

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**ZEKİ OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ İLE MİKRODALGA
DÜZLEMSEL İLETİM HATLARININ
MODELLENMESİ**

**Hazırlayan
Hakan KİŞİOĞLU**

**Danışman
Prof. Dr. Celal YILDIZ**

Doktora Tezi

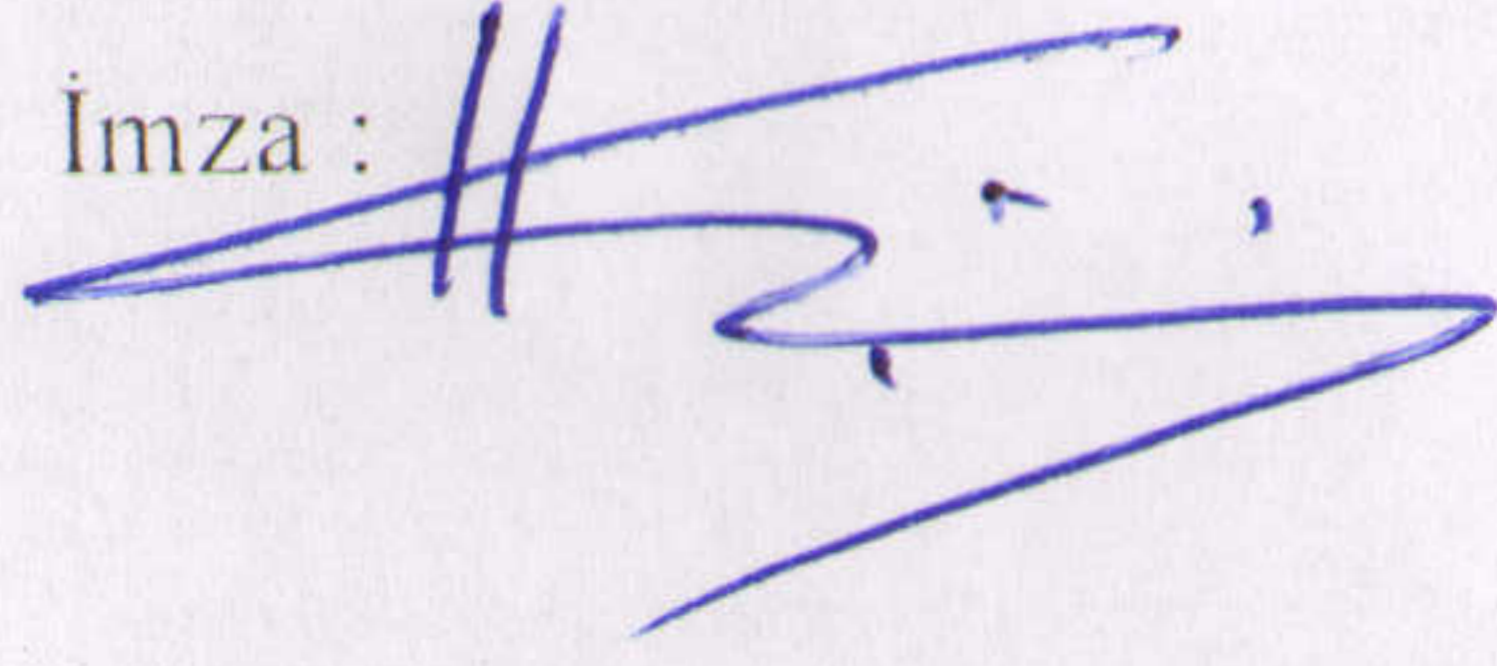
**Ocak 2018
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

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

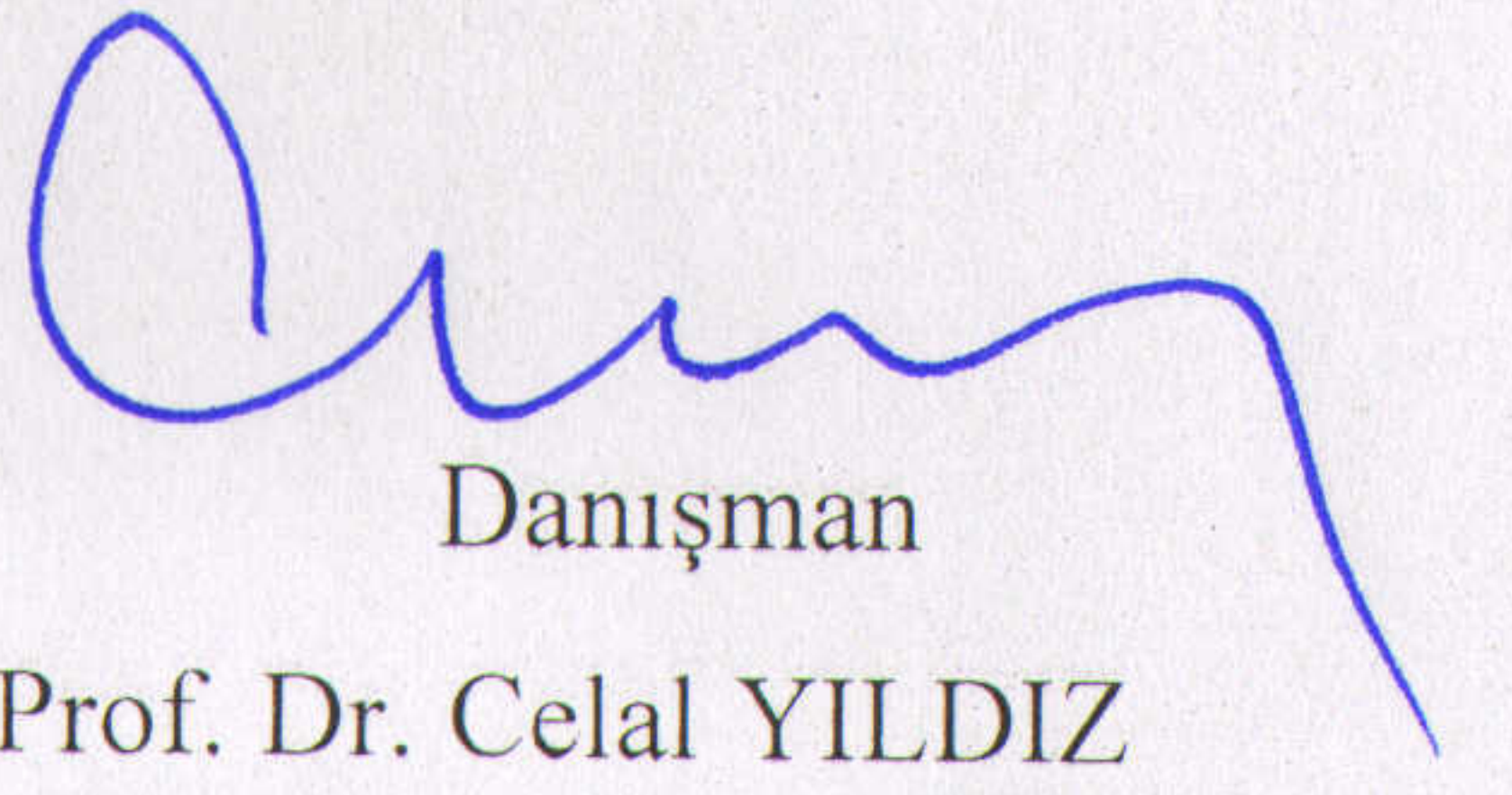
Hakan KİŞİOĞLU

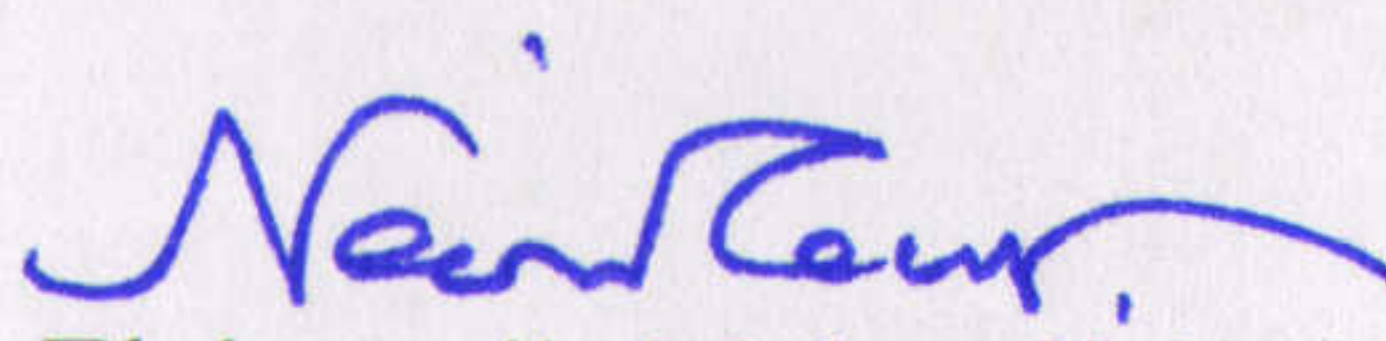
İmza :



“Zeki Optimizasyon Teknikleri İle Mikrodalga Düzlemsel İletim Hatlarının Modellenmesi”
adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne
uygun olarak hazırlanmıştır.


Tezi Hazırlayan
Hakan KİŞİOĞLU


Danışman
Prof. Dr. Celal YILDIZ


Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı
Prof. Dr. Necmi TAŞPINAR

Prof. Dr. Celal YILDIZ danışmanlığında **Hakan KİŞİOĞLU** tarafından hazırlanan “**Zeki Optimizasyon Teknikleri İle Mikrodalga Düzlemsel İletim Hatlarının Modellenmesi**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik-Elektronik Mühendisliği** Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

12/01/2018

JÜRİ:

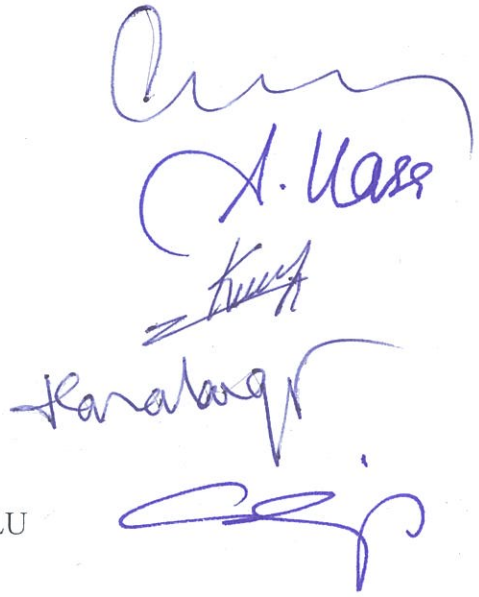
Danışman : Prof. Dr. Celal YILDIZ

Üye : Prof. Dr. Ali KARA

Üye : Prof. Dr. Kerim GÜNEY

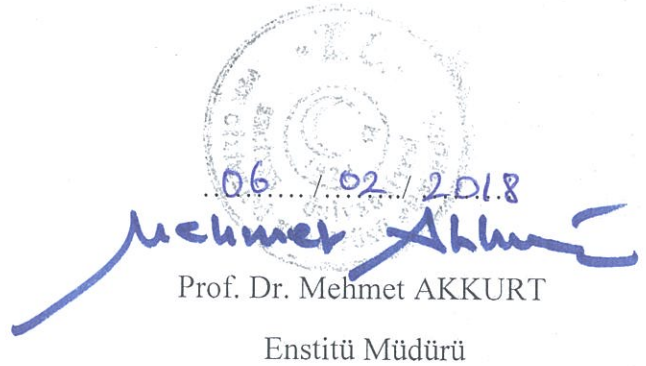
Üye : Prof. Dr. Derviş KARABOĞA

Üye : Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU



ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 06/02/2018 tarih ve 2018/02-17 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



06 / 02 / 2018
Prof. Dr. Mehmet AKKURT
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

“Zeki optimizasyon teknikleri ile mikrodalga düzlemsel iletim hatlarının modellenmesi” isimli tez çalışması kapsamında bilgi ve tecrübesini hiçbir zaman esirgemeyen çok değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Celal YILDIZ’a teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme komitesinde bulunarak çalışmalarımı yönlendiren hocalarım sayın Prof. Dr. Derviş KARABOĞA ve sayın Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU’na ayrıca teşekkür ederim.

Ayrıca; çalışmalarına doğrudan ya da dolaylı olarak katkıda bulunmuş değerli hocalarıma, tüm arkadaşlarıma ve çalışmalarım süresince sabır göstererek beni daima destekleyen aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Hakan KIŞIOĞLU
Kayseri, Ocak 2018

ZEKİ OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ İLE MİKRODALGA DÜZLEMSEL İLETİM HATLARININ MODELLENMESİ

Hakan KİŞİOĞLU

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi, Ocak 2018

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Celal YILDIZ

ÖZET

Mikrodalga iletim hatları, mikrodalga entegre devrelerinin temelini oluştururlar. Mikrodalga iletim hatları esas olarak yüksek frekanslı işaretlerin bozulmadan iletilmesinde kullanılmakla beraber, birçok mikrodalga devre elemanlarının gerçekleştirilmesinde de kullanılmaktadırlar. Mikrodalga iletim hatlarının analizinde genellikle tam-dalga yaklaşımlar ve quasi-statik yaklaşımlar kullanılır. Tam-dalga yaklaşımda hem TEM modu için hem de hibrit modlar için iletim hattının karakteristik parametreleri frekansa bağlı olarak belirlenirler. Quasi-statik yaklaşımda ise sadece TEM modu için iletim hattının karakteristik parametreleri frekanstan bağımsız olarak belirlenir. Literatürde mikrodalga iletim hatlarının karakteristik empedans ve efektif dielektrik sabiti gibi propagasyon karakteristiklerini belirlemek amacı ile hem tam dalga hem de quasi-statik yaklaşımla çok sayıda çalışma yapılmıştır. Literatürde bu tür hatların arzu edilen karakteristik empedansa sahip olması için yapının geometrik boyutlarını belirleyen tasarımlara yönelik sentez modelleri ise sınırlı sayıdadır. Mikrodalga iletim hatlarının analizinde ve tasarımında kullanılan yöntemlerin problemlerin yapısına ve duyulan ihtiyaca göre bazı avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Bu nedenle mikrodalga iletim hatlarının analizi ve sentezi için hata oranı düşük ve matematiksel olarak çok daha basit yeni modellere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışmasında mikrodalga iletim hatlarının analizine ve tasarımına yönelik yeni modeller gerçekleştirilmiştir. Analize ve tasarıma yönelik olarak gerçekleştirilen modellerin geliştirilmesinde zeki optimizasyon tekniklerinden genetik programlama ve yapay arı kolonisi algoritması kullanılmıştır. Mikrodalga iletim hatlarından; dielektrik taban destekli eş düzlemli dalga kılavuzları, asılı mikroşerit hatlar, ters mikroşerit hatlar,

klasik mikroşerit hatlar, sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip eş düzlemlı dalga kılavuzlarının analiz ve sentez modelleri genetik programlama kullanılarak belirlenirken, iletken destekli mikro eş düzlemlı şerit hatlar ve sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik eş düzlemlı şerit hatların sentez modelleri genetik programlama ve yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak elde edilmiştir. Ele alınan mikrodalga düzlemsel iletim hatlarının quasi-statik analizine ve sentezine yönelik olarak geliştirilen zeki optimizasyon tabanlı modellerin sonuçları literatürde mevcut olan teorik, deneysel ve IE3D elektromanyetik simülatör sonuçları ile karşılaştırılmış ve aralarında çok iyi bir uyumun olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikrodalga iletim hatları; analiz model; sentez model; genetik programlama; yapay arı kolonisi algoritması; IE3D.

MODELING OF MICROWAVE PLANE TRANSMISSION LINES WITH INTELLIGENT OPTIMIZATION TECHNIQUES

Hakan KİŞİOĞLU

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Ph. D. Thesis, January 2018

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Celal YILDIZ

ABSTRACT

Microwave transmission lines are essential components of microwave integrated circuits. They are used mainly in the transmission of high frequency signals without distortion, but also in the realization of many microwave circuit elements. In the analysis of microwave transmission lines, generally full-wave approaches and quasi-static approaches are employed. The full-wave method represents the characteristic parameters of the transmission line for both TEM mode and hybrid modes depending on the frequency. In the quasi-static approach, the characteristic parameters of the transmission line for TEM mode are determined independently from frequency. Numerous studies have been conducted in the literature to determine the propagation characteristics such as characteristic impedance and effective dielectric constant of microwave transmission lines with both full wave and quasi-static approach. In the literature, the lines to be desired characteristic impedance, determining of the geometric structure has limited synthesis models. The methods used in the analysis and design of microwave transmission lines have some advantages and disadvantages, depending on the nature of the problems and the needs. For this reason, there is a need for new models with low error rates and mathematically much simpler for the analysis and synthesis of microwave transmission lines.

In this thesis, new models for the analysis and design of microwave transmission lines have been realized. Models for analysis and design have been developed using intelligent optimization techniques such as genetic programming and artificial bee colony algorithm. Microwave transmission lines; analysis and synthesis models of dielectric based supported coplanar waveguides, suspended microstrip lines, inverted microstrip lines, classical microstrip lines, coplanar waveguide with a finite width ground plane were

determined using genetic programming. Synthesis models of conductor-supported micro coplanar strip lines and asymmetric coplanar strip lines with infinitely wide strip were obtained by using genetic programming and artificial bee colony algorithm. The results of intelligent optimization-based models developed for quasi-static analysis and synthesis of microwave planar transmission lines discussed in this thesis study were compared with the theoretical, experimental and IE3D electromagnetic simulator results available in the literature. It is observed that the results obtained from this thesis are in very good agreement with the results in the literature.

Keywords: Microwave transmission lines; analysis model; synthesis model; genetic programming; artificial bee colony algorithm; IE3D.

İÇİNDEKİLER

ZEKİ OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ İLE MİKRODALGA DÜZLEMSEL İLETİM HATLARININ MODELLENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	ii
KABUL VE ONAY	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
KISA ÖZET	v
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xvi
SİMGELER ve KISALTMALAR	xix
GİRİŞ	1

1.BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

1.1.Mikrodalga İletim Hatları.....	3
1.2.Literatür Taraması	4
1.3.Tezin Amacı	10

2.BÖLÜM

GEREÇ VE YÖNTEM

2.1.Giriş	13
2.2.Genetik Programlama	14
2.2.1. Terminal ve Fonksiyon Kümeleri	14
2.2.2. Uyumluluk (Fitness) Fonksiyonu.....	16
2.2.3. Genetik operatörler.....	16
2.2.4. Çaprazlama.....	16
2.2.5. Mutasyon.....	17
2.2.6. Çoğalma	19

2.2.7. Seçme İşlemi	19
2.2.8. Genetik Programlamanın Adımları	20
2.3. Yapay Arı Kolonisi Algoritması	23
2.3.1. Algoritmanın Temel Adımları	23
2.3.2. Kontrol Parametreleri	25
2.3.3. Sistemin Başlatılması	25
2.3.4. Görevli Arıların Besin Kaynaklarına Gönderilmesi.....	26
2.3.5. Seleksiyonda Kullanılacak Olasılık Değerlerinin Hesaplanması.....	27
2.3.6. Gözcü Arıların Seleksiyonda Kullanacakları olasılık Değerlerinin Hesaplanması (Dans Benzetimi)	27
2.3.7. Gözcü Arıların Besin Kaynaklarına Gönderilmesi	28
2.3.8. Tükenen Kaynağı Bırakma ve Kaşif Arı Üretimi	28
2.4. IE3D Elektromanyetik Simülatör Programı	31

3. BÖLÜM

MİKRODALGA İLETİM HATLARI İÇİN ÖNERİLEN ANALİZ MODELLERİ

3.1. Giriş	34
3.2. Dielektrik Taban Destekli EDDK'lar için Önerilen Analiz Modelleri	34
3.3. Asılı Mikroşerit Hatlar için Önerilen Analiz Modelleri	37
3.4. Ters Mikroşerit Hatlar için Önerilen Analiz Modelleri	39
3.5. Klasik Mikroşerit Hatlar için Önerilen Analiz Modelleri.....	42
3.6. Sonlu Genişlikte Toprak Düzlemine Sahip EDDK'lar için Önerilen Analiz Modelleri	45

4. BÖLÜM

MİKRODALGA İLETİM HATLARI İÇİN ÖNERİLEN SENTEZ MODELLERİ

4.1. Giriş	48
4.2. Dielektrik Taban Destekli EDDK'lar için Önerilen Sentez Modelleri	48
4.3. Asılı Mikroşerit Hatlar için Önerilen Sentez Modeli.....	50
4.4. Ters Mikroşerit Hatlar için Önerilen Sentez Modeli	52

4.5. Klasik Mikroşerit Hatlar için Önerilen Sentez Modeli	54
4.6. Sonlu Genişlikte Toprak Düzlemine Sahip EDDK'lar için Önerilen Sentez Modelleri.....	56
4.7. İletken Destekli Mikro EDŞH'ler için Önerilen Sentez Modelleri	58
4.8. Sonsuz Toprak Düzlemine Sahip Asimetrik EDŞH'ler için Önerilen Sentez Modelleri	61

5. BÖLÜM

ANALİZ MODELLERİNİN SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. Giriş	65
5.2. Dielektrik Taban Destekli EDDK'lar için Önerilen Analiz Modellerin Sonuçları ve Değerlendirilmesi	65
5.3. Asılı Mikroşerit Hatlar için Önerilen Analiz Modellerin Sonuçları ve Değerlendirilmesi	72
5.4. Ters Mikroşerit Hatlar için Önerilen Analiz Modellerin Sonuçları ve Değerlendirilmesi	75
5.5. Klasik Mikroşerit Hatlar için Önerilen Analiz Modellerin Sonuçları ve Değerlendirilmesi	79
5.6. Sonlu Genişlikte Toprak Düzlemine Sahip EDDK'lar için Önerilen Analiz Modellerin Sonuçları ve Değerlendirilmesi	84

6. BÖLÜM

SENTEZ MODELLERİNİN SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1. Giriş	87
6.2. Dielektrik Taban Destekli EDDK'lar için Önerilen Sentez Modellerin Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	87
6.3. Asılı Mikroşerit Hatlar için Önerilen Sentez Modelin Sonuçları ve Değerlendirilmesi	97

6.4. Ters Mikroşerit Hatlar için Önerilen Sentez Modelin Sonuçları ve Değerlendirilmesi	101
6.5. Klasik Mikroşerit Hatlar için Önerilen Sentez Modelin Sonuçları ve Değerlendirilmesi	105
6.6. Sonlu Genişlikte Toprak Düzlemine Sahip EDDK'lar için Önerilen Sentez Modellerin Sonuçları ve Değerlendirilmesi	108
6.7. İletken Destekli Mikro EDŞH'ler için Önerilen Sentez Modellerin Sonuçları ve Değerlendirilmesi	112
6.8. Sonsuz Toprak Düzlemine Sahip Asimetrik EDŞH'ler için Önerilen Sentez Modellerin Sonuçları ve Değerlendirilmesi	117

7. BÖLÜM

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

7.1. Giriş	125
7.2. Sonuçlar	125
7.3. Öneriler	126
KAYNAKÇA	128
EKLER.....	141
ÖZGEÇMİŞ.....	145

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen analiz modellerine ait katsayılar	36
Tablo 3.2. Asılı mikroşerit hatlar için önerilen analiz modellerine ait katsayılar.....	39
Tablo 3.3. Ters mikroşerit hatlar için önerilen analiz modellerine ait katsayılar	42
Tablo 3.4. Klasik mikroşerit hatlar için önerilen analiz modellerine ait katsayılar	44
Tablo 3.5. Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'lar için önerilen analiz modellerine ait katsayılar	47
Tablo 4.1. Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen sentez modellerine ait katsayılar.....	50
Tablo 4.2. Asılı mikroşerit hatlar için önerilen sentez modeline ait katsayılar	52
Tablo 4.3. Ters mikroşerit hatlar için önerilen sentez modeline ait katsayılar	54
Tablo 4.4. Klasik mikroşerit hatlar için önerilen sentez modeline ait katsayılar.....	55
Tablo 4.5. Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'lar için önerilen sentez modellerine ait katsayılar	57
Tablo 4.6. GP ve YAK algoritması ile belirlenen iletken destekli mikro EDŞH'lerin sentez modellerinin katsayıları	60
Tablo 4.7. GP ve YAK algoritması ile belirlenen sonsuz toprak düzlemine sahip asimetric EDŞH'lerin sentez modellerin katsayıları	64
Tablo 5.1. Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen analiz modelinden elde edilen sonuçların KDT, IE3D, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 6.15$, $\epsilon_{r2} = 10.2$, $h = 1270 \mu m$, $f = 2 \text{ GHz}$).	67
Tablo 5.2. Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen analiz modelinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 20$, $h = 200 \mu m$)	69
Tablo 5.3. Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen analiz modelinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 3.78$, $\epsilon_{r2} = 12.9$, $h = 200 \mu m$)	70
Tablo 5.4. Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen analiz modelinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 12.9$, $h = 200 \mu m$)	71

Tablo 5.5. Dielektrik taban destekli EDDK'nın için önerilen analiz modellerin ortalama yüzde hataları	72
Tablo 5.6. Asılı mikroşerit hatların karakteristik empedansı ve efektif dielektrik sabiti için GP ile geliştirilen analiz modeli, literatürdeki analiz modeller ve HFSS sonuçları	74
Tablo 5.7. Asılı mikroşerit hatların efektif dielektrik sabiti için GP ile geliştirilen analiz modeli, deneysel çalışma, literatürdeki analiz modeller ve HFSS sonuçları .	74
Tablo 5.8. Asılı mikroşerit hatlar için önerilen analiz modellerin ortalama yüzde hataları	75
Tablo 5.9. Ters mikroşerit hatların karakteristik empedansı ve efektif dielektrik sabiti için GP ile geliştirilen analiz modeli, literatürdeki analiz modeller ve HFSS sonuçları	77
Tablo 5.10. Ters mikroşerit hatların efektif dielektrik sabiti için GP ile geliştirilen analiz modeli, deneysel çalışma, literatürdeki analiz modeller ve HFSS sonuçları	78
Tablo 5.11. Ters mikroşerit hatlar için önerilen analiz modellerin ortalama yüzde hataları	78
Tablo 5.12. Klasik mikroşerit hatlar için önerilen analiz modellerin ortalama yüzde hataları	82
Tablo 5.13. Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'lar için analiz modellerin ortalama yüzde hataları	85
Tablo 6.1. Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen sentez modellerinden elde edilen sonuçların KDT, IE3D, deneysel sonuçlar ve literatürdeki diğer sentez modeli ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 6.15$, $\epsilon_{r2} = 10.2$, $h = 1270 \mu m$, $f = 2$ GHz).	93
Tablo 6.2. Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen sentez modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 20$, $h = 200 \mu m$).....	94
Tablo 6.3. Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen sentez modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 3.78$, $\epsilon_{r2} = 12.9$, $h = 200 \mu m$)	95
Tablo 6.4. Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen sentez modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 12.9$, $h = 200 \mu m$)	96

Tablo 6.5. Dielektrik taban destekli EDDK'nın için önerilen sentez modelinin geometrik boyutlara göre ve karakteristik empedansa göre ortalama yüzde hataları ..	97
Tablo 6.6. Asılı mikroşerit hatlar için GP ile geliştirilen sentez modeli ve sentez metot sonuçlarının karşılaştırılması	99
Tablo 6.7. Asılı mikroşerit hatlar için önerilen sentez modelin geometrik boyutlara göre ve karakteristik empedansa göre ortalama yüzde hataları.....	100
Tablo 6.8. Ters mikroşerit hatlar için GP ile geliştirilen sentez modeli ve sentez metot sonuçlarının karşılaştırılması	102
Tablo 6.9. Ters mikroşerit hatlar için önerilen sentez modelin geometrik boyutlara göre ve karakteristik empedansa göre ortalama yüzde hataları	103
Tablo 6.10. Klasik mikroşerit hatlar için önerilen sentez modelin geometrik boyutlara göre ve karakteristik empedansa göre ortalama yüzde hataları	106
Tablo 6.11. Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'lar için önerilen sentez modellerin geometrik boyutlara göre ve karakteristik empedansa göre ortalama yüzde hataları	110
Tablo 6.12. GP ve YAK algoritması ile belirlenen iletken destekli mikro EDŞH'lerin sentez modellerinden elde edilen sonuçlar ile literatürdeki diğer çalışmalardan elde edilmiş sonuçların karşılaştırması ($\epsilon_r = 10.1$ ve $h = 400 \mu m$)	116
Tablo 6.13. GP ve YAK algoritması ile belirlenen iletken destekli mikro EDŞH'lerin sentez modellerinden elde edilen sonuçlar ile literatürdeki diğer çalışmalardan elde edilmiş sonuçların karşılaştırması ($\epsilon_r = 10.2$ ve $h = 1270 \mu m$)	116
Tablo 6.14. İletken destekli mikro EDŞH'ler için önerilen sentez modellerin geometrik boyutlara göre ve karakteristik empedansa göre ortalama yüzde hataları	116
Tablo 6.15. GP ve YAK algoritması ile belirlenen sonsuz toprak düzlemine sahip asimetric EDŞH'lerin sentez modellerinden elde edilen sonuçlar ile literatürdeki diğer çalışmalardan elde edilmiş sonuçların karşılaştırması $\epsilon_r = 10.2$ ve $h = 1270 \mu m$	123
Tablo 6.16. Sonsuz toprak düzlemine sahip asimetric EDŞH'ler için önerilen sentez modellerin geometrik boyutlara göre ve karakteristik empedansa göre ortalama yüzde hataları	124

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. GP’de bir modelin ağaç yapısı üzerinde gösterimi	15
Şekil 2.2. GP’de bir modelin ağaç yapısı üzerinde çaprazlamanın gösterimi.....	18
Şekil 2.3. GP’de bir modelin ağaç yapısı üzerinde mutasyon işleminin gösterimi.....	19
Şekil 2. 4. GP’nin genel akış diyagramı	22
Şekil 2. 5. YAK Algoritmasının Akış Diyagramı	30
Şekil 2.6. IE3D’nin dikdörtgensel ve üçgensel hücreli uniform olmayan örgü yapısı ...	32
Şekil 2.7. IE3D’nin dikdörtgensel ve üçgensel hücreli uniform örgü yapısı	33
Şekil 3.1. Dielektrik taban destekli EDDK’ların kesit görünümü	35
Şekil 3.2. Asılı mikroşerit hatların kesit görünümü	38
Şekil 3.3. Ters mikroşerit hatların kesit görünümü.....	40
Şekil 3.4. Klasik mikroşerit hatların kesit görünümü	43
Şekil 3.5. Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK’ların kesit görünümü.	45
Şekil 4.1. İletken destekli mikro EDŞH’lerin geometrisi	58
Şekil 4.2. Sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH’nin kesit görünümü.....	61
Şekil 5.1.Dielektrik taban destekli EDDK’ların karakteristik empedansı ve efektif dielektrik sabiti için sunulan analiz modeli ile literatürde mevcut olan quasi statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r1}=3.78$, $\epsilon_{r2}=12.9$, $h=200 \mu m$) ...	66
Şekil 5.2.Dielektrik taban destekli EDDK’ların karakteristik empedansı ve efektif dielektrik sabiti için sunulan analiz modeli ile literatürde mevcut olan quasi statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r1}=10$, $\epsilon_{r1}=20$, $h=200 \mu m$)	67
Şekil 5.3. Asılı mikroşerit hatların karakteristik empedansı ve efektif dielektrik sabiti için sunulan analiz modeli ile T&B’nin modelinin karşılaştırılması ($\epsilon_{r2}=3.78$) ...	73
Şekil 5.4. Ters mikroşerit hatların karakteristik empedansı ve efektif dielektrik sabiti için sunulan analiz modeli ile T&B’nin modelinin karşılaştırılması ($\epsilon_{r2}=3.78$) ...	76
Şekil 5.5.Analiz modelinden elde edilen karakteristik empedans sonuçlarının literatürdeki mevcut CAD model ve VM sonuçlarıyla karşılaştırılması ($t = 0$).....	80
Şekil 5.6. Analiz modelinden elde edilen karakteristik empedans sonuçlarının farklı ϵ_r değerleri için VM sonuçlarıyla karşılaştırılması ($t = 0$)	81

Şekil 5.7. Analiz modelinden elde edilen karakteristik empedans sonuçlarının farklı t/h değerleri için VM sonuçlarıyla karşılaştırılması ($t \neq 0$)	82
Şekil 5.8. Analiz modelinden elde edilen efektif dielektrik sabiti sonuçlarının farklı ϵ_r değerleri için VM sonuçlarıyla karşılaştırılması ($t = 0$)	83
Şekil 5.9. Analiz modelinden elde edilen sonuçların quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 12.9$, $h = 100 \mu m$, $t = 0 \mu m$ ve $wg = 100 \mu m$).	85
Şekil 5.10. Analiz modelinden elde edilen sonuçların quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 6$, $h = 100 \mu m$, $t = 0 \mu m$ ve $wg = 100 \mu m$).	86
Şekil 6.1. Birinci sentez modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 3.78$, $\epsilon_{r2} = 12.9$, $h = 200 \mu m$)	88
Şekil 6.2. Birinci sentez modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 20$, $h = 200 \mu m$).	89
Şekil 6.3. İkinci sentez modelinden elde edilen yarık genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 3.78$, $\epsilon_{r2} = 12.9$, $h = 200 \mu m$).	90
Şekil 6.4. İkinci sentez modelinden elde edilen yarık genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 20$, $h = 200 \mu m$).	91
Şekil 6.5. Sentez modellerinin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması.....	92
Şekil 6.6. Asılı mikroşerit hatlar için önerilen sentez modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz sonuçları ve T&B'nin sentez sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r2}=3.78$)	98
Şekil 6.7. Asılı mikroşerit hatlar için önerilen sentez modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz sonuçları ve T&B'nin sentez sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r2}=12.9$)	99
Şekil 6.8 Asılı mikroşerit hatlar için sunulan sentez modeli kullanılarak elde edilen karakteristik empedans sonuçları ile quasi statik analiz sonuçlarının karşılaştırılması ($\epsilon_{r2}=3.78$)	100
Şekil 6.9. Ters mikroşerit hatlar için önerilen sentez modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz sonuçları ve T&B'nin sentez sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r2}=3.78$)	102
Şekil 6.10. Ters mikroşerit hatlar için önerilen sentez modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz sonuçları ve T&B'nin sentez sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r2}=12.9$)	103

Şekil 6.11.Ters mikroşerit hatlar için önerilen sentez modeli kullanılarak elde edilen karakteristik empedans sonuçları ile quasi statik analiz sonuçlarının karşılaştırılması ($\epsilon_r=3.78$)	104
Şekil 6.12.Sentez modelinden elde edilen sonuçlarının farklı ϵ_r değerleri için VM ve literatürdeki sentez modelin sonuçlarıyla karşılaştırılması ($t = 0$)	106
Şekil 6.13.Sentez modelinden elde edilen sonuçlarının farklı t/h değerleri için VM sonuçlarıyla karşılaştırılması ($t \neq 0$)	107
Şekil 6.14.Birinci sentez modelinden elde edilen sonuçların quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r=12.9$, $h=100 \mu m$, $t=0 \mu m$ ve $wg=100\mu m$)	109
Şekil 6.15. İkinci sentez modelinden elde edilen sonuçların quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 12.9$, $h = 100 \mu m$, $t = 0 \mu m$ ve $wg = 100 \mu m$).	110
Şekil 6.16. Sentez modellerin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 9.9$, $h = 100 \mu m$, $t = 0 \mu m$ ve $wg = 100 \mu m$).	111
Şekil 6.17. Sentez modellerinden (s) elde edilen sonuçların quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 12.9$ ve $h = 200 \mu m$).	113
Şekil 6.18. Sentez modellerinden (w) elde edilen sonuçların quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 12.9$ ve $h = 200 \mu m$).	114
Şekil 6.19. Sentez modellerin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 9.9$, $h = 1000 \mu m$)	115
Şekil 6.20. Sentez modellerinden (w) elde edilen sonuçların quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 3.78$ ve $h = 400 \mu m$).	118
Şekil 6.21. Sentez modellerinden (w) elde edilen sonuçların quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 20$ ve $h = 400 \mu m$).	119
Şekil 6.22. Sentez modellerinden (s) elde edilen sonuçların quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 3.78$ ve $h = 400 \mu m$).	120
Şekil 6.23. Sentez modellerinden (s) elde edilen sonuçların quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 20$ ve $h = 400 \mu m$).	121
Şekil 6.24. Sentez modellerin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması ($h= 635 \mu m - \epsilon_r = 3.78$, $h= 635 \mu m - \epsilon_r = 9.9$, $h= 635 \mu m - \epsilon_r = 20$)	122

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış olan bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklama

ϵ_{eff}	: Efektif dielektrik sabiti
ϵ_r	: Bağıl dielektrik sabiti
Z_0	: Karakteristik empedans
ϵ_0	: Boş uzayın dielektrik sabiti
η_0	: Hava ortamının öz empedansı

Kısaltmalar

Açıklama

EDDK	:Eş Düzlemli Dalga Kılavuzu
EDŞH	:Eş Düzlemli Şerit Hat
TEM	:Transverse Electromagnetic (Enine Elektromanyetik)
KDT	:Konform Dönüşüm Tekniği
MİH	:Mikrodalga İletim Hatları
MED	:Mikrodalga Entegre Devre
MMED	:Monolitik Mikrodalga Entegre Devreler
GHz	:Giga Hertz
CAD	:Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
VM	:Variational Method
SDA	:Spektral Domen Analizi
GSDA	:Geliştirilmiş Spektral Domen Analizi
RF	:Radyo Frekans
YAK	:Yapay Arı Kolonisi
GP	:Genetik Programlama
GA	:Genetik Algoritma
3B	:3 Boyutlu

RFIC	:Radyo Frequency Integrated Circuits (Radyo Frekansı Entegre Devreleri)
RFID	:Radio-Frequency Identification (Radyo Frekansı ile Tanımlama)



GİRİŞ

Mikrodalga entegre devrelerin temelini oluşturan mikrodalga iletim hatlarının analizleri genel olarak iki grupta toplanabilir. Bunlar quasi-statik analiz yaklaşımı ve tam dalga analiz yaklaşımıdır. Quasi-statik yaklaşımlar yapının propagasyon karakteristiklerini frekanstan bağımsız olarak yapının elektrik, manyetik özelliklerine ve geometrik boyutlarına bağlı kapalı formda matematiksel ifadeler ile ortaya koyar. Tam dalga yaklaşımlar ise yapının propagasyon karakteristiklerini frekansa bağlı olarak ortaya koyarken oldukça karmaşık matematiksel işlemler gerektiren pahalı özel paket programlar kullanarak gerçekleştirilir.

Quasi-statik yaklaşımlar frekanstan bağımsız çözümler içermesine rağmen bu yaklaşımla ifade edilen propagasyon karakteristikleri 40 ile 50 GHz'e kadar geçerlidir. Mikrodalga iletim hatlarının kullanıldığı mikrodalga devre tasarımında mikrodalga iletim hatlarının istenen karakteristik empedansa sahip olması için iletim hattının geometrik boyutlarını doğrudan hesaplayan sentez modellerine yoğun şekilde ihtiyaç duyulmaktadır. Sentez modelleri de frekans bağımlı ve frekanstan bağımsız quasi-statik yaklaşımlar olmak üzere iki grupta toplanırlar. Literatürde mikrodalga iletim hatlarının analizine yönelik hem tam dalga hem de quasi-statik yaklaşımla gerçekleştirilmiş çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Oysaki mikrodalga iletim hatlarının sentezine yönelik sınırlı sayıda çalışma mevcut olup bunların çoğu frekanstan bağımsız olarak gerçekleştirilmiş sentez çalışmalarıdır.

Mikrodalga iletim hatlarının analizinde kullanılan yöntemler ve paket programları problemin yapısına ve duyulan ihtiyaca göre bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bu nedenle iletim hatlarının analizi ve sentezi için hata oranları düşük ve basit modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla literatürde son yıllarda iletim hatlarının analizine ve sentezine yönelik yapay sinir ağı, bulanık mantık ve işlemsel zeka tabanlı modeller gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında farklı mikrodalga iletim hatlarından dielektrik taban destekli eş düzlemlı dalga kılavuzları (EDDK'lar), asılı mikroşerit hatlar, ters mikroşerit hatlar, klasik mikroşerit hatlar, sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların analiz ve sentez modelleri genetik programlama ile belirlenirken, mikrodalga iletim hatlarından iletken destekli mikro eş düzlemlı şerit hatlar (EDŞH'ler) ve sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'lerin sentez modelleri hem genetik programlama hemde yapay arı koloni algoritması ile belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasının organizasyonu ise şu şekilde planlanmıştır: Tezin birinci bölümünde mikrodalga iletim hatlarına ilişkin genel bilgiler verilmiştir. Literatüre sunulmuş bulunan mikrodalga iletim hatlarına ait analiz ve sentez çalışmalarına değinilmiştir. Ayrıca bu bölümde tez çalışmasının amacı açıklanmıştır.

İkinci bölümde, tez çalışması kapsamında kullanılacak olan zeki optimizasyon tekniklerinden olan genetik programlama ve yapay arı koloni algoritması ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

Üçüncü bölümde, mikrodalga iletim hatlarının karakteristik parametreleri olan karakteristik empedans ve efektif dielektrik sabitini hesaplayan analiz modelleri sunulmuştur.

Dördüncü bölümde, mikrodalga iletim hatlarının arzu edilen karakteristik empedansa sahip olması için gerekli olan geometrik boyutları hesaplayan sentez modelleri sunulmuştur.

Beşinci bölümde, mikrodalga iletim hatları için sunulan analiz modellerin sonuçları ve bu sonuçlara ait değerlendirilmelere yer verilmiştir.

Altıncı bölümde, mikrodalga iletim hatları için sunulan sentez modellerin sonuçları ve bu sonuçlara ait değerlendirilmelere yer verilmiştir.

Son olarak yedinci bölümde ise tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve önerilere yer verilmiştir.

1.BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

1.1. Mikrodalga İletim Hatları

İkinci Dünya savaşı sırasında mikrodalga teknolojisinde hızlı ilerlemeler sağlanmış ve radar problemlerine çözümler geliştirmek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Pratik olarak gerçekleştirilen bu çalışmalar için analitik metotlar da geliştirilmiştir. Bu çalışmaların tamamı uygulamada süratle kullanım alanları bulmuşlardır. Bu çalışmalarda, iki temel yapı olarak yer alan koaksiyel TEM (Transverse Electromagnetic: Enine Elektromanyetik) hatlar ve dalga kılavuzları mikrodalga devrelerin ilerleyişinde önemli katkı sağlamışlardır. Koaksiyel hatlar, bozulma etkileri olmadığından doğal olarak geniş bant aralığı sağlamıştır. Dalga kılavuzları ise yüksek kalite faktörlü boşluk rezonatörlerine imkan sağlayan düşük kayıplar ve yüksek güç kapasitesi sağlamışlardır. Mikrodalga devreler için bu iki iletim hattı yapısı, önemli elemanlar olarak yer almış ve birbirlerini bütünleyici olarak değerlendirilmişlerdir.

İletken kaplı iki dielektrik plaka arasına ince bir iletkenin sandviç şeklinde yerleştirilmesinden meydana gelen şerit hatlar Barrett ve Barnes [1] tarafından 1951 yılında tasarlanmıştır. Cohn [2] ve Begovich [3] tarafından aynı yıllarda yapılan çalışmalarda şerit hatlar sırasıyla konform dönüşüm tekniği (KDT) (CMT: Conformal Mapping Technique) ve dizi eşleştirme metodu (SMM: Series Matching Method) kullanılarak analiz edilmişlerdir. Hattın karakteristik empedansının merkez şerit genişliği ile kontrol edilebilmesi şerit hatların en önemli özelliğinden biridir. Bir başka iletim hattı yapısı olarak 1950'li yıllarda, bir dielektrik tabanın bir yüzeyine bir şerit yerleştirilmesi ve diğer yüzüne ise tamamen iletken kaplama yapılmasıyla mikroşerit hatlar tasarlanmıştır [4, 5]. Mikroşerit hatlara olan ilgi, 1960'lı yıllarda mikrodalga devre elemanlarının silah, roket ve uydu uygulamalarında kullanılabilmesi için gerekli olan

boyut küçültmelerine olan ihtiyacın çoğalmasıyla bir hayli artmıştır. Şerit ve mikroşerit hatların dielektrik tabanın karşı tarafına yerleştirilmiş olan toprak düzlemleri, birçok aktif mikrodalga devre elemanları için gerekli olan şönt bağlantıları güçlendirmektedir. Karakteristik parametrelerinin, dielektrik tabanın kalınlığına direkt olarak bağlı olması şerit ve mikroşerit hatlarda sıcaklık kompanzeli seramikler gibi yüksek dielektrik sabitli ve düşük kayıplı malzemelerin kullanımını da zor bir duruma düşürmektedir. Bu durum boyut küçültülmesinin önemli olduğu düşük frekanslar için kesinlikle bir dezavantajdır. Bütün bu dezavantajları ortadan kaldırmak için toprak düzlemi de dahil olmak üzere bütün iletim elemanlarının aynı düzlemde yer aldığı eş düzlemli dalga kılavuzları (EDDK) geliştirilmiştir [6]. Mikrodalga yarı iletken elemanlarla ilgili hızlı gelişmelerle birlikte kuplajlı mikroşerit hatlar gibi düzlemsel mikrodalga iletim hatlarının (MİH) kullanılmasıyla MED (Microwave Integrated Circuits: Mikrodalga Entegre Devreler) teknolojisi doğmuştur [7–10].

EDDK'ların analizi KDT kullanılarak ilk kez Wen [6] tarafından 1969 yılında yapılmıştır. EDDK'lar, bir dielektrik tabanın üzerine aynı düzlemde bir merkez iletken ve bu iletkenin her iki yanına, iki yarıktan sonra yerleştirilmiş olan toprak düzlemlerinden meydana gelmektedir. EDDK'larda bütün iletim elemanlarının aynı düzlemde olması birçok aktif mikrodalga devre elemanları için gerekli olan şönt bağlantıları kolaylaştırmaktadır. Ayrıca monolitik mikrodalga entegre devreler (MMED) içerisindeki yarı-iletken taban üzerine yerleştirilmiş çeşitli elemanlarla da bağlantıda idealdirler.

1.2. Literatür Taraması

Son zamanlarda gelişen teknoloji ile birlikte elektronik düzenler yüksek hızlara ulaşmış olup 100 GHz ve üstü olan yüksek frekans sahasında başarılı olarak çalışabilmektedirler [11-18]. Yüksek frekanslarda, işaretle bozulmalar yaşanmadan iletilmesi için devre elemanlarının birleştirilmesi ve işaretlerin bir noktadan diğerine gönderilebilmesi amacı ile iletim hatlarının kullanılması gerekmektedir. Bu yüzden iletim hatları MMED uygulamaları içerisinde çok yaygın olarak kullanılmışlardır [19-22]. MMED tasarımı için kullanılan mikrodalga iletim ortamları literatürde birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır [23-37]. Ayrıca bu yapıların karakteristik parametrelerini belirleyen analitik

yaklaşımların ve CAD (Computer Aided Design: Bilgisayar Destekli Tasarım) modellerin gelişimi bu yapılara olan ilgiyi artırmıştır.

MİH'lerin analizinde genellikle quasi-statik yaklaşımlar ve tam-dalga yaklaşımlar kullanılır. Quasi-statik yaklaşımda sadece TEM modu için iletim hattının karakteristik parametreleri belirlenir. Quasi-statik analiz yöntemi olan KDT, CAD uygulamaları için uygun olan kapalı form analitik ifadelerle imkan vermekte ve 40 GHz'e kadar olan frekans bölgeleri için tam dalga analizlerinin doğruluğu ile mukayese edilebilir bir doğruluğa sahiptir [38–50]. Tam-dalga yaklaşımda ise yalnızca TEM modu için değil aynı zamanda hibrit modlar için de iletim hattının karakteristik parametreleri frekansa bağlı olarak belirlenir [51–56].

MMED'lerde bağlantı elemanları olarak kullanılan mikroşerit hatların gelişmesiyle birçok yeni devre uygulaması gerçekleştirilmiştir. Mikroşerit hatların kullanılmasıyla birlikte mikrodalga devre yapılarının boyutları, ağırlıkları ve aynı zamanda üretim maliyetleri azaltılmış, üretim teknikleriyle uyumlu ve yüksek doğruluklar sunabilen yapılar dizayn edilmiştir [57]. Mikroşerit yapılarının KDT'ye dayalı analizleri ilk olarak Wheeler tarafından 1960'lı yıllarda yapılmıştır [58, 59]. Yamashita ve Mittra [60] 1968 yılında değişebilir metot (VM: Variational Method) ile mikroşerit hatların analizini yapmışlardır. Mikroşerit yapıların frekans bağımlı analizleri ise, Cory [61] ve Derdinger [62] tarafından yapılarak literatüre sunulmuştur. Mikroşerit hatlar, literatürde birçok araştırmacı tarafından quasi-statik metotlar [58–60, 63–65], tam dalga analiz metotları [61, 62, 66–69] kullanılarak analiz edilmişlerdir.

Mikroşerit hatların özel bir versiyonu olan asılı ve ters mikroşerit hatların analizleri birçok araştırmacı tarafından gerçekleştirilmiş olup bu çalışmaları üç grupta toplamak mümkündür [70]. Birinci grup, asılı ve ters mikroşerit hatların elektromanyetik analizi ve bunların süreksizlikleri ile ilgili analitik çalışmaları içermektedir. İkinci grupta, filtreler, faz kaydırıcılar, karıştırıcılar, güç birleştiriciler, antenler gibi asılı ve ters mikroşerit hatların uygulamaları ile ilgili çalışmalar içermektedir. Üçüncü grup, asılı ve ters mikroşerit hatları analiz etmek için CAD modelleri ile ilgili birçok çalışmayı içermektedir.

Literatürde asılı ve ters mikroşerit hatların quasi-statik analizi için üç CAD modeli önerilmiştir [71–75]. İlk CAD modeli 1985 yılında Pramanick ve Bhartia [71] önerilmiş

ve Tomar ve ark. [70] tarafından üretilen tam doğru teorik verilere göre bu modelin ortalama yüzde hatası $\pm 1\%$ olarak verilmiştir. İkinci quasi-statik CAD modeli ilk CAD modelinin genişletilmiş halidir [72]. Üçüncü CAD modeli ilk olarak 1992'de Svachina tarafından bildirilmiştir [73, 74] ve daha sonra Schellenberg, Svachina'nın formüllerini ile teorik verileri elde etmek için eğri uydurma ile birlikte bir KDT kullanarak efektif dielektrik sabiti hesaplamak için iki kapalı form denklemler önermiştir [75].

1985 yılında Pramanick ve Bhartia [71] önerilmiş model efektif dielektrik sabiti için asılı ve ters mikroşerit hatların geometrik boyutlarına bağlı ampirik bir ifade içerir ve $\epsilon_{r2} \leq 6$ için geçerlidir. Bu çalışmanın en önemli dezavantajı dielektrik taban malzemesi için dielektrik sabitin $\epsilon_{r2} \leq 6$ olmasıdır. Çünkü $\epsilon_{r2} \geq 6$ olan dielektrik taban malzemeleri, örneğin alüminyum ($\epsilon_{r2} = 9.6$) ve GaAs ($\epsilon_{r2} = 12.9$) gibi malzemeler pratikte sıklıkla kullanılmaktadır. Literatürde bulunan diğer model [72] daha geniş bir tasarım parametresi aralığı için geçerlidir ve [70]'de üretilen tam teorik verilere göre bu modelin ortalama yüzde hatası asılı ve ters mikroşerit hatlar için $\pm 0.6\%$ olarak verilmiştir. Bu model, efektif dielektrik sabiti için hatların geometrik boyutlarına bağlı olan bir polinom ifadesi içerir. Schellenberg [75] tarafından sunulan asılı ve ters mikroşerit hatların efektif dielektrik sabitlerini belirlemek amacı ile sunulan modeller $\epsilon_{r2} \leq 12.9$ için geçerli olup ortalama yüzde hataları asılı ve ters mikroşerit hatlar için sırası ile $\pm 0.65\%$ ve $\pm 1\%$ olarak verilmiştir. Literatürde bulunan bu çalışmalar matematiksel olarak oldukça uzun ve karmaşık ifadelerden oluşmaktadır. Örnek olarak referans [72]'de sunulan modellere ilişkin bağıntılar Ek-1'de verilmiştir.

Eşdüzlemli iletim hatları, iletken şeritin ve toprak düzlemlerinin dielektrik taban malzemesinin üzerine simetrik veya asimetrik bir şekilde yerleştirilmesi ile gerçekleştirilirler. Asimetrik iletim hatları literatürde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [76-79]. Sonsuz kalınlıktaki dielektrik tabana sahip asimetrik EDDK'lar 1981 yılında Hanna ve Thebault [76] tarafından literatüre sunulmuş ve quasi-statik analizleri KDT kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonlu kalınlıktaki dielektrik tabana sahip asimetrik EDDK'ların karakteristik parametreleri KDT kullanılarak elde edilmiştir [77, 78]. Asimetrik EDDK'ların karakteristik empedansları ayrıca zaman domeninde sonlu farklar metodu kullanılarak bulunmuştur [79].

Sonsuz genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'nın quasi-statik analizi ilk defa 1969 yılında Wen [6] tarafından KDT kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların quasi-statik analizleri ise Heinrich [80], Fuste ve ark. [81] tarafından literatüre sunulmuştur. Heinrich dağılmış elemanlar yaklaşımı kullanarak EDDK'lar için yaklaşık kapalı formda ifadeler türetirken, Fuste ve ark. ise 2012 yılında sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların quasi-statik analizlerini KDT kullanarak gerçekleştirmiştir.

Entegre devrelerde, iletim elemanları dielektrik katmanlar arasına ya da dielektrik tabanın üzerine yerleştirilmektedirler. Tek bir dielektrik tabana sahip iletim hatları ile karşılaştırıldığında çok katmanlı yapıların avantajı alt ve üst katmanlar için uygun dielektrik tabanların kullanılmasıyla temel frekans bölgesinin kontrol edilmesi ve kaçak alanların önlenemesidir [82-87].

Literatürde yaygın olarak kullanılan çok katmanlı EDDK'lardan bir tanesi de dielektrik taban destekli EDDK'larıdır. Dielektrik taban destekli EDDK'ların karakteristik parametreleri Bedair ve Wolff [88] tarafından quasi-statik analizleri KDT kullanılarak elde edilmiştir. Aynı zamanda, elde edilen analitik ifadelerin sonuçları spektral domen analizi (SDA) sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bir diğer çalışmada ise Cheng ve Robertson [89], geliştirilmiş SDA (GSDA) metodunu kullanarak dielektrik taban destekli EDDK'ların karakteristik parametrelerini elde etmişlerdir. Çok katmanlı asimetrik EDDK'lar ayrıca Görür ve Ark. [90] tarafından quasi-statik TEM karakteristikleri yapılan bir çalışmada literatüre sunulmuştur.

EDŞH'de EDDK'lar gibi MED ve MMED'lerdeki devre elemanlarının seri ve paralel bağlantılarını kolaylaştıran iletim hatlarıdır [6, 39, 91-102]. EDŞH'lerin en önemli özellikleri iyi bir propagasyona ve küçük dispersiyona sahip olmaları ve karakteristik parametrelerinin dielektrik taban malzemesinin kalınlığına direk bağlı olmasıdır. EDŞH'ler radyo frekans ve mikrodalga entegre devreler için çok kullanışlı iletim hatlarıdır. Bu nedenle birçok simetrik ve asimetrik EDŞH yapısı literatüre sunulmuş ve analizi gerçekleştirilmiştir [6, 39, 91-102].

Asimetrik EDŞH'lerden mikro EDŞH'ler ilk olarak 1987 yılında Yamashita ve Ark. [97] tarafından analizleri dikdörtgen sınır bölme metodu kullanılarak elde edilmiş ve literatüre sunulmuştur. Mikro EDŞH'lerin analizi değişik metotlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Goverdhanam ve Ark. [98] tarafından zaman domeninde sonlu farklar metodu ile mikro EDŞH'lerin analizleri gerçekleştirilmiştir. Tan ve Uysal [99] ve Görür ve Karpuz [100] tarafından aynı iletim hattının analizleri KDT kullanılarak elde edilmiş ve literatüre sunulmuştur. Qian ve Yamashita [101] tarafından 1990 yılında yapılan bir çalışmayla aynı iletim hattının analizi literatüre önerilmiştir.

