and stopbands of asymmetrically loaded helix slow-wave structures. This original method is based on the analysis of stored complex power in the unicell of a periodic structure. Symmetric unit cell assumption of the periodic structure is removed by obtaining this novel method. Hence, this proposed method has comprehensive approach with applicability to both symmetric and asymmetric unit cell configuration of the periodic structures. Proposed novel method can also be used for determination of passband/stopband regions of different types of periodic structures with asymmetric/symmetric unit cell configuration. In this context, indicated comprehensive method is successfully applied to periodically dielectric loaded rectangular waveguides and photonic crystals. Ladder circuit representation for single turn helix model of related helix slow wave structure is used in order to obtain generalized scattering matrix of helix unit cell configuration. Results from the proposed method are validated with results of literature and commercial electromagnetic simulation programs in considering examples and good agreement results are obtained. It is indicated that proposed auxiliary functions of generalized scattering matrix method is quite fast and simple to the other solutions methods.

A novel auxiliary functions of generalized scattering matrix method is proposed in order to determine π-point frequency and stopbands of asymmetrically loaded helix slow-wave structures. Indicated original method is reformulated by enforcing band edge conditions into eigenvalue equation of single Floquet mode and successfully applied to determine π-point frequency and stopbands of symmetric/asymmetric helix slow-wave structures. In order to test the validity of this reformulated method, related single turn helix is modeled as a ladder circuit at the π-point frequency. All possible asymmetric cases such as angular offset of the rods, variations of support rod permittivity values and widths, angular offset of metal segments, variations in gap between helix to segment and segment width are analyzed for dielectric and dielectric & metal segment loaded helix slow-wave structures, respectively. Results obtained from applied reformulated method are validated with open literature and consistent results are observed.

A simple and extremely fast design procedure are proposed for determination of π-point frequency of helix slow-wave structures and design of stopbands near the π-point frequency of asymmetrically loaded helix slow wave structures. Rectangular and circular dielectric loaded helix slow-wave structures which are available in open literature are considered for proposed design procedure. Each interested helix slow-wave structure is modeled as ladder circuit with its single turn approach. Results obtained from the proposed methods are validated with results from open literature and commercial electromagnetic simulation environment and good agreement are acquired. The results show that proposed design procedure is fast and simple to the other solution methods such as coupled mode analysis and commercial electromagnetic simulation program.

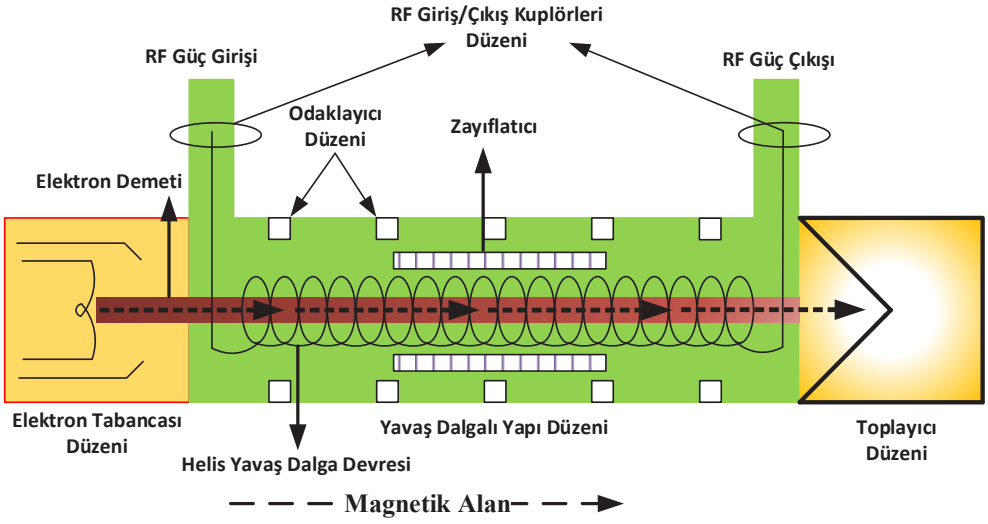
A fast and efficient method is proposed for determination of dispersion characteristics of helix slow-wave structures for broadband traveling wave tubes. Indicated method is based on the solution of eigenvalue equation of given periodic structure. Dispersion

characteristics of rectangular, circular, T-shaped rod and dielectric & metal segment loaded helix slow-wave structures, which are in open literature, are obtained by using proposed method. Indicated helix slow-wave structures are represented as ladder circuit which can be obtained by slitting helix tape at the outer helix radius along the direction normal to the helix winding direction and flattening it out. Results obtained from the proposed method are compared with experiment, field analysis results which are available in open literature and commercial electromagnetic simulation program for related problem. Percent error and average error calculations are performed between proposed method and other solutions such as field analysis, experiment and electromagnetic design environment. It is seen that proposed method gives more compatible results in helix slow-wave structures which has relatively flat dispersion characteristics.

1. GİRİŞ

Elektromagnetik spektrumu kullanan radar, elektronik harp, internet, radyo ve televizyon yayınları, görüntüleme cihazları ve mikrodalga ısıtma gibi bir çok uygulamanın çalışma isterlerini karşılayacak güç kaynaklarına pratikte ihtiyaç duyulmaktadır [1–15]. Bu bağlamda, Yürüyen Dalgalı Tüp (YDT)'ler bir güç kuvvetlendiricisi olarak sağladığı geniş bandda çalışma imkanı, yüksek güç verimliliği, uzun ömürlü olmasından ötürü başta uzay uygulamaları olmak üzere birçok haberleşme sisteminde yaygın bir şekilde on yıllardır kullanılmaktadır [3, 5, 6, 8, 9, 11, 13, 15–17].

YDT cihazları temel anlamda bir işaret kuvvetlendirme mekanizmasına sahip olup bu cihazlarda Şekil 1.1'de de gösterildiği gibi bu mekanizmanın çalışmasını sağlayan beş ana düzen yer almaktadır [2, 13]. Tipik bir YDT'de ilk alt düzeni elektron tabancası bloğu oluşturmaktadır ve bu blok uygun çapta ve sabit bir eksenel hızda olacak biçimde bir elektron demetinin oluşmasını sağlamaktadır. Yavaş Dalgalı Yapı (YDY) alt düzeninde elektron demeti ile RF işaretin etkileşimi gerçekleşmektedir. Bu düzen içerisinde yer alan yavaş dalgalı devre elemanı



Şekil 1.1 : Tipik bir YDT'nin ana düzenleri ile şematik gösterimi.

genellikle helis tipi yapılardan oluşmakta olup bu yapılar vakum zarf içerisinde dielektrik destek çubukları ile sabit konumda tutulmaktadır. Ayrıca, etkileşim bölgesi boyunca periyodik bir düzen içerisinde sabit mıknatıslarla oluşturulan odaklayıcı ana düzeni bulunmaktadır. Odaklayıcı düzeni elektron demetinin YDY boyunca ilerlerken dağılmasını engellemek için yerleştirilmiş bir mekanizmadır [2, 3, 5, 6, 8, 9, 11, 13, 15]. Ek olarak, RF güç işaretinin uygulandığı ve arzu edilen çıkış işaretinin alındığı RF giriş/çıkış kuplörleri de tipik bir YDT'nin bir başka ana düzenini oluşturmaktadır. YDT'nin son ana düzenini oluşturan toplayıcı bloğunun temel görevi YDT'de etkileşim bölgesini geçip işlevini tamamlayan hızı azalmış elektron demet enerjisinin, ısıya dönüşüm ve ikincil emisyon oluşumunu minimuma indirecek biçimde geri kazanılmasını sağlamaktır [2,13]. Elektron demetinin etkileşim bölgesine geri yansımasını engellemek, elektronların toplayıcı bloğuna çarpmadan yeterince yavaşlatmak ve bu şekilde toplayıcı elektrot yüzeyinde sıcaklık artışını sınırlamak toplayıcı bloğunun önemli görevlerindendir [2, 13].

YDT'de bandgenişliği, kazanç ve çıkış gücü gibi çalışma isterlerini karşılayabilecek tasarımların yapılabilmesi için YDY'de kullanılan yavaş dalgalı devrelerin seçimi önemli bir araştırma konusu olup güncelliğini koruyan bir çalışma alanına sahiptir [14, 18, 19]. Sağladığı genişbandda çalışma yeteneğinden dolayı helis tipi yavaş dalgalı devreler YDT'nin YDY alt düzeninde on yıllardır kullanılagelmiştir [2–15,20]. Helis tipi yavaş dalgalı devrelerin uygun forma sahip dielektrik destek çubukları ile yüklenmesiyle, ilgili devrelerin dispersiyon özellikleri kontrol edilebilmektedir. Görece düz bir dispersiyon eğrisi, genişbandda çalışılması istenen bir YDT için oldukça uygun olabilmektedir. Ek olarak, helisli YDY'de metal segment ile yüklemenin de bu yönde bir fayda sağladığı literatürde mevcuttur [3, 11, 13]. Bununla beraber, özellikle genişbandda çalışan helisli YDT'lerde çalışma isterlerinin sağlanması noktasında birçok yapısal sorunların meydana geldiği görülmektedir [21–28]. Temelde üretim hatalarından ve/veya helisin etrafında yer alan dielektrik destek çubukları ve/veya metal segment gibi elemanların açısal, parametrik veya malzeme özelliklerinden kaynaklanan asimetrik yerleşimler ve oluşumlar helis tipi YDT'lerde π-noktası civarında durdurma bandı oluşumlarına sebep olmaktadır. Bu durum sonucunda ilgili YDT'nin çalışma yeteneklerini sınırlayan band içinde güç boşlukları ve/veya band ucu osilasyonları oluşabilmektedir [21–30]. Oluşan güç problemlerinin

ana kaynağının belirlenmesi açısından helisli YDY'lerin π-noktası frekansı civarında meydana gelen durdurma bandının analizleri önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir.

1.1 Literatür Araştırması

Helisli YDY'lerdeki asimetri problemlerinden kaynaklanan durdurma bandının tespiti için Kuple Mod Analizi (KMA) öne sürülmüştür [31,32]. Bu analizde, helisli YDY'nin yüklenme durumuna göre (simetrik/asimetrik) ilgili özdeğer denkleminin çözümünden gelen yayılım faz sabitleri ve yüklenme durumundan kaynaklanan çoklu yansımaların oluşturduğu bir kuplaj katsayısı kullanılmaktadır. Herhangi bir asimetri mevcut ise, ilgili ileri ve geri dalgalar birbirine girerek yeni hibrid modlar oluşmaktadır. Bu durumda, ilgili yapıdaki asimetri problemleri belirlenebilmekte ve güç problemlerinin düzeltilmesinde referans alınabilmektedir.

Bir YDT'de yer alan herhangi bir helisli YDY için basit anlamda bir kuple mod analizi, ilgili YDY'nin yaklaşık bir faz hızı değerine sahip olduğu varsayımı ile Hinson tarafından yapılmıştır [22, 28]. Lien'in ele aldığı problemde ise dielektrik yüklü helisli YDY için kaskat bağlı devre yaklaşımı ile π-noktası durdurma bandı davranışları belirlenmiştir [23, 28]. Benzer yaklaşım, metal segment yüklü helisli YDY'lere de Onodera tarafından uygulanmıştır [24, 25, 28]. Hinson'ın kullanmış olduğu basit formdaki kuple mod analizi daha titiz bir şekilde dielektrik yüklü helisli YDY'lere uygulanmıştır [27, 28]. Ayrıca alan analizine dayanan bir başka yaklaşımda ise kama biçimli dielektrik yüklü helisli YDY'lerdeki asimetri problemi incelenmiştir [26]. Çoklu yansımalı KMA'nın dielektrik ve metal segment yüklü helisli YDY'lere uygulanması [28] referans numaralı çalışma ile yapılmıştır. Mevcut çalışmalarda genel olarak KMA ve kaskat bağlı devrelerin analizi kullanılmıştır. KMA'da ele alınan formülasyon [28], basit bir forma sahip olmakla birlikte yayılım faz sabitlerinin bulunması için ilgili helisli YDY'lerin özdeğer denkleminin çözümünü gerektirmektedir. Bu çözüm için hesap yoğunluğu içeren bir matematiksel model kullanılmaktadır ve bu durumda hesaplama süresi artabilmektedir.

1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı

Yürüyen dalgalı tüplerde güç problemlerine yol açan, helisli yavaş dalgalı yapılarda asimetrik yerleşimler sonucu ilgili yapıların π-noktası frekansı civarında oluşan durdurma bandlarının hızlı ve doğru bir şekilde belirlenmesi konusunda literatürde yer alan geleneksel yöntemler, alan analizleri ile yayılım faz sabitlerinin bulunmasına dayandığından hesaplama süresini oldukça artırmaktadır. Literatürdeki bu problemi ortadan kaldıracak basit, hızlı ve kolay yardımcı fonksiyonlar içeren yeni bilimsel yöntemler literatüre kazandırılmıştır. Öncelikle asimetrik yüklü helisli yavaş dalgalı yapıların π-noktası frekansının ve bu frekans civarında oluşan durdurma bandlarının belirlenmesi amacıyla geliştirilen yeni yöntemin kapsamlı olduğu periyodik dielektrik yüklü dikdörtgen dalgakılavuzları ve fotonik kristallere de başarı ile uygulanarak ifade edilmiştir.

Tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde yer alan içerikler ana hatları ile aşağıda ifade edilmektedir.

Bölüm 2'de ele alınan problemin genel görünümünün anlaşılması açısından, yürüyen dalgalı tüplerin demet-dalga etkileşimi sonucu oluşan yayılım sabitlerinin elde edilmesi ve yürüyen dalgalı tüplerdeki küçük işaret kazancının detaylı incelemesi yapılmıştır.

Bölüm 3'te periyodik yapılarda kullanılmak üzere, periyodik yapıların iletim ve durdurma band bölgelerini bulmak için genelleştirilmiş saçılma matrisi tabanlı yardımcı fonksiyonlar türetilmiştir. Belirtilen yardımcı fonksiyonlar, sırasıyla periyodik dielektrik yüklü dikdörtgen dalgakılavuzları, bir boyutlu fotonik kristaller ve asimetrik yüklü helisli yavaş dalgalı yapılarda test edilerek geçerliliği ortaya konmuştur.

Bölüm 4'te tek Floquet modunun özdeğer denklemine band ucu koşullarının zorlanması sonucu elde edilen zarif ve anlaşılır nitelikte bir diğer özgün yardımcı fonksiyonlar türetilmiştir. Belirtilen bölümde türetilen yardımcı fonksiyonlar ile asimetrik dielektrik ve metal segment yüklü helisli yavaş dagalı yapıların π-noktası frekansı ve bu frekans civarında oluşan durdurma bandları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Bölüm 5'te literatürde sıklıkla kullanılan asimetrik dikdörtgen/dairesel destek çubuk yüklü helisli yavaş dalgalı yapıların π-noktası frekansı ve bu frekans civarında oluşan durdurma bandı analizleri literatürdeki mevcut yöntemler ile bölümler 3-4'teki yeni özgün yöntemler kullanılarak yapılmıştır. Ek olarak, belirtilen helisli yavaş dalgalı yapıların amaca uygun π-noktası frekansı ve bu frekans civarında arzu edilen durdurma bandlarının tasarımı incelenmiştir.

Bölüm 6'da genişbandlı yürüyen dagalı tüplerde kullanılan helisli yavaş dalgalı yapıların faz hızı frekans karakteristiklerinin bulunmasına yönelik bir yöntem önerilmiştir. Yöntemin uygulanabilirliğini anlamak için literatürde mevcut farklı helisli yavaş dalgalı yapılar ele alınmıştır.

Bölüm 7'de sonuçlar ve genel değerlendirmeler yer almaktadır.

2. TEK HELİSLİ YÜRÜYEN DALGALI TÜBÜN KÜÇÜK İŞARET KAZANCI ANALİZİNİN PİERCE PARAMETRELERİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde literatürde on yıllardır yer alan ve güncelliğini koruyan [1, 5, 11, 33–39] tek helisli YDT'lerde küçük işaret kazanç analizinin araştırılması yapılmaktadır. YDT'ye ilişkin dispersiyon denklemi ele alınmıştır ve helis tipi YDT yapısının yayılım sabitlerinin davranışı demet dalga etkileşimi mevcut iken incelenmiştir. Kuvvetlendirme işleminde önemli role sahip tüm dalgalar ele alınmıştır. Etkileşim devresinden ileri gelen kaybın etkileri, uzay yükü ve demet hızı değişikliklerinin etkileri, YDT'nin dispersiyon denkleminin çözümü yapılırken ve kazanç karakteristiği elde edilirken dikkate alınmıştır. Hız senkronizasyon parametresi (b), uzay yükü parametresi (QC) ve tüp devre kaybı (d) gibi Pierce parametrelerinin durumuna göre YDT'nin kazanç davranışını açıklamak için önemli bazı grafikler elde edilmiştir. Demet hızı, devre kaybı ve demet dalga etkileşimi dikkate alındığında YDT'nin kazanç karakteristiğini araştırmak için Pierce'ın küçük işaret kazanç teorisinin önemli bilgiler verdiği not edilmelidir. Bu bölümde ele alınan analizler [40] no'lu yayın ile belirtilen ve tez kapsamında üretilen bildiriyi içermektedir.

2.1 Giriş

YDT'ler; elektronik harp sistemleri, uydu haberleşmesi gibi birçok uygulama alanlarında yaygın bir şekilde son kuvvetlendirici olarak kullanılmaktadır [5, 11]. YDT'nin çalışma prensibini ve teorisini anlamak için birçok yöntem literatürde yer almaktadır [33, 34]. YDT'nin kazanç analizinin açıklanması ve teorisinin anlaşılması noktasında öncü çalışmaları Pierce ileri sürmüştür [33].

Bu bölümde helis tipindeki YDT'nin küçük işaret kazanç analizi ele alınmıştır [33–36]. Analiz prosedürü dört adımdan oluşmaktadır. İlk olarak, problemin basitleştirilmesi için genel kabuller dikkate alınmıştır. İkinci olarak, elektron konveksiyon akımından kaynaklanan eksenel elektrik alan türetilmiştir. Analiz işleminin diğer adımı devre dalgası ve uzay yükü etkisinin elektrik alanından

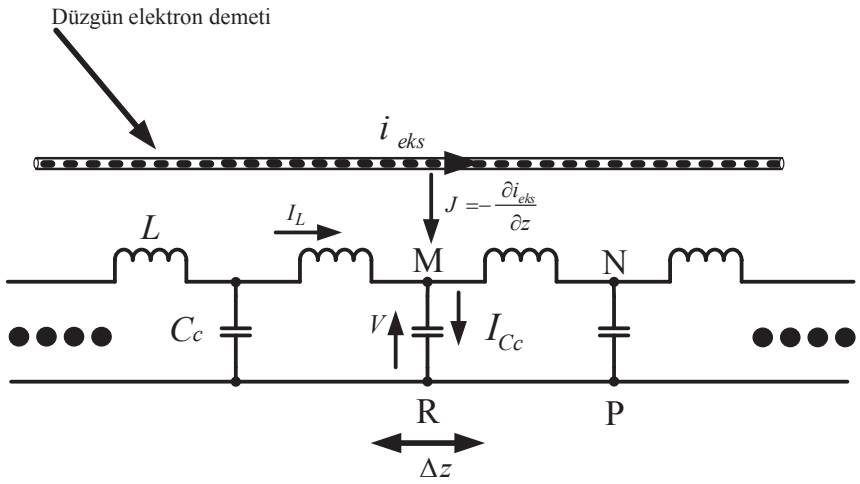
kaynaklanan, elektron demetindeki konveksiyon akımının belirlenmesidir. Son iki adımda elde edilen denklemlerin bir araya getirilmesi ile dispersiyon denklemi elde edilmiştir. Dispersiyon denklemi, kazanç değişimlerini incelemek için çözülmüştür. Dispersiyon denkleminin çözülmesinden sonra, YDT'ye ait tüm kazanç denklemleri belirlenmiştir. Bu kazanç denklemleri, uzay yükü parametresi (QC), kayıp parametresi (d) ve hız parametresi (b) gibi Pierce parametreleri ile ilişkilidir. Kazanç değişimlerinde tüm Pierce parametrelerinin etkilerinin anlaşılması ve maksimum kazancın elde edilmesi için bazı kritik çizimler gösterilmiştir. İlgilenilen frekans bölgesinde eniyilenmiş kazanç değişimine sahip olmak için, devre kaybı ve uzay yükü parametresinin kontrol edilmesinin gerekli olduğu açıkça söylenebilmektedir.

2.2 YDT'nin Pierce Küçük İşaret Teorisi

Pierce, YDT'nin çalışma mekanizmasının anlaşılması için matematiksel bir model önermiştir ve önerdiği model niceliksel bakış açılarına sahip yaklaşık bir modeldir [11, 33–35]. Genel olarak ileri sürülen model, devre ve demet parametreleri arasındaki matematiksel ilişkiyi elde etmek için devre ve elektronik denklemlerinin aynı anda çözümü ve bu çözümlerin bir araya getirilmesinden ileri gelmektedir. Pierce'ın önerdiği bu yöntemin uygulanmasında dalga tipi çözümlerin elde edilmesi için tüm büyüklüklerin zamanla ve konumla değişiminin $e^{j\omega t-\zeta z}$ ile değiştiği kabul edilmiştir ve verilen bu değişimde yer alan ζ bulunması gereken, elektron demetine sahip yürüyen dalgalı tüp için bilinmeyen yayılım sabitini göstermektedir. Birincil olarak, helis gibi herhangi bir yavaş dalgalı yapı üzerindeki işaretin oluşturduğu elektromagnetik alan ile elektron demeti arasındaki etkileşim işleminin anlaşılması için problemi basitleştirmeye yönelik temel bazı kabullerin yapılması gereklidir. Bu amaçla, aşağıda verilen önemli kabuller [11, 35, 36] dikkate alınmıştır.

- Elektron demet hızının ac bileşeni v'nin elektron demetinin ortalama hızı ($u_0 = \sqrt{2\eta V_0}$, V_0:dc demet gerilimi olmak üzere)'na göre ihmal edildiği küçük işaret koşulu kabul edilmiştir.

- Elektron demet hızının ışık hızına göre küçük olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 2.1 : Tipik bir YDT analizi için eşdeğer devre gösterimi [11].

- Elektron demetinin enine harekete sahip olmadığı anlamına gelen, elektron demetinin sadece eksenel yönde bileşeninin olduğu ya da güçlü bir magnetik odaklayıcı alanın uygulandığı varsayılmıştır.
- Elektron demet çapının çok küçük olduğu ya da içi boş silindirik biçimli elektron demetinin mevcut olduğu anlamına gelen, elektron akışı üzerinde aynı elektrik alanın bir etkiye sahip olduğu kabul edilmiştir.

2.2.1 Devre denklemi

Bölüm 2.2'nin ilk kısımlarında verilen kabuller ile oluşturulan temel YDT modeline ait eşdeğer devre [11] Şekil 2.1'de gösterilmektedir. YDT'nin yavaş dalgalı yapısı Şekil 2.1'de verildiği gibi düzgün dağılmış parametreli seri indüktanslar ve paralel kapasitanslardan oluşan bir iletim hattı [33] ile modellenebilmektedir. Basitlik açısından iletim hattının birim uzunluk başına seri direncin ve paralel kondüktansın sıfıra eşit olduğu kayıpsız bir iletim hattı modeli seçilmiştir. Süreklilik denklemi ve Gauss yasası yardımıyla yer değiştirme ve konveksiyon akımının toplamının sıfıra eşit olması gerektiği açıkça söylenebilmektedir. Elektron demetinin çok küçük bir çapta olduğu ve elektron konveksiyon akımının ac bileşeninin (i_{eks}) iletim hattına çok yakın aktığı kabul edilmektedir. Bu bağlamda, yer değiştirme akımı dikkate alınarak elektron demetinden iletim hatına demet boyunca yer değiştirme akımının ihmal edilebilir olduğu not edilmelidir [11, 33, 35]. Bu sebeple, yer değiştirme akımı J, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi konveksiyon akımının konumla değişimi olarak ifade edilebilmektedir. Şekil 2.1'de verilen M düğümünde ve $MNPR$ çevresinde sırasıyla

Kirchoff'un düğüm ve çevre analizinin uygulanması ile denklem 2.1'de verilen ifadeler elde edilmektedir [11].

$$\frac{\partial I_L}{\partial z} = -j\omega C_c V + J. \tag{2.1a}$$

$$\frac{\partial V}{\partial z} = -j\omega L I_L. \tag{2.1b}$$

$$J = -\frac{\partial i_{eks}}{\partial z}. \tag{2.1c}$$

Denklem 2.1'de verilen C_c, L ve I_L ifadeleri sırasıyla birim uzunluk başına paralel kapasitans ve seri indüktans ile seri indüktansın akımını göstermektedir. Devre ve demet parametreleri de dahil olmak üzere, tüm RF büyüklüklerinin zaman ve konumda $e^{j\omega t-\zeta z}$ ile değiştiği not edilmelidir. Denklem 2.1'de verilen ifadelerin fazörü [1] alınırsa denklem 2.2'deki ifadeler elde edilmektedir.

$$-\zeta I_L = -j\omega C_c V + \zeta i_{eks}. \tag{2.2a}$$

$$-\zeta V = -j\omega L I_L. \tag{2.2b}$$

$$J = \zeta i_{eks}. \tag{2.2c}$$

Denklem 2.2'deki I_L yok edildikten sonra, 2.3 no'lu denklem yazılabilmektedir.

$$V(\zeta^2 + \omega^2 L C_c) = -j\omega L \zeta i_{eks}. \tag{2.3}$$

2.3 no'lu denklemde i_{eks}'nin sıfır olduğu duruma karşı düşen elektron demetinin olmadığı durum varsayılırsa, YDT modeline ait eşdeğer devre kayıpsız bir iletim hattına dönüşmektedir. Bu durumda yürüyen dalgalı tüp yayılım sabiti, ζ, denklem 2.4'te de verildiği gibi elektron demetinin olmadığı durumdaki yavaş dalga devresinin yayılım sabiti, ζ_0, olarak yazılabilmektedir [1].

$$\zeta_0 = j\omega\sqrt{LC_c}. \tag{2.4}$$

Diğer taraftan, elektron demeti yokken kayıpsız iletim hattının karakteristik empedansı denklem 2.5'teki gibi yazılabilmektedir [1, 11, 33–37].

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C_c}}. \tag{2.5}$$

Denklemler 2.4 ve 2.5 kullanılarak denklem 2.6 elde edilebilmektedir [11].

$$\omega L = -j\zeta_0 Z_0. \tag{2.6a}$$

$$\omega C_c = -j\frac{\zeta_0}{Z_0}. \tag{2.6b}$$

2.6 no'lu denklem, 2.3 no'lu denklemde yerine konursa, oluşan gerilim V ve i_{eks}'den ileri gelen eksenel elektrik alan ifadeleri denklemler 2.7 ve 2.8'deki gibi yazılabilmektedir [11, 33, 36].

$$V = \frac{-\zeta\zeta_0 Z_0 i_{eks}}{(\zeta^2 - \zeta_0^2)}. \tag{2.7}$$

$$E_z = \frac{\zeta^2\zeta_0 Z_0}{(\zeta_0^2 - \zeta^2)} i_{eks}. \tag{2.8}$$

2.8 no'lu denklem ile ifade edilen sonuç, elektron konveksiyon akımının *ac* bileşeninden dolayı yavaş dalga devresinde gerilimin indüklendiğini göstermektedir. Elde edilmesi gereken bir diğer durum ise, elektrik alandan kaynaklanan konveksiyon akımının ortaya çıkarılmasıdır.

2.2.2 Elektronik denklemi

Bölüm 2.2'nin ilk bölümlerinde ifade edildiği gibi elektron demet hızı iki bileşen (ϑ ve u_0) içermektedir. Elektron demet hızının değişiminin denklem 2.9'da verildiği gibi elektron-yük kütle oranı ile gerilimin gradyantının çarpımına eşit olduğu açıkça ifade edilmektedir [33, 36]. Verilen ifadede elektron yükü *e* genlik değeri yerine *-e* olarak alınmıştır [11, 33, 36].

$$\frac{d(u_0 + \vartheta)}{dt} = \eta\frac{\partial V}{\partial z}. \tag{2.9}$$

2.9 no'lu denklemin sol tarafı adi diferansiyel denklemlerden oluşmaktadır. Ek olarak, ortalama demet hızı zamanla değişmemektedir ve elektron demet hızının *ac* bileşeni denklem 2.10'da görüldüğü gibi kısmi türevler cinsinden yazılabilmektedir [33, 36].

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{\partial\vartheta}{\partial t} + \frac{\partial\vartheta}{\partial z}(u_0 + \vartheta) = \eta\frac{\partial V}{\partial z}. \tag{2.10}$$

Lineer denklem elde etmek için denklem 2.10'da verilen *ac* büyüklüklerin çarpımının ihmal edilmesiyle, YDT'nin küçük işaret davranışı elde edilebilmektedir. Bu durumda 2.10 no'lu denklem fazör formda yazılırsa, 2.11 no'lu denklem elde edilmektedir ve 2.11 no'lu denklem düzenlenirse, elektron demet hızının *ac* bileşeni 2.12 no'lu denklem ile ifade edilebilmektedir.

$$(j\omega - u_0\zeta)\vartheta = -\eta\zeta V. \tag{2.11}$$

$$\vartheta = \frac{-\eta\zeta V}{u_0(j\beta_e - \zeta)}. \tag{2.12}$$

2.12 no'lu denklemde yer alan β_e denklem 2.13'te verildiği gibi, demet yayılım sabitini göstermektedir.

$$\beta_e = \frac{\omega}{u_0}. \tag{2.13}$$

Elektron demetindeki toplam konveksiyon akımı, toplam demet hızı ile *ac* ve *dc* bileşen içeren toplam yük yoğunluğunun çarpımına eşittir ve denklem 2.14'te gösterilmektedir [33, 36].

$$-I_0 + i_{eks} = (u_0 + \vartheta)(\rho_0 + \rho). \tag{2.14}$$

2.14 no'lu denklemde verilen ρ_0 ve ρ 2.15 ve 2.16 no'lu denklemlerde ifade edilmiştir.

$$\rho_0 = -\frac{I_0}{u_0}. \tag{2.15}$$

$$\rho = \frac{-j\zeta i_{eks}}{\omega}. \tag{2.16}$$

2.15 no'lu denklemde yer alan I_0 ve ρ_0 ile 2.16 no'lu denklemde yer alan ρ sırasıyla ortalama elektron konveksiyon akımı, birim uzunluk başına ortalama yük yoğunluğu ve *ac* lineer yük yoğunluğunu ifade etmektedir. Küçük işaret kabulü ve denklem 2.16'da gösterildiği gibi ζ ve i_{eks} cinsinden *ac* lineer yük yoğunluğunu elde etmek için yükün korunumu denkleminin uygulanmasıyla, eksenel elektrik alan tarafından üretilen konveksiyon akımı, denklem 2.17'deki gibi elde edilebilmektedir [33, 36].

$$i_{eks} = \frac{j\beta_e I_0}{2V_0(j\beta_e - \zeta)^2} E_z. \tag{2.17}$$

2.2.3 Genel denklem

Denklem 2.8 ve denklem 2.17'nin birleştirilmesiyle, YDT'nin davranışını modelleyen genel denklem, 2.18 no'lu denklem ile ifade edilebilmektedir [11,35]. Kuvvetlendirme işleminin dört dalga tipi çözüm ile açıklanabildiğini ifade eden 2.18 no'lu dördüncü dereceden denklemin 2.4 no'lu denklem ile ifade edilen herhangi bir dalga hızı ve zayıflama ve 2.13 no'lu denklem ile ifade edilen herhangi bir elektron hızı durumu için zorlanabileceği açıkça söylenmektedir.

$$\frac{j\beta_e I_0 Z_0 \zeta^2 \zeta_0}{2V_0(\zeta_0^2 - \zeta^2)(j\beta_e - \zeta)^2} = 1. \tag{2.18}$$

Pierce, uzay yükü etkisi olarak adlandırılan [33] Q parametresinin elektron demeti ile iletim hattı devresi arasında bir kuplaj kapasitörü olarak modellenebileceğini vurgulamıştır ve Q parametresi denklem 2.19'teki gibi verilmektedir.

$$Q = \frac{\beta_e}{\omega C_1 (E_z^2/\beta_y^2 P)}. \tag{2.19}$$

2.19 no'lu denklemde yer alan C_1, β_y ve P ifadeleri sırasıyla demet ile devre arasındaki kapasitansı (birim uzunluk başına kapasitans), yavaş dalga devresinin eksenel yayılım faz sabitini, ve yavaş dalga devresi boyunca güç akışını göstermektedir.

Uzay yükü etkilerinin dikkate alınması durumunda 2.17 no'lu denklemde belirtilen elektrik alan $E_z = E_{za} + E_{zuy}$ olarak yazılabilmektedir [1, 11] ve E_{za} ile E_{zuy} ifadeleri sırasıyla uzay yükü etkileri yokken ve uzay yükü etkisinden kaynaklanan elektrik alanları göstermektedir. E_{zuy} ifadesi denklem 2.20'da verilmektedir.

$$E_{zuy} = -\frac{j\zeta^2}{\omega C_1} i_{eks}. \tag{2.20}$$

2.20 no'lu denklemde yer alan C_1 birim uzunluk başına kapasitörü göstermektedir. Genel denklem için 2.20 no'lu denklem, 2.17 no'lu denklemde dikkate alınırsa, 2.21 no'lu denklem yazılabilmektedir [11, 33, 36].

$$\frac{j\beta_e I_0 \zeta}{2V_0(j\beta_e - \zeta)^2}\left[\frac{\zeta\zeta_0 Z_0}{2(\zeta_0^2 - \zeta^2)} - \frac{j\zeta}{\omega C_1}\right] = 1. \tag{2.21}$$

Pierce küçük işaret kazanç parametresi (C), Pierce hız parametresi (b), Pierce zayıflama parametresi (d) gibi bazı kritik normalizasyon parametreleri YDT'nin kazanç hesabı için tanımlanabilmektedir [5, 11, 33, 36]. C, b ve d parametreleri 2.22-2.24'te tanımlanmaktadır.

$$C = \left(\frac{Z_0}{4V_0/I_0}\right)^{1/3} \approx \left(\frac{E_z^2}{2\beta_y^2 P}\right)^{1/3} \times \left(\frac{I_0}{4V_0}\right)^{1/3}. \tag{2.22}$$

$$b = \frac{(u_0 - \vartheta_f)}{C\vartheta_f}. \tag{2.23}$$

$$d = \frac{\alpha}{\beta_e C}. \tag{2.24}$$

2.22-2.24 ifadelerinde yer alan $\frac{4V_0}{I_0}, \vartheta_f$ ve α parametreleri sırasıyla demet empedansı, yavaş dalga devresinin faz hızı ve yavaş dalga devresinin zayıflama parametresini göstermektedir. 2.22 no'lu ifadede yer alan C, yavaş dalga devresindeki güç akışı cinsinden de yazılabilmektedir. Pierce kazanç parametresi C, genellikle $0.01 - 0.1$

aralığında olmaktadır [11]. 2.23 ve 2.24 no'lu ifadelerde de gösterildiği üzere, b, demet ile dalga arasındaki senkronizasyonun ölçüsünü ve d ise, devre kaybının oranını ifade etmektedir. Buna bağlı olarak, mümkün tüm yayılım sabitleri 2.22-2.24 no'lu ifadeler kullanılarak 2.25 ve 2.26 no'lu ifadeler gibi yazılabilmektedir.

$$\zeta = j\beta_e - \beta_e C\delta. \tag{2.25}$$

$$\zeta_0 = j\beta_e + j\beta_e Cb + \beta_e Cd. \tag{2.26}$$

2.25'deki ifadenin sağ tarafındaki ikinci terim, elektron demeti mevcut iken, yayılım sabitinde çok az bir değişimin meydana geldiğini ifade etmektedir [35, 36]. 2.25 no'lu denklemde yer alan δ ifadesi, kompleks bir sayı olup denklem 2.27'de verilmektedir.

$$\delta = x + jy. \tag{2.27}$$

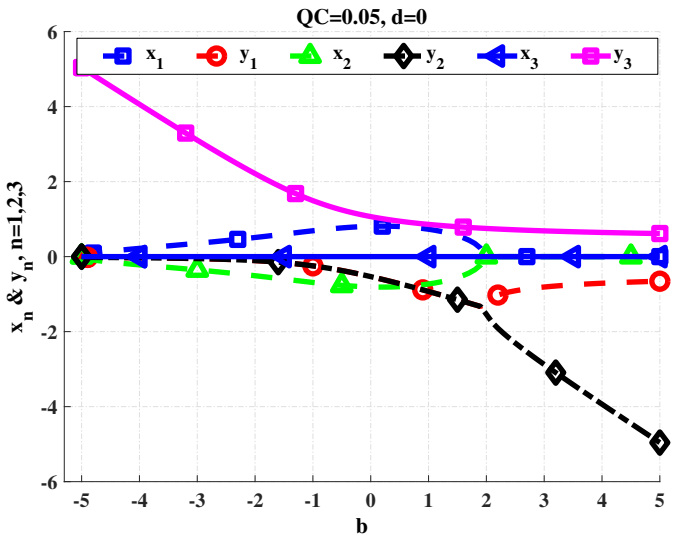
2.26'da verilen ifadenin sağ tarafında yer alan ikinci ve üçüncü terimler senkron olmayan durumdan kaynaklanan demet hızı ile dalga hızı arasındaki farklılıklarının ve devre kaybının oluşabileceğini ifade etmektedir.

2.19, 2.22, 2.23, 2.24 no'lu ifadelerde verilen tanımlamalar ve 2.25, 2.26'da verilen ifadeler 2.21'de yerine konursa ve bazı cebirsel işlemler sonucunda 2.28 no'lu denklem yazılabilmektedir [36].

$$\delta^2 + 4QC(1+jC\delta)^2 = \frac{(1+jC\delta)^2(1+C(b-jd))}{\left(-b+jd+j\delta+C\left(jbd-\frac{b^2}{2}+\frac{d^2}{2}-\frac{\delta^2}{2}\right)\right)}. \tag{2.28}$$

2.28 no'lu denklem $C << 1$ ve QC parametresinin sonlu olması kabulleri dikkate alınarak, QC'li terimler hariç C'li terimlerin ihmal edilmesiyle basitleştirilebilmektedir. QC parametresi YDT denkleminin uzay yükü parametresini göstermektedir. Bu kabullerin 2.28 no'lu denkleme uygulanmasıyla 2.29 no'lu kübik formda bir denklem elde edilmektedir [1, 11, 33, 37]. 2.29 no'lu denklem, 2.25 no'lu denklemde belirtilen yürüyen dalgalı tüp yayılım sabitlerinin elde edilmesini sağlamak için üç adet kompleks kök barındırmaktadır. 2.29 no'lu denklemin kökleri Pierce parametreleri QC, b ve d'ye bağlı olarak elde edilebilmektedir.

$$\delta^2 + 4QC = \frac{1}{(-b+jd+j\delta)}. \tag{2.29}$$



Şekil 2.2 : $d = 0$, $QC = 0.05$ için tüp yayılım sabitlerinin kök değişimleri.

