

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

**FARKLI GEOMETRİK YAPILARDAKİ MİKRODALGA
İLETİM HATLARININ YAPAY SİNİR AĞLARI İLE
MODELENMESİ**

138918

**Tezi Hazırlayan
Mustafa TÜRKMEN**

**Tez Yöneticisi
Yrd. Doç. Dr. Celal YILDIZ**

**Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

138918

**Haziran 2003
KAYSERİ**

Bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

12.17/2003

JÜRİ:

Üye : Prof. Dr. Kenan DANIŞMAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Celal YILDIZ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ö. Galip SARAÇOĞLU

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun ...17/-07-2003..... tarih ve0...8.... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

15 EKİM 2003
.....17/2003

Prof. Dr. İlhan ÖZTÜRK
Enstitü Müdürü



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının danışmanlığını yürüten ve benden maddi manevi hiçbir desteği esirgemeyen saygı değer hocam **Yrd. Doç. Dr. Celal YILDIZ**'a ve bilimsel desteklerinin yanı sıra manevi desteklerinden dolayı da sayın hocam **Doç. Dr. Şeref SAĞIROĞLU**'na, sevgi ve minnet sözcüklerinin yetersiz kaldığı, emeklerini tarif bile edemeyeceğim sevgili **aileme** ve son olarak ta tüm **dostlarıma** sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.



FARKLI GEOMETRİK YAPILARDAKİ MİKRODALGA İLETİM HATLARININ YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MODELLENMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, mikrodalga uygulamaları için önemli iletim ortamları olan ve farklı geometrik boyutlarda gerçekleştirilebilen iletim hatlarının karakteristik parametre değerleri olan efektif dielektrik sabitleri ve karakteristik empedansları, yapay sinir ağları (YSA) kullanılarak modellenmiştir. Elde edilen sonuçların literatürdeki deneysel, teorik ve bilgisayar destekli tasarım (CAD) modelleriyle elde edilen sonuçlarla iyi bir uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmada, YSA'ların cazip özellikleri kullanılarak yüksek doğruluklara sahip modeller sunulmuştur.

Tez çalışması yedi bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, farklı geometrik boyutlardaki mikrodalga iletim hatları tanıtılmış ve bu iletim hatlarının analizlerinde kullanılan metotlarla ilgili literatür bilgisi verilmiştir. Ardından YSA'ların elektromanyetik ve mikrodalga problemlerine uygulamalarından söz edilerek tezin amacı ortaya konmuştur. İkinci bölümde, düzlemsel iletim hatlarının farklı geometrik yapılarının analizlerinde kullanılabilecek alternatif metotlara örnek olması bakımından literatürde yaygın bir şekilde kabul görmekte olan konform dönüşümleri ile yapılan analizler ve düzlemsel iletim hatlarının karakteristik parametreleri için ortaya konulan analitik ifadeler incelenmiştir. Üçüncü bölümde, silindirik iletim hatlarının farklı geometrik yapılarına ilişkin analitik ifadeler ve analiz yöntemlerinin detaylarına yer verilmiştir. Dördüncü bölümde YSA'ların tarihsel gelişimi, hesaplama özellikleri verilerek, yapılarına ve öğrenme algoritmalarına göre sınıflandırılmalarından bahsedilmiştir. Beşinci bölümde, tez çalışmasına konu olan düzlemsel mikrodalga iletim hatlarının YSA kullanılarak nasıl modellendiği açıklanmış ve her bir yapıya ait YSA modelleri ve sonuçlarına yer verilmiştir. Altıncı bölümde, silindirik mikrodalga iletim hatlarına ait YSA modelleri verilmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Yedinci bölümde ise tez çalışmasında elde edilen bulgular ve sonuçlar tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mikrodalga iletim hatları, efektif dielektrik sabiti, karakteristik empedans ve yapay sinir ağları.

MODELING OF MICROWAVE TRANSMISSION LINES IN DIFFERENT GEOMETRIC STRUCTURES WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

ABSTRACT

In thesis, characteristic parameters of coplanar transmission lines in different geometric structures, which are very important transmission medias for microwave applications, have been determined by using artificial neural networks (ANNs). Results obtained have good agreement with experimental, theoretical, and computed (CAD) results available in the literature. In this study, ANN models were proposed in very high accuracy.

This thesis consists of seven chapters. In the first chapter, transmission lines in different geometric structures have been introduced and the literature reviews on the methods used for analyzing these structures have been given. The aim of the thesis has been then presented and ANN applications to electromagnetic and microwave engineering have been briefly reviewed. In the second chapter, conformal mapping method, most commonly used to analyze planar transmission lines in different geometric structures, has been examined. The proposed analytical expressions for characteristic parameters of these transmission lines have been given. In the third chapter, conformal mapping method used to analyze cylindrical transmission lines in different geometric structures, and obtained analytical expressions belonging to these transmission lines have been reviewed. In the fourth chapter the historical improvements and calculation techniques of ANNs, classifications of the ANN structures and learning algorithms have been given. In the fifth chapter, presented ANN models to determine the characteristic parameters of the planar structures have been given and their results have been expressed. In the sixth chapter, the models proposed for cylindrical transmission lines and their results have been given. Results obtained from this work have been presented and the work is then concluded in the last chapter.

Keywords: Transmission lines, effective dielectric constant, characteristic impedance and artificial neural networks.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	III
ÖZET	IV
ABSTRACT	V
İÇİNDEKİLER.....	VI
KISALTMALAR VE SİMGELER.....	X
TABLolar LİSTESİ	XIII
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	XIV

BÖLÜM 1

SUNUŞ

1.1	Giriş.....	1
1.2	Literatür Taraması	5
1.3	Tezin Amacı	10

BÖLÜM 2

DÜZLEMSEL İLETİM HATLARI

2.1	Giriş.....	12
2.1.1	Sonsuz Kalınlıktaki Dielektrik Tabana Sahip Geleneksel CPW'ler	12
2.1.2	Sonlu Kalınlıktaki Dielektrik Tabana Sahip Geleneksel CPW'ler	17
2.1.3	Alt Korumalı CPW'ler	20
2.1.4	Alt ve Üst Korumalı CPW'ler.....	23
2.2	Çok Katmanlı CPW'ler	25
2.2.1	Sandviç CPW'ler.....	25
2.2.2	Alt Korumalı Sandviç CPW'ler	28
2.2.3	Üst Korumalı Sandviç CPW'ler.....	30
2.2.4	İletken Destekli Sandviç CPW'ler	32
2.2.5	Alt ve Üst Korumalı SCPW'ler.....	34

BÖLÜM 3

SİLİNDİRİK İLETİM HATLARI

3.1	Giriş.....	40
3.1.1	Tek Katmanlı Silindirik Simetrik CPW'ler.....	41
3.1.2	Silindirik Asimetrik CPW'ler.....	45
3.1.3	Çok Katmanlı Silindirik Simetrik CPW'ler	50
3.2	Silindirik CPS'ler	52

3.2.1	Çok katmanlı Silindirik CPS'ler	52
-------	---------------------------------------	----

BÖLÜM 4

YAPAY SİNİR AĞLARI

4.1	Giriş.....	57
4.1.1	Biyolojik nöron yapısı.....	57
4.1.2	Yapay Sinir Ağlarının Tarihsel Gelişimi	59
4.1.3	Yapay Sinir Ağlarının Genel Özellikleri.....	62
4.1.4	Yapay Nöron	63
4.1.5	Transfer Fonksiyonları	64
4.2	YSA'ların Hesaplama Özellikleri	66
4.2.1	Doğrusal Olmama	66
4.2.2	Öğrenme	66
4.2.3	Genelleme Yapabilme	66
4.2.4	Adaptasyon (Uyarlanabilirlik).....	67
4.2.5	Donanım Olarak Gerçekleştirilebilme	67
4.2.6	Hataya Karşı Duyarlılık	67
4.3	YSA'ların Sınıflandırılması	67
4.3.1	YSA'ların Ağ Yapılarına Göre Sınıflandırılması.....	67
4.3.1.1	İleri Beslemeli Ağ Yapısı.....	68
4.3.1.2	Geri Beslemeli Ağ Yapısı	68
4.3.2	YSA'ların Öğrenme Algoritmalarına Göre Sınıflandırılması.....	69
4.3.2.1	Danışmanlı Öğrenme Metodu	69
4.3.2.2	Danışmansız Öğrenme Metodu.....	70
4.3.2.3	Takviyeli Öğrenme Metodu	70
4.3.3	Yapay Sinir Ağı Yapıları.....	70
4.3.3.1	Çok Katmanlı Perseptron (ÇKP) YSA Yapısı	70
4.3.3.2	LVQ Yapıları.....	71
4.3.3.3	Elman ve Jordan Ağları.....	72
4.3.3.4	Kohonen Ağı	73
4.3.3.5	Radyal Tabanlı Yapay Sinir Ağı (RTYSA) Yapıları	74
4.3.4	YSA'ların Öğrenme Algoritmaları.....	75
4.3.4.1	Geri Yayılım (BP)	75
4.3.4.2	Momentumlu Geri Yayılım (BPM).....	76

4.3.4.3	Esnek Geri Yayılım (BPR).....	76
4.3.4.4	Eşleştirmeli Gradyent (Conjugate Gradient) Azaltma Geri Yayılım (CGF).	77
4.6.4.4.1	Fletcher-Reeves (FR) Yöntemi	77
4.6.4.4.2	Polak-Ribière (PR) Yöntemi	78
4.6.4.4.3	Powell-Beale (PB) Yöntemi.....	78
4.6.5	Quasi-Newton (QN)	78
4.6.6	Delta-Bar-Delta (DBD)	79
4.6.7	Genişletilmiş Delta-Bar-Delta (EDBD)	80
4.6.8	Levenberg Marquardt (LM)	81
4.6.9	Bayesian Düzenlileştirme (BD) Öğrenme Algoritması	82
4.6.10	Tek Adım Sekant (TAS) Öğrenme Algoritması	82

BÖLÜM 5

DÜZLEMSEL İLETİM HATLARININ YSA İLE MODELLENMESİ

5.1	Giriş.....	83
5.2	Sonsuz Kalınlıktaki Dielektrik Tabana Sahip Geleneksel CPW'ler için Sunulan YSA Modeli	84
5.3	Sonlu Kalınlıktaki Dielektrik Tabana Sahip CPW'lerin YSA Modeli	88
5.4	Alt Korumalı CPW'ler için Sunulan YSA Modeli	91
5.5	Alt ve Üst Korumalı CPW'ler için Sunulan YSA Modeli	94
5.6	Sandviç CPW'ler için Sunulan YSA Modeli	97
5.7	Alt Korumalı SCPW'ler için Sunulan YSA Modeli	102
5.8	Üst Korumalı SCPW'ler için Sunulan YSA Modeli.....	105
5.9	İletken Destekli SCPW'ler için Sunulan YSA Modeli	107
5.10	Alt ve Üst Korumalı SCPW'ler için Sunulan YSA Modeli.....	111

BÖLÜM 6

SİLİNDİRİK İLETİM HATLARININ YSA İLE MODELLENMESİ

6.1	Giriş.....	116
6.2	Tek Katmanlı Simetrik Silindirik CPW'ler için Sunulan YSA Modeli	116
6.3	Asimetrik Silindirik CPW'ler için Sunulan YSA Modeli.....	119
6.4	Çok Katmanlı Silindirik CPW'ler için Sunulan YSA Modeli	122
6.5	Çok Katmanlı Silindirik CPS'ler için Sunulan YSA Modeli.....	127

BÖLÜM 7
SONUÇLAR

KAYNAKLAR.....	137
ÖZGEÇMİŞ	151



KISALTMALAR VE SİMGELER

TEM	Enine Elektromanyetik
MIC	Mikrodalga Entegre Devreler
MMIC	Monolitik Mikrodalga Entegre Devreler
CPW	Coplanar Waveguides; Eş düzlemli dalga kılavuzları
CMT	Conformal Mapping Theory; Konform dönüşüm tekniği
FEM	Finite Element Method; Sonlu farklar metodu
SDA	Spektral Domen Analizi
CAD	Computer Aided Design; Bilgisayar destekli tasarım
GHz	Giga Hertz
CPS	Coplanar Strips
CTL	Coplanar Transmission Lines; Eş düzlemli iletim hatları
HTSC	Yüksek sıcaklıklı süper iletken
TWM	Entegre optik ilerleyen dalgalı modülatörler
ve ark.	ve arkadaşları
YSA	Yapay sinir ağları
FET	Field Effect Transistor; Alan etkili transistör
HBT	Heterojunction Bipolar Transistor
HEMT	High Electron Mobility Transistor
GA	Genetik algoritma
SCPW	Sandviç CPW
CBSCPW	İletken destekli SCPW
CCPW	Silindirik CPW
ACCPW	Asimetrik CCPW
DOÖ	Diferansiyel optik örnekleme
Si	Silisyum
SOI	Si-on-insulator; Yalıtkan üzerindeki silisyum
MCPW	Çok katmanlı CPW
MCCPW	Çok katmanlı CCPW
CCPS	Silindirik CPS
MCCPS	Çok katmanlı CCPS
ÇKP	Çok katlı perseptron

İEÇ	İşlemci eleman çıkışı
RBF	Radyal tabanlı fonksiyon
LVQ	Learning Vector Quantization
SOM	Self Organizing Map
ART	Adaptif rezonans teorisi
RTYSA	Radyal tabanlı yapay sinir ağı
BP	Geri yayılım
BPM	Grup momentumlu BP
BPR	Resilient-BP
CGF	Eşleştirmeli gradiyent azaltma
QN	Quasi-Newton
DBD	Delta-Bar-Delta
EDBD	Extended DBD; Genişletilmiş DBD
LM	Levenberg-Marquardt
BD	Bayesian Düzenleme
TAS	Tek Adım Sekant
FR	Fletcher-Reeves
PR	Polak-Ribière
PB	Powell-Beale
RMS	Root Mean Square
Adaline	Adaptif Lineer Neuron
Madaline	Multiple Adaline
ϵ_{eff}	Efektif dielektrik sabiti
Z_0	Karakteristik empedans
ϵ_r	Bağıl dielektrik sabiti
v_{ph}	Faz hızı
c	Boş uzaydaki ışık hızı
q_i	Kısmi doldurma faktörleri
ϵ_0	Boş uzayın dielektrik katsayısı
ϵ_i	Dielektrik katmanların efektif permitiviteeleri
φ, k_i	Eliptik integral modülleri
ϕ	Açısal uzunluk
C_i	Kısmi kapasite değeri

C_{air}, C_{0i}	Hava kapasite değerleri
$K(k_i), K(k_i')$	Birinci dereceden eliptik integraller
x_i	Nöron girişleri
w_{ij}	Ağırlık değerleri
θ_i	Eşik değeri
σ	Standart sapma
σ_i	Genişlikleri
X_i	Çok boyutlu giriş vektörleri
Δ	Değişim
y_i'	Hedeflenen çıkış değerleri
y_i	Nöron çıkış değerleri
$\eta, \alpha(k)$	Öğrenme katsayıları
μ	Momentum katsayısı
p	İterasyon
g	Gradyent
$\delta(k)$	Eğim bileşeni
$\bar{\delta}(k)$	Eğim bileşeninin ağırlıklı ortalaması
θ	Konveks ağırlık faktörü
κ	Artma faktörü veya derecelendirme sabiti
φ	Azaltma faktörü
γ	Üstel artırma faktörü
J	Jacobiyen matrisi
e	Ağ hata vektörü
T	Matrisin transpozesi
y_{dj}	Arzu edilen çıkış değerleri

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Biyolojik sinir sistemi ile YSA'ların karşılaştırılması.....	60
Tablo 4.2. İstatistiksel yöntemlerle YSA'ların terminolojik ilişkileri	61
Tablo 4.3. Bazı transfer fonksiyonlarının matematiksel ifadeleri	65
Tablo 5.1. Geleneksel CPW'ler için sunulan YSA modelinin algoritma performansları	86
Tablo 5.2. YSA modeliyle elde edilen karakteristik empedans $Z_0(\Omega)$ sonuçlarının klasik tekniklerle karşılaştırılması.....	89
Tablo 5.3. Alt korumalı CPW'ler için sunulan YSA modelinde algoritma performansları	92
Tablo 5.4. Alt ve üst korumalı CPW'ler için sunulan YSA modelinde algoritma performansları	95
Tablo 5.5. SCPW'ler için sunulan YSA modelinde algoritma performansları	98
Tablo 5.6. YSA modeliyle geleneksel CPW'lerin karakteristik empedansına $Z_0(\Omega)$ ait sonuçların klasik tekniklerle karşılaştırılması.....	99
Tablo 5.7. Alt korumalı SCPW'ler için sunulan YSA modelinde algoritma performansları	103
Tablo 5.8. Üst korumalı SCPW'ler için sunulan YSA modelinde algoritma performansları	106
Tablo 5.9. CBSCPW'ler için sunulan YSA modelinde algoritma performansları.....	109
Tablo 5.10. Alt ve üst korumalı SCPW'ler için sunulan YSA modelinde algoritma performansları	112
Tablo 6.1. ACCPW'ler için sunulan YSA modelinde algoritma performansları.....	120
Tablo 6.2. MCCPW'ler için sunulan YSA modelinde algoritma performansları	123
Tablo 6.3. MCCPS'ler için sunulan YSA modelinde algoritma performansları	128
Tablo 7.1. İletim hatlarına göre en iyi performansa sahip YSA yapılarının karşılaştırılması	135

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Sonsuz kalınlıktaki dielektrik tabana sahip eş düzlemli dalga kılavuzlarının kesit görünümü	14
Şekil 2.2. Düzlem dönüşümleri	14
Şekil 2.3. Sonlu kalınlıktaki dielektrik tabana sahip eş düzlemli dalga kılavuzlarının kesit görünümü	19
Şekil 2.4. Alt korumalı CPW'nin kesit görünümü	21
Şekil 2.5. Alt ve üst korumalı CPW'nin kesit görünümü.....	24
Şekil 2.6. SCPW'nin kesit görünümü	26
Şekil 2.7. Alt korumalı SCPW'nin kesit görünümü.....	30
Şekil 2.8. Üst korumalı SCPW'nin kesit görünümü	32
Şekil 2.9. CBSCPW'nin kesit görünümü	34
Şekil 2.10. Alt ve üst korumalı SCPW'nin kesit görünümü	35
Şekil 2.11. Alt ve üst korumalı SCPW'ler için konform dönüşümler.....	39
Şekil 3.1. Simetrik CCPW yapısı	44
Şekil 3.2. Düzlem dönüşümleri	44
Şekil 3.3. İletim elemanları dielektrik tabakanın iç yüzeyine yerleştirilmiş simetrik CCPW yapısı	45
Şekil 3.4. ACCPW yapısı	46
Şekil 3.5. ACCPW'nin hava kapasitesinin hesaplanabilmesi için gerekli olan düzlem dönüşümleri	47
Şekil 3.6. Dielektrik permitivitesi $\epsilon_r - 1$ olan bir dielektrik materyal ile doldurulmuş olan paralel plakalı kondansatör.....	49
Şekil 3.7. MCCPW yapısı	52
Şekil 3.8. MCCPS yapısı.....	53
Şekil 3.9. MCCPS'ler için düzlem dönüşümleri	54
Şekil 4.1. Biyolojik nöron	58
Şekil 4.2. Yapay nöron.....	63
Şekil 4.3. YSA'larda en çok kullanılmakta olan transfer fonksiyonları	64
Şekil 4.4. İleri beslemeli YSA yapısı	68
Şekil 4.5. Geri beslemeli YSA yapısı.....	69
Şekil 5.1. Geleneksel CPW'ler için sunulan YSA modeli	86

Şekil 5.2. Model sonuçlarının CMT sonuçları ile karşılaştırılması.....	87
Şekil 5.3. Sonlu kalınlıktaki dielektrik tabana sahip CPW'ler için sunulan YSA modeli	88
Şekil 5.4. CMT ile YSA modeli sonuçlarının karşılaştırılması.....	90
Şekil 5.5. Alt korumalı CPW'ler için sunulan YSA modeli	91
Şekil 5.6. Alt korumalı CPW'ye ait CMT ve YSA sonuçları	93
Şekil 5.7. Alt ve üst korumalı CPW'ler için sunulan YSA modeli.....	94
Şekil 5.8. Alt ve üst korumalı CPW'ye ait CMT ve YSA sonuçlarının karşılaştırılması.....	96
Şekil 5.9. SCPW'ler için sunulan YSA modeli.....	97
Şekil 5.10. Sunulan YSA modelin geleneksel CPW'ye ait sonuçlarının ölçüm sonuçları ve CMT sonuçları ile karşılaştırılması.....	100
Şekil 5.11. Sunulan YSA modelinden, SCPW'ler için elde edilen sonuçların CMT sonuçları ile karşılaştırılması	101
Şekil 5.12. Alt korumalı SCPW'ler için sunulan YSA modeli	102
Şekil 5.13. Alt korumalı SCPW'ler için sunulan YSA modelinden elde edilen sonuçların CMT sonuçları ile karşılaştırılması.....	104
Şekil 5.14. Üst korumalı SCPW'ler için sunulan YSA modeli.....	105
Şekil 5.15. Üst korumalı SCPW'ler için sunulan YSA modeli sonuçlarının CMT sonuçları ile karşılaştırılması	107
Şekil 5.16. CBSCPW'ler için sunulan YSA modeli	108
Şekil 5.17. CBSCPW'ler için sunulan YSA modeli sonuçlarının CMT sonuçları ile karşılaştırılması.....	110
Şekil 5.18. Alt ve üst korumalı SCPW'ler için sunulan YSA modeli.....	111
Şekil 5.19. Alt ve üst korumalı SCPW'ler için sunulan YSA modelinden üst korumalı CBCPW'ler için elde edilen sonuçların FEM ve CMT sonuçları ile karşılaştırılması	113
Şekil 5.20. Alt ve üst korumalı SCPW'ler için sunulan YSA modelinden farklı geometrik boyutlardaki CPW'ler için elde edilen sonuçların CMT sonuçları ile karşılaştırılması	114
Şekil 6.1. Tek katmanlı simetrik CCPW'ler için sunulan YSA modeli.....	117
Şekil 6.2. Tek katmanlı simetrik CCPW'ler için sunulan YSA modelinden elde edilen sonuçların CMT sonuçları ile karşılaştırılması	118

Şekil 6.3. ACCPW'ler için sunulan YSA modeli	120
Şekil 6.4. ACCPW'ler için sunulan YSA modeli sonuçlarının CMT sonuçları ile karşılaştırılması.....	121
Şekil 6.5. MCCPW'ler için sunulan YSA modeli.....	122
Şekil 6.6. MCCPW'ler için sunulan YSA modelinden tek katmanlı CCPW'ler için elde edilen sonuçların CMT sonuçları ile karşılaştırılması.....	124
Şekil 6.7. MCCPW'ler için sunulan YSA modelinden iki katmanlı CCPW'ler için elde edilen sonuçların CMT sonuçları ile karşılaştırılması	125
Şekil 6.8. Sunulan YSA modelinden MCCPW'ler için elde edilen sonuçların CMT sonuçları ile karşılaştırılması	126
Şekil 6.9. MCCPS'ler için sunulan YSA modeli	127
Şekil 6.10. MCCPS'ler için sunulan YSA modelinden tek katmanlı CCPS'ler için elde edilen sonuçların CMT sonuçları ile karşılaştırılması.....	129
Şekil 6.11. MCCPS'ler için sunulan YSA modelinden iki katmanlı CCPS'ler için elde edilen sonuçların CMT sonuçları ile karşılaştırılması.....	130
Şekil 6.12. Sunulan YSA modelinden MCCPS'ler için elde edilen sonuçların CMT sonuçları ile karşılaştırılması	131

BÖLÜM 1

SUNUŞ

1.1 Giriş

Mikrodalga devrelerindeki hızlı gelişmeler, ikinci dünya savaşı sırasında gerçekleşmiş ve radar problemlerine mikrodalga tekniklerini uygulamak amacıyla laboratuvarlar kurularak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Aynı zamanda yapılan 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 TEM (Transverse Electromagnetic: Enine Elektromanyetik) hatlar mikrodalga devrelerin gelişiminde sıkça kullanılan iki temel yapı olarak yer almışlardır. Dalga kılavuzları, yüksek kalite faktörlü boşluk rezonatörlerine imkan sağlayan düşük kayıplar ve yüksek güç kapasitesi sağlamışlardır. Koaksiyel hatlar ise bozulma etkileri olmadığından doğal olarak geniş bant aralığı sağlamıştır. Bu iki iletim hattı yapısı, mikrodalga devreler için önemli elemanlar olarak yer edinmiş ve birbirlerini bütünleyici olarak değerlendirilmişlerdir.

İki-iletkenli iletim hat teorisinin özel adaptasyonundan meydana gelen çok yararlı mikrodalga teknikleri bu aşamada ortaya çıkmış ve iletken 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 hassas bir teknoloji ile geliştirilmiştir. Şerit hat karakteristiklerinin detaylı bir şekilde hesaplanması, ilk olarak 1956 yılında Peters ve ark. [2] tarafından yapılmıştır. Şerit hatların en önemli özelliği, hattın karakteristik empedansının merkez şerit aralığı ile kontrol edilebilmesidir. Şerit hat devre konfigürasyonunun iki boyutlu yapısı, dış iletken korumalarının kesilmesine gerek kalmadan birçok elemanın ara bağlantısına ve giriş çıkış portlarının rahat bir şekilde yerleştirilmesine imkan sağlar.

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 1952 yılında Wheeler [3] tarafından ortaya konulmuştur.

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 elde edilen mikroşerit hatlar tasarlanmıştır [4, 5]. Bu yıllarda mikroşerit hatlar üzerine yoğun araştırmalar yapılmış ve tasarımlarda yaygın bir kullanım alanı bulmuşlardır. Ancak ısımanın sebep olduğu birim uzunluk başına düşen kayıplarının yüksek olması ve düşük dielektrik sabitine sahip taban malzemelerine ihtiyaç duymaları nedeniyle mikrodalga uygulamalarında pek kabul görmemişlerdir. Daha sonraki teknolojik gelişmeler, hem yüksek dielektrik sabitli ve düşük kayıplı malzemelerin kullanımını hem de işlem ve üretim için uygun metotların elde edilememesi gibi problemleri ortadan kaldırmıştır. Mikrodalga devre elemanlarının silah, roket ve uydu uygulamalarında kullanılabilmesi için gerekli olan boyut küçültmelerine olan ihtiyacın artması, 60'lı yıllarda mikroşerit hatlara olan ilgiyi artırmıştır. Mikrodalga yarı iletken elemanlar, ince film yoğunlaştırma ve fotolitografi tekniğindeki hızlı gelişmelerle birlikte kuplajlı mikroşerit hatlar gibi düzlemsel mikrodalga iletim hat yapısının kullanılmasıyla MIC (Microwave Integrated Circuits: Mikrodalga Entegre Devreler) teknolojisi doğmuştur [6-9]. MIC'ler, hibrid entegre devre teknolojisinin mikrodalga frekanslarının genişletilmesine imkan sağlarlar. Ayrıca sistem mühendislerine radar ve haberleşme sistemleri için boyutları küçük ve grup olarak kullanılmaları mümkün olan modülleri araştırma imkanı sunarlar. Fakat bu yıllarda radar ve haberleşme sistemleri iki taraflı olmayan manyetik elemanlar ihtiva etmekteydiler. Bu elemanların işlem alanı dairesel kutuplu RF (Radyo Frekans) manyetik alan gerektirmekteydi. Ancak daha önce kullanılan şerit ve mikroşerit hatlar gerekli olan bu alanı sağlayamıyorlardı. Ek olarak, bu hatların dielektrik tabanın karşı tarafına yerleştirilmiş olan toprak düzlemleri, birçok aktif mikrodalga devre elemanları için gerekli olan şönt bağlantılara kolayca erişilir olmasını engelliyordu. 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 zorlaştırmaktaydı. Bu durum boyut küçültülmesinin önemli olduğu düşük frekanslar için kesinlikle bir dezavantajdı. Bütün bu olumsuz gelişmeler, toprak düzlemi de dahil olmak üzere bütün

iletim elemanlarının dielektrik tabanla aynı düzlemde yer alan yeni bir entegre devre iletim hat konfigürasyonu geliştirilmesine neden olmuştur. Bu iletim hattı konfigürasyonu CPW (Coplanar Waveguide: Eş Düzlemlili Dalga Kılavuzu) olarak adlandırılan yüzey kaplamalı iletim hatlarıdır.

CPW'lerin analizleri ilk olarak Wen tarafından 1969 yılında CMT (Conformal Mapping Technique : Konform Dönüşüm Tekniği) kullanılarak yapılmıştır [10]. CPW'ler, bir dielektrik tabanın yüzeyine aynı düzlem üzerinde bir merkez iletken ve bu iletkenin her iki yanına, iki yarıktan sonra yerleştirilmiş olan toprak düzlemlerinden oluşmaktadırlar. Quasi-TEM modundaki yayınımlarından dolayı düşük frekans kesim noktaları yoktur. Merkez iletkenle toprak düzlemleri arasındaki RF elektrik alan hava-dielektrik sınırına teğet olmasına rağmen, RF manyetik alan bileşenlerini ilettiği gibi, eksensel bir artış verip arabirim akım yoğunluğunun yer değiştirmesiyle süreksizlikler üretir. Bu bileşenler karşılıklı olmayan cayromanyetik mikrodalga cihaz uygulamaları için gerekli olan eliptik polarizasyona imkan sağlarlar [11]. Bütün iletim elemanlarının eş düzlemlili bir konfigürasyonu, harici şönt elemanlar gibi aktif devre elemanları ile bağlantıyı kolaylaştırmaktadır. Ayrıca MMIC'ler (Monolithic Microwave Integrated Circuits: Monolitik Mikrodalga Entegre Devreler) içerisindeki yarı-iletken taban veya ferromagnetik yarı-iletkenler üzerine yerleştirilmiş çeşitli elemanlarla da bağlantıda idealdirler.

Bu iletim hatlarının, mikrodalga ve milimetrik dalga uygulamalarında kaskat bağlanma zorunlulukları ve MMIC'lere uyarlanma gerekliliğinden dolayı, bu hatların uygulama açısından en önemli karakteristik parametreleri, efektif dielektrik sabitleri ve karakteristik empedanslarıdır.

İletim hatlarının analizinde kullanılan yöntemlerin temel amacı, karakteristik empedansın ve yayılım sabitinin (faz hızı ve zayıflama sabiti) belirlenmesidir. Bu yöntemler, quasi-statik yaklaşım ve tam dalga analizleri olarak ikiye ayrılırlar.

Quasi-Statik yöntemleri içeren birinci grupta, Modifiye konform dönüşüm metodu (Modified Conformal Transformation Method), Sonlu Farklar Metodu (Finite Difference Method), İntegral Eşitlik Metodu (Integral Equation Method), Fourier Dönüşüm Domenindeki Değişebilir Metot (Variational Method in Fourier Transform Domain), Sınırlı Element Metodu (Boundary Element Method) gibi metotlar yer alır. Ve bu metotların hepsinde, yayılım modu saf enine elektrik manyetik (TEM) olarak göz önüne alınarak hat parametreleri yapının elektrostatik kapasitesinden hesaplanır. Bu

analizler, taban kalınlığının dielektrik malzemedeki dalga boyundan çok daha kısa olduğu, düşük frekanslı (X-bandından daha aşağıdaki frekanslar) devrelerin tasarımı için uygundur [12]. Quasi statik metotlar transmisyon hattı parametrelerinin analizinde basit olmalarına rağmen bir transmisyon hattının dispersif doğasını dikkate almaz. Bunun sonucu olarak transmisyon hattı dispersif hale gelirken Quasi statik metodun yaklaşımı da kötüleşir. Transmisyon hattı bir TEM veya Quasi TEM modunu desteklemiyorsa quasi statik metotların hatasının arttığı da bilinmektedir [13].

İkinci gruptaki analiz metotları ise Zaman Domeninde Sonlu Farklar Metodu (Finite Difference Time Domain Method), İntegral Eşitlik Metodu (Integral Equation Method), Spektral Domen Analizi (Spectral Domain Analysis) ve Spektral Domende Galerkin Metodudur (Galerkin's Method in Spectral Domain). Bu analiz metotlarında, yayılım modunun hibrid doğası hesaba katılmaktadır. Tam dalga analizlerde izlenen teknikler daha zor ve analitik olarak karmaşıktırlar. Tam dalga analizinin önemli bir sonucu, hatların karakteristik parametrelerinin frekansa bağlı değişimi hakkında bilgi vermesidir. Tam dalga analizleri, daha karmaşık olduğundan, karakteristik empedans ve efektif dielektrik sabitinin frekansla değişimini ortaya koyan ve *dispersiyon modelleri* olarak bilinen birçok yarı-ampirik metotlar geliştirilmiştir [12].

Hibrid veya Monolitik MIC'ler, alçak frekans [14] entegre devreleriyle hemen hemen aynı avantajları sunarlar. Bu avantajları sırasıyla şu şekilde ifade edebiliriz: Geliştirilmiş sistem güvenilirliği, indirgenmiş hacim ve ağırlık ve büyük oranda standartlaştırma ihtiyacında düşük maliyet. Alçak frekans entegre devrelerinde olduğu gibi MIC'ler hem sivil amaçlı kullanımları kapsayan yeni uygulama alanları açılmasında hem de mevcut pazarların genişlemesinde etken olmuştur [15]. MIC'ler, yaygın olarak kullanılmaya başlamadan önce, mikrodalga sistem mühendisleri ve kullanıcılar, devre performansını üretimden sonraki aşamalarda düzenli bir şekilde optimize etmek için kullanılan ayar vidaları ve adaptörlerin birleştirilmesi esnekliğine sahiptiler [14]. MIC'ler özellikle, yüksek güvenilirlik ihtiyaçlarını karşılama durumunda bu harici düzenleme ihtiyacını karşılayamamaktadır. Bu nedenle MIC'lerde hassas karakterize edilmiş düzenlere ve gelişen teknolojiye uyum sağlayabilecek farklı geometrik yapılarda tasarlanmış iletim hattı yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Sonuç olarak, kullanılan düzenler daha hassas karakterize işlemi gerektirir ve devreler daha düzenli bir şekilde tasarlanarak farklı geometrik boyutlara uyarlanmalıdırlar. Bu sebeple, iletim hatları için simülasyon ve

optimizasyon teknikleri ve CAD (Computer Aided Design: Bilgisayar Destekli Tasarım) paketlerinin kullanımı zorunlu hale gelmiştir [16].

1.2 Literatür Taraması

Günümüzde kullanılan yüksek hızlı elektronik düzenler, 100 GHz ve daha yüksek frekanslar bölgesinde başarılı bir şekilde çalışabilmektedirler [17-19]. Yüksek frekanslarda, işaretin doğruluğunu kaybetmeden iletilmesi amacıyla devre elemanlarının birleştirilmesi ve işaret dağıtımı için iletim hatlarının kullanılması gerekmektedir. İletim hattı olarak kullanılan yapılar içerisinde CPW'ler ve CPS (Coplanar Strips: Koplanar Şeritler)'lerden oluşan CTL'ler (Coplanar Transmission Lines: Eş Düzlemli İletim Hatları); çeşitli üretim metotlarıyla uyumlu olmaları ve elektronik düzenlerle birlikte kullanılabilir olmalarından dolayı cazip hale gelmişlerdir. Ayrıca CTL'ler yüksek hızlı işaret karakterizasyonları ve MMIC uygulamaları için önemli elemanlardır [20-24].

MMIC dizaynı için kullanılan mikrodalga iletim ortamları, sağladıkları üstünlüklerden dolayı, literatürde son yirmi yıl içerisinde birçok araştırmacı tarafından ele alınmış farklı geometrik boyutlarda üretimi ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte eş düzlemli yapıların kullanıldığı, elektro optik modülatörler de geliştirilmiştir [25]. Ayrıca bu yapıların karakteristik parametrelerini belirleyen analitik yaklaşımların ve CAD modellerin gelişimi bu yapılara olan ilgiyi artırmıştır.

Yüksek sıcaklıklı süper iletken (HTSC) mikrodalga düzenler, entegre optik yürüyen dalgalı modülatörler (TWM) ve optik kontrollü mikrodalga düzenlerle ilgili yeni gelişmeler, CPW'ler üzerinde geniş çaplı bir araştırma başlamasına sebep olmuştur [26-30]. Günümüzde kullanılan CPW'ler MMIC teknolojisinin gelişmesiyle kompleks yapılar haline gelmişlerdir [31, 32]. Paketlenmiş MIC'lerde kullanılan CPW'lerin alt ve üst yüzeyleri iletken duvarlarla kaplanır. Tam dalga analizleri genellikle böyle kompleks CPW yapılarını karakterize etmede kullanılır. Bu tür yaklaşımlar, geniş bir frekans bandında önemli derecede doğruluk sağlarlar [33-37]. Bu metotların yanı sıra, konform dönüşüm tekniği CAD uygulamaları için uygun olan kapalı form analitik çözümlere imkan sağlamakta ve 40 GHz'e kadar olan frekans bölgeleri için tam dalga analizlerinin doğruluğu ile mukayese edilebilir bir doğruluğa sahiptirler [38-45]. Ayrıca kuplajlı CPW'ler, metal şeritlerdeki mikrodalga kayıplarına ve geometrik olarak

ta çok katmanlı dielektrik tabanlara sahip CPW'ler, silindirik ve eliptik gibi farklı boyutlara sahip CPW'ler için de kullanılabilecek ifadeler elde edilmiştir [40, 46 - 54].

MMIC teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaya başlanan iletim hatlarının temelini teşkil eden sonsuz kalınlıktaki dielektrik tabana sahip eş düzlemli dalga kılavuzlarının analizleri ilk olarak 1969 yılında Wen [10] tarafından konform dönüşüm tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yapı geçmişte radar ve haberleşme sistemlerinde kullanılan ve birlikte kullanılmaları mümkün olmayan manyetik devre elemanlarının ve daha sonra geliştirilen şerit ve mikro şerit iletim hatlarının yerini almıştır. Bu çalışma, iletim hatlarının karakteristik parametreleri için temel analitik ifadeler içeren sonsuz taban kalınlıklı ve sonsuz genişlikli toprak düzlemlerine sahip eş düzlemli iletim hatları için geçerlidir. Davis ve ark. Wen'in analizini, toprak düzlem genişlikleri sonsuz, dielektrik taban kalınlıkları sonlu olan yapılar için geçerli hale getirmişlerdir [33]. Bu çalışmada, Wen'in temel ifadelerinin, yüksek karakteristik empedanslı hatlarda yarı genişliği s 'in taban kalınlığı h 'a oranı olan $s/h=2$ için geçerli olduğunu ortaya koymuşlardır. Houdart tarafından ikinci derece Green Fonksiyonlarının tanımlanması ve Hatsuda tarafından geliştirilen nümerik metotların kullanılmasıyla hat parametrelerinin sonlu hat boyutlarının ve sonlu taban kalınlıklarının etkisini hesaba katarak hesaplanması için çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

CPW'lerin dengeli anten besleme hattı olarak kullanılmaları 1950'lerde literatüre girmiştir. Özellikle, 1958'de Owyang ve Wu [55] tarafından yapılan çalışmada, daha sonradan CPW olarak adlandırılan yapının elektriksel parametreleri ve iletken kayıplarını ihtiva eden analiz sunulmaktadır. 1979'da artan indüktans kuralına dayalı yeni bir ifade sunulmuştur [56]. Bu ifade de yer alan formüller daha karmaşık olmakla birlikte Owyang ve Wu tarafından sunulan formüllerden daha az doğruluğa sahip olduğu ve zayıflama formüllerinde hatalar olduğu fark edilerek Ghione ve ark. [57] tarafından yapılan bir çalışma ile düzeltilmiştir. Kayıplarla ilgili olarak Hoffman [58] tarafından yeni formüller sunulmuş fakat bu formüllerinde bazı hatalar içerdiği Jackson [22] tarafından yapılan bir çalışmada ortaya konulmuş ve nümerik sonuçlarla da desteklenerek düzeltilmiştir. Eş düzlemli iletim hatlarında kullanılan iletim elemanlarının geometrisinde yapılan değişikliklerle simetrik olarak ortaya çıkan bu iletim hatları asimetrik bir geometride gerçekleştirilmiş ve konform dönüşüm tekniği kullanılarak iletken kayıpları analitik yaklaşımlar formunda Ghione [50] tarafından

hesaplanmıştır. Bu analitik ifadeler CAD yönlü olması bakımından MMIC dizaynı için oldukça uygundur.

Birçok araştırmacı tarafından tasarlanan bu tür iletim hatlarının analizleri CMT gibi quasi-statik yaklaşımla veya frekans bağımlı tam dalga analizleri ile yapılmaktadır. Ancak frekans bağımlı çözümlerde, yapıların karakteristik parametrelerinin hesaplanmasında işlem süresinin uzun olması, güçlü bir teorik bilgi birikimi gerektirmesi ve pahalı paket programlara ihtiyaç duyulması gibi dezavantajlar iletim hatlarının analizlerinde genellikle quasi-statik yaklaşımların kullanılmasına neden olmuştur. Veyers ve Hanna [59] sonlu hat boyutlarına ve sonlu taban kalınlığına sahip CPW'lere CMT'yi uygulamışlardır. Bu uygulamanın doğruluğu sonraki yıllarda çeşitli araştırmacılar tarafından ispatlanmıştır [60].

Pratikte çok katmanlı dielektrik tabanların kullanımı yaygındır. Entegre devrelerde, iletim elemanları dielektrik katmanlar arasına yada dielektrik tabanın üzerine yerleştirilmektedirler. Tek bir dielektrik tabana sahip CPW'lerle karşılaştırıldığında çok katmanlı yapıların avantajı alt ve üst katmanlar için uygun dielektrik tabanların kullanılmasıyla temel frekans bölgesinin kontrol edilmesi ve kaçak alanların önlenilmesidir. Literatürde çok katmanlı CPW'lerin tam dalga analizleri [61-63] ve quasi-statik çözümleri [45, 64-67] için sunulan çalışmalar oldukça kısıtlı sayıdadır.

Bedair ve Wolff [45] çok katlı CPW'lerin karakteristik parametrelerinin CMT kullanarak analiz etmiştir. Aynı zamanda, elde etmiş oldukları kapalı form analitik ifadelerin sonuçlarını frekans bağımlı bir analitik çözüm olan Spektral Domen Yaklaşımı ile karşılaştırmışlar ve sonuçların uyum içerisinde olduğunu göstermişlerdir. Ghione ve Naldi [64], yapmış oldukları bir çalışmada üst koruma, iletken destek, sonlu toprak düzlemleri ve hattan hata (Line-to-Line) bağlantının bu tür iletim hattı konfigürasyonlarının karakteristik parametreleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Gevorgian ve ark. [65] tarafından yapılan benzer bir çalışmada alt ve üst ekranlı çok katlı CPW'nin temel karakteristikleri için analitik ifadeleri yine CMT kullanarak türetmişlerdir. Çok katlı CPW'ler ayrıca Görür ve ark. [68] tarafından yapılan bir çalışmada da ele alınmıştır. Bu çalışmada daha önce incelenen yapılardan farklı olarak, çok katmanlı CPW yapılarının iletim elemanları asimetrik bir geometriye sahiptir. Chen ve Chou [66] CMT'yi kullanarak çok katmanlı dielektrik tabanlar üzerindeki CPS ve CPW'lerin karakteristik parametrelerini analitik olarak elde etmişlerdir. Ve bu ifadelerin

doğruluklarını diferansiyel elektro optik örnekleme simülatörü ile farklı geometrik boyutlardaki iletim hatları için yaptıkları deneylerde ispatlamışlardır.

Yapılan literatür araştırmasında görülmüştür ki, silindirik tabanlar üzerinde yapılan çalışmalar oldukça kısıtlı sayıdadır. Eş düzlemlili silindirik iletim hatları, silindirik yüzeyler üzerine basılmış antenleri besleme uygulamalarında kullanılan elemanlardır. Ayrıca bu tip iletim hatları, adaptör ve yarı hatlar gibi uygulamalarda da kullanılmaktadırlar. Düzlemsel olamayan yapılara temel teşkil eden ilk çalışma Barrett [69] tarafından 1952 yılında yapılmıştır. 1975'te ise silindirik tabanlı yapılar üzerinde yapılan ciddi bir çalışmayı Clements ve ark. [70], dielektrik yüklü silindirik iletkin sistemleri için kapasitans hesaplamaları yaparak ortaya koymuşlardır. Su ve Wong [35] tarafından 1996 yılında yapılan bir çalışmada ise, silindirik tabanlı CPW'lerin tam dalga analizleri gerçekleştirilmiştir. Bir yıl sonra aynı araştırmacılar tarafından bu yapıların quasi-statik çözümleri gerçekleştirilerek literatüre kazandırılmıştır [40]. Karpuz ve ark. [71] tarafından yapılan bir çalışmada ise silindirik asimetric şerit hatların quasi-statik analizleri için analitik ifadeler sunulmuştur. 2000 yılında Dib ve Al-Zoubi [72] sonlu toprak düzlemlerine sahip silindirik asimetric CPW'lerin quasi-statik analizlerini gerçekleştirmişlerdir.

2001 yılında ise Simons geçmiş yıllarda yapılan çalışmalarını bir kitapta toplayarak, eş düzlemlili iletim hatları ile oluşturulan sistemler, devreler ve kullanılan bileşenler hakkında detaylı bir bilgi sunmuştur [73].

Eş düzlemlili iletim hatları için hızlı ve kolayca uygulanabilir bir kapalı form denkleminin olmayışı, üretimden önce hangi boyutlardaki iletim hatlarının arzu edilen karakteristik parametreleri sağlayacağını tasarımcılar tarafından belirlenmesinde ve hat içi mikrodalga devrelerinde kullanıp kullanılmayacaklarına karar verilmesinde büyük bir engeldir. Aşağıda, bu tür iletim hatlarının analizlerinde kullanılan metotların bazı dezavantajlarına değinilmiştir.

Tam dalga analiz teknikleri ve CMT gibi Quasi statik yaklaşımla yapılan analizlerinde bazı dezavantajları mevcuttur. CMT ile yapılan analizlerde, yapının karakteristik parametrelerini veren kapalı formdaki ifadelerin elde edilebilmesi için yapı bir takım düzlem dönüşümleri ile paralel plakalı kondansatöre dönüştürülür. Ancak kapalı formdaki bu ifadeler belirli yaklaşımlarla çözülebilen eliptik integraller içerirler. Dolayısıyla elde edilen ifadelerin doğrulukları yine belirli bir hata oranına sahiptir ve düzlem dönüşümleri için uzmanlık bilgisi gerektirir. Bütün bu olumsuz etkenler, CMT

ile yapılan analizlerin dezavantajları olarak sıralanabilir. Frekans bağımlı çözümlerde ise, yapıların karakteristik parametrelerinin hesaplanmasında işlem süresinin uzun olması, güçlü bir teorik bilgi birikimi gerektirmesi ve pahalı paket programlara ihtiyaç duyulması gibi dezavantajlar vardır. Bu yüzden araştırmacılar birçok lineer olmayan problemin çözümünde CAD tabanlı programlardan daha fazla yararlanmanın yollarını araştırmaya başlamışlardır.

Yapay Sinir Ağları (YSA), insan beynindeki sinir hücrelerinin varsayılan çalışma prensibine göre geliştirilmiş olan, olaylar arasındaki ilişkileri bilinen durumları kullanarak öğrenmeye çalışan, paralel çalışabilme özelliklerinden dolayı çok daha kısa sürelerde sonuçlar üretebilen ve gerçek zamanlı problem çözmede oldukça faydalı sonuçlar ortaya koyan bilgi esaslı yapay sistemlerdir. Genel anlamda bir beyin hücresine karşılık geldiği varsayılan nöron veya işlemci eleman adı verilen basit birimlerin birbirlerine değişik eşik seviyeleri ile bağlanmasıyla oluşturulan, daha sonra işlemci elemanlar arasındaki ilişkinin öğrenme algoritmaları, tercih edilecek olan ağ yapısı ve eşik fonksiyonu seçimiyle probleme özel hale getirilebildiği karmaşık bir sistem olarak düşünülebilir., YSA'lar probleme özel basit yapıları, öğrenme, genelleme ve paralel işlem yapabilme özelliklerinden doğan hızlı hesaplama kabiliyetlerinden ve lineer olmayan farklı problemlere kolay çözümler sunabilmelerinden dolayı birçok mühendislik problemlerinin çözümlerinin yanı sıra, mikrodalga ve elektromanyetik problemlerin çözümünde de alternatif yaklaşımlar sunmaktadır. Bu sebeple son yıllarda CAD tabanlı bir yaklaşım olan YSA'lar, elektromanyetik problemlerinin çözümünde ve mikrodalga problemlerin modellenmesi, simülasyonu ve optimizasyonunda yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Hızlı, doğru ve uyumlu sonuçlar verebilen YSA modellerinin eğitim ve test işlemleri, nümerik hesaplama, deneysel veya simülasyon sonucunda elde edilen datalarla gerçekleştirilebilir. Literatürde YSA yaklaşımı, geniş bir uygulama alanına sahip olan iletim hattı tasarımının daha hızlı yapılabilmesi için sunulan modellerde [74, 75], mikrodalga devrelerine [76-79], bağlantı elemanlarında [80], mikroşerit devrelerde ana bağlantı elemanlarına [81-83], CPW bileşenlerine [84, 85], helezon indüktörlere [86, 87], FET (Field Effect Transistor)'lere [88 -92], HBT (Heterojunction Bipolar Transistor)'lere [85], HEMT (High Electron Mobility Transistor)'lere [93, 94], lazer diyotlara [95], filtreler [96-98], kuvvetlendiricilere [99, 100], mikserlere [100] ve antenlere [101 - 107] uygun modeller ortaya konulurken kullanılmışlardır. Günel [108], Genetik Algoritma (GA) kullanılarak oluşturduğu bir

YSA modeli ile mikro şerit yan hat uygulamalarına yönelik bir çalışma sunmuştur. 2001 yılında Devabhaktuni ve ark. [109] yaptıkları bir çalışmada ise lineer olmayan modelleme teknikleri ve model geliştirme problemlerini içeren, mikrodalga modellemede YSA yapıları ile yapılan çalışmaları inceleyerek YSA modellerin özelliklerini ve avantajlarını ortaya koymuşlardır. Yıldız ve ark. [110] ise 2002 yılında dairesel mikroşerit antenlerin rezonans frekansının ve iletken destekli simetrik olmayan ortak düzlemlı dalga kılavuzlarının karakteristik parametrelerinin hesaplanmasında yine YSA ile oluşturdukları modelleri kullanmışlardır. Gültekin [111] hazırladığı doktora tezinde çeşitli tipteki mikroşerit antenlerin karakteristik parametrelerinin belirlenmesinde YSA'ları kullanmış ve farklı eğitim algoritmalarının performanslarını karşılaştırmıştır. Sagioglu ve Yıldız [112], iletken destekli ortak düzlemlı hattın karakteristik parametrelerinin belirlenmesinde YSA modellerini kullanarak bu YSA'ların elektromanyetik problemlerin çözümünde yeni bir alternatif olabileceğini göstermişlerdir.

