

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

**DÜZLEMSEL İLETİM HATLARININ
İŞLEMSEL ZEKA YÖNTEMLERİ İLE SENTEZİ**

**Hazırlayan
Sabri KAYA**

**Danışman
Prof. Dr. Kerim GÜNEY**

Doktora Tezi

**AĞUSTOS 2011
KAYSERİ**

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.

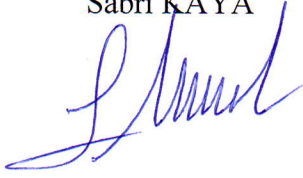


Sabri KAYA

Düzlemsel İletim Hatlarının İşlemsel Zeka Yöntemleri ile Sentezi adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Sabri KAYA



Danışman

Prof. Dr. Kerim GÜNEY



Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

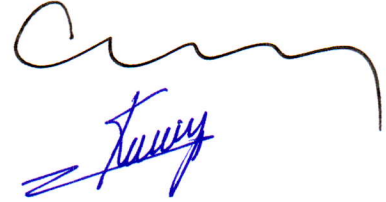
Prof. Dr. Necmi TAŞPINAR

Prof. Dr. Kerim GÜNEY danışmanlığında **Sabri KAYA** tarafından hazırlanan **“Düzlemsel İletim Hatlarının İşlemsel Zeka Yöntemleri ile Sentezi”** adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

25/08/2011

JÜRİ:

Başkan : Prof. Dr. Celal YILDIZ



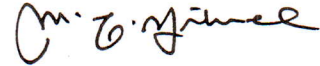
Üye : Prof. Dr. Kerim GÜNEY



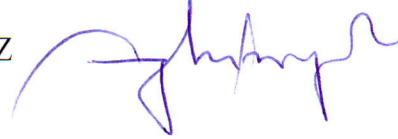
Üye : Prof. Dr. Necmi TAŞPINAR



Üye : Prof. Dr. Mehmet Emin YÜKSEL



Üye : Doç. Dr. Ceyhun KARPUZ



ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 13/09/2011.. tarih ve 2011/32-05.. sayılı kararı ile onaylanmıştır.

13/09/2011



Prof. Dr. Necmettin MARAŞLI
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Akademisyen olmam konusunda beni cesaretlendiren ve maddi, manevi desteklerini esirgemeyen anneme, babama, kardeşlerime ve eşime, moral ve motivasyon kaynağım olan kızlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Hem tecrübeleri hem de engin bilgileri ile bana yol gösteren değerli hocalarım Prof. Dr. Kerim GÜNEY'e, Prof. Dr. Celal YILDIZ'a, Yrd. Doç. Dr. Mustafa TÜRKMEN'e, bilgisayar laboratuvarı imkanlarını sunarak yardımcı olan Araş. Gör. Rifat KURBAN'a ve Araş. Gör. Emre BENDEŞ'e, tüm çalışma arkadaşlarıma, hocalarıma ve dostlarıma teşekkürlerimi sunuyorum.

“Esnek Hesaplama Yöntemleri ile Mikrodalga İletim Hatlarının Analizi ve Sentezi” isimli araştırma projesi ile doktora tezimi destekleyen TÜBİTAK Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projeleri Birimi'ne, doktora tezim süresince doktora bursu kapsamında maddi destekte bulunan TÜBİTAK- Münir Bırsel Lisansüstü Bursları Vakfı'na teşekkür ediyorum.

Hazırlamış olduğum doktora tezimi, hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini sürekli yanımda hissettiğim rahmetli babama ithaf ediyorum.

DÜZLEMSEL İLETİM HATLARININ İŞLEMSEL ZEKA YÖNTEMLERİ İLE SENTEZİ

Sabri KAYA

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi, Ağustos 2011

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kerim GÜNEY

ÖZET

Mikrodalga iletim hatlarının analizinde genellikle quasi-statik yaklaşımlar ve tam-dalga yaklaşımlar kullanılır. Quasi-statik yaklaşımda sadece TEM modu için iletim hattının karakteristik parametreleri belirlenirken, tam-dalga yaklaşımda yalnızca TEM modu için değil aynı zamanda hibrit modlar için de iletim hattının karakteristik parametreleri frekansa bağlı olarak belirlenir. Literatürde mikrodalga iletim hatlarının karakteristik parametrelerini farklı analiz yöntemleri kullanarak belirleyen çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen, arzu edilen karakteristik empedansa sahip olması istenen mikrodalga iletim hattının geometrik boyutlarının belirlenmesi amacıyla yapılan sentez çalışmaları sınırlı sayıdadır.

Bu tez çalışmasında, mikrodalga iletim hatlarından asimetrik eşdüzlemli dalga kılavuzu, dielektrik taban destekli eşdüzlemli dalga kılavuzu, mikro eşdüzlemli şerit hat ve sonsuz uzun toprak düzlemine sahip eşdüzlemli şerit hat ele alınmıştır.

Bu tez çalışmasında, dört farklı düzlemsel iletim hattının geometrik boyutlarının hesaplanması için kapalı formda sentez modelleri sunulmuştur. Sentez modellerinin bilinmeyen katsayı değerleri esnek hesaplama algoritmaları kullanılarak optimum bir şekilde bulunmuştur. Katsayı değerlerinin elde edilmesinde kullanılan esnek hesaplama algoritmaları; diferansiyel gelişim, genetik, benzetilmiş tavlama ve parçacık sürü optimizasyon algoritmalarıdır.

Bu tez çalışmasında ayrıca, dört farklı düzlemsel iletim hattının geometrik boyutlarının hesaplanması için bulanık sinir ağlarına dayalı sentez modelleri sunulmuştur. Bulanık sinir ağları bulanık küme teorisine, bulanık kurallara ve bulanık muhakemeye dayanan popüler bir hesaplama yöntemidir. Bulanık sinir ağları giriş ve çıkış değişkenleri arasında lineer olmayan ilişkiye sahip problemlerin çözümüne yatkın lineer olmayan bir

sistemdir. Bulanık sinir ağılarına dayalı sentez modellerinin parametrelerinin elde edilmesinde hibrid öğrenme, en küçük kareler, genetik ve benzetilmiş tavlama algoritmaları kullanılmıştır.

Tez çalışması kapsamında oluşturulan sentez modellerinin doğruluğunu ve geçerliliğini göstermek için düzlemsel iletim hatlarının analizi IE3D elektromanyetik simülatörü kullanılarak gerçekleştirilmiş, düzlemsel iletim hatları tasarlanmış ve imal edilmiştir. İletim hatlarının S-parametreleri vektör network analizör kullanılarak ölçülmüş ve S-parametreleri kullanılarak iletim hatlarının karakteristik empedans değerleri hesaplanmıştır. Sentez modellerinden elde edilen sonuçlar IE3D elektromanyetik simülatörü sonuçlarıyla ve deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasında yapılan teorik, simülasyon ve deneysel çalışmaların sonuçları literatürdeki mevcut sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Tez çalışmasından elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla çok iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Düzlemsel iletim hatları; işlemsel zeka yöntemleri; esnek hesaplama algoritmaları; bulanık sinir ağıları; IE3D elektromanyetik simülatörü; deneysel çalışma

SYNTHESIS OF PLANAR TRANSMISSION LINES BY USING COMPUTATIONAL INTELLIGENCE METHODS

Sabri KAYA

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Ph. D. Thesis, August 2011

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Kerim GÜNEY

ABSTRACT

Quasi-static and full-wave approaches are usually used for analyzing of microwave transmission lines. The quasi-static approach only produces transmission line parameters for the TEM mode. On the other hand, the full-wave approach can produce the transmission parameters not only for the TEM mode but also for the hybrid modes, whose parameters are functions of frequency. There are a lot of studies in the literature to obtain the characteristic parameters of microwave transmission lines by using the different analysis methods. Whereas, there is a little synthesis studies to determine the physical dimensions of microwave transmission lines having required characteristic impedance.

The microwave transmission lines studied in this thesis are asymmetric coplanar waveguide, supported coplanar waveguide, microcoplanar stripline, and asymmetric coplanar stripline with an infinitely wide strip.

In this thesis, closed- form synthesis models to compute the physical dimensions of four different planar transmission lines are presented. The values of the unknown coefficients in the synthesis models are optimally obtained by using the soft computing algorithms. The soft computing algorithms used in the synthesis are differential evolution, genetic, simulated annealing, and particle swarm optimization algorithms.

In this thesis, synthesis models based on adaptive-network-based fuzzy inference system (ANFIS) are also presented to accurately calculate the geometrical dimensions of four different planar transmission lines. ANFIS is a popular computing framework based on the concepts of fuzzy set theory, fuzzy if-then rules, and fuzzy reasoning. It is a nonlinear system capable of inferring complex nonlinear relationships between input

and output variables. Hybrid learning, least-squares, genetic, and simulated annealing algorithms are used to determine the parameters of the ANFIS models.

In order to show the accuracy and validity of the synthesis models obtained in this thesis, planar transmission lines are analyzed by using the electromagnetic simulator IE3D, and planar transmission lines are designed and constructed. S-parameters of transmission lines are measured by using the vector network analyzer. The characteristic impedances of transmission lines are computed by using the S-parameters. The results of synthesis models are compared with the electromagnetic simulator IE3D and experimental results.

The theoretical, simulation, and experimental results obtained in this thesis are compared with the results available in the literature. It is shown that the results obtained in this thesis are in very good agreement with the results available in the literature.

Keywords: Planar transmission lines; computational intelligence methods; soft computing algorithms; adaptive-network-based fuzzy inference system; electromagnetic simulator IE3D; experimental work

İÇİNDEKİLER

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK SAYFASI	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI	iii
KABUL VE ONAY SAYFASI	iv
TEŞEKKÜR	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER	xiii
TABLolar LİSTESİ	xiv
ŞEKİLLER LİSTESİ	xvii

GİRİŞ	1
--------------------	----------

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

1.1. Mikrodalga İletim Hatları	3
1.2. Literatür Taraması	4
1.3. Tezin Amacı	6

2. BÖLÜM

GEREÇ ve YÖNTEM

2.1. Giriş	10
2.2. Esnek Hesaplama Algoritmaları	11
2.2.1. Diferansiyel Gelişim Algoritması	11
2.2.2. Genetik Algoritma	13
2.2.3. Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması	14
2.2.4. Benzetilmiş Tavlama Algoritması	15
2.3. Bulanık Sinir Ağları	15
2.3.1. Hibrid Öğrenme Algoritması	18
2.3.2. En Küçük Kareler Algoritması	19
2.4. IE3D Elektromanyetik Simülatör Programı	21
2.5. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihaz ve Malzemeler	23

2.5.1. Baskı Devre Kazıma Cihazı	23
2.5.2. RT/Duroid Taban Malzemeleri	24
2.5.3. Konnektörler.....	25
2.5.4. Network Analizör	25

3. BÖLÜM

SİMULASYONLAR VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Giriş	26
3.1.1. Asimetrik Eşdüzlemlı Dalga Kılavuzlarına Ait Simülasyonlar ve Deneysel Çalışmalar.....	27
3.1.2. Dielektrik Taban Destekli Eşdüzlemlı Dalga Kılavuzlarına Ait Simülasyonlar ve Deneysel Çalışmalar	30
3.1.3. Mikro Eşdüzlemlı Şerit Hatlara Ait Simülasyonlar ve Deneysel Çalışmalar.....	32
3.1.4. Sonsuz Toprak Düzlemine Sahip Eşdüzlemlı Şerit Hatlara Ait Simülasyonlar ve Deneysel Çalışmalar	33

4. BÖLÜM

MİKRODALGA İLETİM HATLARI İÇİN SUNULAN SENTEZ FORMÜLLERİ

4.1. Giriş	35
4.1.1. Asimetrik Eşdüzlemlı Dalga Kılavuzları için Sunulan Sentez Formülleri.....	35
4.1.2. Dielektrik Taban Destekli Eşdüzlemlı Dalga Kılavuzları için Sunulan Sentez Formülleri	42
4.1.3. Mikro Eşdüzlemlı Şerit Hatlar için Sunulan Sentez Formülleri.....	53
4.1.4. Sonsuz Uzun Toprak Düzlemine Sahip Eşdüzlemlı Şerit Hatlar için Sunulan Sentez Formülleri	59

5. BÖLÜM

MİKRODALGA İLETİM HATLARININ SENTEZİ İÇİN SUNULAN BSA MODELLERİ

5.1. Giriş	66
5.1.1. Asimetrik Eşdüzlemlı Dalga Kılavuzlarının Sentezi için Sunulan BSA Modelleri	68

5.1.2. Dielektrik Taban Destekli Eşdüzlemli Dalga Kılavuzlarının Sentezi için Sunulan BSA Modelleri	73
5.1.3. Mikro Eşdüzlemli Şerit Hatların Sentezi için Sunulan BSA Modelleri	79
5.1.4. Sonsuz Uzun Toprak Düzlemine Sahip Eşdüzlemli Şerit Hatların Sentezi için Sunulan BSA Modelleri	83

6. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Tartışma-Sonuçlar	88
6.2. Öneriler	89

KAYNAKLAR	91
------------------------	----

ÖZGEÇMİŞ	100
-----------------------	-----

KISALTMALAR VE SİMGELER

Kısaltmalar

GHz	Giga Hertz
RF	Radyo Frekans
MİH	Mikrodalga İletim Hattı
MIC	Microwave Integrated Circuits (Mikrodalga Entegre Devreler)
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuits (Monolitik Mikrodalga Entegre Devreler)
TEM	Transverse Electromagnetic (Enine Elektromanyetik)
EDK	Eşdüzlemli Dalga Kılavuzu (Coplanar Waveguide)
DTDEDK	Dielektrik Taban Destekli Eşdüzlemli Dalga Kılavuzu (Supported Coplanar Waveguide)
EŞH	Eşdüzlemli Şerit Hat (Coplanar Stripline)
KDT	Konform Dönüşüm Tekniği (Conformal Mapping Technique)
SDA	Spektral Domen Analizi (Spectral Domain Analysis)
DSBM	Dikdörtgen Sınır Bölme Metodu (Rectangular Boundary Division Method)
CAD	Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
BSA	Bulanık Sinir Ağları
DE	Differential Evolution (Diferansiyel Gelişim)
GA	Genetic Algorithm (Genetik Algoritma)
PSO	Particle Swarm Optimization (Parçacık Sürü Optimizasyon)
SA	Simulated Annealing (Benzetilmiş Tavlama)
HL	Hybrid Learning (Hybrid Öğrenme)
LSQ	Least Squares (En Küçük Kareler)

Simgeler

Z_0	Karakteristik Empedans
η_0	Hava Ortamının Özempedansı
ϵ_0	Boş Uzayın Dielektrik Katsayısı
ϵ_r	Bağıl Dielektrik Sabiti

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Baskı devre cihazı ve aparatları.....	24
Tablo 2.2. Konnektörlerin özellikleri	25
Tablo 3.1. Asimetrik EDK'lara ait simülasyon ve ölçüm sonuçları.....	30
Tablo 3.2. DTDEDK'lara ait simülasyon ve ölçüm sonuçları.....	31
Tablo 3.3. Mikro EŞH'lara ait simülasyon ve ölçüm sonuçları.....	33
Tablo 3.4. Sonsuz toprak düzlemine sahip EŞH'lara ait simülasyon ve ölçüm sonuçları	34
Tablo 4.1. DE, GA, PSO ve SA algoritmaları kullanılarak elde edilen sentez formülü katsayıları.....	38
Tablo 4.2. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçların KDT, IE3D ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması.....	41
Tablo 4.3. DE algoritması kullanılarak elde edilen sentez formülü katsayıları.....	44
Tablo 4.4. PSO algoritması kullanılarak elde edilen sentez formülü katsayıları.....	45
Tablo 4.5. SA algoritması kullanılarak elde edilen sentez formülü katsayıları.....	45
Tablo 4.6. GA kullanılarak elde edilen sentez formülü katsayıları	46
Tablo 4.7. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması.....	49
Tablo 4.8. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması.....	50
Tablo 4.9. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması.....	51
Tablo 4.10. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçların KDT, IE3D ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması.....	52
Tablo 4.11. DE algoritması kullanılarak elde edilen sentez formülü katsayıları.....	54
Tablo 4.12. SA kullanılarak elde edilen sentez formülü katsayıları.....	55
Tablo 4.13. GA kullanılarak elde edilen sentez formülü katsayıları	55
Tablo 4.14. PSO kullanılarak elde edilen sentez formülü katsayıları.....	55
Tablo 4.15. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçların KDT, IE3D ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması.....	59
Tablo 4.16. Sentez formüllerden elde edilen sonuçların DSBM, KDT ve ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılması	59

Tablo 4.17. DE, PSO, SA ve GA kullanılarak elde edilen sentez formülü katsayıları....	62
Tablo 4.18. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçların KDT, IE3D ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması.....	65
Tablo 5.1. MİH'lerin geometrik boyutlarının belirlenmesi için sunulan BSA modelleri.....	67
Tablo 5.2. BSA modellerinin üyelik fonksiyonu tipleri ve sayıları, kural, parametre ve veri sayıları	67
Tablo 5.3. BSA modellerinin ortalama yüzde hataları	69
Tablo 5.4. BSA modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla, tez çalışması kapsamında sunulan sentez formüllerinin sonuçlarıyla ve gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	72
Tablo 5.5. BSA modellerinin ortalama yüzde hataları	73
Tablo 5.6. BSA modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla, tez çalışması kapsamında sunulan sentez formüllerinin sonuçlarıyla ve gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	76
Tablo 5.7. BSA modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması.....	77
Tablo 5.8. BSA modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması.....	78
Tablo 5.9. BSA modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması.....	78
Tablo 5.10. BSA modellerinin ortalama yüzde hataları	79
Tablo 5.11. BSA modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla, tez çalışması kapsamında sunulan sentez formüllerinin sonuçlarıyla ve gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	83
Tablo 5.12. BSA modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla ve tez çalışması kapsamında sunulan sentez formüllerinin sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	83
Tablo 5.13. BSA modellerinin ortalama yüzde hataları	84

Tablo 5.14. BSA modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla, tez çalışması kapsamında sunulan sentez formüllerinin sonuçlarıyla ve gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılması.....	87
---	----

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. BSA yapısı	16
Şekil 2.2. IE3D'nin örgü yapısı.....	23
Şekil 2.3. QC-7000 Baskı devre kazıma cihazı.....	24
Şekil 2.4. ISO Pro 2.7 yazılım logosu	24
Şekil 2.5. Kazıma uçları (Endmils)	24
Şekil 2.6. Çeşitli konnektörler.....	25
Şekil 2.7. Rohde-Schwarz ZVB 20 vektör network analizör.....	25
Şekil 3.1. Asimetrik EDK'nın kesit görünümü	27
Şekil 3.2. İki kapılı devre konfigürasyonu	27
Şekil 3.3. Deneysel olarak tasarlanan asimetrik EDK	30
Şekil 3.4. DTDEDK'nın kesit görünümü.....	31
Şekil 3.5. Deneysel olarak tasarlanan DTDEDK yapısı.....	31
Şekil 3.6. Mikro EŞH'nın kesit görünümü.....	32
Şekil 3.7. Deneysel olarak tasarlanan mikro EŞH yapısı.....	32
Şekil 3.8. Sonsuz toprak düzeline sahip EŞH'nın kesit görünümü.....	33
Şekil 3.9. Deneysel olarak tasarlanan sonsuz toprak düzlemine sahip EŞH.....	34
Şekil 4.1. Birinci sentez formülünden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi- statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	40
Şekil 4.2. İkinci sentez formülünden elde edilen yarık genişliği sonuçlarının quasi- statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	40
Şekil 4.3. Sentez formüllerinin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	41
Şekil 4.4. Birinci sentez formülünden elde edilen yarık genişliği sonuçlarının quasi- statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	47
Şekil 4.5. İkinci sentez formülünden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi- statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	47
Şekil 4.6. Sentez formüllerinin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	48
Şekil 4.7. Birinci sentez formülünden elde edilen yarık genişliği sonuçlarının quasi- statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	57

Şekil 4.8. İkinci sentez formülünden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi- statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	57
Şekil 4.9. Sentez formüllerinin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	58
Şekil 4.10. Birinci sentez formülünden elde edilen yarık genişliği sonuçlarının quasi- statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	63
Şekil 4.11. İkinci sentez formülünden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi- statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	63
Şekil 4.12. Sentez formüllerinin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	64
Şekil 5.1. Asimetrik EDK'ların sentezi için oluşturulan BSA modelleri	68
Şekil 5.2. Birinci BSA modelinden elde edilen yarık genişliği sonuçlarının quasi- statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	70
Şekil 5.3. İkinci BSA modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi- statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	71
Şekil 5.4. BSA modellerinden elde edilen sonuçların kullanılmasıyla hesaplanan karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	71
Şekil 5.5. Birinci BSA modelinden elde edilen yarık genişliği sonuçlarının quasi- statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	74
Şekil 5.6. İkinci BSA modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi- statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	75
Şekil 5.7. BSA modellerinden elde edilen sonuçların kullanılmasıyla hesaplanan karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	76
Şekil 5.8. Birinci BSA modelinden elde edilen yarık genişliği sonuçlarının quasi- statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	80
Şekil 5.9. İkinci BSA modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi- statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	81
Şekil 5.10. BSA modellerinden elde edilen sonuçların kullanılmasıyla hesaplanan karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	82

Şekil 5.11. Birinci BSA modelinden elde edilen yarık genişliği sonuçlarının quasi- statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	85
Şekil 5.12. İkinci BSA modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi- statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	85
Şekil 5.13. BSA modellerinden elde edilen sonuçların kullanılmasıyla hesaplanan karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırılması	86

GİRİŞ

Mikrodalga iletim hatları mikrodalga entegre devrelerinin temelini oluştururlar. Mikrodalga iletim hatlarının analizinde genellikle quasi-statik yaklaşımlar ve tam-dalga yaklaşımlar kullanılır. Literatürde mikrodalga iletim hatlarının karakteristik parametrelerini farklı analiz yöntemleri kullanarak belirleyen çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen, arzu edilen karakteristik empedansa sahip olması istenen mikrodalga iletim hattının geometrik boyutlarının belirlenmesi amacıyla yapılan sentez çalışmaları sınırlı sayıdadır.

Bu tez çalışmasında, mikrodalga iletim hatlarından

- Asimetrik eşdüzlemli dalga kılavuzları
- Dielektrik taban destekli eşdüzlemli dalga kılavuzları
- Mikro eşdüzlemli şerit hatlar
- Sonsuz uzun toprak düzlemine sahip eşdüzlemli şerit hatlar

ele alınmıştır. Ele alınan mikrodalga iletim hatlarının sentezi için iki farklı yaklaşım kullanılmıştır.

- Birinci yaklaşım, kapalı formda sentez formüllerinin oluşturulmasıdır. Bu yaklaşımda ilk olarak sentez modelleri oluşturulmuştur. Daha sonra, sentez modellerinin katsayıları esnek hesaplama algoritmaları kullanılarak elde edilmiştir.
- İkinci yaklaşım, bulanık sinir ağlarına dayalı sentez modellerinin oluşturulmasıdır. Oluşturulan bulanık sinir ağı modellerinin parametreleri farklı optimizasyon algoritmaları ile optimum bir şekilde belirlenmiştir.

Tez çalışması kapsamında ayrıca, oluşturulan sentez modellerinin geçerliliğini göstermek için mikrodalga iletim hatlarının analizi IE3D elektromanyetik simülatörü kullanılarak gerçekleştirilmiş, mikrodalga iletim hatları tasarlanmış ve imal edilmiştir.

Tezin birinci bölümünde mikrodalga iletim hatları ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. Mikrodalga iletim hatlarının analizi ve sentezi ile ilgili literatürdeki çalışmalardan bahsedilerek tezin amacı açıklanmıştır.

İkinci bölümde ise tez çalışması kapsamında kullanılacak olan esnek hesaplama algoritmaları ve bulanık sinir ağları detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bu bölümde mikrodalga iletim hatlarının analizinde kullanılan IE3D elektromanyetik simülatörü hakkında da bilgi verilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan cihaz ve malzemelerle ilgili bilgiler yine ikinci bölümde sunulmuştur.

Üçüncü bölümde mikrodalga iletim hatlarına ait tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyonlara ve deneysel çalışmalara yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde mikrodalga iletim hatlarının geometrik boyutlarının hesaplanması için oluşturulan sentez formülleri verilmiştir. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçlar, literatürdeki sonuçlarla ve tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Beşinci bölümde mikrodalga iletim hatlarının geometrik boyutlarının hesaplanması için oluşturulan bulanık sinir ağlarına dayalı sentez modelleri verilmiştir. Bulanık sinir ağlarına dayalı sentez modellerinden elde edilen sonuçlar, literatürdeki sonuçlarla ve tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Altıncı bölümde ise tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen teorik, simülasyon ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve önerilere yer verilmiştir.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

1.1. Mikrodalga İletim Hatları

Mikrodalga devrelerindeki hızlı gelişmeler, ikinci dünya savaşı sırasında gerçekleşmiş ve radar problemlerine mikrodalga tekniklerini uygulamak amacıyla laboratuvarlar kurularak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu deneysel çalışmalar için analitik metotlar da geliştirilmiştir. Pratik olarak gerçekleştirilen bu çalışmaların hepsi uygulamada hızlı bir şekilde kullanım alanları bulmuşlardır. Bu çalışmalarda, dalga kılavuzu ve koaksiyel hatlar mikrodalga devrelerin gelişiminde iki temel yapı olarak yer almışlardır. İletken kaplı iki dielektrik plaka arasına ince bir iletkenin sandviç şeklinde yerleştirilmesinden meydana gelen şerit hatlar 1951 yılında Barrett ve Barnes [1] tarafından tasarlanmıştır. Şerit hat teknikleri ilk olarak baskı devre için geliştirilen bakır kaplı levhaların kullanılmasıyla geliştirilmiştir. Şerit hatlar, birbirlerine yakın yerleştirilmiş iki şerit arasındaki doğal kuplajdan dolayı paralel hat kuplörlerinde kullanılmak için uygun bulunmuşlardır. Şerit hat konfigürasyonunun kullanıldığı kuplajlı hat yönlü kuplör prensipleri Wheeler [2] tarafından ortaya konulmuştur. Şerit hat karakteristiklerinin detaylı bir şekilde hesaplanması, ilk olarak Peters [3] tarafından yapılmıştır. Şerit hatların en önemli özelliği, hattın karakteristik empedansının merkez şerit genişliği ile kontrol edilebilmesidir. 1950'li yıllarda, bir başka iletim hattı yapısı olarak, bir dielektrik tabanın bir yüzeyine bir şerit yerleştirilmesi ve diğer yüzüne ise tamamen iletken kaplama yapılmasıyla mikroşerit hatlar tasarlanmıştır [4, 5]. Bu yıllarda mikroşerit hatlar üzerine yoğun araştırmalar yapılmış ve tasarımlarda yaygın bir kullanım alanı bulmuşlardır. Mikrodalga devre elemanlarının silah, roket ve uydu uygulamalarında kullanılabilmesi için gerekli olan boyut küçültmelerine olan ihtiyacın artması, 1960'lı yıllarda mikroşerit hatlara olan ilgiyi artırmıştır. Mikrodalga yarı iletken elemanlarla ilgili hızlı gelişmelerle birlikte kuplajlı mikroşerit

hatlar gibi düzlemsel mikrodalga iletim hatlarının (MİH) kullanılmasıyla MIC (Microwave Integrated Circuits: Mikrodalga Entegre Devreler) teknolojisi doğmuştur [6-9]. MIC'ler, sistem mühendislerine radar ve haberleşme sistemleri için boyutları küçük ve grup olarak kullanılmaları mümkün olan modülleri araştırma imkanı sunarlar. Şerit ve mikroşerit hatlarda dielektrik tabanın karşı tarafına yerleştirilmiş olan toprak düzlemleri, birçok aktif mikrodalga devre elemanları için gerekli olan şönt bağlantıları zorlaştırmaktadır. 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 zorlaştırmaktadır. Bu durum boyut küçültülmesinin önemli olduğu düşük frekanslar için kesinlikle bir dezavantajdır. Bütün bu dezavantajları ortadan kaldırmak için toprak düzlemi de dâhil olmak üzere bütün iletim elemanlarının aynı düzlemde yer aldığı eşdüzlemli dalga kılavuzları (EDK) geliştirilmiştir [10].

EDK'ların analizi ilk olarak Wen [10] tarafından 1969 yılında konform dönüşüm tekniği (KDT) kullanılarak yapılmıştır. EDK'lar, bir dielektrik tabanın üzerine aynı düzlem üzerinde bir merkez iletken ve bu iletkenin her iki yanına, iki yarıktan sonra yerleştirilmiş olan toprak düzlemlerinden oluşmaktadırlar. EDK'larda bütün iletim elemanlarının aynı düzlemde olması birçok aktif mikrodalga devre elemanları için gerekli olan şönt bağlantıları kolaylaştırmaktadır. Ayrıca MMIC'ler (Monolithic Microwave Integrated Circuits: Monolitik Mikrodalga Entegre Devreler) içerisindeki yarı-iletken taban üzerine yerleştirilmiş çeşitli elemanlarla da bağlantıda idealdirler.

1.2. Literatür Taraması

Günümüzde kullanılan yüksek hızlı elektronik düzenler, 100 GHz ve daha yüksek frekanslar bölgesinde başarılı bir şekilde çalışabilmektedirler [11-16]. Yüksek frekanslarda, işaretin doğruluğunu kaybetmeden iletilmesi amacıyla devre elemanlarının birleştirilmesi ve işaretlerin bir noktadan diğerine gönderilebilmesi için iletim hatlarının kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle iletim hatları MMIC uygulamaları içerisinde yaygın olarak kullanılmışlardır [17-20]. MMIC dizaynı için kullanılan mikrodalga iletim ortamları literatürde birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır [21-31]. Ayrıca bu yapıların karakteristik parametrelerini belirleyen analitik yaklaşımların ve CAD modellerin gelişimi bu yapılara olan ilgiyi artırmıştır.

MİH'lerin analizinde genellikle quasi-statik yaklaşımlar ve tam-dalga yaklaşımlar kullanılır. Quasi-statik yaklaşımda sadece TEM (Transverse Electromagnetic: Enine Elektromanyetik) modu için iletim hattının karakteristik parametreleri belirlenir. Quasi-statik analiz yöntemi olan KDT, CAD uygulamaları için uygun olan kapalı form analitik ifadelerle imkân vermekte ve 40 GHz'e kadar olan frekans bölgeleri için tam dalga analizlerinin doğruluğu ile mukayese edilebilir bir doğruluğa sahiptir [32-44]. Tam-dalga yaklaşımda ise yalnızca TEM modu için değil aynı zamanda hibrit modlar için de iletim hattının karakteristik parametreleri frekansa bağlı olarak belirlenir [45-50].

Eşdüzlemli iletim hatları, iletken şeritlerin ve toprak düzlemlerinin dielektrik taban malzemesinin üzerine simetrik veya asimetrik bir şekilde yerleştirilmesi ile gerçekleştirilirler. Asimetrik iletim hatları literatürde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [51-54]. Sonsuz kalınlıktaki dielektrik tabana sahip asimetrik EDK'lar 1981 yılında Hanna ve Thebault [51] tarafından literatüre sunulmuş ve analizi gerçekleştirilmiştir. Sonlu kalınlıktaki dielektrik tabana sahip asimetrik EDK'ların karakteristik parametreleri KDT kullanılarak elde edilmiştir [52, 53]. Asimetrik EDK'ların karakteristik empedansları ayrıca zaman domeninde sonlu farklar metodu kullanılarak bulunmuştur [54].

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 önlenmesidir [55-60].

Literatürde yaygın olarak kullanılan çok katmanlı EDK'lardan bir tanesi de dielektrik taban destekli eşdüzlemli dalga kılavuzlarıdır (DTDEDK). DTDEDK'ların karakteristik parametreleri Bedair ve Wolff [61] tarafından 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 [62], geliştirilmiş SDA (GSDA) metodunu kullanarak DTDEDK'ların karakteristik parametrelerini elde etmişlerdir. Çok katmanlı asimetrik EDK'lar ayrıca Görür ve ark. [63] tarafından yapılan bir çalışmada da ele alınmıştır.

Eşdüzlemli şerit hatlar (EŞH) da EDK'lar gibi MIC ve MMIC'lerdeki devre elemanlarının seri ve paralel bağlantılarını kolaylaştıran iletim hatlarıdır [10, 33, 64-75]. EŞH'ların en önemli özellikleri iyi bir propagasyona ve küçük dispersiyona sahip olmaları ve karakteristik parametrelerinin dielektrik taban malzemesinin kalınlığına direk bağlı olmasıdır. EŞH'lar RF ve mikrodalga entegre devreler için çok kullanışlı iletim hatlarıdır. Bu nedenle birçok simetrik ve asimetrik EŞH yapısı literatüre sunulmuş ve analizi gerçekleştirilmiştir [10, 33, 64-75].

Asimetrik EŞH'lardan mikro eşdüzlemli şerit hatlar (mikro EŞH) ilk olarak 1987 yılında Yamashita [70] tarafından literatüre sunulmuştur. Mikro EŞH'ların analizi değişik metotlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunlar; dikdörtgen sınır bölme metodu [70], zaman domeninde sonlu farklar metodu [71] ve KDT'dir [72, 73]. Mikro EŞH'ların geometrik boyutlarının hesaplanması için birkaç sentez formülü de literatürde sunulmuştur [70, 74].

Asimetrik EŞH'lardan sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH'lar ise 1997 yılında Svacina [75] tarafından literatüre sunulmuş ve analizi gerçekleştirilmiştir. Sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH'ların karakteristik parametreleri için kapalı-form ifadeler KDT kullanılarak elde edilmiştir [75].

1.3. Tezin Amacı

MİH'ler mikrodalga entegre devrelerinin temelini oluştururlar. MİH'ler esas olarak yüksek frekanslardaki işaretlerin taşınmasında kullanılmakla birlikte, mikrodalga filtreler ve kuplörler gibi birçok devre elemanlarının gerçekleştirilmesinde de kullanılırlar. MİH'ler değişik mikrodalga devre uygulamaları için farklı geometrik boyutlarda ve yapılarda tasarlanmışlardır. En yaygın kullanılan MİH'ler, düzlemsel iletim hatları olan EDK'lar ve EŞH'lardır.

MİH'lerin analizinde iki farklı yaklaşım kullanılır. Bunlardan birincisi statik veya quasi-statik yaklaşımlar, ikincisi dinamik veya tam-dalga yaklaşımlardır [38]. Statik veya quasi-statik yaklaşımda TEM modu için iletim hattının karakteristik parametreleri belirlenirken, tam-dalga veya dinamik yaklaşımda yalnızca TEM modu için değil aynı zamanda hibrit modlar için de iletim hattının karakteristik parametreleri frekansa bağlı olarak belirlenir. Statik veya quasi-statik yaklaşımın kullanıldığı yöntemler, KDT, sonlu

farklar yöntemi, Fourier dönüşüm domeninde değişebilir yöntemi ve sınırlı elemanlar yöntemidir. Dinamik veya tam-dalga yaklaşımının kullanıldığı yöntemler ise, zaman domeninde sonlu farklar yöntemi, mod-uygunlaştırma yöntemi, SDA ve spektral domende Galerkin yöntemidir. Tam-dalga yaklaşımı kullanan yöntemler en doğru sonuçları vermelerine karşın oldukça zor ve uzun zaman alacak karmaşık işlemler gerektirirler. Quasi-statik yaklaşımların kullanıldığı yöntemler ise nispeten basit olmalarına karşın, iletim hattının dispersif yapısını dikkate almazlar ve bu yüzden de yüksek frekanslarda hatalı sonuçlar verirler.