2.29 no'lu denklemden elde edilen bu köklerin ne anlama geldiğini öğrenmek için 2.25 no'lu denklem $e^{-\zeta z}$ ifadesinde denklem 2.30'da verildiği gibi yerine konmaktadır.

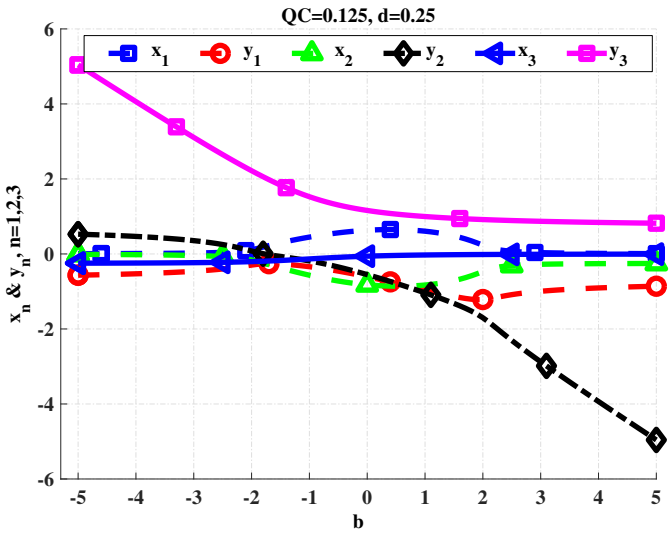
$$e^{-\zeta z} = e^{\beta_e C x_n z} e^{-j[\beta_e(1-Cy_n)z]}, \quad n = 1,2,3. \tag{2.30}$$

2.30 no'lu denklemin ilk eksponansiyel kısmı mevcut olabilen üç dalgaya ait genlik değişimi hakkında bilgi vermektedir. 2.30 no'lu denklemin ikinci eksponansiyel kısmı üç dalga tipi çözümün hız değişimini göstermektedir. Bu bağlamda, 2.29 no'lu denklem analitik olarak çözülmektedir ve 2.29 no'lu denklemin köklerinin sabit Pierce uzay yükü parametresi QC ve devre kayıp parametresi d ile farklı Pierce hız parametresi b değerlerine göre değişimleri Şekiller 2.2-2.7'de gösterildiği gibi mümkün olabilen tüm dalgaların davranışını modellemek için çizdirilmiştir.

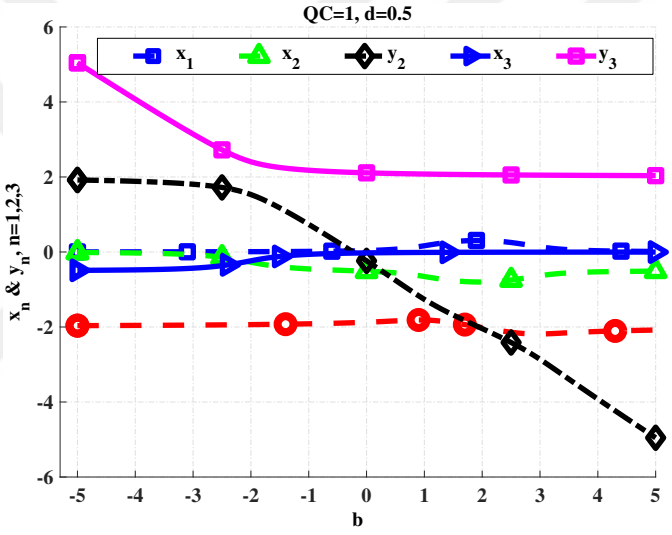
Şekiller 2.2-2.7'de gösterildiği gibi, x_1'in farklı b değerlerinde sadece pozitif değerlere sahip olduğu açıkça ifade edilmektedir. Ek olarak, y_1 farklı b değerlerinde negatif değerlere sahiptir. 2.30 no'lu denklem dikkate alındığında, ileri dalgaların hızlarına ilişkin 2.31 no'lu denklem ortaya çıkmaktadır. 2.31 no'lu denklem, $y_n = y_1$ durumunda 2.30 no'lu denklemin elektron demet hızına göre daha yavaş faz hızına sahip artan bir dalga gibi davrandığını göstermektedir.

$$\vartheta_p = \frac{u_0}{(1-Cy_n)}. \tag{2.31}$$

Şekiller 2.2-2.4 kullanılarak ve 2.30 ve 2.31 no'lu denklemler dikkate alındığında, ikinci kök δ_2'nin ve üçüncü kök δ_3'ün sırasıyla elektronların hızından daha yavaş hıza sahip azalan ve elektronların hızından daha hızlı hıza sahip zayıflamayan dalga olarak



Şekil 2.3 : $d = 0.25$, $QC = 0.125$ için tüp yayılım sabitlerinin kök değişimleri.

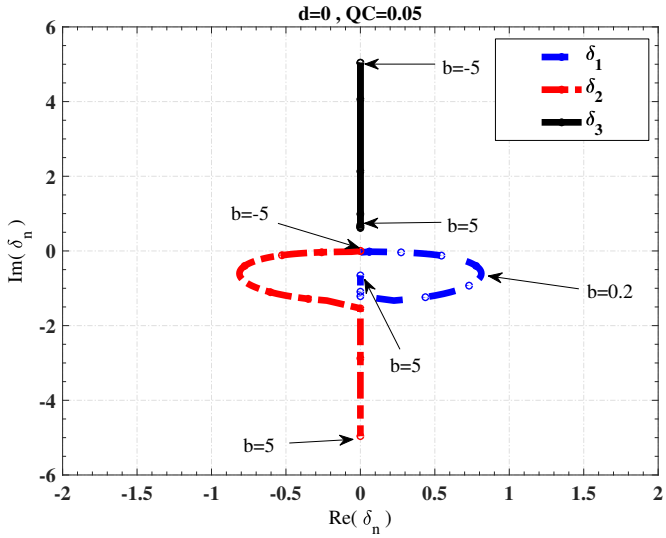


Şekil 2.4 : $d = 0.5$, $QC = 1$ için tüp yayılım sabitlerinin kök değişimleri.

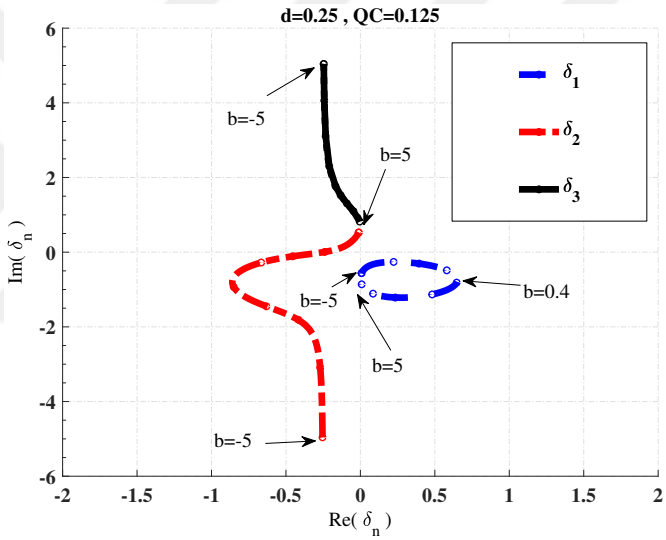
tanımlanabilmektdir. Elde edilen bu dalgaların, elektromagnetik dalga ile elektron demetinin aynı yönde olduğunu ifade eden ileri dalgalar olduğu belirtilmelidir [36]. Buna ek olarak, kompleks δ düzleminde köklerin davranışları Şekiller 2.5-2.7'de görülebilmektedir [38]. Şekiller 2.5-2.7'den artan dalganın kompleks δ düzleminde dördüncü dörtlükte yer aldığı belirtilmelidir.

2.2.4 YDT'nin gerilim kazacının hesaplanması

YDT'ye ilişkin devre gerilimi üç ileri dalganın toplamından oluşmaktadır. Giriş ve çıkış gerilimleri arasındaki ilişkiyi bulmak için 2.30 nolu denklem kullanılarak 2.32



Şekil 2.5 : Kompleks δ düzleminde $d = 0.5$, $QC = 1$ için tüp yayılım sabitlerinin kök değişimleri.



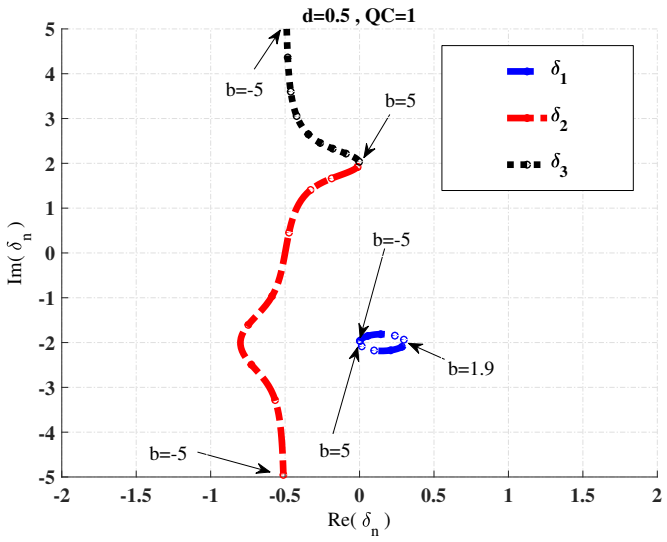
Şekil 2.6 : Kompleks δ düzleminde $d = 0.25$, $QC = 0.125$ için tüp yayılım sabitlerinin kök değişimleri.

no'lu denklem yazılabilmektedir [5, 36].

$$\begin{aligned} V(z) &= V_1(z=0)e^{\beta_e C x_1 z}e^{-j[\beta_e(1-Cy_1)z]} + V_2(z=0)e^{\beta_e C x_2 z}e^{-j[\beta_e(1-Cy_2)z]} \\ &\quad + V_3(z=0)e^{\beta_e C x_3 z}e^{-j[\beta_e(1-Cy_3)z]}. \end{aligned} \tag{2.32}$$

Etkileşim bölgesinin giriş ve çıkışında sınır koşullarının uygulanması ile giriş ve çıkış devre gerilimleri V_{gir}, $V_{çık}$ sırasıyla 2.33 ve 2.34 no'lu denklemlerdeki gibi yazılabilmektedir [5, 36].

$$V_{gir} = V(z=0) = V_1(z=0) + V_2(z=0) + V_3(z=0). \tag{2.33}$$



Şekil 2.7 : Kompleks δ düzleminde $d = 0.5$, $QC = 1$ için tüp yayılım sabitlerinin kök değişimleri.

$$\begin{aligned} V_{çık} = V(z = L_u) \quad &= \quad V_1(z=0)e^{\beta_e Cx_1 L_u} e^{-j[\beta_e(1-Cy_1)L_u]} \\ &\quad + V_2(z=0)e^{\beta_e Cx_2 L_u} e^{-j[\beta_e(1-Cy_2)L_u]} \\ &\quad + V_3(z=0)e^{\beta_e Cx_3 L_u} e^{-j[\beta_e(1-Cy_3)L_u]}. \end{aligned} \tag{2.34}$$

2.34 no'lu denklemde yer alan L_u, dalgaboyu cinsinden ifade edilebilen, tüpteki etkileşim uzunluğunu göstermektir ve 2.35 no'lu denklemde verilmektedir.

$$L_u = \frac{2\pi N}{\beta_e}. \tag{2.35}$$

Bazı matematiksel işlemlerden sonra, 2.32 no'lu denklemin genlik bileşenlerinin her biri denklemler 2.36-2.38'deki gibi yazılabilmektedir [5, 39].

$$V_1(z=0) = \left(1 + \frac{4QC}{\delta_1^2}\right)\left(\frac{1}{\left(1-\frac{\delta_2}{\delta_1}\right)\left(1-\frac{\delta_3}{\delta_1}\right)}\right)V_{gir}. \tag{2.36}$$

$$V_2(z=0) = \left(1 + \frac{4QC}{\delta_2^2}\right)\left(\frac{1}{\left(1-\frac{\delta_3}{\delta_2}\right)\left(1-\frac{\delta_1}{\delta_2}\right)}\right)V_{gir}. \tag{2.37}$$

$$V_3(z=0) = \left(1 + \frac{4QC}{\delta_3^2}\right)\left(\frac{1}{\left(1-\frac{\delta_1}{\delta_3}\right)\left(1-\frac{\delta_2}{\delta_3}\right)}\right)V_{gir}. \tag{2.38}$$

Denklemler 2.36, 2.37 ve 2.38, 2.34 no'lu denklemde yerine konursa, $V_{çık}$ ve V_{gir} arasındaki ilişki 2.39 no'lu denklemdeki gibi elde edilebilmektedir [5, 36].

$$\begin{aligned} G_{toplam} &= 20log_{10} \mid \frac{V_{çık}}{V_{gir}} \mid = \\ & 20log_{10}\Bigg[\left(1+\frac{4QC}{\delta_1^2}\right)\left(\frac{1}{\left(1-\frac{\delta_2}{\delta_1}\right)\left(1-\frac{\delta_3}{\delta_1}\right)}\right)e^{\beta_e C x_1 L_u} e^{-j[\beta_e(1-Cy_1)L_u]} \\ & +\left(1+\frac{4QC}{\delta_2^2}\right)\left(\frac{1}{\left(1-\frac{\delta_3}{\delta_2}\right)\left(1-\frac{\delta_1}{\delta_2}\right)}\right)e^{\beta_e C x_2 L_u} e^{-j[\beta_e(1-Cy_2)L_u]} \\ & +\left(1+\frac{4QC}{\delta_3^2}\right)\left(\frac{1}{\left(1-\frac{\delta_1}{\delta_3}\right)\left(1-\frac{\delta_2}{\delta_3}\right)}\right)e^{\beta_e C x_3 L_u} e^{-j[\beta_e(1-Cy_3)L_u]}\Bigg]. \end{aligned} \tag{2.39}$$

Yeterince uzun bir etkileşim bölgesine sahip bir YDT'de azalan ve zayıflamayan dalgaların gerilim kazancına katkıları, artan dalganın baskın hale gelmesinden dolayı ihmal edilebilmektedir [11]. Bu bağlamda toplam gerilim kazancı 2.40 no'lu denklemdeki gibi yazılabilmektedir [5, 33, 39].

$$G_{artan} = 20log_{10} \mid \left(1+\frac{4QC}{\delta_1^2}\right)\left(\frac{1}{\left(1-\frac{\delta_2}{\delta_1}\right)\left(1-\frac{\delta_3}{\delta_1}\right)}\right) \mid +(40\pi log_{10}e)x_1 CN. \tag{2.40}$$

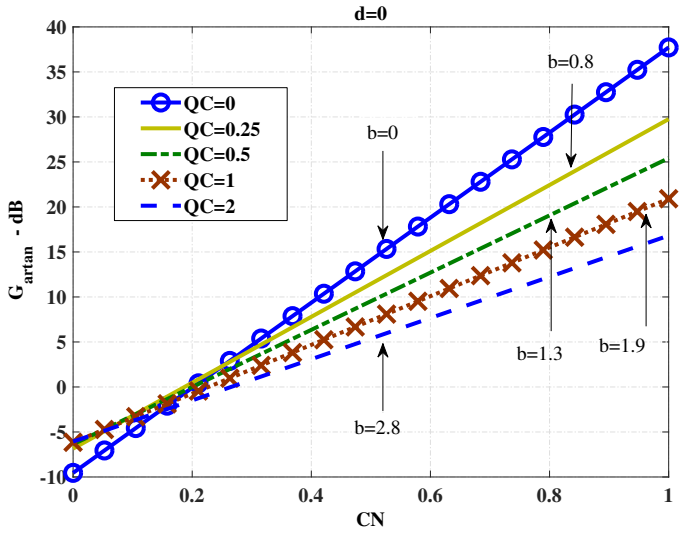
2.40 no'lu denklem daha basit bir formda yazılmak istenirse 2.41 no'lu denklem elde edilmektedir.

$$G_{artan} = H + RCN. \tag{2.41}$$

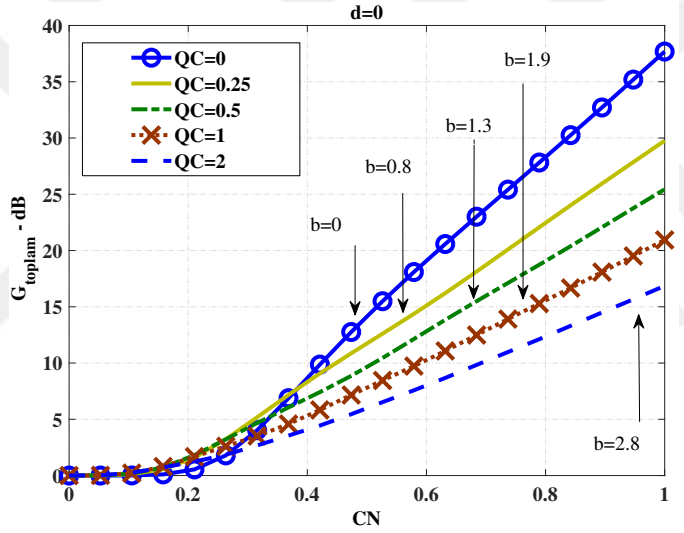
2.41 no'lu denklemde yer alan H ve R parametreleri sırasıyla devre ve uzay yükünden ileri gelen kayıp ve artan dalga parametrelerini göstermektedir. Bu sayede, tipik bir YDT'ye ilişkin küçük işaret kazancı denklemleri denklem 2.39'da verilen toplam gerilim kazancı ve denklem 2.40'da verilen artan dalga gerilim kazancı olarak türetilmiştir.

Farklı Pierce parametreleri için maksimum kazancın elde edilmesi YDT'nin davranışının anlaşılması açısından önemli bir durumdur. Bu sebeple, kazanç parametresi ve tüp uzunluğunu içeren farklı CN değerleri için denklemlerin hesaplanmasında artan dalganın maksimum olduğu noktalar seçilmiştir. Maksimum artan dalga noktasına denk düşen b değeri ve farklı d, QC değerleri için 2.39 ve 2.40 no'lu denklemlerde verilen kazanç denklemlerinin değişimleri Şekiller 2.8-2.11'de verilmektedir.

Farklı d değerleri için uzay yükü parametresi QC'nin artması durumunda tüm maksimum kazanç değişimlerinin azaldığı Şekiller 2.8-2.11'den açıkça görülmektedir.

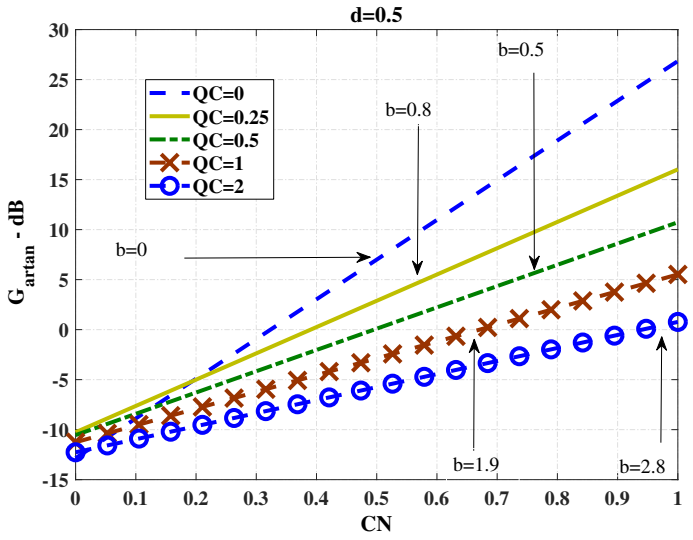


Şekil 2.8 : $d = 0$ ve farklı QC değerleri için CN parametresine göre YDT'nin artan dalgasına ait maksimum kazanç değişimi.

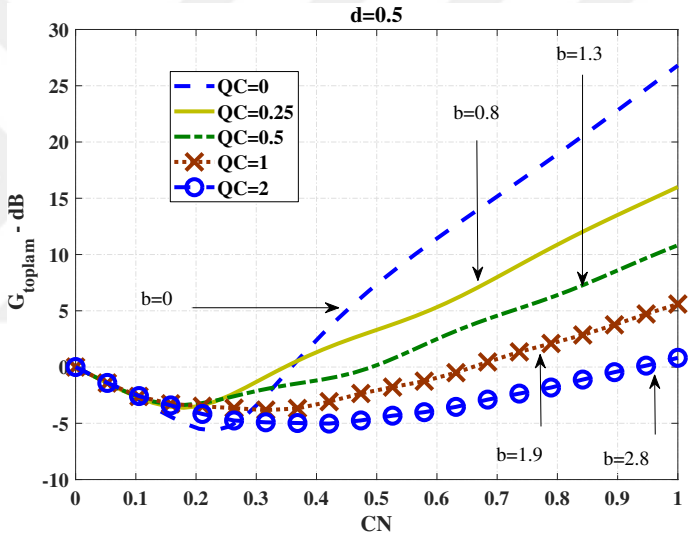


Şekil 2.9 : $d = 0$ ve farklı QC değerleri için CN parametresine göre YDT'nin toplam dalgasına ait maksimum kazanç değişimi.

Buna ek olarak, farklı QC değerleri için kayıp parametresi d'nin artması tüm maksimum kazanç değişimlerini azaltmıştır. Şekil 2.11'de görüldüğü gibi sabit QC değeri için d'nin artış göstermesi artan ileri dalganın, artan dalga baskın hale gelmeden önce maksimum kazancın sıfırın altında olduğu anlamına gelen en az $CN = 0.38$ değerinden sonra baskın hale gelmeye başladığı ifade edilebilmektedir. Şekiller 2.8-2.11'den görüldüğü üzere QC'nin büyük değerleri için tüm maksimum kazanç değişimlerinin sıfıra yaklaştığı gözlenmektedir. Bundan başka, QC'nin



Şekil 2.10 : $d = 0.5$ ve farklı QC değerleri için CN parametresine göre YDT'nin artan dalgasına ait maksimum kazanç değişimi.



Şekil 2.11 : $d = 0.5$ ve farklı QC değerleri için CN parametresine göre YDT'nin toplam dalgasına ait maksimum kazanç değişimi.

artması ile elektron hız parametresi b'nin değeri maksimum kazanç noktası için artış göstermektedir.

2.3 Sonuç

Arzu edilen frekans bölgesinde maksimum kazancın kontrol edilmesi YDT tasarımında önemli tasarım hedeflerinden biridir. Bu bölümde Pierce parametreleri yardımıyla tek helisli yavaş dalgalı yapıya sahip bir YDT cihazındaki maksimum kazanç değişimlerinin araştırılması yapılmıştır. Bu bağlamda, tek helisli bir YDT'deki kazanç değişimleri, YDT'nin kazanç karakteristikleri üzerinde farklı QC, b ve d

parametrelerinin etkilerini görmek için çıkarılmıştır. Kazanç parametresi *C*, elektron ve devre hızı arasındaki senkronizasyon parametresi *b*, devre kaybı parametresi *d* ve uzay yükü parametresi *QC*'nin tasarımcılar için, YDT'nin kazancının kontrol edilmesinde önemli bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır.

3. PERİYODİK YAPILARIN DURDURMA BANDI KARAKTERİSTİKLERİNİN BULUNMASI İÇİN KAPSAMLI BİR YARDIMCI FONKSİYONLU GENELLEŞTİRİLMİŞ SAÇILMA MATRİSİ YÖNTEMİ

Bu bölümde, periyodik yapıların durdurma bandı karakteristiklerinin bulunmasına yönelik Genelleştirilmiş Saçılma Matrisi tabanlı yardımcı fonksiyonlardan oluşan, doktora tez çalışması kapsamında türetilen ve literatüre [41] ile önerilen yeni sonuçlar bulunmaktadır. Birçok mühendislik uygulamalarında karşılaşılan periyodik yapıların durdurma bandı analizleri için kapsamlı bir Yardımcı Fonksiyonlu Genelleştirilmiş Saçılma Matrisi (YFGSM) yöntemi sunulmaktadır. Amaçlanan yöntem simetrik ve asimetrik birim hücreli periyodik yapıların durdurma band bölgelerini doğru bir şekilde belirlemektedir. Amaçlanan yöntemin yapılabilirliğini test etmek için sayısal sonuçlar, özdeğer yöntemi ve HFSS/CST frekans domeni benzetimleri ile karşılaştırılmıştır. Sunulan yöntemin geçerliliği ve uygulanabilirliği periyodik dielektrik yüklü dikdörtgen dalga kılavuzlarında, fotonik kristaller (FK)'de ve YDT'lerdeki helisli YDY'lerin durdurma band karakteristiklerinin analiz edilmesi ile gösterilmiştir ve benzetim sonuçları ile mükemmel uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Amaçlanan YFGSM yöntemi kullanılarak farklı periyodik yapı problemlerinde durdurma bandı analizi ve tasarımı etkin bir şekilde yapılabilmektedir.

3.1 Giriş

YDT'lerde kullanılan tek helisli YDY modelleri, fotonik kristaller, periyodik dielektrik yüklü dikdörtgen dalga kılavuzları ve diğer elektromagnetik durdurma band yapıları gibi birçok mühendislik uygulamaları elektromagnetik özelliklerinden dolayı periyodik yapılardan (PY'ler) oluşmaktadır. Bu yapılar YDY'de meydana geldiği gibi elektromagnetik dalgaların hızının yavaşlatılmasında ya da arzu edilen frekans bandlarında durdurma band bölgelerinin elde edilmesinde kullanılmaktadır. [11, 42–44]. Buna ek olarak, bu yapılar süzgeç [45], ayırıcı ve bükücü [46] olarak ta kullanılabilmektedir.

PY'ler birim hücre (BH)'lerin ardışık tekrarlarından oluşmaktadır. Periyodiklikten dolayı, durdurma band karakteristikleri ve ilgili PY üzerindeki gerekli tüm bilgiler BH analizinden çıkarılabilmektedir. Bu sebeple, BH analizinde ortaya konan yöntemler mevcut literatürde önemli bir yere sahiptir. Bu bağlamda, Zaman Domeninde Sonlu Farklar Yöntemi (ZDSFY), Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ve Momentler Yöntemi (MY) gibi birçok sayısal çözüm yöntemleri PY'lerin durdurma bandlarının bulunmasında kullanılmaktadır. Bu yöntemler tam dalga elektromagnetik yöntemlerdir ve oldukça yüksek hesaplama süresi gerektirmektedir. Diğer yandan, Floquet periyodik sınır koşulu ile birlikte BH yaklaşımının kullanılmasıyla, PY problemi [47–50] no'lu referanslarda belirtilen yarı analitik bir yöntem olarak özdeğer denkleminin çözümüne indirgenmektedir. Özdeğer denkleminin çözümünü gerektiren, BH analizine dayanan geleneksel yöntemler özdeğer (ÖZD) yöntemleri olarak isimlendirilmektedir. ÖZD yönteminin sık frekans bölmelendirmesi yapılarak kullanılması durumunda PY'lerin elektromagnetik ya da fotonik durdurma bandı karakteristikleri ve dispersiyon diyagramı elde edilebilmektedir. Bununla beraber, tasarım uzayında çok değişkenli eniyileme ve sık frekans tarama gerekliliğinden dolayı PY'lerin arzu edilen frekans karakteristiklerinin elde edilmesinde BH'nin tasarımı için özdeğer denkleminin çözümü uygun değildir. Her ne kadar yarı analitik özdeğer yöntemleri saf sayısal tam dalga elektromagnetik yöntemlerden hızlı olsa da, özdeğer yöntemleri pratik tasarım uygulamaları düşünüldüğünde yüksek hesaplama süresine ihtiyaç duymaktadır. Bu sebeple, PY'lerin analizi ve tasarımı için hızlı ve verimli yöntemlerin geliştirilmesi zorunlu hale gelmektedir.

Yardımcı Fonksiyonlu Genelleştirilmiş Saçılma Matrisi (YFGSM)-(Auxiliary functions of generalized scattering matrix (AFGSM)) yöntemi olarak isimlendirilen alternatif bir teknik özdeğer denklemi çözmeksizin PY'lerin durdurma bandı karakteristiklerinin analizi için [51–53]'te önerilmiştir. [51–53]'te verilen yöntem, sadece simetrik BH'lere sahip PY'lerin analizi ve tasarımı ile sınırlı olmaktadır. Bununla beraber, asimetrik BH'li PY'ler birçok uygulamada yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu bölümde bu sınırlamayı ortadan kaldırmak için YFGSM yöntemi yeniden geliştirilmiş ve hem simetrik hem de asimetrik BH'li PY'lerin durdurma bandı karakteristiklerinin belirlenmesi için kapsamlı bir YFGSM yöntemi önerilmiştir. Kapsamlı YFGSM yöntemi, PY'nin BH'sinde depo edilen kompleks

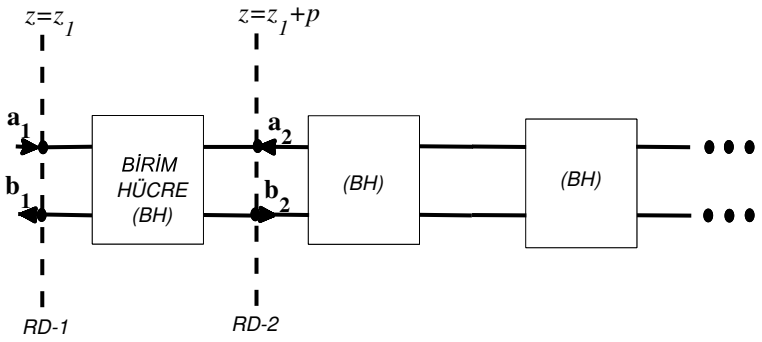
güce dayanmaktadır. Edinilen tecrübelere dayanarak, simetrik BH'lerin durdurma bandı analiz ve tasarımı ile sınırlanmayan bu önerilen yaklaşımın özgünlük içerdiği ve mevcut literatürde bu zamana kadar türetilmediği tespit edilmiştir. Sunulan bu yöntem, PY'lerin BH'sinin GSM'sini kullanarak PY'nin band ucu frekanslarını bulan yardımcı fonksiyonları (J_{+1} ve J_{-1}) amaçlamaktadır. Amaçlanan kapsamlı YFGSM yönteminin geçerliliği ve uygulanabilirliği, YDT'lerin tek helisli YDY'leri, FK'ler ve periyodik dielektrik yüklü dikdörtgen dalga kılavuzları gibi kayıpsız PY'lerin durdurma bandı karakteristiklerinin analizinde araştırılmıştır. Ayrıca, ele alınan problemler elde edilen sonuçların doğrulanması için Ansys HFSS ve CST tam dalga elektromagnetik benzetim ortamlarında modellenmiş ve benzetimleri yapılmıştır. Amaçlanan özgün yardımcı fonksiyonlar (J_{+1} ve J_{-1}), PY'lerin durdurma bandı karakteristiklerini kolay ve hızlı bir şekilde bulabilmektedir ve farklı tipteki PY'lerin durdurma bandı davranışının tahmininde kullanılabilmektedir.

3.2 Teori

Herhangi bir periyodik yapının birim hücresi kapalı bir blok ile karakterize edilebilmektedir ve Şekil 3.1'de verilen GSM gösterimleri ile modellenebilmektedir. Birim hücrenin GSM ifadesi denklem 3.1'de verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{b_1} \\ \boldsymbol{b_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{S_{11}} & \boldsymbol{S_{12}} \\ \boldsymbol{S_{21}} & \boldsymbol{S_{22}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{a_1} \\ \boldsymbol{a_2} \end{bmatrix}. \tag{3.1}$$

Denklem 3.1'de yer alan $\boldsymbol{a}$ ve $\boldsymbol{b}$ Şekil 3.1'de gösterildiği gibi sırasıyla referans düzlemlerinden gelen ve yansıyan dalgaların kompleks genlikleridir. Referans düzlemleri $z = z_1$ $(RD-1)$ ve $z = z_1 + p$ $(RD-2)$, saçılma matrisi $(\boldsymbol{S_{11}}, \boldsymbol{S_{12}}, \boldsymbol{S_{21}}, \boldsymbol{S_{22}})$'nin elemanlarının tanımında kullanılan giriş ve çıkış kapıları olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.1 : Bir periyodik yapının GSM gösterimi.

Birim hücre z yönünde periyodik olup periyodu p ile gösterilmiştir. Birim hücrenin periyodikliğinden dolayı, Floquet periyodik sınır koşulu denklem 3.2'de verildiği gibi uygulanabilmektedir.

$$\boldsymbol{b_2} = \lambda \boldsymbol{a_1}, \boldsymbol{a_2} = \lambda \boldsymbol{b_1}. \tag{3.2}$$

3.1 ve 3.2 nolu denklemler kullanılarak, kayıpsız ve resiprok bir periyodik yapının birim hücresi için klasik özdeğer denklemi 3.3'teki gibi elde edilebilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{I} & -\boldsymbol{S_{11}} \\ \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{S_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{b_1} \\ \boldsymbol{a_1} \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} -\boldsymbol{S_{12}} & \boldsymbol{0} \\ -\boldsymbol{S_{22}} & \boldsymbol{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{b_1} \\ \boldsymbol{a_1} \end{bmatrix} = 0. \tag{3.3}$$

Denklem 3.3'te yer alan $\boldsymbol{I}$ ifadesi birim matrisi göstermektedir. Tek Floquet modlu yayılım için özdeğer ifadesi denklem 3.4'teki gibi tanımlanmaktadır.

$$\lambda_{1,2} = e^{\pm j\theta}, \theta = \beta p \in (0, \pi). \tag{3.4}$$

Denklem 3.4'te yer alan β BH'nin Floquet faz faktörünü göstermektedir.

Periyodik yapıya ait dispersiyon diyagramı ve iletim/durdurma bandları denklem 3.3 çözülerek belirlenebilmektedir. Alternatif bir yöntem olarak, BH'de depo edilen kompleks gücün ($\boldsymbol{\Psi}$) sıfır geçişlerinin bulunması da iletim/durdurma band uçlarının tam olarak bulunmasında kullanılabilmektedir. Depo edilen kompleks gücün ($\boldsymbol{\Psi}$) ifadesi denklem 3.5'teki gibi yazılabilmektedir [51]. Denklem 3.5'te yer alan t ve $*$ ifadeleri sırasıyla üstünde bulunan ifadenin transpozunu ve kompleks eşleniğini göstermektedir.

$$\boldsymbol{\Psi} = \boldsymbol{a}^t \boldsymbol{Q} \boldsymbol{a}^* = \begin{bmatrix} \boldsymbol{a_1} \\ \boldsymbol{a_2} \end{bmatrix}^t \begin{bmatrix} \boldsymbol{Q_{11}} & \boldsymbol{Q_{12}} \\ \boldsymbol{Q_{21}} & \boldsymbol{Q_{22}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{a_1} \\ \boldsymbol{a_2} \end{bmatrix}^*. \tag{3.5}$$

Denklem 3.5'te yer alan $\boldsymbol{Q_{11}}$, $\boldsymbol{Q_{12}}$, $\boldsymbol{Q_{21}}$ ve $\boldsymbol{Q_{22}}$ ifadeleri denklem 3.6'da verilmektedir.

$$\boldsymbol{Q_{11}} = (\boldsymbol{I} + \boldsymbol{S_{11}})\boldsymbol{U}(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{S_{11}^*}) - \boldsymbol{S_{12}}\boldsymbol{U}\boldsymbol{S_{12}^*}. \tag{3.6a}$$

$$\boldsymbol{Q_{12}} = \boldsymbol{S_{12}}\boldsymbol{U}(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{S_{22}^*}) - (\boldsymbol{I} + \boldsymbol{S_{11}})\boldsymbol{U}\boldsymbol{S_{12}^*}. \tag{3.6b}$$

$$\boldsymbol{Q_{21}} = \boldsymbol{S_{12}}\boldsymbol{U}(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{S_{11}^*}) - (\boldsymbol{I} + \boldsymbol{S_{22}})\boldsymbol{U}\boldsymbol{S_{12}^*}. \tag{3.6c}$$

$$\boldsymbol{Q_{22}} = (\boldsymbol{I} + \boldsymbol{S_{22}})\boldsymbol{U}(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{S_{22}^*}) - \boldsymbol{S_{12}}\boldsymbol{U}\boldsymbol{S_{12}^*}. \tag{3.6d}$$

Denklem 3.6'da yer alan $\boldsymbol{U}$ $N \times N$'lik köşegen matristir ve bu matrisin elemanları sırasıyla iletimdeki ve kesimdeki modlarda 1'e ve $\pm j$'ye eşittir. 3.1 ve 3.2 no'lu

denklemler kullanılarak $\boldsymbol{a_2 = Ka_1}$ yazılabilmektedir ve $\boldsymbol{K = (S_{22}^{-1}(\lambda - S_{21}))}$ olarak yazılabilmektedir. Dolayısıyla depo edilen kompleks güç ifadesi , $\boldsymbol{\Psi}$, denklem 3.7'deki gibi açılabilmektedir.

$$\boldsymbol{\Psi = a_1{}^t \Omega a_1^*}, \quad \boldsymbol{\Omega = (Q_{11} + Q_{12}K^* + K^t Q_{21} + K^t Q_{22} K^*)}. \tag{3.7}$$

3.7 no'lu denklem, çözümlerde tek ve çift simetrik uyarımların yapılabildiği simetrik BH kabulü altında kullanılabilmektedir [51]. Sonuç olarak, tek ve çift modlar tarafından depo edilen kompleks güç [51]'de türetilmiştir ve simetrik BH'li PY'lerin band ucu frekanslarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu sebeple, [51]'de verilen yöntem simetrik BH'li PY'lerin durdurma bandı davranışlarının bulunması ile sınırlıdır. Bu bölümde verilen simetrik/asimetrik BH'li PY'ler için geçerli analiz, bu sınırlamaları ve özel durumları ortadan kaldırmaktadır. Amaçlanan yöntemin çıkarımları denklem 3.7'den başlanarak elde edilecektir.