Sonuç itibarı ile araştırmacılar yukarıda bahsedilen problemlerin çözümünde kullanılan klasik yöntemlere yeni bir alternatif olarak YSA modellerinin kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır.

1.3 Tezin Amacı

MMIC teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaya başlanan iletim hatlarının analizlerinde frekans bağımlı tam dalga analizleri veya konform dönüşüm tekniği (CMT) gibi quasi-statik yaklaşımlar kullanılmaktadır. Ancak her iki yaklaşımla yapılan analizlerde bazı dezavantajları mevcuttur. Frekans bağımlı çözümlerde yapıların karakteristik parametrelerinin hesaplanmasında işlem süresinin uzun olması ve pahalı paket programlara ihtiyaç duyması, CMT ile yapılan analizlerde ise yapının karakteristik parametrelerini veren kapalı formdaki ifadelerin belirli yaklaşımlarla çözülebilen eliptik integraller içermesi ve her iki yaklaşımında güçlü bir teorik bilgi birikimi gerektirmesi karşılaşılan güçlüklerdir. Bu nedenle hata oranı düşük olan modellemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, CAD tabanlı olan ancak en az mevcut yöntemler kadar doğru ve hassas sonuçlar sunabilen modellemelerin gerekliliği, bu tez çalışmasına bir temel teşkil etmiştir.

Bu çalışmada, YSA'ların cazip özellikleri kullanılarak; ilk olarak iletim hatlarının temelini teşkil eden sonsuz kalınlıktaki dielektrik tabana sahip eş düzlemli dalga kılavuzlarının quasi-statik analizleri YSA modeli ile gerçekleştirilecektir. Yapılan diğer modellemelerde ise sırasıyla sonlu kalınlıktaki dielektrik tabana sahip eş düzlemli dalga kılavuzlarının (Coplanar Waveguides; CPWs), alt korumalı CPW'lerin, alt ve üst korumalı CPW'lerin, iletim elemanlarının iki dielektrik taban arasına yerleştirilmesiyle oluşturulan sandviç CPW (SCPW)'lerin, üst korumalı SCPW'lerin, alt korumalı SCPW'lerin, iletken destekli SCPW (SCBCPW)'lerin, alt ve üst korumalı SCPW'lerin, iletken destekli üst korumalı SCPW'lerin, alt ve üst korumalı çok katmanlı CPW (Shielded Multilayered CPW; MCPW)'lerin, simetrik silindirik CPW (Cylindrical CPW; CCPW)'lerin, asimetrik silindirik CPW (ACCPW)'lerin, çok katmanlı silindirik CPW (MCCPW)'lerin ve çok katmanlı silindirik CPS (MCCPS)'lerin karakteristik parametreleri quasi-statik yaklaşım altında YSA modelleri ile belirlenecektir.

BÖLÜM 2

DÜZLEMSEL İLETİM HATLARI

2.1 Giriş

Analizleri ilk olarak C. P. Wen [10] tarafından 1969 yılında CMT (Conformal Mapping Technique : Konform Dönüşüm Tekniği) kullanılarak yapılmış olan CPW'ler, bir merkez iletken, iki toprak düzlemi ve bir dielektrik tabandan oluşmaktadırlar. Bu tür iletim hatlarında tüm iletim elemanları aynı düzlem üzerinde yer aldığı için bir başka mikrodalga devre elemanı ile yapılacak olan bir bağlantı sırasında dielektrik taban üzerinde bir delik veya yarık açmaya gerek yoktur. Merkez iletken ve bu iletkenin her iki yanında yer alan yarıkların genişlikleri ile dielektrik tabanın kalınlığı ve permitivitesi bu iletim hatlarının karakteristik parametreleri olan efektif dielektrik sabitini (ϵ_{eff}) ve karakteristik empedansını (Z_0) belirler. Ancak Wen'in yapmış olduğu analizde dielektrik taban kalınlığı sonsuz seçilmesinin sebebi, şerit hatların aksine CPW'lerin karakteristik parametre değerlerindeki dielektrik taban kalınlığına olan bağımlılığının çok daha az olduğunu göstermektedir. En basit yapı geleneksel CPW (Conventional CPW) olarak adlandırılmaktadır. Bir sonraki kısımda, sonsuz kalınlıktaki dielektrik tabana sahip geleneksel CPW'lerden bahsedilerek, karakteristik parametreleri için quasi-statik bir yaklaşım olarak literatürde yaygın bir kullanım alanına sahip olan CMT ile elde edilen kapalı form ifadeler verilecektir. Daha sonraki kısımlarda ise, bu tez çalışmasında YSA yaklaşımı kullanılarak modellenen iletim hatları ve quasi-statik analizlerinden bahsedilecektir.

2.1.1 Sonsuz Kalınlıktaki Dielektrik Tabana Sahip Geleneksel CPW'ler

MMIC teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaya başlanan iletim hatlarının temelini teşkil eden sonsuz kalınlıktaki dielektrik tabana sahip eş düzlemli dalga kılavuzları, geçmişte radar ve haberleşme sistemlerinde kullanılan ve birlikte kullanılmaları

mümkün olmayan manyetik devre elemanlarının ve daha sonra geliştirilen şerit ve mikroşerit iletim hatlarının yerini almıştır. Bu iletim hatlarından farklı olarak, geleneksel CPW'de iletim elemanları dielektrik tabanın aynı düzlemi üzerinde yer almaktadır. Bu açıdan CPW, yarık hatta benzerdir ve bazı araştırmacılar tarafından *Çiftli Şerit Hat* (Coupled Slot Line) olarak ta adlandırılmaktadır [113, 114]. Geleneksel CPW yapısı, quasi-TEM yayılım modunu destekler ve geleneksel mikroşerit hatlara göre bazı avantajlar sunar [115]. Bu avantajları maddeler halinde sıralayacak olursak, CPW yapıları,

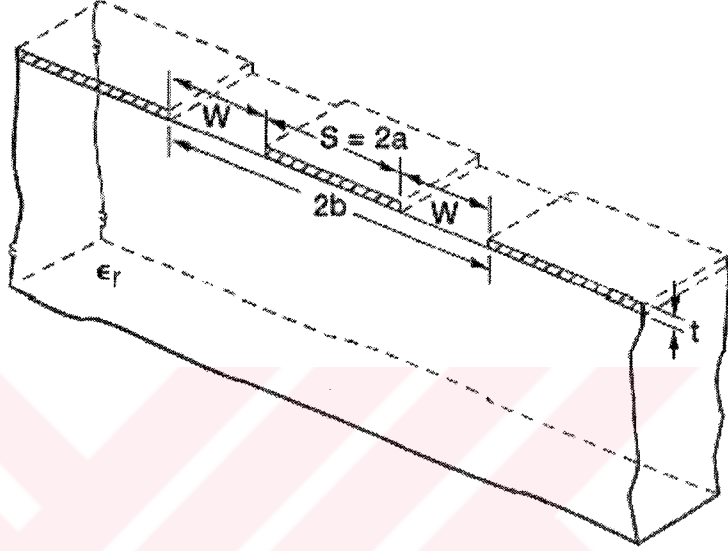
- ✓ İmalatı basitleştirir,
- ✓ Aktif ve pasif aygıtlara paralel ve seri olarak yüzey montajını kolaylaştırır,
- ✓ Özel muhafaza içine alma ihtiyacını ortadan kaldırır,
- ✓ Radyasyon kayıplarını azaltır,
- ✓ Yapının geometrik boyutlarından a/b oranı değiştirilerek karakteristik empedans, sınır olmaksızın istenilen büyüklükte ayarlanabilir. Buradaki tek sakınca, daha yüksek kayıpların ortaya çıkabilmesidir,
- ✓ Uygulamada iki CPW paralel olarak bağlandığında, işaret iletkenleri arasında toprak düzlemleri bulunacağından parazitik etkileri oldukça zayıftır ve
- ✓ Alışılmış mikroşeritlere göre daha yoğun imal edilebilir.

Bunlar göz önüne alındığında CPW'ler, mikrodalga tümleşik devreler (MIC) ve monolitik MIC (MMIC)'ler için çok uygundurlar.

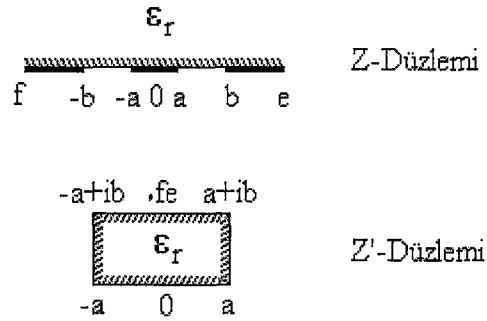
Bu tür iletim hatlarının analizlerinde, konform dönüşüm tekniğinin geçerliliği, bir quasi-statik kabule dayanır. Bu kabul, iletim hatlarındaki dalga yayılım yönünde manyetik alan bileşeni bulunmadığı için CPW'deki yayılım modunun yüksek frekanslarda TEM olarak seçilmesidir. Bağlı olarak quasi-statik yaklaşım 40 GHz'e kadar olan frekans bölgesinde geçerlidir [115]. Ayrıca quasi-statik yaklaşımla elde edilen formüller değiştirilerek frekans bağımlı çözümlerde elde edilebilir [116-118].

Sonsuz kalınlıktaki dielektrik tabana sahip eş düzlemlili dalga kılavuzlarının geometrik yapısı Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Şekilde yarık genişlikleri w , merkez iletken genişliği $S=2a$, yarıklar ve merkez iletken genişlikleri toplamı $2b$, metal şerit kalınlığı ise t ile gösterilmektedir. Quasi-TEM yaklaşımda, CPW'lerin karakteristik parametrelerinin hesaplanması sırasında öncelikle dalga kılavuzlarının birim uzunluk başına kapasite değerinin belirlenmesi gerekir. Bu amaçla, bir dielektrik yarı-düzlemin üzerine yerleştirilen CPW'nin birim uzunluk başına toplam kapasite değerlerinin

belirlenebilmesi için bu yapı bir takım düzlem dönüşümleri ile paralel plakalı kondansatör haline dönüştürülür. Şekil 2.2’de dielektrik yarı-düzlemin, CMT [10] kullanılarak bir dikdörtgenin iç kısmına dönüştürülmesine ilişkin düzlem dönüşümleri görülmektedir.



Şekil 2.1. Sonsuz kalınlıktaki dielektrik tabana sahip eş düzlemli dalga kılavuzlarının kesit görünümü



Şekil 2.2. Düzlem dönüşümleri

Şekil 2.2’de dielektrik yarı-düzlem *Z-Düzlemi* olarak gösterilmektedir, bu düzlem konform dönüşüm tekniği kullanılarak *Z'-Düzlemi*’ne dönüştürülebilir [119],

$$\frac{dZ'}{dZ} = \frac{A}{(Z^2 - a_1)^{1/2} \cdot (Z^2 - b_1)^{1/2}} \quad (2.1)$$

Burada A bir sabittir. Z' düzlemindeki bir dikdörtgenin a/b oranı eşitlik (2.1)'in her iki tarafının dZ ile çarpılıp integrale edilmesiyle bulunabilir;

$$a + jb = \int_0^{b_1} \frac{A \cdot dZ}{(Z^2 - a_1)^{1/2} \cdot (Z^2 - b_1)^{1/2}} \quad (2.2)$$

Sonuç olarak a/b oranı;

$$\frac{a}{b} = \frac{K(k)}{K(k')} \quad (2.3)$$

ile elde edilebilir. Burada $k=a_1/b_1$, $K(k)$ birinci dereceden tam eliptik integrallerdir [120]. k' modülü ise ;

$$k' = \sqrt{1 - k^2} \quad (2.4)$$

ile verilir. Şekil 2.2'de Z' düzleminde gösterilen dikdörtgenin doldurma materyalinin bağıl dielektrik sabiti ϵ_r 'dir ve zıt kutuplu yüklere sahip olan kondansatörün alt ve üst plakaları uniform bir elektrik alan ile indüklenir ve hattın birim uzunluk başına kapasite değeri boş olan yarı-düzlemi de içerecek şekilde;

$$C = \epsilon_0 \cdot (\epsilon_r + 1) \cdot \frac{2 \cdot a}{b} \quad (2.5)$$

ile hesaplanabilir. Quasi-Statik yaklaşım CPW'lerin, efektif dielektrik sabiti $(\epsilon_r+1)/2$ olan bir dielektrik malzeme içerisindeki bir iletim hattı olarak ele alınmasını sağlar. Bunun sonucunda, faz hızı;

$$v_{ph} = \left(\frac{2}{\epsilon_r + 1} \right)^{1/2} \cdot c \quad (2.6)$$

şeklinde elde edilebilir ve burada c boşluktaki ışık hızını göstermektedir. Karakteristik empedans değeri ise;

$$Z_0 = \frac{1}{C \cdot v_{ph}} \quad (2.7)$$

ile belirlenebilir. İletim hattının birim uzunluk başına toplam kapasite değeri, kısmi kapasitelerin toplamı olarak $C_{cpw} = C_l + C_{air}$ ile belirlenebilir. Burada C_l dielektrik malzemenin kapasite değerini, C_{air} ise dielektrik malzeme olarak hava kullanılması durumundaki kapasite değerini göstermektedir. Bu kapasite değerleri belirlenirken metal şeritlerin kalınlıkları ihmal edilir. C_l ve C_{air} kapasiteleri ise eşitlik (2.5)'ten yola çıkılarak;

$$C_l = 2 \cdot \epsilon_0 \cdot (\epsilon_r - 1) \cdot \frac{K(k_1)}{K(k_1')} \quad (2.8)$$

$$C_{air} = 4 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{K(k_0)}{K(k_0')} \quad (2.9)$$

ifadeleri ile belirlenebilir [10, 69]. Bu ifadelerdeki $K(k_0)$, $K(k_0')$, $K(k_1)$ ve $K(k_1')$ birinci tür tam eliptik integrallerdir. Bu integraller daha önce de bahsedildiği gibi analitik olarak çözümlenmeleri zor olan ifadelerdir ancak Hilberg [121] tarafından 1969 yılında yapılan bir çalışma da $K(k)/K(k')$ için yaklaşık çözümler sunulmuş ve bu ifadeler literatürde yaygın bir kabul görmüşlerdir. Bu ifadelerde kullanılan k_1 , k_1' , k_0 ve k_0' modülleri ise

$$k_0 = k_1 = \frac{S}{S + 2w} \quad (2.10)$$

$$k_0' = k_1' = \sqrt{1 - k_0^2} \quad (2.11)$$

ile verilmektedir. Böylece birim uzunluk başına toplam kapasite değeri;

$$C_{cpw} = 2 \cdot \epsilon_0 (\epsilon_r + 1) \cdot \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} \quad (2.12)$$

olarak tespit edilir. Böylece bu tür yapıların efektif dielektrik sabiti (ϵ_{eff}) ve karakteristik empedansı (Z_0)

$$\epsilon_{eff} = \frac{C_{cpw}}{C_{air}} = 1 + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \cdot \frac{K(k_1)}{K(k'_1)} \cdot \frac{K(k'_0)}{K(k_0)} \quad (2.13)$$

$$Z_0 = \frac{1}{c C_{air} \sqrt{\epsilon_{eff}}} = \frac{30\pi}{\sqrt{(\epsilon_r + 1)/2}} \cdot \frac{K(k'_0)}{K(k_0)} \quad (2.14)$$

ile belirlenebilir. Bu ifadelerdeki c , eşitlik (2.6)'da olduğu gibi, yine boşluktaki ışık hızını göstermektedir.

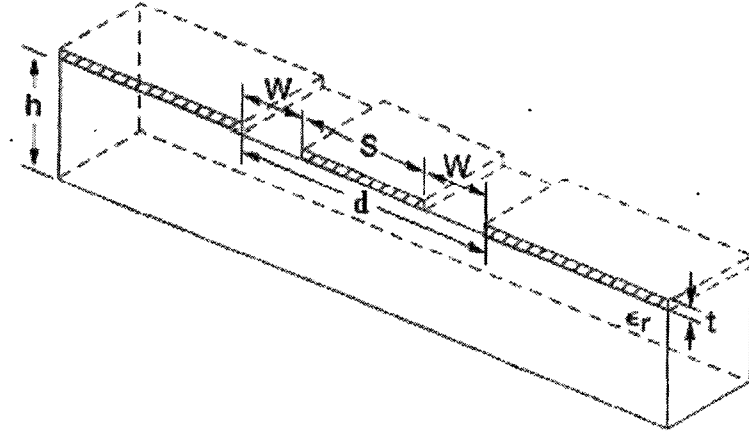
Ancak bilindiği gibi quasi-statik yaklaşım sadece belirli bir frekans bölgesinde geçerliliğini korumaktadır. Özellikle yüksek frekans bölgelerinde iyi sonuç verip vermeyeceği kesin değildir. Bu amaçla yapılan araştırmalar sonucunda, eş düzlemlı dalga kılavuzlarının frekans bağımlı parametreleri için literatürdeki mevcut kapalı form ifadelerin yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu engel, bir takım nümerik yaklaşımlar ortaya konularak aşılmaya çalışılmıştır. Örneğin, Shih ve Itoh [122] tarafından 1982 yılında yapılan bir çalışmada iletken destekli CPW'ler için dispersif etkilerin 40 Ghz'e kadar olan frekans bölgesinde ihmal edilebilir seviyede olduğu gösterilmektedir.

2.1.2 Sonlu Kalınlıktaki Dielektrik Tabana Sahip Geleneksel CPW'ler

Sonsuz kalınlıktaki dielektrik tabana sahip iletim hatlarının karakteristik parametreleri için quasi-statik yaklaşımlarla elde edilen kapalı form ifadeler literatürde mevcut iken, sonlu dielektrik taban kalınlıkları için ortaya konulan analitik ifadeler yaklaşık ifadeler olarak kullanılmaktaydı ve daha kesin sonuçlar veren nümerik analiz metotları geçerlilikleri belirlenmediği için kabul görmüyorlardı. 1973 yılında Davis ve ark. [33], Wen'in CMT ile yapmış olduğu quasi-statik analizi, toprak düzlem genişlikleri sonsuz, dielektrik taban kalınlıkları sonlu olan yapılar için geçerli hale getirmişlerdir. Bu çalışmada, Wen'in temel ifadelerinin, yüksek karakteristik empedanslı hatlarda yarık

genişliği s 'in (şekil 2.2'deki w) taban kalınlığı h 'a oranı olan $s/h=2$ için geçerli olduğunu ortaya koymuşlardır. Daha sonraki yıllarda, Houdart tarafından ikinci derece Green Fonksiyonlarının tanımlanması ve Hatsuda tarafından geliştirilen nümerik metotların kullanılmasıyla, hat parametrelerinin sonlu hat boyutları ve sonlu taban kalınlıklarının etkisini hesaba katarak hesaplanması için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. 1980 yılında, Hanna ve Veyers [38] sonlu hat boyutlarına ve sonlu taban kalınlığına sahip CPW'lerin quasi-statik analizlerini CMT kullanarak gerçekleştirmişlerdir. 1981'de ise Hanna ve Thebault [123] yaptıkları bir çalışmada asimetrik geometrideki iletim elemanlarına sahip CPW'leri yine CMT kullanarak analiz etmişler ve bu ifadeleri daha sonraki yıllarda yaptıkları deneysel çalışmalarla da desteklemişlerdir. Sonraki yıllarda ise, Ghione ve Naldi [60] yaptıkları bir çalışmada, [59]'de sunulan ifadeler de dahil olmak üzere literatürde yayınlanmış bazı analitik ifadelerin geçerliliğini belirlemişler ve doğrulukları kesin olmayan formüller içinde uygun düzeltmeler yaparak daha doğru analitik ifadeler ortaya koymuşlardır. Daha önce Gupta, Davis ve ark. [33] tarafından sunulan verileri uygun hale getirmek suretiyle bazı analitik ifadeler ortaya koymuş ancak bu formüller sadece belirli taban kalınlıkları için doğru sonuçlar verebildiği için kullanımları yaygınlaşmamıştır. Bedair ve Wolff [45] tarafından 1992 yılında yapılan bir çalışmada CPW'lerin MMIC uygulamaları için hızlı, basit ve tam sonuçlar sunabilen analitik ifadeler, CMT kullanılarak ortaya konulmuştur. Ayrıca bu tür iletim hatlarının frekans bağımlı çözümleri de literatürde mevcuttur. Örneğin, Jansen [124] tarafından yapılan bir çalışmada farklı dielektrik tabanlara sahip geleneksel CPW yapıları SDA kullanılarak analiz edilmiştir.

Sonlu kalınlıktaki dielektrik tabana sahip eş düzlemli dalga kılavuzlarının kesit görünümlü şekil 2.3'de verilmiştir. şekildeki w 'lar yarık genişliklerini, S merkez iletken genişliğini, d yarıklar ve merkez iletken genişlikleri toplamını, h dielektrik tabanın kalınlığını, t ise metal şerit kalınlığını göstermektedir.



Şekil 2.3. Sonlu kalınlıktaki dielektrik tabana sahip eş düzlemlili dalga kılavuzlarının kesit görünümü

Quasi-TEM yaklaşımda, geleneksel CPW'lerin karakteristik parametreleri olan efektif dielektrik sabiti ve karakteristik empedanslarının hesaplanması sırasında dalga kılavuzlarının birim uzunluk başına kapasite değeri belirlenmelidir. Bölüm 2.1.1'de sonsuz dielektrik tabana sahip CPW'ler için verilen dönüşümlere benzer bir takım düzlem dönüşümleri ile yapı paralel plakalı kondansatör haline dönüştürülür. Ve birim uzunluk başına kapasite değeri kısmi kapasitelerin toplamı olarak $C_{cpw}=C_l+C_{air}$ ile belirlenebilir. Burada C_l dielektrik malzemenin kapasite değerini, C_{air} ise dielektrik malzeme olarak hava kullanılması durumundaki kapasite değerini göstermektedir. Bu değerler belirlenirken yine daha önceki yaklaşımlarda olduğu gibi metal şeritlerin kalınlıkları ihmal edilmiştir. C_l ve C_{air} kapasiteleri (2.8) ve (2.9) eşitlikleri kullanılarak belirlenir. Ancak bu ifadelerde kullanılacak olan k_1 , k_1' , k_0 ve k_0' modülleri

$$k_1 = \frac{\sinh\left(\frac{\pi \cdot S}{4 \cdot h}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi \cdot (S + 2w)}{4 \cdot h}\right)} \quad (2.15)$$

$$k_1' = \sqrt{1 - k_1^2} \quad (2.16)$$

$$k_0 = \frac{S}{S + 2w} \quad (2.17)$$

$$k_0' = \sqrt{1 - k_0^2} \quad (2.18)$$

olarak seçilmelidir. Böylece birim uzunluk başına toplam kapasite değeri;

$$C_{cpw} = 2 \cdot \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \cdot \frac{K(k_1)}{K(k_1')} + 4 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{K(k_0)}{K(k_0')} \quad (2.19)$$

olarak tespit edilir. Dolayısıyla, efektif dielektrik sabitini (ϵ_{eff}) ve karakteristik empedansını (Z_0) hesaplamak için literatürde mevcut olan ifadelerin kullanılması ile

$$\epsilon_{eff} = \frac{C_{cpw}}{C_{air}} = 1 + \frac{(\epsilon_r - 1)}{2} \cdot \frac{K(k_1)}{K(k_1')} \cdot \frac{K(k_0')}{K(k_0)} \quad (2.20)$$

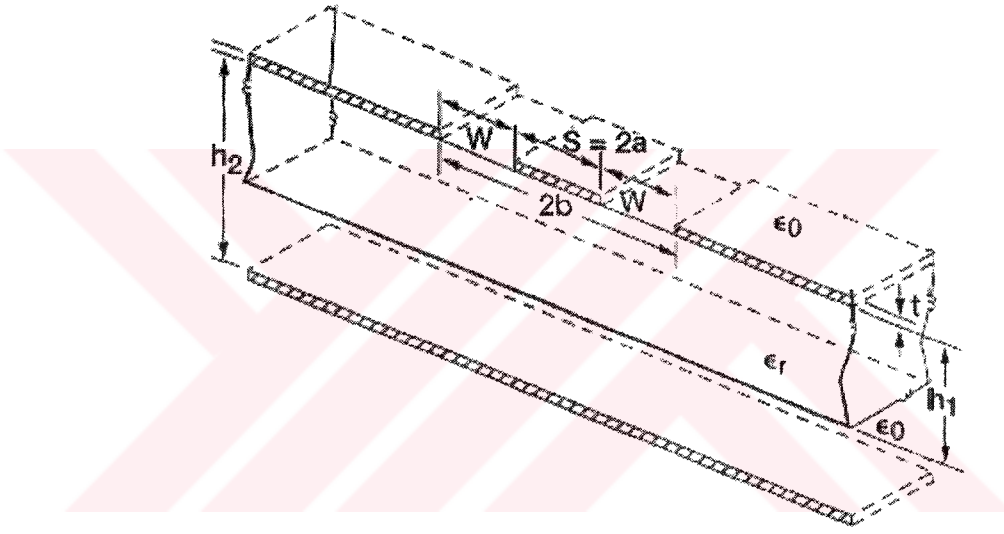
$$Z_0 = \frac{1}{c C_{air} \sqrt{\epsilon_{eff}}} = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \cdot \frac{K(k_0')}{K(k_0)} \quad (2.21)$$

şeklinde elde edilir [56]. Bu ifadelerdeki c boşluktaki ışık hızını gösterirken, $K(k_0)$, $K(k_0')$, $K(k_1)$ ve $K(k_1')$ birinci tür tam eliptik integralleri göstermektedir. Geleneksel CPW'lerin efektif dielektrik sabiti ve karakteristik empedanslarına ilişkin olarak verilen bu ifadeler, Ghione ve Naldi [60] tarafından verilen ifadelerle özdeştir.

2.1.3 Alt Korumalı CPW'ler

Gevorgian ve ark. [65] tarafından yapılan bir çalışmada çok katmanlı CPW'ler için sunulan CAD modeller arasında bu yapı, alternatif yapılardan biri olarak değerlendirilmiş ancak bu iletim hatları için özel bir değerlendirme yapılmamıştır. 1988 yılında, Simons ve Ponchak [125] tarafından sunulan bir çalışmada, bazı CPW'lerin S-parametrelerinin (Scattering Parameters : Saçılma Parametreleri) analizleri gerçekleştirilirken alt korumalı CPW'ler de incelenmiştir. Lyons ve ark. [126] tarafından sunulan bir çalışmada ise bu yapı SDA kullanılarak analiz edilmiştir. Kesit görünümü Şekil 2.4'te verilen alt korumalı iletim hattı konfigürasyonunda yapı uygun geometrik boyutlar seçilerek iletken destekli CPW (CBCPW) haline de dönüştürülebilir.

Burada tek yapılması gereken h_2 kalınlığının h_1 'e eşit seçilmesidir. Bu durum sunulacak olan bir modele, iki farklı iletim hattının analizini yapabilme kabiliyeti kazandırması bakımından oldukça önemlidir. CBCPW'ler Veyers ve Hanna [59] tarafından geleneksel CPW yapısından geliştirilen bir iletim hattıdır. 1980 yılında yapılan bu çalışmada yine CMT kullanılmıştır. Wang ve Okoro [127] ise yaptıkları bir çalışmada bu yapıya ait karakteristik empedans değerlerini hesaplamışlardır. CBCPW'ler sonraki yıllarda birçok araştırmacı tarafından ele alınmış ve farklı yapıları da literatüre sunulmuştur [128].



Şekil 2.4. Alt korumalı CPW'nin kesit görünümü

Şekil 2.4'te kesit görünümü verilen Alt Korumalı CPW'lerin quasi-statik analizinin gerçekleştirilebilmesi için yapı, Bölüm 2.1.1'de sonsuz dielektrik tabana sahip CPW'ler için verilen dönüşümlere benzer bir takım düzlem dönüşümleri ile paralel plakalı kondansatör haline dönüştürülür. Ve birim uzunluk başına kapasite değeri kısmi kapasitelerin toplamı olarak $C=2 (C_1+C_2)$ ile belirlenebilir. Burada C_1 dielektrik malzemenin kapasite değerini, C_2 ise h_2 kalınlığı ile verilen ve iletim elemanları ile alt koruma arasında kalan bölgenin kısmi kapasite değeridir. Bu kapasite yukarıda sözü edilen iletim hatlarındaki dielektrik malzeme yerine hava kullanılması durumundaki kapasite değerini de içermektedir. Bu değerler belirlenirken yine daha önceki yaklaşımlarda olduğu gibi metal şeritlerin kalınlıkları ihmal edilmiştir. C_1 ve C_2 kapasiteleri;

$$C_1 = \varepsilon_0 \cdot (\varepsilon_r - 1) \cdot \frac{K(k_1)}{K(k_1')} \quad (2.22)$$

$$C_2 = \varepsilon_0 \cdot \frac{K(k_2)}{K(k_2')} \quad (2.23)$$

ile belirlenir. Bu ifadelerde kullanılacak olan k_1 , k_2 , k_1' ve k_2' modülleri

$$k_i = \frac{\sinh\left(\frac{\pi \cdot a}{2h_i}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi \cdot b}{2h_i}\right)} \quad i=1, 2 \quad (2.24)$$

$$k_i' = \sqrt{1 - k_i^2} \quad i=1, 2 \quad (2.25)$$

olarak seçilmelidir. Böylece birim uzunluk başına toplam kapasite değeri;

$$C = 2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{eff} \cdot \left[\frac{K(k_2)}{K(k_2')} \right] \quad (2.26)$$

olarak tespit edilir. Bu eşitlikteki, efektif dielektrik sabitini (ε_{eff}) kısmi doldurma faktörü (partial filling factor) olarak adlandırılan parametreyle eliptik integraller cinsinden;

$$\varepsilon_{eff} = 1 + q_1 (\varepsilon_r - 1) \quad (2.27)$$

şeklinde belirleyebiliriz [65].

$$q_1 = \frac{K(k_1)}{K(k_1')} \cdot \frac{K(k_2')}{K(k_2)} \quad (2.28)$$

iletim hattının karakteristik empedansı olan (Z_0)'ı hesaplamak içinse;

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \cdot \frac{K(k_2')}{K(k_2)} \quad (2.29)$$

ifadesi kullanılabilir. Bu ifadelerdeki, $K(k_1)$, $K(k_1')$, $K(k_2)$ ve $K(k_2')$ terimleri yine birinci tür tam eliptik integralleri göstermektedir.

2.1.4 Alt ve Üst Korumalı CPW'ler

Paket halinde üretilmekte olan MIC'lerin içinde metal duvarlar alt ve üst kısımlarda kullanılmaktadır. Dolayısıyla bu tip elemanlarla olan bağlantı kolaylıkları nedeniyle alt ve üst korumalı elemanların kullanımları MIC'ler için bir avantaj teşkil etmektedir [64]. Bu yapıların analizlerini gerçekleştirmek için gerekli olan ifadeler, Gevorgian ve ark. [65] tarafından sunulan çalışmada $h_2=0$ veya $\epsilon_2=1$ seçilmesiyle elde edilebilir. Quasi-statik yaklaşımla yapılan bütün analizlerde olduğu gibi, bu yapının analizinde de CPW'lerin bütün iletken şerit kalınlıkları ihmal edilmektedir. Bu yaklaşımla, elde edilecek olan kısmi kapasite değerlerinin toplamı iletim hattının birim uzunluk başına toplam kapasite değerini verecektir. Kısmi kapasite değerlerinin elde edilebilmesi için yapı iki adımda gerçekleştirilebilecek olan bir takım düzlem dönüşümlerine tabi tutulmalıdır. Daha önce söz edilen bütün düzlem dönüşümleri tek adımda gerçekleştirilebilecek düzeydeydiler. Ancak burada yapılacak olan düzlem dönüşümlerinin ilk adımı daha öncekilerle aynı olup, ikinci adımda Schwartz-Christoffel dönüşümleri kullanılmalıdır [65]. Schwartz-Christoffel dönüşümleri ile ilgili detaylı bilgi ileriki kısımlarda verilecektir. Quasi-statik yaklaşımlar altında Şekil 2.5'te kesit görünümü verilen alt ve üst korumalı CPW'lerin efektif dielektrik sabiti (ϵ_{eff}) eşitlik (2.27) kullanılarak belirlenebilir. Karakteristik empedansı (Z_0) ise;

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \cdot \frac{q_1}{\frac{K(k_1)}{K(k_1')}} \quad (2.30)$$

eşitliği ile belirlenebilir. Bu ifadelerdeki, q_1 kısmi doldurma faktörü ise;

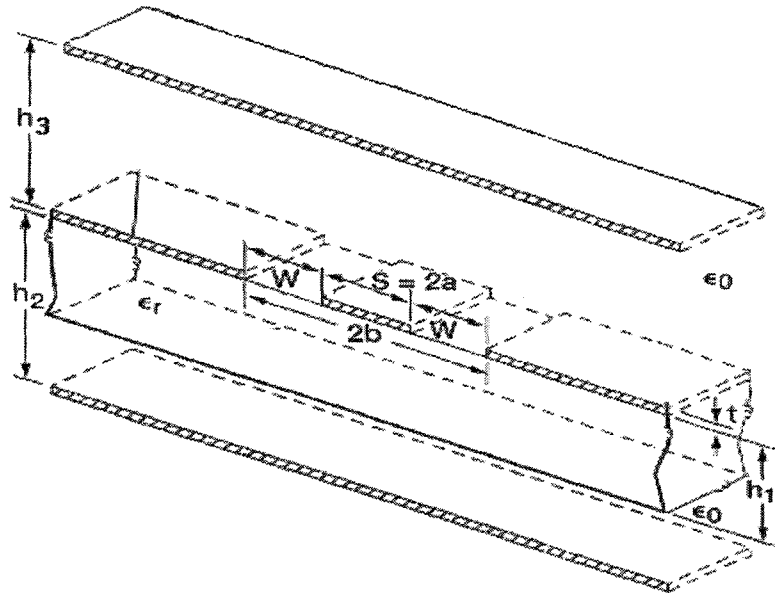
$$q_1 = \frac{\frac{K(k_1)}{K(k_1')}}{\frac{K(k_2)}{K(k_2')} + \frac{K(k_3)}{K(k_3')}} \quad (2.31)$$

ile belirlenebilir. Bu ifadelerdeki, k_1 , k_1' , k_2 ve k_2' modülleri sırasıyla eşitlik (2.24) ve (2.25) kullanılarak belirlenebilir. k_3 ve k_3' ise;

$$k_3 = \frac{\tanh\left(\frac{\pi \cdot a}{2 \cdot h_3}\right)}{\tanh\left(\frac{\pi \cdot b}{2 \cdot h_3}\right)} \quad (2.32)$$

$$k_3' = \sqrt{1 - k_3^2} \quad (2.33)$$

şeklinde elde edilebilir [65]. Bu ifadelerdeki, $K(k_1)$, $K(k_1')$, $K(k_2)$, $K(k_2')$, $K(k_3)$ ve $K(k_3')$ terimleri yine birinci tür tam eliptik integralleri göstermektedir.



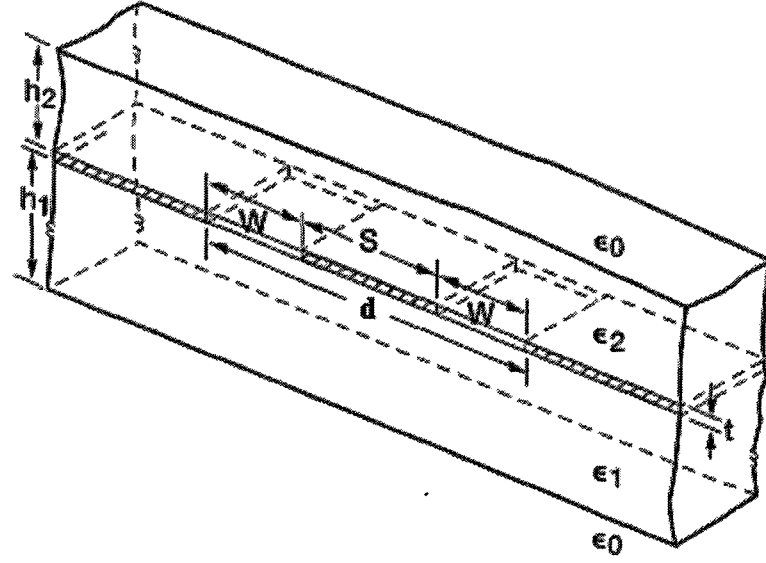
Şekil 2.5. Alt ve üst korumalı CPW'nin kesit görünümü

2.2 Çok Katmanlı CPW'ler

Çok katlı CPW (MCPW) yapıları, geleneksel CPW'den farklı olarak iletim elemanlarının iki veya daha fazla dielektrik taban arasına yerleştirilmesiyle veya iletim elemanları altında birden fazla dielektrik tabaka kullanılmasıyla gerçekleştirilen iletim hatlarıdır. MCPW'lerin analizleri, Veyers ve Hanna [59] tarafından geliştirilen kısmi kapasitans yaklaşımı kullanılarak yapılabilir. Ancak bu yaklaşımda sunulan ifadelerin doğrulukları, tek bir dielektrik tabana sahip iletim hatları için yapılan çalışmalarla [65] ispatlanmış olmasına rağmen, çok katlı tabanlar için bu yaklaşımların doğruluğu henüz bilinmemektedir. Bu amaçla, Chen ve Chou [66] tarafından 1997 yılında sunulan bir çalışmada diferansiyel optik örnekleme (DOÖ) kullanılarak çok katlı CPW ve CPS'ler için kapalı form ifadelerin doğrulukları deneysel olarak ispatlanmıştır. Bu çalışmada deneysel olarak gerçekleştirilen çok katmanlı iletim hatlarında dielektrik taban olarak, Si (Silisyum) ve SOI (Si-on-insulator; yalıtkan üzerindeki silisyum) kullanılmıştır. Aynı araştırmacılar bir yıl önce ise yine aynı yöntemi kullanarak çok katlı şerit iletim hatları içerisindeki grup hızları ile ilgili deneysel bir çalışma sunmuşlardır [129]. Çok katlı CPW'ler ayrıca Görür ve ark. [68] tarafından yapılan bir çalışmada da ele alınmıştır. Bu çalışmada daha önce incelenen yapılardan farklı olarak, MCPW yapılarının iletim elemanları asimetrik bir geometriye sahiptir. Kısmi kapasitans yaklaşımında, öncelikle her bir dielektrik katmana ait kapasite değeri belirlenir ve iletim hattının birim uzunluk başına kısmi kapasitesi, taban malzemelerinin kısmi kapasiteleri ve dielektrik materyaller yerine hava kullanılması durumundaki kapasite değerlerinin toplanmasıyla elde edilir.

2.2.1 Sandviç CPW'ler

Şekil 2.6'da kesit görünümü verilen sandviç CPW (SCPW) yapısında, yarık genişlikleri w , merkez iletken genişliği S , ve merkez iletken ile yarık genişliklerinin toplamı d ile gösterilmiştir.



Şekil 2.6. SCPW'nin kesit görünümü

SCPW'lerin analizleri sırasında öncelikle, kısmi kapasitans yaklaşımı ile her bir dielektrik katmana ait kapasite değerinin belirlenir ve iletim hattının birim uzunluk başına toplam kapasite değeri;

$$C = C_0 + C_1 + C_2 \quad (2.34)$$

elde edilir. Burada C_1 ve C_2 iletim elemanlarının sırasıyla alt ve üst kısımlarındaki dielektrik katmanların kısmi kapasite değerleridir. C_0 ise bu dielektrik materyaller yerine hava kullanılması durumundaki kısmi kapasite değeridir. Hattın birim uzunluk başına toplam kapasite değeri yine bir takım düzlem dönüşümleri ardından yapının paralel plakalı kondansatör haline dönüştürülmesi ile elde edilebilmektedir. Buna göre kısmi kapasite değerleri;

$$C_0 = 4 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} \quad (2.35)$$

$$C_i = 2 \cdot (\epsilon_i - 1) \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{K(k_i)}{K(k'_i)} \quad i=1, 2 \quad (2.36)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu formüllerde yer alan k_0 , k_0' , k_1' ve k_2' modülleri sırasıyla (2.17), (2.18), (2.16) ve (2.25) eşitliklerinden belirlenebilir. k_1 ve k_2 modülleri ise;

$$k_i = \frac{\sinh\left(\frac{\pi \cdot S}{4 \cdot h_i}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi \cdot d}{4 \cdot h_i}\right)} \quad i=1, 2 \quad (2.37)$$

ifadesi ile belirlenebilir [65]. Böylece SCPW'lerin karakteristik parametre değerlerinden biri olan efektif dielektrik sabiti, toplam kapasite değerinin, C_0 'a oranlanması ile;

$$\epsilon_{eff} = \frac{C}{C_0} \quad (2.38)$$

şeklinde, diğer bir parametre değeri olan karakteristik empedans ise efektif dielektrik sabiti cinsinden;

$$Z_0 = \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{C \cdot v_0} \quad (2.39)$$

şeklinde elde edilir. Bu ifadedeki v_0 , boş uzaydaki ışık hızını temsil etmektedir. Bu ifadelerin düzenlenmesi ve kısmi doldurma faktörlerinin devreye sokulması ile efektif dielektrik sabiti;

$$\epsilon_{eff} = 1 + q_1 \cdot (\epsilon_1 - 1) + q_2 \cdot (\epsilon_2 - 1) \quad (2.40)$$

şeklinde elde edilir. Burada sözü geçen kısmi doldurma faktörleri q_1 ve q_2 ise;

$$q_i = \frac{1}{2} \frac{K(k_i)}{K(k_i')} \cdot \frac{K(k_0')}{K(k_0)} \quad i=1, 2 \quad (2.41)$$

ifadesi ile belirlenebilir. Böylece karakteristik empedans değeri (Z_0);

$$Z_0 = \frac{30 \pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \cdot \frac{K(k_0')}{K(k_0)} \quad (2.42)$$

şeklinde elde edilir [65]. Yukarıdaki ifadelerde yer alan her bir $K(k_i)$ ve $K(k_i')$ terimi yine birinci dereceden tam eliptik integralleri göstermektedir. Analitik ifadelerden de görüleceği gibi, quasi-statik yaklaşımdan dolayı yapının analizinde iletim elemanları kalınlıklarının ihmal edilmesi gerekmektedir.

2.2.2 Alt Korumalı Sandviç CPW'ler

Şekil 2.7'de kesit görünümü verilen alt korumalı SCPW'lerin analizleri, SCPW analizlerine benzer olarak, kısmi kapasitans yaklaşımı ile yapılabilir. Quasi-statik yaklaşımdan dolayı yapının analizinde iletim elemanları kalınlıklarının ihmal edilmesi gerekmektedir. Kısmi kapasitans yaklaşımında, öncelikle her bir dielektrik katmana ait kapasite değerinin belirlenir ve iletim hattının birim uzunluk başına toplam kapasite değeri;

$$C = 2 \cdot (C_{04} + C_{03} + C_2 + C_1) \quad (2.43)$$

şeklinde elde edilir. Burada C_1 ve C_2 iletim elemanlarının sırasıyla alt ve üst kısımlarındaki dielektrik katmanların kısmi kapasite değerleridir. C_{03} kısmi kapasitesi, alt dielektrik materyal yerine hava kullanıldığı varsayımı ile, iletken koruma alt koruma arasında kalan h_3 kalınlığındaki bölgenin kısmi kapasite değeridir. C_{04} ise, h_2 kalınlığındaki dielektrik materyal yerine hava kullanıldığı durumdaki kısmi kapasite değeridir. Buna göre kısmi kapasite değerleri;

$$C_{04} = \epsilon_0 \cdot \frac{K(k_0)}{K(k_0')} \quad (2.44)$$

$$C_{03} = \epsilon_0 \cdot \frac{K(k_3)}{K(k_3')} \quad (2.45)$$

$$C_i = (\epsilon_i - 1) \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{K(k_i)}{K(k'_i)} \quad i=1, 2 \quad (2.46)$$

şeklinde ifade edilebilir. Eşitlik (2.43)'den iletim hattının birim uzunluk başına toplam kısmi kapasite değeri;

$$C = 2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{eff} \cdot \left[\frac{K(k_3)}{K(k'_3)} + \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} \right] \quad (2.47)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu formüllerde yer alan k_0 , k_1 , k_2 ve k_3 modülleri ise;

$$k_0 = \frac{S}{d} \quad (2.48)$$

$$k_i = \frac{\sinh\left(\frac{\pi \cdot S}{4 \cdot h_i}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi \cdot d}{4 \cdot h_i}\right)} \quad i=1, 2, 3 \quad (2.49)$$

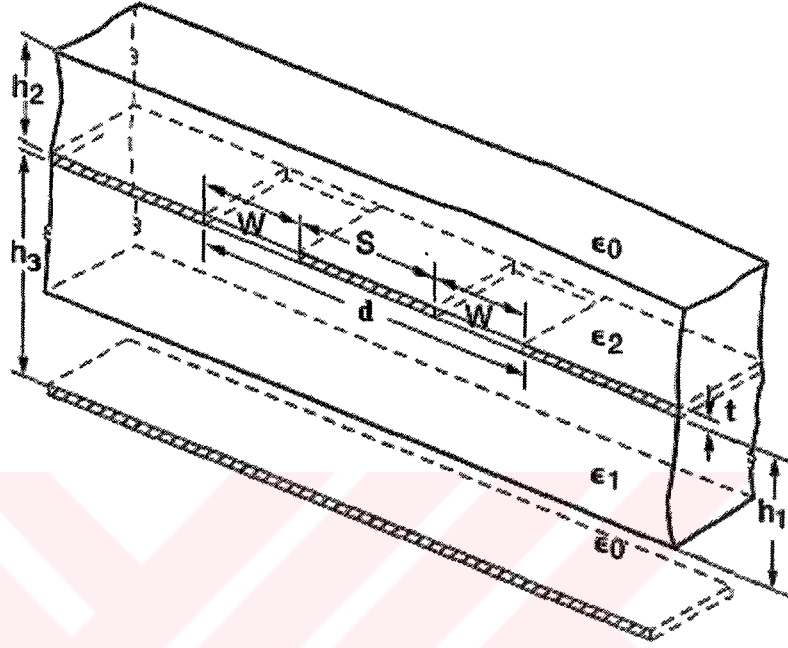
eşitlikleri ile elde edilebilir. Ve yukarıdaki ifadelerde yer alan her bir k'_i terimleri eşitlik (2.25) kullanılarak elde edilebilir. Bu ifadelerin düzenlenmesi ve kısmi doldurma faktörlerinin kullanılması ile efektif dielektrik sabiti eşitlik (2.40)'dan elde edilebilir. Ancak bu eşitliklerde kullanılacak olan kısmi doldurma faktörleri q_1 ve q_2 ;

$$q_i = \frac{K(k_i)}{K(k'_i)} \cdot \left[\frac{K(k_3)}{K(k'_3)} + \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} \right] \quad i=1, 2 \quad (2.50)$$

ifadesi ile belirlenmelidir. Böylece karakteristik empedans değeri (Z_0);

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \cdot \left[\frac{K(k_3)}{K(k'_3)} + \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} \right]^{-1} \quad (2.51)$$

şeklinde elde edilir [65]. Yukarıdaki ifadelerde yer alan her bir $K(k_i)$ ve $K(k'_i)$ terimi birinci dereceden tam eliptik integralleri göstermektedir.



Şekil 2.7. Alt korumalı SCPW'nin kesit görünümü

2.2.3 Üst Korumalı Sandviç CPW'ler

Şekil 2.8'de kesit görünümü verilen üst korumalı SCPW'lerin analizleri yine kısmi kapasitans yaklaşımı ile belirlenebilir. Bu amaçla, öncelikle hattın birim uzunluk başına toplam kapasite değeri kısmi kapasite değerlerinin toplamı şeklinde yine eşitlik (2.56)'dan elde edilebilir. Bu eşitlikteki C_1 ve C_2 kapasiteleri sırasıyla iletim elemanlarının alt ve üst kısımlarındaki dielektrik katmanların kısmi kapasite değerleridir. C_{03} kısmi kapasitesi h_2 kalınlığı ile verilen dielektrik materyal yerine hava kullanıldığı varsayılarak yani $\epsilon_2=1$ kabulü ile hesaplanan üst koruma iletkeni ve iletim elemanları arasında kalan bölgenin kısmi kapasite değeridir. C_{04} kısmi kapasitesi ise alt dielektrik materyal yerine hava kullanılması durumundaki kısmi kapasite değeridir. Hattın birim uzunluk başına toplam kapasite değeri yine bir takım düzlem dönüşümleri ardından yapının paralel plakalı kondansatör haline dönüştürülmesi ile elde edilebilmektedir. Buna göre kısmi kapasite değerleri;

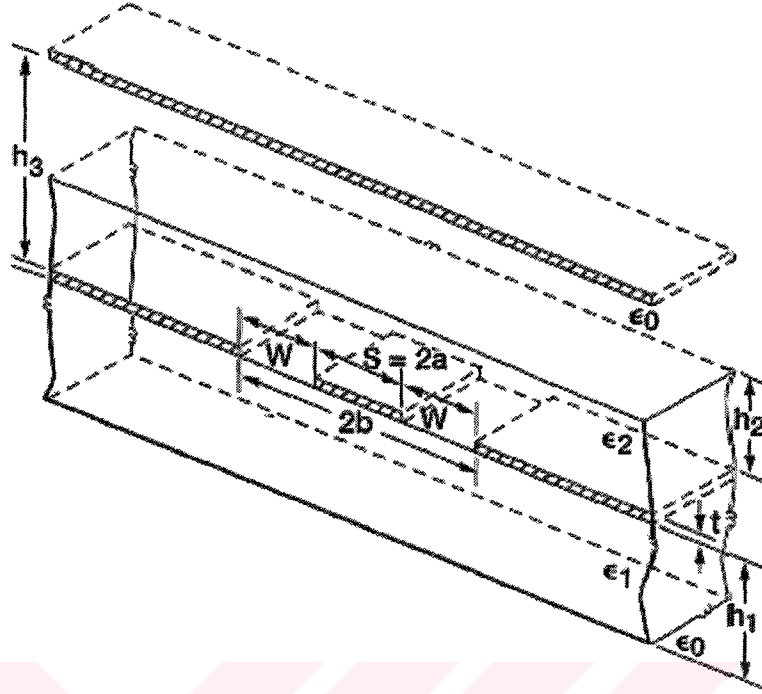
$$C_i = 2 \cdot (\epsilon_i - 1) \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{K(k_i)}{K(k'_i)} \quad i=1, 2 \quad (2.52)$$

eşitlikleri ile elde edilebilir. C_{03} ve C_{04} kısmi kapasite değerleri ise (2.44) ve (2.45) denklemlerinden belirlenebilir. Eşitlik (2.43)'den iletim hattının birim uzunluk başına toplam kısmi kapasite değeri (2.47) eşitliğindeki gibi ifade edilebilir. Ancak bu eşitliklerde yer alan k_0 ve k_2 modülleri;

$$k_0 = \frac{a}{b} \quad (2.53)$$

$$k_2 = \frac{\sinh\left(\frac{\pi \cdot a}{2 \cdot h_2}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi \cdot a}{2 \cdot h_2}\right)} \quad (2.54)$$

ile k'_0 , k_1 , k'_1 , k'_2 , k_3 ve k'_3 modülleri ise sırasıyla (2.18), (2.24), (2.25), (2.25), (2.32) ve (2.33) eşitlikleri kullanılarak hesaplanmalıdır. Böylece yapının efektif dielektrik sabiti eşitlik (2.40)'da, karakteristik empedans değeri (Z_0) ise eşitlik (2.51)'de verilen ifadeler kullanılarak belirlenebilir. Bu ifadelerde kullanılacak olan kısmi doldurma faktörleri ise (2.50) denkleminde elde edilmelidir.