Literatürde MİH'lerin karakteristik parametrelerini farklı analiz yöntemleri kullanarak belirleyen çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen, arzu edilen karakteristik empedansa sahip olması istenen MİH'lerin geometrik boyutlarının belirlenmesi amacıyla yapılan sentez çalışmaları sınırlı sayıdadır. Mikrodalga teknolojisinde yaygın olarak kullanılan MİH'lerden sadece birkaç iletim hattına ait sentez modelleri literatürde mevcuttur [76-92]. Bu sebepten dolayı bu tez çalışması kapsamında MİH'lerin sentez için iki farklı yaklaşım sunulmuştur:

- Birinci yaklaşım, sentez formüllerinin oluşturulmasıdır. Bu yaklaşımda ilk olarak sentez modelleri oluşturulmuştur. Daha sonra sentez modellerinin katsayıları esnek hesaplama algoritmalarından diferansiyel gelişim [93, 94], genetik [95, 96], parçacık sürü optimizasyon [97] ve benzetilmiş tavlama [98] algoritmaları kullanılarak elde edilmiştir. Esnek hesaplama algoritmaları, yerel minimumlara takılmamalarından ve başlangıç şartlarına çok bağlı olmamalarından dolayı bir çok mikrodalga ve anten probleminin çözümünde kullanılmıştır [83-86, 99-114].
- İkinci yaklaşım, BSA'lara [115-117] dayalı sentez modellerinin oluşturulmasıdır. BSA bulanık küme teorisine, bulanık kurallara ve bulanık muhakemeye dayanan popüler bir hesaplama yöntemidir. BSA giriş ve çıkış değişkenleri arasında lineer olmayan ilişkiye sahip problemlerin çözümüne yatkın lineer olmayan bir sistemdir. BSA modellerinin parametreleri, hibrid öğrenme [116, 117], en küçük kareler [118, 119], genetik [95, 96] ve benzetilmiş tavlama [98] algoritmaları ile optimum bir şekilde belirlenmiştir.

Son yıllarda pek çok elektromanyetik problemin çözümünde bulanık mantık sistemler kullanılmıştır [120-140]. Yapılan çalışmaların çoğunda, mikroşerit antenlerin karakteristik parametreleri veya geometrik boyutları BSA modelleri kullanılarak elde edilmiştir [120-130]. Ayrıca, farklı geometrik yapılardaki MİH'lerin analizi için de BSA modelleri literatüre sunulmuştur [136-140].

Tez çalışması kapsamında farklı yapılarda MİH'ler deneysel olarak da gerçekleştirilmiştir. Tasarım aşamasına geçmeden önce ilk olarak, şerit ve yarık genişlikleri değiştirilmek suretiyle 50Ω 'luk karakteristik empedansa sahip iletim hattı yapıları belirlenmiştir. Daha sonra iletim hatları tam-dalga elektromanyetik simülatörü IE3D [141] ile simüle edilmiş ve tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak tasarımları gerçekleştirilecek iletim hatları, RT-Duroid taban malzemeleri üzerine QC 7000 cihazı kullanılarak baskı devre kazıma yöntemiyle imal edilmişlerdir. Bu iletim hatlarının S-parametreleri, Rohde-Schwarz ZVB 20 vektör network analizör ile ölçülmüş ve karakteristik empedans değerleri ise S-parametrelerine ait ölçüm sonuçlarının kullanılmasıyla dolaylı olarak hesaplanmıştır [38].

Tez çalışması kapsamında MİH'lerden

- Asimetrik EDK'lar
- Dielektrik taban destekli eşdüzlemli dalga kılavuzları (DTDEDK)
- Mikro eşdüzlemli şerit hatlar (mikro EŞH)
- Sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH'lar

ele alınmıştır.

Bu tezin temel amacı

- Esnek hesaplama algoritmalarından diferansiyel gelişim, genetik, parçacık sürü optimizasyon ve benzetilmiş tavlama algoritmalarını kullanarak MİH'lerin geometrik boyutları için basit sentez formülleri sunmak;
- MİH'lerin geometrik boyutlarını hesaplamak için BSA'lara dayalı sentez modelleri oluşturmak ve BSA modellerini hibrid öğrenme, en küçük kareler, genetik ve benzetilmiş tavlama algoritmalarını kullanarak optimize etmek;

- MİH'lerin karakteristik parametrelerini IE3D elektromanyetik simülatörü ile hesaplamak ve elde edilen sonuçları tez çalışmasında geliştirilen modellerin sonuçları ile karşılaştırmak;
- MİH'leri deneysel olarak tasarlamak ve bu MİH'lerin karakteristik parametrelerini ölçerek elde edilecek sonuçları tez çalışmasında geliştirilen sentez modellerinin sonuçları karşılaştırmak;
- Esnek hesaplama yöntemlerinin MİH'lerin 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. MİH'lerin karakteristik parametrelerinin belirlenmesi amacıyla literatürde bir çok analiz yöntemi mevcuttur. Ancak arzu edilen karakteristik empedansa sahip olması istenen MİH'lerin geometrik boyutlarının belirlenmesi amacıyla yapılan sentez çalışmaları sınırlı sayıdadır. Bu tez çalışmasında MİH'lerin geometrik boyutlarının hesaplanması için esnek hesaplama yöntemleri kullanılmıştır.

Tez çalışması kapsamında, MİH'lerin geometrik boyutlarının hesaplanması için iki farklı yaklaşım kullanılmıştır.

- Birinci yaklaşım, kapalı formda sentez formüllerinin oluşturulmasıdır. Bu yaklaşımda ilk olarak sentez modelleri oluşturulmuştur. Daha sonra sentez modellerinin katsayıları esnek hesaplama algoritmalarından diferansiyel gelişim [93, 94], genetik [95, 96], parçacık sürü optimizasyon [97] ve benzetilmiş tavlama [98] algoritmaları kullanılarak elde edilmiştir.
- İkinci yaklaşım, BSA'lara [115-117] dayalı sentez modellerinin oluşturulmasıdır. Oluşturulan BSA modellerinin parametreleri, hibrid öğrenme [116, 117], en küçük kareler [118, 119], genetik [95, 96] ve benzetilmiş tavlama [98] algoritmaları ile optimum bir şekilde belirlenmiştir.

Tez çalışması kapsamında farklı yapılarda MİH'ler deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Tasarım aşamasına geçmeden önce ilk olarak, şerit ve yarık genişlikleri değiştirilmek suretiyle 50 Ω 'luk karakteristik empedansa sahip iletim hattı yapıları belirlenmiştir. İletim hatları IE3D [141] ile simüle edilmiş ve tasarımlar gerçekleştirilmiştir. İletim hatları, RT-Duroid taban malzemeleri üzerine QC 7000 cihazı kullanılarak baskı devre kazıma yöntemiyle imal edilmiştir. Bu iletim hatlarının S-parametreleri, Rohde-Schwarz ZVB 20 vektör network analizör ile ölçülmüş ve karakteristik empedans değerleri S-parametrelerine ait ölçüm sonuçlarının kullanılmasıyla dolaylı olarak hesaplanmıştır [38]. Sentez modellerinden elde edilen sonuçlar, literatürdeki sonuçlarla ve tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Bu bölümde, sentez modellerinin oluşturulmasında kullanılan esnek hesaplama algoritmaları ve BSA'lar hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca simülasyonlarda kullanılan IE3D programı ve deneysel çalışmalarda kullanılan cihazlar ve malzemelerle ilgili bilgilerde bu bölümde sunulmuştur.

2.2. Esnek Hesaplama Algoritmaları

Tez çalışması kapsamında, MİH'lerin geometrik boyutlarının hesaplanması için basit ve doğru formüller üretmek amacı ile sentez modelleri oluşturulmuştur. Sentez modellerinin katsayıları esnek hesaplama algoritmalarından diferansiyel gelişim, genetik, parçacık sürü optimizasyon ve benzetilmiş tavlama algoritmaları kullanılarak elde edilmiştir. Tez çalışması kapsamında kullanılan esnek hesaplama algoritmalarıyla ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir.

2.2.1. Diferansiyel Gelişim Algoritması

Diferansiyel gelişim (DE: Differential Evolution) algoritması basit, ama güçlü bir popülasyon tabanlı algoritmadır [93, 94]. Özellikle gerçek değerli tasarım parametrelerini içeren fonksiyonları küresel olarak optimize etmek amacıyla kullanılan bir araştırma algoritmasıdır. DE algoritmasında, N_{PAR} çözüm vektöründen oluşan bir popülasyon başlangıçta aşağıdaki gibi üretilir:

$$v_{i,j}^P = v_j^{\min} + M_j \times (v_j^{\max} - v_j^{\min}), \quad j=1, 2, \dots, N_{PAR} \quad (2.1)$$

Burada, M_j 0 ile 1 arasında rasgele bir sayı, $v_j^{\min}$ ve $v_j^{\max}$ ise sırasıyla j. parametrenin alabileceği minimum ve maksimum değerleridir. Başlangıç popülasyonu oluşturulduktan sonra bu popülasyon mutasyon, çaprazlama ve seleksiyon olmak üzere üç aşamadan geçirilir.

Mutasyon: Popülasyon içerisinde rasgele üç çözüm ($t_{r1,G}$, $t_{r2,G}$, ve $t_{r3,G}$) aşağıdaki bağıntıya göre mutasyona uğratarak mutasyona uğratılmış vektör ($v_{i,G+1}$) elde edilir.

$$v_{i,G+1} = t_{r1,G} + F \cdot (t_{r2,G} - t_{r3,G}) \quad (2.2)$$

Burada r_1 , r_2 , ve $r_3 \in [1-N_{POP}]$ 'dir ve birbirinden farklı olmalıdır. F , fark vektörü üzerinde etkili olan bir ölçeklendirme faktörüdür.

Çaprazlama: Çaprazlama işleminde ebeveyn vektör ($t_{ji,G}$) ile mutasyon sonucunda elde edilen vektör ($v_{ji,G+1}$) karşılaştırılarak yeni çözüm vektörü $p_{ji,G+1}$ elde edilir:

$$p_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1}, & \text{if } (R_j \leq CR) \\ t_{ji,G}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.3)$$

Burada R_j , 0 ile 1 arasında üretilen rastgele bir değer, CR ise araştırmacının 0 ile 1 arasında belirlediği bir çaprazlama katsayısıdır.

Seleksiyon: Çaprazlama sonucunda elde edilen vektör ($p_{ji,G+1}$) ile ebeveyn vektör karşılaştırılır. Eğer çaprazlama sonucunda elde edilen vektör ebeveyn vektöre göre daha iyi ise bir sonraki iterasyonda kullanılmak üzere çözüm kümesine dâhil edilir, aksi durumda ebeveyn vektörü yerini korur.

Yukarıdaki işlemler belirli bir durdurma kriterine gelinceye kadar devam eder, bu durdurma kriteri belirli bir hata değeri veya iterasyon sayısı olabilir.

2.2.2. Genetik Algoritma

Genetik algoritma (GA: Genetic Algorithm), yönlendirilmiş rasgele araştırma algoritmalarının bir türüdür [95, 96]. GA ilk olarak, 1975 yılında Holland [95] tarafından yapılan bir çalışma ile literatüre sunulmuştur. GA en iyinin korunumu ve tabii seçme ilkesine göre çözümü aramaktadır. GA, araştırma uzayında bulunan çözümlerin bazılarının oluşturduğu bir popülasyonu kullanmaktadır. Bu popülasyon, tabii seçme, tekrar üreme, çaprazlama ve mutasyon işlemleri ile geliştirilir. En son jenerasyonun en uygun bireyi, problem için en uygun çözüm olmaktadır.

Tekrar üreme işlemi, tabii seçme işlemi olarak adlandırılan kalitesi yüksek bireylerin hayatta kalmaları ve sayılarının artması, kalitesi düşük bireylerin ise sayılarının azalarak kaybolması prensibine göre çalışan bir GA işlemidir.

Çaprazlama işlemi, tabii sistemlerde meydana gelen veya genetik çaprazlama olayıyla ortaya çıkan hibrid yapıların üretilmesine eşdeğer bir özelliği GA'ya kazandırır. Çaprazlama işleminin amacı iyi çözümlerden daha iyi çözümler üretmektir.

Mutasyon işlemi, GA'nın performansında temel rol oynamaktadır. Yeni popülasyonda bulunan çözümlere ait her bit, tek tek kontrol edilir ve mutasyon oranı'na göre 1 ise 0'a, 0 ise 1'e çevrilir, yani bitlerin değerleri tersine döndürülür. Mutasyon yeni, görülmemiş ve araştırılmamış çözümlerin bulunmasını sağlar. Aynı zamanda mutasyon işlemi, GA'nın yerel çözümlere takılmasını engeller.

Basit bir GA'nın temel kontrol parametreleri, popülasyon büyüklüğü, çaprazlama ve mutasyon oranlarıdır. Bu kontrol parametrelerinin değerlerinin seçimi algoritmanın performansı üzerinde oldukça etkilidir.

Popülasyon büyüklüğü, algoritma performansı açısından önemli bir kriterdir. Popülasyon büyüklüğünün aşırı küçük seçilmesi, araştırma uzayının yetersiz örneklenmesine sebep olur. Böylece, yakınsamayı sağlamak zorlaşır ve araştırma yerel çözüme doğru sürüklenir. Tersine, aşırı yüksek değer seçildiğinde bir jenerasyonluk gelişim oldukça uzun zaman gerektirir. Bu durum özellikle gerçek zamanlı problemlerin çözümünde arzu edilmez. Bu yüzden uygun bir popülasyon büyüklüğü belirlenmelidir.

Çaprazlama oranı, yeni bireylerin üretiminde ne oranda çaprazlama yapılacağını belirler. Bu değer düşük olursa popülasyona çok az sayıda yeni birey katılır. Dolayısıyla tekrar üreme işlemi algoritmada aşırı etkili işlem haline gelmekte ve araştırmanın yakınsama hızı düşmektedir. Çaprazlama oranı yüksek seçilirse araştırma uzayı çok hızlı bir şekilde taratılır fakat oran aşırı yüksek ise çaprazlama işlemi benzer veya daha iyi yapıları üretmeden kuvvetli olan yapılar çok hızlı olarak bozulacağından algoritmanın performansı düşmektedir.

Mutasyon oranı ise, algoritma performansını etkileyen diğer bir parametredir. Mutasyon işlemi araştırma sahasına yeni bölgelerin girmesini sağlar. Yüksek mutasyon oranı, araştırmaya aşırı bir rastgelelik kazandır ve algoritmanın yakınsamasını güçleştirir. Düşük mutasyon oranı ise araştırma uzayının tamamen araştırılmasını engeller.

2.2.3. Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması

Parçacık sürü optimizasyon (PSO: Particle Swarm Optimization) algoritması, hayvanlardan ve farklı tür sosyal etkileşimlerden esinlenilerek geliştirilen bir optimizasyon tekniğidir [97]. PSO ile biyoloji ve parçacık fiziği bilim dallarındaki kolektif davranışlar matematiksel temellere oturtularak pek çok mühendislik problemi çözülebilmektedir. Doğadaki parçacık davranışları tek başına çok fazla bir anlam içermemektedir fakat kolektif yapı içerisinde kıymetli sonuçlar üretebilmektedir.

PSO'da sürü içerisindeki parçacıkların hızı ve yönü aşağıdaki eşitlikler kullanılarak güncellenmektedir:

$$u_{id} = nu_{id} + c_1 \times K_1 \times (p_{id} - z_{id}) + c_2 \times K_2 \times (p_{gd} - z_{id}) \quad (2.4)$$

$$z_{id} = z_{id} + u_{id} \quad (2.5)$$

Burada u_{id} i . parçacık için d . boyut hızını, z_{id} i . parçacık için d . boyut pozisyonunu, c_1 ve c_2 ivme katsayılarını, K_1 ve K_2 0 ile 1 arasında rastgele değerleri, p_{id} vektörü i . parçacığın en iyi uygunluk değerini veren en iyi pozisyonu, p_{gd} popülasyondaki en iyi parçacığın pozisyonunu, n ise atalet ağırlık katsayısını göstermektedir.

2.2.4. Benzetilmiş Tavlama Algoritması

Benzetilmiş tavlama (SA: Simulated Annealing) algoritması bölgesel minimumlardan uzaklaşmak için rastgele çıkış hareketleri kullanan modifiye edilmiş bir iteratif iniş algoritmasıdır [98]. Standart bir SA algoritmasının temel adımları aşağıda verilmiştir.

Adım 1. Sezgisel olarak veya rasgele bir başlangıç çözümü S üret. Sıcaklık T için bir başlangıç değeri T_s belirle ve diğer parametreleri tayin et (durdurma kriteri gibi).

Adım 2. Komşu bir çözüm $S' \in N(S)$ üret ve bu üretilen çözümle S çözümünün amaç değerleri ($C(S)$ ve $C(S')$) arasındaki farkı $\Delta = C(S') - C(S)$ hesapla.

Adım 3. Eğer

(i) S' , S den daha iyi (yani $\Delta < 0$) ise veya

(ii) S' , S den daha kötü ama mevcut sıcaklık T 'de $(e^{-\Delta/T}) > \theta$ ile tanımlı ise

O zaman S çözümünü S' ile yer değiştir. Yoksa S yi mevcut çözüm olarak muhafaza et.

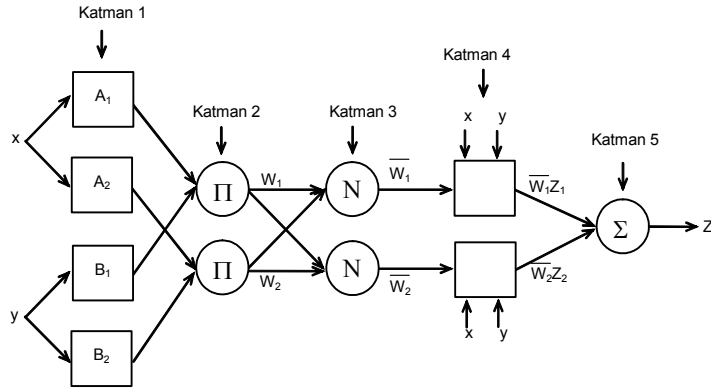
Adım 4. Belirli bir kurallar setine göre T sıcaklığını değiştir. Bu,

- (i) Kullanılan soğutma tarifesine göre,
- (ii) Üçüncü adımda üretilen çözümlerde herhangi bir gelişme olup olmadığına göre,
- (iii) S çözümüne ait komşuluğun tamamen araştırılıp araştırılmadığına göre veya başka kriterlere göre belirlenmiş kurallar olabilir.

Adım 5. Durdurma kriteri sağlanıyor ise araştırmayı durdur, yoksa Adım 2'ye git.

2.3. Bulanık Sinir Ağları

Bu tez çalışmasında, arzu edilen karakteristik empedansa sahip MİH'lerin geometrik boyutlarının hesaplanması için BSA tabanlı sentez modelleri oluşturulmuştur. BSA'lar bulanık küme teorisine, bulanık kurallara ve bulanık muhakemeye dayanan popüler bir hesaplama yöntemidir [116, 117]. Bulanık sinir ağları giriş ve çıkış değişkenleri arasında lineer olmayan ilişkiye sahip problemlerin çözümüne yatkın lineer olmayan bir sistemdir. Şekil 2.1'de BSA'nın Sugeno tipi bulanık mantık sistemi olarak modellenmesi görülmektedir. Şekil 2.1'de her bir daire bir sabit düğümü gösterirken, her bir kare bir uyarlanabilir düğümü göstermektedir.



Şekil 2.1. Bulanık sinir ağı yapısı.

Bu model için tipik bir kural seti olan iki bulanık eğer-ise kuralı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\text{Kural 1: Eğer } x \in A_1 \text{ ve } y \in B_1 \text{ ise, } z_1 = p_1x + q_1y + r_1 \quad (2.6)$$

$$\text{Kural 2: Eğer } x \in A_2 \text{ ve } y \in B_2 \text{ ise, } z_2 = p_2x + q_2y + r_2 \quad (2.7)$$

Burada A_i ve B_i başlangıçtaki bulanık mantık setleri, p_i , q_i ve r_i eğitim işlemi esnasında belirlenen tasarım parametreleri yani lineer olmayan parametreleridir. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, BSA beş katmandan oluşmaktadır. Bunlar;

Katman 1: Birinci katmandaki her bir düğüm aşağıda verilen bir düğüm fonksiyonunu kullanır:

$$Q_{1,i} = \begin{cases} \mu_{A_i}(x), & i = 1, 2 \text{ için} \\ \mu_{B_{i-2}}(y), & i = 3, 4 \text{ için} \end{cases} \quad (2.8)$$

Burada $\mu_{A_i}(x)$ ve $\mu_{B_{i-2}}(y)$ herhangi bir bulanık üyelik fonksiyonuna uyumlandırılabilir. Üyelik fonksiyonu olarak geliştirilmiş çan tipi (Gbell) veya Gauss tipi (Gaussian) üyelik fonksiyonları kullanılabilir. Genelleştirilmiş çan tipi (Gbell) ve Gauss tipi (Gaussian) üyelik fonksiyonları aşağıdaki gibi ifade edilirler:

$$Gbell(x; a_i, b_i, c_i) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c_i}{a_i} \right|^{2b_i}} \quad (2.9)$$

$$Gauss(x; \gamma_i, \sigma_i) = e^{-\frac{(x-\gamma)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.10)$$

Burada (a_i, b_i, c_i) ve (γ_i, σ_i) lineer olmayan parametreler olup üyelik fonksiyonun şeklinin optimize edilmesinde kullanılırlar.

Katman 2: Bu katmandaki her bir düğümün çıkışı kuralların çarpımı ile elde edilen ağırlığı verir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$Q_{2,i} = \omega_i = \mu_{A_i}(x) \mu_{B_i}(y), \quad i = 1, 2 \quad \text{için} \quad (2.11)$$

Katman 3: Bu katmandaki i 'nci düğüm, i 'nci kuralın ağırlığının tüm ağırlıkların toplamına oranını aşağıdaki şekilde belirler:

$$Q_{3,i} = \overline{\omega}_i = \frac{\omega_i}{\omega_1 + \omega_2}, \quad i = 1, 2 \quad (2.12)$$

Burada $\overline{\omega}_i$ normalize edilmiş ağırlık olarak adlandırılır.

Katman 4: Bu katmanda, her bir düğüm aşağıdaki fonksiyona sahiptir:

$$Q_{4,i} = \overline{\omega}_i z_i = \overline{\omega}_i (p_i x + q_i y + r_i), \quad i = 1, 2 \quad (2.13)$$

Burada $\overline{\omega}_i$ üçüncü katmanın çıkışıdır ve $\{p_i, q_i, r_i\}$ i düğümünün parametre kümesidir.

Bu katmandaki parametreler, lineer parametreler olarak bilinir.

Katman 5: Bu katmanda tek bir düğüm, gelen bütün işaretlerin toplamı olan genel çıkışı aşağıda ifade edildiği gibi hesaplar:

$$Q_{5,i} = \sum_{i=1}^2 \overline{\omega}_i z_i = \frac{\omega_1 z_1 + \omega_2 z_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (2.14)$$

BSA'nın, lineer ve lineer olmayan parametreler olarak isimlendirilen ayarlanabilir iki parametre seti vardır. Eğitim işlemi boyunca, birinci katmandaki lineer olmayan parametreler ve dördüncü katmandaki lineer parametreler, bulanık mantık sistemi arzu edilen cevaba ulaşana dek ayarlanır. Literatürde, BSA yapılarının eğitime işlemleri BSA yapılarının içerisindeki parametrelerin optimum bir şekilde belirlenmesi anlamına geldiği için bu parametrelerin belirlenmesi sırasında farklı öğrenme algoritmaları kullanılabilmektedir. Tez çalışması kapsamında oluşturulan BSA yapılarının parametrelerinin optimizasyonunda hibrid öğrenme, en küçük kareler, genetik ve benzetilmiş tavlama algoritmaları kullanılmıştır. Hibrid öğrenme ve en küçük kareler algoritmaları aşağıda kısaca tanıtılmıştır. Bir önceki kısımda genetik ve benzetilmiş tavlama algoritmalarından bahsedildiğinden burada tekrar verilmemiştir.

2.3.1. Hibrid Öğrenme Algoritması

Üyelik fonksiyonlarının lineer olmayan parametre değerleri sabit tutulduğunda, BSA çıkışı şu şekilde yazılabilir;

$$z = \frac{\omega_1}{\omega_1 + \omega_2} z_1 + \frac{\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} z_2 \quad (2.15)$$

Eşitlik (2.12), Eşitlik (2.14)'te yerine konulursa;

$$z = \bar{\omega}_1 z_1 + \bar{\omega}_2 z_2 \quad (2.16)$$

elde edilir. Eğer ise kurallarını da eşitlik (2.16)'da yerine konulursa, aşağıdaki hale dönüşür:

$$z = \bar{\omega}_1 (p_1 x + q_1 y + r_1) + \bar{\omega}_2 (p_2 x + q_2 y + r_2) \quad (2.17)$$

Bu eşitlik yeniden düzenlendiğinde ise BSA'nın çıkışı lineer olmayan parametrelerin lineer bir kombinasyonu olarak yazılabilir:

$$z = (\bar{\omega}_1 x) p_1 + (\bar{\omega}_1 y) q_1 + (\bar{\omega}_1) r_1 + (\bar{\omega}_2 x) p_2 + (\bar{\omega}_2 y) q_2 + (\bar{\omega}_2) r_2 \quad (2.18)$$

En küçük kareler metodu, lineer parametrelerin optimum değerlerini belirlemede kullanılabilir. Lineer olmayan parametreler sabit tutulmadığında ise, araştırma uzayı büyür ve eğitim yakınsaması yavaşlar. Hibrid öğrenme (HL: Hybrid Learning) [116, 117] algoritması ile bu problem çözülebilir. Toplam parametre kümesi; $S = S_p + S_c$ şeklinde ifade edilecek olursa, S_p giriş parametrelerine, S_c de çıkış parametrelerine karşılık gelir. HL'nin ilk aşaması ya da ileri yön geçişi ile BSA ağına ait giriş parametreleri, ikinci aşamada ya da geri yön geçişinde ise ağı lineer olmayan parametreleri güncellenir. HL'nin ileri yön geçişini oluşturan ve en küçük kareler yöntemi kullanılmak suretiyle gerçekleştirilen kısmında, ağı girişindeki üyelik fonksiyonlarına ait parametreler ya da kısaca S_p ile belirtilen lineer parametreleri sabit tutulur. Böylece ağı çıkışı, S_p parametre kümesi içinde bulunan lineer olmayan parametrelerinin, lineer bir kombinasyonu haline gelir. HL'nin geri yön geçişinde, S_c lineer olmayan parametreleri sabit tutulur ve ağı çıkışındaki hata sinyali geriye doğru yayılarak, standart geri yayılım algoritmasıyla giriş parametreleri güncellenir.

2.3.2. En Küçük Kareler Algoritması

En küçük kareler algoritması (LSQ: Least Squares) genel bir en küçük kareler probleminin çözümüne dayanır. Genel bir en küçük kareler probleminin çözümünde sistemin çıkış ifadesi y doğrusal olarak aşağıdaki gibi ifade edilir [118, 119]:

$$y = \theta_1 \cdot f_1(u) + \theta_2 \cdot f_2(u) + \dots + \theta_n \cdot f_n(u) \quad (2.19)$$

Burada $u = [u_1, \dots, u_p]^T$ modelin giriş vektörü, $f_1, \dots, f_n$ u 'nun bilinen fonksiyonları ve $\theta_1, \dots, \theta_n$ belirlenecek olan bilinmeyen parametrelerdir. Doğrusal bir model kullanarak eğri uydurma işlemine istatistikte doğrusal bağlanım adı verilir. Buna göre Eşitlik (2.19) bağlanım fonksiyonu ve θ_i 'ler ise bağlanım katsayıları olarak adlandırılır.

θ_i parametrelerinin tanımlanabilmesi için $\{(u_i, y_i), i = 1, \dots, m\}$ 'den oluşan eğitim veri setinin oluşturulması gerekir. Bu veri seti modellenen sistemin arzu edilen giriş-çıkış değerlerini göstermektedir. Eşitlik (2.17) m adet lineer eşitlik için genişletilerek:

$$\begin{cases} \theta_1 \cdot f_1(u_1) + \theta_2 \cdot f_2(u_1) + \dots + \theta_n \cdot f_n(u_1) = y_1 \\ \theta_1 \cdot f_1(u_2) + \theta_2 \cdot f_2(u_2) + \dots + \theta_n \cdot f_n(u_2) = y_2 \\ \vdots \\ \theta_1 \cdot f_1(u_m) + \theta_2 \cdot f_2(u_m) + \dots + \theta_n \cdot f_n(u_m) = y_m \end{cases} \quad (2.20)$$

doğrusal denklem şeklinde elde edilir. Matris notasyonu kullanılarak (2.20) nolu eşitlik:

$$A \cdot \theta = y \quad (2.21)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Burada A $m \times n$ boyutlu bir matristir ve tasarım matrisi olarak da adlandırılmaktadır:

$$A = \begin{pmatrix} f_1(u_1) & \dots & f_n(u_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(u_m) & \dots & f_n(u_m) \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

θ $n \times 1$ boyutlu bir bilinmeyen parametreler vektörüdür:

$$\theta = \begin{pmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_n \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

y ise $m \times 1$ boyutlu çıkış vektörüdür:

$$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

$[a_i^T : y_i]$ ile temsil edilen ortak veri matrisi $[A : y]$ 'nin i . satırı, i . giriş-çıkış veri çifti $(u_i; y_i)$ ile ilişkilidir:

$$a_i^T = [f_1(u_i), \dots, f_n(u_i)] \quad (2.25)$$

θ bilinmeyen vektörünü tek olarak belirleyebilmek için $m \geq n$ şartı sağlanmalıdır. A tekil olmayan bir kare matris ($m = n$) ise, Eşitlik (2.21):

$$\theta = A^{-1} \cdot y \quad (2.26)$$

şeklinde çözülebilir. Ancak m genellikle n 'den büyüktür ve LSQ algoritmasıyla belirlenecek olan parametre sayısından daha fazla sayıda giriş-çıkış veri çifti vardır. Bu yüzden ve ayrıca gürültünün de hesaba katılmasından dolayı m adet eşitliğin tamamının sağlanması veya modelin hedef sistemi tam olarak temsil etmesi mümkün olmayabilir. Böylece Eşitlik (2.21), rasgele gürültü veya modelleme hatalarından kaynaklanan bir hata vektörü e 'yi de içerecek şekilde yeniden düzenlenirse:

$$A \cdot \theta + e = y \quad (2.27)$$

şeklinde yazılabilir. Bu durumda yapılacak kestirim tam çözümü sağlayan θ değerleri yerine karesel hatanın toplamını minimize eden $\hat{\theta}$ değerlerinin kestirilmesidir. Toplam karesel hata ifadesi:

$$E(\theta) = \sum_{i=1}^m (y_i - a_i^T \cdot \theta) = e^T \cdot e = (y - A \cdot \theta)^T \cdot (y - A \cdot \theta) \quad (2.28)$$

şeklinde yazılır. Burada $e = (y - A \cdot \theta)$ belirli θ değerleri için üretilen hata vektörüdür. Ayrıca $E(\theta)$ karesel bir ifadedir ve $\theta = \hat{\theta}$ 'da tek bir minimuma sahiptir.

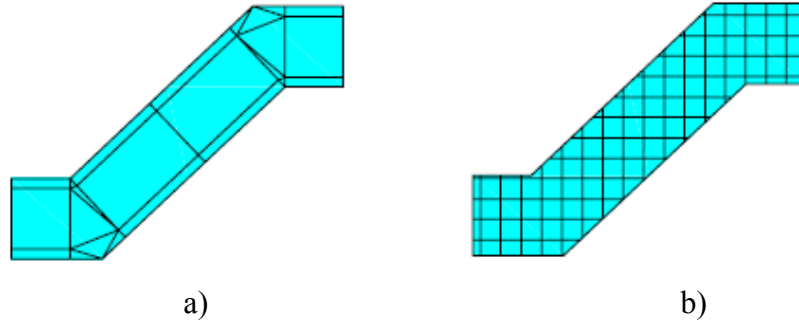
2.4. IE3D Elektromanyetik Simülasyon Programı

IE3D, 3-boyutlu (3B) ve düzlemsel mikrodalga devreleri, MMIC, RFIC (Radyo Frekansı Entegre Devreleri: Radyo Frequency Integrated Circuits), RFID (Radyo Frekansı ile Tanımlama: Radio-Frequency Identification), antenler, dijital devreler ve yüksek hızlı devrelerin analizi ve tasarımı için kullanılabilen bir entegre tam dalga elektromanyetik simülasyon paketidir [141]. Pratik devre ve anten yapıları için, metalik alan ne kadar sınırlı ise IE3D'nin çözümü de o kadar sınırlı olacaktır. Buna en tipik örnek mikroşerit devre yapısıdır. Bu problemde çözüm alanı sadece dielektrik taban

malzemesi üzerindeki şerittir. IE3D’de elektromanyetik teorisinin temeli olan Maxwell denklemlerinin çözümü esasına dayanmaktadır. IE3D’nin teknik özellikleri ve kullanıcılara sağladığı imkânlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır.

1. IE3D, windows ve linux tabanlı grafik ara yüzlerine sahip, emsallerine göre düşük maliyet, yüksek verimlilik ve yüksek doğruluk dereceli bir elektromanyetik simülasyon aracıdır. Kişisel bilgisayarlarda çalışan bu simülatör, üst düzey iş istasyonlarında çalışan diğer alan çözücülerden daha hızlıdır.
2. IE3D, 3B ve çok katmanlı metalik yapıların, bir poligon grubu olarak etkileşimli bir şekilde tasarlanmasına imkân sağlar. Tasarım aşamasındaki poligon ve köşe noktalarının belirlenmesini kolaylaştırmak için, birçok biçimlendirme özellikleri sağlanmış ve kısayollar tanımlanmıştır.
3. IE3D’de çemberler, halkalar, küreler, spiraller, 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 yöntemine dayalı bir sayısal simülasyon, ele alınan devrenin küçük hücrelere bölünmesini gerektirir. Bu amaçla, IE3D’de hem dikdörtgensel hem de üçgensel hücreler kullanılmaktadır. En yüksek verim için dikdörtgensel hücreler düzenli tabakalarda kullanılır. Üçgensel hücrelerden, düzensiz sınırlara uymakta faydalanılır. En iyi sonuçların elde edilmesi için dikdörtgensel hücrelerin verimliliği ve üçgensel hücrelerin esnekliği birleştirilmiştir.
5. IE3D, otomatik köşe hücresi tanımlama özelliği ile tecrübesiz kullanıcılara ızgara (grid) yapısını oluştururken büyük bir kolaylık sağlamaktadır. MİH yapılarında akım iletken şeritlerin köşesinde yoğunlaşmaktadır. Yüksek akımın köşelerde yoğunlaşmasının kusursuz modellenmesi, baskı devrelerinin doğru simülasyonu için son derece önemlidir. Köşelere küçük hücrelerin eklenmesi genellikle simülasyonun doğruluğunu sağlar. Bir simülasyona hücreler eklenirken, aynı zamanda simülasyon içerisindeki hücre sayısının düşürülmesi oldukça zordur. IE3D 3.0 ile birlikte, köşelerde küçük hücrelerin otomatik olarak oluşturulması seçeneği getirilmiştir. Çok az bir sayısal modelleme bilgisine sahip kullanıcılar, otomatik köşe hücresi

özelliği sayesinde doğru sonuçları kolayca elde edebilirler. Şekil 2.2’de IE3D’nin örgü yapısı görülmektedir. IE3D’de dikdörtgensel ve üçgensel hücreli uniform olmayan örgü asgari hücre sayısı ile en doğru sonuçları verir. Şekil 2.2.a.’daki örgü yapısı buna örnektir. Uniform örgü yapısı, en basit iletim hattı yapıları için dahi gereğinden fazla sayıda hücre oluşturur bu da bilinmeyenlerin sayısını artırarak işlem süresinin çok daha fazla olmasına neden olur. Şekil 2.2.b.’deki örgü yapısı da uniform örgü yapısına bir örnektir.



Şekil 2.2. IE3D’nin örgü yapısı a) Dikdörtgensel ve üçgensel uniform olmayan örgü yapısı, b) Uniform örgü yapısı.

6. IE3D kullanılarak yarıklı yapıların modellenmesi gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayede, IE3D ile EDK’ların, EŞH’ların, EDK beslemeli antenlerin ve mikroşerit antenlerin modellenmesi mümkün olmaktadır.