Asimetrik EDŞH'lerden sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EDŞH'ler ise 1997 yılında Svacina [102] tarafından literatüre sunulmuş ve analizi gerçekleştirilmiştir. Sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EDŞH'lerin karakteristik parametreleri için kapalı form ifadeler KDT kullanılarak elde edilmiştir [102].

Son yıllarda mikrodalga iletim hatlarının analizi için yapay sinir ağı ve bulanık sinir ağı tabanlı modeller literatüre sunulmuştur. Mikroşerit hatların quasi-statik analizi bulanık sinir ağları ile gerçekleştirilerek Yıldız ve Ark. [103] tarafından literatüre sunulmuştur. Yıldız ve Saracoğlu tarafından asılı ve ters mikroşerit hatların karakteristik parametrelerinden olan efektif dielektrik sabiti hesaplamak için bulanık sinir ağı tabanlı modeller önerilmiştir [104]. EDŞH'lerin quasi-statik analizi için yapay sinir ağları tabanlı modelleri Lakshmi ve Ark. [105] tarafından 2008 yılında literatüre sunulmuştur. EDŞH'lerin quasi-statik analizi bulanık sinir ağları kullanılarak elde edilmiş ve literatüre önerilmiştir [106]. Asimetrik EDŞH'lerin quasi-statik analizi yapay sinir ağları kullanılarak elde edilmiş ve literatüre önerilmiştir [107]. Dielektrik taban destekli EDDK'ların quasi-statik analizi bulanık sinir ağları Yıldız ve Ark. [108] tarafından yapılarak literatüre sunulmuştur. Bulanık sinir ağları ve yapay sinir ağları tabanlı bu modeller kapalı formda tasarım denklemleri içermeyen kapalı kutu modellerdir.

Literatürde bulunan bu analiz modellerinin bazı dezavantajı bulunmaktadır. Tam-dalga analiz metotları, MİH'lerin frekans bağımlı analizleri için çok doğru sonuçlar sunabilmelerine karşın analitik olarak çok daha zor ve işlem süresi oldukça uzun karmaşık işlemler içermektedirler. Quasi-statik metotlar basit olmalarına rağmen MİH'lerin dispersif doğasını dikkate almazlar. Bunun sonucu olarak da iletim hattı dispersif hale gelirken quasi-statik metotların hatasının arttığı da bilinmektedir. KDT literatürde sıklıkla kullanılan quasi-statik metotlardandır. Quasi-statik metotlar, 100 GHz'e kadar geçerli sonuçlar sunabilmektedir [83]. Bu metodun doğruluğu ise tamamen iletim hattı üzerindeki dalga yayılım modunun quasi statik yani saf TEM seçilmesine bağlıdır [85].

Yapay sinir ağırları ve bulanık sinir ağırları tabanlı olarak geliştirilen analiz modelleri ise kapalı kutu modeller olup kapalı formda açık matematiksel ifadeler içermez.

Mikrodalga iletim hatlarının istenilen karakteristik empedansa sahip olacak şekilde geometrik boyutlarının belirlenmesine yönelik sentez çalışmaları literatürde sınırlı sayıdadır. Mikroşerit hat yapılarının istenilen karakteristik empedansa sahip olacak şekilde geometrik boyutlarının belirlenmesine yönelik sentez çalışmaları literatüre Hammerstad [64] tarafından sunulmuştur. Literatürde, asılı ve ters mikroşerit hatların tasarımı için Bhartia ve Ark. [71, 72] tarafından önerilen iki çalışma bulunmaktadır. İlk çalışma [71], asılı ve ters mikroşerit hatların şerit genişliklerini doğrudan hesaplamak için uzun kapalı form tasarım denklemleri içerir. İlk çalışmadaki tasarım parametreleri $1 \leq w/b \leq 8$, $0.2 \leq a/b \leq 1$ ve $\epsilon_{r2} \leq 6$ aralığında kalır. Bu çalışmanın en önemli dezavantajı dielektrik taban malzemesi için $\epsilon_{r2} \leq 6$ bağıl dielektrik sabitinin kısıtlanmasıdır, çünkü $\epsilon_{r2} \geq 6$ olan dielektrik taban malzemeleri, örneğin alüminyum ($\epsilon_{r2} = 9.6$) ve GaAs ($\epsilon_{r2} = 12.9$) gibi pratikte sıklıkla kullanılmaktadır.

İkinci çalışmada, Tomar ve Bhartia tarafından asılı ve ters mikroşerit hatlar için analitik yöntemin tersine çevrilmesine dayanan bir tasarım yöntemi önerilmiştir [72]. Bu yöntemin dezavantajları matematiksel olarak basit değildir ve istenen karakteristik empedansa sahip olan asılı ve ters mikroşerit hatların şerit genişliğini belirlemek için çok fazla hesaplama çabası gerektirir. (Ek-1)

Bunun yanı sıra EDŞH'lerin sentez modelleri de literatüre sunulmuştur [105, 109-112]. Bu sentez modelleri ihtiyaç duyulan tasarımı yapmak için doğrudan EDŞH yapılarının fiziksel boyutları elde etmek için kullanılırlar. Deng. ve Ark. [109] tarafından sunulan modeller eğri uydurma tekniği ile geliştirilerek literatüre sunulmuştur. Yıldız [110] tarafından 2005 yılında diferansiyel gelişim algoritması ile geliştirilen sentez formülleri literatüre önerilmiştir. Yıldız ve Ark. [111] tarafından sunulan sentez modelleri ise eğri uydurma tekniği ile geliştirilmiştir. 2007 yılında ise Yıldız ve Ark. [112] tarafından literatüre sunulan yeni sentez modelleri bulanık sinir ağırları kullanılarak geliştirilmiştir. Ayrıca EDŞH'lerin tasarımı için yapay sinir ağırları tabanlı sentez modelleri literatüre sunulmuştur [105].

Mikro EDŞH'lerin geometrik boyutlarının hesaplanması için sentez formülleri de literatürde sunulmuştur [97, 101, 113, 114]. Yamashita ve Ark. [97] önerilen tasarım

denklemleri eğri uydurma tekniği ile geliştirilmiştir. Qian ve Yamashita [101] tarafından 1990 yılında yine önerilen tasarım denklemleri eğri uydurma tekniği ile geliştirilmiştir. Güney ve Ark. [113] tarafından 2008 yılında diferansiyel gelişim algoritması kullanılarak geliştirilen sentez formülleri literatüre sunulmuştur. Ayrıca Kaya ve Ark. [114] 2012 yılında aynı iletim hattı için bulanık sinir ağı yardımıyla sentez modelleri geliştirmiştir.

Asimetrik EDŞH'lerin tasarımı için diferansiyel gelişim algoritması ve parçacık sürü optimizasyon algoritması ile geliştirilen sentez modelleri literatüre Güney ve Ark. [115] tarafından önerilmiştir. Aynı iletim hattının tasarımı için geliştirilen sentez modelleri bulanık sinir ağları ile geliştirilerek literatüre sunulmuştur [114].

Sonsuz genişlikli toprak düzlemine sahip EDDK'ların sentez modellerine ilişkin çalışmalar literatürde bulunmaktadır [116-121]. Fakat sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların sentez modellerine ilişkin bir çalışma bilgilerimize göre literatürde bulunmamaktadır. Dielektrik taban destekli EDDK'ların tasarımı için diferansiyel gelişim algoritması ve parçacık sürü optimizasyon algoritması ile geliştirilen sentez modelleri literatüre Kaya ve Ark. [122] tarafından önerilmiştir. Dielektrik taban destekli EDDK'ların tasarımı için geliştirilen sentez modelleri bulanık sinir ağları ile geliştirilerek literatüre sunulmuştur [123].

Literatürde bulunan bu çalışmaların dezavantajları şunlardır. EDŞH'lerin tasarımı için önerilen kapalı formdaki modeller [109-111], mikro EDŞH'lerin tasarımı için önerilen kapalı formdaki modeller [97, 101, 113], asimetrik EDŞH'lerin tasarımı için önerilen kapalı formdaki model [115] ve dielektrik taban destekli EDDK'ların tasarımı için önerilen kapalı formdaki model [122] matematiksel olarak oldukça uzun ifadeler içermektedir. Diğer modeller ise [105, 112, 114, 123] bulanık sinir ağları ve yapay sinir ağları tabanlı kapalı kutu modelleri olup matematiksel olarak kapalı form tasarım denklemleri içermezler.

1.3. Tezin Amacı

Yüksek frekanslardaki işaretlerin taşınmasında kullanılan MİH'ler mikrodalga entegre devrelerinin temelini oluştururlar. Ayrıca mikrodalga filtreler ve kuplörler gibi birçok devre elemanlarının gerçekleştirilmesinde de görev almaktadır. MİH'ler farklı mikrodalga devre uygulamaları için farklı fiziksel boyutlarda ve yapılarda dizayn

edilmiştir. En yaygın kullanılan MİH'ler, düzlemsel iletim hatları olan EDDK'lar ve EDŞH'lerdir.

MİH'lerin analizinde iki farklı yaklaşım kullanılır. Bunlardan birincisi dinamik veya tam-dalga yaklaşımlar ikincisi statik veya quasi-statik, yaklaşımlardır [44]. Tam-dalga veya dinamik yaklaşımda yalnızca TEM modu için değil aynı zamanda hibrit modlar için de iletim hattının karakteristik parametreleri frekansa bağlı olarak belirlenirken, statik veya quasi-statik yaklaşımda TEM modu için iletim hattının karakteristik parametreleri belirlenir. Dinamik veya tam-dalga yaklaşımının kullanıldığı yöntemler ise, zaman domeninde sonlu farklar yöntemi, mod-uygunlaştırma yöntemi, SDA ve spektral domende galerkin yöntemidir. Statik veya quasi-statik yaklaşımın kullanıldığı yöntemler, KDT, sonlu farklar yöntemi, Fourier dönüşüm domeninde değişebilir yöntemi ve sınırlı elemanlar yöntemidir. Quasi-statik yaklaşımların kullanıldığı yöntemler nispeten basit olmalarına karşın, iletim hattının dispersif yapısını dikkate almazlar ve bu yüzden de yüksek frekanslarda hatalı sonuçlar verirler. Tam-dalga yaklaşımı kullanan yöntemler ise en doğru sonuçları vermelerine karşın oldukça zor ve uzun zaman alacak karmaşık işlemler gerektirirler.

Literatürde MİH'lerin karakteristik parametrelerini farklı analiz yöntemleri kullanarak belirleyen çok sayıda çalışma yapılmıştır. Ayrıca arzu edilen karakteristik empedansa sahip olması istenen MİH'lerin geometrik boyutlarının belirlenmesi amacıyla yapılan sentez çalışmaları sınırlı sayıdadır. Literatüre sunulan bu analiz ve sentez çalışmaları uzun matematiksel ifadeler içermektedir. Bu sebepten dolayı bu tez çalışması kapsamında MİH'lerin analiz ve sentezlerine ilişkin hata oranları düşük ve matematiksel olarak çok basit modeller elde etmek amacı ile iki farklı zeki optimizasyon tekniği ele alınmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında farklı mikrodalga iletim hatlarından dielektrik taban destekli EDDK'lar, asılı mikroşerit hatlar, ters mikroşerit hatlar, klasik mikroşerit hatlar, sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların analiz ve sentez modelleri genetik programlama [124, 125] ile belirlenirken, mikrodalga iletim hatlarından iletken destekli mikro EDŞH'ler ve sonsuz toprak düzlemine sahip asimetric EDŞH'lerin sentez modelleri genetik programlama ve yapay arı koloni algoritması [126, 127] ile belirlenmiştir.

Bu tezin amacı

- Zeki optimizasyon tekniklerinden genetik programlama (GP) kullanarak MİH'lerin karakteristik parametreleri olan karakteristik empedans ve efektif dielektrik sabitini hesaplamak için hata oranları düşük ve matematiksel olarak çok basit analiz modelleri sunmak;
- Zeki optimizasyon tekniklerinden GP ve yapay arı koloni (YAK) algoritması kullanarak MİH'lerin istenen karakteristik empedans değerine sahip olması amacı ile gerekli olan geometrik boyutları hesaplayan hata oranları düşük ve matematiksel olarak çok basit sentez modelleri sunmak;
- GP ve YAK algoritmalarının MİH'lerin analizinde ve sentezinde kullanılabileceğini göstermektir.

2. BÖLÜM

GEREÇ VE YÖNTEM

2.1. Giriş

MİH'ler mikrodalga entegre devrelerinin temelini oluştururlar. MİH'lerin analizinde genellikle quasi-statik ve tam-dalga yaklaşımlar kullanılır. Literatürde, MİH'lerin karakteristik parametrelerinin belirlenmesi için birçok analiz yöntemi mevcuttur. Ancak arzu edilen karakteristik empedansa sahip olması istenen MİH'lerin geometrik boyutlarının belirlenmesi amacıyla yapılan sentez çalışmaları literatürde sınırlı sayıdadır. Bu tez çalışmasında MİH'lerin karakteristik parametrelerinin ve geometrik boyutlarının hesaplanması için GP ve YAK algoritması kullanılmıştır.

GP evrimsel algoritma tekniklerinden biri olup son yıllarda birçok mühendislik probleminin çözümünde büyük rol oynamıştır [128-137]. Bu çalışmalarda, Baykasoğlu ve Ark [128] tarafından kireçtaşının basınç ve çekme dayanımının GP yoluyla tahmin edilmesi incelenmiştir. Koza ve Ark. [129] tarafından analog elektrik devrelerinin GP yoluyla otomatik sentezi çalışılmıştır. Ayrıca reaktif çekme sistemlerinde kart sayısının dinamik olarak nasıl ayarlandığını öğrenmek için GP kullanılmıştır [130]. Dahası kümeleşme uygulamalarında [131], elektromanyetik cihaz tasarımı optimizasyonunda [132], basınç dayanım problemlerinde [133], su kaynaklarının belirlenmesinde [134], mühendislikte tersine problem uygulamaları [135], yer altı su seviyesi tahmininde [136] ve veri madenciliği [137] gibi birçok alanda kullanılmıştır.

YAK algoritması güçlü bir optimizasyon tekniği olup, nümerik optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilmiştir. YAK algoritmasının mühendislik uygulamalarına yönelik birçok problem bulunmaktadır [127, 138-141]. Bu çalışmalardan bazıları, PID kontrol sistemlerinin optimizasyonu, nümerik optimizasyon problemleri, güç sistemlerinde harmonik tahmini ve anten tasarımı problemleridir.

Ayrıca bu tez çalışması kapsamında elektromanyetik simülasyon programı olan IE3D elektromanyetik simülatör programı [142] kullanılarak bazı modellerin analizleri gerçekleştirilmiştir.

2.2. Genetik Programlama

GP, adaptasyona giren yapıların karmaşıklığını arttırarak genetik algoritmalarda temsil etme problemiyle uğraşma eğilimini sürdürür. Genetik programlamada adaptasyon yapılan yapılar, genel olarak, dinamik olarak değişen boyut ve şekle sahip hiyerarşik bilgisayar programlarıdır.

GP evrimsel algoritma sınıfına ait olup, Koza [124] tarafından geliştirilmiştir. En iyilerin hayatta kalma prensibi temeline, genetik ve doğal evrim adımlarından uyarılmıştır. Evrimsel programlama, evrimsel strateji ve genetik algoritma (GA) gibi GP’de diğer evrimsel algoritma tekniklerinden biridir. GP ile GA arasında bazı benzerlikler olmasına karşılık aralarındaki temel farklılık yönettikleri yapının gösterimi ve bu gösterimin taşıdığı anlamda ortaya çıktığı görülmektedir. GA’da çözüm gerçek veya ikili sayılardan oluşan bir dizi şeklindedir. GP’de ise genellikle ağaç yapıları ile temsil edilen bilgisayar programları şeklindedir. GA ’da sayı dizileri sabitken, GP’de ağaçların sayısı veya uzunluğu oluşum veya koşma sırasında değişebilir [143, 144].

GP sembolik regresyon arasındaki çoğu uygulamadan biridir. Bu uygulamanın amacı giriş ve çıkış değişkenleri arasındaki ilişkiden bir fonksiyon bulmaktır. Bu fonksiyonel ilişki ise lineer, kuadratik veya daha yüksek diğer polinomsal ifadeler olabilir. GP aynı zamanda matematiksel modelin nümerik katsayılarını ve model yapısını belirleyebilmektedir. GP algoritmasında iki temel bileşen bulunur. Bunlar terminal ve fonksiyon kümeleridir. Bu iki küme, GP’nin araştırma uzayının popülasyon bireylerini kullanarak oluşturulan bloklar içerir.

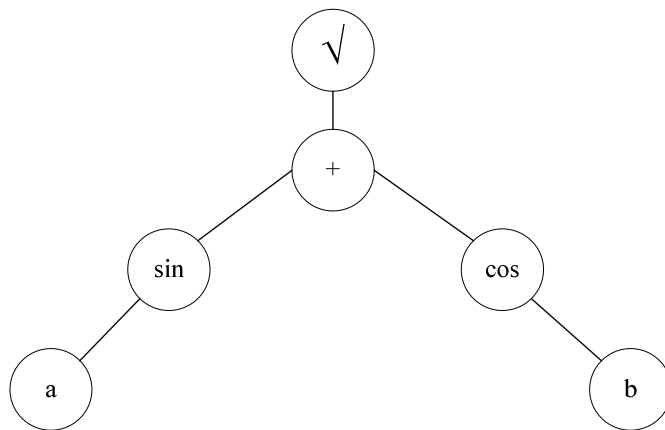
2.2.1. Terminal ve Fonksiyon Kümeleri

GP’de rastgele olarak bireylerin (bilgisayar programları) popülasyonu oluşturulur. Geniş bir çözüm uzayı içerisinde oluşturulan başlangıç popülasyonu yüksek çeşitlilik gösterir.

Bir popülasyon bireyi bir ağaç yapısında olup fonksiyonlar ve terminaller bulundurur. Fonksiyon setindeki fonksiyonlar arasında,

- Aritmetik işlemler (+, -, ×, /),
- Matematiksel fonksiyonlar (sin, cos, exp ve log gibi),
- Boolean işlemleri (AND, OR, NOT gibi),
- Koşullu operatörler (If-Then-Else gibi),
- Yinelemeye neden olan işlevler (Do-Until gibi),
- Özyinelemeye neden olan işlevler ve tanımlanabilen diğer alana özgü işlevler bulunmaktadır.

Probleme bağlı olarak, bilgisayar programı boolean değerli, tamsayı değerli, gerçek değerli, karmaşık değerli, vektör değerli, simgesel değerli veya çok değerli olabilir. Terminal kümesi ise kullanıcı tarafından belirlenen fonksiyon parametrelerinden (değişkenler, sayısal ve mantıksal sabitler) meydana gelir. Örneğin bazı sistemlerin girişlerini, sensörlerini, dedektörlerini veya durum değişkenlerini temsil eder. Fonksiyon ve terminallerin rastgele olarak seçilmesiyle beraber bir kök noktası ve uzanan dal şeklinde olan ağaca benzeyen bir şekilde model oluştururlar [125]. Örneğin bir GP'de elde edilen bir matematiksel modelin ağaç yapısı üzerinde gösterimi Şekil 2.1'de verilmiştir. Bu matematiksel modelin sembolik ifadesi $\sqrt{\sin(a) + \cos(b)}$ şeklindedir.



Şekil 2.1. GP'de bir modelin ağaç yapısı üzerinde gösterimi

2.2.2. Uyumluluk (Fitness) Fonksiyonu

Amaca ve uygulanacak probleme göre uygunluk fonksiyonu farklılık gösterir. GP'nin araştırma uzayında yön vermesini sağlayan önemli adımlardan biri uygunluk ölçümü adımıdır. Eğer uygunluk fonksiyonu iyi bir şekilde belirlenmiş ise problemin çözümünde optimuma ulaşmasını kolaylıkla sağlanabilirken, aksine bir durumda modelin performansının azalmasını doğrudan etkileyebilecektir. Amaç fonksiyonunun doğrudan uygunluk fonksiyonu olarak atanabileceği gibi, amaç fonksiyonuna eklenecek çeşitli terimler GP algoritmasının iyi çözümlere yaklaşma hızını artırabilecektir [125].

2.2.3. Genetik operatörler

GP'de genetik operatörler kullanılarak popülasyon içinden bir başlangıç popülasyonu oluşturulur. Bu genetik operatörler çaprazlama ve mutasyon operatörleridir. Bu operatörlerle popülasyon içinde yeni bireyler elde edilir [124, 125].

2.2.4. Çaprazlama

Popülasyondaki bireylerden bazılarının eşleştirilmesi ve bu ebebeyn olarak adlandırılan bireylerin gen bilgilerini içeren, çocuk olarak adlandırılan yeni kromozomların üretilmesidir. Böylece her çocuğun her bir geni atalarından birisi ile aynı olacaktır. Çaprazlamada popülasyondaki bireylerden rastgele iki birey seçilir. Bu bireylerden birincisine, birinci ebebeyn ikincisine, ikinci ebebeyn denir. Bu bireylerden yine rastgele bir çaprazlama noktası işaretlenir. Bu noktaya çaprazlama noktası denir. Bu çaprazlama noktası kökün dışında her yerde olabilir. Sonrasında birinci ebebeynin çaprazlama noktasının altında kalan alt ağaç ile ikinci atanın çaprazlama noktasının alt ağacı karşılıklı yer değiştirilir. Oluşan yeni ağaçlara birinci çocuk ve ikinci çocuk denir. Genellikle çaprazlama oranı 0.1-1 arasında alınır.

Çaprazlama operatörünün amacı araştırma uzayı içerisinde eski popülasyonda bulunmayan yeni birey programlar türetmektir. Bunun için çaprazlamada ilk olarak iki ağaç birey program aday olarak seçilmelidir. İki ağaç birey program adayında rasgele bir düğüm noktası belirlenir. Belirlenen düğümden sonraki alt ağaçlar bu iki ağaç birey program arasında seçilen noktalardan karşılıklı yer değiştirilir. GP'de bir modelin ağaç yapısı şeklinde çaprazlamanın gösterimi Şekil 2.2' de verilmiştir. Şekilde C1 ile C2

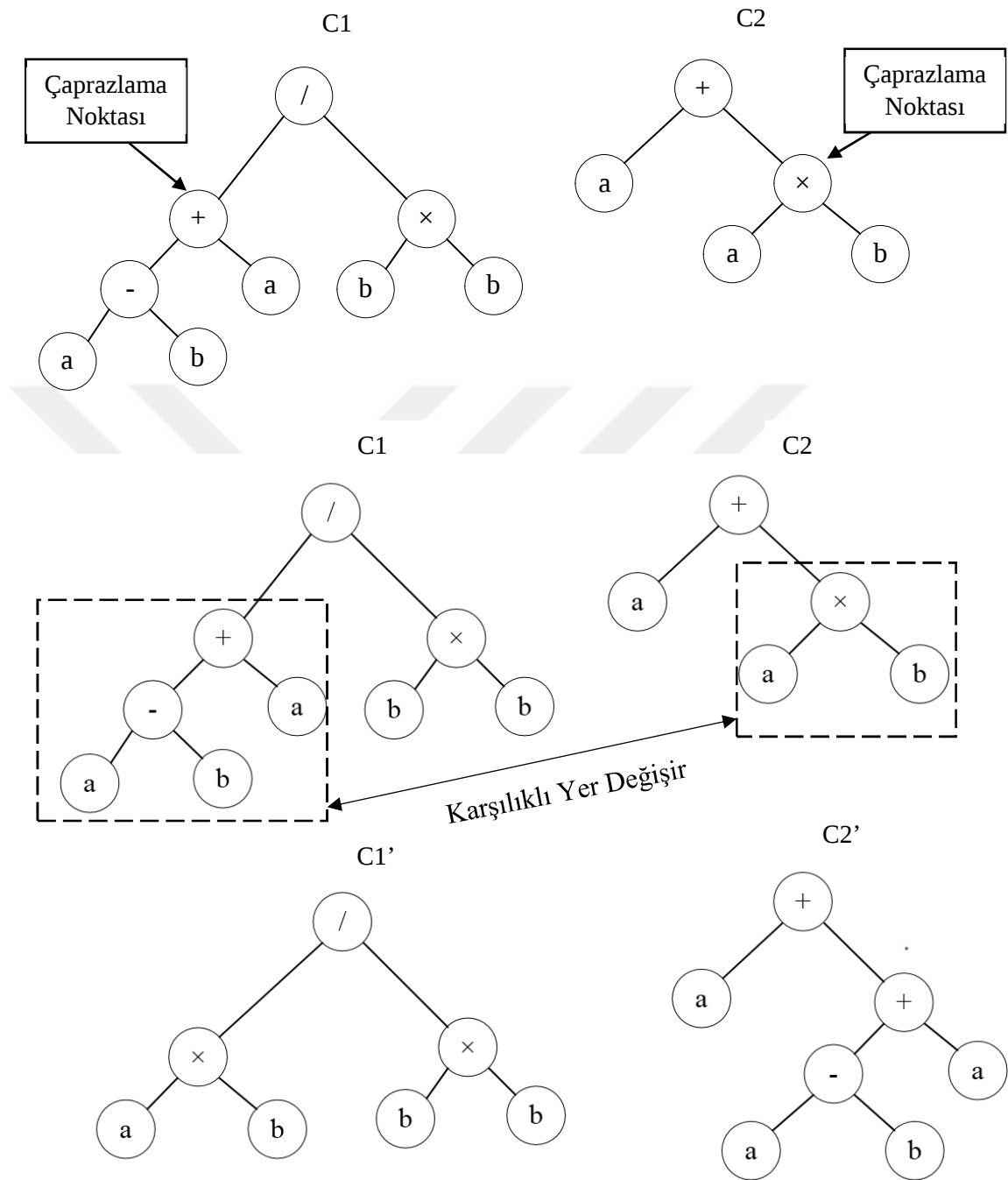
adayları için rasgele bir düğüm belirlenmiş olup bu düğüm noktalarında çaprazlama yapılmıştır. Oluşan yeni bireyler C1' ve C2' ile gösterilmiştir.

Çaprazlama işleminde çözüm seçmek için üç yöntem bulunmaktadır. Birinci yöntemde, çözümün uyumuna göre olasılığı kullanmaktır. Böylelikle yeni jenerasyona fonksiyonun olasılığı kopyalanmaktadır. İkinci yöntemde, turnuvalı seçim yöntemidir. GP rasgele olarak iki çözümü seçer. Seçilen bu iki çözümüden uyumu daha iyi olan kazanmış olur. Son ve üçüncü metotta sıralama yöntemi ile seçim yapılır. Bu metotta uyum değeri daha iyi olan çözümler çaprazlamaya tabi tutulurlar [124, 125].

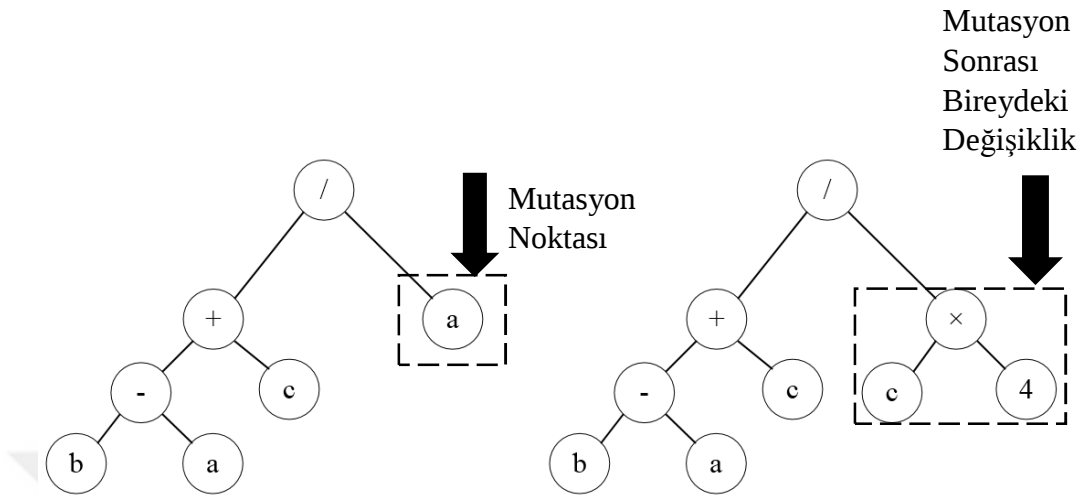
2.2.5. Mutasyon

GP'da mutasyon işleminde ebebeyin ağaç program yapısı içinde rasgele bir düğüm noktası seçilir. Bu seçilen noktada rasgele olarak yeni bir ağaç yapısı büyütülür. GP'de mutasyon operatörünün kullanılmasıyla popülasyondaki genetik çeşitlilik artmaktadır. Şekil 2.3'te mutasyon işlemi için seçilen bir birey ve bu bireyden mutasyon sonucunda elde edilen yeni bir birey gösterilmektedir.

Mutasyonda popülasyondaki bireylerden rastgele bir tanesi seçilir. Bu seçilen bireyden rastgele bir nokta belirlenir. Bu belirlenen noktaya mutasyon noktası denir. Seçilen noktanın alt ağacındaki bütün terminaller silinerek yerlerine aynı terminal setinden rastgele seçilen yeni terminaller girilir. Aynı şekilde alt ağaçta bulunan bütün fonksiyonlar silinerek aynı fonksiyon setinden bulunan rastgele seçilen yeni fonksiyonlar girilir. Mutasyon bizi genetik programlamada zaman zaman rastladığımız bölgesel minimum yada bölgesel maksimumlardan kurtulmamızı olanak tanımaktadır. Genellikle mutasyon oranı 0.01-1 arasında alınır [124].



Şekil 2. 2. GP'de bir modelin ağaç yapısı üzerinde çaprazlamanın gösterimi



Şekil 2. 3. GP’de bir modelin ağaç yapısı üzerinde mutasyon işleminin gösterimi

2.2.6. Çoğalma

Çoğalma operatörü basit bir yapıda olup bu operatör ile gelecek jenerasyona bir bireyi kopyalanır. Bunun için popülasyondan bir birey seçilir. Seçilen birey kopyalanarak popülasyon içinde başka bir yere eklenir. Böylelikle popülasyonda aynı bireyin iki versiyonu bulunur.

2.2.7. Seçme İşlemi

İşlemlerin uygulanacağı bireylerin seçiminde kullanılan yöntemi ifade eder. Problem tipine göre seçim yöntemlerinden biri seçilir. Bireylerin seçme işlemleri dört yöntemle yapılabilir. Bunlar rulet tekerleği seçme, sıralama seçme, turnuva seçme ve lexicografik parsimoni basınç seçme olarak sıralanabilir.

Rulet tekerleği seçme olarak bilinen bu yöntem uygunluk orantılı seçme olarak da bilinmekte olup yaygın bir metottur. Bu metotta bireyler rulet tekerleğindeki şans faktörü üzerinden uygunluk değeri hesaplanıp seçme işlemi yapılır. Rulet tekerleği döndüğünde skalada en fazla yer kaplayan bireyin seçilme olasılığının daha yüksek olur. Turnuva metodu daha hızlı bir yakınsama yapılmak isteniyorsa önerilmektedir. Bu metotta sıklıkla popülasyondan bireylerin özel bir grubu (genellikle iki) rasgele seçilecektir ve daha iyi uygunluklu (daha az uygunluklu) bireyler seçilecektir. Bireylerin uygunluğu arasındaki fark önemli ise turnuva ve rulet tekerleği yöntemlerinin kullanılması önerilmemektedir.

Bunların yerine sıralama (rank) seçme metotları uygundur. Örneğin en iyi birey programın uygunluğu yaklaşık %90 ise, diğer birey programların seçilebilmesi için şansı daha azdır. Sıralama değeri uygunluk değerinin yerini alması gibi bir fark ile bu yöntem rulet tekerleği yöntemine benzerdir. Lexicografik parsimoni basınç (Lexicographic parsimony pressure) yöntemi turnuva işlemine benzerlik göstermektedir. Bu yöntem uygunluk değerini ve ağaç uzunluğunu optimize edebilmektedir. Bu metotta iki birey aynı uygunluk değerine sahip olduğu zaman, daha az düğüme sahip olan en kısa birey en iyi çözüm olarak seçilecektir [124].

2.2.8. Genetik Programlamanın Adımları

Aşağıda maddeler halinde GP'nin çalışma adımları verilmiştir [124];

1. Uygun fonksiyon ve terminallerin rastgele bileşimiyle oluşan bilgisayar programı bireylerinin başlangıç popülasyonunu oluştur.
2. İteratif olarak, durdurma kriteri sağlanıncaya kadar aşağıda verilen alt adımları gerçekleştir. Bu alt adımlar şu şekildedir;
 - a) Popülasyonda bulunan her bir program çalıştırılır ve probleme uygunluk ölçümü kullanılarak uygunluk değeri hesaplanır.
 - b) Popülasyondan bir ya da iki birey programı, uygunluk değerine bağlı olarak genetik operasyon uygulamak için seçilir (Seleksiyon).
 - c) Popülasyona yeni birey ya da bireyler oluşturmak için genetik operasyonlar (çaprazlama ve mutasyon) belirli bir olasılık değerlerinde uygulanır.

Genetik operasyonlardan çaprazlama ile popülasyondaki bireylerden bazılarının eşleştirilmesi ve bu ata olarak adlandırılan bireylerin gen bilgilerini bulunduran, çocuk olarak adlandırılan, yeni kromozomların üretilmesidir. Böylece her çocuğun her bir geni atalarından birisi ile aynı olmaktadır.

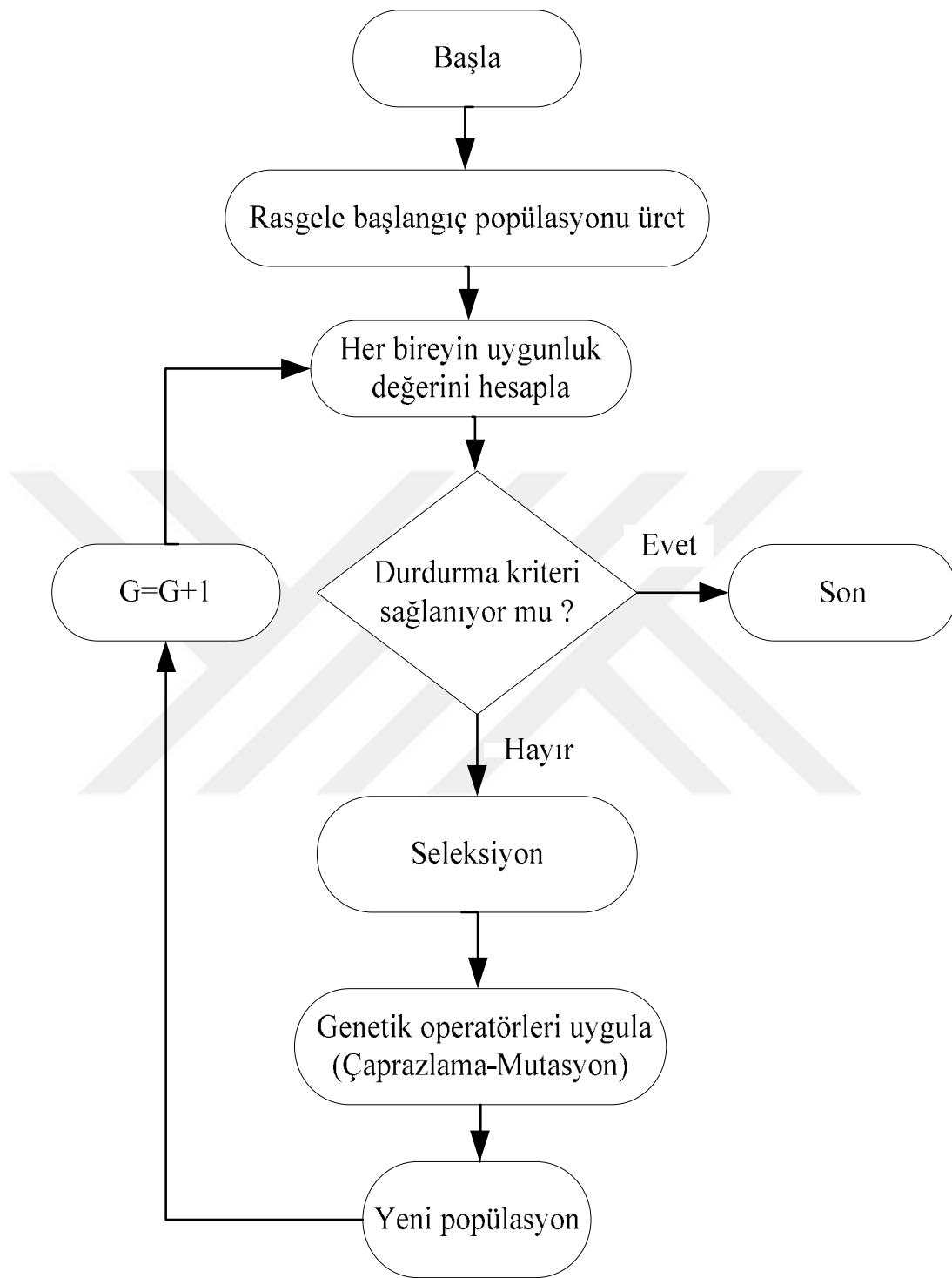
Mutasyon ile popülasyon bireylerinin arasından rasgele seçilenlerinin bazı gen değerlerinin rasgele değiştirilmesidir.

Çoğalma ile seçilen bireylerden hangilerinin diğer hiçbir genetik operatör tarafından değişikliğe uğramadan (çaprazlama, mutasyon) yeni nesile aktarılmasının seçimine denir.

3. Durdurma kriterine ulaşıldığı zaman, çalışma sırasında popülasyonda elde edilen en iyi ve basit program toplanıp çalışma sonucu olarak atanmaktadır.

GP'nin genel akış diyagramı Şekil 2.4'te verilmiştir. Bu şekle göre, GP rasgele bir başlangıç popülasyonunun üretilmesi ile başlamaktadır. İlk jenerasyonun üretilmesinden sonra her bir bireyin uygunluk değeri hesaplanır. Durdurma kriteri olarak en iyi çözüm yada maksimum jenerasyon sayısı sağlandığında algoritma durmaktadır. Aksi takdirde algoritma devam edecektir. Daha sonra genetik operatörler uygulanacaktır. Böylelikle ikinci jenerasyon üretilecek olup tekrar her bir bireyin uygunluk değeri hesaplanacaktır. Böylece durdurma kriterleri sağlanıncaya kadar bu adımlar tekrar edecektir [124].





Şekil 2. 4. GP'nin genel akış diyagramı

2.3. Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Sürü halinde yaşayan arıların besin arama esnasında sundukları sosyal davranışlar çok dikkat çekicidir. Bu süreçte arıların kendi aralarında bir iş bölümü yapabilmektedir. Arıların değişen şartlara göre iş bölümünde değişik görevler üstlenmektedir. Diğer taraftan sürünün hiçbir dış etken olmadan kendi içerisinde organize olabilmesi bu davranışlardan bazılarıdır. Ayrıca arıların bulmuş oldukları besin kaynaklarının kalitesini belirleme ve birbirleriyle haberleşerek bu kaynaklar hakkında bilgi paylaşımında bulunmaktadırlar. Arıların besin arama süreci içerisinde sundukları zeki davranışlara farklı örnekler olarak gösterilebilir. Doğada var olan zeki davranışlar içeren süreçlerin incelenmesi araştırmacıları yeni optimizasyon metotları geliştirmeye sevk etmiştir. YAK algoritması bu tür zeki davranışları gerçeğine uygun bir şekilde modelleyen ve son yıllarda oldukça popüler olan bir zeki optimizasyon tekniğidir. Karaboğa, arıların besin arama davranışını modelleyerek YAK algoritmasını geliştirmiştir [126, 127].

2.3.1. Algoritmanın Temel Adımları

YAK algoritmasında bir yapay arı kolonisi; görevli arılar, gözcü arılar ve kaşif arılar olmak üzere üç çeşit arıdan oluşur. Görevli arılar, bulmuş oldukları besin kaynağından nektar depolayıp kovana getiren arılardır. Bir görevli arının, nektar depoladığı besin kaynağı bellidir. Bu arıların asıl görevi nektar taşıma işlemiyle sorumludur. Nektar taşımanın dışında diğer bir görevi daha vardır. Bu görevi ise bulmuş olduğu besin kaynağı hakkında kovanda bekleyen gözcü arılara bilgi vermektir. Bilgi verme işlemini yapmış olduğu dansla gerçekleştirir. Yapılan dansın süresi besin kaynağının kalitesiyle doğru orantılıdır. Başka bir ifadeyle, yapılan dansın süresi ne kadar uzunsa bulunan besin kaynağı da o kadar kalitelidir.

Görevli arıların yapmış oldukları dansları izleyerek besin kaynakları hakkında bilgi edinen gözcü arılar, edindikleri bilgiler ışığında bir besin kaynağının kullanılıp kullanılmayacağı hakkında bir değerlendirme yaparlar. Yaptığı değerlendirmeye göre bir besin kaynağını kullanmaya karar verirse görevli arılara yardım ederler. Eğer besin kaynağını kullanmayı düşünmezse kovanda bekleyerek görevli arıların danslarını izlemeye devam ederler.

Yeni besin kaynaklarını aramaya çıkmış arılara kaşif arılar adı verilir. Bir arı, kaşif arı olmadan önce aslında bir görevli arıdır ve bir besin kaynağından nektar depolar. Kullanılan besin kaynağı tüketilmişse veya yeteri kadar bu kaynaktan yararlanılmışsa görevli arı kaşif arı olur. Böylece kaşif arı olarak yeni besin kaynaklarını aramaya çıkarlar.

Karaboğa'nın YAK algoritmasının temel aldığı model de bazı kabuller yapılmaktadır. Bunlardan birincisi görevli arıların sayısı toplam besin kaynağı sayısına eşittir. İşçi arıların sayısı aynı zamanda gözcü arıların sayısına da eşittir. Nektarı tükenmiş kaynağın görevli arısı artık kaşif arı haline dönüşmektedir. Besin kaynaklarının yerleri optimizasyon problemine ait olası çözümlere ve kaynakların nektar miktarları ise o kaynaklarla ilgili çözümlerin kalitesine (uygunluk) karşılık gelmektedir. Dolayısıyla YAK optimizasyon algoritması en fazla nektara sahip kaynağın yerini bulmaya çalışarak uzaydaki çözümlerden problemin minimum yada maksimum değerini veren noktayı (çözümü) bulmaya çalışmaktadır.

Algoritmada besin aramanın başlangıcında kaşif arılar rastgele bir bölgeye giderek birer besin kaynağı seçerler. Seçilen besin kaynaklarından nektar depolayıp kovana getiren arılar görevli arı konumuna geçerler. Bir görevli arı kovana getirdiği nektarı boşaltırlar. Bu arılar bulmuş olduğu kaynağa dönüp nektar depolamaya devam eder. Böylece seçtikleri kaynaktan en iyi şekilde faydalanmaya çalışırlar. Görevli arı, nektarı bıraktıktan sonra yaptığı dansla gözcü arılara bulmuş olduğu kaynağın kalitesi hakkında bilgi verir. Gözcü arı yapılan olasılık hesabı sonucunda bir kaynak üzerinde karar vererek görevli arılara yardımcı olurlar. Eğer bir görevli arı bulmuş olduğu kaynağı tüketmiş ise yada o kaynaktan yeterince faydalanmış ise başka kaynaklar aramaya başlarlar. Bunun sonucunda görevli arı kaşif arı konumuna geçer. Böylece rastgele bir kaynağa ulaşarak tekrar görevli arı konumuna geçer. Kaşif arıların bu davranışı keşfedilmemiş yeni kaynakların bulunmasını ve daha fazla kaynağa erişilmiş olmasını sağlar. Görevli arılar ve gözcü arılar arasındaki iletişim sayesinde de komşu kaynaklardan en etkili biçimde faydalanmış olurlar. Görevli ve gözcü arılar arasındaki iş bölümü yerel kaynakların kullanımını (exploitation) sağlar. Kaşif arılar ise keşfedilmemiş alanların bulunmasını (exploration) gerçekleştirir.

YAK algoritması oldukça az kontrol parametresine sahip, basit ve esnek olup ayrıca sürü zekasına dayalı bir algoritmadır. YAK algoritması nümerik problemler için geliştirilmiştir olup ayrık problemler için de kullanılabilir. Algoritmada, kaşif arılar tarafından gerçekleştirilen küresel ve görevli ve gözcü arılar tarafından gerçekleştirilen bölgesel araştırma kabiliyetine sahiptir ve ikisi paralel yürütülmektedir [127].

2.3.2. Kontrol Parametreleri

Temelde YAK algoritmasında kullanılan iki adet kontrol parametresi bulunmaktadır. Bu parametreler popülasyon büyüklüğü (popsiz) ve limit parametreleridir. Popülasyon büyüklüğü YAK algoritmasında kullanılacak popülasyonun sayısıdır. Daha önce açıklandığı gibi besin kaynaklarının, görevli arıların ve gözcü arıların sayısı (NS) birbirine eşittir. Bunların sayısı aynı zamanda “NS = popsize/2” olarak kabul edilmektedir. Bu algoritmada bir kaynağın terk edilip terk edilmeyeceğini belirleyen eşik değeri limit parametresi tarafından ifade edilir. Limit, algoritmada bir görevli arının kaşif arı olması için kullanılan çok önemli bir parametredir. Bu iki parametrenin dışında algoritmanın ne kadar maliyet fonksiyonu değerlendirileceği yada kaç çevrim ilerleyeceği gibi durdurma kriteri de giriş parametresi olarak tanımlanabilir.

2.3.3. Sistemin Başlatılması

YAK algoritmasında arama uzayını besin kaynaklarını içeren kovan çevresi olarak düşünülür ve çevrede rastgele besin kaynakları üretmeye başlamaktır. Rastgele yer üretme aşaması her bir parametrenin alt ve üst sınırları arasında rastgele değer üreterek gerçekleşir (Eşitlik 2.1).

$$x_{ij} = x_j^{\min} + \text{rand}(0,1)(x_j^{\max} - x_j^{\min}) \quad (2.1)$$

Burada $i = 1 \dots SN$, $j = 1 \dots D$ ve SN besin kaynağı sayısı ve D ise optimize edilecek parametre sayısıdır. $x^{\min}$, j. parametrenin alt sınırı, $x^{\max}$ ise j. parametrenin üst sınırıdır. Başlangıç aşamasından sonra besin kaynaklarının görevli arı, gözcü arı ve kaşif arı süreçlerinden geçirilerek, daha iyisi bulunmaya çalışılır. YAK algoritması için durdurma kriteri olarak kabul edilebilir bir hata değeri (e) ve maksimum çevrim sayısı

veya diğer optimizasyon algoritmalarında olduğu gibi standart bir durdurma kriteri tanımlanabilir.

2.3.4. Görevli Arıların Besin Kaynaklarına Gönderilmesi

Besin kaynaklarının sayısı görevli arı sayısına eşittir. İşçi arı çalıştığı besin kaynağı komşuluğunda yeni bir besin kaynağı belirler. Ayrıca bunun kalitesini de değerlendirir. Yeni kaynak eskisinden daha iyi ise bu yeni kaynağı hafızasına alır. Yeni kaynağın mevcut kaynak komşuluğunda belirlenmesinin benzetimi Eşitlik 2.2 ile tanımlanmaktadır:

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij} (x_{ij} - x_{kj}) \quad (2.2)$$

Burada rastgele seçilen parametresi, j değiştirilerek x_i komşuluğunda v_i kaynağı bulunur. Eşitlik 2.2'de j , $[1, D]$ aralığında rastgele üretilen bir tamsayıdır. Rastgele seçilen j parametresi değiştirilirken, yine rastgele seçilen x_k komşu çözümünün ($k \in \{1, 2, \dots, SN\}$) j . parametresi ile mevcut kaynağın j . parametresinin farkları alınıp $[-1, 1]$ arasında rastgele değer alan ϕ_{ij} sayısı ile çarpıldıktan sonra mevcut kaynağın j . parametresine eklenmektedir. Üretilen v_{ij} 'nin sınırları aşması durumunda alt veya üst sınır değerlerine ötelenir.

Eşitlik 2.2'den de görüldüğü gibi $x_{i,j}$ ve $x_{k,j}$ arasındaki fark açıldıkça, yani çözümler birbirine benzedikçe, $x_{i,j}$ parametresindeki değişim miktarı da azalacaktır. Böylece bölgesel optimal çözüme yaklaştıkça değişim miktarı da adaptif olarak azalmaktadır. Bu işlem sonucunda üretilen $v_{i,j}$ 'nin daha önceden belli olan parametre sınırları aşması durumunda j , parametreye ait olan alt veya üst sınır değerlerine ötelenmektedir. (Eşitlik 2.3):

$$v_{ij} = \begin{cases} x_j^{\min} & , \quad v_{ij} < x_j^{\min} \\ v_{ij} & , \quad x_j^{\min} \leq v_{ij} \leq x_j^{\max} \\ x_j^{\max} & , \quad v_{ij} > x_j^{\max} \end{cases} \quad (2.3)$$

Eşitlik 2.3’de kontroller sonrasında yeni oluşan v_i çözümünün kalitesi belirlenir. Eğer elde edilen v_i çözümü hafızada bulunan x_i çözümünden daha kaliteli ise görevli arı x_i çözümünü terk eder ve v_i çözümünden nektar depolamaya başlar. Aksine bir durumda ise görevli arı sahip olduğu x_i kaynağını bırakmaz. Bu çözümün geliştirilememe sayacı bir artırılır. Bir çevrim içerisinde bütün görevli arılar bu işlemleri yaparlar.

2.3.5. Seleksiyonda Kullanılacak Olasılık Değerlerinin Hesaplanması

Bütün görevli arılar besin araştırmalarını tamamladıktan ve kovana döndükten sonra buldukları kaynaklar hakkında gözcü arılara bilgi verirler. Bilgi aktarımı görevli arıların yapmış olduğu dans ile gerçekleştirilir [145]. Görevli arının yaptıkları dansın süresi buldukları besin kaynağının kalitesi ile doğru orantılıdır. Temel YAK algoritması seçim işlemi için bu mantığa en uygun teknik olan rulet tekerleği yöntemini kullanır [146]. Olasılık değerlerinin belirlenmesi için her bir çözümün maliyet değeri eşitlik 2.4 şeklinde normalize edilir. Sınırlar dahilinde üretilen v_i parametre vektörü yeni bir kaynağı temsil etmektedir.

$$\text{fitness}_i = \begin{cases} 1 / (1 + f_i) & f_i \geq 0 \\ 1 + \text{abs}(f_i) & f_i < 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

Burada f_i , v_i kaynağının yani çözümünün maliyet değeridir. x_i ile v_i arasında nektar miktarlarına yani uygunluk değerlerine göre bir aç gözlü (greedy) seçme işlemi uygulanır. Yeni bulunan v_i çözümü eskiye göre daha iyi ise görevli arı hafızasından eski kaynağın yerini siler. Yeni v_i kaynağının yerini hafızaya alır.

2.3.6. Gözcü Arıların Seleksiyonda Kullanacakları Olasılık Değerlerinin Hesaplanması (Dans Benzetimi)

Tüm görevli arılar topladıkları nektarlarla ilgili kovanda gözcü arılara dans aracılığıyla bilgi verirler. Gözcü arılar gidecekleri besin kaynağını topladıkları bilgilerden yararlanarak seçerler. Olasılıksal seçme işlemi, algoritmada nektar miktarlarına karşılık gelen uygunluk değerleri kullanılarak yapılmaktadır. Uygunluk değerine bağlı seçme

işlemi sıralamaya dayalı, rulet tekerleği, turnuva yöntemi, stokastik örnekleme yada diğer seleksiyon şemalarından herhangi biri ile gerçekleştirilebilir. Temel YAK algoritmasında bu seleksiyon işlemi rulet tekerleği kullanılarak yapılmıştır. Bir kaynağın uygunluk değerinin tüm kaynakların uygunluk değeri toplamına oranı o kaynağın diğer kaynaklara göre oranla seçilme olasılığı olduğunu Eşitlik 2.5'te vermektedir.

$$p_i = \frac{\text{fitness}_i}{\sum_{j=1}^{SN} \text{fitness}_j} \quad (2.5)$$

Burada, SN görevli arı sayısını, fitness_i kaynağın kalitesini göstermektedir. Bu olasılık işlemine göre kaynak nektarının kalitesi arttıkça o kaynağı seçecek arıların sayısı da artacaktır.

2.3.7. Gözcü Arıların Besin Kaynaklarına Gönderilmesi

Algoritmada olasılık değerleri hesaplandıktan sonra bu değerler kullanılarak rulet tekerleğine göre seçim işleminde her bir kaynak için $[0,1]$ aralığında rastgele sayı üretilir ve p_i değeri bu üretilen sayıdan büyükse görevli arılar gibi gözcü arı da Eşitlik 2.2'yi kullanarak bu kaynak bölgesinde yeni bir çözüm üretir. Yeni çözümün kalitesi eski çözüm ile karşılaştırılır. Eğer daha iyi bir sonuç verdiyse geliştirememme sayacı sıfırlanır. Eğer eski sonuçtan daha kötü bir sonuçsa geliştirememme sayacı bir artırılır. Bu süreç tüm gözcü arılar besin kaynağı gölgelerine dağılına kadar devam eder.