Şekil 2.8. Üst korumalı SCPW'nin kesit görünümü

2.2.4 İletken Destekli Sandviç CPW'ler

Şekil 2.9'da kesit görünümü verilen CBSCPW'ler çok katmanlı iletim hattı yapılarında alternatif bir düzenleme olarak yer almaktadır. Bu yapı, SCPW'lerden farklı olarak sahip olduğu iletken taban sayesinde diğer paket halinde üretilmekte olan MIC uygulamalarında bağlantı kolaylığı sağlar. Bu yapının analizlerini gerçekleştirmek için gerekli olan bağıntılar daha önce alt korumalı SCPW'ler için verilmiş olan ifadelerde bir takım düzeltilmeler yapılarak elde edilebilir. Çünkü, CBSCPW'ler ile alt korumalı SCPW'ler arasındaki tek fark alt dielektrik materyalden hemen sonra yer alan ve dielektrik sabiti ϵ_0 ile verilen katmanının kullanılmamasıdır. Buna göre, CBSCPW'lerin analizleri yine kısmi kapasitans yaklaşımı ile belirlenebilir. Bu amaçla, öncelikle hattın birim uzunluk başına toplam kapasite değeri kısmi kapasite değerlerinin toplamı eşitlik (2.43)'den hesaplanabilir. Bu eşitlikte kullanılacak olan C_1 ve C_2 kısmi kapasite değerleri eşitlik (2.52)'den, C_{04} kısmi kapasitesi ise eşitlik (2.44)'den belirlenebilir. C_{03} kısmi kapasite değeri bu iletim hattı konfigürasyonu için, iletim elemanları altında yer alan dielektrik materyal yerine hava kullanıldığı varsayılarak yani $\epsilon_1=1$ kabulü ile hesaplanan iletken taban ve iletim elemanları arasında kalan bölgenin kısmi kapasite değeridir ve

$$C_{03} = \epsilon_0 \cdot \frac{K(k_1)}{K(k'_1)} \quad (2.55)$$

eşitliği kullanılarak elde edilir. Böylece eşitlik (2.43) kullanılarak iletim hattının birim uzunluk başına toplam kısmi kapasite değeri;

$$C = 2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{eff} \cdot \left[\frac{K(k_1)}{K(k'_1)} + \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} \right] \quad (2.56)$$

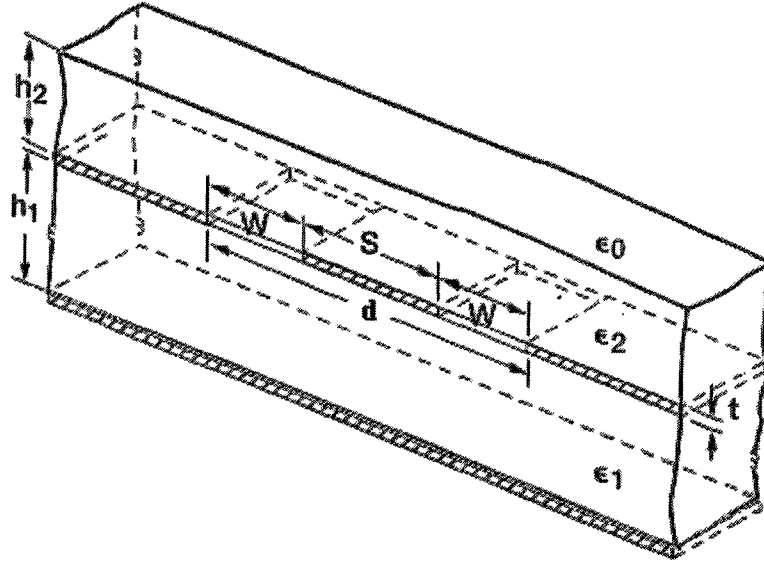
şeklinde ifade edilebilir. Alt korumalı SCPW'ler için verilen analitik ifadeler de $h_3=h_1$ olduğu için $k_3=k_1$ olarak ve $k_4=k_0$ seçilerek aynı ifadeler elde edilebilir. Yukarıdaki ifadelerde yer alan k_0 , k'_0 , k_1 , k'_1 , k_2 , k'_2 , k_3 ve k'_3 modülleri ise sırasıyla (2.17), (2.18), (2.49), (2.16), (2.49), (2.25), (2.49) ve (2.33) eşitliklerinde verilen analitik ifadelerden belirlenebilir. Böylece iletim hattının karakteristik parametrelerinden biri olan efektif dielektrik sabiti alt korumalı CPW'lerin aynı parametresi için verilen eşitlik (2.40)'da

$$q_i = \frac{K(k_i)}{K(k'_i)} \cdot \left[\frac{K(k_1)}{K(k'_1)} + \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} \right] \quad i=1, 2 \quad (2.57)$$

ile verilen doldurma faktörlerinin kullanılması ile elde edilebilir. Diğer bir parametre karakteristik empedans değeri (Z_0) ise;

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \cdot \left[\frac{K(k_1)}{K(k'_1)} + \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} \right]^{-1} \quad (2.58)$$

şeklinde verilmektedir [65]. Yukarıdaki ifadelerde yer alan her bir $K(k_i)$ ve $K(k'_i)$ terimi yine birinci dereceden tam eliptik integralleri göstermektedir.



Şekil 2.9. CBSCPW'nin kesit görünümü

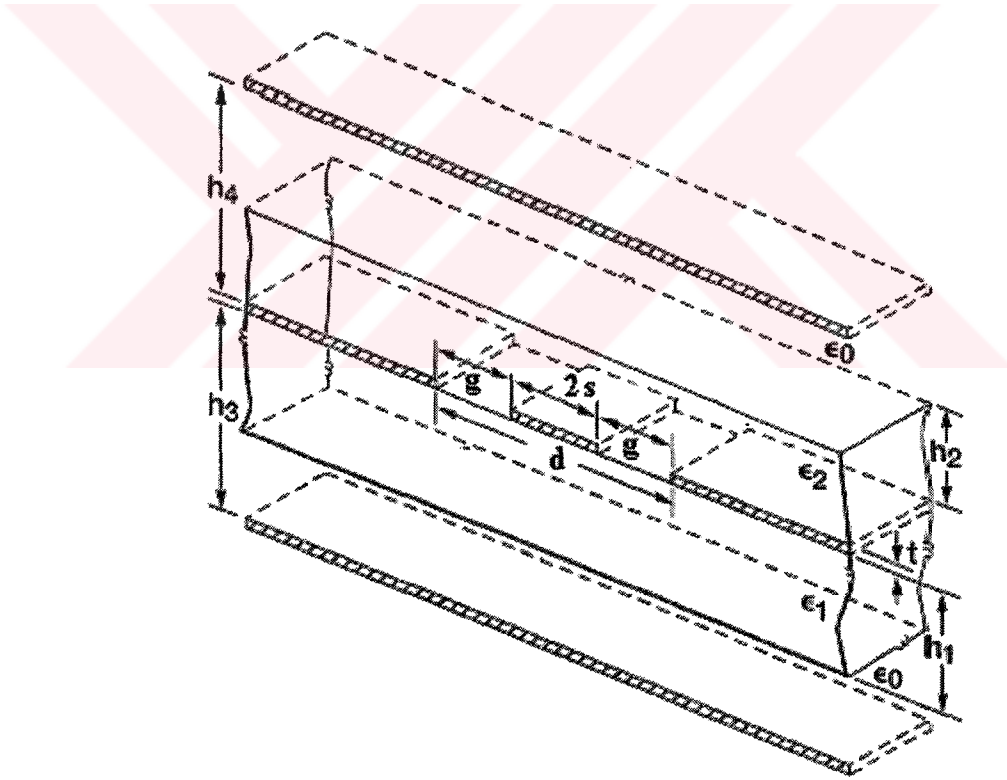
2.2.5 Alt ve Üst Korumalı SCPW'ler

Alt ve üst korumalı çok katmanlı CPW'lerin karakteristik parametre değerleri, birim uzunluk başına kapasite değeri kullanılarak CMT ile elde edilebilir. Quasi-statik yaklaşımla gerçekleştirilebilecek olan analizlerin temeli, Veyers ve Hanna [56] tarafından sunulan çalışmadaki analitik ifadelerin genişletilmesine dayanmaktadır. Kullanılacak olan bu metodun geçerliliği, kompleks iletim hattı yapıları için kesin olmamakla beraber kabul edilebilir bir doğruluk sağlamaktadır. Pratikte, karakteristik empedans için enine boyutlar, iletim hattı içerisindeki dalga boyları ile mukayese edildiğinde oldukça küçüktür. Dolayısıyla, yarıklar ve manyetik duvarlar modellenebilir ve quasi-statik yaklaşımın uygulanabilmesi için, metal şeritler ve dielektrik katmanlardaki kayıplar ihmal edilebilir. Buna ek olarak, boyuna alanların etkisi, kullanılacak olan materyallerin dielektrik sabitlerinin birbirinden farklı olması durumunda düşük frekanslarda ihmal edilebilecek düzeydedir [15].

1995 yılında Gevorgian ve ark. [65], yaptıkları bir çalışmada, alt ve üst korumalı CPW'lerin quasi-statik analizleri için analitik ifadeler ortaya koymuşlar ve çok katmanlı yapılar için CAD modeller sunmuşlardır. Bu çalışmadaki analitik ifadeler, geometrik boyutların uygun olarak seçilmesiyle farklı bir takım iletim hattı konfigürasyonlarının analizleri için de geliştirilebilmektedir. Bu amaçla, analitik ifadelerdeki değişkenlerin nasıl seçilmesi gerektiğini bir tablo halinde verilmiştir [65]. Ayrıca araştırmacılar

alternatif yapıların birkaçı için literatürdeki mevcut ölçüm sonuçları ile de CAD modelleri test etmişlerdir.

Şekil 2.10'da kesit görünümü verilen, alt ve üst korumaları SCPW'lerde, daha önceki çok katmalı yapılardan farklı olarak yarı genişlikleri g ve merkez iletken genişliği $2s$ ile gösterilmiştir. Bu iletim hatlarının quasi-statik analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için yapı yine bir takım düzlem dönüşümleri ile paralel plakalı kondansatör haline dönüştürülerek, kısmi kapasite değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Ancak burada uygulanacak olan düzlem dönüşümleri Bölüm 2.1.5'te de bahsedildiği gibi iki adımda gerçekleştirilebilecek türden dönüşümlerdir. İlk adımdaki dönüşümler daha önceki kısımlarda verilen düzlem dönüşümlerine benzemesine karşın, ikinci adımdaki düzlem dönüşümleri çok daha farklıdır.



Şekil 2.10. Alt ve üst korumalı SCPW'nin kesit görünümü

İki adımda gerçekleştirilebilecek olan bu düzlem dönüşümleri Şekil 2.11'te verilmiştir. Bu dönüşümler sırasında CMT'nin simetri özelliğinden dolayı, yapıların sadece pozitif reel bölgeleri için gerekli olan dönüşümler ele alınmıştır. Bu düzlem dönüşümlerinin ilk adımı;

$$R = \cosh^2 \left(\frac{\pi \cdot z}{2 \cdot h_i} \right) \quad (2.59)$$

dönüşümü kullanılarak *Z-düzlemi*'ndeki yapılar *R-Düzlemi*'ne dönüştürülür. Bu eşitlikte verilen *i* indisleri sırasıyla Şekil 2.11.a, 11.b, 11.c, ve 11.d'deki yapıları temsil etmektedir. Aynı şekilde verilen I, II, III ve IV bölgelerini temsil eden noktalar;

$$t_1 = 1 \quad (2.60)$$

$$t_2 = \cosh^2 \left(\frac{\pi \cdot s}{2 \cdot h_i} \right) \quad (2.61)$$

$$t_3 = \cosh^2 \left(\frac{\pi \cdot (s + g)}{2 \cdot h_i} \right) \quad (2.62)$$

eşitlikleri kullanılarak bulunabilir. İkinci adımda ise Schwartz-Christoffel dönüşümü kullanılarak *R-Düzlemi*'nin üst yarı bölgesi, *W-Düzlemi*'ndeki dikdörtgenin iç bölgesine dönüştürülebilir. Şekil 2.11. a ve 11.c'de görülen III ve IV bölgeleri için,

$$W = \frac{2 \cdot A_1}{\sqrt{t_2 \cdot (t - t_3)}} \cdot F(\varphi, k) + A \quad (2.63)$$

ifadesi ile elde edilir. Burada $F(\varphi, k)$, birinci dereceden eliptik integraldir. Eşitlik (2.63)'de yer alan φ ve k modülleri ise;

$$\varphi = \arcsin \sqrt{\frac{t_2 \cdot (t - t_3)}{t_3 \cdot (t - t_2)}} \quad (2.64)$$

$$k = \sqrt{\frac{t_3 \cdot (t_2 - t)}{t_2 \cdot (t_3 - 1)}} \quad (2.65)$$

eşitlikleri ile belirlenebilir. A_1 ve A_2 sabitleri, W ve R -Düzlem'lerinde yapılan işlemlerde (2.60), (2.61) ve (2.62) eşitlikleri kullanılarak belirlenebilir. Schwartz-Christoffel dönüşümünün uygulanmasıyla Şekil 2.11.b ve 11.d'de gösterilen I ve II bölgeleri için,

$$W = \frac{2 \cdot B_1}{\sqrt{(t_3 - t_1)}} \cdot F(\varphi, k) + B_2 \quad (2.66)$$

ifadesi ile elde edilir. Burada $F(\varphi, k)$, yine birinci dereceden eliptik integraldir. φ ve k modülleri ise;

$$\varphi = \arcsin \sqrt{\frac{(t_3 - 1)}{(t - 1)}} \quad (2.67)$$

$$k = \sqrt{\frac{(t_2 - 1)}{(t_3 - 1)}} \quad (2.68)$$

ile elde edilebilir. B_1 ve B_2 sabitleri, (2.63), (2.64) ve (2.65) eşitlikleri kullanılarak elde edilen sınır şartlarından belirlenebilir. Böylece düzlem dönüşümleri ile paralel plakalı kondansatör haline dönüştürülen yapının birim uzunluk başına toplam kapasite değeri eşitlik (2.43) kullanılarak,

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{eff} \cdot \frac{2 \cdot s}{G} \quad (2.69)$$

şeklinde elde edilebilir. Burada,

$$\frac{2 \cdot s}{G} = \sum_{i=1}^4 \frac{k_i}{k_i'} \quad (2.70)$$

şeklinde kullanılmalıdır. Bu eşitlikteki her bir k_i ve k_i' ifadesi birinci dereceden eliptik integrali temsil etmektedir. Ve bu eliptik integral modülleri sırasıyla;

$$k_i = \frac{\sinh\left(\frac{\pi \cdot s}{2 \cdot h_i}\right)}{\sinh\left(\frac{\pi \cdot (s+g)}{2 \cdot h_i}\right)} \quad (2.71)$$

eşitlikleri kullanılarak, her bir k_i' terimi ise (2.25) eşitliğinden faydalanılarak hesaplanabilir. Buna göre kısmi kapasite değerleri;

$$C_{0i} = 2 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{K(k_i)}{K(k_i')} \quad (2.72)$$

eşitliklerinden C_1 ve C_2 kısmi kapasiteleri ise eşitlik (2.52)'den belirlenebilir. Böylece eşitlik (2.43)'ün kullanılması ile de iletim hattının birim uzunluk başına toplam kısmi kapasite değeri;

$$C = 2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{eff} \cdot \left[\frac{K(k_3)}{K(k_3')} + \frac{K(k_4)}{K(k_4')} \right] \quad (2.73)$$

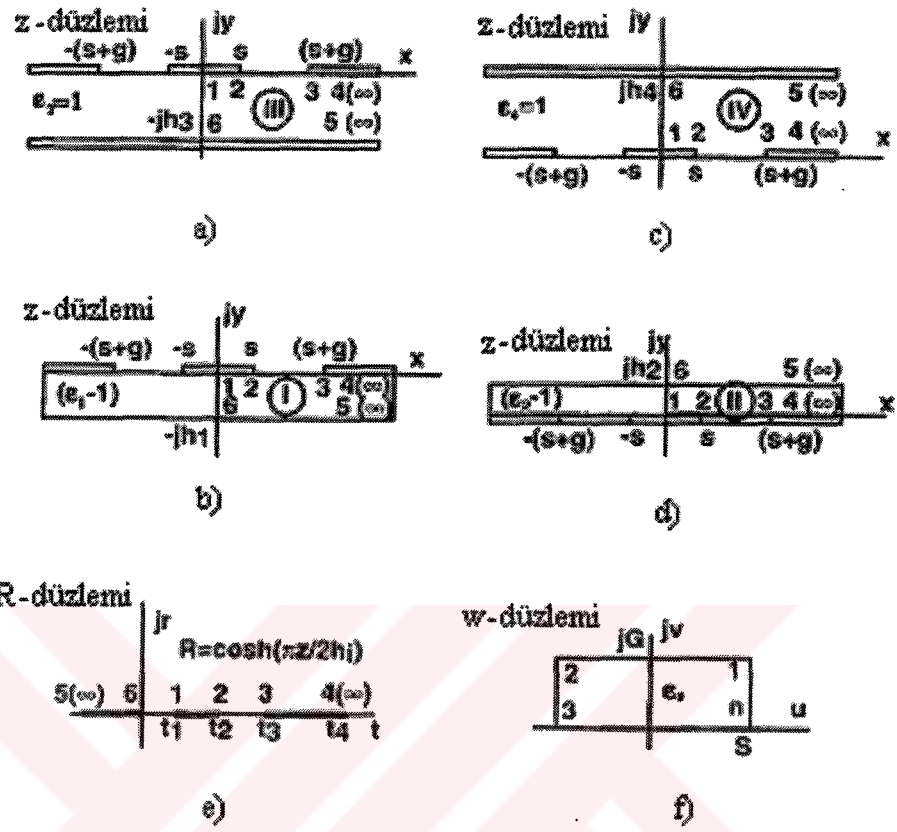
Bu ifadelerin düzenlenmesi ve kısmi doldurma faktörlerinin devreye sokulması ile efektif dielektrik sabiti (2.40) eşitliğinde kısmi doldurma faktörleri olarak;

$$q_i = \frac{K(k_i)}{K(k_i')} \cdot \left[\frac{K(k_3)}{K(k_3')} + \frac{K(k_4)}{K(k_4')} \right] \quad i=1, 2 \quad (2.74)$$

ifadeleri kullanılması ile belirlenebilir. Karakteristik empedans değeri (Z_0) ise;

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \cdot \left[\frac{K(k_3)}{K(k_3')} + \frac{K(k_4)}{K(k_4')} \right]^{-1} \quad (2.75)$$

şeklinde elde edilir [65]. Yukarıdaki ifadelerde yer alan her bir $K(k_i)$ ve $K(k_i')$ terimi ise yine birinci dereceden tam eliptik integralleri göstermektedir.



Şekil 2.11. Alt ve üst korumalı SCPW'ler için konform dönüşümler

BÖLÜM 3

SİLİNDİRİK İLETİM HATLARI

3.1 Giriş

Silindirik geometriye sahip yapılar, iletim elemanlarının silindirik bir geometri kazandırılan dielektrik tabakanın iç veya dış kısmına yerleştirilmesiyle iki farklı türde gerçekleştirilebilir. Ayrıca iletim elemanları iki farklı dielektrik katman arasına alınarak çok katmanlı silindirik yapıların oluşturulması da mümkündür. 1997 yılında Su ve Wong [40] tek katmanlı silindirik yapıları, CMT (Conformal Mapping Technique : Konform Dönüşüm Tekniği) kullanarak analiz etmişlerdir. Quasi-TEM yaklaşımında yapının enine boyutlarının çalışma dalga boyuna göre küçük olduğu kabul edilmektedir. Bu yaklaşım kullanılarak analizleri gerçekleştirilen iletim hatlarının yarık genişlikleri simetrik bir geometriye sahiptir. Ayrıca bu çalışmada, iki farklı silindirik yapının iki farklı konfigürasyonu incelenmiştir. Birincisi, iletim elemanlarının silindirik dielektrik tabanın dış yüzeyine, ikincisi ise, iç yüzeyine yerleştirilmesiyle elde edilen simetrik CCPW yapısıdır. Aynı araştırmacılar, daha önce yaptıkları iki çalışmada bu iki yapıyı ayrı ayrı inceleyerek frekans bağımlı yaklaşımlardan moment metodu kullanarak dispersiyon karakteristiklerini incelemişlerdir [35, 130]. Ayrıca Duyar [15] tarafından sunulan tez çalışmasında çok katmanlı CPW'lerin analizleri de CMT kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Karpuz ve ark. [67] tarafından yapılan bir çalışmada ise silindirik asimetrik şerit hatların quasi-statik analizleri için analitik ifadeler sunulmuştur. 2000 yılında Dib ve Al-Zoubi [72] sonlu toprak düzlemlerine sahip silindirik asimetrik CPW (ACCPW)'lerin quasi-statik analizlerini literatüre kazandırmışlardır.

Bir sonraki kısmında, tek katmanlı silindirik simetrik yapıların, CMT ile elde edilen quasi-statik parametreleri için geçerli olan analitik ifadeler yer verilecektir. Daha sonraki kısımlarda ise, bu tez çalışmasında YSA yaklaşımı kullanılarak modellenen silindirik geometriye sahip iletim hatları ve quasi-statik analizlerinden bahsedilecektir.

3.1.1 Tek Katmanlı Silindirik Simetrik CPW'ler

Giriş kısmında da bahsedildiği gibi bu yapı iletim elemanlarının yerleşimine göre iki farklı geometride gerçekleştirilebilen bir iletim hattı yapısıdır. Bu kısımda, iletim elemanları silindirik dielektrik tabanın dış yüzeyine yerleştirilerek elde edilen yapının quasi-statik parametrelerine ilişkin analitik ifadeler verilecek ve son olarak bu ifadeler kullanılarak, iletim elemanları dielektrik tabanın iç yüzeyine yerleştirilmiş olan silindirik simetrik yapının analizlerine nasıl geçiş yapılabileceğinden bahsedilecektir.

Tek katmanlı simetrik CCPW'nin konfigürasyonu Şekil 3.1'de görülmektedir. Bu yapıda toprak düzlemleri sonsuz uzunluğa ve yarık genişlikleri simetrik bir geometriye sahip olup silindirik dielektrik tabakanın dış yüzeyine yerleştirilmiştir. Bu şekilde w yarık genişliklerini, S merkez iletken genişliğini, b dielektrik tabakanın dış yarıçapını, ve a ise dielektrik tabakanın iç yarıçapını göstermektedir. Merkez iletken genişliği S 'in açisal uzunluğu 2ϕ dir. Şekil 3.1'deki yapı;

$$z = -j \ln\left(\frac{b}{r}\right) + \phi \quad (3.1)$$

dönüşüm fonksiyonu kullanılarak Şekil 3.2.a'da yer alan sonlu toprak düzlemlili düzlemsel CPW yapısına dönüştürülebilir. Düzlemsel CPW'lerin quasi-statik parametreleri yapının, Bölüm 2'de detaylı bir şekilde söz edilen düzlem dönüşümleri ile paralel plakalı kondansatör haline dönüştürülmesi ile hesaplanabilir. Bu düzlem dönüşümleri Şekil 3.2'de verilmektedir. CMT'de kısmi kapasitans yaklaşımının kullanılması ile Ghione ve Naldi [64] yapının toplam birim uzunluk başına kapasite değerini; taban malzemesinin dielektrik sabitini ϵ_r-1 kabul ederek hesapladıkları kısmi kapasite değeri ile dielektrik malzeme olarak hava kullanıldığı varsayımı ile hesapladıkları kısmi kapasite değerlerinin toplamı şeklinde ifade etmektedirler. Dielektrik malzeme olarak hava kullanılması durumundaki kısmi kapasite değerini hesaplamak için Şekil 3.2.a'daki birinci bölge;

$$t = z^2 \quad (3.2)$$

fonksiyonu ile Şekil 3.2.b'deki t -düzlemi'nin üst yarı bölgesine ve ardından,

$$w = \int_{t_0}^t \frac{dt}{\sqrt{t \cdot (t - t_1) \cdot (t - t_2) \cdot (t - t_3)}} \quad (3.3)$$

dönüşümü kullanılarak Şekil 3.2.d'de yer alan w -düzlemi'ndeki dikdörtgenin iç bölgesine dönüştürülür. Böylece kısmi kapasite değeri;

$$C_{air} = 4 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{K(k_0)}{K(k_0')} \quad (3.4)$$

şeklinde elde edilir. Bu ifade de yer alan k_0 ve k_0' modülleri ise;

$$k_0 = \frac{S}{d} \cdot \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{d}{2 \cdot b \cdot \pi}\right)^2}{1 - \left(\frac{S}{2 \cdot b \cdot \pi}\right)^2}} \quad (3.5)$$

$$k_0' = \sqrt{1 - k_0^2} \quad (3.6)$$

ifadeleri ile belirlenebilir. Burada d merkez iletken ve yarık genişlikleri toplamını temsil etmektedir. Dielektrik bölgenin kısmi kapasitesini belirlemek içinse, Şekil 3.2.a'daki bölge ilk olarak;

$$x = \cosh^2 \left(\frac{\pi \cdot z}{\ln(b/a)} \right) \quad (3.7)$$

fonksiyonu ile Şekil 3.2.c'deki x -düzlemi'nin alt yarı bölgesine ve daha sonra,

$$w = \int_{x_0}^x \frac{dx}{\sqrt{x \cdot (x - x_1) \cdot (x - x_2) \cdot (x - x_3)}} \quad (3.8)$$

dönüşümü ile Şekil 3.2.d'de gösterilen w -düzlemi'ndeki dikdörtgenin iç bölgesine dönüştürülür. Böylece, dielektrik bölgenin kısmi kapasite değeri;

$$C_1 = 2 \cdot \varepsilon_0 \cdot (\varepsilon_r - 1) \cdot \frac{K(k_1)}{K(k_1')} \quad (3.9)$$

şeklinde elde edilir. Bu ifade de yer alan k_1 ve k_1' modülleri ise;

$$k_1 = \frac{\sinh(A \cdot S)}{\sinh(A \cdot d)} \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{\sinh^2(A \cdot d)}{\sinh^2(2 \cdot A \cdot b \cdot \pi)}}{1 - \frac{\sinh^2(A \cdot S)}{\sinh^2(2 \cdot A \cdot b \cdot \pi)}}} \quad (3.10)$$

$$k_1' = \sqrt{1 - k_1^2} \quad (3.11)$$

ve burada geçen A sabiti,

$$A = \frac{\pi}{4 \cdot b \cdot \ln(b/a)} \quad (3.12)$$

ile elde edilebilir. Böylece yapının birim uzunluk başına toplam kapasite değeri;

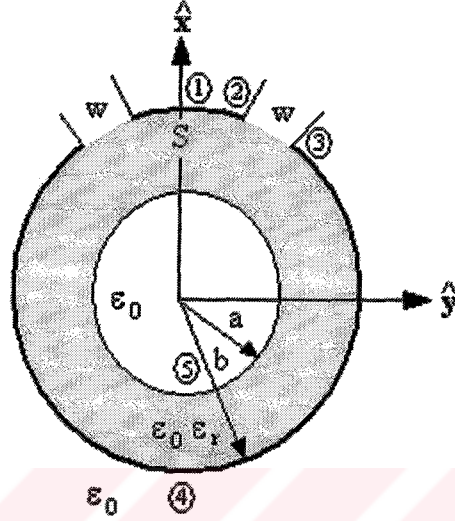
$$C = C_{air} + C_1 \quad (3.13)$$

şeklinde belirlenir. Bu ifadelerle de yapının efektif dielektrik sabiti ve karakteristik empedansı sırasıyla;

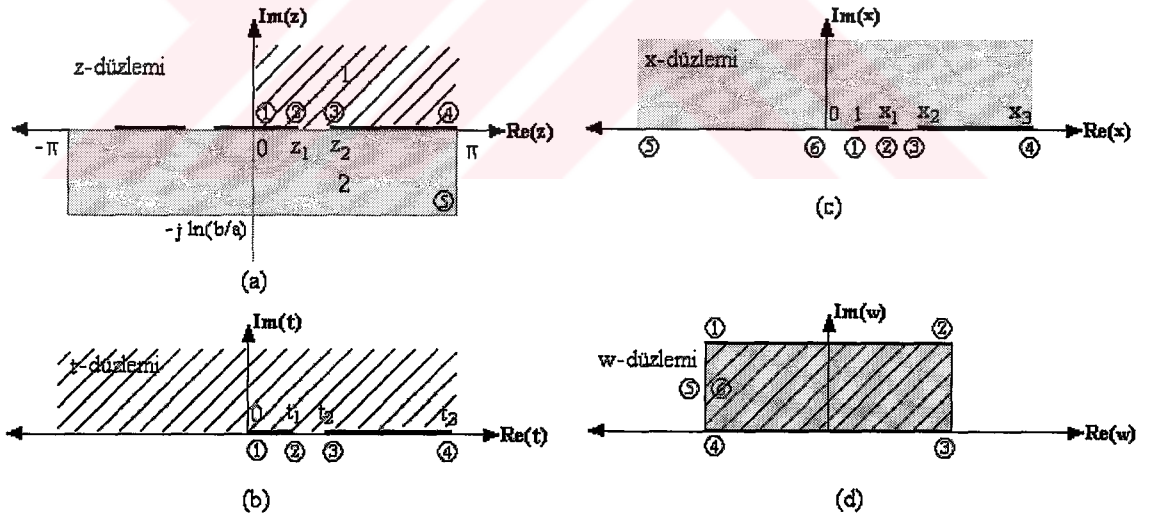
$$\varepsilon_{eff} = \frac{C}{C_{air}} = 1 + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \cdot \frac{K(k_1)}{K(k_1')} \cdot \frac{K(k_0')}{K(k_0)} \quad (3.14)$$

$$Z_0 = \frac{30 \cdot \pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \cdot \frac{K(k_0')}{K(k_0)} \quad (3.15)$$

ifadeleri ile belirlenebilir [40]. Bu ifadelerdeki her bir $K(k_i)$ ve $K(k'_i)$ terimi yine birinci dereceden tam eliptik integralleri göstermektedir.



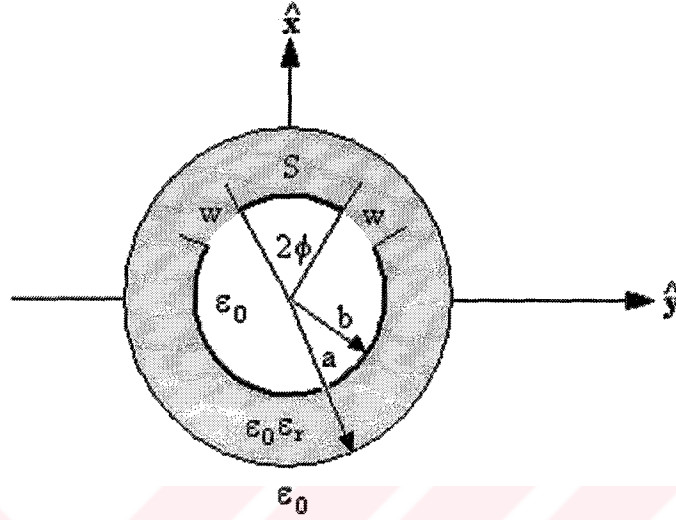
Şekil 3.1. Simetrik CCPW yapısı



Şekil 3.2. Düzlem dönüşümleri

Şekil 3.3.'te verilmekte olan silindirik iletim hattı konfigürasyonunda iletim elemanları silindirik dielektrik katmanın iç yüzeyine yerleştirilmiştir. Bu yapıya ait quasi-statik parametrelerin elde edilebilmesi için yukarıda, verilen ifadelerin tamamında dielektrik katmana ait iç ve dış yarıçap değerlerinin yer değiştirilmesi ile elde edilebilir. Yani bu ifadelerde a yerine b , b yerine de a kullanılarak iletim elemanlarının dielektrik katmanın

iç yüzeyine yerleştirilmesi ile oluşturulan yapının karakteristik parametrelerine ilişkin analitik ifadeler elde edilebilir [40].



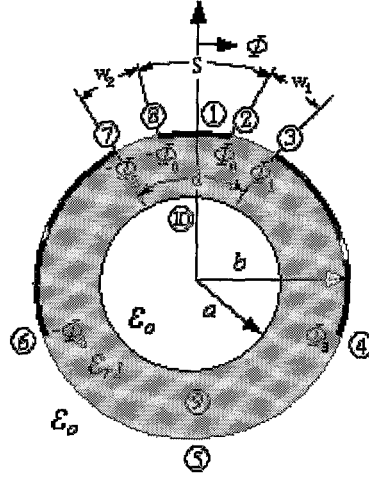
Şekil 3.3. İletim elemanları dielektrik tabakanın iç yüzeyine yerleştirilmiş simetrik CCPW yapısı

3.1.2 Silindirik Asimetrik CPW'ler

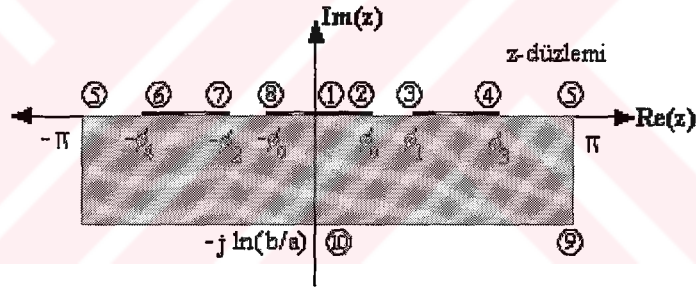
Simetrik yapılara benzer olarak iki farklı geometrik boyutta gerçekleştirilebilen asimetrik silindirik yapıların quasi-statik analizleri ilk olarak Dib ve Al-Zoubi [72] tarafından gerçekleştirilmiştir. Dib ve Al-Zoubi tarafından sunulan bu yapıda daha önceki silindirik yapılardan farklı olarak toprak düzlemleri sonlu geometrik boyutlara sahiptir. Ancak toprak düzlemlerinin yerleştirme konumları genişletilerek Bölüm 3.1.1'de verilen silindirik yapının quasi-statik parametrelerine ilişkin analitik ifadelerde elde edilebilir.

Analizlerine ilişkin CMT ile elde edilen analitik ifadelerin verileceği silindirik asimetrik CPW (ACCPW)'nin yapısı Şekil 3.4'te görülmektedir. Bu şekilde a ve b dielektrik katmanın sırasıyla iç ve dış yarıçaplarını göstermektedir. h dielektrik katmanın kalınlığını, ϵ_r ise taban malzemenin dielektrik sabitini temsil etmektedir. Aynı şekilde merkez iletken genişliği, düzlemde $\phi=0^\circ$ 'ye yerleştirilmiş olan S ile, yarı genişlikleri w_1 ve w_2 ile ve iki toprak düzlemi arasındaki açıklık ise d ile gösterilmektedir. Ayrıca,

silindirik dielektrik katmanın iç ve dış kısımları hava ile dolu olduğu kabul edilmektedir. Toprak düzlemleri ϕ_1 - ϕ_3 ve ϕ_2 - ϕ_4 arasına konumlandırılmıştır.



a) Orijinal ACCPW yapısı



b) Düzlemsel CPW'ye dönüşüm

Şekil 3.4. ACCPW yapısı

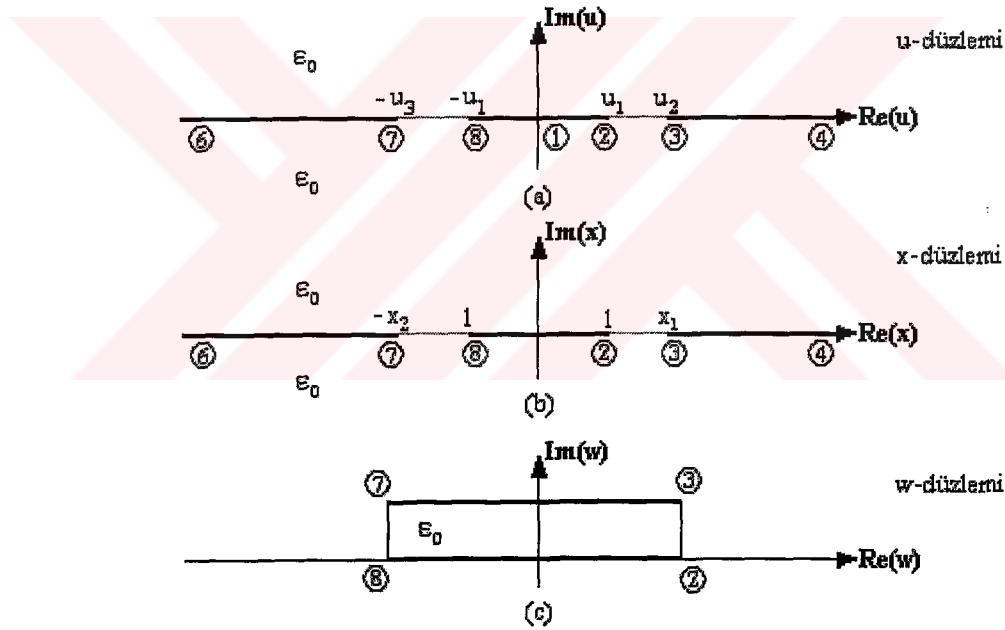
Bu iletim hattı konfigürasyonunun birim uzunluk başına toplam kapasite değerinin belirlenebilmesi için yapının bir takım konform dönüşüm teknikleri ile paralel plakalı kondansatör haline dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla, ilk olarak orijinal silindirik yapı eşitlik (3.1)'de verilen düzlem dönüşümünden faydalanılarak Şekil 3.5.b'de verilen düzlemsel CPW haline getirilir.

Böylece iletim hattının birim uzunluk başına toplam kapasite değeri, dielektrik materyalin yokluğundaki hava kapasite değeri ve dielektrik sabiti $\epsilon_r - 1$ olan dielektrik materyal üzerindeki hat kapasitelerinin toplamı şeklinde belirlenebilir [64]. Dielektrik

materyalin yokluğu varsayılarak elde edilecek olan hava kapasitesini belirleyebilmek için yapı;

$$u = \frac{z}{\sqrt[4]{(\phi_3^2 - z^2)(\phi_4^2 - z^2)}} \quad (3.16)$$

dönüşümü ile Şekil 3.5.a'da verilen *u*-düzlemi'ne dönüştürülür. Daha sonra bu yapıya literatürde mevcut olan ve Şekil 3.5'de verilen seri bir düzlem dönüşümü uygulanır. Böylece, Şekil 3.5.b'nin üst yarı düzlemi *w*-düzlemi'ndeki içi hava ile dolu olan paralel plakalı kondansatöre dönüştürülmüş olur.



Şekil 3.5. ACCPW'nin hava kapasitesinin hesaplanabilmesi için gerekli olan düzlem dönüşümleri

Sonuç olarak hava kapasitesi,

$$C_{air} = 4 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{K(k_1)}{K(k_1')} \quad (3.17)$$

şeklinde elde edilir. Bu ifadede yer alan k_1' modülü eşitlik (3.11) kullanılarak, k_1 modülü ise,

$$k_1 = \frac{S}{d} \cdot \sqrt{\frac{1-d^2/4\pi^2b^2}{1-S^2/4\pi^2b^2}} \quad (3.18)$$

eşitliği ile belirlenebilir. Bu dönüşümlerin ardından ACCPW yapısı Şekil 3.6'da verilen ve taban malzemesi olarak dielektrik sabiti ϵ_r-1 olan dielektrik materyal kullanıldığı varsayımı ile elde edilecek paralel plakalı kondansatörün sağ yarı düzleminin kısmi kapasite değeri,

$$C_{s1} = \epsilon_0 \cdot (\epsilon_{r1} - 1) \cdot \frac{K(k_2)}{K(k_2')} \quad (3.19)$$

şeklinde belirlenebilir. Bu ifadedeki k_2 ve k_2' modülleri ise,

$$k_2 = \frac{\sinh(2 \cdot A \cdot b \cdot \phi_0)}{\sinh(2 \cdot A \cdot b \cdot \phi_1)} \left[\frac{1 - \sinh^2(2 \cdot A \cdot b \cdot \phi_1) / \sinh^2(2 \cdot A \cdot b \cdot \phi_3)}{1 - \sinh^2(2 \cdot A \cdot b \cdot \phi_0) / \sinh^2(2 \cdot A \cdot b \cdot \phi_3)} \right]^{0.5} \quad (3.20)$$

eşitliği ile belirlenebilir. Bu eşitlikte kullanılan A sabiti ise eşitlik (3.12)'de verilenle aynıdır. Şekil 3.6'da verilen paralel plakalı kondansatörün sol yarı düzleminin kısmi kapasite değeri,

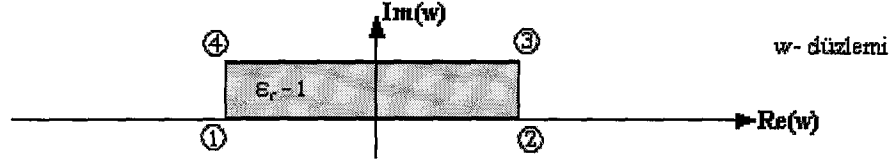
$$C_{s2} = \epsilon_0 \cdot (\epsilon_{r1} - 1) \cdot \frac{K(k_3)}{K(k_3')} \quad (3.21)$$

eşitliği ile belirlenir. Bu eşitlikte yer alan k_3 modülü ise,

$$k_3 = \frac{\sinh(2 \cdot A \cdot b \cdot \phi_0)}{\sinh(2 \cdot A \cdot b \cdot \phi_2)} \left[\frac{1 - \sinh^2(2 \cdot A \cdot b \cdot \phi_2) / \sinh^2(2 \cdot A \cdot b \cdot \phi_4)}{1 - \sinh^2(2 \cdot A \cdot b \cdot \phi_0) / \sinh^2(2 \cdot A \cdot b \cdot \phi_4)} \right]^{0.5} \quad (3.22)$$

eşitliği ile belirlenebilir. Yukarıdaki eşitliklerde yer alan k_2' ve k_3' modülleri ise,

$$k_i' = \sqrt{1 - k_i^2} \quad i=2, 3 \quad (3.23)$$



Şekil 3.6. Dielektrik permitivitesi ϵ_r-1 olan bir dielektrik materyal ile doldurulmuş olan paralel plakalı kondansatör

Eşitlik (3.18), (3.20) (3.22) ve (3.23)'de verilen ifadeler kullanılarak iletim hattının birim uzunluk başına kısmi kapasite değeri

$$C = C_a + C_{s1} + C_{s2} \quad (3.24)$$

şeklinde elde edilir. Buradan da yapının efektif dielektrik sabiti ϵ_{eff} ,

$$\epsilon_{eff} = \frac{C}{C_{air}} = 1 + \frac{\epsilon_r - 1}{4} \cdot \frac{K(k_1')}{K(k_1)} \cdot \left[\frac{K(k_2)}{K(k_2')} + \frac{K(k_3)}{K(k_3')} \right] \quad (3.25)$$

şeklindedir. Karakteristik empedans değeri Z_0 ise,

$$Z_0 = \frac{\sqrt{\epsilon_{eff}}}{C \cdot v_0} \quad (3.26)$$

ifadesi kullanılarak elde edilebilir. Bu ifadedeki v_0 boşluktaki ışık hızını göstermektedir.

Eşitlik (3.24)'de (3.25) ve (3.26)'dan elde edilen değerlerin kullanılması ile,

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \cdot \frac{K(k_1')}{K(k_1)} \quad (3.27)$$

şeklinde elde edilir. Yukarıdaki ifadelerde yer alan her bir $K(k_i)$ ve $K(k_i')$ terimi yine birinci dereceden tam eliptik integralleri göstermektedir.

3.1.3 Çok Katmanlı Silindirik Simetrik CPW'ler

Şekil 3.7'de geometrisi verilen çok katmanlı CPW'ler, iletim elemanlarının alt kısmında iki ve üst kısmında bir adet olmak üzere üç ayrı dielektrik katman içerirler. Bu şekilde, w 'lar yarık genişliklerini, S merkez iletken genişliğini, h_i 'ler dielektrik taban kalınlıklarını, ϵ_i 'ler taban malzemelerinin dielektrik permitivitesini, a , b , c ve d ise dielektrik katmanlarının yarıçaplarını göstermektedir. Bu yapının karakteristik parametrelerinin elde edilebilmesi için daha önceki kısımlarda bahsedilen kısmi kapasitans yaklaşımı ile yapının birim uzunluk başına toplam kısmi kapasite değeri konform dönüşümlerle yapının paralel plakalı kondansatör haline dönüştürülmesi ile kısmi kapasitelerin toplamı şeklinde belirlenebilir. Böylece birim uzunluk başına toplam kısmi kapasite değeri;

$$C = C_0 + C_1 + C_2 + C_3 \quad (3.28)$$

şeklinde elde edilir. Bu ifadedeki C_0 kısmi kapasite değeri, dielektrik tabanların yerine hava kullanılması durumundaki kısmi kapasite değeridir. C_1 , C_2 ve C_3 kısmi kapasite değerleri ise dielektrik sabitleri sırasıyla ϵ_1 - ϵ_2 , ϵ_2 -1 ve ϵ_3 -1 olan ve h_1 , h_2+h_1 ve h_3 kalınlıklı dielektrik tabanların kısmi kapasite değerleridir. Sonuç olarak MCCPW'nin birim uzunluk başına toplam kısmi kapasite değeri;

$$C = 2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{eff} \cdot \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} \quad (3.29)$$

olarak, yapının efektif dielektrik sabiti ise;

$$\epsilon_{eff} = 1 + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \cdot q_1 + \frac{\epsilon_2 - 1}{2} \cdot q_2 + \frac{\epsilon_3 - 1}{2} \cdot q_3 \quad (3.30)$$

ifadesi ile belirlenebilir. Bu ifadedeki kısmi doldurma faktörleri ise,

$$q_i = \frac{K(k_i)}{K(k'_i)} \cdot \frac{K(k'_0)}{K(k_0)} \quad i=1, 2, 3 \quad (3.31)$$

ifadeleri ile verilmektedir [15]. Bu ifade de yer alan k_0 ve k'_0 modülleri ise sırasıyla eşitlik (3.5) ve (3.6)'dan elde edilebilir. Diğer kısmi doldurma faktörleri ise $i=1, 2$ ve 3 olmak üzere;

$$k_i = \frac{\sinh(B_i \cdot S)}{\sinh(B_i \cdot d)} \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{\sinh^2(B_i \cdot d)}{\sinh^2(2 \cdot B_i \cdot b \cdot \pi)}}{1 - \frac{\sinh^2(B_i \cdot S)}{\sinh^2(2 \cdot B_i \cdot b \cdot \pi)}}} \quad (3.32)$$

$$k'_i = \sqrt{1 - k_i^2} \quad (3.33)$$

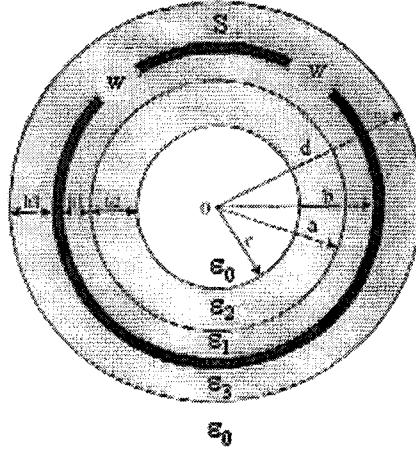
ifadeleri ile belirlenebilir. Bu ifadelerdeki d yarık ve merkez iletken genişliklerinin toplamını göstermektedir. Her bir B_i sabiti ise sırasıyla;

$$B_1 = \ln(b/a) \quad (3.34)$$

$$B_2 = \ln(b/c) \quad (3.35)$$

$$B_3 = \ln(d/b) \quad (3.36)$$

şeklinde ifade edilir. Sonuç olarak MCCPW'lerin karakteristik empedansı eşitlik (3.15)'de uygun modüllerin kullanılması ile elde edilebilir [15]. Bu ifadelerdeki her bir $K(k_i)$ ve $K(k'_i)$ terimi yine birinci dereceden tam eliptik integralleri göstermektedir.