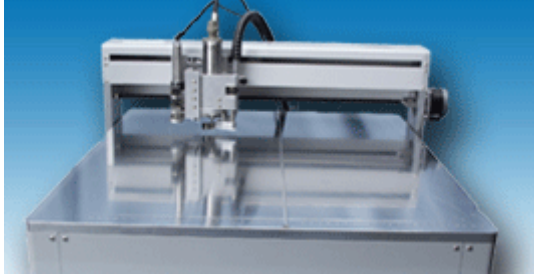
2.5. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Cihaz ve Malzemeler

Deneysel çalışmalarda kullanılan cihaz ve malzemeler; baskı devre çıkartım cihazı, baskı devre imalat malzemeleri, RT-Duroid baskı devre plaketleri ve konnektörlerdir. Deneysel çalışmalarda kullanılan cihaz ve malzemelerle ilgili bilgiler aşağıda verilmiştir.

2.5.1. Baskı Devre Kazıma Cihazı

Bu tez çalışmasında, MİH’ler RT-Duroid taban malzemeleri üzerine QC 7000 cihazı kullanılarak baskı devre kazıma yöntemiyle imal edilmişlerdir. Baskı devre kazıma cihazının özellikleri ve cihazın diğer aparatlarına ait özellikler Tablo 2.1’de verilmektedir.

Tablo 2.1. Baskı devre cihazı ve aparatları.

T-Tech's – QC-7000 13"×19" lik çalışma alanı olan XY imalat tablası, QC-7000 Standart Sistemi, 5K-60K RPM mil, kablolar, kullanıcı manueli ve başlangıç kitinden oluşmaktadır.	 Şekil 2.3. QC-7000 Baskı devre kazıma cihazı.
Software-IsoPro 2.7 IsoPro yazılımı kullanıcıların daha hızlı üretim yapabilmeleri, kolaylıkla kullanabilmeleri ve standart CAD çıkışlarını kolaylıkla değiştirebilmeleri için Windows grafik ara yüzeyi kullanmaktadır.	 Şekil 2.4. ISO Pro 2.7 yazılım logosu.
Kazıma uçları Kazıma uçları prototiplerin yüzeyindeki iletkenleri maksimum düzeyde kazıyacak şekilde tasarlanmıştır. Dielektrik malzemeye minimum miktarda zarar verdiği için RF ve Mikrodalga uygulamalarında kullanılmaktadır. Kullanılan kazıma uçlarının uç kalınlıkları aşağıdaki gibidir: • 0.031" • 0.020" • 0.015" • 0.011"	 Şekil 2.5. Kazıma uçları (Endmils).

2.5.2. RT/Duroid Taban Malzemeleri

MİH'ler, RT-Duroid taban malzemeleri üzerine QC 7000 cihazı kullanılarak baskı devre kazıma yöntemiyle imal edilmişlerdir. Tez çalışması kapsamında farklı dielektrik sabitine sahip RT-Duroid taban malzemeleri kullanılmıştır.

2.5.3. Konnektörler

Deneysel olarak tasarımı gerçekleştirilen iletim hatlarının S-parametreleri vektör network analizör ile ölçülmektedir. İletim hattı ile vektör network analizör arasındaki bağlantılar konnektörler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Tez çalışmasında kullanılan konnektörlerin özellikleri Tablo 2.2’de verilmektedir.

Tablo 2.2. Konnektörlerin özellikleri.

Özellikler: Empedans: 50 Ohm Arayüz frekansı: Maksimum 18 GHz Ağırlık: 0.0027 kg Çalışma Sıcaklığı : -65 °C - 165 °C	 Şekil 2.6. Çeşitli konnektörler.
--	---

2.5.4. Network Analizör

Deneysel olarak tasarımı gerçekleştirilen iletim hatlarının S-parametreleri Rohde-Schwarz ZVB 20 vektör network analizör ile ölçülmektedir. Şekil 2.7’de resmi verilen Rohde-Schwarz ZVB 20 vektör network analizör 10 MHz ile 20 GHz arasında ölçüm yapabilmektedir.



Şekil 2.7. Rohde-Schwarz ZVB 20 vektör network analizör.

3. BÖLÜM

SİMÜLASYONLAR VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1. Giriş

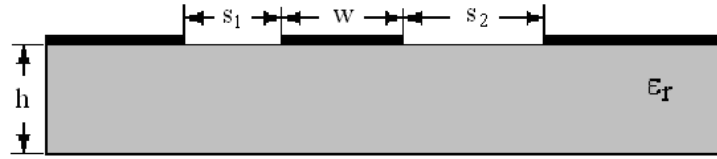
Tez çalışması kapsamında literatürde yaygın bir şekilde kullanılan MİH'lerden asimetrik EDK'lar, dielektrik taban destekli EDK'lar, mikro EŞH'lar ve sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH'lar deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Tasarım aşamasına geçmeden önce ilk olarak, şerit ve yarık genişlikleri değiştirilmek suretiyle 50 Ω 'luk karakteristik empedansa sahip iletim hatları belirlenmiştir. İletim hatları IE3D elektromanyetik simülatörü [141] ile simüle edilmiş ve tasarıma geçilmiştir. Tasarımları yapılan iletim hatları, RT-Duroid taban malzemeleri üzerine QC 7000 cihazı kullanılarak baskı devre kazıma yöntemiyle imal edilmişlerdir.

Dielektrik taban malzemelerinin üzerindeki iletkenleri baskı devre kazıma cihazı ile kazırken dikkat edilecek en önemli husus kazıma uçlarının derinliğinin iyi ayarlanmasıdır. Kazıma uçlarının derinliği dielektrik taban üzerindeki iletkenin kalınlığından daha az olursa iletken yeteri kadar kazınmamaktadır. Bu durumda iletken şerit ile toprak düzlemi arasında kısa devre oluşmaktadır. Kazıma uçlarının derinliği dielektrik taban üzerindeki iletkenin kalınlığından daha fazla olursa bu durumda da iletkenle birlikte dielektrik taban malzemesi de kazınmaktadır. Her iki durumda da arzu edilen karakteristik empedansa sahip iletim hattı imal edilememektedir. Bu nedenle tasarımlar gerçekleştirilirken baskı devre kazıma ucunun derinliğinin, dielektrik taban üzerindeki iletken kalınlığı ile aynı olmasına dikkat edilmiştir.

Baskı devre kazıma yöntemi ile imal edilen iletim hatlarının S-parametreleri, Rohde-Schwarz ZVB 20 vektör network analizör ile ölçülmüş ve karakteristik empedans değerleri S-parametrelerine ait ölçüm sonuçlarının kullanılmasıyla dolaylı olarak hesaplanmıştır [38]. Aşağıda simülasyonlara ve deneysel çalışmalara ilişkin detaylar ve elde edilen bulgular sunulmuştur.

3.1.1. Asimetrik Eşdüzlemli Dalga Kılavuzlarına Ait Simülasyonlar ve Deneysel Çalışmalar

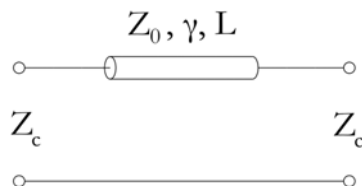
Şekil 3.1’de kesit görünümü verilen asimetrik EDK yapısında dielektrik taban malzemesinin kalınlığı h , bağıl dielektrik sabiti ϵ_r ’dir. Dielektrik taban üzerine yerleştirilen iletken şeridin genişliği w , iletken şerit ile toprak düzlemi arasındaki yarık genişlikleri s_1 ve s_2 ’dir.



Şekil 3.1. Asimetrik EDK’nın kesit görünümü.

Bu tez çalışması kapsamında beş farklı asimetrik EDK yapısı deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Tasarım aşamasına geçmeden önce şerit ve yarık genişlikleri değiştirilerek 50Ω ’luk karakteristik empedansa sahip asimetrik EDK yapıları belirlenmiştir. Bu yapılar arasından mevcut malzemelerle tasarlanabilecek olan beş farklı yapı tespit edilmiştir. İletim hatları IE3D elektromanyetik simülatör [141] ile simüle edilmiş ve tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Tasarımlarda bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r = 10.2$ ve kalınlığı $h = 1270 \mu m$ olan RT/Duroid taban malzemeleri kullanılmıştır. Deneysel olarak gerçekleştirilen asimetrik EDK’ların S-parametreleri ölçülmüştür. S-parametrelerine ait ölçüm sonuçları kullanılarak ilgili yapıların karakteristik empedans değerleri iki kapılı devre konfigürasyonu kullanılarak dolaylı olarak aşağıdaki yöntem ile hesaplanmıştır [38]:

Şekil 3.2’de görülen devre yapısında Z_0 iletim hattının karakteristik empedansını, γ yayılım sabitini, L iletim hattının boyunu, Z_c ise ölçümde kullanılan problemlerin karakteristik empedans değerlerini göstermektedir.



Şekil 3.2. İki kapılı devre konfigürasyonu.

İletim hattının karakteristik empedansının, ölçüm sonuçlarından dolayı olarak hesaplanabilmesi için kullanılacak olan temel ifade aşağıda verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma L) & Z_0 \sinh(\gamma L) \\ \frac{1}{Z_0} \sinh(\gamma L) & \cosh(\gamma L) \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Yukarıdaki eşitlikten açıkça görüleceği gibi ABCD matrisinin elemanları, iletim hattının boyuna (L) ve elektriksel parametrelerine (Z_0, γ) bağlıdır. ABCD matrisinin elemanları bilinirse iletim hattının karakteristik empedans değeri kolaylıkla hesaplanabilir. ABCD matrisinin elemanları, S-parametrelerinin değerlerinin aşağıdaki eşitliklerde yerine yazılması ile elde edilir;

$$A = \frac{(1 + S_{11}) \cdot (1 - S_{22}) + S_{12} \cdot S_{21}}{2 \cdot S_{21}} \quad (3.2)$$

$$B = Z_c \cdot \frac{(1 + S_{11}) \cdot (1 + S_{22}) - S_{12} \cdot S_{21}}{2 \cdot S_{21}} \quad (3.3)$$

$$C = \frac{1}{Z_c} \cdot \frac{(1 - S_{11}) \cdot (1 - S_{22}) - S_{12} \cdot S_{21}}{2 \cdot S_{21}} \quad (3.4)$$

$$D = \frac{(1 - S_{11}) \cdot (1 + S_{22}) + S_{12} \cdot S_{21}}{2 \cdot S_{21}} \quad (3.5)$$

Ölçümlerden S_{11} ve S_{21} belirlenmiştir ve ayrıca iki kapılı devre yapısına sahip çift taraflı ve simetrik bir network için $S_{11}=S_{22}$ ve $S_{12}=S_{21}$ 'dir. Dolayısıyla bütün S parametre değerleri bilinmektedir. ABCD matrisi ile empedans matrisi arasındaki ilişki ise Eşitlik (3.6)'daki gibidir:

$$\begin{aligned} Z_{11} &= \frac{A}{C} & Z_{12} &= \frac{AD - BC}{C} \\ Z_{21} &= \frac{1}{C} & Z_{22} &= \frac{D}{C} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Yine çift taraflı ve simetrik yapıdan dolayı $A=D$ ve $AD-BC=1$ 'dir. Buna göre S-parametreleri kullanılarak elde edilen ABCD matrisinden empedans matrisine Eşitlik (3.7) ve (3.8)'de verilen ifadeler kullanılarak geçiş yapılır.

$$Z_{11} = Z_{22} = \frac{A}{C} \quad (3.7)$$

$$Z_{12} = Z_{21} = \frac{1}{C} \quad (3.8)$$

A ve C elemanlarının değerlerinin yerine yazılması ile;

$$Z_{11} = \frac{Z_0}{\tanh(\gamma L)} \quad (3.9)$$

$$Z_{21} = \frac{Z_0}{\sinh(\gamma L)} \quad (3.10)$$

elde edilir. Ölçümü yapılan iletim hattının boyu bilinmektedir ancak iletim hattının yayılım sabiti ve karakteristik empedansı bilinmeyen değerlerdir. Karakteristik empedansın hesaplanması için öncelikle yayılım sabitinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla Eşitlik (3.9) ve (3.10)'da verilen ifadelerin taraf tarafa oranlanması ile

$$\cosh(\gamma L) = \frac{Z_{11}}{Z_{21}} \quad (3.11)$$

elde edilir. Buradan da yayılım sabiti γ ;

$$\gamma = \frac{1}{L} \cdot \cosh^{-1} \left(\frac{Z_{11}}{Z_{21}} \right) \quad (3.12)$$

olarak bulunur. Dolayısıyla da Eşitlik (3.9) ve (3.10)'dan;

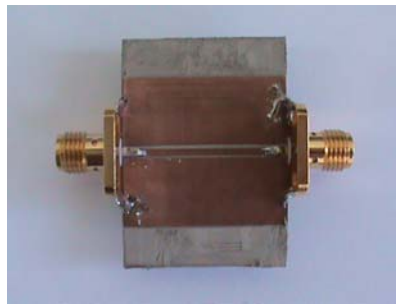
$$Z_0 = Z_{11} \cdot \tanh(\gamma L) \quad (3.13)$$

veya

$$Z_0 = Z_{21} \cdot \sinh(\gamma L) \quad (3.14)$$

olarak iletim hattının karakteristik empedans değeri (Z_0) bulunur.

Tasarlanan asimetrik EDK'lardan biri Şekil 3.3'te verilmiştir. Asimetrik EDK'lara ait simülasyon ve ölçüm sonuçları Tablo 3.1'de sunulmuştur.



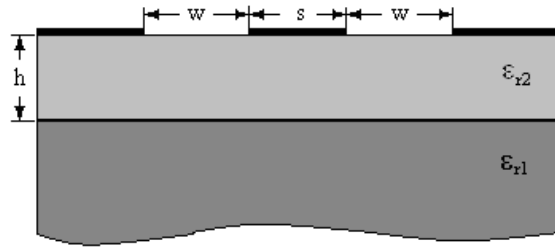
Şekil 3.3. Deneysel olarak tasarlanan asimetrik EDK.

Tablo 3.1. Asimetrik EDK'lara ait simülasyon ve ölçüm sonuçları ($\epsilon_r = 10.2$, $h = 1270 \mu\text{m}$, $f = 2.5 \text{ GHz}$).

Geometrik Boyutlar			Karakteristik empedans, $Z_0 (\Omega)$	
$w (\mu\text{m})$	$s_1 (\mu\text{m})$	$s_2 (\mu\text{m})$	Deneysel	IE3D
1000	300	600	47.88	51.25
1000	400	450	48.08	51.13
1200	450	500	47.84	49.99
1250	350	750	47.74	50.65
1400	425	700	48.01	49.92

3.1.2. Dielektrik Taban Destekli Eşdüzlemli Dalga Kılavuzlarına Ait Simülasyonlar ve Deneysel Çalışmalar

Şekil 3.4'te kesit görünümü verilen dielektrik taban destekli EDK (DTDEDK) yapısında, bağıl dielektrik sabiti ϵ_{r2} olan taban malzemesinin kalınlığı h , bu taban malzemesini destekleyen sonsuz kalınlıktaki malzemenin bağıl dielektrik sabiti ϵ_{r1} 'dir. Dielektrik tabanın üzerine yerleştirilen iletken şeridin genişliği s , iletken şerit ile toprak düzlemleri arasındaki yarık genişliği w 'dır.



Şekil 3.4. DTDEDK'nın kesit görünümü.

Bu çalışmada beş farklı DTDEDK yapısı deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. 50Ω 'luk karakteristik empedansa sahip olması istenen DTDEDK yapıları IE3D elektromanyetik simülatörü [141] ile simüle edilmiş ve tasarımlar gerçekleştirilmiştir. DTDEDK'lar bağıl dielektrik sabitleri $\epsilon_{r1} = 6.15$, $\epsilon_{r2} = 10.2$ ve kalınlığı $h = 1270 \mu\text{m}$ olan RT-Duroid taban malzemeleri üzerine QC 7000 cihazı kullanılarak baskı devre kazıma yöntemiyle imal edilmişlerdir. Deneysel olarak gerçekleştirilen DTDEDK'ların S-parametreleri ölçülerek karakteristik empedansları hesaplanmıştır.

Tasarımı gerçekleştirilen DTDEDK'lardan biri Şekil 3.5'te verilmiştir. DTDEDK'lara ait simülasyon ve deneysel çalışmaların sonuçları Tablo 3.2'de sunulmuştur.



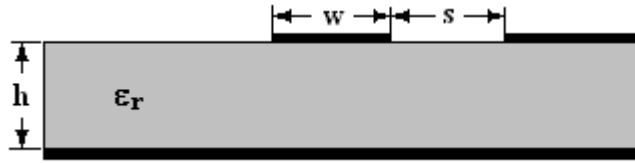
Şekil 3.5. Deneysel olarak tasarlanan DTDEDK yapısı.

Tablo 3.2. DTDEDK'lara ait simülasyon ve ölçüm sonuçları
($\epsilon_{r1} = 6.15$, $\epsilon_{r2} = 10.2$, $h = 1270 \mu\text{m}$, $f = 2 \text{ GHz}$).

Geometrik boyutlar		Karakteristik empedans, $Z_0 (\Omega)$	
$w (\mu\text{m})$	$s (\mu\text{m})$	Deneysel	IE3D
450	1000	47.47	48.80
500	1200	48.34	47.57
550	1300	47.48	47.91
600	1400	46.66	48.21
650	1500	47.01	48.48

3.1.3. Mikro Eşdüzlemli Şerit Hatlara Ait Simülasyonlar ve Deneysel Çalışmalar

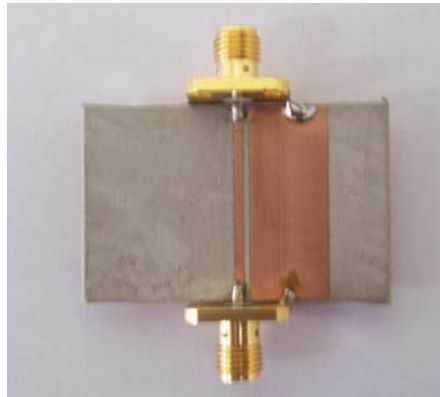
Şekil 3.6’da kesit görünümü verilen mikro eşdüzlemli şerit hatlarda (mikro EŞH) iletken desteğin üzerindeki dielektrik taban malzemesinin kalınlığı h , bağıl dielektrik sabiti ϵ_r ’dir. Dielektrik taban üzerine yerleştirilen iletken şeridin genişliği w , iletken şerit ile toprak düzlemi arasındaki yarıklık genişliği s ’dir.



Şekil 3.6. Mikro EŞH’nin kesit görünümü.

Bu çalışmada mikrodalga devreler için önemli bir iletim hattı olan mikro EŞH’lar deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. 50 Ω ’luk karakteristik empedansa sahip olması istenen mikro EŞH yapıları IE3D elektromanyetik simülatörü [141] ile simüle edilmiş ve tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Tasarımlarda her iki yüzeyinde de iletken kaplama bulunan bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r = 10.2$ ve kalınlığı $h = 1270 \mu\text{m}$ olan RT/Duroid taban malzemeleri kullanılmıştır. Deneysel olarak gerçekleştirilen mikro EŞH’ların S-parametreleri ölçülerek karakteristik empedansları hesaplanmıştır.

Tasarımı gerçekleştirilen mikro EŞH’lardan biri Şekil 3.7’de verilmiştir. Mikro EŞH’lara ait simülasyon ve ölçüm sonuçları Tablo 3.3’te sunulmuştur.



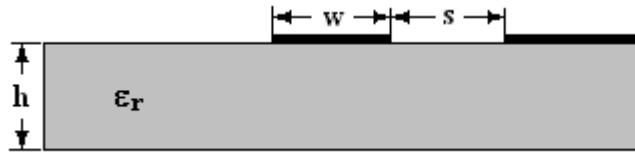
Şekil 3.7. Deneysel olarak tasarlanan mikro EŞH yapısı.

Tablo 3.3. Mikro EŞH'lara ait simülasyon ve ölçüm sonuçları
($\epsilon_r = 10.2$, $h = 1270 \mu\text{m}$, $f = 1.75 \text{ GHz}$).

Geometrik Boyutlar		Karakteristik empedans, $Z_0 (\Omega)$	
$s (\mu\text{m})$	$w (\mu\text{m})$	Deneyssel	IE3D
475	1000	46.78	49.14
550	1050	47.02	49.44
700	1100	46.62	50.53
850	1150	47.09	51.10

3.1.4. Sonsuz Toprak Düzlemine Sahip Eşdüzlemli Şerit Hatlara Ait Simülasyonlar ve Deneyssel Çalışmalar

Şekil 3.8'de kesit görünümü verilen sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH'nın dielektrik taban malzemesinin kalınlığı h , bağıl dielektrik sabiti ϵ_r 'dir. Dielektrik taban üzerindeki iletken şeridin genişliği w , iletken şerit ile toprak düzlemi arasındaki yarık genişliği s 'dir.



Şekil 3.8. Sonsuz toprak düzlemine sahip EŞH'nın kesit görünümü.

Bu çalışmada üç farklı sonsuz toprak düzlemine sahip EŞH yapısı deneyssel olarak gerçekleştirilmiştir. 50Ω 'luk karakteristik empedansa sahip olması istenen sonsuz toprak düzlemine sahip EŞH yapıları IE3D elektromanyetik simülatörü [141] ile simüle edilmiş ve tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Tasarımlarda bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r = 10.2$ ve kalınlığı $h = 1270 \mu\text{m}$ olan RT/Duroid taban malzemesi kullanılmıştır. Deneyssel olarak gerçekleştirilen sonsuz toprak düzlemine sahip EŞH'ların S-parametreleri ölçülerek karakteristik empedansları hesaplanmıştır.

Tasarımı gerçekleştirilen sonsuz toprak düzlemine sahip EŞH'lardan biri Şekil 3.9'da verilmiştir. Sonsuz toprak düzlemine sahip EŞH'larına ait simülasyon ve ölçüm sonuçları Tablo 3.4'te sunulmuştur.



Şekil 3.9. Deneysel olarak tasarlanan sonsuz toprak düzlemine sahip EŞH.

Tablo 3.4. Sonsuz toprak düzlemine sahip EŞH'lara ait simülasyon ve ölçüm sonuçları ($\epsilon_r = 10.2$, $h = 1270 \mu\text{m}$, $f = 1.75 \text{ GHz}$).

Geometrik Boyutlar		Karakteristik empedans, $Z_0 (\Omega)$	
$s (\mu\text{m})$	$w (\mu\text{m})$	Deneysel	IE3D
175	2500	47.87	53.81
150	1750	47.93	52.08
125	1300	47.50	52.71

4. BÖLÜM

MİKRODALGA İLETİM HATLARI İÇİN SUNULAN SENTEZ FORMÜLLERİ

4.1. Giriş

MİH'ler, mikrodalga entegre devrelerinin temelini oluşturur. MİH'ler esas olarak yüksek frekanslardaki işaretlerin taşınmasında kullanılmakla birlikte, mikrodalga filtreler ve kuplörler gibi birçok devre elemanlarının gerçekleştirilmesinde de kullanılırlar. MİH'lerin analizinde genellikle quasi-statik yaklaşımlar ve tam-dalga yaklaşımlar kullanılır.

Literatürde MİH'lerin karakteristik parametrelerini farklı analiz yöntemleri kullanarak belirleyen çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen, arzu edilen karakteristik empedansa sahip olması istenen iletim hattının geometrik boyutlarının belirlenmesi amacıyla yapılan sentez çalışmaları sınırlı sayıdadır. Bu tez çalışmasında, MİH'lerden asimetrik EDK'ların, DTDEDK'ların, mikro EŞH'ların ve sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH'ların geometrik boyutlarının hesaplanması için sentez modelleri oluşturulmuş ve bu modellerin katsayıları esnek hesaplama algoritmalarından DE [93, 94], GA [95, 96], PSO [97] ve SA [98] algoritmaları kullanılarak optimum bir şekilde bulunmuştur. MİH'lerin geometrik boyutlarının hesaplanması için oluşturulan sentez formülleri ile ilgili detaylı bilgiler aşağıda verilmiştir.

4.1.1. Asimetrik Eşdüzlemli Dalga Kılavuzları için Sunulan Sentez Formülleri

Sonsuz kalınlıktaki dielektrik tabana sahip asimetrik EDK'lar 1981 yılında Hanna ve Thebault [51] tarafından literatüre sunulmuş ve analizi gerçekleştirilmiştir. Sonlu kalınlıktaki dielektrik tabana sahip asimetrik EDK'ların karakteristik parametreleri KDT kullanılarak elde edilmiştir [52, 53]. Asimetrik EDK'ların karakteristik empedansları ayrıca zaman domeninde sonlu farklar metodu kullanılarak

bulunmuştur [54]. Asimetrik EDK'ların karakteristik parametrelerinin hesaplanması için bir çok çalışma mevcut olmasına rağmen geometrik boyutlarının hesaplanması için literatürde henüz sentez formülü mevcut değildir. Bu nedenle tez çalışması kapsamında asimetrik EDK'ların tasarımında çok geniş bir kullanım alanına sahip sentez formülleri esnek hesaplama algoritmalarından DE, GA, PSO ve SA algoritmaları kullanılarak elde edilmiştir.

Şekil 3.1'de kesit görünümü verilen asimetrik EDK yapısında dielektrik taban malzemesinin kalınlığı h , bağıl dielektrik sabiti ϵ_r 'dir. Dielektrik taban üzerine yerleştirilen iletken şeridin genişliği w , iletken şerit ile toprak düzlemi arasındaki yarık genişlikleri s_1 ve s_2 'dir.

Bu çalışmada asimetrik EDK'nın geometrik boyutlarının hesaplanması için sentez formülleri oluşturulurken, KDT [53] sonuçlarından elde edilen 2079 veri seti kullanılmıştır. Veri seti oluşturulurken kullanılan tasarım parametreleri: $2 \leq \epsilon_r \leq 21$, $0.1 \leq s_1/s_2 \leq 0.9$, $0.1 \leq s_2/h \leq 0.9$, $0.1 \leq w/h \leq 2$, $20 \mu\text{m} \leq h \leq 2000 \mu\text{m}$. Bunlara karşılık gelen karakteristik empedans değerleri ise $20 \Omega \leq Z_0 \leq 212 \Omega$ arasındadır.

Arzu edilen karakteristik empedansa sahip asimetrik EDK'nın tasarımı için ilk adım uygun dielektrik tabanın seçilmesidir (ϵ_r , h). Uygun dielektrik taban seçildikten sonra şerit ve yarık genişlikleri hesaplanabilir. Bu çalışmada şerit ve yarık genişliklerinin hesaplanması için iki sentez formülü sunulmuştur. Birinci sentez formülü ile, dielektrik taban malzemesi (ϵ_r , h) seçildikten sonra, verilen yarık genişliklerine (s_1 ve s_2) karşılık arzu edilen karakteristik empedansa (Z_0) sahip iletim hattı tasarımı için gerekli olan şerit genişliği (w) hesaplanmaktadır. İkinci sentez formülü ile dielektrik taban malzemesi (ϵ_r , h) seçildikten sonra, verilen bir şerit genişliğine (w) ve yarık genişliğine (s_2) karşılık arzu edilen karakteristik empedansa (Z_0) sahip iletim hattı tasarımı için gerekli olan diğer yarık genişliği (s_1) hesaplanmaktadır.

Asimetrik EDK'nın geometrik boyutları için geçerli sentez modellerini bulmak amacıyla bir çok deneme yapılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda, şerit ve yarık genişliklerinin hesaplanması için hata oranları düşük aşağıdaki sentez modelleri elde edilmiştir.

$$w = \frac{h \cdot \left(\alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y + \alpha_4 \cdot \left(\frac{s_1}{h} \right) + \alpha_5 \cdot \left(\frac{s_2}{h} \right) + \alpha_6 \cdot \left(\frac{s_1}{h} \right)^2 + \alpha_7 \cdot \left(\frac{s_2}{h} \right)^2 + \alpha_8 \cdot x^{\alpha_9} \cdot y^{\alpha_{10}} \cdot \left(\frac{s_1}{h} \right)^{\alpha_{11}} \cdot \left(\frac{s_2}{h} \right)^{\alpha_{12}} \right)^{1/2}}{\alpha_{13} + \alpha_{14} \cdot x + \alpha_{15} \cdot y + \alpha_{16} \cdot \left(\frac{s_1}{h} \right) + \alpha_{17} \cdot \left(\frac{s_2}{h} \right) + \alpha_{18} \cdot x^2 + \alpha_{19} \cdot y^2 + \alpha_{20} \cdot x^{\alpha_{21}} \cdot y^{\alpha_{22}} \cdot \left(\frac{s_1}{h} \right)^{\alpha_{23}} \cdot \left(\frac{s_2}{h} \right)^{\alpha_{24}}} \quad (4.1)$$

ve

$$s_1 = \frac{h \cdot \left(\alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y + \alpha_4 \cdot \left(\frac{s_2}{h} \right) + \alpha_5 \cdot \left(\frac{w}{h} \right) + \alpha_6 \cdot x^2 + \alpha_7 \cdot y^2 + \alpha_8 \cdot \left(\frac{s_2}{h} \right)^2 \right)}{1 + \alpha_9 \cdot x + \alpha_{10} \cdot y + \alpha_{11} \cdot \left(\frac{s_2}{h} \right) + \alpha_{12} \cdot \left(\frac{w}{h} \right) + \alpha_{13} \cdot x^2 + \alpha_{14} \cdot y^2 + \alpha_{15} \cdot \left(\frac{s_2}{h} \right)^2 + \alpha_{16} \cdot x^{\alpha_{17}} \cdot y^{\alpha_{18}} \cdot \left(\frac{s_2}{h} \right)^{\alpha_{19}} \cdot \left(\frac{w}{h} \right)^{\alpha_{20}}} \quad (4.2)$$

$$x = \frac{1}{\varepsilon_r} \quad \text{ve} \quad y = \frac{Z_0}{\eta_0} \quad (4.3)$$

Burada $\eta_0 = 120 \pi \Omega$ olup hava ortamının özempedansını, $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{24})$ ise optimizasyon algoritmaları ile bulunacak katsayıları temsil etmektedir. DE, GA, PSO ve SA algoritmaları kullanılarak optimum bir şekilde bulunan katsayı değerleri Tablo 4.1’de verilmiş olup, bu katsayı değerleri (4.1) ve (4.2) eşitliklerinde yerine konularak şerit ve yarık genişlikleri için sentez formülleri elde edilir.

Örneğin, DE algoritması kullanılarak elde edilen şerit ve yarık genişliği formülleri aşağıdaki gibidir:

$$w = \frac{h \cdot \left(0.17 - 0.16 \cdot x - 0.26 \cdot y + 1.15 \cdot \left(\frac{s_1}{h} \right) + 0.35 \cdot \left(\frac{s_2}{h} \right) + 13.53 \cdot \left(\frac{s_1}{h} \right)^2 - 0.293 \cdot \left(\frac{s_2}{h} \right)^2 - 15.39 \cdot x^{-0.054} \cdot y^{0.17} \cdot \left(\frac{s_1}{h} \right)^{2.073} \cdot \left(\frac{s_2}{h} \right)^{-0.195} \right)^{1/2}}{-0.28 + 0.88 \cdot x - 0.52 \cdot y + 0.03 \cdot \left(\frac{s_1}{h} \right) - 0.1 \cdot \left(\frac{s_2}{h} \right) - 1.15 \cdot x^2 + 8.2 \cdot y^2 + 7.58 \cdot x^{-1.62} \cdot y^{3.2} \cdot \left(\frac{s_1}{h} \right)^{-0.37} \cdot \left(\frac{s_2}{h} \right)^{-0.306}} \quad (4.4)$$

ve

$$s_1 = \frac{h \cdot \left(2.9 + 17.61 \cdot x - 6.96 \cdot y - 0.28 \cdot \left(\frac{s_2}{h} \right) - 0.90 \cdot \left(\frac{w}{h} \right) + 15.75 \cdot x^2 + 20.07 \cdot y^2 + 0.30 \cdot \left(\frac{s_2}{h} \right)^2 \right)}{1 + 30 \cdot x - 21.76 \cdot y + 3.41 \cdot \left(\frac{s_2}{h} \right) - 0.95 \cdot \left(\frac{w}{h} \right) - 32.11 \cdot x^2 + 9.78 \cdot y^2 - 1 \cdot \left(\frac{s_2}{h} \right)^2 + 0.105 \cdot x^{3.42} \cdot y^{-6.4} \cdot \left(\frac{s_2}{h} \right)^{0.75} \cdot \left(\frac{w}{h} \right)^{-1.79}} \quad (4.5)$$

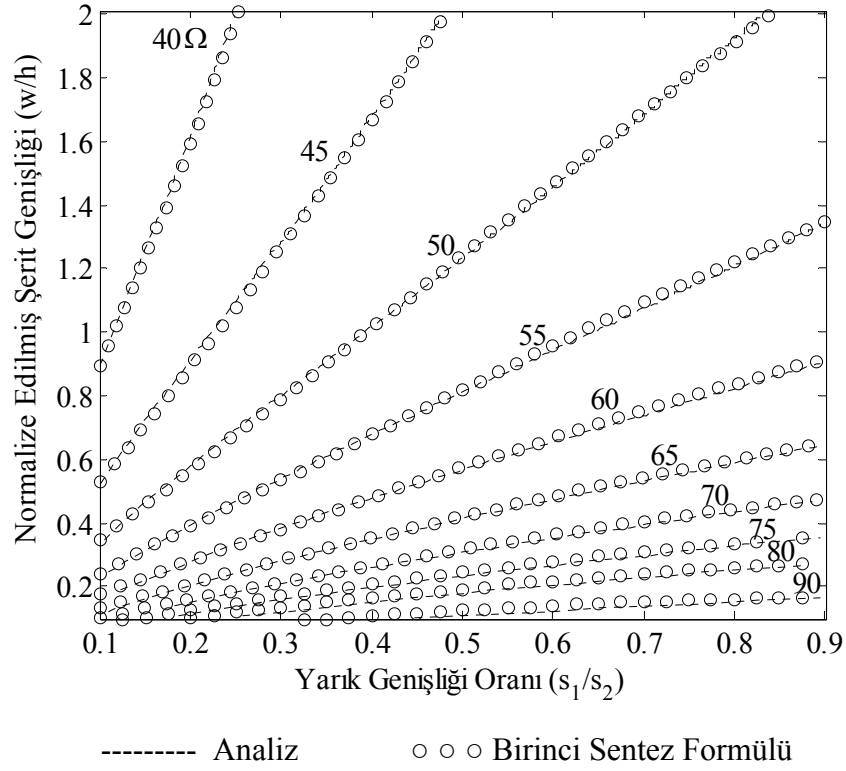
Tablo 4.1. DE, GA, PSO ve SA algoritmaları kullanılarak elde edilen sentez formülü katsayıları.