Denklem 3.7 mevcut haliyle özdeğer denkleminin çözümü için herhangi bir avantaj sağlamamaktadır. Fakat tek Floquet modunun BH'de yayıldığı varsayılırsa, durdurma bandları $\lambda = 1$ ve $\lambda = -1$ değerlerinde meydana gelmektedir. $\lambda = 1$ ve $\lambda = -1$ değerleri denklem 3.2'de yerine konursa ve denklem 3.2'den elde edilen b_2 ve a_2 ifadeleri denklem 3.1'de yerine yazılırsa $\lambda = 1$ için $a_2 = a_1(1 - S_{21})/S_{22}$ ve $\lambda = -1$ için $a_2 = a_1(-1 - S_{21})/S_{22}$ ifadeleri elde edilmektedir. Bu durumda denklem 3.7 basitleştirilerek denklem 3.8'deki gibi yazılabilmektedir.

$$\Psi_{\pm 1} = \mid a_1 \mid^2 (Q_{11} + Q_{12}K_{\pm 1}^* + Q_{21}K_{\pm 1} + Q_{22} \mid K_{\pm 1} \mid^2). \tag{3.8}$$

Denklem 3.8'de yer alan K_1, Q_{11}, Q_{12}, Q_{21}, Q_{22} ifadeleri denklem 3.9'da verilmiştir.

$$K_1 = \frac{1 - S_{21}}{S_{22}}, \;\; K_{-1} = \frac{-1 - S_{21}}{S_{22}}. \tag{3.9a}$$

$$Q_{11} = (1 + S_{11})(1 - S_{11}^*) - S_{12}S_{12}^*. \tag{3.9b}$$

$$Q_{12} = S_{12}(1 - S_{22}^*) - (1 + S_{11})S_{12}^*. \tag{3.9c}$$

$$Q_{21} = S_{12}(1 - S_{11}^*) - (1 + S_{22})S_{12}^*. \tag{3.9d}$$

$$Q_{22} = (1 + S_{22})(1 - S_{22}^*) - S_{12}S_{12}^*. \tag{3.9e}$$

Kayıpsız bir PY için, birim hücrede depo edilen kompleks gücün reel kısmı $\mathrm{Re}\{\Psi\}=0$ koşulunu hem iletim hem de durdurma bandında sağlamaktadır. Ayrıca, band ucu frekanslarında birim hücrede depo edilen kompleks gücün sanal kısmı $\lambda=\pm 1$ için $\mathrm{Im}\{\Psi_{\pm 1}\}=0$ koşulunu sağlamaktadır. Bu nedenle, denklem 3.10'da ve 3.11'de verilen J_1 ve J_{-1} fonksiyonları [41] no'lu referansta da belirtildiği gibi $\mathrm{Im}\{\Psi_{\pm 1}\}=0$ olmasından dolayı band uçlarında tam olarak sıfırdan geçmek zorundadır.

$$J_1=\mathrm{Im}\{Q_{11}+Q_{12}K_1^*+Q_{21}K_1+Q_{22}\mid K_1\mid^2\}=0. \tag{3.10}$$

$$J_{-1}=\mathrm{Im}\{Q_{11}+Q_{12}K_{-1}^*+Q_{21}K_{-1}+Q_{22}\mid K_{-1}\mid^2\}=0. \tag{3.11}$$

Kayıpsız ve resiprok bir PY için, denklem 3.9'da verilen Q parametreleri $Q_{11}=j2\,\mathrm{Im}(S_{11})$, $Q_{12}=Q_{21}=j2\,\mathrm{Im}(S_{21})$, $Q_{22}=j2\,\mathrm{Im}(S_{22})$ olarak yazılabilmektedir ve J_1, J_{-1} yardımcı fonksiyonları denklemler 3.12'de ve 3.13'te verildiği gibi yazılabilmektedir.

$$J_1=2\,\mathrm{Im}\{S_{11}+2S_{21}\,\mathrm{Re}\{K_1\}+S_{22}\mid K_1\mid^2\}=0. \tag{3.12}$$

$$J_{-1}=2\,\mathrm{Im}\{S_{11}+2S_{21}\,\mathrm{Re}\{K_{-1}\}+S_{22}\mid K_{-1}\mid^2\}=0. \tag{3.13}$$

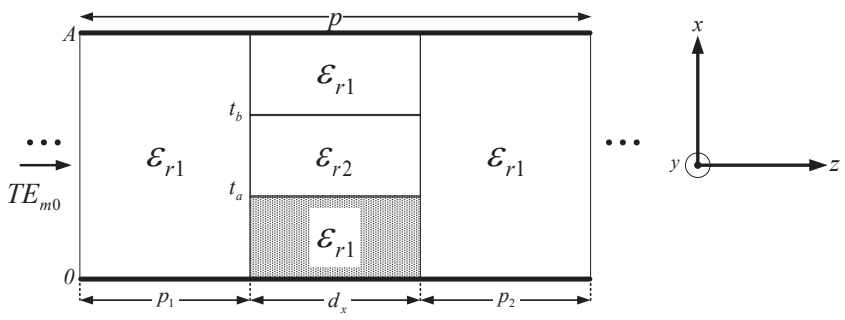
Denklemler 3.12 ve 3.13'te durdurma band geçiş frekansları dışında sırasıyla $\mathrm{Im}\{S_{11}+2S_{21}\,\mathrm{Re}\{K_1\}+S_{22}\mid K_1\mid^2\}\neq 0$ ve $\mathrm{Im}\{S_{11}+2S_{21}\,\mathrm{Re}\{K_{-1}\}+S_{22}\mid K_{-1}\mid^2\}\neq 0$ olmaktadır, durdurma band geçiş frekanslarında ise J_1 ve J_{-1} fonksiyonları sıfırdan geçmektedir. Sonuçta periyodik yapıların durdurma bandları J_1 ve J_{-1}'in sıfır geçişlerinin gözlenmesiyle [41] no'lu referansta da belirtildiği gibi doğru bir şekilde elde edilebilmektedir. J_1 ve J_{-1} fonksiyonlarının özgün olduğu ve mevcut literatürde bu zamana kadar türetilmediği not edilmelidir. Bu yardımcı fonksiyonlar ayrıca FK'lar, YDT'lerde yer alan tek helisli YDY'ler ve periyodik dielektrik yüklü dikdörtgen dalga kılavuzları gibi bir çok farklı tipteki PY problemlerinin çözümü için oldukça elverişlidir. Bu sebeple, amaçlanan yöntem, kapsamlı YFGSM olarak adlandırılmıştır. Amaçlanan yöntemin çoklu Floquet mod bölgesinde kabul edilebilir bir doğrulukla kullanılabileceği not edilmelidir. Bir sonraki bölümde farklı PY'lerin analizinde kapsamlı YFGSM yönteminin etkinliği ortaya konacaktır.

3.3 Bazı Periyodik Yapıların Durdurma Bandı Analizi Üzerine Sayısal Örnekler

Bu bölümde, amaçlanan YFGSM yöntemini doğrulamak için üç farklı uygulama sunulmuştur. İlk alt bölümde, kısmi dielektrik yüklü dikdörtgen dalga kılavuzu örnekleri ele alınmıştır ve adı geçen yapıların elektromagnetik durdurma bandı özellikleri YFGSM yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. İkinci olarak, bir boyutlu (1B) FK'lerin fotonik durdurma bandları üzerine YFGSM yönteminin performansı, bir düzlem dalganın belirli bir geliş açısı ile FK'ye geldiği durumlar için ele alınmıştır. Son olarak ise, tek helisli YDY'lerin dielektrik destek çubuklarının yerleşiminden kaynaklanan ve durdurma bandı oluşmasına yol açan açısal asimetri problemi ele alınmıştır ve bu durdurma bandları YFGSM yöntemi ile belirlenmiştir.

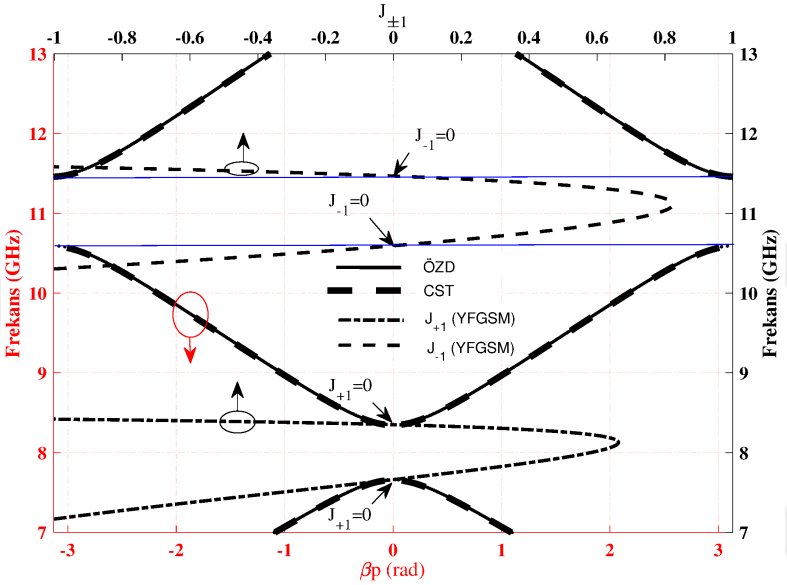
3.3.1 Dikdörtgen dalgakılavuzları

Bu alt bölümde, Şekil 3.2'de gösterildiği gibi periyodik dielektrik yüklü dikdörtgen dalga kılavuzları problemi dikkate alınmaktadır. Kesit uzunlukları A= 22.86 mm ve B= 10.16 mm olan standard WR-90 dikdörtgen dalgakılavuzunun kullanılması tercih edilmiştir. Amaçlanan dalgakılavuzu, d_x uzunluklu bölümü inhomojen dielektrik bölümlerden ve p ilgili dalgakılavuzunun periyodu olmak üzere $p_1 + p_2 = p - d_x$ uzunluklu bölümü homojen bölümlerden oluşan z-yönünde periyodik yüklü bir modeli içermektedir. Aşağıda yer alan örneklerde iki asimetrik BH ($p_1 \neq p_2$) konfigürasyonları ele alınmıştır. Bu örneklerde dikdörtgen dalga kılavuzunun kesiti tümüyle ya da kısmi dielektrik yüklüdür. Ele alınan her iki konfigürasyonun saçılma parametreleri, TE_{m0} (z'ye göre TE, $E_z = 0$) modlarından 10 mod ele alınarak Modal

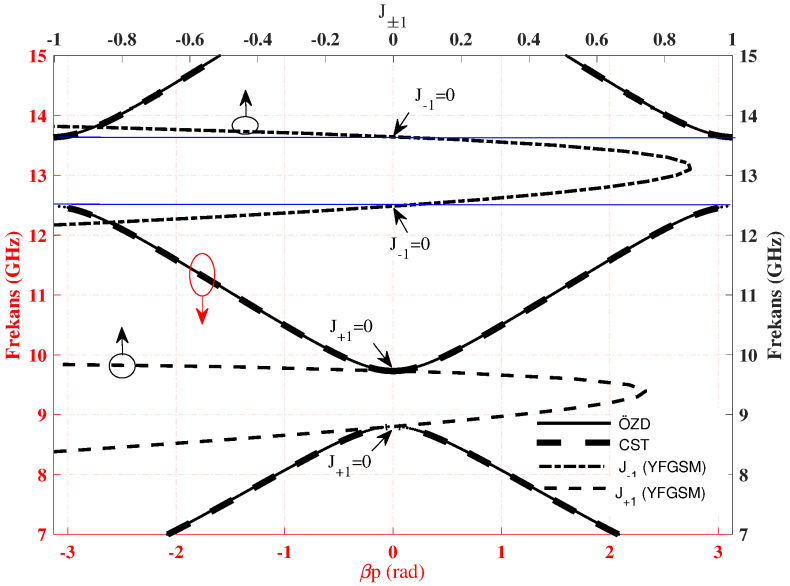


Şekil 3.2 : Asimetrik BH'li kısmi dielektrik yüklü dikdörtgen dalgakılavuzunun kesit görünümü.

Açılım Tekniğinin (MAT) [54] uygulanmasıyla belirlenmiştir. MAT ile elde edilen saçılma parametreleri sırasıyla bir ÖZD yöntemi olan denklem 3.3'te ve kapsamlı YFGSM yöntemi olarak denklem 3.12'de ve 3.13'te yerine konmaktadır. Denklem 3.12'de ve 3.13'te kullanılan saçılma parametreleri periyodik yüklü dikdörtgen dalga kılavuzunun genelleştirilmiş saçılma matrisinden doğru elemanların seçilmesiyle belirlenmiştir. Bu örneklere ait durdurma bandı diyagramları Şekil 3.3 ve 3.4'te seçilen



Şekil 3.3 : ε_{r1} =1, ε_{r2} =2.56, d_x=1.09A, $p_1 = A/8$, $p_2 = A/16$, t_a =0, t_b=A parametre değerleri için homojen dielektrik yüklü dükdörtgen dalgakılavuzunun durdurma band diyagramı.



Şekil 3.4 : $\varepsilon_{r1} = 1$, $\varepsilon_{r2} = 2.56$, d_x=0.88A , p_1=$A/8$, p_2=$A/16$, t_a=$A/16$, t_b=$15A/16$ parametre değerleri için inhomojen dielektrik yüklü dükdörtgen dalgakılavuzunun iletim durdurma band diyagramı.

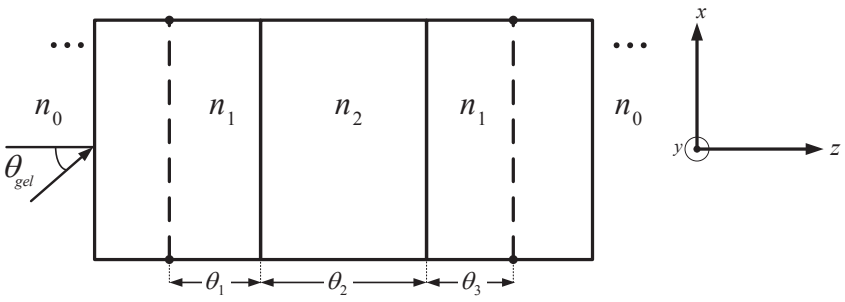
Çizelge 3.1 : İncelenen her iki asimetrik dikdörtgen dalga kılavuzu konfigürasyonları için ÖZD ve YFGSM yöntemleri ile CST benzetimlerinin band ucu frekans sonuçları.

Konfigürasyonlar	Durdurma Bandı	ÖZD (GHz)	YFGSM (GHz)		CST (GHz)
			$J_{+1}=0$	$J_{-1}=0$	
Şekil 3.3 Homojen	1. $\theta=0$	$7.66< f <8.36$	7.67	-	$7.66< f <8.34$
			8.36	-	
	2. $\theta=\pi$	$10.59< f <11.47$	-	10.6	$10.59< f <11.46$
			-	11.47	
Şekil 3.4 Inhomojen	1. $\theta=0$	$8.8< f <9.74$	8.8	-	$8.8< f <9.73$
			9.74	-	
	2. $\theta=\pi$	$12.48< f <13.65$	-	12.48	$12.48< f <13.63$
			-	13.65	

parametre değerleri için verilmektedir. ÖZD ve YFGSM yöntemlerine ait durdurma bandı sonuçları Şekil 3.3 ve 3.4'te gösterildiği gibi mükemmel uyum içerisindedir. Buna ek olarak, ele alınan konfigürasyonlar CST tasarım ortamında modellenmiştir ve CST saçılma parametre değerleri denklem 3.3'te yerine konmuştur. ÖZD ve YFGSM yöntemleri ile CST sonuçları mükemmel uyum içerisindedir. İlgilenilen ÖZD ve YFGSM yöntemleri ve CST benzetim sonuçları için her iki konfigürasyona ilişkin tam band ucu frekansları Çizelge 3.1'de verilmektedir. Sunulan YFGSM yönteminin band ucu frekanslarının diğer yöntemler ile mükemmel uyum içerisinde olduğu Çizelge 3.1'den açıkça görülmektedir. YFGSM yönteminin homojen ve inhomojen periyodik dielektrik yüklü dikdörtgen dalgakılavuzlarının durdurma bandlarının bulunmasında etkili bir şekilde uygulanabileceği Şekil 3.3 ve 3.4'ten görülmektedir.

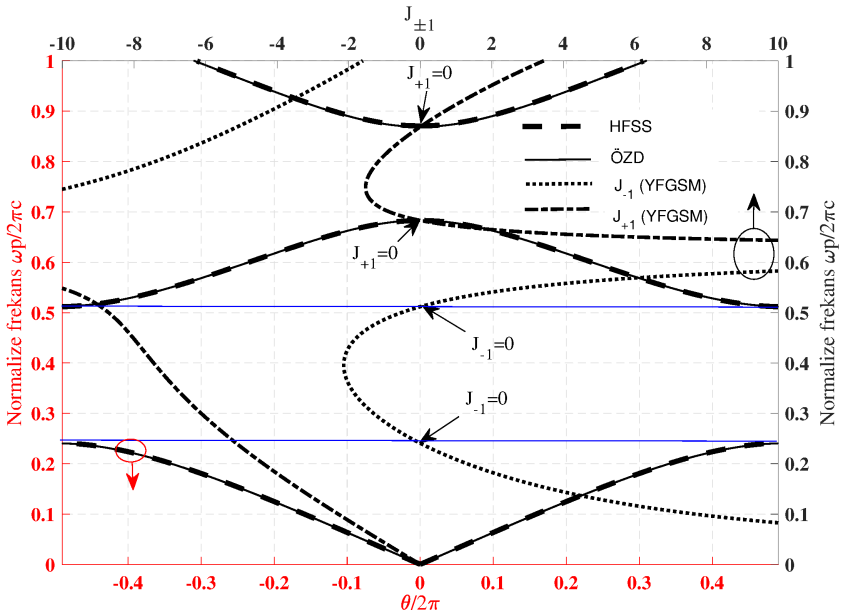
3.3.2 Bir boyutlu fotonik kristaller

YFGSM yönteminin fotonik kristaller üzerindeki başarısını değerlendirmek için, bir boyutlu (1B) FK yapısı Şekil 3.5'te görüldüğü gibi ele alınmıştır. Fotonik kristal yapısı n_1 ve n_2 kırılma indislerine sahip iki farklı kayıpsız dielektrik katman içermektedir. Şekil 3.5'te görüldüğü farklı elektriksel (θ_1 ve θ_3) uzunluklara sahip asimetrik BH konfigürasyonu ele alınmıştır. Ana ortam (n_0) hava kabul edilmiştir ve düzlem dalga yüzey normaline bir θ_{gel} geliş açısı ile gelmektedir. TE durumu

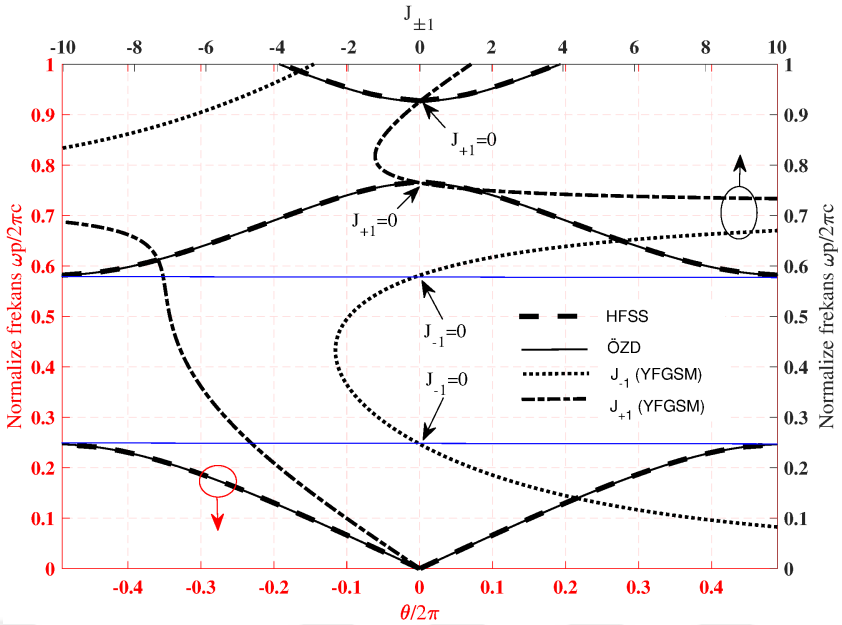


Şekil 3.5 : Asimetrik birim hücreli 1B FK'nın kesit görünümü.

için problem parametreleri $\theta_{gel} = 0°$ (dik geliş), $\theta_{gel} = 30°$ (eğik geliş), $n_1^2 = 13$, $n_2^2 = 1$ olarak seçilmiştir ve fotonik durdurma band diyagramları farklı yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Asimetrik BH'lerin saçılma parametreleri doğrudan [52]'de verilen ifadeler kullanılarak elde edilmiştir. Bu durumda, ilgili problem için ÖZD ve YFGSM yöntemlerine ait sonuçlar Şekil 3.6'da ve Şekil 3.7'de gösterilmektedir. ÖZD yönteminin band ucu frekansları kapsamlı YFGSM yönteminin J_1 ya da J_{-1} fonksiyonlarının sıfır olduğu noktalarının her biri ile tam olarak kesişmektedir. Buna ek olarak, 1B FK'ler HFSS tasarım ortamında modellenmiştir ve band ucu frekanslarının karşılaştırılması Çizelge 3.2'de verilmektedir. YFGSM yönteminin doğru sonuçlar ortaya koyduğu ve 1B FK'lerin durdurma bandı analizine doğrudan uygulanabileceği Çizelge 3.2'den ve Şekiller 3.6 ve 3.7'den görülebilmektedir.



Şekil 3.6 : p=A= 200 nm, $p_1 = 0.2A$, p_2= $0.8A$, $\theta_1 = k_1 p_1/2$, $\theta_2 = k_2 p_2$, $\theta_3 = k_1 p_1/5$ ve $\theta_{gel} = 0°$ değerleri için (k_1 and k_2 dalga vektörünün z bileşeni olmak üzere) 1B FK'nın fotonik iletim/durdurma band diyagramı.



Şekil 3.7 : p=A= 200 nm, p_1=0.2A, p_2=0.8A, $\theta_1 = k_1 p_1/2$, $\theta_2 = k_2 p_2$, $\theta_3 = k_1 p_1/5$ ve $\theta_{gel} = 30°$ değerleri için (k_1 and k_2 dalga vektörünün z bileşeni olmak üzere) 1B FK'nın fotonik iletim/durdurma band diyagramı.

Çizelge 3.2 : 1B FK'ların her iki asimetrik konfigürasyonları için ÖZD, YFGSM yöntemlerine ve HFSS benzetimine ait band ucu frekans sonuçları.

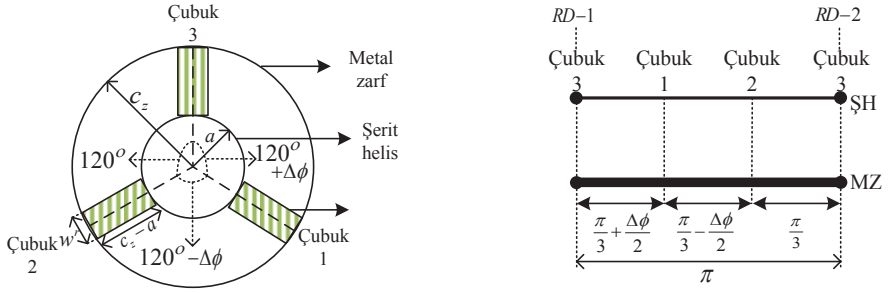
Problemler	Durdurma bandı	ÖZD (THz)	YFGSM (THz)		HFSS (THz)
			$J_{+1}=0$	$J_{-1}=0$	
Şekil. 3.6	1.	360.68< f <768.02	-	360.93	361.45< f <767.65
	$\theta = \pi$		-	767.76	
TE,TM	2.		1024.6	-	
$\theta_{gel} = 0°$	$\theta = 0$	1024.6< f <1303.5	1303.5	-	1025< f <1306
	1.	369.8< f <872.60	-	369.8	371< f <871
Şekil 3.7	$\theta = \pi$		-	872.63	
TE	2.		1147.12	-	
$\theta_{gel} = 30°$	$\theta = 0$	1147.1< f <1390	1389.98	-	1151< f <1391

3.3.3 Tek helisli yürüyen dalgalı tüpler

Tek helisli YDT'ler Şekil 3.8(a)'da verildiği gibi metal zarf (MZ), dielektrik destek çubukları ve şerit helis içeren periyodik YDY sistemlerine sahiptir. Bu sistemler simetrik bir tek helisli YDY ile tasarlanabilmektedir, bununla beraber,

üretim aşamasında tek helisli YDY üzerinde asimetri meydana gelebilmektedir. Bu asimetrinin π-noktası frekansı civarında durdurma bandı oluşturduğu ve oluşan durdurma bandından dolayı YDT'nin güç kapasitesini sınırlayan güç boşluklarının oluştuğu çok iyi bilinmektedir [28]. Bu nedenle, asimetrik tek helisli YDY'nin durdurma bandının belirlenmesi yüksek güçlü ve geniş bandlı bir YDT tasarımı için önemli bir etkiye sahiptir. Amaçlanan YFGSM teorisi, tek helisli YDT'nin durdurma bandı karakteristiklerinin bulunmasında yaygın bir şekilde kullanılan kuple mod analizine alternatif bir yaklaşımdır. Amaçlanan yöntemin asimetrik dielektrik yüklü tek helisli YDY'nin π-noktası frekansı analizinde geçerliliğini göstermek için, mevcut literatürde yer alan sonuçlar ile YFGSM yöntemi ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. [21] no'lu referansta verilen ve şerit kalınlığı 0.28 mm, şerit genişliği 0.90 mm, ortalama yarıçapı (a) of 2.73 mm, hatvesi (p) 3.18 mm ve metal zarf (MZ) yarıçapı (c_z) 5.2 mm olan şerit helis (ŞH) bir YDY modeli ele alınmıştır. Ele alınan tek helisli YDY modeli çubuk genişliği (w^r) 0.64 mm olan üç adet dikdörtgen Berilya dielektrik destek çubuklarının 120° açısal simetri ile yerleşimini içermektedir. Berilya'nın bağıl dielektrik sabiti sayısal hesaplamalarda $\varepsilon_r = 6.3$ olarak kabul edilmiştir.

Tek helisli YDY'nin π-modu durdurma band karakteristiklerini analiz etmek için helisin tek bir sarımının merdiven devre gösterimi Şekil 3.8(b)'de ele alınmıştır. Şekil 3.8(b)'de verilen devre modelinin saçılma parametreleri, GSM yöntemi kullanılarak doğrudan elde edilebilmektedir. Bu sebeple, amaçlanan J_1 ve J_{-1} fonksiyonları,



(a) Kesit görünümü (b) Merdiven devre gösterimi

Şekil 3.8 : (a) $\Delta\phi = 15^\circ$ için 1. dielektrik destek çubuğunda asimetri içeren tek helisli YDY'nin kesit görünümü (b) Şekil 3.8(a)'da verilen tek helisli YDY'nin tek bir sarımına ait merdiven devre gösterimi.

saçılma parametrelerinin hesaplanan değerleri kullanılarak elde edilebilmektedir. Bu hesaplamaların sonucunda, tek helisli YDY'nin π-mod durdurma bandı frekansı J_{-1}'in kökleri (başka bir ifade ile $\lambda = e^{j\pi}$'den gelen fonksiyon) bulunarak kolaylıkla elde edilebilmektedir. Literatürde mevcut çalışmalarda, ilgilenilen tek helisli YDY'nin verilen parametreleri için sırasıyla π-modu frekansı 7.9GHz olarak ölçülmüş [21], 7.96GHz olarak hesaplanmıştır [25] ve amaçlanan YFGSM yöntemi ile 7.97GHz olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların doğrulanması için, tek helisli YDY modeli ayrıca CST tasarım ortamında modellenmiştir. CST'de yer alan Eigen Mode Solver modülü benzetimler için kullanılmıştır ve simetrik BH'nin π-modu frekansı [21] no'lu referansta verilen ölçüm değeri 7.9GHz'e çok yakın bir şekilde 7.88GHz olarak hesaplanmıştır. Ele alınan tek helisli YDY'nin π-modu frekansının ($\Delta\phi = 0^\circ$ için) hesaplama ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması Çizelge 3.3'te verilmiştir. Berilya çubuklarının açısal yerleşimindeki asimetri Şekil 3.8(a)'da ve Şekil 3.8(b)'de gösterildiği gibi 1. çubuğun $\Delta\phi$ açısal kaydırımı yapılarak benzetilmiştir. Geleneksel özdeğer denklemi ve amaçlanan YFGSM yöntemine ait sayısal sonuçlar $\Delta\phi = 15^\circ$ için Şekil 3.9'da karşılaştırılmıştır. Π-modu durdurma bandı, düz çizgi ile gösterilen özdeğer çözümü ile 7.85-8.09GHz aralığında elde edilmiştir ve bu durdurma band bölgesi Şekil 3.9'da yer almaktadır. Buna ek olarak, J_{-1} fonksiyonunun değişimi kesik çizgi-nokta formunda Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Amaçlanan YFGSM yönteminin diğer yöntemlere göre geçerliliğini anlamak için ele alınan üç yönteme ait detaylı band ucu frekans değerleri Çizelge 3.4'te verilmektedir.

J_{-1}'in band ucu frekanslarında sıfırdan geçtiği açıkça görülmektedir. 7.85 GHz ve 8.09GHz olan band ucu frekansları J_{-1}'in köklerine karşılık düşmektedir. Bu sebeple, J_{-1} fonksiyonu tek helisli asimetrik YDY'nin durdurma bandını mükemmel bir şekilde bulmaktadır. Ayrıca ele alınan aynı asimetrik BH modeli için CST durdurma bandı sonuçları (7.78-7.95GHz) Şekil 3.9'da kesik-çizgi ile gösterilmektedir. Amaçlanan

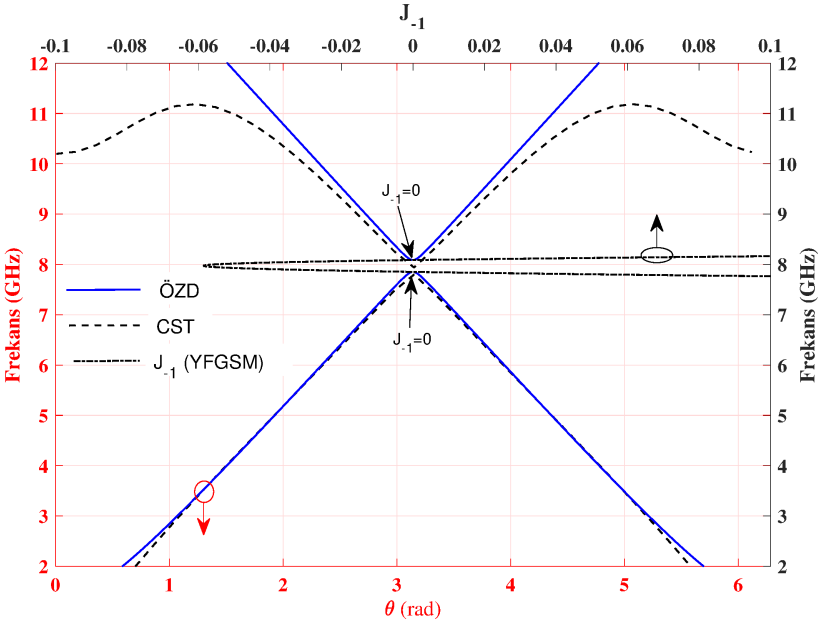
Çizelge 3.3 : Tek helisli YDY'nin π-modu frekansına ait ölçülen ve hesaplanan sonuçların karşılaştırılması.

İlgili çalışmalar	Hobrect, [21]	Onodera, [25]	CST	YFGSM
Frekans (GHz) $\Delta\phi = 0^\circ$ için	7.9	7.96	7.88	7.97

Çizelge 3.4 : Tek helisli YDY'nin asimetrik konfigürasyonu için ÖZD ve YFGSM yöntemleri ile CST benzetimlerine ait band ucu frekans sonuçları.

Ele alınan problem	Durdurma bandı	ÖZD (GHz)	YFGSM (GHz)		CST (GHz)
			$J_{+1}=0$	$J_{-1}=0$	
Şekil 3.9	1.		-	7.85	
Açısal asimetri	$\theta=\pi$	$7.85< f <8.09$	-	8.09	$7.78< f <7.95$
$\Delta\phi=15^\circ$ için					

YFGSM yönteminin CST ile de tutarlı sonuçlar verdiği açıkça görülmektedir. CST benzetimlerinde ele alınan tek helisli YDY modeli için saçılma parametrelerinin doğrudan hesaplanması yerine Eigen Mode Solver modülü kullanılmıştır. Helisli YDY modeli dalgaboyu başına 10 adım seçilerek, mevcut dörtyüzlü (tetrahedral legacy) bölmelendirmelere (mesh) ayrılmıştır. Ele alınan tek helisli YDY'nin BH'si için Z_{min}'de ve Z_{max}'da periyodik sınır koşulu uygulanmıştır. Periyodik yapının faz kayması 0'dan 2π'ye $\pi/18$ adım aralıkları seçilerek değiştirilmiştir. Her faz kayması için frekans çözümü 2-15 GHz frekans band aralığında belirlenmiştir. YFGSM yöntemi ve CST arasındaki küçük farklılıklar, ele alınan tek helisli YDY'nin iletim



Şekil 3.9 : $\Delta\phi=15^\circ$ için 1. dielektrik destek çubuğunda meydana gelen açısal asimetriden dolayı tek helisli YDT'de oluşan durdurma band karakteristikleri.

hattı eşdeğeri üzerindeki yaklaşımlar ve kabullerden ayrıca CST benzetimlerindeki seçilen çözüm parametrelerinin sonucundan ileri gelmektedir.

Ele alınan tek helisli YDY modelinin YFGSM yöntemi ile yapılan benzetimlerinde sahte bir band ucu frekansı çözümünün oluştuğunu belirtmek gereklidir. Ek olarak, bu sahte band ucu frekasında $S_{11} = -S_{22}$ eşitliğinin oluştuğu belirlenmiştir. Uygulanan YFGSM yöntemi için bu koşul sahte çözümlerin ayıklanmasında kullanılabilmektedir.

Sayısal sonuçlar, 8GB RAM'e, 2.20GHz Intel i7 işlemciye sahip bir kişisel bilgisayar üzerinde çalışan Matlab kodu kullanılarak elde edilmiştir. Her durum için her BH'nin genelleştirilmiş saçılma matrisini hesaplama süresi Çizelge 3.5'te verilmiştir. GSM belirlendiğinde yardımcı fonksiyonların 10ms'den az bir sürede kolay ve

Çizelge 3.5 : YFGSM ve CST/HFSS sonuçları için gerekli toplam hesaplama ve benzetim sürelerinin karşılaştırılması.

Ele alınan problemler	GSM (s)	YFGSM (s)	CST/HFSS (s)
Şekil 3.3, Homojen yüklü dikdörtgen dalgakılavuzu	187.01	0.004	1305
Şekil 3.4, İnhomojen yüklü dikdörtgen dalgakılavuzu	300.32	0.004	1020
Şekil 3.6, 1B FK: TE,TM $\theta_{gel} = 0^\circ$	3.49	0.004	1425
Şekil 3.7,1B FK: TE, $\theta_{gel} = 30^\circ$	3.51	0.004	66999
Şekil 3.9,Tek Helisli YDY, $\Delta\phi = 15^\circ$	0.09	0.002	1548

hızlı bir şekilde elde edilebildiği Çizelge 3.5'ten görülmektedir. Bu sebeple, YFGSM yöntemi, CST ve HFSS benzetimlerine göre PY'lerin analizinin benzetim süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır. PY'lerin tasarımı, tasarım uzayında birçok parametrenin eniyilenmesini gerektirmektedir. Amaçlanan yöntemin hesaplama süre performansı düşünüldüğünde, bu yöntem PY'lerin tasarımında alternatif bir yöntem olarak kullanılabilmektedir.

3.4 Sonuç

Bu bölümde periyodik yapıların durdurma bandlarının belirlenmesi için genelleştirilmiş saçılma matrisi gösterimlerine dayanan hızlı, doğru ve etkili bir yöntem sunulmuştur. Amaçlanan kapsamlı YFGSM yöntemi sonuçlarının ÖZD yöntemi

ve HFSS/CST benzetim sonuçları ile mükemmel uyum içinde olduğu gösterilmiştir. Ayrıca amaçlanan yöntem, periyodik yapıların modellenmesi için kullanılan tam dalga elektromagnetik benzeticilere göre gerekli hesaplama süresini önemli ölçüde azaltmaktadır ve periyodik dielektrik yüklü dikdörtgen dalgakılavuzları, fotonik kristaller ve YDT'lerde kullanılan tek helisli YDY'ler gibi periyodik yapıların durdurma bandı analizi ve tasarımında etkili bir şekilde kullanılabilmektedir. Asıl önemli olan ise, amaçlanan kapsamlı YFGSM yöntemi oldukça genel olması ve birçok farklı tipteki periyodik yapı problemlerinin durdurma band analizi ve tasarımında başarılı bir şekilde uygulanabilmesidir. Sunulan YFGSM yönteminin periyodik yapıların durdurma bandı analizi ve tasarımı için üç boyutlu tam dalga elektromagnetik tasarım ortamlarında bir periyodik yapı modülü olarak kullanılabileceği umulmaktadır.

4. YARDIMCI FONKSİYONLU GENELLEŞTİRİLMİŞ SAÇILMA MATRİSİ (YFGSM) YÖNTEMİ İLE ASİMETRİK YÜKLÜ TEK HELİSLİ YAVAŞ DALGALI YAPILARIN DURDURMA BANDI KARAKTERİSTİKLERİNİN BELİRLENMESİ

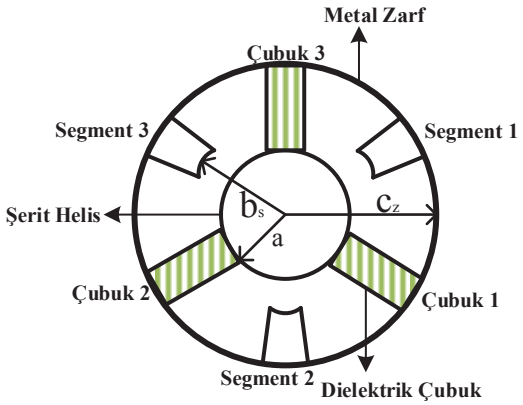
YDT'lerde kullanılan tek helisli YDY modellerinin dispersiyon karakteristiğinin amaca uygun iyileştirilmesi için düzgün helis yapısı, dielektrik destek çubukları ve metal segmentler ile yüklenebilmektedir. Bu yüklemede oluşabilecek herhangi bir simetrik olmayan durum, ilgili YDT'de π-noktası frekansı civarında durdurma bandının oluşmasına sebebiyet vermektedir. Bu durum, YDT'nin çalışma frekanslarında güç boşluklarının oluşmasına yol açmaktadır ve gücü sınırlayan bir faktör olarak YDT'lerde kritik öneme sahiptir.