Şekil 3.7. MCCPW yapısı

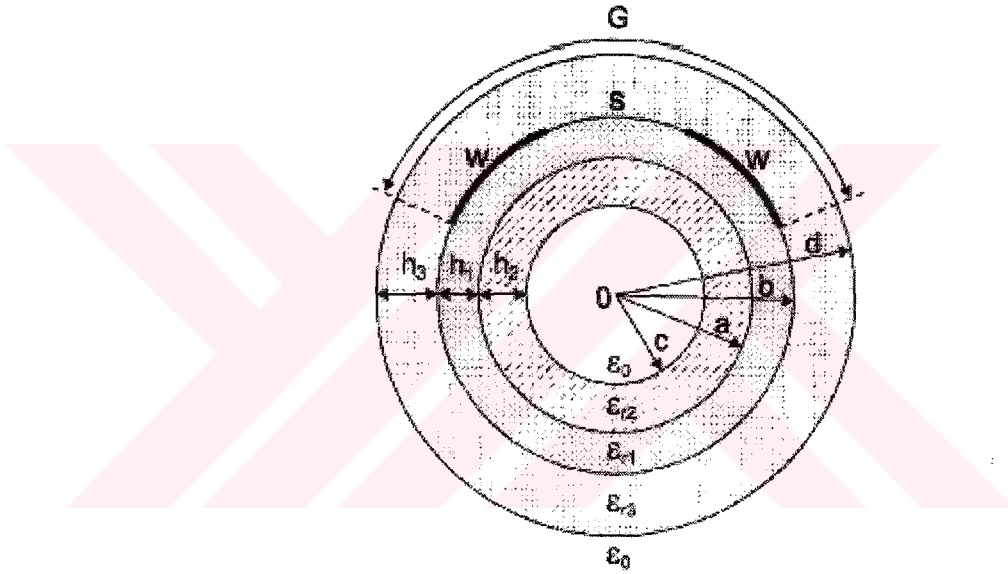
3.2 Silindirik CPS'ler

Silindirik eş düzlemlı şerit hatlarda (CCPS), mikroşerit hatlar ve daha önceki bölümlerde quasi-statik analizleri verilen eş düzlemlı dalga kılavuzlarına benzer şekilde baskı devre antenlerde besleme hattı olarak kullanılmakta olan iletim hattı konfigürasyonlarıdır. Ayrıca bu yapılar adaptör ve yarık hat uygulamaları gibi farklı uygulama alanlarında sahiptirler. Silindirik destekli şerit hatlarında uygulama alanlarının belirlenmesi açısından karakteristik parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Quasi-TEM yaklaşımı ile analizleri gerçekleştirilebilen bu iletim hatlarının analizleri de birçok araştırmacı tarafından gerçekleştirilmiştir [15, 131-134]. Literatürde quasi-statik bir yaklaşım olarak yaygın bir kabul görmekte olan CMT kullanılarak elde edilen karakteristik parametre değerlerine ilişkin analitik ifadeler frekans değişimine karşı fazla hassas olmadıkları için mikrodalga frekans bölgesinde hızlı ve doğru sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte ince tabanlı CPS'lerin quasi-statik parametreleri, hemen bütün mikrodalga frekans bölgesinde, frekans değişimlerinden etkilenmemektedirler [15]. Eş düzlemlı CCPS yapılarına örnek olması bakımından bir alt kısımda MCCPS'lerin quasi-statik analizlerinden bahsedilecektir.

3.2.1 Çok katmanlı Silindirik CPS'ler

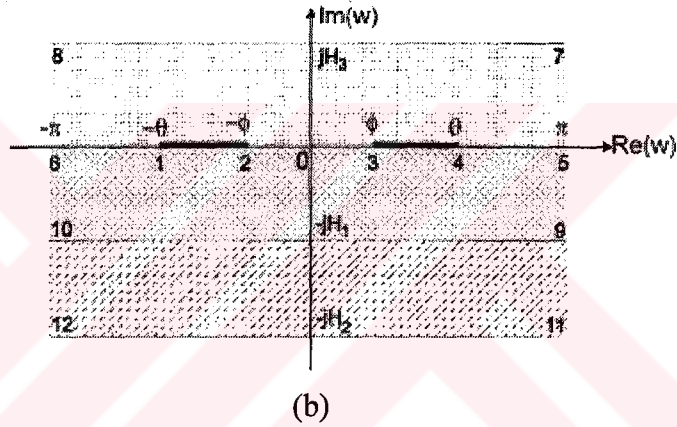
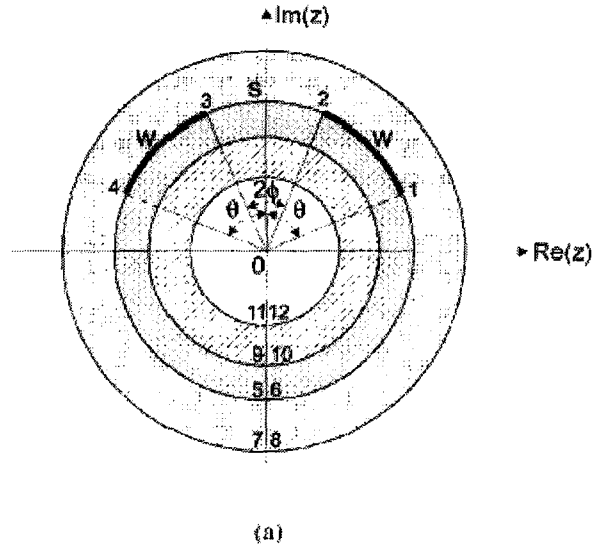
Geometrik yapıları Şekil 3.8'de verilmekte olan silindirik CPS'lerin quasi-statik analizleri CMT kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Bu şekilde, w 'lar şerit genişliklerini, s yarık genişliğini, G şeritlerin ve yarık genişliklerinin toplamını, h_i 'ler

dielektrik taban kalınlıklarını, ϵ_i 'ler taban malzemelerinin dielektrik permitivitesini, a , b , c ve d ise dielektrik katmanlarının yarıçaplarını göstermektedir. CCPS'lerin analizlerinin CMT ile gerçekleştirilebilmesi için yine birim uzunluk başına toplam kısmi kapasite değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu sebeple, yapı daha önce söz edilen iletim hatlarına benzer olarak, yine bir takım düzlem dönüşümleri ile paralel plakalı kondansatör haline dönüştürülmelidir. Düzlem dönüşümlerinin ilk adımını bütün silindirik iletim hatlarında olduğu gibi yapıya düzlemsel bir geometri verilmesi oluşturmaktadır.



Şekil 3.8. MCCPS yapısı

Bu amaçla, Şekil 3.8'deki orijinal yapı, Şekil 3.9.a ve 9.b'de görülmekte olan dönüşümlerle düzlemsel CPS haline dönüştürülür. Şekil 3.9.a'dan görülebileceği gibi yarık genişliğinin açısal uzunluğu 2φ , w genişliğine sahip şeritlerin açısal uzunlukları ise $\theta-\varphi$ 'dir.



Şekil 3.9. MCCPS'ler için düzlem dönüşümleri

Şekil 3.8'de geometrisi yer alan MCCPS, üç ayrı silindirik dielektrik katmana sahiptir. Dolayısıyla orijinal yapının birim uzunluk başına toplam kısmi kapasite değeri,

$$C = C_0 + C_1 + C_2 + C_3 \quad (3.37)$$

şeklinde belirlenebilir. Burada C_0 , dielektrik tabanlar olmadığı durumdaki hava kapasitesini, C_1 $\epsilon_{r1}-\epsilon_{r2}$ dielektrik sabitine sahip h_1 kalınlıklı katmanın kısmi kapasite değerini, ve C_2 ve C_3 ise sırasıyla $\epsilon_{r2}-1$ dielektrik sabitine sahip h_1+h_2 kalınlıklı dielektrik katmanın ve $\epsilon_{r3}-1$ dielektrik sabitine sahip h_3 kalınlıklı dielektrik katmanın kısmi kapasite değerleridir. MCCPS'lerin hava kapasitesi,

$$C_0 = \epsilon_0 \cdot \frac{K(k_0')}{K(k_0)} \quad (3.38)$$

ile verilmektedir. Burada k'_0 modülü eşitlik (3.6)'dan, k_0 modülü ise,

$$k_0 = \frac{\phi}{\theta} = \frac{s}{G} \quad (3.39)$$

eşitliğinden elde edilebilir. Diğer kısmi kapasite değerleri ise sırasıyla,

$$C_1 = \epsilon_0 \cdot \frac{(\epsilon_{r1} - \epsilon_{r2})}{2} \cdot \frac{K(k'_1)}{K(k_1)} \quad (3.40)$$

$$C_i = \epsilon_0 \cdot \frac{(\epsilon_{ri} - 1)}{2} \cdot \frac{K(k'_i)}{K(k_i)} \quad i=2, 3 \quad (3.41)$$

eşitlikleri ile belirlenebilir. Sonuç olarak MCCPS'lerin birim uzunluk başına toplam kısmi kapasite değeri;

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{eff} \cdot \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} \quad (3.42)$$

olarak elde edilir. Ghione [50] tarafından belirtildiği gibi CPS'lerin CPW yapılarının komplementeridir ve komplementer iletim hatlarında faz hızlarının aynı olması nedeniyle yapının efektif dielektrik sabiti eşitlik (3.30)'a benzer olarak,

$$\epsilon_{eff} = 1 + \frac{\epsilon_{r1} - \epsilon_{r2}}{2} \cdot q_1 + \frac{\epsilon_{r2} - 1}{2} \cdot q_2 + \frac{\epsilon_{r3} - 1}{2} \cdot q_3 \quad (3.43)$$

ifadesi ile belirlenebilir. Bu ifadedeki kısmi doldurma faktörleri ise sırasıyla

$$q_i = \frac{K(k'_i)}{K(k_i)} \cdot \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} \quad i=1, 2, 3 \quad (3.44)$$

ifadeleri ile verilmektedir [134]. Bu ifadeler de yer alan her bir k_i' modülü eşitlik (3.33)'ten k_i modülleri ise,

$$k_i = \frac{\sinh(\frac{\pi \cdot s}{4 \cdot b \cdot H_i})}{\sinh(\frac{\pi \cdot (s + 2 \cdot w)}{4 \cdot b \cdot H_i})} \quad i=1, 2, 3 \quad (3.45)$$

eşitliğinde,

$$H_1 = \ln(b/a) \quad (3.46)$$

$$H_2 = \ln(b/c) \quad (3.47)$$

$$H_3 = \ln(d/b) \quad (3.48)$$

sabitlerinin kullanılması ile elde edilebilir. Sonuç olarak MCCPS'lerin karakteristik empedansı

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \cdot \frac{K(k_0')}{K(k_0)} \quad (3.49)$$

eşitliği ile belirlenebilir. Yukarıda verilen ifadelerdeki her bir $K(k_i)$ ve $K(k_i')$ terimi yine birinci dereceden tam eliptik integralleri göstermektedir. Bu kısımda üç katlı CCPS'ler için verilen analitik ifadeler, daha fazla alt ve üst dielektrik katman kullanılması ile oluşturulacak olan MCCPS'ler için genişletilebilir.

BÖLÜM 4

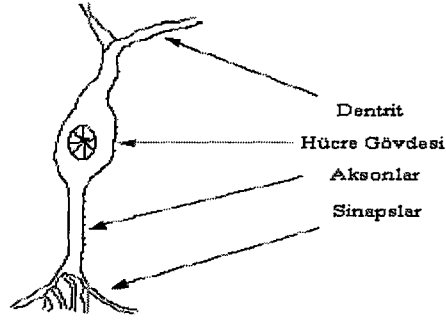
YAPAY SİNİR AĞLARI

4.1 Giriş

Yapay sinir ağları (YSA) beynin fizyolojisinden faydalanılarak oluşturulmaya çalışılan bilgi işleme modelleridir. YSA'lar insan beyninin çalışma prensibi örnek alınarak geliştirilmeye çalışılmıştır. Yapısal olarak benzerlikler gösterirler. YSA'ların öğrenme özelliği araştırmacıların dikkatini çeken en önemli özelliklerinden biridir. Çünkü bir olay hakkında giriş ve çıkışlar arasındaki ilişkiyi, doğrusal olsun veya olmasın, elde bulunan mevcut örneklerden öğrenerek daha önce hiç görülmemiş olayları, önceki örneklerden çağrışım yaparak ilgili olaya çözümler üretebilme özelliği, YSA'lardaki zeki davranışın da temelini oluşturur [135].

4.1.1 Biyolojik Nöron Yapısı

İnsan sinir sistemi, çevreden algıladıkları uyarıları elektriksel sinyallere dönüştürerek insan beynine bilgi ileten alıcı sinirler, iletilen elektriksel sinyalleri yorumlayarak uygun bir karar üreten merkezi sinir ağı ve üretilen elektriksel sinyalleri uygun tepkilere dönüştüren sinirlerden oluşur. Merkezi sinir ağının temel işlem elemanı, nöron olarak isimlendirilen sinir hücresidir. Biyolojik bir nöronun yapısı Şekil 4.1'de görülmektedir. Sinir hücresi, hücre çekirdeğini saran bir hücre gövdesinden oluşur. Hücre gövdesinden çıkan uzantılar akson olarak adlandırılırlar. Aksonlar, çok sayıda dallara ayrılan ve hücre gövdesinden gerekli sinyalleri diğer hücrelere taşıyan uzun bir fiber yapısıdır. Aksonlar, diğer hücrelerin bilgi alıcı uzantıları olan dendritlerle eşleşerek bir hücreden diğerlerine bilgi aktarır. Biyolojik bir nöron içerisindeki dendritler, diğer hücrelerden aldıkları bilgileri hücre gövdesine ulaştıran ince ve kısa yollar, aksonlar ise algıladıkları bilgileri elektriksel darbeler şeklinde taşıyan daha uzun yollar olarak düşünülebilir.



Şekil 4.1. Biyolojik nöron

Şekil 4.1'den de görülebileceği gibi aksonların bitimi, ince yollara ayrılabilir ve bu yollar, diğer hücrelerin dendritlerini oluşturan yollardır. Akson-dendrit bağlantı elemanı sinaps olarak isimlendirilir. Sinapsa gelen ve dendritler tarafından algılanan bilgiler genellikle elektriksel darbelerdir. Belirli bir sürede hücreye gelen girişlerin değeri, belirli bir eşik seviyesine ulaştığında hücre bir tepki üretir. Hücrenin sinapsları tarafından belirlenen tepkilerini artırıcı yöndeki girişler uyarıcı, azaltıcı yöndeki girişler ise önleyici olarak isimlendirilirler.

Biyolojik sinir sisteminde tüm sinirsel eylemler, merkezi sinir sistemi olarak adlandırılan beyin tarafından yürütülür. Biyolojik sinir sistemlerinde güçlü ön işlemciler mevcuttur ve bu veri derleme sırasında önemli avantajlar sağlar. Bir insan beyni, 10^{11} sinir hücresinden ve yaklaşık 60 trilyon sinaps bağlantısından oluştuğu düşünülürse son derece karmaşık ve etkin bir yapıya sahip olduğu anlaşılır. Bu karmaşık yapı içerisinde insan beyni 10^{12} bitlik veriyi saklama kapasitesine sahiptir. Beynin deneyim veya örneklerden öğrenme yeteneği vardır. Ayrıca bir sinir hücresinin hızı, günümüz mikro işlemcilerine göre oldukça yavaş olmakla birlikte, sinir hücreleri duygusal bilgileri son derece hızlı değerlendirebilirler [135, 136]. Günümüzde kullanılan bilgisayarların veri saklama kapasiteleri teknolojik gelişmelere bağlı olarak artmaktadır. Ancak bilgisayarlarda verilere doğrudan adresleme ile ulaşılmakta ve veriler yerel noktalarda saklanmaktadır. Dolayısıyla veri işleme veya elde etmede ön işlemciler kullanılmaktadır. Beynin ise tümleşik bir çalışma yapısı vardır. Beyne bağlı olarak çalışan alıcı sinirler, veri toplamakla görevlidir. Bu sinirler algıladıkları tüm verileri bilgi içeren elektriksel sinyallere dönüştürerek beyne iletirler. Beyin veri işleme süreci sonunda aldığı kararları benzer şekilde elektriksel sinyallere dönüştürür ve tepki sinirleri ile uygun tepkiyi veya bilgiyi aldığı organlara iletir. Bu nedenle insan beyni; öğrenme, birlikte işlem yapabilme, uyarılma ve paralel dağılmış bir bilgi işleme sistemi olarak

tanımlanabilir [137]. Bilim adamları bu üstün özellikleri nedeniyle, insan beyninin nörofiziksel yapısından esinlenerek matematiksel modelini ortaya koymaya çalışmışlardır. Beynin bütün davranışlarını tam olarak modelleyebilmek için fiziksel bileşenlerinin doğru olarak modellenmesi gerektiği düşüncesi ile çeşitli modeller geliştirmiştir. Beyin fizyolojisi göz önüne alınarak, bir bilgi işleme modeli olarak geliştirilen ve günümüzde kullanılmakta olan algoritmik hesaplama yöntemlerinden farklı bir bilim alanı olan yapay sinir ağları (YSA)'ların literatürde yüzlerce modeli mevcuttur [138]. Bu modelleri geliştiren araştırmacılar beynin düşünme, hatırlama ve problem çözme gibi özelliklerini bilgisayarla aktarmaya çalışmışlardır. İnsan beyninin bilinen en kompleks hesaplayıcı olmasından esinlenerek yapılan bu çalışmalarda insan beyninin fonksiyonları ve biyolojik sinir sistemlerinin işleyiş kuralları taklit edilerek modellemeler yapılmaya çalışılmıştır [138].

4.1.2 Yapay Sinir Ağlarının Tarihsel Gelişimi

Yapay sinir ağları (YSA), genel olarak matematiksel olarak modellenmeleri çok zor olan problemlerin çözümü için kullanılmaktadır. Bu nedenle YSA'lar geniş bir uygulama alanına sahiptir. YSA'ların temeli olan nöron veya işlemci elemanların bir ağ yapısı oluşturacak şekilde birlerlerine bağlanma fikri tamamen biyolojik sinir sisteminin işleyiş yönteminden yola çıkılarak ortaya atılmıştır. 20. yüzyılın başlarında öğrenme, görme, şartlanma gibi konuların genel teorileri verilmiş ancak nöron işlemlerinin matematiksel modellerin incelenmesi çeşitli bilim adamlarının fizik, psikoloji ve nöropsikoloji alanlarında yaptıkları çalışmalarla başlamıştır. Bu çalışmalar, 1943 yılında McCulloch ve Pitts [139] tarafından, sinir aktivitesindeki düşüncelere ait bir mantıksal hesap ismiyle sunulan bir çalışma ile devam etmiştir. 1956 yılında ise yapay zeka konulu ilk konferans düzenlenmiştir. Bu konferans bilgisayarlarda zeka ve öğrenmenin nasıl simüle edilebileceği üzerinde tartışmalar başlatması bakımından oldukça önemlidir. 1959 yılında ise Widrow [140] basit nöron benzeri elemanlardan oluşan ve Adaline (Adaptive Linear Neuron) ve Madaline (Multiple Adaline) olarak adlandırılan adaptif lineer bir eleman geliştirmiştir. Adaline ve Madaline modeli hava tahmini, ses ve karakter tanıma gibi bazı uygulamalarda ve adaptif kontrol amaçlı çalışmalarda kullanılmıştır. Daha sonra Widrow, telefon hatları üzerindeki yansımaları en aza

indirgeyebilmek için bu algoritmaları kullanarak adaptif filtreleri geliştirmiştir. Bu çalışmalarla YSA modelleri, gerçek problemlerin çözümünde kullanılmaya başlamıştır. Kohonen [141] ve Anderson [142] yaptıkları çalışmalarda, hafıza elemanı gibi davranan nöral ağlar geliştirmişlerdir. Daha önce Minsky ve Papert [143] tarafından yayınlanan “Perceptron” isimli kitapta YSA’ların ilgi çekici konular olmadığı belirtilmesi üzerine bu alandaki çalışmalar durma noktasına gelmişse de, Carpenter ve Grossberg’in [144] “Self-Organizing Neural Network” isimli çalışmaları bu alana yeni boyutlar kazandırmayı başarmıştır. Ayrıca, hafıza ve sezgisel yaklaşımlar için YSA yapıları öneren ve stokastik modellerle bütünleşen bir sinaptik model ortaya koyan Grossberg, Cohen-Grossberg kararlılık teoremini de ispatlamayı başarmıştır. Bu teoreme göre YSA’ların herhangi bir harici uyarıya karşılık olarak YSA çıkış değerinin bir dengeye doğru yakınsayacağı öngörülmektedir.

1980’li yıllarda kişisel bilgisayarların artması, yapılan çalışmaların artmasına neden olmuştur. 1982 yılında Hopfield [145] adındaki bir fizikçi moleküler biyolojiden beynin daha iyi anlaşılmasına geçişi sağlayan bir model sunmuştur. Hopfield’in sunduğu ve kendi ismiyle anılan bu ağ yapısı bir çok alanda kullanılmaya başlamıştır. Bu yıllarda birkaç araştırmacı tarafından çok katlı perseptron (ÇKP) yapısının eğitilmesi için yapılan çalışmalarda, geri yayılım algoritması geliştirilmiştir [146].

Daha öncede vurgulandığı gibi YSA’lar, biyolojik sinir sisteminin taklit edilmesiyle, oluşturulmuş yapay sinir sistemleridir. Biyolojik sinir sistemleri ile yapay sinir sisteminin benzerlikleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Biyolojik sinir sistemi ile YSA’ların karşılaştırılması

Biyolojik Sinir Sistemi	Yapay Sinir Sistemi
▼ Nöron	▼ İşlemci Eleman
▼ Dendrit	▼ Toplama Fonksiyonu
▼ Hücre Gövdesi	▼ Transfer Fonksiyonu
▼ Aksonlar	▼ Yapay Nöron Çıkışı
▼ Sinapslar	▼ Ağırlıklar

YSA’nın temel işlemci elemanının doğrusal bir yapıda olmaması, bu işlemci elemanların birleştirilmesi ile oluşturulan YSA yapısının doğrusal olmayan karmaşık

problemlerin çözümünde de etkili sonuçlar üretebilmesini sağlayan bir özelliktir. YSA'ların arzu edilen davranışı sergileyebilmesi için problemin yapısına göre tanımlanması gerekmektedir. Temel fikrini aldıkları biyolojik sinir sistemine paralel olarak oluşturulan YSA'ların karmaşık yapısı, bağlantıların ve ağırlık değerlerinin önceden belirlenmesini engeller. Bu nedenle YSA, istenen davranışı gösterecek şekilde ilgilenilen problemde alınan eğitim örneklerini kullanarak öğrenme işlemini gerçekleştirmek zorundadır. Bu öğrenme işlemi genel olarak tamamen bağlantı ve ağırlık değerlerinin ayarlanması şeklinde gerçekleşmektedir. Böylece YSA'lar farklı problemlere farklı çözümler sunabilen bir yapıya sahip olan ağ yapılarıdır [141].

Ayrıca YSA konusu genel olarak istatistiksel prensipler üzerinde kuruludur. İstatistiksel prensiplerle YSA'lar arasındaki terminolojik ilişki ise Tablo 4.2'de görülmektedir.

Tablo 4.2. İstatistiksel yöntemlerle YSA'ların terminolojik ilişkileri

İstatistik	Yapay Sinir Ağları
✓ Model	✓ Ağ yapısı
✓ Tahmin	✓ Öğrenme
✓ Regresyon	✓ Danışmanlı öğrenme
✓ İnterpolasyon	✓ Genelleştirme
✓ Gözlem	✓ Öğrenme kümesi
✓ Parametre	✓ Ağırlıklar
✓ Bağımsız değişken	✓ Giriş verileri
✓ Bağımlı değişken	✓ Çıkış verileri
✓ Sınır regresyonu	✓ Ağırlık değiştirme işlemi

Bu terminolojik benzerliklerle farklı yetenekleri de kazanan çok sayıda hücrenin çeşitli şekillerde birbirlerine bağlanması ile oluşan YSA modelleri paralel dağılmış bir yapıya sahip olurlar. Bu ağ yapısının sahip olduğu bilgi, ağdaki bütün bağlantılar üzerine dağıtılmıştır. Böylece öğrenme işlemini gerçekleştirmiş olan bir YSA modeli biyolojik sinir sistemine benzer olarak herhangi bağlantının zarar görmesi hatta bazı bağlantı elemanlarının bozulması durumunda bile doğru bilgi üretebilecek bir yapıya sahip olur.

Bu nedenle, geleneksel yöntemlere göre hatayı tolere etme yetenekleri son derece yüksektir [141].

YSA teknolojisi havacılık ve uzay alanında yüksek performanslı otomatik pilot geliştirme çalışmalarında, uçuş kontrol sistemlerinde ve simülasyon cihazlarında kullanılmaktadır. YSA'lar ayrıca otomotiv sektöründe oto-rehberlik geliştirme uygulamaları geliştirmede de kullanılmaktadırlar. Bankacılık alanında ise YSA'lar, kredi risk analizlerinde, kontrol ve doküman okuma uygulamalarında kullanılmaktadır. Savunma alanında YSA'larından, hedef tanıma ve izleme, silah oryantasyonu, veri kodlama ve sıkıştırma, sayısal görüntü işleme gibi birçok alanda faydalanılmaktadır. Meteorolojik tahminlerde de yaygın olarak kullanılmaya başlanan YSA'lar elektronikte bilgisayar destekli görme, ses anlama, görüntü ve işaret işleme, ve filtreleme alanlarında da kullanılmaktadırlar. Ayrıca eğlence ve finans sektörünün yanı sıra sigortacılık, robotik, tıp, haberleşme ve diğer birçok alanda YSA'lardan yaygın olarak faydalanılmaktadır.

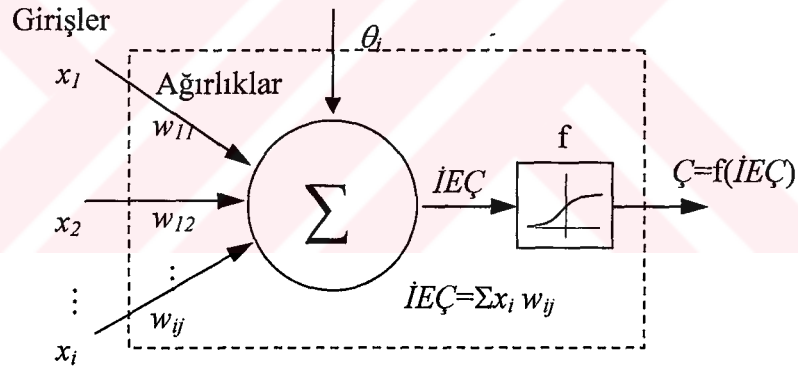
4.1.3 Yapay Sinir Ağlarının Genel Özellikleri

Genel anlamda YSA'lar, biyolojik sinir sisteminin işlevi taklit edilerek insan beyninin modellenmesi için tasarlanmış sistemlerdir. Yapay sinir hücrelerinin birbirleri ile çeşitli şekillerde bağlanmalarından oluşan ağ yapısı genellikle katmanlar şeklinde düzenlenir. İnsan beyninin bilgi işleme yöntemine uygun olarak YSA'lar, bir öğrenme sürecinden sonra bilgiyi toplama, hücreler arasındaki bağlantı şekilleri ve ağırlıkları ile bu bilgiyi saklama ve genelleme yapabilme yeteneğine sahip paralel dağılmış bir işlemcidir [139]. YSA'lar, insan beyninin çalışma prensibi örnek alınarak geliştirilmeye çalışılmış ve aralarında Tablo 4.1'de de verilmekte olan yapısal benzerliklere sahip bir tekniktir. Bu benzerlikleri ile YSA'lar karmaşık problemleri çözebilme yeteneğine sahip olmaktadır. YSA'ların hesaplama özelliklerini, paralel dağılmış yapılarından ve öğrenme ve genelleme yapabilme özelliklerinden aldığı söylenebilir. Genelleme yapabilme özellikleri bilinen durumlardan bilinmeyen durumlar içinde çözümler sunabilme özelliği olarak tanımlanabilir. YSA'lar doğrusal olmayan yapıları, öğrenme ve genelleme yapabilme kabiliyetleri, hataya karşı toleranslı davranabilme yetenekleri, paralel işlem yapabilmelerinden kaynaklanan hızlı ve doğru çözümler sunabilmeleri, donanım olarak gerçekleştirilebilmeleri, adaptasyon kabiliyetleri ve piyasada hazır

birçok yazılım bulunması nedeniyle çok farklı mühendislik alanında başarıyla uygulanmaktadır [135, 136, 138].

4.1.4 Yapay Nöron

YSA'ların en küçük bilgi işleme elemanı olan yapay nöron, Şekil 4.2'de verilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi bir yapay nöron, girişler, ağırlıklar, birleştirme fonksiyonu, transfer fonksiyonu ve çıkış bileşenlerinden oluşmaktadır. Girişler, diğer sinir hücrelerinden yada dış bağlantılar üzerindeki ağırlıklardan hücreye giren verilerdir. Birleştirme fonksiyonu, yapay nörona gelen net girişin, girişlerin ilgili ağırlıklarla çarpılarak toplanmasıdır. Transfer fonksiyonu ise, birleştirme fonksiyonu ile elde edilen net girişin bir işlemden geçirilerek nöron çıkışını belirleyen ve genellikle doğrusal olmayan bir fonksiyondur [136].



Şekil 4.2. Yapay nöron

YSA modeline verilen giriş değerlerine önce toplama fonksiyonları uygulanır ve her bir işlem elemanın çıkış ($\dot{IE\check{C}}$) değeri

$$\dot{IE\check{C}} = \sum x_i w_{ij} - \theta_i \quad (4.1)$$

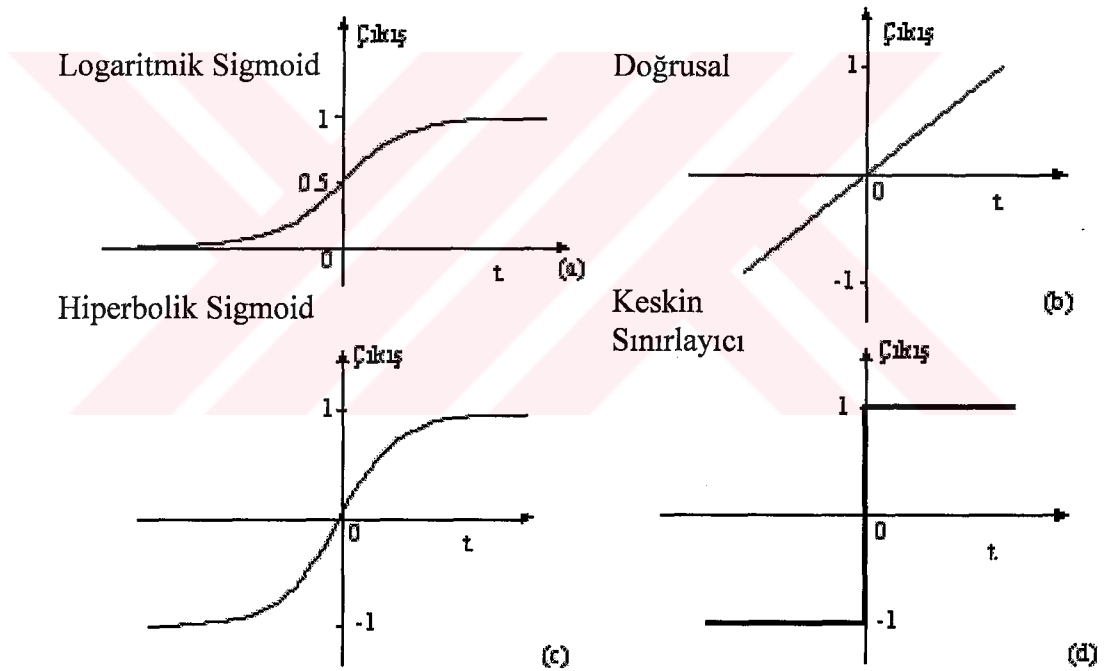
ile bulunur. Burada x_i , i 'inci girişi, w_{ij} , j 'inci elemana bağlantı ağırlığını ve θ_i eşik değerini göstermektedir. Daha sonra bu $\dot{IE\check{C}}$ değerleri bir transfer fonksiyonuna uygulanır. Burada sigmoid fonksiyonu kullanıldığı kabul edilirse çıkış değeri $\check{C}$;

$$\zeta = f(IE\zeta) = \frac{1}{1 + e^{-IE\zeta}} \quad (4.2)$$

şeklinde elde edilir.

4.1.5 Transfer Fonksiyonları

YSA nöronları; transfer fonksiyonu adı verilen fonksiyonlar içerirler. Gradyent azaltımında kullanılan asıl fonksiyonlar transfer fonksiyonlarıdır. YSA'da en sık kullanılan transfer fonksiyonlarına ait grafikler Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. YSA'larda en çok kullanılmakta olan transfer fonksiyonları

Doğrusal olmayan transfer fonksiyonlarının da kullanılması ile yapay sinir ağları daha kompleks problemlere uygulanmaya başlanmıştır [146]. Transfer fonksiyonları öğrenme eğrisi olarak da adlandırılmaktadır. Tablo 4.3'te YSA'da en çok kullanılmakta olan transfer fonksiyonlarının matematiksel yapıları verilmiştir.

Tablo 4.3. Bazı transfer fonksiyonlarının matematiksel ifadeleri

Fonksiyon tipi	Matematiksel İfadesi
Doğrusal	x
Logaritmik-Sigmoid	$\frac{1}{1+e^{-x}}$
RBF–Multiquadratik	$(1+x)^{0.5}$
RBF–Cauchy	$(1+x)^{-1}$
RBF–Ters Multiquadratik	$(1+x)^{0.5}$
RBF–Gaussian	$e^{\frac{-x^2}{\beta^2}}$
Hiperbolik Tanjant	$\frac{1-e^{-2x}}{1+e^{-2x}}$
Keskin Sınırlayıcı	$\begin{cases} 1 & x \geq x_0 \\ 0 & \text{diğer} \end{cases}$

Transfer fonksiyonları türevleri tanımlanabilir, sürekli fonksiyonlar olmalıdırlar. Son zamanlarda, çeşitli radyal tabanlı (radial basis) ve spline fonksiyonları da aktivasyon fonksiyonları olarak kullanılmıştır. Radyal tabanlı fonksiyonlar sinir ağlarında oldukça iyi sonuçlar vermişlerdir. Son zamanlarda yapılan bir çalışmada [147] radyal tabanlı fonksiyon olarak gauss fonksiyonu kullanılmış, fonksiyonların merkezleri K-means clustering algoritmasıyla bulunmuş, fonksiyonların ağırlıkları ise Expectation Maximization algoritmasıyla elde edilmiştir. Böylece klasik radyal tabanlı fonksiyon ağlarına göre daha az gizli katman kullanılarak doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesinde yüksek performans elde edilmiştir. Diğer bir çalışmada ise aktivasyon fonksiyonu olarak dalgacık (wavelet) fonksiyonları kullanılmıştır [148]. Yang ve ark. tarafından yapılan diğer bir çalışmada, modellenecek sistemin, darbe girişine verdiği cevabı tahmin etmek ve sistem kimliklendirmek için yeni bir yöntem kullanılmışlardır [149]. Klasik yöntemlerde modele ait parametreler en küçük kareler teknikleriyle elde edilirken, bu çalışmada dalgacık tabanlı sinir ağları yoluyla sistemin darbe cevabı

bulunmaya çalışılmıştır. Her bir sinir düğümünde yer alan dalgacık temel fonksiyonlarının adedi ise genetik algoritma kullanılarak tespit edilmiştir. Yöntem, klasikte yöntemlerde göre daha başarılı sonuçlar vermiştir. Farklı bir uygulamada YSA yapısı, doğrusal ve doğrusal olmayan sistem kimliklendirme ve kontrol işlemlerinde kullanılmıştır [150, 151].

4.2 YSA'ların Hesaplama Özellikleri

YSA'ların en önemli özellikleri; öğrenme, genelleme yapabilme, doğrusal olmama, gürültüyü yayabildiklerinden dolayı gürültüye karşı tolerans, paralel işlem yapabilme ve uyarlanabilirliktir [135]. Bu özellikleri aşağıda kısaca tanıtalım.

4.2.1 Doğrusal Olmama

YSA'nın temel işlem elemanı olan nöron doğrusal olmak zorunda değildir. Bu durumda hücrelerin birleşmesinden meydana gelen YSA'da doğrusal olmayacaktır. Bu yüzden, YSA doğrusal olmayan karmaşık problemlere kolayca çözüm getirebilmektedir.

4.2.2 Öğrenme

Bir sistemin girişi ve çıkışı arasındaki ilişkiyi en iyi tanımlayacak olan YSA ağırlıklarının bulunması işlemine öğrenme denir. Bu işlem YSA yapısı üzerindeki ağırlıkların bir öğrenme algoritması kullanılmasıyla, istenilen ilişkinin öğrenmesi sağlanır. Bu nedenle YSA, istenen davranışı gösterecek şekilde ilişkilendirmek istenen sistemin uygun örnek giriş ve çıkışlarından faydalanılarak gerçekleştirilir [146].

4.2.3 Genelleme Yapabilme

YSA'lar bir problemi öğrendikten sonra eğitimde kullanılmayan test verileri içinde beklenen veya istenilen tepkiyi üretme kabiliyetine sahiptir. Nöral hesaplamada hafızalar birleşiktir. Yani eğitilmiş ağa giriş örneğinin bir kısmı verilse bile, ağ hafızadan bu girişe en yakını seçerek uygun çıkış değeri üretir. YSA'ya bozuk veya eksik bir bilgi verilse bile ağ kabul edilebilir en uygun çıkışı verecektir. Burada temel özellik az veriyle sistem davranışının veya ilişkisinin öğrenilmesidir.

4.2.4 Adaptasyon (Uyarlanabilirlik)

YSA'nın ağırlıkları, problemden probleme değişir. Yani bir problemde iyi çıkışlar veren ağırlıklar diğer bir problem için iyi çıkışlar vermeyebilir. YSA'lar problemlerdeki değişmelere göre farklı şekilde eğitilebilirler. Bu özellik YSA'ların hedef tanıma ve izleme, uyarlamalı örnek tanıma, sınıflandırma, görüntü ve sinyal işleme, otomatik sistem kimliklendirme ve kontrol gibi alanlarda kullanım kolaylığı sağlamaktadır.

4.2.5 Donanım Olarak Gerçekleştirilebilme

YSA'lar paralel işlem yapabilme yetenekleri nedeni ile büyük ölçekli entegre devre (VLSI) teknolojisiyle tarafından desteklenmektedirler. Bu özellikleri ile de YSA'lar en ileri düzeydeki veri işleme teknolojileri arasındadır. Bu nedenle hızlı işlem yapabilme kabiliyetine sahiptirler.

4.2.6 Hataya Karşı Duyarlılık

YSA'lar çok sayıda işlemci elemandan oluşmuştur. Bu elemanlar arası bağlantılar paralel dağıtılmış bir yapıya sahiptir. Ağına sahip olduğu bilgi, ağıdaki bütün bağlantılara dağıtılmıştır. Giriş data setinde bulunabilecek herhangi bir gürültü, bütün ağırlıklar üzerine dağıtıldığından dolayı, gürültü etkisi tolere edilebilir. Geleneksel yöntemlere göre hatayı tolere etme yetenekleri daha fazladır.

4.3 YSA'ların Sınıflandırılması

YSA'lar işlemci eleman olarak adlandırılan nöronlardan ve ağ bağlantılarından oluşmaktadırlar. Bu nedenle ağ bağlantı şekillerine, öğrenme kuralları ve transfer fonksiyonlarına göre belirlenen bu YSA modellerini yapılarına ve öğrenme algoritmalarına bağlı olarak sınıflandırmak mümkündür.

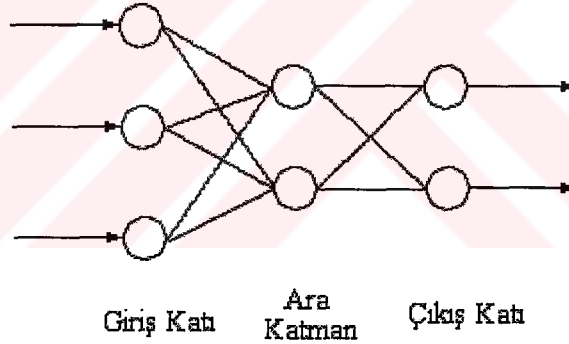
4.3.1 YSA'ların Ağ Yapılarına Göre Sınıflandırılması

YSA'lar mimari yapılarına göre ileri beslemeli (feed-forward) ve geri beslemeli (feed-back) ağlar olarak ikiye ayrılabilir [135]. Bu yapılar aşağıdaki kısımlarda açıklanmıştır.

4.3.1.1 İleri Beslemeli Ağ Yapısı

İleri beslemeli bir ağda işlemci elemanlar katmanlar üzerinde bulunur. Giriş katmanı, dış ortamdan aldığı bilgileri hiçbir değişiklik yapmadan ara katmandaki işlemci elemanlara iletir. Bilgi, ara katman veya katmanlarla çıkış katmanında işlenerek ağ çıkışına iletilir. Girişler tek yönlü olarak çıkışa doğru iletilirken, her bir katman çıkışı diğer katmana giriş olarak uygulanmaktadır [142]. Herhangi bir andaki çıkış değeri, sadece o andaki girişin fonksiyonu şeklinde ortaya çıkmaktadır. Böylece bu ağ yapısı, statik yapıya sahip olur.

İleri beslemeli ağlar doğrusal olmayan bir yapıya sahip olup çok katmanlı perseptronlar (ÇKP), LVQ (Learning Vector Quantization) ağ yapıları bunlara örnek olarak verilebilir. ÇKP yapısının eğitilmesinde en çok kullanılan öğrenme algoritması geri yayılım algoritmasıdır. İleri beslemeli YSA yapısı Şekil 4.4'te verilmiştir.

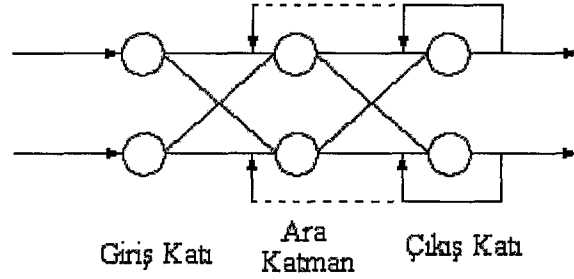


Şekil 4.4. İleri beslemeli YSA yapısı

4.3.1.2 Geri Beslemeli Ağ Yapısı

Geri beslemeli bir sinir ağı, en az bir işlemci eleman çıkışının kendisine veya diğer işlemci elemanlara bir gecikme elemanı üzerinden giriş olarak uygulanması ile elde edilen ağ yapısıdır. Geri besleme, bir katmandaki işlemciler arasında olduğu gibi katmanlar arasındaki işlemciler arasında da gerçekleştirilebilmektedir [135]. Geri beslemeli YSA yapıları, doğrusal olmayan dinamik bir davranış gösterirler ve herhangi andaki çıkış değeri hem o andaki hem de daha önceki giriş değerlerine sahiptirler. Dinamik yapılarından dolayı geri beslemeli YSA'lar tahmin uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadırlar. Hopfield, SOM (Self Organizing Map), Kohonen,

Elman ve Jordan ağıları bu yapılara örnek olarak verilebilir. Şekil 4.5'te geri beslemeli bir YSA yapısı verilmiştir.



Şekil 4.5. Geri beslemeli YSA yapısı

4.3.2 YSA'ların Öğrenme Algoritmalarına Göre Sınıflandırılması

Öğrenme; gözlem ve eğitim sonucu oluşan hareketin doğal yapıda meydana getirdiği davranış değişikliği olarak tanımlanabilir [135]. Bu tanıma göre, YSA'larda öğrenme yani gözlem ve eğitim sonucu oluşan davranış değişiklikleri, bir takım metot ve kurallar yardımıyla ağırlıkların değiştirilmesiyle sağlanabilir. Öğrenme sırasında, ağı uyarılması sonucunda ağırlıklarında uyarılması ve ağı problemi çözmeye yönelik yeni tepkiler vermesi gerekir. Bunun için genel olarak üç öğrenme metodundan ve bunların uyguladığı değişik öğrenme kurallarından söz edilebilir.

4.3.2.1 Danışmanlı Öğrenme Metodu

YSA, istenilen tepkiyi gösterebilmek için öğrenmeyi gerçekleştirecek, çözümü istenen problemin yapısını ve ortamın davranışlarını içeren, uygun bir eğitici sinyal veya giriş kullanır. Eğitici sinyal ve girişler eğitim örneklerini oluşturur. Arzu edilen çıkış değerleri ile ağı gerçek çıkışları arasındaki hata, YSA ağırlıklarına yansıtılır. Danışmanlı öğrenme algoritması istenen çıkış sinyalini sağlamak için bir danışmana ihtiyaç duyar ve bu metot fonksiyon yakınsama, nesne tanıma, sistem kimliklendirme ve uyarmalı denetim uygulamalarında kullanılır [150-152]. Widrow ve Hoff [140] ve Rumelhart ve McClelland [146] tarafından geliştirilen delta kuralları veya geri yayılım algoritması buna örnek olarak verilebilir.

4.3.2.2 Danışmansız Öğrenme Metodu

Danışmansız öğrenme metodu, öğrenme sürecinde sadece giriş bilgilerini kullanır. Giriş bilgilerine göre ağ öğrenme kurallarını kendi kendine geliştirir. Yani istenilen çıkış değerlerinin bilinmesine gerek yoktur. Ses tanıma ve robot modelleme [136] gibi uygulamalarda danışmansız öğrenme metodu kullanılmıştır. Carpenter ve Grossberg [144] tarafından geliştirilen adaptif rezonans teorisi (ART) yapısında veya Kohonen [141] tarafından geliştirilen SOM yapısında bu danışmansız öğrenme metotları kullanılmaktadır.

4.3.2.3 Takviyeli Öğrenme Metodu

Takviyeli öğrenme metodunda da danışmansız öğrenme metodu gibi istenilen çıkışın bilinmesine gerek yoktur. Bunun yerine istenilen çıkışı elde edebilmek için çıkışın verilen girişe uygun olup olmadığını değerlendirmek için bir kriter kullanılmaktadır. Optimizasyon problemlerini çözmek için geliştirilen Boltzmann kuralı veya genetik algoritma takviyeli öğrenmeye örnek olarak verilebilir.

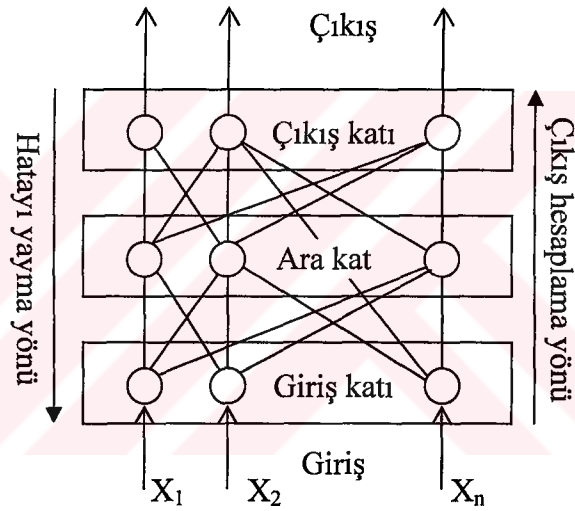
4.3.3 Yapay Sinir Ağı Yapıları

Literatürde çok sayıda YSA ağ yapısı bulunmaktadır [135, 136, 138, 146, 165]. Bunlara, ÇKP'ler, LVQ'lar, Elman ve Jordan Ağları, SOM'lar ve Radyal Tabanlı Yapay sinir ağı (RTYSA) yapıları örnek olarak verilebilir. Bu ağların bazıları aşağıda kısaca tanımlanmıştır.

4.3.3.1 Çok Katmanlı Perseptron (ÇKP) YSA Yapısı

Çok katmanlı bir perseptron sinir ağı modeli, Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Bu ağ modeli özellikle mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan sinir ağı modeli olmuştur. Bu modelin yaygın kullanılmasının sebebi, bir çok öğrenme algoritmasının bu ağın eğitiminde kolaylıkla kullanılabilmesidir. Bu sebeplerden dolayı bu çalışmada ÇKP YSA kullanılmıştır. Bir ÇKP modeli, bir giriş, bir veya daha fazla ara kat ve birde çıkış katından oluşur. Bir katmandaki bütün işlem elemanları bir üst katmandaki bütün işlem elemanlarına bağlıdır. Bilgi akışı ileri doğru olup geri besleme yoktur. Bu yüzden bu ağ yapısı ileri beslemeli sinir ağı modeli olarak adlandırılır. Giriş katmanında herhangi bir

bilgi işleme yapılmaz. Ara katman sayısı ve ara katmanlardaki işlem elemanı sayısı genellikle deneme yanılma yoluyla bulunur. Çıkış katmanındaki eleman sayısı yine uygulanan probleme bağlı olarak belirlenebilir. ÇKP ağlarında, ağa bir örnek gösterilir ve örnek neticesinde nasıl bir sonuç türeteceği de bildirilir. Örnekler giriş katmanına uygulanır, ara katmanlarda işlenir ve sonuç çıkış katmanından elde edilir. Kullanılan eğitime algoritmasına göre ağın çıkışı ile arzu edilen çıkış arasındaki hata tekrar geri doğru ağırlıklar üzerine yayılarak hata minimuma düşünceye kadar ağırlıklar değiştirilir. ÇKP ağı ileri beslemeli ağ olup, en genel anlamıyla giriş ile çıkış uzayı arasında statik haritalama yaparlar, bir andaki çıkış sadece o andaki girişin bir fonksiyonudur [150].



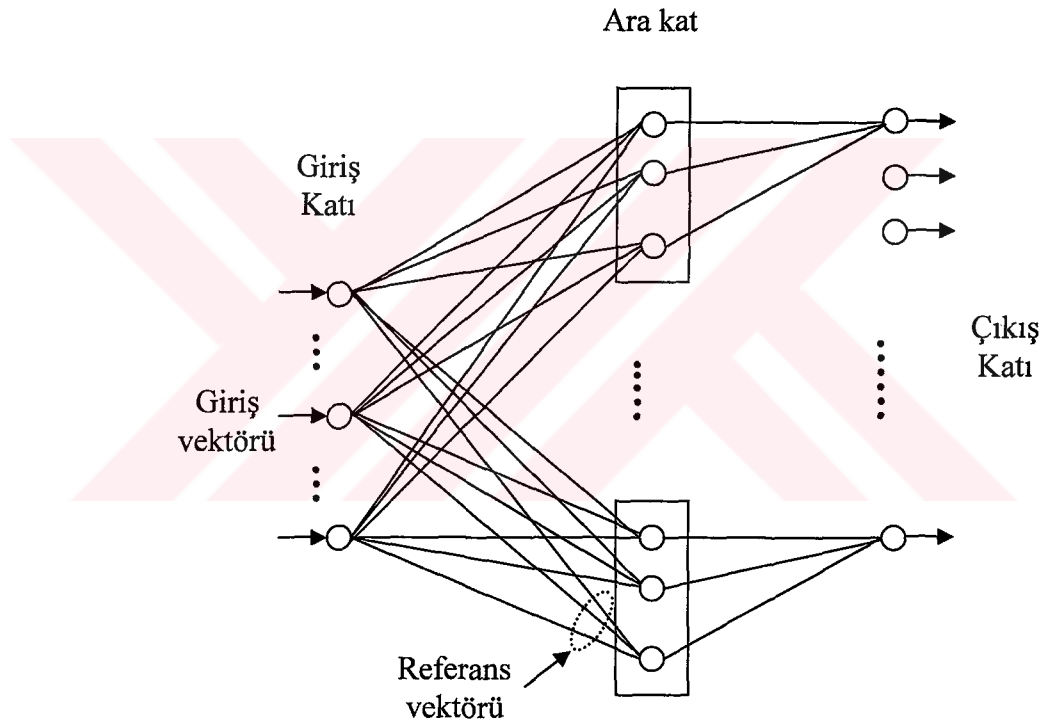
Şekil 4.6. Genel bir ÇKP Yapısı

4.3.3.2 LVQ Yapıları

LVQ ağı, Kohonen [141] tarafından geliştirilmiş bir sınıflandırma ağ yapısıdır. Vektör nitelme (quantalama) tekniğine dayanan bu yöntem, giriş örneklerinin önceden tanımlandığı belirli sayıdaki referans vektörü etrafında kümelenmesiyle tanımlanır. LVQ'da öğrenmenin amacı bu referans vektörlerinin bulunmasıdır. Şekil 4.7'de genel yapısı verilmekte olan bir LVQ ağı, giriş katı, ara kat ve çıkış katı olmak üzere üç katmandan oluşur.