	Birinci Sentez Formülü (w)				İkinci Sentez Formülü (s_1)			
	DE	GA	PSO	SA	DE	GA	PSO	SA
α_1	0.17	0.16	0.14	0.13	2.90	4.08	3.20	3.11
α_2	-0.16	-0.24	-0.27	-0.29	17.61	10.47	15.25	15.9
α_3	-0.26	-0.09	0.22	0.25	-6.96	5.27	1.97	2.40
α_4	1.15	1.09	1.00	1.21	-0.28	-2.40	-0.35	-0.40
α_5	0.35	0.31	0.32	0.29	-0.90	-1.10	-0.74	-0.81
α_6	13.53	13.6	13.72	13.34	15.75	28.76	20.72	19.2
α_7	-0.293	-0.26	-0.27	-0.25	20.07	2.23	8.53	9.06
α_8	-15.39	-15.52	-15.44	-15.5	0.30	2.04	0.49	0.62
α_9	-0.054	-0.05	-0.05	-0.049	30	32.25	33.53	34.98
α_{10}	0.17	0.17	0.168	0.168	-21.76	-20.04	-19.95	-20.93
α_{11}	2.073	2.06	2.066	2.065	3.41	3.72	3.43	3.39
α_{12}	-0.195	-0.189	-0.191	-0.191	-0.95	-1.14	-0.61	-0.68
α_{13}	-0.28	-0.28	-0.30	-0.29	-32.11	-29.36	-34.84	-35.42
α_{14}	0.88	0.77	1.09	1.06	9.78	-5.04	-10.41	-7.98
α_{15}	-0.52	-0.46	-0.55	-0.58	-1	-0.01	-0.30	0.08
α_{16}	0.03	0.06	0.02	0.04	0.105	0.091	0.097	0.094
α_{17}	-0.1	-0.09	-0.08	-0.085	3.42	3.348	3.35	3.363
α_{18}	-1.15	-1.02	-1.53	-1.49	-6.4	-6.55	-6.53	-6.54
α_{19}	8.2	7.73	8.31	8.12	0.75	0.78	0.78	0.75
α_{20}	7.58	7.35	7.36	7.43	-1.79	-1.85	-1.85	-1.86
α_{21}	-1.62	-1.617	-1.62	-1.615	---	---	---	---
α_{22}	3.2	3.20	3.19	3.195	---	---	---	---
α_{23}	-0.37	-0.38	-0.36	-0.365	---	---	---	---
α_{24}	-0.306	-0.31	-0.317	-0.314	---	---	---	---

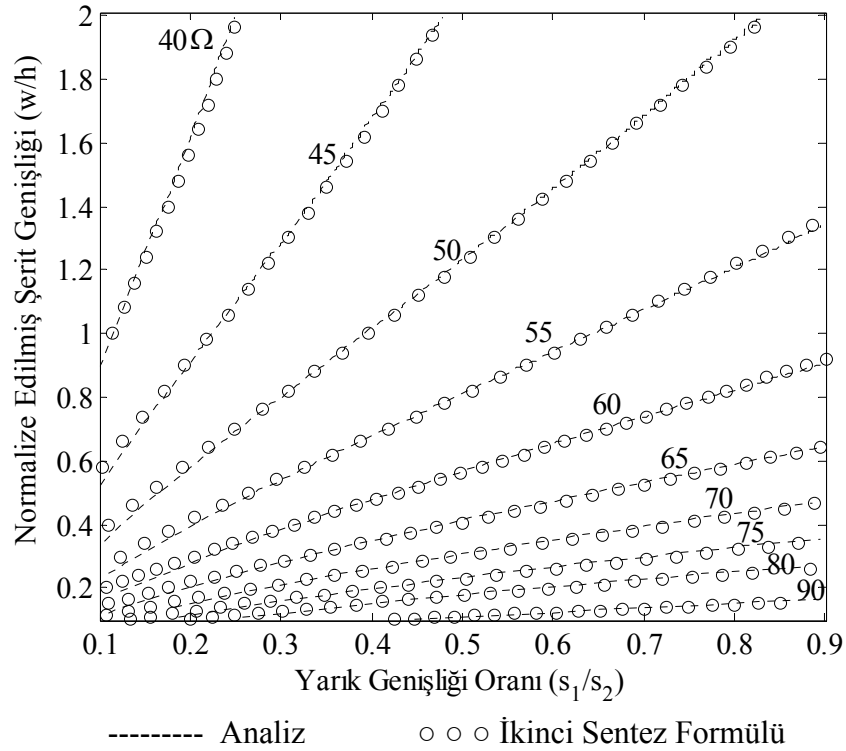
Elde edilen sentez formülleri $2 \leq \varepsilon_r \leq 21$, $0.1 \leq s_1/s_2 \leq 0.9$, $0.1 \leq s_2/h \leq 0.9$, $0.1 \leq w/h \leq 2$, $20 \mu\text{m} \leq h \leq 2000 \mu\text{m}$ ve $20 \Omega \leq Z_0 \leq 212 \Omega$ aralıkları için geçerlidir. DE'nin optimizasyon sürecinde popülasyon büyüklüğü 30, ölçeklendirme faktörü 0.8 ve çaprazlama oranı 0.8 olarak alınmıştır. GA'nın optimizasyon sürecinde popülasyon büyüklüğü 30, mutasyon oranı 0.01 ve çaprazlama oranı 0.85 olarak tercih edilmiştir. PSO optimizasyonunda popülasyon büyüklüğü 30, atalet ağırlık katsayısı 2, hızlandırma (ivme) katsayıları 2.05 olarak alınmıştır. SA optimizasyonunda Boltzmann sabiti 1, soğutma katsayısı 0.99 olarak tercih edilmiştir.

DE, GA, PSO ve SA algoritmaları kullanılarak elde edilen sentez formüllerinin quasi-statik analiz [53] sonuçları ile karşılaştırıldığında ortalama yüzde hataları sırasıyla % 0.56, % 0.62, % 0.87 ve % 0.88'dir. Ortalama yüzde hata değerlerinden görüldüğü gibi en iyi sonuçlar DE algoritması kullanılarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, diğer algoritmalarından elde edilen sentez formüllerinin de pratikte kullanılabilir bir doğruluğa sahip olduğu görülmüştür. Bu çalışmada, DE algoritması kullanılarak elde edilen sentez formüllerinin sonuçları literatürdeki sonuçlarla, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılarak sentez formüllerinin doğruluğu ve geçerliliği gösterilmiştir. Şekil 4.1'de $\epsilon_r = 12.9$, $s_2/h = 0.9$ ve $h = 635 \mu\text{m}$ olan asimetrik EDK'nın arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için birinci sentez formülünden elde edilen şerit genişliği $w(\epsilon_r, Z_0, s_1/h, s_2/h)$ sonuçları quasi-statik analiz [53] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.2'de ise aynı iletim hattının arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için ikinci sentez formülünden elde edilen yarı genişliği $s_1(\epsilon_r, Z_0, w/h, s_2/h)$ sonuçları quasi-statik analiz [53] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçların quasi-statik analiz sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisinde olduğu Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'den görülmektedir. DE algoritmasıyla oluşturulan sentez formüllerinin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerleri quasi-statik analiz [53] sonuçları ile farklı w/h değerleri için Şekil 4.3'te karşılaştırılmıştır. Şekil 4.3'teki sonuçlar $\epsilon_r = 9.6$, $s_2/h = 0.9$ ve $h = 250 \mu\text{m}$ olan asimetrik EDK'lar için elde edilmiştir. Şekil 4.3'ten açıkça görüldüğü gibi sentez formüllerinden elde edilen sonuçlar quasi-statik analiz sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisindedir. Ayrıca bu şekilde birinci ve ikinci sentez formüllerinin kendileri arasında da iyi bir uyum olduğu görülmektedir.

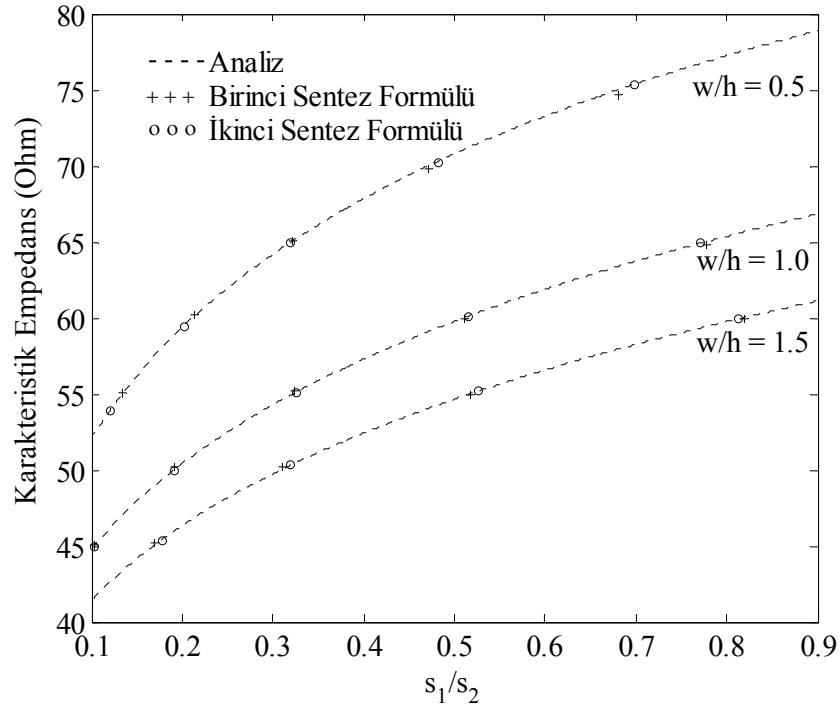
Sentez formüllerinin geçerliliğini ortaya koymak için beş farklı asimetrik EDK yapısı ($\epsilon_r = 10.2$ ve $h = 1270 \mu\text{m}$) deneysel olarak tasarlanmıştır. Deneysel olarak tasarlanan asimetrik EDK'lardan biri Şekil 3.3'te yer almaktadır. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçlar KDT [53], IE3D [141] ve ölçüm sonuçlarıyla Tablo 4.2'de karşılaştırılmıştır. Bu tabloda w' , s_1' , s_2' ve Z_0' deneysel sonuçları; $Z_0(w', s_1', s_2')$: w' , s_1' ve s_2' değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(w, s_1', s_2')$: s_1' , s_2' ve birinci sentez formülünden elde edilen w değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(w', s_1, s_2')$ ise w' , s_2' ve ikinci sentez formülünden elde edilen s_1 değerleri kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerini temsil etmektedir.



Şekil 4.1. Birinci sentez formülünden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [53] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 12.9$, $s_2/h = 0.9$, $h = 635 \mu\text{m}$).



Şekil 4.2. İkinci sentez formülünden elde edilen yarık genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [53] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 12.9$, $s_2/h = 0.9$, $h = 635 \mu\text{m}$).



Şekil 4.3. Sentez formüllerinin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz [53] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 9.6$, $s_2/h = 0.9$, $h = 250 \mu\text{m}$).

Tablo 4.2. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçların KDT, IE3D ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 10.2$, $h = 1270 \mu\text{m}$, $f = 2.5 \text{ GHz}$).

Deneysel				KDT [53]	IE3D [141]	Birinci Sentez Formülü		İkinci Sentez Formülü	
w' (μm)	s_1' (μm)	s_2' (μm)	Z_0' (Ω)	$Z_0(w', s_1', s_2')$ (Ω)	$Z_0(w', s_1', s_2')$ (Ω)	w (μm)	$Z_0(w, s_1', s_2')$ (Ω)	s_1 (μm)	$Z_0(w', s_1, s_2')$ (Ω)
1000	300	600	47.88	50.07	51.25	1001	50.05	291	49.80
1000	400	450	48.08	50.30	51.13	1011	50.17	361	49.50
1200	450	500	47.84	49.82	49.99	1170	50.12	433	49.51
1250	350	750	47.74	50.27	50.65	1280	49.99	337	49.93
1400	425	700	48.01	50.12	49.92	1423	49.93	412	49.86

Sonuç olarak bu çalışmada asimetrik EDK'ların geometrik boyutlarının hesaplanması için DE, GA, PSO ve SA algoritmaları kullanılarak sentez formülleri elde edilmiştir. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçların KDT, IE3D ve deneysel çalışma sonuçları ile iyi bir uyum içerisinde olması sunulan sentez formüllerinin asimetrik EDK'nın geometrik boyutlarının hesaplanmasında kullanılabileceğini açıkça göstermektedir [142].

4.1.2. Dielektrik Taban Destekli Eşdüzlemli Dalga Kılavuzları için Sunulan Sentez Formülleri

Literatürde yaygın olarak kullanılan çok katmanlı EDK'lerden bir tanesi de DTDEDK'lardır. DTDEDK'ların karakteristik parametreleri Bedair ve Wolff [61] tarafından KDT kullanarak elde edilmiştir. Aynı zamanda, elde edilen analitik ifadelerin sonuçları spektral domen analizi (SDA) sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bir diğer çalışmada ise Cheng ve Robertson [62], geliştirilmiş SDA (GSDA) metodunu kullanarak DTDEDK'ların karakteristik parametrelerini elde etmişlerdir. DTDEDK'ların karakteristik parametrelerinin elde edilmesi için çalışmalar yapılmış olmasına rağmen arzu edilen karakteristik empedansa sahip DTDEDK'ların geometrik boyutlarının hesaplanması için literatürde henüz sentez formülü mevcut değildir. Bu nedenle tez çalışması kapsamında DTDEDK'ların pratik tasarımında çok geniş bir kullanım alanına sahip sentez formülleri DE, PSO, SA ve GA kullanılarak elde edilmiştir.

Şekil 3.4'te kesit görünümü verilen DTDEDK yapısında bağıl dielektrik sabiti ϵ_{r2} olan taban malzemesinin kalınlığı h , bu taban malzemesini destekleyen sonsuz kalınlıktaki malzemenin bağıl dielektrik sabiti ϵ_{r1} 'dir. Dielektrik tabanın üzerine yerleştirilen iletken şeridin genişliği s , iletken şerit ile toprak düzlemleri arasındaki yarık genişliği w 'dır.

Bu çalışmada DTDEDK'ların geometrik boyutlarının hesaplanması için sentez formülleri oluşturulurken, KDT [61] sonuçlarından elde edilen 4560 veri seti kullanılmıştır. Veri seti oluşturulurken kullanılan tasarım parametreleri: $2 \leq \epsilon_{r1} \leq 10$, $10 \leq \epsilon_{r2} \leq 20$, $0.1 \leq s/h \leq 4$, $0.1 \leq w/h \leq 1$, $20 \mu\text{m} \leq h \leq 2000 \mu\text{m}$. Bunlara karşılık gelen karakteristik empedans değerleri ise $19 \Omega \leq Z_0 \leq 117 \Omega$ arasındadır.

Arzu edilen karakteristik empedansa sahip DTDEDK'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 formülü sunulmuştur. Birinci sentez formülü ile, 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. İkinci sentez formülü ile

de, 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.

DTDEDK'nın geometrik boyutları için geçerli sentez modellerini bulmak amacıyla bir çok deneme yapılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda, yarık ve şerit genişliklerinin hesaplanması için hata oranları düşük aşağıdaki sentez modelleri elde edilmiştir.

$$w = \frac{h \cdot \left(\alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y + \alpha_4 \cdot z + \alpha_5 \cdot \left(\frac{s}{h} \right) + \alpha_6 \cdot x^2 + \alpha_7 \cdot x^{\alpha_8} \cdot y^{\alpha_9} \cdot z^{\alpha_{10}} \cdot \left(\frac{s}{h} \right)^{\alpha_{11}} \right)^{1/2}}{\left(1 + \alpha_{12} \cdot x + \alpha_{13} \cdot y + \alpha_{14} \cdot z + \alpha_{15} \cdot \left(\frac{s}{h} \right) + \alpha_{16} \cdot y^2 + \alpha_{17} \cdot x^{\alpha_{18}} \cdot y^{\alpha_{19}} \cdot z^{\alpha_{20}} \cdot \left(\frac{s}{h} \right)^{\alpha_{21}} \right)} \quad (4.6)$$

ve

$$s = \frac{h \cdot \left(\alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y + \alpha_4 \cdot z + \alpha_5 \cdot \left(\frac{w}{h} \right) + \alpha_6 \cdot x^2 + \alpha_7 \cdot y^2 + \alpha_8 \cdot x^{\alpha_9} \cdot y^{\alpha_{10}} \cdot z^{\alpha_{11}} \cdot \left(\frac{w}{h} \right)^{\alpha_{12}} \right)^{1/2}}{\left(0.25 + \alpha_{13} \cdot x + \alpha_{14} \cdot y + \alpha_{15} \cdot z + \alpha_{16} \cdot \left(\frac{w}{h} \right) + \alpha_{17} \cdot x^2 + \alpha_{18} \cdot y^2 + \alpha_{19} \cdot x^{\alpha_{20}} \cdot y^{\alpha_{21}} \cdot z^{\alpha_{22}} \cdot \left(\frac{w}{h} \right)^{\alpha_{23}} \right)} \quad (4.7)$$

$$x = \frac{Z_0}{\eta_0} \quad (4.8)$$

$$y = \frac{1}{\varepsilon_{r1}} \quad (4.9)$$

$$z = \frac{1}{\varepsilon_{r2}} \quad (4.10)$$

DE, PSO, SA ve GA kullanılarak optimum bir şekilde bulunan katsayı değerleri (α_1 , α_2 , ..., α_{23}) sırasıyla Tablo 4.3 - Tablo 4.6'da verilmiş olup, bu katsayı değerleri (4.6) ve (4.7) eşitliklerinde yerine konularak sentez formülleri elde edilir.

DE'nin optimizasyon sürecinde popülasyon büyüklüğü 30, ölçeklendirme faktörü 0.8 ve çaprazlama oranı 0.8 olarak alınmıştır. PSO optimizasyonunda popülasyon büyüklüğü 30, atalet ağırlık katsayısı 2, c_1 ve c_2 katsayıları 2.1 olarak tercih edilmiştir. SA optimizasyonunda Boltzmann sabiti 1, soğutma katsayısı 0.98 olarak alınmıştır. GA'nın optimizasyon sürecinde popülasyon büyüklüğü 30, mutasyon oranı 0.05 ve çaprazlama oranı 0.85 olarak tercih edilmiştir.

DE, PSO, SA ve GA kullanılarak elde edilen sentez formülleri quasi-statik analiz [61] sonuçları ile karşılaştırıldığında ortalama yüzde hataları sırasıyla % 1.26, % 1.67, % 1.68 ve % 1.75'dir. Ortalama yüzde hata değerlerinden görüldüğü gibi en iyi sonuçlar DE algoritması kullanılarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, diğer algoritmalarından elde edilen sentez formüllerinin de pratikte kullanılabilir bir doğruluğa sahip olduğu görülmüştür.

Tablo 4.3. DE algoritması kullanılarak elde edilen sentez formülü katsayıları.

	Birinci Sentez Formülü (w)		İkinci Sentez Formülü (s)			
	$0.1 \leq s/h \leq 0.6$	$0.6 < s/h \leq 4.0$	$0.1 \leq w/h \leq 0.3$	$0.3 < w/h \leq 0.5$	$0.5 < w/h \leq 0.75$	$0.75 < w/h \leq 1.0$
α_1	1.82	-0.68	0.2227	0.269	1.23	18.362
α_2	-2.47	0.18	-15.899	-1.46	-69.77	-50.813
α_3	12.01	0.4	22.5884	4.555	285.44	346.74
α_4	10.106	-5.053	10.966	1	72.55	11.31
α_5	0.86	3.016	-1.444	-0.32	-8	-22.7
α_6	-1.1	6.05	30	-0.51	99	168
α_7	2.04	4.662	17.826	3.55	79.03	-11.07
α_8	3.448	1.586	0.0008	0.000145	0.0008	0.0005
α_9	0.73	-1.649	-9.036	-8.082	-9.507	1.3
α_{10}	-2.187	1	1.238	1.1	1.30	-0.773
α_{11}	-0.071	2.634	4.287	3.14	4.072	-3.052
α_{12}	-4.14	-5.457	0.904	0.82	0.608	11.07
α_{13}	1.919	0.14	-5.870	-0.678	3.32	2.45
α_{14}	0.49	4.58	-3.482	-1.261	-7.074	-7.11
α_{15}	-0.036	0.229	9.108	1.670	7.448	4.855
α_{16}	-0.43	0.135	-0.1	-0.229	-0.53	-0.439
α_{17}	0.247	0.044	-20.442	5.593	32.408	49.585
α_{18}	-3.706	-4.14	1.66	0.858	3.805	5.13
α_{19}	0.27	0.04	76.041	23.637	223.81	223.468
α_{20}	1.77	1.82	3.247	3.64	3.842	4
α_{21}	-1.038	-0.15	0.686	0.67	0.635	0.5
α_{22}	--	--	-1.511	-1.788	-1.801	-1.86
α_{23}	--	--	-0.955	-1.266	-1.347	-1.52

Tablo 4.4. PSO algoritması kullanılarak elde edilen sentez formülü katsayıları.

	Birinci Sentez Formülü (w)		İkinci Sentez Formülü (s)			
	$0.1 \leq s/h \leq 0.6$	$0.6 < s/h \leq 4.0$	$0.1 \leq w/h \leq 0.3$	$0.3 < w/h \leq 0.5$	$0.5 < w/h \leq 0.75$	$0.75 < w/h \leq 1.0$
α_1	6.408	-0.712	-0.047	0.214	-1.893	18.993
α_2	11.754	0.12	-14.269	-1.737	-27.595	-52.359
α_3	-3.025	-0.006	22.576	4.778	284.556	345.224
α_4	-3.016	-5.023	9.849	0.966	82.232	15.227
α_5	1.799	3.122	-1.071	-0.284	-7.475	-21.021
α_6	-4.626	6.05	25.721	-0.534	-117.337	92.291
α_7	4.031	4.44	18.638	2.921	78.211	-11.940
α_8	3.45	1.67	0.0007	0.000168	0.0008	0.0006
α_9	-4.895	-1.658	-9.05	-8.1	-9.5	1.5
α_{10}	1.92	1.115	1.209	1.110	1.30	-0.8
α_{11}	3.11	3.081	4.269	3.2	4.072	-3.048
α_{12}	-4.568	-5.301	0.924	0.83	0.608	11
α_{13}	3.997	0.286	-6.05	-0.568	2.86	3.08
α_{14}	-0.60	4.068	-3.312	-1.266	-7.062	-7.124
α_{15}	0.183	0.230	8.975	1.743	7.843	4.88
α_{16}	-5.456	-0.230	-0.069	-0.25	-0.517	-0.434
α_{17}	0.245	0.04	-19.8	5.652	32.120	49.585
α_{18}	-3.7	-4.2	1.476	0.814	3.683	5.142
α_{19}	-0.064	0.045	76.237	21.909	230.192	216.359
α_{20}	1.866	1.85	3.25	3.6	3.85	4.04
α_{21}	-0.985	-0.09	0.69	0.7	0.638	0.505
α_{22}	--	--	-1.51	-1.794	-1.8	-1.9
α_{23}	--	--	-0.95	-1.25	-1.35	-1.521

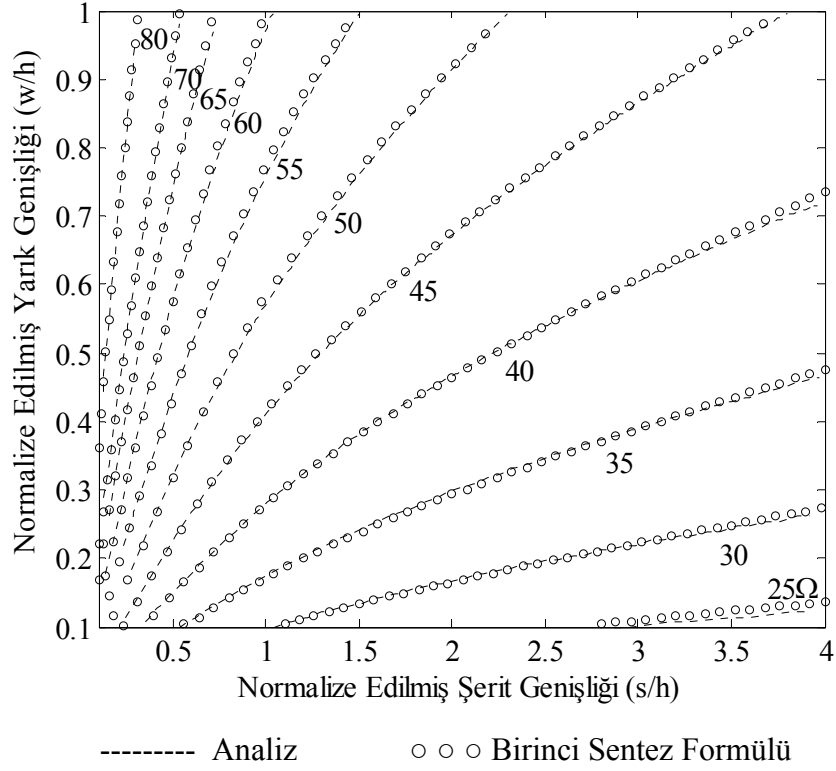
Tablo 4.5. SA algoritması kullanılarak elde edilen sentez formülü katsayıları.

	Birinci Sentez Formülü (w)		İkinci Sentez Formülü (s)			
	$0.1 \leq s/h \leq 0.6$	$0.6 < s/h \leq 4.0$	$0.1 \leq w/h \leq 0.3$	$0.3 < w/h \leq 0.5$	$0.5 < w/h \leq 0.75$	$0.75 < w/h \leq 1.0$
α_1	6.517	-0.771	0.019	0.205	-2.096	18.828
α_2	11.933	0.467	-14.483	-1.686	-24.426	-49.961
α_3	-3.004	0.018	22.264	4.727	283.676	342.245
α_4	-5.134	-5.681	9.837	1.208	80.269	14.544
α_5	1.778	3.132	-1.079	-0.276	-7.805	-20.676
α_6	-4.751	7.447	25.868	-1.208	-81.890	94.165
α_7	4.121	4.43	18.460	2.985	77.962	-11.871
α_8	-0.233	1.704	0.0007	0.00017	0.001	0.0008
α_9	-2.138	-1.695	-9.038	-8.099	-9.412	0.166
α_{10}	0.816	1.065	1.211	1.108	1.297	0.602
α_{11}	9.164	2.977	4.261	3.196	4.071	-2.75
α_{12}	-4.503	-5.296	0.921	0.833	0.526	13.047
α_{13}	3.961	0.306	-6.166	-0.558	2.938	3.103
α_{14}	-0.711	4.130	-3.326	-1.262	-7.075	-7.157
α_{15}	0.105	0.230	8.975	1.760	7.848	4.979
α_{16}	-5.420	-0.315	-0.043	-0.250	-0.554	-0.455
α_{17}	0.244	0.043	-19.819	5.619	35.897	49.989
α_{18}	-3.706	-4.176	1.450	0.810	3.675	5.140
α_{19}	-0.060	0.05	76.348	21.911	230.52	217.273
α_{20}	1.855	1.854	3.249	3.598	3.850	4.04
α_{21}	-0.971	-0.090	0.691	0.698	0.643	0.504
α_{22}	--	--	-1.51	-1.791	-1.799	-1.902
α_{23}	--	--	-0.949	-1.251	-1.358	-1.521

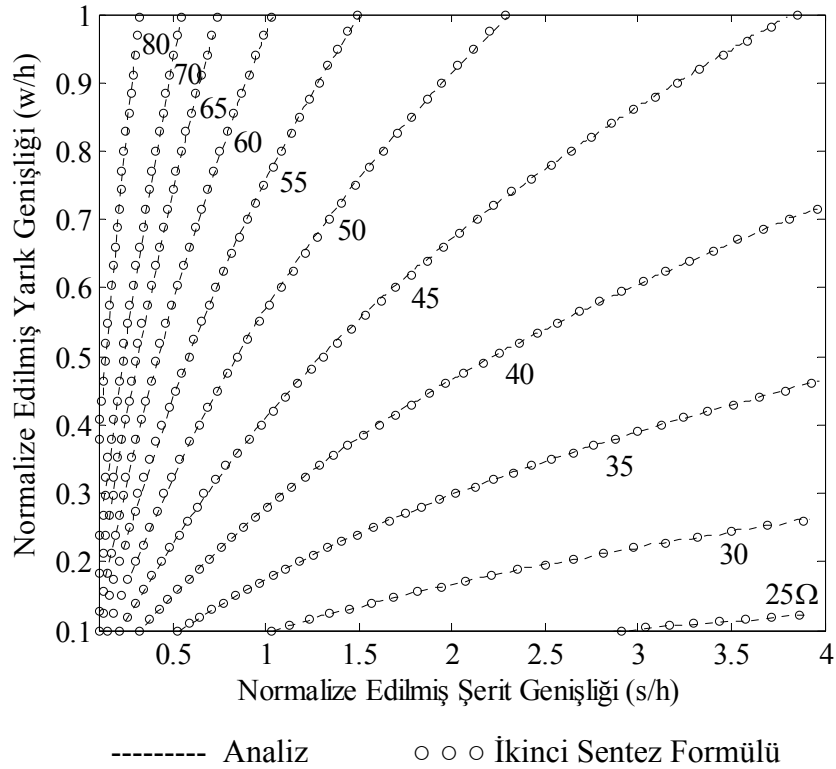
Tablo 4.6. GA kullanılarak elde edilen sentez formülü katsayıları.

	Birinci Sentez Formülü (w)		İkinci Sentez Formülü (s)			
	$0.1 \leq s/h \leq 0.6$	$0.6 < s/h \leq 4.0$	$0.1 \leq w/h \leq 0.3$	$0.3 < w/h \leq 0.5$	$0.5 < w/h \leq 0.75$	$0.75 < w/h \leq 1.0$
α_1	2.38	-0.86	-0.307	0.202	-3.326	14.562
α_2	-4.17	2.587	-3.942	-0.461	-82.039	-31.968
α_3	11.99	0.31	23.443	4.402	295.33	342.235
α_4	8.673	-5.56	10.578	0.883	73.773	10.401
α_5	0.85	3.048	-1.604	-0.218	-1.247	-19.242
α_6	-3.82	-0.003	-34.874	-5.371	146.07	93.213
α_7	2.80	4.803	16.428	3.709	60.726	-19.188
α_8	3.55	1.58	0.0008	0.00014	0.0009	0.0007
α_9	0.69	-1.65	-9.035	-8.083	-9.496	1.47
α_{10}	-2.18	0.995	1.235	1.1	1.235	-0.767
α_{11}	-0.09	2.624	4.286	3.128	4.070	0.097
α_{12}	-4.37	-5.40	0.905	0.819	0.603	11.12
α_{13}	1.77	0.10	-5.852	-0.667	3.631	2.335
α_{14}	0.01	4.64	-3.48	-1.266	-7.100	-7.200
α_{15}	0.12	0.224	9.11	1.641	7.570	5.336
α_{16}	-0.45	0.13	-0.11	-0.224	-0.512	-0.447
α_{17}	0.25	0.046	-20.123	5.467	30.329	47.854
α_{18}	-3.71	-4.12	1.645	0.846	3.781	5.174
α_{19}	0.27	0.045	76.5	23.922	224.924	220.228
α_{20}	1.77	1.817	3.247	3.639	3.836	3.991
α_{21}	-1.037	-0.143	0.685	0.671	0.637	0.502
α_{22}	--	--	-1.510	-1.787	-1.799	-1.861
α_{23}	--	--	-0.956	-1.267	-1.339	-1.516

Bu çalışmada, DE algoritması kullanılarak elde edilen sentez formüllerinin sonuçları literatürdeki sonuçlarla [61, 62] ve tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak sentez formüllerinin doğruluğu ve geçerliliği gösterilmiştir. Şekil 4.4'te $\epsilon_{r1} = 3.78$, $\epsilon_{r2} = 12.9$ ve $h = 200 \mu\text{m}$ olan DTDEDK'nın arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için birinci sentez formülünden elde edilen yarık genişliği $w(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, Z_0, s/h)$ sonuçları quasi-statik analiz [61] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.5'te ise aynı iletim hattının arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için ikinci sentez formülünden elde edilen şerit genişliği $s(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, Z_0, w/h)$ sonuçları quasi-statik analiz [61] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sentez formüllerinin sonuçlarının quasi-statik analiz [61] sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisinde olduğu Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'ten açıkça görülmektedir.



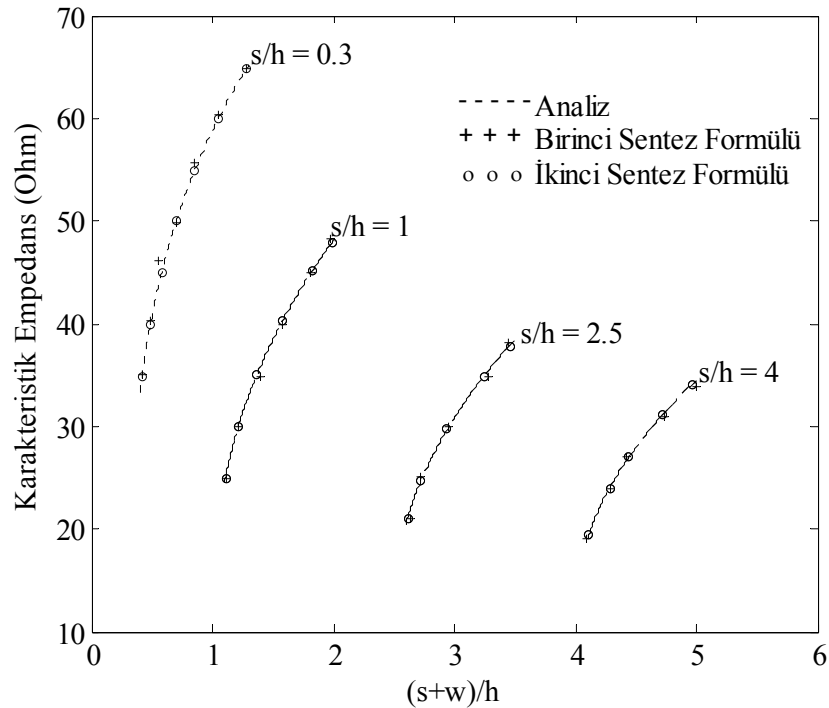
Şekil 4.4. Birinci sentez formülünden elde edilen yarık genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [61] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 3.78$, $\epsilon_{r2} = 12.9$, $h = 200 \mu\text{m}$).



Şekil 4.5. İkinci sentez formülünden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [61] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 3.78$, $\epsilon_{r2} = 12.9$, $h = 200 \mu\text{m}$).

DE algoritmasıyla oluşturulan sentez formüllerinin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerleri quasi-statik analiz [61] sonuçları ile farklı s/h değerleri için Şekil 4.6'da karşılaştırılmıştır. Şekil 4.6'daki sonuçlar $\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 20$ ve $h = 250 \mu\text{m}$ olan DTDEDK'lar için elde edilmiştir. Şekil 4.6'dan açıkça görüldüğü gibi sentez formüllerinden elde edilen sonuçlar quasi-statik analiz sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisindedir. Ayrıca bu şekilde birinci ve ikinci sentez formüllerinin kendileri arasında da iyi bir uyum olduğu görülmektedir.

Sentez formüllerinden elde edilen geometrik boyutlar ve bu boyutlar kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerleri KDT [61], SDA [61] ve GSDA [62] sonuçları ile Tablo 4.7 - Tablo 4.9'da 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 birinci sentez formülünden elde edilen w değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(w', s)$ ise verilen w' ve ikinci sentez formülünden elde edilen s değerleri kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerini temsil etmektedir.



Şekil 4.6. Sentez formüllerinin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz [61] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 20$, $h = 250 \mu\text{m}$).

Tablo 4.7 - Tablo 4.9'dan görüldüğü gibi sentez formüllerinden elde edilen geometrik boyutlar (w ve s), gerçek geometrik boyutlar (w' ve s') ile uyum içerisindedir. Buna bağlı olarak sentez formüllerinin sonuçları kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerleri KDT, SDA ve GSDA sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisindedir.