Bu bölümde tez kapsamında yeni bir bakış açısı ile türetilen ve literatüre [55] ile önerilen yeni bir YFGSM (Auxiliary Functions of Generalized Scattering Matrix (AFGSM)) yöntemi, asimetrik yüklü tek helisli yavaş dalgalı yapıların durdurma bandı karakteristiklerinin analizi için sunulmuştur. Önerilen bu yöntemde asimetrik yüklü tek helisli YDY'nin durdurma bandının belirlenmesi problemi, π-noktası frekansı civarında $\overline{J}_{-1}$ ve $\overline{R}_{-1}$ yardımcı fonksiyonlarının sıfır geçişlerinin belirlenmesine indirgenmiştir. Bunun yanı sıra, dielektrik destek çubuklarının açısal kaydırımı, dielektrik destek çubuğunun bağıl dielektrik sabiti değerlerinin ve genişliklerinin değişimi, metal segmentlerin açısal kaydırımı ve genişliğinin değişimi, helis ile metal segment arasındaki aralığın değişimi gibi birçok farklı durumlardan kaynaklanan asimetri durumları için tek helisli YDY'nin bir sarımına ait ilgili eşdeğer devreler yardımıyla genelleştirilmiş saçılma matrisi (GSM) gösterimleri açık bir şekilde ifade edilmiştir. Yöntemin doğruluğunu göstermek için, amaçlanan yeni YFGSM yöntemi literatürde mevcut tek helisli YDY modellerine ait sonuçlar ile doğrulanmıştır. Asimetrik yüklü tek helisli YDY modelinde durdurma bandı analizi için amaçlanan yöntemin uygulanabilirliği oldukça basittir ve önerilen yöntem farklı asimetrik

durumlar altında ilgili YDY için Bağıl Durdurma Bandgenişliği (BDB)'ni doğru bir şekilde belirlemektedir.

4.1 Giriş

Helis tipi YDT'ler oldukça geniş frekans bandının gerektirdiği uygulamalarda, haberleşme ve elektronik karşı tedbir sistemleri için mikrodalga güç kuvvetlendiricileri olarak kullanılmaktadır [11]. Helis tipi bir YDT'nin ana bileşenlerini elektron tabancası, yavaş dalgalı yapı, odaklama yapısı, RF giriş-çıkış kuplörleri ve toplayıcı olarak ifade etmek mümkündür. Tek helisli YDY'ler, kendilerine ait önemli dispersiyon karakteristiklerinden dolayı YDT'lerin RF güç performansını baskın bir şekilde etkilemektedir ve bu sebeple bu yapılara ilişkin analizler mevcut literatürde [1,5,11,26,56–59] referans numaralı çalışmalar ile verilen birçok yöntem kullanılarak araştırılmıştır. Helis tipi YDY'lerin temel elemanları tipik olarak Şekil 4.1'de verildiği gibi şerit helis, metal zarf ve dielektrik destek çubuklarıdır. Helis elemanı genellikle görece kolay kırılabilen bir malzeme olan tungsten şeritten yapılmaktadır ve uygun malzemeler kullanılıp, tam olarak desteklenerek YDT içinde uygun konumda tutulmalıdır. Diğer yandan, yükleme etkilerinden kaçınmak için ince dielektrik destek çubukları kullanılmaktadır. Helis tipi YDY'nin desteklenmesi için en yaygın kullanılan dielektrik malzemeler, Berilyum Oksit (BeO) ve Anizotropik Prolitik Boron Nitrit (APBN)'dir. Helis ve eş aralıklı üç dielektrik destek çubuğu bir metal zarf içine yerleştirilmektedir. Ek olarak, helis tipi YDY'lerde mükemmel simetrik bir yerleşim olmalıdır.



Şekil 4.1 : YDT'deki tipik bir helis yavaş dalgalı yapıya ait kesit görünümü.

Helis tipi YDY'lerde kullanılan bu formdaki tüm yerleşimler asimetri içermeyecek mükemmel bir şekilde bir araya getirilmelidir. Aksi takdirde, helisli YDY elemanlarının herhangi bir şekilde kaydırımından, malzeme parametrelerinin farklılığından meydana gelen asimetri temel ileri ve geri dalgaların kesiştiği π-noktası frekansı civarında durdurma bandına sebep olmaktadır. Buna ek olarak, meydana gelen asimetriler, YDT'nin güç performansını olumsuz etkileyen güç boşluklarına ve band ucu osilasyonlarına sebep olabilmektedir. Bu nedenle, helisli YDY'nin asimetrik yüklü olmasından ileri gelen bu durdurma bandının mevcudiyeti geniş bandlı YDT'lerin tasarımında kritik problem olarak yer almaktadır.

YDT'nin performansı üzerinde bu asimetrinin etkileri helisli YDY'nin durdurma bandı karakteristikleri incelenerek değerlendirilebilmektedir. Durdurma bandı karakteristiklerinin analizinde Kuple Mod Analizi (KMA)'ne dayanan birçok analitik yöntem yer almaktadır [22,23,25,27,28]. [22] no'lu referansta Hinson'nın sunduğu ve [23] no'lu referansta Lien'nin ele aldığı çalışmalarda metal zarf içinde dielektrik destek çubukları ile yüklü helisli YDY analiz edilmiş ve ele alınan yavaş dalga devresinin dispersiyonsuz olduğu ve kayıpsız olduğu varsayılmıştır. Bu durumda ileri sürülen yöntemler düşük frekanslar ve dar band uygulamalar ile sınırlı kalmaktadır. [25] no'lu referansta verilen Onodera'nın yaklaşımında ise metal segment yüklü kayıpsız yavaş dalga yapısı ele alınmıştır. Datta ve diğ.'nin [27]'de yer alan çalışmasında metal segment olmayan dielektrik yüklü helis YDY modelleri çoklu yansımalı kuple mod analizi kullanılarak analiz edilmiştir. Son zamanlarda, Datta ve diğ.'nin [28]'de yer alan ve çoklu yansımalı kuple mod analizine dayanan çalışması helisli YDY'nin durdurma bandı analizi fenomenini önemli bir noktaya taşımıştır ve sadece dielektrik destek çubuklarının açısal değişimi değil aynı zamanda destek çubuklarının dielektrik sabitlerinin, çubuk genişliğinin değişimleri, metal segmentin açısal değişimi, helis ve segment aralığının ve segment genişliğinin değişimini de içeren helisli YDY'de oluşan asimetrilere ait durdurma bandı analizleriyle literatüre güçlü bir katkı sunmuşlardır.

Asimetrik yüklü helisli YDY'lerin analizi mevcut literatürde ciddi ölçüde KMA'ya dayanmaktadır. Bu sebeple, KMA asimetrik yüklü helisli YDY'lerin analizinde geleneksel bir yöntem olarak adlandırılabilmektedir. Helisli YDY'lerin π-noktası frekansı civarında ileri ve geri uzay harmonik dalgaların analizinde kullanılan kuple mod analizi, dejenere olmuş kuple modların yayılım sabitlerini hesaplamak için

ileri ve geri dalga uzay harmoniklerinin kuple olmayan yayılım sabitlerine ihtiyaç duymaktadır [31, 32, 36]. Buna ek olarak, kuple mod dispersiyon ilişkisinin kuplaj katsayısını bulmak için gerekli olan toplam yansıma katsayısı, çoklu yansıma yaklaşımı kullanılarak hesaplanmak zorundadır. Kuple mod dispersiyon diyagramını elde etmek için helisli YDY'nin merdiven devre gösterimi kullanılmaktadır. Helisli YDY'nin bir sarımının eşdeğer devre gösteriminin π-noktası frekansında $\beta p = \pi$ faz farkının olmasının zorunlu olduğunu ifade etmek önemlidir. Helisli YDY'nin toplam yansıma katsayısının hesaplanması π-noktası frekansında KMA yöntemi için gereklidir. [41] no'lu çalışmada kapsamlı bir YFGSM yöntemi ile önerilen yaklaşım sadece simetrik değil aynı zamanda asimetrik birim hücreli periyodik yapılarda da geçerlidir. YFGSM yöntemi, asimetrik birim hücre konfigürasyonlarına sahip helisli YDY'ler, fotonik kristaller ve periyodik dielektrik yüklü dalga kılavuzları gibi periyodik yapıların durdurma bandlarının belirlenmesi için [41]'de önerilmiştir. [41]'de önerilen yöntem, periyodik yapıların birim hücresinde depo edilen kompleks güç ile ilişkili elde edilen iki yardımcı fonksiyonun ($J_{\pm 1}$) hesaplanmasına dayanmaktadır ve bu sayede ilgili periyodik yapının durdurma bandı ortaya çıkarılmaktadır.

Bu bölümde farklı bir yol ile YFGSM yöntemi yeniden formüle edilmiştir ve [41]'de verilen fonksiyonlara göre oldukça basit ve zarif fonksiyonlar geliştirilmiştir. Bu yeni yaklaşımla geliştirilen formülasyon, periyodik yapının birim hücresinin genelleştirilmiş saçılma matrisi cinsinden özdeğer denklemi yardımı ile basit bir şekilde elde edilebilmektedir. Özdeğer denklemi üzerinde band ucu koşulları zorlanmıştır. Bu bölümde geliştirilen yeni fonksiyonlar periyodik yapıların durdurma bandlarının belirlenmesinde açıkça kullanılabilmektedir. Bu bölümde sunulan çalışmada YDT'lerde kullanılan helisli YDY'lerin asimetrik yüklü olması durumunda oluşan durdurma bandı karakteristikleri araştırılmıştır. Amaçlanan yeniden formüle edilmiş YFGSM yöntemi, π-noktası frekasında helisli YDY'nin kuple mod analizi ile aynı yapıya sahip merdiven devre gösterimini kullanmaktadır. Ayrıca, sunulan yöntem sadece helisli YDY'nin birim hücresine ait genelleştirilmiş saçılma matrisine ihtiyaç duymaktadır. Bu sebeple, kuple mode analizinden farklı olarak YFGSM yöntemi ile asimetrik yüklü helisli YDY'nin durdurma bandı karakteristiklerinin belirlenmesinde birim hücrenin GSM hesaplamasının yapılması yeterlidir. YFGSM yöntemi

yardımıyla helisli YDY'nin dielektrik destek çubuklarının asimetrik durumlarına ait farklı senaryolar ve bu durumların bağıl durdurma bandgenişliğine etkileri analiz edilmiştir. Bugüne kadar edinilen tecrübelere göre, asimetrik yüklü helisli YDY'lerin durdurma bandının belirlenmesinde önerilen duruma benzer bir yaklaşım uygulanmamıştır. Bu amaçla, bu bölümde önerilen yeni YFGSM yöntemi , geleneksel kuple mod analizine karşı helisli YDY'nin π-noktası frekası analizi ve tasarımında yeni bir bakış açısı oluşturmaktadır.

4.2 Helisli YDY'ler için YFGSM Teorisi

Periyodik yapıların durdurma bandı karakteristiklerinin belirlenmesinde mevcut literatürde kapsamlı bir YFGSM yöntemi sunulmuştur. [41]'de verilen yöntem periyodik yapının birim hücresinde depo edilen kompleks gücün analizine dayanmaktadır. Birim hücrede tek bir Floquet modunun yayıldığı ve band ucu koşullarının uygulandığı varsayıldığında kayıpsız ve resiprok bir periyodik yapı için denklemler 4.1'de ve 4.2'de saçılma parametreleri (S_{11}, S_{21}, S_{22}) cinsinden verilen yardımcı fonksiyonlar ($J_{\pm 1}$) [41]'de türetilmiştir.

$$J_1 = 2\,\mathrm{Im}\{S_{11} + 2S_{21}\,\mathrm{Re}\{K_1\} + S_{22} \mid K_1 \mid^2\} = 0. \tag{4.1}$$

$$J_{-1} = 2\,\mathrm{Im}\{S_{11} + 2S_{21}\,\mathrm{Re}\{K_{-1}\} + S_{22} \mid K_{-1} \mid^2\} = 0. \tag{4.2}$$

4.1 ve 4.2 no'lu denklemlerde verilen K_1 ve K_{-1} ifadeleri 4.3'te verilmiştir. Bölüm 3'te de belirtildiği gibi denklemler 4.1 ve 4.2'de yer alan fonksiyonlar durdurma band geçiş frekanslarında sıfırdan geçmekte ve bu frekans değerleri dışında sıfırdan farklı değerler almaktadır. [41]'de türetilen J_1 ve J_{-1} fonksiyonları periyodik yapıların durdurma bandı analizinde doğrudan kullanılabilmektedir.

$$K_1 = \frac{1 - S_{21}}{S_{22}}, \;\; K_{-1} = \frac{-1 - S_{21}}{S_{22}}. \tag{4.3}$$

Bu bölümdeki çalışmada birim hücredeki komplek güce odaklanmak yerine, farklı bir bakış açısı ile periyodik yapıların özdeğer denklemi üzerinde yoğunlaşılmaktadır. Resiprok bir periyodik yapının simetrik olmayan bir birim hücresinin özdeğer denklemi birim hücrenin genelleştirilmiş saçılma matrisi cinsinden [51]'de verildiği

gibi denklem 4.4'teki şekilde yazılabilmektedir.

$$cos\theta = \frac{1 - S_{11}S_{22} + S_{21}^2}{2S_{21}}. \tag{4.4}$$

Denklem 4.4'te yer alan θ tek bir Floquet mod yayılımı açısından iletim bandında saf reel, durdurma bandında ise kompleks olmaktadır. Birim hücrede tek bir Floquet mod yayılımı için, özdeğer ifadesi denklem 4.5'teki gibi tanımlanabilmektedir.

$$\lambda_{1,2} = e^{\pm j\theta}, \theta = \beta p \in (0, \pi). \tag{4.5}$$

Denklem 4.5'te verilen β ve p ifadeleri sırasıyla Floquet faz faktörü ve birim hücrenin periyodunu göstermektedir. Birim hücrenin durdurma bandları $\lambda = +1$ ve $\lambda = -1$'de sırasıyla $\theta = 0$ ve $\theta = \pi$'ye karşılık düşen bölgelerde meydana gelmektedir. Denklem 4.4'te θ yerine 0 ve π değerleri yazılırsa 4.6 ve 4.7 no'lu denklemler elde edilmektedir.

$$S_{11}S_{22} - (1 - S_{21})^2 = 0, \quad \theta = 0, \lambda = 1 \quad \text{için.} \tag{4.6}$$

$$S_{11}S_{22} - (1 + S_{21})^2 = 0, \quad \theta = \pi, \lambda = -1 \quad \text{için.} \tag{4.7}$$

4.1 ve 4.2 nol'lu denklemlerde verildiği gibi uygun fonksiyonlar elde etmek için, denklemler 4.6'nın ve 4.7'nin reel ve sanal kısımlarına bakılmaktadır. Bu durum incelendiğinde, $\lambda = +1$ ve $\lambda = -1$ için denklemler 4.6'nın ve 4.7'nin reel ve sanal kısımları band frekanslarında sıfır olmak zorundadır. Bu sebeple, $\lambda = +1$ ve $\lambda = -1$ band ucu koşullarına karşılık gelen $\overline{J}_1$, $\overline{R}_1$, $\overline{J}_{-1}$ and $\overline{R}_{-1}$ yardımcı fonksiyonları denklemler 4.8'deki ve 4.9'daki tanımlanabilmektedir.

$$\overline{J}_{\pm 1} = \mathrm{Im}\{S_{11}S_{22} - (1 \mp S_{21})^2\} = 0. \tag{4.8}$$

$$\overline{R}_{\pm 1} = \mathrm{Re}\{S_{11}S_{22} - (1 \mp S_{21})^2\} = 0. \tag{4.9}$$

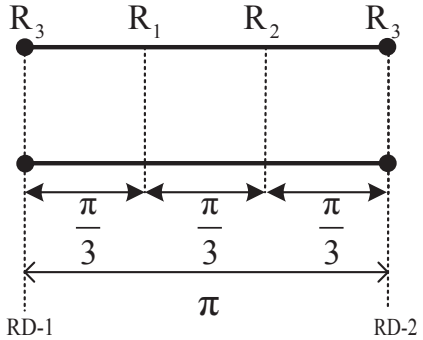
Böylece, geliştirilem $\overline{J}_{\pm 1}$ ve $\overline{R}_{\pm 1}$ fonksiyonları simetrik ve asimetrik birim hücreli periyodik yapıların durdurma bandlarının belirlenmesinde öncelikli olarak kullanılabilmektedir. Önerilen yöntem için ele alınan örnekler asimetrik yüklü helisli YDY'lerin durdurma bandlarının belirlenmesine yönelik olacaktır. İncelenen durdurma bandları π-noktası frekası civarında meydana gelmektedir. Frekans bandı π-noktası frekası civarında süpürüldüğünde, $\lambda = -1$ için $\overline{J}_{-1}$ ve $\overline{R}_{-1}$ fonksiyonlarının her ikisininde 0 olduğu noktalar π-modu frekansı ve band ucu frekanslarına karşılık düşebilmektedir. Asimetrik yüklü helisli YDY'lerin durdurma

bandı karakteristiklerinin analizinde geliştirilen $\overline{J}_{-1}$ ve $\overline{R}_{-1}$ fonksiyonları açıkça ve doğru bir şekilde uygulanabilmektedir. $\overline{J}_{-1}$ ve $\overline{R}_{-1}$ denklemlerinden görüldüğü gibi, helisli YDY'nin genelleştirilmiş saçılma matrisi sayısal hesaplamalarda belirlenmek zorundadır. Asimetrik yüklü helisli YDY'nin GSM'si bölüm 4.3'te verilen açıklamalar kullanılarak doğrudan elde edilebilmektedir.

4.3 Helisli YDY'nin GSM gösterimi

Helisli yavaş dalgalı yapı, eşdeğer bir iletim hattı devresi ile modellenebilmektedir. Bir helisli YDY'nin tek sarımına ait merdiven devre gösterimi Şekil 4.2'de verilmektedir. Helisli YDY, etrafına eş aralıklı olarak yerleştirilmiş üç adet dielektrik destek çubukları (R_1, R_2, R_3) ile yüklenmiştir. Bu durumda metal zarf, helis ve destek çubukları bir mikroşerit iletim hattı olarak modellenebilmektedir [28, 55, 60].

Helisli YDY'nin bir sarımına ait devre gösterimi birçok süreksizlik noktaları içermektedir. Bu noktada, referans düzlemleri RD-1 ve RD-2 arasındaki süreksizliklerdeki tüm etkileşimlerin etkileri ele alınarak genelleştirilmiş saçılma matrisinin doğru bir şekilde elde edilmesinin gerektiğine dikkat çekilmelidir. Bu nedenle, hesaplamalarda sayısal kararlılığı garanti eden GSM gösterimi helisli YDY'nin eşdeğer iletim hattına ustalıkla uygulanmalıdır. Bu bağlamda, ele alınan asimetrik durumlar için GSM yöntemi ile saçılma matrisinin türetilmesi sistematik bir şekilde açıklanmıştır. Kaskat bağlı devrelerin genelleştirilmiş saçılma matrisinin [51]'de ve [61]'ta verilen detayları ile ele alındığı not edilmelidir. Helisli YDY'de dielektrik destek çubuklarının açısal yerleşimi, dielektrik çubukların bağıl dielektrik değerlerinin değişimleri, destek

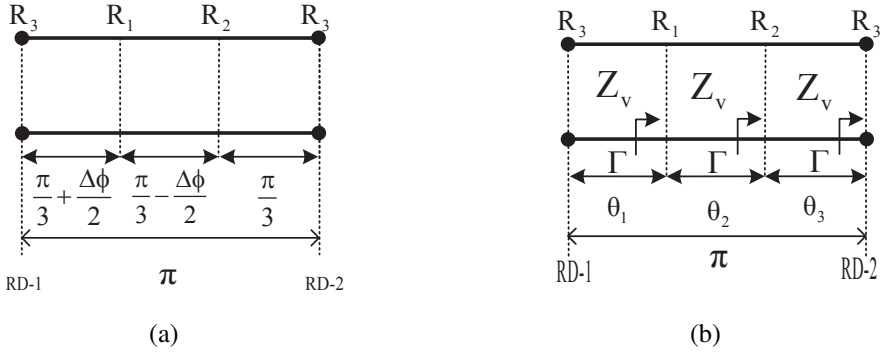


Şekil 4.2 : π-noktası frekansında helisli YDY'nin merdiven devre gösterimi.

çubuğunun genişliğinin değişimi, metal segmenlerin açısal yerleşimi, metal segment ile helis arasındaki boşluğun değişimleri ve metal segment genişliğinin değişimleri gibi durumlardan dolayı meydana gelen farklı asimetri problemleri ele alınmıştır. Her durum için, helisli YDY'nin toplam saçılma matrisinin belirlenmesi uygun bir şekilde hesaplanmalıdır. Helisli YDY'nin toplam saçılma matrisini elde etmek için, her bir asimetrik durumun iletim hattı eşdeğer devresi açık bir şekilde ifade edilmiştir. Buna ek olarak, jonksiyon saçılma matrisleri uygun şekilde tanımlanmıştır ve iletim hattı eşdeğer devresi üzerinde gösterilmiştir. Aşağıda alt bölümleri verilen ilk üç asimetrik durum dielektrik yüklü, metal segmente sahip olmayan helisli YDY'ler için kullanılabilmektedir. Ele alınan durumların geri kalanı ise dielektrik yüklü metal segmentli helisli YDY'ler için geçerlidir.

4.3.1 1. Durum: dielektrik destek çubuklarının açısal asimetrisi

Açısal asimetri olması durumunda dielektrik çubuklarla destekli helisli YDY'nin π-noktası frekansında merdiven devre gösterimi Şekil 4.3(a)'da verilmektedir. Eşit aralıklı simetrik dielektrik çubuklar için, jonksiyonlar arasındaki faz farkı her vakum bölgesinin elektriksel uzunluklarının $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \pi/3$'e karşılık düştüğü $\beta p/3$'e denk düşmektedir. Şekil 4.3(a)'da görüldüğü gibi ilk dielektrik destek çubuğu $\Delta\phi$ kadar açısal kaydırılmıştır ve bu durum $\Delta\phi/2$ kadar faz farkı oluşturmaktadır [28]. Bu duruma ait eşdeğer iletim hattı devre gösterimi Şekil 4.3(b)'de verilmiştir. Şekil 4.3(a)'da açısal asimetri ele alındığında her vakum bölgesinin elektriksel uzunluğu $\theta_1 = \pi/3 + \Delta\phi/2, \theta_2 = \pi/3 - \Delta\phi/2$ ve $\theta_3 = \pi/3$ olarak ifade edilebilmektedir.



Şekil 4.3 : a)π-noktası frekansında dielektrik destek çubuklarından birinin açısal asimetrisi için merdiven devre gösterimi (1. durum) b) Açısal asimetri durumunda helisli YDY'ye ait eşdeğer iletim hattı gösterimi.

Şekil 4.3(b)'de verilen jonksiyon yansıma katsayısı $\Gamma = (Z_d - Z_v)/(Z_d + Z_v)$ olarak tanımlanmaktadır ve bu ifadede verilen Z_v ve Z_d ifadeleri sırasıyla helisli YDY'nin vakum ve dielektrik yüklü bölgesine ait karakteristik empedansları ifade etmektedir.

Mikroşerit hatta karşılık düşen eşdeğer iletim hattı modeli dikkate alındığında, vakum bölgesinin (Z_v) ve çubuk bölgesinin (Z_d) karakteristik empedansları [60]'deki gibi verilebilmektedir ve denklemler 4.10'da ve 4.11'de ifade edilmiştir.

$$Z_v = 120\pi \left(\frac{w_{şerit}}{c_z - a} + 1.98 \left(\frac{w_{şerit}}{c_z - a} \right)^{0.172} \right)^{-1}. \tag{4.10}$$

$$Z_d = \frac{Z_v}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}}. \tag{4.11}$$

Denklemler 4.10'da ve 4.11'de yer alan ε_r, a, c_z, $w_{şerit}$, k ve ε_{eff} sırasıyla dielektrik destek çubuğunun bağıl dielektrik sabiti, helisin ortalama yarıçapı, YDY'nin zarf yarıçapı, helisin şerit genişliği, alan ekranlama faktörü ve helis destek çubuk bölgesinin etkin bağıl dielektrik sabitini göstermektedir. Helisin dielektrik destek çubuğu bölgesindeki etkin bağıl dielektrik sabiti denklem 4.12'de verilmektedir [28, 55, 60].

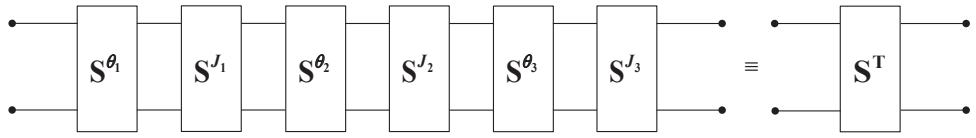
$$\varepsilon_{eff} = k \left(1 + \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{2} \right) \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + 10\,(c_z - a)\,/w_{şerit}}} \right) \right). \tag{4.12}$$

Alan ekranlama faktörü k, $\varepsilon_r \neq 1$ için Lien'nin ilgili çalışmasında [23] 0.5 olarak belirlenmiştir [28, 60]. Vakum bölgelerinin saçılma matrisleri ve jonksiyon saçılma matrisleri θ ve Γ cinsinden denklemler 4.13'te ve 4.14'deki gibi ifade edilebilmektedir.

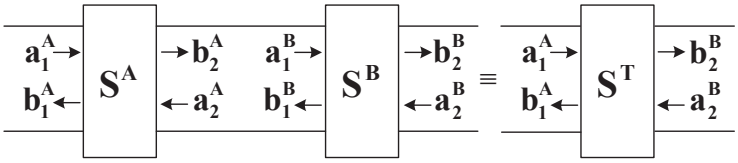
$$\left[S^{\theta_m}\right] = \begin{bmatrix} 0 & e^{-j\theta_m} \\ e^{-j\theta_m} & 0 \end{bmatrix}, m = 1,2,3. \tag{4.13}$$

$$\left[S^{J_n}\right] = \begin{bmatrix} \Gamma & \sqrt{1-\Gamma^2} \\ \sqrt{1-\Gamma^2} & -\Gamma \end{bmatrix}, n = 1,2,3. \tag{4.14}$$

Şekil 4.3(b)'deki eşdeğer iletim hattı devresi kaskat olarak bağlı altı devreden oluşmaktadır. Bu devreye ait GSM gösterimi Şekil 4.4'de açıkça ifade edilmiştir. Şekil 4.3'teki kaskat bağlı devrelerin toplam saçılma matrisi ($\mathbf{S^T}$)'ni belirlemek için, iki kaskat bağlı devre durumu için verilen aşağıdaki hesaplama prosedürü doğru bir şekilde uygulanmalıdır. Şekil 4.5'te verilen $\mathbf{S^A}$ ve $\mathbf{S^B}$ sırasıyla kaskat bağlı iki devrenin saçılma matrisini temsil etmektedir. Şekil 4.5'te verilen $\mathbf{a_1}$, $\mathbf{a_2}$ ve $\mathbf{b_1}$, $\mathbf{b_2}$ ifadeleri sırasıyla genelleştirilmiş saçılma matrisinin tanımında kullanılan referans düzlemlerinden gelen ve yansıyan dalgaların kompleks genlikleridir. Bu durumda



Şekil 4.4 : 1. durum için genelleştirilmiş saçılma matrisi gösterimi.



Şekil 4.5 : Kaskat bağlı süreksizliklerin ve devrelerin GSM gösterimi.

kaskat bağlı devrenin genelleştirilmiş saçılma matrisi ($\mathbf{S^T}$) denklemler 4.15-4.19 'daki formda yazılabilmektedir.

$$\mathbf{S_{11}^T = S_{11}^A + S_{12}^A F S_{11}^B S_{21}^A}. \tag{4.15}$$

$$\mathbf{S_{12}^T = S_{12}^A F S_{12}^B}. \tag{4.16}$$

$$\mathbf{S_{21}^T = S_{21}^B E S_{21}^A}. \tag{4.17}$$

$$\mathbf{S_{22}^T = S_{22}^B + S_{21}^B E S_{22}^A S_{12}^B}. \tag{4.18}$$

$$\mathbf{E = (I - S_{22}^A S_{11}^B)^{-1}} \ , \ \mathbf{F = (I - S_{11}^B S_{22}^A)^{-1}}. \tag{4.19}$$

Denklemler 4.15-4.19'de yer alan saçılma parametrelerinde yer alan üst indis $^{\mathbf{A}}$ ve $^{\mathbf{B}}$, Şekil 4.5'teki $\mathbf{S^A}$ ve $\mathbf{S^B}$ devrelerine ilişkin saçılma parametrelerini göstermektedir. Denklem 4.19'da verilen $\mathbf{I}$ birim matrisi göstermektedir. Şekil 4.5'teki bu gösterim $\mathbf{S^A}$ ve $\mathbf{S^B}$ arasında herhangi bir iletim hattı bölümü içermemektedir. $\mathbf{S^A}$ ve $\mathbf{S^B}$ ifadeleri $\mathbf{S^{\theta_1}}$ ve $\mathbf{S^{J_1}}$ ile yer değiştirilirse ve iteratif olarak yukarıda bahsedilen prosedür doğru bir şekilde kaskat bağlanarak uygulandığında, helisli YDY'nin toplam saçılma matrisi doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir.

4.3.2 2. Durum: dielektrik çubukların dielektrik sabiti değerinin değişimleri

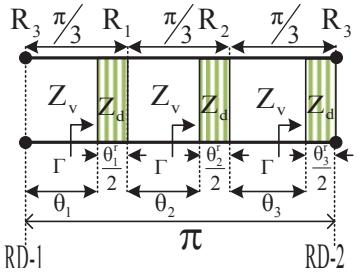
Helisli YDY'nin dielektrik destek çubuklarından birinin dielektrik sabiti değeri değiştirildiğinde, oluşan durumun eşdeğer iletim hattı modeli 1. durumda verilen eşdeğer devreye eşittir ve bu durumda ortaya çıkan asimetrinin durdurma bandgenişliğinin π-noktası frekansına oranı olan bağıl durdurma bandgenişliği (BDB) üzerindeki etkisi incelenebilmektedir.

4.3.3 3. Durum: dielektrik destek çubuk genişliğinin değişimleri

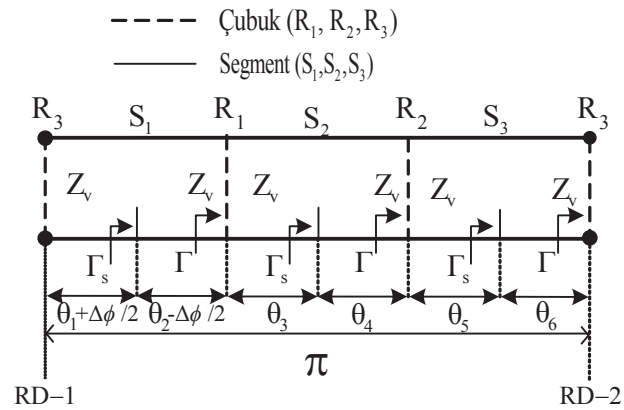
Dielektrik destek çubuklarından birinin genişliği (w^r)'nin değişimi ele alındığında, tek sarımlı helisin eşdeğer devre gösterimi Şekil 4.6'da çizilmiştir. 3. Durum için eşdeğer iletim hattı devresi kaskat bağlı on iki devre içermektedir. Vakum bölgelerinin, vakumdan çubuğa geçişteki jonksiyonların, dielektrik çubuk bölgesinin, dielektrik çubuktan vakuma geçişteki süreksizlik bölgesinin saçılma matrislerinin doğru bir şekilde elde edilmesi gereklidir. Vakum ve çubuk bölgelerinin saçılma matrisleri için elektriksel uzunluklar π-noktası frekansında $\theta_1 = \pi/3 - \theta_1^r/2$, $\theta_2 = \pi/3 - \theta_2^r/2$, $\theta_3 = \pi/3 - \theta_3^r/2$ olarak elde edilebilmektedir ve verilen elektriksel uzunluklardaki θ_n^r ($n = 1,2,3.$ için) ifadesi w_n^r/a olarak ifade edilmektedir. Dielektrik destek çubuklarının kalınlıkları ihmal edildiğinde, destek çubuk bölgelerinin elektriksel uzunlukları devre gösteriminde sıfır olmaktadır. Bu durumda Şekil 4.6'da gösterilen 3. durum, Şekil 4.1'de verilen 1. duruma indirgenmiş olmaktadır.

4.3.4 4. Durum: metal segmentlerin açısal kaydırımı

Bu durum için, helisli YDY'ye eşit aralıklı üç adet kama biçimli metal segment eklenmektedir ve oluşan durumun eşdeğer devre modeli Şekil 4.7'de verilmektedir. Ele alınan bu durumda metal segment ve çubuk kalınlıklarının ihmal edildiği varsayılmıştır. Eşdeğer iletim hattı devresi on iki kaskat bağlı devreden oluşmaktadır. Ele alınan durumda ilk metal segment $\Delta\phi$ açısal kaydırıma sahiptir. Vakumdan segmente geçişteki süreksizliğin jonksiyon yansıma katsayısı $\Gamma_s = (Z_s - Z_v)/(Z_s + Z_v)$ olarak yazılabilmektedir ve bu ifadedeki Z_s metal segmentin karakteristik empedansını göstermektedir. [60]'de verilen süreksizlik bölgesindeki kapasitans etkisi ihmal edilmiş



Şekil 4.6 : π-noktası frekansında dielektrik destek çubuk genişliklerinin değişimleri ($w^r \pm \Delta w^r$) için helisli YDY'nin eşdeğer iletim hattı gösterimi (3. durum).



Şekil 4.7 : π-noktası frekansında metal segmentlerden birinin açısal kaydırımı için helisli YDY'nin eşdeğer iletim hattı gösterimi (4. durum).

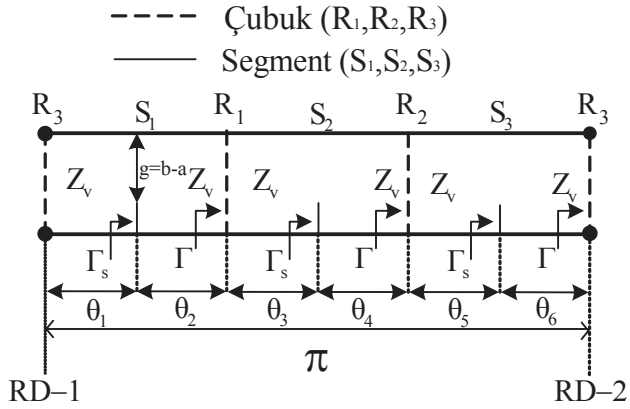
segment bölgesine ait karakteristik empedans ifadesi denklem 4.20'de verilmiştir.

$$Z_s = 120\pi \left(\frac{w_{şerit}}{b_s - a} + 1.98 \left(\frac{w_{şerit}}{b_s - a} \right)^{0.172} \right)^{-1} . \tag{4.20}$$

4.20 no'lu denklemde verilen b_s segment yarı çapını göstermektedir. 4. duruma ait toplam saçılma matrisi Şekil 4.7 dikkate alınarak 1. durumda bahsedilen kaskat bağlı devreler için takip edilen prosedür yoluyla türetilebilmektedir.

4.3.5 5. Durum: helis ve metal segment arasındaki boşluğun değişimleri

Helis ve metal segment arasındaki boşluk (g) segment empedansını etkilemektedir ve ele alınan asimetrik durumun analizi için saçılma matrisi doğru bir şekilde belirlenmelidir. Ele alınan duruma ait iletim hattı devre gösterimi Şekil 4.8'de verilmiştir ve ilgili iletim hattı devresinde metal segment ve dielektrik çubuk kalınlıklarının ihmal edildiği varsayılmıştır. Benzer şekilde, Şekil 4.8'de gösterilen eşdeğer devrede on iki kaskat bağlı devre mevcuttur. Kaskat bağlı devrenin GSM'sinin



Şekil 4.8 : Helis ile metal segment arasındaki boşluğun değişimi ($g \pm \Delta g$) için helisli YDY'nin eşdeğer iletim hattı gösterimi (5. durum).

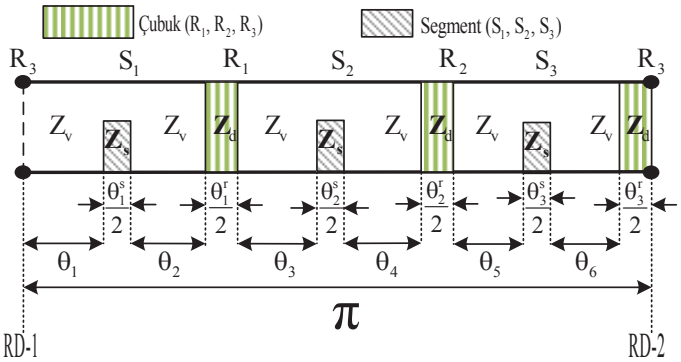
belirlenmesi, Şekil 4.8'deki kaskat devreler için 1. durumda anlatılan prosedür ile elde edilebilmektedir.

4.3.6 6. Durum: metal segment genişliğinin değişimleri

Bu durum için, metal segment genişliği ve destek çubuk genişliğine ilişkin elektriksel uzunluklar θ^s and θ^r dikkate alınarak eşdeğer iletim hattı modeline dahil edilmiştir. Buna ek olarak, destek çubukları ve metal segmentler arasındaki her bölgeye ait elektriksel uzunluklar [55]'te de belirtildiği gibi $\theta_1 = (\pi/6 - \theta_1^s/4 - \theta_1^r/4)$, $\theta_2 = (\pi/6 - \theta_1^r/4 - \theta_2^s/4)$, $\theta_3 = (\pi/6 - \theta_2^s/4 - \theta_2^r/4)$, $\theta_4 = (\pi/6 - \theta_2^r/4 - \theta_3^s/4)$, $\theta_5 = (\pi/6 - \theta_3^s/4 - \theta_3^r/4)$, $\theta_6 = (\pi/6 - \theta_3^r/4 - \theta_1^s/4)$ olarak elde edilmektedir. Bu ifadelerde yer alan θ_n^s (n=1, 2, 3 için) ifadesi segment genişliği w_n^s olarak tanımlandığında w_n^s/b olarak π-noktası frekansı için yazılmaktadır. Şekil 4.9'da verilen gösterim yirmi dört kaskat bağlı devreye sahiptir ve eşdeğer iletim hattına ait saçılma matrisi 1. durumda verilen prosedür yoluyla doğrudan belirlenebilmektedir.