LVQ ağ yapısında giriş ve ara katlardaki işlemci elemanlar birbirleri arasında tamamen, ara kat ve çıkış katmanındaki işlemci elemanlar ise kısmen birbirleriyle bağlantılıdır. Her çıkış işlemci elemanı farklı bir ara kat işlemci eleman kümesine bağlıdır. Ara

kattaki her işlemci elemana ise bir referans vektör atanmıştır, atanan bu vektör; giriş ve ara katman işlemci eleman bağlantı ağırlıklarını belirler. Ağı öğretilmesi sırasında ise ağırlıklar yeni değerler alırlar. Ara kat ve çıkış işlemci elemanları ikili (binary) çıkışa sahiptirler. Ağa bir giriş deseni verildiğinde referans vektörü giriş desenine en yakın ara kat işlemci eleman kümesi '1' diğerleri '0' üretir. Eğer aktif hale geçen işlemci eleman giriş vektör sınıfına dahilse giriş vektörüne doğru hareket yakınlaştırılır, giriş vektör sınıfına dahil değilse uzaklaştırılır. Böylece işlemci elemanlar ilişkili olduğu bölgeye hareket ettirilerek sınıflandırma sağlanmış olur [153, 154].



Şekil 4.7. LVQ Ağ yapısı

4.3.3.3 Elman ve Jordan Ağları

Geri beslemeli ağ tiplerinden olan Elman ve Jordan ağları çok katlıdır ve ÇKP'ye benzer yapıdadır. Her iki ağda ara katmana ek olarak özel bir gizli kat vardır bu kat durum katı olarak adlandırılır. Bu katman gizli kattan veya çıkış katından geri besleme işaretlerini alır. Her iki ağdada durum tabakasındaki işlemci elemanların çıkışları ileriye doğru verilmektedir [155, 156]. Sadece ileriye doğru bağlantılar göz önüne alınır ve geri

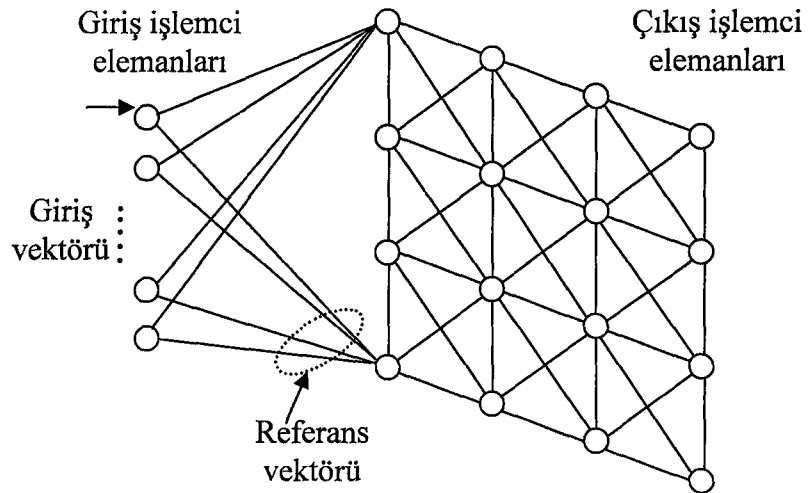
besleme ağına sabit değerler verilirse bu ağlar sıradan geri beslemeli ağlar haline gelirler.

4.3.3.4 Kohonen Ağı

Şekil 4.8’de görülmekte olan Kohonen ağ yapısı bir giriş ve bir çıkış katı olmak üzere iki katmandan oluşur. Çıkış katındaki işlemci elemanlar giriş işlemci elemanlarının hepsine bağlıdır ve düzenli iki boyutlu aralıklarla düzenlenir. Çıkıştaki her işlemci eleman bütün giriş katındaki işlemci elemanlara bağlıdır.

Çıkış katmanı işlemci elemanlarının hepsi küçük rasgele değerler çekilir. Bir giriş deseni belirlenir. Bir çıkış işlem elemanı giriş desenine en yakın kaynak vektörü tarafından belirlenir [141]. Belirlenen işlemci eleman ve komşularının referans vektörü güncelleştirilir. Böylece referans vektörleri giriş vektörlerine ayarlanır. Öğrenmenin sonunda sadece belirlenen işlemci elemanın referans vektörü ortaya çıkar.

İyi eğitilmiş bir Kohonen ağında birbirine yakın çıkış işlemci elemanlarının referans vektörleri vardır. Öğrenmeden sonraki sınıflandırma etiketleme işlemiyle yapılır. Bilinen sınıfların desenleri ağına giriş olarak verilir, bu giriş desenleri tarafından aktif hale gelen çıkış işlemci elemanlarına bu sınıf etiketleri verilir.



Şekil 4.8. Kohonen ağ yapısı

4.3.3.5 Radyal Tabanlı Yapay Sinir Ağı (RTYSA) Yapıları

ÇKP yapılarına alternatif olarak geliştirilen bu YSA yapıları genellikle radyal olarak simetrik ara kat işlemci elemanlarının harici olarak ifade edilmesiyle oluşan bir ağ yapısıdır [157]. Buna benzer çalışmalar, enterpolasyon ve yakınsama problemleri üzerinde çalışan Powel [158] ve Broomhead ve Lowe [159] gibi araştırmacılar tarafından da sunulmuştur. Bu yapı içerisindeki bir işlemci elemanı temel olarak; giriş ve ara katlar arasındaki ağırlık vektörü olarak saklanan giriş uzayındaki bir merkez vektörü, giriş vektörünün merkezden ne kadar uzakta olduğunu belirlemek için kullanılan standart öklit uzaklığı ifadesi ve uzaklık fonksiyon çıkışı tek değişkenli olarak alan işlemci elemanın çıkış değerini belirleyen bir transfer fonksiyonuna sahiptir. RTYSA' lerde $f(x)$ transfer fonksiyonu,

$$f(x) = \varphi(\|X - C\|) \quad (4.3)$$

ifadesi ile verilmektedir. Ara kat çıkış ifadesi F_k ise,

$$F_k = \exp\left(\frac{-O_k}{\sigma_k^2}\right) \quad (4.4)$$

ve bu ifadedeki O_k modülü,

$$O_k = \|X - C_k\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - C_i)^2} \quad k=1, 2, \dots, n \quad (4.5)$$

şeklinde elde edilebilir. Bu ifadelerde yer alan X 'ler çok boyutlu giriş vektörünü, C 'ler giriş vektörü ile aynı boyuttaki merkez vektörünü ve σ ise standart sapma değerini göstermektedir. Ara kat işlemci elemanların eğitilebilmesi için C_k ağırlıkları ile σ_k genişliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu işlemci eleman fonksiyonu olan C_k 'ların belirlenebilmesi için önerilen bazı yöntemler literatürde mevcuttur [157].

RTYSA yapıları ÇKP'lere nazaran daha hızlı bir öğrenme kabiliyetine sahiptirler. Fakat giriş sayısının fazla olduğu problemlerin çözümünde çok yüksek boyutlu RTYSA

yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır. RTYSA yapıları, tahmin ve sınıflandırma problemlerinin çözümlenmesinde kullanılmaktadır.

4.3.4 YSA'ların Öğrenme Algoritmaları

Literatürde, YSA yapılarına göre farklılık gösteren çok sayıda öğrenme algoritması mevcuttur. Bu kısımda tez çalışması boyunca ÇKP ağ yapılarını eğitmede kullanılan algoritmalar kısaca tanıtılacaktır. Bunlar; standart geri yayılım (Backpropagation, BP), Grup momentumlu geri yayılım (BPM), Esnek geri yayılım (BPR), Eşleştirmeli Gradyent Azaltma Geri Yayılım (EGBP), Quasi-Newton (QN), delta-bar-delta (DBD), genişletilmiş DBD (Extended DBD, EDBD), Levenberg-Marquardt (LM), Bayesian düzenleme (BD) ve Tek adım sekant (TAS) algoritmalarıdır.

4.3.4.1 Geri Yayılım (BP)

Bir çok uygulamada yaygın bir şekilde kullanılmakta olan bir öğrenme algoritmasıdır. Anlaşılması ve matematiksel olarak kolayca ispatlanabilir olmasından dolayı tercih edilmektedir. Bu algoritma, hataları geriye doğru çıkıştan girişe azaltmaya çalışmasından dolayı geri yayılım ismini almıştır [136].

Bu algoritmayla, i ve j katman nöronları arasındaki ağırlık ifadesi olan $\Delta w_{ji}(k)$ değişikliği hesaplanır. Bu ifade,

$$\Delta w_{ji}(k) = \eta \delta_j x_i \quad (4.6)$$

olarak verilir. Bu eşitlik η öğrenme katsayısı, δ_j ara veya çıkış katmanındaki herhangi bir j nöronuna ait bir faktördür. Çıkış katmanı için bu faktör aşağıdaki şekilde verilir.

$$\delta_j = \frac{\partial f}{\partial net_j} (y_j^k - y_j) \quad (4.7)$$

Burada $net_j \equiv \sum x_i w_{ji}$ ve y_j^k ise j nöronunun hedef çıkışıdır. Ara katmanlardaki nöronlar için bu faktör,

$$\delta_j = \left(\frac{\partial f}{\partial net_j} \right) \sum w_{qj} \delta_q \quad (4.8)$$

olarak verilir. Ara katmanlardaki nöronlar için herhangi bir hedef çıkış olmadığından eşitlik (4.7) yerine eşitlik (4.8) kullanılır. Bu duruma bağlı olarak, çıkış katmanından başlayarak δ_j faktörü, bütün katmanlardaki nöronlar için hesaplanır. Tüm ağırlıklar eşitlik (4.6)'ya bağlı olarak güncelleştirilir.

Bu çalışmada, artırmalı ve grup modu olmak üzere iki hesaplama modu bu algorithmada kullanılmıştır. Artırmalı (iteratif) modda ağırlık değişimi her adımda, grup (batch) modda ise ağırlıklar tüm eğitim kümesinin ağırlık uygulanması ve hataların toplamından sonra değiştirilir.

4.3.4.2 Momentumlu Geri Yayılım (BPM)

Momentum ağırlık lokal gradientleri aşmasını sağladığı gibi aynı zamanda hatanın hızlı düşmesine de yardımcı olur. Bir alçak geçiş filtresi gibi davranan momentum ağırlık hata yüzeyindeki küçük değerlerin ihmal edilebilmesini sağlar. Momentum olmaksızın ağırlık lokal bir minimuma takılarak salınımlar yapabilir. Momentum kullanılır ise ağırlık lokal minimumun diğer yüzüne sıçrama imkanı kazanır. Bu yöntemde öncelikle, öğrenilen her bir elemandan hesaplanan gradientlerin toplamından toplam gradient değeri hesaplanır ve tüm öğrenme kümesinin işlenmesi her bittiğinde ağırlıklar ve bias'lar güncelleştirilir [146].

$$\Delta w_{ji}(k) = \eta \delta_j x_i + \mu \Delta w_{ji}(k-1) \quad (4.9)$$

4.3.4.3 Esnek Geri Yayılım (BPR)

Sinir düğümü yapısında sıklıkla sigmoid tabanlı fonksiyonlar kullanılır. Bu fonksiyonlar sonsuz giriş aralığındaki veriyi sonlu aralığa transfer ederler ve giriş değeri büyüdükçe fonksiyonlardaki eğiklik sıfıra doğru gider. Bu durum sigmoid fonksiyonlarına sahip sinir ağırlarında türevdeki değişikliklerin parametre üzerindeki etkisini azaltır. Bu yüzden türevin değeri yerine yalnızca işaretine göre parametrelerin yenilenmesini sağlamak

amacıyla bu yöntem geliştirilmiştir [160]. Bu yöntem önceki anlatılan yöntemden daha hızlı yakınsamaktadır.

4.3.4.4 Eşleştirmeli Gradyent (Conjugate Gradient) Azaltma Geri Yayılım (CGF)

Basit geri-yayılım algoritması ağırlık değerlerini gradiyentin negatifi yönünde dengeler. Bu doğrultu gradiyentin hızla düştüğü doğrultu olarak bilinir. Bu doğrultuda performans fonksiyonu da hızla düşer. Performans fonksiyonundaki hızlı düşüşe rağmen bu gelişme sonuca en hızlı yakınsama için gerekli olmayabilir. Eşleştirmeli gradiyent algoritmalarında hızlı gradiyent düşüş doğrultusundan genellikle daha çabuk sonuca yakınsayan eşleştirme doğrultusunda bir arama işlemi uygulanır. Bir çok eşleştirmeli gradiyent algoritmasında adım boyutu her bir iterasyonda yeniden düzenlenir. Performans fonksiyonunun yakınsama doğrultusu boyunca minimize edilmesi için güncelleme adım boyutunun belirlenmesi amacıyla eşleştirmeli gradiyent doğrultusu boyunca bir arama gerçekleştirilir.

Bu algoritmaların bir kaç farklı versiyonu bulunmaktadır. Bunlar aşağıda kısaca açıklanmıştır.

4.6.4.4.1 Fletcher-Reeves (FR) Yöntemi

Bütün eşleştirmeli gradiyent algoritmalarının ilk iterasyonu gradiyentin ters işaretli değeriyle başlar [161]. Yani $p_0 = -g_0$ olmak üzere

$$x_{k+1} = x_k - \alpha_k p_k \quad (4.10)$$

$$p_k = -g_k + \beta_k p_{k-1} \quad (4.11)$$

$$\beta_k = \frac{g_k^T g_k}{g_{k-1}^T g_{k-1}} \quad (4.12)$$

Bu yöntem genellikle esnek yayılım yönteminden daha hızlı yakınsar.

4.6.4.4.2 Polak-Ribière (PR) Yöntemi

Polak-Ribière (PR) yönteminde, Fletcher-Reeves yönteminde yer alan β_k ifadesi

$$\beta_k = \frac{\Delta g_{k-1}^T g_k}{g_{k-1}^T g_{k-1}} \quad (4.13)$$

şeklinde değişmiştir. Önceki yöntemden daha fazla hesaplama ihtiyacı olmasına rağmen performans olarak hangisinin daha iyi olduğunu söylemek zordur.

4.6.4.4.3 Powell-Beale (PB) Yöntemi

Tüm eşleştirmeli gradiyent algoritmaları arama doğrultusunun gradiyentinin negatifi yönünde düzenli olarak başlangıç değerlerine geri döndürülür.

$$|\rho_{k-1}^T \rho_k| \geq 0.2 \|\rho_k\|^2 \quad (4.14)$$

Normalde algoritma iterasyon sayısı ağ parametre sayısına eşitlendiğinde standart reset noktası elde edilir. Bununla beraber reset noktasının elde edilmesi amacıyla geliştirilmiş yaklaşımlar bulunmaktadır. PB yöntemi böyle bir metot tanımlar [158, 162]. Bu öğrenme yöntemi mevcut ve bir önceki gradiyent değerleri arasındaki fark çok küçük ise geri başlatım işlevini gerçekleştirir. PB öğrenme algoritması bazı problemlerde PR'den daha iyi sonuç verdiği bilinmektedir. PB algoritmasının hafıza ihtiyaçları PR'den daha fazladır.

4.6.5 Quasi-Newton (QN)

Newton yöntemleri hızlı optimizasyon için kullanılabilecek yöntemlerdir. Newton metodu temel olarak

$$p_k = -A_k^{-1} g_k \quad (4.15)$$

ile ifade edilir. Burada A_k Hessian matrisidir ve ikinci derece türevlerde tanımlanır. Bu öğrenme algoritması Hessian matrisinin her iterasyonda yaklaşık değerinin hesaplanması esasına dayanır. Bir sonraki iterasyondaki Hessian matrisi ve ΔA_k

$$A_{k+1} = A_k + \Delta A_k \quad (4.16)$$

$$\Delta A_k = \frac{g_k \cdot g_k^T}{g_k^T \cdot p_k} + \frac{\Delta g_k \cdot \Delta g_k^T}{\Delta g_k^T \Delta X_k} \quad (4.17)$$

şeklindedir. Burada ΔX_k , k . iterasyondaki ağırlık değişimi olarak alınır. QN eşleştirmeli gradiyent yöntemlerine göre çok daha fazla hafıza ve her iterasyonda çok daha fazla hesaplama gerektirse de genellikle birkaç iterasyonda sonuca erişir. Küçük boyutlu ağlarda kullanımı daha uygundur. n , ağdaki ağırlıkların ve bias'ların değerine eşit olmak üzere $n^2 \times n^2$ boyutlu tahmini Hessian matrisinin hafızada saklanması gerekir [163].

4.6.6 Delta-Bar-Delta (DBD)

Jacobs [164] tarafından geliştirilmiş bir ÇKP öğrenme algoritması olan DBD'nin eğitme kuralı, ağırlıkların yakınsama hızını arttırmak için kullanılan sezgisel bir yaklaşımdır. DBD öğrenme algoritmasında, ağırlık her bir bağlantısına atanan öğrenme katsayılarının optimum değerlerinin belirlenmesi çok zor ve zaman alıcı olabilmektedir. Bu algortmada, bir bağlantıya ait ağırlık değişim işaretinin ardışık birkaç adımı sırasıyla farklı değerler alması durumunda öğrenme oranı azaltılmalı aynı kalması durumunda ise öğrenme oranı artırılmalıdır. Bu değişimi sağlayabilmek için ağırlıklar, hatanın derecesine bağlı olan kısmi türevlerine ve ağırlık değeri noktasının çevresindeki hata yüzeyinin eğrilik ölçüsüne göre güncellenmelidir. Güncelleme işlemi,

$$w(k+1) = w(k) + \alpha(k) \cdot \delta(k) \quad (4.18)$$

eşitliği ile gerçekleştirilir. Bu ifadedeki $\alpha(k)$ öğrenme katsayısı her bir ağırlık için farklı bir değerde atanmalıdır. Her bir ağırlığın öğrenme hızının artırılması için, $\delta(k)$ eğim bileşeninin ağırlıklı ortalaması kullanılarak bulunur ve ağırlıklı ortalama değeri,

$$\bar{\delta}(k) = (1 - \theta) \cdot \delta(k) + \theta \cdot \delta(k - 1) \quad (4.19)$$

eşitliği ile düzenlenebilir. Bu ifadede yer alan θ konveks ağırlık faktörüdür. Üstel olarak artan önceki eğim bileşeni ve mevcut eğim bileşeni aynı işaretli ise öğrenme katsayısı, κ sabiti ile artırılan ağırlıkla birleştirilir. Mevcut eğim bileşeni üstel ortalamasına göre zıt işaretli ise, öğrenme katsayısı mevcut değeri ile orantılı olarak azaltılır. Bu işlem,

$$\Delta\alpha(k) = \begin{cases} \kappa & \bar{\delta}(k-1) \cdot \delta(k) > 0 \\ -\varphi \cdot \kappa & \bar{\delta}(k-1) \cdot \delta(k) < 0 \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (4.20)$$

eşitliği ile gerçekleştirilebilir. Burada, κ artma faktörünü, φ azaltma faktörünü, $\delta(k)$ ise k anındaki öğrenme katsayısını göstermektedir. Bu ifadeye göre DBD algoritması, öğrenme katsayısını doğrusal olarak artırmakta, fakat geometrik olarak azaltmaktadır denilebilir [165].

4.6.7 Genişletilmiş Delta-Bar-Delta (EDBD)

Bu algoritma isminden de anlaşılacağı gibi Jacobs tarafından sunulan DBD algoritmasının geliştirilmiş halidir. EDBD algoritması Minai ve Williams [166] tarafından ÇKP'lerin eğitme zamanını düşürme amaçlı olarak geliştirilmiştir. DBD algoritmasından farklılıkları; sezgisel momentum kullanması, ağırlık uzayında büyük artmaları ortadan kaldırması ve geometrik azaltımın büyük orandaki atlamalarını engellemede yeterince hızlı olmaları şeklinde sıralanabilir. EDBD'de ağırlık değişimleri,

$$\Delta w(k+1) = \alpha(k) \cdot \delta(k) + \mu(k) \cdot \Delta w(k) \quad (4.21)$$

eşitliği ile belirlenebilir. Burada $\delta(k)$, ağırlık değişiminin gradiyent bileşeni, $\alpha(k)$ ve $\mu(k)$ sırasıyla öğrenme ve momentum katsayılarıdır. Ağırlıklardaki değişimin belirlenmesi ile yeni ağırlık değeri,

$$w(k+1) = w(k) + \Delta w(k) \quad (4.22)$$

şeklinde güncellenmelidir. Öğrenme katsayısındaki değişim ise,

$$\Delta\alpha(k) = \begin{cases} \kappa \cdot \exp(-\gamma_\alpha \cdot |\delta(k)|) & \bar{\delta}(k-1) \cdot \delta(k) > 0 \\ -\varphi_\alpha \cdot \kappa & \bar{\delta}(k-1) \cdot \delta(k) < 0 \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (4.23)$$

ifadesi ile verilmektedir. Bu ifadedeki κ_α öğrenme katsayısının derecelendirme sabiti, γ_α öğrenme katsayısını üstel olarak artırmada kullanılan sabiti, φ_α öğrenme katsayısının azaltma sabitidir. Ağırlık uzayında osilasyonları ve aşırı atlamaları engellemede tüm bağlantılar için $\alpha(k) \leq \alpha_{max}$ ve $\mu(k) \leq \mu_{max}$ değerinin sağlanması gerekmektedir. Burada α_{max} , öğrenme katsayısının üst sınırı ve μ_{max} , momentum katsayısının üst sınırıdır.

4.6.8 Levenberg Marquardt (LM)

Oldukça başarılı bir optimizasyon metodu olan LM algoritması, öğrenmede kullanılan geri yayılım algoritmasının farklı öğrenme tekniklerinden birisidir [167, 168]. Bu öğrenme algoritmasının seçilmesinin sebebi, hızlı öğrenme ve iyi yakınsayabilme özelliğinden kaynaklanmaktadır. Temel olarak LM algoritması, maksimum komşuluk fikri üzerine kurulmuş bir hesaplama metodu olup Gauss-Newton ve Steepest-Descent algoritmalarının en iyi özelliklerinden oluşmuştur ve bu iki metodun kısıtlamalarını ortadan kaldırır [168]. Performans fonksiyonu kareler toplamı biçimine sahip olduğunda daha sonra Hessian matrisine;

$$H = J^T J \quad (4.24)$$

şeklinde yaklaşıklık yapılabilir ve buradan gradiyent;

$$g = J^T \cdot e \quad (4.25)$$

olarak hesaplanabilir. Eşitliklerde, J ağda yer alan ağırlık ve biaslara ait hataların ilk türevlerini içeren Jacobiyen matrisidir. e ise, ağ hatalarının vektörüdür. T matris transpozisini temsil eder. Bu metot ile performans fonksiyonu algoritmanın her

iterasyonunda azalan bir eğim gösterecektir ve J matrisini Hessian matrisi yerine kullanır:

$$w_{k+1} = w_k - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T x e \quad (4.26)$$

Eğer μ büyük ise, minimum yaklaşım adımı küçük olur. Bu yüzden, her başarılı adımda μ değeri azaltılmalıdır. Eğer performans fonksiyonu artıyorsa μ artırılmalıdır.

4.6.9 Bayesian Düzenleme (BD) Öğrenme Algoritması

Optimum düzenleme parametrelerinin otomatik bulunması arzu edilir. Bu amaçla kullanılan yöntemlerden biri Bayesian düzenleme yaklaşımıdır. Bayesian yaklaşımının ağda bulunan ağırlıklar ve bias değerleri farklı dağılımlı değişkenler gibi düşünülür. Düzenleme parametreleri bu dağılımların birleşiminin değeri bilinmeyen varyansı ile ilişkilendirilerek tahmin edilir. Bu amaçla istatistiksel yöntemler kullanılır [169]. Burada LM'ye benzer şekilde, J 'ler Jacobian matrisi, E hata, I birim matris ve μ momentum katsayısı olmak üzere

$$dX = -(JX^T JX + I^* \mu) / (JX^T E) \quad (4.27)$$

4.6.10 Tek Adım Sekant (TAS) Öğrenme Algoritması

QN yönteminin her bir iterasyonda ihtiyaç duyduğu hafıza ve işlem zamanını azaltmak için kullanılan bu yaklaşımda arama doğrultusu;

$$p_k = -g_k + \Delta X_k \cdot \left(1 + \frac{\Delta g_k^T \cdot \Delta g_k}{\Delta X_k^T \cdot \Delta g_k}\right) \cdot \frac{\Delta X_k^T \cdot g_k}{\Delta X_k^T \cdot \Delta g_k} + \Delta g_k^T \cdot \frac{g_k}{\Delta X_k^T \cdot \Delta g_k} \quad (4.28)$$

ifadesi ile verilir. Bu metotta Hessian matrisinin tanımı kullanılmaz ve her bir iterasyonda Hessian matrisinin birim matris olduğunu kabul edilir. Ayrıca matrisin tersi hesaplanmaksızın yeni arama doğrultusu belirlenebilir [170]. Bu algoritmanın hafıza ihtiyacı ve işlem zamanı her bir iterasyonda QN algoritmasından daha az, eşleştirmeli gradiyent tekniklerinden biraz fazladır.

BÖLÜM 5

DÜZLEMSEL İLETİM HATLARININ YSA İLE MODELLENMESİ

5.1 Giriş

MMIC teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaya başlanan iletim hatlarının analizlerinde frekans bağımlı tam dalga analizleri veya konform dönüşüm tekniği (CMT) gibi quasi-statik yaklaşımlar kullanılmaktadır. Ancak her iki yaklaşımla yapılan analizlerinde bazı dezavantajları mevcuttur. CMT ile yapılan analizlerde, yapının karakteristik parametrelerini veren kapalı formdaki ifadelerin elde edilebilmesi için iletim hattı konfigürasyonlarının bir takım düzlem dönüşümleri ile paralel plakalı kondansatöre dönüştürülerek birim uzunluk başına toplam kısmi kapasite değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Ancak, bu düzlem dönüşümleri uzman kişilerce gerçekleştirilebilecek düzeydedir ve sonuçta elde edilen kapalı formdaki ifadeler belirli yaklaşımlarla çözülebilen eliptik integraller içerirler. Bu eliptik integrallerin çözümleri Bölüm 2’de bahsedildiği gibi analitik olarak çözümlenmeleri zor olan ifadelerdir ve Hilberg [121] tarafından 1969 yılında sunulan ve belirli bir hata oranına sahip olan yaklaşık çözümler kullanılarak yapılabilmektedir. Dolayısıyla elde edilen ifadelerin doğruluklarının belirli bir hata oranına sahip olması ve düzlem dönüşümleri için uzmanlık bilgisi gerektirmesi CMT’nin dezavantajlarından biridir. Frekans bağımlı çözümlerde ise, yapıların karakteristik parametrelerinin hesaplanmasında işlem süresinin uzun olması, güçlü bir teorik bilgi birikimi gerektirmesi ve pahalı paket programlara ihtiyaç duyulması gibi dezavantajlar vardır. Bu nedenle hata oranı düşük olan modellemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışmada, farklı geometrik boyutlardaki iletim hatlarının karakteristik parametreleri olan karakteristik empedansları ve efektif dielektrik sabitleri yapay sinir ağı (YSA) modelleri ile hesaplanmıştır. Oluşturulan YSA modellerinden elde edilen sonuçlar literatürde mevcut olan bazı tam dalga analiz metodları ve CMT ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak modellerin

kabul edilebilirlikleri test edilmiştir. Ayrıca, YSA modelleri oluşturulurken farklı YSA yapıları ve öğrenme algoritmaları denenerek hata oranı düşük olan ve yapısal olarak ta basitlik arz eden modeller oluşturulmaya çalışılmıştır. Yapılan bu çalışmalarla, bu tip problemlere uygun olan YSA yapıları, bu yapıların her bir katmanında kullanılacak olan transfer fonksiyonları belirlendikten sonra oluşturulan YSA modellerin eğitimi farklı öğrenme algoritmaları ile gerçekleştirilerek, algoritma performansları kendi aralarında değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçların literatürdeki mevcut sonuçlarla son derece uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir. Bu bölümde düzlemsel iletim hatlarının analizleri sonucunda elde edilen karakteristik parametre değerlerine ait grafiklerle, oluşturulan YSA modelinin detayları ve modelleri eğitmede kullanılan öğrenme algoritmalarının performanslarına ait tablolara yer verilecektir. İlk olarak iletim hatlarının temelini teşkil eden sonsuz kalınlıktaki dielektrik tabana sahip geleneksel CPW'lerin analizleri için oluşturulan YSA modeli ardından da Bölüm 2'de analizlerine ilişkin analitik ifadeleri verilen yapılara ait modeller yine aynı sıra içerisinde verilecektir.

5.2 Sonsuz Kalınlıktaki Dielektrik Tabana Sahip Geleneksel CPW'ler için Sunulan YSA Modeli

Yapay sinir ağlarının birçok farklı yapısı mevcuttur. ÇKP, birçok alanda uygulanmış olan bir YSA yapısıdır. Bölüm 4.6.1'de genel olarak bahsedilmiş bir ÇKP YSA yapısında giriş katındaki nöronlar tampon gibi davranırlar ve x_i giriş sinyalini ara kattaki nöronlara dağıtırlar. Ara kattaki her bir nöronun j 'nin çıkışı, eşitlik (5.1)'de görülebileceği gibi kendine gelen bütün giriş sinyalleri x_i 'leri takip eden bağlantı ağırlıkları w_{ji} ile çarpımlarının toplanması ile elde edilir. Elde edilen bu toplam, bir fonksiyondan geçirilerek çıkış elde edilir. Burada kullanılacak fonksiyon basit bir eşik fonksiyonu, bir sigmoid veya tanjant hiperbolik fonksiyonu olabilir.

$$y_j = f\left(\sum w_{ji}x_i\right) \quad (5.1)$$

Diğer katlardaki nöronların çıkışları da aynı şekilde hesaplanır. Her bir nöronun çıkışı benzer şekilde hesaplanır ve modelin eğitimi bir öğrenme algoritması kullanarak ağırlıkların ayarlanması ile gerçekleştirilir. Bu çalışmada öğrenme algoritmaları

ağırlıkları arzu edilen çıkış değerleri ile model çıkışları arasındaki farkların kareleri toplamını minimize edecek şekilde ayarlamaktadırlar.

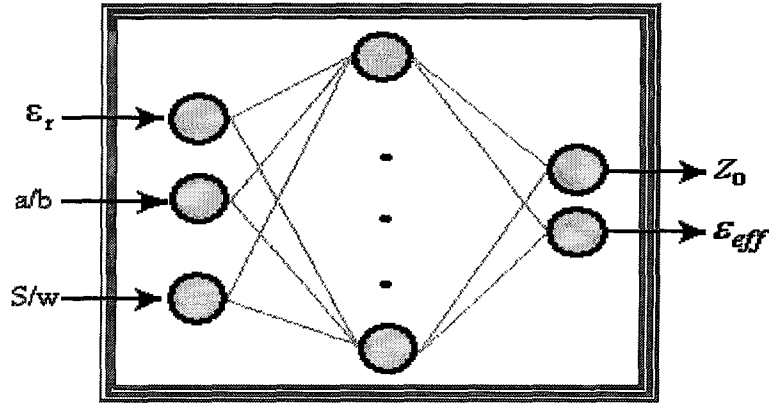
$$E = \frac{1}{2} \sum_j (y_{dj} - y_j)^2 \quad (5.2)$$

Burada y_{dj} arzu edilen çıkışı, y_j ise nöronun ürettiği çıkışı göstermektedir. Eğitim verilen bir adım sayısına veya bir performans kriterinin minimum değerine ulaşıncaya kadar devam etmektedir.

Sonsuz kalınlıktaki dielektrik tabana sahip eş düzlemli dalga kılavuzlarının geometrik yapısı Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Şekilde yarık genişlikleri w , merkez iletken genişliği $S=2a$, yarıklar ve merkez iletken genişlikleri toplamı $2b$, metal şerit kalınlığı ise t ile gösterilmektedir. Bu çalışmada, ÇKP’lere giriş olarak yapının geometrik boyutları olan S/w ve a/b oranları ile kullanılan dielektrik malzemenin bağlı dielektrik sabiti ϵ_r , çıkış olarak ta efektif dielektrik sabiti ve karakteristik empedans değerleri uygulanmıştır. Sunulan bu model giriş katı, iki ara kat ve bir çıkış katından oluşan ÇKP YSA yapısıdır. Şekil 5.1’de verilmekte olan model, 3’er nöron giriş ve ilk ara katmanda, 6 nöron ikinci ara katmanda ve 2 nöronda çıkış katında olmak üzere toplam 14 nörondan oluşmaktadır. Modelin eğitimi için 225 adet veriden oluşan bir eğitim seti, test içinse 54 adet veriden oluşan bir test veri seti kullanılmıştır. YSA ile oluşturulan modelin eğitimi sırasında kullanılacak olan veri setinin tamamen deneysel verilerden oluşması halinde hem quasi-statik analizin hem de YSA modelinin karşılaştırılması gerçekçi olarak ortaya konulabilir. Ancak böyle bir deneysel veri setinin oluşturulması ekonomik olmayacağından literatürde yaygın olarak kabul görmekte olan CMT [10] ile oluşturulan bir veri seti bu çalışmada eğitim amaçlı olarak kullanılmıştır. Transfer fonksiyonu olarak ara katmanlarda tanjant sigmoid çıkış katmanında ise lineer eşik fonksiyonu kullanılarak oluşturulan modellerin eğitimi ise karşılaştırma yapılabilmesi açısından beş farklı öğrenme algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunlar; Bölüm 4.7’de detayları verilmiş olan LM, BD, QN, BP ve BPR algoritmalarıdır.

Modelin eğitimi için kullanılan algoritmaların performansları Tablo 5.1’de değerlendirilmiştir. Kullanılan algoritmalar arasında en küçük RMS (Root Mean Square; Kareleri ortalamasının karekökü) hataya sahip olan LM eğitim algoritması eğitim işlemi sonucunda karakteristik empedans (Z_0) için $1.54 \cdot 10^{-6} \Omega$, efektif dielektrik

sabiti (ϵ_{eff}) içinse $1.20 \cdot 10^{-6}$ test işlemi sonucunda ise Z_0 için 0.0063Ω , ϵ_{eff} için 0.0057 gibi bir hata oranına sahip değerler üretmiştir. Tablo 5.1'den de görüleceği gibi bu algoritmalar arasında en kötü performansı BPR algoritması sergilemiştir.

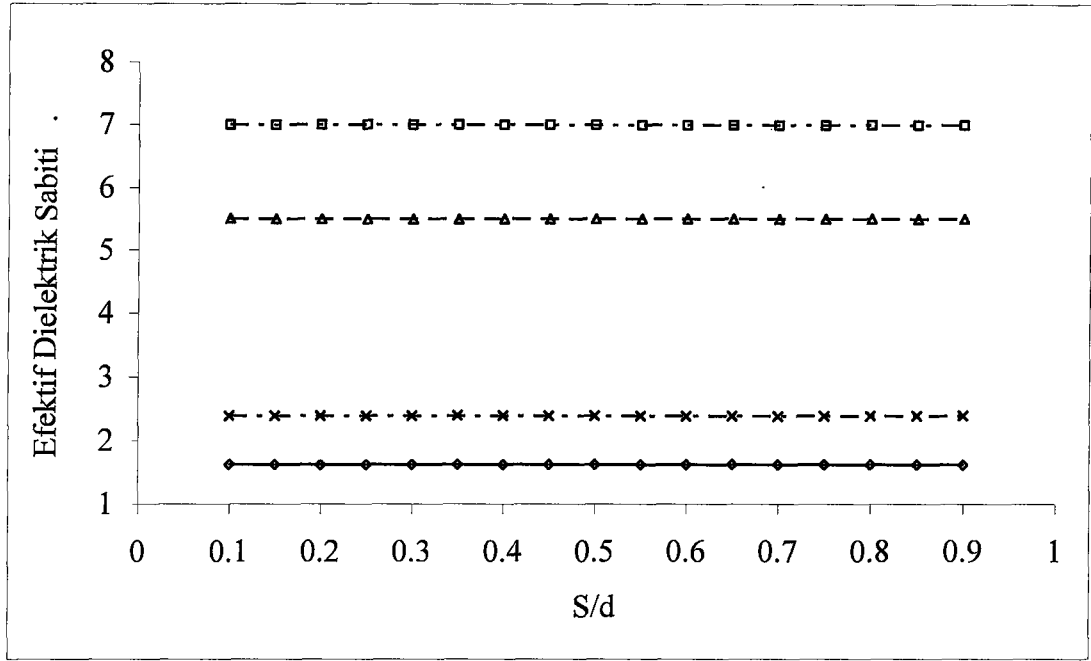
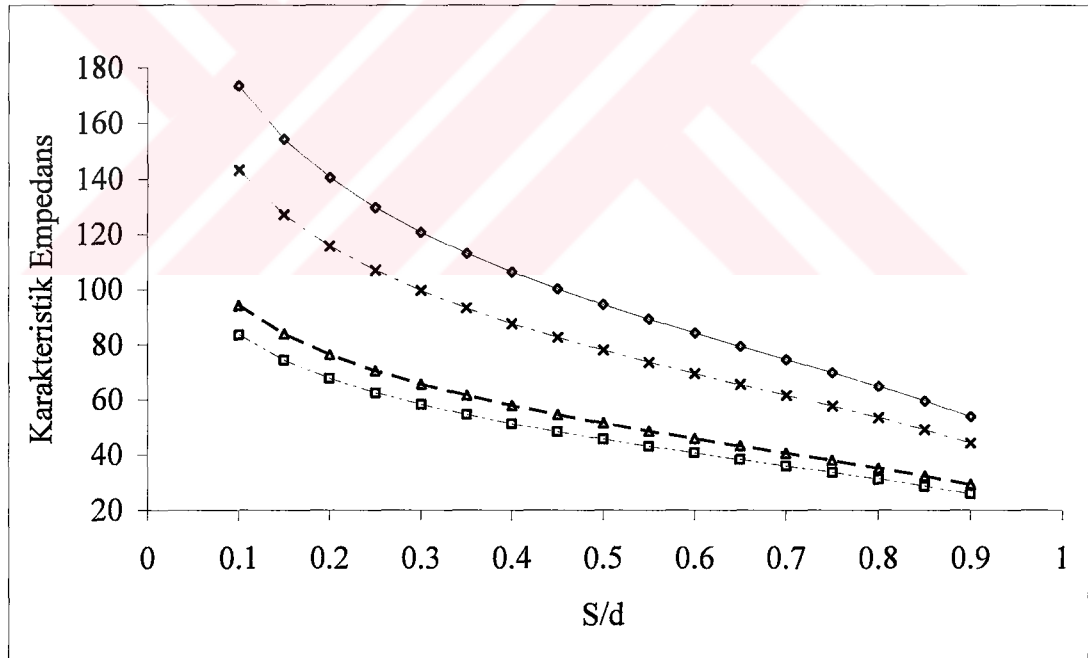


Şekil 5.1. Geleneksel CPW'ler için sunulan YSA modeli

Tablo 5.1. Geleneksel CPW'ler için sunulan YSA modelinin algoritma performansları

Öğrenme Algoritmaları	Eğitim RMS hataları		Test RMS hataları	
	ϵ_{eff}	$Z_0 (\Omega)$	ϵ_{eff}	$Z_0 (\Omega)$
LM	$1.20 \cdot 10^{-6}$	$1.54 \cdot 10^{-6}$	0.0057	0.0063
BD	$1.19 \cdot 10^{-5}$	$9.29 \cdot 10^{-6}$	0.0175	0.0147
QN	0.0132	0.0088	0.3188	0.2547
BP	1.4038	1.8280	0.8705	4.0326
BPR	0.2884	1.6285	4.9044	4.1904

En iyi performansa sahip LM algoritması ile eğitilen YSA modelinden elde edilen karakteristik empedans ve efektif dielektrik sabitine ait sonuçlar ile literatürde mevcut olan CMT [10, 73] sonuçları farklı dört dielektrik taban malzemesi için sırası ile Şekil 5.2.a ve 2.b'de karşılaştırılmıştır. Karakteristik empedansa ve efektif dielektrik sabitine ait YSA ve CMT sonuçlarının dört farklı dielektrik taban malzemesi içinde çok iyi bir uyum içerisinde olmaları sunulan YSA modelinin geçerliliğini ortaya koymaktadır.

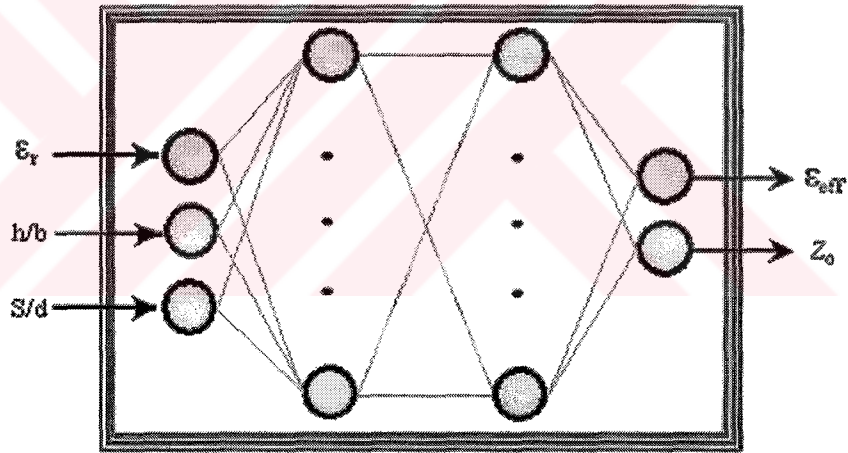
a) ϵ_{eff} b) $Z_0 (\Omega)$

— $\epsilon_r=2.25$ için CMT --- $\epsilon_r=3.78$ CMT --- $\epsilon_r=10$ CMT --- $\epsilon_r=13$ için CMT
 ◇ $\epsilon_r=2.25$ için YSA x $\epsilon_r=3.78$ YSA Δ $\epsilon_r=10$ YSA □ $\epsilon_r=13$ için YSA

Şekil 5.2. Model sonuçlarının CMT sonuçları ile karşılaştırılması

5.3 Sonlu Kalınlıktaki Dielektrik Tabana Sahip CPW'lerin YSA Modeli

Sonlu kalınlıktaki dielektrik tabana sahip CPW'lerin kesit görünümü Şekil 2.3'de verilmiştir. Şekildeki w 'lar yarık genişliklerini, S merkez iletken genişliğini, d yarıklar ve merkez iletken genişlikleri toplamını, h dielektrik tabanın kalınlığını, t ise metal şerit kalınlığını göstermektedir. Bu iletim hattı konfigürasyonunun karakteristik parametrelerinin YSA ile belirlenmesi için oluşturulan model yine ÇKP yapısında olan bir YSA modelidir. Üç giriş ve iki çıkıştan oluşan ÇKP YSA modeli Şekil 5.3'de gösterilmiştir. Bu YSA modeline tasarımda kullanılacak olan taban malzemesinin bağıl dielektrik sabiti ϵ_r ve yapının geometrik boyutları ile ilgili parametreler olan S/d ile h/b giriş olarak uygulanırken yapının efektif dielektrik sabiti ϵ_{eff} ve karakteristik empedansı Z_0 çıkış olarak uygulanmıştır.



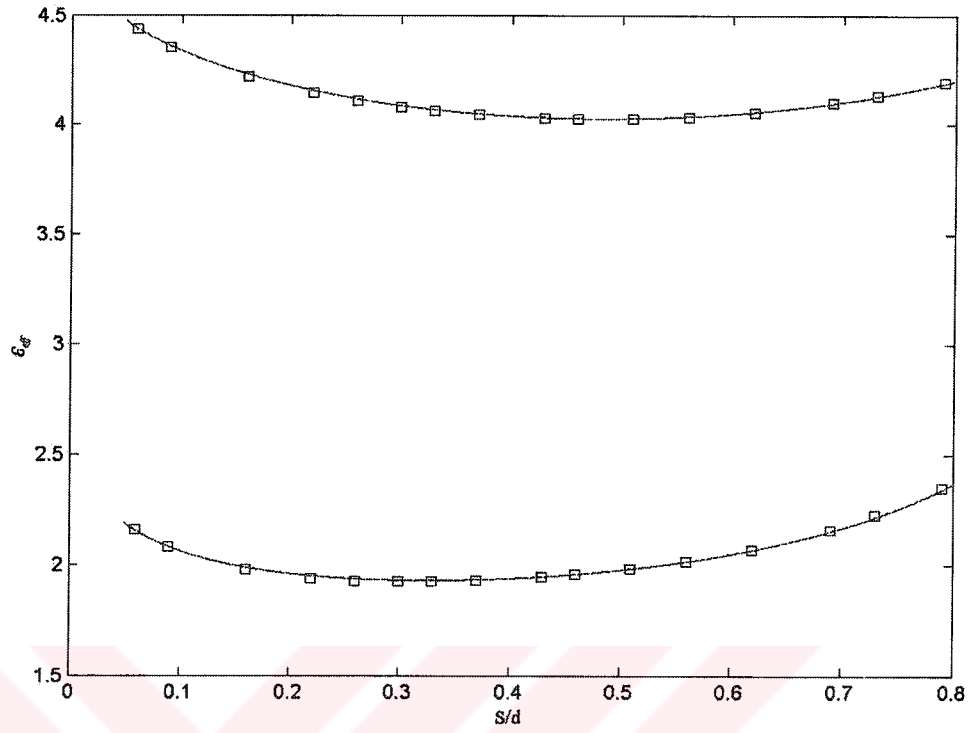
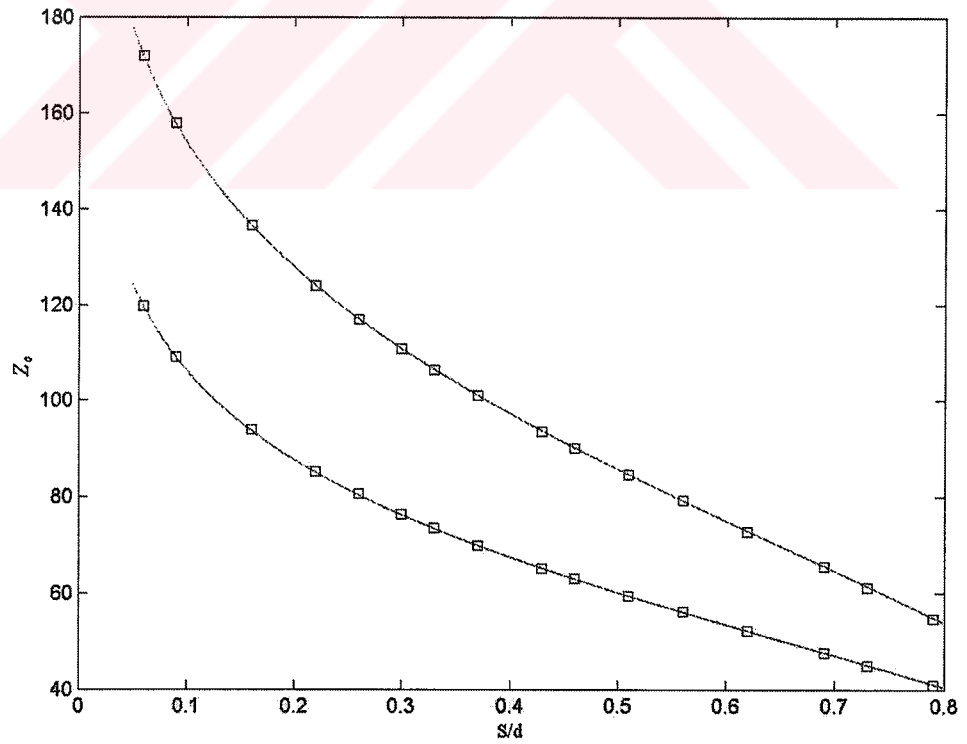
Şekil 5.3. Sonlu kalınlıktaki dielektrik tabana sahip CPW'ler için sunulan YSA modeli

Burada tek bir YSA modeli ile iki farklı çıkış elde edildiğini belirtmek faydalı olacaktır. YSA'lar 600 adet veriden oluşan bir veri seti ile eğitilmiştir. Bu veri setindeki giriş parametrelerinin değişim aralıkları, taban malzemesinin bağıl dielektrik sabiti ϵ_r 2 ile 22 arasında değişirken, S/d 0.05 ile 0.8 arasında, h/b ise 0.1 ile 100 arasında değişmektedir. Test için ise eğitim setinden farklı olarak oluşturulmuş 448 adet veriden oluşan bir veri seti kullanılmıştır. Kullanılan YSA modeli bir giriş, üç ara kat ve bir çıkış katına sahip ÇKP YSA yapısındadır. Ara katmanların ilkinde 3 nöron, ikincisinde 6 nöron, üçüncüsünde ise 4 nöron kullanılmıştır. Transfer fonksiyonu olarak ta ilk ara

katmanında tanjant sigmoid, diğer ara katmanlarda logaritmik sigmoid ve çıkış katmanında ise lineer eşik fonksiyonu kullanılmıştır. YSA'yı eğitime işleminde LM öğrenme algoritması kullanılmış ve eğitime belirlenen bir iterasyon sayısına veya belirlenen bir hata kriterine ulaşıldığında son verilmiştir. Değerlendirme kriteri olarak RMS değerler tercih edilmiştir. Sunulan YSA modelinin eğitim ve test hataları sırası ile 1.2146×10^{-7} ve 1.3704×10^{-6} olarak bulunmuştur. Tablo 5.2'de daha genel bir karşılaştırma yapılabilmesi için CMT ve SDA ile YSA modelinden elde edilen yapının karakteristik empedansına ait sonuçlar tablo halinde verilmiştir. Bu tabloda verilen değerler $h=200\mu\text{m}$ için geçerlidir. SDA, frekans bozulmalarının etkisinden sakınmak amacıyla 1 GHz için gerçekleştirilmiştir [124]. Şekil 5.4.a'da ise sonlu kalınlıktaki dielektrik tabana sahip geleneksel CPW'lerin karakteristik empedansına Z_0 (Ω) ve 4.b'de ise efektif dielektrik sabitine ϵ_{eff} ait grafiklerde, YSA modeli ile elde edilen sonuçlar CMT [73] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu grafiklerde taban malzemesinin bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r=10$ alınmıştır. Şekil 5.4'deki grafiklerden ve Tablo 5.2'deki sonuçlardan açıkça görüleceği gibi YSA modeli ile elde edilen sonuçlar literatürde mevcut CMT [73] ve SDA [124] gibi klasik tekniklerle de uyumludur [171].