Tablo 4.7. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 20$, $h = 200 \mu\text{m}$).

w' (μm)	s' (μm)	KDT [61]	SDA [61]	GSDA [62]	Birinci Sentez Formülü		İkinci Sentez Formülü	
		$Z_0(w', s')$ (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	45.51	45.85	45.38	20	45.51	19	46.19
	60	33.24	33.38	33.15	20	33.24	61	33.09
	120	27.68	27.12	27.56	21	28.01	120	28.01
	200	24.52	24.50	24.37	20	24.52	200	24.52
	800	19.01	18.83	18.76	22	19.37	790	19.03
60	20	61.82	62.01	61.49	61	62.10	17	64.45
	60	45.81	45.83	45.60	60	45.81	54	47.19
	120	37.73	37.67	37.51	61	37.92	115	38.17
	200	32.95	32.61	32.70	60	32.95	197	33.08
	800	24.41	24.05	24.00	60	24.41	799	24.39
100	20	70.56	70.60	70.02	100	70.56	20	70.56
	60	53.26	53.18	52.90	100	53.26	60	53.26
	120	44.09	43.90	43.73	101	44.22	123	43.79
	200	38.47	38.19	38.07	102	38.71	204	38.27
	800	27.98	27.48	27.43	100	27.98	798	27.96
200	20	83.77	83.24	82.62	199	83.67	24	80.59
	60	65.28	64.80	64.45	199	65.19	61	65.02
	120	54.87	54.31	54.09	200	54.87	118	55.11
	200	48.95	47.50	47.34	208	48.78	185	49.11
	800	34.42	33.66	33.63	201	34.47	811	34.31

Tablo 4.8. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 3.78$, $\epsilon_{r2} = 12.9$, $h = 200 \mu\text{m}$).

w' (μm)	s' (μm)	KDT [61]	SDA [61]	GSDA [62]	Birinci Sentez Formülü		İkinci Sentez Formülü	
		$Z_0(w', s')$ (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
	60	40.90	41.08	40.79	19	40.31	59	41.09
	120	34.11	34.16	33.96	20	34.11	116	34.36
	200	30.30	30.28	30.12	20	30.30	195	30.43
	800	23.73	23.72	23.63	22	24.39	829	23.79
60	20	76.09	76.32	75.69	60	76.09	21	75.14
	60	56.46	56.50	55.21	59	56.18	59	56.73
	120	46.62	46.56	46.37	60	46.62	119	46.73
	200	40.88	40.72	40.58	60	40.88	201	40.83
	800	30.99	30.56	30.49	62	31.23	806	30.92
100	20	86.97	87.03	86.32	100	86.97	21	85.97
	60	65.80	65.71	65.37	99	65.60	59	66.10
	120	54.65	54.44	54.23	100	54.65	120	54.65
	200	47.91	47.60	47.44	102	48.21	202	47.79
	800	35.76	35.16	35.09	102	35.93	805	35.68
200	20	103.80	103.20	102.42	202	104.08	23	100.82
	60	81.22	80.66	80.21	202	81.47	61	80.90
	120	68.62	67.95	67.67	203	68.96	119	68.75
	200	60.58	59.80	59.61	204	61.00	198	60.72
	800	44.60	43.65	43.59	202	44.75	808	44.50

Tablo 4.9. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması ($\varepsilon_{r1} = 10$, $\varepsilon_{r2} = 12.9$, $h = 200 \mu\text{m}$).

w' (μm)	s' (μm)	KDT [61]	SDA [61]	GSDA [62]	Birinci Sentez Formülü		İkinci Sentez Formülü	
		$Z_0(w', s')$ (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	55.91	56.33	55.75	20	55.91	20	55.91
	60	40.79	40.98	40.69	20	40.79	61	40.61
	120	33.90	33.96	33.76	21	34.30	120	33.90
	200	29.98	29.92	29.77	21	30.23	194	30.09
	800	22.60	22.47	22.40	23	23.21	808	22.53
60	20	75.84	76.09	75.46	62	76.50	18	77.93
	60	56.07	56.14	55.86	61	56.35	57	56.90
	120	46.01	46.00	45.82	61	46.24	120	46.01
	200	39.96	39.89	39.75	62	40.34	203	39.81
	800	28.69	28.43	28.38	61	28.78	810	28.59
100	20	86.36	86.48	85.77	101	86.58	19	87.43
	60	64.98	64.97	64.64	101	65.17	60	64.98
	120	53.92	53.42	53.22	103	54.00	119	53.65
	200	46.39	46.22	46.07	104	46.94	203	46.21
	800	32.61	32.25	32.22	102	32.75	810	32.49
200	20	101.80	101.50	100.60	200	101.80	23	98.74
	60	78.85	78.94	78.12	200	78.85	60	78.85
	120	65.81	65.44	65.18	198	65.62	117	66.26
	200	57.26	56.22	56.66	202	57.44	195	57.67
	800	39.47	38.95	38.95	203	39.65	805	39.41

Sentez formüllerinin geçerliliğini ortaya koymak için beş farklı DTDEDK yapısı ($\varepsilon_{r1} = 6.15$, $\varepsilon_{r2} = 10.2$ ve $h = 1270 \mu\text{m}$) deneysel olarak tasarlanmıştır. Deneysel olarak tasarlanan DTDEDK'lerden biri Şekil 3.5'te yer almaktadır. Sentez formüllerinin sonuçlarından elde edilen karakteristik empedans değerleri KDT [61] sonuçlarıyla ve tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarıyla Tablo 4.10'da 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 birinci sentez formülünden elde edilen w değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(w', s)$ ise verilen w' ve ikinci sentez formülünden elde edilen s değerleri kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerini göstermektedir. Tablo 4.10'dan açıkça görüldüğü gibi sentez formüllerinden elde edilen sonuçlar KDT [61], IE3D ve ölçüm sonuçlarıyla iyi bir uyum içerisinde.

Sonuç olarak bu çalışmada DTDEDK'ların geometrik boyutlarının hesaplanması için DE, PSO, SA ve GA kullanılarak sentez formülleri elde edilmiştir. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçların KDT, SDA, GSDA, IE3D ve ölçüm sonuçları ile iyi bir uyum içerisinde olması sunulan sentez formüllerinin DTDEDK'ların geometrik boyutlarının hesaplanmasında kullanılabileceğini açıkça göstermektedir [143].

Tablo 4.10. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçların KDT, IE3D ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması ($\varepsilon_{r1} = 6.15$, $\varepsilon_{r2} = 10.2$, $h = 1270 \mu\text{m}$, $f = 2 \text{ GHz}$).

Deneysel			KDT [61]	IE3D [141]	Birinci Sentez Formülü		İkinci Sentez Formülü	
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)
450	1000	47.47	50.21	48.80	447	50.11	1019	49.96
500	1200	48.34	49.33	47.57	529	50.18	1149	49.91
550	1300	47.48	49.70	47.91	568	50.19	1281	49.90
600	1400	46.66	50.04	48.21	605	50.17	1417	49.88
650	1500	47.01	50.35	48.48	641	50.14	1560	49.84

4.1.3. Mikro EŞH'ler için Sunulan Sentez Formülleri

Mikro EŞH'lar ilk olarak 1987 yılında Yamashita [70] tarafından literatüre sunulmuştur. Mikro EŞH'ların analizi değişik metotlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunlar; dikdörtgen sınır bölme metodu (DSBM) [70], zaman domeninde sonlu farklar metodu [71] ve KDT'dir [72, 73]. Mikro EŞH'ların geometrik boyutlarının hesaplanması için birkaç sentez formülü de literatürde sunulmuştur [70, 74]. Fakat bu sentez formülleri [70, 74] mikro EŞH tasarımında çok kısıtlı bir alanda geçerlidir. Ayrıca bu sentez formülleri ile karakteristik empedansı 50Ω 'dan farklı mikro EŞH'ların tasarlanması mümkün değildir. Bu nedenle bu çalışmada mikro EŞH'ların tasarımında çok geniş bir kullanım alanına sahip sentez formülleri DE, SA, GA ve PSO algoritmaları kullanılarak elde edilmiştir.

Şekil 3.6'da kesit görünümü verilen mikro EŞH yapısında iletken desteğin üzerindeki dielektrik taban malzemesinin kalınlığı h , bağlı dielektrik sabiti ϵ_r 'dir. Dielektrik taban üzerine yerleştirilen iletken şeridin genişliği w , iletken şerit ile toprak düzlemi arasındaki yarık genişliği s 'dir.

Bu çalışmada mikro EŞH'ların geometrik boyutlarının hesaplanması için sentez formülleri oluşturulurken, KDT [72] sonuçlarından elde edilen 2254 veri seti kullanılmıştır. Veri seti oluşturulurken kullanılan tasarım parametreleri: $2 \leq \epsilon_r \leq 21$, $0.05 \leq s/h \leq 1$, $0.1 \leq w/h \leq 1$, $50 \mu\text{m} \leq h \leq 3000 \mu\text{m}$. Bunlara karşılık gelen karakteristik empedans değerleri ise $25 \Omega \leq Z_0 \leq 212 \Omega$ arasındadır.

Arzu edilen karakteristik empedansa sahip mikro EŞH'nın tasarımı için ilk adım uygun dielektrik tabanın seçilmesidir (ϵ_r, h). Uygun dielektrik taban seçildikten sonra yarık ve şerit genişlikleri hesaplanabilir. Bu çalışmada yarık ve şerit genişliklerinin hesaplanması için iki sentez formülü sunulmuştur. Birinci sentez formülü ile, dielektrik taban malzemesi (ϵ_r, h) seçildikten sonra, verilen bir şerit genişliğine (w) karşılık arzu edilen karakteristik empedansa (Z_0) sahip iletim hattı tasarımı için gerekli olan yarık genişliği (s) hesaplanmaktadır. İkinci sentez formülü ile de, dielektrik taban malzemesi (ϵ_r, h) seçildikten sonra, verilen bir yarık genişliğine (s) karşılık arzu edilen karakteristik empedansa (Z_0) sahip iletim hattı tasarımı için gerekli olan şerit genişliği (w) hesaplanmaktadır.

Mikro EŞH'nın geometrik boyutları için geçerli sentez modellerini bulmak amacıyla bir çok deneme yapılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda, yarık ve şerit genişliklerinin hesaplanması için hata oranları düşük aşağıdaki sentez modelleri elde edilmiştir.

$$s = \frac{h}{\alpha_1 \cdot x^{\alpha_2} \cdot y^{\alpha_3} \cdot \left(\frac{w}{h}\right)^{\alpha_4} + \alpha_5 \cdot x^{\alpha_6} \cdot y^{\alpha_7} + \alpha_8 \cdot \left(x + \frac{w}{h}\right)^{\alpha_9} + \alpha_{10} \cdot x + \alpha_{11} \cdot y + \alpha_{12}} \quad (4.11)$$

ve

$$w = \frac{h}{\alpha_1 \cdot x^{\alpha_2} \cdot y^{\alpha_3} \cdot \left(\frac{s}{h}\right)^{\alpha_4} + \alpha_5 \cdot x^{\alpha_6} \cdot y^{\alpha_7} + \alpha_8 \cdot x + \alpha_9 \cdot y + \alpha_{10} \cdot \frac{s}{h} + \alpha_{11} \cdot x^2 + \alpha_{12}} \quad (4.12)$$

$$x = \frac{Z_0}{\eta_0} \quad \text{ve} \quad y = \frac{1}{\varepsilon_r + 1} \quad (4.13)$$

DE, SA, GA ve PSO algoritmaları kullanılarak optimum bir şekilde bulunan katsayı değerleri ($\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{12}$) sırasıyla Tablo 4.11 - Tablo 4.14'te verilmiş olup, bu katsayı değerleri (4.11) ve (4.12) eşitliklerinde yerine konularak sentez formülleri elde edilir. DE'nin optimizasyon sürecinde popülasyon büyüklüğü 30, ölçeklendirme faktörü 0.85 ve çaprazlama oranı 0.75 olarak alınmıştır. SA optimizasyonunda Boltzmann sabiti 1, soğutma katsayısı 0.98 olarak tercih edilmiştir. GA'nın optimizasyon sürecinde popülasyon büyüklüğü 30, mutasyon oranı 0.01 ve çaprazlama oranı 0.8 olarak alınmıştır. PSO optimizasyonunda popülasyon büyüklüğü 30, atalet ağırlık katsayısı 2, c_1 ve c_2 katsayıları 2.05 olarak alınmıştır.

Tablo 4.11. DE algoritması kullanılarak elde edilen sentez formülü katsayıları.

		α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}	α_{11}	α_{12}
Birinci Sentez Formülü (s)	$0.1 \leq w/h < 0.3$	0.119	-4.408	2.199	-1.185	-1.411	1.340	-0.819	-5.203	0.564	1.967	2.412	2.7572
	$0.3 \leq w/h < 0.5$	0.068	-4.945	2.498	-1.391	-1.408	3.795	-2.139	-14.814	0.156	1.468	2.652	12.4337
	$0.5 \leq w/h < 0.7$	0.013	-6.243	3.150	-1.962	-7.825	1.088	-0.550	-9.398	0.385	3.527	2.671	11.3402
	$0.7 \leq w/h < 1.0$	0.004	-7.286	3.702	-2.524	-10.832	1.070	-0.540	-10.648	0.379	1.889	3.947	14.6537
İkinci Sentez Formülü (w)	$0.05 \leq s/h < 0.3$	5.829	4.844	-2.440	-0.988	3.038	1.199	-0.624	1.096	-0.402	-0.343	-2.556	-0.2099
	$0.3 \leq s/h < 0.6$	8.427	3.398	-1.714	-0.513	4.150	9.716	-4.944	0.421	-0.139	0.242	-2.733	0.2640
	$0.6 \leq s/h < 1.0$	8.868	4.781	-2.414	-0.562	3.234	1.306	-0.636	-0.250	0.086	-0.076	-2.844	-0.0868

Tablo 4.12. SA algoritması kullanılarak elde edilen sentez formülü katsayıları.

		α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}	α_{11}	α_{12}
Birinci Sentez Formülü (s)	$0.1 \leq w/h < 0.3$	0.116	-4.403	2.196	-1.198	-1.435	1.34	-0.816	-4.817	0.614	1.759	2.541	2.455
	$0.3 \leq w/h < 0.5$	0.067	-4.945	2.496	-1.404	-1.409	3.82	-2.146	-14.773	0.150	1.423	2.644	12.433
	$0.5 \leq w/h < 0.7$	0.013	-6.243	3.149	-1.969	-7.762	1.085	-0.549	-9.378	0.383	3.507	2.66	11.301
	$0.7 \leq w/h < 1.0$	0.004	-7.297	3.709	-2.516	-10.705	1.069	-0.540	-10.678	0.378	1.831	3.954	14.639
İkinci Sentez Formülü (w)	$0.05 \leq s/h < 0.3$	5.813	4.84	-2.437	-0.988	3.045	1.199	-0.626	1.072	-0.389	-0.353	-2.526	-0.212
	$0.3 \leq s/h < 0.6$	8.693	3.41	-1.712	-0.513	3.451	9.670	-4.967	0.328	-0.074	0.249	-3.007	0.281
	$0.6 \leq s/h < 1.0$	8.957	4.824	-2.427	-0.609	3.524	1.331	-0.637	-0.668	0.223	-0.064	-2.878	-0.097

Tablo 4.13. GA kullanılarak elde edilen sentez formülü katsayıları.

		α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}	α_{11}	α_{12}
Birinci Sentez Formülü (s)	$0.1 \leq w/h < 0.3$	0.118	-4.409	2.198	-1.186	-1.401	1.333	-0.821	-5.560	0.506	1.886	2.450	3.186
	$0.3 \leq w/h < 0.5$	0.069	-4.944	2.501	-1.377	-1.401	3.793	-2.134	-14.761	0.158	1.462	2.650	12.382
	$0.5 \leq w/h < 0.7$	0.013	-6.242	3.152	-1.972	-7.827	1.087	-0.549	-9.404	0.384	3.560	2.655	11.345
	$0.7 \leq w/h < 1.0$	0.004	-7.290	3.701	-2.529	-10.567	1.069	-0.539	-10.480	0.378	1.887	3.917	14.358
İkinci Sentez Formülü (w)	$0.05 \leq s/h < 0.3$	5.795	4.843	-2.439	-0.988	3.044	1.200	-0.625	1.081	-0.387	-0.348	-2.579	-0.215
	$0.3 \leq s/h < 0.6$	7.828	3.370	-1.717	-0.501	4.973	9.708	-4.933	0.786	-0.297	0.206	-2.571	0.254
	$0.6 \leq s/h < 1.0$	9.360	4.780	-2.413	-0.511	3.210	1.302	-0.640	-0.213	0.083	-0.104	-2.745	-0.080

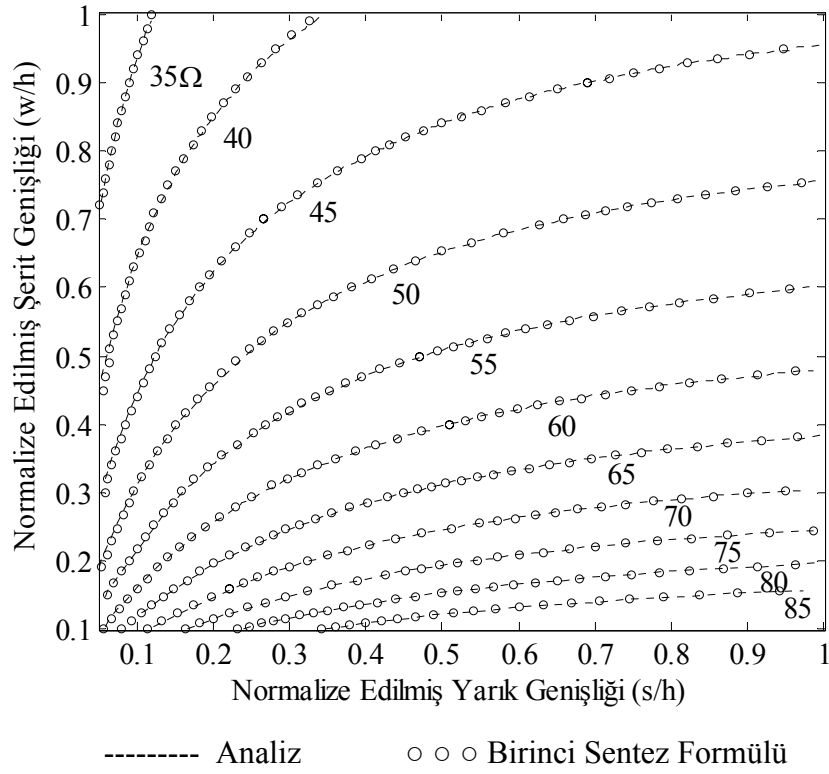
Tablo 4.14. PSO algoritması kullanılarak elde edilen sentez formülü katsayıları.

		α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}	α_{11}	α_{12}
Birinci Sentez Formülü (s)	$0.1 \leq w/h < 0.3$	0.117	-4.400	2.197	-1.196	-1.531	1.341	-0.815	-5.171	0.615	1.918	2.573	2.724
	$0.3 \leq w/h < 0.5$	0.067	-4.947	2.497	-1.405	-1.437	3.817	-2.151	14.764	0.152	1.427	2.613	12.425
	$0.5 \leq w/h < 0.7$	0.013	-6.238	3.146	-1.964	-7.861	1.085	-0.550	-9.375	0.384	3.737	2.486	11.337
	$0.7 \leq w/h < 1.0$	0.004	-7.284	3.710	-2.520	-10.781	1.070	-0.540	-10.608	0.378	1.688	3.947	14.653
İkinci Sentez Formülü (w)	$0.05 \leq s/h < 0.3$	5.817	4.841	-2.438	-0.987	3.102	1.198	-0.625	0.688	-0.207	-0.352	-2.368	-0.210
	$0.3 \leq s/h < 0.6$	8.650	3.411	-1.714	-0.512	3.143	9.668	-4.965	0.503	-0.210	0.235	-2.842	0.269
	$0.6 \leq s/h < 1.0$	8.654	4.821	-2.449	-0.590	3.268	1.312	-0.637	-0.455	0.232	-0.057	-2.816	-0.088

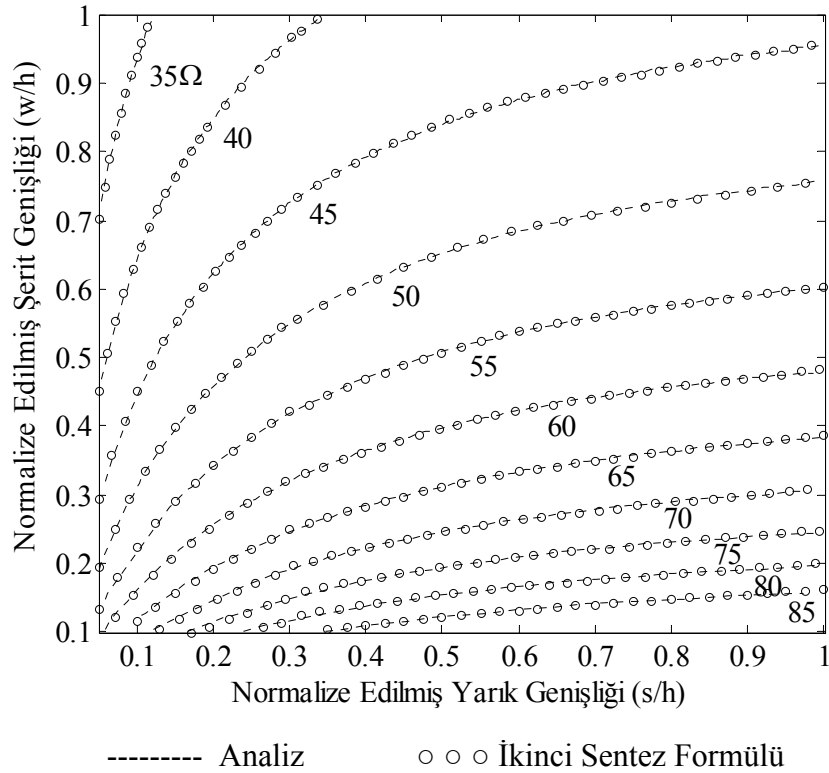
DE, SA, GA ve PSO algoritmaları kullanılarak elde edilen sentez formüllerinin quasi-statik analiz [72] sonuçları ile karşılaştırıldığında ortalama yüzde hataları sırasıyla % 0.9, % 1.02, % 1.27 ve % 1.79'dur. Ortalama yüzde hata değerlerinden görüldüğü gibi en iyi sonuçlar DE algoritması kullanılarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, diğer algoritmalarından elde edilen sentez formüllerinin de pratikte kullanılabilir bir doğruluğa sahip olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada, DE algoritması kullanılarak elde edilen sentez formüllerinin sonuçları literatürdeki sonuçlarla [70, 72], tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılarak sentez formüllerinin doğruluğu ve geçerliliği gösterilmiştir. Şekil 4.7'de $\epsilon_r = 12.9$ ve $h = 200 \mu\text{m}$ olan mikro EŞH'nin arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için birinci sentez formülünden elde edilen yarık genişliği $s(\epsilon_r, Z_0, w/h)$ sonuçları quasi-statik analiz [72] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.8'de ise aynı iletim hattının arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için ikinci sentez formülünden elde edilen şerit genişliği $w(\epsilon_r, Z_0, s/h)$ sonuçları quasi-statik analiz sonuçları [72] ile karşılaştırılmıştır. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçların quasi-statik analiz [72] sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisinde olduğu Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'den açıkça görülmektedir.

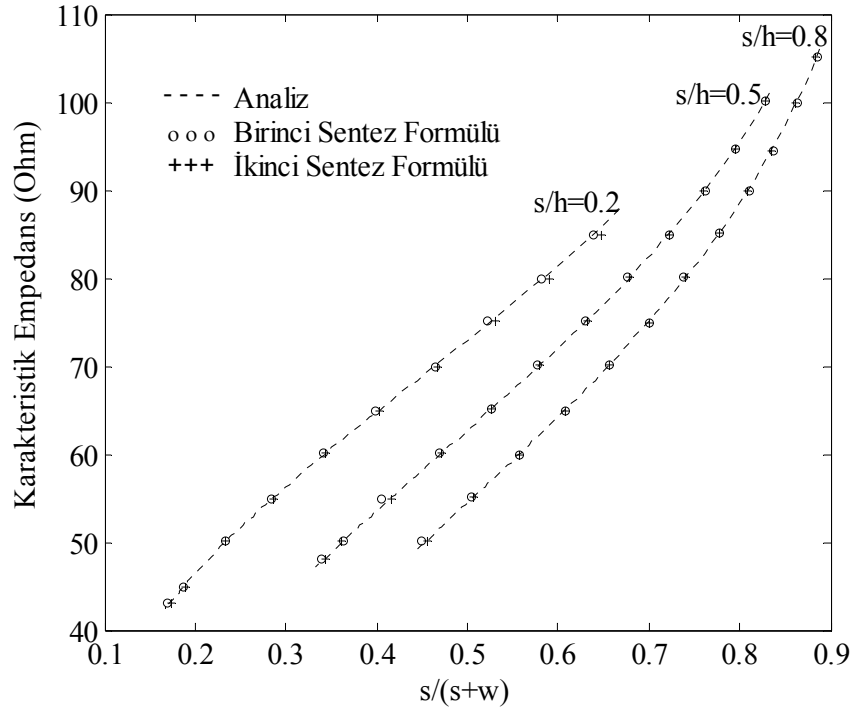
DE algoritmasıyla oluşturulan sentez formüllerinin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerleri quasi-statik analiz [72] sonuçları ile farklı s/h değerleri için Şekil 4.9'da karşılaştırılmıştır. Şekil 4.9'daki sonuçlar $\epsilon_r = 9.9$ ve $h = 1000 \mu\text{m}$ olan mikro EŞH'lar için elde edilmiştir. Şekil 4.9'dan açıkça görüldüğü gibi sentez formüllerinden elde edilen sonuçlar quasi-statik analiz sonuçları ile çok iyi bir uyum içersindedir. Ayrıca bu şekilde birinci ve ikinci sentez formüllerinin kendileri arasında da iyi bir uyum olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7. Birinci sentez formülünden elde edilen yarık genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [72] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 12.9$, $h = 200 \mu\text{m}$).



Şekil 4.8. İkinci sentez formülünden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [72] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 12.9$, $h = 200 \mu\text{m}$).



Şekil 4.9. Sentez formüllerinin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz [72] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 9.9$, $h = 1000 \mu\text{m}$).

Sentez formüllerinin geçerliliğini ortaya koymak için dört farklı mikro EŞH yapısı ($\epsilon_r = 10.2$ ve $h = 1270 \mu\text{m}$) deneysel olarak tasarlanmıştır. Deneysel olarak tasarlanan mikro EŞH'lerden biri Şekil 3.7'de yer almaktadır. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçlar literatürdeki KDT [72] sonuçlarıyla ve tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarıyla Tablo 4.15'te karşılaştırılmıştır. Tablo 4.16'da ise sentez formüllerinden elde edilen sonuçlar literatürdeki KDT [72], DSBM [70] ve ölçüm [70] sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu tablolarda s' , w' ve Z_0' deneysel sonuçları; $Z_0(s', w')$: s' ve w' değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(s, w')$: verilen w' ve birinci sentez formülünden elde edilen s değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(s', w)$ ise verilen s' ve ikinci sentez formülünden elde edilen w değerleri kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerini temsil etmektedir. Tablolardan görüldüğü gibi sentez formüllerinden elde edilen geometrik boyutlar (s ve w), deneysel çalışmada kullanılan geometrik boyutlar (s' ve w') ile uyum içerisinde. Buna bağlı olarak sentez formüllerinin sonuçları kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerleri literatürdeki sonuçlarla ve ölçüm sonuçlarıyla çok iyi bir uyum içerisinde.

Tablo 4.15. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçların KDT, IE3D ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 10.2$, $h = 1270 \mu\text{m}$, $f = 1.75 \text{ GHz}$).

Deneyisel			KDT [72]	IE3D [141]	Birinci Sentez Formülü		İkinci Sentez Formülü	
s' (μm)	w' (μm)	Z_0' (Ω)	$Z_0(s', w')$ (Ω)	$Z_0(s', w')$ (Ω)	s (μm)	$Z_0(s, w')$ (Ω)	w (μm)	$Z_0(s', w)$ (Ω)
475	1000	46.78	50.03	49.14	471	49.98	1002	49.99
550	1050	47.02	49.87	49.44	563	49.99	1045	49.97
700	1100	46.62	50.14	50.53	681	50.00	1109	49.97
850	1150	47.09	50.06	51.10	839	50.00	1151	50.04

Tablo 4.16. Sentez formüllerden elde edilen sonuçların DSBM [70], KDT [72] ve ölçüm [70] sonuçlarıyla karşılaştırılması ($\epsilon_r = 10.1$, $h = 400 \mu\text{m}$).

Deneyisel [70]			DSBM [70]	KDT [72]	Birinci Sentez Formülü		İkinci Sentez Formülü	
s' (μm)	w' (μm)	Z_0' (Ω)	$Z_0(s', w')$ (Ω)	$Z_0(s', w')$ (Ω)	s (μm)	$Z_0(s, w')$ (Ω)	w (μm)	$Z_0(s', w)$ (Ω)
296	375	48.28	47.52	49.90	295.21	49.90	374.12	49.97
95	374	43.05	42.26	44.17	93.73	44.09	372.73	44.23
46	374	40.06	38.25	40.06	45.81	40.03	374.88	40.02

Sonuç olarak bu çalışmada mikro EŞH'ların geometrik boyutlarının hesaplanması için DE, SA, GA ve PSO algoritmaları kullanılarak sentez formülleri elde edilmiştir. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçların KDT, DSBM, IE3D ve ölçüm sonuçlarıyla iyi bir uyum içerisinde olması sunulan sentez formüllerinin mikro EŞH'ların geometrik boyutlarının hesaplanmasında kullanılabileceğini açıkça göstermektedir [144].

4.1.4. Sonsuz Uzun Toprak Düzlemine Sahip Eşdüzlemli Şerit Hatlar için Sunulan Sentez Formülleri

Asimetrik EŞH'lardan sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH'lar 1997 yılında Svacina [75] tarafından literatüre sunulmuş ve analizi gerçekleştirilmiştir. Sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH'ların karakteristik parametreleri için kapalı-form ifadeler KDT kullanılarak elde edilmiştir [75]. Sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH'ların

geometrik boyutlarının hesaplanması için literatürde henüz sentez formülü mevcut değildir. Bu nedenle tez çalışması kapsamında bu iletim hatlarının tasarımında çok geniş bir kullanım alanına sahip sentez formülleri DE, PSO, SA ve GA kullanılarak elde edilmiştir.

Şekil 3.8’de kesit görünümü verilen sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH’nın dielektrik taban malzemesinin kalınlığı h , bağıl dielektrik sabiti ϵ_r ’dir. Dielektrik taban üzerine yerleştirilen iletken şeridin genişliği w , iletken şerit ile toprak düzlemi arasındaki yarık genişliği s ’dir.

Bu çalışmada sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH’nın geometrik boyutlarının hesaplanması için sentez formülleri oluşturulurken KDT [75] sonuçlarından elde edilen 4913 veri seti kullanılmıştır. Veri seti oluşturulurken kullanılan tasarım parametreleri: $2 \leq \epsilon_r \leq 50$, $0.1 \leq s/h \leq 0.9$, $0.1 \leq w/h \leq 0.9$, $20 \mu\text{m} \leq h \leq 2000 \mu\text{m}$. Bunlara karşılık gelen karakteristik empedans değerleri ise $25 \Omega \leq Z_0 \leq 250 \Omega$ arasındadır.

Arzu edilen karakteristik empedansa sahip sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH’nın tasarımı için ilk adım uygun dielektrik tabanın seçilmesidir (ϵ_r , h). Uygun dielektrik taban seçildikten sonra yarık ve şerit genişlikleri hesaplanabilir. Bu çalışmada yarık ve şerit genişliklerinin hesaplanması için iki sentez formülü sunulmuştur. Birinci sentez formülü ile, dielektrik taban malzemesi (ϵ_r , h) seçildikten sonra, verilen bir şerit genişliğine (w) karşılık arzu edilen karakteristik empedansa (Z_0) sahip iletim hattı tasarımı için gerekli olan yarık genişliği (s) hesaplanmaktadır. İkinci sentez formülü ile de, dielektrik taban malzemesi (ϵ_r , h) seçildikten sonra, verilen bir yarık genişliğine (s) karşılık arzu edilen karakteristik empedansa (Z_0) sahip iletim hattı tasarımı için gerekli olan şerit genişliği (w) hesaplanmaktadır.

Sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH’nın geometrik boyutları için geçerli sentez modellerini bulmak amacıyla bir çok deneme yapılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda, yarık ve şerit genişliklerinin hesaplanması için hata oranları düşük aşağıdaki sentez modelleri elde edilmiştir.

$$s = \frac{h \cdot \left(\alpha_1 \cdot x^{\alpha_2} \cdot y^{\alpha_3} \cdot \left(\frac{w}{h} \right)^{\alpha_4} + \alpha_5 \cdot x \cdot y + \alpha_6 \cdot x + \alpha_7 \cdot y + \alpha_8 \cdot \left(\frac{w}{h} \right) + \alpha_9 \cdot x^2 + \alpha_{10} \cdot y^2 + \alpha_{11} \cdot \left(\frac{w}{h} \right)^2 + \alpha_{12} \right)}{\left(1 + \alpha_{13} \cdot x^{\alpha_{14}} \cdot y^{\alpha_{15}} \cdot \left(\frac{w}{h} \right)^{\alpha_{16}} + \alpha_{17} \cdot x + \alpha_{18} \cdot y + \alpha_{19} \cdot \left(\frac{w}{h} \right) + \alpha_{20} \cdot x^2 + \alpha_{21} \cdot y^2 + \alpha_{22} \cdot \left(\frac{w}{h} \right)^2 \right)} \quad (4.14)$$

ve

$$w = \frac{h \cdot \left(\alpha_1 \cdot x^{\alpha_2} \cdot y^{\alpha_3} \cdot \left(\frac{s}{h} \right)^{\alpha_4} + \alpha_5 \cdot x \cdot y + \alpha_6 \cdot x \cdot \left(\frac{s}{h} \right) + \alpha_7 \cdot x + \alpha_8 \cdot y + \alpha_9 \cdot \left(\frac{s}{h} \right) + \alpha_{10} \cdot x^2 + \alpha_{11} \cdot y^2 + \alpha_{12} \cdot \left(\frac{s}{h} \right)^2 + \alpha_{13} \right)}{\left(1 + \alpha_{14} \cdot x^{\alpha_{15}} \cdot y^{\alpha_{16}} \cdot \left(\frac{s}{h} \right)^{\alpha_{17}} + \alpha_{18} \cdot x + \alpha_{19} \cdot y + \alpha_{20} \cdot \left(\frac{s}{h} \right) + \alpha_{21} \cdot x^2 + \alpha_{22} \cdot y^2 + \alpha_{23} \cdot \left(\frac{s}{h} \right)^2 \right)} \quad (4.15)$$

$$x = \frac{Z_0}{\eta_0} \quad \text{ve} \quad y = \frac{1}{\varepsilon_r} \quad (4.16)$$

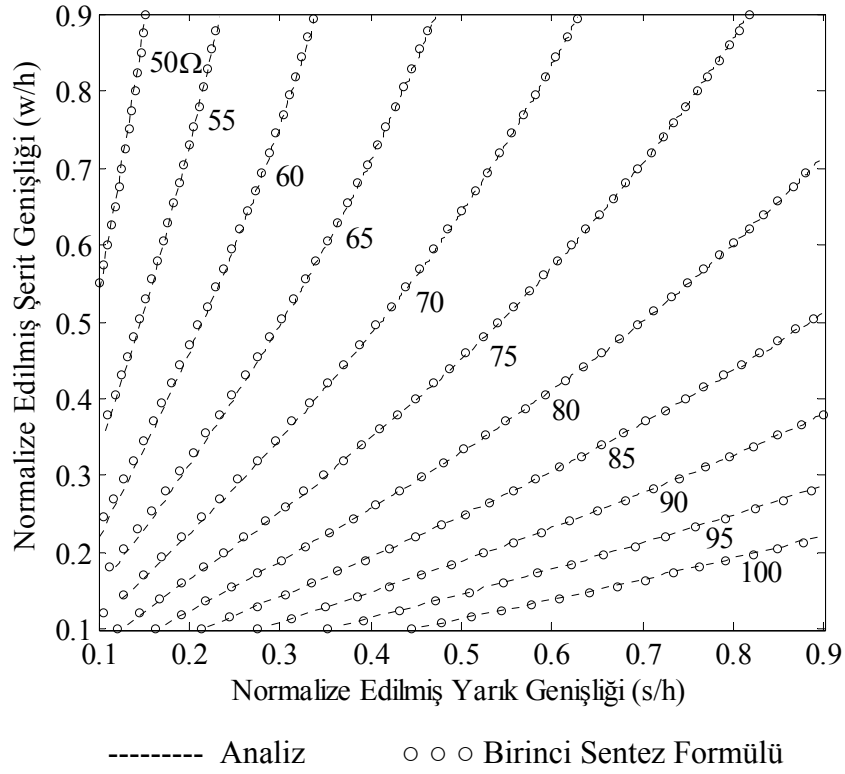
DE, PSO, SA ve GA kullanılarak optimum bir şekilde bulunan katsayı değerleri ($\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{23}$) Tablo 4.17’de verilmiş olup, bu katsayı değerleri (4.14) ve (4.15) eşitliklerinde yerine konularak sentez formülleri elde edilir. DE’nin optimizasyon sürecinde popülasyon büyüklüğü 30, ölçeklendirme faktörü 0.8 ve çaprazlama oranı 0.8 olarak alınmıştır. PSO optimizasyonunda popülasyon büyüklüğü 40, atalet ağırlık katsayısı 0.5, hızlandırma (ivme) katsayıları 2.05 olarak alınmıştır. SA optimizasyonunda Boltzmann sabiti 1, soğutma katsayısı 0.99 olarak alınmıştır. GA’nın optimizasyon sürecinde popülasyon büyüklüğü 30, mutasyon oranı 0.05 ve çaprazlama oranı 0.85 olarak alınmıştır.