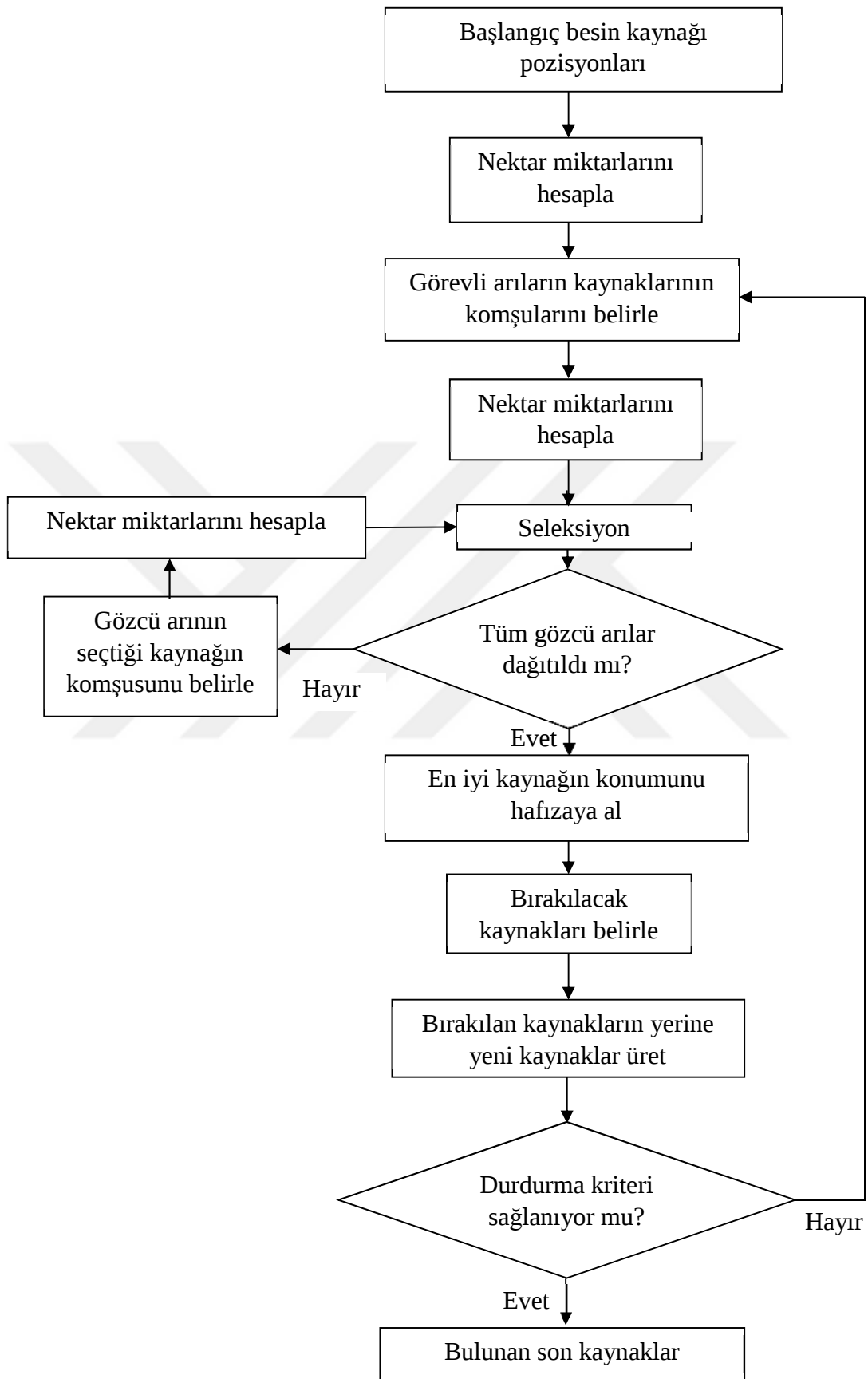
2.3.8. Tükenen Kaynağı Bırakma ve Kaşif Arı Üretimi

Bir çevrim sonunda tüm görevli arılar ve gözcü arılar arama süreçlerini tamamladıktan sonra çözüm geliştirememme sayaçları kontrol edilir. Bir besin kaynağının tükenip tükenmediği çözüm geliştirememme sayaçları ile tespit edilir. Bu sayaç belirli bir değerin üzerinde ise yani mevcut çözümlerden daha iyi bir çözüm geliştirilemiyorsa o besin kaynağı tükenmiş demektir. Besin kaynaklarının tükenmesiyle beraber o görevli arılar kendilerine başka besin kaynakları aramaya başlarlar. Böylece görevli arılar kaşif arı konumuna geçerler. Kaşif arı haline geldikten sonra, bu arı için rastgele çözüm arama süreci başlar (Eşitlik 2.1). Kaynağın tükendiğinin belirlenmesi için kullanılan eşik değeri,

YAK algoritmasının önemli bir kontrol parametresidir ve "*limit*" olarak adlandırılmaktadır [127]. Dört farklı seleksiyon işlemi kullanılan YAK algoritmasında işlemler şöyledir;

- 1)Potansiyel iyi kaynakların belirlenmesine yönelik Eşitlik 2.5 ile olasılık değerlerinin hesaplandığı global olasılık temelli seleksiyon sürecidir.
- 2)Görevli ve gözcü arıların koku, şekil ve renk gibi nektar kaynağının türünü belirlemesini sağlayan görsel bilgiyi kullanarak bir bölgede kaynağın bulunmasına neden olan bölgesel olasılık tabanlı seleksiyon işlemidir. (Eşitlik 2.2).
- 3)Gözcü ve görevli arıların daha iyi olan kaynağı belirlemek amacı ile kullandıkları seleksiyonun aç gözlü seçme işlemi olmasıdır.
- 4)Kaşif arılar tarafından Eşitlik 2.1 aracılığı ile gerçekleştirilen seçme işlemi rastgele seleksiyondur. Bütün bu seleksiyon metotlarının bir arada kullanılmasıyla YAK algoritması hem iyi bir bölgesel araştırma hem de global araştırma yapabilmektedir.

Tüm bu birimler arasındaki ilişki ve döngü Şekil 2.5'te akış diyagramı ile gösterilmiştir [127].



Şekil 2. 5. YAK algoritmasının akış diyagramı

2.4. IE3D Elektromanyetik Simülasyon Programı

IE3D, düzlemsel mikrodalga devreleri ve 3-boyutlu (3B) MMED, RFIC (Radyo Frekansı Entegre Devreleri: Radyo Frequency Integrated Circuits), RFID (Radyo Frekansı ile Tanımlama: Radio-Frequency Identification), antenler, dijital devreler ve yüksek hızlı devrelerin tasarımı ve analizi için kullanılabilen bir entegre tam dalga elektromanyetik simülasyon paketidir [142].

Anten ve pratik devre yapıları için, metalik alan ne kadar sınırlı ise IE3D'nin çözümü de o kadar sınırlı olacaktır. Mikroşerit devre yapısı buna en tipik bir örnektir. Bu problemde çözüm alanı sadece dielektrik taban malzemesi üzerindeki şerittir. IE3D'de elektromanyetik teoremin temeli olan Maxwell denklemlerinin çözümü esasına dayanmaktadır.

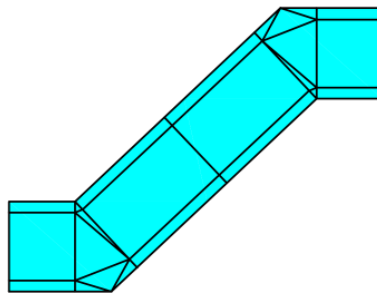
IE3D'nin kullanıcılara sağladığı avantajlar ve teknik özelliklerinden bazıları aşağıda sırası ile verilmiştir.

1. IE3D, linux ve windows tabanlı grafik ara yüzlerine sahip, örneklerine göre yüksek verimlilik, yüksek doğruluğa sahip ve düşük maliyetli bir elektromanyetik simülasyon aracıdır. Kişisel bilgisayarlarda çalışan IE3D simülasyonu, üst düzey iş istasyonlarında çalışan diğer alan çözümlerinden daha hızlıdır.
2. IE3D, 3B ve çok katmanlı metalik yapıların, bir poligon grubu olarak etkileşimli bir şekilde tasarlanmasına avantaj sağlar. Tasarım aşamasındaki poligon ve köşe noktalarının belirlenmesini kolaylaştırmak için, birçok biçimlendirme özellikleri sağlanmış ve kısayollar tanımlanmıştır.
3. Elektromanyetik simülasyon programı olan IE3D'de halkalar, çemberler, spiraller, küreler, silindirik ve konik vialar ve helezonlar gibi kompleks yapıların tasarımı için bir klasör sunulmuştur. Böylece, 3B ve çok katmanlı kompleks yapılar kolaylıkla tasarlanabilmektedir.
4. Moment metoduna dayalı bir sayısal simülasyon, ele alınan devrenin küçük hücrelere bölünmesini gerektirir. Bu amaçla, IE3D'de hem üçgensel hem de dikdörtgensel hücreler kullanılmaktadır. En yüksek verim için dikdörtgensel hücreler düzenli tabakalarda kullanılır. Üçgensel hücrelerden, düzensiz sınırlara uymakta faydalanılır. En iyi

sonuçların elde edilmesi için üçgensel hücrelerin esnekliği ve dikdörtgensel hücrelerin verimliliği birleştirilmiştir.

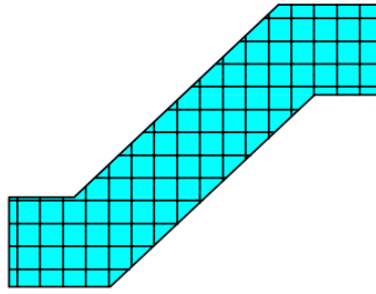
5. IE3D’de metalik yapıların şekil ve yöneliminde herhangi bir sınırlama konulmamıştır. Bundan dolayı bu simülatör konik helezon antenler, tel bağlar ve diğer genel şekilli 3B yapıları modelleyebilmektedir. IE3D geniş bir çeşitlilikte üç boyutlu mikrodalga, düzlemsel ve RF yapıları oluşturup simüle edebilir.

6. IE3D, otomatik köşe hücresi tanımlama özelliği ile tecrübesi bulunmayan kullanıcılara ızgara (grid) yapısını oluştururken büyük bir kolaylık sağlamaktadır. MİH yapılarında akım iletken şeritlerin köşesinde yoğunlaşmaktadır. Yüksek akımın köşelerde yoğunlaşmasının en iyi modellenmesi, baskı devrelerinin doğru simülasyonu için son derece önemlidir. Köşelere küçük hücrelerin eklenmesi genellikle simülasyonun doğruluğunu sağlamaktadır. Bir simülasyona hücreler eklenirken, bununla birlikte simülasyonun içindeki hücre sayısının azaltılması oldukça zordur. IE3D 3.0 ile birlikte, köşelerde küçük hücrelerin otomatik olarak oluşturulması seçeneği getirilmiştir. Oldukça az bir sayısal modelleme bilgisine sahip kullanıcılar, otomatik köşe hücresi özelliği sayesinde doğru sonuçları kolaylıkla elde edebilirler. Şekil 2.6’da IE3D’nin örgü yapısı görülmekte olup, dikdörtgensel ve üçgensel hücreli uniform olmayan örgü asgari hücre sayısı ile en doğru sonuçları verir. Şekil 2.7’deki örgü yapısı uniformdur ve en basit iletim hattı yapıları için dahi gereğinden fazla sayıda hücre oluşturur. Yani bilinmeyenlerin sayısını artırarak işlem süresinin çok daha fazla olmasına neden olur.



Şekil 2.6. IE3D’nin dikdörtgensel ve üçgensel hücreli uniform olmayan örgü yapısı

7. IE3D bileşenleri arasında elektromanyetik optimizasyon motoru bulunmaktadır. Bu simülatör ile kullanıcılara bir devrenin şeklini optimizasyon değişkenleri halinde tanımlama imkanı sağlamaktadır. IE3D içerisindeki optimizasyon modülü, bir yapıyı en iyi performansı sağlayacak biçimde optimize edebilmektedir.



Şekil 2.7. IE3D'nin dikdörtgensel ve üçgensel hücreli uniform örgü yapısı

8. IE3D, metal kalınlığının etkilerini ve gerçek üç boyutlu metalik yapıları doğru bir şekilde modelleyebilmektedir. Moment yöntemi tabanlı similatörlerden birçoğu, çok ince metalik yapıları modellemekte kullanılmaktadır. Bu simülatörlerde metallerin kalınlık bilgisi sadece metalik kaybın düzeltilmesi içindir ve metal kalınlığın yapısal etkilerini modelleyemezler. IE3D ise, isteğe bağlı olarak kullanıcıların metal kalınlıklarının etkisini tam olarak modellemelerine olanak sağlamaktadır. Geniş mikroşerit yapılar, akım metalik şeridin alt yüzeyinde yoğunlaşır. Bu geniş mikroşerit yapılar, kalınlık etkisini modellemeden de iyi sonuçlar elde edilebilir. Ancak şerit hatlarda ve ters ve asılı şerit hatlar gibi bazı şerit hat konfigürasyonlarında, akım metalik şeridin hem alt hem de üst yüzeyinde yoğunlaşır. Metal kalınlığının yapısal etkilerini modellemeden alınacak simülasyon sonuçları, gerçek sonuçlardan oldukça farklı olacaktır. IE3D bir metalik şeridin dört köşesindeki akımları aynen modelleyebilir. Böylelikle, IE3D şerit hat filtrelerinin tasarımı içinde uygun hale gelmektedir.

9. IE3D, S, Y ve Z parametrelerinin, dikdörtgensel grafik ve Smith abağında görsel gösterimini sağlayan MODUA isimli bir bileşene sahiptir. Aynı zamanda bir devre simülatörü olan MODUA ile kullanıcılar değişik S-parametre modüllerini ve toplu öğeleri grafiksel olarak birbiriyle bağlayarak düğümsel bir simülasyon gerçekleştirebilir.

10. Yarık yapıların modellenmesi IE3D kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayede, IE3D ile EDDK'ların, EDŞH'lerin, EDDK beslemeli antenlerin ve mikroşerit antenlerin modellenmesi mümkün olmaktadır.

3. BÖLÜM

MİKRODALGA İLETİM HATLARI İÇİN ÖNERİLEN ANALİZ MODELLERİ

3.1. Giriş

Mikrodalga entegre devrelerin temelini oluşturmakta olan MİH'ler esas olarak yüksek frekanslardaki işaretlerin taşınmasında kullanılmaktadır. Ayrıca mikrodalga filtreler ve kuplörler gibi birçok devre elemanlarının gerçekleştirilmesinde de kullanılırlar. MİH'lerin analizinde genellikle quasi-statik ve tam dalga yaklaşımlar kullanılır. Literatürde MİH'lere ait birçok analiz modeli bulunmakla birlikte bu modeller uzun matematiksel ifadeler içermektedir.

Bu tez çalışması kapsamında MİH'lerden, dielektrik taban destekli EDDK'ların, asılı mikroşerit hatların, ters mikroşerit hatların, klasik mikroşerit hatların ve sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların karakteristik parametrelerini hesaplayan analiz modelleri GP kullanılarak bulunmuştur. MİH'lerin karakteristik parametrelerini hesaplayan analiz modelleri ile ilgili detaylı bilgiler aşağıda sırası ile verilmiştir.

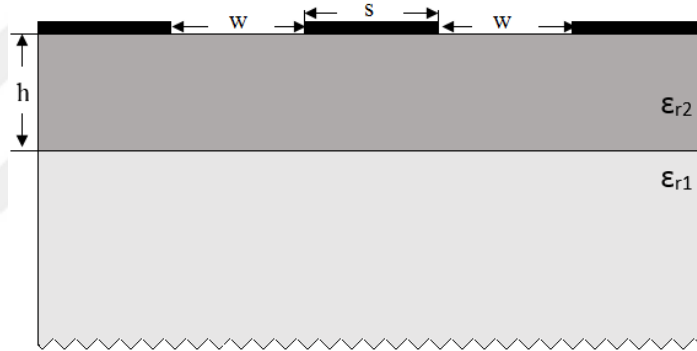
3.2. Dielektrik Taban Destekli EDDK'lar için Önerilen Analiz Modelleri

Dielektrik taban destekli EDDK'lar literatürde yaygın olarak kullanılan çok katmanlı EDDK'lardan biridir. Dielektrik taban destekli EDDK'ların karakteristik parametreleri Bedair ve Wolff [88] tarafından KDT kullanılarak elde edilmiştir. Aynı zamanda elde edilen analitik ifadelerin sonuçları spektral domain analizi (SDA) sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Diğer bir çalışmada ise Cheng ve Robertson [89], geliştirilmiş (GSDA) metodunu kullanarak dielektrik taban destekli EDDK'ların karakteristik parametrelerini elde etmişlerdir. Literatürde önerilen analiz CAD modelleri uzun matematiksel ifadeler

içermektedir. Bu nedenle dielektrik taban destekli EDDK'ların karakteristik parametrelerinin hesaplanması oldukça uzun zaman almaktadır.

Bu tez çalışmasında dielektrik taban destekli EDDK'ların karakteristik parametrelerini hesaplayan doğru ve çok basit bir yapıya sahip analiz modelleri sunulmuştur. Dielektrik taban destekli EDDK'ların analiz modellerinin geliştirilmesinde GP kullanılmıştır.

Şekil 3.1'de kesit görünümü verilen dielektrik taban destekli EDDK yapısında bağl dielektrik sabiti ϵ_{r2} olan taban malzemesinin kalınlığı h , bu taban malzemesini destekleyen sonsuz kalınlıktaki malzemenin bağl dielektrik sabiti ϵ_{r1} 'dir. Dielektrik tabanın üzerine yerleştirilen merkez iletken şeridin genişliği s , merkez iletken şerit ile toprak düzlemleri arasındaki yarık genişliği w 'dır.



Şekil 3.1. Dielektrik taban destekli EDDK'ların kesit görünümü

Bu çalışmada dielektrik taban destekli EDDK'ların karakteristik parametrelerini hesaplanması için analiz modelleri oluşturulurken, KDT [88] sonuçlarından elde edilen 8000 adet veri seti kullanılmıştır. Veri seti oluşturulurken kullanılan tasarım parametreleri: $2 \leq \epsilon_{r1} \leq 10$, $10 \leq \epsilon_{r2} \leq 20$, $0.1 \leq s/h \leq 4$, $0.1 \leq w/h \leq 1$, $20 \mu m \leq h \leq 2000 \mu m$. Bunlara karşılık gelen karakteristik empedans değerleri ise $19 \Omega \leq Z_0 \leq 117 \Omega$ arasındadır.

Dielektrik taban destekli EDDK'ların quasi-statik analizi için GP tarafından belirlenen uygun analiz modellerini bulmak için birçok deneme yapılmıştır. Bu denemelerde, popülasyon büyüklüğü, mutasyon oranı, çaprazlama oranı ve çoğalma oranının en uygun değerleri sırasıyla 150, 0.1, 0.8 0.1 olarak seçilmiştir. Birçok denemeden sonra hata oranları düşük ve matematiksel olarak çok basit analiz modelleri elde edilmiştir. Analiz

modellerini kullanılarak belirli iki dielektrik taban malzemesi (ϵ_{r1} , ϵ_{r2}) ve fiziksel boyutlar (w/h ve s/h) için dielektrik taban destekli EDDK'ların karakteristik parametrelerini yani karakteristik empedansı (Z_0) ve efektif dielektrik sabiti (ϵ_{eff}) hesaplanır.

Dielektrik taban destekli EDDK'ların karakteristik empedansını ve efektif dielektrik sabitini hesaplamak için iyi sonuçlar veren GP tarafından belirlenen analiz modelleri aşağıda verilmiştir;

$$Z_0 = \eta_0 \cdot \left[\frac{\frac{x_1 \cdot w}{h} + \frac{x_2 \cdot h}{w} + \frac{x_3 \cdot \epsilon_{r1} \cdot h}{s}}{\left(x_4 + x_5 \cdot \epsilon_{r2} + x_6 \cdot \log\left(\frac{s}{h}\right) \cdot \log\left(x_7 + \frac{w}{h} + x_8 \cdot \epsilon_{r2}\right) \right) + \frac{x_9 \cdot \frac{w}{h}}{h}} \right]^{-1} \quad (3.1)$$

$$\epsilon_{eff} = \left[\frac{x_1 + x_2 \cdot \epsilon_{r2} + \frac{x_3 \cdot \epsilon_{r1} \cdot w}{h} + \frac{x_4 \cdot \epsilon_{r1} \cdot s}{h} - \frac{x_5 \cdot \epsilon_{r2} \cdot s}{h} - \frac{x_6 \cdot \epsilon_{r2} \cdot w}{h}}{-\frac{x_7 \cdot \epsilon_{r2} \cdot w}{h} \cdot \sin\left(\frac{x_8 \cdot s}{h}\right)} \right] \quad (3.2)$$

Burada $\eta_0 = 120\pi \, \Omega$ hava ortamının öz empedansını ve ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_9$) analiz modellerinin katsayılarını temsil etmektedir. Tablo 3.1'de dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen analiz modellerine ait katsayılar verilmiştir.

Tablo 3.1. Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen analiz modellerine ait katsayılar

Katsayılar	Karakteristik Empedans (Z_0)	Efektif Dielektrik Sabiti (ϵ_{eff})
x_1	1.1261	0.4789
x_2	0.1446	0.5080
x_3	0.0552	0.0780
x_4	4.0994	0.0353
x_5	0.3069	0.0339
x_6	4.1489	0.0592
x_7	0.3938	0.0442
x_8	0.6735	0.5954
x_9	0.6914	---

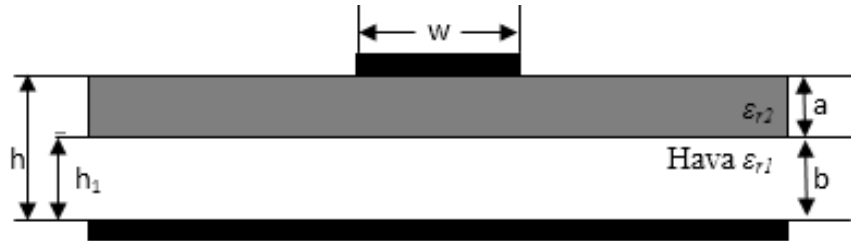
3.3. Asılı Mikroşerit Hatlar için Önerilen Analiz Modelleri

Mikroşerit hatların özel bir versiyonu olan asılı mikroşerit hatların analizleri birçok araştırmacı tarafından gerçekleştirilmiş olup bu çalışmaları üç grupta toplamak mümkündür [70]. Birinci grup, asılı mikroşerit hatların elektromanyetik analizi ve bunların süreksizlikleri ile ilgili analitik çalışmaları içermektedir. İkinci grupta, filtreler, faz kaydırıcılar, karıştırıcılar, güç birleştiriciler, antenler gibi asılı mikroşerit hatların uygulamaları ile ilgili çalışmalar içermektedir. Üçüncü grup, asılı mikroşerit hatların analizi için CAD modeller ile ilgili birçok çalışmayı içermektedir.

Literatürde asılı mikroşerit hatlarının quasi-statik analizi için dört CAD modeli önerilmiştir [71–75, 104]. İlk CAD modeli 1985 yılında Pramanick ve Bhartia [71] önerilmiş ve Tomar ve ark. [70] tarafından üretilen tam doğru teorik verilere göre bu modelin ortalama yüzde hatası $\pm \% 1$ olarak verilmiştir. Bu model efektif dielektrik sabiti için asılı mikroşerit hatların geometrik boyutlarına bağlı ampirik bir ifade içerir ve $\epsilon_{r2} \leq 6$ için geçerlidir. Bu çalışmanın en önemli dezavantajı dielektrik taban malzemesi için dielektrik sabitinin $\epsilon_{r2} \leq 6$ olmasıdır. Çünkü $\epsilon_{r2} \geq 6$ olan dielektrik taban malzemeleri, örneğin alüminyum ($\epsilon_{r2} = 9.6$) ve GaAs ($\epsilon_{r2} = 12.9$) gibi malzemeler pratikte sıklıkla kullanılmaktadır. İkinci quasi-statik CAD modeli ilk CAD modelinin genişletilmiş bir halidir [72]. Bu model daha geniş bir tasarım parametresi aralığı için geçerlidir ve [70]'de üretilen tam teorik verilere göre bu modelin ortalama yüzde hatası asılı mikroşerit hatlar için $\pm \% 0.6$ olarak verilmiştir. Bu model, efektif dielektrik sabiti için hatların geometrik boyutlarına bağlı olan bir polinom ifadesi içermektedir. Üçüncü CAD modeli ilk olarak 1992'de Svacania tarafından bildirilmiştir [73, 74] ve daha sonra Schellenberg, Svacania'nın formüllerini ile teorik verileri elde etmek için eğri uydurma ile birlikte bir KDT kullanarak efektif dielektrik sabiti hesaplamak için iki kapalı form denklem önermiştir [75]. Schellenberg [75] tarafından sunulan asılı mikroşerit hatların efektif dielektrik sabitlerini belirlemek amacı ile sunulan modeller $\epsilon_{r2} \leq 12.9$ için geçerli olup ortalama yüzde hataları asılı mikroşerit hatlar için $\pm \% 0.65$ olarak verilmiştir. Son model asılı mikroşerit hatlar için efektif dielektrik sabiti hesaplamak amacıyla önerilmiş olan bulanık sinir ağı tabanlı olup kapalı formda tasarım denklemleri içermezler [104].

Bu tez çalışmasında, asılı mikroşerit hatların karakteristik parametrelerini hesaplamak için GP tarafından geliştirilen doğru ve çok basit analiz modelleri sunulmuştur. Şekil 3.2'de kesit görünümü verilen asılı mikroşerit hatlar yapısında w şerit genişliğini,

a dielektrik taban kalınlığını ve ϵ_{r2} ise taban malzemesinin bağıl dielektrik sabiti, ϵ_{r1} havanın bağıl dielektrik sabitini ve b ile gösterilen kısım hava tabakası kalınlığını göstermektedir. Burada $h=a+b$ ve $h_1=b$ olarak da bu tabakaların kalınlıkları verilmiştir.



Şekil 3.2. Asılı mikroşerit hatların kesit görünümü

Bu çalışmada asılı mikroşerit hatların karakteristik parametrelerinin hesaplanması için GP ile belirlenen analiz modelleri oluşturulurken, quasi-statik analiz [72] sonuçlarından elde edilen 3600 adet veri seti kullanılmıştır. Veri seti oluşturulurken kullanılan tasarım parametreleri: $2 \leq \epsilon_{r2} \leq 20$, $0.5 \leq w/b \leq 10$, $0.1 \leq a/b \leq 1.5$. Bunlara karşılık gelen karakteristik empedans değerleri ise $28\Omega \leq Z_0 \leq 185\Omega$ arasındadır.

Asılı mikroşerit hatların quasi-statik analizi için GP tarafından üretilen uygun analiz modellerini bulmak için birçok deneme yapılmıştır. Bu denemelerde, popülasyon büyüklüğü, mutasyon oranı, çaprazlama oranı ve çoğalma oranının en uygun değerleri sırasıyla 50, 0.1, 0.85, 0.05 olarak seçilmiştir. Birçok denemeden sonra hata oranları düşük ve matematiksel olarak çok basit analiz modelleri elde edilmiştir. Analiz modellerini kullanılarak belirli bir dielektrik taban malzemesi (ϵ_{r2}) ve fiziksel boyutlar (w/b ve a/b) için asılı mikroşerit hatların karakteristik parametrelerini yani karakteristik empedansı (Z_0) ve efektif dielektrik sabiti (ϵ_{eff}) hesaplanır.

Asılı mikroşerit hatların karakteristik empedansını ve efektif dielektrik sabitini hesaplamak için iyi sonuçlar veren GP tarafından belirlenen analiz modelleri aşağıda verilmiştir;

$$Z_0 = \eta_0 \cdot \left[\begin{array}{c} x_1 + x_2 \cdot u + x_3 \cdot \epsilon_{r2} \cdot y + \frac{x_4}{x_5 \cdot u + \cos(x_6 + y)} \\ - \frac{x_7 + x_8 \cdot u \cdot \sin(x_9 \cdot y)}{x_{10} + \epsilon_{r2}} + x_{11} \cdot y \cdot u \end{array} \right]^{-1} \quad (3.3)$$

$$\epsilon_{eff} = x_1 + x_2 \cdot y + \frac{x_3 \cdot y}{x_4 + \epsilon_{r2}} + \frac{x_5 \cdot \epsilon_{r2} \cdot y + x_6 \cdot y^2}{u + x_7 \cdot \epsilon_{r2} + x_8 \cdot y^{x_9}} \quad (3.4)$$

$$u = \frac{w}{b} \text{ ve } y = \frac{a}{b} \quad (3.5)$$

Burada $\eta_0=120\pi \Omega$ hava ortamının öz empedansını ve $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{11})$ analiz modellerinin katsayılarını temsil etmektedir. Tablo 3.2’de asılı mikroşerit hatlar için önerilen analiz modellerine ait katsayılar verilmiştir.

Tablo 3.2. Asılı mikroşerit hatlar için önerilen analiz modellerine ait katsayılar

Katsayılar	Karakteristik Empedans (Z_0)	Efektif Dielektrik Sabiti (ϵ_{eff})
x_1	3.6450	1.0501
x_2	0.9952	0.7993
x_3	0.0533	-1.7814
x_4	-1.2319	1.0508
x_5	0.9952	0.4085
x_6	5.7193	-0.5734
x_7	5.6497	0.0331
x_8	0.9952	1.5063
x_9	1.2505	1.0508
x_{10}	3.3701	---
x_{11}	-0.2066	---

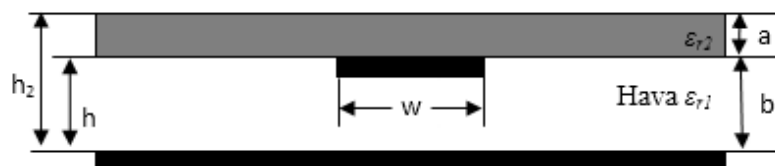
3.4. Ters Mikroşerit Hatlar için Önerilen Analiz Modelleri

Mikroşerit hatların özel bir versiyonu olan ters mikroşerit hatların analizleri birçok araştırmacı tarafından gerçekleştirilmiş olup bu çalışmaları üç grupta toplamak mümkündür [70]. Birinci grup, ters mikroşerit hatların elektromanyetik analizi ve bunların süreksizlikleri ile ilgili analitik çalışmaları içermektedir. İkinci grupta, filtreler, faz kaydırıcılar, karıştırıcılar, güç birleştiriciler, antenler gibi ters mikroşerit hatların uygulamaları ile ilgili çalışmalar içermektedir. Üçüncü grup, ters mikroşerit hatların analiz için CAD modeller ile ilgili birçok çalışmayı içermektedir.

Literatürde ters mikroşerit hatlarının quasi-statik analizi için dört CAD modeli önerilmiştir [71–75, 104]. İlk CAD modeli 1985 yılında Pramanick ve Bhartia [71] önerilmiş ve Tomar ve ark. [70] tarafından üretilen tam doğru teorik verilere göre bu

modelin ortalama yüzde hatası $\pm\% 1$ olarak verilmiştir. Bu model efektif dielektrik sabiti için ters mikroşerit hatların geometrik boyutlarına bağlı ampirik bir ifade içerir ve $\epsilon_{r2} \leq 6$ için geçerlidir. Bu çalışmanın en önemli dezavantajı dielektrik taban malzemesi için dielektrik sabitinin $\epsilon_{r2} \leq 6$ olmasıdır. Çünkü $\epsilon_{r2} \geq 6$ olan dielektrik taban malzemeleri, örneğin alüminyum ($\epsilon_{r2} = 9.6$) ve GaAs ($\epsilon_{r2} = 12.9$) gibi malzemeler pratikte sıklıkla kullanılmaktadır. İkinci quasi-statik CAD modeli ilk CAD modelinin genişletilmiş halidir [72]. Bu model daha geniş bir tasarım parametresi aralığı için geçerlidir ve [70]'de üretilen tam teorik verilere göre bu modelin ortalama yüzde hatası ters mikroşerit hatlar için $\pm\%0.6$ olarak verilmiştir. Bu model, efektif dielektrik sabiti için hatların geometrik boyutlarına bağlı olan bir polinom ifadesi içerir. Üçüncü CAD modeli ilk olarak 1992'de Svacania tarafından bildirilmiştir [73, 74] ve daha sonra Schellenberg, Svacania'nın formüllerini ile teorik verileri elde etmek için eğri uydurma ile birlikte bir KDT kullanarak efektif dielektrik sabiti hesaplamak için iki kapalı form denklem önermiştir [75]. Schellenberg [75] tarafından sunulan ters mikroşerit hatların efektif dielektrik sabitlerini belirlemek amacı ile sunulan modeller $\epsilon_{r2} \leq 12.9$ için geçerli olup ortalama yüzde hataları ters mikroşerit hatlar için $\pm\%1$ olarak verilmiştir. Son model ters mikroşerit hatlar için efektif dielektrik sabiti hesaplamak amacı ile sunulmuş olup bulanık sinir ağı tabanlıdır ve kapalı formda tasarım denklemleri içermezler [104].

Bu tez çalışmasında, ters mikroşerit hatlar karakteristik parametrelerini hesaplamak için GP tarafından geliştirilen doğru ve çok basit analiz modelleri sunulmuştur. Şekil 3.3'de kesit görünümü verilen ters mikroşerit hatlar yapısında w şerit genişliğini, a dielektrik taban kalınlığını ve ϵ_{r2} ise taban malzemesinin bağıl dielektrik sabiti, ϵ_{r1} havanın bağıl dielektrik sabitini ve b ile gösterilen kısım hava tabakası kalınlığını göstermektedir. Burada $h_2 = a + b$ ve $h = b$ olarak da bu tabakaların kalınlıkları verilmiştir.



Şekil 3.3. Ters mikroşerit hatların kesit görünümü

Bu çalışmada ters mikroşerit hatların karakteristik parametrelerini hesaplanması için GP ile belirlenen analiz modelleri oluşturulurken, quasi-statik analiz [72] sonuçlarından elde

edilen 3600 adet veri seti kullanılmıştır. Veri seti oluşturulurken kullanılan tasarım parametreleri: $2 \leq \epsilon_{r2} \leq 20$, $0.5 \leq w/b \leq 10$, $0.1 \leq a/b \leq 1.5$. Bunlara karşılık gelen karakteristik empedans değerleri ise $24 \Omega \leq Z_0 \leq 159 \Omega$ arasındadır.

Ters mikroşerit hatların quasi-statik analizi için GP tarafından üretilen uygun analiz modellerini bulmak için birçok deneme yapılmıştır. Bu denemelerde, popülasyon büyüklüğü, mutasyon oranı, çaprazlama oranı ve çoğalma oranının en uygun değerleri sırasıyla 50, 0.1, 0.85, 0.05 olarak seçilmiştir. Birçok denemeden sonra hata oranları düşük ve matematiksel olarak çok basit analiz modelleri elde edilmiştir. Analiz modellerini kullanılarak belirli bir dielektrik taban malzemesi (ϵ_{r2}) ve fiziksel boyutlar (w/b ve a/b) için ters mikroşerit hatların karakteristik parametrelerini yani karakteristik empedansı (Z_0) ve efektif dielektrik sabiti (ϵ_{eff}) hesaplanır.

Ters mikroşerit hatların karakteristik empedansını ve efektif dielektrik sabitini hesaplamak için iyi sonuçlar veren GP tarafından belirlenen analiz modelleri aşağıda verilmiştir;

$$Z_0 = \eta_0 \cdot \left[x_1 + x_2 \cdot u + x_3 \cdot \sqrt{\epsilon_{r2} \cdot y} - \frac{x_4 + x_5 \cdot y \cdot \sqrt{\epsilon_{r2} \cdot y}}{x_6 + x_7 \cdot u + x_8 \cdot u^2} + x_9 \cdot y \right]^{-1} \quad (3.6)$$

$$\epsilon_{eff} = \left[\frac{x_1 + \frac{x_2 \cdot \epsilon_{r2} + x_3 \cdot \epsilon_{r2} \cdot y + x_4 \cdot y \cdot \epsilon_{r2}^2 + x_5 \cdot \epsilon_{r2} \cdot y^2}{x_6 + u + y}}{+x_7 \cdot y^2 + x_8 \cdot \epsilon_{r2} \cdot y^2} \right] \quad (3.7)$$

$$u = \frac{w}{b} \text{ ve } y = \frac{a}{b} \quad (3.8)$$

Burada $\eta_0=120\pi \Omega$ hava ortamının öz empedansını ve $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_9)$ analiz modellerinin katsayılarını temsil etmektedir. Tablo 3.3'te ters mikroşerit hatlar için önerilen analiz modellerine ait katsayılar verilmiştir.

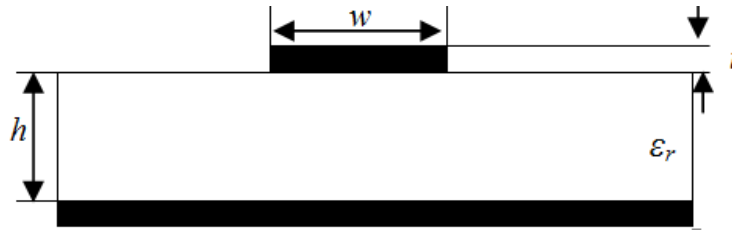
Tablo 3.3. Ters mikroşerit hatlar için önerilen analiz modellerine ait katsayılar

Katsayılar	Karakteristik Empedans (Z_0)	Efektif Dielektrik Sabiti (ϵ_{eff})
x_1	2.0540	1.0068
x_2	1.0569	0.0249
x_3	0.7599	0.4235
x_4	3.4134	-0.0063
x_5	0.7029	-0.0249
x_6	3.7305	0.5449
x_7	3.7305	-0.0152
x_8	1.4177	-0.00301
x_9	-0.3105	---

3.5. Klasik Mikroşerit Hatlar için Önerilen Analiz Modelleri

Mikroşerit yapılarının KDT'ye dayalı analizleri ilk olarak Wheeler tarafından 1960'lı yıllarda yapılmıştır [58, 59]. Yamashita ve Mittra [60] 1968 yılında değişebilir metot (VM: Variational Method) ile mikroşerit hatların analizini yapmışlardır. Mikroşerit yapıların frekans bağımlı analizleri ise, Cory [61] ve Derdinger [62] tarafından yapılarak literatüre sunulmuştur. Mikroşerit hatlar, literatürde birçok araştırmacı tarafından quasi-statik metotlar [58–60, 63–65], tam dalga analiz metotları [61, 62, 66–69] kullanılarak analiz edilmişlerdir. Yıldız ve Ark. [103] tarafından klasik mikroşerit hatların karakteristik parametrelerini hesaplamak için kapalı form tasarım denklemleri içermeyen bulanık sinir ağıları tabanlı modeller önerilmiştir.

Bu tez çalışmasında klasik mikroşerit hatların karakteristik parametrelerini hesaplayan doğru ve çok basit bir yapıya sahip kapalı formda matematiksel ifadelerden oluşan analiz modelleri sunulmuştur. Klasik mikroşerit hatların analiz modellerinin geliştirilmesinde GP kullanılmıştır. Klasik mikroşerit hatların geometrisi Şekil 3.4'te yer almaktadır. Bu şekilde, w merkez iletken genişliğini, h dielektrik taban kalınlığını, t iletken kalınlıklarını ve ϵ_r ise taban malzemesinin bağıl dielektrik sabitini göstermektedir.



Şekil 3.4. Klasik mikroşerit hatların kesit görünümü

Klasik mikroşerit hatlar için sunulan analiz modellerin oluşturulması sırasında kullanılan veri setleri Yamashita ve Mittra [60] tarafından literatüre sunulan VM ile türetilmiştir. Klasik mikroşerit hatlar için sunulan modeller tıpkı VM metot gibi metal kalınlıklarının etkisini inceleyebilecek bir yapıya sahiptirler. Klasik mikroşerit hatların karakteristik parametrelerin hesaplanması için analiz modelleri oluşturulurken, VM [60] sonuçlarından elde edilen 1232 adet veri seti kullanılmıştır. Veri seti oluşturulurken kullanılan tasarım parametreleri $1 \leq \epsilon_r \leq 51$, $0.01 \leq w/h \leq 10$, $0 \leq t/h \leq 0.1$. Bunlara karşılık gelen karakteristik empedans değerleri ise $4.5 \Omega \leq Z_0 \leq 400 \Omega$ arasındadır.

Klasik mikroşerit hatların quasi-statik analizi için GP tarafından üretilen uygun analiz modellerini bulmak için birçok deneme yapılmıştır. Bu denemelerde, popülasyon büyüklüğü, mutasyon oranı, çaprazlama oranı ve çoğalma oranının en uygun değerleri sırasıyla 200, 0.1, 0.8 0.1 olarak seçilmiştir. Birçok denemeden sonra hata oranları düşük ve matematiksel olarak çok basit analiz modelleri elde edilmiştir. Analiz modellerini kullanarak belirli bir dielektrik taban malzemesi (ϵ_r) ve fiziksel boyutlar (w/h , t/h) için klasik mikroşerit hatların karakteristik parametrelerini yani karakteristik empedansı (Z_0) ve efektif dielektrik sabiti (ϵ_{eff}) hesaplanır.

Klasik mikroşerit hatların karakteristik empedansını ve efektif dielektrik sabitini hesaplamak için iyi sonuçlar veren GP tarafından belirlenen analiz modelleri aşağıda verilmiştir;

$$Z_0 = \eta_0 \cdot \left[\frac{x_1 \cdot \sqrt{\left(\frac{t}{h} + x_2 \cdot \frac{w}{h} + x_3 \cdot \frac{\epsilon_r \cdot t}{h} \right)} + \frac{x_4 + x_5 \cdot \epsilon_r + x_6 \cdot \epsilon_r \cdot \left(\frac{w}{h} \right)^{0.5}}{\epsilon_r^{0.5}} \right]^{-1}, \quad 0.01 \leq \frac{w}{h} \leq 0.5 \quad (3.9)$$

$$Z_0 = \eta_0 \cdot \left[\begin{pmatrix} x_1 + x_2 \cdot \epsilon_r + x_3 \cdot \frac{w}{h} + x_4 \cdot \frac{\epsilon_r \cdot t}{h} \\ + x_5 \cdot \frac{\epsilon_r \cdot w}{h} + x_6 \cdot \epsilon_r \cdot \left(\frac{w}{h} \right)^{0.5} \end{pmatrix} \cdot \epsilon_r^{-0.5} \right]^{-1}, 0.5 < \frac{w}{h} \leq 10 \quad (3.10)$$

$$\epsilon_{eff} = \left[\begin{pmatrix} x_1 + x_2 \cdot \epsilon_r + x_3 \cdot \frac{w}{h} + x_4 \cdot \epsilon_r \cdot \left(x_5 + \frac{w}{h} + \frac{t}{h} \right)^{x_6} \\ + x_7 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{w}{h} + x_8 \cdot \left(x_9 + \frac{w}{h} + \frac{t}{h} \right)^{x_{10}} \end{pmatrix} \right] \quad (3.11)$$

Burada $\eta_0 = 120\pi \Omega$ hava ortamının öz empedansını ve $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{10})$ analiz modellerin katsayılarını temsil etmektedir. Tablo 3.4’de klasik mikroşerit hatlar için önerilen analiz modellerine ait katsayılar verilmiştir.

Tablo 3.4. Klasik mikroşerit hatlar için önerilen analiz modellerine ait katsayılar

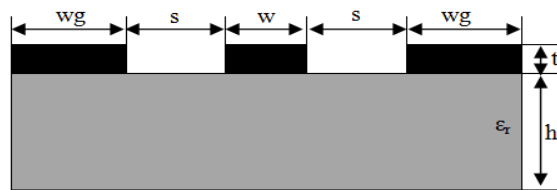
Katsayılar	Karakteristik Empedans (Z_0)		Efektif Dielektrik Sabiti (ϵ_{eff})
	$0.01 \leq w/h \leq 0.5$	$0.5 < w/h \leq 10$	
x_1	1.0055	0.5680	0.6752
x_2	0.4523	0.8806	0.3291
x_3	0.7463	0.0671	0.0189
x_4	0.2142	1.5504	0.2627
x_5	0.5461	0.9225	0.6076
x_6	1.4626	0.4906	0.4294
x_7	---	---	-0.0221
x_8	---	---	-0.2471
x_9	---	---	0.6076
x_{10}	---	---	0.4294

3.6. Sonlu Genişlikte Toprak Düzlemine Sahip EDDK'lar için Önerilen Analiz Modelleri

Sonsuz genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'nın quasi-statik analizi ilk defa 1969 yılında Wen [6] tarafından KDT kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların quasi-statik analizleri ise Heinrich [80], Fuste ve ark. [81] tarafından literatüre sunulmuştur. Heinrich dağılmış elemanlar yaklaşımı kullanarak EDDK'lar için yaklaşık kapalı formda ifadeler türetirken, Fuste ve ark. ise 2012 yılında sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların quasi-statik analizlerini KDT kullanarak gerçekleştirmiştir. Literatüre sunulan bu analiz modelleri oldukça uzun matematiksel ifadeler içermektedir.

Bu tez çalışmasında sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların karakteristik parametrelerini hesaplayan doğru ve çok basit bir yapıya sahip analiz modelleri sunulmuştur. Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların analiz modellerinin geliştirilmesinde GP kullanılmıştır.

Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların kesit görünümü Şekil 3.5'te yer almaktadır. Bu şekilde, w merkez iletken genişliğini, s yarık genişliklerini, w_g toprak düzlem genişliklerini, t iletken kalınlığını, h dielektrik taban malzemesinin kalınlığını ve ϵ_r ise bağıl dielektrik sabitini göstermektedir. Bu çalışmada $t = 0 \mu m$ olarak alınarak iletken kalınlığı ihmal edilmiştir. Ayrıca iletken tabakanın bakır olduğu varsayılmıştır.



Şekil 3.5. Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların kesit görünümü

Bu çalışmada sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların karakteristik parametrelerinin hesaplanması için analiz modelleri oluşturulurken kullanılan veri setleri Fuste ve Ark. [81] tarafından literatüre sunulan KDT'ye dayalı bu yapıların quasi-statik analizlerine yönelik çalışmasından türetilmiştir. Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların quasi-statik analizlerine yönelik çalışmada iletken kalınlığı ihmal edilerek

($t = 0 \mu\text{m}$), 9712 adet veri seti elde edilmiştir. Veri seti oluşturulurken kullanılan tasarım parametreleri $0.1 \leq s/h \leq 0.7$, $0.1 \leq w/h \leq 0.7$, $2 \leq \epsilon_r \leq 34.7$, $wg \geq s$ ve $wg \geq w$ olmak üzere $0.1 \leq wg/h \leq 13$ ve $100 \mu\text{m} \leq h \leq 1300 \mu\text{m}$ alınmıştır. Bunlara karşılık gelen karakteristik empedans değerleri $21 \Omega \leq Z_0 \leq 209 \Omega$.

Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların quasi-statik analizi için GP tarafından üretilen uygun analiz modellerini bulmak için birçok deneme yapılmıştır. Bu denemelerde, popülasyon büyüklüğü, mutasyon oranı, çaprazlama oranı ve çoğalma oranının en uygun değerleri sırasıyla 100, 0.1, 0.85, 0.05 olarak seçilmiştir. Birçok denemeden sonra hata oranları düşük ve matematiksel olarak çok basit analiz modelleri elde edilmiştir. Analiz modellerini kullanarak belirli bir dielektrik taban malzemesi (ϵ_r) ve fiziksel boyutlar (w/h , wg/h) için sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların karakteristik parametreleri hesaplanır.

Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların karakteristik empedansını ve efektif dielektrik sabitini hesaplamak için iyi sonuçlar veren GP tarafından belirlenen analiz modelleri aşağıda verilmiştir;

$$Z_0 = \eta_0 \cdot \left[\frac{x_1 + x_2 \cdot \sqrt{\epsilon_r}}{+x_3 \cdot \sqrt{x_4 \cdot \frac{w}{h} + x_5 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{h}{w} + \epsilon_r \cdot \frac{w}{s} + x_6 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{w}{wg} - \frac{s}{h}}} \right]^{-1} \quad (3.12)$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \left[\frac{x_1 + x_2 \cdot \epsilon_r + x_3 \cdot \frac{wg}{h} + \frac{x_4 \cdot \frac{s}{h} + x_5 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{s}{h} \cdot \frac{w}{h}}{x_6 + \frac{wg}{h}}}{+x_7 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{s}{h} + x_8 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{s}{h} \cdot \frac{w}{h}} \right] \quad (3.13)$$

Burada $\eta_0 = 120\pi \Omega$ hava ortamının öz empedansını ve ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_9$) analiz modellerinin katsayılarını temsil etmektedir. Tablo 3.5'te sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'lar için önerilen analiz modellerine ait katsayılar verilmiştir.

Tablo 3.5. Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'lar için önerilen analiz modellerine ait katsayılar

Katsayılar	Karakteristik Empedans (Z_0)	Efektif Dielektrik Sabiti (ϵ_{eff})
x_1	0.6504	0.4862
x_2	0.8570	0.5052
x_3	0.8645	0.0081
x_4	3.5176	0.0596
x_5	-0.0094	0.0596
x_6	-0.2410	0.2214
x_7	---	-0.0199
x_8	---	-0.1225

4. BÖLÜM

MİKRODALGA İLETİM HATLARI İÇİN ÖNERİLEN SENTEZ MODELLERİ

4.1. Giriş

Bu tez çalışması kapsamında bu bölümde MİH'lerden, dielektrik taban destekli EDDK'ların, asılı mikroşerit hatların, ters mikroşerit hatların, klasik mikroşerit hatların, sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların, iletken destekli EDŞH'lerin, sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'lerin geometrik boyutlarını hesaplayan sentez modelleri sunulmuştur.

4.2. Dielektrik Taban Destekli EDDK'lar için Önerilen Sentez Modelleri

Dielektrik taban destekli EDDK'lar literatürde yaygın olarak kullanılan çok katmanlı EDDK'lardan biridir. Dielektrik taban destekli EDDK'ların sentez modellerine ilişkin literatürde Kaya ve ark. [122] tarafından 2010 yılında önerilen CAD modeller içeren çalışma bulunmaktadır. Bir diğer çalışmada ise Kaya ve ark. [123] tarafından 2013 yılında sunulan bulanık sinir ağları tabanlı çalışmadır. Literatürde önerilen CAD modelleri [122] uzun matematiksel ifadeler içermektedir. Diğer çalışmada [123] ise kapalı form tasarım denklemleri içermeyen kapalı kutu modelleridir.

Bu tez çalışmasında dielektrik taban destekli EDDK'ların geometrik boyutlarını hesaplayan doğru ve çok basit bir yapıya sahip sentez modelleri sunulmuştur. Dielektrik taban destekli EDDK'ların sentez modellerinin geliştirilmesinde GP kullanılmıştır. Şekil 3.1'de dielektrik taban destekli EDDK'ların kesit görünümü verilmiştir.

Dielektrik taban destekli EDDK'ların geometrik boyutlarının hesaplanması için GP dayalı sentez modelleri oluşturulurken, KDT [88] sonuçlarından elde edilen 8000 adet veri seti kullanılmıştır. Veri seti oluşturulurken kullanılan tasarım parametreleri: $2 \leq \epsilon_{r1} \leq 10$, $10 \leq \epsilon_{r2} \leq 20$, $0.1 \leq s/h \leq 4$, $0.1 \leq w/h \leq 1$, $20 \mu m \leq h \leq 2000 \mu m$. Bunlara karşılık gelen karakteristik empedans değerleri ise $19 \Omega \leq Z_0 \leq 117 \Omega$ arasındadır.

Dielektrik taban destekli EDDK'ların geometrik boyutlarını belirleyen GP tarafından üretilen uygun sentez modellerini bulmak için birçok deneme yapılmıştır. Bu denemelerde, popülasyon büyüklüğü, mutasyon oranı, çaprazlama oranı ve çoğalma oranının en uygun değerleri sırasıyla 150, 0.1, 0.8 0.1 olarak seçilmiştir. Birçok denemeden sonra hata oranları düşük ve matematiksel olarak çok basit sentez modelleri elde edilmiştir.

Sentez modelleri kullanılarak, arzu edilen karakteristik empedansa sahip dielektrik taban destekli EDDK'nın tasarımı için ilk adım uygun dielektrik taban malzemelerinin seçilmesidir (ϵ_{r1} , ϵ_{r2} , h). Uygun dielektrik taban malzemeleri seçildikten sonra yarık ve şerit genişlikleri hesaplanabilir. Bu çalışmada bu geometrik boyutların hesaplanması için iki sentez modeli önerilmiştir. Birinci sentez modeli ile dielektrik taban malzemeleri (ϵ_{r1} , ϵ_{r2} , h) seçildikten sonra, verilen bir yarık genişliğine (w) karşılık arzu edilen karakteristik empedansa (Z_0) sahip iletim hattı tasarımı için gerekli olan şerit genişliği (s) hesaplanmaktadır. İkinci sentez modeli ile de, dielektrik taban malzemeleri (ϵ_{r1} , ϵ_{r2} , h) seçildikten sonra, verilen bir şerit genişliğine (s) karşılık arzu edilen karakteristik empedansa (Z_0) sahip iletim hattı tasarımı için gerekli olan yarık genişliği (w) hesaplanmaktadır.

Dielektrik taban destekli EDDK'ların geometrik boyutlarını (şerit genişliği ve yarık genişliği) hesaplayan iyi sonuçlar veren GP tarafından belirlenen sentez modelleri aşağıda verilmiştir;

$$s = h \cdot x_1 \cdot \left[\frac{x_2 \cdot \epsilon_{r1} \cdot zn + \frac{[x_3 \cdot \epsilon_{r2}^2 \cdot zn^{x_4} + x_5 \cdot \tan(x_6 \cdot zn^2)] \cdot h}{w}}{x_7} + x_8 \cdot a \cdot \tan\left(\frac{x_9 \cdot zn \cdot h}{w} + x_{10} \cdot zn + x_{11} \cdot \epsilon_{r2}^2 \cdot zn^{x_{12}}\right)^{x_{13}} \right]^{-1} \quad (4.1)$$

$$w = h \cdot \left[\begin{aligned} &x_1 \cdot \epsilon_{r2} \cdot zn^{x_2} \left(\frac{s}{h} \right)^{x_3} \cdot \exp \left(x_4 \cdot zn + x_5 \cdot \epsilon_{r1} \cdot \frac{s}{h} \cdot zn^{x_6} \right) \\ &+ x_7 \cdot \epsilon_{r2} + x_8 \cdot zn + x_9 \cdot \epsilon_{r2} \cdot \frac{s}{h} \cdot zn \cdot \left(\frac{s}{h} \right)^{x_{10}} \end{aligned} \right] \quad (4.2)$$

$$zn = \frac{Z_0}{\eta_0} \quad (4.3)$$

Burada $\eta_0 = 120\pi \, \Omega$ hava ortamının öz empedansını ve $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{13})$ sentez modellerinin katsayılarını temsil etmektedir. Tablo 4.1’de dielektrik taban destekli EDDK’lar için önerilen sentez modellerine ait katsayılar verilmiştir.

Tablo 4.1. Dielektrik taban destekli EDDK’lar için önerilen sentez modellerine ait katsayılar

Katsayılar	Şerit genişliği (s)	Yarık genişliği (w)
x ₁	-2.9514	3.8425
x ₂	-0.6319	2.1397
x ₃	-18.5495	0.5
x ₄	3.67053	1.1439
x ₅	-1.9681	0.6233
x ₆	14.4683	1.8087
x ₇	0.8118	-0.0012
x ₈	1.7379	-1.5757
x ₉	1.3102	0.0155
x ₁₀	-1.4422	0.5
x ₁₁	2.3804	---
x ₁₂	3.2694	---
x ₁₃	1.4247	---

4.3. Asılı Mikroşerit Hatlar için Önerilen Sentez Modeli

Literatürde, asılı mikroşerit hatların tasarımı için Bhartia ve Ark. [71, 72] tarafından önerilen iki çalışma bulunmaktadır. İlk çalışma [71], asılı mikroşerit hatların şerit genişliklerini doğrudan hesaplamak için çok uzun kapalı form tasarım denklemleri içerir. İlk çalışmadaki tasarım parametreleri $1 \leq w/b \leq 8$, $0.2 \leq a/b \leq 1$ ve $\epsilon_{r2} \leq 6$ aralığında kalır. Bu çalışmanın en önemli dezavantajı dielektrik taban malzemesi için $\epsilon_{r2} \leq 6$ bağlı dielektrik sabitinin kısıtlanmasıdır. Çünkü $\epsilon_{r2} \geq 6$ olan dielektrik taban malzemeleri, örneğin alüminyum ($\epsilon_{r2} = 9.6$) ve GaAs ($\epsilon_{r2} = 12.9$) gibi pratikte sıklıkla kullanılmaktadır.

İkinci çalışmada, Tomar ve Bhartia tarafından asılı mikroşerit hatlar için analitik yöntemin tersine çevrilmesine dayanan bir tasarım yöntemi önerilmiştir [72]. Bu yöntemin dezavantajları ise oldukça uzun matematiksel ifadeler içerdiğinden basit değildir ve istenen karakteristik empedansa sahip olacak asılı mikroşerit hatların şerit genişliğini belirlemek için çok fazla hesaplama çabası gerektirir. (Ek-1)

Bu tez çalışmasında, arzu edilen karakteristik empedansa sahip olması için asılı mikroşerit hatların geometrik boyutlarını belirleyen GP tarafından geliştirilen doğru ve çok basit sentez modeli sunulmuştur. Asılı mikroşerit hatların kesit görünümü Şekil 3.2’de verilmiştir.

Bu çalışmada asılı mikroşerit hatların geometrik boyutlarını hesaplamak için GP dayalı sentez modeli oluşturulurken, quasi-statik analiz [72] sonuçlarından elde edilen 3600 adet veri seti kullanılmıştır. Veri seti oluşturulurken kullanılan tasarım parametreleri: $2 \leq \epsilon_{r2} \leq 20$, $0.5 \leq w/b \leq 10$, $0.1 \leq a/b \leq 1.5$. Bunlara karşılık gelen karakteristik empedans değerleri ise $28\Omega \leq Z_0 \leq 185\Omega$ arasındadır.

Asılı mikroşerit hatların geometrik boyutlarını belirleyen GP tarafından üretilen uygun sentez modelini bulmak için birçok deneme yapılmıştır. Bu denemelerde, popülasyon büyüklüğü, mutasyon oranı, çaprazlama oranı ve çoğalma oranının en uygun değerleri sırasıyla 50, 0.1, 0.85, 0.05 olarak seçilmiştir. Birçok denemeden sonra hata oranı düşük ve matematiksel olarak çok basit sentez modeli elde edilmiştir.