Tablo 5.2. YSA modeliyle elde edilen karakteristik empedans $Z_0(\Omega)$ sonuçlarının klasik tekniklerle karşılaştırılması

S/d	b(μm)	Sunulan YSA Modeli			SDA [124]			CMT [73]		
		$\epsilon_r=20$	$\epsilon_r=12.9$	$\epsilon_r=2.25$	$\epsilon_r=20$	$\epsilon_r=12.9$	$\epsilon_r=2.25$	$\epsilon_r=20$	$\epsilon_r=12.9$	$\epsilon_r=2.25$
0.2	50	55.48	68.19	141.86	55.76	68.28	141.40	54.49	67.95	140.75
	170	57.47	70.62	143.90	57.52	70.27	142.97	57.52	70.29	142.86
	230	59.09	72.52	145.48	59.02	71.95	143.95	59.00	72.13	144.83
	350	63.01	76.95	148.85	62.60	75.93	146.30	62.89	76.44	147.85
0.4	50	42.06	51.64	107.23	42.22	51.69	106.99	42.04	51.47	106.57
	170	43.78	53.78	109.01	43.86	53.56	108.32	43.88	53.60	108.47
	230	45.21	55.43	110.36	45.20	55.05	109.34	45.28	55.21	109.82
	350	48.51	59.13	113.11	48.24	58.44	111.41	48.46	58.82	112.62
0.6	50	33.29	40.96	84.75	33.48	40.99	84.83	33.32	40.80	84.45
	170	34.75	42.75	86.29	34.86	42.56	85.84	34.87	42.59	86.04
	230	35.94	44.07	87.39	35.93	43.76	86.68	35.99	43.87	87.12
	350	38.47	46.85	89.56	38.26	46.36	88.38	38.41	46.63	89.24
0.8	50	25.66	31.56	65.40	25.86	31.66	65.51	25.68	31.45	65.09
	170	26.72	32.82	66.52	26.80	32.71	66.03	26.81	32.75	66.03
	230	27.54	33.70	67.26	27.53	33.54	66.59	27.56	33.61	66.59

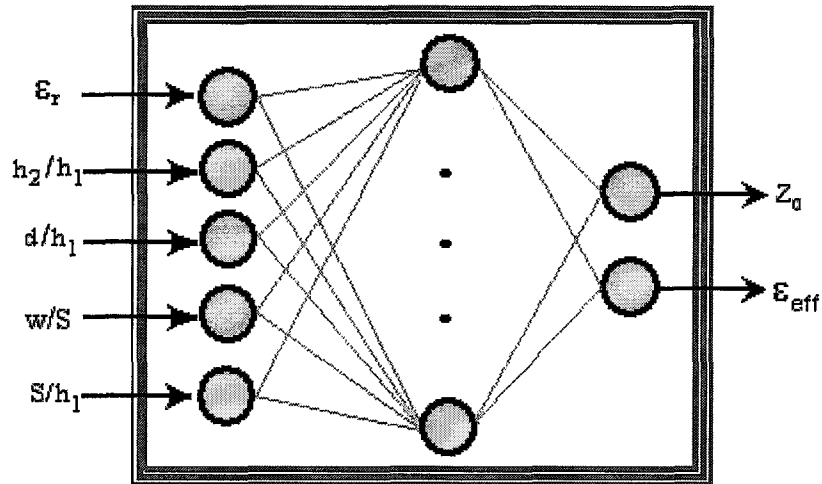
a) Efektif dielektrik sabiti ϵ_{eff} b) Karakteristik empedans Z_0 (Ω)

— CMT □ YSA

Şekil 5.4. CMT ile YSA modeli sonuçlarının karşılaştırılması

5.4 Alt Korumalı CPW'ler için Sunulan YSA Modeli

Alt korumalı CPW'lerin kesit görünümü Şekil 2.4'de verilmiştir. Şekildeki w 'lar yarıklık genişliklerini, $S=2a$ merkez iletken genişliğini, $2b$ yarıklar ve merkez iletken genişlikleri toplamını, h_1 dielektrik tabanın kalınlığını, h_2 alt korumanın iletken elemanlara olan uzaklığını ve t ise metal şerit kalınlıklarını göstermektedir. Alt korumalı iletim hattı konfigürasyonunda yapı uygun geometrik boyutlar seçilerek iletken destekli CPW haline de dönüştürülebilir. Burada tek yapılması gereken h_2 kalınlığının h_1 'e eşit seçilmesidir. Bu durum sunulacak olan bir modele, iki farklı iletim hattının analizini yapabilme kabiliyeti kazandırması bakımından oldukça önemlidir. Modelin bu kabiliyetin kazandırılabilmesi için eğitim ve test data aralıklarının buna uygun olarak seçilmesi gerekmektedir. Bu iletim hattı konfigürasyonunun karakteristik parametrelerinin YSA ile belirlenmesi için oluşturulan model yine ÇKP yapısında olan bir YSA modelidir. Beş giriş ve iki çıkıştan oluşan ÇKP-YSA modeli Şekil 5.5'de gösterilmiştir. Bu YSA modeline tasarımda kullanılacak olan taban malzemesinin bağıl dielektrik sabiti ϵ_r ve yapının geometrik boyutları ile ilgili parametreler olan h_2/h_1 , d/h_1 , w/S ile S/h_1 giriş olarak uygulanırken yapının efektif dielektrik sabiti ϵ_{eff} ve karakteristik empedansı Z_0 çıkış olarak uygulanmıştır.



Şekil 5.5. Alt korumalı CPW'ler için sunulan YSA modeli

YSA' modeli 540 adet veriden oluşan bir veri seti ile eğitilmiştir. Bu veri setindeki giriş parametrelerinin değişim aralıkları, taban malzemesinin bağıl dielektrik sabiti ϵ_r 2 ile 22

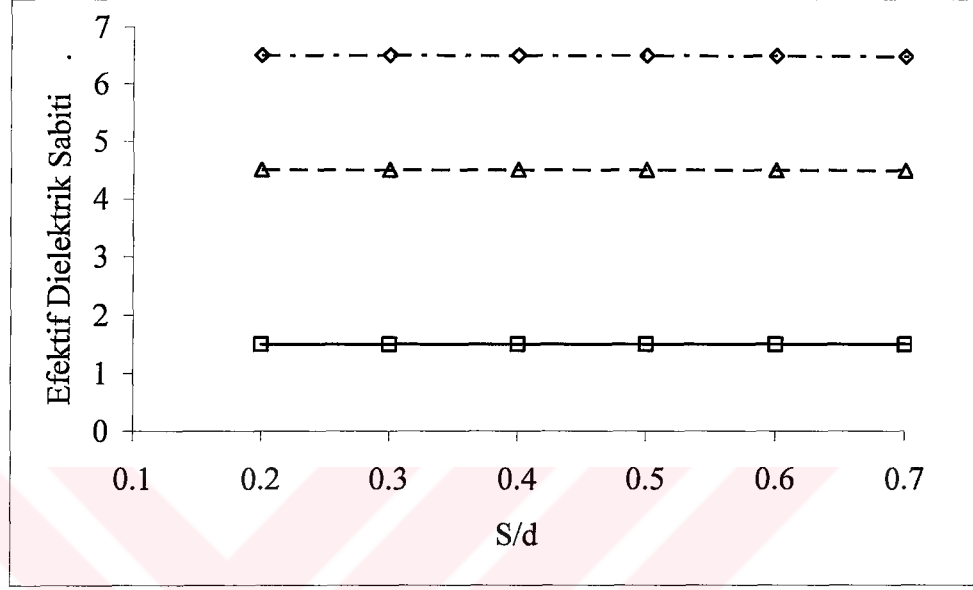
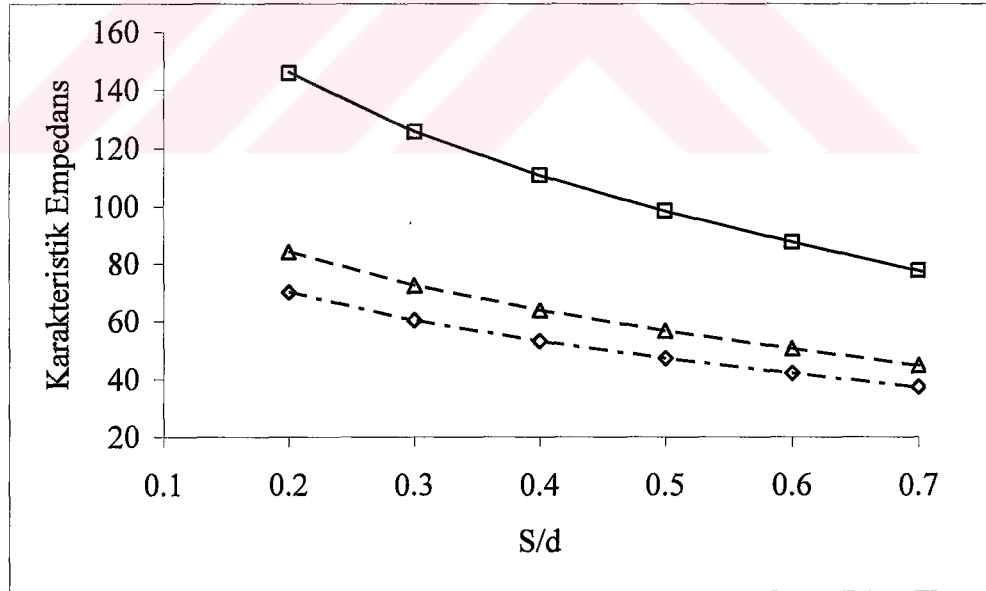
arasında değişirken, S/d 0.1 ile 0.9 arasında, w 10 μm ila 110 μm , h_1 ve h_2 ise 600 μm ila 1000 μm arasında değişen değerler için belirlenmiştir. Test için ise eğitim setinden farklı olarak oluşturulmuş 525 adet veriden oluşan bir veri seti kullanılmıştır. Kullanılan YSA modeli giriş ve ilk ara katmanda 5'er nöron, ikinci ara katmanda 10 nöron çıkışta da 2 nöron olmak üzere toplam 22 nörondan oluşan bir ÇKP yapısıdır. Transfer fonksiyonu olarak ta ilk ara katmanda tanjant sigmoid, ikinci ara katmanda logaritmik sigmoid ve çıkış katmanında lineer eşik fonksiyonu kullanılmıştır. YSA'yı eğitime işlemine, belirlenen bir iterasyon sayısına veya belirlenen bir hata kriterine ulaşıldığında son verilmiştir. Değerlendirme kriteri olarak hataların kareleri ortalaması tercih edilmiştir. YSA modelinin eğitimi altı farklı öğrenme algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunlar; LM, BD, QN, CGF, BPR ve BP algoritmalarıdır. Tablo 5.3'te bu öğrenme algoritmalarının eğitim ve test hata sonuçları karşılaştırılarak performansları değerlendirilmiştir. Buna göre en iyi performansı LM ve BD öğrenme algoritmaları sergilemiştir.

Tablo 5.3. Alt korumalı CPW'ler için sunulan YSA modelinde algoritma performansları

Öğrenme Algoritmaları	Eğitim RMS Hataları		Test RMS Hataları	
	ϵ_{eff}	$Z_0 (\Omega)$	ϵ_{eff}	$Z_0 (\Omega)$
LM	0.0908	0.0315	0.2101	0.0313
BD	0.5872	0.3671	0.2725	0.0333
QN	0.5678	1.8456	1.9304	1.0488
CGF	7.4021	1.2628	1.8116	1.6709
BPR	13.1899	2.1082	1.4259	1.3634
BP	40.9159	7.4469	15.6867	6.1177

Şekil 5.6.a'da alt korumalı CPW'lerin karakteristik empedansına $Z_0 (\Omega)$ ve 6.b'de ise efektif dielektrik sabitine ϵ_{eff} ait grafiklerde, LM ile eğitimi gerçekleştirilen YSA modeli ile elde edilen sonuçlar CMT [65] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu grafiklerde taban malzemelerinin bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r=2, 8$ ve 12 olan, diğer geometrik boyutları ise $w=20\mu\text{m}$, $h_1=600\mu\text{m}$ ve $h_2=650\mu\text{m}$ olan alt korumalı CPW yapıları incelenmiştir. Sonuç olarak sunulan YSA modellerinden LM ile eğitimi gerçekleştirilen modelden elde edilen sonuçların, literatürde mevcut CMT [65] sonuçları ile uyum içerisinde olduğu

gözlenmiştir. Bu nedenle sunulan YSA modeli klasik tekniklere alternatif yeni bir yaklaşım olarak önerilebilecek düzeydeki bir hata oranına sahip olduğu söylenebilir.

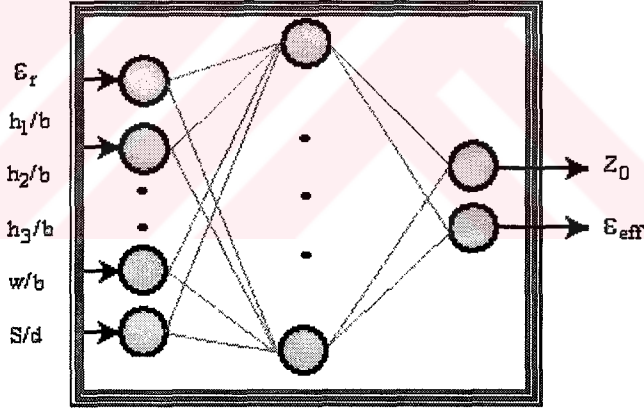
a) ϵ_{eff} b) $Z_0(\Omega)$

— $\epsilon_r=2$ için CMT --- $\epsilon_r=8$ için CMT --- $\epsilon_r=12$ için CMT
 □ $\epsilon_r=2$ için YSA Δ $\epsilon_r=8$ için YSA ◇ $\epsilon_r=12$ için YSA

Şekil 5.6. Alt korumalı CPW'ye ait CMT ve YSA sonuçları

5.5 Alt ve Üst Korumalı CPW'ler için Sunulan YSA Modeli

Şekil 2.5'de kesit görünümü verilmiş olan alt ve üst korumalı CPW'lerde w 'lar yarık genişliklerini, $S=2a$ merkez iletken genişliğini, $2b$ yarıklar ve merkez iletken genişlikleri toplamını, h_1 dielektrik tabanın kalınlığını, h_2 alt korumanın iletim elemanlara olan uzaklığını, h_3 üst korumanın iletim elemanlara olan uzaklığını ve t ise metal şerit kalınlıklarını göstermektedir. Üst korumalı CPW'lerin karakteristik parametrelerinin YSA ile belirlenmesi için oluşturulan model altı giriş ve iki çıkıştan oluşmaktadır. Bu model, Şekil 5.7'de görülmektedir. YSA modeline tasarımda kullanılacak olan taban malzemesinin bağıl dielektrik sabiti ϵ_r ve yapının geometrik boyutları ile ilgili parametreler olan h_1/b , h_2/b , h_3/b , w/b ile S/d giriş olarak uygulanırken yapının efektif dielektrik sabiti ϵ_{eff} ve karakteristik empedansı Z_0 çıkış olarak uygulanmıştır.



Şekil 5.7. Alt ve üst korumalı CPW'ler için sunulan YSA modeli

YSA' modeli 1680 adet veriden oluşan bir veri seti ile eğitilmiştir. Bu veri setindeki giriş parametrelerinin değişim aralıkları, taban malzemesinin bağıl dielektrik sabiti ϵ_r 2 ile 14 arasında değişirken, S/d 0.1 ile 0.9 arasında, b 100 μ m ile 500 μ m, h_1 100 μ m ile 1000 μ m ve h_1/b değeri 0.1 ile 1.2 arasında, h_1/h_3 değeri 1 ile 4 arasında değişen değerler için belirlenmiştir. Test için ise eğitim setinden farklı olarak oluşturulmuş 672 adet veriden oluşan bir veri seti kullanılmıştır. Kullanılan YSA modeli giriş ve ilk ara katmanda 6'şar nöron, ikinci ara katmanda 12 nöron çıkışta ise 2 nöron olmak üzere toplam 26 nörondan oluşan bir ÇKP yapısıdır. Transfer fonksiyonu olarak ta ilk ara

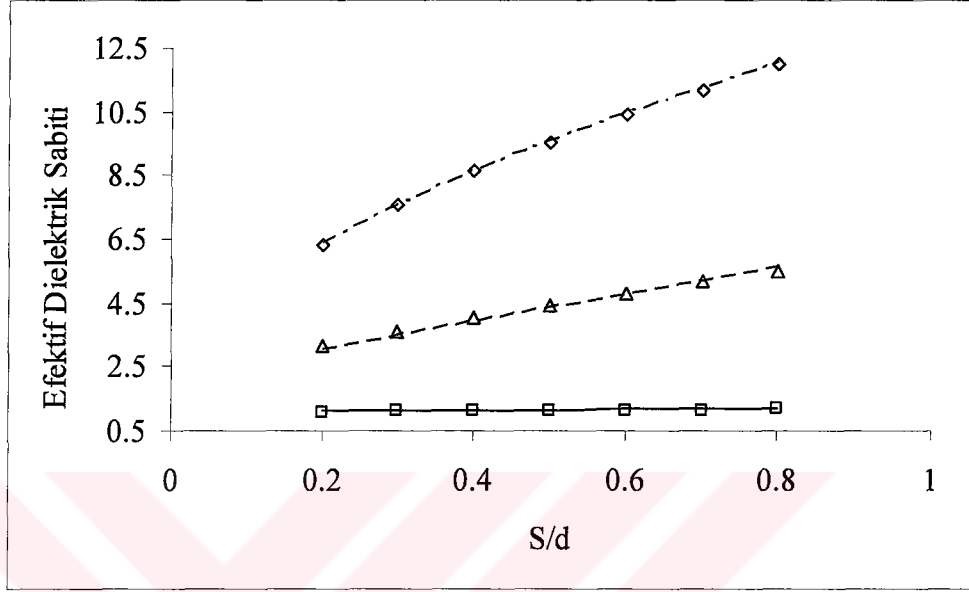
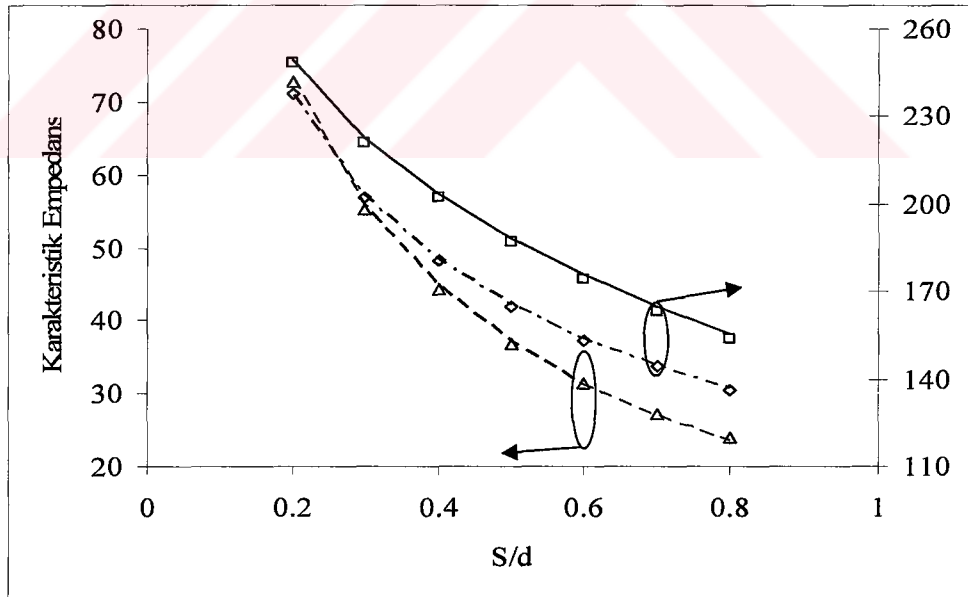
katmanda tanjant sigmoid, ikinci ara katmanda logaritmik sigmoid ve çıkış katmanında ise lineer eşik fonksiyonu kullanılmıştır. YSA'yı eğitme işlemine, belirlenen bir iterasyon sayısına veya belirlenen bir hata kriterine ulaşıldığında son verilmiştir. Değerlendirme kriteri olarak hataların kareleri ortalaması tercih edilmiştir. YSA modelinin eğitimi dört farklı öğrenme algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunlar; LM, BPR, QN ve CGF algoritmalarıdır. Tablo 5.4'de bu öğrenme algoritmalarının eğitim ve test işlemleri için RMS hata sonuçları karşılaştırılarak performansları değerlendirilmiştir. Buna göre en iyi performansı LM ve BR algoritmaları, en kötü performansı ise CGF algoritması sergilemiştir. QN ise ilginç bir performans sergileyerek Z_0 için iyi bir öğrenme gerçekleştirmesine rağmen aynı performansı diğer bir karakteristik parametre olan ϵ_{eff} ve test işlemleri için gösterememiştir. TAS algoritması da eğitim amaçlı olarak kullanılmaya çalışılmış ancak RMS hata oranları eğitim ve test işlemlerinin her ikisi için de oldukça yüksek olduğu için değerlendirmeye alınmamıştır.

Tablo 5.4. Alt ve üst korumalı CPW'ler için sunulan YSA modelinde algoritma performansları

Öğrenme Algoritmaları	Eğitim RMS Hataları		Test RMS Hataları	
	ϵ_{eff}	$Z_0 (\Omega)$	ϵ_{eff}	$Z_0 (\Omega)$
LM	0.6846	0.5770	0.6047	1.1421
BPR	0.7533	0.7279	1.7725	0.7266
QN	0.6623	39.5687	19.6953	21.6945
CGF	12.5981	29.1029	9.3034	20.9659

Şekil 5.8.a'da alt ve üst korumalı CPW'lerin karakteristik parametrelerden biri olan ϵ_{eff} efektif dielektrik sabitine ve 8.b'de ise diğer bir parametre olan karakteristik empedansına $Z_0(\Omega)$ ait grafiklerde, LM ile eğitimi gerçekleştirilen YSA modelinden elde edilen sonuçlar CMT [65] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu grafiklerde taban malzemelerinin bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r=2, 9$ ve 13 olan, diğer geometrik boyutları ise $w=20\mu m$, $h_1=635\mu m$ ve $h_2=650\mu m$ olan alt korumalı CPW yapıları incelenmiştir. Sonuç olarak sunulan YSA modellerinden LM ile eğitimi gerçekleştirilen modelden elde edilen sonuçların, literatürde mevcut CMT sonuçları ile uyum içerisinde olduğu

gözlenmiştir. Bu nedenle sunulan YSA modeli klasik tekniklere alternatif yeni bir yaklaşım olarak önerilebilecek düzeydeki bir hata oranına sahip olduğu söylenebilir.

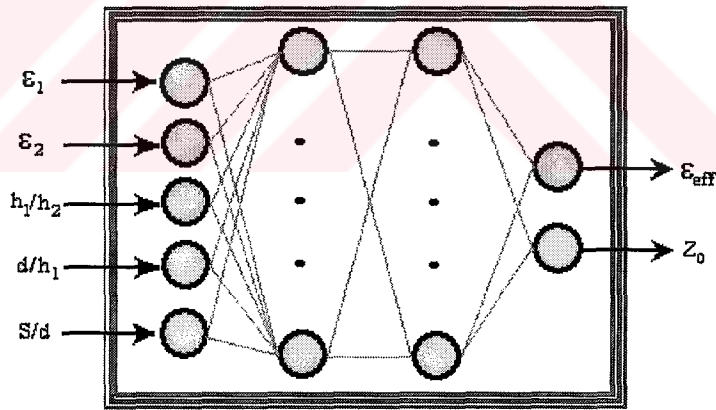
a) ϵ_{eff} b) $Z_0 (\Omega)$

— $\epsilon_r=2$ için CMT --- $\epsilon_r=9$ için CMT --- $\epsilon_r=13$ için CMT
 □ $\epsilon_r=2$ için YSA Δ $\epsilon_r=9$ için YSA ◇ $\epsilon_r=13$ için YSA

Şekil 5.8. Alt ve üst korumalı CPW'ye ait CMT ve YSA sonuçlarının karşılaştırılması

5.6 Sandviç CPW'ler için Sunulan YSA Modeli

Şekil 2.6'da kesit görünümü verilmiş olan sandviç CPW (SCPW)'lerde ϵ_1 alt katmanın bağıl dielektrik sabitini, ϵ_2 üst katmanın bağıl dielektrik sabitini, w 'lar yarıklı genişliklerini, $S=2a$ merkez iletken genişliğini, d yarıklar ve merkez iletken genişlikleri toplamını, h_1 alt dielektrik tabanın kalınlığını, h_2 üst dielektrik tabanın kalınlığını ve t ise metal şerit kalınlıklarını göstermektedir. SCPW'lerin karakteristik parametrelerinin YSA ile belirlenmesi için oluşturulan model beş giriş ve iki çıkıştan oluşmaktadır. Bu model, Şekil 5.9'da görülmektedir. YSA modeline tasarımda kullanılacak olan taban malzemelerinin bağıl dielektrik sabitleri ϵ_1 , ϵ_2 ve yapının geometrik boyutları ile ilgili parametreler olan h_1/h_2 , d/h_1 , ile S/d giriş olarak uygulanırken yapının efektif dielektrik sabiti ϵ_{eff} ve karakteristik empedansı Z_0 çıkış olarak uygulanmıştır. ϵ_2 'nin 1'e eşit seçilmesi durumunda bu iletim hattı konfigürasyonu geleneksel CPW'ye dönüştüğü için bu model kullanılarak her iki yapıya ait analizleri de gerçekleştirebilir.



Şekil 5.9. SCPW'ler için sunulan YSA modeli

YSA modelinin eğitimi için kullanılan veri setindeki giriş parametrelerinin değişim aralıkları, $1 \leq \epsilon_1 \leq 21$, $1 \leq \epsilon_2 \leq 13$, $0.1 \leq S/d \leq 0.9$, $200 \mu\text{m} \leq h_1 \leq 1270 \mu\text{m}$, $600 \mu\text{m} \leq h_2 \leq 1270 \mu\text{m}$ ve $100 \mu\text{m} \leq d \leq 2100 \mu\text{m}$, h_1/h_2 ve d/h_1 oranları içinse sırasıyla $1/3 \leq h_1/h_2 \leq 6.35$ ve $0.1 \leq d/h_1 \leq 10.5$ arasında değişen değerler için belirlenmiştir. Test için ise eğitim setinden farklı olarak oluşturulmuş bir veri seti kullanılmıştır. Kullanılan YSA modeli $5 \times 5 \times 5 \times 10 \times 2$ şeklinde düzlenmiş bir ÇKP YSA yapısıdır. Yani giriş ve ilk iki ara katmanda 5'er nöron, ikinci ara katmanda 10 nöron ve çıkışta da 2 nöron olmak üzere toplam 27 nörondan oluşan modeldir. Transfer fonksiyonu olarak ta ilk ara katmanda

tanjant sigmoid, diğer ara katmanlarda logaritmik sigmoid ve çıkış katmanında ise lineer eşik fonksiyonu kullanılmıştır. YSA'yı eğitme işlemine, belirlenen bir iterasyon sayısına veya belirlenen bir hata kriterine ulaşıldığında son verilmiştir. Değerlendirme kriteri olarak ta daha iyi bir karşılaştırma yapabilmek için ortalama mutlak hata değerleri ve RMS hatalar kullanılmıştır. YSA modelinin eğitimi yedi farklı öğrenme algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunlar; LM, BD, CGF, QN, BPM, BPR ve BP algoritmalarıdır. Tablo 5.5'de bu öğrenme algoritmalarının eğitim ve test işlemleri için RMS hata sonuçları karşılaştırılarak performansları değerlendirilmiştir. Buna göre en iyi performansı LM ve BD algoritmaları, en kötü performansı ise BPR ve BP algoritmaları sergilemişlerdir.

Tablo 5.5. SCPW'ler için sunulan YSA modelinde algoritma performansları

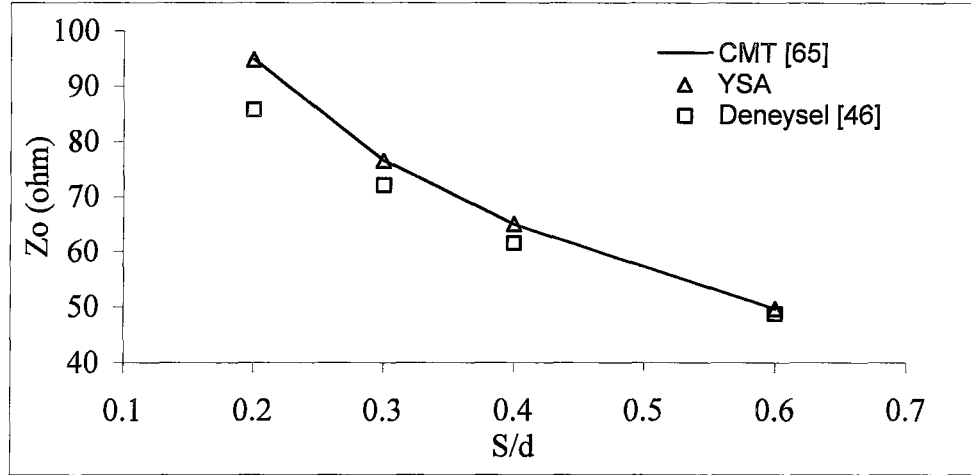
Öğrenme Algoritmaları	Eğitim RMS Hataları		Test RMS Hataları	
	ϵ_{eff}	$Z_0 (\Omega)$	ϵ_{eff}	$Z_0 (\Omega)$
LM	0.0272	0.1011	0.0823	0.0698
BD	0.1964	0.2644	0.0354	0.0427
CGF	1.1006	4.1949	0.1593	0.6007
QN	4.0343	0.9981	0.7838	0.1964
BPM	3.7349	15.6495	2.2833	2.4190
BPR	35.7848	50.2774	0.8729	2.1566
BP	21.5032	91.1962	28.8595	21.4216

Sunulan bu model kullanılarak hem SCPW'lerin hem de sonlu dielektrik taban uzunluğuna sahip geleneksel CPW'lerin analizleri gerçekleştirilebilmektedir. Bu amaçla YSA modeli, Şekil 5.10'da görülmekte olan grafiklerde farklı geometrik boyutlara sahip üç geleneksel CPW için test edilmiştir. Bu grafiklerde, literatürde mevcut ölçüm sonuçları [46-48] ve CMT [65] kullanılarak elde edilen teorik sonuçlarla YSA modeli test edilmiş ve sonuçların son derece uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Şekil 5.10.a'da geometrik boyutları $S=1270\mu m$, $h_f=1270\mu m$ olan ve taban malzemesi olarak bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r=9.2$, 10.b'de geometrik boyutları $d=1000\mu m$, $h_f=640\mu m$ olan ve taban malzemesi olarak bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r=9.7$ ve 10.c'de ise geometrik boyutları $S=508\mu m$, $h_f=635\mu m$ olan ve taban malzemesi olarak bağıl dielektrik sabiti

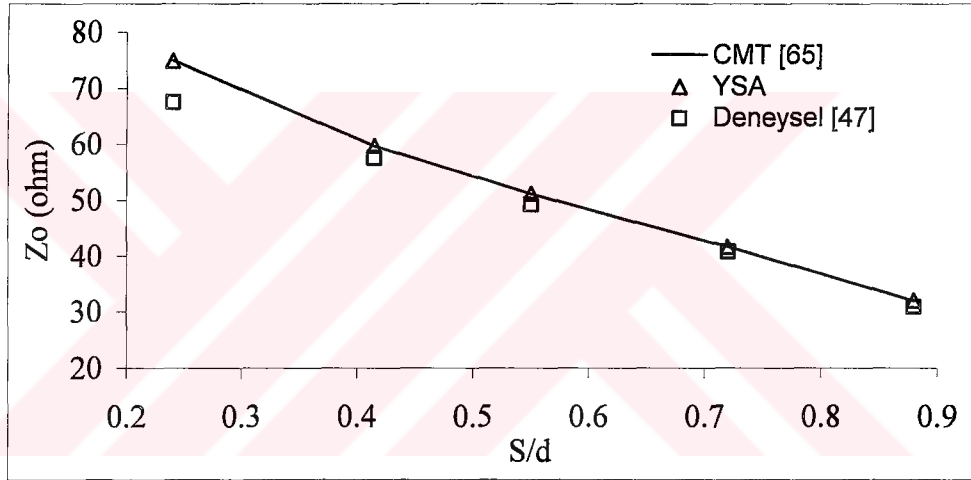
$\epsilon_r=9.6$ olan CPW'lere ilişkin test sonuçları verilmiştir. Tablo 5.6'de ise daha genel bir karşılaştırma yapılabilmesi için CMT [65] ve SDA [124] ile YSA modelinden elde edilen dielektrik taban kalınlığı $h_f=200\mu\text{m}$ olan CPW'nin karakteristik empedansına ait sonuçlar tablo halinde verilmiştir. SDA, frekans bozulmalarının etkisinden sakınmak amacıyla 1 GHz için gerçekleştirilmiştir [124].

Tablo 5.6. YSA modeliyle geleneksel CPW'lerin karakteristik empedansına $Z_0(\Omega)$ ait sonuçların klasik tekniklerle karşılaştırılması.

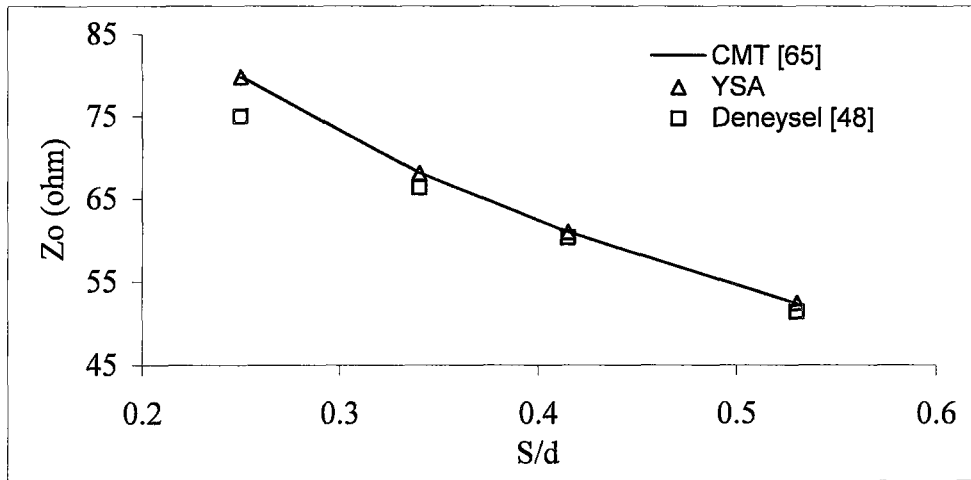
S/d	d/h_1	YSA Modeli			SDA [124]			CMT [65]		
		$\epsilon_r=20$	$\epsilon_r=12.9$	$\epsilon_r=2.25$	$\epsilon_r=20$	$\epsilon_r=12.9$	$\epsilon_r=2.25$	$\epsilon_r=20$	$\epsilon_r=12.9$	$\epsilon_r=2.25$
0.2	0.5	55.40	68.03	141.32	55.76	68.28	141.40	54.49	67.95	140.75
	1.7	57.55	70.56	143.47	57.52	70.27	142.97	57.52	70.29	142.86
	2.3	59.13	72.39	144.96	59.02	71.95	143.95	59.00	72.13	144.83
	3.5	62.94	76.67	148.22	62.60	75.93	146.30	62.89	76.44	147.85
0.4	0.5	41.99	51.57	107.06	42.22	51.69	106.99	42.04	51.47	106.57
	1.7	43.93	53.88	108.99	43.86	53.56	108.32	43.88	53.60	108.47
	2.3	45.33	55.48	110.29	45.20	55.05	109.34	45.28	55.21	109.82
	3.5	48.54	59.04	112.97	48.24	58.44	111.41	48.46	58.82	112.62
0.6	0.5	33.26	40.84	84.69	33.48	40.99	84.83	33.32	40.80	84.45
	1.7	34.82	42.73	86.35	34.86	42.56	85.84	34.87	42.59	86.04
	2.3	35.93	44.00	87.40	35.93	43.76	86.68	35.99	43.87	87.12
	3.5	38.36	46.71	89.47	38.26	46.36	88.38	38.41	46.63	89.24
0.8	0.5	25.62	31.48	65.23	25.86	31.66	65.51	25.68	31.45	65.09
	1.7	26.70	32.81	66.51	26.80	32.71	66.03	26.81	32.75	66.03
	2.3	27.44	33.67	67.27	27.53	33.54	66.59	27.56	33.61	66.59



a) $S=1270\mu\text{m}$, $h_I=1270\mu\text{m}$, $\epsilon_I=9.2$ ve $\epsilon_2=1$



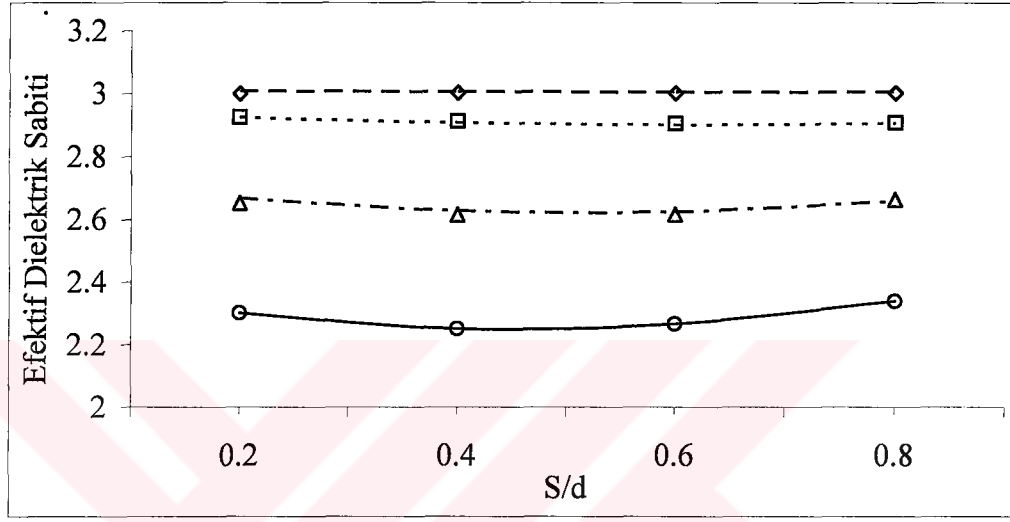
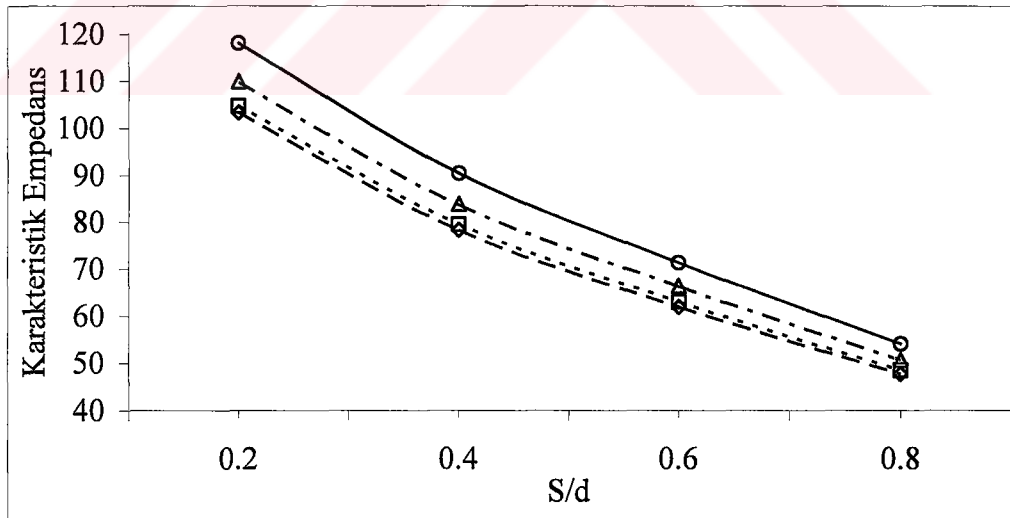
b) $d=1000\mu\text{m}$, $h_I=640\mu\text{m}$, $\epsilon_I=9.7$ ve $\epsilon_2=1$



c) $S=508\mu\text{m}$, $h_I=635\mu\text{m}$, $\epsilon_I=9.6$ ve $\epsilon_2=1$

Şekil 5.10. Sunulan YSA modelin geleneksel CPW'ye ait sonuçlarının ölçüm sonuçları ve CMT sonuçları ile karşılaştırılması

Şekil 5.11'de dört farklı d/h_1 oranına sahip SCPW'ler için test sonuçları yer almaktadır. Şekil 5.11.a'da $h_1=200\mu\text{m}$, $h_2=600\mu\text{m}$, $\epsilon_1=2.25$ ve $\epsilon_2=3.78$ için SCPW'lerin efektif dielektrik sabiti ϵ_{eff} 'e ve 11.b'de ise karakteristik empedansı $Z_0(\Omega)$ 'a ait grafikler verilmiştir.

a) ϵ_{eff} b) $Z_0 (\Omega)$

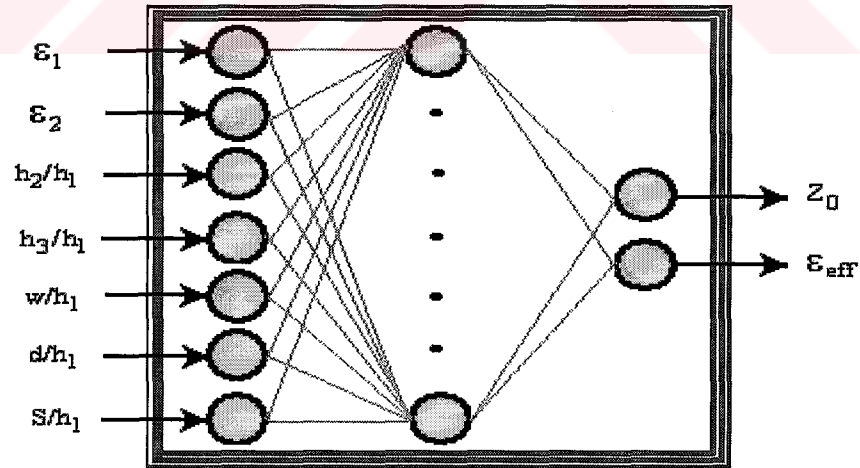
---	CMT	◇ YSA	$d/h_1=0.5$
.....	CMT	□ YSA	$d/h_1=2$
-.-.-	CMT	△ YSA	$d/h_1=5$
—	CMT	○ YSA	$d/h_1=10$

Şekil 5.11. Sunulan YSA modelinden, SCPW'ler için elde edilen sonuçların CMT sonuçları ile karşılaştırılması

Yukarıda bahsedilen grafiklerin tamamındaki sonuçlar, en iyi performansı sergileyen LM öğrenme algoritması ile eğitimi gerçekleştirilen YSA modeline ait sonuçlardır. Sonuç olarak sunulan YSA modellerinden LM ile eğitimi gerçekleştirilen modelden elde edilen sonuçların, literatürde mevcut ölçüm [46-48], CMT [65] ve SDA [124] sonuçları ile iyi bir uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle sunulan YSA modeli, klasik tekniklere alternatif yeni bir yaklaşım olarak önerilebilir [172].

5.7 Alt Korumalı SCPW'ler için Sunulan YSA Modeli

Şekil 2.7'de kesit görünümü verilmiş olan alt korumalı SCPW'ler de ϵ_1 alt katmanın bağıl dielektrik sabitini, ϵ_2 üst katmanın bağıl dielektrik sabitini, w 'lar yarı genişliklerini, $S=2a$ merkez iletken genişliğini, d yarıklar ve merkez iletken genişlikleri toplamını, h_1 alt dielektrik tabanın kalınlığını, h_2 üst dielektrik tabanın kalınlığını, h_3 alt korumanın iletim elemanlarına olan uzaklığını ve t ise metal şerit kalınlıklarını göstermektedir. Alt korumalı SCPW'lerin karakteristik parametrelerinin YSA ile belirlenmesi için oluşturulan model yedi giriş ve iki çıkıştan oluşmaktadır. Bu model, Şekil 5.12'de görülmektedir.



Şekil 5.12. Alt korumalı SCPW'ler için sunulan YSA modeli

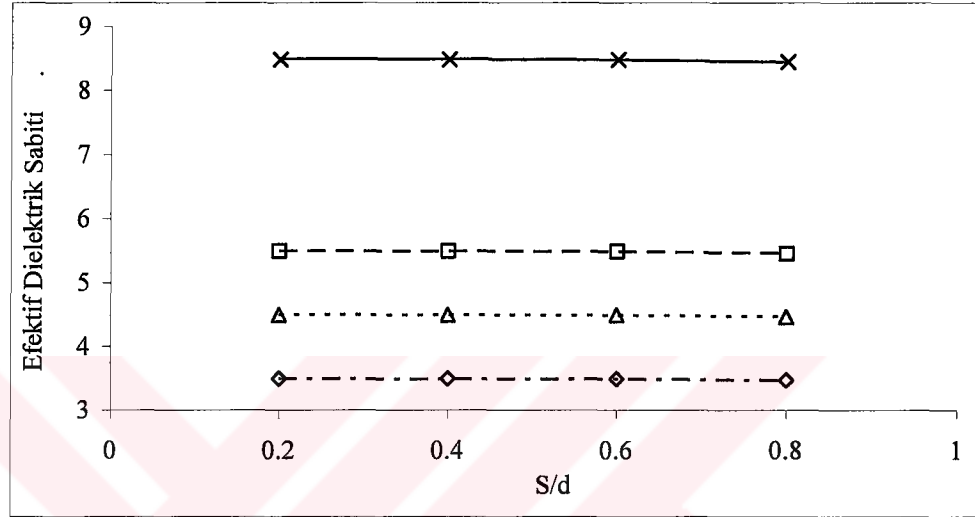
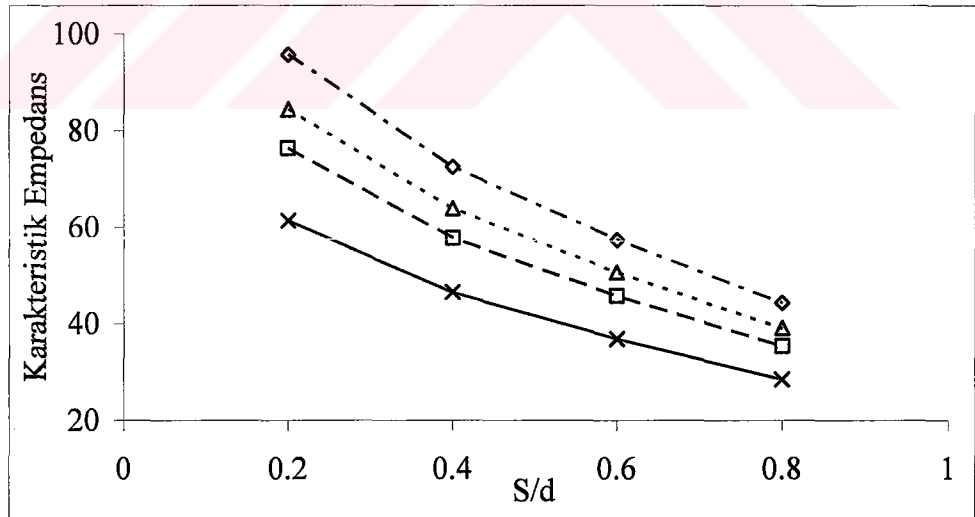
YSA modeline tasarımda kullanılacak olan taban malzemelerinin bağıl dielektrik sabitleri ϵ_1 , ϵ_2 ve yapının geometrik boyutları ile ilgili parametreler olan h_1/h_2 , h_3/h_1 , d/h_1 , w/S ile S/d giriş olarak uygulanırken yapının efektif dielektrik sabiti ϵ_{eff} ve karakteristik empedansı Z_0 çıkış olarak uygulanmıştır. Sunulan bu model geometrik

boyutların uygun bir şekilde seçilmesiyle, dört farklı CPW konfigürasyonunun analizlerini gerçekleştirebilir. Örneğin ε_2 'nin 1'e eşit seçilmesi durumunda bu iletim hattı konfigürasyonu alt korumalı CPW'ye, h_3 'ün h_1 'e eşit seçilmesiyle CBSCPW'ye, ε_2 'nin 1'e h_3 'ünde h_1 'e eşit seçilmesiyle de CBCPW'ye dönüştür. YSA modelinin eğitimi için kullanılan veri setindeki giriş parametrelerinin değişim aralıkları, $1 \leq \varepsilon_1 \leq 21$, $1 \leq \varepsilon_2 \leq 13$, $0.1 \leq S/d \leq 0.9$, $200 \mu\text{m} \leq h_1 \leq 1270 \mu\text{m}$, $600 \mu\text{m} \leq h_2 \leq 1270 \mu\text{m}$ ve $100 \mu\text{m} \leq d \leq 2100 \mu\text{m}$, h_1/h_2 ve d/h_1 oranları içinse sırasıyla $1/3 \leq h_1/h_2 \leq 6.35$ ve $0.1 \leq d/h_1 \leq 10.5$ arasında değişen değerler için belirlenmiştir. Test için ise eğitim setinden farklı olarak oluşturulmuş bir veri seti kullanılmıştır. Kullanılan YSA modeli $7 \times 7 \times 12 \times 2$ şeklinde düzlenmiş bir ÇKP YSA yapısıdır. Yani giriş ve ilk ara katmanda 7'şer nöron, ikinci ara katmanda 12 nöron ve çıkışta da 2 nöron olmak üzere toplam 30 nörondan oluşan modeldir. Transfer fonksiyonu olarak ta ilk ara katmanda tanjant sigmoid, diğer ara katmanlarda logaritmik sigmoid ve çıkış katmanında ise lineer eşik fonksiyonu kullanılmıştır. YSA'yı eğitme işlemine, belirlenen bir iterasyon sayısına veya belirlenen bir hata kriterine ulaşıldığında son verilmiştir. Değerlendirme kriteri olarak ta daha iyi bir karşılaştırma yapabilmek için ortalama mutlak hata değerleri ve RMS hatalar kullanılmıştır. YSA modelinin eğitimi dört farklı öğrenme algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunlar; LM, BD, QN ve BP algoritmalarıdır. Tablo 5.7'de bu öğrenme algoritmalarının eğitim ve test işlemleri için RMS hata sonuçları karşılaştırılarak performansları değerlendirilmiştir. Buna göre en iyi performansı LM algoritması, en kötü performansı ise BP algoritması sergilemişlerdir.