DE, PSO, SA ve GA kullanılarak elde edilen sentez formülleri quasi-statik analiz [75] sonuçları ile karşılaştırıldığında ortalama yüzde hataları sırasıyla % 0.85, % 1.62, % 1.65 ve % 1.80’dir. Ortalama yüzde hata değerlerinden görüldüğü gibi en iyi sonuçlar DE algoritması kullanılarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, diğer algoritmalarından elde edilen sentez formüllerinin de pratikte kullanılabilir bir doğruluğa sahip olduğu görülmüştür.

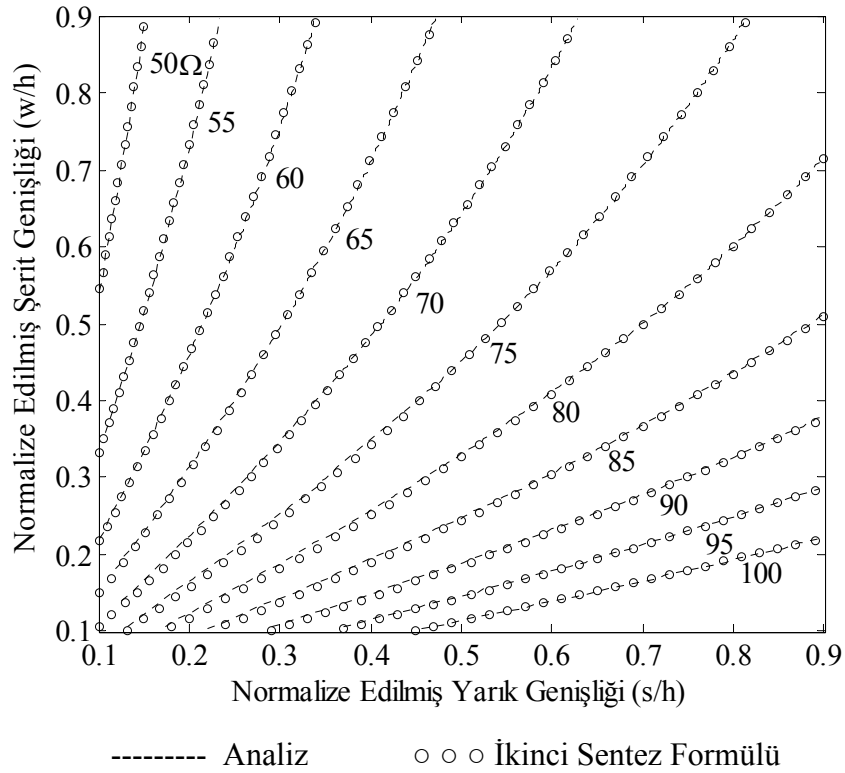
Tablo 4.17. DE, PSO, SA ve GA kullanılarak elde edilen sentez formülü katsayıları.

	Birinci Sentez Formülü (s)				İkinci Sentez Formülü (w)			
	DE	PSO	SA	GA	DE	PSO	SA	GA
α_1	29.91	0.022	0.02	27.01	-43.69	-6.017	1.025	-43.64
α_2	2.05	-1.20	-0.97	2.06	0.055	10.65	10.65	0.056
α_3	0.38	0.67	1.11	0.39	0.016	2.45	-6.23	0.015
α_4	0.79	0.441	0.97	0.73	0.97	45.19	45.15	0.97
α_5	10.24	1.66	1.54	3.38	-15.29	24.48	22.41	-15.09
α_6	3.28	12.92	12.81	2.31	8.45	0.02	0.5	8.38
α_7	15.2	10.00	10.77	16.82	-18.78	-21.18	-21.98	-19.08
α_8	1.78	-1.00	-0.88	1.80	9.69	10.23	11.14	10.50
α_9	-11.69	2.92	2.39	-9.14	28.84	-6.4	-6.26	28.81
α_{10}	-3.03	21.75	21.00	-2.90	27.51	9.36	10.87	27.54
α_{11}	-1.82	0.419	0.24	-1.87	-0.48	-18.07	-18.59	-2.08
α_{12}	2.37	2.81	2.73	2.44	2	1.77	1.57	2.01
α_{13}	0.9	2.245	2.24	0.88	-1	-0.92	-0.88	-0.90
α_{14}	-4.76	-4.20	-4.2	-4.78	-86.12	-84.62	-83.57	-86.60
α_{15}	2.5	2.34	2.35	2.50	4.74	4.94	4.93	4.72
α_{16}	-1	-0.996	-1.0	-1.001	-2.16	-2.26	-2.26	-2.15
α_{17}	-5.62	-2.12	-2.5	-5.63	-0.72	-0.76	-0.76	-0.71
α_{18}	25.05	10.56	11.5	25.44	14.83	7.21	8.54	14.78
α_{19}	1.89	0.16	0.55	1.85	-0.93	0.62	0.46	-0.09
α_{20}	-9.91	-0.92	-0.70	-9.61	-0.85	-0.12	-0.20	-0.86
α_{21}	-19.33	-13.97	-14.52	-22.53	-71.95	-34.29	-37.80	-72.22
α_{22}	-1.61	0.26	-0.19	-1.61	4.39	-3.53	-3.43	2.71
α_{23}	---	---	---	---	3.18	1.76	1.87	3.27

Bu çalışmada, DE algoritması kullanılarak elde edilen sentez formüllerinin sonuçları literatürdeki sonuçlarla ve tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak sentez formüllerinin doğruluğu ve geçerliliği gösterilmiştir. Şekil 4.10'da $\epsilon_r = 12.9$ ve $h = 400 \mu\text{m}$ olan sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH'nın arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için birinci sentez formülünden elde edilen yarık genişliği $s(\epsilon_r, Z_0, w/h)$ sonuçları quasi-statik analiz [75] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.11'de ise aynı iletim hattının arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için ikinci sentez formülünden elde edilen şerit genişliği $w(\epsilon_r, Z_0, s/h)$ sonuçları quasi-statik analiz [75] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçların quasi-statik analiz [75] sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisinde olduğu Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'den açıkça görülmektedir.



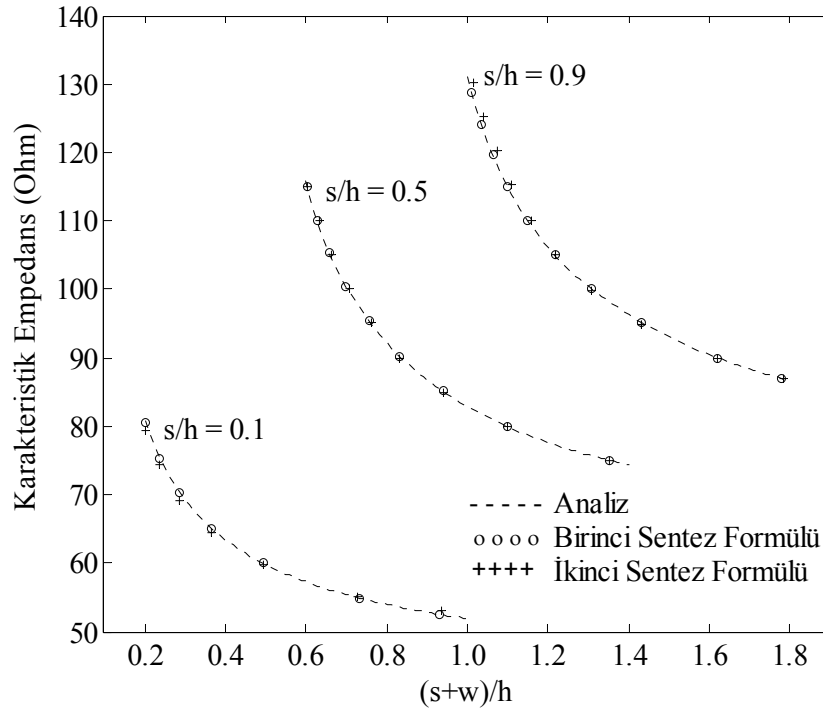
Şekil 4.10. Birinci sentez formülünden elde edilen yarık genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [75] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 12.9$, $h = 400 \mu\text{m}$).



Şekil 4.11. İkinci sentez formülünden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [75] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 12.9$, $h = 400 \mu\text{m}$).

DE algoritmasıyla oluşturulan sentez formüllerinin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerleri quasi-statik analiz [75] sonuçları ile farklı s/h değerleri için Şekil 4.12’de karşılaştırılmıştır. Şekil 4.12’deki sonuçlar $\epsilon_r = 9.9$ ve $h = 635 \mu\text{m}$ olan sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH’lar için elde edilmiştir. Şekil 4.12’den açıkça görüldüğü gibi sentez formüllerinden elde edilen sonuçlar quasi-statik analiz sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisindedir. Ayrıca bu şekilde birinci ve ikinci sentez formüllerinin kendileri arasında da iyi bir uyum olduğu görülmektedir.

Sentez formüllerinin geçerliliğini ortaya koymak için üç farklı sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH yapısı ($\epsilon_r = 10.2$ ve $h = 1270 \mu\text{m}$) deneysel olarak tasarlanmıştır. Deneysel olarak tasarlanan sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH’lardan biri Şekil 3.9’da yer almaktadır. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçlar literatürdeki KDT [75] sonuçlarıyla ve tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarıyla Tablo 4.18’de karşılaştırılmıştır. Bu tabloda s' , w' ve Z_0' deneysel sonuçları; $Z_0(s', w')$: s' ve w' değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(s, w')$: verilen w' ve birinci sentez formülünden elde edilen s



Şekil 4.12. Sentez formüllerinin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz [75] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 9.9$, $h = 635 \mu\text{m}$).

Tablo 4.18. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçların KDT, IE3D ve ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 10.2$, $h = 1270 \mu\text{m}$, $f = 1.75 \text{ GHz}$).

Deneyssel			KDT [75]	IE3D [141]	Birinci Sentez Formülü		İkinci Sentez Formülü	
s' (μm)	w' (μm)	Z_0' (Ω)	$Z_0(s', w')$ (Ω)	$Z_0(s', w')$ (Ω)	s (μm)	$Z_0(s, w')$ (Ω)	w (μm)	$Z_0(s', w)$ (Ω)
175	2500	47.87	50.01	53.81	61	41.42	2117	50.65
150	1750	47.93	50.07	52.08	139	49.36	1678	50.30
125	1300	47.50	50.11	52.71	129	50.45	1302	50.10

değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(s', w)$ ise verilen s' ve ikinci sentez formülünden elde edilen w değerleri kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerini göstermektedir. Tablo 4.18'den görüldüğü gibi sentez formüllerinden elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla ve ölçüm sonuçlarıyla genelde uyum içerisindedir.

Sonuç olarak bu çalışmada sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH'ların geometrik boyutlarının hesaplanması için DE, PSO, SA ve GA kullanılarak sentez formülleri elde edilmiştir. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçların quasi-statik analiz [75] sonuçlarıyla çok iyi bir uyum içerisinde olması sunulan sentez formüllerinin sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH'nın geometrik boyutlarının hesaplanmasında kullanılabileceğini açıkça göstermektedir [145].

5. BÖLÜM

MİKRODALGA İLETİM HATLARININ SENTEZİ İÇİN SUNULAN BSA MODELLERİ

5.1. Giriş

Literatürde MİH'lerin karakteristik parametrelerini farklı analiz yöntemleri kullanarak belirleyen çok sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen, arzu edilen karakteristik empedansa sahip olması istenen MİH'in geometrik boyutlarının belirlenmesi amacıyla yapılan sentez çalışmaları sınırlı sayıdadır. Bu tez çalışmasında, MİH'lerden asimetrik EDK'ların, DTDEDK'ların, mikro EŞH'ların ve sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH'ların geometrik boyutlarının hesaplanması için bulanık sinir ağı (BSA) tabanlı sentez modelleri oluşturulmuştur.

Bu bölümde ilk olarak asimetrik EDK'ların geometrik boyutlarının belirlenmesi için oluşturulan BSA modelleri, daha sonrada sırasıyla DTDEDK'ların, mikro EŞH'ların ve sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH'ların geometrik boyutlarının belirlenmesi için sunulan BSA modelleri sunulacaktır. Sunulan BSA modellerinin giriş ve çıkış parametreleri Tablo 5.1'de verilmiştir. Bu çalışmada her bir iletim hattı için iki adet BSA modeli sunulmuştur. BSA modellerindeki herbir giriş değişkeni için tanımlanan üyelik fonksiyonu tipleri ve sayıları, oluşan kural ve parametre sayıları Tablo 5.2'de verilmiştir. Ayrıca bu tabloda BSA modellerin oluşturulması sırasında kullanılan eğitim ve test veri setlerinin sayıları da verilmiştir.

MİH'lerin geometrik boyutlarının hesaplanması için oluşturulan BSA modellerinin parametreleri HL (Hybrid Learning) [116, 117], LSQ (Least-Squares) [118, 119], GA (Genetic Algorithm) [95, 96] ve SA (Simulated Annealing) [98] algoritmaları ile optimum bir şekilde belirlenmiştir. Farklı optimizasyon algoritmaları ile eğitilen BSA modellerinin hataları birbirleri ile karşılaştırılmış ve hata oranı en düşük model elde

edilmiştir. BSA modellerinden elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla, bu tez çalışması kapsamında sunulan sentez formüllerinin sonuçlarıyla, gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

MİH'lerin sentezi için BSA tabanlı modellerin oluşturulmasında dikkat edilecek en önemli husus, modellerin giriş sayısının artmasıyla model yapılarının kompleks bir hale gelmesidir. Giriş sayılarının artması, BSA tabanlı modellerde optimize edilecek parametre sayısını artırmaktadır. Böyle bir durumda işlem süresi uzamakta ancak hata oranı düşmemektedir. Bu nedenle BSA tabanlı modeller oluşturulurken ilk olarak ele alınacak problemin hangi değişkenlere bağlı olduğu tespit edilmiştir. Girişler bu değişkenlerin birbirlerine oranı şeklinde tanımlanarak giriş sayısı azaltılmıştır.

Tablo 5.1. MİH'lerin geometrik boyutlarının belirlenmesi için sunulan BSA modelleri.

Model	Mikrodalga İletim Hattı	Girişler	Çıkış
Model#1	Asimetrik EDK	$\epsilon_r, Z_0, s_2/h, s_1/h$	w
		$\epsilon_r, Z_0, s_2/h, w/h$	s_1
Model#2	DTDEDK	$\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, Z_0, s/h$	w
		$\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, Z_0, w/h$	s
Model#3	Mikro EŞH	$\epsilon_r, Z_0, w/h$	s
		$\epsilon_r, Z_0, s/h$	w
Model#4	Sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH	$\epsilon_r, Z_0, w/h$	s
		$\epsilon_r, Z_0, s/h$	w

Tablo 5.2. BSA modellerinin üyelik fonksiyonu tipleri ve sayıları, kural, parametre ve veri sayıları (ÜFT: Üyelik fonksiyonu tipi; ÜFS: Üyelik fonksiyonu sayısı; KS: Kural sayısı; LPS: Lineer parametre sayısı; LOPS: Lineer olmayan parametre sayısı).

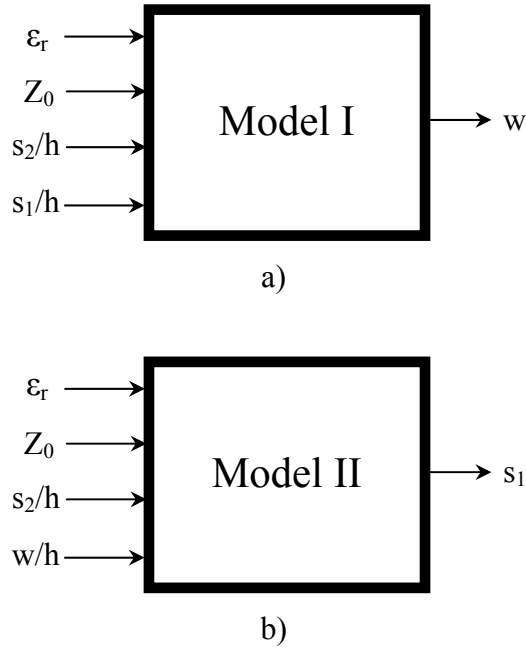
Model	ÜFT*	ÜFS	KS	LPS	LOPS	Eğitim ve test veri sayıları	
						Eğitim	Test
Model#1	Gbell	2×2×2×2	16	80	24	2079	846
Model#2	Gbell	2×2×2×2	16	80	24	2732	971
Model#3	Gaussian	3×3×3	27	18	108	6944	546
Model#4	Gbell	2×2×2	8	18	32	2340	1247

* Gbell: Genelleştirilmiş çan tipi üyeli fonksiyonu (Generalized bell), Gaussian: Gauss tipi üyelik fonksiyonu

5.1.1. Asimetrik Eşdüzlemli Dalga Kılavuzlarının Sentezi için Sunulan BSA Modelleri

Kesit görünümü Şekil 3.1’de verilen asimetrik EDK’ların geometrik boyutlarının hesaplanması amacı ile hata oranı çok düşük BSA modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan BSA modelleri Şekil 5.1’de verilmiştir. Şekil 5.1.a’da görüldüğü gibi birinci BSA modeli ile, dielektrik taban malzemesi seçildikten sonra, verilen yarık genişliklerine karşılık arzu edilen karakteristik empedansa sahip iletim hattı tasarımı için gerekli olan şerit genişliği hesaplanmaktadır. Şekil 5.1.b’de görüldüğü gibi ikinci BSA modeli ile de, dielektrik taban malzemesi seçildikten sonra, verilen bir şerit ve yarık genişliğine karşılık arzu edilen karakteristik empedansa sahip iletim hattı tasarımı için gerekli olan diğer yarık genişliği hesaplanmaktadır.

Asimetrik EDK’ların sentezi için oluşturulan BSA modellerinin eğitiminde KDT [53] sonuçlarından oluşan 2079 adet veri içeren bir set kullanılmıştır. Test işlemi için de eğitim setinden tamamen farklı olmak üzere literatürde mevcut sonuçlardan ve tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarından oluşan 846 adet veri içeren bir set kullanılmıştır. Veri setleri oluşturulurken kullanılan



Şekil 5.1. Asimetrik EDK’ların sentezi için oluşturulan BSA modelleri
a) Şerit genişliği için oluşturulan BSA modeli b) Yarık genişliği için oluşturulan BSA modeli.

tasarım parametreleri: $2 \leq \varepsilon_r \leq 21$, $0.1 \leq s_1/s_2 \leq 0.9$, $0.1 \leq s_2/h \leq 0.9$, $0.1 \leq w/h \leq 2$, $20 \mu\text{m} \leq h \leq 2000 \mu\text{m}$. Bunlara karşılık gelen karakteristik empedans değerleri $20 \Omega \leq Z_0 \leq 212 \Omega$ arasındadır.

BSA modelleri oluşturulurken giriş değişkenleri için 2'şer adet genelleştirilmiş çan tipi (Gbell) üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Böylelikle 16 ($2 \times 2 \times 2 \times 2$) kurala sahip BSA modelleri oluşturulmuştur. Eşitlik (2.9)'dan görüldüğü gibi genelleştirilmiş çan tipi üyelik fonksiyonunun 3 adet parametresi mevcuttur. Dolayısıyla BSA modellerinin lineer olmayan parametresi 24 ($2 \times 3 + 2 \times 3 + 2 \times 3 + 2 \times 3$)'tür. Lineer parametrelerin sayısı ise 80 (5×16)'dir. Böylece asimetrik EDK'ların sentezi için toplam parametre sayısı 104 ($24 + 80$) olan BSA modelleri oluşturulmuştur.

Oluşturulan BSA modellerinin parametreleri HL, LSQ, SA ve GA olmak üzere dört farklı optimizasyon algoritması ile belirlenmiştir. HL, LSQ, SA ve GA algoritmaları ile optimize edilen BSA modellerinin KDT [53]'ye göre ortalama yüzde hataları Tablo 5.3'te verilmiştir. Bu tablodan açıkça görülebileceği gibi en iyi sonuçlar eğitimi HL algoritması ile gerçekleştirilen BSA modellerinden elde edilmiştir.

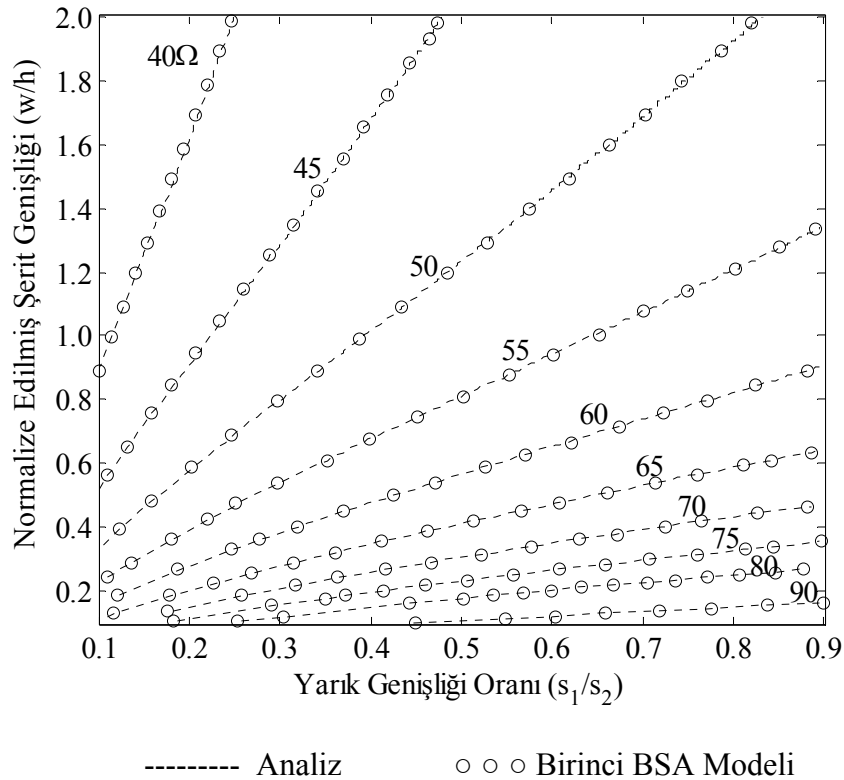
Bu çalışmada, HL algoritması ile eğitilen BSA modellerinden elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla, tez çalışması kapsamında sunulan sentez formüllerinin sonuçlarıyla ve gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak BSA modellerinin doğruluğu ve geçerliliği gösterilmiştir. Şekil 5.2'de $\varepsilon_r = 12.9$, $s_2/h = 0.9$ ve $h = 635 \mu\text{m}$ olan asimetrik EDK'nın arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için birinci BSA modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçları quasi-statik analiz [53] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.3'te ise aynı

Tablo 5.3. BSA modellerinin ortalama yüzde hataları.

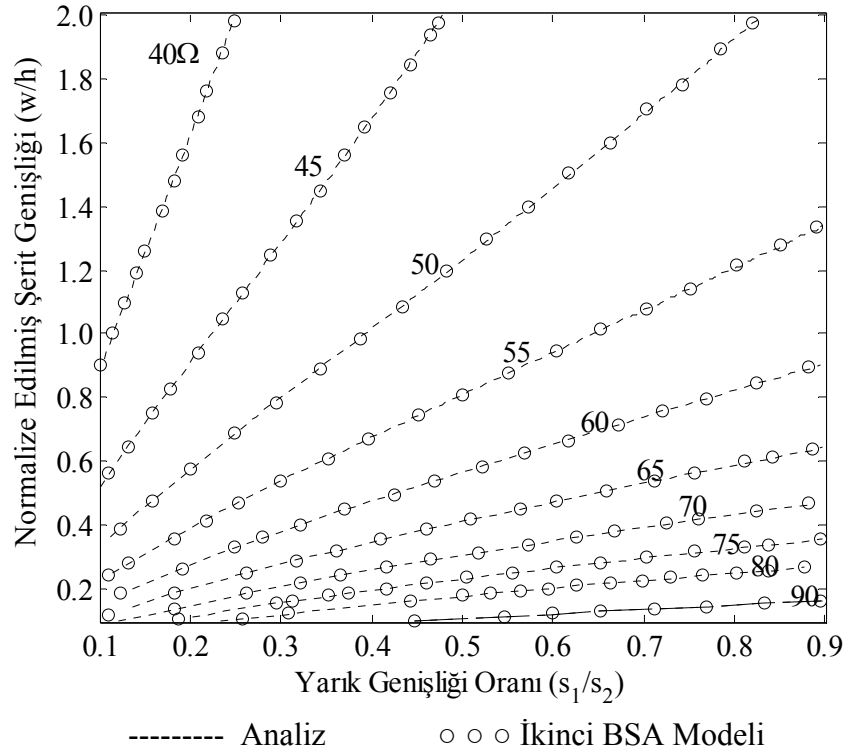
Optimizasyon Algoritmaları	Birinci BSA Modeli (w)		İkinci BSA Modeli (s_1)	
	Eğitim (%)	Test (%)	Eğitim (%)	Test (%)
HL	0.104	0.063	0.053	0.083
LSQ	1.602	1.262	5.208	6.730
SA	1.284	1.192	1.958	1.300
GA	4.075	2.417	3.044	2.756

iletim hattının arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için ikinci BSA modelinden elde edilen yarık genişliği sonuçları quasi-statik analiz [53] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. BSA modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlar ile çok iyi bir uyum içerisinde olduğu Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'ten açıkça görülmektedir.

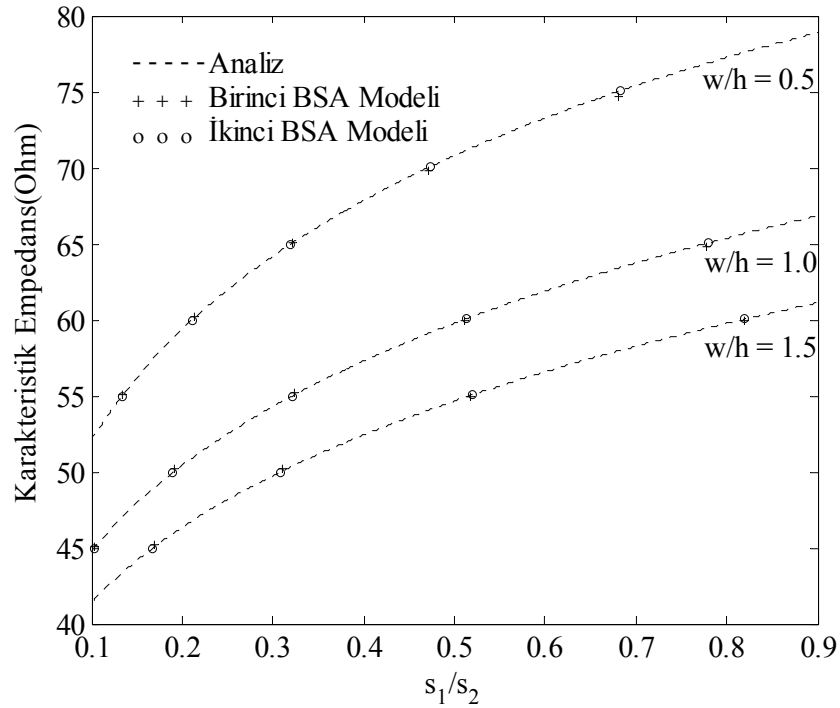
Birinci ve ikinci BSA modellerinden elde edilen sonuçların kullanılmasıyla hesaplanan karakteristik empedans değerleri quasi-statik analiz [53] sonuçları ile farklı w/h değerleri için Şekil 5.4'te karşılaştırılmıştır. Şekil 5.4'teki sonuçlar $\epsilon_r = 9.6$, $s_2/h = 0.9$ ve $h = 250 \mu\text{m}$ olan asimetrik EDK'lar için elde edilmiştir. Şekil 5.4'ten açıkça görüldüğü gibi BSA modellerinden elde edilen sonuçlar quasi-statik analiz sonuçları ile uyum içerisinde. Ayrıca bu şekilde birinci ve ikinci BSA modellerinin kendileri arasında da iyi bir uyum olduğu görülmektedir.



Şekil 5.2. Birinci BSA modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [53] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 12.9$, $s_2/h = 0.9$, $h = 635 \mu\text{m}$).



Şekil 5.3. İkinci BSA modelinden elde edilen yarık genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [53] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 12.9$, $s_2/h = 0.9$, $h = 635 \mu\text{m}$).



Şekil 5.4. BSA modellerinden elde edilen sonuçların kullanılmasıyla hesaplanan karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz [53] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 9.6$, $s_2/h = 0.9$, $h = 250 \mu\text{m}$).

BSA modellerinden elde edilen sonuçlar, literatürdeki sonuçlarla ve tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarıyla Tablo 5.4'te karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu tabloda, DE algoritması kullanılarak elde edilen sentez formüllerinin sonuçları karşılaştırma yapmak amacıyla verilmiştir. Tablo 5.4'te w' , s_1' , s_2' ve Z_0' deneysel sonuçları; $Z_0(w', s_1', s_2')$: w' , s_1' ve s_2' değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(w, s_1', s_2')$: verilen s_1' , s_2' ve birinci BSA modelinden elde edilen w değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(w', s_1, s_2')$ ise verilen w' , s_2' ve ikinci BSA modelinden elde edilen s_1 değerleri kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerini göstermektedir. Ayrıca bu tabloda $Z_0(w^*, s_1', s_2')$: verilen s_1' , s_2' ve sentez formüllerinden elde edilen w^* değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(w', s_1^*, s_2')$ ise verilen w' , s_2' ve sentez formülünden elde edilen s_1^* değerleri kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerini temsil etmektedir. Tablo 5.4'ten açıkça görüldüğü gibi BSA modellerinden elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla ve gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışmaların sonuçlarıyla iyi bir uyum içerisindedir.

Sonuç olarak bu çalışmada asimetrik EDK'ların geometrik boyutlarının hesaplanması için BSA tabanlı sentez modelleri oluşturulmuştur. HL algoritması ile eğitilen BSA modellerinin ortalama yüzde hatalarının sentez formüllerine göre oldukça küçük olduğu görülmüştür. BSA modellerinden elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla ve gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisindedir. Bu uyum, sunulan BSA modellerinin asimetrik EDK'ların geometrik boyutlarının hesaplanmasında kullanılabileceğini göstermektedir.

Tablo 5.4. BSA modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla, tez çalışması kapsamında sunulan sentez formüllerinin sonuçlarıyla ve gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılması ($\epsilon_r=10.2$, $h = 1270 \mu\text{m}$, $f = 2.5 \text{ GHz}$).

Deneysel				KDT [53]	IE3D [141]	Birinci Sentez Formülü		İkinci Sentez Formülü		Birinci BSA Modeli		İkinci BSA Modeli	
w' (μm)	s_1' (μm)	s_2' (μm)	Z_0' (Ω)	$Z_0(w', s_1', s_2')$ (Ω)	$Z_0(w', s_1', s_2')$ (Ω)	w^* (μm)	$Z_0(w^*, s_1', s_2')$ (Ω)	s_1^* (μm)	$Z_0(w', s_1^*, s_2')$ (Ω)	w (μm)	$Z_0(w, s_1', s_2')$ (Ω)	s_1 (μm)	$Z_0(w', s_1, s_2')$ (Ω)
1000	300	600	47.88	50.07	51.25	1001	50.05	291	49.80	1000	50.07	300	50.07
1000	400	450	48.08	50.30	51.13	1011	50.17	361	49.50	1003	50.27	399	50.28
1200	450	500	47.84	49.82	49.99	1170	50.12	433	49.51	1203	49.79	449	49.80
1250	350	750	47.74	50.27	50.65	1280	49.99	337	49.93	1250	50.27	350	50.27
1400	425	700	48.01	50.12	49.92	1423	49.93	412	49.86	1402	50.10	425	50.12

5.1.2. Dielektrik Taban Destekli Eşdüzlemli Dalga Kılavuzlarının Sentezi için Sunulan BSA Modelleri

Kesit görünümü Şekil 3.4'te verilen DTDEDK'ların geometrik boyutlarının hesaplanması için oluşturulan BSA modelleri dört giriş ve bir çıkıştan oluşmaktadır. Birinci BSA modelinin girişleri ε_{r1} , ε_{r2} , Z_0 ve s/h , çıkışı ise w 'dır. İkinci BSA modelinin girişleri ε_{r1} , ε_{r2} , Z_0 ve w/h , çıkışı ise s 'dir. Birinci BSA modeli ile, dielektrik taban malzemeleri seçildikten sonra, verilen şerit genişliğine karşılık arzu edilen karakteristik empedansa sahip iletim hattı tasarımı için gerekli olan yarı genişliği hesaplanmaktadır. İkinci BSA modeli ile de, dielektrik taban malzemeleri seçildikten sonra, verilen bir yarı genişliğine karşılık arzu edilen karakteristik empedansa sahip iletim hattı tasarımı için gerekli olan şerit genişliği hesaplanmaktadır.

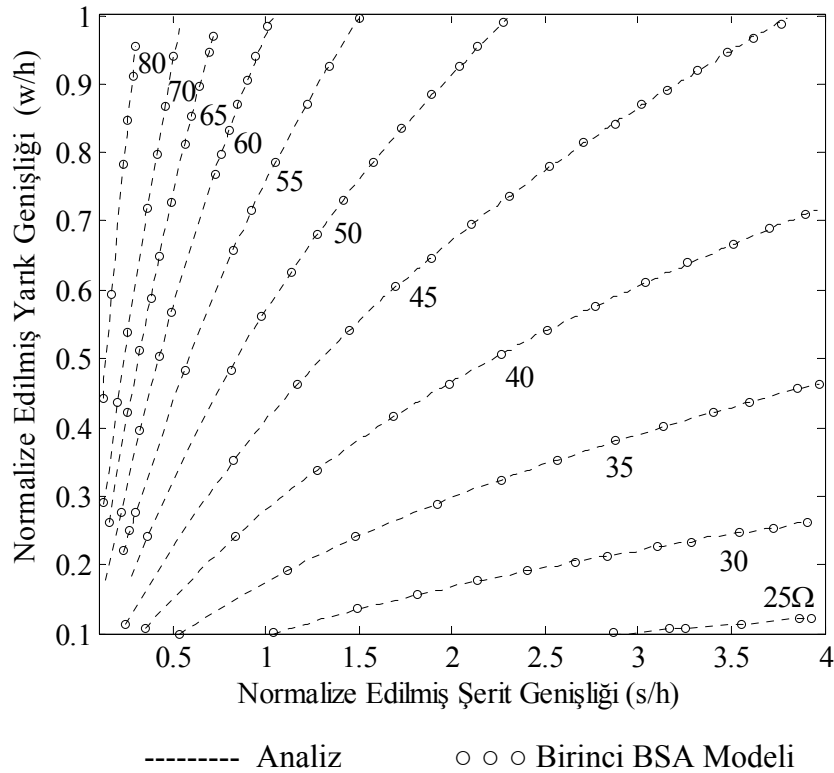
BSA modellerinin eğitiminde KDT [61] sonuçlarından oluşan bir veri seti kullanılmıştır. Test işlemi için de eğitim setinden tamamen farklı olmak üzere literatürdeki mevcut sonuçlar ve tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları kullanılmıştır. Veri setleri oluşturulurken kullanılan tasarım parametreleri: $2 \leq \varepsilon_{r1} \leq 10$, $10 \leq \varepsilon_{r2} \leq 20$, $0.1 \leq s/h \leq 4$, $0.1 \leq w/h \leq 1$, $20 \mu\text{m} \leq h \leq 2000 \mu\text{m}$. Bunlara karşılık gelen karakteristik empedans değerleri $19 \Omega \leq Z_0 \leq 117 \Omega$ arasındadır.

HL, SA, LSQ ve GA kullanılarak optimize edilen BSA modellerinin KDT [61]'ye göre ortalama yüzde hataları Tablo 5.5'te verilmiştir. Bu tablodan açıkça görülebileceği gibi en iyi sonuçlar eğitimi HL algoritması ile eğitilen BSA modellerinden, en kötü sonuçlar ise GA ile eğitilen BSA modellerinden elde edilmiştir.