4.4 Sayısal Örnekler

Helisli YDY için YFGSM teorisi ve asimetrik yüklü helis YDY'nin farklı durumları için GSM gösterimi bölüm 4.2'de ve 4.3'te açıkça ifade edilmiştir. Yöntemin asimetrik yüklü helisli YDY'ler üzerinde uygulanabilirliğini göstermek için, boyutları ve bağıl durdurma bandgenişlikleri mevcut literatürde verilen [21, 24, 28], yaygın olarak kullanılan iki helisli YDY modeli (YDY-I ve YDY-II) dikkate alınmıştır. YDY-I ve YDY-II modellerinin her ikisinde de üç adet dikdörtgen biçimli dielektrik destek çubuğu bulunmaktadır. YDY-I ve YDY-II modellerine ait parametreler Çizelge 4.1'de listelenmiştir. Çizelge 4.1 ayrıca daha önce bölüm 4.3.1'de ifade edilmeyen



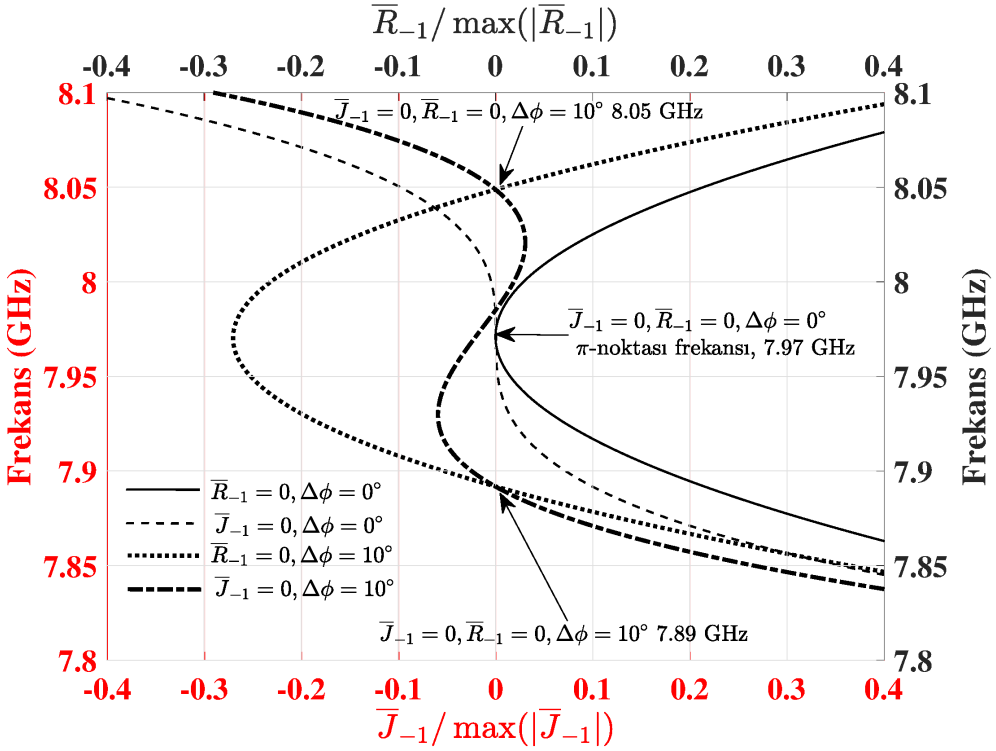
Şekil 4.9 : Metal segment genişliğindeki değişimler için helisli YDY'nin eşdeğer iletim hattı gösterimi (6. durum).

Çizelge 4.1 : Ele alınan helisli YDY'ler ve ilgili parametre değerleri.

YDY	ε_r	$p(mm)$	$a(mm)$	$r_0(mm)$	$c_z(mm)$	$\psi(derece)$	$w_{şerit}(mm)$	$w^r(mm)$
YDY-I [21, 28]	6.3	3.18	2.73	2.87	5.2	10.5	0.9	0.64
YDY-II [24, 28]	5.12	1.8	1.52	1.645	2.64	11.60	0.89	0.51

helis hatvesi p, helisin dış yarıçapı (r_0), hatve açısı (ψ) ve çubuk genişliği (w^r) parametrelerini de içermektedir. YDY-I modeli metal segment içermemesine karşın, YDY-II modeli metal segment içermektedir.

YDY-I modelinde dielektrik destek çubuklarından birinin açısal kaydırımının $\Delta\phi = 0°$ ve $\Delta\phi = 10°$ durumları için YFGSM ile elde edilen durdurma bandı diyagramları Şekil 4.10'da verilmektedir. $\overline{J}_{-1}$ ve $\overline{R}_{-1}$ yardımcı fonksiyonlarının değişimleri Şekil 4.10'da açıkça çizilmiştir. Şekil 4.10'da gösterildiği gibi, $\Delta\phi = 0°$ çözümüne karşı düşen π-noktası frekansı 7.97GHz olarak elde edilmiştir. π-noktası frekansında $\overline{J}_{-1} = 0$ ve $\overline{R}_{-1} = 0$ noktaları Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Buna ek olarak, $\Delta\phi = 10°$ için, YDY'nin durdurma bandı diyagramı da Şekil 4.10'da gösterilmiştir. $\overline{J}_{-1} = 0$

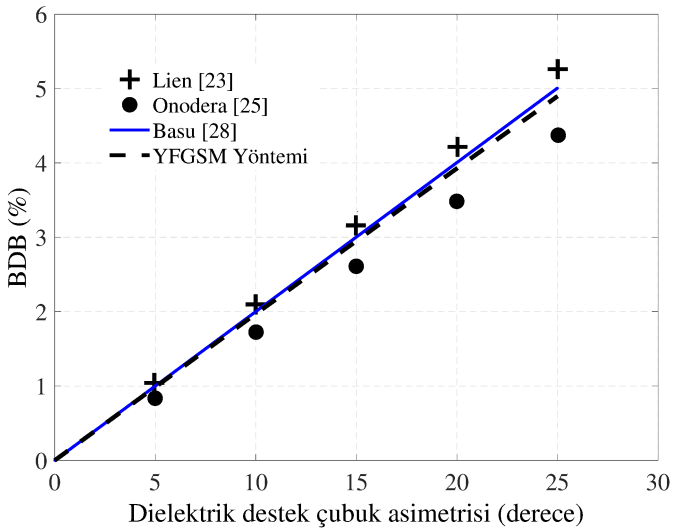


Şekil 4.10 : YDY-I'in dielektrik destek çubuklarından birinin $\Delta\phi = 0°$ ve $\Delta\phi = 10°$ açısal değişiminden ileri gelen durdurma bandı diyagramı.

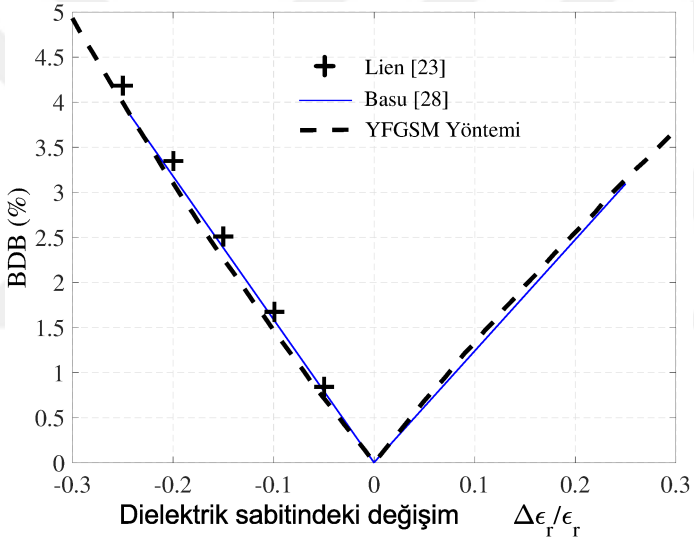
ve $\overline{R}_{-1} = 0$'ın ortak sıfırları 7.89GHz ve 8.05GHz arasında bir durdurma bandı vermektedir. π-noktası frekansıda 7.97GHz olarak dikkate alındığında, bağıl durdurma bandgenişliği %2 olarak hesaplanmaktadır. Birçok açısal asimetri durumları için, band ucu frekansları, durdurma bandları ve BDB'ler Çizelge 4.2'de verilmiştir. Çizelge 4.2, açısal asimetrinin durdurma bandları ve BDB değerleri üzerindeki etkilerini sunmaktadır. Benzer şekilde, helisli YDY'nin farklı birçok açısal asimetri durumları için, BDB değerleri YFGSM yönteminin amaçlanan $\overline{J}_{-1}$ ve $\overline{R}_{-1}$ yardımcı fonksiyonları yardımıyla açık bir şekilde hesaplanmaktadır. Buna ek olarak, helisli YDY-I modelinin dielektrik destek çubuklarının açısal kaydırımı, dielektrik çubuklara ait dielektrik sabiti değerlerinin değişimlerinden kaynaklanan bağıl durdurma bandına ait benzetim sonuçları Şekil 4.11 ve 4.12'de Lien [23], Onodera [25] ve Basu [28]'nun yayınladığı sonuçlar ile birlikte gösterilmektedir. Şekil 4.11'de artı işareti ile verilen sonuçlar Lien'nin çalışmasından [23], nokta işareti ile verilen sonuçlar Onodera'nın çalışmasından [25] ve düz çizgi ile verilen sonuçlar Basu'nun çalışmasından [28] alınmıştır. Şekil 4.12'de artı işareti ile verilen sonuçlar Lien'nin çalışmasından [23] ve düz çizgi ile verilen sonuçlar Basu'nun çalışmasından [28] alınmıştır. [23], [25] ve [28]'de verilen ve Şekiller 4.11 -4.12'de gösterilen sonuçlar ile YFGSM'den elde edilen benzetim sonuçlarının mükemmel uyum gösterdiği görülmektedir. Destek çubuk genişliği değişimlerinin BDB üzerindeki etkileri Şekil 4.13'te çizdirilmiştir. Şekil 4.13'de düz çizgi ile verilen sonuçlar Basu'nun çalışmasından [28] alınmıştır. [28] no'lu referanstaki sonuçlar ile önerilen YFGSM yönteminin verdiği sonuçlar arasında küçük farklılıklar olduğu Şekil 4.13'ten görülebilmektedir. Kama biçimli

Çizelge 4.2 : YDY-I'in çubuk açısal asimetrisi için yeniden formüle edilmiş YFGSM yöntemine ait band ucu frekansları ve bağıl durdurma bandı sonuçları.

Açısal asimetri (deg) $\Delta\phi$	Band uçları (GHz) $(\overline{J}_{-1} = 0, \overline{R}_{-1} = 0)$	Durdurma bandı (MHz)	BDB (%)
0°	7.97	0	0
5°	7.93, 8.01	80	1
10°	7.89, 8.05	160	2
15°	7.85, 8.09	240	3.01
20°	7.81, 8.12	310	3.89
25°	7.77, 8.16	390	4.89

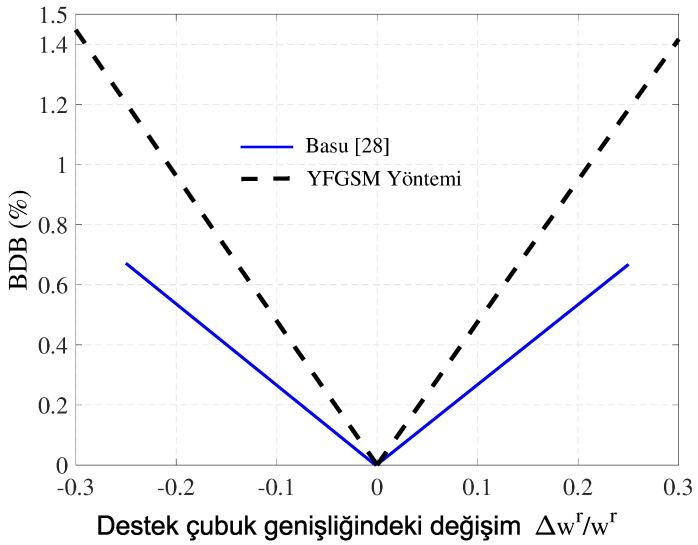


Şekil 4.11 : YDY-I'de dielektrik destek çubuklarından birine ait açısal asimetriden ileri gelen bağıl durdurma band genişliğinin değişimi.

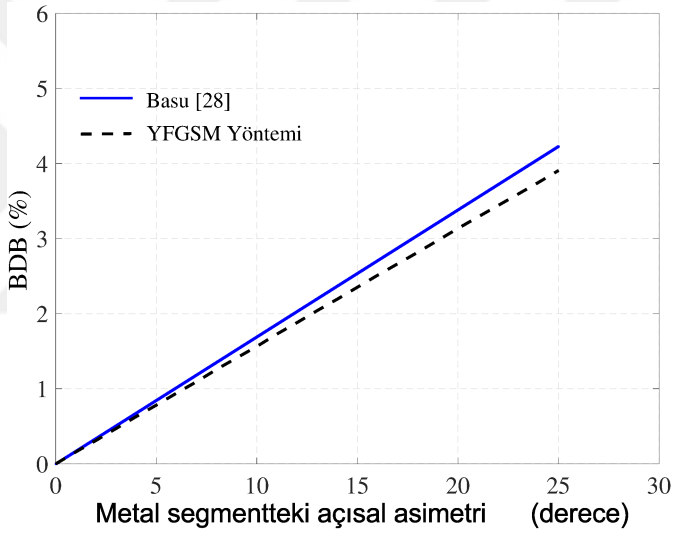


Şekil 4.12 : YDY-I'de dielektrik çubuklardan birinin dielektrik sabiti değerlerinin değişiminden ileri gelen bağıl durdurma bandının değişimi.

segment yüklü YDY-II modeli 2.1mm segment yarıçapına ve 35° segment açısal genişliğine (θ^s) sahiptir. YDY-II modelinde metal segmentlerden birinin açısal kaydırımı ve helis ile metal segment aralığının değişimlerinden kaynalanan asimetriler sonucu oluşan BDB'lere ait benzetim sonuçları Şekil 4.14 ve 4.15'te gösterilmiştir. Şekil 4.14'te düz çizgi ile verilen sonuçlar Basu'nun çalışmasından [28] alınmıştır. Şekil 4.15'te nokta işareti ile verilen sonuçlar Onodera'nın çalışmasından [25] ve düz çizgi ile verilen sonuçlar Basu'nun çalışmasından [28] alınmıştır. Şekil 4.14 ve 4.15'te de görüldüğü gibi önerilen YFGSM yöntemi ile literatürde mevcut sonuçların ele alınan aynı durumlar için oldukça tutarlı olduğu gözlenmektedir. Şekil 4.16'da



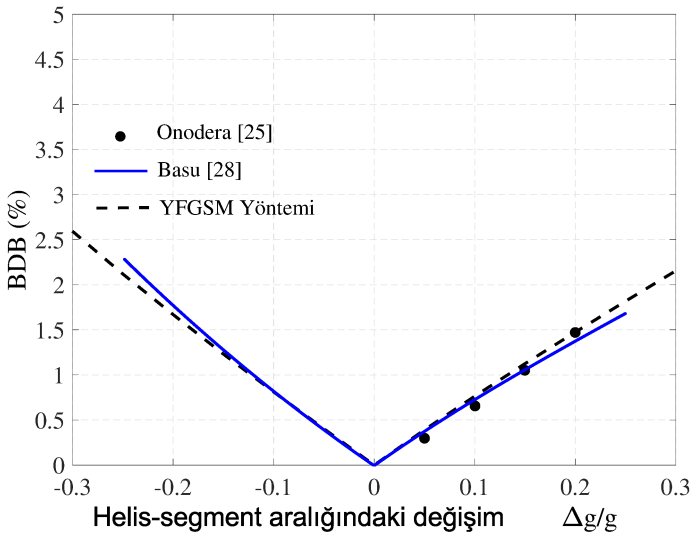
Şekil 4.13 : YDY-I'de dielektrik destek çubuk genişliğinin değişiminden ($w^r \pm \Delta w^r$) ileri gelen bağıl durdurma bandının değişimi.



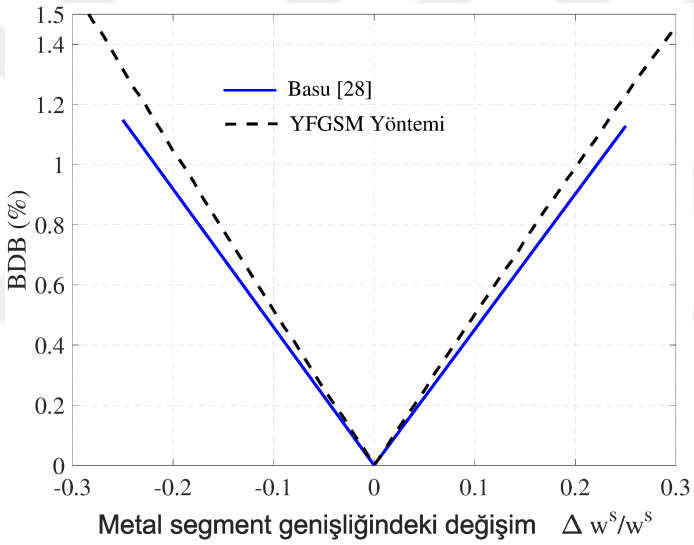
Şekil 4.14 : YDY-II'de metal segmentlerden birinin açısal değişiminden ileri gelen bağıl durdurma bandı değişimi.

metal segment ve dielektrik çubuk kalınlıkları dikkate alındığında YDY-II'nin segment genişliğinin değişimine göre BDB'nin değişimini göstermektedir. Şekil 4.16'da düz çizgi ile verilen sonuçlar Basu'nun çalışmasından [28] alınmıştır.

İncelenen tüm benzetim sonuçlarına göre, dielektrik destek çubuklarının açısal asimetrisi durdurma bandı karakteristiğini baskın bir ölçüde değiştirmektedir. Buna ek olarak, dielektrik destek çubuklarının dielektrik sabiti değerinin değişimi de BDB değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Diğer yandan, destek çubuk/metal segment genişlikleri ve helis ile segment arasındaki boşluğun değişimleri BDB üzerinde %1'den az bir etkiye sahiptir. Metal segment ve dielektrik destek



Şekil 4.15 : YDY-II'de metal segmentlerden biri ile helis arasındaki boşluktan ileri gelen bağıl durdurma bandı değişimi.



Şekil 4.16 : YDY-II'de metal segment genişliklerinden birinin değişiminden $w^s \pm \Delta w^s$ ileri gelen bağıl durdurma bandı değişimi.

çubuklarında oluşabilen tüm asimetriler bir arada ele alındığında oluşabilecek etkilerin de analiz edilmesi gerektiğini vurgulamak önemlidir.

4.5 Sonuç

Bu bölümün ana katkısı yeniden formüle edilen YFGSM yönteminin sunulması ve asimetrik yüklü helis YDY'lerin π-noktası frekansının analizinde ilgili YFGSM yönteminin uygulanabilirliğinin araştırılmasıdır. Bu bağlamda, helisli YDY'nin durdurma bandı karakteristiği, sunulan YFGSM yöntemi ile destek çubuklarının ve metal segmentlerin birçok asimetri durumları için incelenmiştir ve benzetim sonuçları

mevcut literatürde yayınlanan çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Amaçlanan YFGSM yöntemi ile mevcut çalışmaların arasında mükemmel uyumluluklar sunulan yöntemin asimetrik yüklü helisli YDY'lerin durdurma bandı karakteristiklerini değerlendirmek için etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Bu ek olarak, amaçlanan yöntem helisli YDY'nin parametrelerinin eniyilenmesi için kullanılabilmektedir. Bu nedenle, YFGSM yöntemi asimetrik yüklü helisli YDY'lerin durdurma bandlarının hesaplanması için kuple mod analizine alternatif bir yöntem olabilmektedir. Bundan başka, oldukça karmaşık helisli YDY için üç boyutlu elektromagnetik benzetim programlarında GSM hesaplandığında, YFGSM yöntemi de üç boyutlu ticari tasarım ortamında güçlü bir modül olarak kullanılabilmektedir. [41]'de önerilen kapsamlı YFGSM yönteminin de asimetrik yüklü helisli YDY'lere uygulanabileceği belirtilmelidir. Bu amaçla, asimetrik yüklü helisli YDY'lerdeki gelecek araştırmalarda YFGSM yönteminin yeni bir bakış açısı sağlayacağı umulmaktadır.

5. YÜRÜYEN DALGALI TÜPLERDE HELİSLİ YAVAŞ DALGALI YAPILARIN Π-NOKTASI FREKANSI VE DURDURMA BANDI İÇİN OLDUKÇA HIZLI VE BASİT BİR TASARIM PROSEDÜRÜ

Genişbandlı ve yüksek güçlü YDT'lerin tasarımındaki ana problemlerden biri π-noktası frekans bölgesi civarında oluşan band içi güç boşluklarının ve geri dalga osilasyonlarının kontrol edilebilmesidir. Bu sebeple, π-noktası frekansı ve durdurma bandlarının belirlenmesi YDT tasarımcıları için önemli sorunlardır.

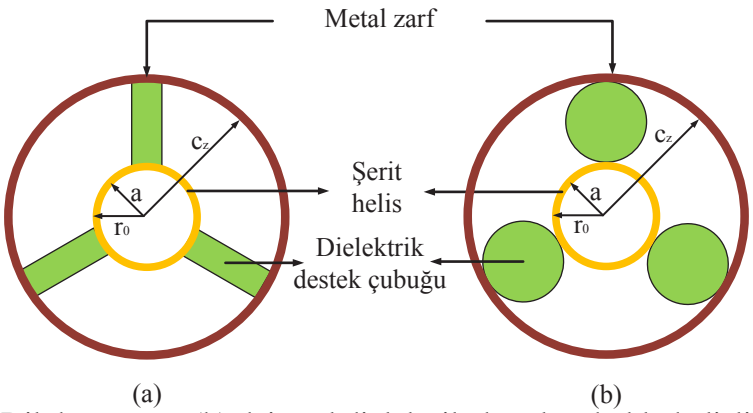
Bu bölümde YDT'lerde kullanılan dikdörtgen/dairesel dielektrik yüklü helisli YDY'lerin π-noktası frekansı ve durdurma bandı analizi için YFGSM yöntemine dayanan hızlı ve basit bir tasarım prosedürü geliştirilmiştir. Sunulan yaklaşımın geçerliliğini göstermek için, çalışma frekansları sadece mikrodalga bölgesinde değil aynı zamanda milimetre dalga frekanslarında da olan literatürde mevcut helisli YDY'lerin π-noktası frekans ve durdurma bandı değerlerinin analizi ve tasarımı YFGSM yöntemi, Kuple Mod Analizi (KMA), Kesin Floquet Yaklaşımı (KFY) ve CST tasarım ortamı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Araştırılan yöntemlere ait karşılaştırmalar yapılmıştır ve iyi uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Amaçlanan hızlı ve basit tasarım prosedürünün geniş bir frekans aralığında farklı helisli YDY'lerin π-noktası frekansı ve durdurma bandı tasarımı için etkili bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.

5.1 Giriş

YDT'lerin yayın yapan uydu sistemleri de dahil olmak üzere birçok haberleşme sistemi uygulamalarında yer istasyonunun bir RF cihazı olarak önemli bir rol oynadığı iyi bilinmektedir. YDT'ler, haberleşme uyduları, radarlar ve elektronik harp sistemlerinde son güç kuvvetlendiricileri olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [5, 62, 63]. Tipik YDT'ler, elektron tabancası, yavaş dalgalı yapı , giriş/çıkış kuplörleri, odaklama düzeni ve toplayıcı olarak isimlendirilen beş ana bölümden oluşmaktadır. Elektron tabancası, YDY'nin girişinden gelen ve YDY içerisinde yayılan RF elektromagnetik dalga ile etkileşim içinde olan elektron demetini

oluşturmakta ve biçimlendirmektedir. Odaklama düzeni YDY'deki etkileşim işlemi için elektron demetinin düzgün bir biçimde belirli bir bölgede sınırlandırılmasını sağlamaktadır. Bu etkileşim, elektronların enerjisinin elektromagnetik dalgaya transfer edildiği bir kuvvetlendirme işlemi ile sonuçlanmaktadır. Giriş/çıkış kuplörleri sistemi, giriş kuplöründe RF işaretin sürülmesini ve çıkış kuplöründe YDT'nin gerekli çıkış gücünü elde etmek için YDY'nin giriş ve çıkış kapılarına bağlıdır [5, 11, 13]. Toplayıcı bloğu, enerjisi azalan elektronların toplanmasını sağlamakla ve YDT'nin verimini iyileştirmek için enerjisi azalan elektron demetinden güç kurtarımına katkı sunmakla görevlidir [13]. YDT sisteminin ilgili bölgesinde demet dalga etkileşimi ve kuvvetlendirme işleminden dolayı genellikle düzgün hatveli helisin kullanıldığı YDY düzeninin önemli bir blok olduğu açıkça belirtilebilmektedir.

Helisli YDY'ler tipik olarak Şekil 5.1'de de gösterildiği gibi metal bir zarf içerisinde helisin etrafında uzunlamasına bir şekilde yerleştirilmiş dikdörtgen/ dairesel dielektrik çubuklarla yüklü metalik bir helisten oluşmaktadır [21, 22, 27, 28, 57–59, 64, 65]. Helisli YDY'nin eniyilenmiş tasarımı ile, ilgili yapının dispersiyon karakteristiği ve etkileşim empedansı iyileştirilebilmektedir ve bu durum geniş çalışma bandı, yüksek güç ve yüksek kazanç gibi YDT'nin tasarım hedeflerini etkileyen başlıca bir faktördür [66]. Bu problem dikdörtgen [27, 57, 58, 65], dairesel [57] ve/veya diğer geometrik biçimlere [65] sahip farklı dielektrik destek çubuklu tasarım konfigürasyonları ile yüklü helisli yavaş dalgalı yapının dispersiyon karakteristiklerinin kontrol edilmesiyle düzenlenebilmektedir. Bununla beraber, dielektrik yükleme işlemi ile RF dalganın faz hızı ve YDT'nin π-noktası frekansı düşmektedir [5]. Helisli YDY'deki elemanlardan herhangi birinin asimetrik yerleşiminden dolayı π-noktası frekansı civarında meydana



Şekil 5.1 : (a) Dikdörtgen ve (b) dairesel dielektrik destek çubuklu helisli YDY'lerin kesin görünümleri.

gelen durdurma bandı, YDT'nin güç kapasitesini sınırlayan ilgili çalışma frekans bandında güç boşlukları ve band ucu osilasyonlarına neden olabilmektedir. Bu sebeple, arzu edilen YDT'lerin tasarımında π-noktası frekans bölgesi karakteristiklerini analiz etmek önemli bir hal almaktadır [22, 27, 28, 30, 64].

Mevcut literatürde π-noktası frekans bölgesinde güç sorununu ele alan [23, 25–28, 30–32, 42, 67–69] referans numaralı çalışmalar mevcuttur. [23, 26–28, 31, 32] referans no'lu çalışmalar temelde KMA'ya dayanan yöntemlerdir. Helisli YDY'nin temel ileri uzay harmonik ve ilk geri uzay harmonik modlar olarak isimlendirilen iki ana konumsal harmoniğe sahip olduğu [27, 28] ve [31, 32] no'lu referanslarda güçlü bir şekilde ifade edilmiştir. Kuple mod analizine göre; helisli YDY, üretim hataları, helisli YDY'ye ait elemanların bölüm 4'te de ifade edilen bir yer değişiminden kaynaklanan herhangi bir asimetrik yerleşim içermediğinde ilgilenilen bu iki mod π-noktası frekansında kesişmektedir. Kuple mod analizi, toplam yansıma katsayısının bulunmasına dayanan bir kuplaj katsayısının hesabına ihtiyaç duymaktadır. Diğer yandan, helisli YDY'nin sadece tek sarımına ait toplam yansıma katsayısının değil aynı zamanda tüm saçılma parametrelerinin ilgili yapının π-noktası frekans karakteristiğinin bulunmasında dikkate alınması önemli bir katkı gerçekleştirebilmektedir. Periyodik yapıların analizinde yaygın olarak kullanılan GSM gösterimi, helisli YDY'nin bir sarımına ait tüm saçılma parametrelerinin elde edilmesinde kullanılabilmektedir [51, 52, 70].

KMA'ya alternatif olarak, bir veya birden fazla Floquet mod yayılım(lar)ının dikkate alınabildiği Kesin Floquet Yaklaşımı (KFY) dikdörtgen/dairesel dielektrik yüklü helisli YDY'nin π-noktası frekansının belirlenmesinde kullanılabilmektedir. Bu bağlamda, özdeğer denkleminin türetilme adımında GSM gösterimi kullanılarak KFY teorisinin uygulanması için ele alınan problem potansiyel olarak uygun olmaktadır. Bu yol ile ilgili problemin analizi, Floquet faz faktörü içeren tek modlu Floquet yayılımına indirgenebilmektedir. Tek Floquet modlu dispersiyon denklemi sadece toplam yansıma katsayısını değil aynı zamanda frekansın fonksiyonu olan helisin birim periyodu başına faz kaymasının hesaplanmasını gerektiren helisli YDY'nin birim hücresine ait saçılma parametrelerinin diğer elemanlarını da içermektedir. Bununla beraber, KFY ilgili problemin π-noktası frekansı ve durdurma band ucu frekanslarının belirlenmesinde çok sık frekans taramalı bir özdeğer denklemi çözümü gerektirdiğinden verimsizdir.

YFGSM yöntemi ilk olarak periyodik dielektrik yüklü metalik dalga kılavuzlarında

GSM gösterimine dayanan [51] referans numaralı çalışmada ifade edilmiştir. Bu bağlamda simetrik birim hücre varsayımı altında periyodik dielektrik yüklü dikdörtgen dalga kılavuzlarının iletim/durdurma band geçiş frekansları [51]'de sunulan yöntem ile doğru bir şekilde elde edilebilmektedir. Sonrasında ilgili yöntem [52] no'lu referansta da ifade edildiği gibi, bir boyutlu fotonik kristallerin fotonik durdurma bandlarının belirlenmesi ve tasarımında optik frekans bölgesinde uygulanmıştır. [51] ve [52] no'lu çalışmalarda sunulan yöntemler simetrik birim hücreli periyodik yapıların analizi ve tasarımı için sınırlı kalmaktadır. İlgili orijinal formülasyonun bu kısıtlaması [41] no'lu çalışmada da belirtildiği gibi simetri koşulunun kullanılmamasıyla ortadan kaldırılmıştır. Kapsamlı (KYFGSM) olarak isimlendirilen yeni teknik; helisli YDY'ler, bir boyutlu fotonik kristaller ve dielektrik yüklü dikdrtgen dalga kılavuzları gibi simetrik ve asimetrik birim hücrelere sahip olabilen periyodik yapılar için uygulanmış ve geçerli olduğu görülmüştür [41]. KYFGSM yöntemi [55] no'lu çalışmada yeniden formüle edilmiş ve oldukça basit ve zarif yardımcı fonksiyonlar geliştirilmiş ve ilgili fonksiyonlar asimetrik yüklü helisli YDY'lerin durdurma bandı analizlerine uygulanmıştır.

Bu bölüm, sadece mikrodalga çalışma bölgesinde değil aynı zamanda milimetre dalga frekanslarında da çalışan helisli YDY'lerin arzu edilen π-noktası frekansı ve durdurma bandlarının elde edilmesinde kullanılabilecek, YFGSM yöntemine dayanan hızlı ve basit bir tasarım prosedürünün geliştirilmesini hedeflemektedir. Bu bağlamda ilk olarak, bir karşılaştırma çalışması anlamında literatürde mevcut dikdörtgen/dairesel dielektrik destek çubuk konfigürasyonlarına sahip, tüm parametre bilgilerinin dikkate alındığı helisli YDY'lerin π-noktası frekansının detaylı analizi KMA, KFY ve YFGSM yöntemleri kullanılarak sunulmuştur. İkinci olarak, amaçlanan tasarım prosedürü mevcut literatürde yaygın olarak yer alan helisli YDY'lerin π-noktası frekansı ve durdurma bandı tasarımında doğrulanmıştır. Sunulan prosedür yardımcı fonksiyonların sıfır geçişleri kullanılarak ilgili parametre takımlarına göre helisli YDY'lerin π-noktası frekanslarının değişimlerinin bulunmasıyla, ilgili helisli YDY'ye ilişkin π-noktası frekansını ve durdurma bandını kolay bir şekilde tasarlayabilmektedir. Buna ek olarak; ilgili tüm helisli YDY'ler, CST elektromagnetik benzetim ortamında karşılaştırma amacıyla modellenmiştir.

5.2 Helisli Yavaş Dalgalı Yapıların π-noktası Frekansı Analiz Teknikleri

YDT'lerde yer alan helisli YDY'lerin π-noktası frekansı analizlerinde literatürde mevcut birçok yöntem yer almaktadır. Bu alt bölümde literatürde yer alan KMA, KFY ve YFGSM yöntemleri incelenmektedir. Her yöntem arasındaki farklılığı belirtmek için aşağıdaki alt bölümlerde ilgili yöntemlerin teorileri açık ve öz bir şekilde ifade edilmiştir.

5.2.1 Kuple mod analizi

Bu bölümde, helisli YDY'nin π-noktası frekansının belirlenmesinde kullanılan KMA formülasyonu ana hatları ile ifade edilecektir. YDT'lerdeki asimetrik yüklü helisli YDY'lerin mod etkileşimlerini anlamak için KMA yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [22, 27, 28]. Bu yaklaşım, π-noktası frekansı civarında ileri ve geri uzay harmonik dalgaların etkileşimine dayanmaktadır. İdeal durumda, helisli YDY'de dielektrik destek çubukları, herhangi bir asimetri oluşmaksızın mükemmel bir şekilde yerleştirilmektedir ve bu durumda helisli YDY'lerin ileri ve geri dalgaları arasında herhangi bir kuplaj mümkün olmamaktadır. Kullanılan destek çubuklarındaki açısal asimetri, dielektrik sabit değerlerinin ve çubuk genişliklerinin değişimi gibi dielektrik destek çubuklarındaki herhangi bir asimetrik yerleşim, yansımaların oluşmasına neden olmaktadır. Bu durumda, helisli YDY'nin ileri ve geri dalgaları birbirleri ile etkileşime girmektedir ve ilgili modlar artık kuple hibrid modlara dönüşmektedir. Bu durum, [27] ve [28] no'lu çalışmalarda belirtildiği gibi helisli YDY'nin tek bir sarımına ait merdiven devre gösterimi ile modellenebilmektedir. Π-noktası frekansı civarında helisli YDY'nin kuple modlarının yayılım sabitlerini elde etmek için denklem 5.1'de yer alan kuple-mod dispersiyon denklemi elde edilmiştir [27, 28, 31, 32].

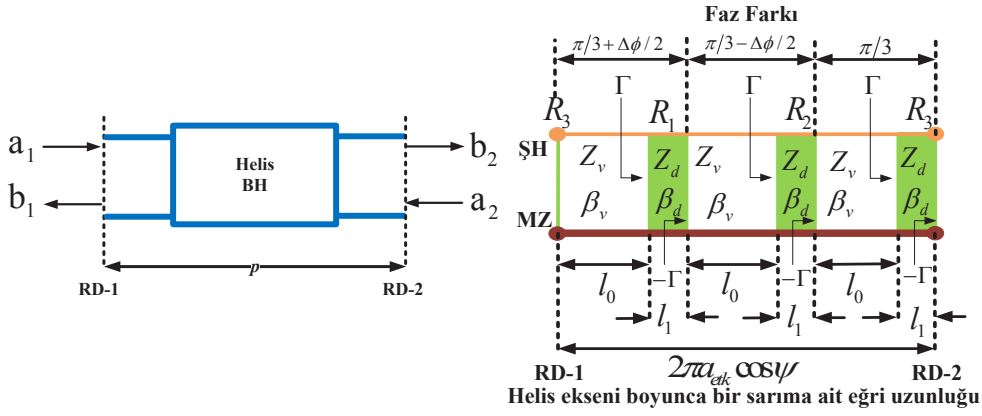
$$\beta_{1,2}^{h} = \left(\frac{\beta_0^{bh} + \beta_{-1}^{bh}}{2} \right) \pm \left[\left(\frac{\beta_0^{bh} - \beta_{-1}^{bh}}{2} \right) - K^C \right]^{1/2}. \tag{5.1}$$

Denklem 5.1'de yer alan $\beta_{1,2}^{h}$, β_0^{bh} ve β_{-1}^{bh} ifadeleri sırasıyla hibrid modlara ait yayılım sabitleri, kuple olmayan ileri ve geri uzay harmonik dalgaların yayılım sabitlerini göstermektedir. Denklem 5.1'de yer alan kuple hibrid modların elde edilmesinde kullanılan ve önemli bir parametre olan K^C kuplaj katsayısı olarak isimlendirilmektedir ve helisli YDY'nin bir sarımına ait toplam yansıma katsayısının genliğinin ilgili

helisin hatvesine oranı kullanılarak hesaplanmaktadır. Muntazam bir şekilde biraraya getirilmiş ve yerleştirilmiş bir helisli YDY ele alınırsa, denklem 5.1 modlar arasında kuplajın oluşmadığı özel bir durumu sağlamaktadır. Bu durumda K^C sıfıra eşit olmaktadır ve kuple olmayan, birbirinden bağımsız ileri ve geri dalgalar mevcut olmaktadır. Denklem 5.1'de yer alan β_0^{bh} ve β_{-1}^{bh} ifadeleri sırasıyla ω/s_k ve $\frac{2\pi}{h} - \omega/s_k$ olarak tanımlanmaktadır ve verilen son ifadelerde yer alan ω, p ve s_k sırasıyla açısal frekans, helis hatvesi ve π-noktası frekansında temel ileri dalgaya ait dispersiyon eğrisinin eğimini göstermektedir [22, 27, 28]. Kuple olmayan, bu yayılım faz sabitleri [57, 71–73] no'lu çalışmalarda belirtilen ilgili helisli YDY için dispersiyon ilişkisi kullanılarak elde edilebilmektedir. Bu iki bağımsız, kuple olmayan yayılım sabitlerinin kesişim noktasının frekansı ilgili helisli YDY'nin π-noktası frekansını vermektedir. Böylece, helisli YDY'nin ileri ve geri dalgalarının kuple olmayan yayılım sabitlerinin doğru bir şekilde bulunması durumunda ilgili helisli YDY'nin π-noktası frekansı belirlenebilmektedir.