Tablo 5.7. Alt korumalı SCPW'ler için sunulan YSA modelinde
algoritma performansları

Öğrenme Algoritmaları	Eğitim RMS Hataları		Test RMS Hataları	
	ε_{eff}	$Z_0 (\Omega)$	ε_{eff}	$Z_0 (\Omega)$
LM	0.0558	0.0170	0.0097	0.0452
BD	0.0207	0.0264	0.0490	0.0013
QN	1.4920	4.0687	2.6206	2.0715
BP	91.5040	38.1405	37.2913	19.2845

Sunulan bu YSA modeli, Şekil 5.13’de görülmekte olan grafiklerde farklı geometrik boyutlara sahip dört CPW yapısı için test edilmiştir. Sonuç olarak sunulan YSA modellerinden LM ile eğitimi gerçekleştirilen modelden elde edilen sonuçların, CMT [65] sonuçları ile iyi bir uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir.

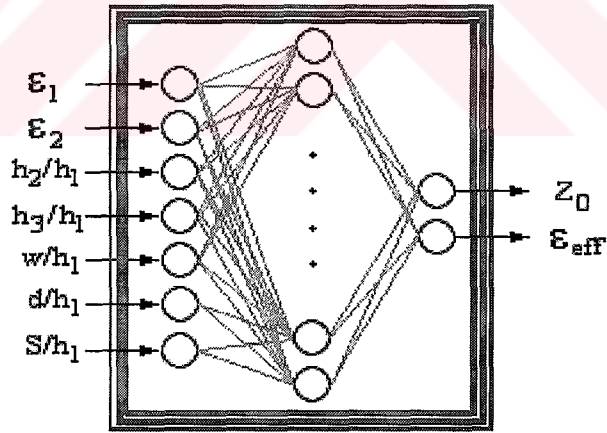
a) ϵ_{eff} b) Z_0 (Ω)

— CMT	x YSA	Alt Korumalı SCPW için
--- CMT	□ YSA	Alt Korumalı CPW için
--- CMT	Δ YSA	CBCPW için
--- CMT	◇ YSA	CBSCPW için

Şekil 5.13. Alt korumalı SCPW’ler için sunulan YSA modelinden elde edilen sonuçların CMT sonuçları ile karşılaştırılması

5.8 Üst Korumalı SCPW'ler için Sunulan YSA Modeli

Şekil 2.8'de kesit görünümü verilmiş olan üst korumalı SCPW'ler de ϵ_1 alt katmanın bağıl dielektrik sabitini, ϵ_2 üst katmanın bağıl dielektrik sabitini, w 'lar yarı genişliklerini, $S=2a$ merkez iletken genişliğini, $2b$ yarıklar ve merkez iletken genişlikleri toplamını, h_1 alt dielektrik tabanın kalınlığını, h_2 üst dielektrik tabanın kalınlığını, h_3 üst korumanın iletim elemanlarına olan uzaklığını ve t ise metal şerit kalınlıklarını göstermektedir. Üst korumalı SCPW'lerin karakteristik parametrelerinin YSA ile belirlenmesi için oluşturulan model yedi giriş ve iki çıkıştan oluşmaktadır. Bu model, Şekil 5.14'de görülmektedir. YSA modeline tasarımda kullanılacak olan taban malzemelerinin bağıl dielektrik sabitleri ϵ_1 , ϵ_2 ve yapının geometrik boyutları ile ilgili parametreler olan h_2/h_1 , h_3/h_1 , w/h_1 , d/h_1 ile S/h_1 giriş olarak uygulanırken yapının efektif dielektrik sabiti ϵ_{eff} ve karakteristik empedansı Z_0 çıkış olarak uygulanmıştır. Sunulan bu model kullanılarak, ϵ_2 1'e eşit seçilmesiyle, üst korumalı CPW'lerin analizleri de gerçekleştirilebilir.



Şekil 5.14. Üst korumalı SCPW'ler için sunulan YSA modeli

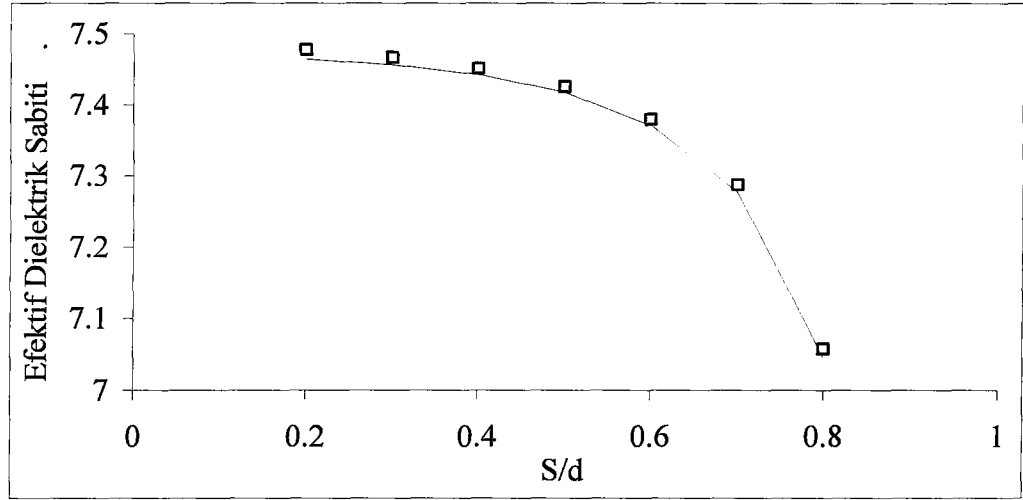
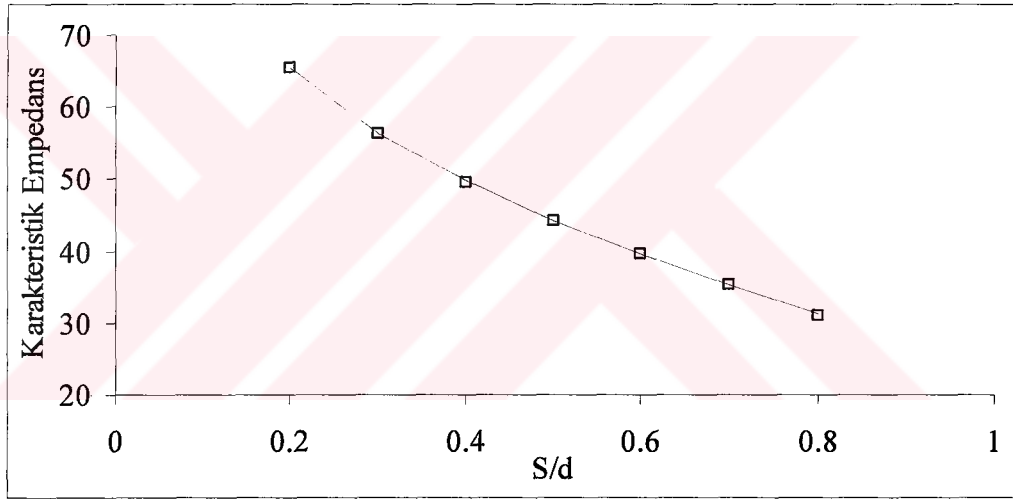
Üst Korumalı SCPW'ler için sunulan YSA modelinin eğitimi için 2000 adet veriden oluşan bir eğitim seti, test işlemi içinse 1344 adet veriden oluşan bir test veri seti kullanılmıştır. Eğitim setindeki giriş parametreleri $2 \leq \epsilon_1 \leq 14$, $1 \leq \epsilon_2 \leq 15$, $0.1 \leq S/d \leq 0.9$, $600 \mu\text{m} \leq h_1 \leq 800 \mu\text{m}$, $800 \mu\text{m} \leq h_2 \leq 1000 \mu\text{m}$ ve $10 \mu\text{m} \leq w \leq 90 \mu\text{m}$ arasında değişen değerler için belirlenmiştir. Kullanılan YSA modeli $7 \times 7 \times 12 \times 2$ şeklinde düzlenmiş bir ÇKP YSA

yapısıdır. Yani giriş ve ilk ara katmanda 7'şer nöron, ikinci ara katmanda 12 nöron ve çıkışta da 2 nöron olmak üzere toplam 28 nörondan oluşan modeldir. Transfer fonksiyonu olarak ta ara katmanlarda tanjant sigmoid ve çıkış katmanında ise lineer eşik fonksiyonu tercih edilmiştir. YSA'yı eğitime işlemine, yine belirlenen bir iterasyon sayısına veya belirlenen bir hata kriterine ulaşıldığında son verilmiştir. Değerlendirme kriteri olarak RMS hatalar kullanılmıştır. YSA modelinin eğitimi beş farklı öğrenme algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunlar; LM, BD, BP, BPR ve QN algoritmalarıdır. Tablo 5.8'de bu öğrenme algoritmalarının eğitim ve test işlemleri için RMS hata sonuçları karşılaştırılarak performansları değerlendirilmiştir. Buna göre en iyi performansı LM algoritması, en kötü performansı ise QN algoritması sergilemişlerdir.

Tablo 5.8. Üst korumalı SCPW'ler için sunulan YSA modelinde algoritma performansları

Öğrenme Algoritmaları	Eğitim RMS Hataları		Test RMS Hataları	
	ϵ_{eff}	$Z_0 (\Omega)$	ϵ_{eff}	$Z_0 (\Omega)$
LM	0.1511	0.0154	0.0129	0.0809
BD	0.2589	0.0431	0.1125	0.0022
BP	0.1076	2.1611	2.6369	2.6167
BPR	0.4344	0.6479	5.9598	5.6341
QN	3.6104	0.2816	2.2231	1.9884

Şekil 5.15'de görülmekte olan grafiklerde üst korumalı SCPW'ler için sunulan YSA modeli sonuçları CMT [65] ile elde edilen sonuçlarla test edilmiştir. Bu grafiklerde, $\epsilon_1=11$, $\epsilon_2=4$, $h_1=h_2=600\mu\text{m}$, $h_3=750\mu\text{m}$ ve $w=60\mu\text{m}$ için türetilen üst korumalı SCPW yapısına ait efektif dielektrik sabiti ve karakteristik empedans sonuçları verilmiştir. Sonuç olarak sunulan YSA modellerinden LM ile eğitimi gerçekleştirilen modelden elde edilen sonuçların, literatürde mevcut CMT [65] sonuçları ile iyi bir uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle sunulan YSA modeli, klasik tekniklere alternatif yeni bir yaklaşım olarak önerilebilir [173].

a) ϵ_{eff} b) $Z_0(\Omega)$

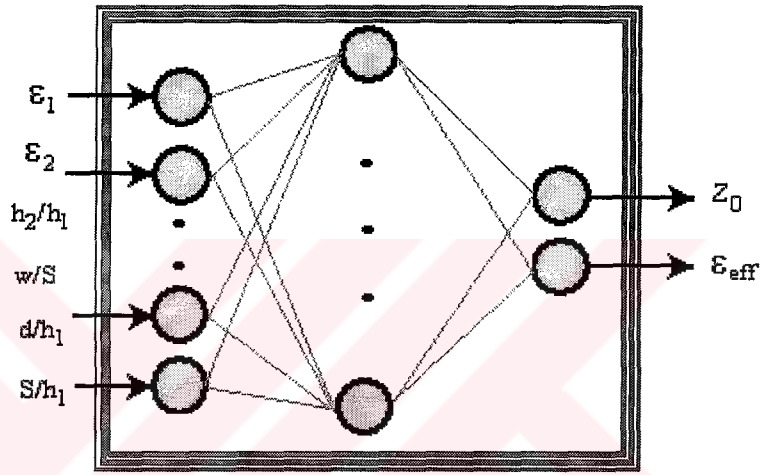
— CMT □ YSA

Şekil 5.15. Üst korumalı SCPW'ler için sunulan YSA modeli sonuçlarının CMT sonuçları ile karşılaştırılması

5.9 İletken Destekli SCPW'ler için Sunulan YSA Modeli

Şekil 2.10'da kesit görünümü verilmiş olan iletken destekli SCPW (CBSCPW)'ler de ϵ_1 alt katmanın bağıl dielektrik sabitini, ϵ_2 üst katmanın bağıl dielektrik sabitini, w 'lar yarınc genişliklerini, $S=2a$ merkez iletken genişliğini, d yarınc ve merkez iletken genişlikleri toplamını, h_1 alt dielektrik tabanın kalınlığını ve alt korumanın iletim elemanlarına olan uzaklığını, h_2 üst dielektrik tabanın kalınlığını ve t ise metal şerit kalınlıklarını göstermektedir. CBSCPW'lerin karakteristik parametrelerinin YSA ile

belirlenmesi için oluşturulan model altı giriş ve iki çıkıştan oluşmaktadır. Bu model, Şekil 5.16'da görülmektedir. YSA modeline tasarımda kullanılacak olan taban malzemelerinin bağıl dielektrik sabitleri ϵ_1 , ϵ_2 ve yapının geometrik boyutları ile ilgili parametreler olan h_2/h_1 , w/S , d/h_1 ile S/h_1 giriş olarak uygulanırken yapının efektif dielektrik sabiti ϵ_{eff} ve karakteristik empedansı Z_0 çıkış olarak uygulanmıştır. Sunulan bu model, ϵ_2 1'e eşit seçilmesiyle, CBCPW'lerin analizleri için de kullanılabilir.



Şekil 5.16. CBCPW'ler için sunulan YSA modeli

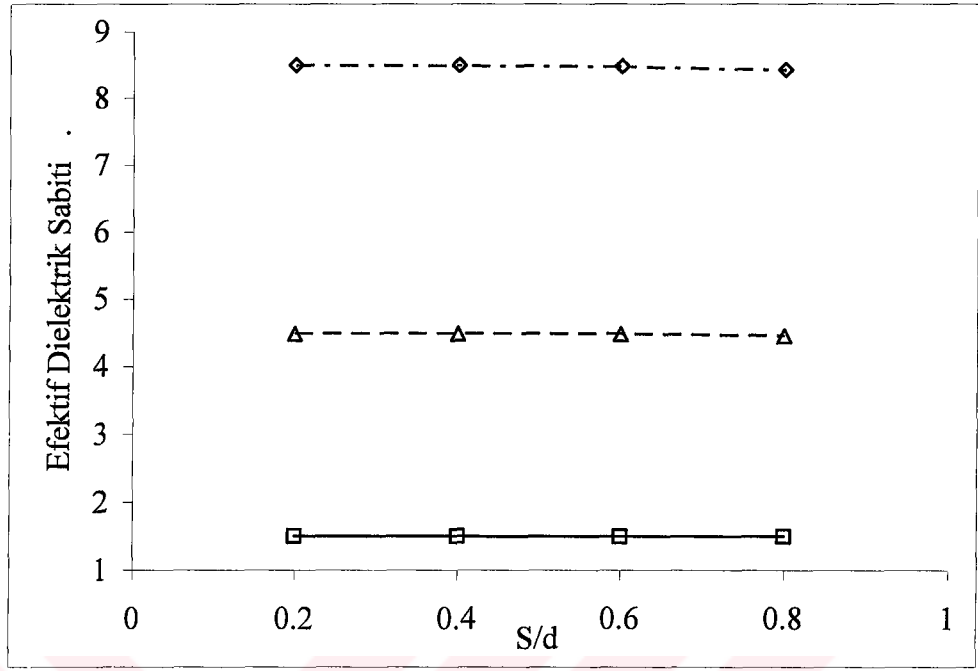
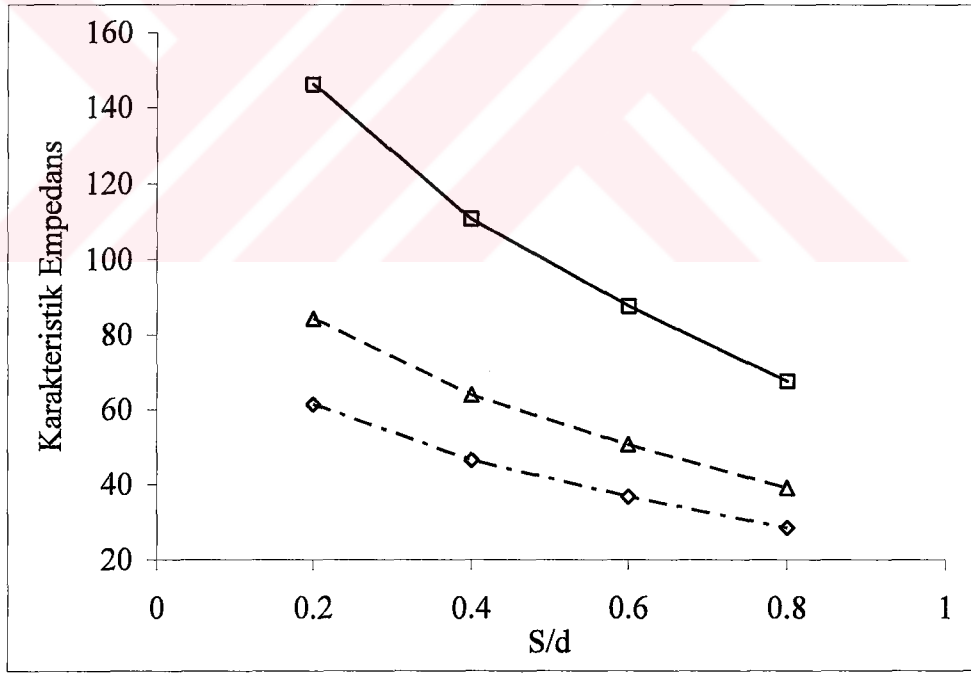
SCBCPW'ler için sunulan YSA modelinin eğitimi için 1620 adet veriden oluşan bir eğitim seti, test işlemi içinse 720 adet veriden oluşan bir test veri seti kullanılmıştır. Eğitim setindeki giriş parametreleri $2 \leq \epsilon_1 \leq 22$, $1 \leq \epsilon_2 \leq 17$, $0.1 \leq S/d \leq 0.9$, $600 \mu\text{m} \leq h_1 = h_2 = h_3 \leq 1000 \mu\text{m}$ ve $10 \mu\text{m} \leq w \leq 90 \mu\text{m}$ arasında değişen değerler için belirlenmiştir. Kullanılan YSA modeli $6 \times 6 \times 12 \times 2$ şeklinde düzlenmiş bir ÇKP YSA yapısıdır. Yani giriş ve ilk ara katmanda 6'şar nöron, ikinci ara katmanda 12 nöron ve çıkışta ise 2 nöron olmak üzere toplam 26 nörondan oluşan modeldir. Transfer fonksiyonu olarak ara katmanlarda tanjant sigmoid ve çıkış katmanında lineer eşik fonksiyonu tercih edilmiştir. YSA'yı eğitme işlemine, yine belirlenen bir iterasyon sayısına veya belirlenen bir hata kriterine ulaşıldığında son verilmiştir. Değerlendirme kriteri olarak RMS hatalar kullanılmıştır. YSA modelinin eğitimi beş farklı algoritma kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunlar; LM, BD, QN, CGF ve TAS algoritmalarıdır. Tablo 5.9'da bu öğrenme algoritmalarının eğitim ve test işlemleri için RMS hata sonuçları karşılaştırılarak performansları

değerlendirilmiştir. Buna göre en iyi performansı LM ve BD algoritmaları, en kötü performansı ise CGF ve TAS algoritmaları sergilemişlerdir.

Tablo 5.9. CBSCPW'ler için sunulan YSA modelinde algoritma performansları

Öğrenme Algoritmaları	Eğitim RMS Hataları		Test RMS Hataları	
	ϵ_{eff}	$Z_0 (\Omega)$	ϵ_{eff}	$Z_0 (\Omega)$
LM	0.0510	0.0195	0.1342	$8.0431 \cdot 10^{-4}$
BD	0.0305	0.0149	0.0258	0.0063
QN	4.0530	1.8586	1.4032	0.3500
CGF	20.2096	3.7316	4.0978	1.8342
TAS	98.5958	25.9070	16.3919	7.7525

Şekil 5.17'de görülmekte olan grafiklerde CBSCPW'ler için sunulan YSA modeli sonuçları CMT [65] ile elde edilen sonuçlarla test edilmiştir. Bu grafiklerin tamamında iletim hatlarındaki yarıklık genişlikleri $w=20\mu m$ olarak seçilmiştir. Şekilde CPW₁ olarak gösterilen yapı $\epsilon_1=2$ ve geometrik boyutları $h_1=h_3=600\mu m$ olan CBCPW'leri, CPW₂ olarak gösterilen yapı $\epsilon_1=2$, $\epsilon_2=7$ ve geometrik boyutları $h_1=h_3=600\mu m$, $h_2=650\mu m$ olan CBSCPW'leri, CPW₃ olarak gösterilen yapı ise $\epsilon_1=10$, $\epsilon_2=7$ ve geometrik boyutları $h_1=h_3=600\mu m$, $h_2=650\mu m$ olan CBSCPW'leri temsil etmektedir.

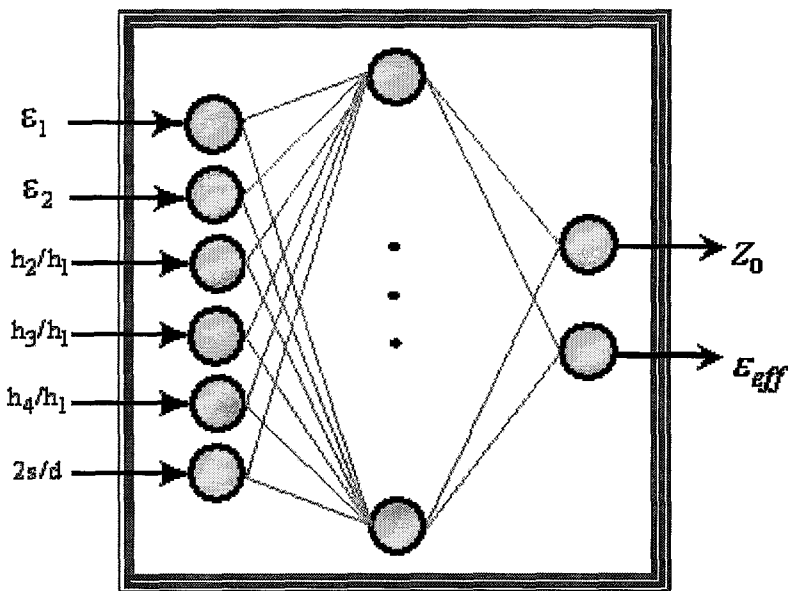
a) ϵ_{eff} b) $Z_0(\Omega)$

— CMT	□ YSA	CPW ₁
--- CMT	Δ YSA	CPW ₂
--- CMT	◇ YSA	CPW ₃

Şekil 5.17. CBSCPW'ler için sunulan YSA modeli sonuçlarının CMT sonuçları ile karşılaştırılması

5.10 Alt ve Üst Korumalı SCPW'ler için Sunulan YSA Modeli

Şekil 2.10'da kesit görünümü verilmiş olan iletken destekli SCPW'ler de ϵ_1 alt katmanın bağıl dielektrik sabitini, ϵ_2 üst katmanın bağıl dielektrik sabitini, g 'ler yarık genişliklerini, $2s$ merkez iletken genişliğini, d yarıklar ve merkez iletken genişlikleri toplamını, h_1 alt dielektrik tabanın kalınlığını, h_2 üst dielektrik tabanın kalınlığını, h_3 alt korumanın ve h_4 ise alt korumanın iletim elemanlarına olan uzaklığını ve t ise metal şerit kalınlıklarını göstermektedir. Alt ve üst korumalı SCPW'ler, iletken korumalarla dielektrik tabanlar arasındaki hava ile dolu olan bölgelerin de birer katman olarak kabul edilmesiyle çok katmanlı iletken korumalı CPW'ler olarak ta adlandırılmaktadır [65]. Alt ve üst korumalı SCPW'lerin karakteristik parametrelerinin YSA ile belirlenmesi için oluşturulan model altı giriş ve iki çıkıştan oluşmaktadır. Bu model, Şekil 5.18'de görülmektedir. YSA modeline tasarımda kullanılacak olan taban malzemelerinin bağıl dielektrik sabitleri ϵ_1 , ϵ_2 ve yapının geometrik boyutları ile ilgili parametreler olan h_2/h_1 , h_3/h_1 , h_4/h_1 ve $2s/d$ giriş olarak uygulanırken yapının efektif dielektrik sabiti ϵ_{eff} ve karakteristik empedansı Z_0 çıkış olarak uygulanmıştır. Bu modelde uygun geometrik boyutların giriş olarak uygulanması ile yine farklı CPW yapılarının analizleri gerçekleştirilebilmektedir. Bu alternatif yapılar, üst korumalı CBCPW'ler, alt ve üst korumalı CPW'ler ve CBSCPW'lerdir.



Şekil 5.18. Alt ve üst korumalı SCPW'ler için sunulan YSA modeli

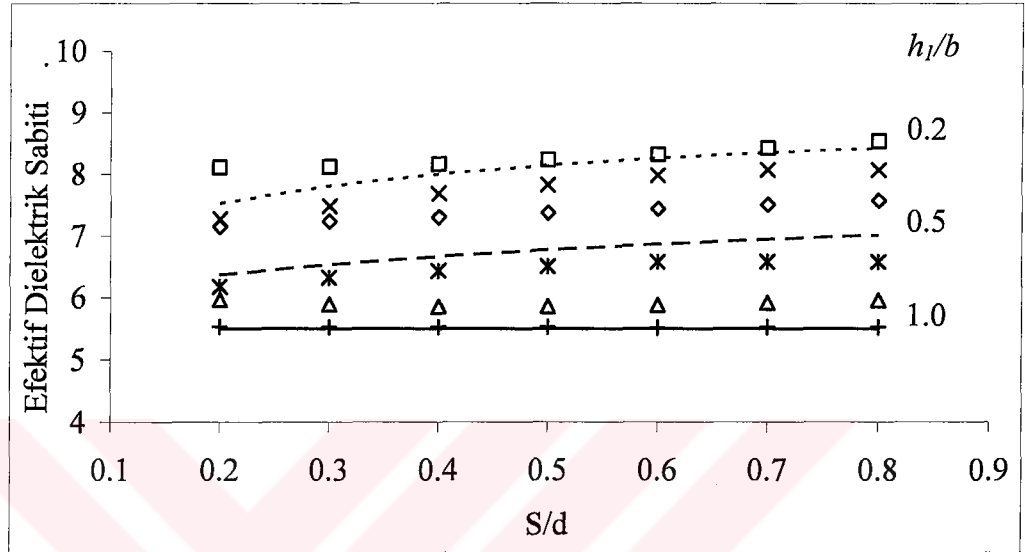
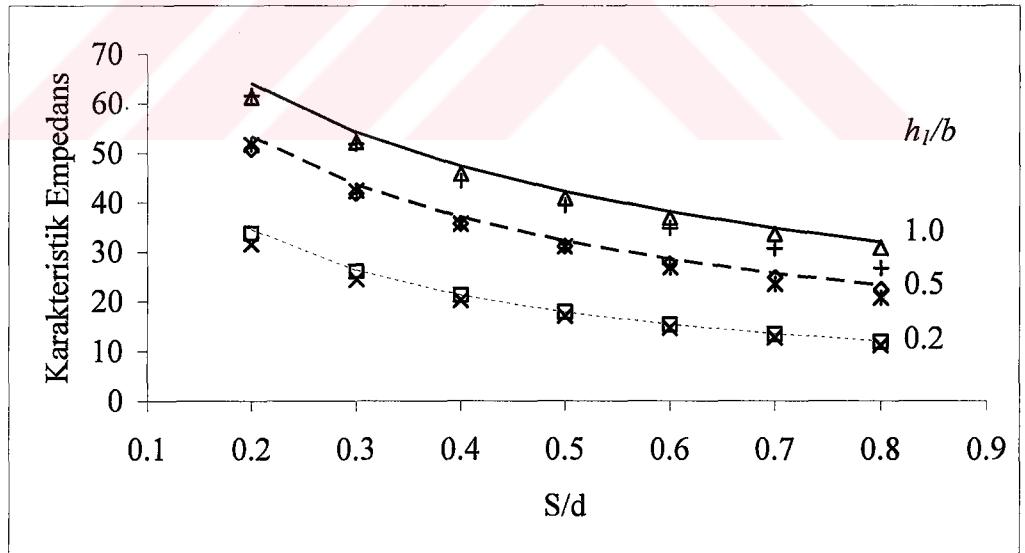
Alt ve üst korumalı SCPW'ler için sunulan YSA modelinin eğitimi için 3240 adet veriden oluşan bir eğitim seti, test işlemi içinse 252 adet veriden oluşan bir test veri seti kullanılmıştır. Eğitim setindeki giriş parametreleri $2 \leq \varepsilon_1 \leq 14$, $1 \leq \varepsilon_2 \leq 10$, $0.1 \leq S/d \leq 0.9$, $0.1 \leq h_1/b \leq 1.0$, $1 \leq h_1/h_2 \leq 3$, $1 \leq h_1/h_3 \leq 4$ ve $100 \mu\text{m} \leq b \leq 300 \mu\text{m}$ arasında değişen değerler için belirlenmiştir. Kullanılan YSA modeli $6 \times 6 \times 12 \times 2$ şeklinde düzlenmiş bir ÇKP YSA yapısıdır. Yani giriş ve ilk ara katmanda 6'şar nöron, ikinci ara katmanda 12 nöron ve çıkışta da 2 nöron olmak üzere toplam 26 nörondan oluşan modeldir. Transfer fonksiyonu olarak ara katmanlarda tanjant sigmoid ve çıkış katmanında lineer eşik fonksiyonu kullanılmıştır. YSA'yı eğitime işlemine, yine belirlenen bir iterasyon sayısına veya belirlenen bir hata kriterine ulaşıldığında son verilmiştir. Değerlendirme kriteri olarak RMS hatalar kullanılmıştır. YSA modelinin eğitimi beş farklı öğrenme algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunlar; BD, LM, CGF ve QN algoritmalarıdır. Tablo 5.10'da bu öğrenme algoritmalarının eğitim ve test işlemleri için RMS hata sonuçları karşılaştırılarak performansları değerlendirilmiştir. Buna göre en iyi performansı BD ve LM algoritmaları, en kötü performansı ise QN algoritması sergilemiştir.

Tablo 5.10. Alt ve üst korumalı SCPW'ler için sunulan YSA modelinde algoritma performansları

Öğrenme Algoritmaları	Eğitim RMS Hataları		Test RMS Hataları	
	ε_{eff}	$Z_0 (\Omega)$	ε_{eff}	$Z_0 (\Omega)$
BD	0.1976	0.0672	0.6896	0.2501
LM	0.3284	0.1336	0.5846	0.3674
CGF	15.1451	3.5131	4.1081	5.3520
QN	44.6875	4.6159	2.2371	2.2270

Şekil 5.19'da görülmekte olan grafiklerde üst korumalı CBCPW'ler için burada sunulan ve eğitimi BD algoritması ile gerçekleştirilmiş olan YSA modelinden elde edilen sonuçlar literatürde mevcut frekans bağımlı bir yaklaşım olan FEM [64] ve quasi-statik bir yaklaşım olan CMT [64, 65, 73] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu grafiklerde taban malzemelerinin bağıl dielektrik sabiti $\varepsilon_r=10$ olan, diğer geometrik boyutları ise $b=300 \mu\text{m}$, $h_3=d-h_1$, $h_1/b=0.2$, 0.5 ve 1.0 için karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 5.19.a'dan da görülebileceği gibi bu model sonuçları efektif dielektrik sabitlerinde hata oranı

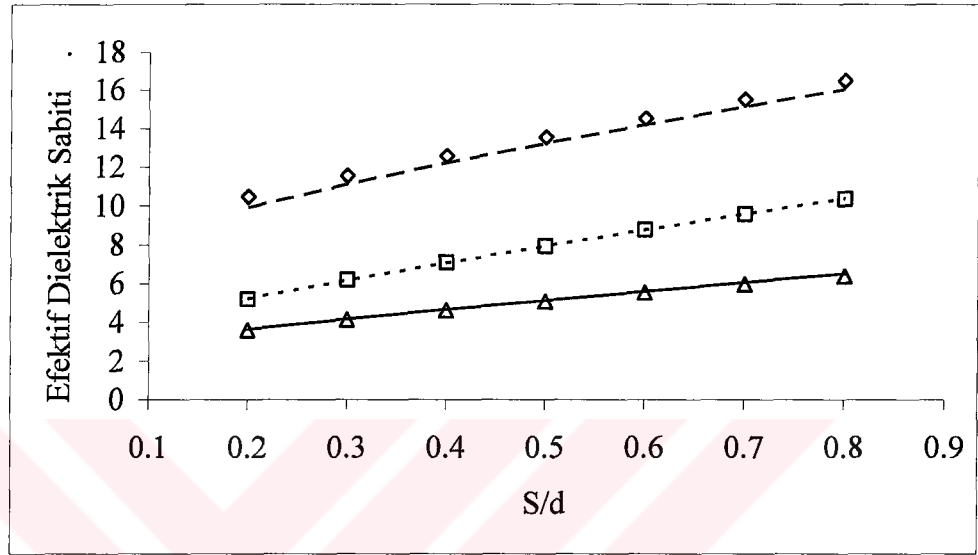
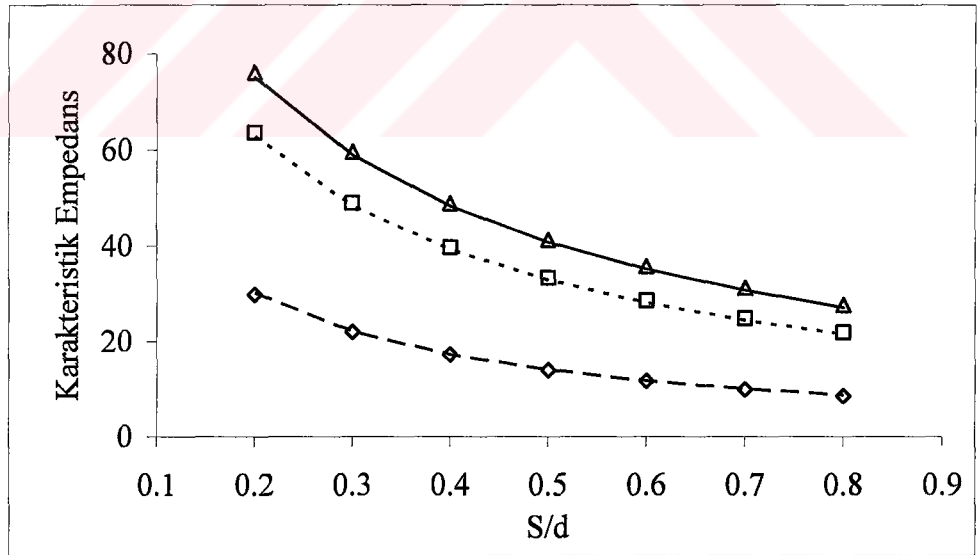
yüksek sonuçlar vermesine karşın karakteristik empedans değerlerinde sonuçlar oldukça iyi bir uyum içerisinde. Efektif dielektrik sabitindeki yüksek hata oranı yalnızca bu yapı için geçerli olabilecek bir YSA modeli ortaya konulmasıyla giderilebilir.

a) ϵ_{eff} b) Z_0 (Ω)

— $h_1/b = 1.0$ için CMT --- $h_1/b = 0.5$ için CMT - - - $h_1/b = 0.2$ için CMT
 + $h_1/b = 1.0$ için FEM ж $h_1/b = 0.5$ için FEM x $h_1/b = 0.2$ için FEM
 Δ $h_1/b = 1.0$ için YSA ◇ $h_1/b = 0.5$ için YSA □ $h_1/b = 0.2$ için YSA

Şekil 5.19. Alt ve üst korumalı SCPW'ler için sunulan YSA modelinden üst korumalı CBCPW'ler için elde edilen sonuçların FEM ve CMT sonuçları ile karşılaştırılması

Şekil 5.20’de ise yine sunulan modelin kullanılması ile analizleri gerçekleştirilebilecek olan diğer alternatif yapılara ilişkin karakteristik parametre sonuçlarının CMT [64, 65, 73] sonuçları ile karşılaştırılması yer almaktadır.

a) ϵ_{eff} b) $Z_0 (\Omega)$

— CPW₁ için CMT - - - CPW₂ için CMT - - - CPW₃ için CMT
 Δ CPW₁ için YSA $\square$ CPW₂ için YSA $\diamond$ CPW₃ için YSA

Şekil 5.20. Alt ve üst korumalı SCPW’ler için sunulan YSA modelinden farklı geometrik boyutlardaki CPW’ler için elde edilen sonuçların CMT sonuçları ile karşılaştırılması

Bu şekilde CPW_1 olarak verilen iletim hattı konfigürasyonu alt ve üst korumalı CPW 'leri, CPW_2 olarak verilen alt ve üst korumalı $SCPW$ 'leri, CPW_3 olarak verilen yapı ise $CBSCPW$ 'leri göstermektedir. Sonuç olarak sunulan YSA modellerinden BD ile eğitimi gerçekleştirilen modelden elde edilen sonuçların, FEM [64] ve CMT [64, 65, 73] sonuçları ile iyi bir uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle sunulan YSA modeli klasik tekniklere alternatif yeni bir yaklaşım olarak önerilebilecek düzeydeki bir hata oranına sahip olduğu söylenebilir.



BÖLÜM 6

SİLİNDİRİK İLETİM HATLARININ YSA İLE MODELLENMESİ

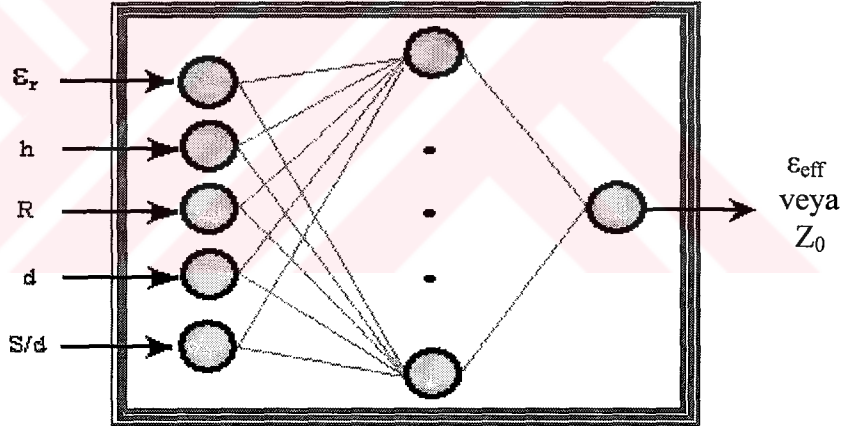
6.1 Giriş

Silindirik tabanlı eş düzlemli dalga kılavuzlarının, antenler, sensörler ve kablosuz haberleşmede yaygın şekilde kullanımı bu tür yapılara olan ilgiyi artırmıştır ve son zamanlarda bir çok araştırmacı tarafından analizleri gerçekleştirilmiştir [15, 35, 40, 67, 68, 134]. Bu bölümde YSA'nın sunduğu cazip avantajlardan faydalanılarak literatürdeki mevcut yaklaşımların dezavantajlarının aşılması ve/veya bu metotlara alternatif bir yaklaşım olması açısından silindirik iletim hatları için gerçekleştirilen modeller sunulacaktır. İlk olarak tek katmanlı silindirik simetrik yapılara ait model ve bu modele ait tablo ve grafikler verilecektir. Ardından da Bölüm 3'te verilen silindirik geometrideki diğer yapılara ait modeller ve bu modellerden elde edilen sonuçlara ait grafikler incelenecek ve YSA modelleri oluşturulurken kullanılan öğrenme algoritmalarının performanslarının yer aldığı tablolara yer verilecektir.

6.2 Tek Katmanlı Simetrik Silindirik CPW'ler için Sunulan YSA Modeli

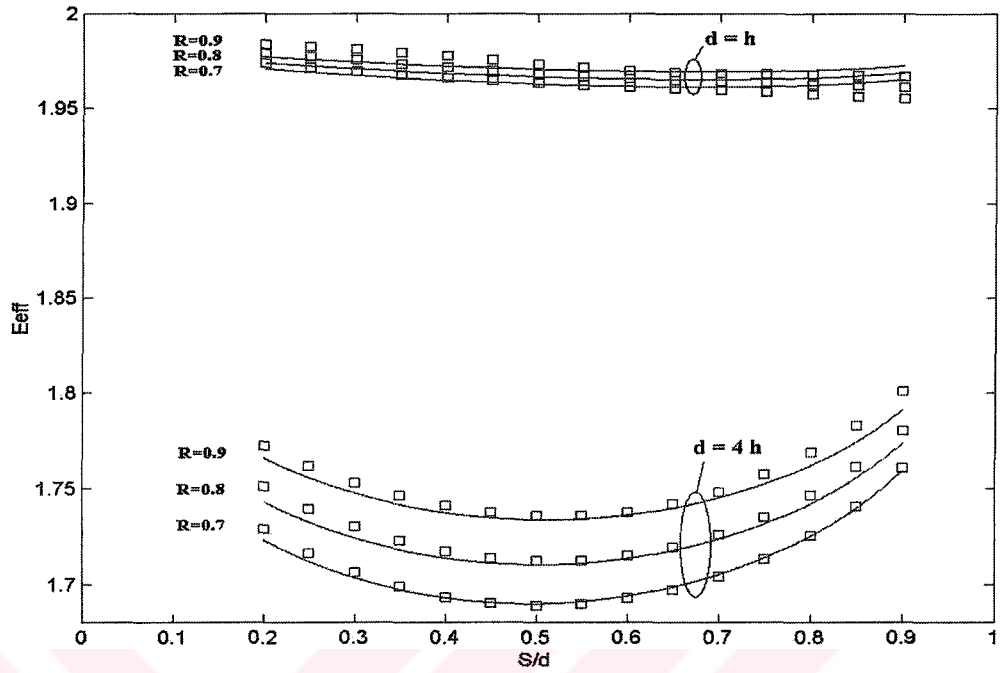
Şekil 3.1'de kesit görünümü verilmiş olan iletim elemanları silindirik dielektrik tabanın dış yüzeyine yerleştirilmiş tek katmanlı simetrik CCPW'ler de ϵ_r dielektrik katmanın bağıl dielektrik sabitini, w yarı genişliklerini, S merkez iletken genişliğini, b dielektrik tabakanın dış yarıçapını, ve a ise dielektrik tabakanın iç yarıçapını göstermektedir. YSA ile oluşturulan model giriş katı, iki ara kat ve bir çıkış katından oluşan ÇKP YSA yapısı kullanılmıştır. Tek katmanlı simetrik CCPW'lerin hem efektif dielektrik sabiti, hem de karakteristik empedansı YSA ile ayrı ayrı modellenmiş ve her bir model 5 giriş ve 1 çıkıştan oluşmuştur. YSA modeline, tasarımda kullanılacak olan malzemenin bağıl dielektrik sabiti ϵ_r ve yapının geometrik boyutları giriş olarak uygulanmıştır. Söz edilen geometrik boyutlar; dielektrik tabanın kalınlığı h , eğrilik yarıçapı $R=a/b$, yarık

genişlikleri ve merkez iletkenin genişliği toplamı d , ve S/d terimleridir. YSA'nın eğitim aralığı belirlenirken ϵ_r için 2.1'den 2 artım değeri ile 11.1'e kadar olan değerler, S/d için 0.15 ila 0.95 aralığında 0.1 artım aralığı ile, R eğrilik yarıçapı için yine 0.1 artım aralığı ile 0.75 ila 0.95 arası değerler, d için $0.75h$ artım aralığı ile $0.75h$ 'tan $5.25h$ 'a kadar, h içinse 1mm ile 10mm arasında 1mm'lik artım aralığındaki değerler kullanılmıştır. Test işleminde ise $\epsilon_r=3$, $h=1524\mu\text{m}$, $d=h$, $4h$ ve $R=0.7$, 0.8 ve 0.9 için karşılaştırma yapılmıştır. YSA ile oluşturulan her bir modelde 5'er nöron giriş ve ilk ara katmanda, 10 nöron ikinci ara katmanda ve 1 nöronda çıkış katmanında olmak üzere toplam 21 nörondan oluşan bir yapı meydana getirilmiştir. Bu yapı Şekil 6.1'de görülmektedir. Modelin eğitimi için 15120 adet veriden oluşan bir eğitim seti seçilerek, daha geniş bir spektrum da analiz yapılmaya çalışılmıştır. Test sırasında ise 1278 adet veriden oluşan bir test seti kullanılmıştır.

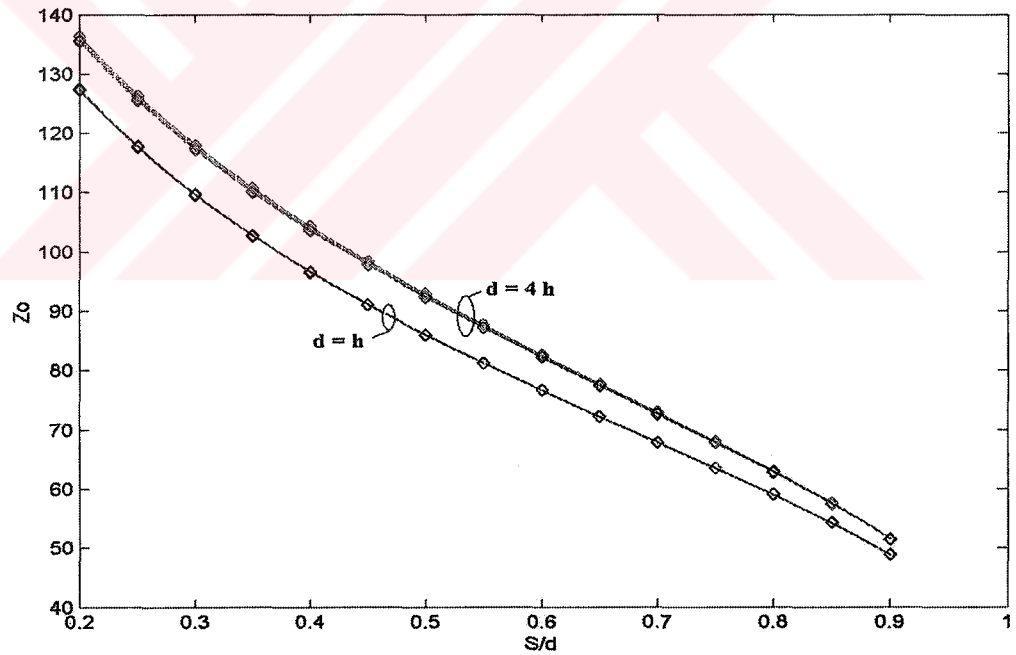


Şekil 6.1. Tek katmanlı simetrik CCPW'ler için sunulan YSA modeli

YSA modelinin eğitim sonucundaki hata değeri 4.569×10^{-5} , test sonucundaki değeri ise 1.987×10^{-5} olarak tespit edilmiştir. Efektif dielektrik sabiti için uygulanan yöntem Z_0 karakteristik empedansı içinde uygulanarak eğitim ve test hataları sırası ile $9.93 \times 10^{-6} \Omega$ ve $6.86 \times 10^{-6} \Omega$ olarak elde edilmiştir. Efektif dielektrik sabiti ve karakteristik empedans için YSA modeli ile elde edilen sonuçların CMT [40, 72] ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığı grafikler Şekil 6.2'de verilmiştir. Bu sonuçlardan, YSA'ların klasik yaklaşımlara göre alternatif yeni bir yaklaşım olduğu görülmüştür [174].



a) Efektif dielektrik sabiti ϵ_{eff} , $\square$ YSA, -.- CMT



b) Karakteristik empedans Z_0 , $\diamond$ YSA, -.- CMT

Şekil 6.2. Tek katmanlı simetrik CCPW'ler için sunulan YSA modelinden elde edilen sonuçların CMT sonuçları ile karşılaştırılması

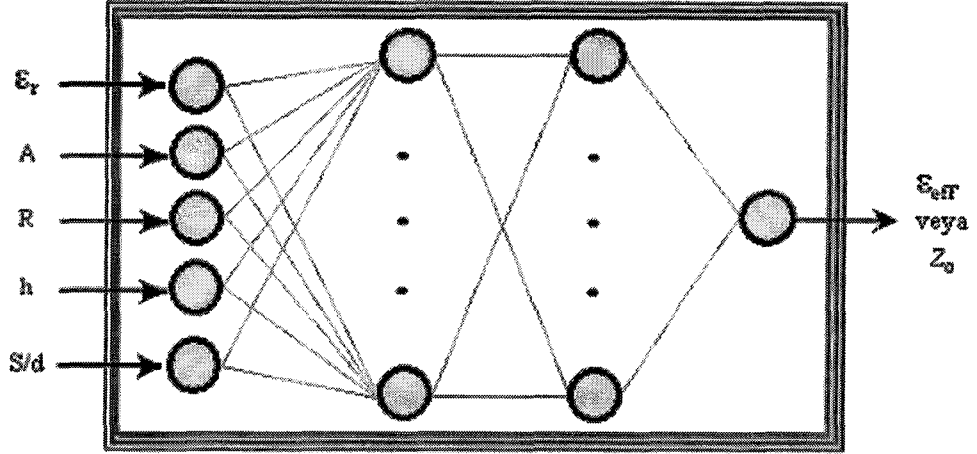
Yukarıdaki karşılaştırmalarda kullanılan CMT sonuçları Su ve Wong [40] tarafından verilen analitik ifadelerden türetilmiş ancak bu ifadelerin S/d oranının 1'e yakın olduğu durumlarda sonuçlarda küçükte olsa bir sapma olduğu gözlenmiş ve bu durum [72]'de

ACCPW'ler için sunulan analitik ifadelerin simetrik yapılar için düzenlenmesi ile ortadan kaldırılmıştır.

6.3 Asimetrik Silindirik CPW'ler için Sunulan YSA Modeli

Şekil 3.4'de kesit görünümü verilen ACCPW'lerde Bu şekilde a ve b dielektrik katmanın sırasıyla iç ve dış yarıçaplarını göstermektedir. h dielektrik katmanın kalınlığını, ϵ_r ise taban malzemenin dielektrik sabitini temsil etmektedir. Aynı şekilde merkez iletken genişliği, düzlemde $\phi=0^\circ$ 'ye yerleştirilmiş olan S ile, yarık genişlikleri w_1 ve w_2 ile ve iki toprak düzlemi arasındaki açıklık ise d ile gösterilmektedir ve toprak düzlemleri $\phi_1-\phi_3$ ve $\phi_2-\phi_4$ arasına konumlandırılmıştır. YSA ile oluşturulan model giriş katı, üç ara kat ve bir çıkış katından oluşan ÇKP-YSA yapısı kullanılmıştır. ACCPW'lerin hem efektif dielektrik sabiti, hem de karakteristik empedansı YSA ile ayrı ayrı modellenmiştir. Sunulan bu model Şekil 6.3'te gösterilmektedir. Modele, tasarımda kullanılacak olan malzemenin bağıl dielektrik sabiti ϵ_r , dielektrik taban kalınlığı h , asimetri oranı olarak adlandırılan ve A ile gösterilen yarık genişlikleri oranı w_1/w_2 , R ile gösterilen ve eğrilik yarıçapı olarak adlandırılan a/b ve diğer bir geometrik boyut olan S/d terimleri giriş olarak uygulanmıştır. Çıkış olarak ta yapının efektif dielektrik sabiti ϵ_{eff} ve karakteristik empedansı Z_0 uygulanmıştır.