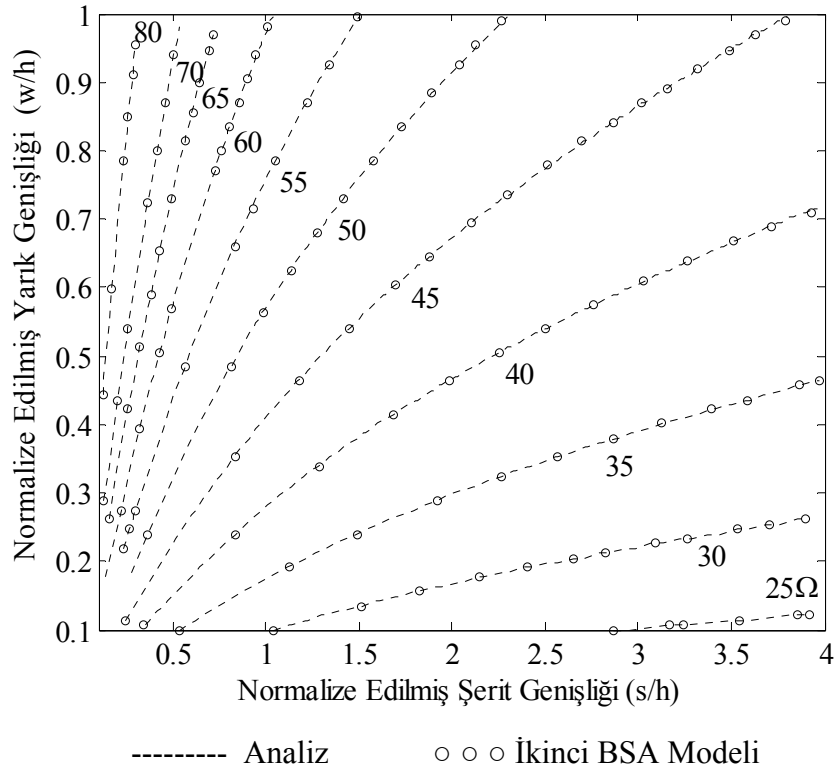
Tablo 5.5. BSA modellerinin ortalama yüzde hataları.

Optimizasyon Algoritmaları	Birinci BSA Modeli (w)		İkinci BSA Model (s)	
	Eğitim (%)	Test (%)	Eğitim (%)	Test (%)
HL	0.2005	0.2193	0.4322	0.4856
SA	4.0259	4.1936	5.4603	5.4330
LSQ	10.4860	10.9179	7.9451	8.0792
GA	15.6200	17.0074	15.9932	16.0257

Bu çalışmada, HL algoritması ile eğitilen BSA modellerinden elde edilen sonuçlar KDT [61], SDA [61], GSDA [62] sonuçlarıyla, tez çalışması kapsamında sunulan sentez formüllerinin sonuçlarıyla ve gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak BSA modellerinin doğruluğu ve geçerliliği gösterilmiştir. Şekil 5.5'te $\varepsilon_{r1} = 3.78$, $\varepsilon_{r2} = 12.9$ ve $h = 200 \mu\text{m}$ olan DTDEDK'nın arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için birinci BSA modelinden elde edilen yarı genişliği sonuçları quasi-statik analiz [61] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.6'da ise aynı iletim hattının arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için ikinci BSA modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçları quasi-statik analiz [61] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. BSA modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlar ile çok iyi bir uyum içerisinde olduğu Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'dan açıkça görülmektedir.



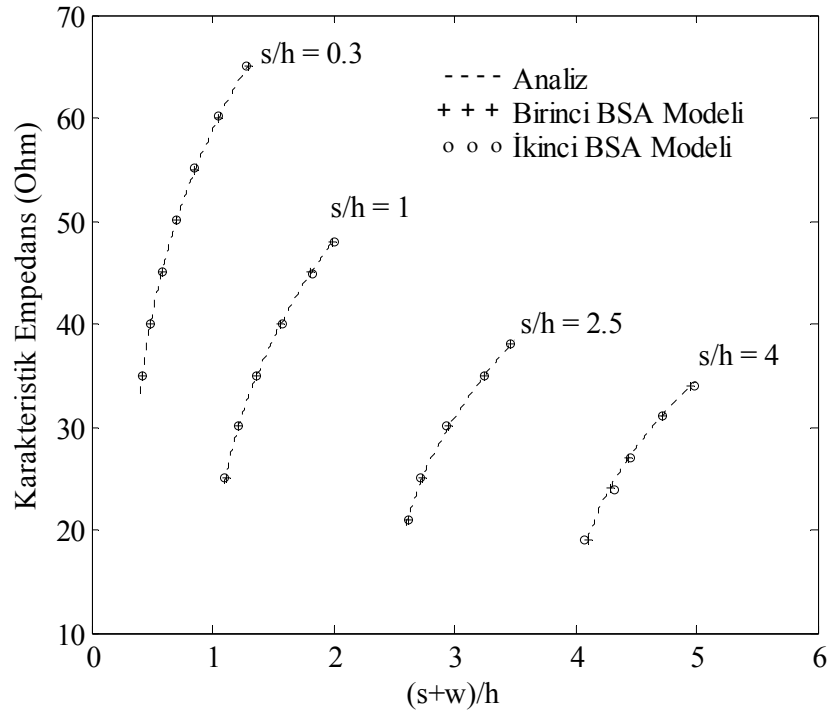
Şekil 5.5. Birinci BSA modelinden elde edilen yarı genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [61] sonuçları ile karşılaştırılması ($\varepsilon_{r1} = 3.78$, $\varepsilon_{r2} = 12.9$, $h = 200 \mu\text{m}$).



Şekil 5.6. İkinci BSA modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [61] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 3.78$, $\epsilon_{r2} = 12.9$, $h = 200 \mu\text{m}$).

Birinci ve ikinci BSA modellerinin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerleri quasi-statik analiz [61] sonuçları ile farklı s/h değerleri için Şekil 5.7’de karşılaştırılmıştır. Şekil 5.7’deki sonuçlar $\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 20$ ve $h = 250 \mu\text{m}$ olan DTDEDK’lar için elde edilmiştir. Şekil 5.7’den açıkça görüldüğü gibi BSA modellerinden elde edilen sonuçlar quasi-statik analiz sonuçları ile uyum içerisindedir. Ayrıca bu şekilde birinci ve ikinci BSA modellerinin kendileri arasında da iyi bir uyum olduğu görülmektedir.

BSA modellerinden elde edilen sonuçlar, literatürdeki sonuçlarla ve tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarıyla Tablo 5.6’da karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu tabloda, DE algoritması kullanılarak elde edilen sentez formüllerinin sonuçları karşılaştırma yapmak amacıyla verilmiştir. Tablo 5.6’da w' , s' ve Z_0' deneysel sonuçları; $Z_0(w', s')$: w' ve s' kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(w, s')$: verilen s' ve birinci BSA modelinden elde edilen w değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(w', s)$ ise verilen w' ve



Şekil 5.7. BSA modellerinden elde edilen sonuçların kullanılmasıyla hesaplanan karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz [61] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_{r1} = 10$, $\epsilon_{r2} = 20$, $h = 250 \mu\text{m}$).

ikinci BSA elde edilen s değerleri kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerini göstermektedir. Ayrıca bu tabloda $Z_0(w^*, s')$: verilen s' ve sentez formüllerinden elde edilen w^* değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(w', s^*)$ ise verilen w' ve sentez formüllerinden elde edilen s^* değerleri kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerini temsil etmektedir. Tablo 5.6'dan açıkça görüldüğü gibi BSA modellerinden elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla ve tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve ölçüm sonuçlarıyla iyi bir uyum içerisindedir.

Bir diğer karşılaştırmada, BSA modellerinden elde edilen geometrik boyutlar ve bu boyutlar kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerleri literatürdeki sonuçlarla Tablo 5.7 – Tablo 5.9'da üç farklı taban malzemesi için karşılaştırılmıştır. Tablo 5.7 – Tablo 5.9'dan görüldüğü gibi BSA modellerinden elde edilen geometrik boyutlar (w ve s), gerçek geometrik boyutlar (w' ve s') ile uyum içerisindedir. Buna bağlı olarak BSA modellerinden elde edilen geometrik boyutlar kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerinin KDT [61], SDA [61] ve GSDA [62] sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisinde olduğu Tablo 5.7 – Tablo 5.9'dan açıkça görülmektedir.

Sonuç olarak bu çalışmada DTDEDK'ların geometrik boyutlarının hesaplanması için BSA modelleri oluşturulmuştur. HL algoritması ile eğitilen BSA modellerinin ortalama yüzde hatalarının sentez formüllerine göre oldukça küçük olduğu görülmüştür. BSA modellerinden elde edilen sonuçlar KDT, SDA, GSDA, IE3D ve ölçüm sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisinde. Bu uyum, sunulan BSA modellerinin DTDEDK'ların geometrik boyutlarının hesaplanmasında kullanılabileceğini göstermektedir.

Tablo 5.6. BSA modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla, tez çalışması kapsamında sunulan sentez formüllerinin sonuçlarıyla ve gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılması ($\varepsilon_{r1} = 6.15$, $\varepsilon_{r2} = 10.2$, $h = 1270 \mu\text{m}$, $f = 2 \text{ GHz}$).

Deneyisel			KDT [61]	IE3D [141]	Birinci Sentez Formülü		İkinci Sentez Formülü		Birinci BSA Modeli		İkinci BSA Modeli	
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	444	50.01	1016	49.99
500	1200	48.34	49.33	47.57	529	50.18	1149	49.91	523	50.01	1140	50.02
550	1300	47.48	49.70	47.91	568	50.19	1281	49.90	561	50.00	1269	50.02
600	1400	46.66	50.04	48.21	605	50.17	1417	49.88	599	50.01	1401	50.03
650	1500	47.01	50.35	48.48	641	50.14	1560	49.84	635	50.00	1536	50.04

Tablo 5.7. BSA modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması ($\varepsilon_{r1} = 10$, $\varepsilon_{r2} = 20$, $h = 200 \mu\text{m}$).

w' (μm)	s' (μm)	KDT [61]	SDA [61]	GSDA [62]	Birinci Sentez Formülü		İkinci Sentez Formülü		Birinci BSA Modeli		İkinci BSA Modeli	
		$Z_0(w', s')$ (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)	w (μm)	$Z_0(w, s')$ (Ω)	s (μm)	$Z_0(w', s)$ (Ω)
20	20	45.51	45.85	45.38	20	45.51	19	46.19	20	45.51	20	45.51
	60	33.24	33.38	33.15	20	33.24	61	33.09	20	33.24	60	33.24
	120	27.68	27.12	27.56	21	28.01	120	28.01	20	27.68	120	27.68
	200	24.52	24.50	24.37	20	24.52	200	24.52	20	24.52	199	24.53
	800	19.01	18.83	18.76	22	19.37	790	19.03	20	19.01	802	18.98
60	20	61.82	62.01	61.49	61	62.10	17	64.45	60	61.82	20	61.82
	60	45.81	45.83	45.60	60	45.81	54	47.19	60	45.81	60	45.81
	120	37.73	37.67	37.51	61	37.92	115	38.17	60	37.73	121	37.64
	200	32.95	32.61	32.70	60	32.95	197	33.08	60	32.95	200	32.95
	800	24.41	24.05	24.00	60	24.41	799	24.39	60	24.41	807	24.34
100	20	70.56	70.60	70.02	100	70.56	20	70.56	100	70.56	20	70.56
	60	53.26	53.18	52.90	100	53.26	60	53.26	100	53.26	60	53.26
	120	44.09	43.90	43.73	101	44.22	123	43.79	100	44.09	121	43.99
	200	38.47	38.19	38.07	102	38.71	204	38.27	100	38.47	201	38.42
	800	27.98	27.48	27.43	100	27.98	798	27.96	100	27.98	803	27.93
200	20	83.77	83.24	82.62	199	83.67	24	80.59	200	83.77	20	83.77
	60	65.28	64.80	64.45	199	65.19	61	65.02	201	65.38	60	65.28
	120	54.87	54.31	54.09	200	54.87	118	55.11	201	54.96	120	54.87
	200	48.95	47.50	47.34	208	48.78	185	49.11	200	48.95	202	48.02
	800	34.42	33.66	33.63	201	34.47	811	34.31	199	34.39	796	34.46

Tablo 5.8. BSA modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması ($\varepsilon_{r1} = 3.78$, $\varepsilon_{r2} = 12.9$, $h = 200 \mu\text{m}$).

w' (μm)	s' (μm)	KDT [61]	SDA [61]	GSDA [62]	Birinci Sentez Formülü		İkinci Sentez Formülü		Birinci BSA Modeli		İkinci BSA Modeli	
		$Z_0(w', s')$ (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)	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	20	55.96	20	55.96
	60	40.90	41.08	40.79	19	40.31	59	41.09	20	40.90	60	40.90
	120	34.11	34.16	33.96	20	34.11	116	34.36	20	34.11	119	34.15
	200	30.30	30.28	30.12	20	30.30	195	30.43	20	30.30	200	30.30
	800	23.73	23.72	23.63	22	24.39	829	23.79	20	23.73	794	23.93
60	20	76.09	76.32	75.69	60	76.09	21	75.14	61	76.43	20	76.09
	60	56.46	56.50	55.21	59	56.18	59	56.73	60	56.46	60	56.46
	120	46.62	46.56	46.37	60	46.62	119	46.73	60	46.62	120	46.62
	200	40.88	40.72	40.58	60	40.88	201	40.83	60	40.88	201	40.83
	800	30.99	30.56	30.49	62	31.23	806	30.92	60	30.99	800	30.99
100	20	86.97	87.03	86.32	100	86.97	21	85.97	100	86.97	20	86.97
	60	65.80	65.71	65.37	99	65.60	59	66.10	100	65.80	60	65.80
	120	54.65	54.44	54.23	100	54.65	120	54.65	99	54.47	120	54.65
	200	47.91	47.60	47.44	102	48.21	202	47.79	100	47.91	201	47.85
	800	35.76	35.16	35.09	102	35.93	805	35.68	100	35.76	802	35.71
200	20	103.80	103.20	102.42	202	104.08	23	100.82	201	103.95	20	103.80
	60	81.22	80.66	80.21	202	81.47	61	80.90	201	81.34	60	81.22
	120	68.62	67.95	67.67	203	68.96	119	68.75	201	68.73	120	68.62
	200	60.58	59.80	59.61	204	61.00	198	60.72	201	60.68	199	60.65
	800	44.60	43.65	43.59	202	44.75	808	44.50	199	44.52	808	44.50

Tablo 5.9. BSA modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması ($\varepsilon_{r1} = 10$, $\varepsilon_{r2} = 12.9$, $h = 200 \mu\text{m}$).

w' (μm)	s' (μm)	KDT [61]	SDA [61]	GSDA [62]	Birinci Sentez Formülü		İkinci Sentez Formülü		Birinci BSA Modeli		İkinci BSA Modeli	
		$Z_0(w', s')$ (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)	w (μm)	$Z_0(w, s')$ (Ω)	s (μm)	$Z_0(w', s)$ (Ω)
20	20	55.91	56.33	55.75	20	55.91	20	55.91	20	55.91	20	55.91
	60	40.79	40.98	40.69	20	40.79	61	40.61	20	40.79	60	40.79
	120	33.90	33.96	33.76	21	34.30	120	33.90	20	33.90	120	33.90
	200	29.98	29.92	29.77	21	30.23	194	30.09	20	29.98	199	29.91
	800	22.60	22.47	22.40	23	23.21	808	22.53	20	22.60	802	22.56
60	20	75.84	76.09	75.46	62	76.50	18	77.93	60	75.84	20	75.84
	60	56.07	56.14	55.86	61	56.35	57	56.90	60	56.07	60	56.07
	120	46.01	46.00	45.82	61	46.24	120	46.01	60	46.01	121	45.91
	200	39.96	39.89	39.75	62	40.34	203	39.81	60	39.96	200	39.96
	800	28.69	28.43	28.38	61	28.78	810	28.59	60	28.69	807	28.61
100	20	86.36	86.48	85.77	101	86.58	19	87.43	100	86.36	20	86.36
	60	64.98	64.97	64.64	101	65.17	60	64.98	100	64.98	60	64.98
	120	53.92	53.42	53.22	103	54.00	119	53.65	100	53.92	121	53.40
	200	46.39	46.22	46.07	104	46.94	203	46.21	100	46.39	201	46.33
	800	32.61	32.25	32.22	102	32.75	810	32.49	100	32.61	803	32.55
200	20	101.80	101.50	100.60	200	101.80	23	98.74	200	101.80	20	101.80
	60	78.85	78.94	78.12	200	78.85	60	78.85	200	78.85	60	78.85
	120	65.81	65.44	65.18	198	65.62	117	66.26	200	65.81	120	65.81
	200	57.26	56.22	56.66	202	57.44	195	57.67	200	57.26	202	57.11
	800	39.47	38.95	38.95	203	39.65	805	39.41	200	39.47	796	39.53

5.1.3. Mikro Eşdüzlemlı Şerit Hatların Sentezi için Sunulan BSA Modelleri

Kesit görünümü Şekil 3.6’da verilen mikro EŞH’ların geometrik boyutlarının hesaplanması için oluşturulan BSA modelleri üç giriş ve bir çıkıştan oluşmaktadır. Birinci BSA modelinin girişleri ε_r , Z_0 ve w/h , çıkışı ise s ’dir. İkinci BSA modelinin girişleri ε_r , Z_0 ve s/h , çıkışı ise w ’dır. Birinci BSA modeli ile, dielektrik taban malzemesi seçildikten sonra, verilen şerit genişliğine karşılık arzu edilen karakteristik empedansa sahip iletim hattı tasarımı için gerekli olan yarık genişliği hesaplanmaktadır. İkinci BSA modeli ile de, dielektrik taban malzemesi seçildikten sonra, verilen bir yarık genişliğine karşılık arzu edilen karakteristik empedansa sahip iletim hattı tasarımı için gerekli olan şerit genişliği hesaplanmaktadır.

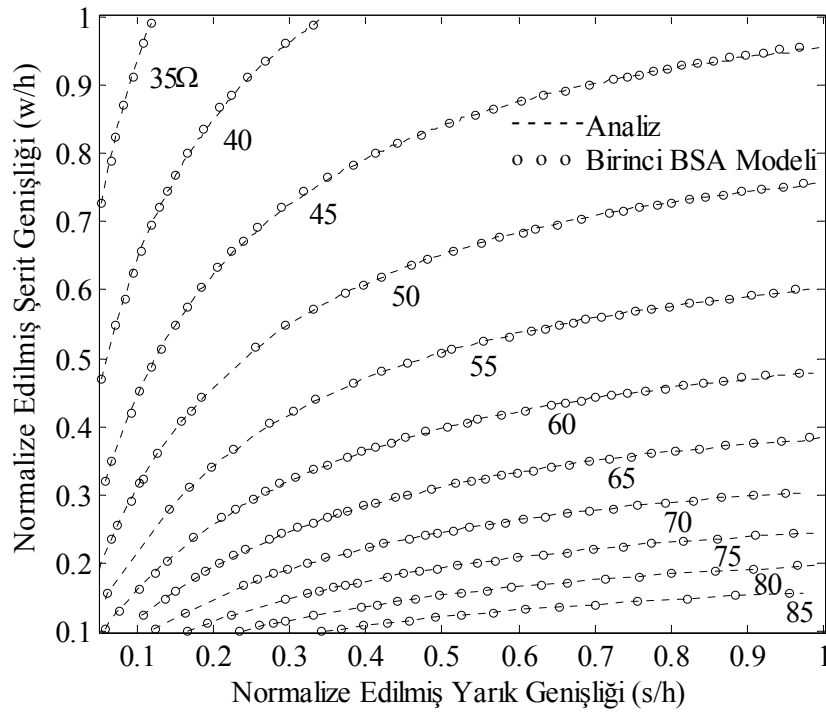
BSA modellerinin eğitiminde KDT [72] sonuçlarından oluşan bir veri seti kullanılmıştır. Test işlemi için de eğitim setinden tamamen farklı olmak üzere literatürdeki mevcut sonuçlar ve tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları kullanılmıştır. Veri setleri oluşturulurken kullanılan tasarım parametreleri: $2 \leq \varepsilon_r \leq 21$, $0.05 \leq s/h \leq 1$, $0.1 \leq w/h \leq 1$, $20 \mu\text{m} \leq h \leq 2000 \mu\text{m}$. Bunlara karşılık gelen karakteristik empedans değerleri $25 \Omega \leq Z_0 \leq 212 \Omega$ arasındadır.

HL, SA, LSQ ve GA kullanılarak optimize edilen BSA modellerinin KDT [72]’ye göre ortalama yüzde hataları Tablo 5.10’da sunulmuştur. Bu tablodan açıkça görülebileceği gibi en iyi sonuçlar eğitimi HL algoritması ile eğitilen BSA modellerinden elde edilmiştir.

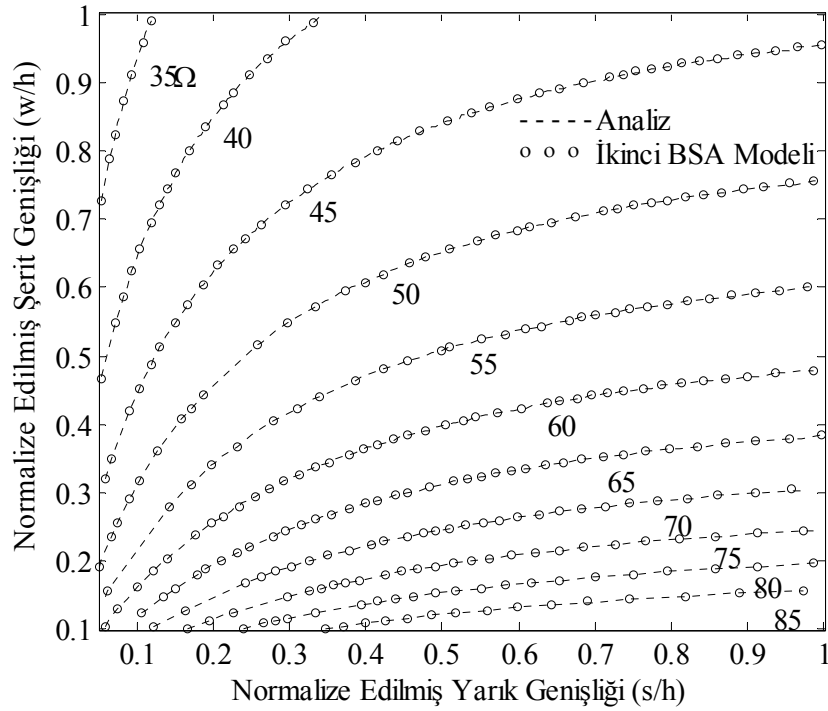
Tablo 5.10. BSA modellerinin ortalama yüzde hataları.

Optimizasyon Algoritmaları	Birinci BSA Modeli (s)		İkinci BSA Modeli (w)	
	Eğitim (%)	Test (%)	Eğitim (%)	Test (%)
HL	0.848	0.895	0.019	0.020
SA	1.400	1.635	1.270	1.259
LSQ	3.237	3.380	0.583	0.441
GA	3.712	2.251	9.459	5.174

Bu çalışmada, HL algoritması ile eğitilen BSA modellerinden elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla, tez çalışması kapsamında sunulan sentez formüllerinin sonuçlarıyla ve gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak BSA modellerinin doğruluğu ve geçerliliği gösterilmiştir. Şekil 5.8’de $\epsilon_r = 12.9$ ve $h = 200 \mu\text{m}$ olan mikro EŞH’nın arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için birinci BSA modelinden elde edilen yarık genişliği sonuçları quasi-statik analiz [72] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.9’da ise aynı iletim hattının arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için ikinci BSA modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçları quasi-statik analiz [72] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. BSA modellerinden elde edilen sonuçların quasi-statik analiz [72] sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisinde olduğu Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’dan açıkça görülmektedir.



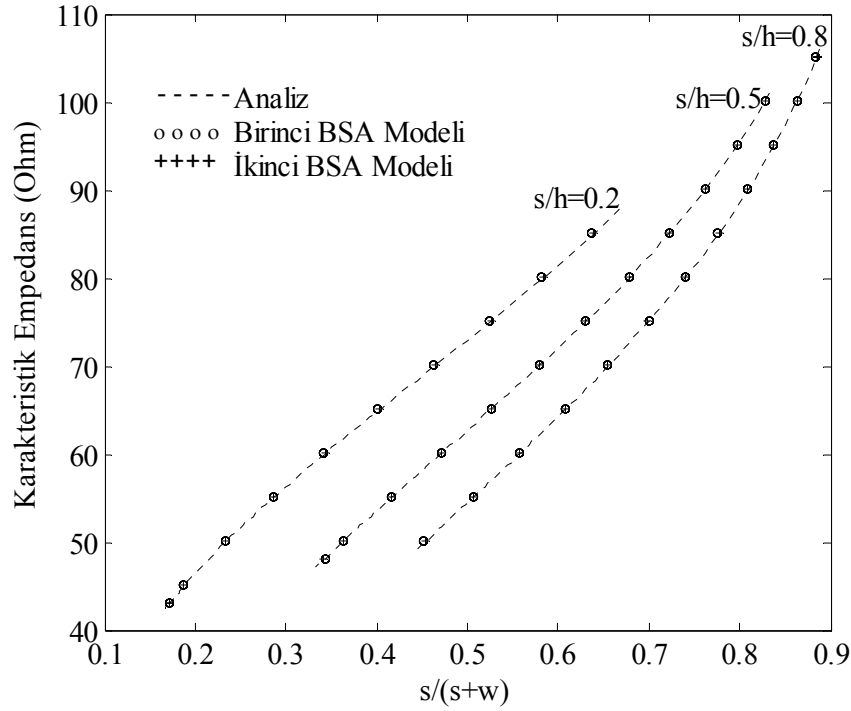
Şekil 5.8. Birinci BSA modelinden elde edilen yarık genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [72] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 12.9$, $h = 200 \mu\text{m}$).



Şekil 5.9. İkinci BSA modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [72] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 12.9$, $h = 200 \mu\text{m}$).

Birinci ve ikinci BSA modellerinin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerleri quasi-statik analiz [72] sonuçları ile farklı s/h değerleri için Şekil 5.10'da karşılaştırılmıştır. Şekil 5.10'daki sonuçlar $\epsilon_r = 9.9$ ve $h = 1000 \mu\text{m}$ olan mikro EŞH'lar için elde edilmiştir. Şekil 5.10'dan açıkça görüldüğü gibi BSA modellerinden elde edilen sonuçlar quasi-statik analiz sonuçları ile uyum içerisindedir. Ayrıca bu şekilde birinci ve ikinci BSA modellerinin kendileri arasında da iyi bir uyum olduğu görülmektedir.

BSA modellerinden elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarıyla Tablo 5.11'de karşılaştırılmıştır. Tablo 5.12'de ise BSA modellerinden elde edilen sonuçlar DSBM [70], KDT [72] ve ölçüm [70] sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu tablolarda ayrıca DE algoritması kullanılarak elde edilen sentez formüllerinin sonuçları da verilmiştir. Bu tablolarda s' , w' ve Z_0' deneysel sonuçları; $Z_0(s', w')$: s' ve w' değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(s, w')$: verilen w' ve birinci BSA modelinden elde edilen s değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(s', w)$ ise verilen s' ve ikinci BSA elde edilen w değerleri



Şekil 5.10. BSA modellerinden elde edilen sonuçların kullanılmasıyla hesaplanan karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz [72] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 9.9$, $h = 1000 \mu\text{m}$).

kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerini temsil etmektedir. Ayrıca bu tablolarda $Z_0(s^*, w')$: verilen w' ve sentez formüllerinden elde edilen s^* değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(s', w^*)$ ise verilen s' ve sentez formüllerinden elde edilen w^* değerleri kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerini göstermektedir. Tablo 5.11 ve Tablo 5.12'den görüldüğü gibi BSA modellerinden elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla ve tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışmaların sonuçlarıyla iyi bir uyum içerisinde dir.

Sonuç olarak bu çalışmada mikro EŞH'ların geometrik boyutlarının hesaplanması için BSA modelleri oluşturulmuştur. HL algoritması ile eğitilen BSA modellerinin ortalama yüzde hatalarının sentez formüllerine göre küçük olduğu görülmüştür. BSA modellerinden elde edilen sonuçlar KDT, DSBM, IE3D ve ölçüm sonuçları ile iyi bir uyum içerisinde dir. Bu uyum, sunulan BSA modellerinin mikro EŞH'ların geometrik boyutlarının hesaplanmasında kullanılabileceğini göstermektedir.

Tablo 5.11. BSA modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla, tez çalışması kapsamında sunulan sentez formüllerinin sonuçlarıyla ve gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılması ($\epsilon_r = 10.2$, $h = 1270 \mu\text{m}$, $f = 1.75 \text{ GHz}$).

Deneysel			KDT [72]	IE3D [141]	Birinci Sentez Formülü		İkinci Sentez Formülü		Birinci BSA Modeli		İkinci BSA Modeli	
s' (μm)	w' (μm)	Z_0' (Ω)	$Z_0(s', w')$ (Ω)	$Z_0(s', w')$ (Ω)	s^* (μm)	$Z_0(s^*, w')$ (Ω)	w^* (μm)	$Z_0(s', w^*)$ (Ω)	s (μm)	$Z_0(s, w')$ (Ω)	w (μm)	$Z_0(s', w)$ (Ω)
475	1000	46.78	50.03	49.14	471	49.98	1002	49.99	473	50.00	1000	50.03
550	1050	47.02	49.87	49.44	563	49.99	1045	49.97	551	49.88	1050	49.87
700	1100	46.62	50.14	50.53	681	50.00	1109	49.97	705	50.18	1100	50.14
850	1150	47.09	50.06	51.10	839	50.00	1151	50.04	857	50.09	1150	50.06

Tablo 5.12. BSA modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla ve tez çalışması kapsamında sunulan sentez formüllerinin sonuçlarıyla karşılaştırılması ($\epsilon_r = 10.1$ ve $h = 400 \mu\text{m}$).

Deneysel [70]			DSBM [70]	KDT [72]	Birinci Sentez Formülü		İkinci Sentez Formülü		Birinci BSA Modeli		İkinci BSA Modeli	
s' (μm)	w' (μm)	Z_0' (Ω)	$Z_0(s', w')$ (Ω)	$Z_0(s', w')$ (Ω)	s^* (μm)	$Z_0(s^*, w')$ (Ω)	w^* (μm)	$Z_0(s', w^*)$ (Ω)	s (μm)	$Z_0(s, w')$ (Ω)	w (μm)	$Z_0(s', w)$ (Ω)
296	375	48.28	47.52	49.90	295.21	49.90	374.12	49.97	295.40	49.91	375.24	49.90
95	374	43.05	42.26	44.17	93.73	44.09	372.73	44.23	94.49	44.14	373.89	44.17
46	374	40.06	38.25	40.06	45.81	40.03	374.88	40.02	46.42	40.11	373.75	40.07

5.1.4. Sonsuz Uzun Toprak Düzlemine Sahip Eşdüzlemli Şerit Hatların Sentezi için Sunulan BSA Modelleri

Kesit görünümü Şekil 3.8'de verilen sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH'ların geometrik boyutlarının hesaplanması için oluşturulan BSA modelleri üç giriş ve bir çıkıştan oluşmaktadır. Birinci BSA modelinin girişleri ϵ_r , Z_0 ve w/h , çıkışı ise s' 'dir. İkinci BSA modelinin girişleri ϵ_r , Z_0 ve s/h , çıkışı ise w' 'dir. Birinci BSA modeli ile, dielektrik taban malzemesi seçildikten sonra, verilen şerit genişliğine karşılık arzu edilen karakteristik empedansa sahip iletim hattı tasarımı için gerekli olan yarık genişliği hesaplanmaktadır. İkinci BSA modeli ile de, dielektrik taban malzemesi seçildikten sonra, verilen bir yarık genişliğine karşılık arzu edilen karakteristik empedansa sahip iletim hattı tasarımı için gerekli olan şerit genişliği hesaplanmaktadır.

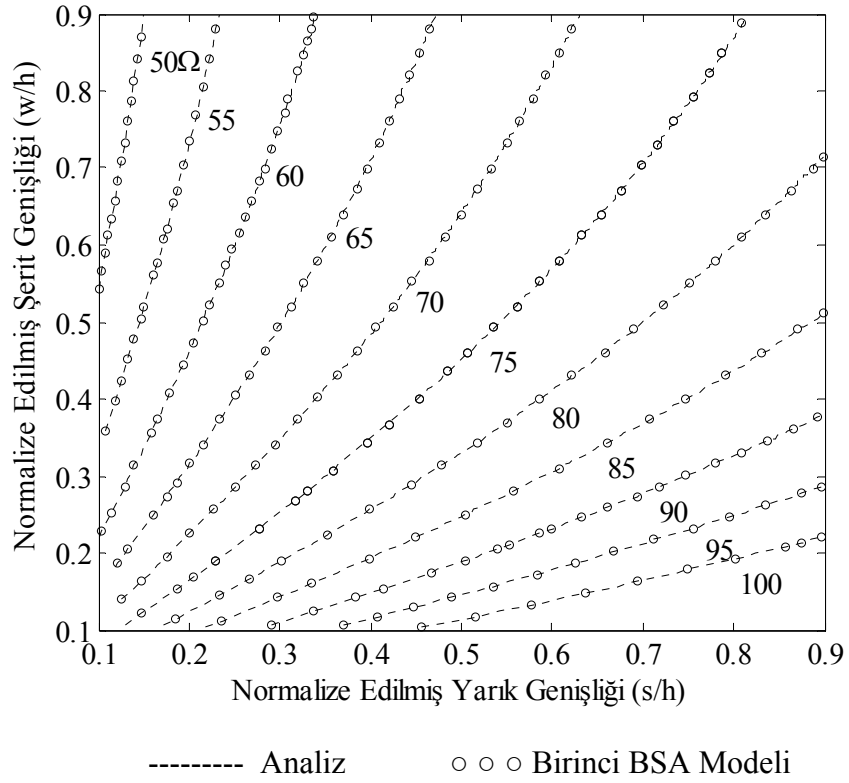
BSA modellerinin eğitiminde KDT [75] sonuçlarından oluşan bir veri seti kullanılmıştır. Test işlemi için de eğitim setinden tamamen farklı olmak üzere literatürdeki mevcut sonuçlar ve tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları kullanılmıştır. Veri setleri oluşturulurken kullanılan tasarım parametreleri: $2 \leq \varepsilon_r \leq 21$, $0.05 \leq s/h \leq 1$, $0.1 \leq w/h \leq 2$, $20 \mu\text{m} \leq h \leq 2000 \mu\text{m}$. Bunlara karşılık gelen karakteristik empedans değerleri $30 \Omega \leq Z_0 \leq 250 \Omega$ arasındadır.

HL, SA, GA ve LSQ algoritmaları ile optimize edilen BSA modellerinin KDT [75]'ye göre ortalama yüzde hataları Tablo 5.13'te verilmiştir. Bu tablodan açıkça görülebileceği gibi en iyi sonuçlar eğitimi HL algoritması ile gerçekleştirilen BSA modellerinden, en kötü sonuçlar ise eğitimi LSQ algoritması ile gerçekleştirilen BSA modellerinden elde edilmiştir.