5.2.2 Kesin Floquet yaklaşımı

Helisli YDY'nin periyodikliğinden dolayı, periyodik helisli YDY'nin birim hücresi genelleştirilmiş saçılma matrisi ile karakterize edilebilmektedir. Bu durumda GSM ile helisli YDY'nin bir sarımına ait birim hücre gösterimi ve merdiven devre gösterimi Şekil 5.2(a)'da ve Şekil 5.2(b)'de verilmektedir. Helisin birim hücresinin GSM tanımı



Şekil 5.2 : Helisli YDY gösterimleri: helis birim hücresinin (a) GSM gösterimi (b) merdiven devre gösterimi ($l_{0,1} = l_{0a_{etk},1a_{etk}} \times cos(\varphi)$ olarak verilmektedir ve bu ifade ile şekilde yer alan $l_{0a_{etk},1a_{etk}}$, ψ, ŞH ve MZ sırasıyla etkin helis yarıçapında yüklü ilgili elemanın eğri uzunluğu, helis hatve açısı, şerit helis ve metal zarf olarak ifade edilmektedir.)

denklem 5.2'deki gibi verilebilmektedir.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}. \tag{5.2}$$

Denklem 5.2'de yer alan a ve b giriş ve çıkış kapılarındaki kompleks modal genlikleri göstermektedir. Birim hücredeki Floquet koşulu denklem 5.3'teki gibi yazılabilmektedir [52].

$$\lambda \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_2 \\ a_2 \end{bmatrix}. \tag{5.3}$$

Denklem 5.2'de yer alan λ kompleks bir sabittir ve $\lambda_{1,2} = e^{\pm j\theta}, \theta = \beta p \in [0, \pi]$ olarak tanımlanmaktadır ve bu ifadelerde yer alan β ve p ifadeleri sırasıyla Floquet faz faktörü ve birim hücrenin periyodunu göstermektedir. Ek olarak, verilen ifadenin $e^{j\omega t}$ zaman bağımlılığı ile yazıldığı varsayılırsa Floquet faz faktörü β ile pozitif ve negatif z yönünde yayılan dalga çözümleri λ'nın tanımındaki $-$ ve $+$ işaretlere karşı düşmektedir. Simetrik ve resiprok bir devre ele alındığında ve denklem 5.3, denklem 5.2'de yerine konduğunda denklem 5.4'te gösterilen bir polinom denklemi elde edilmektedir.

$$\lambda^2 + \lambda\left(\frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 - 1}{S_{21}}\right) + 1 = 0. \tag{5.4}$$

Tek bir Floquet modu için dispersiyon denklemi, λ'nın verilen ifadesi ve denklem 5.4 kullanılarak denklem 5.5'teki gibi elde edilebilmektedir. Π-noktası frekansının belirlenmesinde denklem 5.5'in kullanılmasıyla bu yöntem Kesin Floquet Yaklaşımı olarak adlandırılmaktadır.

$$\cos\theta = \frac{1 - S_{11}S_{22} + S_{12}S_{21}}{2S_{21}}. \tag{5.5}$$

Şerit helisli YDY'nin birim hücresine KFY'yi uygulamak için ilgili helisin bir sarımına ait merdiven devre gösterimi Şekil 5.2(b)'deki gibi verilmektedir [27, 28]. Helisli YDY'nin tek sarımına ait merdiven devre gösteriminde eşit aralıklı, simetrik yerleşime sahip destek çubukları (R_1, R_2, R_3) aralarında $\pi/3$ faz farkı ile mevcuttur. Şekil 5.2(b)'de ayrıca merdiven devre gösterimindeki ilk dielektrik destek çubuğundaki açısal asimetriden oluşan faz farkı $\Delta\phi/2$ olarak belirtilmiştir. Merdiven devre gösteriminin eşdeğer iletim hattı modelinde mikroşerit hat modeli kullanılmıştır. Birim hücreye ait referans düzlemleri (RD-1 ve RD-2), vakum ve çubuk bölgelerinin karakteristik empedansları ve yayılım sabitleri (Z_v, Z_d ve β_v, β_d)

ve jonksiyon yansıma katsayıları (Γ) Şekil 5.2(b)'de belirtilmiştir. Amaçlanan helis modeli, helisin dönme yönünde yayılan TEM benzeri modun varlığından dolayı bir mikroşerit hat modeli olarak kabul edilmiştir [27]. Helisli YDY'nin birim hücresine ait saçılma matrisi elemanları Şekil 5.2(b)'de gösterilen merdiven devre gösterimi yardımıyla belirlenebilmektedir. Bu noktada mikroşerit hat modeli varsayımı ile, vakumdan destek çubuğuna geçişteki süreksizlik bölgelerindeki jonksiyon saçılma matrisinin $\Gamma = (Z_d - Z_v)/(Z_d + Z_v)$ yoluyla hesaplandığı ve bu ifadede yer alan karakteristik empedanslara ilişkin ifadelerin de [28] no'lu çalışmada verildiğini belirtmek önemlidir. Helisli YDY'nin birim hücresine ait saçılma matrisi her bir jonksiyondaki ve bölgedeki saçılma matrislerinin hesaplanması ve bölüm 4'te de bahsedilen GSM gösterimi dikkate alınarak uygun bir şekilde bir araya getirilmesiyle kolaylıkla elde edilebilmektedir. Helisli YDY'nin dispersiyon diyagramı denklem 5.5 kullanılarak bulunabilmektedir. $\cos\theta = -1$'e karşı düşen frekanslar simetrik yüklü helisli YDY'nin π-noktası frekansı olarak isimlendirilmektedir, bu sebeple, denklem 5.5, helisli YDY'lerde π-noktası frekansının belirlenmesinde etkin bir şekilde kullanılabilmektedir.

5.2.3 Yardımcı fonksiyonlu genelleştirilmiş saçılma matrisi yöntemi

Bir periyodik yapının birim hücresinde depo edilen kompleks gücün analizi YFGSM yönteminin köşetaşını oluşturmaktadır [41, 51, 52]. Kayıpsız ve resiprok bir periyodik yapının birim hücresinin saçılma matrisi elde edildiğinde, ilgili periyodik yapının birim hücresinde depo edilen kompleks gücün sıfır geçişlerinin gözlenmesiyle bu yapıya ait iletim ve durdurma band uçları kesin olarak belirlenebilmektedir. İlk olarak, simetrik birim hücreye sahip bir periyodik yapının birim hücresinde depo edilen kompleks güç açıkça ifade edilmiştir. Birim hücredeki simetriyi anlamak için, çift ve tek simetrik bileşenlerden oluşan mod uyarımları tanımlanmıştır. Böylece simetrik birim hücreye sahip bir periyodik yapıdaki çift ve tek simetrik modlar (Ψ_ς, Ψ_t) tarafından birim hücrede depo edilen kompleks güç denklem 5.6'daki gibi yazılabilmektedir [51].

$$\boldsymbol{\Psi}_\varsigma = 2\boldsymbol{a}_1^t \boldsymbol{\Upsilon} \boldsymbol{a}_1^* \quad , \boldsymbol{\Upsilon} = [\mathbf{I} + \boldsymbol{S}_{11} + \boldsymbol{S}_{12}]\, \boldsymbol{U}\, [\boldsymbol{I} - \boldsymbol{S}_{11}^* - \boldsymbol{S}_{12}^*]\,. \tag{5.6a}$$

$$\boldsymbol{\Psi}_t = 2\boldsymbol{a}_1^t \boldsymbol{\Lambda} \boldsymbol{a}_1^* \quad , \boldsymbol{\Lambda} = [\boldsymbol{I} + \boldsymbol{S}_{11} - \boldsymbol{S}_{12}]\, \boldsymbol{U}\, [\boldsymbol{I} - \boldsymbol{S}_{11}^* + \boldsymbol{S}_{12}^*]\,. \tag{5.6b}$$

Denklem 5.6'da yer alan $\boldsymbol{a}_1$, $\boldsymbol{I}$ ve $\boldsymbol{U}$ sırasıyla birim hücrenin kapılarından içeri yayılan dalgaların modal genliğini, birim matrisi ve *NxN*'lik köşegen matrisi göstermektedir. Köşegen matris elemanları, yayılan modlarda 1'e, kesimdeki modlarda ise $\pm j$'ye eşit olmaktadır. Denklem 5.6'da yer alan üst indis sembolleri $\boldsymbol{t}$ ve $*$ sırasıyla ilgili büyüklüklerin transpozu ve kompleks eşleniğini göstermektedir. Denklem 5.6'da yer alan $\boldsymbol{S}_{11}$ ve $\boldsymbol{S}_{12}$ ifadeleri birim hücrenin genelleştirilmiş saçılma matrisindeki alt matrisleri göstermektedir. Çift ve tek simetrik modlar için birim hücrede depo edilen kompleks gücün reel kısımları ($\mathrm{Re}(\Psi_ç)$, $\mathrm{Re}(\Psi_t)$) hem durdurma bandında hem de iletim bandında kayıpsız bir periyodik yapı için sıfıra eşit olmak zorundadır [51]. Buna ek olarak, depo edilen kompleks gücün sanal kısımları ($\mathrm{Im}(\Psi_ç)$, $\mathrm{Im}(\Psi_t)$) da band ucu frekanslarında $\mathrm{Im}(\Psi_ç) = \mathrm{Im}(\Psi_t) = 0$ koşulunu sağlamak zorundadır. Bu bağlamda, denklem 5.7'de verilen yardımcı fonksiyonlar tek Floquet mod bölgesinde simetrik birim hücreler için band ucu frekanslarını belirleyebilmektedirler.

$$X_{\pm} = 2\,\mathrm{Im}(S_{11} \pm S_{12}) = 0. \tag{5.7}$$

Denklem 5.7'de verilen ilgili yardımcı fonksiyonlar [51, 52] referans numaralı çalışmalarda da gösterildiği gibi simetrik birim hücreli farklı periyodik yapılara uygulanabilmektedir. Periyodik yapının simetrik birim hücre seçimi kısıtını ortadan kaldırmak için, kapsamlı bir YFGSM yöntemi [41] no'lu çalışmada sunulmuştur. Kayıpsız ve resiprok bir periyodik yapının asimetrik/simetrik birim hücresinde depo edilen kompleks güç [41]'te verildiği gibi tek bir Floquet mod yayılımı için denklem 5.8'te gibi ifade edilebilmektedir.

$$\Psi_{\pm 1} = \mid a_1 \mid^2 (Q_{11} + Q_{12}K_{\pm 1}^{*} + Q_{21}K_{\pm 1} + Q_{22} \mid K_{\pm 1} \mid^2). \tag{5.8}$$

Denklem 5.8'de yer alan K_1, K_{-1}, Q_{11}, $Q_{12} = Q_{21}$ ve Q_{22} ifadeleri sırasıyla $(1 - S_{21})/(S_{22})$, $(-1 - S_{21})/(S_{22})$, $j2\,\mathrm{Im}(S_{11})$, $j2\,\mathrm{Im}(S_{21})$ ve $j2\,\mathrm{Im}(S_{22})$'ye eşittir. Hem iletim hem de durdurma bandında $\mathrm{Re}\{\Psi_{\pm 1}\} = 0$ ve band ucu frekanslarında $\mathrm{Im}\{\Psi_{\pm 1}\} = 0$ koşulları dikkate alındığında [41] no'lu çalışmada belirtilen yardımcı fonksiyonlar (J_1, J_{-1}) denklemler 5.9 ve 5.10'daki gibi yazılabilmektedir.

$$J_1 = 2\,\mathrm{Im}\{S_{11} + 2S_{21}\,\mathrm{Re}\{K_1\} + S_{22} \mid K_1 \mid^2\}. \tag{5.9}$$

$$J_{-1} = 2\,\mathrm{Im}\{S_{11} + 2S_{21}\,\mathrm{Re}\{K_{-1}\} + S_{22} \mid K_{-1} \mid^2\}. \tag{5.10}$$

Denklemler 5.9 ve 5.10'da verilen bu yardımcı fonksiyonlar, periyodik yapıların hem asimetrik hem de simetrik birim hücre konfigürasyonlarında geçerlidir. Buna ek olarak,

klasik özdeğer denkleminin band ucu koşullarına dayanan yardımcı fonksiyonların türetilmesiyle [55] periyodik yapıların iletim/durdurma band karakteristiklerinin incelenmesi noktasında alternatif bir yol seçilebilmektedir. Bu bağlamda [55]'te verilen ve denklemler 5.11 ve 5.12'de gösterilen $\bar{J}_{\pm 1}$ ve $\bar{R}_{\pm 1}$ yardımcı fonksiyonları, ilgili asimetrik/simetrik birim hücreli periyodik yapıların band ucu frekanslarının belirlenmesinde kullanılabilmektedir.

$$\bar{J}_{\pm 1} = \mathrm{Im}\{S_{11}S_{22} - (1 \mp S_{21})^2\}. \tag{5.11}$$

$$\bar{R}_{\pm 1} = \mathrm{Re}\{S_{11}S_{22} - (1 \mp S_{21})^2\}. \tag{5.12}$$

J_{-1} 'in sıfır ya da $\bar{J}_{-1}$ ve $\bar{R}_{-1}$'in ortak sıfır geçişleri simetrik yüklü helisli YDY'nin π-noktası frekansına ya da asimetrik asimetrik yüklü helisli YDY'nin band ucu frekanslarına karşı düşmektedir.

5.3 Helisli Yavaş Dalgalı Yapıların π-noktası Frekansı Tasarımı

Ele alınan tasarım problemi, arzu edilen π-noktası frekansı ya da durdurma bandını elde etmek için verilen parametre takımları için helisli YDY parametrelerinin belirlenmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu noktada, KMA, KFY yöntemleri sık frekans aralığı ile özdeğer denkleminin çözümünü gerektirmektedir. İlgili yöntemler kayda değer derecede hesaplama süresine ihtiyaç duymaktadır ve bu durum tasarım eniyileme süreçleri uygulamasında elverişli olmamaktadır. Bununla beraber, YFGSM yöntemi ilgili helisli YDY'lerin π-noktası frekansı ve durdurma bandlarının belirlenmesinde iyi davranış sergileyen yardımcı fonksiyonlar sunmaktadır. İlgili yardımcı fonksiyonlar helisli YDY'lerin tasarım ve eniyileme işleminde etkili bir şekilde kullanılabilmektedir. YFGSM yönteminin amaçlanan fonksiyonları ($\bar{J}_{-1}$, $\bar{R}_{-1}$) band ucu frekanslarında sıfırdan geçmektedir. Bu sebeple, YFGSM yöntemi bir özdeğer problemini kök bulma problemine indirgemektedir. Böylece, YFGSM yönteminde yer alan ilgili yardımcı fonksiyonların kökleri klasik kök bulma algoritmaları kullanılarak kolay ve etkili bir şekilde belirlenebilmektedir.

Helisli YDY'lerin π-noktası frekansı ve durdurma bandının tasarımı aşağıdaki tasarım prosedürü ile gerçekleştirilebilmektedir.

$(\boldsymbol{i})$ Destek çubuğunun dielektrik sabitini (ε_r), dielektrik destek çubuk sayısını (N_d),

helis şerit kalınlığını (s) ve şerit genişliğini ($w_{şerit}$) seç.

(*ii*) Seçilen parametre (a, c_z, ψ, $w_{çubuk}$ ve $\Delta\phi$) takımlarına karşı düşen π-noktası frekansı ve band ucu frekanslarını $\bar{J}_{-1}$ ve $\bar{R}_{-1}$'in sıfır geçişleri yoluyla tasarım uzayındaki birçok parametrenin değiştirilmesiyle belirle.

(*iii*) İkinci adımda farklı π-noktası frekansları ve band ucu frekansları için çözüm değerleri (a, c_z, ψ, $w_{çubuk}$ ve $\Delta\phi$)'ni içeren bir veri seti elde edilmiştir. Bu veri seti kullanılarak, tasarım hedeflerini karşılayan helisli yavaş dalgalı yapı konfigürasyonunun arzu edilen π-noktası frekansını seç.

Bu prosedür YDT'lerdeki helisli YDY'lerin arzu edilen π-noktası frekanslarının ve durdurma bandlarının belirlenmesinde etkili bir şekilde kullanılabilmektedir. Amaçlanan prosedürün geçerliliğini ve uygulanabilirliğini göstermek için, sonuçlar ve değerlendirmeler bölümünde sayısal örnekler sunulmuştur.

5.4 Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Bu bölüm, helisli YDY'ler üzerinde YFGSM yönteminin uygulanabilirliğini, araştırılmasını ve değerlendirilmesini vurgulamak için, π-noktası frekansı analizi ve tasarım bölümleri olarak ikiye ayrılmıştır.

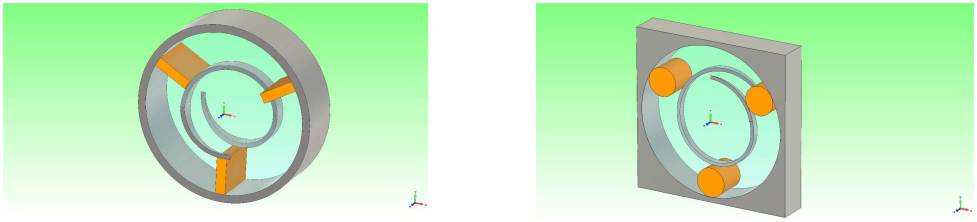
5.4.1 Π-noktası frekansı analizi

Π-noktası frekansının hesaplanmasında kullanılan KMA, KFY ve YFGSM yöntemlerinin karşılaştırmasını göstermek için mevcut literatürde yer alan birçok helisli YDY modelleri ele alınmıştır. Ele alınan helisli YDY'lere ait tüm parametre değerleri Çizelge 5.1'de verilmektedir. Çizelge 5.1'de yer alan ε_r, N_d, p, a, r_0, c_z, ψ, $w_{şerit}$, ÇB (R ve C), $w_{çubuk}$, $r_{çubuk}$ ifadeleri sırasıyla destek çubuğuna ait dielektrik sabitini, destek çubuklarının sayısını, helis hatvesini, helisin ortalama yarıçapını, helisin dış yarıçapını, helis hatve açısını, helis şerit genişliğini, çubuk biçimini (dikdörtgen ve dairesel), dikdörtgen çubuk genişliğini ve dairesel çubuk yarıçapını göstermektedir. Dikdörtgen ve dairesel dielektrik destek çubuk konfigürasyonları CST Microwave Studio modülünde ele alınmış ve Şekil 5.3'teki gibi modellenmiştir. [24] no'lu referansta yer alan çalışmada da dikkate alındığı üzere, ilgili özdeğer denkleminin çözümü için şerit helisten kılıf helis biçimine dönüşümde yer alan bir etkin helis dış yarıçapı, ortalama helis yarıçapı yerine kullanılmıştır. Sayısal hesaplamalar, etkin

Çizelge 5.1 : Ele alınan helisli YDY'lerin parametre değerleri.

Yapılar	ε_r	ÇB	N_d	p (mm)	a (mm)	r_0 (mm)	c_z (mm)	ψ (derece)	$w_{şerit}$ (mm)	$w_{çubuk}$,$r_{çubuk}$ (mm)	Bandgenişliği (GHz)
YDY-I [21, 28]	6.3	R	3	3.18	2.73	2.87	5.2	10.5	0.9	0.64	2.6 - 5.2
YDY-II [58]	5.3	R	3	1.54	1.465	1.59	2.9	9.5	0.89	0.68	4 - 10
YDY-III [57, 65]	5.1	R	3	1.74	1.524	1.651	2.64	10.3	0.89	0.508	2 - 12
YDY-IV [64]	5.1	R	3	5.06	2.718	2.845	4.57	16.5	1.78	0.762	3 - 6
YDY-V [57]	9	C	3	0.58	0.826	0.889	1.499	6.4	0.127	0.305	2 - 14
YDY-VI [74]	5.1	R	3	0.6	0.48	0.53	1.26	11.25	0.34	0.3	10 - 40

helis yarıçapının çoğunlukla helis dış yarıçapına eşit alınması gerektiğini merdiven devre gösteriminin geçerliliği açısından ortaya koymaktadır. Bu durumda, mikroşerit hat temelli merdiven devre gösterimini kullanan ilgili modelin karşılaştırılan diğer yöntemlerle tutarlı sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Ele alınan tüm helisli YDY'lerin dispersiyon diyagramları KMA, KFY, YFGSM yöntemleri ve CST elektromagnetik tasarım ortamı kullanılarak belirlenmiştir. $\Delta\phi = 0^\circ$ için dispersiyon diyagramında kesişmelerin meydana geldiği π-noktası frekans değerleri ve farklı $\Delta\phi$ değerleri için YDY-I'in, YDY-II'nin ve YDY-III'ün dielektrik destek çubuklarından birinin açısal

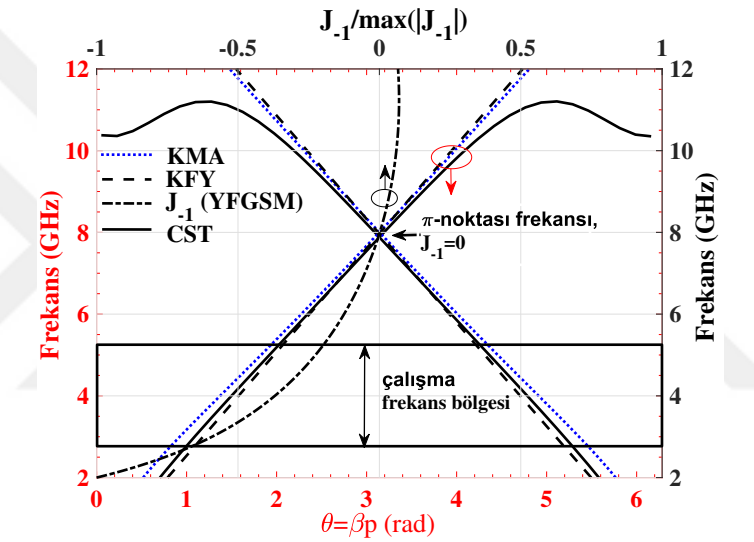


(a) (b)

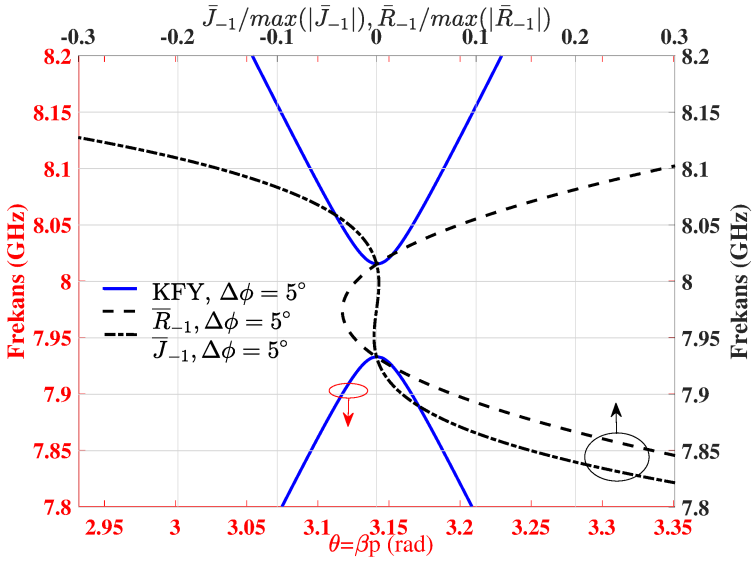
Şekil 5.3 : İlgili (a) dikdörtgen ve (b) dairesel destek çubuklu helisli YDY'lere ilişkin CST konfigürasyonları.

asimetrisinden kaynaklanan durdurma bandları Şekiller 5.4-5.6'da gösterilmiştir. J_{-1} ve $\bar{J}_{-1}$, $\bar{R}_{-1}$'in sıfır geçişlerinin değişimi Şekiller 5.4-5.6'da verilmiştir. Beklendiği üzere, açısal asimetri arttığında daha geniş durdurma bandları oluşabilmektedir.

Farklı helisli YDY'lerde $\Delta\phi = 0^\circ$ için KMA, KFY ve YFGSM yöntemleri kullanılarak her bir yavaş dalgalı yapıya ait hesaplanan π-noktası frekans değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 5.2'de verilmektedir. YFGSM yöntemine ait sonuçların raporlanan sonuçlar [21, 28, 57, 58, 64, 65, 74] ile uygun tutarlılıkta olduğu belirtilmelidir. KFY ve YFGSM yöntemleri, ilgili problemler için aynı π noktası frekanslarını vermektedir. YFGSM yöntemi özdeğer denklemi çözmeden yardımcı fonksiyonların kullanılmasıyla, ilgili helisli YDY'lere ait π-noktası frekanslarını

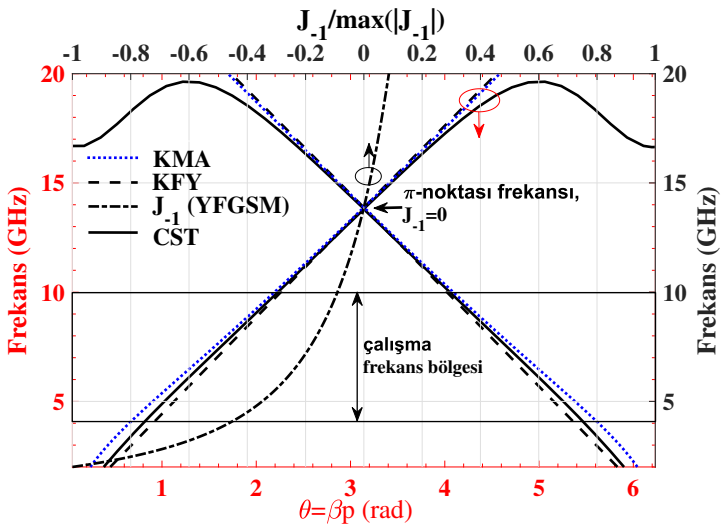


(a)

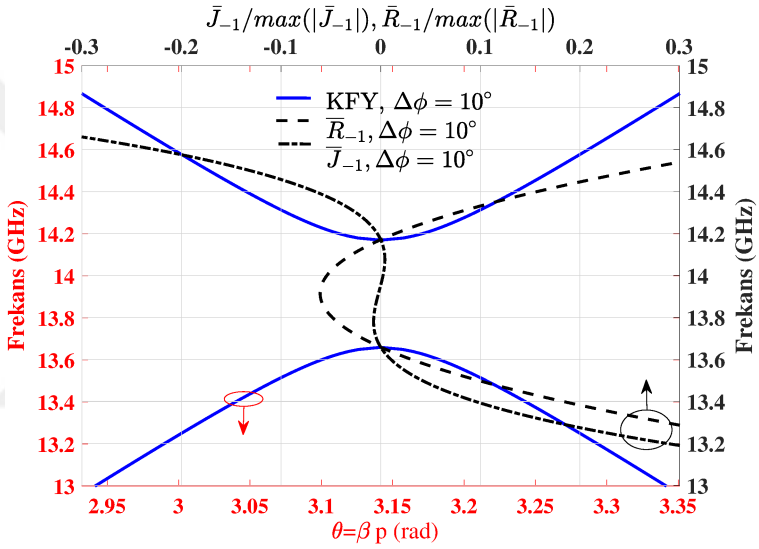


(b)

Şekil 5.4 : YDY-I'te $\Delta\phi = 0^\circ$ ve $\Delta\phi = 15^\circ$ değerleri için sırasıyla (a) π-noktası frekansı ve (b) durdurma bandının belirlenmesi.



(a)

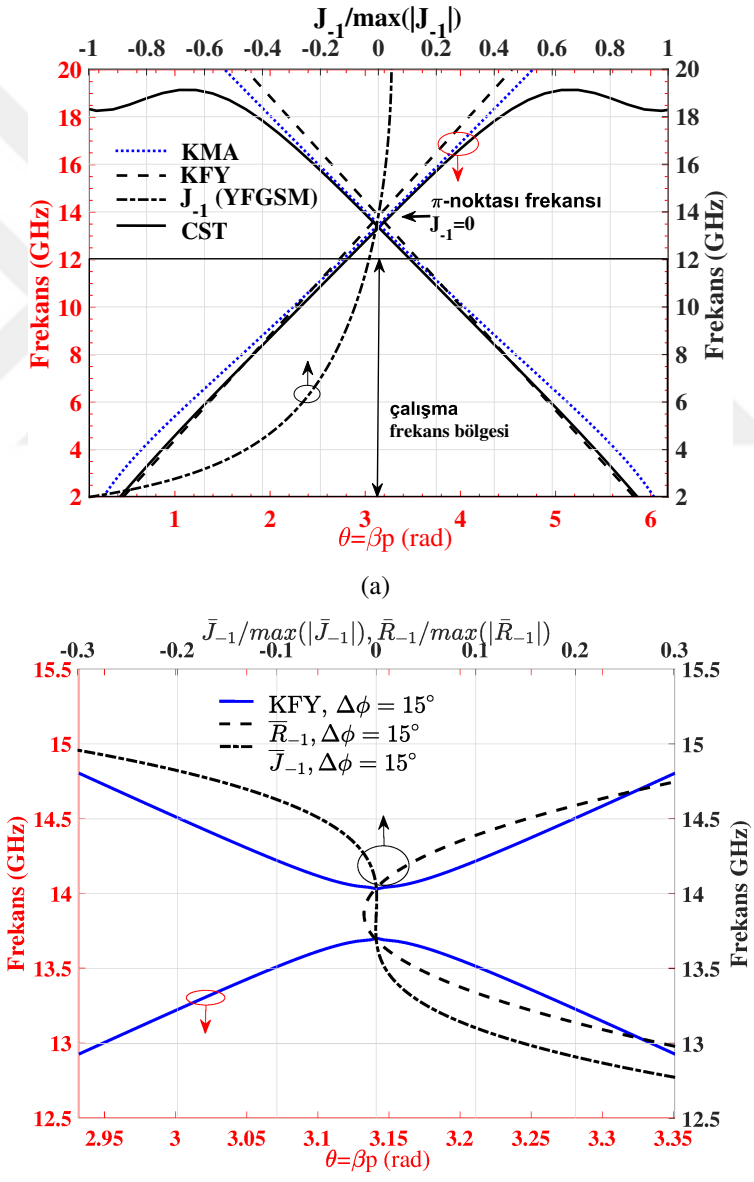


(b)

Şekil 5.5 : YDY-II'te $\Delta\phi = 0°$ ve $\Delta\phi = 10°$ değerleri için sırasıyla (a) π-noktası frekansı ve (b) durdurma bandının belirlenmesi.

etkili bir şekilde belirleyebilmektedir. Diğer yandan, KFY sık frekans aralıkları ile özdeğer denkleminin çözümünüe ihtiyaç duymaktadır. Ele alınan bu üç yöntemde Şekil 5.2'de gösterilen ilgili helisli YDY'ye ait aynı merdiven devre gösterimini kullanmaktadır. Bununla beraber, KMA π-noktası frekansında ilgili merdiven devrenin toplam yansıma katsayısının hesabındaki çoklu yansıma teorisinden ileri gelen yaklaşımları kullanmaktadır. KMA'da kullanılan yaklaşımlar ilgili yapıların π-noktası frekans karakteristiklerinin belirlenmesinde farklılıklara sebep olmaktadır. Merdiven devre gösterimindeki tüm süreksizliklerin etkileri, ilgili helisli YDY'lerin doğru analizi için YFGSM yönteminde GSM gösterimi ile modellenmiştir. Her yavaş dalgalı yapı aynı zamanda CST benzetim ortamında modellenmiş ve benzetimi

yapılmıştır. Çizelge 5.2'den de görüldüğü gibi, KMA, KFY ve YFGSM sonuçları, literatürde mevcut sonuçlar ve CST benzetim sonuçları ile uyumludur. Ele alınan helisli YDY'lerin farklı açısal asimetrisinden kaynaklanan durdurma band bölgelerinin band ucu değerleri Çizelge 5.3'te verilmektedir. İlgili helisli YDY'lerin durdurma bandı band ucu değerlerinin farklı çözüm yöntemleri için görece tutarlı olduğu belirtilmektedir. Ek olarak, ele alınan her helisli YDY'nin π-noktası frekansının belirlenmesi için gerekli hesaplama süreleri KMA, CST ve YFGSM için kaydedilmiş ve ilgili değerler Çizelge 5.4'te verilmiştir. KMA ve YFGSM ile yapılan π-noktası frekansı hesaplamalarında mütevazi özelliklere sahip (8GB RAM, intel i7@ 2.20GHz



Şekil 5.6 : YDY-III'te $\Delta\phi = 0°$ ve $\Delta\phi = 15°$ değerleri için sırasıyla (a) π-noktası frekansı ve (b) durdurma bandının belirlenmesi.

Çizelge 5.2 : $\Delta\phi = 0^\circ$ durumunda ilgili helisli YDY'ler için farklı yöntemlerin ve CST benzetim sonuçlarının raporlanmış sonuçlar ile karşılaştırılması.

Yapılar	MF[1] (GHz)	KFA (GHz)	KMA (GHz)	YFGSM (GHz)	CST (GHz)
YDY-I [21, 28]	7.96	7.97	7.96	7.97	7.88
YDY-II [58]	MD[2]	13.88	13.88	13.88	13.83
YDY-III [57, 65]	13	13.85	13.48	13.85	13.36
YDY-IV [64]	8	8.30	8.04	8.30	7.78
YDY-V [57]	MD[2]	23.83	22.59	23.83	23.94
YDY-VI [74]	41.2	41.75	41.35	41.75	41.58

[1] MF:Mevcut Frekans, [2] MD:Mevcut Değil

Çizelge 5.3 : $\Delta\phi \neq 0^\circ$ durumunda ilgili helisli YDY'ler için farklı yöntemlerin ve CST benzetim sonuçlarının karşılaştırılması.

Yapılar	Band uçları (GHz)			
	KFY	KMA	YFGSM	CST
YDY-I [21, 28], $\Delta\phi = 5^\circ$	7.93-8.01	7.93-7.99	7.93-8.01	7.86-7.90
YDY-II [58], $\Delta\phi = 10^\circ$	13.66-14.17	13.78-13.99	13.66-14.17	13.73-13.95
YDY-III [57, 65], $\Delta\phi = 15^\circ$	13.69-14.04	13.33-13.63	13.69-14.04	13.24-13.49
YDY-IV [64], $\Delta\phi = 5^\circ$	8.26-8.33	8.02-8.06	8.26-8.33	7.75-7.80
YDY-V [57], $\Delta\phi = 5^\circ$	23.67-24.01	22.46-22.75	23.67-24.01	23.86-24.04
YDY-VI [74], $\Delta\phi = 20^\circ$	41.15-42.43	40.79-41.92	41.15-42.43	40.85-42.33

işlemci) bir dizüstü bilgisayar kullanılmıştır. CST benzetimlerinde ise 96GB RAM'e ve intel xeonsilver işlemci (4114@ 2.20GHz 10 core) bir iş istasyonu kullanılmıştır. Bu bağlamda, CST Eigen Mode Solver modülü adaptif bölmelendirme düzeltme seçeneği ve birim maksimum model kutu kenarı başına dörtyüzlü bölmelendirme hücreleri (model:40, arkaplan:1) seçeneği ile birlikte kullanılmıştır. İlgili her bir helisli YDY için CST benzetiminde faz kayması π olarak seçilmiştir. Her bir helisli YDY için frekans süpürmesi 10MHz aralıklarla yapılmıştır. Her bir helisli YDY'nin π-noktası frekansının elde edilmesinde gerekli hesaplama süresinin YFGSM'de bir saniyeden az olduğu, aynı platformda KMA kullanılarak gerekli hesaplama süresinin

Çizelge 5.4 : Farklı helisli YDY'ler için KMA, CST ve YFGSM yöntemleri ile elde edilen π noktası frekansı hesaplama süreleri.

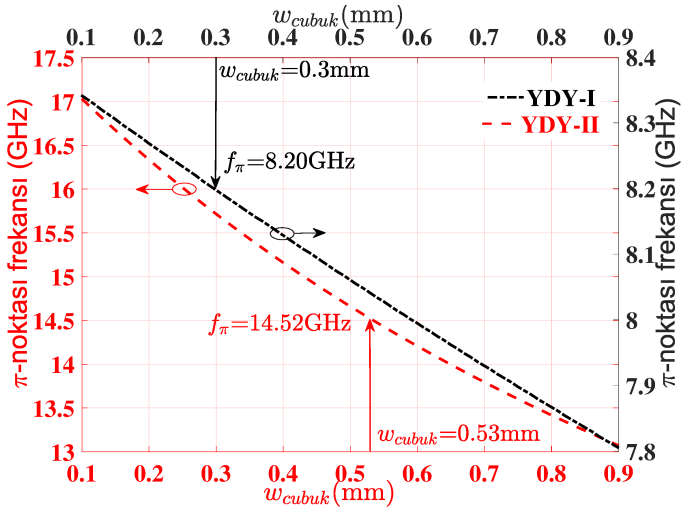
	Benzetim süresi (s)		
Yapılar	KMA	CST	YFGSM
YDY-I [21, 28]	209.51	622	0.27
YDY-II [58]	470.40	288	0.28
YDY-III [57, 65]	477.1	1239	0.30
YDY-IV [64]	464.34	678	0.42
YDY-V [57]	472.91	352	0.63
YDY-VI [74]	1139.07	620	0.66

en az 750 kat, iş istasyonu üzerinde CST kullanıldığında 560 kat arttığı Çizelge 5.4'ten görülmektedir.

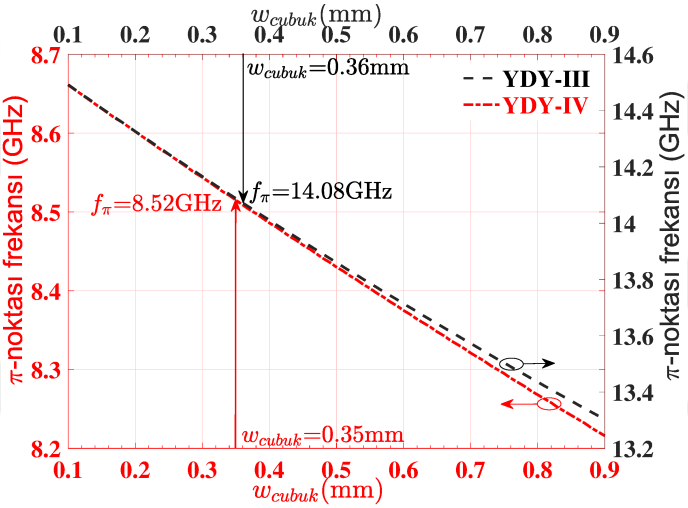
5.4.2 Π-noktası frekansı tasarımı

Π-noktası civarındaki durdurma bandı karakteristiklerinden dolayı, osilasyondan kaçınmak için helisli YDT'nin π-noktası frekansının mümkün olduğu kadar çalışma frekans bölgesinden uzakta tutulması istenmektedir. Ele alınan tüm YDY'lerin parametre değerleri ve π-noktası frekansları, tasarım örnekleri olarak sırasıyla Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de verilmiştir. Çizelge 5.2'de ilgili helisli YDY'lerin raporlanan π-noktası frekans (MF)'ları (YDY-I için 7.96GHz, YDY-II için 13.83GHz, YDY-III için 13GHz, YDY-IV için 8GHz, YDY-V için 23.94GHz ve YDY-VI için 41.2 GHz) osilasyon probleminden dolayı arzu edilen π-noktası frekans (İF)'ları YDY-I için 8.20 GHz, YDY-II için 14.52GHz, YDY-III için 14.08GHz, YDY-IV için 8.52GHz, YDY-V için 23.11GHz ve YDY-VI için 43.5 GHz olacak şekilde tasarlanması hedeflenmektedir. Çizelge 5.2'de mevcut olmayan MF değerleri için aynı çizelgede ilgili yapı için verilen CST benzetim sonuçlarına ait frekans değerleri, referans değerler olarak kabul edilmiştir.