Sentez modeli kullanılarak, arzu edilen karakteristik empedansa sahip asılı mikroşerit hatların tasarımı için ilk adım uygun dielektrik taban malzemesinin seçilmesidir (ϵ_{r2} , a , b). Dielektrik taban malzemesi (ϵ_{r2} , a , b) seçildikten sonra arzu edilen karakteristik empedansa (Z_0) sahip iletim hattı tasarımı için gerekli olan şerit genişliği (w) hesaplanmaktadır.

Asılı mikroşerit hatların geometrik boyutlarını hesaplamak için iyi sonuçlar veren GP tarafından belirlenen sentez modeli aşağıda verilmiştir;

$$w = b \cdot \left[\begin{array}{l} x_1 \cdot y \cdot zn \cdot \log(\epsilon_{r2}) + \frac{x_2 + x_3 \cdot y}{zn} + x_4 + x_5 \cdot y \cdot zn \\ + x_6 \cdot y \cdot zn \cdot \sin(x_7 \cdot y \cdot \log(\epsilon_{r2})) + x_8 \cdot \log(\epsilon_{r2}) + x_9 \cdot y \cdot \log(\epsilon_{r2}) \end{array} \right] \quad (4.4)$$

$$y = \frac{a}{b} \text{ ve } z_n = \frac{Z_0}{\eta_0} \quad (4.5)$$

Burada $\eta_0 = 120\pi \, \Omega$ hava ortamının öz empedansını ve $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_9)$ sentez modelin katsayılarını temsil etmektedir. Tablo 4.2’de asılı mikroşerit hatlar için önerilen sentez modeline ait katsayılar verilmiştir.

Tablo 4.2. Asılı mikroşerit hatlar için önerilen sentez modeline ait katsayılar

Katsayılar	Şerit genişliği (w)
x_1	11.2775
x_2	0.9222
x_3	0.5875
x_4	-1.8196
x_5	-1.7949
x_6	-0.9646
x_7	2.0827
x_8	-0.4984
x_9	-4.7832

4.4. Ters Mikroşerit Hatlar için Önerilen Sentez Modeli

Literatürde, ters mikroşerit hatların tasarımı için Bhartia ve Ark. [71, 72] tarafından önerilen iki çalışma bulunmaktadır. İlk çalışma [71], ters mikroşerit hatların şerit genişliklerini doğrudan hesaplamak için çok uzun kapalı form tasarım denklemleri içerir. İlk çalışmadaki tasarım parametreleri $1 \leq w / b \leq 8$, $0.2 \leq a / b \leq 1$ ve $\epsilon_{r2} \leq 6$ aralığında kalır. Bu çalışmanın en önemli dezavantajı dielektrik taban malzemesi için $\epsilon_{r2} \leq 6$ bağlı dielektrik sabitinin kısıtlanmasıdır, çünkü $\epsilon_{r2} \geq 6$ olan dielektrik taban malzemeleri, örneğin alüminyum ($\epsilon_{r2} = 9.6$) ve GaAs ($\epsilon_{r2} = 12.9$) gibi pratikte sıklıkla kullanılmaktadır.

İkinci çalışmada, Tomar ve Bhartia tarafından ters mikroşerit hatlar için analitik yöntemin tersine çevrilmesine dayanan bir tasarım yöntemi önerilmiştir [72]. Bu yöntemin dezavantajları ise oldukça uzun matematiksel ifadeler içerdiğinden basit değildir ve istenen karakteristik empedansa sahip olan ters mikroşerit hatların şerit genişliğini belirlemek için çok fazla hesaplama çabası gerektirir. (Ek-1)

Bu tez çalışmasında, ters mikroşerit hatların geometrik boyutlarını hesaplamak için GP tarafından geliştirilen doğru ve çok basit sentez modeli sunulmuştur. Ters mikroşerit hatların kesit görünümü Şekil 3.3’te verilmiştir.

Bu çalışmada ters mikroşerit hatların geometrik boyutlarını hesaplamak için GP dayalı sentez modeli oluşturulurken, quasi-statik analiz [72] sonuçlarından elde edilen 3600 adet veri seti kullanılmıştır. Veri seti oluşturulurken kullanılan tasarım parametreleri: $2 \leq \epsilon_{r2} \leq 20$, $0.5 \leq w/b \leq 10$, $0.1 \leq a/b \leq 1.5$. Bunlara karşılık gelen karakteristik empedans değerleri ise $28\Omega \leq Z_0 \leq 185\Omega$ arasındadır.

Ters mikroşerit hatların geometrik boyutlarını belirleyen GP tarafından üretilen uygun sentez modellerini bulmak için birçok deneme yapılmıştır. Bu denemelerde, popülasyon büyüklüğü, mutasyon oranı, çaprazlama oranı ve çoğalma oranının en uygun değerleri sırasıyla 50, 0.1, 0.85, 0.05 olarak seçilmiştir. Birçok denemeden sonra hata oranı düşük ve matematiksel olarak çok basit sentez modeli elde edilmiştir.

Sentez modeli kullanılarak, arzu edilen karakteristik empedansa sahip ters mikroşerit hatların tasarımı için ilk adım uygun dielektrik taban malzemesinin seçilmesidir (ϵ_{r2} , a , b). Dielektrik taban malzemesi (ϵ_{r2} , a , b) seçildikten sonra arzu edilen karakteristik empedansa (Z_0) sahip iletim hattı tasarımı için gerekli olan şerit genişliği (w) hesaplanmaktadır.

Ters mikroşerit hatların geometrik boyutlarını hesaplamak için iyi sonuçlar veren GP tarafından belirlenen sentez modeli aşağıda verilmiştir;

$$w = b \cdot \left[\begin{array}{l} x_1 \cdot zn + x_2 \cdot y + x_3 \cdot \epsilon_{r2} + \frac{x_4}{zn} \\ + x_5 \cdot \epsilon_{r2} \cdot y \cdot \sin^2(zn) + x_6 + x_7 \cdot \sqrt{\epsilon_{r2} \cdot y} \end{array} \right] \quad (4.6)$$

$$y = \frac{a}{b} \text{ ve } zn = \frac{Z_0}{\eta_0} \quad (4.7)$$

Burada $\eta_0 = 120\pi \Omega$ hava ortamının öz empedansını ve ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_7$) sentez modelin katsayılarını temsil etmektedir. Tablo 4.3'de ters mikroşerit hatlar için önerilen sentez modeline ait katsayılar verilmiştir.

Tablo 4.3. Ters mikroşerit hatlar için önerilen sentez modeline ait katsayılar

Katsayılar	Şerit genişliği (w)
X ₁	1.9097
X ₂	0.3693
X ₃	0.0053
X ₄	0.9617
X ₅	1.0094
X ₆	-2.2597
X ₇	-0.7806

4.5. Klasik Mikroşerit Hatlar için Önerilen Sentez Modeli

Mikroşerit hat yapıların istenilen karakteristik empedansa sahip olacak şekilde geometrik boyutlarının belirlenmesine yönelik sentez çalışması literatürde bulunmaktadır [64]. Bu çalışma matematiksel olarak çok basit değildir.

Bu tez çalışmasında klasik mikroşerit hatların karakteristik parametrelerini hesaplayan doğru ve çok basit bir yapıya sahip sentez modeli sunulmuştur. Klasik mikroşerit hatların sentez modelin geliştirilmesinde GP kullanılmıştır. Klasik mikroşerit hatların kesit görünümü Şekil 3.4'te yer almaktadır.

Bu çalışmada, mikroşerit hatların geometrik boyutları GP ile oluşturulan sentez modeli ile hesaplanmıştır. Klasik mikroşerit hatların tasarımı için sunulan sentez modelin GP ile oluşturulması sırasında kullanılan veri setleri Yamashita ve Mittra [60] tarafından literatüre sunulan VM ile türetilmiştir. Klasik mikroşerit hatlar için sunulan model tıpkı VM metot gibi metal kalınlıklarının etkisini inceleyebilecek bir yapıya sahiptirler. Klasik mikroşerit hatların geometrik boyutların hesaplanması için sentez modeli oluşturulurken, VM [60] sonuçlarından elde edilen 1232 adet veri seti kullanılmıştır. Veri seti oluşturulurken kullanılan tasarım parametreleri $1 \leq \epsilon_r \leq 51$, $0.01 \leq w/h \leq 10$, $0 \leq t/h \leq 0.1$. Bunlara karşılık gelen karakteristik empedans değerleri ise $4.5 \Omega \leq Z_0 \leq 400\Omega$ arasındadır.

Klasik mikroşerit hatların tasarımı için GP tarafından üretilen uygun sentez modellini bulmak için birçok deneme yapılmıştır. Bu denemelerde, popülasyon büyüklüğü, mutasyon oranı, çaprazlama oranı ve çoğalma oranının en uygun değerleri sırasıyla 200, 0.1, 0.8 0.1 olarak seçilmiştir. Birçok denemeden sonra hata oranı düşük ve matematiksel olarak çok basit sentez modeli elde edilmiştir.

Sentez modeli kullanılarak, arzu edilen karakteristik empedansa sahip klasik mikroşerit hatların tasarımı için ilk adım uygun dielektrik taban malzemesinin seçilmesidir (ϵ_r , h). Dielektrik taban malzemesi (ϵ_r , h) ve şerit kalınlığı (t) seçildikten sonra arzu edilen karakteristik empedansa (Z_0) sahip iletim hattı tasarımı için gerekli olan şerit genişliği (w) hesaplanmaktadır.

Klasik mikroşerit hatların geometrik boyutlarını hesaplamak için iyi sonuçlar veren GP tarafından belirlenen sentez modeli aşağıda verilmiştir;

$$w = h \cdot \left[\left(\frac{Z_0}{\eta_0} \right)^{x_1} + x_2 \cdot \frac{Z_0}{\eta_0} (x_3 + \epsilon_r)^{0.5} + x_4 \cdot \epsilon_r \cdot \left(\frac{Z_0}{\eta_0} \right)^2 \cdot \exp \left[x_5 \cdot \frac{t}{h} + x_6 \cdot \tan \left(\frac{Z_0}{\eta_0} \right) + x_7 \cdot \epsilon_r \cdot \left(\frac{Z_0}{\eta_0} \right)^2 + x_8 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{t}{h} \cdot \tan \left(\frac{Z_0}{\eta_0} \right)^2 + \frac{x_9 \cdot \tan \left(\frac{Z_0}{\eta_0} \right)}{x_{10} + \epsilon_r} \right] \right]^{-1} \quad (4.8)$$

Burada $\eta_0 = 120\pi \Omega$ hava ortamının öz empedansını ve ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_{10}$) sentez modelin katsayılarını temsil etmektedir. Tablo 4.4’de klasik mikroşerit hatlar için önerilen sentez modeline ait katsayılar verilmiştir.

Tablo 4.4. Klasik mikroşerit hatlar için önerilen sentez modeline ait katsayılar

Katsayılar	Şerit genişliği (w)
x_1	1.9253
x_2	0.9931
x_3	0.0231
x_4	1.9915
x_5	0.9263
x_6	0.5377
x_7	2.0736
x_8	9.5081
x_9	2.4845
x_{10}	1.3145

4.6. Sonlu Genişlikte Toprak Düzlemine Sahip EDDK'lar için Önerilen Sentez Modelleri

Sonsuz genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'nın sentez modelleri ilk defa 2016 yılında Yıldız ve Kişioğlu [147] tarafından literatüre sunulmuştur. Bu tez çalışmada, sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların sentez modelleri GP kullanılarak elde edilmiştir. Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların kesit görünümü Şekil 3.5'te yer almaktadır.

Bu tez çalışmasında sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların geometrik boyutlarının hesaplanması için sentez modellerinin oluşturulmasında kullanılan veri setleri Fuste ve Ark. [81] tarafından 2012 yılında literatüre sunulan KDT'ye dayalı bu yapıların quasi-statik analizlerine yönelik çalışmasından elde edilmiştir. Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların quasi-statik analizlerine yönelik çalışmada iletken kalınlığı ihmal edilerek ($t = 0 \mu m$), 9712 adet veri seti oluşturulmuştur. Veri setleri oluşturulurken kullanılan tasarım parametreleri $0.1 \leq s/h \leq 0.7$, $0.1 \leq w/h \leq 0.7$, $2 \leq \epsilon_r \leq 34.7$, $wg \geq s$ ve $wg \geq w$ olmak üzere $0.1 \leq wg/h \leq 13$ ve $100 \mu m \leq h \leq 1300 \mu m$ alınmıştır. Bunlara karşılık gelen karakteristik empedans değerleri ise $21 \Omega \leq Z_0 \leq 209 \Omega$ arasındadır.

Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların tasarımı için GP tarafından üretilen uygun sentez modellerini bulmak için birçok deneme yapılmıştır. Bu denemelerde, popülasyon büyüklüğü, mutasyon oranı, çaprazlama oranı ve çoğalma oranının en uygun değerleri sırasıyla 100, 0.1, 0.85, 0.05 olarak seçilmiştir. Birçok denemeden sonra hata oranları düşük ve matematiksel olarak çok basit sentez modelleri elde edilmiştir.

Bu çalışmada sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'lar için sunulan birinci sentez modeli; dielektrik taban malzemesi (ϵ_r, h) seçildikten sonra istenilen karakteristik empedansı (Z_0) elde etmek için belirli şerit genişliğine (w) ve toprak düzlem genişliğine (wg) karşılık, gerekli olan yarık genişliğini (s) hesaplamaktadır. İkinci sentez modeli ise; dielektrik taban malzemesi (ϵ_r, h) seçildikten sonra istenilen karakteristik empedansı (Z_0) elde etmek için belirli yarık genişliğine (s) ve toprak düzlem genişliğine (wg) karşılık, gerekli olan şerit genişliğini (w) hesaplamaktadır.

Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların geometrik boyutlarını hesaplamak için iyi sonuçlar veren GP tarafından belirlenen sentez modelleri aşağıda verilmiştir;

$$s = h \cdot \left[x_1 \cdot \tan^{-1} \left(\left(\frac{wg}{h} \right)^{x_2} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{x_3 \cdot \left(\frac{w}{h} \right) \cdot zn^3}{+x_4 \cdot \left(\frac{w}{h} \right) \cdot \varepsilon_r^2 \cdot zn^{x_5}} \right) \right] \quad (4.9)$$

$$w = h \cdot \left[\frac{x_1 \cdot \left(\frac{s}{h} \right)}{x_2 \cdot zn^2 + \varepsilon_r \cdot zn^2 + x_3} + \frac{x_4 \cdot \tanh^{-1} \left(\frac{x_5 \cdot \left(\frac{s}{h} \right)^2}{x_6 \cdot zn^2 + \varepsilon_r \cdot zn^2 + x_7} \right)}{\varepsilon_r \cdot \left(\frac{wg}{h} \right) \cdot zn^2} + x_8 \cdot \tanh \left(\frac{s}{h} \right) \right] \quad (4.10)$$

Burada;

$$zn = \frac{Z_0}{\eta_0} \quad (4.11)$$

Burada $\eta_0=120\pi \Omega$ hava ortamının öz empedansını ve $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_8)$ sentez modellerin katsayılarını temsil etmektedir. Tablo 4.5'te sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'lar için önerilen sentez modellerine ait katsayılar verilmiştir

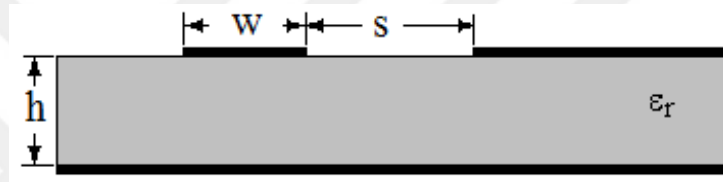
Tablo 4.5. Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'lar için önerilen sentez modellerine ait katsayılar

Katsayılar	Yarık genişliği (s)	Şerit genişliği (w)
x_1	0.0291	0.3784
x_2	4.000	1.1485
x_3	14.2968	-0.0590
x_4	12.5161	0.9015
x_5	4.1495	0.0198
x_6	---	1.1485
x_7	---	-0.0590
x_8	---	-0.4128

4.7. İletken Destekli Mikro EDŞH'ler için Önerilen Sentez Modelleri

İletken destekli mikro EDŞH'ler geometrik boyutlarını hesaplamak için sentez modelleri literatürde yer almaktadır [97, 101, 113, 114]. Literatürdeki [97, 101, 113] bu çalışmalar matematiksel olarak oldukça uzun ifadeler içermektedir. Kaya ve ark. [114] tarafından önerilen modeller bulanık sinir ağları tabanlı bir çalışma olup kapalı formda tasarım denklemleri içermemektedir.

İletken destekli mikro EDŞH'lerin fiziksel yapısı Şekil 4.1'de yer almaktadır. Bu şekilde, s yarık genişliğini, w şerit genişliklerini, h dielektrik taban kalınlığını, ϵ_r ise taban malzemesinin bağıl dielektrik sabitini göstermektedir.



Şekil 4.1. İletken destekli mikro EDŞH'lerin geometrisi

Bu tez çalışmasında, iletken destekli mikro EDŞH'lerin arzu edilen karakteristik empedansa sahip olması için gerekli olan boyutları hesaplayan GP ve YAK algoritması kullanılarak gerçekleştirilen sentez modelleri önerilmiştir. Sentez modellerinin oluşturulması için Tan ve Uysal [99] tarafından 1999 yılında literatüre sunulan KDT ye dayalı matematiksel ifadeler kullanılarak 864 adet veri seti oluşturulmuştur. Veri seti oluşturulurken kullanılan tasarım parametreleri: $2 \leq \epsilon_r \leq 50$, $0.05 \leq s/h \leq 1$, $0.1 \leq w/h \leq 1$ ve $50 \mu m \leq h \leq 3000 \mu m$ 'dir. Bunlara karşılık gelen karakteristik empedans değerleri $25 \Omega \leq Z_0 \leq 212 \Omega$ arasındadır. Burada $\eta_0 = 120\pi \Omega$ hava ortamının öz empedansını temsil etmektedir.

GP ve YAK algoritması ile elde edilen çok basit ve doğru sentez modelleri sunulmuştur. Eşitlik 4.12 YAK algoritmasıyla Eşitlik 4.14 ise GP algoritması ile bulunan sentez modelleri olup, dielektrik taban malzemesi (ϵ_r , h) seçildikten sonra istenilen karakteristik empedansı (Z_0) elde etmek için belirli şerit genişliklerine (w) karşılık, gerekli olan yarık genişliğini (s) hesaplamaktadır. Eşitlik 4.13 YAK algoritmasıyla Eşitlik 4.15 ise GP algoritması ile bulunan sentez modelleri olup dielektrik taban malzemesi (ϵ_r , h)

seçildikten sonra istenilen karakteristik empedansı (Z_0) elde etmek için belirli yarıklık genişliklerine (s) karşılık, gerekli olan şerit genişliğini (w) hesaplamaktadır.

Uygun yarıklık ve şerit genişliklerini hesaplayan YAK algoritması ile katsayıları belirlenen sentez modellerinin oluşturulması için birçok deneme yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda iletken destekli mikro EDŞH'lerin şerit ve yarıklık genişliklerinin hesaplanması için hata oranları düşük sentez modelleri elde edilmiştir. Bu modeller Eşitlik 4.12 ve Eşitlik 4.13'te verilmiştir.

$$s = h \cdot \left[x_1 \cdot \left(\frac{Z_0}{\eta_0} \right)^{x_2} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_r + 1} \right)^{x_3} \cdot \left(\frac{w}{h} \right)^{x_4} + x_5 \cdot \left(\frac{Z_0}{\eta_0} \right)^{x_6} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_r + 1} \right)^{x_7} + x_8 \cdot \left(\frac{Z_0}{\eta_0} + \frac{w}{h} \right)^{x_9} + x_{10} \cdot \left(\frac{Z_0}{\eta_0} \right) + x_{11} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_r + 1} \right) + x_{12} \right]^{-1} \quad (4.12)$$

ve

$$w = h \cdot \left[x_1 \cdot \left(\frac{Z_0}{\eta_0} \right)^{x_2} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_r + 1} \right)^{x_3} \cdot \left(\frac{s}{h} \right)^{x_4} + x_5 \cdot \left(\frac{Z_0}{\eta_0} \right)^{x_6} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_r + 1} \right)^{x_7} + x_8 \cdot \left(\frac{Z_0}{\eta_0} \right) + x_9 \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_r + 1} \right) + x_{10} \cdot \left(\frac{s}{h} \right) + x_{11} \cdot \left(\frac{Z_0}{\eta_0} \right)^2 + x_{12} \right]^{-1} \quad (4.13)$$

Burada iletken destekli mikro EDŞH'lerin için sunulan Eşitlik 4.12 ve Eşitlik 4.13 ile sunulan sentez modelleri YAK algoritması kullanılarak elde edilmiştir. YAK algoritmasının başlangıç parametreleri olarak popülasyon büyüklüğü 30 ve limit değeri 40 olarak alınmıştır. YAK algoritmasının araştırma uzayı ise $[-10, 20]$ arasında alınmıştır.

İletken destekli mikro EDŞH'lerin tasarımı için GP tarafından üretilen uygun sentez modellerini bulmak için birçok deneme yapılmıştır. Bu denemelerde, popülasyon büyüklüğü, mutasyon oranı, çaprazlama oranı ve çoğalma oranının en uygun değerleri sırasıyla 150, 0.15, 0.8, 0.05 olarak seçilmiştir. Birçok denemeden sonra hata oranları düşük sentez modelleri elde edilmiştir. Bu modeller Eşitlik 4.14 ve Eşitlik 4.15'te verilmiştir.

Sunulan GP ve YAK algoritması ile belirlenen sentez modellerine ait katsayıların sayısal değerleri Tablo 4.6’da verilmiştir. Eşitlik 4.14 ve Eşitlik 4.15’te verilen matematiksel ifadelerde görülen zn ifadesi normalize karakteristik empedans değeri olup Eşitlik 4.16’da verilmiştir.

$$s = h \cdot \left[\frac{x_1 + x_2 \cdot \frac{w}{h}}{x_3 \cdot zn + \frac{w}{h} \cdot (zn^3)^{x_4} + \frac{w}{h} \cdot \epsilon_r^2 \cdot zn^4 + x_5} + x_6 \cdot \frac{w}{h} + x_7 \cdot zn \right]^{-1} \quad (4.14)$$

$$w = h \cdot \frac{x_1 + x_2 \cdot \frac{s}{h}}{\epsilon_r \cdot zn^2 \cdot \exp \left[zn + x_3 \cdot \left(\frac{s}{h} \right)^2 + \epsilon_r \cdot zn^3 + \frac{h \cdot (x_4 \cdot zn + \epsilon_r \cdot zn^3 + x_5 \cdot \epsilon_r^2 \cdot zn^2)}{s} \right]} \quad (4.15)$$

$$zn = \frac{Z_0}{\eta_0} \quad (4.16)$$

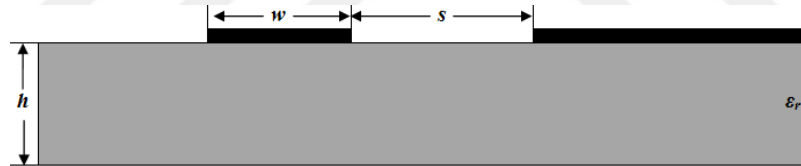
Tablo 4.6. GP ve YAK algoritması ile belirlenen iletken destekli mikro EDŞH’lerin sentez modellerinin katsayıları

Katsayılar	YAK		GP	
	Yarık Genişliği (s)	Şerit Genişliği (w)	Yarık Genişliği (s)	Şerit Genişliği (w)
x_1	0.051	8.813	0.1678	0.1365
x_2	-5.177	4.032	-0.0707	0.1425
x_3	2.656	-2.044	0.0182	0.2869
x_4	-1.488	-0.664	1.2781	0.0738
x_5	-1.709	1.114	-0.005	0.0052
x_6	1.441	-1.568	-2.1572	---
x_7	-0.814	3.002	-3.3697	---
x_8	-4.103	4.054	---	---
x_9	0.861	-3.202	---	---
x_{10}	-0.671	0.202	---	---
x_{11}	4.242	-3.352	---	---
x_{12}	2.782	0.301	---	---

4.8. Sonsuz Toprak Düzlemine Sahip Asimetrik EDŞH'ler için Önerilen Sentez Modelleri

Sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'lerin Svacina [102] tarafından 1997 yılında literatüre sunulmuş ve analizi gerçekleştirilmiştir. Sonsuz toprak düzlemine sahip EDŞH'lerin karakteristik parametreleri için kapalı-form ifadeler KDT kullanılarak elde edilmiştir [102]. Aynı iletim hattının geometrik boyutlarının hesaplanması için gereken sentez modelleri Güney ve Ark. [115] tarafından literatüre sunulmuştur. Güney ve Ark. [115] tarafından önerilen bu çalışma matematiksel olarak çok uzun ifadeler içermektedir. Literatürdeki diğer sentez çalışması ise Kaya ve Ark. [114] tarafından sunulan bulanık sinir ağları tabanlı bir çalışma olup kapalı formda tasarım denklemleri içermemektedir.

Sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'lerin kesit görünümü Şekil 4.2'de yer almaktadır. Bu şekilde, s yarık genişliğini, w şerit genişliklerini, h dielektrik taban kalınlığını, ϵ_r ise taban malzemesinin bağıl dielektrik sabitini göstermektedir.



Şekil 4.2. Sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'nin kesit görünümü

Bu tez çalışmasında, sonsuz uzun toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'nin arzu edilen karakteristik empedansa sahip olması için gerekli olan geometrik boyutları hesaplayan için sentez modelleri oluşturulurken literatürde mevcut olan KDT [102] sonuçlarından elde edilen 1960 adet veri seti kullanılmıştır. Veri seti oluşturulurken kullanılan tasarım parametreleri: $2 \leq \epsilon_r \leq 21$, $0.05 \leq s/h \leq 1$, $0.1 \leq w/h \leq 1.4$, $20 \mu m \leq h \leq 2000 \mu m$. Bunlara karşılık gelen karakteristik empedans değerleri ise $31 \Omega \leq Z_0 \leq 250 \Omega$ arasındadır. Burada $\eta_0 = 120\pi \Omega$ hava ortamının öz empedansını temsil etmektedir.

Sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'nin arzu edilen karakteristik empedansa sahip olması için gerekli olan geometrik boyutların belirlenmesi için ilk adım uygun dielektrik tabanın seçilmesidir (ϵ_r , h). Uygun dielektrik taban seçildikten sonra yarık ve şerit genişlikleri hesaplanabilir.

Bu çalışmada GP ve YAK algoritması ile elde edilen doğru ve çok basit iki sentez modeli önerilmiştir. Eşitlik 4.17 YAK algoritması ile, Eşitlik 4.21 ve Eşitlik 4.22 ise GP algoritması ile bulunan sentez modelleri olup, dielektrik taban malzemesi (ϵ_r , h) seçildikten sonra istenilen karakteristik empedansı (Z_0) elde etmek için belirli yarı genişliklerine (s) karşılık, gerekli olan şerit genişliğini (w) hesaplamaktadır. Eşitlik 4.18 YAK algoritması ile, Eşitlik 4.23 ve Eşitlik 4.24 ise GP algoritması ile bulunan sentez modelleri olup, dielektrik taban malzemesi (ϵ_r , h) seçildikten sonra istenilen karakteristik empedansı (Z_0) elde etmek için belirli şerit genişliklerine (w) karşılık, gerekli olan yarı genişliğini (s) hesaplamaktadır.

Uygun şerit ve yarı genişliklerini hesaplayan YAK algoritması ile katsayıları belirlenen sentez modellerin oluşturulması için birçok deneme yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'lerin şerit ve yarı genişliklerinin hesaplanması için hata oranları düşük aşağıdaki sentez modelleri elde edilmiştir:

$$w = h \cdot G(\epsilon_r, Z_0, X) \quad (4.17)$$

$$s = h \cdot G(\epsilon_r, Z_0, X) \quad (4.18)$$

Eşitlik 4.17 ve Eşitlik 4.18 ile verilen ifadelerde görülen $G(\epsilon_r, Z_0, X)$ fonksiyonu sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'lerin elektriksel özelliklerine ve geometrik boyutlarına bağlıdır. Bu fonksiyondaki X ifadesi aynı MİH'in geometrik boyutunu ifade etmekte olup Eşitlik 4.19'da verilmiştir.

$$X = \begin{cases} \frac{s}{h}, & \text{ için Eşitlik (4.17)} \\ \frac{w}{h}, & \text{ için Eşitlik (4.18)} \end{cases} \quad (4.19)$$

Eşitlik 4.20 ile verilen YAK algoritması ile katsayıları belirlenmiş uygun modelin oluşturulmasında birçok deneme yapılmıştır. YAK algoritmasının başlangıç

parametreleri olarak popülasyon büyüklüğü 30 ve limit değeri 105 olarak alınmıştır. YAK algoritmasının araştırma uzayı ise $[-10, 10]$ arasında alınmıştır.

$$G(\varepsilon_r, Z_0, X) = \left[\alpha_1 \cdot Z_n^{\alpha_2} \cdot (\varepsilon_r + \alpha_3)^{\alpha_4} \cdot X^{\alpha_5} + \alpha_6 \right]^{\alpha_7} \quad (4.20)$$

Sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'lerin tasarımı için GP tarafından üretilen uygun sentez modellerini bulmak için birçok deneme yapılmıştır. Bu denemelerde, popülasyon büyüklüğü, mutasyon oranı, çaprazlama oranı ve çoğalma oranının en uygun değerleri sırasıyla 100, 0.15, 0.8, 0.05 olarak seçilmiştir. Birçok denemeden sonra hata oranları düşük sentez modelleri elde edilmiştir. Bu modeller Eşitlik 4.21- 4.24'te verilmiştir.

$$w = h \cdot \left[\frac{\frac{s}{h}}{Z_n^2 + \alpha_1 \cdot \frac{s}{h} \cdot Z_n + \alpha_2 \cdot Z_n^7 + \alpha_3 \cdot \varepsilon_r^2 \cdot Z_n^4 + \alpha_4 + \alpha_5 \cdot \frac{s}{h} + \alpha_6 \cdot \left(\frac{s}{h}\right)^2} \right], 0.05 \leq s/h < 0.5 \quad (4.21)$$

$$w = h \cdot \left[\alpha_1 \cdot a \tan(\alpha_2 \cdot Z_n) + \alpha_3 \cdot \tan \left(\alpha_4 + \left(\frac{s}{h}\right)^{0.5} + \alpha_5 \cdot Z_n \cdot \left(\alpha_6 + \varepsilon_r + \alpha_7 \cdot \frac{s}{h} \cdot \left(\frac{s}{h}\right)^{0.5} \right)^{0.5} \right) + \alpha_8 \right], 0.5 \leq s/h \leq 1 \quad (4.22)$$

$$s = h \cdot \left[\frac{\frac{\alpha_1 \cdot h}{w} + \frac{\alpha_2 \cdot \varepsilon_r^2 \cdot Z_n^4 \cdot a \tan \left(\alpha_3 + \frac{w}{h} \right)}{a \tan \left(\alpha_4 \cdot \varepsilon_r + \frac{\alpha_5}{\frac{w}{h} + Z_n^2} \right)}}{\alpha_1 \cdot h}, 0.1 \leq w/h < 0.7 \right] \quad (4.23)$$

$$s = h \cdot \left[\frac{\alpha_1 \cdot \epsilon_r^2 \cdot Z_n^4 \cdot a \tan\left(\alpha_2 + \frac{w}{h}\right)}{a \tan\left(\alpha_3 \cdot \epsilon_r + \frac{\alpha_4 \cdot h}{w}\right)} + \alpha_5 \right], 0.7 \leq w/h \leq 1.4 \quad (4.24)$$

Eşitlik 4.20-4.24 ile verilen matematiksel ifadelerde görülen Z_n ifadesi normalize karakteristik empedans değeri olup Eşitlik 4.25’de verilmiştir. Burada görülen $\eta_0=120\pi\Omega$ değeri ise hava ortamının öz empedansını temsil etmektedir. GP ve YAK algoritması ile belirlenen sentez modellerin katsayıları Tablo 4.7’de verilmiştir.

$$Z_n = \frac{Z_0}{\eta_0} \quad (4.25)$$

Tablo 4.7. GP ve YAK algoritması ile belirlenen sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH’lerin sentez modellerin katsayıları

Katsayılar	YAK				GP			
	Şerit genişliği (w)		Yarık genişliği (s)		Şerit genişliği (w)		Yarık genişliği (s)	
	$0.05 \leq s/h < 0.5$	$0.5 \leq s/h \leq 1$	$0.1 \leq w/h < 0.7$	$0.7 \leq w/h \leq 1.4$	$0.05 \leq s/h < 0.5$	$0.5 \leq s/h \leq 1$	$0.1 \leq w/h < 0.7$	$0.7 \leq w/h \leq 1.4$
α_1	10.000	3.776	0.146	0.333	2.8209	0.6121	-0.0054	5.4385
α_2	6.964	3.882	-6.088	-2.662	75.8687	0.6304	5.4678	0.0255
α_3	1.243	1.352	1.124	1.258	5.0330	0.3205	0.0552	0.2591
α_4	3.498	1.948	-3.045	-1.323	-0.0411	1.9884	0.2918	0.0897
α_5	-1.567	-1.002	-1.242	-0.415	-0.7846	-2.1477	0.0934	-0.0073
α_6	-0.439	-0.453	0.197	0.340	-0.2844	1.3381	---	---
α_7	-0.633	-1.102	-0.746	-2.002	---	0.3410	---	---
α_8	---	---	---	---	---	-0.1928	---	---

5. BÖLÜM

ANALİZ MODELLERİNİN SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

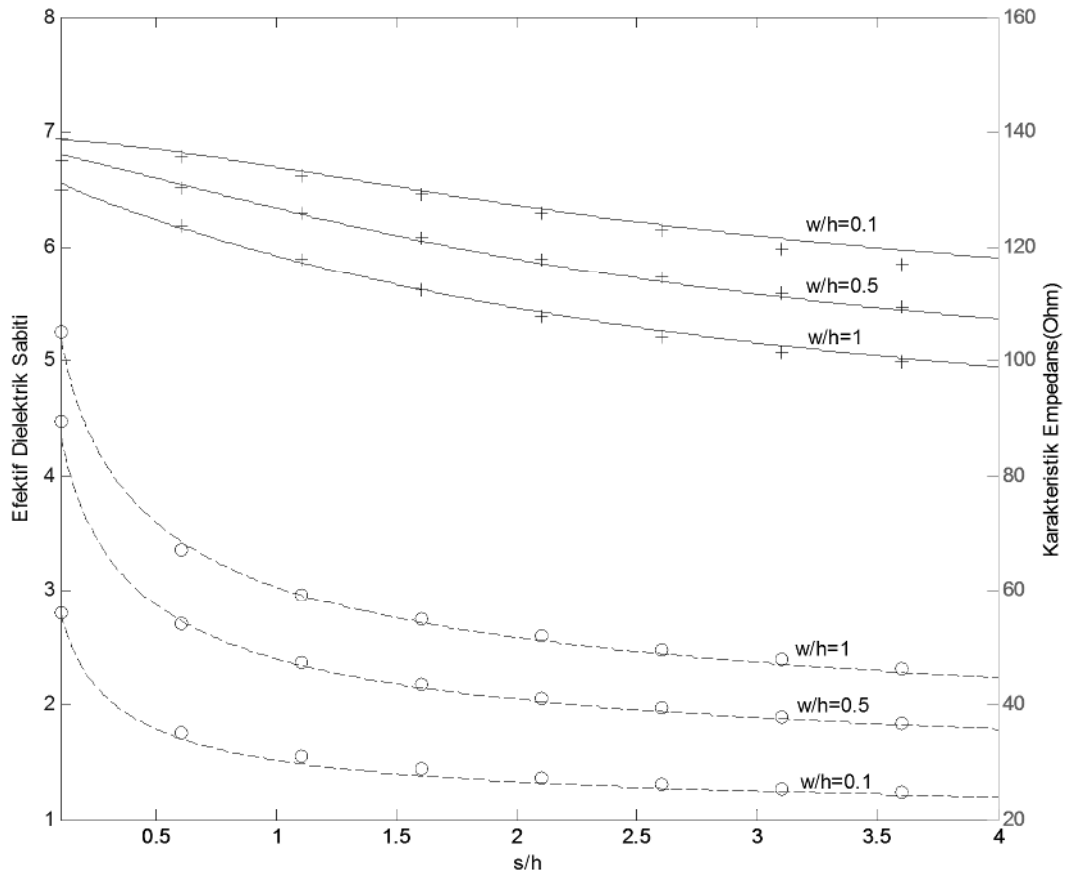
5.1. Giriş

Bu bölümde, tez çalışmasında önerilen analiz modellerin sonuçlarına yer verilmiştir. Önerilen analiz modellerin geçerliliğini ve doğruluğunu ispatlamak için literatürdeki mevcut çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

5.2. Dielektrik Taban Destekli EDDK'lar için Önerilen Analiz Modellerin Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen analiz modellerinin geçerliliğini ve doğruluğunu ispat etmek için birçok karşılaştırma yapılmıştır. Dielektrik taban destekli EDDK'ların karakteristik parametrelerini hesaplayan analiz modellerinin sonuçları ile literatürdeki KDT [88], SDA [88], GSDA [89], IE3D [35] ve ölçüm sonuçlarıyla [35] ile karşılaştırılmıştır.

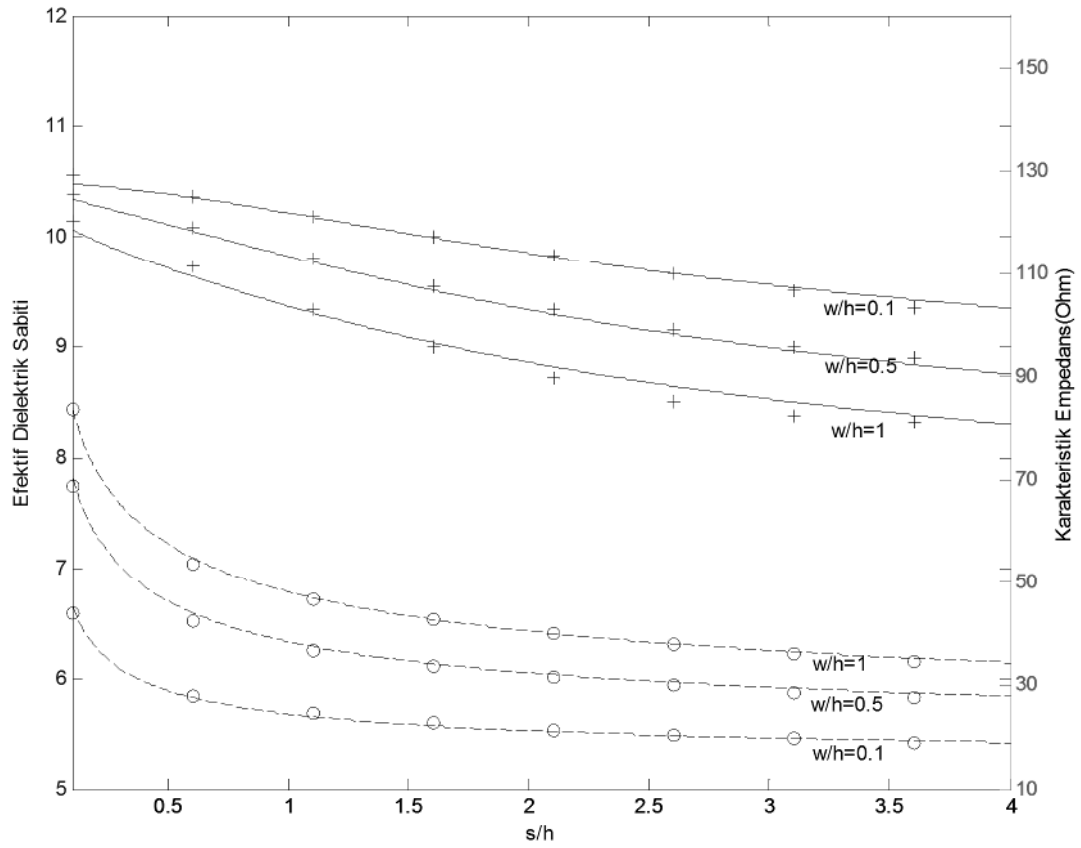
Şekil 5.1'de dielektrik taban malzemesinin $\epsilon_{r1} = 3.78$, $\epsilon_{r2} = 12.9$ ve $h=200 \mu m$ değerleri için farklı w/h değerleri için dielektrik taban destekli EDDK'ların karakteristik parametrelerini hesaplamak için sunulan analiz modellerinden elde edilen sonuçlar ile literatürde mevcut quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.2'de ise dielektrik taban malzemesinin $\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 20$ ve $h=200 \mu m$ değerleri için farklı w/h değerleri için dielektrik taban destekli EDDK'ların karakteristik parametrelerini hesaplamak için sunulan analiz modellerinden elde edilen sonuçlar ile literatürde mevcut quasi-statik analiz [88] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu şekillerden anlaşıldığı gibi önerilen analiz modellerin sonuçları ile quasi-statik analiz [88] sonuçları arasında iyi bir uyum olduğu görülmektedir.



- - - Karakteristik Empedans [88] ——— Efektif Dielektrik sabiti [88]
 o o o Sunulan Analiz Modeli (Karakteristik Empedans)
 + + + Sunulan Analiz Modeli (Efektif Dielektrik sabiti)

Şekil 5.1. Dielektrik taban destekli EDDK'ların karakteristik empedansı ve efektif dielektrik sabiti için sunulan analiz modeli ile literatürde mevcut olan quazi statik analiz [88] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r1}=3.78$, $\epsilon_{r2}=12.9$, $h=200 \mu m$)

Sunulan analiz modellerin sonuçlarından elde edilen karakteristik empedans değerleri KDT [88] sonuçları, IE3D [35] sonuçları, deneysel sonuçlar [35] ve diğer sentez formüllerinden [122] elde edilmiş sonuçlar Tablo 6.1'de karşılaştırılmıştır. Bu tabloda w' , s' ve Z_0' deneysel sonuçları; $Z_0(w', s')$: w' ve s' değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0^*(w', s')$ ise sunulan analiz modelinden elde edilen karakteristik empedans değerlerini göstermektedir. Tablo 5.1'den açıkça görüldüğü gibi sunulan analiz modelinden elde edilen sonuçlar, KDT [88], IE3D [35] ve ölçüm sonuçlarıyla [35] iyi bir uyum içerisindedir.



- - - Karakteristik Empedans [88] ——— Etkif Dielektrik sabiti [88]
 o o o Sunulan Analiz Modeli (Karakteristik Empedans)
 + + + Sunulan Analiz Modeli (Etkif Dielektrik sabiti)

Şekil 5.2. Dielektrik taban destekli EDDK'ların karakteristik empedansı ve efektif dielektrik sabiti için sunulan analiz modeli ile literatürde mevcut olan quazi statik analiz [88] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r1}=10$, $\epsilon_{r2}=20$, $h=200 \mu m$)

Tablo 5.1. Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen analiz modelinden elde edilen sonuçların KDT, IE3D, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 6.15$, $\epsilon_{r2} = 10.2$, $h = 1270 \mu m$, $f = 2 \text{ GHz}$).

DENEYSEL [35]			KDT [88]	IE3D [35]	Sunulan Analiz Modeli
$w' (\mu m)$	$s' (\mu m)$	$Z_0^1 (\Omega)$	$Z_0 (w', s') (\Omega)$	$Z_0 (w', s') (\Omega)$	$Z_0^*(w', s') (\Omega)$
450	1000	47.47	50.21	48.80	49.44
500	1200	48.34	49.33	47.57	48.89
550	1300	47.48	49.70	47.91	49.40
600	1400	46.66	50.04	48.21	49.88
650	1500	47.01	50.35	48.48	50.33

Analiz modellerinden elde edilen karakteristik empedans değerleri KDT [88], spektral domen analizi (SDA) [88], ve geliştirilmiş SDA (GSDA) [89] sonuçları ile Tablo 5.2 - Tablo 5.4'te karşılaştırılmıştır. Ayrıca w' ve s' ile gösterilen gerçekte boyutlar da bu tablolarda verilmiştir. Bu tablolarda $Z_0(w', s')$: verilen w' ve s' değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0^*(w', s')$ sunulan analiz modelinden elde edilen karakteristik empedans değerlerini göstermektedir.

Tablo 5.2 - Tablo 5.4'ten de görüldüğü gibi analiz modelinden hesaplanan karakteristik empedans değerleri KDT [88], spektral domen analizi (SDA) [88], geliştirilmiş SDA (GSDA) [89] sonuçları ve gerçekte boyut değerleri ile iyi bir uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir.

Tablo 5.5'te ise analiz modellerin ortalama yüzde hataları verilmektedir. Tüm bu karşılaştırmalara bakıldığında GP kullanılarak elde edilen analiz modellerin dielektrik taban destekli EDDK'ların karakteristik parametrelerin belirlenmesinde kullanılabilir bir doğruluğa sahip olduğu açıkça görülmektedir.

Tablo 5.2. Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen analiz modelinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 20$, $h = 200 \mu\text{m}$)

w' (μm)	s' (μm)	KDT [88]	SDA [88]	GSDA [89]	Sunulan Analiz Modeli
		$Z_0(w', s')$ (Ω)	$Z_0(w', s')$ (Ω)	$Z_0(w', s')$ (Ω)	$Z_0^*(w', s')$ (Ω)
20	20	45.51	45.85	45.38	44.11
	60	33.24	33.38	33.15	32.72
	120	27.68	27.12	27.56	27.94
	200	24.52	24.50	24.37	25.05
	800	19.01	18.83	18.76	18.56
60	20	61.82	62.01	61.49	59.05
	60	45.81	45.83	45.60	42.87
	120	37.73	37.67	37.51	36.22
	200	32.95	32.61	32.70	32.22
	800	24.41	24.05	24.00	23.19
100	20	70.56	70.60	70.02	68.92
	60	53.26	53.18	52.90	50.24
	120	44.09	43.90	43.73	42.44
	200	38.47	38.19	38.07	37.71
	800	27.98	27.48	27.43	26.78
200	20	83.77	83.24	82.62	83.71
	60	65.28	64.80	64.45	62.98
	120	54.87	54.31	54.09	53.73
	200	48.95	47.50	47.34	47.87
	800	34.42	33.66	33.63	33.47

Tablo 5.3. Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen analiz modelinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 3.78$, $\epsilon_{r2} = 12.9$, $h = 200 \mu\text{m}$)

w' (μm)	s' (μm)	KDT [88]	SDA [88]	GSDA [89]	Sunulan Analiz Modeli
		$Z_0(w', s')$ (Ω)	$Z_0(w', s')$ (Ω)	$Z_0(w', s')$ (Ω)	$Z_0^*(w', s')$ (Ω)
20	20	55.96	56.37	55.79	56.15
	60	40.90	41.08	40.79	41.14
	120	34.11	34.16	33.96	35.08
	200	30.30	30.28	30.12	31.55
	800	23.73	23.72	23.63	24.14
60	20	76.09	76.32	75.69	76.93
	60	56.46	56.50	55.21	54.77
	120	46.62	46.56	46.37	46.14
	200	40.88	40.72	40.58	41.17
	800	30.99	30.56	30.49	30.82
100	20	86.97	87.03	86.32	89.35
	60	65.80	65.71	65.37	63.99
	120	54.65	54.44	54.23	53.99
	200	47.91	47.60	47.44	48.18
	800	35.76	35.16	35.09	35.87
200	20	103.80	103.20	102.42	104.89
	60	81.22	80.66	80.21	78.37
	120	68.62	67.95	67.67	67.15
	200	60.58	59.80	59.61	60.38
	800	44.60	43.65	43.59	45.14

Tablo 5.4. Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen analiz modelinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 12.9$, $h = 200 \mu\text{m}$)

$w' (\mu\text{m})$	$s' (\mu\text{m})$	KDT [88]	SDA [88]	GSDA [89]	Sunulan Analiz Modeli
		$Z_0(w', s') (\Omega)$	$Z_0(w', s') (\Omega)$	$Z_0(w', s') (\Omega)$	$Z_0^*(w', s') (\Omega)$
20	20	55.91	56.33	55.75	55.87
	60	40.79	40.98	40.69	40.68
	120	33.90	33.96	33.76	34.42
	200	29.98	29.92	29.77	30.67
	800	22.60	22.47	22.40	22.19
60	20	75.84	76.09	75.46	76.40
	60	56.07	56.14	55.86	53.96
	120	46.01	46.00	45.82	45.00
	200	39.96	39.89	39.75	39.68
	800	28.69	28.43	28.38	27.71
100	20	86.36	86.48	85.77	88.63
	60	64.98	64.97	64.64	62.89
	120	53.92	53.42	53.22	52.44
	200	46.39	46.22	46.07	46.15
	800	32.61	32.25	32.22	31.73
200	20	101.80	101.50	100.60	103.89
	60	78.85	78.94	78.12	76.72
	120	65.81	65.44	65.18	64.77
	200	57.26	56.22	56.66	57.23
	800	39.47	38.95	38.95	38.76

Tablo 5.5. Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen analiz modellerin ortalama yüzde hataları

Analiz Modelleri	Ortalama Yüzde Hatalar (%)
Karakteristik Empedans (Z_0)	1.42
Efektif Dielektrik Sabiti (ϵ_{eff})	0.61

Sonuç olarak GP kullanılarak geliştirilen analiz modellerinin doğruluğunu ve geçerliliğini ortaya koymak için literatürdeki mevcut sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda önerilen analiz modellerin literatürdeki mevcut sonuçlar ile iyi bir uyum içerisinde olması önerilen analiz modellerin dielektrik taban destekli EDDK'ların karakteristik parametrelerini belirlemek için kullanılabileceğini açık bir şekilde göstermektedir.

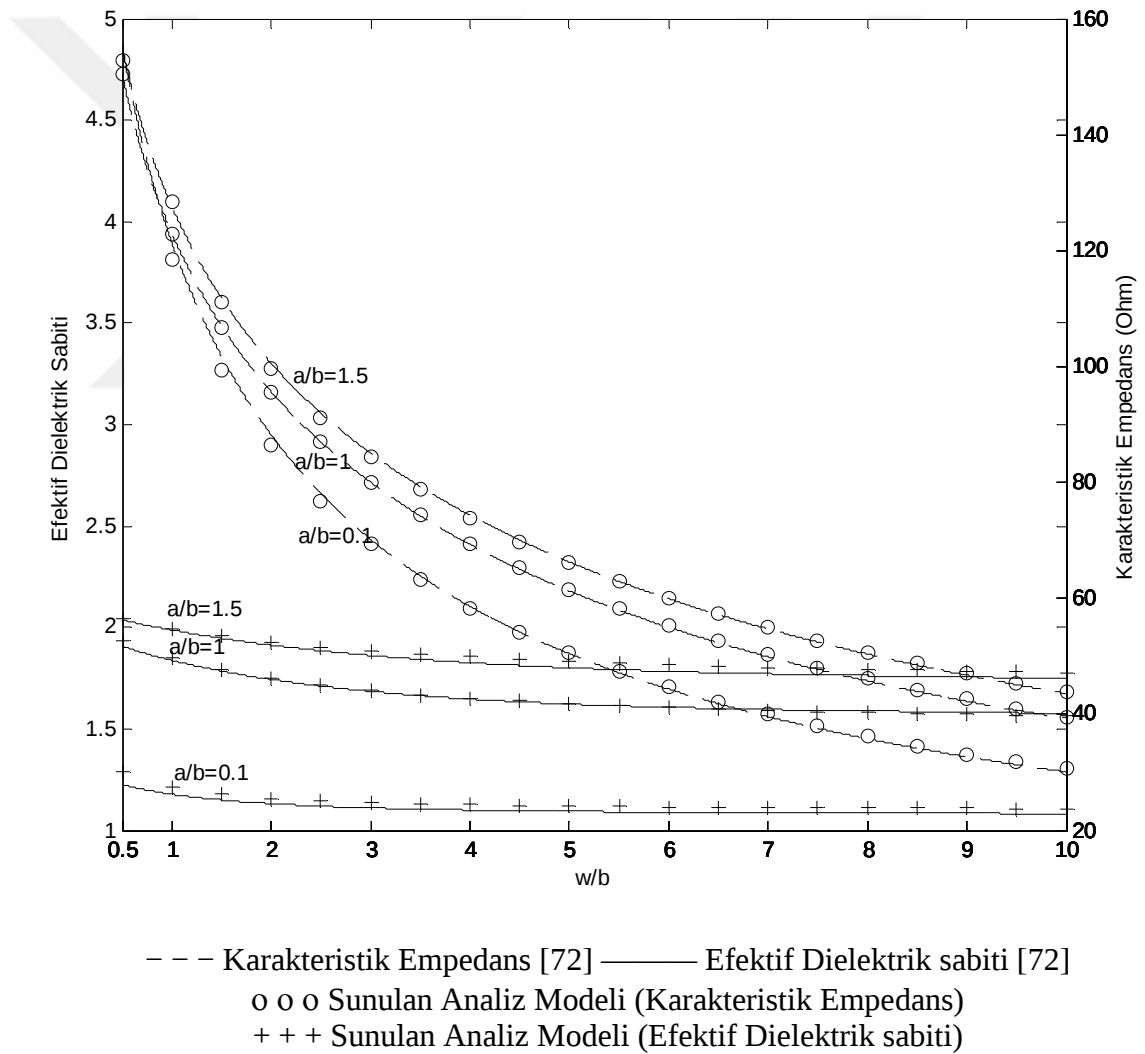
5.3. Asılı Mikroşerit Hatlar için Önerilen Analiz Modellerin Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Asılı mikroşerit hatlar için önerilen analiz modellerin geçerliliğini ve doğruluğunu ispat etmek için birçok karşılaştırma yapılmıştır. Asılı mikroşerit hatların karakteristik parametrelerini hesaplayan analiz modellerin sonuçları ile literatürde mevcut olan diğer analiz modelleri [72, 75, 148], deneysel [149] ve HFSS [70] sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 5.3'te $\epsilon_{r2} = 3.78$ farklı a/b değerleri için asılı mikroşerit hatların karakteristik parametrelerini hesaplamak için sunulan analiz modellerinden elde edilen sonuçlar ile T&B'nin sonuçları [72] karşılaştırılmıştır. Buna göre sunulan analiz modellerin sonuçlarının quasi-statik analiz [72] sonuçları ile iyi bir uyum içerisinde olduğu bu şekillerden açıkça görülmektedir.