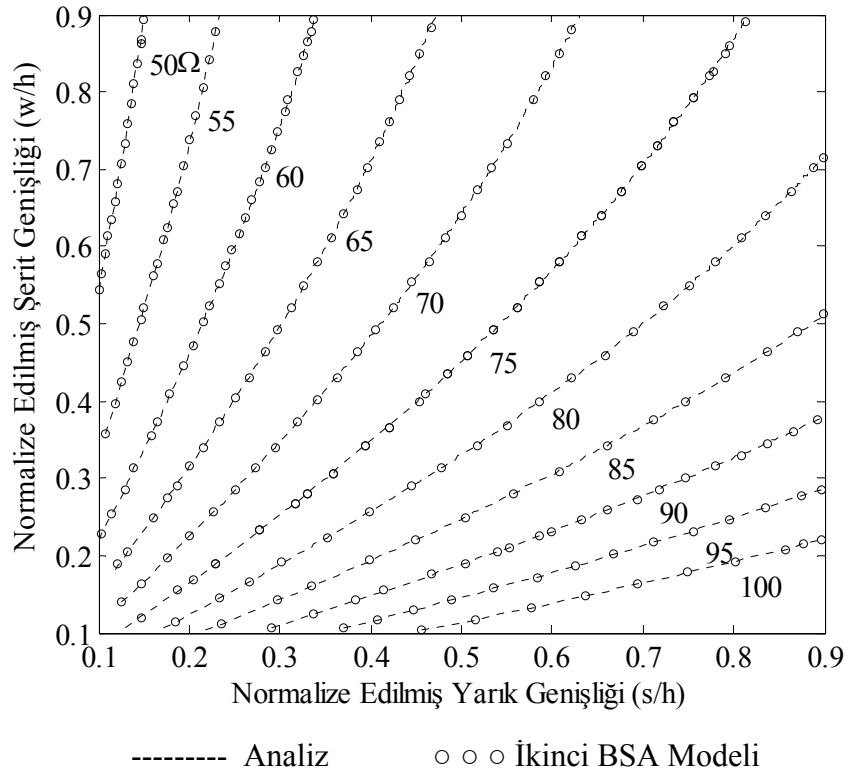
Bu çalışmada, HL algoritması ile eğitilen BSA modellerinden elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla, tez çalışması kapsamında sunulan sentez formüllerinin sonuçlarıyla ve gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak BSA modellerinin doğruluğu ve geçerliliği gösterilmiştir. Şekil 5.11'de $\varepsilon_r = 12.9$ ve $h = 400 \mu\text{m}$ olan sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH'nın arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için birinci BSA modelinden elde edilen yarık genişliği sonuçları quasi-statik analiz [75] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.12'de ise aynı iletim hattının arzu edilen karakteristik empedansı (Z_0) vermesi için ikinci BSA modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçları quasi-statik analiz [75] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. BSA modellerinden elde edilen sonuçların quasi-statik analiz [75] sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisinde olduğu Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'den açıkça görülmektedir.

Tablo 5.13. BSA modellerinin ortalama yüzde hataları.

Optimizasyon Algoritmaları	Birinci BSA Modeli (s)		İkinci BSA Modeli (w)	
	Eğitim (%)	Test (%)	Eğitim (%)	Test (%)
HL	0.034	0.029	0.273	0.259
SA	0.759	0.841	1.115	1.134
GA	4.784	1.681	3.640	3.264
LSQ	7.615	6.849	5.503	3.555



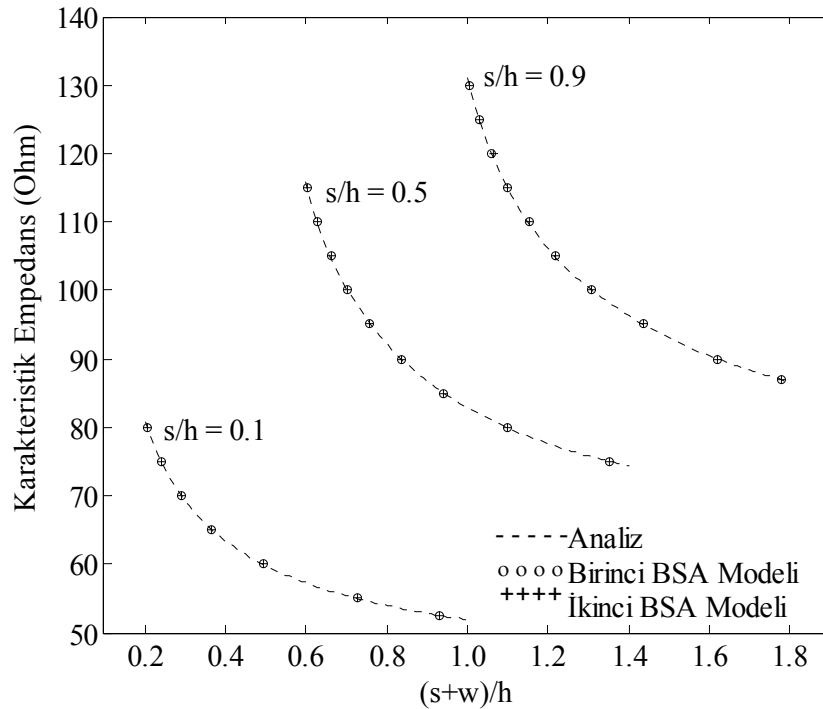
Şekil 5.11. Birinci BSA modelinden elde edilen yarık genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [75] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 12.9$, $h = 400 \mu\text{m}$).



Şekil 5.12. İkinci BSA modelinden elde edilen şerit genişliği sonuçlarının quasi-statik analiz [75] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 12.9$, $h = 400 \mu\text{m}$).

Birinci ve ikinci BSA modellerinin sonuçları kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerleri quasi-statik analiz [75] sonuçları ile farklı s/h değerleri için Şekil 5.13'te karşılaştırılmıştır. Şekil 5.13'teki sonuçlar $\epsilon_r = 9.9$ ve $h = 635 \mu\text{m}$ olan sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH'lar için elde edilmiştir. Şekil 5.13'ten açıkça görüldüğü gibi BSA modellerinden elde edilen sonuçlar quasi-statik analiz sonuçları ile uyum içerisinde. Ayrıca bu şekilde birinci ve ikinci BSA modellerinin kendileri arasında da iyi bir uyum olduğu görülmektedir.

BSA modellerinden elde edilen sonuçlar, literatürdeki sonuçlarla ve tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarıyla Tablo 5.14'te karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu tabloda, DE algoritması kullanılarak elde edilen sentez formüllerinin sonuçları karşılaştırma yapmak amacıyla verilmiştir. Tablo 5.14'te s' , w' ve Z_0' deneysel sonuçları; $Z_0(s', w')$: s' ve w' değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(s, w')$: verilen w' ve birinci BSA modelinden elde edilen s değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(s', w)$



Şekil 5.13. BSA modellerinden elde edilen sonuçların kullanılmasıyla hesaplanan karakteristik empedans değerlerinin quasi-statik analiz [75] sonuçları ile karşılaştırılması ($\epsilon_r = 9.9$, $h = 635 \mu\text{m}$).

Tablo 5.14. BSA modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla, tez çalışması kapsamında sunulan sentez formüllerinin sonuçlarıyla ve gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılması ($\epsilon_r = 10.2$, $h = 1270 \mu\text{m}$, $f = 1.75 \text{ GHz}$).

Deneysel			KDT [75]	IE3D [141]	Birinci Sentez Formülü		İkinci Sentez Formülü		Birinci BSA Modeli		İkinci BSA Modeli	
s' (μm)	w' (μm)	Z_0' (Ω)	$Z_0(s', w')$ (Ω)	$Z_0(s', w')$ (Ω)	s^* (μm)	$Z_0(s^*, w')$ (Ω)	w^* (μm)	$Z_0(s', w^*)$ (Ω)	s (μm)	$Z_0(s, w')$ (Ω)	w (μm)	$Z_0(s', w)$ (Ω)
175	2500	47.87	50.01	53.81	61	41.42	2117	50.65	175	50.01	2447	50.08
150	1750	47.93	50.07	52.08	139	49.36	1678	50.30	150	50.07	1815	49.88
125	1300	47.50	50.11	52.71	129	50.45	1302	50.10	125	50.11	1344	49.89

ise verilen s' ve ikinci BSA elde edilen w değerleri kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerini göstermektedir. Ayrıca bu tabloda $Z_0(s^*, w')$: verilen w' ve sentez formüllerinden elde edilen s^* değerleri kullanılarak hesaplanan karakteristik empedans değerlerini; $Z_0(s', w^*)$ ise verilen s' ve sentez formüllerinden elde edilen w^* değerleri kullanılarak elde edilen karakteristik empedans değerlerini temsil etmektedir.

Sonuç olarak bu çalışmada sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH'ların geometrik boyutlarının hesaplanması için BSA modelleri oluşturulmuştur. HL algoritması ile eğitilen BSA modellerinin ortalama yüzde hatalarının sentez formüllerine göre çok küçük olduğu görülmüştür. BSA modellerinden elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla ve tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve ölçüm sonuçları ile çok iyi bir uyum içerisindedir. Bu uyum, sunulan BSA modellerinin sonsuz uzun toprak düzlemine sahip EŞH'ların geometrik boyutlarının hesaplanmasında kullanılabileceğini göstermektedir.

6. BÖLÜM

TARTIŞMA-SONUÇ ve ÖNERİLER

6.1. Tartışma-Sonuçlar

Tez çalışması kapsamında MİH'lerden

- Asimetrik eşdüzlemli dalga kılavuzları
- Dielektrik taban destekli eşdüzlemli dalga kılavuzları
- Mikro eşdüzlemli şerit hatlar
- Sonsuz uzun toprak düzlemine sahip eşdüzlemli şerit hatların

ele alınmıştır. sentezi esnek hesaplama yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Ele alınan MİH'lerin analizi IE3D elektromanyetik simülatörü kullanılarak gerçekleştirilmiş, MİH'ler tasarlanmış ve imal edilmiştir. Tasarlanan MİH'lerin S-parametreleri vektör network analizör kullanılarak ölçülmüş ve S-parametreleri kullanılarak MİH'lerin karakteristik empedans değerleri hesaplanmıştır.

Tez çalışması kapsamında, MİH'lerin geometrik boyutlarının hesaplanması için iki farklı yaklaşım kullanılmıştır.

- Birinci yaklaşım, MİH'ler için sentez formüllerinin bulunmasıdır. Bu yaklaşımda ilk olarak sentez modelleri oluşturulmuştur. Daha sonra sentez modellerinin katsayıları esnek hesaplama algoritmalarından DE, GA, PSO ve SA algoritmaları kullanılarak elde edilmiştir. Sentez formüllerinden elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. En iyi sonuçlar, katsayıları DE algoritması kullanılarak bulunan sentez formüllerinden elde edilmiştir. DE algoritması

kullanılarak oluşturulan sentez formüllerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarıyla iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

- İkinci yaklaşım, BSA tabanlı sentez modellerinin oluşturulmasıdır. Oluşturulan BSA tabanlı sentez modellerinin parametreleri HL, LSQ, GA ve SA algoritmaları kullanılarak optimize edilmiştir. BSA modellerinden elde edilen sonuçlar literatürdeki sonuçlarla, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. En iyi sonuçlar HL algoritması kullanılarak eğitilen BSA tabanlı sentez modellerinden elde edilmiştir. HL algoritması kullanılarak eğitilen BSA modellerinden elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarıyla çok iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Ayrıca HL algoritması kullanılarak eğitilen BSA modellerinin, tez çalışması kapsamında sunulan sentez formüllerinden daha doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarla esnek hesaplama yöntemlerinin, MİH'lerin sentezinde kullanılabileceği açıkça gösterilmiştir.

6.2. Öneriler

Bu tez çalışması kapsamında dört farklı MİH yapısının geometrik boyutlarının hesaplanması için sentez formülleri ve BSA modelleri oluşturulmuştur. Bu iletim hatlarının dışında sentez çalışması yapılmamış MİH'ler de literatürde mevcuttur. Gelecek dönemlerde yapılacak çalışmalarda literatürde sentezi gerçekleştirilmemiş MİH'ler için de sentez formülleri ve BSA modelleri oluşturulabilir.

Tez çalışması kapsamında ele alınan MİH'lerin sentezi frekanstan bağımsız olarak gerçekleştirilmiştir. Bundan sonra yapılacak sentez çalışmalarında veri setleri tam-dalga yaklaşımları kullanılarak elde edilebilir. Böylece yüksek frekanslar için de doğru sonuçlar verebilecek sentez formülleri oluşturulabilir.

Bu tez çalışmasında, sentez modelleri oluşturulması için quasi-statik analiz yaklaşımlar kullanılarak veri setleri elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarının sonuçları da sentez modellerinin doğruluğunu ve geçerliliğini test etmek için kullanılmıştır. Çok sayıda deneysel çalışma yapılarak ölçüm sonuçlarından veri setleri elde edilebilir. Bu veri setleri kullanılarak sentez modelleri oluşturulabilir.

Tez çalışması kapsamında MİH'lerin geometrik boyutlarının hesaplanması için sentez modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan sentez modellerinin katsayıları DE, GA, PSO ve SA algoritmaları kullanarak optimum bir şekilde bulunmuştur. Karınca koloni algoritması, tabu araştırma algoritması ve yapay bağışıklık algoritması gibi algoritmalar sentez modellerinin katsayılarının elde edilmesinde kullanılabilir.

Tez çalışmasında MİH'lerin sentezi için BSA modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan BSA modellerinin parametreleri HL, LSQ, GA ve SA algoritmaları kullanılarak optimize edilmiştir. BSA modellerinin parametreleri karınca koloni algoritması, tabu araştırma algoritması ve yapay bağışıklık algoritması gibi optimizasyon algoritmaları kullanılarak da elde edilebilir.

KAYNAKLAR

1. Barrett, R. M., Barnes, M. H., 1951. Microwave circuits, pp. *National Conference on Airborne Electronics, IRE, May 1951, Ohio.*
2. Wheeler, H. A., 1952. Directional Coupler. US patent 2 606 974, August 12, 1952.
3. Peters, R. W., 1956. Handbook of Tri-Plate Microwave Components. Nashua, New Hampshire.
4. Grieg, D. D., Engelmann, H. F., 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. Special Issue on, Microwave Integrated Circuits, IEEE Transactions on Electron Devices, ED-15, 1968.
7. Special Issue on, Microwave Integrated Circuits, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-19, 1971.
8. Gupta, K. C., Singh, A., 1974. Microwave Integrated Circuits. Wiley Eastern Ltd., New Delhi.
9. Frey, J., 1974. Microwave Integrated Circuits. Artech House, Dedham.
10. 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.
11. Gupta, K. C., 1979. Microwaves. Wiley Eastern Ltd., New Delhi.
12. Gupta, K. C., Garg, R., Bahl, I. J., 1979. Microstrip Lines and Slot Lines. Artech House.
13. 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): 325-327.
14. Ahmari, D. A., Fresina, M. T., Hartmann, Q. J., Barlage, D. W., Mares, P. J., Feng, M., Stillman, G. E., 1996. High speed in GaP/GaAs HBT's with a strained In_xGa_{1-x}As base. **IEEE Electronic Device Letters**, **17** (5): 226-228.
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 Electronic Device Letters**, **17** (7): 328-330.
16. Dipalo, F., 2000. Networks and Devices Using Planar Transmission Lines. CRC Press.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.

21. Alferness, R. C., 1982. Waveguide electrooptic modulators. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **30** (8): 1121-1137.
22. Ramer, O. G., 1982. Integrated optic electrooptic modulator electrode analysis. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, **18** (3): 386-392.
23. Special Issue on, Application of Lightwave Technology to Microwave Devices, Circuits and Systems, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-38, 1990.
24. Kessler, J., Dill, R., 1992. Influence of buffer layers within $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ coplanar waveguide structure. **IEEE Microwave and Guided Wave Letters**, **2** (1): 6-7.
25. 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.
26. Itoh, T., 1989. Numerical Technique for Microwave and Millimeter-wave Passive Circuits. Wiley, New York.
27. 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.
28. Karpuz, C., 1995. Yavaş-Dalgalı Transmisyon Hatları. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
29. Karpuz, C., 2001. Mikrodalga Filtrelerinin Minyatürizasyonu İçin Yeni Planar Rezonatörlerin Tasarımı. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri.
30. Türkmen, M., 2003. Farklı Geometrik Yapılardaki Mikrodalga İletim Hatlarının Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
31. Kaya, S., 2006. Kuplajlı İletim Hatlarının Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
32. Veyres, C., Hanna, V. F., 1980. Extension of the application of conformal mapping techniques to coplanar lines with finite dimensions. **International Journal of Electronics**, **48** (1): 47-56.
33. Ghione, G., Naldi, C., 1984. Analytical formulas for coplanar lines in hybrid and monolithic MICs. **Electronics Letters**, **20** (4): 179-181.
34. Kitazawa, T., Kuo, C. W., Kong, K. S., Itoh, T., 1991. Planar transmission lines with finitely thick conductors and lossy substrates, pp. 769-772. *1991 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 10-14 Jul 1991*.
35. Su, H.-C., Wong, K.-L., 1997. Quasistatic solutions of cylindrical coplanar waveguides. **Microwave and Optical Technology Letters**, **14** (6): 347-351.
36. Kiang, J. F., 1996. Quasi-TEM analysis of coplanar waveguides with an inhomogeneous semiconductor substrate. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **44** (9): 1586-1589.
37. 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, pp. 1311-1314. *1999 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 1999*.
38. Simons, R. N., 2001. Coplanar Waveguide Circuits, Components and Systems. John Wiley and Sons.

39. Gorur, A., Karpuz, C., 1999. Quasi-TEM analysis of coplanar waveguides with different ground-plane widths. **Microwave and Optical Technology Letters**, **20** (5): 311-315.
40. Karpuz, C., Duyar, M., Gorur, A., 2000. Analysis of cylindrical conductor-backed coplanar waveguides. **Microwave and Optical Technology Letters**, **27** (2): 144-146.
41. Karpuz, C., Gorur, A., 1999. Quasistatic solutions of elliptical coplanar waveguides. **Microwave and Optical Technology Letters**, **20** (6): 385-389.
42. Akan, V., Yazgan, E., 2004. Quasistatic TEM characteristics of multilayer elliptical and cylindrical coplanar waveguides. **Microwave and Optical Technology Letters**, **42** (4): 317-322.
43. Duyar, M., 1999. Çok Katlı Koplanar Dalga Kılavuzları ve Koplanar Şeritlerin Quasi-Statik Analizi. Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Niğde.
44. Duyar, M., 2006. Değişik Kesitli Eşdüzlemsel İletim Hatlarının Konformal Dönüşüm Tekniği Kullanılarak Analizi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Konya.
45. Davis, M. E., Williams, E. W., Celestini, A. C., 1973. Finite-boundary corrections to the coplanar waveguide analysis. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **21** (9): 594-596.
46. 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.
47. 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.
48. 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.
49. Wolff, I., 2006. Coplanar Microwave Integrated Circuits. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.
50. 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.
51. Hanna, V. F., Thebault, D., 1981. Analysis of asymmetrical coplanar waveguides. **International Journal of Electronics**, **50** (3): 221-224.
52. Hanna, V. F., Thebault, D., 1984. Theoretical and experimental investigation of asymmetric coplanar waveguides. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **32** (12): 1649-1651.
53. Karpuz, C., Gorur, A., Gorur, H., Alkan, M., 1995. Fast and simple analytical expressions for quasistatic parameters of asymmetric coplanar lines. **Microwave and Optical Technology Letters**, **9** (6): 334-336.
54. Chen, P., Shao-Jun, F., Wang, E.-C., 2005. Analysis of characteristic impedance of asymmetric coplanar waveguide using finite-difference time-domain method, pp. 91-94. *2005 IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications 8-12 Aug. 2005.*

55. 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.
56. 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.
57. 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.
58. 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.
59. Alkan, M., Gorur, A., Karpuz, C., 1998. Quasistatic analysis of cylindrical coplanar waveguide with multilayer dielectrics. **International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering**, **8** (4): 303-314.
60. Gorur, A., Duyar, M., Karpuz, C., 1999. Analytic formulas for calculating the quasistatic parameters of a multilayer cylindrical coplanar strip line. **Microwave and Optical Technology Letters**, **22** (6): 432-436.
61. Bedair, S. S., Wolff, I., 1992. Fast, accurate and simple approximate analytic formulas for calculating the parameters of supported coplanar waveguides for (M)MICs. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **40** (1): 41-48.
62. 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.
63. Gorur, A., Karpuz, C., Alkan, M., 1996. Quasistatic TEM characteristics of overlayed supported asymmetric coplanar waveguides. **International Journal of Microwave and Millimeter-Wave Computer-Aided Engineering**, **6** (5): 297-304.
64. Svacina, J., 1992. Parameters of multilayer asymmetric coplanar waveguide, modeling, measurements and control. **AMSE Press**, **48** (2): 37-45.
65. 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.
66. 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.
67. Bedair, S. S., 1984. Characteristics of some asymmetrical coupled transmission lines. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **32** (1): 108-110.
68. 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.
69. Chiou, H. K., Chang, C. Y., Lin, H. H., 1995. Balun design for uniplanar broadband double balanced mixer. **Electronics Letters**, **31** (24): 2113-2114.

70. 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.
71. Goverdhanam, K., Simons, R. N., Katehi, L. P. B., 1998. Micro-coplanar striplines - New transmission media for microwave applications, pp. 1035-1038. *1998 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 7-12 Jun 1998*.
72. 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.
73. Gorur, 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.
74. Qian, Y. X., Yamashita, E., 1990. Additional approximate formulas and experimental-data on micro coplanar striplines. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **38** (4): 443-445.
75. Svacina, J., 1997. Special types of coplanar transmission lines suitable up to mm-wave bands, pp. 99-102. *IEEE 6th Topical Meeting on Electrical Performance of Electronic Packaging, 1997*.
76. Deng, T. Q., Leong, M. S., Kooi, P. S., 1995. Accurate and simple closed-form formulas for coplanar waveguide synthesis. **Electronics Letters**, **31** (23): 2017-2019.
77. Deng, T. Q., 1996. CAD model for coplanar waveguide synthesis. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, **44** (10): 1733-1738.
78. 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): 2253-2254.
79. Deng, T. Q., Leong, M. S., Kooi, P. S., Yeo, T. S., 1997. Synthesis formulas simplify coplanar-waveguide design. **Microwaves RF**, **36** (3): 84-98.
80. Yildiz, C., Turkmen, M., 2004. New and very simple CAD models for coplanar waveguide synthesis. **Microwave and Optical Technology Letters**, **41** (1): 49-53.
81. Yildiz, C., 2005. New and very simple synthesis formulas for coplanar strip line. **Microwave and Optical Technology Letters**, **44** (2): 199-202.
82. Yildiz, C., Turkmen, M., 2008. Synthesis formulas for conductor-backed coplanar waveguide. **Microwave and Optical Technology Letters**, **50** (4): 1115-1117.
83. 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.
84. Guney, K., Yildiz, C., Kaya, S., Turkmen, M., 2007. New and accurate synthesis formulas for multilayer homogeneous coupling structure. **Microwave and Optical Technology Letters**, **49** (10): 2486-2489.
85. Guney, K., Yildiz, C., Kaya, S., Turkmen, M., 2007. Synthesis formulas for multilayer homogeneous coupling structure with ground shielding. **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**, **21** (14): 2073-2084.

86. 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.
87. 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.
88. Kışioğlu, H., 2011. Yapay Arı Kolonisi Algoritması Kullanarak Eş Düzlemli Dalga Kılavuzları ve Şerit Hatların Tasarımı. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
89. 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**: 218-224.
90. Yildiz, C., Guney, K., Turkmen, M., Kaya, S., 2007. Neural models for coplanar strip line synthesis. **Progress in Electromagnetics Research**, **69**: 127-144.
91. 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.
92. Kaya, S., Guney, K., Yildiz, C., Turkmen, M., 2011. New and accurate synthesis formulas for asymmetric conductor-backed coplanar waveguides. **Microwave and Optical Technology Letters**, **53** (1): 211-216.
93. Price, K. V., 1996. Differential evolution: A fast and simple numerical optimizer, pp. 524-527. *1996 Biennial Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society, 19-22 Jun 1996*.
94. Storn, R., K. Price, 1995. Differential Evolution-a Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization Over Continuous Spaces, Technical Report TR-95-012. *International Computer Science Institute (ICSI), Berkeley, California, USA, 1995*.
95. Holland, J., 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press, Michigan.
96. Goldberg, D., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Reading, MA: Addison-Wesley.
97. Kennedy, J., Eberhart, R., 1995. Particle swarm optimization, pp. 1942-1948. *Int. Conf. Neural Networks, 1995, Perth, Australia*.
98. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., Vecchi, M. P., 1983. Optimization by simulated annealing. **Science**, **220** (4598): 671-680.
99. Michalski, K. A., 2000. Electromagnetic imaging of circular-cylindrical conductors and tunnels using a differential evolution algorithm. **Microwave and Optical Technology Letters**, **27** (5): 330-334.
100. Michalski, K. A., 2001. Electromagnetic imaging of elliptical-cylindrical conductors and tunnels using a differential evolution algorithm. **Microwave and Optical Technology Letters**, **28** (3): 164-169.
101. Anyong, Q., 2003. Electromagnetic inverse scattering of multiple two-dimensional perfectly conducting objects by the differential evolution strategy. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **51** (6): 1251-1262.

102. Luo, X. F., Oing, A., Lee, C. K., 2005. Application of the differential-evolution strategy to the design of frequency-selective surfaces. **International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering**, **15** (2): 173-180.
103. Luo, X. F., Teo, P. T., Qing, A., Lee, C. K., 2005. Design of double-square-loop frequency-selective surfaces using differential evolution strategy coupled with equivalent-circuit model. **Microwave and Optical Technology Letters**, **44** (2): 159-162.
104. Akdagli, A., Guney, K., 2000. Effective patch radius expression obtained using a genetic algorithm for the resonant frequency of electrically thin and thick circular microstrip antennas. **IEE Proceedings-Microwaves Antennas and Propagation**, **147** (2): 156-159.
105. Liu, W. C., 2005. Design of a CPW-fed notched planar monopole antenna for multiband operations using a genetic algorithm. **IEE Proceedings-Microwaves Antennas and Propagation**, **152** (4): 273-277.
106. Sedaghat-Pisheh, H., Naghshi, M., Rashed-Mohassel, J., Shahabadi, M., Aliakbarian, H., Razavi, F., 2007. Genetic algorithm optimization of a CPW-fed on-chip slot loop antenna on photonic crystal substrate using silicon micromachining, pp. 177-180. *2007 IEEE Radio and Wireless Symposium, 9-11 Jan. 2007.*
107. Wang, W., Lu, Y. L., Fu, J. S., Xiong, Y. Z., 2005. Particle swarm optimization and finite-element based approach for microwave filter design. **IEEE Transactions on Magnetics**, **41** (5): 1800-1803.
108. Liu, W. C., 2005. Design of a multiband CPW-fed monopole antenna using a particle swarm optimization approach. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **53** (10): 3273-3279.
109. Akdagli, A., Guney, K., 2006. New wide-aperture-dimension formula obtained by using a particle swarm optimization for optimum gain pyramidal horns. **Microwave and Optical Technology Letters**, **48** (6): 1201-1205.
110. Xu, S., Rahmat-Samii, Y., Gies, D., 2006. Shaped-reflector antenna designs using particle swarm optimization: An example of a direct-broadcast satellite antenna. **Microwave and Optical Technology Letters**, **48** (7): 1341-1347.
111. Chauhan, N., Mittal, A., Wagner, D., Kartikeyan, M. V., Thumm, M. K., 2008. Design and optimization of nonlinear tapers using particle swarm optimization. **International Journal of Infrared and Millimeter Waves**, **29** (8): 792-798.
112. Vicente-Lozano, M., Ares-Pena, F., Moreno-Piquero, E., 2000. Synthesis of tapered transmission lines with characteristic impedance optimization. **Microwave and Optical Technology Letters**, **24** (4): 277-281.
113. Chu, G., Yunyi, W., Duxin, C., 2004. Equivalent circuits modeling of coplanar waveguide structures using simulated annealing method, pp. 2739-2742. *2004 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 20-25 June 2004.*
114. Chi, H., Zhang, X., 2004. FIR photonic microwave filter design employing simulated annealing algorithm. **International Journal of Infrared and Millimeter Waves**, **25** (12): 1757-1764.
115. Kosko, B., 1992. Fuzzy systems as universal approximators, pp. 1153-1162. *1992 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 8-12 Mar 1992.*

116. Jang, J. S. R., 1993. ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, **23** (3): 665-685.
117. Jang, J.-S. R., Sun, C. T., Mizutani, E., 1997. Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
118. Marquardt, D. W., 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. **11**: 431-441.
119. Dennis, J. E., 1977. Nonlinear Least-Squares, State of the Art in Numerical Analysis. Academic Press, Orlando.
120. Ozer, S., Guney, K., Kaplan, A., 2000. Computation of the resonant frequency of electrically thin and thick rectangular microstrip antennas with the use of fuzzy inference systems. **International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering**, **10** (2): 108-119.
121. Kaplan, A., Guney, K., Ozer, S., 2001. Fuzzy associative memories for the computation of the bandwidth of rectangular microstrip antennas with thin and thick substrates. **International Journal of Electronics**, **88** (2): 189-195.
122. Guney, K., Sarikaya, N., 2004. Adaptive neuro-fuzzy inference system for computing the resonant frequency of circular microstrip antennas. **Applied Computational Electromagnetics Society Journal**, **19** (3): 188-197.
123. Guney, K., Sarikaya, N., 2004. Computation of resonant frequency for equilateral triangular microstrip antennas using the adaptive neuro-fuzzy inference system. **International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering**, **14** (2): 134-143.
124. Guney, K., Sarikaya, N., 2004. Input resistance calculation for circular microstrip antennas using adaptive neuro-fuzzy inference system. **International Journal of Infrared and Millimeter Waves**, **25** (4): 703-716.
125. Guney, K., Sarikaya, N., 2004. Adaptive neuro-fuzzy inference system for the input resistance computation of rectangular microstrip antennas with thin and thick substrates. **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**, **18** (1): 23-39.
126. Guney, K., Sarikaya, N., 2006. Adaptive neuro-fuzzy inference system for computing the physical dimensions of electrically thin and thick rectangular microstrip antennas. **International Journal of Infrared and Millimeter Waves**, **27** (2): 219-233.
127. Guney, K., Sarikaya, N., 2006. Adaptive neuro-fuzzy inference system for computing patch radius of circular microstrip antennas. **Microwave and Optical Technology Letters**, **48** (8): 1606-1610.
128. Guney, K., Sarikaya, N., 2006. Adaptive neuro-fuzzy inference system for the computation of the bandwidth of electrically thin and thick rectangular microstrip antennas. **Electrical Engineering**, **88** (3): 201-210.
129. Guney, K., Sarikaya, N., 2007. Adaptive neuro-fuzzy inference system for computing the resonant frequency of electrically thin and thick rectangular microstrip antennas. **International Journal of Electronics**, **94** (9): 833-844.
130. Guney, K., Sarikaya, N., 2007. Resonant frequency calculation for circular microstrip antennas with a dielectric cover using adaptive network-based fuzzy inference system optimized by various algorithms. **Progress in Electromagnetics Research**, **72**: 279-306.

131. Guney, K., Sarikaya, N., 2008. Adaptive-network-based fuzzy inference system models for narrow aperture dimension calculation of optimum gain pyramidal horns. **Neural Network World**, **18** (5): 341-363.
132. Rahouyi, E. B., Hinojosa, J., Garrigos, J., 2006. Neuro-fuzzy modeling techniques for microwave components. **IEEE Microwave and Wireless Components Letters**, **16** (2): 72-74.
133. Hinojosa, J., Domenech-Asensi, G., 2007. Space-mapped neuro-fuzzy optimization for microwave device modeling. **Microwave and Optical Technology Letters**, **49** (6): 1328-1334.
134. Hinojosa, J., Domenech-Asensi, G., Martinez-Alajarin, J., 2007. Development of VHDL-AMS neuro-fuzzy behavioral models for RF/Microwave passive components. **International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering**, **17** (3): 335-344.
135. Hinojosa, J., Pereira, F. D. Q., Martinez-Mendoza, M., Alvarez-Melcon, A., 2011. Optimization-oriented design of RF/Microwave circuits using inverse-linear-input neuro-fuzzy-output space mapping with two different dimensionality simulators. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I-Regular Papers**, **58** (1): 176-185.
136. 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.
137. Yildiz, C., Guney, K., Turkmen, M., Kaya, S., 2009. Analysis of conductor-backed coplanar waveguides using adaptive-network-based fuzzy inference system models. **Microwave and Optical Technology Letters**, **51** (2): 439-445.
138. Türkmen, M., 2009. Mikrodalga İletim Hatlarının Bulanık Sinir Ağları ile Modellenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri.
139. Turkmen, M., Yildiz, C., Guney, K., Kaya, S., 2010. Adaptive-network-based fuzzy inference system models for computing the characteristic impedances of air-suspended trapezoidal and rectangular-shaped microshield lines. **Microwave and Optical Technology Letters**, **52** (1): 20-24.
140. Turkmen, M., Yildiz, C., Guney, K., Kaya, S., 2010. ANFIS models for the quasistatic analysis of coplanar strip line structures. **Microwave and Optical Technology Letters**, **52** (9): 1990-1996.
141. Zeland Software Inc., I. D., Version 12.12, (Web page: <http://www.zeland.com>), (Date accessed: January 2008).
142. Kaya, S., Guney, K., 2011. New and accurate synthesis formulas for asymmetric coplanar waveguides. **Microwave and Optical Technology Letters**, **53** (9): 1991-1996.
143. 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.
144. Guney, K., Yildiz, C., Kaya, S., Turkmen, M., 2008. Synthesis formulas for microcoplanar striplines. **Microwave and Optical Technology Letters**, **50** (11): 2884-2888.
145. 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.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı : Sabri KAYA
 Uyruğu : Türkiye (TC)
 Doğum Tarihi ve Yeri: 2 Mart 1981, Kayseri
 Medeni Durumu : Evli
 Tel : +90 352 437 49 01/32209
 Faks : +90 352 437 57 84
 E-mail : sabrikaya@erciyes.edu.tr
 Yazışma Adresi : Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
 Elektrik-Elektronik Bölümü, 38039 Talas/KAYSERİ

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	ERÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Müh. A.B.D.	2006
Lisans	ERÜ Mühendislik Fak. Elektronik Bölümü	2004
Lise	Kayseri Melikgazi Lisesi	1999

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2004-	Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Bölümü	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Guney, K., Yildiz, C., Kaya, S., Turkmen, M., 2006. Artificial neural networks for calculating the characteristic impedance of air-suspended trapezoidal and rectangular-shaped microshield lines. **Journal of Electromagnetic Waves and Applications (JEMWA)**, **20** (9): 1161-1174.
2. Guney, K., Yildiz, C., Kaya, S., Turkmen, M., 2006. Neural models for the broadside-coupled V-shaped microshield coplanar waveguides. **International Journal of Infrared and Millimeter Waves**, **27** (9): 1241-1255.
3. Yildiz, C., Guney, K., Turkmen, M., Kaya, S., 2007. Neural models for coplanar strip line synthesis. **Progress in Electromagnetics Research (PIER)**, **69**: 127-144.

4. Guney, K., Yildiz, C., Kaya, S., Turkmen, M., 2007. Neural models for the V-shaped conductor-backed coplanar waveguides. **Microwave and Optical Technology Letters**, **49** (6): 1294-1299.
5. Guney, K., Yildiz, C., Kaya, S., Turkmen, M., 2007. New and accurate synthesis formulas for multilayer homogeneous coupling structure. **Microwave and Optical Technology Letters**, **49** (10): 2486-2489.
6. Yildiz, C., Guney, K., Turkmen, M., Kaya, S., 2007. Neural models for quasi-static analysis of conventional and supported coplanar waveguides. **AEÜ International Journal of Electronics and Communications**, **61** (8): 521-527.
7. Guney, K., Yildiz, C., Kaya, S., Turkmen, M., 2007. Synthesis formulas for multilayer homogeneous coupling structure with ground shielding. **Journal of Electromagnetic Waves and Applications (JEMWA)**, **21** (14): 2073-2084.
8. 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.
9. Guney, K., Yildiz, C., Kaya, S., Turkmen, M., 2008. Synthesis formulas for micro-coplanar striplines. **Microwave and Optical Technology Letters**, **50** (11): 2884-2888.
10. Yildiz, C., Guney, K., Turkmen, M., Kaya, S., 2009. Analysis of conductor-backed coplanar waveguides using adaptive-network-based fuzzy inference system models. **Microwave and Optical Technology Letters**, **51** (2): 439-455.
11. 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**, **50** (2): 109-116.
12. Turkmen, M., Yildiz, C., Guney, K., Kaya, S., 2010. Adaptive-network-based fuzzy inference system models for computing the characteristic impedances of air-suspended trapezoidal and rectangular-shaped microshield lines. **Microwave and Optical Technology Letters**, **52** (1): 20-24.
13. 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.
14. 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.
15. Kaya, S., Guney, K., Yildiz, C., Turkmen, M., 2011. New and accurate synthesis formulas for asymmetric conductor-backed coplanar waveguides. **Microwave and Optical Technology Letters**, **53** (1): 211-216.
16. Kaya, S., Guney, K., 2011. New and accurate synthesis formulas for asymmetric coplanar waveguides. **Microwave and Optical Technology Letters**, **53** (9): 1991-1996.