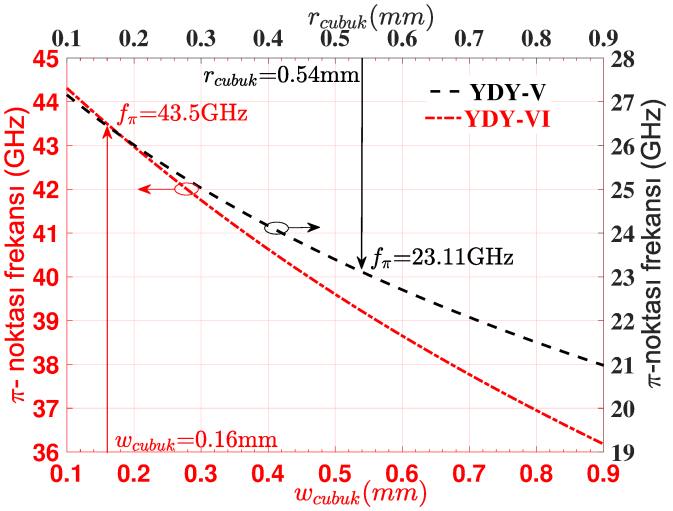
$w_{çubuk}$ ve $r_{çubuk}$ parametre değerleri 0.1mm'den 0.9mm'ye değiştirildiğinde, ilgili her helisli YDY için adım adım amaçlanan tasarım prosedürü uygulanmıştır. $\bar{J}_{-1}$ ve $\bar{R}_{-1}$ fonksiyonlarının ortak sıfır geçişleri gözlenerek $w_{çubuk}$ ve $r_{çubuk}$ parametrelerine göre, ilgili helisli YDY'lerin π-noktası frekans değişimleri Şekil 5.7'de verilmektedir. Her helisli YDY için arzu edilen π-noktası frekans değişimleri Şekil 5.7'de açıkça



(a)



(b)



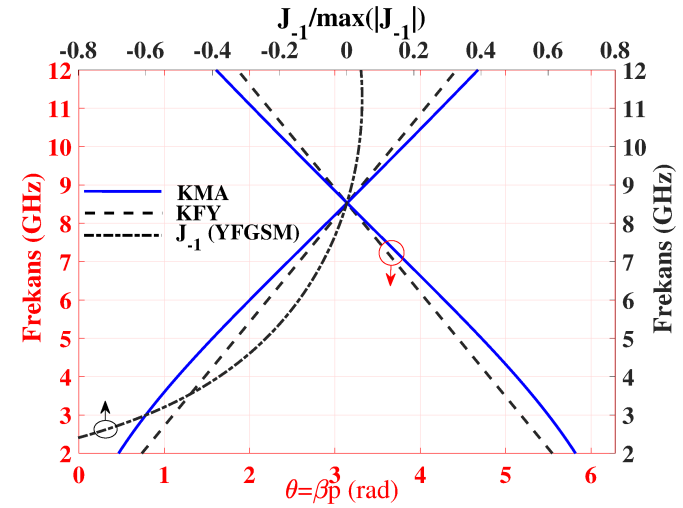
(c)

Şekil 5.7 : YFGSM yöntemi ile π-noktası frekansının $w_{çubuk}$ ve $r_{çubuk}$'ye bağlılığının (a) YDY-I, YDY-II (b) YDY-III, YDY-IV (c) YDY-V, YDY-VI için incelenmesi.

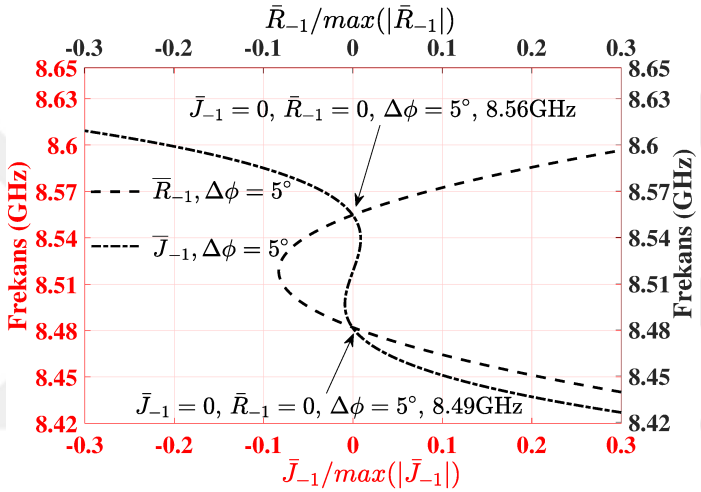
Çizelge 5.5 : $w_{çubuk,İF}$, $r_{çubuk,İF}$ değerleri için KMA'ya ve KFY'ye ilişkin π noktası frekanslarının karşılaştırılması.

Yapılar	$w_{çubuk,İF}$, $r_{çubuk,İF}$ (mm)	KMA (GHz)	KFY (GHz)
YDY-I, İF= 8.20GHz için	**0.3**	8.38	8.20
YDY-II, İF= 14.52GHz için	**0.53**	14.25	14.52
YDY-III, İF= 14.08GHz için	**0.36**	13.9	14.08
YDY-IV, İF= 8.52GHz için	**0.35**	8.42	8.52
YDY-V, İF= 23.11GHz için	**0.54**	20.47	23.11
YDY-VI, İF= 43.5GHz için	**0.16**	44.29	43.53

verilmiştir. Buna ek olarak, arzu edilen π-noktası frekansları için belirlenen $w_{çubuk,İF}$, $r_{çubuk,İF}$ değerleri tüm helisli YDY konfigürasyonları için amaçlanan tasarım prosedürünün sonucu olarak Çizelge 5.5'te koyu renkli biçimde verilmektedir. Ayrıca $w_{çubuk,İF}$, $r_{çubuk,İF}$ değerleri için ilgili helisli YDY'lerin π-noktası frekansları KMA ve KFY ile de hesaplanmıştır ve ilgili karşılaştırmalar Çizelge 5.5'te verilmektedir. Benzer şekilde, istenen π-noktası frekansları değiştirildiğinde, gerekli $w_{çubuk,İF}$, $r_{çubuk,İF}$ parametre değerleri Şekil 5.7 yardımıyla kolay bir şekilde belirlenebilmektedir. Bu bağlamda, $w_{çubuk,İF}$, $r_{çubuk,İF}$'ye karşı π-noktası frekansı için türetilen eğriler tasarım adımlarında etkili bir şekilde kullanılabilmektedir. Bunun yanısıra, elde edilen $w_{çubuk,İF}$, $r_{çubuk,İF}$ değerlerinin ilgili π-noktası frekans değerlerini verdiğini doğrulamak için, YDY-IV, YDY-V ve YDY-VI'ya ilişkin dispersiyon diyagramları ilgili parametre değerleri için KMA, KFY ve YFGSM kullanılarak Şekiller 5.8(a)-5.10(a)'daki gibi sunulmaktadır. Şekiller 5.8(a)-5.10(a)'da görüldüğü gibi seçilen İF değerleri (YDY-IV için 8.52GHz, YDY-V için 23.11GHz ve YDY-VI için 43.5 GHz) için herhangi bir asimetri yokken ($\Delta\phi = 0^\circ$) π-noktası frekansları doğrulanmıştır. YDY'lerdeki farklı açısal asimetriler (YDY-IV ve YDY-V için $\Delta\phi = 5^\circ$ ve YDY-VI için $\Delta\phi = 20^\circ$)'den dolayı arzu edilen π-noktası frekansları civarındaki durdurma bandları Şekiller 5.8(b)-5.10(b)'de verilmektedir. Şekiller 5.8(b)-5.10(b)'den de görüldüğü üzere seçilen İF değerleri için YDY-IV, YDY-V ve YDY-VI'nın durdurma bandları merkez frekanslarının sırasıyla 8.52GHz, 23.11GHz ve 43.5 GHz olduğu görülmektedir. İlgilenilen helisli YDY'nin durdurma bandı, helisli YDY'lerin açısal asimetrisinin değiştirilmesiyle etkili bir şekilde tasarlanabilmektedir. KMA, KFY yöntemleri ve CST benzetimleri kullanılarak ilgili helisli YDY'lere ait



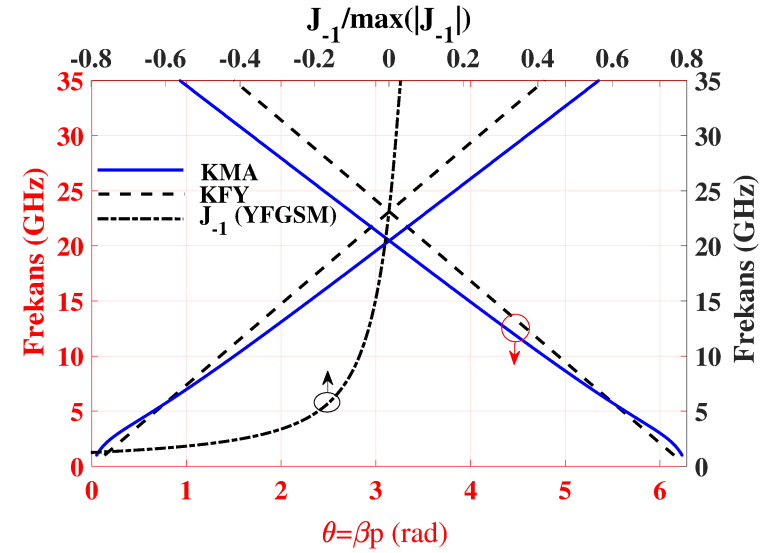
(a)



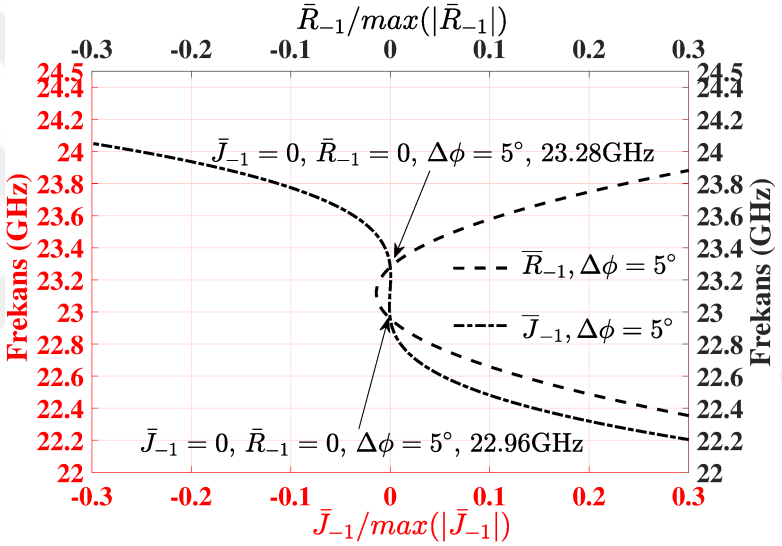
(b)

Şekil 5.8 : Arzu edilen π-noktası 8.52GHz frekansı için YFGSM yöntemi kullanılarak YDY-IV'in (a) π-noktası frekansı ($\Delta\phi = 0°$) (b) durdurma bandı ($\Delta\phi = 5°$).

durdurma bandları ve band ucu frekansları Çizelge 5.6'da verilmektedir. KMA, KFY ve CST'den elde edilen ve Çizelge 5.6'da verilen band ucu frekans sonuçları YFGSM yöntemine ait tasarım ile elde edilen sonuçlar ile iyi bir uyuma sahiptir. Hesaplamaları ve benzetimleri KMA, KFY, YFGSM ve CST ile yapılan ilgili helisli YDY'lerin π-noktası frekanslarının %0.4 ile %6.7 aralığında değişen bir mutlak hata ile elde edildiği sayısal sonuçlardan görülmektedir. Ayrıca, ele alınan yöntemler ile Şekil 5.7'de verilen tasarım eğrilerinin oluşturulması için gerekli hesaplama sürelerine ait karşılaştırmalar Çizelge 5.7'de verilmiştir. Bölüm 5.4.1'de belirtilen bilgisayar platformları bu hesaplamalarda aynı özellikler seçilerek kullanılmıştır. Her helisli YDY'de π-noktası frekansı hesaplamaları için $w_{çubuk}$ ve $r_{çubuk}$ parametrelerinden 81 örnek alınmıştır. Her helisli YDY için KMA ve YFGSM yöntemlerinde 1MHz



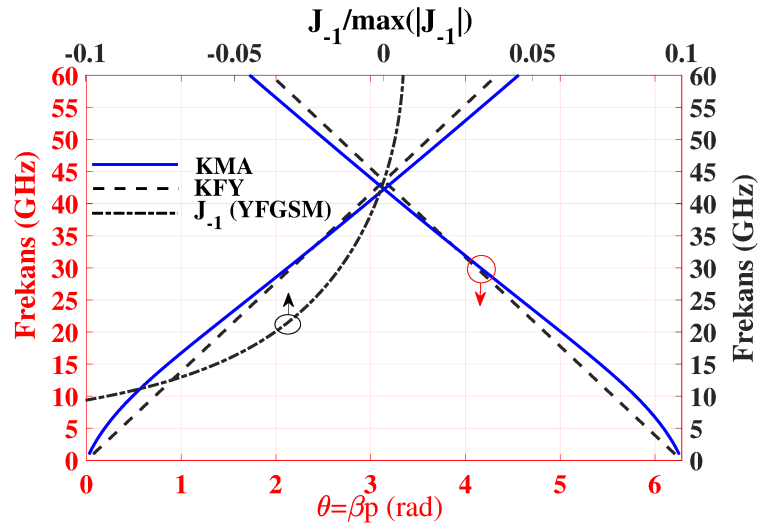
(a)



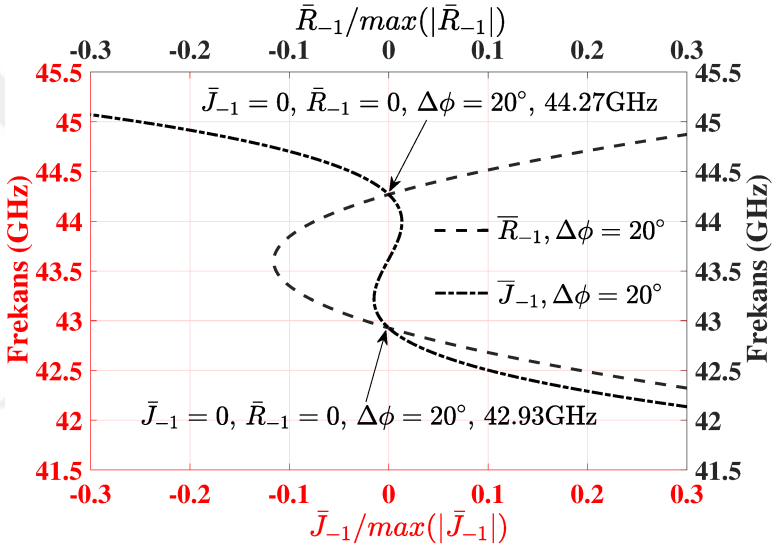
(b)

Şekil 5.9 : Arzu edilen π-noktası 23.11GHz frekansı için YFGSM yöntemi kullanılarak YDY-V'in (a) π-noktası frekansı ($\Delta\phi = 0°$) (b) durdurma bandı ($\Delta\phi = 5°$).

frekans aralığında frekans süpürme yapılmıştır. Bölüm 5.4.1'de belirtilen aynı bölmelendirme özellikleri bu bölümdeki CST benzetimlerinde de kullanılmıştır. Şekil 5.7'yi oluşturmak için gerekli hesaplama süresinin 6.05s olduğu Çizelge 5.7'den görülmektedir. YFGSM ile diğer yöntemler arasındaki gerekli hesaplama süre farkının en yüksek değerinin 10^4 katına yakın olduğu belirlenmiştir. YFGSM için Çizelge 5.7'de verilen hesaplama süresinin hem GSM hesaplama hem de yardımcı fonksiyonların çözüm sürelerini içerdiği belirtilmelidir.



(a)



(b)

Şekil 5.10 : Arzu edilen π-noktası 43.5GHz frekansı için YFGSM yöntemi kullanılarak milimetre dalga çalışma frekanslarını içeren YDY-VI'in (a) π-noktası frekansı ($\Delta\phi = 0°$) (b) durdurma bandı ($\Delta\phi = 20°$).

5.5 Sonuç

Bu bölümün en ilginç katkısı YDT'lerdeki helisli YDY'lerin π-noktası frekansı ve durdurma bandlarını tasarlamak için YFGSM yöntemine dayanan oldukça hızlı (KMA ve CST'ye göre 10^4 kat daha hızlı) ve basit bir tasarım prosedürünün sunulmasıdır. İlk olarak, literatürde mevcut dikdörtgen/dairesel dielektrik yüklü helisli YDY'lerin π-noktası frekansı ve durdurma bandlarının KMA, KFY ve YFGSM yöntemleri ile bir karşılaştırma çalışması olarak dikkatli bir analizi yapılmıştır. Bunun yanında, ele alınan helisli YDY'ler, CST elektromagnetik benzetim ortamında modellenmiş ve benzetimleri yapılmıştır. Sonrasında helisli YDY'lerin π-noktası frekansı ve durdurma

Çizelge 5.6 : Seçilen $\Delta\phi$ ve tasarlanan $w_{çubuk,İF}$, $r_{çubuk,İF}$ değerleri için KMA, KFY sonuçları ile CST benzetim sonuçlarına ait band ucu frekanslarının karşılaştırılması.

Yapılar	KMA (GHz)	KFY (GHz)	CST (GHz)
YDY-I $\Delta\phi = 5^\circ$ & $w_{çubuk,İF} = 0.3$mm için	8.36-8.42	8.19-8.28	8.31-8.35
YDY-II $\Delta\phi = 10^\circ$ & $w_{çubuk,İF} = 0.53$mm için	14.15-14.36	14.29-14.83	14.22-14.41
YDY-III $\Delta\phi = 15^\circ$ & $w_{çubuk,İF} = 0.36$mm için	13.75-14.06	13.93-14.28	13.49-13.80
YDY-IV $\Delta\phi = 5^\circ$ & $w_{çubuk,İF} = 0.35$mm için	8.39-8.45	8.49-8.56	8.25-8.28
YDY-V $\Delta\phi = 5^\circ$ & $r_{çubuk,İF} = 0.54$mm için	20.34-20.61	22.96-23.28	22.98-23.15
YDY-VI $\Delta\phi = 20^\circ$ & $w_{çubuk,İF} = 0.16$mm için	43.69-44.89	42.93-44.27	44.37-45.47

Çizelge 5.7 : Farklı helisli YDY'ler için KMA, CST ve YFGSM yöntemleri ile π-noktası frekansı tasarım eğrilerinin(Şekil 5.7'den görülebilir) bulunması için gerekli hesaplama süreleri.

	Benzetim süresi (s)		
Yapılar	KMA	CST	YFGSM
YDY-I	3.46×10^4	4.97×10^4	11.31
YDY-II	13.63×10^4	1.71×10^4	34.26
YDY-III	4.58×10^4	7.74×10^4	11.31
YDY-IV	2.27×10^4	4.59×10^4	6.05
YDY-V	13.1×10^4	4.37×10^4	55
YDY-VI	22.49×10^4	3.72×10^4	155.40

bandı için amaçlanan tasarım prosedürü ile elde edilen sonuçlar; yayınlanmış sonuçlar, KMA, KFY sonuçları ve CST sonuçları ile doğrulanmıştır ve sonuçların iyi uyumlu olduğu gözlenmiştir. Sunulan tasarım prosedürünün mikrodalga frekanslarından milimetre dalga frekanslarına kadar geniş bir çalışma frekans bölgesine sahip farklı helisli YDY'lerin π-noktası frekansı ve durdurma bandının tasarımında etkili ve başarılı bir şekilde kullanılabildiği görülmüştür. YFGSM yöntemine dayanan sunulan tasarım prosedürünün helisli YDY'lerin π-noktası frekansı tasarımı için KMA ve KFY

yöntemlerine alternatif olacağı umulmaktadır.

Sunulan tasarım prosedürü sadece dielektrik yüklü ilgili helisli YDY konfigürasyonlarının π-noktası frekans bölgesinin belirlenmesi ile sınırlanmamaktadır. Daha karmaşık yapıdaki helisli YDY konfigürasyonlarının saçılma matrisi, tam dalga elektromagnetik benzeticilerle doğru bir şekilde elde edilirse, amaçlanan YFGSM tasarım prosedürü bu tipteki yapıların π-noktası frekans bölgelerinin tasarımı/eniyilenmesi için tamamlayıcı bir işleme sahip olacaktır. Amaçlanan tasarım prosedürünün, yüksek güçlü ve genişbandlı YDT'lerin tasarımında önemli role sahip olan helisli YDY'nin π-noktası frekans bölgesinin tasarımında alternatif bir yaklaşım olabileceği umulmaktadır. Sunulan tasarım prosedürü, gelecek çalışmalar olarak metal segmentlere sahip asimetrik dielektrik yüklü helisli YDY'lere doğrudan uygulanabilmektedir. Sonuca varmadan önce, sunulan prosedürün YDT'lerdeki helisli YDY'lerin π-noktası ve band ucu frekanslarının tasarımı ile sınırlı olduğu belirtilmelidir.

6. KESİN FLOQUET YAKLAŞIMI İLE GENİŞBANDLI YÜRÜYEN DALGALI TÜPLER İÇİN HELİS TİPİ YAVAŞ DALGALI YAPILARIN DİSPERSİYON KARAKTERİSTİĞİNİN ANALİZİ

Bu bölümde YDT'lerde kullanılan yüklü helisli yavaş dalgalı yapıların dispersiyon karakteristiğinin kontrolünde kullanılan ve Kesin Floquet Yaklaşımı (KFY) olarak isimlendirilen farklı bir yöntem sunulmaktadır. Bu bağlamda, bu bölüm üç ana kısımdan oluşmaktadır. İlk olarak, helisli YDY'lerin dispersiyon analizi için KFY açıkça ifade edilmiştir. İkinci olarak, yöntemin geçerliliğini test etmek için, mevcut literatürde verilen dikdörtgen, dairesel ve T biçimli dielektrik destek çubukları ile yüklü birçok helisli YDY'nin normalize faz hızları belirlenmiştir. Buna ek olarak, dielektrik ve metal segment yüklü helisli YDY'de KFY ile dispersiyon karakteristiğinin araştırılması ele alınmıştır. Son olarak, ele alınan tüm helisli YDY'ler CST Microwave Studio tasarım ortamında modellenmiş ve elde edilen tüm sonuçlar sunulan yöntem ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca amaçlanan yöntem, literatürde mevcut olan teorik ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. KFY yönteminin literatürde mevcut çalışmalar ve CST ile uyum içinde olduğu not edilmelidir. KFY, helisli YDY'lerin dispersiyon analizi için literatürdeki mevcut yöntemlere göre hızlı ve alternatif olabilmektedir.

6.1 Giriş

Helis tipi YDY'ler sağladığı geniş frekans bandında çalışma imkanından dolayı on yıllardır YDT'lerde kullanılmaktadır [11, 13, 25, 27, 28, 32, 39, 41, 55, 57–59, 65, 75–77]. Helisli YDY'ler geniş bir frekansbandında dispersiyonsuz frekans karakteristiğine sahip olabilmektedir. Bu durumda YDT'ler helisli YDY'lerin görece düz dispersiyon karakteristiklerinden ötürü makul bir kazanç ve verimlilikle genişbandda çalışabilmektedir. YDT'lerde geniş bir frekans bandında düze yakın bir faz hızı dispersiyonu elde etmek için, helisli YDY'ler dielektrik destek çubukları ve metal segmentler ile yüklenebilmektedir. Bu sebeple, helisli YDY'lerin dispersiyon karakteristiklerinin analizi için kolay ve hızlı bir yöntemin olması gereklidir.

Bu bölümün amacı, helisli YDY gibi periyodik yapıların birim hücresine ait tüm saçılma parametrelerinin elde edilmesine dayanan ve Kesin Floquet Yaklaşımı olarak isimlendirilen hızlı ve basit bir analiz yönteminin sunulmasıdır. Bu yöntem ilk olarak helisli YDY'nin birim hücresine ait saçılma parametrelerinin bulunmasına ihtiyaç duymaktadır. Helisli YDY'nin tek bir sarımı, ilgilenilen iletken şerit helisin dönme yönüne dik yönde ve dış yarıçapında sökülüp düzleştirilmektedir. Bu durumda oluşan birim hücrenin tüm saçılma parametrelerinin hesaplanmasında igili helisli YDY'nin merdiven devre gösterimi yapılabilmektedir [28]. Böylece, ilgilenilen helisli YDY'nin birim hücresine ait saçılma parametreleri ve Floquet faz sabiti kullanılarak normalize faz hızı elde edilebilmektedir. KFY yönteminin geçerliliğini test etmek için, dikdörtgen, dairesel, T-biçimli ve metal segment yüklü helisli YDY'ler analiz için ele alınmıştır. Her helisli YDY konfigürasyonu kendisine ait merdiven devre gösterimi ile modellenmiştir. Her bölgeye (vakum, dielektrik ve karışık bölgeler) ait karakteristik empedanslar ve faz sabitleri [28] no'lu referansta verilen mikroşerit hat formülleri kullanılarak hesaplanabilmektedir. Tüm bölgeler ve bu bölgeler arasındaki süreksizlikler, kendilerine ait saçılma matrisleri ile modellenebilmektedir. Tek sarımlı helisli YDY'nin saçılma matrisi, helis dış yarıçapında sökülüp düzleştirilerek elde edilen merdiven devredeki ilgili her bir parçanın (bölgeler ve süreksizlikler) kaskat bağlanmasıyla elde edilebilmektedir. Bu durumda, KFY kullanılarak, her bir helisli YDY'nin dispersiyon karakteristiği kolay bir şekilde elde edilebilmektedir. KFY'nin genişbandlı YDT'lerde kullanılabilecek helisli YDY'lerin normalize faz hızı karakteristiğinin elde edilmesinde hızlı ve kolay hesaplama yeteneğinden dolayı alternatif bir analiz yöntemi olarak kullanılabileceğini dispersiyon sonuçları göstermektedir.

6.2 Kesin Floquet Yaklaşımı

Helisli YDY'nin tek sarımı bu yapının birim hücresini oluşturmaktadır ve bu sebeple ilgili tek sarımlı model $[b] = [S][a]$ olarak yazılabilen, bu ifadede yer alan a ve b'lerin giriş ve çıkış kapılarındaki kompleks modal genlikler olarak ifade edilebildiği Genelleştirilmiş Saçılma Matrisi (GSM) formunda yazılabilmektedir [51, 52]. İfadelerinin $a_2 = \lambda b_1$, $b_2 = \lambda a_1$ olarak yazılabildiği ve λ'nın kompleks sabit olduğu Floquet koşulu dikkate alınırsa ve bu ifadeler GSM gösteriminde yerine

konursa, denklem 6.1'deki gibi bir karakteristik denklem elde edilmektedir.

$$\lambda^2 + \lambda\left(\frac{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21} - 1}{S_{21}}\right) + 1 = 0. \tag{6.1}$$

Denklem 6.1'de yer alan λ denklem 6.2'de gösterilmektedir. Denklem 6.2'de verilen β ve p sırasıyla Floquet faz faktörü ve helisli birim hücrenin periyodunu göstermektedir.

$$\lambda_{1,2} = e^{\pm j\beta p}, \quad \beta p \in [0, \pi]. \tag{6.2}$$

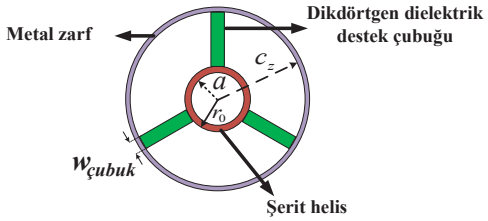
$e^{j\omega t}$ zaman bağımlılığı kabulü yapıldığında denklem 6.2'de yer alan $-j\beta p$ and $+j\beta p$ büyüklükleri sırasıyla pozitif ve negatif z-yönünde ilerleyen dalga çözümlerine karşı düşmektedir. Tek bir Floquet modu yayılımı dikkate alındığında, denklem 6.2'nin denklem 6.1'de yerine konulmasıyla denklem 6.3'te verilen dispersiyon denklemi elde edilmektedir.

$$\beta p = cos^{-1}\left(\frac{1 - S_{11}S_{22} + S_{12}S_{21}}{2S_{21}}\right), \qquad \vartheta_f = \frac{2\pi f}{\beta}. \tag{6.3}$$

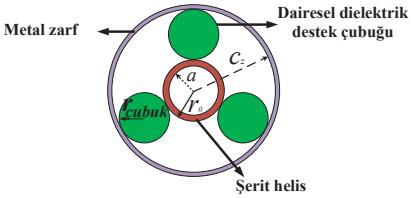
İlgili helisli YDY'nin tek sarımına ait saçılma parametrelerini elde etmek için, ilgili helisli YDY'ler [41]'de ve [55]'te ve bir önceki bölümde detayları ile verilen merdiven devre ile gösterilebilmektedir. Bu sayede ilgili birim hücreye ait denklem 6.3'te yer alan saçılma parametreleri bulunmuş olmaktadır. Bu durumda, ilgili periyodik yapıya ait faz hızı denklem 6.3 kullanılarak bulunabilmektedir. İlgili problemde KFY'nin geçerliliğini test etmek için ilerleyen bölümde farklı helisli YDY'ler ele alınmıştır.

6.3 Helisli YDY Örnekleri ve Faz Hızı Sonuçları

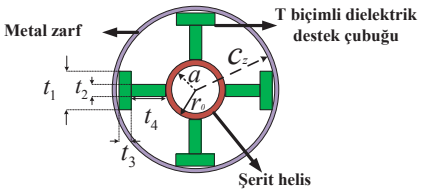
Mevcut literatürde teorik ve deneysel sonuçları [57, 58, 65, 75, 76] referans numaralı çalışmalar ile verilen ve kesit görünümleri Şekil 6.1'de verilen dört farklı helisli YDY modeli kullanılarak KFY'nin helisli YDY'lerde faz hızı dispersiyonunun elde edilmesindeki geçerliliği araştırılmıştır. Şekil 6.1'de verilen modellerde kullanılan a, r_0, c_z, $w_{çubuk}$, $r_{çubuk}$, $t_{1,2,3,4}$, θ_m ve s ifadeleri sırasıyla helisin ortalama ve dış yarıçapı, metal zarfın yarıçapı, dikdörtgen dielektrik destek çubuğunun genişliği, dairesel destek çubuğunun çubuk yarıçapı, T-biçimli çubuğa ait parametreler, metal segment açısal genişlik ve metal segmentin uç yarıçapını ifade etmektedir. Ek olarak, ilgili helisli YDY'lere ait teorik, deneysel ve CST sonuçları da karşılaştırma için dikkate alınmıştır. 96GB RAM ve intel xeon silver 4114 2.20GHz frekanslı işlemciden oluşan bir iş istasyonu KFY yöntemi ve CST tasarım ortamında ilgili helisli YDY'lerin dispersiyon



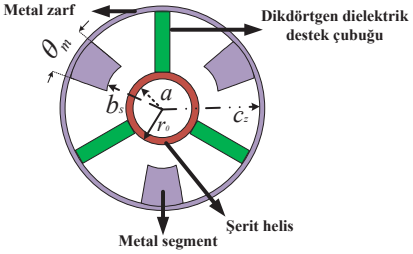
(a) Dikdörtgen destek çubuklu helis: YDY-I.



(b) Dairesel destek çubuklu helis: YDY-II.



(c) T-biçimli destek çubuklu helis: YDY-III.



(d) Metal segment yüklü helis: YDY-IV.

Şekil 6.1 : Literatürde mevcut bazı helisli YDY konfigürasyonlarına ait kesit görünümleri.

karakteristiklerinin hesaplanmasında kullanılmıştır. İlgilenilen helisli YDY'nin tek sarımı, bir önceki bölümde ve [28] no'lu referansta detayları verilen mikroşerit hat formüllerine dayanan ve iletim hattı büyüklükleri (her bölgenin karakteristik empedansı (Z_n) ve faz sabiti β_n)'ni içeren bir merdiven devre ile modellenmiştir. Bu amaçla, her helisli YDY, helisin dönme yönüne dik yönde dış yarıçapı dikkate alınarak sökülmüş ve düzleştirilmiştir. Literatürde yer alan helisli YDY'lere ait tüm yapı parametreleri Çizelge 6.1'de verilmiştir. Çizelge 6.1'de verilen ε_r, p, ψ ve $w_{şerit}$

Çizelge 6.1 : Ele alınan helisli YDY'lere ait yapı parametreleri.

Yapılar	ε_r	ÇB[1] SB[2]	SD[3]	SM[4]	p (mm)	a (mm)	r_0 (mm)	c_z (mm)	ψ (derece)	$w_{şerit}$ (mm)	$w_{çubuk}$, $r_{çubuk}$, t_n (mm)
YDY-I, [57, 65] Sekil 4 (a)	5.1	DI, -	3	-	1.74	1.524	1.651	2.64	10.3	0.89	$w_{çubuk}$: 0.508
YDY-II, [57] Sekil 4 (a)	9	DA, -	3	-	0.58	0.826	0.889	1.499	6.4	0.127	$r_{çubuk}$: 0.305
YDY-III, [58] Sekil 11. k=8 için	5.2	T, -	4	-	0.714	0.451	0.475	1.255	14.16	0.337	t_1: 0.7, t_2: 0.3 t_3: 0.38, t_4: 0.4
YDY-IV, [76] $\theta_m = 70°$, s=1.445 Sekil 8. (a) için	5.12	DI, K	3	3	1.465	1.111	1.182	2.667	11.85	0.762	$w_{çubuk}$: 0.762

[1] ÇB: Çubuk Biçimi, DI: Dikdörtgen, DA: Dairesel, T: T-Biçimli, [2] SB: Segment Biçimi, K: Kama,
[3] SD: Dielektrik destek çubuklarının sayısı [4] SM: Metal segment sayısı.

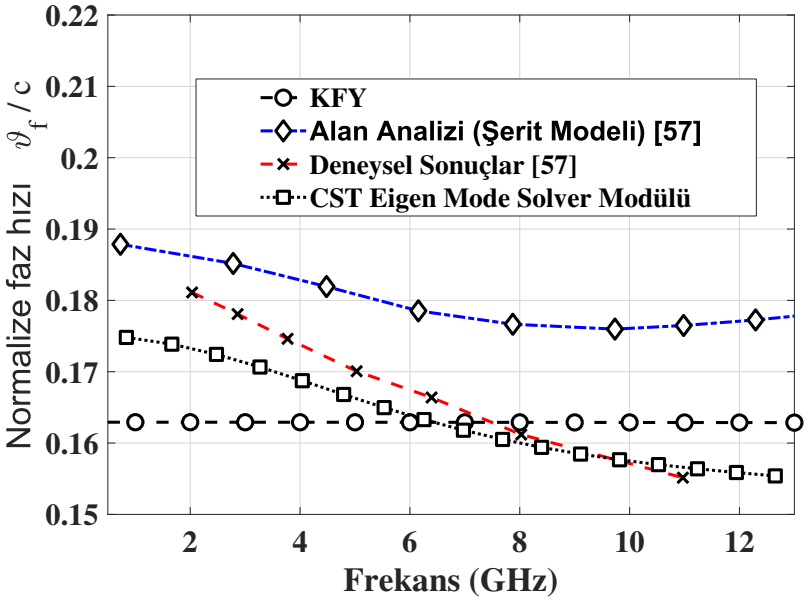
ifadeleri sırasıyla destek çubuklarının bağıl dielektrik sabitini, helis hatvesini, helis hatve açısını ve helisin şerit genişliğini göstermektedir.

6.3.1 Dikdörtgen dielektrik destek çubukları ile yüklü helis: YDY-I

Ele alınan YDY modeli metal bir zarf içerisinde eşit aralıklı üç adet dikdörtgen biçimli destek çubuğunun simetrik bir şekilde helis etrafında yerleştirilmesinden oluşmaktadır. İlgili YDY-I modeline ait merdiven devre bölüm 6.3'te giriş kısımlarında bahsedilen çıkartma prosedürü ile elde edilebilmektedir. İlgili merdiven devrenin saçılma parametreleri, [41] ve [55] no'lu referanslarda anlatıldığı gibi ve bir önceki bölümde verilen ilgili bölgelere ait karakteristik empedanslar ve faz sabitleri ile her bölge arasındaki süreksizlikler dikkate alınarak hesaplanabilmektedir. İlgili frekanslar için ele alınan yapının dispersiyon karakteristiği, YDY-I'in tek sarımına ait merdiven devre gösteriminden yararlanarak saçılma parametrelerinin hesaplanmasıyla ve bu ifadelerin denklem 6.3'te yerine konmasıyla kolaylıkla elde edilebilmektedir. [65] no'lu referanstan atfedilen ve [57] no'lu referansta verilen deneysel sonuçlar ve [57] no'lu referansta verilen teorik sonuçlar karşılaştırmaların yapılması amacıyla kullanılmıştır. İlgili helisli yavaş dalgalı yapının eşdeğer devre gösterimine dayanarak periyodik yapının birim hücresine ait saçılma parametrelerinin hesaplanması hesaplama açısından hızlı bir yaklaşım sunmakla beraber faz hızı dispersiyon karakteristiğini kabul edilebilir değerler arasında bulmaktadır. Şekil 6.2'de verilen sonuçlara göre, ilgili frekans bölgesi boyunca KFY ve teorik sonuçlar arasındaki maksimum ve minimum yüzde hataların sırasıyla %3.23 ve % 7.43 olduğu belirlenmiştir. Mevcut problemin aynı sonuç grafiğine göre KFY ile deneysel sonuçlar arasındaki ortalama yüzde hatanın % 5.37 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca KFY ile CST benzetim sonuçları arasındaki maksimum yüzde hatanın % 6.75 olduğu belirlenmiştir.

6.3.2 Dairesel destek çubuk yüklü helis:YDY-II

Bu modelde metalik bir kabuk içerisinde eşit aralıklı dairesel destek çubukları helis etrafına simetrik bir şekilde yerleştirilmiştir. Bu modelin tek sarımına ait merdiven devre gösteriminin oluşturulmasında ve saçılma parametrelerinin elde edilmesinde her dairesel dielektrik destekli çubuğun bir kama biçimli geometri olarak ele alındığını bu bölümde vurgulamak gereklidir. Bu amaçla, seçilen kama geometrisine ait etkin bağıl



Şekil 6.2 : Dikdörtgen destekli helisli YDY-I modeline ait normalize faz hızı-frekans eğrilerine ilişkin KFY, alan analizi, deneysel ve CST Eigen Mode Solver modülü sonuçları.