Tablo 5.6'da asılı mikroşerit hatların karakteristik empedansı ve efektif dielektrik sabitinin farklı geometrik boyutlar ve farklı bağıl dielektrik sabiti için karşılaştırılması verilmiştir. Bu çalışmada GP ile geliştirilen analiz modelleri, literatürdeki diğer analiz modelleri [72, 75, 148], ve HFSS [70] sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.7’da GP ile geliştirilmiş analiz modellerin geçerliliğini göstermek için efektif dielektrik sabiti sonuçları, literatürdeki diğer metotların sonuçları, HFSS sonuçları ve deneysel veriler farklı geometrik boyutlar ve farklı bağıl dielektrik sabitleri için karşılaştırılmıştır. Sunulan analiz modellerin ortalama yüzde hatası 3600 örnek veri için hesaplanarak Tablo 5.8’de verilmiştir. Tüm bu karşılaştırmalara bakıldığında GP kullanılarak elde edilen analiz modellerin asılı mikroşerit hatların karakteristik parametrelerin belirlenmesinde kullanılabilir bir doğruluğa sahip olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 5.3. Asılı mikroşerit hatların karakteristik empedansı ve efektif dielektrik sabiti için sunulan analiz modeli ile T&B’nin modelinin [72] karşılaştırılması ($\epsilon_{r2}=3.78$)

Tablo 5.6. Asılı mikroşerit hatların karakteristik empedansı ve efektif dielektrik sabiti için GP ile geliştirilen analiz modeli, literatürdeki analiz modelleri ve HFSS sonuçları

ϵ_{r2}	a/b	w/b	Analiz Modeli [148]		Analiz Modeli [72]		Analiz Modeli [75]		HFSS (1 GHz) [70]		Sunulan Analiz Modeli	
			$\sqrt{\epsilon_{eff}}$	$Z_0 (\Omega)$	$\sqrt{\epsilon_{eff}}$	$Z_0 (\Omega)$	$\sqrt{\epsilon_{eff}}$	$Z_0 (\Omega)$	$\sqrt{\epsilon_{eff}}$	$Z_0 (\Omega)$	$\sqrt{\epsilon_{eff}}$	$Z_0 (\Omega)$
2.22	0.2	0.5	1.1018	161.84	1.0955	162.14	1.1146	159.35	1.1027	162.95	1.1345	167.35
		1	1.0830	127.11	1.0816	126.61	1.0987	124.64	1.0826	129.38	1.1038	128.69
		2	1.0681	92.83	1.0664	92.35	1.0825	90.98	1.0668	96.16	1.0809	92.93
		3	1.0613	74.22	1.0587	73.85	1.0740	72.80	1.0611	75.43	1.0716	74.31
		4	1.0574	62.18	1.0547	61.86	1.0688	61.04	1.0574	62.80	1.0665	62.35
		5	1.0548	53.65	1.0526	53.36	1.0653	52.72	1.0550	53.37	1.0633	53.87
		6	1.0530	47.65	1.0516	46.98	1.0628	46.48	1.0540	48.50	1.0611	47.49
		7	1.0517	42.26	1.0512	42.00	1.0608	41.62	1.0531	42.51	1.0595	42.50
		8	1.0508	38.24	1.0508	38.01	1.0593	37.70	1.0515	38.71	1.0583	38.48
		9	1.0500	34.94	1.0502	34.75	1.0581	34.48	1.0512	34.33	1.0573	35.16
		10	1.0494	32.17	1.0489	32.04	1.0572	31.79	1.0502	31.46	1.0566	32.38
12.9	1	0.5	1.9184	108.80	1.9121	108.81	1.9202	108.4	1.9162	109.66	1.9109	108.54
		1	1.8220	92.07	1.8296	91.18	1.8257	91.37	1.8237	92.14	1.8228	92.67
		2	1.7096	74.58	1.7149	73.77	1.7072	74.10	1.7026	75.05	1.7075	75.08
		3	1.6417	63.98	1.6401	63.46	1.6373	63.57	1.6377	64.60	1.6351	64.33
		4	1.5957	56.40	1.5883	56.09	1.5912	55.99	1.5903	56.59	1.5853	56.64
		5	1.5622	50.60	1.5510	50.41	1.5583	50.17	1.5560	50.57	1.5489	50.75
		6	1.5367	45.97	1.5232	45.84	1.5336	45.53	1.5310	46.57	1.5211	46.03
		7	1.5164	42.17	1.5019	42.07	1.5142	41.73	1.5076	42.12	1.4991	42.16
		8	1.4999	38.99	1.4849	38.90	1.4986	38.54	1.4926	38.15	1.4814	38.90
		9	1.4862	36.27	1.4707	36.20	1.4856	35.84	1.4826	35.43	1.4667	36.13
		10	1.4746	33.93	1.4582	33.88	1.4747	33.50	1.4741	33.52	1.4544	33.73

Tablo 5.7. Asılı mikroşerit hatların efektif dielektrik sabiti için GP ile geliştirilen analiz modeli, deneysel çalışma, literatürdeki analiz modelleri ve HFSS sonuçları

ϵ_{r2}	a/b	w/b	Efektif Dielektrik Sabiti (ϵ_{eff})					
			Deneysel Veri [149]	Analiz Modeli [148]	Analiz Modeli [72]	Analiz Modeli [75]	HFSS (1 GHz) [70]	Sunulan Analiz Modeli
2.55	1.6069	0.6541	1.7566	1.5976	1.6002	1.5847	1.6703	1.5996
	0.8034	0.4727	1.5986	1.4879	1.4879	1.4751	1.5587	1.5609
	0.4017	0.3041	1.4775	1.3959	1.3806	1.3853	1.4568	1.5098
	0.2008	0.1775	1.3841	1.3273	1.2760	1.3149	1.3884	1.4554

Tablo 5.8. Asılı mikroşerit hatlar için önerilen analiz modellerin ortalama yüzde hataları

Analiz Modelleri	Ortalama Yüzde Hatalar (%)
Karakteristik Empedans (Z_0)	0.33
Efektif Dielektrik Sabiti (ϵ_{eff})	0.68

Sonuç olarak GP kullanılarak geliştirilen analiz modellerin doğruluğunu ve geçerliliğini ortaya koymak için literatürdeki mevcut sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda önerilen analiz modellerin literatürdeki mevcut sonuçlar ile iyi bir uyum içerisinde olması önerilen analiz modellerinin asılı mikroşerit hatların karakteristik parametrelerini hesaplamak için kullanılabileceğini açık bir şekilde göstermektedir [150].

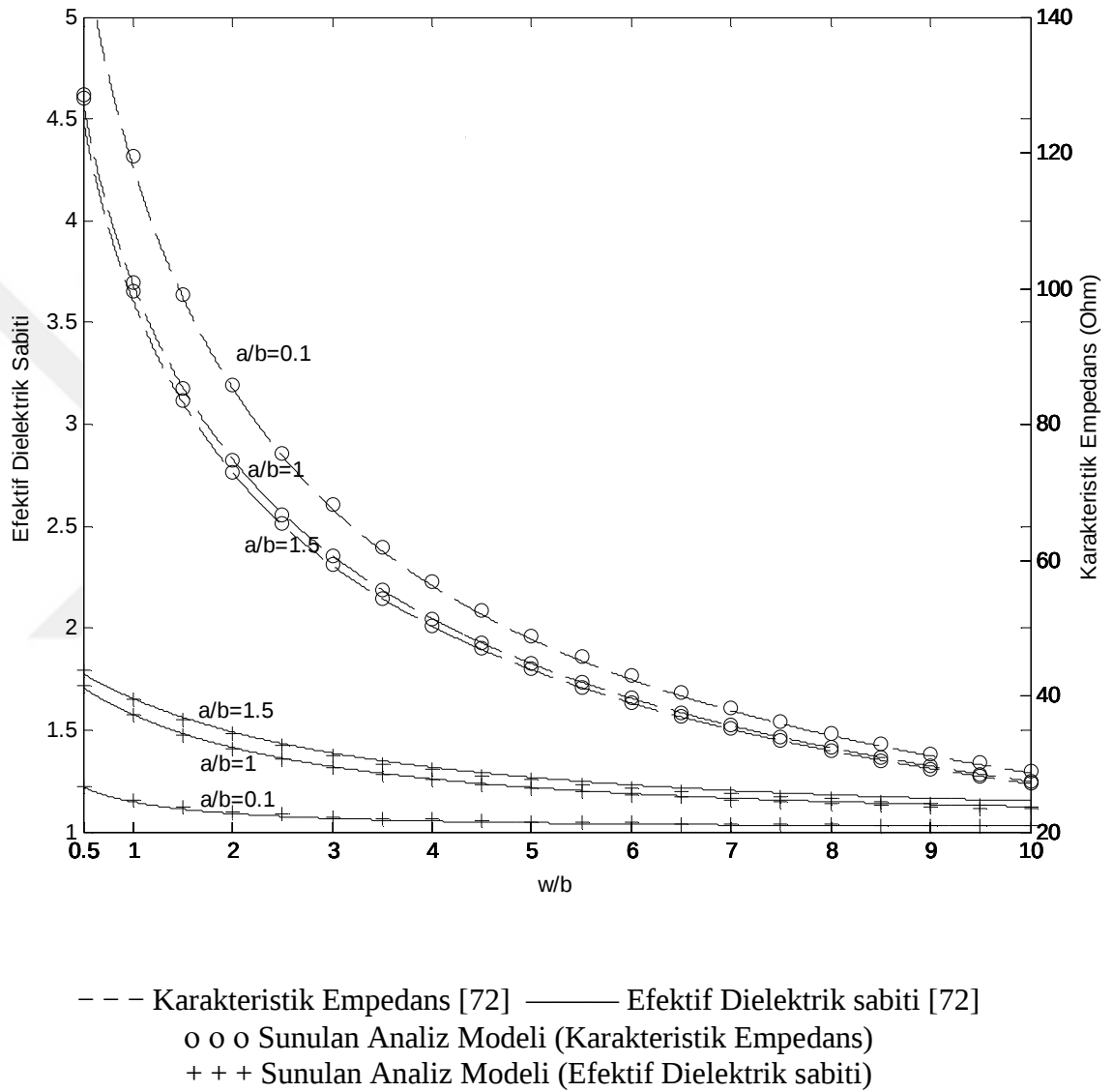
5.4. Ters Mikroşerit Hatlar için Önerilen Analiz Modellerin Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Ters mikroşerit hatlar için önerilen analiz modellerin geçerliliğini ve doğruluğunu ispat etmek için birçok karşılaştırma yapılmıştır. Ters mikroşerit hatların karakteristik parametrelerini hesaplayan analiz modellerin sonuçları ile literatürde mevcut olan diğer analiz modelleri [72, 75, 148], deneysel [151, 152] ve HFSS [70] sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 5.4'te $\epsilon_{r2} = 3.78$ farklı a/b değerleri için ters mikroşerit hatların karakteristik parametrelerini hesaplamak için sunulan analiz modellerinden elde edilen sonuçlar ile T&B'nin sonuçları [72] karşılaştırılmıştır. Buna göre sunulan analiz modellerin sonuçlarının quasi-statik analiz [72] sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisinde olduğu Şekil 5.4'den açıkça görülmektedir.

Tablo 5.9'da ters mikroşerit hatların karakteristik empedansı ve efektif dielektrik sabitinin farklı geometrik boyutlar ve farklı bağıl dielektrik sabiti için karşılaştırılması verilmiştir. Bu çalışmada GP ile geliştirilen analiz modelleri, literatürdeki diğer analiz modelleri [72, 75, 148], ve HFSS [70] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tablo 5.10'da GP ile geliştirilmiş analiz modellerin geçerliliğini göstermek için efektif dielektrik sabiti sonuçları, literatürdeki diğer metotların sonuçları, HFSS sonuçları ve deneysel veriler farklı geometrik boyutlar ve farklı bağıl dielektrik sabitleri için karşılaştırılmıştır. Sunulan analiz modellerin ortalama yüzde hatası 3600 örnek veri için hesaplanarak Tablo 5.11'de

verilmiştir. Tüm bu karşılaştırmalara bakıldığında GP kullanılarak elde edilen analiz modellerinin ters mikroşerit hatların karakteristik parametrelerin belirlenmesinde kullanılabilir bir doğruluğa sahip olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 5.4. Ters mikroşerit hatların karakteristik empedansı ve efektif dielektrik sabiti için sunulan analiz modeli ile T&B'nin modelinin [72] karşılaştırılması ($\epsilon_{r2}=3.78$)

Tablo 5.9. Ters mikroşerit hatların karakteristik empedansı ve efektif dielektrik sabiti için GP ile geliştirilen analiz modeli, literatürdeki analiz modelleri ve HFSS sonuçları

ϵ_{r2}	a/b	w/b	Analiz Modeli [148]		Analiz Modeli [72]		Analiz Modeli [75]		HFSS (1 GHz) [70]		Sunulan Analiz Modeli	
			$\sqrt{\epsilon_{eff}}$	$Z_0 (\Omega)$	$\sqrt{\epsilon_{eff}}$	$Z_0 (\Omega)$	$\sqrt{\epsilon_{eff}}$	$Z_0 (\Omega)$	$\sqrt{\epsilon_{eff}}$	$Z_0 (\Omega)$	$\sqrt{\epsilon_{eff}}$	$Z_0 (\Omega)$
2.22	1	0.5	1.1608	144.59	1.1636	143.36	1.1618	143.59	1.1601	148.64	1.1956	142.02
		1	1.1348	112.44	1.1359	111.37	1.1711	108.03	1.1345	113.41	1.1586	109.90
		2	1.1015	81.80	1.1006	80.95	1.0885	81.85	1.1036	80.72	1.1142	79.79
		3	1.0810	65.43	1.0792	64.70	1.0701	65.25	1.0826	65.73	1.0886	64.06
		4	1.0673	54.87	1.0651	54.23	1.0583	54.58	1.0686	56.34	1.0719	53.89
		5	1.0575	47.39	1.0552	46.82	1.0501	47.05	1.0578	47.79	1.0601	46.64
		6	1.0502	41.77	1.0479	41.26	1.0440	41.41	1.0502	41.43	1.0514	41.16
		7	1.0444	37.39	1.0425	36.91	1.0393	37.03	1.0474	37.27	1.0447	36.85
		8	1.0398	33.86	1.0383	33.42	1.0355	33.51	1.0416	33.86	1.0393	33.38
		9	1.0360	30.96	1.0350	30.54	1.0325	30.62	1.0392	30.83	1.0350	30.50
9.8	0.6	0.5	1.5434	108.75	1.5485	107.73	1.4966	111.47	1.5440	110.28	1.5423	107.92
		1	1.4349	88.92	1.4430	87.67	1.5396	82.17	1.4279	89.76	1.4336	88.34
		2	1.3174	68.39	1.3177	67.61	1.3286	67.06	1.3161	69.44	1.3102	67.79
		3	1.2521	56.49	1.2462	56.03	1.2613	55.36	1.2329	57.15	1.2416	56.09
		4	1.2097	48.41	1.2004	48.12	1.2177	47.44	1.1996	48.01	1.1977	48.14
		5	1.1795	42.48	1.1689	42.27	1.1869	41.62	1.1790	42.21	1.1627	42.27
		6	1.1568	37.92	1.1459	37.73	1.1640	37.14	1.1615	37.04	1.1447	37.72
		7	1.1390	34.28	1.1287	34.10	1.1463	33.57	1.1446	32.69	1.1274	34.07
		8	1.1246	31.31	1.1154	31.11	1.1321	30.65	1.1269	29.99	1.1137	31.08
		9	1.1128	28.82	1.1048	28.61	1.1205	28.21	1.1050	27.62	1.1026	28.57
		10	1.1028	26.71	1.0964	26.49	1.1108	26.15	1.1050	25.76	1.0934	26.45

Tablo 5.10. Ters mikroşerit hatların efektif dielektrik sabiti için GP ile geliştirilen analiz modeli, deneysel çalışma, literatürdeki analiz modelleri ve HFSS sonuçları

ϵ_r	a/b	w/b	Efektif Dielektrik Sabiti (ϵ_{eff})						
			Deneysel Veriler		Analiz Modeli [148]	Analiz Modeli [72]	Analiz Modeli [75]	HFSS (1 GHz) [70]	Sunulan Analiz Modeli
			[151]	[152]					
3.78	1.333	1	1.5269	---	1.6276	1.6340	1.6215	1.6240	1.6340
		2	1.3763		1.4701	1.4689	1.4577	1.4660	1.4600
		3	1.2735		1.3740	1.3675	1.3684	1.3590	1.3574
		4	1.2137		1.3098	1.3000	1.3092	1.2929	1.2898
		5	1.1709		1.2642	1.2524	1.2670	1.2450	1.2418
	0.333	0.5	---	1.3689	1.4551	1.4682	1.3964	1.4299	1.4297
		1.0		1.2544	1.3375	1.3391	1.3581	1.3165	1.3163
		2.0		1.1664	1.2285	1.2181	1.2301	1.2078	1.2077
		3.0		1.1342	1.1737	1.1608	1.1744	1.1552	1.1552
		4.0		1.1025	1.1340	1.1278	1.1408	1.1242	1.1241
		5.0		1.0712	1.1168	1.1063	1.1185	1.1038	1.1037

Tablo 5.11. Ters mikroşerit hatlar için önerilen analiz modellerin ortalama yüzde hataları

Analiz Modelleri	Ortalama Yüzde Hatalar (%)
Karakteristik Empedans (Z_0)	0.33
Efektif Dielektrik Sabiti (ϵ_{eff})	0.68

Sonuç olarak GP kullanılarak geliştirilen analiz modellerin doğruluğunu ve geçerliliğini ortaya koymak için literatürdeki mevcut sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda önerilen analiz modellerin literatürdeki mevcut sonuçlar ile iyi bir uyum içerisinde olması önerilen analiz modellerin ters mikroşerit hatların karakteristik parametrelerini hesaplamak için kullanılabileceğini açık bir şekilde göstermektedir [150].

5.5. Klasik Mikroşerit Hatlar için Önerilen Analiz Modellerin Sonuçları ve Değerlendirilmesi

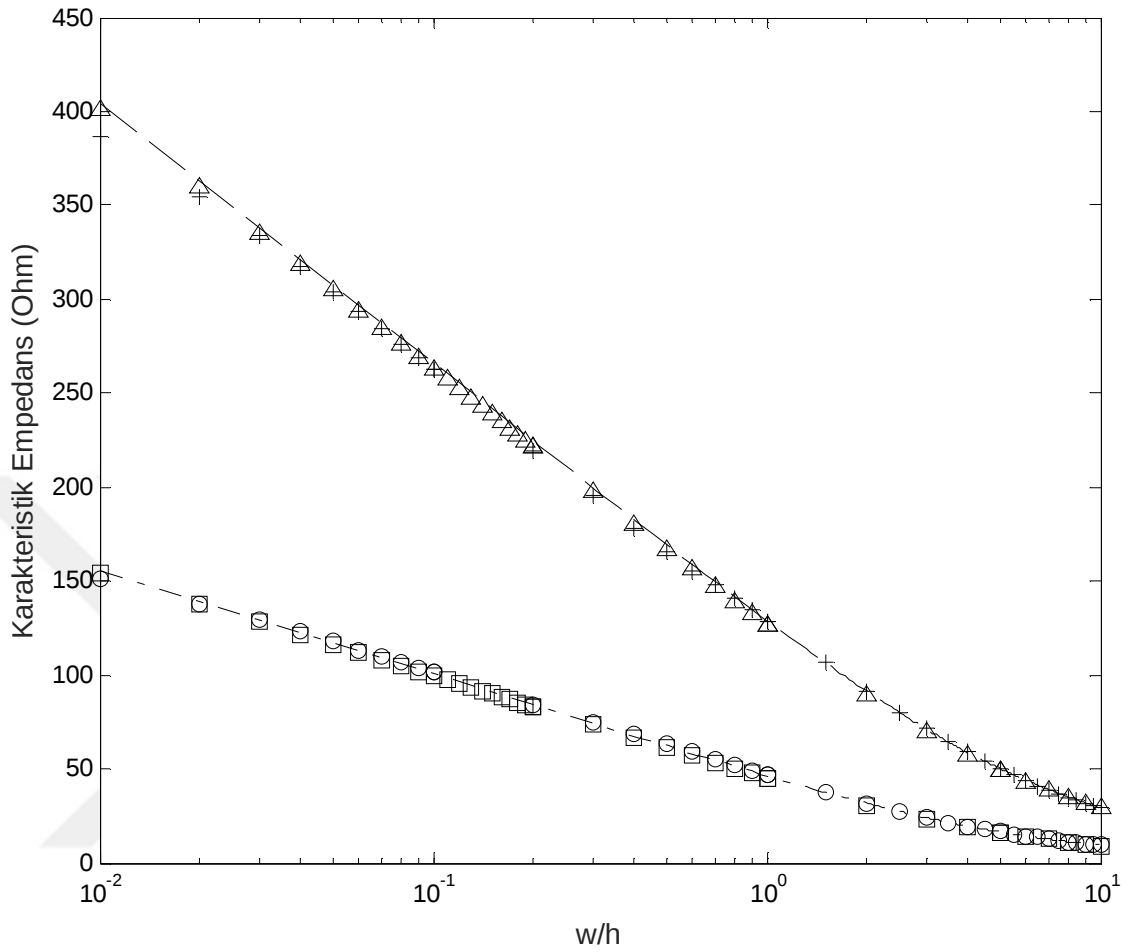
Klasik mikroşerit hatlar için önerilen analiz modellerinin geçerliliğini ve doğruluğunu ispat etmek için birçok karşılaştırma yapılmıştır. Klasik mikroşerit hatların karakteristik parametrelerini hesaplayan analiz modellerin sonuçları ile literatürde mevcut CAD model [65] ve VM [60] sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Şekil 5.5'te, sunulan analiz modelinden elde edilen karakteristik empedans sonuçları, CAD model [65] ve VM [60] sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu grafikteki karşılaştırmalar, iki farklı ϵ_r değeri için gerçekleştirilmiştir. Burada ayrıca $t = 0$ seçilerek metal kalınlıkları ihmal edilmiştir.

Bu şekilden de açıkça görülebileceği gibi analiz modelinden elde edilen sonuçlar CAD model [65] ve VM [60] sonuçlarıyla oldukça iyi bir uyum içerisindedir. Şekil 5.6'de, benzer bir karşılaştırma farklı dielektrik malzemeler için gerçekleştirilmiştir. Analiz modelinden elde edilen sonuçların VM [60] sonuçlarıyla olan uyumu bu şekilden de açıkça görülmektedir.

Bu çalışmada t/h 'ın giriş olarak tanımlanmasıyla metal kalınlıklarının da hesaba katılması sağlanmıştır. Böylelikle Şekil 5.7'de klasik mikroşerit hatların karakteristik empedanslarının metal kalınlıklarına bağlı olarak değişimleri incelenmiştir. Şekil 5.7'de analiz modelinden elde edilen karakteristik empedans sonuçları, VM [60] sonuçları $\epsilon_r = 11.7$ için karşılaştırılmıştır. Bu grafikte verilen karşılaştırmalarda, hem $t = 0$ hem de $t \neq 0$ için geçerli sonuçlar yer almaktadır.

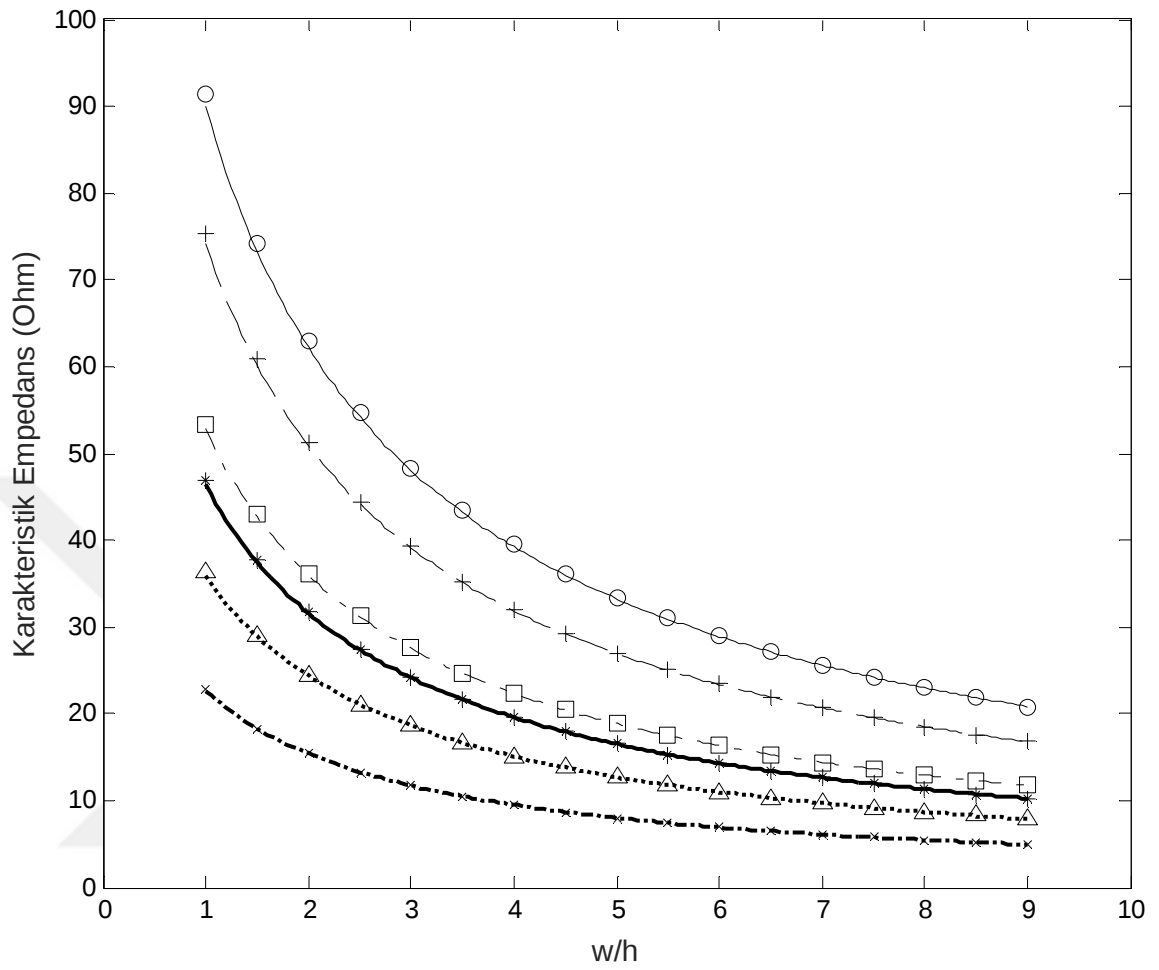
Şekil 5.8'de ise, klasik mikroşerit hatların efektif dielektrik sabitleri için sunulan analiz modelinden elde edilen sonuçlar, VM [60] sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu grafikteki karşılaştırmalar, altı farklı ϵ_r değeri ve $t = 0$ için gerçekleştirilmiştir. Analiz modelinden elde edilen sonuçların literatürdeki VM [60] sonuçlarıyla olan uyumu Şekil 5.8'den de açıkça görülmektedir.



--- Analiz [60] için $\epsilon_r = 1$, -.-.- Analiz [60] için $\epsilon_r = 11.7$
 + + + Sunulan Analiz Modeli için $\epsilon_r = 1$, ○○○ Sunulan Analiz Modeli için $\epsilon_r = 11.7$
 Δ Δ Δ CAD Modeli [65] için $\epsilon_r = 1$, □ □ □ CAD Modeli [65] için $\epsilon_r = 11.7$

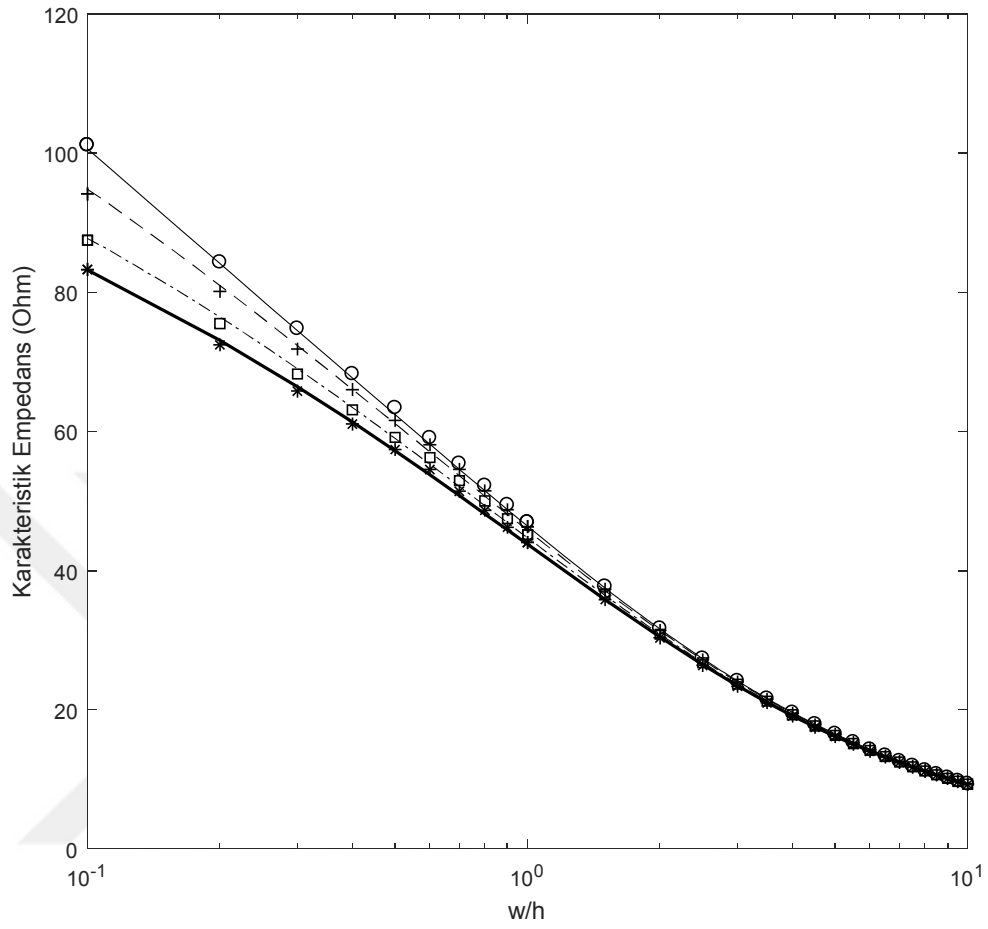
Şekil 5.5. Analiz modelinden elde edilen karakteristik empedans sonuçlarının literatürdeki mevcut CAD modeli [65] ve VM [60] sonuçlarıyla karşılaştırılması ($t = 0$)

Sunulan modellerin ortalama yüzde hatası 1232 örnek veri için hesaplanarak Tablo 5.12’de verilmiştir. Tüm bu karşılaştırmalara bakıldığında GP kullanılarak elde edilen analiz modellerin klasik mikroşerit hatların karakteristik parametrelerin belirlenmesinde kullanılabilir bir doğruluğa sahip olduğu açıkça görülmektedir.



Analiz [60] (—— için $\epsilon_r = 2.65$, --- için $\epsilon_r = 4.2$, -.-.- için $\epsilon_r = 8.9$,
 ——— için $\epsilon_r = 11.7$, için $\epsilon_r = 20$, -.-.- için $\epsilon_r = 51$)
 Sunulan Analiz Modeli (ooo için $\epsilon_r = 2.65$, +++ için $\epsilon_r = 4.2$, □□□ için $\epsilon_r = 8.9$,
 *** için $\epsilon_r = 11.7$, ΔΔΔ için $\epsilon_r = 20$, ××× için $\epsilon_r = 51$)

Şekil 5.6. Analiz modelinden elde edilen karakteristik empedans sonuçlarının farklı ϵ_r değerleri için VM [60] sonuçlarıyla karşılaştırılması ($t = 0$)



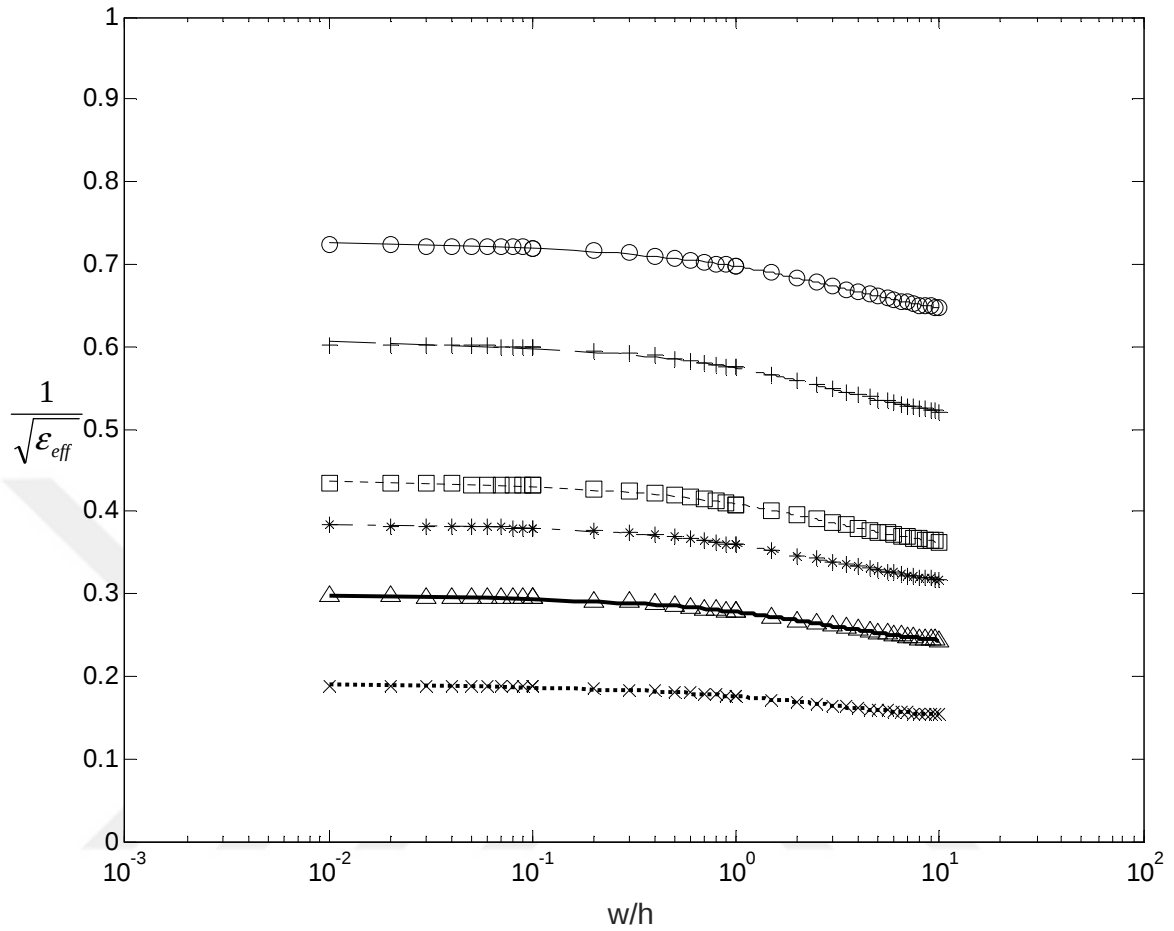
Analiz [60] (—— için $t/h = 0$, --- için $t/h = 0.02$, -.-.- için $t/h = 0.06$,
— için $t/h = 0.1$)

Sunulan Analiz Modeli (Z_0) (ooo için $t/h = 0$, +++ için $t/h = 0.02$,
□□□ için $t/h = 0.06$, *** için $t/h = 0.1$)

Şekil 5.7. Analiz modelinden elde edilen karakteristik empedans sonuçlarının farklı t/h değerleri için VM [60] sonuçlarıyla karşılaştırılması ($t \neq 0$)

Tablo 5.12. Klasik mikroşerit hatlar için önerilen analiz modellerin ortalama yüzde hataları

Analiz Modelleri	Ortalama Yüzde Hatalar (%)
Karakteristik Empedans (Z_0)	0.42
Efektif Dielektrik Sabiti (ϵ_{eff})	0.41



Analiz [60] (—— için $\epsilon_r = 2.65$, --- için $\epsilon_r = 4.2$, ----- için $\epsilon_r = 8.9$,
 -·-·- için $\epsilon_r = 11.7$, ——— için $\epsilon_r = 20$, ······ için $\epsilon_r = 51$)
 Sunulan Analiz Modeli (ϵ_{eff}) (○○○ için $\epsilon_r = 2.65$, + + + için $\epsilon_r = 4.2$,
 □ □ □ için $\epsilon_r = 8.9$, * * * için $\epsilon_r = 11.7$, Δ Δ Δ için $\epsilon_r = 20$, × × × için $\epsilon_r = 51$)

Şekil 5.8. Analiz modelinden elde edilen efektif dielektrik sabiti sonuçlarının farklı ϵ_r değerleri için VM [60] sonuçlarıyla karşılaştırılması ($t = 0$)

Sonuç olarak GP kullanılarak geliştirilen analiz modellerin doğruluğunu ve geçerliliğini ortaya koymak için literatürdeki CAD modeli [65] ve VM [60] sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda önerilen analiz modellerin literatürdeki sonuçlar ile iyi bir uyum içerisinde olması önerilen analiz modellerinin klasik mikroserit hatların karakteristik parametrelerini hesaplamak için kullanılabileceğini açık bir şekilde göstermektedir.

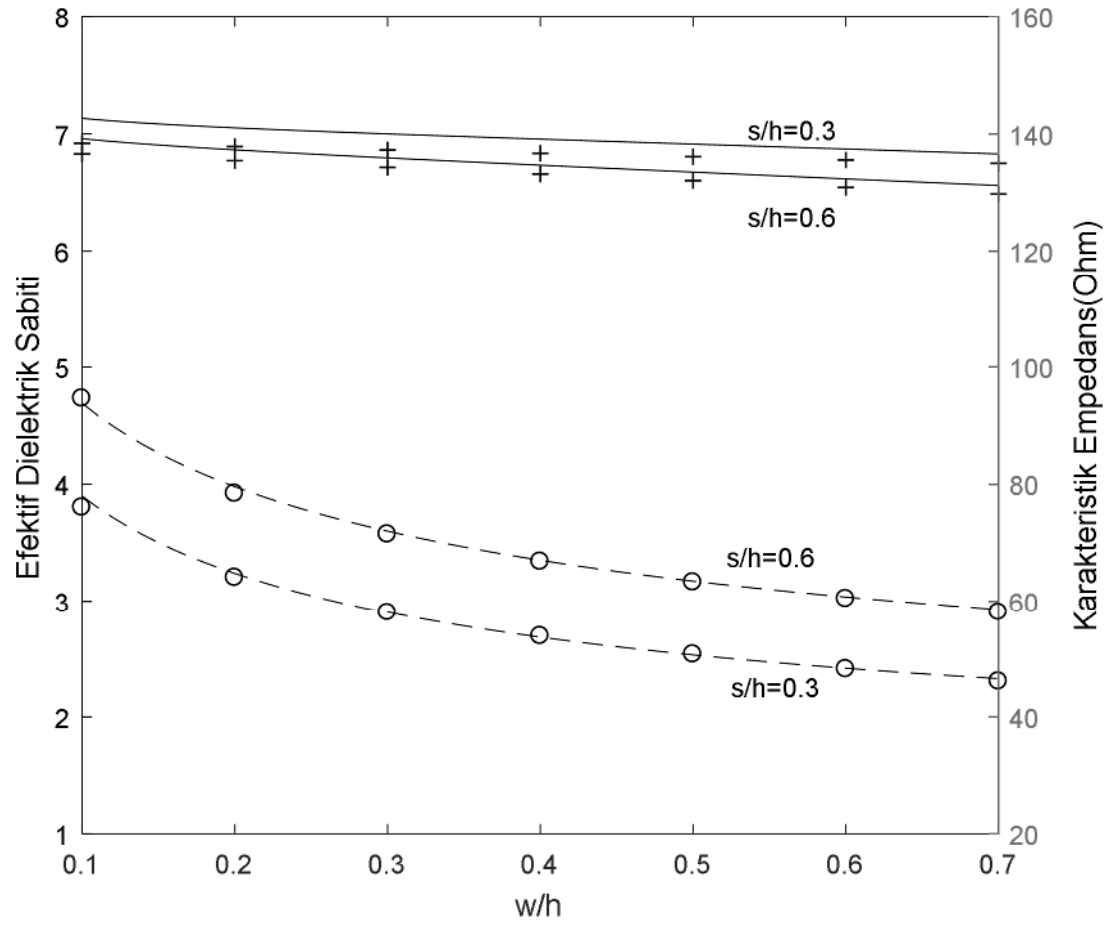
5.6. Sonlu Genişlikte Toprak Düzlemine Sahip EDDK'lar için Önerilen Analiz Modellerin Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'lar için önerilen analiz modellerinin geçerliliğini ve doğruluğunu ispat etmek için birçok karşılaştırma yapılmıştır. Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların karakteristik parametrelerini hesaplayan analiz modellerin sonuçları quasi-statik [81] analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

GP ile elde belirlenen analiz modellerinden elde edilen sonuçlar ile quasi-statik [81] analiz sonuçlarından elde edilen sonuçlar farklı ε_r değerleri için Şekil 5.9'da ve Şekil 5.10'da karşılaştırılmıştır. Karakteristik parametreleri belirlemek için sunulan analiz modellerinden elde edilen sonuçlar ile quasi-statik [81] analiz sonuçları karşılaştırıldığında aralarında iyi bir uyum olduğu bu şekillerden açıkça görülmektedir.

Farklı elektriksel parametrelere ve farklı geometrik boyutlara sahip sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'lara ait 9712 adet örnek veri için önerilen analiz modellerin ortalama yüzde hatası Tablo 5.13'te verilmiştir. Bu tablodan, GP kullanılarak elde edilen analiz modellerinin sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların karakteristik parametrelerin belirlenmesinde kullanılabilir bir doğruluğa sahip olduğu açıkça görülmektedir.

Sonuçta GP kullanılarak geliştirilen analiz modellerin doğruluğunu ve geçerliliğini ortaya koymak için literatürdeki quasi-statik analiz [81] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Önerilen analiz modellerinden elde edilen sonuçlar ile quasi-statik [81] analiz sonuçları karşılaştırıldığında aralarında iyi bir uyum olduğu açıkça görülmektedir.

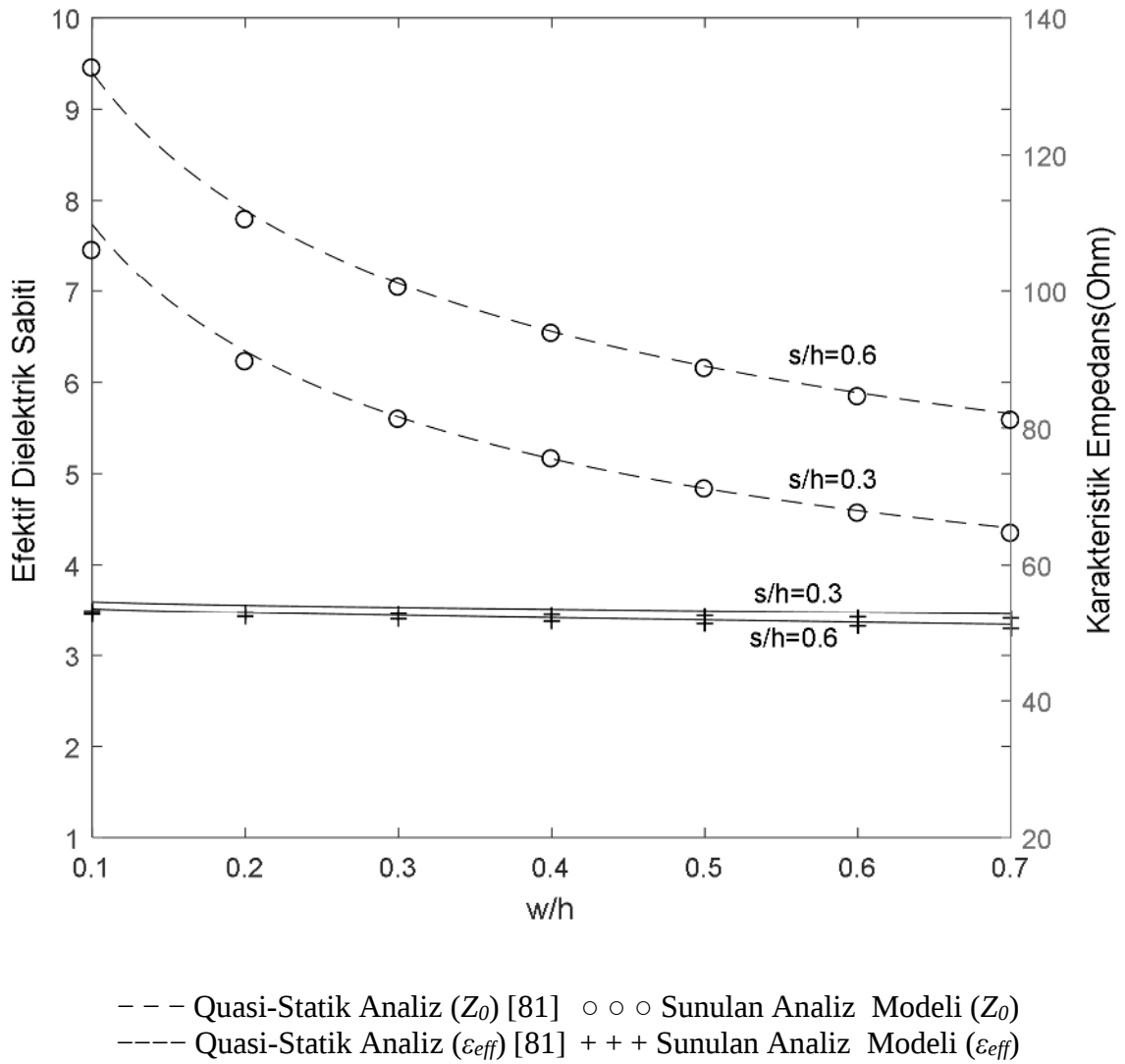


--- Quasi-Statik Analiz (Z_0) [81] o o o Sunulan Analiz Modeli (Z_0)
 ---- Quasi-Statik Analiz (ϵ_{eff}) [81] + + + Sunulan Analiz Modeli (ϵ_{eff})

Şekil 5.9. Analiz modelinden elde edilen sonuçların quasi-statik analiz [81] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 12.9$, $h = 100 \mu m$, $t = 0 \mu m$ ve $w_g = 100 \mu m$).

Tablo 5.13. Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'lar için önerilen analiz modellerin ortalama yüzde hataları

Analiz Modelleri	Ortalama Yüzde Hatalar (%)
Karakteristik Empedans (Z_0)	1.08
Efektif Dielektrik Sabiti (ϵ_{eff})	0.48



Şekil 5.10. Analiz modelinden elde edilen sonuçların quasi-statik analiz [81] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 6$, $h = 100 \mu m$, $t = 0 \mu m$ ve $w_g = 100 \mu m$).

Sonuç olarak GP kullanılarak geliştirilen analiz modellerin doğruluğunu ve geçerliliğini ortaya koymak için literatürdeki mevcut sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda önerilen analiz modellerin literatürdeki mevcut sonuçlar ile iyi bir uyum içerisinde olması önerilen analiz modellerin sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların karakteristik parametrelerini hesaplamak için kullanılabileceğini açık bir şekilde göstermektedir.

6. BÖLÜM

SENTEZ MODELLERİNİN SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

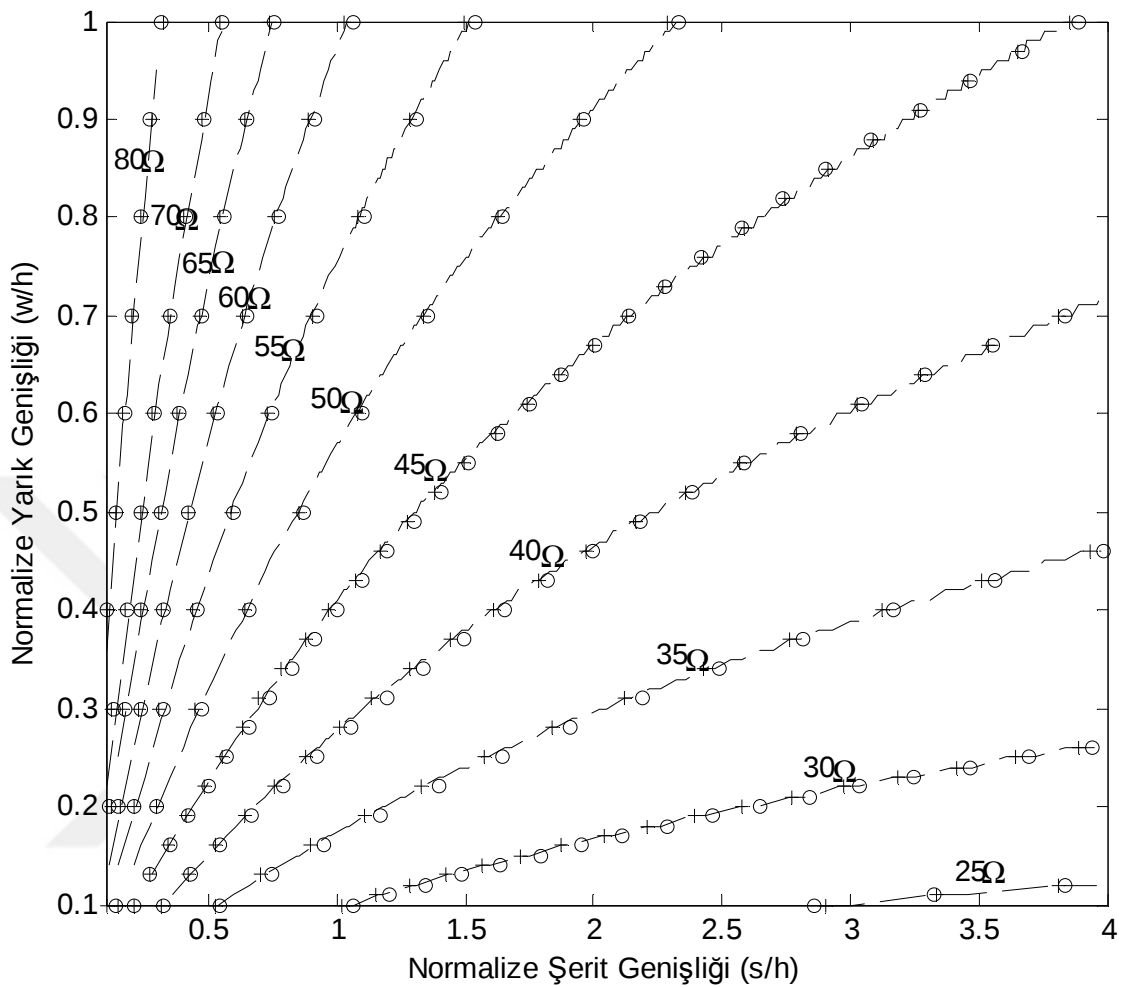
6.1. Giriş

Bu bölümde, tez çalışmasında önerilen sentez modellerin sonuçlarına yer verilmiştir. Önerilen sentez modellerin geçerliliğini ve doğruluğunu ispatlamak için literatürdeki mevcut çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

6.2. Dielektrik Taban Destekli EDDK'lar için Önerilen Sentez Modellerin Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen sentez modellerin geçerliliğini ve doğruluğunu ispat etmek için birçok karşılaştırma yapılmıştır. Dielektrik taban destekli EDDK'ların geometrik boyutlarını hesaplayan sentez modellerin sonuçları quasi-statik [88], SDA [88], GSDA [89], IE3D [35], literatürdeki diğer sentez modelleri [122], ve ölçüm sonuçlarıyla [35] karşılaştırılmıştır.

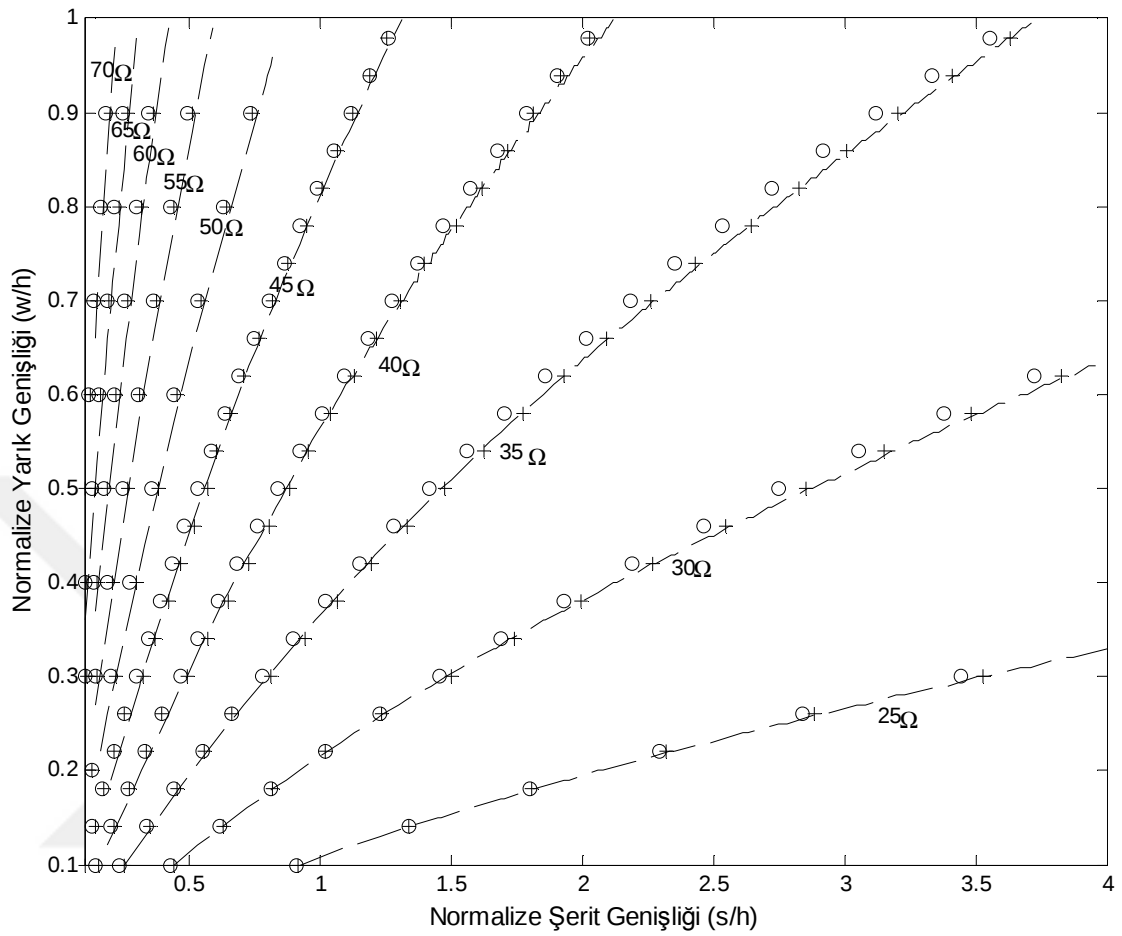
Şekil 6.1'de $\epsilon_{r1} = 3.78$, $\epsilon_{r2} = 12.9$ ve $h = 200 \mu m$ ve Şekil 6.2'de $\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 20$ ve $h = 200 \mu m$ olan dielektrik taban destekli EDDK'nın arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için birinci sentez modelinden elde edilen şerit genişliği $s(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, Z_0, w/h)$ sonuçları ile literatürdeki mevcut sentez modelleri [122] sonuçları ile quasi-statik analiz [88] sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 6.3'de $\epsilon_{r1} = 3.78$, $\epsilon_{r2} = 12.9$ ve $h = 200 \mu m$ ve Şekil 6.4'te ise $\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 20$ ve $h = 200 \mu m$ olan aynı iletim hattının arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için ikinci sentez modelinden elde edilen yarık genişliği $w(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, Z_0, s/h)$ sonuçları ile literatürdeki mevcut sentez modelleri [122] sonuçları ile quasi-statik analiz [88] sonuçları karşılaştırılmıştır. Sentez modellerinin sonuçları ile literatürdeki mevcut sentez modelleri [122] sonuçları ile quasi-statik analiz [88] sonuçları çok iyi bir uyum içerisinde olduğu bu şekillerden açıkça görülmektedir.



---Analiz [88], o o o Birinci Sentez Modeli (s), + + + Sentez Model [122]

Şekil 6.1. Birinci sentez modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [88] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 3.78$, $\epsilon_{r2} = 12.9$, $h = 200 \mu m$).

GP kullanılarak elde edilen sentez modellerinin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerleri ile literatürdeki mevcut sentez modelleri [122] sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerleri ile quasi-statik analiz [88] sonuçları farklı s/h değerleri için Şekil 6.5’de karşılaştırılmıştır. Bu şekilden açıkça görülebileceği gibi sunulan sentez modellerinden elde edilen sonuçlar ile literatürdeki diğer sentez modellerin [122] sonuçları ile quasi-statik analiz sonuçları iyi bir uyum içinde olduğu görülmekte olup ayrıca birinci ve ikinci sentez modelleri kendi arasında da iyi bir uyum içindedir.

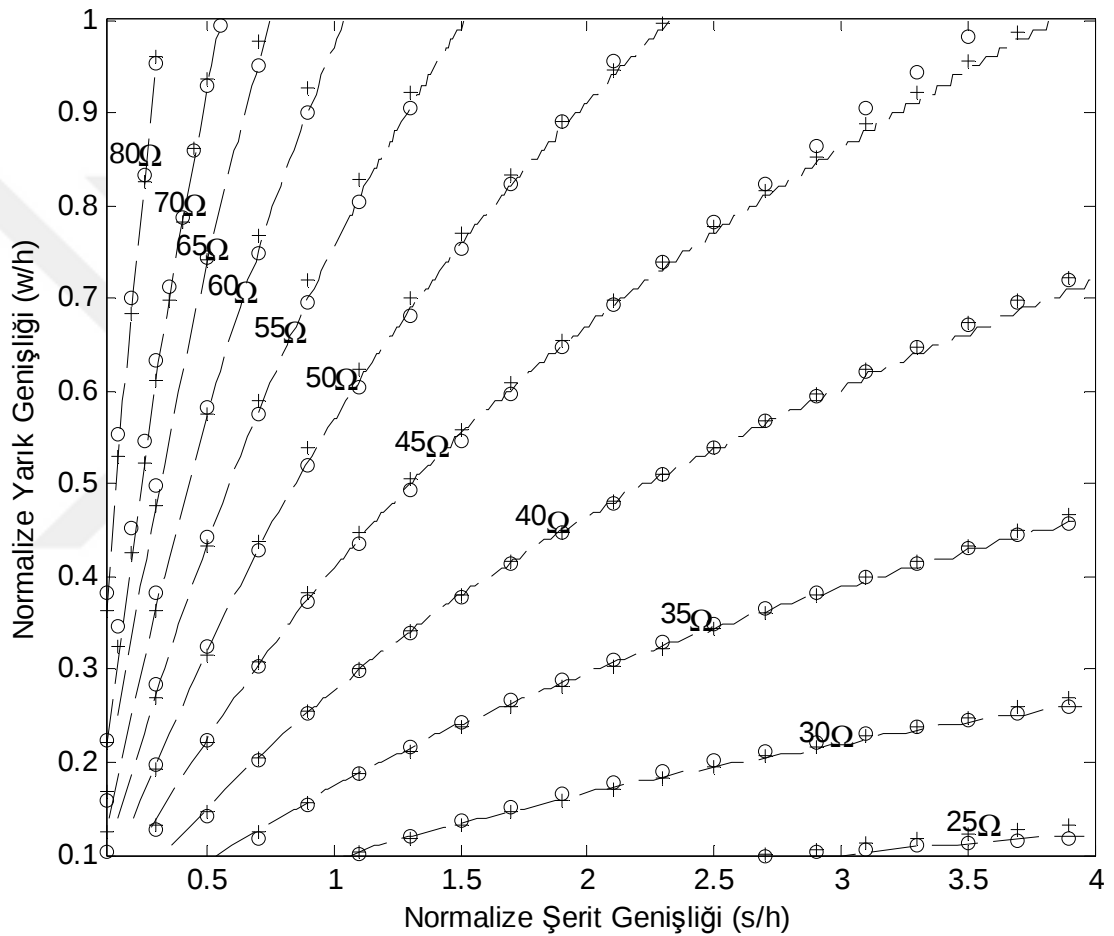


--- Analiz [88], ○ ○ ○ Birinci Sentez Modeli (s), + + + Sentez Model [122]

Şekil 6.2. Birinci sentez modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [88] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 20$, $h = 200 \mu m$).

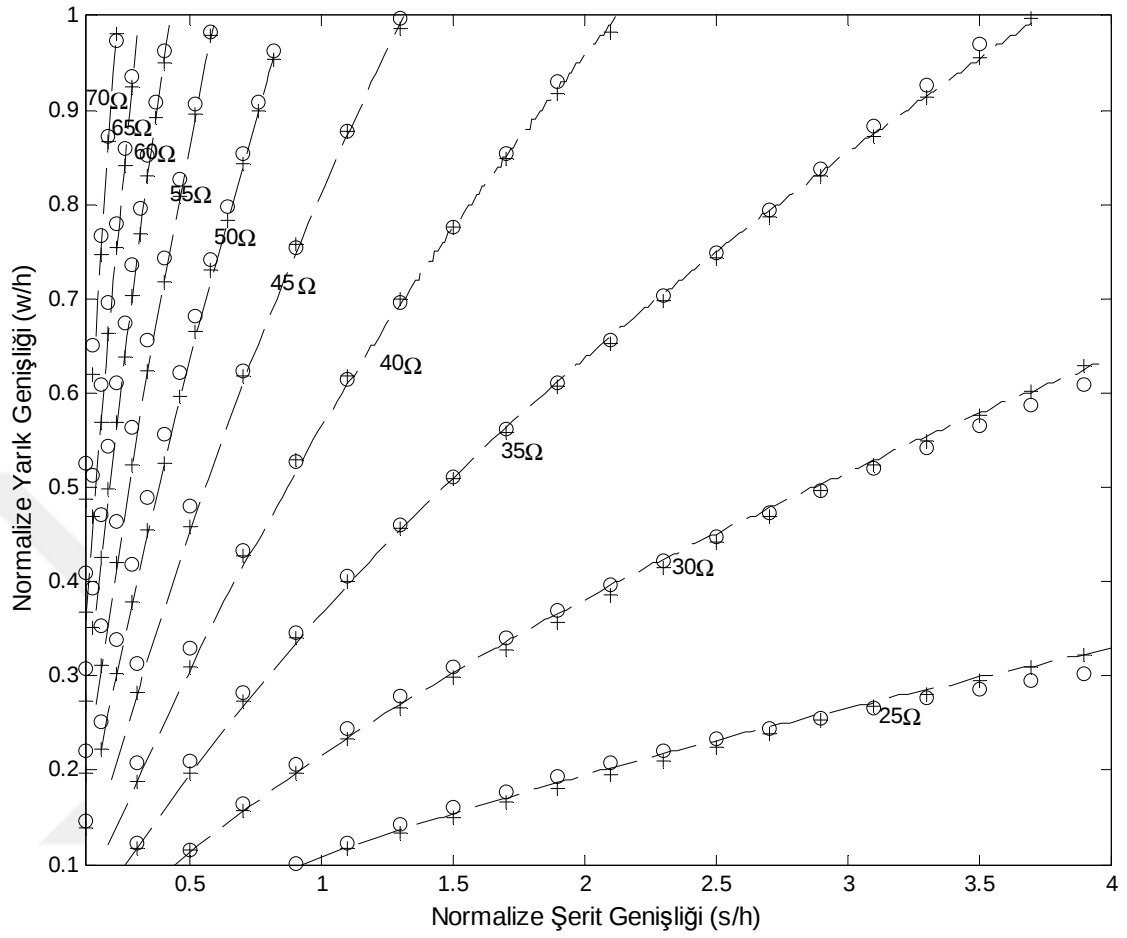
Sunulan sentez modellerinin sonuçlarından elde edilen karakteristik empedans değerleri KDT [88] sonuçları, IE3D [35] sonuçları, deneysel sonuçlar [35] ve diğer sentez formüllerinden [122] elde edilmiş sonuçlar Tablo 6.1’de karşılaştırılmıştır. Bu tabloda w' , s' ve Z_0' deneysel sonuçları; $Z_0(w', s')$: w' ve s' değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(w, s')$: verilen s' ve literatürdeki sentez formülünden elde edilen w değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(w', s)$ ise verilen w' ve literatürdeki sentez formülünden elde edilen s değerleri kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerini göstermektedir. $Z_0(w^*, s')$: verilen s' ve sentez modelinden elde edilen w^* değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(w', s^*)$ ise verilen w' ve sentez

modelinden elde edilen s^* değerleri kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerini göstermektedir. Tablo 6.1'den açıkça görüldüğü gibi sentez modellerinden elde edilen sonuçlar, KDT [88], literatürdeki diğer sentez modelleri [122], IE3D [35] ve ölçüm sonuçlarıyla [35] iyi bir uyum içerisinde.



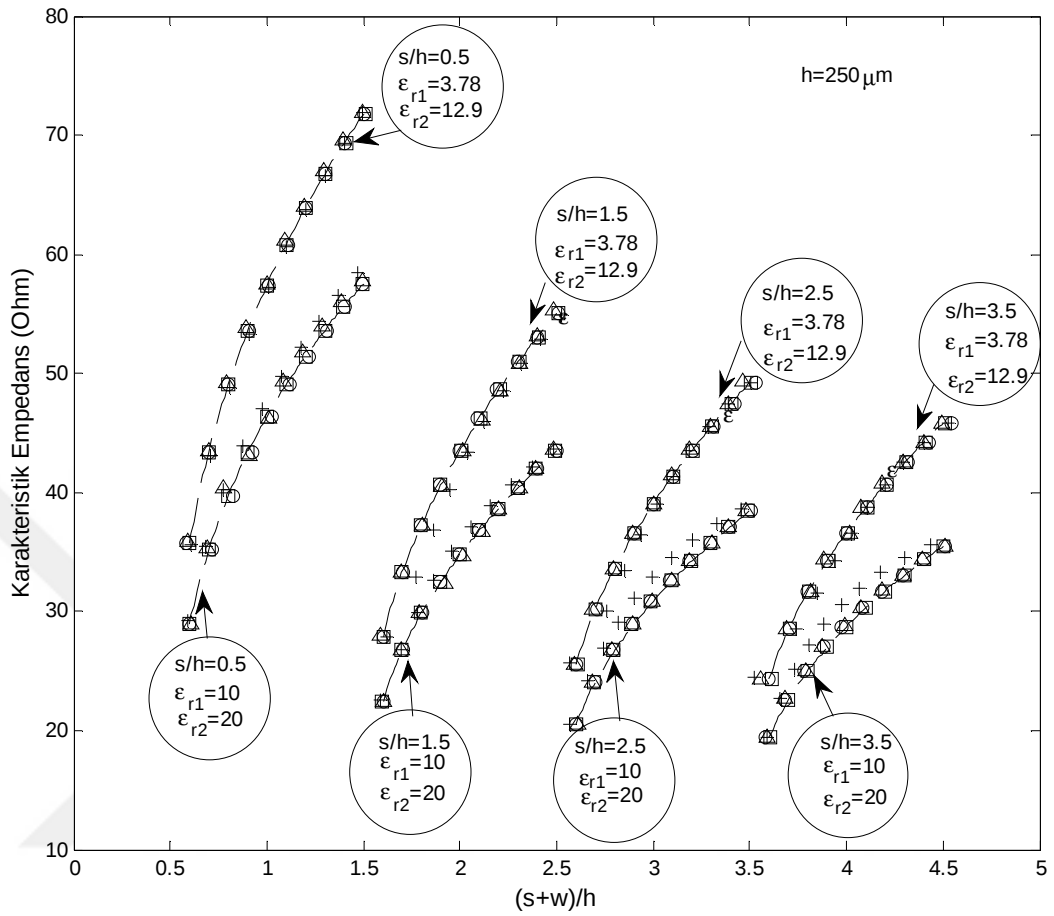
-- -- Analiz [88], ○ ○ ○ İkinci Sentez Modeli (w), + + + Sentez Model [122]

Şekil 6.3. İkinci sentez modelinden elde edilen yarık genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [88] sonuçları ile karşılaştırılması
($\epsilon_{r1} = 3.78$, $\epsilon_{r2} = 12.9$, $h = 200 \mu m$).



-- -- Analiz [88], ○ ○ ○ İkinci Sentez Modeli (w), + + + Sentez Model [122]

Şekil 6.4. İkinci sentez modelinden elde edilen yarık genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [88] sonuçları ile karşılaştırılması
($\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 20$, $h = 200 \mu m$).



Şekil 6.5. Sentez modellerinin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz [88] sonuçları ile karşılaştırılması

Sentez modellerinden elde edilen geometrik boyutlar ve bu boyutlar kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerleri KDT [88], spektral domen analizi (SDA) [88], ve geliştirilmiş SDA (GSDA) [89] sonuçları ile Tablo 6.2 - Tablo 6.4'te karşılaştırılmıştır. Ayrıca w' ve s' ile gösterilen gerçek boyutlar da bu tablolarda verilmiştir. Bu tablolarda $Z_0(w', s')$: verilen w' ve s' değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(w, s')$: verilen s' ve literatürdeki sentez modelinden [122] elde edilen w değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(w', s)$ ise verilen w' ve literatürdeki sentez modelinden [122] elde edilen s değerleri kullanılarak elde edilen

karakteristik empedans değerlerini temsil etmektedir. $Z_0(w^*, s')$: verilen s' ve literatürdeki sunulan sentez modelinden elde edilen w^* değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(w', s^*)$ ise verilen w' ve literatürdeki sentez modelinden elde edilen s^* değerleri kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerini göstermektedir.

Tablo 6.2- Tablo 6.4'ten de görüldüğü gibi sentez modellerden elde edilen geometrik boyutlar (w^* ve s^*), gerçek geometrik boyutlar (w' ve s') ile uyum içerisindedir. Buna bağlı olarak sentez modellerin sonuçları kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerleri KDT [88], spektral domen analizi (SDA) [88], ve geliştirilmiş SDA (GSDA) [89] sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisindedir. Ayrıca Tablo 6.5'de ise dielektrik taban destekli EDDK'nın için önerilen sentez modellerin geometrik boyutlara göre ve karakteristik empedansa göre ortalama yüzde hataları verilmektedir. Tüm bu karşılaştırmalara bakıldığında GP kullanılarak elde edilen sentez modellerinin dielektrik taban destekli EDDK'ların geometrik boyutların hesaplamasında kullanılabilir bir doğruluğa sahip olduğu açıkça görülmektedir.

Tablo 6.1. Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen sentez modellerinden elde edilen sonuçların KDT, IE3D, deneysel sonuçlar ve literatürdeki diğer sentez modeli ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 6.15$, $\epsilon_{r2} = 10.2$, $h = 1270 \mu m$, $f = 2 \text{ GHz}$).

DENEYSEL [35]			KDT [88]	IE3D [35]	Sentez modeller [122]				Sunulan Sentez Modelleri			
w' (μm)	s' (μm)	Z_0' (Ω)	Z_0 (w', s') (Ω)	Z_0 (w', s') (Ω)	w (μm)	Z_0 (w, s') (Ω)	s (μm)	Z_0 (w', s) (Ω)	w^* (μm)	Z_0 (w^*, s') (Ω)	s^* (μm)	Z_0 (w', s^*) (Ω)
450	1000	47.47	50.21	48.80	447	50.11	1019	49.96	437	49.83	1025.1	49.90
500	1200	48.34	49.33	47.57	529	50.18	1149	49.91	515	49.80	1152.4	49.90
550	1300	47.48	49.70	47.91	568	50.19	1281	49.90	552	49.79	1282.4	49.91
600	1400	46.66	50.04	48.21	605	50.17	1417	49.88	588	49.77	1415.3	49.93
650	1500	47.01	50.35	48.48	641	50.14	1560	49.84	624	49.76	1551.3	49.94

Tablo 6.2. Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen sentez modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 20$, $h = 200 \mu m$)

$w' (\mu m)$	$s' (\mu m)$	KDT [88]	SDA [88]	GSDA [89]	Sentez modeller [122]				Sunulan Sentez Modelleri			
		$Z_0 (w', s') (\Omega)$	$Z_0 (w', s') (\Omega)$	$Z_0 (w', s') (\Omega)$	$w (\mu m)$	$Z_0 (w, s') (\Omega)$	$s (\mu m)$	$Z_0 (w', s) (\Omega)$	$w^* (\mu m)$	$Z_0 (w^*, s') (\Omega)$	$s^* (\mu m)$	$Z_0 (w', s^*) (\Omega)$
20	20	45.51	45.85	45.38	20	45.51	19	46.19	18.27	44.37	17.56	47.27
	60	33.24	33.38	33.15	20	33.24	61	33.09	19.29	32.92	56.97	33.74
	120	27.68	27.12	27.56	21	28.01	120	28.01	20.05	27.69	117.83	27.80
	200	24.52	24.50	24.37	20	24.52	200	24.52	20.66	24.70	198.35	24.55
	800	19.01	18.83	18.76	22	19.37	790	19.03	15.33	18.01	805.93	18.98
60	20	61.82	62.01	61.49	61	62.10	17	64.45	68.61	64.09	17.91	63.64
	60	45.81	45.83	45.60	60	45.81	54	47.19	66.57	47.27	55.55	46.84
	120	37.73	37.67	37.51	61	37.92	115	38.17	63.53	38.40	116.31	38.08
	200	32.95	32.61	32.70	60	32.95	197	33.08	61.83	33.26	197.57	33.07
	800	24.41	24.05	24.00	60	24.41	799	24.39	55.63	23.94	787.77	24.47
100	20	70.56	70.60	70.02	100	70.56	20	70.56	107.84	71.96	18.70	71.73
	60	53.26	53.18	52.90	100	53.26	60	53.26	107.87	54.50	55.44	54.44
	120	44.09	43.90	43.73	101	44.22	123	43.79	103.96	44.65	115.21	44.61
	200	38.47	38.19	38.07	102	38.71	204	38.27	101.29	38.64	194.98	38.74
	800	27.98	27.48	27.43	100	27.98	798	27.96	95.66	27.62	778.60	28.12
200	20	83.77	83.24	82.62	199	83.67	24	80.59	186.04	82.35	20.28	83.58
	60	65.28	64.80	64.45	199	65.19	61	65.02	199.38	65.26	55.27	66.64
	120	54.87	54.31	54.09	200	54.87	118	55.11	200.34	54.93	114.38	55.58
	200	48.95	47.50	47.34	208	48.78	185	49.11	210.23	48.98	184.15	49.20
	800	34.42	33.66	33.63	201	34.47	811	34.31	203.94	34.66	793.15	34.51

Tablo 6.3. Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen sentez modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 3.78$, $\epsilon_{r2} = 12.9$, $h = 200 \mu m$)

$w' (\mu m)$	$s' (\mu m)$	KDT [88]	SDA [88]	GSDA [89]	Sentez modeller [122]				Sunulan Sentez Modelleri			
		Z_0 (w', s') (Ω)	Z_0 (w', s') (Ω)	Z_0 (w', s') (Ω)	w (μm)	$Z_0(w, s')$ (Ω)	Z_0 (w', s') (Ω)	$Z_0(w', s)$ (Ω)	w^* (μm)	Z_0 (w^*, s') (Ω)	s^* (μm)	Z_0 (w', s^*) (Ω)
20	20	55.96	56.37	55.79	19	55.14	20	55.96	13.12	49.54	18.50	57.26
	60	40.90	41.08	40.79	19	40.31	59	41.09	15.73	38.26	59.06	41.10
	120	34.11	34.16	33.96	20	34.11	116	34.36	17.47	32.91	121.34	34.00
	200	30.30	30.28	30.12	20	30.30	195	30.43	18.96	29.88	203.30	30.17
	800	23.73	23.72	23.63	22	24.39	829	23.79	18.05	23.41	836.43	23.77
60	20	76.09	76.32	75.69	60	76.09	21	75.14	63.38	77.26	19.23	76.91
	60	56.46	56.50	55.21	59	56.18	59	56.73	62.15	57.09	59.29	56.68
	120	46.62	46.56	46.37	60	46.62	119	46.73	59.97	46.64	123.67	46.27
	200	40.88	40.72	40.58	60	40.88	201	40.83	59.34	40.77	209.60	40.44
	800	30.99	30.56	30.49	62	31.23	806	30.92	59.75	30.95	813.14	30.90
100	20	86.97	87.03	86.32	100	86.97	21	85.97	103.86	87.88	20.08	86.94
	60	65.80	65.71	65.37	99	65.60	59	66.10	103.85	66.59	59.42	66.01
	120	54.65	54.44	54.23	100	54.65	120	54.65	100.35	54.74	122.48	54.38
	200	47.91	47.60	47.44	102	48.21	202	47.79	98.64	47.72	206.36	47.57
	800	35.76	35.16	35.09	102	35.93	805	35.68	100.12	35.76	810.69	35.66
200	20	103.80	103.20	102.42	202	104.08	23	100.82	188.03	102.24	21.07	102.75
	60	81.22	80.66	80.21	202	81.47	61	80.90	199.53	81.21	58.82	81.65
	120	68.62	67.95	67.67	203	68.96	119	68.75	199.67	68.61	120.44	68.59
	200	60.58	59.80	59.61	204	61.00	198	60.72	199.63	60.57	204.26	60.31
	800	44.60	43.65	43.59	202	44.75	808	44.50	209.32	45.33	816.21	44.44

Tablo 6.4. Dielektrik taban destekli EDDK'lar için önerilen sentez modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 12.9$, $h = 200 \mu m$)

$w' (\mu m)$	$s' (\mu m)$	KDT [88]	SDA [88]	GSDA [89]	Sentez modeller [122]				Sunulan Sentez Modelleri			
		$Z_0 (w', s') (\Omega)$	$Z_0 (w', s') (\Omega)$	$Z_0 (w', s') (\Omega)$	$w (\mu m)$	$Z_0(w, s') (\Omega)$	$s (\mu m)$	$Z_0 (w', s) (\Omega)$	$w^* (\mu m)$	$Z_0 (w^*, s') (\Omega)$	$s^* (\mu m)$	$Z_0 (w', s^*) (\Omega)$
20	20	55.91	56.33	55.75	20	55.91	20	55.91	13.81	50.26	18.23	57.46
	60	40.79	40.98	40.69	20	40.79	61	40.61	16.62	38.76	57.21	41.37
	120	33.90	33.96	33.76	21	34.30	120	33.90	18.46	33.18	115.87	34.19
	200	29.98	29.92	29.77	21	30.23	194	30.09	20.06	29.91	191.85	30.18
	800	22.60	22.47	22.40	23	23.21	808	22.53	18.88	22.33	860.39	22.30
60	20	75.84	76.09	75.46	62	76.50	18	77.93	65.35	77.60	18.98	76.93
	60	56.07	56.14	55.86	61	56.35	57	56.90	64.86	57.40	57.41	56.82
	120	46.01	46.00	45.82	61	46.24	120	46.01	62.72	46.64	117.76	46.29
	200	39.96	39.89	39.75	62	40.34	203	39.81	61.60	40.29	198.28	40.08
	800	28.69	28.43	28.38	61	28.78	810	28.59	59.30	28.60	827.74	28.47
100	20	86.36	86.48	85.77	101	86.58	19	87.43	106.15	87.69	20.01	86.41
	60	64.98	64.97	64.64	101	65.17	60	64.98	10.757	66.39	58.23	65.57
	120	53.92	53.42	53.22	103	54.00	119	53.65	106.72	54.61	114.97	54.21
	200	46.39	46.22	46.07	104	46.94	203	46.21	101.67	46.65	197.31	46.60
	800	32.61	32.25	32.22	102	32.75	810	32.49	98.71	32.49	817.36	32.44
200	20	101.80	101.50	100.60	200	101.80	23	98.74	186.34	100.18	21.98	99.78
	60	78.85	78.94	78.12	200	78.85	60	78.85	200.41	78.94	61.00	78.57
	120	65.81	65.44	65.18	198	65.62	117	66.26	201.17	65.97	123.27	65.38
	200	57.26	56.22	56.66	202	57.44	195	57.67	199.97	57.29	205.28	56.89
	800	39.47	38.95	38.95	203	39.65	805	39.41	202.68	39.65	807.39	39.41

Tablo 6.5. Dielektrik taban destekli EDDK'nın için önerilen sentez modellerin geometrik boyutlara göre ve karakteristik empedansa göre ortalama yüzde hataları

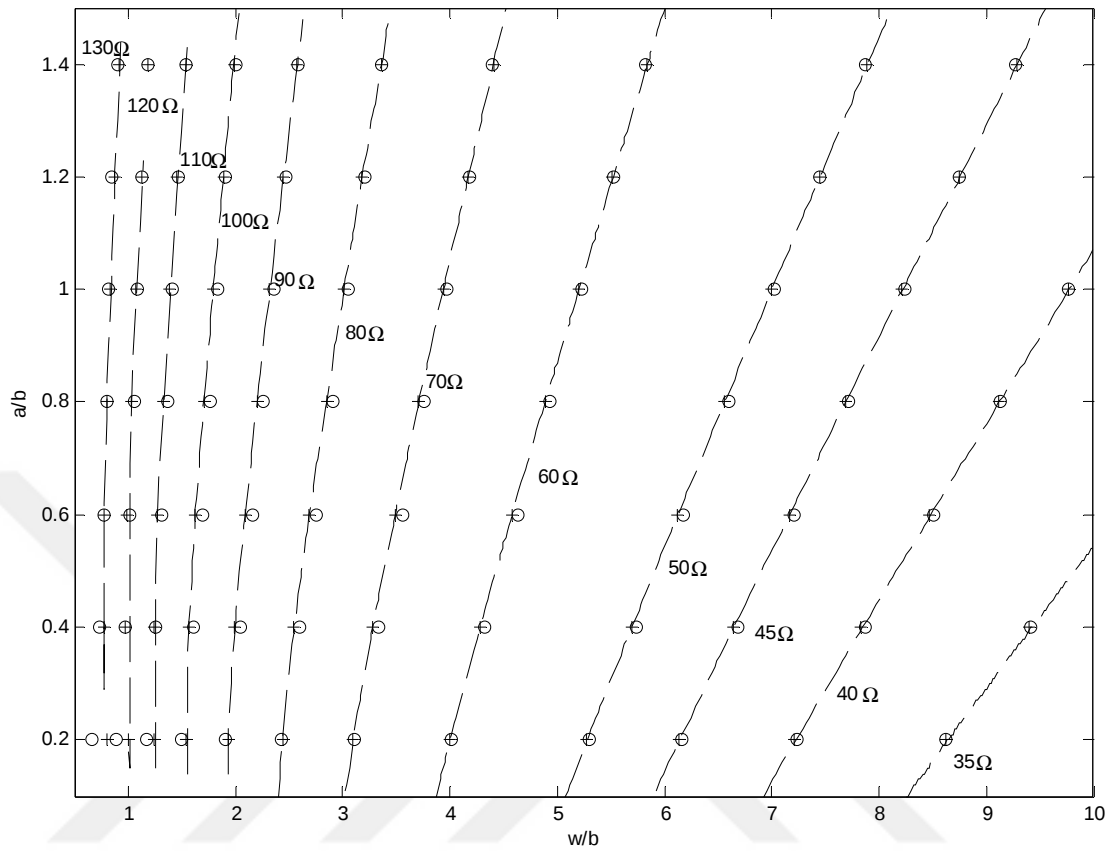
Sentez Modelleri	Geometrik Boyutlara Göre Ortalama Yüzde Hatalar (%)	Karakteristik Empedansa Göre Ortalama Yüzde Hatalar (%)
Şerit Genişliği (s)	2.01	0.45
Yarık Genişliği (w)	2.21	0.64

Sonuç olarak GP kullanılarak geliştirilen sentez modellerin doğruluğunu ve geçerliliğini ortaya koymak için literatürdeki mevcut sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda önerilen sentez modellerin literatürdeki mevcut sonuçlar ile iyi bir uyum içerisinde olması önerilen sentez modellerin dielektrik taban destekli EDDK'ların geometrik boyutlarını hesaplamak için kullanılabileceğini açık bir şekilde göstermektedir.

6.3. Asılı Mikroşerit Hatlar için Önerilen Sentez Modelin Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Asılı mikroşerit hatlar için önerilen sentez modelin geçerliliğini ve doğruluğunu ispat etmek için birçok karşılaştırma yapılmıştır. Asılı mikroşerit hatlar geometrik boyutlarını hesaplayan sentez modelin sonuçları quasi-statik analiz [72] sonuçları ve T&B'nin sentez sonuçları [72] ile karşılaştırılmıştır.

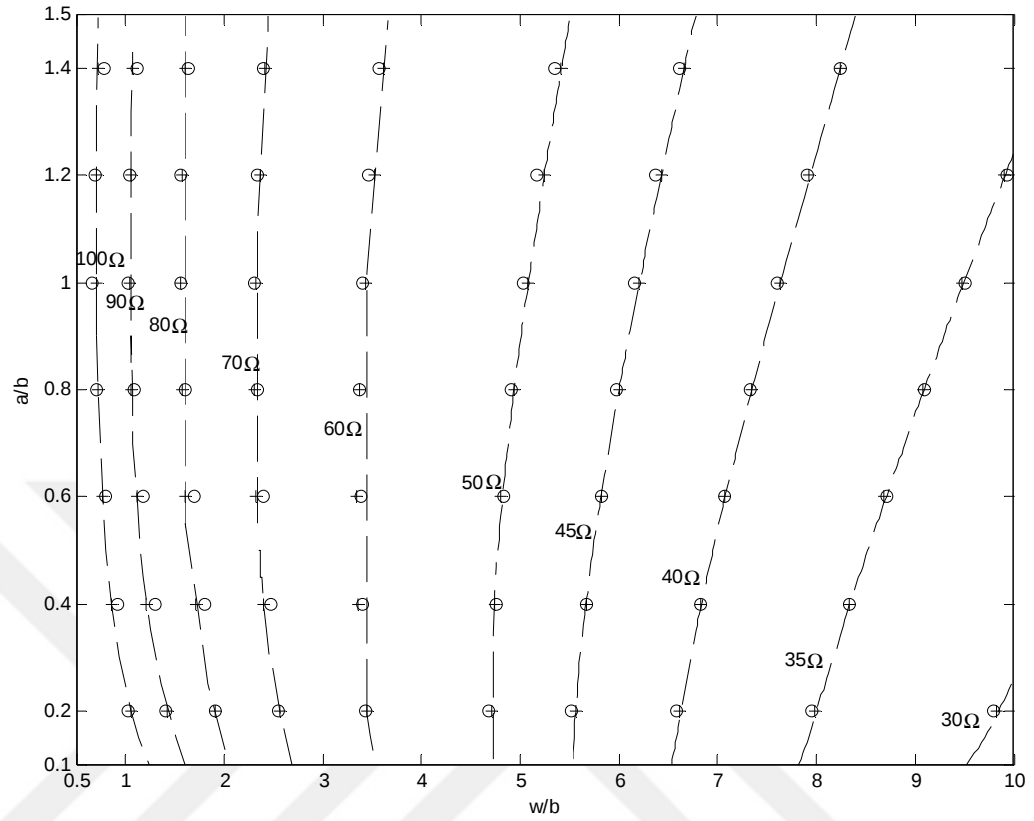
Şekil 6.6'da ve Şekil 6.7'de sırasıyla $\epsilon_{r2} = 3.78$ ve $\epsilon_{r2} = 12.9$ değerleri için asılı mikroşerit hatların arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için sunulan sentez modelinden elde edilen şerit genişliği $w(\epsilon_{r2}, Z_0, a, b)$ sonuçları, T&B'nin sonuçları [72] quasi-statik analiz [72] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca Şekil 6.8'de farklı a/b değerleri için önerilen sentez modelinden elde edilen karakteristik empedans sonuçları ile quasi-statik analiz [72] sonuçları karşılaştırılmıştır. Buna göre sunulan sentez modelin sonuçlarının quasi-statik analiz [72] sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisinde olduğu bu şekillerden açıkça görülmektedir.



-- Quasi-Statik Analiz [72], o o o Sunulan Sentez Modeli,
 +++ T&B'nin Sentez Metodu [72]

Şekil 6.6. Asılı mikroşerit hatlar için önerilen sentez modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [72] sonuçları ve T&B'nin sentez sonuçları [72] ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r2}=3.78$)

Tablo 6.6'da ise asılı mikroşerit hatlar için GP ile geliştirilen sentez modeli ve sentez metot [72] sonuçları farklı geometrik boyutlar ve farklı bağıl dielektrik sabitleri için karşılaştırılmıştır. Sunulan sentez modelin ortalama yüzde hatası 3600 örnek veri için hesaplanarak Tablo 6.7'de verilmiştir. Tüm bu karşılaştırmalara bakıldığında GP kullanılarak elde edilen sentez modelin asılı mikroşerit hatların geometrik boyutların hesaplamasında kullanılabilir bir doğruluğa sahip olduğu açıkça görülmektedir.

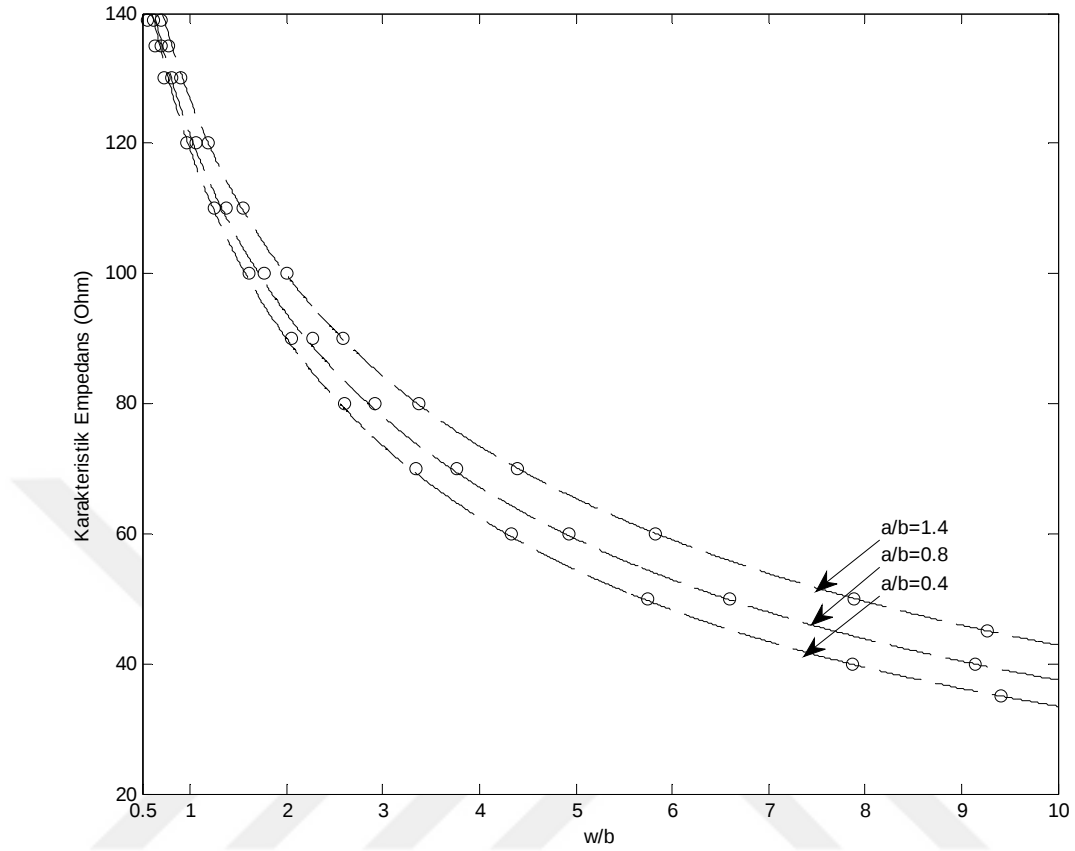


--- Quasi-Statik Analiz [72], o o o Sunulan Sentez Modeli,
 + + + T&B'nin Sentez Metodu [72]

Şekil 6.7. Asılı mikroşerit hatlar için önerilen sentez modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [72] sonuçları ve T&B'nin sentez sonuçları [72] ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r2}=12.9$)

Tablo 6.6. Asılı mikroşerit hatlar için GP ile geliştirilen sentez modeli ve sentez metot [72] sonuçlarının karşılaştırılması

$Z_0 (\Omega)$	$\epsilon_{r2}=4.2, a/b=1.2$				$\epsilon_{r2}=20, a/b=1.2$			
	Sentez Metot [72]		Sunulan Sentez Modeli		Sentez Metot [72]		Sunulan Sentez Modeli	
	w/b^*	$Z_0(w/b^*) (\Omega)$	w/b'	$Z_0(w/b') (\Omega)$	w/b^*	$Z_0(w/b^*) (\Omega)$	w/b'	$Z_0(w/b') (\Omega)$
30	15.77	30.08	15.15	30.81	11.64	29.81	11.75	29.83
40	10.17	40.04	10.17	40.04	7.01	39.96	7.05	39.85
50	7.24	50.03	7.24	50.03	4.41	49.87	4.40	50.04
60	5.34	60.00	5.33	60.07	2.78	59.88	2.77	60.06
70	4.01	69.99	4.01	69.99	1.73	69.94	1.72	70.13
80	3.04	80.00	3.05	79.87	1.07	79.88	1.04	80.72
90	2.32	90.00	2.33	89.80	0.67	89.40	0.60	92.43
100	1.77	100.00	1.78	99.84	0.43	98.08	0.33	105.66
110	1.36	109.94	1.36	109.94	0.27	110.23	0.19	118.76
120	1.04	120.07	1.03	120.25	0.18	119.66	0.13	126.38



--- Quasi-Statik Analiz [72], o o o Sunulan Sentez Modeli

Şekil 6.8 Asılı mikroşerit hatlar için sunulan sentez modelleri kullanılarak elde edilen karakteristik empedans sonuçları ile quasi statik analiz [72] sonuçlarının karşılaştırılması ($\epsilon_{r2}=3.78$)

Tablo 6.7. Asılı mikroşerit hatlar için önerilen sentez modelin geometrik boyutlara göre ve karakteristik empedansa göre ortalama yüzde hataları

Sentez Modeli	Geometrik Boyutlara Göre Ortalama Yüzde Hatalar (%)	Karakteristik Empedansa Göre Ortalama Yüzde Hatalar (%)
Şerit Genişliği (w)	2.09	0.85

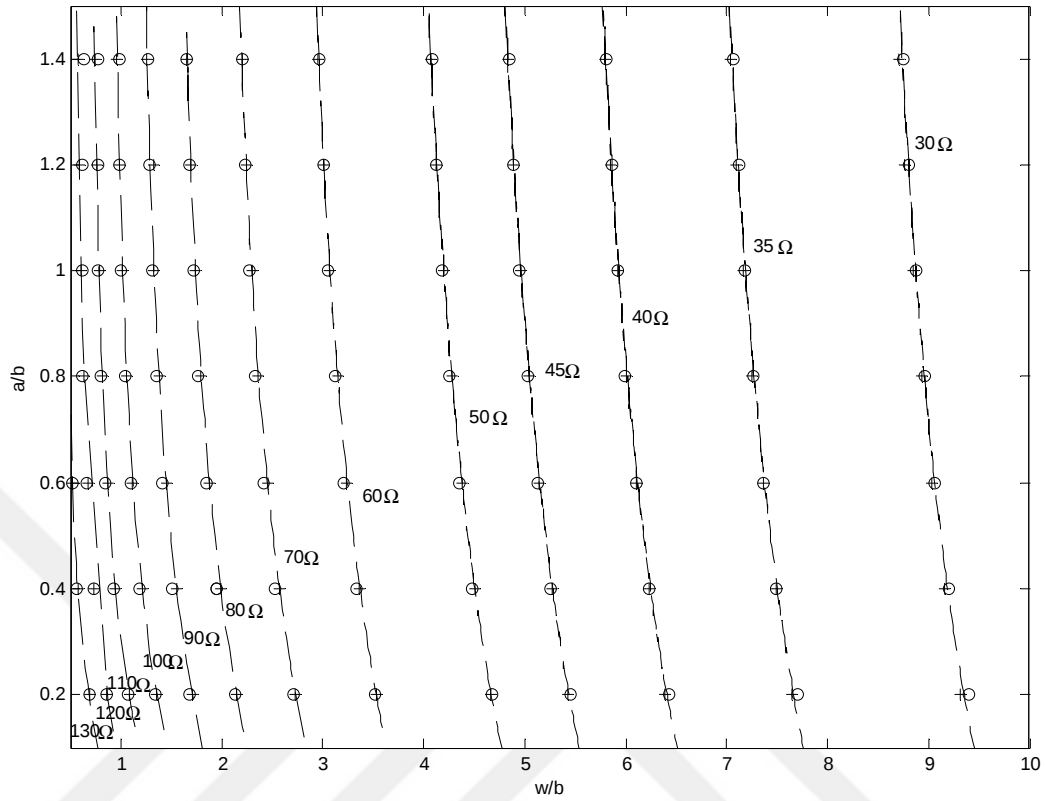
Sonuç olarak GP kullanılarak geliştirilen sentez modelin doğruluğunu ve geçerliliğini ortaya koymak için literatürdeki mevcut sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda önerilen sentez modelin literatürdeki mevcut sonuçlar ile iyi bir uyum içerisinde olması önerilen sentez modelin asılı mikroşerit hatların geometrik boyutlarını hesaplamak için kullanılabileceğini açık bir şekilde göstermektedir.

6.4. Ters Mikroşerit Hatlar için Önerilen Sentez Modelin Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Ters mikroşerit hatlar için önerilen sentez modelin geçerliliğini ve doğruluğunu ispat etmek için birçok karşılaştırma yapılmıştır. Ters mikroşerit hatların geometrik boyutlarını hesaplayan sentez modelin sonuçları quasi-statik analiz [72] sonuçları ve T&B'nin sentez sonuçları [72] ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 6.9'de ve Şekil 6.10'da sırasıyla $\epsilon_{r2} = 3.78$ ve $\epsilon_{r2} = 12.9$ değerleri için ters mikroşerit hatların arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için sunulan sentez modelinden elde edilen şerit genişliği $w(\epsilon_{r2}, Z_0, a, b)$ sonuçları, T&B'nin sonuçları [72] quasi-statik analiz [72] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca Şekil 6.11'da farklı a/b değerleri için önerilen sentez modelinden elde edilen karakteristik empedans sonuçları ile quasi-statik analiz [72] sonuçları karşılaştırılmıştır. Buna göre sunulan sentez modelin sonuçlarının quasi-statik analiz [72] sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisinde olduğu bu şekilden açıkça görülmektedir.

Tablo 6.8'de ters mikroşerit hatlar için GP ile geliştirilen sentez modeli ve sentez metot [72] sonuçları farklı geometrik boyutlar ve farklı bağıl dielektrik sabitleri için karşılaştırılmıştır. Sunulan sentez modelin ortalama yüzde hatası 3600 örnek veri için hesaplanarak Tablo 6.9'da verilmiştir. Tüm bu karşılaştırmalara bakıldığında GP kullanılarak elde edilen sentez modelinin ters mikroşerit hatlar geometrik boyutların hesaplamasında kullanılabilir bir doğruluğa sahip olduğu açıkça görülmektedir.

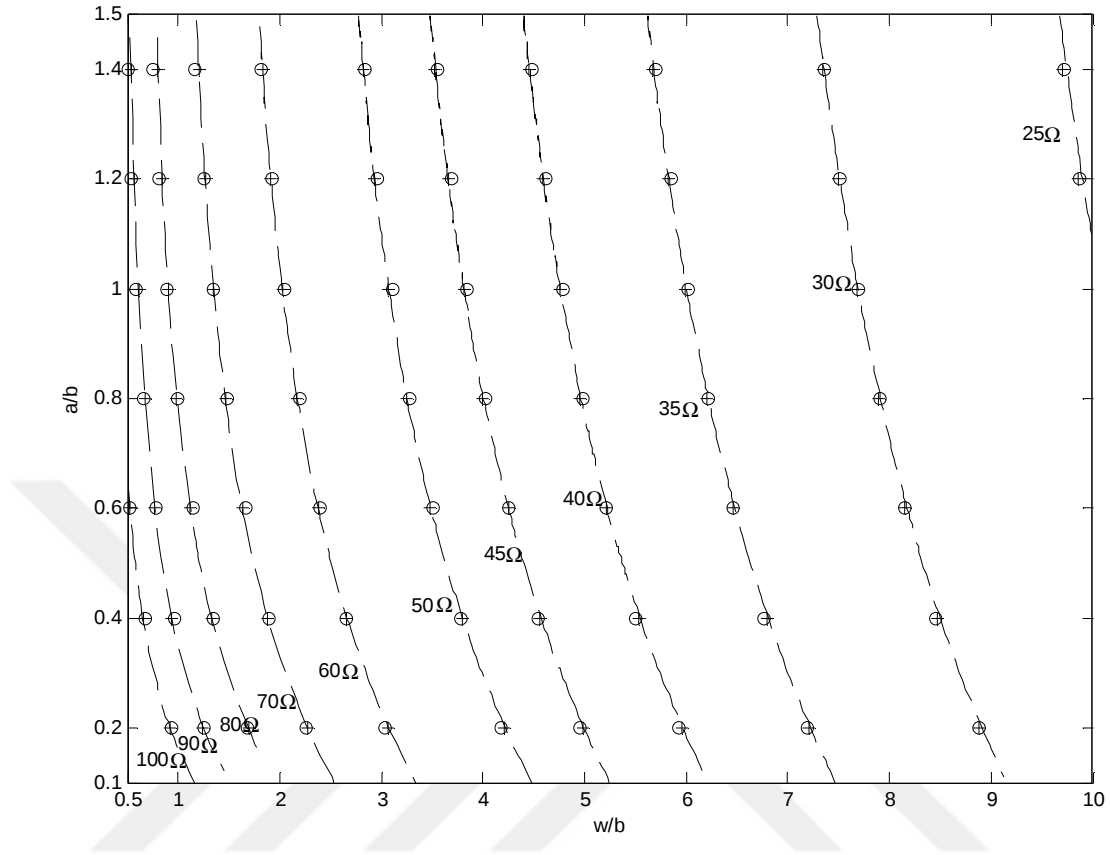


--- Quasi-Statik Analiz [72], o o o Sunulan Sentez Modeli,
+++ T&B'nin Sentez Metodu [72]

Şekil 6.9. Ters mikroşerit hatlar için önerilen sentez modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [72] sonuçları ve T&B'nin sentez sonuçları [72] ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r2}=3.78$)

Tablo 6.8. Ters mikroşerit hatlar için GP ile geliştirilen sentez modeli ve sentez metot [72] sonuçlarının karşılaştırılması

Z_0 (Ω)	$\epsilon_{r2}=11.7, a/b=0.2$				$\epsilon_{r2}=20, a/b=0.2$			
	Sentez Metot [72]		Sunulan Sentez Model		Sentez Metot [72]		Sunulan Sentez Model	
	w/b^{**}	$Z_0(w/b^{**})$ (Ω)	$w/b^{''}$	$Z_0(w/b^{''})$ (Ω)	w/b^{**}	$Z_0(w/b^{**})$ (Ω)	$w/b^{''}$	$Z_0(w/b^{''})$ (Ω)
30	8.93	30.07	8.93	30.07	8.62	30.04	8.62	30.08
40	6.00	40.04	5.97	40.18	5.69	39.99	5.67	40.14
50	4.26	50.01	4.23	50.25	3.95	49.93	3.93	50.16
60	3.12	60.00	3.09	60.32	2.81	59.88	2.81	60.00
70	2.32	70.01	2.30	70.30	2.02	69.85	2.03	69.80
80	1.73	80.12	1.72	80.32	1.45	79.85	1.47	79.51
90	1.30	89.92	1.30	89.92	1.03	89.83	1.07	88.86
100	0.96	100.12	0.98	99.43	0.73	99.66	0.77	98.30
110	0.71	110.00	0.73	109.10	0.51	109.11	0.55	107.78
120	0.52	119.98	0.54	118.78	0.36	118.04	0.38	118.17

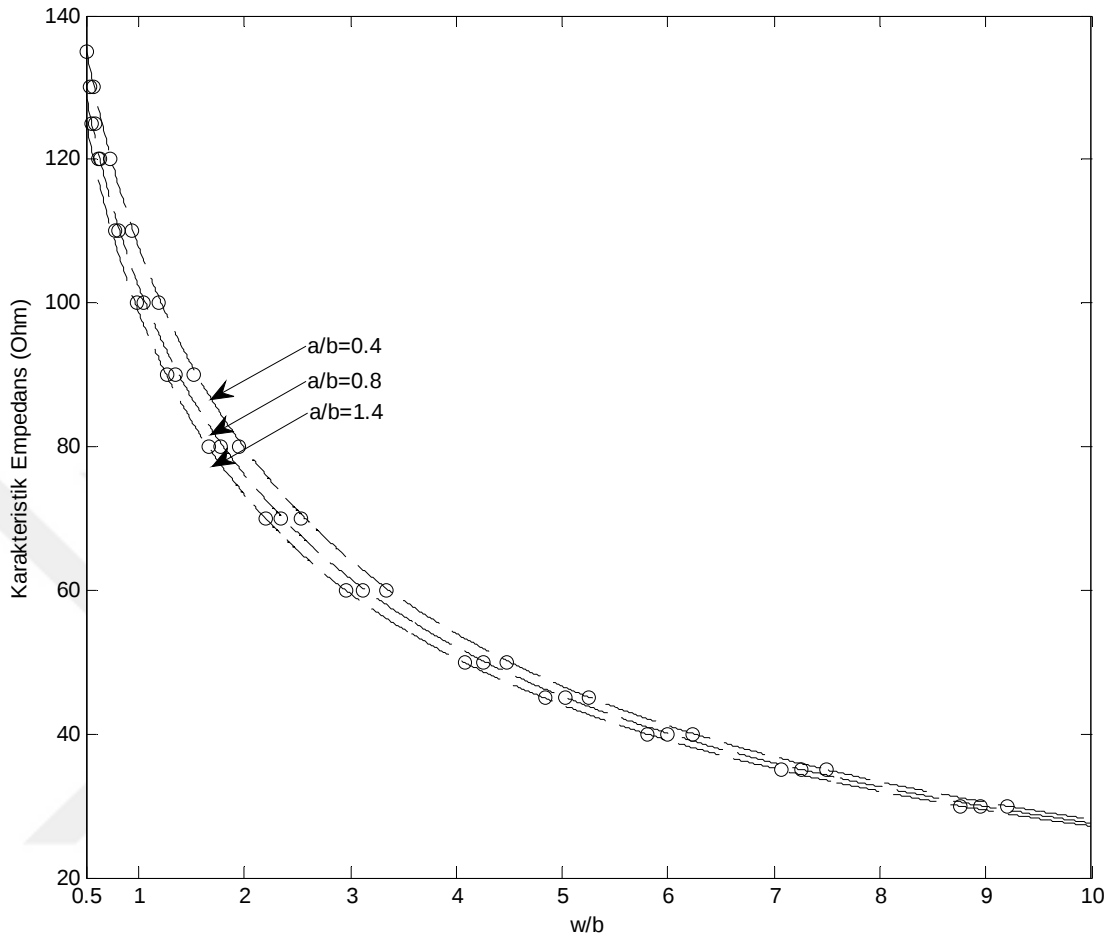


--- Quasi-Statik Analiz [72], o o o Sunulan Sentez Modeli,
 +++ T&B'nin Sentez Metodu [72]

Şekil 6.10. Ters mikroşerit hatlar için önerilen sentez modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [72] sonuçları ve T&B'nin sentez sonuçları [72] ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r2}=12.9$)

Tablo 6.9. Ters mikroşerit hatlar için önerilen sentez modelin geometrik boyutlara göre ve karakteristik empedansa göre ortalama yüzde hataları

Sentez Modeli	Geometrik Boyutlara Göre Ortalama Yüzde Hatalar (%)	Karakteristik Empedansa Göre Ortalama Yüzde Hatalar (%)
Şerit Genişliği (w)	0.81	0.37



--- Quasi-Statik Analiz [72], o o o Sunulan Sentez Modeli,

Şekil 6.11. Ters mikroşerit hatlar için önerilen sentez modeli kullanılarak elde edilen karakteristik empedans sonuçları ile quasi statik analiz [72] sonuçlarının karşılaştırılması ($\epsilon_{r2}=3.78$)

Sonuç olarak GP kullanılarak geliştirilen sentez modelin doğruluğunu ve geçerliliğini ortaya koymak için literatürdeki mevcut sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda önerilen sentez modelin literatürdeki mevcut sonuçlar ile iyi bir uyum içerisinde olması önerilen sentez modelin ters mikroşerit hatların geometrik boyutlarını hesaplamak için kullanılabileceğini açık bir şekilde göstermektedir.

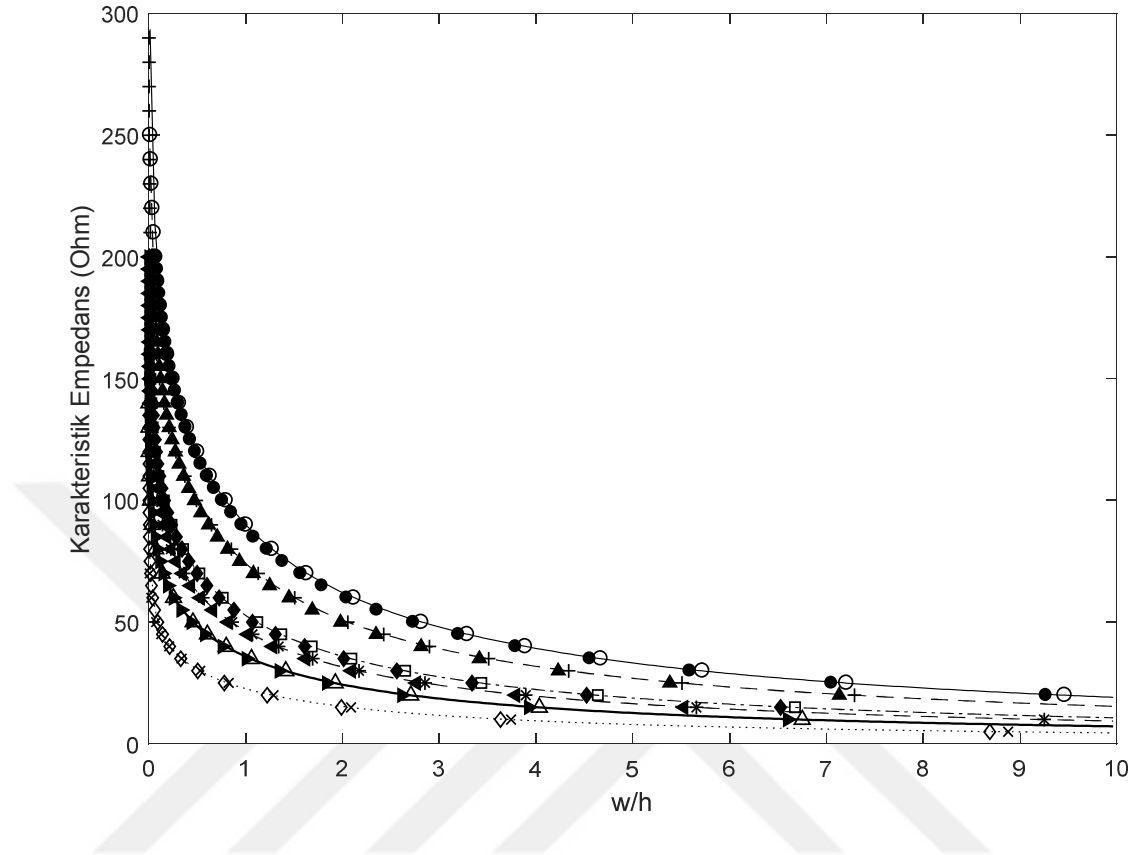
6.5. Klasik Mikroşerit Hatlar için Önerilen Sentez Modelin Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Klasik mikroşerit hatlar için önerilen sentez modelin geçerliliğini ve doğruluğunu ispat etmek için birçok karşılaştırma yapılmıştır. Klasik mikroşerit hatların geometrik boyutlarını hesaplayan önerilen sentez modelin sonuçları VM [60] ve literatürdeki sentez modelin [64] sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 6.12’de klasik mikroşerit hatların geometrik boyutlarının belirlenmesi için sunulan sentez modelinden elde edilen sonuçlar, VM [60] ve literatürdeki sentez modeli [64] sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu grafikteki karşılaştırmalar, altı farklı ϵ_r değeri ve $t = 0$ için gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi sentez modelinden elde edilen sonuçlar ile VM [60] sonuçları ve sentez modeli [64] arasında iyi bir uyum bulunmaktadır.

Bu sentez çalışmada da t/h ’ın giriş olarak tanımlanmasıyla metal kalınlıklarının da hesaba katılması sağlanmıştır. Böylelikle Şekil 6.13’de klasik mikroşerit hatların geometrik boyutları metal kalınlıklarına bağlı olarak değişimleri incelenmiştir. Sentez modelinden elde edilen sonuçlar ile VM [60] analiz sonuçlarıyla olan uyumu bu şekillerden de açıkça görülmektedir.

Sunulan sentez modelin ortalama yüzde hatası 1232 örnek veri için hesaplanarak Tablo 6.10’da verilmiştir. Bu tablodan da görüldüğü üzere GP kullanılarak elde edilen sentez modeli, klasik mikroşerit hatların geometrik boyutların hesaplamasında kullanılabilir bir doğruluğa sahip olduğu açıkça görülmektedir.