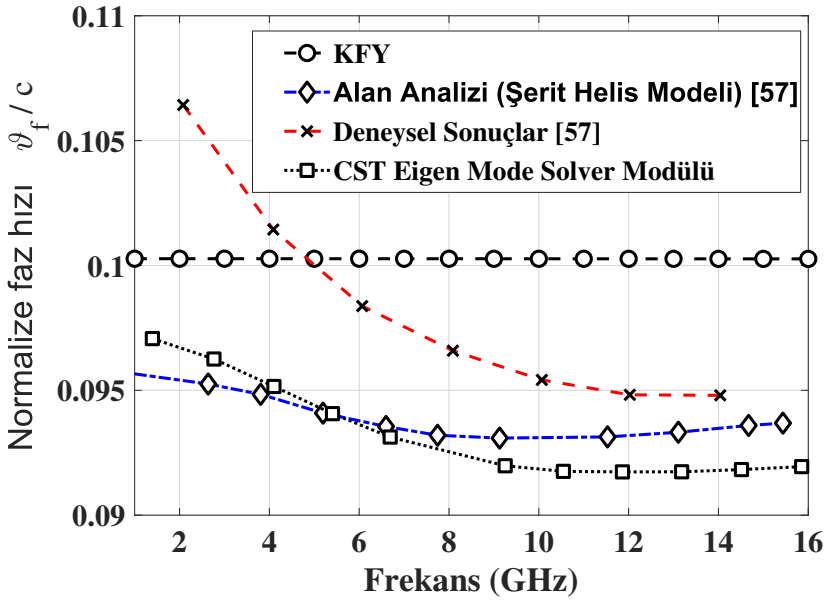
dielektrik sabiti denklem 6.4'te ifade edilmektedir [57].

$$\varepsilon_A = 1 + (\varepsilon_r - 1)\frac{A_d}{A_k}. \tag{6.4}$$

Denklem 6.4'te verilen A_d ve A_k sırasıyla ilgili dairesel dielektrik destek çubuğunun ve seçilen her bir kama geometrisinin kesit alanlarını ifade etmektedir. Bu durumda, dairesel destek çubuk bölgesi, etkin bağıl dielektrik sabitine sahip kama biçimli bir modele donüşmektedir. YDY-II'nin tek sarımlı modeline ait saçılma parametrelerinin hesaplama prosedürü YDY-I ile benzer şekildedir. Bu durumda, YDY-II'nin normalize faz hızı davranışı, Şekil 6.3'teki gibi elde edilebilmektedir. KFY ile ele alınan bu örnekte eşdeğer devre modelinde kama biçimli geometri seçimi için etkin dielektrik sabiti hesaplandığından ve mikroşerit hat yaklaşımı kullanıldığından elde edilen sonuçlarda görece farklılıklar oluşmuştur. [75]'ten atfedilen ve [57]'den alınan alan analizi ve deneysel sonuçlar Şekil 6.3'te verilmektedir. KFY sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki maksimum yüzde hatanın %5.73 olduğu belirtilmelidir.

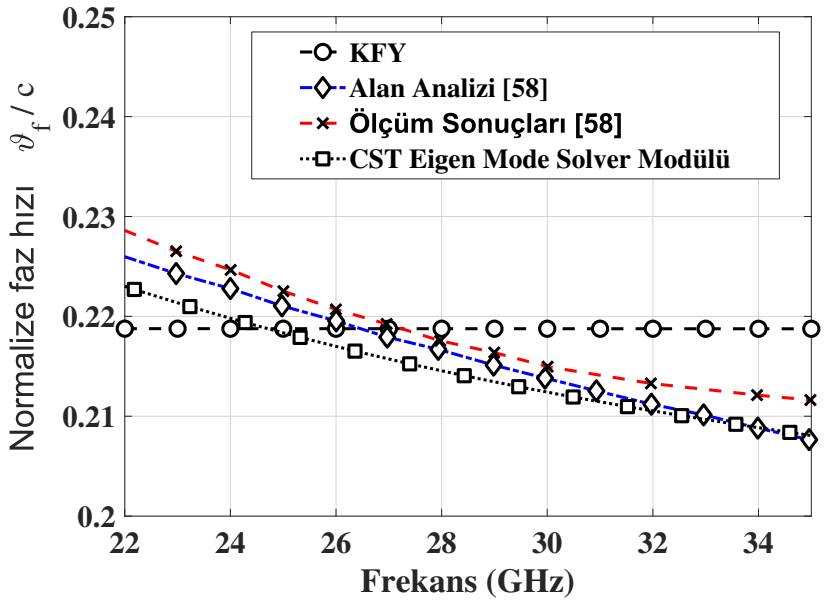
6.3.3 T-biçimli dielektrik yüklü helis: YDY-III

YDT'lerde geniş bir frekans bölgesinde çalışmak için üretim açısından uygunluğundan dolayı helisli YDY'lerde T-biçimli dielektrik destek çubukları kullanılabilmektedir [39]. Bu amaçla [58]'de yer alan ve yapı parametreleri Çizelge 6.1'de verilen T-biçimli dielektrik destek çubuklu helisli YDY modeli bu bölümde ele alınmıştır.



Şekil 6.3 : Dairesel destekli helisli YDY-II modeline ait normalize faz hızı-frekans eğrilerine ilişkin KFY, alan analizi, deneysel ve CST Eigen Mode Solver modülü sonuçları.

Bu modele ait tek sarımlı birim hücrenin saçılma parametrelerinin hesabı için, ilgili modeldeki helis ve metal zarf arasındaki bölgeye yerleştirilmiş yükleme kısımlarının ilk ve üçüncü dielektrik-hava bölgelerinin denklem 6.4'te yer alan etkin dielektrik sabiti ile modellendiğini ifade etmek gereklidir. YDY-III'ün tek sarımına ait saçılma parametrelerinin hesaplanması prosedürü YDY-II'deki ile aynıdır. Bu durumda, Şekil 6.4'te gösterildiği gibi, YDY-III'e ait normalize faz hızı karakteristiği KFY

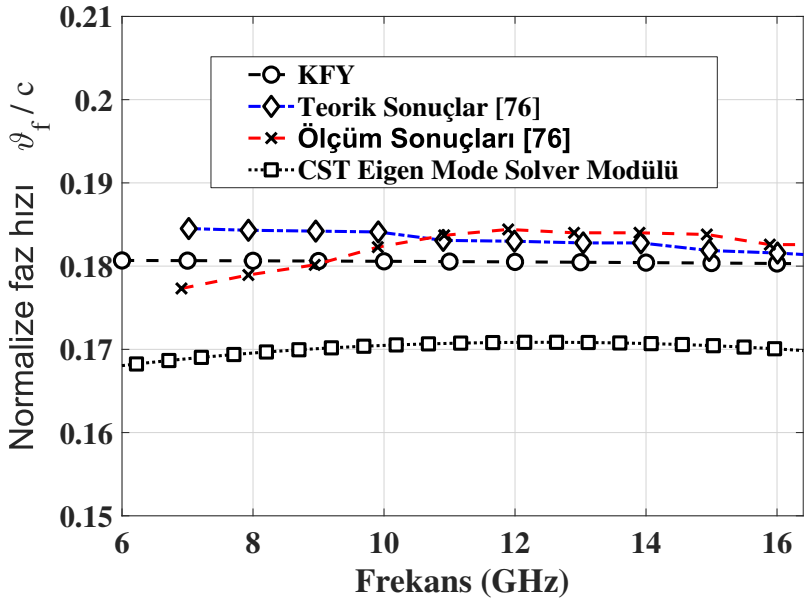


Şekil 6.4 : T çubuk yüklü helisli YDY-III modeline ait normalize faz hızı-frekans eğrilerine ilişkin KFY, alan analizi, deneysel ve CST Eigen Mode Solver modülü sonuçları.

kullanılarak elde edilebilmektedir. Şekil 6.4'te verilen teorik ve ölçüm sonuçları [58] no'lu çalışmadan alınmıştır. Bu örnek için, KFY ile ele alınan eşdeğer devre modelinde dielektrik-hava içeren bölgelerin etkin bir dielektrik sabiti ile modellenmesi normalize faz hızı frekans eğrisinin kabul edilebilir değerlerde çıkmasını sağlamıştır. KFY ile alan analizi, ölçüm ve CST sonuçları arasındaki maksimum yüzde hatanın sırasıyla %5.35, %3.36 ve %5.1 olduğu Şekil 6.4'te görülmektedir.

6.3.4 Dikdörtgen dielektrik ve metal segment yüklü helis: YDY-IV

Bu bölümde ele alınan model uç yarıçapı b_s ve metal segment açısal genişliği θ_m olan metal segment bölümü dışında geometrik olarak YDY-I ile aynıdır. Bu modelin tek sarımına ait saçılma parametrelerinin elde edilmesinde metal segment-hava bölgesinin karakteristik empedanslarının hesabı için [28]'de verilen mikroşerit hat formülünün kullanıldığı belirtilmelidir. Sunulan yöntemin sonuçları ile, verileri [76] no'lu çalışmadan alınan teorik ve ölçüm sonuçlarının tutarlı olduğu Şekil 6.5'ten görülmektedir. İlgilenilen frekans bölgesi boyunca normalize faz hızının belirlenmesinde kullanılan KFY ve teorik sonuçlar arasındaki yüzde hata %0.25 ile %2.1 arasında değişmektedir. KFY ile deneysel sonuçlar arasındaki ortalama yüzde hatanın ilgilenilen frekans aralığı içinde %1.42'nin altında olduğu Şekil 6.5'ten



Şekil 6.5 : Dielektrik & metal segment yüklü helisli YDY-IV modeline ait normalize faz hızı-frekans eğrilerine ilişkin KFY, alan analizi, deneysel ve CST Eigen Mode Solver modülü sonuçları.

görülmektedir. KFY ve CST sonuçları arasındaki maksimum ve minimum yüzde hata sırasıyla %7.56 ve %5.68 olmaktadır.

Son olarak ise, ele alınan senaryolara ait KFY ve CST sonuçlarının elde edilmesinde gerekli hesaplama sürelerinin karşılaştırılmasını ifade etmek önemlidir. Şekiller 6.1-6.5'te verilen KFY ve CST ile elde edilen sonuçlar için gerekli hesaplama süreleri Çizelge 6.2'de verilmektedir. İlgili şekillerde yer alan KFY ve CST'ye ait sonuçları elde etmek için gerekli hesaplama süreleri arasındaki farkın neredeyse 10^4 kat fazla olduğunu Çizelge 6.2'ten söylemek mümkündür.

Çizelge 6.2 : Farklı helisli YDY'ler için Şekiller 6.2 ve 6.5'de elde edilen sonuçlar için gerekli hesaplama sürelerinin karşılaştırılması.

	Hesaplama süresi (s)	
Yapı	KFY	CST
YDY-I	1.74	14564
YDY-II	2.55	9284
YDY-III	2.97	6952
YDY-IV	0.11	5104

6.4 Sonuç

Bu bölümde ele alınan çalışmada farklı dielektrik ve metal segment yüklü helisli YDY'lere ait dispersiyon karakteristiklerinin analizi için Kesin Floquet Yaklaşımı uygulanmıştır. Amaçlanan yaklaşımdan elde edilen sonuçlar literatürde mevcut teorik ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan sonuçlara göre, KFY küçük farklılıklara sahip olmasına rağmen, ele alınan çözüm yöntemlerine göre KFY'nin daha hızlı sonuç verdiği görülmüştür. Buna ek olarak, sunulan teorinin, ilgilenilen frekans bölgesinde YDY-IV gibi nerdeyse dispersiyonsuz karakteristiğe sahip olabilen helisli YDY modellerinde güvenli bir şekilde uygulanabileceği görülmüştür.

7. SONUÇLAR VE GENEL DEĞERLENDİRMELER

Yürüyen dalgalı tüp kuvvetlendiricilerinde kullanılan tek helisli yavaş dalgalı yapılardaki önemli sorunlardan biri ilgili yapılardaki üretim hatalarından, ilgili elemanların yerleşiminden ve/veya dielektrik destek çubuklarının dielektrik sabiti değişiminden kaynaklanan asimetrilerin oluşmasıdır. Helisli yavaş dalgalı yapılarda meydana gelen asimetri problemi π-noktası frekansında durdurma bandını oluşturmaktadır ve bu durum yürüyen dalgalı tüplerde güç problemlerinin oluşmasına yol açmaktadır. Bu bağlamda, helisli yavaş dalgalı yapılarda farklı durumlarda oluşabilen durdurma bandlarının analiz ile belirlenmesi ve güç problemlerinin önüne geçebilmek için amaca uygun tasarımların yapılması noktasında literatüre etkili ve hızlı bir çözüm sunulmasına ihtiyaç duyulduğu görülmüştür. Bu doktora tezi kapsamında mevcut literatürde ihtiyaç duyulan bu eksikliklerin giderilmesi için birçok uygulamada kullanılabilen kapsamı genişletilmiş yeni bilimsel yöntemler ve özgün yaklaşımlar ile bu yöntemlerin asimetrik yüklü helisli yavaş dalgalı yapılara uygulanması yoluyla literatüre katkı yapılmıştır.

Periyodik yapıların iletim durdurma band bölgelerinin bulunması için önerilen yöntemler [51–53] simetrik birim hücreli periyodik yapılar için sınırlıydı. Helisli yavaş dalgalı yapıların asimetrik yüklü olması durumunda oluşan durdurma bandının belirlenmesi için, [51–53] no'lu çalışmalarda önerilen yöntemler uygun değildi. Bu durumu ortadan kaldıracak kapsamlı, hızlı ve etkili bir çözüm literatürde mevcut değildi. Bu amaçla, hem simetrik hem de asimetrik periyodik yapıların iletim/durdurma band bölgelerinin bulunması için yeni ve özgün bir yöntem geliştirildi [41]. Önerilen yeni yöntem, doktora tez kapsamında asimetrik yüklü helisli yavaş dalgalı yapıların π-noktası frekansının belirlenmesi ve bu frekans noktası civarında oluşan durdurma bandı analizlerinde başarı ile uygulandı.

Helisli yavaş dalgalı yapılarda oluşan ve bölüm 4'te de bahsedilen birçok durumdan kaynaklanabilen asimetri problemlerinin incelenmesi için yeniden formüle edilmiş bir bilimsel yöntem, literatüre [55] no'lu çalışma ile önerilmiştir. [41] no'lu çalışmadan

farklı bir bakış açısı ile önerilen [55] no'lu çalışma ile hem asimetrik hem de simetrik birim hücreli periyodik yapıların iletim/durdurma band bölgelerinin belirlenmesi için basit ve zarif bir formülasyon geliştirilmiştir. Geliştirilen yeni bilimsel yöntem, asimetrik yüklü helisli yavaş dalgalı yapıların durdurma bandı analizlerinde birçok durum için başarı ile test edilmiştir.

Genişband ve/veya yüksek güç isterlerine sahip olan yürüyen dalgalı tüplerin çalışma isterlerini etkileyen ve sınırlayan en önemli sorunlar arasında band içi güç boşlukları ve band ucu osilasyonları yer almaktadır. Bu sorunların üstesinden gelebilmek adına öncelikle bu sorunun kaynağını ele almanın önemli bir başlangıç noktası oluşturacağı düşünülmüştür. Bu bağlamda, bu sorunların oluşmasına zemin hazırlayan helisli yavaş dalgalı yapılardaki asimetrik yerleşim probleminin detaylı incelenme ihtiyacı doğmuştur. Bölüm 3'te verilen ve [41] no'lu çalışmada literatüre önerilen yeni bilimsel yöntem ile bölüm 4'te verilen ve [55] no'lu çalışmada sunulan bir diğer yeni bilimsel yöntem farklı geometrilere ve parametrik değerlere sahip helisli yavaş dalgalı yapıların π-noktası frekansının belirlenmesi ve durdurma bandı analizleri ile amaca uygun tasarımlarının yapılması için ilgili simetrik ve asimetrik yüklü helisli yavaş dalgalı yapılara başarı ile uygulanmıştır. Bu sayede helisli yavaş dalgalı yapıların π-noktası frekansı ve durdurma bandı tasarımı için etkili ve oldukça hızlı bir tasarım prosedürü geliştirilmiştir.

Genişbandlı yürüyen dalgalı tüpler için etkili ve hızlı bir dispersiyon analiz yöntemi geliştirildi. Ele alınan yöntemin uygulanabilirliği literatürde mevcut olan birçok helisli yavaş dalgalı yapılar üzerinde test edildi ve oldukça düz bir dispersiyon karakteristiğine sahip olabilen helisli yavaş dagalı yapılar için oldukça uygun bir analiz yöntem olduğu vurgulanmıştır.

Genel olarak periyodik yapılar için özelde ise asimetrik yüklü helisli yavaş dalgalı yapıların π-noktası frekansı ve durdurma bandı analizleri ve tasarımları için geliştirilen ve literatüre önerilen yeni bilimsel yöntemler, literatürde mevcut olan teoriler ve bağımsız elektromagnetik modelleme imkanı sunan, endüstride yaygın olarak kullanılan lisanslı benzetim ortamları HFSS ve CST ile karşılaştırılmış, önerilen yöntemlerin uygulanabilirliği ve geçerlilik durumları değerlendirilmiştir.

Bu tez çalışması ile literatüre önerilen, teorik ve benzetim sonuçları ile doğrulanan bilimsel yöntemlerin genel olarak farklı tipteki periyodik yapılar için ve özel olarak ise vakum tabanlı teknolojilerde kullanılan yavaş dalgalı yapılar için durdurma bandı özelliklerinin araştırılmasında kullanılması bu doktora tez çalışmasının gelecek çalışmaları olma niteliğindedir.

KAYNAKLAR

[1] **Gewartowski, J.W. ve Watson, H.A.** (1965). *Principles of electron tubes: including grid-controlled tubes, microwave tubes, and gas tubes*, van Nostrand.

[2] **Adam, S.F.** (1969). *Microwave theory and applications*, Prentice-Hall.

[3] **Gilmour, A.** (1994). *Principles of traveling wave tubes*, Artech House.

[4] **Gaponov-Grekhov, A.V. ve Granatstein, V.L.** (1994). *Applications of high-power microwaves*, Artech House Publishers.

[5] **Basu, B.** (1996). *Electromagnetic theory and applications in beam-wave electronics*, World scientific.

[6] **Whitaker, J.** (1999). *Power vacuum tubes handbook*, CRC press.

[7] **Abrams, R.**, **Levush, B.**, **Mondelli, A. ve Parker, R.** (2001). Vacuum electronics for the 21st century, *IEEE Microwave magazine*, *2*(3), 61–72.

[8] **Barker, R.J.**, **Luhmann, N.C.**, **Booske, J.H. ve Nusinovich, G.S.** (2005). *Modern microwave and millimeter-wave power electronics*.

[9] **Tsimring, S.E.** (2007). *Electron beams and microwave vacuum electronics*, Wiley Online Library.

[10] **Benford, J.**, **Swegle, J.A. ve Schamiloglu, E.** (2007). *High power microwaves*, CRC press.

[11] **Gilmour, A.** (2011). *Klystrons, traveling wave tubes, magnetrons, crossed-field amplifiers, and gyrotrons*, Artech House.

[12] **Carter, R.G.** (2018). *Microwave and RF vacuum electronic power sources*, Cambridge University Press.

[13] **Kesari, V. ve Basu, B.** (2018). *High power microwave tubes: basics and trends*, cilt 1, Morgan & Claypool Publishers.

[14] **Wong, P.** (2018). A contemporary study in the theory of traveling-wave tubes, *Doktora Tezi*, University of Michigan.

[15] **Minenna, D.F.**, **André, F.**, **Elskens, Y.**, **Auboin, J.F.**, **Doveil, F.**, **Puech, J. ve Duverdier, É.** (2019). The traveling-wave tube in the history of telecommunication, *The European Physical Journal H*, *44*(1), 1–36.

[16] **Hutter, R.G.**, (1954). Traveling-wave tubes, Advances in Electronics and Electron Physics, cilt 6, Elsevier, s.371–461.

[17] **Pierce, J.R.** (1973). Almost all about waves, *Cambridge: MIT Press, 1973*.

[18] **Varshney, A.K.**, **Guha, R.**, **Datta, S.K. ve Basu, B.** (2016). Dispersion control of helical slow-wave structure by double-negative metamaterial loading, *Journal of Electromagnetic waves and applications*, *30*(10), 1308–1320.

[19] **Guha, R.**, **Bandyopadhyay, A.K.**, **Varshney, A.K.**, **Datta, S.K. ve Basu, B.** (2018). Investigations into helix slow-wave structure assisted by double-negative metamaterial, *IEEE Transactions on Electron Devices*, *65*(11), 5082–5088.

[20] **Duffield, M.J. ve Ghosh, T.K.** (2015). The helix TWT: over 70 years old but not ready to retire, 1–9, `https://www.armms.org/media/uploads/p01---mike-duffield---the-helix-twt-over-70-years-.pdf`.

[21] **Hobrecht, C.** (1977). Resonant loss for helix traveling wave tubes, *Electron Devices Meeting, 1977 International*, IEEE, s.348–350.

[22] **Hinson, D.P.** (1978). An investigation of power suck-out in helix traveling-wave tubes., Teknik Rapor, Varian Associates Inc Palo Alto CA.

[23] **Lien, E.L.** (1979). Stopbands produced by asymmetrical support rod system in helix structures, *Electron Devices Meeting, 1979 Internationa*, IEEE, s.412–415.

[24] **Onodera, T. ve Raub, W.** (1988). Phase velocity dispersion of a generalized metal-segment-loaded helix as used in broad-band traveling-wave tubes, *IEEE Transactions on Electron Devices*, *35*(4), 533–538.

[25] **Onodera, T.** (1988). An analysis of the pi-mode stopband caused by asymmetries of a metal-segment-loaded helix as used in broad-band traveling-wave tubes, *IEEE Transactions on Electron Devices*, *35*(10), 1758–1759.

[26] **Joo, Y.D.**, **Sinha, A.K. ve Park, G.S.** (2003). Electromagnetic wave propagation through an azimuthally asymmetric helix slow wave structure, *Japanese journal of applied physics*, *42*(12R), 7585.

[27] **Datta, S.**, **Kumar, L. ve Basu, B.** (2008). Analysis of π-mode stopband in an asymmetric millimeter-wave helical slow-wave structure, *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, *29*(11), 1048–1059.

[28] **Datta, S.K.**, **Naidu, V.B.**, **Rao, P.R.R.**, **Kumar, L. ve Basu, B.** (2010). Simple formulas for stopband attenuation characteristics of asymmetric helical slow-wave structures of traveling-wave tubes, *IEEE Transactions on Electron Devices*, *57*(6), 1447–1454.

[29] **Antonsen, T.M.**, **Safier, P.**, **Chernin, D.P. ve Levush, B.** (2002). Stability of traveling-wave amplifiers with reflections, *IEEE Transactions on Plasma Science*, *30*(3), 1089–1107.

[30] **Chernin, D.**, **Antonsen, T. ve Levush, B.** (2003). Power holes and nonlinear forward and backward wave gain competition in helix traveling-wave tubes, *IEEE Transactions on Electron Devices*, *50*(12), 2540–2547.

[31] **Pierce, J.R.** (1954). Coupling of modes of propagation, *Journal of Applied Physics*, *25*(2), 179–183.

[32] **Watkins, D.A.** (1958). *Topics in electromagnetic theory*, Wiley.

[33] **Pierce, J.R.** (1950). Traveling-wave tubes, *Bell System Technical Journal*, *29*(3), 390–460.

[34] **Chu, L.J. ve Jackson, J.D.** (1948). Field theory of traveling-wave tubes, *Proceedings of the IRE*, *36*(7), 853–863.

[35] **Searle, W.M.** (1950). Design of traveling wave tubes, *yüksek lisans tezi, University of Western Ontario.*

[36] ***Pierce, J.*** *(1947). Theory of the beam-type traveling-wave tube,* Proceedings of the IRE*,* 35*(2), 111–123.*

[37] ***Luiz, R.*** *(1979). A comprehensive review of travelling-wave tube technology, Teknik Rapor, Defence Research Establishment Ottowa (Ontario).*

[38] ***Brewer, G.R. ve Birdsall, C.K.*** *(1957). Traveling-wave tube propagation constants,* IRE Transactions on Electron Devices*,* 4*(2), 140–144.*

[39] ***Varshney, A.K.***, ***Guha, R.***, ***Ghosh, S.K. ve Basu, B.*** *(2016). Gain-frequency response of a helix traveling-wave tube with T-shaped dielectric support rods in a metal envelope,* Journal of ElEctromagnEtic WavEs and applications*,* 30*(5), 566–578.*

[40] ***Ertay, A.O. ve Şimşek, S.*** *(2017). On the assessment study of small signal gain analysis of helix type traveling wave tube with pierce parameters,* 2017 IV International Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkiye)*, IEEE, s.1–7.*

[41] ***Ertay, A.O. ve Şimşek, S.*** *(2018). A comprehensive Auxiliary Functions of Generalized Scattering Matrix (AFGSM) method to determine bandgap characteristics of periodic structures,* AEU - International Journal of Electronics and Communications*,* 94*, 139 – 144.*

[42] ***Gong, Y.***, ***Duan, Z.***, ***Wang, Y.***, ***Wei, Y.***, ***Yin, H. ve Wang, W.*** *(2011). Suppression of in-band power holes in helix traveling-wave tubes,* IEEE Transactions on Electron Devices*,* 58*(5), 1556–1561.*

[43] ***Tsang, L.*** *(2015). Broadband calculations of band diagrams in periodic structures using the broadband green's function with low wavenumber extraction (BBGFL),* Progress In Electromagnetics Research*,* 153*, 57–68.*

[44] ***Kumar, N. ve Ojha, S.P.*** *(2008). Photonic crystals as infrared broadband reflectors with different angles of incidence: A comparative study,* Progress In Electromagnetics Research*,* 80*, 431–445.*

[45] ***Silvestri, L.***, ***Massoni, E.***, ***Tomassoni, C.***, ***Coves, A.***, ***Bozzi, M. ve Perregrini, L.*** *(2017). Substrate integrated waveguide filters based on a dielectric layer with periodic perforations,* IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*,* 65*(8), 2687–2697.*

[46] ***Joannopoulos, J.D., Johnson, S.G., Winn, J.N. ve Meade, R.D.*** *(2011).* Photonic crystals: molding the flow of light*, Princeton university press.*

[47] ***Yeh, P., Yariv, A. ve Hong, C.S.*** *(1977). Electromagnetic propagation in periodic stratified media. I. General theory,* JOSA*,* 67*(4), 423–438.*

[48] ***Omar, A.S. ve Schunemann, K.*** *(1987). Complex and backward-wave modes in inhomogeneously and anisotropically filled waveguides,* IEEE transactions on microwave theory and techniques*,* 35*(3), 268–275.*

[49] ***Amari, S., Vahldieck, R., Bornemann, J. ve Leuchtmann, P.*** *(2000). Spectrum of corrugated and periodically loaded waveguides from classical matrix eigenvalues,* IEEE Transactions on Microwave Theory and techniques*,* 48*(3), 453–460.*

[50] ***Lech, R. ve Mazur, J.*** *(2004). Propagation in rectangular waveguides periodically loaded with cylindrical posts,* IEEE microwave and wireless components letters*,* 14*(4), 177–179.*

[51] ***Simsek, S. ve Topuz, E.*** *(2007). Some properties of generalized scattering matrix representations for metallic waveguides with periodic dielectric loading,* IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*,* 55*(11), 2336–2344.*

[52] ***Şimşek, S.*** *(2013). A novel method for designing one dimensional photonic crystals with given bandgap characteristics,* AEU-International Journal of Electronics and Communications*,* 67*(10), 827–832.*

[53] ***Erkan, O., Akıncı, M.N. ve Şimşek, S.*** *(2018). A fast hybrid method for the bandgap analysis of 2D photonic crystals based on EMT and AFGSM methods,* AEU-International Journal of Electronics and Communications*,* 87*, 107–112.*

[54] ***Şimşek, S., Işık, C., Topuz, E. ve Esen, B.*** *(2006). Determination of the complex permittivity of materials with transmission/reflection measurements in rectangular waveguides,* AEU-International Journal of Electronics and Communications*,* 60*(9), 677–680.*

[55] ***Ertay, A.O. ve Şimşek, S.*** *(2018). Determination of stopband characteristics of asymmetrically loaded helix slow wave structures with Auxiliary Functions of Generalized Scattering Matrix (AFGSM) method,* AEU - International Journal of Electronics and Communications*,* 95*, 271 – 278.*

[56] ***Sinha, A., Verma, R., Gupta, R., Kumar, L., Joshi, S., Jain, P. ve Basu, B.*** *(1992). Simplified tape model of arbitrarily-loaded helical slow-wave structures of a travelling-wave tube,* IEE Proceedings H-Microwaves, Antennas and Propagation*,* 139*(4), 347–350.*

[57] ***Ghosh, S., Jain, P. ve Basu, B.*** *(1997). Rigorous tape analysis of inhomogeneously-loaded helical slow-wave structures,* IEEE Transactions on Electron Devices*,* 44*(7), 1158–1168.*

[58] ***D'Agostino, S.***, ***Emma, F. ve Paoloni, C.*** *(1998). Accurate analysis of helix slow-wave structures,* IEEE Transactions on Electron Devices, 45*(7), 1605–1613.*

[59] ***Kesari, V. ve Basu, B.N.*** *(2017). Analysis of some periodic structures of microwave tubes: part I: analysis of helical slow-wave structures of traveling-wave tubes,* Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 31*(1), 1–37.*

[60] ***Ramo, S.***, ***Whinnery, J.R. ve Van Duzer, T.*** *(2008).* Fields and waves in communication electronics, *John Wiley & Sons.*

[61] ***Chu, T.S. ve Itoh, T.*** *(1986). Generalized scattering matrix method for analysis of cascaded and offset microstrip step discontinuities,* IEEE transactions on microwave theory and techniques, 34*(2), 280–284.*

[62] ***İzmir, M.***, ***Ertay, A.O. ve Şimşek, S.*** *(2017). Design and simulation study of Helix Traveling Wave Amplifier for Ku-Band applications,* 2017 IV International Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkiye), *IEEE, s.1–6.*

[63] ***Lohmeyer, W.Q.***, ***Aniceto, R.J. ve Cahoy, K.L.*** *(2016). Communication satellite power amplifiers: current and future SSPA and TWTA technologies,* International journal of satellite communications and networking, 34*(2), 95–113.*

[64] ***Jung, A.R.*** *(1978). 10 KW and up from a helix TWT?,* 1978 International Electron Devices Meeting, *IEEE, s.530–533.*

[65] ***Putz, J. ve Cascone, M.*** *(1979). Effective use of dispersion shaping in broadband helix TWT circuits,* 1979 International Electron Devices Meeting, *IEEE, s.422–424.*

[66] ***Ghosh, S.***, ***Jain, P. ve Basu, B.*** *(1997). Analytical exploration of new tapered-geometry dielectric-supported helix slow-wave structures for broadband TWT's,* Progress In Electromagnetics Research, 15, *63–85.*

[67] ***Hu, Y.L.***, ***Yang, Z.H.***, ***Li, J.Q. ve Li, B.*** *(2011). Backward-wave oscillation suppression in high-power broadband helix traveling-wave tubes,* IEEE Transactions on Electron Devices, 58*(5), 1562–1569.*

[68] ***Hägermann, M.***, ***Birtel, P.***, ***Meyne, S.***, ***Safi, D. ve Jacob, A.F.*** *(2018). Magnetic field tapering approaches for backward-wave oscillation suppression in helix traveling-wave tubes,* IEEE Transactions on Electron Devices, 65*(6), 2236–2242.*

[69] ***Alaria, M.K. ve Ghosh, S.*** *(2019). Backward wave oscillation suppression study of the helix travelling wave tube,* Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 33*(5), 557–563.*

[70] ***Overfelt, P. ve White, D.*** *(1989). Alternate forms of the generalized composite scattering matrix,* IEEE transactions on microwave theory and techniques, 37*(8), 1267–1268.*

[71] ***Jain, P.***, ***Murty, K.***, ***Joshi, S. ve Basu, B.*** *(1987). Effect of the finite thickness of the helix wire on the characteristics of the helical slow-wave structure of a traveling-wave tube,* IEEE Transactions on Electron Devices, 34*(5), 1209–1213.*

[72] ***Jain, P. ve Basu, B.*** *(1987). The inhomogeneous loading effects of practical dielectric supports for the helical slow-wave structure of a TWT,* IEEE Transactions on Electron Devices, 34*(12), 2643–2648.*

[73] ***Ertay, A.O. ve Şimşek, S.*** *(2018). Yürüyen dalgalı tüp kuvvetlendiricileri için helis yavaş dalgalı yapıların tasarımı,* Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, ELECO 2018, *Bursa Uludağ Üniversitesi, s.423–427.*

[74] ***Datta, S.***, ***Kumar, L. ve Basu, B.*** *(2008). A simple closed-form formula for backward-wave start-oscillation condition for millimeter-wave helix TWTs,* International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 29*(6), 608–616.*

[75] ***Belohoubek, E.*** *(1965). Helix support structure for ultra-wide-band traveling-wave tubes(Traveling wave tube supporting structure of helical half-moon-shaped ceramic rods for greater bandwith),* RCA Review, 26, *106–117.*

[76] ***Wessel-Berg, T.*** *(2004). CAD of tape helix circuits for traveling wave tubes by convolution methods,* IEEE Transactions on Electron Devices, 51*(11), 1918–1927.*

[77] ***Liu, L.W.***, ***Wei, Y.Y.***, ***Xu, J.***, ***Lu, Z.G.***, ***Yin, H.R.***, ***Yue, L.N.***, ***Gong, H.R.***, ***Zhao, G.***, ***Duan, Z.***, ***Wang, W.X.*** ve diğerleri *(2013). A novel slotted helix slow-wave structure for millimeter-wave traveling-wave tube,* Progress In Electromagnetics Research, 135, *347–362.*

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Agah Oktay Ertay

Doğum Tarihi ve Yeri: Gaziantep ve 1987

E-Posta: aoertay@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2010, Yıldız Teknik üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi - Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü.
- **Y. Lisans:** 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Telekomünikasyon Mühendisliği.

MESLEKİ DENEYİMLER VE ÖDÜLLER:

- **2010 – 2011** Erzincan Üniversitesi - Mühendislik Fakültesi - Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü.
- **2011 – 2019** İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi - Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü.
- **2016** Syracuse'de düzenlenen Anten Sistemlerinde Anten Ölçümleri ve Uygulamaları Uluslararası Konferansında IEEE Antennas and Propagation Ulrich L. Rohde inovatif konferans bildirisi ödülü.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Ertay, A. O.**, Şimşek, S., 2018. Yürüyen dalgalı tüp kuvvetlendiricileri için helis yavaş dalgalı yapıların tasarımı, *Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, ELECO 2018*, 423–427.
- **Ertay, A. O.**, Şimşek, S., 2018. Determination of stopband characteristics of asymmetrically loaded helix slow wave structures with Auxiliary Functions of Generalized Scattering Matrix (AFGSM) method, *AEU International Journal of Electronics and Communications* , 95, 271-278.
- **Ertay, A. O.**, Şimşek, S., 2018. A comprehensive Auxiliary Functions of Generalized Scattering Matrix (AFGSM) method to determine bandgap characteristics of periodic structures, *AEU International Journal of Electronics and Communications*, 94, 139-144.
- **Ertay, A. O.**, Şimşek, S., 2017. On the assessment study of small signal gain analysis of helix type traveling wave tube with pierce parameters. *In: Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkiye), 2017 IV International. IEEE*, 2017. p. 1-7 Ankara, Turkey.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER: :

- Abbak, M., Akıncı, M. N., **Ertay, A. O.**, Özgür S., Işık, C.,Akduman İ., 2017. Wideband compact dipole antenna for microwave imaging applications, *IET Microwaves Antennas Propagation*, vol. 11, no. 2, pp. 265–270.

- **Ertay, A. O.**, Köseoğlu, E., Şimşek, S.,Demiralay B., 2017. On the study of comparative analysis of dielectric loaded effects for rectangular cavity resonators *In: Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkiye), 2017 IV International. IEEE*, 2017. Ankara, Turkey.

- İzmir M., **Ertay, A. O.**, Şimşek, S., 2017. Design and simulation study of helix traveling wave amplifier for Ku-Band applications *In: Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Turkiye), 2017 IV International. IEEE*, 2017. Ankara, Turkey.

- Uyanık, C., **Ertay, A. O.**, Doğu, S., Akduman, İ., Şahintürk, H., 2016., "A coplanar vivaldi antenna design with improved frequency response for microwave breast imaging," IEEE International Conference on Antenna Measurements & Applications Focus on Antenna Systems, SYRACUSE, 2016.

- **Ertay, A. O.**, Şimşek, S., 2016, "A compact bandstop filter design for X band applications," International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), Bucharest, Romania, 2016.

- Uyanık., C., Yıldız M.,Ö., Doğu, S., **Ertay, A. O.**, Akduman İ., 2016, "Mikrodalga görüntüleme uygulamaları için log periyodik dipol anten dizisi tasarımı," Elektrik, Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, ELECO, 2016.

- Uyanık., C., Dalgıç Ö., **Ertay, A. O.**, Doğu, S., Çayören, M., Akduman İ., 2016, "Mikrodalga görüntüleme uygulamaları için oluklu vivaldi anten tasarımı," Elektrik, Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, ELECO, 2016.

- **Ertay, A. O.**, Şimşek, S., 2016, "S bandı uygulamaları için band söndüren mikroşerit süzgeç tasarımı," URSI-TÜRKİYE'2016 VIII. Bilimsel Kongresi, Ankara, 2016

- **Ertay, A. O.**, Abbak, M., Şimşek, S., 2016, "An improved stopband and sharp roll off microstrip low pass filter with defected ground structures," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies* , vol. 8, no. 3, pp. 573–581, May 2016.

- Arasıl, G., **Ertay, A. O.**, Kaplan, E., 2015, "Investigation of schizophrenic EEG signals using wavelet transform functions," 2015 23nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Malatya, Turkey, 2015.

- Abbak, M., **Ertay, A. O.**, Suer, C., 2015, "A compact CPW fed wide band microstrip antenna design for mobile applications," 2015 23nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Malatya, Turkey, 2015.

- Abbak, M., **Ertay, A. O.**, Şimşek, S., 2015, "A wideband CPW fed microstrip antenna design for wireless communication applications," 2015 23nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Malatya, Turkey, 2015.

- **Ertay, A. O.**, Abbak, M., Suer, C., 2014, "İyileştirilmiş geniş durdurma bantlı taban iletkeni kusurlu alçak geçiren bir mikroşerit filtre tasarımı," EMO Bilimsel Dergi, vol. 4, no. 8, pp. 35–40, 2014.

- **Ertay, A. O.**, Abbak, M., Şimşek, S., 2013, "A compact low pass filter design with a fan shaped defected ground structure for broad stopband," 2013 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, 2013.

- **Ertay, A. O.**, Suer, C., 2013, " Multi layered frequency selective surfaces for high frequency applications," Progress In Electromagnetic Research Symposium, Stockholm, 2013.

- **Ertay, A. O.**, Şimşek, S., 2013, "Design of elliptic function microstrip filters with defected ground structures," Progress In Electromagnetic Research Symposium, Stockholm, 2013.

- **Ertay, A. O.**, Şimşek, S., 2013, "Taban iletkeni kusurlu yapıların mikroşerit filtre tasarımındaki etkilerinin incelenmesi," 2. Ulusal Elektromanyetik Uyumluluk Konferansı, İstanbul, 2013.

- **Ertay, A. O.**, Kavas, A., Uz O., Altınok, B., 2012, "WCDMA sistemlerinde makro hücre kapasite ve yük hesaplaması," Elektrik, Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, ELECO, Bursa, 2012.

- Saydur, E., D., Erdoğan, A.,Y., **Ertay, A. O.**, Kavas, A., 2010, " Üç boyutlu cisimlerin radar kesit alanının fizik optik tekniğiyle analizi," URSI - Türkiye 2010 Bilimsel Kongresi, KKTC, Girne, 2010.

- **Ertay, A. O.**, Kavas, A., 2010, " Farklı geometrili plakaların radar kesit alanının fizik optik yöntemi ile analizi," III. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Eskişehir, 2010.