Analiz [60] (—— için $\epsilon_r = 2.65$, --- için $\epsilon_r = 4.2$, -.-.- için $\epsilon_r = 8.9$, için $\epsilon_r = 11.7$,
— için $\epsilon_r = 20$,..... için $\epsilon_r = 51$)

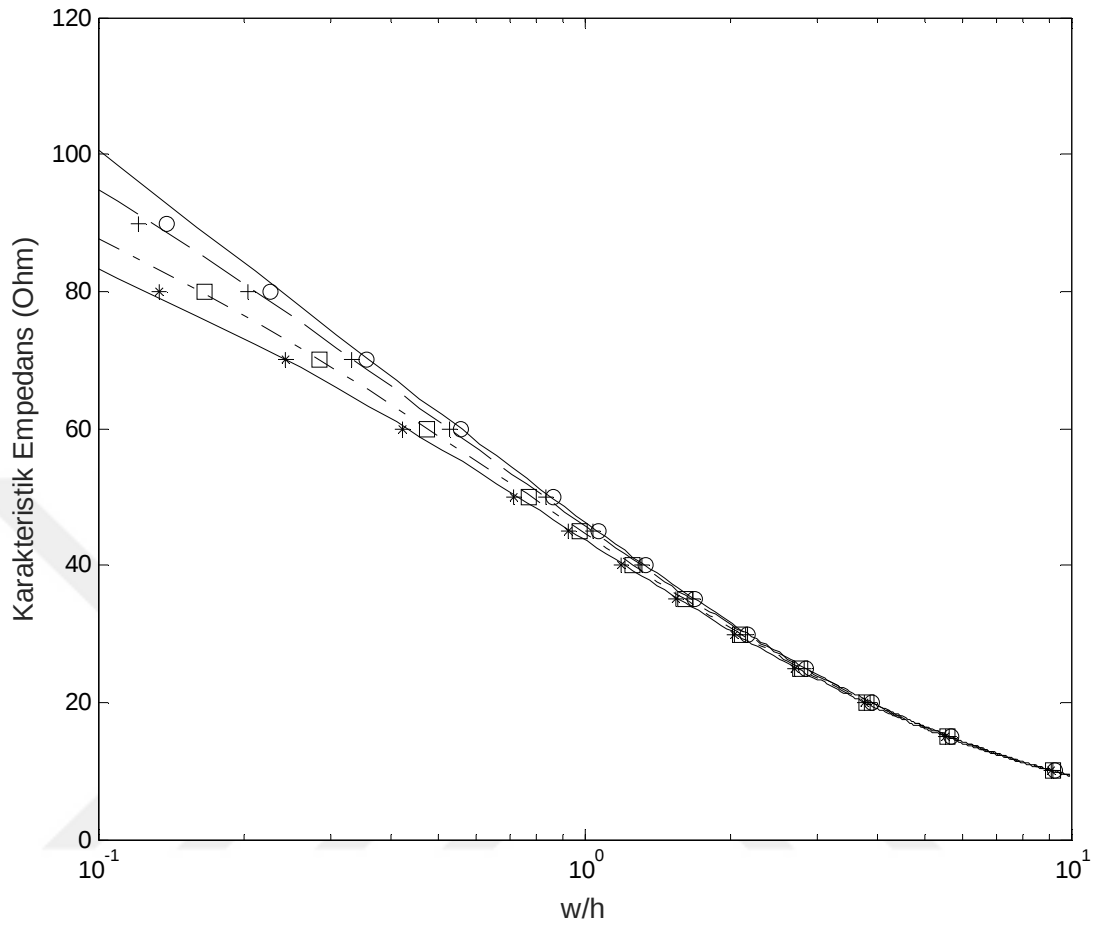
Sunulan Sentez Modeli (ooo için $\epsilon_r = 2.65$, +++ için $\epsilon_r = 4.2$, □□□ için $\epsilon_r = 8.9$,
*** için $\epsilon_r = 11.7$, ΔΔΔ için $\epsilon_r = 20$, ××× için $\epsilon_r = 51$)

Sentez Modeli [64] (●●● için $\epsilon_r = 2.65$, ▲▲▲ için $\epsilon_r = 4.2$, ◆◆◆ için $\epsilon_r = 8.9$,
◄◄◄ için $\epsilon_r = 11.7$, ►►► için $\epsilon_r = 20$, ◇◇◇ için $\epsilon_r = 51$)

Şekil 6.12. Sentez modelinden elde edilen sonuçlarının farklı ϵ_r değerleri için VM [60] ve literatürdeki sentez modelin [64] sonuçlarıyla karşılaştırılması ($t = 0$)

Tablo 6.10. Klasik mikroşerit hatlar için önerilen sentez modelin geometrik boyutlara göre ve karakteristik empedansa göre ortalama yüzde hataları

Sentez Modeli	Geometrik Boyutlara Göre Ortalama Yüzde Hatalar (%)	Karakteristik Empedansa Göre Ortalama Yüzde Hatalar (%)
Şerit Genişliği (w)	5.63	0.79



Analiz [60] (— için $t/h = 0$, --- için $t/h = 0.02$, -.-.- için $t/h = 0.06$,
— için $t/h = 0.1$)
Sunulan Sentez Modeli (○○○ için $t/h = 0$, + + + için $t/h = 0.02$, □ □ □ için $t/h = 0.06$,
* * * için $t/h = 0.1$)

Şekil 6.13. Sentez modelinden elde edilen sonuçlarının farklı t/h değerleri için VM [60] sonuçlarıyla karşılaştırılması ($t \neq 0$)

Sonuç olarak GP kullanılarak geliştirilen sentez modelin doğruluğunu ve geçerliliğini ortaya koymak için literatürdeki VM [60] sonuçları ve sentez modeli [64] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda önerilen sentez modelin literatürdeki bu sonuçlar ile iyi bir uyum içerisinde olması önerilen sentez modelin klasik mikroşerit hatların geometrik boyutlarını hesaplamak için kullanılabileceğini açık bir şekilde göstermektedir.

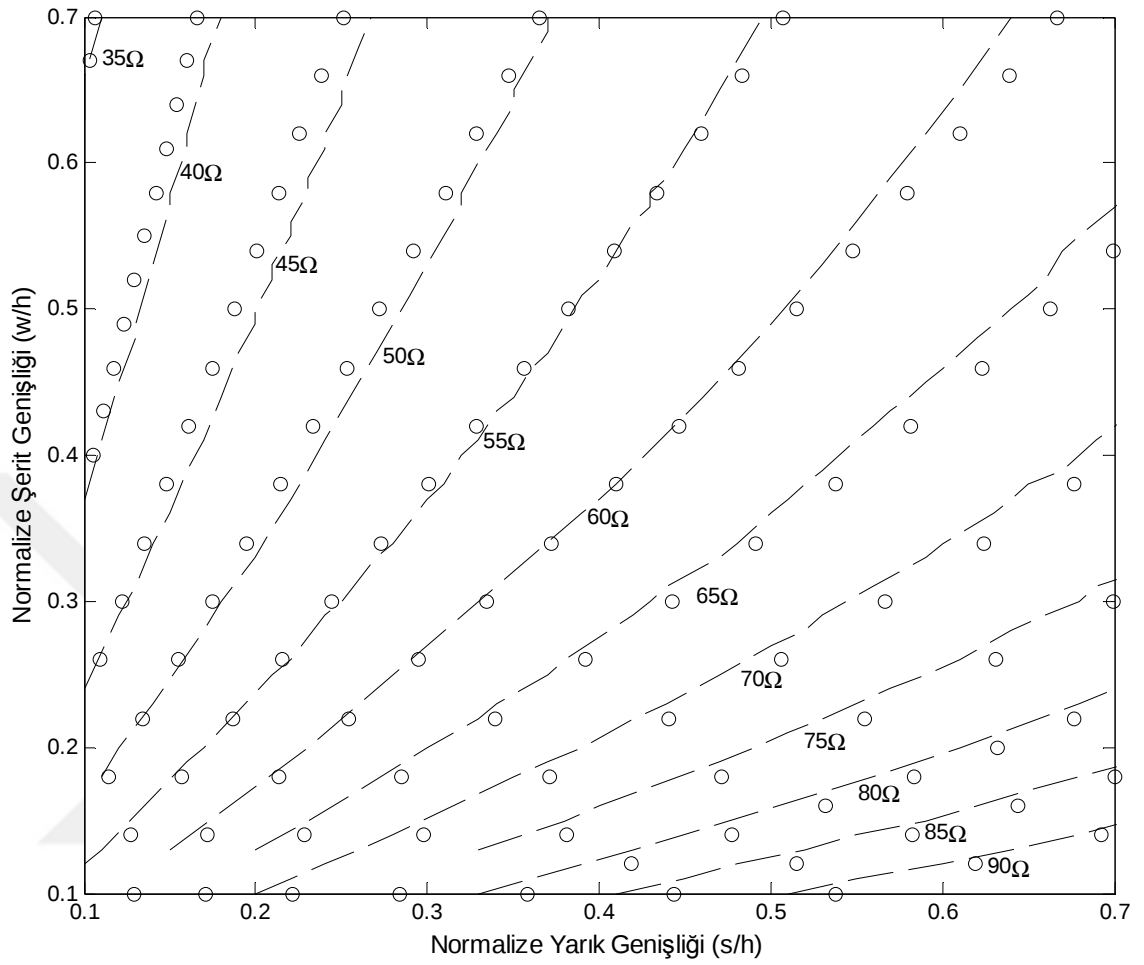
6.6. Sonlu Genişlikte Toprak Düzlemine Sahip EDDK'lar için Önerilen Sentez Modellerin Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'lar için önerilen sentez modellerin geçerliliğini ve doğruluğunu ispat etmek için birçok karşılaştırma yapılmıştır. Bu amaçla yapılan karşılaştırmalarda, GP ile bulunan sentez modellerden elde edilen yarık ve şerit genişliği sonuçları ile quasi statik analiz [81] sonuçları karşılaştırılmıştır.

Birinci sentez modelinden (s) elde edilen sonuçlar ile hesaplanan karakteristik empedans değerleri ile quasi-statik [81] analiz sonuçlarından elde edilen sonuçlar Şekil 6.14'te karşılaştırılmıştır. Şekil 6.15'te ise ikinci sentez modelinden (w) elde edilen sonuçlar ile hesaplanan karakteristik empedans değerleri ile quasi-statik [81] analiz sonuçlarından elde edilenler karşılaştırılmıştır. Birinci ve ikinci sentez modellerinden elde edilen sonuçlar ile quasi-statik [81] analiz sonuçları karşılaştırıldığında aralarında çok iyi bir uyum olduğu bu şekillerden açıkça görülmektedir.

Sentez modellerin geçerliliğini ortaya koymak için sentez modellerinden elde edilen sonuçları kullanarak hesaplanan karakteristik empedans değerleri ile quasi-statik analiz [81] sonuçları birbirinden farklı s / h değerleri için Şekil 6.16'te karşılaştırılmıştır. Şekilden de açıkça görüleceği üzere yine sentez modellerinden elde edilen sonuçlar ile quasi-statik analiz sonuçlarının uyum içerisinde olduğu açıkça görülmektedir.

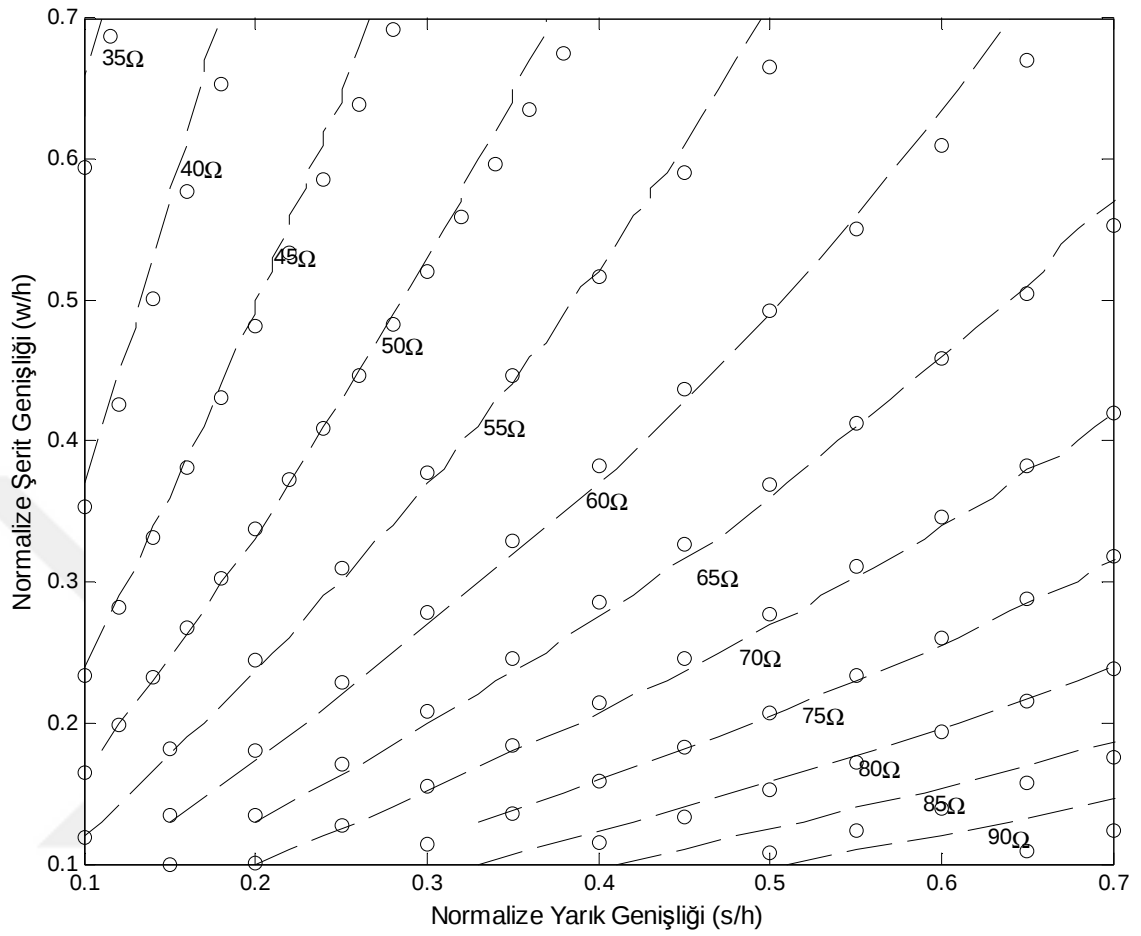
Farklı elektriksel parametrelere ve farklı geometrik boyutlara sahip sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'lar ait 9712 adet örnek veri için önerilen sentez modellerin ortalama yüzde hatası Tablo 6.11 verilmiştir. Bu çalışmada, sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların arzu edilen karakteristik empedansa sahip olması için gerekli olan yarık ve şerit genişliklerini doğrudan hesaplayan kapalı formda denklemler içeren oldukça basit, doğru ve yeni sentez modelleri sunulmuştur.



--- Quasi-Statik Analiz [81] ○ ○ ○ Sunulan Sentez Modeli

Şekil 6.14. Birinci sentez modelinden elde edilen sonuçların quasi-statik analiz [81] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 12.9$, $h = 100 \mu\text{m}$, $t = 0 \mu\text{m}$ ve $w_g = 100 \mu\text{m}$).

GP kullanılarak geliştirilen bu yeni sentez modellerin doğruluğunu ve geçerliliğini ortaya koymak için quasi-statik analiz [81] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda sunulan sentez modellerin sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların tasarımı için kullanılabileceği görülmüştür.

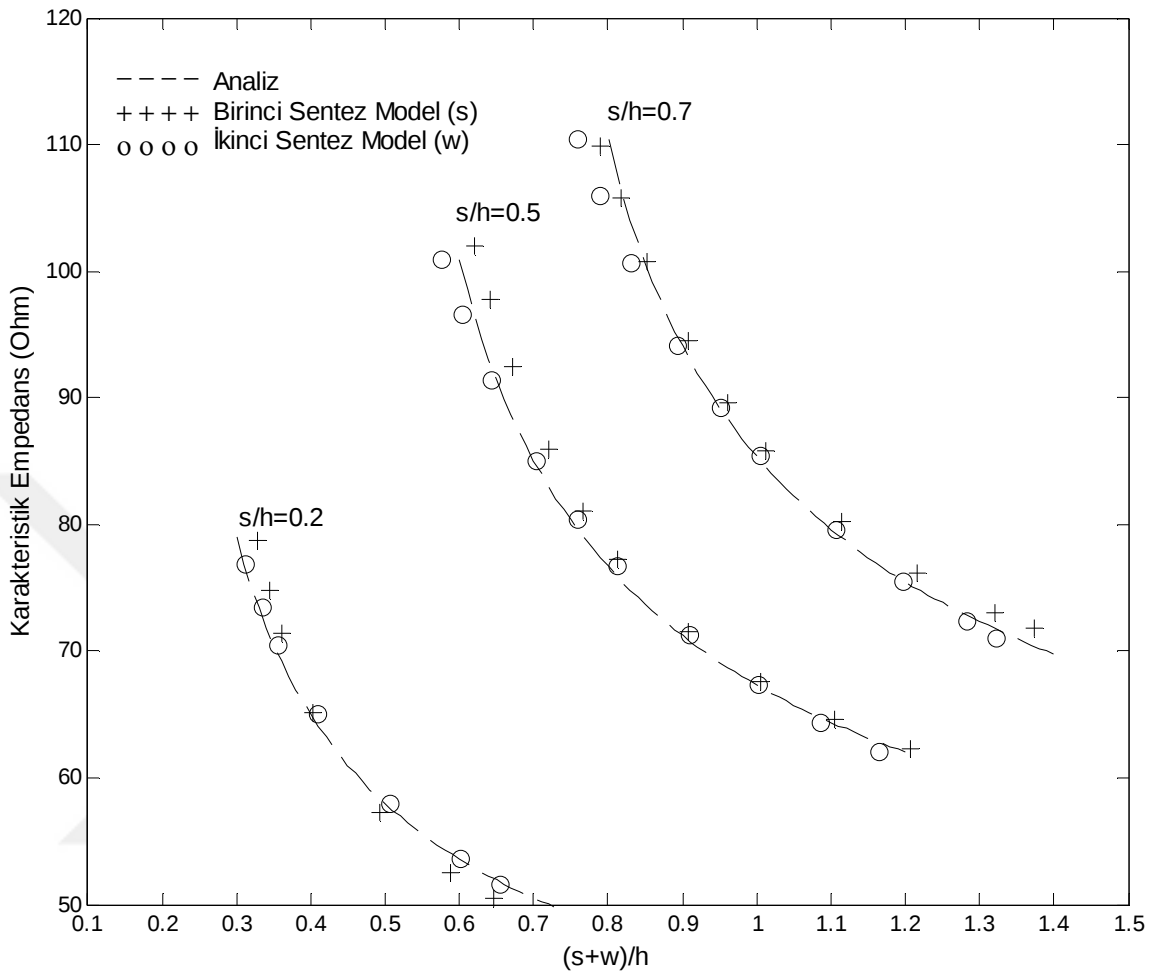


--- Quasi-Statik Analiz [81] o o o Sunulan Sentez Modeli

Şekil 6.15. İkinci sentez modelinden elde edilen sonuçların quasi-statik analiz [81] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 12.9$, $h = 100 \mu m$, $t = 0 \mu m$ ve $wg = 100 \mu m$).

Tablo 6.11. Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'lar için önerilen sentez modellerin geometrik boyutlara göre ve karakteristik empedansa göre ortalama yüzde hataları

Sentez Modelleri	Geometrik Boyutlara Göre Ortalama Yüzde Hatalar (%)	Karakteristik Empedansa Göre Ortalama Yüzde Hatalar (%)
Yarık Genişliği (s)	5.85	1.69
Şerit Genişliği (w)	4.83	1.16



Şekil 6.16. Sentez modellerin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz [81] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 9.9$, $h = 100 \mu\text{m}$, $t = 0 \mu\text{m}$ ve $wg = 100 \mu\text{m}$).

Sonuç olarak GP kullanılarak geliştirilen sentez modellerin doğruluğunu ve geçerliliğini ortaya koymak için literatürdeki mevcut sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda önerilen sentez modellerin literatürdeki mevcut sonuçlar ile iyi bir uyum içerisinde olması önerilen sentez modellerin sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların geometrik boyutlarını hesaplamak için kullanılabileceğini açık bir şekilde göstermektedir [147].

6.7. İletken Destekli Mikro EDŞH'ler için Önerilen Sentez Modellerin Sonuçları ve Değerlendirilmesi

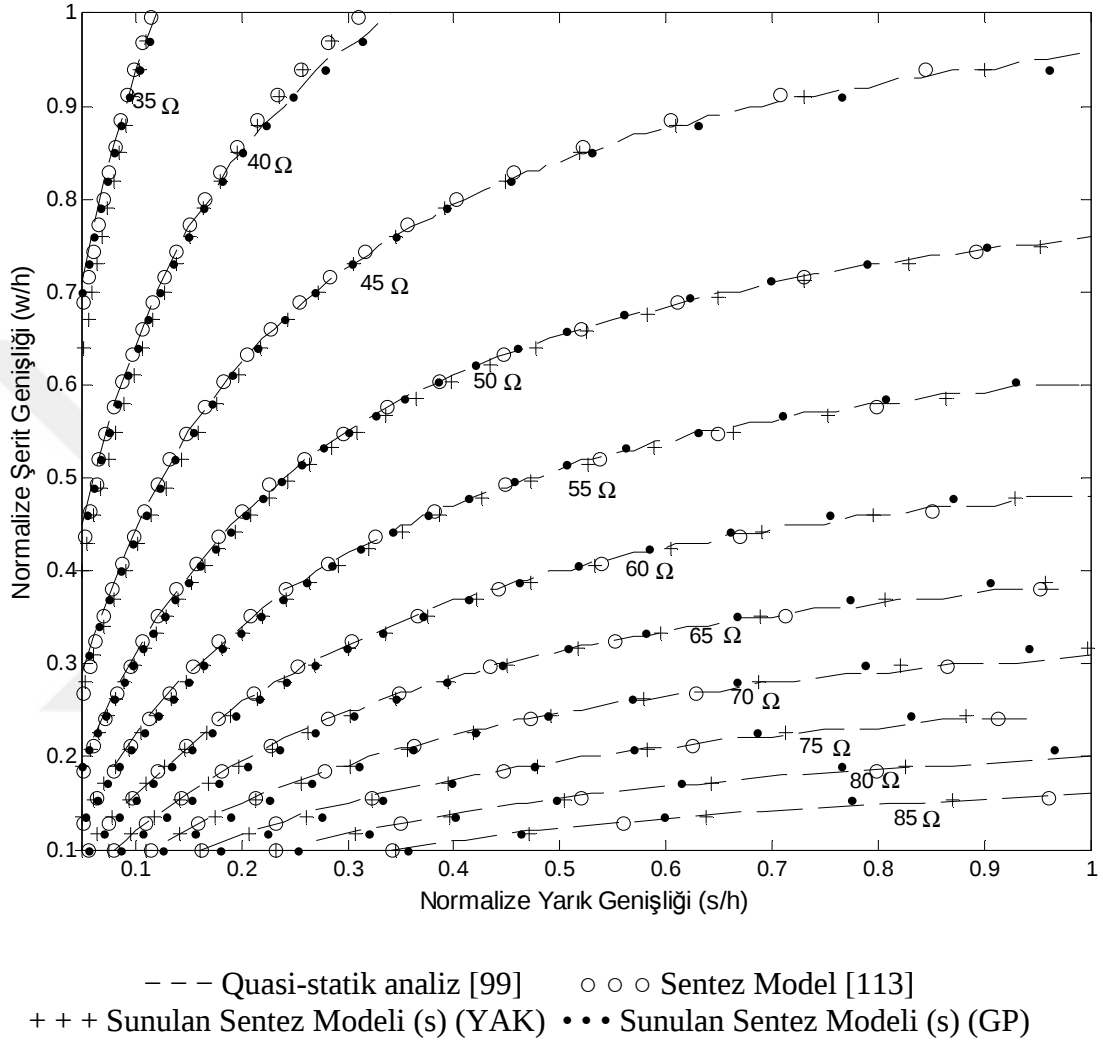
İletken destekli mikro EDŞH'lerin için önerilen sentez modellerin geçerliliğini ve doğruluğunu ispat etmek için birçok karşılaştırma yapılmıştır. Bu amaçla yapılan karşılaştırmalarda, GP ve YAK algoritması ile bulunan sentez modellerden elde edilen şerit ve yarık genişliği sonuçları ile quasi statik analiz [99] sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında sunulan iletken destekli mikro EDŞH'lerin sentez modellerin doğruluğunu ve geçerliliğini göstermek için kapsamlı karşılaştırmalar yapılmıştır. İletken destekli mikro EDŞH'lerin geometrik boyutlarını hesaplayan sentez modellerin sonuçları ile literatürde mevcut olan Güney ve Ark. [113] tarafından önerilen sentez modellerin sonuçları, quasi- statik analiz [99] sonuçları ve deneysel çalışmalar [101, 114] ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 6.18'de $\epsilon_r = 12.9$ ve $h = 200 \mu m$ olan iletken destekli mikro EDŞH'nin arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için GP ve YAK algoritması ile belirlenen sentez modelinden elde edilen yarık genişliği $s(\epsilon_r, Z_0, w/h)$ sonuçları ile literatürde mevcut olan Güney ve Ark. [113] tarafından önerilen sentez modellerin sonuçları ile quasi-statik analiz [99] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6.19'de ise aynı iletim hattı olan iletken destekli mikro EDŞH'nin arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için GP ve YAK algoritması ile belirlenen sentez modelinden elde edilen şerit genişliği $w(\epsilon_r, Z_0, s/h)$ sonuçları ile literatürde mevcut olan Güney ve Ark. [113] tarafından önerilen sentez modellerin sonuçları ile quasi-statik analiz sonuçları [99] ile karşılaştırılmıştır. Sentez modellerinden elde edilen sonuçların quasi-statik analiz [99] sonuçları ile Güney ve Ark. [113] tarafından önerilen sentez modellerin sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisinde olduğu Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'den açıkça görülmektedir.

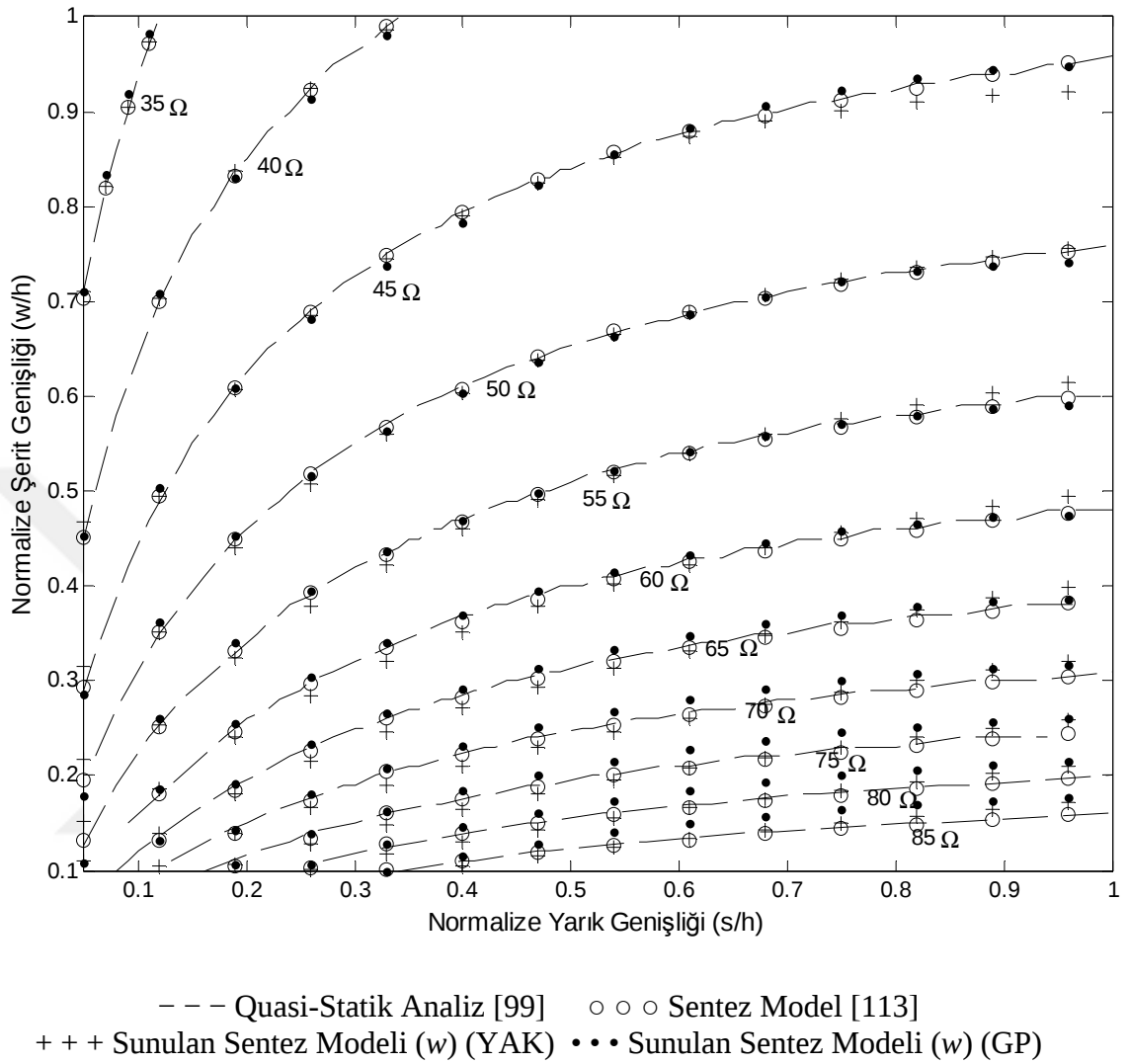
GP ve YAK algoritmasıyla belirlenen sentez modellerin sonuçları ile belirlenen karakteristik empedans değerleri quasi-statik analiz [99] sonuçları ile farklı s/h değerleri için Şekil 6.19'de karşılaştırılmıştır. Şekil 6.19'deki bu sonuçlar dielektrik taban malzemesinin değerleri $\epsilon_r = 9.9$ ve $h = 1000 \mu m$ olan iletken destekli mikro EDŞH'ler için elde edilmiştir. Bu şekilden açıkça görüldüğü gibi sentez modellerinden elde edilen sonuçlar quasi-statik analiz sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisinde. Ayrıca bu şekilden açıkça anlaşıldığı üzere yarık ve şerit genişliklerini belirleyen GP ve YAK

algoritması ile belirlenen sentez modelleri kendileri arasında da iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.17. Sentez modellerinden (s) elde edilen sonuçların quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması $\epsilon_r = 12.9$ ve $h = 200 \mu m$).

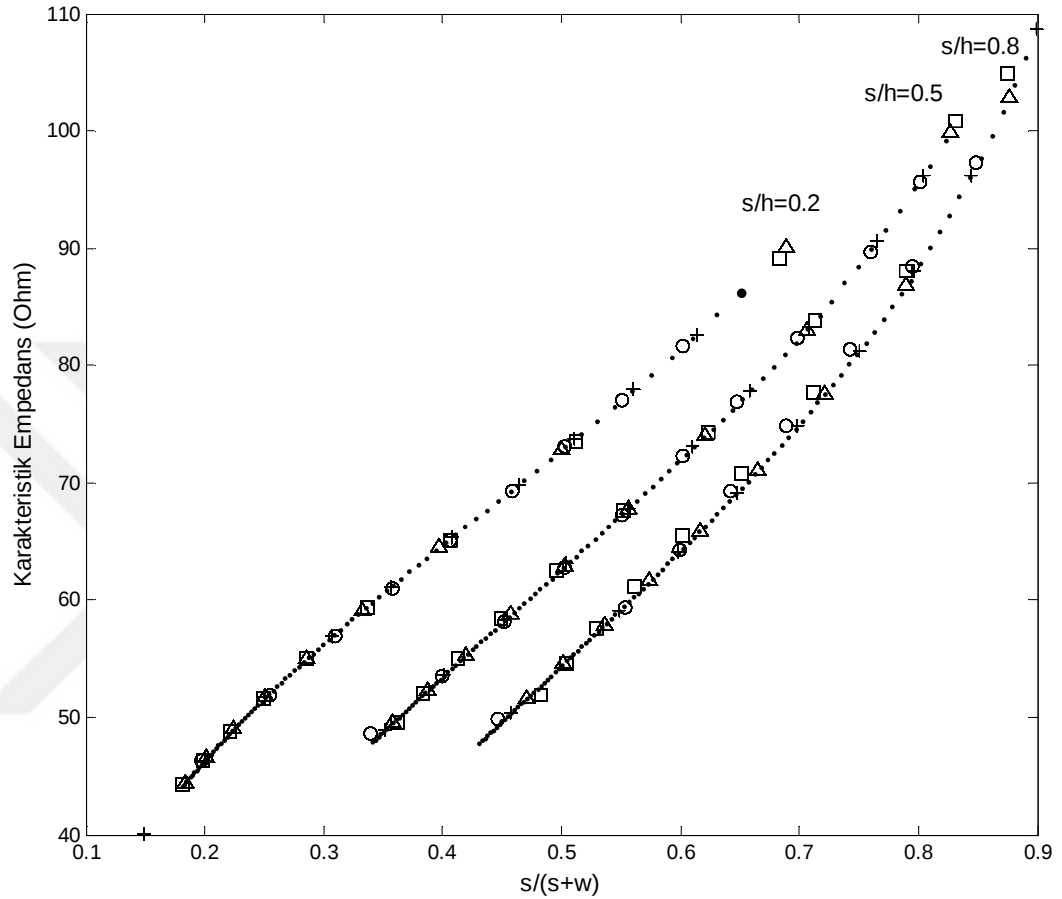
Bu tez çalışmasında sunulan sentez modellerin doğruluğunu göstermek için, önerilen sentez modellerin sonuçları, quasi-statik analiz [99], diğer sentez modelleri [113] ve deneysel sonuçlar [101, 114] ile farklı dielektrik taban malzemesi değerleri için karşılaştırılmıştır. $\epsilon_r = 10.1$, $h = 400 \mu m$ olan iletken destekli mikro EDŞH'ler ve $\epsilon_r = 10.2$, $h = 1270 \mu m$ olan iletken destekli mikro EDŞH'ler için karşılaştırmaların sonuçları sırasıyla Tablo 6.12 ve Tablo 6.13'te gösterilmektedir.



Şekil 6.18. Sentez modellerinden (w) elde edilen sonuçların quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 12.9$ ve $h = 200 \mu m$).

Bu tablolarda, Z_0' ölçülen karakteristik empedans değerlerini, s' ve w' sırasıyla ölçülen yarıklık ve şerit genişliğini belirtmektedir. Z_0 , ölçülen s' ve w' değerlerini kullanarak quasi-statik analizden [99] ve dikdörtgen sınır bölme metodundan (DSBM) [97] elde edilen karakteristik empedans değerlerini temsil eder. s^* ve w^* sırasıyla ölçülen s' ve w' değerlerini kullanarak Güney ve Ark. [113] tarafından önerilen sentez modellerinden hesaplanan yarıklık ve şerit genişliklerini göstermektedir. Z_{0s}^* ve Z_{0w}^* , sırasıyla s^* ve w^* değerlerini kullanarak hesaplanan quasi-statik analiz sonuçlarıdır. s ve w , sırasıyla ölçülen s' ve w' değerlerini kullanarak bu tez çalışmasında sunulan GP ve YAK algoritması ile belirlenen sentez modelleri kullanarak hesaplanan iletken destekli mikro EDŞH'lerin

yarık ve şerit genişlikleridir. Son olarak Z_{0s} ve Z_{0w} sırasıyla s ve w değerlerini kullanarak hesaplanan quasi-statik analiz sonuçlarını ifade etmektedir.



- • • Quasi-Statik Analiz [99] ○ ○ ○ Sunulan Sentez Modeli (s) (YAK)
 + + + Sunulan Sentez Modeli (w) (YAK)
 □ □ □ Sunulan Sentez Modeli (s) (GP) △ △ △ Sunulan Sentez Modeli (w) (GP)

Şekil 6.19. Sentez modellerin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz [99] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 9.9$, $h = 1000 \mu m$).

Bu tablolardan açıkça görülebileceği gibi, bu tez çalışmasında önerilen sentez modelleri olan yarık ve şerit genişliklerinin ölçülen değerlerini kullanarak hesaplanan yarık ve şerit genişliği değerleri arasında iyi bir uyum bulunmaktadır. Ayrıca bu tablolarda, önerilen sentez modellerin sonuçlarını kullanarak hesaplanan karakteristik empedans Z_{0s} ve Z_{0w} 'nın KDT [99], DSBM [97], Güney ve Ark. [113] ve ölçülen sonuçlar [101, 114] karşılaştırılmış olup aralarında iyi bir uyumun olduğu görülmüştür.

Tablo 6.12. GP ve YAK algoritması ile belirlenen iletken destekli mikro EDŞH'lerin sentez modellerinden elde edilen sonuçlar ile literatürdeki diğer çalışmalardan elde edilmiş sonuçların karşılaştırması ($\epsilon_r = 10.1$ ve $h = 400 \mu m$)

Deneyisel [101]			DSBM [97]	KDT [99]	Sentez modelleri [113]				Önerilen Sentez Modelleri (YAK)				Önerilen Sentez Modelleri (GP)			
s' (μm)	w' (μm)	Z_0' (Ω)	Z_0 (Ω)	Z_0 (Ω)	s^* (μm)	w^* (μm)	Z_{0s}^* (Ω)	Z_{0w}^* (Ω)	s (μm)	w (μm)	Z_{0s} (Ω)	Z_{0w} (Ω)	s (μm)	w (μm)	Z_{0s} (Ω)	Z_{0w} (Ω)
296	375	48.2 8	47.52	49.90	295.2 1	374.12	49.90	49.9 7	290.62	369.21	49.83	50.2 6	315.3 5	377.6 6	50.15	49.74
95	374	43.0 5	42.26	44.17	93.7 3	372.73	44.09	44.2 3	89.06	375.73	43.79	44.0 8	95.01	369.5 5	44.16	44.39
46	374	40.0 6	38.25	40.06	45.8 1	374.88	40.03	40.0 2	45.88	377.97	40.04	39.8 9	46.52	378.6 9	40.12	39.86

Tablo 6.13. GP ve YAK algoritması ile belirlenen iletken destekli mikro EDŞH'lerin sentez modellerinden elde edilen sonuçlar ile literatürdeki diğer çalışmalardan elde edilmiş sonuçların karşılaştırması ($\epsilon_r = 10.2$ ve $h = 1270 \mu m$)

Deneyisel [114]			KDT [99]	Sentez modelleri [113]				Önerilen Sentez Modelleri (YAK)				Önerilen Sentez Modelleri (GP)			
s' (μm)	w' (μm)	$Z_0'(\Omega)$	$Z_0(\Omega)$	s^* (μm)	w^* (μm)	Z_{0s}^* (Ω)	Z_{0w}^* (Ω)	s (μm)	w (μm)	Z_{0s} (Ω)	Z_{0w} (Ω)	s (μm)	w (μm)	Z_{0s} (Ω)	Z_{0w} (Ω)
475	1000	46.78	50.03	471	1002	49.98	49.99	467.18	995.93	49.92	50.10	471.32	982.11	49.97	50.39
550	1050	47.02	49.87	563	1045	49.99	49.97	538.60	1046	49.73	49.93	550.35	1035.8	49.86	50.15
700	1100	46.62	50.14	681	1109	50.00	49.97	687.01	1094.2	50.03	50.24	712.44	1096.0	50.22	50.21
850	1150	47.09	50.06	839	1151	50.00	50.04	839.41	1137.9	49.98	50.28	889.01	1154.1	50.23	49.96

Sentez modellerinden elde edilen sonuçların KDT, DSBM, ve ölçüm sonuçlarıyla ile iyi bir uyum içerisinde olması önerilen sentez modellerin iletken destekli mikro EDŞH'lerin fiziksel boyutlarının hesaplanmasında kullanılabileceğini açık bir şekilde göstermektedir [153].

GE ve YAK algoritması kullanılarak elde edilen sentez modellerin ortalama yüzde hataları Tablo 6.14 verilmiştir. Bu Tablodan da anlaşıldığı üzere YAK algoritması kullanılarak elde edilmiş olan sentez modellerin iletken destekli mikro EDŞH'lerin tasarımında kullanılabilir bir doğruluğa sahip olduğu görülmüştür.

Tablo 6.14. İletken destekli mikro EDŞH'ler için önerilen sentez modellerin geometrik boyutlara göre ve karakteristik empedansa göre ortalama yüzde hataları

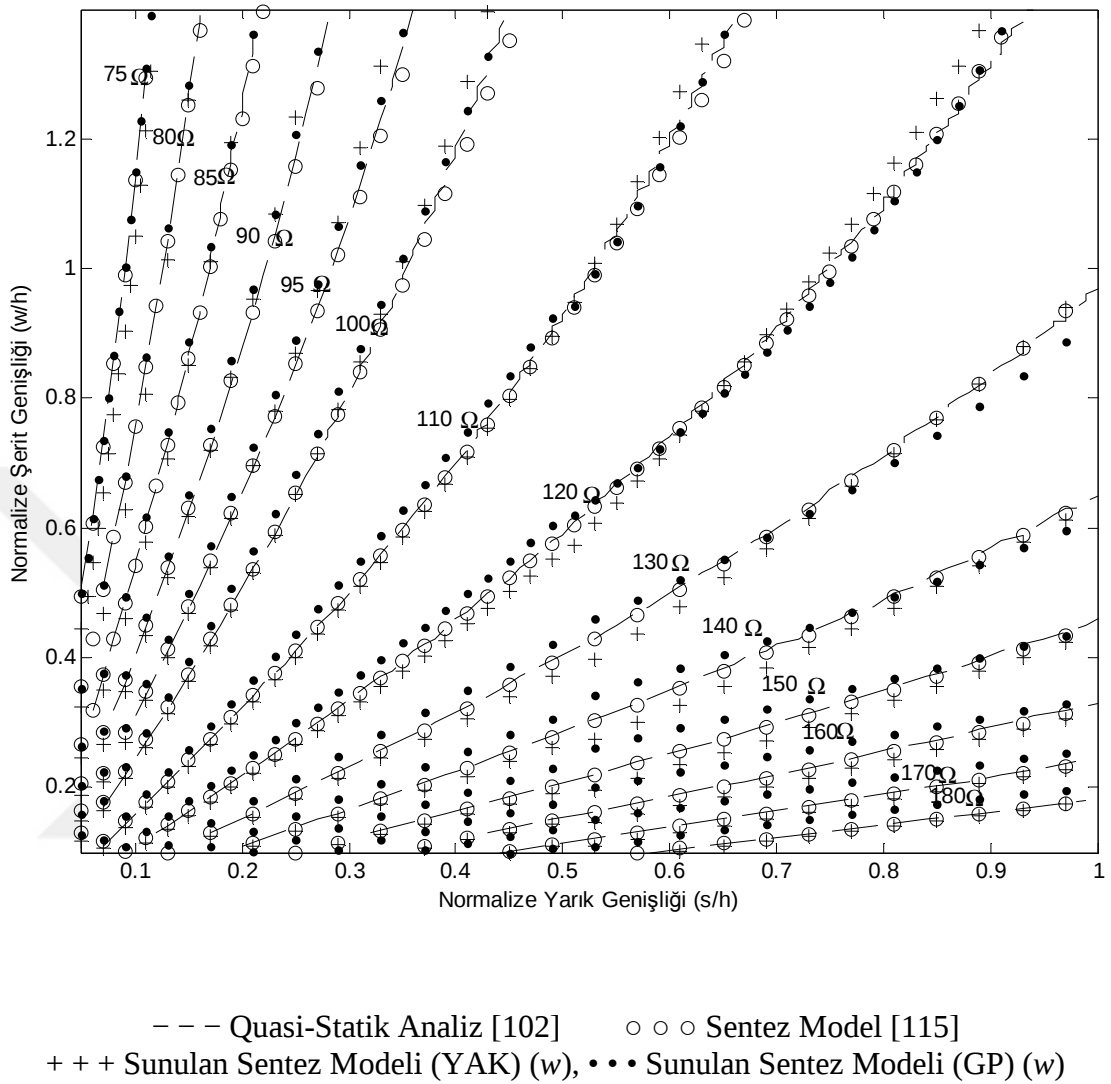
Sentez Modelleri		Geometrik Boyutlara Göre Ortalama Yüzde Hatalar (%)	Karakteristik Empedansa Göre Ortalama Yüzde Hatalar (%)
YAK	Şerit Genişliği (w)	2.23	0.67
	Yarık Genişliği (s)	3.92	0.49
GP	Şerit Genişliği (w)	3.30	1.00
	Yarık Genişliği (s)	4.93	0.51

Sonuç olarak GP ve YAK algoritması kullanılarak geliştirilen sentez modellerin doğruluğunu ve geçerliliğini ortaya koymak için literatürdeki mevcut sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda önerilen sentez modellerin literatürdeki mevcut sonuçlar ile iyi bir uyum içerisinde olması önerilen sentez modellerin iletken destekli mikro EDŞH'lerin geometrik boyutlarını hesaplamak için kullanılabileceğini açık bir şekilde göstermektedir [153].

6.8. Sonsuz Toprak Düzlemine Sahip Asimetrik EDŞH'ler için Önerilen Sentez Modellerin Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'lerin için önerilen sentez modellerin geçerliliğini ve doğruluğunu ispat etmek için birçok karşılaştırma yapılmıştır. Bu amaçla yapılan karşılaştırmalarda, sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'lerin geometrik boyutlarını hesaplayan sentez modellerin sonuçları ile literatürde mevcut olan Güney ve Ark. [115] tarafından önerilen sentez modellerin sonuçları, quasi- statik analiz [102] sonuçları, deneysel [114] ve simülasyon [142] sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

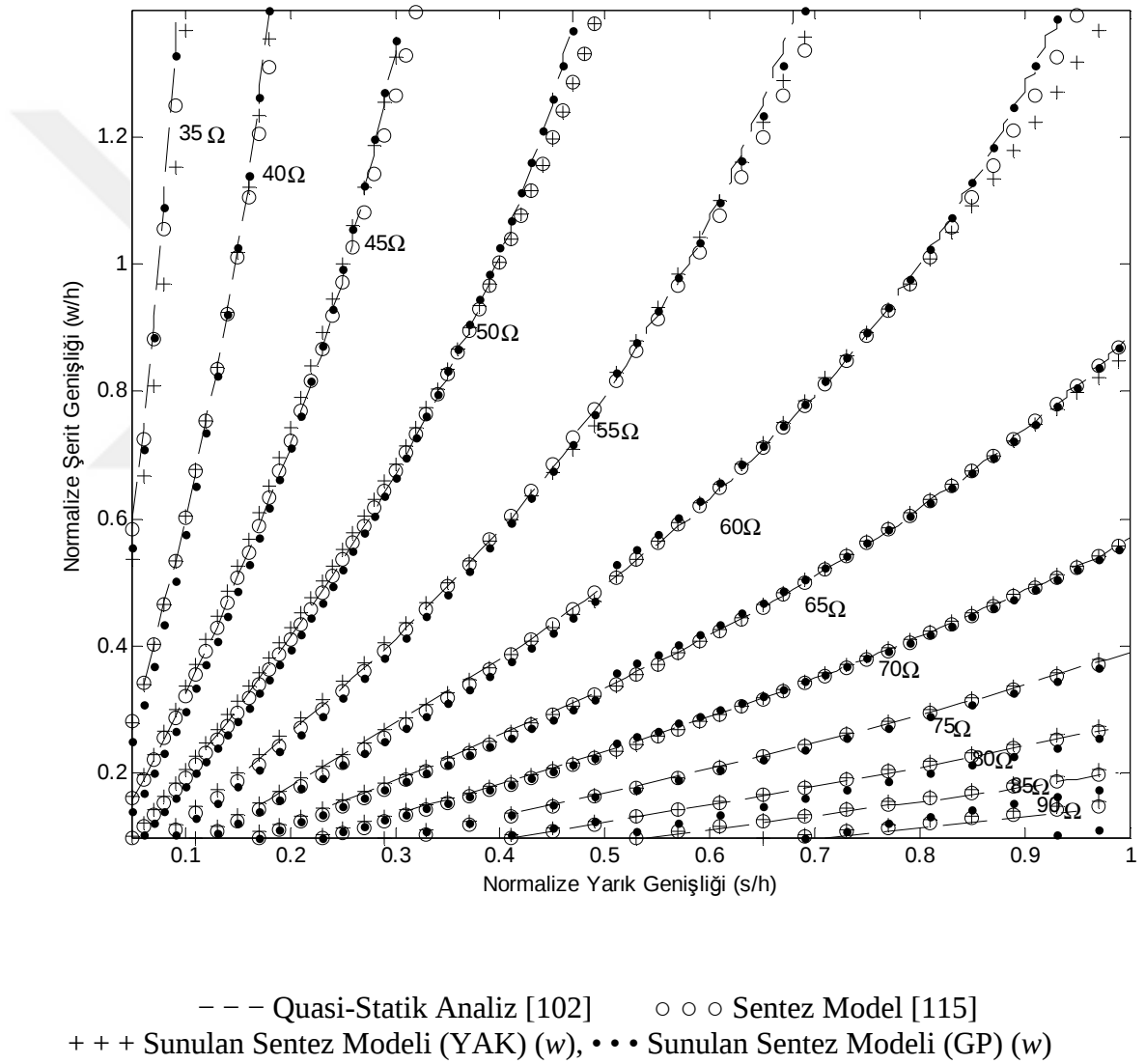
Şekil 6.20'de $\epsilon_r = 3.78$ ve $h = 400 \mu m$ olan sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'nin arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için GP ve YAK algoritması ile belirlenen sentez modelinden elde edilen şerit genişliği $w(\epsilon_r, Z_0, s/h)$ sonuçları ile literatürde mevcut olan Güney ve Ark. [115] tarafından önerilen sentez modellerin sonuçları ile quasi-statik analiz [102] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6.21'de, Şekil 6.20'ten farklı olarak dielektrik taban malzemesi değerleri $\epsilon_r = 20$ ve $h = 400 \mu m$ olan sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'nin arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için yine GP ve YAK algoritması ile belirlenen sentez modelinden elde edilen şerit genişliği $w(\epsilon_r, Z_0, s/h)$ sonuçları ile literatürde mevcut olan Güney ve Ark. [115] tarafından önerilen sentez modellerin sonuçları ile quasi-statik analiz [102] sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



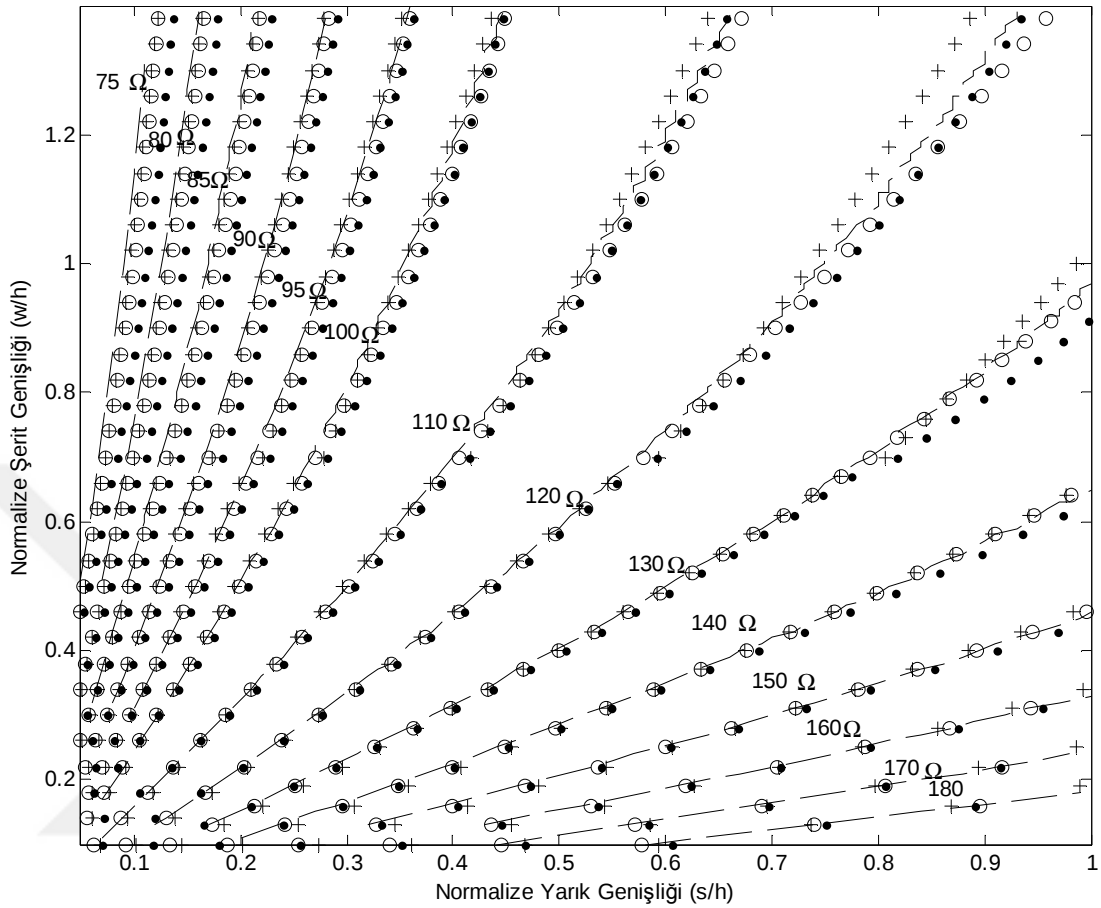
Şekil 6.20. Sentez modellerinden (w) elde edilen sonuçların quasi-statik analiz [102] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 3.78$ ve $h = 400 \mu m$)

Şekil 6.22’de ise $\epsilon_r = 3.78$ ve $h = 400 \mu m$ dielektrik taban malzemesi değerleri için aynı iletim hattı olan sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH’lerin arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için GP ve YAK algoritması ile belirlenen sentez modelinden elde edilen yarık genişliği $s(\epsilon_r, Z_0, w/h)$ sonuçları ile literatürde mevcut olan Güney ve Ark. [115] tarafından önerilen sentez modellerin sonuçları ile quasi-statik analiz sonuçları [102] ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6.23’te ise, Şekil 6.22’den farklı olarak dielektrik taban malzemesi değerleri $\epsilon_r = 20$ ve $h = 400 \mu m$ olan sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH’lerin arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için yine

GP ve YAK algoritması ile belirlenen sentez modelinden elde edilen yarık genişliği $s(\epsilon_r, Z_0, w/h)$ sonuçları ile literatürde mevcut olan Güney ve Ark. [115] tarafından önerilen sentez modellerin sonuçları ile quasi-statik analiz [102] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sentez modellerinden elde edilen sonuçların quasi-statik analiz [102] sonuçları ile Güney ve Ark. [115] tarafından önerilen sentez modellerini sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisinde olduğu bu şekillerden açıkça görülmektedir.



Şekil 6.21. Sentez modellerinden (w) elde edilen sonuçların quasi-statik analiz [102] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 20$ ve $h = 400 \mu m$)

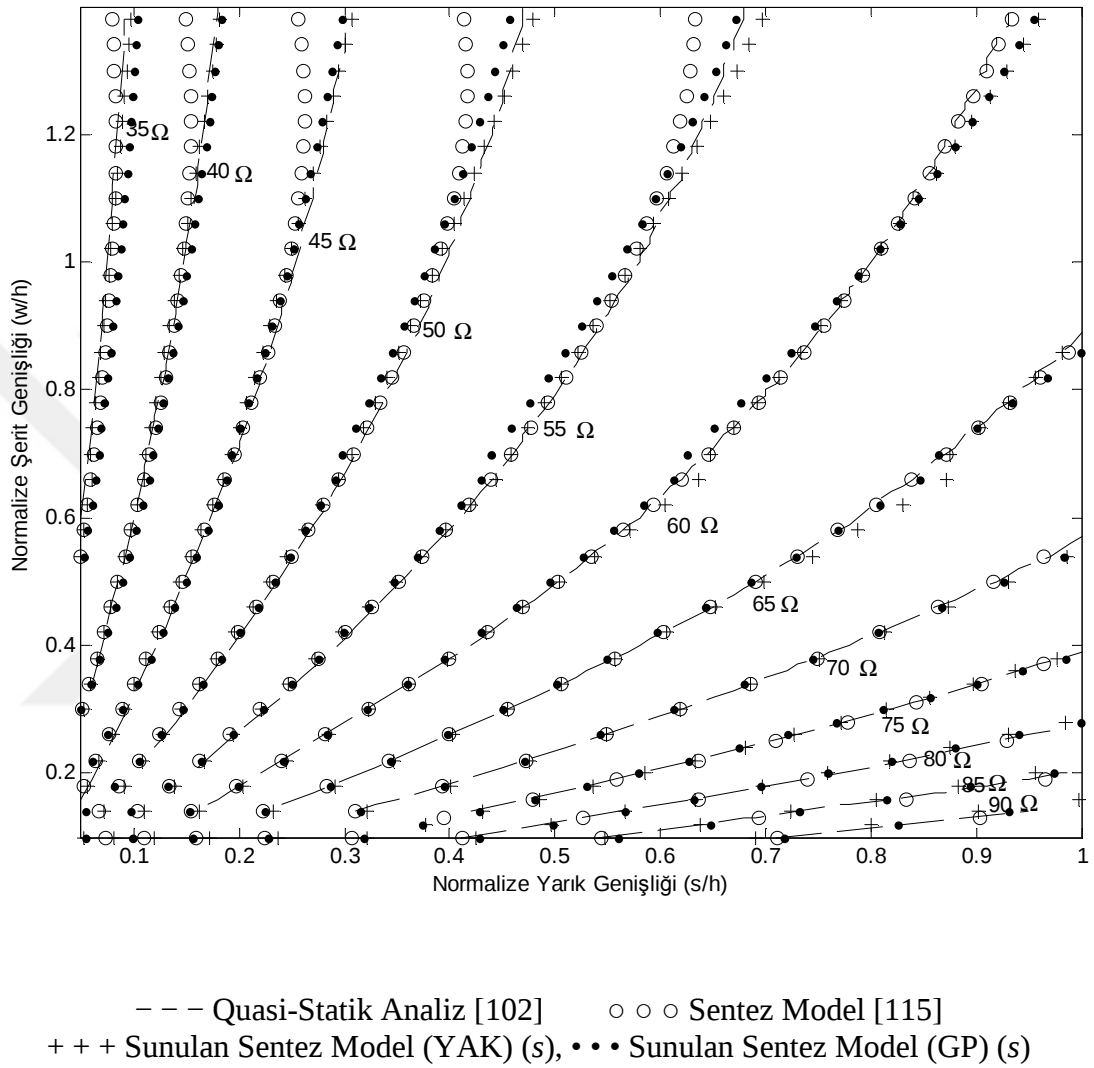


--- Quasi-Statik Analiz [102] ○ ○ ○ Sentez Model [115]
 + + + Sunulan Sentez Modeli (YAK) (s), • • • Sunulan Sentez Modeli (GP) (s)

Şekil 6.22. Sentez modellerinden (s) elde edilen sonuçların quasi-statik analiz [102] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 3.78$ ve $h = 400 \mu m$)

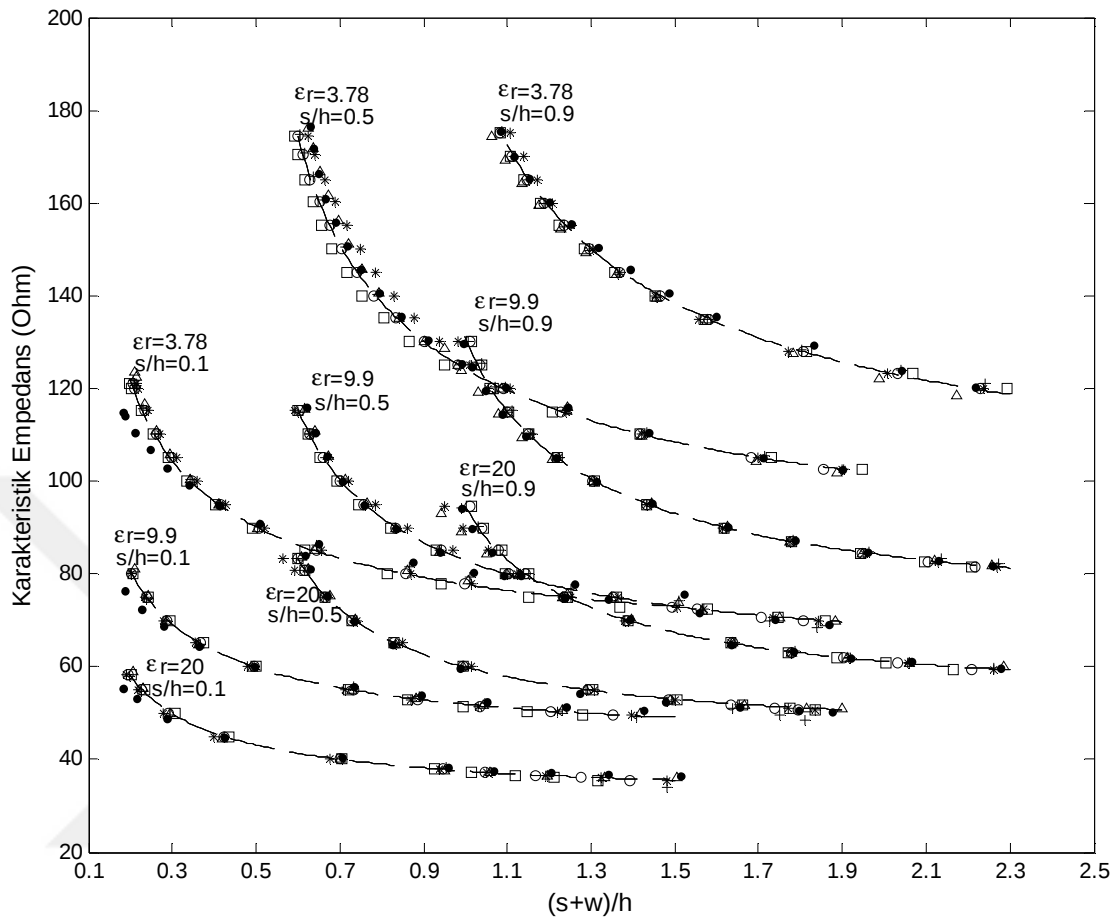
Sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'lerin geometrik boyutlarını hesaplayan sunulan sentez modellerin sonuçları ile belirlenen karakteristik empedans değerleri quasi-statik analiz [102] sonuçları ile farklı s/h değerleri için Şekil 6.24'de karşılaştırılmıştır. Şekil 6.24'deki bu sonuçlar dielektrik taban malzemesinin değerleri olan ($h = 635 \mu m - \epsilon_r = 3.78$, $h = 635 \mu m - \epsilon_r = 9.9$, $h = 635 \mu m - \epsilon_r = 20$) sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'ler için elde edilmiştir. Şekil 6.24'ten de açıkça görüldüğü gibi sentez modellerinden elde edilen sonuçlar quasi-statik analiz sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisinde. Ayrıca bu şekilden de açıkça anlaşıldığı üzere şerit ve yarık genişliklerinin

belirleyen GP ve YAK algoritmasıyla elde edilen sentez modelleri kendileri arasında da iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 6.23. Sentez modellerinden (s) elde edilen sonuçların quasi-statik analiz [102] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 20$ ve $h = 400 \mu m$)

Bu tez çalışmasında sunulan sentez modellerin doğruluğunu ve geçerliliğini göstermek için, önerilen sentez modellerin sonuçları, quasi-statik analiz [102], diğer sentez modelleri [115], deneysel sonuçlar [114] ve simülasyon sonuçları [142] ile $\epsilon_r = 10.2$ ve $h = 1270 \mu m$ olan dielektrik taban malzemesi değerleri için Tablo 6.15'te karşılaştırılmıştır.



--- KDT [102]

- □ □ Sunulan Sentez Modeli (YAK) (w), Δ Δ Δ Sunulan Sentez Modeli (YAK) (s)
 * * * Sunulan Sentez Modeli (GP) (w), • • • Sunulan Sentez Modeli (GP) (s)
 + + + Sentez Modeli (s) [115], ○ ○ ○ Sentez Modeli (w) [115]

Şekil 6.24. Sentez modellerin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz [102] sonuçları ile karşılaştırılması
 ($h = 635 \mu m$ - $\epsilon_r = 3.78$, $h = 635 \mu m$ - $\epsilon_r = 9.9$, $h = 635 \mu m$ - $\epsilon_r = 20$)

Bu tablolarda, Z_0' ölçülen karakteristik empedans değerlerini, w' ve s' sırasıyla ölçülen şerit ve yarık genişliğini belirtmektedir. Z_0 , ölçülen s' ve w' değerlerini kullanarak KDT [102]'den elde edilen karakteristik empedans değerini temsil eder. Z_0^+ ise s' ve w' değerlerini kullanarak IE3D [142] simülasyon programından elde edilen karakteristik empedans değeridir. w^* ve s^* sırasıyla ölçülen w' ve s' değerlerini kullanarak Güney ve Ark. [115] tarafından önerilen sentez modellerinden hesaplanan şerit ve yarık genişliklerini göstermektedir. $Z_0(s', w^*)$ ve $Z_0(s^*, w')$, sırasıyla w^* ve s^* değerlerini

kullanarak hesaplanan quasi-statik analiz sonuçlarıdır. w ve s , sırasıyla ölçülen w' ve s' değerlerini kullanarak bu tez çalışmasında sunulan GP ve YAK algoritmasıyla belirlenen sentez modelleri kullanarak hesaplanan sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'lerin şerit ve yarık genişlikleridir. Son olarak $Z_o(s', w)$ ve $Z_o(s, w')$ sırasıyla şerit genişliği (w) ve yarık genişliği (s) değerlerini kullanarak hesaplanan quasi-statik analiz sonuçlarını ifade etmektedir.

Tablo 6.15'ten de açıkça görülebileceği gibi, önerilen sentez modellerinden elde edilen yarık ve şerit genişlikleri, ölçülen değerleri kullanarak hesaplanan yarık ve şerit genişliği değerleri arasında iyi bir uyum bulunmaktadır. Ayrıca bu tablodan, önerilen sentez modellerinin sonuçlarını kullanarak hesaplanan karakteristik empedans $Z_o(s', w)$ ve $Z_o(s, w')$ 'nin KDT [102], IE3D [142], Güney ve Ark. [115] ve ölçülen sonuçlar [114] karşılaştırılmış olup aralarında iyi bir uyumun olduğu görülmüştür.

Sentez modellerinden elde edilen sonuçların KDT, IE3D, ve ölçüm sonuçlarıyla iyi bir uyum içerisinde olması önerilen sentez modellerinin sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'lerin geometrik boyutlarının hesaplanmasında kullanılabileceğini açık bir şekilde göstermektedir [154].

Tablo 6.15. GP ve YAK algoritması ile belirlenen sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'lerin sentez modellerinden elde edilen sonuçlar ile literatürdeki diğer çalışmalardan elde edilmiş sonuçların karşılaştırması $\epsilon_r = 10.2$ ve $h = 1270 \mu\text{m}$.

Deneyisel [114]			KDT [102]	IE3D [142]	Sentez Modelleri [115]				Sunulan Sentez Modelleri (YAK)				Sunulan Sentez Modelleri (GP)			
s' (μm)	w' (μm)	Z_o' (Ω)	Z_o (s', w') (Ω)	Z_o^+ (s', w') (Ω)	s^* (μm)	Z_o (s^*, w^*) (Ω)	w^* (μm)	Z_o (s', w^*) (Ω)	s (μm)	Z_o (s, w') (Ω)	w (μm)	Z_o (s', w) (Ω)	s (μm)	Z_o (s, w') (Ω)	w (μm)	Z_o (s', w) (Ω)
125	1300	47.50	50.11	52.71	129	50.45	1302	50.10	125.68	50.17	1237	50.46	138.27	51.11	1310	50.06
150	1750	47.93	50.07	52.08	139	49.36	1678	50.30	156.46	50.48	1630	50.47	164.60	50.99	1630	50.47

GP ve YAK algoritması kullanılarak elde edilen sentez modellerin ortalama yüzde hataları Tablo 6.16 verilmiştir. Bu tablodan da anlaşıldığı üzere GP ve YAK algoritması kullanılarak elde edilmiş olan sentez modellerin sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'nin tasarımında kullanılabilir bir doğruluğa sahip olduğu görülmüştür.

Tablo 6.16. Sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'ler için önerilen sentez modellerin geometrik boyutlara göre ve karakteristik empedansa göre ortalama yüzde hataları

Sentez Modelleri		Geometrik Boyutlara Göre Ortalama Yüzde Hatalar (%)	Karakteristik Empedansa Göre Ortalama Yüzde Hatalar (%)
YAK	Şerit Genişliği (w)	3.45	0.60
	Yarı Genişliği (s)	2.11	0.46
GP	Şerit Genişliği (w)	3.25	0.65
	Yarı Genişliği (s)	3.43	0.73

Sonuç olarak GP ve YAK algoritması kullanılarak geliştirilen sentez modellerin doğruluğunu ve geçerliliğini ortaya koymak için literatürdeki mevcut sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda önerilen sentez modellerin literatürdeki mevcut sonuçlar ile iyi bir uyum içerisinde olması önerilen sentez modellerin sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'lerin geometrik boyutlarını hesaplamak için kullanılabileceğini açık bir şekilde göstermektedir [154].

7. BÖLÜM

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

7.1. Giriş

Bu bölümde, ilk olarak tez çalışması kapsamında yapılan GP ve YAK algoritması ile yapılan modelleme çalışmalarının sonuçlarıyla ilgili genel bir değerlendirme yapılmıştır. Daha sonra ise gelecek dönem çalışmalarına, GP ve YAK algoritması kullanılarak yapılacak olan modelleme çalışmalarıyla ilgili önerilere yer verilmiştir.

7.2. Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında, MİH'lerin hem quasi-statik analizleri hem de sentezleri için GP algoritması ile gerçekleştirilen modeller sunulmuştur. Bu amaçla MİH'lerin karakteristik parametreleri olan efektif dielektrik sabitleri ve karakteristik empedanslarını hesaplamak için GP kullanılarak gerçekleştirilen analiz modelleri sunulmuştur. MİH'lerin arzu edilen karakteristik empedansa sahip olması için gerekli olan geometrik boyutlarını hesaplayan sentez modelleri hem GP ve hem de YAK algoritması kullanılarak elde edilmiştir. Sunulan bu tez çalışmasında, yedi farklı mikrodalga iletim hattı yapısı ele alınmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında farklı mikrodalga iletim hatlarından dielektrik taban destekli EDDK'ların, asılı mikroşerit hatların, ters mikroşerit hatların, klasik mikroşerit hatların, sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların analiz ve sentez modelleri GP ile belirlenirken, mikrodalga iletim hatlarından iletken destekli mikro EDŞH'lerin ve sonsuz toprak düzlemine sahip asimetric EDŞH'lerin sentez modelleri hem GP hem de YAK algoritması ile belirlenmiştir.

Yukarıda sıralanan bu modellerin oluşturulması esnasında kullanılan veri setleri literatürde bulunan mevcut quasi-statik metotlardan elde edilmiştir. Ayrıca bu tez çalışması kapsamında simülasyon çalışması yapılmıştır. Yapılan bu simülasyon çalışması ise tam dalga EM simülatör olan IE3D ile gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında önerilen analiz ve sentez modellerin doğruluğunu ve geçerliliğini kanıtlamak için oldukça kapsamlı karşılaştırmalar yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, analiz ve sentez modellerinden elde edilen sonuçların literatürde bulunan mevcut teorik, simülasyon ve deneysel çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırıldığında oldukça iyi bir uyum içerisinde oldukları görülmüştür. Ayrıca sunulan tüm analiz ve sentez modellerin literatürdeki kapalı formda matematiksel ifadelere sahip mevcut çalışmalarla karşılaştırıldığında matematiksel olarak oldukça basit oldukları görülmüştür.

Bu tez çalışması kapsamında farklı mikrodalga iletim hatlarından dielektrik taban destekli EDDK'ların, asılı mikroşerit hatların, ters mikroşerit hatların, klasik mikroşerit hatların, sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip EDDK'ların analiz ve sentez modelleri genetik programlama ile belirlenirken, mikrodalga iletim hatlarından iletken destekli mikro EDŞH'lerin ve sonsuz toprak düzlemine sahip asimetrik EDŞH'lerin sentez modelleri hem genetik programlama hemde yapay arı koloni algoritması ile belirlenmiştir.

7.3. Öneriler

GP ile yapılacak olan matematiksel model arama çalışmalarında dikkat edilmesi gereken en önemli husus, matematiksel model elde edilirken giriş sayısının artmasıyla model yapılarının kompleksliği artabilmektedir. Giriş sayılarının artması, hem eğitimlerde kullanılan veri sayılarının hem de modellemelerdeki parametre sayılarının artmasına neden olmaktadır. Böyle bir durumda, GP ile model aranırken hem işlem süresi oldukça uzamakta hemde doğru modellerin bulunmasında zorluklar yaşanmaktadır. Bu nedenle, GP ile yapılacak olan modelleme çalışması sırasında ilk olarak ele alınacak olan problemin hangi değişkenlere bağlı olduğu belirlenmelidir. Böylece girişler, bu değişkenlerin birbirlerine oranı şeklinde tanımlanırsa giriş sayısının azaltılması mümkün olabilir. GP ile matematiksel model aranırken hata oranının düşmemesi durumunda modellerin geçerli olduğu bölge bölümlere ayrılarak veya daraltılarak doğru modeller bulunabilir. Ayrıca başlangıç parametreleri olan popülasyon sayısı, çaprazlama, mutasyon ve çoğalma operatörlerinin uygun seçilmesi ile işlem süresini kısaltarak daha

hızlı zamanda hata oranı daha düşük ve matematiksel olarak daha basit modeller bulunabilir. GP çözümleri bir ağaç yapısı şeklinde olup fonksiyonlar ve terminaller bulundurur. Fonksiyon kümesinde bulunan, matematiksel fonksiyonlar (sin, cos, tan, vs), aritmetik operatörler (+, -, ×, /) gibi ifadelerin çok kullanılması işlem süresini uzatarak daha karmaşık matematiksel modeller bulunur. Bu fonksiyonları optimum şekilde alarak daha iyi sonuçlar bulunabilir.

YAK algoritması ile sentez modellerin optimizasyonu yapılırken öncelikle matematiksel modelin nasıl olabileceği tahmin edilerek optimum bir model seçilebilir. Sentez modellerin basitliği yada karmaşıklığı, katsayı aralığının büyük yada küçük olması YAK algoritmasının çalışması dikkate alınarak uzun sürebilmektedir. YAK algoritmasının parametrelerinden olan; popülasyon sayısı, limit ve iterasyon sayısının optimum seçilmesi durumunda hata oranı en düşük değerde modeller elde edilebilir.

Gelecek dönem çalışmaları arasında, ekranlı MİH'lerin analizleri ve MİH'lerin frekans bağımlı analizleri GP tabanlı modellerle gerçekleştirilmesi çalışmaları yer almaktadır. Frekans bağımlı analizler için yapılacak olan modelleme çalışmalarında ise yapıya ait saçılma parametreleri yapının geometrik boyutlarına ve çalışma frekansına bağlı olarak hesaplanabilir. GP ve YAK algoritması ile belirlenen modellerinden elde edilen sonuçların teorik, simülasyon ve deneysel çalışmaların sonuçlarıyla oldukça iyi bir uyum içerisinde olması, GP ve YAK algoritmasının MİH'lerin hem frekans bağımlı hem de quasi-statik analizlerinin yanı sıra diğer birçok elektromanyetik ve mikrodalga problemlerinin çözümü içinde alternatif bir yaklaşım olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

KAYNAKÇA

1. Barrett, R. M., Barnes, M. H., Microwave circuits. *National Conference on Airborne Electronics*, IRE, May 1951. Ohio.
2. Cohn, S. B., 1955. Problems in strip transmission lines. **IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, MTT-3 (2): 119–126.
3. Begovich, N. A., 1955. Capacity and characteristic impedance of strip transmission lines with rectangular inner conductors. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, 3 (2): 127–133.
4. Grieg, D., Engelmann, H., 1952. Microstrip-A new transmission technique for the kilomegacycle range. **Proceedings of the IRE**, 40 (12): 1644–1650.
5. Assadourian, F., Rimai, E., 1952. Simplified theory of microstrip transmission systems. **Proceedings of the IRE**, 40 (12): 1651–1657.
6. Wen, C. P., 1969. Coplanar waveguide: A surface strip transmission line suitable for nonreciprocal gyromagnetic device applications. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, 17 (12): 1087–1090.
7. Special issue on, 1968. Microwave integrated circuits. **IEEE Transactions on Electron Devices**, ED-15.
8. Special issue on, 1971. Microwave integrated circuits. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, MTT-19.
9. Gupta, K. C., Singh, A., 1974. *Microwave Integrated Circuits*. Wiley Eastern Ltd. New Delhi.
10. Frey, J., 1974. *Microwave Integrated Circuits*. Artech House, Dedham.
11. Gupta, K. C., 1979. *Microwaves*. Wiley Eastern Ltd., New Delhi.
12. Ho, P., Kao, M. Y., Chao, P. C., Duh, K. H. G., Ballingall, J. M., Allen, S. T., Tessmer, A. J., Smith, P. M., 1991. Extremely high gain 0.15 μm gate-length InAlAs/InGaAs/InP HEMTs. **Electronics Letters**, 27 (4): 325.
13. Ahmari, D. A., Fresina, M. T., Hartmann, Q. J., Barlage, D. W., Mares, P. J., Feng, M., Stillman, G. E., 1996. High-speed InGaP/GaAs HBTs with a strained In/sub x /Ga/sub $1-x$ /As base. **IEEE Electron Device Letters**, 17 (5): 226–228.
14. Gupta, K. C., Garg, R., Bahl, I., Bhartia, P., 1996. *Microstrip Lines And Slotlines*. Second ed. Boston: Artech House.
15. Gill, D. M., Kane, B. C., Svensson, S. P., Tu, D. W., Uppal, P. N., Byer, N. E.,

1996. High-performance, 0.1 μm InAlAs/InGaAs high electron mobility transistors on GaAs. **IEEE Electron Device Letters**, **17** (7): 328–330.
16. Dipolalo, F., 2000. Networks and Devices Using Planar Transmission Lines. CRC Press.
 17. Liu, N., Fu, J., Cui, W., Liu, Z., Liu, L., Zhou, W., Wang, Q., Guo, A., 2017. Automatic and scalable parametric modeling for 1–100GHz transmission line. *2017 International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC)*. IEEE; 2017:1–2.
 18. Kucharski, M., Borngraber, J., Wang, D., Kissinger, D., Ng, H. J., 2017. A 109–137 GHz power amplifier in SiGe BiCMOS with 16.5 dBm output power and 12.8% PAE. *2017 12th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC)*. IEEE; 2017:281–284.
 19. Frankel, M. Y., Whitaker, J. F., Mourou, G. A., 1992. Optoelectronic transient characterization of ultrafast devices. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, **28** (10): 2313–2324.
 20. Jackson, R. W., 1986. Considerations in the use of coplanar waveguide for millimeter-wave integrated circuits. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **34** (12): 1450–1456.
 21. Majidi-Ahy, R., Nishimoto, C. K., Riazat, M., Glenn, M., Silverman, S., Weng, S. L., Pao, Y. C., Zdasiuk, G. A., Bandy, S. G., Tan, Z. C. H., 1990. 5-100 GHz InP coplanar waveguide MMIC distributed amplifier. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **38** (12): 1986–1993.
 22. Riazat, M., Majidi-Ahy, R., Feng, I. J., 1990. Propagation modes and dispersion characteristics of coplanar waveguides. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **38** (3): 245–251.
 23. Alferness, R. C., 1982. Waveguide electrooptic modulators. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **30** (8): 1121–1137.
 24. Ramer, O., 1982. Integrated optic electrooptic modulator electrode analysis. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, **18** (3): 386–392.
 25. Special issue on, 1990. Application of lightwave technology to microwave devices, circuits and systems. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **MTT-38**.
 26. Kessler, J., Dill. R., 1992. Influence of buffer layers within YBa/sub 2/Cu/sub

- 3/O/sub 7-x/ coplanar waveguide structure. **IEEE Microwave and Guided Wave Letters**, 2 (1): 6–7.
27. Newman, N., Lyons, W. G., 1993. High-temperature superconducting microwave devices: Fundamental issues in materials, physics, and engineering. **Journal of Superconductivity**, 6 (3): 119–160.
 28. Itoh, T., 1989. Numerical Technique for Microwave and Millimeter-wave Passive Circuits. Wiley, New York.
 29. Soghomonian, M. S., Robertson, I. D., 1993. Finite difference modeling of novel waveguiding structures for MMIC applications. **International Journal of Microwave and Millimeter-Wave Computer-Aided Engineering**, 3 (3): 271–286.
 30. Karpuz, C., 1995. Yavaş-Dalgalı Transmisyon Hatları. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 71s.
 31. Karpuz, C., 2001. Mikrodalga Filtrelerinin Minyatürizasyonu İçin Yeni Planar Rezonatörlerin Tasarımı. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri, 108s.
 32. Türkmen, M., 2003. Farklı Geometrik Yapılardaki Mikrodalga İletim Hatlarının Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 151s.
 33. Kaya, S., 2006. Kuplajlı İletim Hatlarının Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 60s.
 34. Türkmen, M., 2009. Mikrodalga İletim Hatlarının Bulanık Sinir Ağları ile Modellenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri, 136s.
 35. Kaya, S., 2011. Düzlemsel İletim Hatlarının İşlemsel Zeka Yöntemleri ile Sentezi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri, 101s.
 36. Kişioğlu, H., 2011. Yapay Arı Kolonisi Algoritması Kullanarak Eş Düzlemli Dalga Kılavuzları ve Şerit Hatların Tasarımı. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 73s.
 37. Seyrekoğlu, S., 2011. Eş Düzlemli Dalga Kılavuzları ve Şerit Hatlar İçin Bulanık Sinir Ağı Tabanlı Sentez Modelleri. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 114s.
 38. Veyres, C., Fouad Hanna, V., 1980. Extension of the application of conformal

- mapping techniques to coplanar lines with finite dimensions. **International Journal of Electronics**, **48** (1): 47–56.
39. Ghione, G., Naldi, C., 1984. Analytical formulas for coplanar lines in hybrid and monolithic MICs. **Electronics Letters**, **20** (4): 179.
 40. Kitazawa, T., Kuo, C. W., Kong, K. S, Itoh, T., 1991. Planar transmission lines with finitely thick conductors and lossy substrates. *1991 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. IEEE:769–772.
 41. Su, H. C., Wong, K. L., 1997. Quasi-static solutions of cylindrical coplanar waveguides. **Microwave and Optical Technology Letters**, **14** (6): 347–351.
 42. Jean-Fu, K., 1996. Quasi-TEM analysis of coplanar waveguides with an inhomogeneous semiconductor substrate. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **44** (9): 1586–1589.
 43. Ghione, G., Goano, M., Pirola, M., 1999. Exact, conformal-mapping models for the high-frequency losses of coplanar waveguides with thick electrodes of rectangular or trapezoidal cross section. *1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.99CH36282)*, vol 3. IEEE:1311–1314.
 44. Simons, R., 2001. Coplanar Waveguide Circuits, Components, And Systems. John Wiley and Sons, Cleveland, Ohio, 439.
 45. Görür, A., Karpuz, C., 1999. Quasi-TEM analysis of coplanar waveguides with different ground-plane widths. **Microwave and Optical Technology Letters**, **20** (5): 311–315.
 46. Karpuz, C., Duyar, M., Görür, A., 2000. Analysis of cylindrical conductor-backed coplanar waveguides. **Microwave and Optical Technology Letters**, **27** (2): 144–146.
 47. Karpuz, C., Görür A., 1999. Quasi-static solutions of elliptical coplanar waveguides. **Microwave and Optical Technology Letters**, **20** (6) : 385–389.
 48. Akan, V., Yazgan, E., 2004. Quasi-static TEM characteristics of multilayer elliptical and cylindrical coplanar waveguides. **Microwave and Optical Technology Letters**, **42** (4): 317–322.
 49. Duyar, M., 1999. Çok Katlı Koplanar Dalga Kılavuzları ve Koplanar Şeritlerin Quasi-Statik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Niğde.
 50. Duyar, M., 2006. Değişik Kesitli Eşdüzlemsel İletim Hatlarının Konformal Dönüşüm Tekniği Kullanılarak Analizi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri

Enstitüsü, Doktora Tezi, Konya.

51. Davis, M. E., Williams, E. W., Celestini, A. C., 1973. Finite-boundary corrections to the coplanar waveguide analysis (Short papers). **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **21** (9): 594–596.
52. Chang, C. N., Chang, W. C., Chen, C. H., 1991. Full-wave analysis of multilayer coplanar lines. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **39** (4): 747–750.
53. Su, H. C., Wong, K. L., 1996. Full-wave analysis of the effective relative permittivity of a coplanar waveguide printed inside a cylindrical substrate. **Microwave and Optical Technology Letters**, **12** (2): 94–97.
54. Dib, N., Weller, T., Scardelletti M, Imparato M., 1999. Analysis of cylindrical transmission lines with the finite-difference time-domain method. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **47** (4): 509–512.
55. Wolff, I., 2006. Coplanar Microwave Integrated Circuits. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 545.
56. Phatak, D. S., Das, N. K., Defonzo, A. P., 1990. Dispersion characteristics of optically excited coplanar striplines: comprehensive full-wave analysis. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **38** (11): 1719–1730.
57. Ardit, M., 1955. Characteristics and applications of microstrip for microwave wiring. **IEEE Trans Microwave Theory Tech**, **3** : 31–56.
58. Wheeler, H. A., 1964. Transmission-line properties of parallel wide strips by a conformal-mapping approximation. **IEEE Trans Microwave Theory Tech**, **12** : 280–289.
59. Wheeler, H. A., 1965. Transmission-line properties of parallel strips separated by a dielectric sheet. **IEEE Trans Microwave Theory Tech**, **13** : 172–185.
60. Yamashita, E., Mittra, R., 1968. Variational method for the analysis of microstrip lines. **IEEE Trans Microwave Theory Tech**, **16** : 251–256.
61. Cory, H., 1981. Dispersion characteristics of microstrip lines. **IEEE Trans Microwave Theory Tech**, **29** : 59–61.
62. Derdinger, E. J., 1971. A frequency dependent solution for microstrip transmission lines. **IEEE Trans Microwave Theory Tech**, **19** : 30–39.
63. Wheeler, H. A., 1977. Transmission-line properties of a strip on a dielectric sheet on a plane. **IEEE Trans Microwave Theory Tech**, **25** : 631–647.

64. Hammerstad, E. O., 1975. Equation for microstrip circuit design. *Proceedings of the European Microwave Conference*; 1975:268–272.
65. Hammerstad, E, Jensen, O., 1980. Accurate Models for Microstrip Computer-Aided Design. *MTT-S International Microwave Symposium Digest*, vol 80. MTT006:407–409.
66. Hong, J. S., Shi, J. M., 1987. Modeling microstrip step discontinuities by the transmission matrix. **Electron Lett**, **23** : 678–679.
67. Easter, B., 1975. The equivalent circuit of some microstrip discontinuities. **IEEE Trans Microwave Theory Tech**, **23** : 655–660.
68. Welch, J. D., Pratt, H. J., 1966. Losses in microstrip transmission systems for integrated microwave circuits. **NEREM Rec.**, **8** : 100–101.
69. Bianco, B., Panini, L., Parodi, M., Ridella, S., 1978. Some considerations about the frequency dependence of the characteristic impedance of uniform microstrips. **IEEE Trans Microwave Theory Tech**, **26** : 182–185.
70. Tomar, R., Antar, Y., Bhartia, P., 2005. Computer-aided-design (CAD) of suspended-substrate microstrips: An overview. **International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering**, **15** (1): 44–55.
71. Pramanick, P., Bhartia, P., 1985. Computer-aided design models for millimeter-wave finlines and suspended-substrate microstrip lines. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **33** (12): 1429–1435.
72. Tomar, R. S, Bhartia, P., 1987. New quasi-static models for the computer-aided design of suspended and inverted microstrip lines (Short paper). **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **35** (4): 453–457.
73. Svacina, J., 1992. Analysis of multilayer microstrip lines by a conformal mapping method. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **40** (4): 4–7.
74. Svacina, J., 1992. A simple quasi-static determination of basic parameters of multilayer microstrip and coplanar waveguide. **IEEE Microwave and Guided Wave Letters**, **2** (10): 385–387.
75. Schellenberg, J. M., 1995. CAD models for suspended and inverted microstrip. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **43** (6): 1247–1252.
76. Fouad Hanna, V., Thebault, D., 1981. Analysis of asymmetrical coplanar waveguides. **International Journal of Electronics**, **50** (3): 221–224.

77. Hanna, V. F., Thebault, D., 1984. Theoretical and experimental investigation of asymmetric coplanar waveguides (Short papers). **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **32** (12): 1649–1651.
78. Karpuz, C., Görür, A., Görür, H., Alkan, M., 1995. Fast and simple analytical expressions for quasi static parameters of asymmetric coplanar lines. **Microwave and Optical Technology Letters**, **9** (6): 334–336.
79. Chen, P., Shao-Jun, F., Wang E. C., 2005. Analysis of characteristic impedance of asymmetric coplanar waveguide using finite-difference time-domain method. *2005 IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*; 2005:91–94.
80. Heinrich, W., 1993. Quasi-TEM description of MMIC coplanar lines including conductor-loss effects. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **41** (1): 45–52.
81. Ibarra Fusté J. A., Santos Blanco M. C., Rodríguez R. E., 2012. Compact closed-form expressions for the propagation parameters of a finite ground width coplanar transmission waveguide with thick electrodes. **IET Microwaves, Antennas & Propagation**, **6** (3): 269.
82. Das, N. K., Pozar, D. M., 1987. A generalized spectral-domain green's function for multilayer dielectric substrates with application to multilayer transmission lines. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **35** (3): 326–335.
83. Frankel, M. Y., Voelker, R. H., Hilfiker, J. N., 1994. Coplanar transmission lines on thin substrates for high-speed low-loss propagation. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **42** (3): 396–402.
84. Gevorgian, S., Linner, L. J. P., Kollberg, E. L., 1995. CAD models for shielded multilayered CPW. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **43** (4): 772–779.
85. Erli, C., Chou, S. Y., 1997. Characteristics of coplanar transmission lines on multilayer substrates: modeling and experiments. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **45** (6): 939–945.
86. Alkan, M., Görür, A., Karpuz, C., 1998. Quasi-static analysis of cylindrical coplanar waveguide with multilayer dielectrics. **International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering**, **8** (4): 303–314.

87. Görür, A., Duyar, M., Karpuz, C., 1999. Analytic formulas for calculating the quasi-static parameters of a multilayer cylindrical coplanar strip line. **Microwave and Optical Technology Letters**, **22** (6): 432–436.
88. Bedair, S. S., Wolff, I., 1992. Fast, accurate and simple approximate analytic formulas for calculating the parameters of supported coplanar waveguides for (M)MIC's. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **40** (1): 41–48.
89. Cheng, K. K. M., Robertson, I. D., 1994. Numerically efficient spectral domain approach to the quasi-TEM analysis of supported coplanar waveguide structures. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **42** (10): 1958–1965.
90. Görür, A., Karpuz, C., Alkan, M., 1996. Quasi-static TEM characteristics of overlayed supported asymmetric coplanar waveguides. **International Journal of Microwave and Millimeter-Wave Computer-Aided Engineering**, **6** (5): 297–304.
91. Svacina, J., 1992. Parameters of multilayer asymmetric coplanar waveguide, modeling, measurements and control. **AMSE Press**, **48** (2): 37–45.
92. Ghione, G., 1993. A CAD-oriented analytical model for the losses of general asymmetric coplanar lines in hybrid and monolithic MICs. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **41** (9): 1499–1510.
93. Knorr, J. B, Kuchler, K., 1975. Analysis of Coupled Slots and Coplanar Strips on Dielectric Substrate. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **23** (7): 541–548.
94. Bedair, S. S., 1984. Characteristics of Some Asymmetrical Coupled Transmission Lines (Short Paper). **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **32** (1): 108–110.
95. Phatak, D. S., Defonzo, A. P., 1990. Dispersion characteristics of optically excited coplanar striplines: pulse propagation. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **38** (5): 654–661.
96. Lin, H. H., Chiou, H. K., Chang, C. Y., 1995. Balun design for uniplanar broad band double balanced mixer. **Electronics Letters**, **31** (24): 2113–2114.
97. Yamashita, E., Ke Ren, L., Suzuki, Y., 1987. Characterization method and simple design formulas of MCS lines proposed for MMIC's. **IEEE Transactions on**

- Microwave Theory and Techniques**, 35 (12): 1355–1362.
98. Goverdhanam, K., Simons, R. N., Katehi, L. P. B., 1998. Micro-coplanar striplines - New transmission media for microwave applications. *1998 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*; 1998:1035–1038.
 99. Tan, K. W., Uysal S., 1999. Analysis and design of conductor-backed asymmetric coplanar waveguide lines using conformal mapping techniques and their application to end-coupled filters. **IEICE Transactions on Electronics**, E82C (7): 1098–1103.
 100. Görür, A., Karpuz C., 1999. Analytic formulas for conductor-backed asymmetric CPW with one lateral ground plane. **Microwave and Optical Technology Letters**, 22 (2): 123–126.
 101. Qian, Y., Yamashita, E., 1990. Additional approximate formulas and experimental data on micro-coplanar striplines (MMICs). **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, 38 (4): 443–445.
 102. Svacina, J., 1997. Special types of coplanar transmission lines suitable up to mmwave bands. *IEEE 6th Topical Meeting on Electrical Performance of Electronic Packaging*; 1997:99–102.
 103. Yildiz, C., Guney, K., Turkmen, M., Kaya, S., 2008. Adaptive neuro-fuzzy models for the quasi-static analysis of microstrip line. **Microwave and Optical Technology Letters**, 50 (5): 1191–1196.
 104. Yildiz, C., Saracoglu, O., 2003. Simple models based on neural networks for suspended and inverted microstrip lines. **Microwave and Optical Technology Letters**, 39 (5): 383–389.
 105. Lakshmi, N. J., Sri Rama Krishna, K., Pratap Reddy, L., 2008. ANN models for coplanar strip line analysis and synthesis. *2008 International Conference on Recent Advances in Microwave Theory and Applications*. IEEE; 2008:682–685.
 106. Turkmen, M., Yildiz, C., Guney, K., Kaya, S., 2010. Anfis models for the quasi-static analysis of coplanar strip line structures. **Microwave and Optical Technology Letters**, 52 (9): 1990–1996.
 107. Yıldız, C., Sağıroğlu, Ş., Saraçoğlu, O., Türkmen, M., 2003. Neural models for an asymmetric coplanar stripline with an infinitely wide strip. **International Journal of Electronics**, 90 (8): 509–516.
 108. Yildiz, C., Guney, K., Turkmen, M., Kaya, S., 2007. Neural models for quasi-static

- analysis of conventional and supported coplanar waveguides. **AEU - International Journal of Electronics and Communications**, **61** (8): 521–527.
109. Deng, T. Q., Leong, M. S., Kooi, P. S., Yeo, T. S., 1996. Synthesis formulas for coplanar lines in hybrid and monolithic MICs. **Electronics Letters**, **32** (24): 2253.
 110. Yildiz, C., Akdagli, A., Turkmen, M., 2006. Simple and accurate synthesis formulas obtained by using a differential evolution algorithm for coplanar strip lines. **Microwave and Optical Technology Letters**, **48** (6): 1133–1137.
 111. Yildiz, C., 2005. New and very simple synthesis formulas for coplanar strip line. **Microwave and Optical Technology Letters**, **44** (2): 199–202.
 112. Yildiz, C., Guney, K., Turkmen, M., Kaya, S., 2007. Neural models for coplanar strip line synthesis. **Progress In Electromagnetics Research, PIER**, **69** : 127–144.
 113. Guney, K., Yildiz, C., Kaya, S., Turkmen, M., 2008. Synthesis formulas for microcoplanar striplines. **Microwave and Optical Technology Letters**, **50** (11): 2884–2888.
 114. Kaya, S., Guney, K., Yildiz, C., Turkmen, M., 2012. ANFIS models for synthesis of micro-coplanar stripline and asymmetric coplanar stripline with an infinitely wide strip. **Microwave and Optical Technology Letters**, **54** (2): 460–467.
 115. Guney, K., Yildiz, C., Kaya, S., Turkmen, M., 2009. New and accurate synthesis formulas for asymmetric coplanar stripline with an infinitely wide strip. **Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves**, **30** (2): 109–116.
 116. Deng, T. Q., Leong, M. S., Kooi, P. S., Yeo, T. S., 1997. Synthesis formulas simplify coplanar-waveguide design. **Microwaves and RF**, **36** (3): 84–98.
 117. Deng, T., 1996. CAD model for coplanar waveguide synthesis. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **44** (10): 1733–1738.
 118. Leong, M. S., Kooi, P. S., Deng, T. Q., 1995. Accurate and simple closed-form formulas for coplanar waveguide synthesis. **Electronics Letters**, **31** (23): 2017–2019.
 119. Akdagli, A., Turkmen, M., Yildiz, C., 2008. Accurate and simple synthesis formulas for coplanar waveguides. **International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering**, **18** (2): 112–117.
 120. Yildiz, C., Turkmen, M., 2005. Very accurate and simple CAD models based on neural networks for coplanar waveguide synthesis. **International Journal of RF**

- and Microwave Computer-Aided Engineering**, 15 (2): 218–224.
121. Kaya, S., Guney, K., Yildiz, C., Turkmen, M., 2009. Accurate synthesis formulas obtained by using a differential evolution algorithm for conductor-backed coplanar waveguides. **Progress In Electromagnetics Research M**, 10 : 71–81.
 122. Kaya, S., Guney, K., Yildiz, C., Turkmen, M., 2010. New and accurate synthesis formulas for open supported coplanar waveguides. **Microwave and Optical Technology Letters**, 52 (2): 262–269.
 123. Kaya, S., Guney, K., Yildiz, C., Turkmen, M., 2013. Anfis models for synthesis of open supported coplanar waveguides. **Neural Network World**, 23 (6): 553–569.
 124. Koza, J. R., 1992. Genetic Programming: On The Programming Of Computers By Means Of Natural Selection. MIT Press, Cambridge.
 125. Koza, J. R., 1999. Genetic Programming In: Darwinian Invention And Problem Solving. Morgan Kaufmann, San Francisco.
 126. Karaboğa, D., 2005. Yapay Arı Koloni (Artificial Bee Colony, ABC) Algoritması. (Web sayfası: <http://mf.erciyes.edu.tr/abc/>), (Erişim tarihi: Aralık 2017)
 127. Akay, B., 2009. Nümerik Optimizasyon Problemlerinde Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony) Algoritmasının Performans Analizi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri, 301s.
 128. Baykasoğlu, A., Güllü, H., Çanakçı, H., Özbakır, L., 2008. Prediction of compressive and tensile strength of limestone via genetic programming. **Expert Systems with Applications**, 35 (1–2): 111–123.
 129. Koza, J. R., Bennett, F. H., Andre, D., Keane, M. A., Dunlap, F., 1997. Automated synthesis of analog electrical circuits by means of genetic programming. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, 1 (2): 109–128.
 130. Belisário, L. S., Pierreval, H., 2015. Using genetic programming and simulation to learn how to dynamically adapt the number of cards in reactive pull systems. **Expert Systems with Applications**, 42 (6): 3129–3141.
 131. Patnaik, A. K., Bhuyan, P. K., 2016. Application of genetic programming clustering in defining LOS criteria of urban street in Indian context. **Travel Behaviour and Society**, 3 : 38–50.
 132. Ishikawa, K., Kitagawa, W., Takeshita, T., 2017. Design for electromagnetic device by multiobjective optimization using genetic programming. **Electronics and Communications in Japan**, 100 (4): 56–65.

133. Velay-Lizancos, M., Perez-Ordoñez, J. L., Martinez-Lage, I., Vazquez-Burgo, P., 2017. Analytical and genetic programming model of compressive strength of eco concretes by NDT according to curing temperature. **Construction and Building Materials**, **144** : 195–206.
134. Usman, I., Khan, A., Chamlawi, R., 2011. Employing intelligence in the embedding and decoding stages of a robust watermarking system. **AEU - International Journal of Electronics and Communications**, **65** (6): 582–588.
135. Arslan, Y., 2005. Mühendislikte Tersine Problem Uygulamaları İçin Genetik Programlama Yaklaşımı. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak, 135s.
136. Babayiğit, E., 2015. Meteorolojik Veriler Kullanılarak Yeraltı Su Seviyesinin Genetik Programlama İle Tahmini. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 64s.
137. Telcioğlu, M. B., 2007. Veri Madenciliğinde Genetik Programlama Temelli Yeni Bir Sınıflandırma Yaklaşımı Ve Uygulaması. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 135s.
138. Zhang, X., Zhang, X., 2016. A novel artificial bee colony algorithm for radar polyphase code and antenna array designs. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, **2016** (1): 40.
139. Kabalci, Y., Kockanat, S., Kabalci, E., 2018. A modified ABC algorithm approach for power system harmonic estimation problems. **Electric Power Systems Research**, **154** : 160–173.
140. Karaboga, D., Basturk, B., 2007. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. **Journal of Global Optimization**, **39** (3): 459–471.
141. Abachizadeh, M., Yazdi, M. R. H., Yousefi-Koma, A., 2010. Optimal tuning of PID controllers using Artificial Bee Colony algorithm. *2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. IEEE; 2010:379–384.
142. Zeland Software Inc., IE3D™, www.zeland.com, 2010.
143. Takac, A., 2002. Cellular genetic programming algorithm applied to classification task. Institute of informatics, Faculty of Mathematics, Physics and Informatics Comenius University, Bratislava, Slovakia.

144. Wong, M. L., Leung, K. S., 1999. Data Mining Using Grammar Based Genetic Programming And Applications. Kluwer Academic Publishers, London.
145. Karaboğa, D., 2011. Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları. Nobel Basımevi, İstanbul, 231s.
146. Karaboga, D., 2005. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. Technical Report-TR06, Erciyes University, Engineering Faculty Computer Engineering Department.
147. Kişioğlu, H., Yıldız, C., 2017. Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip eş düzlemli dalga kılavuzu için yeni sentez modelleri. *2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering, ELECO 2016*:558–561.
148. Bhartia, P., Bahl, I. J., Millimeter-Wave Engineering And Applications. Wiley, New York.
149. Yamashita, E., 1968. Variational method for the analysis of microstrip-like transmission lines. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **16** (8): 529–535.
150. Yildiz, C., Kisioglu, H., 2017. Very simple and accurate computer-aided-design (CAD) models developed by genetic programming for the quasi-static analysis of unshielded suspended and inverted microstrip lines. **Journal of Electrical & Electronics Engineering, Istanbul University**, **17** (2): 3303–3309.
151. Spielman, B. E., 1977. Dissipation loss effects in isolated and coupled transmission lines. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **25** (8): 648–656.
152. Schneider, M. V., 1969. Microstrip Lines for Microwave Integrated Circuits. **Bell System Technical Journal**, **48** (5): 1421–1444.
153. Yildiz, C., Kisioglu, H., 2013. Very simple synthesis formulas for microcoplanar striplines. **Microwave and Optical Technology Letters**, **55** (3): 615–619.
154. Yildiz, C., Kisioglu, H., Ozturk, C., 2017. Closed-form design equations for asymmetric coplanar strip line with an infinitely wide strip. **Electromagnetics**, **37** (6): 411–421.

EKLER

Ek-1

Asılı mikroşerit hatlar için analiz modeli [72]

$$\sqrt{\epsilon_{re}} = (1 - f_1 f_2)^{-1} \quad (1)$$

$$f_1 = 1 - \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

$$f_2^{-1} = \sum_{i=0}^3 c_i (w/b)^i \quad (3)$$

$$c_i = \sum_{j=0}^3 d_{ij} \left(\frac{b}{a} \right)^j \quad (4)$$

$$Z = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (5)$$

$$Z_0 = 60 \ln \left[\frac{f(u)}{u} + \sqrt{1 + \frac{4}{u^2}} \right] \quad (6)$$

$$u = \frac{w/b}{1 + \left(\frac{a}{b} \right)} \quad (7)$$

$$f(u) = 6 + (2\pi - 6) \exp \left[- (30.666 / u)^{0.7528} \right] \quad (8)$$

Ters mikroşerit hatlar için analiz modeli [72]

$$\sqrt{\epsilon_{re}} = 1 + f_1 f_2 \quad (9)$$

$$f_1 = \sqrt{\epsilon_r} - 1 \quad (10)$$

$$u = w/b \quad (11)$$

$$f_2^{-1} = \sum_{i=0}^3 c_i (w/b)^i \quad (12)$$

$$c_i = \sum_{j=0}^3 d_{ij} \left(\frac{b}{a} \right)^j \quad (13)$$

$$Z = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (14)$$

$$Z_0 = 60 \ln \left[\frac{f(u)}{u} + \sqrt{1 + \frac{4}{u^2}} \right] \quad (15)$$

$$f(u) = 6 + (2\pi - 6) \exp \left[- (30.666 / u)^{0.7528} \right] \quad (16)$$

Asılı mikroşerit hatlar için sentez modeli [72]

$$x = \frac{1}{u} = \frac{1 + (a/b)}{w/b} \quad (17)$$

$$f(x) \ln(6x + \sqrt{1 + 4x^2}) = Z / 60 \quad (18)$$

$$f(x) = 1 - \frac{x^3 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \right)}{c'_0 x^3 + c'_1 x^2 + c'_2 x + c'_3} \quad (19)$$

$$c'_i = c_i \left(1 + \frac{a}{b} \right)^i \quad (20)$$

Ters mikroşerit hatlar için sentez modeli [72]

$$x = \frac{1}{u} = \frac{b}{w} \quad (21)$$

$$\frac{\ln(6x + \sqrt{1 + 4x^2})}{f(x)} = Z / 60 \quad (22)$$

$$f(x) = 1 + \frac{x^3 (\sqrt{\epsilon_r} - 1)}{c_0 x^3 + c_1 x^2 + c_2 x + c_3} \quad (23)$$

$$x = \frac{3g - \sqrt{g^2 + 8}}{16} \quad (24)$$

$$g = \exp(Z / 60) \quad (25)$$

Asılı mikroşerit hatların analiz ve sentez modelindeki d parametresi;

$$f = \ln \epsilon_r \quad (26)$$

$$d_{00} = (176.2576 - 43.1240f + 13.4094f^2 - 1.7010f^3) \times 10^{-2} \quad (27)$$

$$d_{01} = (4665.2320 - 1790.4000f + 291.5858f^2 - 8.0888f^3) \times 10^{-4} \quad (28)$$

$$d_{02} = (-3025.5070 - 141.9368f - 3099.4700f^2 + 777.6151f^3) \times 10^{-6} \quad (29)$$

$$d_{03} = (2481.5690 + 1430.3860f + 10095.5500f^2 - 2599.1320f^3) \times 10^{-8} \quad (30)$$

$$d_{10} = (-1410.2050 + 149.9293f + 198.2892f^2 - 32.1679f^3) \times 10^{-4} \quad (31)$$

$$d_{11} = (2548.7910 + 1531.9310f - 1027.5200f^2 + 138.4192f^3) \times 10^{-4} \quad (32)$$

$$d_{12} = (999.3135 - 4036.7910f + 1762.4120f^2 - 298.0241f^3) \times 10^{-6} \quad (33)$$

$$d_{13} = (-1983.7890 + 8523.9290f - 5235.4600f^2 + 1145.7880f^3) \times 10^{-8} \quad (34)$$

$$d_{20} = (1954.0720 + 333.3873f - 700.7473f^2 + 121.3212f^3) \times 10^{-5} \quad (35)$$

$$d_{21} = (-3931.0900 - 1890.7190f + 1912.2660f^2 - 319.6794f^3) \times 10^{-5} \quad (36)$$

$$d_{22} = (-532.1326 + 7274.7210f - 4955.7380f^2 + 941.4134f^3) \times 10^{-7} \quad (37)$$

$$d_{23} = (138.2037 - 1412.4270f + 1184.2700f^2 - 270.0047f^3) \times 10^{-8} \quad (38)$$

$$d_{30} = (-983.4028 - 255.1229f + 455.8729f^2 - 83.9468f^3) \times 10^{-6} \quad (39)$$

$$d_{31} = (1956.3170 + 779.9975f - 995.9494f^2 + 183.1957f^3) \times 10^{-6} \quad (40)$$

$$d_{32} = (62.8550 - 3462.5000f + 2909.9230f^2 - 614.7068f^3) \times 10^{-8} \quad (41)$$

$$d_{33} = (-35.2531 + 601.0291f - 643.0814f^2 + 161.2689f^3) \times 10^{-9} \quad (42)$$

Ters mikroşerit hatların analiz ve sentez modelindeki d parametresi;

$$f = \ln \epsilon_r \quad (43)$$

$$d_{00} = (2359.4010 - 97.1644f - 5.7706f^2 + 11.4112f^3) \times 10^{-3} \quad (44)$$

$$d_{01} = (4855.9472 - 3408.5207f + 15296.7300f^2 - 2418.1785f^3) \times 10^{-5} \quad (45)$$

$$d_{02} = (1763.3400 + 961.0481f - 2089.2800f^2 + 375.8805f^3) \times 10^{-5} \quad (46)$$

$$d_{03} = (-556.0909 - 268.6165f + 623.7094f^2 - 119.1402f^3) \times 10^{-6} \quad (47)$$

$$d_{10} = (219.0660 - 253.0864f + 208.7469f^2 - 27.3285f^3) \times 10^{-3} \quad (48)$$

$$d_{11} = (915.5589 + 338.4033f - 253.2933f^2 + 40.4745f^3) \times 10^{-3} \quad (49)$$

$$d_{12} = (-1957.3790 - 1170.9360f + 1480.8570f^2 - 347.6403f^3) \times 10^{-5} \quad (50)$$

$$d_{13} = (486.7425 + 279.8323f - 431.3625f^2 + 108.8240f^3) \times 10^{-6} \quad (51)$$

$$d_{20} = (5602.7670 + 4403.3560f - 4517.0340f^2 + 743.2717f^3) \times 10^{-5} \quad (52)$$

$$d_{21} = (-2823.4810 - 1562.7820f + 3646.1500f^2 - 823.4223f^3) \times 10^{-5} \quad (53)$$

$$d_{22} = (253.8930 + 158.5529f - 3235.4850f^2 - 919.36661f^3) \times 10^{-6} \quad (54)$$

$$d_{23} = (-147.0235 + 62.4342f + 887.5211f^2 - 270.7555f^3) \times 10^{-7} \quad (55)$$

$$d_{30} = (-3170.2100 - 1931.8520f + 2715.3270f^2 - 519.3420f^3) \times 10^{-6} \quad (56)$$

$$d_{31} = (596.3251 + 188.1409f - 1741.4770f^2 + 465.6756f^3) \times 10^{-6} \quad (57)$$

$$d_{32} = (124.9655 + 577.5381f + 1366.4530f^2 - 481.1300f^3) \times 10^{-7} \quad (58)$$

$$d_{33} = (-530.2099 - 2666.3520f - 3220.0960f^2 + 1324.4990f^3) \times 10^{-9} \quad (59)$$

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Hakan KİŞİOĞLU

Uyruğu: Türkiye (T.C.)

Doğum Tarihi ve Yeri: 22 Ekim 1983, Kahramanmaraş/Göksun

Medeni Durumu: Bekar

Tel: +90 354 242 1002

Fax: +90 354 242 1005

Email: hakan.kisioglu@bozok.edu.tr

Yazışma Adresi: Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi,
Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümü, 66900, Merkez/YOZGAT

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Elektrik Elektronik Müh. ABD	2011
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü	2009
Lise	Burhanettin Yıldız Anadolu Meslek Lisesi, Diyarbakır	2001

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2011- Halen	Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü	Öğretim Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Yildiz, C., Kisioglu, H., Ozturk, C., 2017. Closed-form design equations for asymmetric coplanar strip line with an infinitely wide strip. **Electromagnetics**, 37 (6): 411–421.

2. Yildiz, C., Kisioglu, H., 2013. Very simple synthesis formulas for microcoplanar striplines. **Microwave and Optical Technology Letters**, 55 (3): 615–619.
3. Yildiz, C., Kisioglu, H., 2017. Very simple and accurate computer-aided-design (CAD) models developed by genetic programming for the quasistatic analysis of unshielded suspended and inverted microstrip lines. **Journal of Electrical & Electronics Engineering, Istanbul University**, 17 (2): 3303–3309.
4. Kişioğlu, H., Yıldız, C., 2017. Sonlu genişlikte toprak düzlemine sahip eş düzlemlı dalga kılavuzu için yeni sentez modelleri. *2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering*, ELECO :558–561.