ACCPW'ler için sunulan YSA modelinin eğitimi için 2184 adet veriden oluşan bir eğitim seti, test işlemi içinse 1708 adet veriden oluşan bir test veri seti kullanılmıştır. Eğitim setindeki giriş parametreleri $3 \leq \epsilon_r \leq 12$, $1 \leq A \leq 19$, $0.7 \leq R \leq 0.9$, $400 \mu m \leq h \leq 700 \mu m$, $0.2 \leq S/d \leq 0.8$ arasında değişen değerler için belirlenmiştir. Şekil 6.3'te görülmekte olan YSA modeli $5 \times 5 \times 10 \times 10 \times 1$ şeklinde düzenlenmiştir. Yani giriş ve ilk ara katmanda 5'er nöron, diğer ara katmanlarda 10'ar nöron, çıkış katmanında ise 1 nöron olmak üzere toplam 31 nöron kullanılmıştır. Transfer fonksiyonu olarak ta ara katmanlarda tanjant sigmoid ve çıkış katmanında ise lineer eşik fonksiyonu kullanılmıştır. YSA'yı eğitme işlemine, yine belirlenen bir iterasyon sayısına veya belirlenen bir hata kriterine ulaşıldığında son verilmiştir. Değerlendirme kriteri olarak RMS hatalar kullanılmıştır.

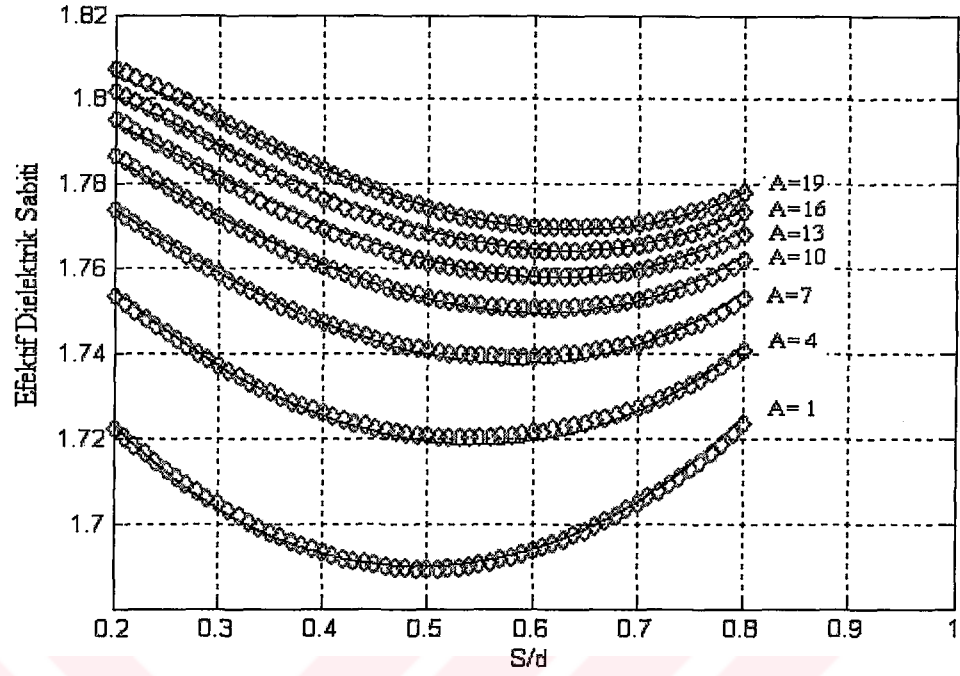


Şekil 6.3. ACCPW'ler için sunulan YSA modeli

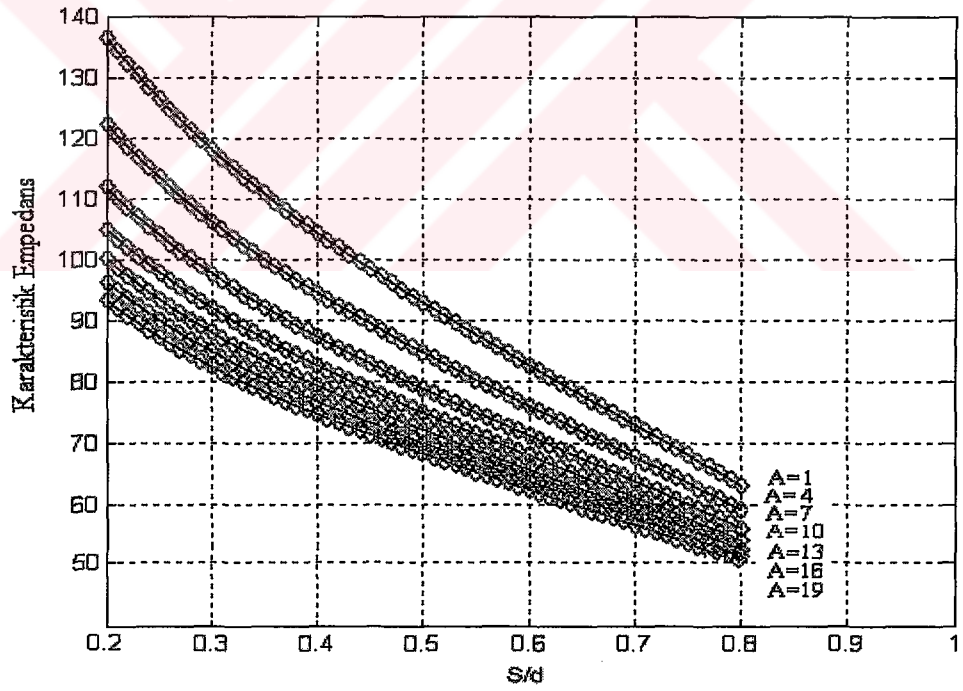
YSA modelinin eğitimi EDBD ve QN öğrenme algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 6.1'de bu öğrenme algoritmalarının eğitim ve test işlemleri için RMS hata sonuçları karşılaştırılarak performansları değerlendirilmiştir. Şekil 6.4'te görülmekte olan grafiklerde ise EDBD algoritması ile eğitimi gerçekleştirilmiş olan YSA modelinden elde edilen sonuçlar literatürde mevcut olan CMT [72] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu grafiklerde taban malzemelerinin bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r=3$ olan, diğer geometrik boyutları ise $h=1524\mu\text{m}$, $d=4h$, $R=0.9$, $\phi_3=\phi_4=\pi$, $A=1, 4, 7, 10, 13, 16$ ve 19 için karşılaştırmalar yapılmıştır. Sonuç olarak sunulan YSA modellerinden EDBD ile eğitimi gerçekleştirilen modelin sonuçlarının CMT [72] sonuçları ile iyi bir uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle sunulan YSA modeli klasik tekniklere alternatif yeni bir yaklaşım olarak önerilebilecek düzeydeki bir hata oranına sahip olduğu söylenebilir [175].

Tablo 6.1. ACCPW'ler için sunulan YSA modelinde algoritma performansları

Öğrenme Algoritmaları	Eğitim RMS Hataları		Test RMS Hataları	
	ϵ_{eff}	$Z_0 (\Omega)$	ϵ_{eff}	$Z_0 (\Omega)$
EDBD	0.00200	0.001600	0.00210	0.0018
QN	0.00036	0.000119	0.00079	0.0013



a) ϵ_{eff} , $\diamond$ YSA, -- CMT

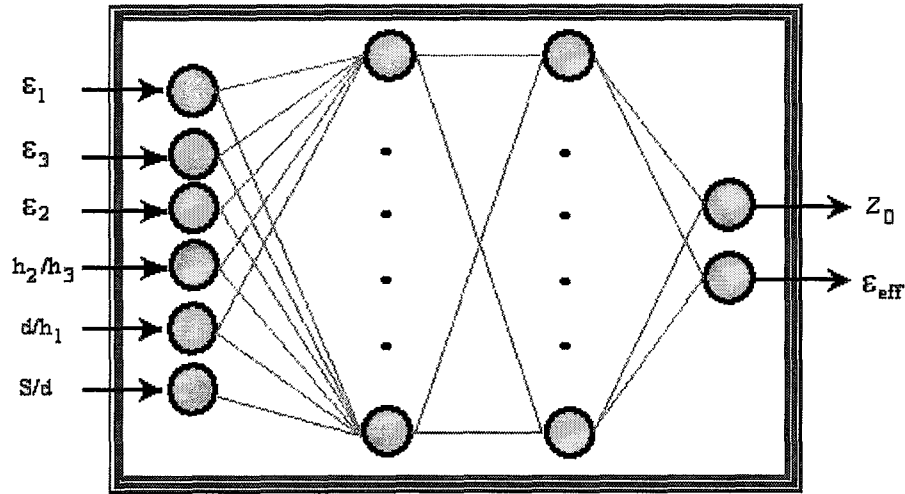


b) Z_0 (Ω), $\diamond$ YSA, -- CMT

Şekil 6.4. ACCPW'ler için sunulan YSA modeli sonuçlarının CMT sonuçları ile karşılaştırılması

6.4 Çok Katmanlı Silindirik CPW'ler için Sunulan YSA Modeli

Şekil 3.7'de kesit görünümü verilmiş olan çok katmanlı silindirik CPW (MCCPW)'ler de ϵ_1 iletim elemanlarının altında yer alan katmanın bağıl dielektrik sabitini, ϵ_2 en iç kısımda yer alan katmanın bağıl dielektrik sabitini, ϵ_3 iletim elemanlarının üstündeki katmanın bağıl dielektrik sabitini, w 'lar yarık genişliklerini, S merkez iletken genişliğini, d yarıklar ve merkez iletken genişlikleri toplamını, h_1 iç ve dış yarıçapları sırasıyla a ve b olan dielektrik tabanın kalınlığını, h_2 iç ve dış yarıçapları sırasıyla c ve a olan dielektrik tabanın kalınlığını, h_3 en üstteki dielektrik tabanın kalınlığını, d ise yine en üstteki dielektrik katmanın dış yarıçapını göstermektedir. MCCPW'ler karakteristik parametrelerinin YSA ile belirlenmesi için oluşturulan model altı giriş ve iki çıkıştan oluşmaktadır. Bu model, Şekil 6.5'de görülmektedir. YSA modeline tasarımda kullanılacak olan taban malzemelerinin bağıl dielektrik sabitleri ϵ_1 , ϵ_2 ve ϵ_3 ile yapının geometrik boyutlarıyla ilgili parametreler olan h_2/h_3 , d/h_1 ve S/d giriş olarak uygulanırken yapının efektif dielektrik sabiti ϵ_{eff} ve karakteristik empedansı Z_0 çıkış olarak uygulanmıştır. Bu YSA modelinde uygun geometrik boyutların giriş olarak uygulanması ile farklı CCPW yapılarının analizleri de gerçekleştirilebilmektedir. Bu alternatif yapılar, tek katmanlı simetrik CCPW'ler ve iki katmanlı CCPW'lerdir.



Şekil 6.5. MCCPW'ler için sunulan YSA modeli

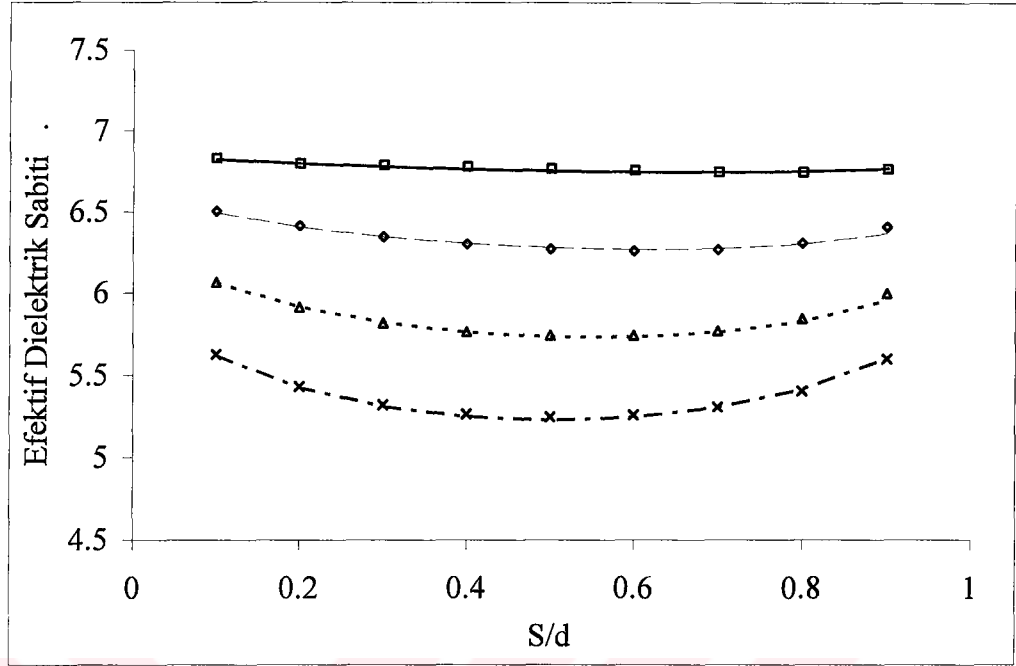
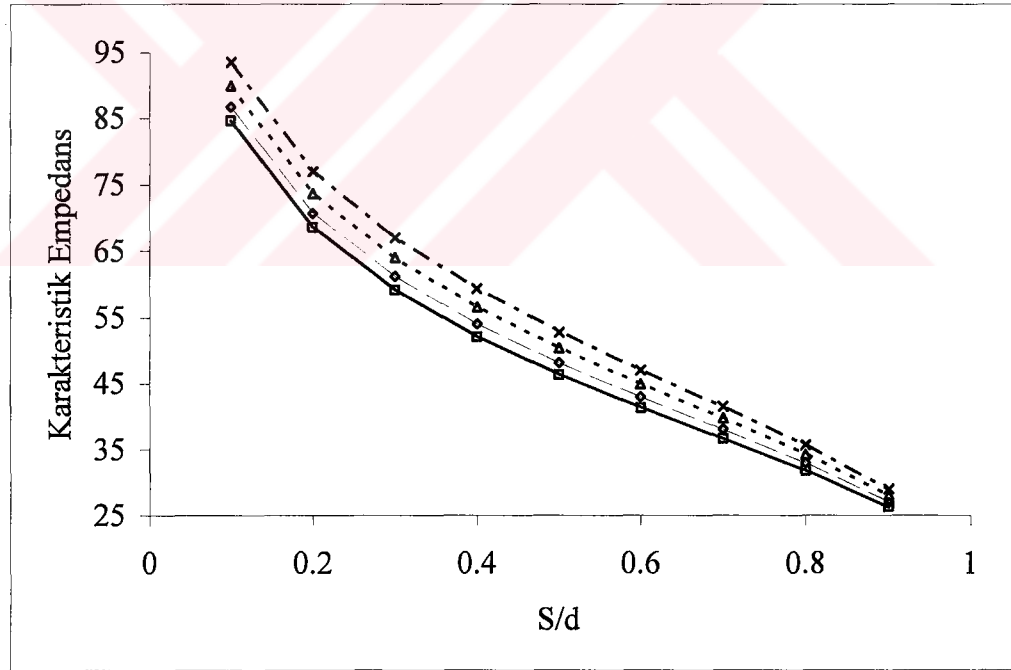
MCCPW'ler için sunulan YSA modelinin eğitimi için 1296 adet veriden oluşan bir eğitim seti, test işlemi içinse 576 adet veriden oluşan bir test veri seti kullanılmıştır. Eğitim setindeki giriş parametreleri $2 \leq \epsilon_1 \leq 14$, $1 \leq \epsilon_2 = \epsilon_3 \leq 10$, $0.1 \leq S/d \leq 0.9$, $1 \leq d/h_1 \leq 4$,

$100\mu\text{m} \leq h_1 \leq 1500\mu\text{m}$, $200\mu\text{m} \leq h_2 \leq 1400\mu\text{m}$, $100\mu\text{m} \leq h_3 \leq 1400\mu\text{m}$ arasında değişen değerler için belirlenmiştir. Sunulan bu modelin tamamında silindirik geometriye sahip iletim hatlarının eğrilik yarıçapı olarak adlandırılan R sabitleri 0.8 olarak alınmıştır. Kullanılan YSA modeli $6 \times 6 \times 10 \times 6 \times 2$ şeklinde düzlenmiş bir ÇKP YSA yapısıdır. Yani giriş katmanında 6 nöron, ilk ara katmanda 6 nöron, ikinci ara katmanda 10 nöron, son ara katmanda 6 nöron ve çıkışta da 2 nöron olmak üzere toplam 30 nörondan oluşan bir modeldir. Transfer fonksiyonu olarak ta ilk ara katmanda tanjant sigmoid, diğer ara katmanlarda logaritmik sigmoid ve çıkış katmanında ise lineer eşik fonksiyonu kullanılmıştır. YSA'yı eğitime işlemine, yine belirlenen bir iterasyon sayısına veya belirlenen bir hata kriterine ulaşıldığında son verilmiştir. Değerlendirme kriteri olarak RMS hatalar kullanılmıştır. YSA modelinin eğitimi beş farklı öğrenme algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunlar; BD, LM, CGF ve QN algoritmalarıdır. Tablo 6.2'de bu öğrenme algoritmalarının eğitim ve test işlemleri için RMS hata sonuçları karşılaştırılarak performansları değerlendirilmiştir. Buna göre en iyi performansı LM ve BD algoritmaları, en kötü performansı ise QN algoritması sergilemiştir.

Tablo 6.2. MCCPW'ler için sunulan YSA modelinde algoritma performansları

Öğrenme Algoritmaları	Eğitim RMS Hataları		Test RMS Hataları	
	ϵ_{eff}	$Z_0 (\Omega)$	ϵ_{eff}	$Z_0 (\Omega)$
LM	0.1409	0.6283	0.0512	0.1103
BD	2.5326	0.5983	0.5763	0.2428
CGF	14.4429	4.2829	1.1506	7.5709
QN	20.2353	117.4026	1.1086	8.1041

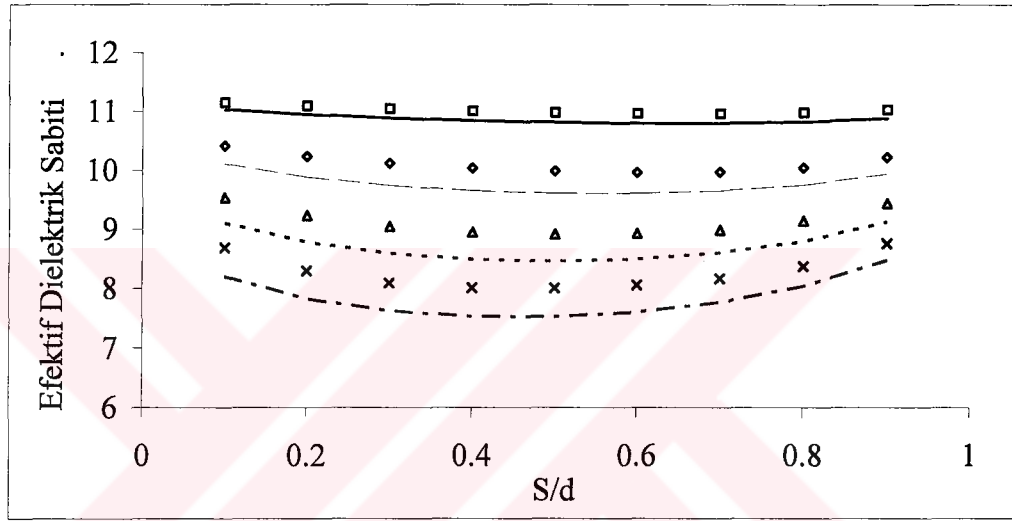
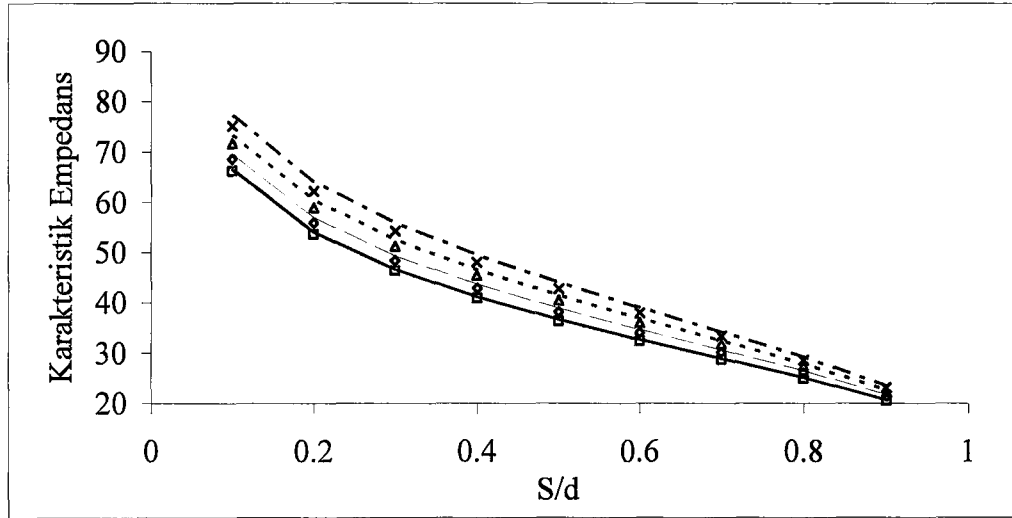
Şekil 6.6'da görülmekte olan grafiklerde eğitimi LM algoritması ile gerçekleştirilmiş olan YSA modelinden tek katmanlı CCPW'ler için elde edilen sonuçlar literatürde mevcut CMT [15, 65] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu grafiklerde taban malzemelerinin bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_1=12.9$, $\epsilon_2=\epsilon_3=1$ olan ve diğer geometrik boyutları ise $h_1=762\mu\text{m}$, $d/h_1=1, 2, 3$ ve 4 olarak seçilen CPW yapısı için karşılaştırmalar yapılmıştır.

a) ϵ_{eff} b) $Z_0 (\Omega)$

— $d/h_1=1$ için, --- $d/h_1=2$ için, - - - $d/h_1=3$ için, - - - $d/h_1=4$ için CMT
 □ $d/h_1=1$ için Δ $d/h_1=2$ için, ◇ $d/h_1=3$ için, x $d/h_1=4$ için YSA

Şekil 6.6. MCCPW'ler için sunulan YSA modelinden tek katmanlı CCPW'ler için elde edilen sonuçların CMT sonuçları ile karşılaştırılması

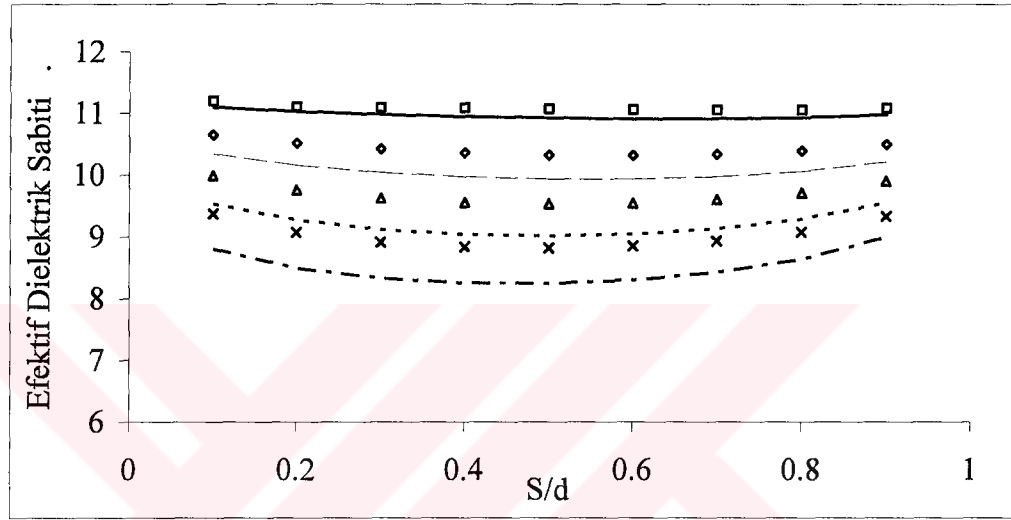
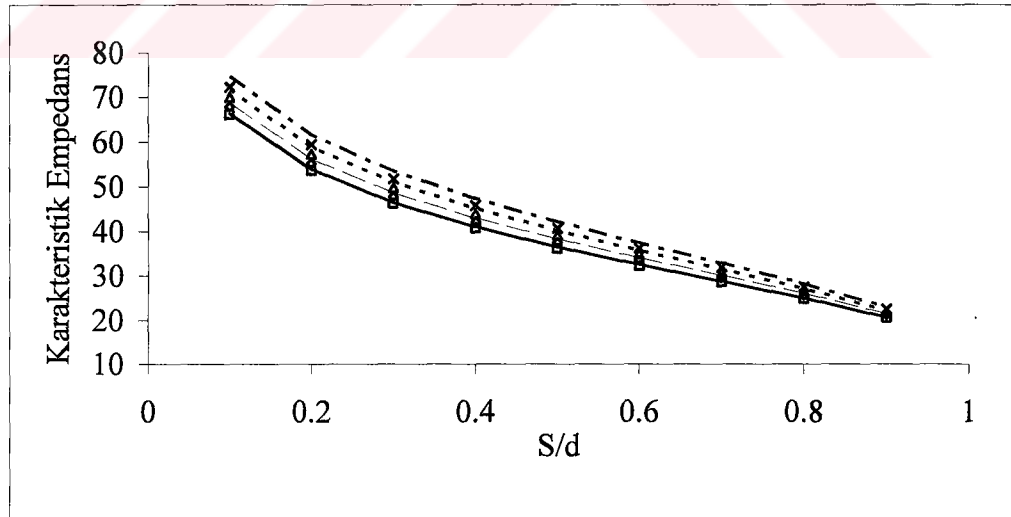
Şekil 6.7’de yine sunulan modelin kullanılması ile analizleri gerçekleştirilebilecek olan iletim elemanları iki dielektrik katman arasına yerleştirilmiş olan CCPW’lere ilişkin karakteristik parametre sonuçlarının CMT [15, 65] sonuçları ile karşılaştırılması yer almaktadır. Bu grafiklerde taban malzemelerinin bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_1=12.9$, $\epsilon_2=1$ ve $\epsilon_3=10$ olan ve diğer geometrik boyutları ise $h_1=762\mu\text{m}$, $h_3=635\mu\text{m}$, $d/h_1=1, 2, 3$ ve 4 olarak seçilen CCPW yapıları için karşılaştırmalar yapılmıştır.

a) ϵ_{eff} b) $Z_0 (\Omega)$

— $d/h_1=1$ için, --- $d/h_1=2$ için, - - - $d/h_1=3$ için, - - - $d/h_1=4$ için CMT
 □ $d/h_1=1$ için, Δ $d/h_1=2$ için, ◇ $d/h_1=3$ için, x $d/h_1=4$ için YSA

Şekil 6.7. MCCPW’ler için sunulan YSA modelinden iki katmanlı CCPW’ler için elde edilen sonuçların CMT sonuçları ile karşılaştırılması

Şekil 6.8’de ise MCCPW’lere ilişkin karakteristik parametre sonuçlarının CMT [15, 65] sonuçları ile karşılaştırılması yer almaktadır. Bu grafiklerde ise taban malzemelerinin bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_1=12.9$, $\epsilon_2=10$ ve $\epsilon_3=10$ olan ve diğer geometrik boyutları ise $h_1=762\mu\text{m}$, $h_2=h_3=500\mu\text{m}$, $d/h_1=1, 2, 3$ ve 4 olarak seçilen MCCPW yapıları için karşılaştırmalar yer almaktadır.

a) ϵ_{eff} b) $Z_0 (\Omega)$

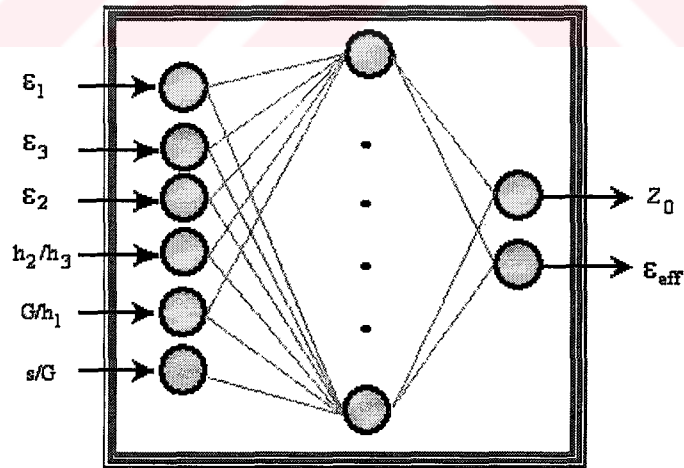
— $d/h_1=1$ için, --- $d/h_1=2$ için, - - - $d/h_1=3$ için, - - - $d/h_1=4$ için CMT
 □ $d/h_1=1$ için Δ $d/h_1=2$ için, ◇ $d/h_1=3$ için, x $d/h_1=4$ için YSA

Şekil 6.8. Sunulan YSA modelinden MCCPW’ler için elde edilen sonuçların CMT sonuçları ile karşılaştırılması

Sonuç olarak sunulan YSA modellerinden LM algoritması ile eğitimi gerçekleştirilen modelden elde edilen sonuçların, CMT sonuçları ile iyi bir uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle sunulan YSA modeli klasik tekniklere alternatif yeni bir yaklaşım olarak önerilebilecek düzeydeki bir hata oranına sahip olduğu söylenebilir.

6.5 Çok Katmanlı Silindirik CPS'ler için Sunulan YSA Modeli

Şekil 3.8'de kesit görünümü verilmiş olan çok katmanlı silindirik CPS (MCCPS)'ler de ϵ_1 iletim elemanlarının altında yer alan katmanın bağıl dielektrik sabitini, ϵ_2 en iç kısımda yer alan katmanın bağıl dielektrik sabitini, ϵ_3 iletim elemanlarının üstündeki katmanın bağıl dielektrik sabitini, w 'lar şerit genişliklerini, s yarık genişliğini, G iletken şeritler ve yarık genişlikleri toplamını, h_1 iç ve dış yarıçapları sırasıyla a ve b olan dielektrik tabanın kalınlığını, h_2 iç ve dış yarıçapları sırasıyla c ve a olan dielektrik tabanın kalınlığını, h_3 en üstteki dielektrik tabanın kalınlığını, d ise yine en üstteki dielektrik katmanın dış yarıçapını göstermektedir. MCCPS'ler karakteristik parametrelerinin YSA ile belirlenmesi için oluşturulan model altı giriş ve iki çıkıştan oluşmaktadır. Bu model, Şekil 6.9'da verilmiştir.



Şekil 6.9. MCCPS'ler için sunulan YSA modeli

YSA modeline tasarımda kullanılacak olan taban malzemelerinin bağıl dielektrik sabitleri ϵ_1 , ϵ_2 ve ϵ_3 ile yapının geometrik boyutlarıyla ilgili parametreler olan h_2/h_3 , G/h_1 ve s/G giriş olarak uygulanırken yapının efektif dielektrik sabiti ϵ_{eff} ve karakteristik empedansı Z_0 çıkış olarak uygulanmıştır. Bu YSA modelinde uygun geometrik

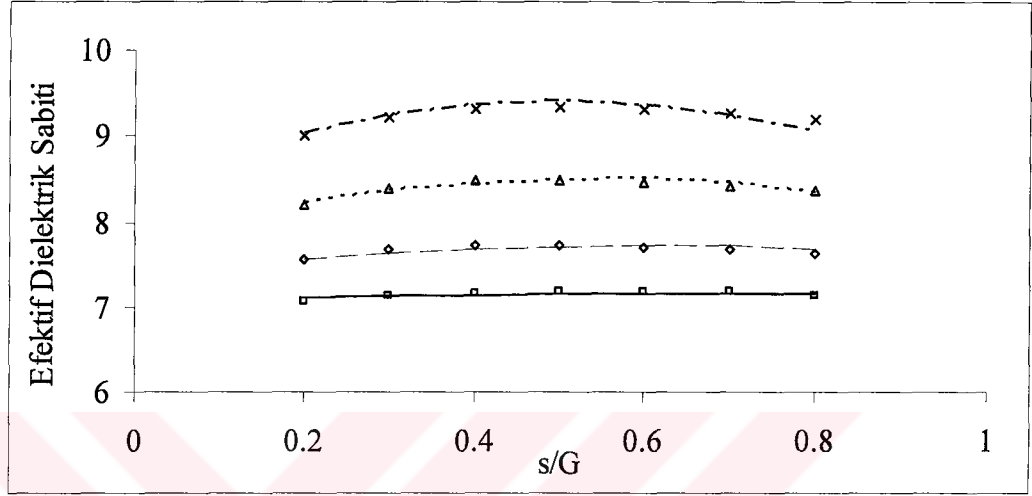
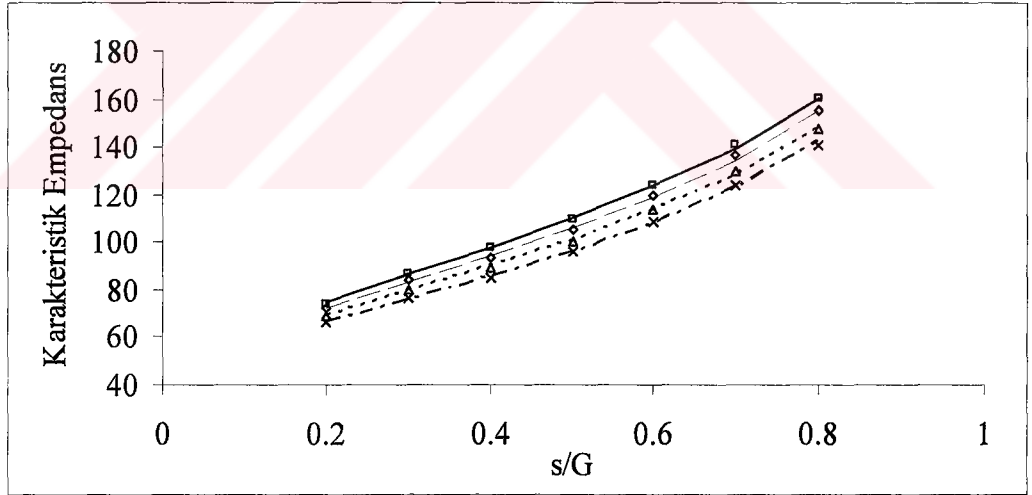
boyutların giriş olarak uygulanması ile farklı CCPS yapılarının analizleri de gerçekleştirilebilmektedir. Bu alternatif yapılar, tek katmanlı CCPS'ler ve iki katmanlı CCPS'lerdir. MCCPS'ler için sunulan YSA modelinin eğitimi için 1008 adet veriden oluşan bir eğitim seti, test işlemi içinse 448 adet veriden oluşan bir test veri seti kullanılmıştır. Eğitim setindeki giriş parametreleri $2 \leq \varepsilon_1 \leq 14$, $1 \leq \varepsilon_2 = \varepsilon_3 \leq 10$, $0.1 \leq S/d \leq 0.9$, $1 \leq d/h_1 \leq 4$, $200 \mu\text{m} \leq h_1 \leq 1500 \mu\text{m}$, $300 \mu\text{m} \leq h_2 \leq 1400 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m} \leq h_3 \leq 1400 \mu\text{m}$ arasında değişen değerler için belirlenmiştir. Sunulan bu modelin tamamında silindirik geometriye sahip iletim hatlarının eğrilik yarıçapı olarak adlandırılan R sabitleri 0.8 olarak alınmıştır. Kullanılan YSA modeli $6 \times 6 \times 12 \times 2$ şeklinde düzlenmiş bir ÇKP YSA yapısıdır. Yani giriş ve ilk ara katmanda 6'şar nöron, ikinci ara katmanda 12 nöron ve çıkışta da 2 nöron olmak üzere toplam 26 nörondan oluşan modeldir. Transfer fonksiyonu olarak ta ilk ara katmanda tanjant sigmoid, ikinci ara katmanda logaritmik sigmoid ve çıkış katmanında lineer eşik fonksiyonu kullanılmıştır. YSA'yı eğitime işlemine, yine belirlenen bir iterasyon sayısına veya belirlenen bir hata kriterine ulaşıldığında son verilmiştir. Değerlendirme kriteri olarak RMS hatalar kullanılmıştır. YSA modelinin eğitimi beş farklı öğrenme algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bunlar; BD, LM, CGF ve QN algoritmalarıdır. Tablo 6.3'de bu öğrenme algoritmalarının eğitim ve test işlemleri için RMS hata sonuçları karşılaştırılarak performansları değerlendirilmiştir. Buna göre en iyi performansı LM ve BD algoritmaları, en kötü performansı ise QN algoritması sergilemiştir.

Tablo 6.3. MCCPS'ler için sunulan YSA modelinde algoritma performansları

Öğrenme Algoritmaları	Eğitim RMS Hataları		Test RMS Hataları	
	ε_{eff}	$Z_0 (\Omega)$	ε_{eff}	$Z_0 (\Omega)$
LM	0.5414	0.4176	0.9829	0.2044
BD	1.9970	0.8685	3.8211	0.1822
CGF	1.6806	2.2890	18.4865	25.9225
QN	1.1837	1.5074	64.9284	78.2641

Şekil 6.10'da görülmekte olan grafiklerde eğitimi LM algoritması ile gerçekleştirilmiş olan YSA modelinden tek katmanlı CCPS'ler için elde edilen sonuçlar literatürde

mevcut CMT [138] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu grafiklerde taban malzemelerinin bağıl dielektrik sabiti $\varepsilon_1=12.9$, $\varepsilon_2=\varepsilon_3=1$ olan ve diğer geometrik boyutları ise $h_1=762\mu\text{m}$, $d/h_1=1, 2, 3$ ve 4 olarak seçilen CPS yapısı için karşılaştırmalar yapılmıştır.

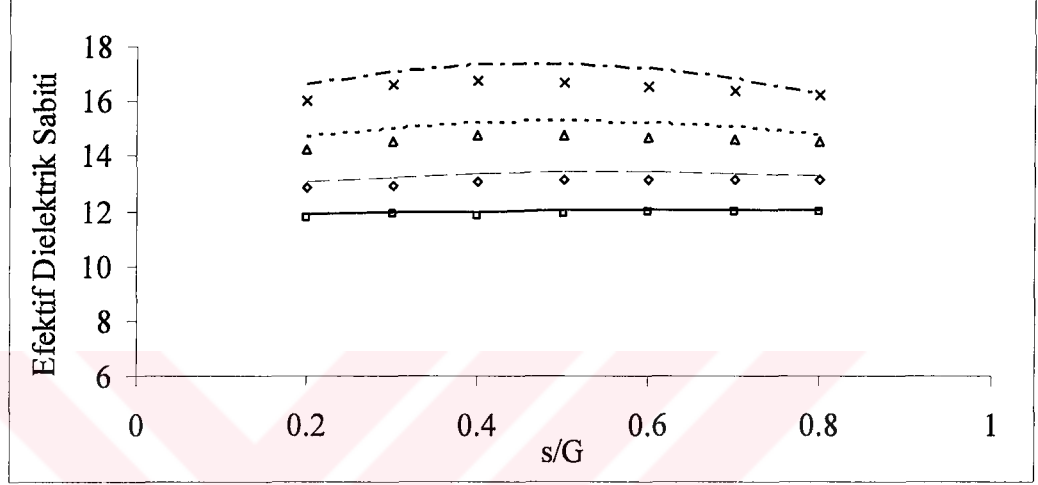
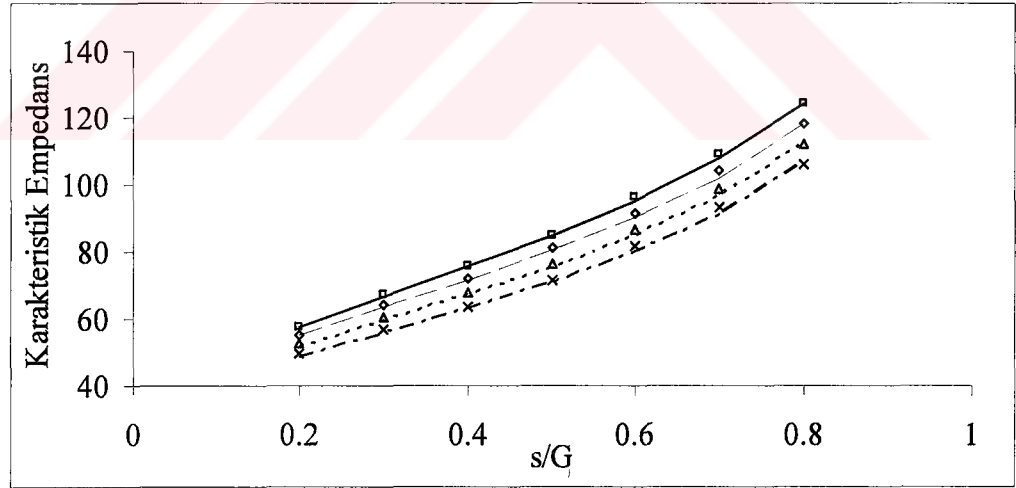
a) ε_{eff} b) $Z_0 (\Omega)$

— $d/h_1=1$ için, --- $d/h_1=2$ için, - - - $d/h_1=3$ için, - - - $d/h_1=4$ için CMT
 □ $d/h_1=1$ için, △ $d/h_1=2$ için, ◇ $d/h_1=3$ için, × $d/h_1=4$ için YSA

Şekil 6.10. MCCPS'ler için sunulan YSA modelinden tek katmanlı CCPS'ler için elde edilen sonuçların CMT sonuçları ile karşılaştırılması

Şekil 6.11'de yine sunulan modelin kullanılması ile analizleri gerçekleştirilebilecek olan iletim elemanları iki dielektrik katman arasına yerleştirilmiş olan CCPS'lere ilişkin

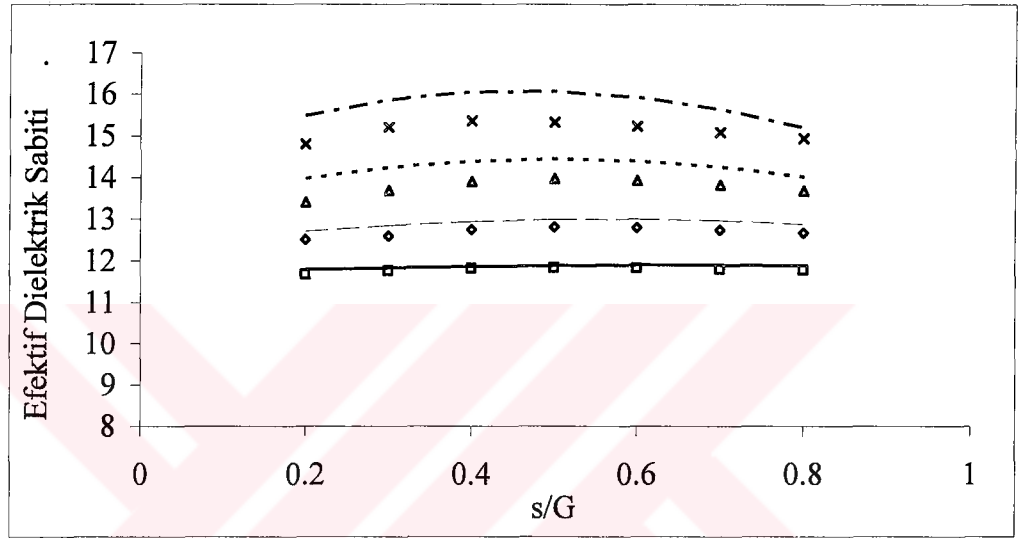
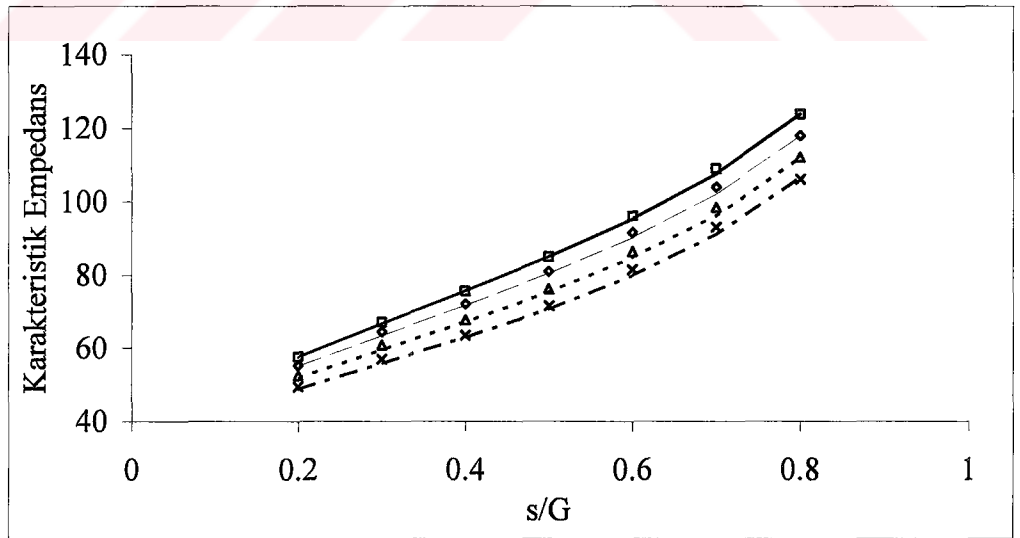
karakteristik parametre sonuçlarının CMT sonuçları ile karşılaştırılması yer almaktadır. Bu grafiklerde taban malzemelerinin bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_1=12.9$, $\epsilon_2=1$ ve $\epsilon_3=10$ olan ve diğer geometrik boyutları ise $h_1=762\mu\text{m}$, $h_3=600\mu\text{m}$, $d/h_1=1, 2, 3$ ve 4 olarak seçilen CCPS yapıları için karşılaştırmalar yapılmıştır.

a) ϵ_{eff} b) $Z_0 (\Omega)$

— $d/h_1=1$ için, --- $d/h_1=2$ için, - - - $d/h_1=3$ için, - - - $d/h_1=4$ için CMT
 □ $d/h_1=1$ için, Δ $d/h_1=2$ için, ◇ $d/h_1=3$ için, x $d/h_1=4$ için YSA

Şekil 6.11. MCCPS'ler için sunulan YSA modelinden iki katmanlı CCPS'ler için elde edilen sonuçların CMT sonuçları ile karşılaştırılması

Şekil 6.12’de ise MCCPS’lere ilişkin karakteristik parametre sonuçlarının CMT sonuçları ile karşılaştırılması yer almaktadır. Bu grafiklerde ise taban malzemelerinin bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_1=12.9$, $\epsilon_2=10$ ve $\epsilon_3=10$ olan ve diğer geometrik boyutları ise $h_1=762\mu\text{m}$, $h_2=h_3=600\mu\text{m}$, $d/h_1=1, 2, 3$ ve 4 olarak seçilen MCCPS yapıları için karşılaştırmalar yer almaktadır.

a) ϵ_{eff} b) $Z_0 (\Omega)$

— $d/h_1=1$ için, --- $d/h_1=2$ için, - - - $d/h_1=3$ için, - - - $d/h_1=4$ için CMT
 □ $d/h_1=1$ için, Δ $d/h_1=2$ için, ◇ $d/h_1=3$ için, x $d/h_1=4$ için YSA

Şekil 6.12. Sunulan YSA modelinden MCCPS’ler için elde edilen sonuçların CMT sonuçları ile karşılaştırılması

Sonuç olarak sunulan YSA modellerinden LM algoritması ile eğitimi gerçekleştirilen modelden elde edilen sonuçların, CMT sonuçları ile iyi bir uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle sunulan YSA modeli klasik tekniklere alternatif yeni bir yaklaşım olarak önerilebilecek düzeydeki bir hata oranına sahip olduğu söylenebilir.



BÖLÜM 7

SONUÇLAR

Tez çalışması sırasında düzlemsel ve silindirik geometrideki on üç farklı mikrodalga iletim hattının quasi-statik analizleri dokuz farklı öğrenme algoritmasıyla eğitilmiş YSA modelleriyle literatürde ilk kez gerçekleştirilmiştir. Düzlemsel eş düzlemlili dalga kılavuzlarından dokuz farklı yapı ele alınmış ve bu yapılar için oluşturulan modellerin tamamı her bir yapıda mümkün olabilecek tüm geometrik boyutlar için analizleri YSA modelleriyle gerçekleştirilmiştir. Bu düzlemsel iletim hattı konfigürasyonları sırasıyla; Sonsuz kalınlıktaki dielektrik tabana sahip CPW'ler, sonlu kalınlıktaki dielektrik tabana sahip CPW'ler, alt korumalı CPW'ler, alt ve üst korumalı CPW'ler, SCPW'ler, alt korumalı SCPW'ler, üst korumalı SCPW'ler, CBSCPW'ler ve alt ve üst korumalı çok katmanlı CPW'lerdir. Silindirik geometriye sahip iletim hatlarından ise simetrik CCPW'ler, ACCPW'ler, MCCPW'ler ve MCCPS'ler ele alınmıştır.

Bu tez çalışmasında sunulan modeller ile YSA'ların cazip özelliklerinden faydalanılarak hem farklı geometrik yapılardaki mikrodalga iletim hatları ele alınmış hem de incelenen yapılardan sadece ikisinin dışındaki tüm iletim hatlarının her iki karakteristik parametresi de tek bir modelle hesaplanmıştır. Ayrıca sunulan bazı modeller her iki karakteristik parametrenin hesaplanmasında kullanılabileceği gibi birden çok iletim hattı konfigürasyonunun analizleri için de kullanılabilir.

Tez çalışmasında sunulan YSA modellerinin, basit yapılı olmaları, kabul edilebilir bir doğrulukta sonuçlar üretebilmeleri, karmaşık matematiksel ifadeler gerektirmemeleri, hızlı sonuç üretmeleri bu çalışmanın üstünlüklerindendir. Bu CAD modeller söz konusu iletim ortamlarının karakteristik parametrelerinin yüksek doğrulukla tahmin etme yeteneğine sahip olduklarından bu tür mikrodalga iletim hatlarının modellenmesinde etkili alternatif bir model olabileceği bu çalışmanın sonuçlarından açıkça görülmektedir. Her ne kadar YSA modellerinin eğitimi teorik olarak elde edilen verilerle gerçekleştirilmiş olsa da, literatürde mevcut bazı deneysel sonuçlarla da YSA

modellerinin test edilmesi ve kabul edilebilir sonuçlar alınması bu çalışmanın önemini ortaya koymaktadır. Deneysel verilerle eğitim setlerinin oluşturulamamasının sebebi alternatif tüm iletim hattı yapılarının fiziksel olarak gerçekleştirilmesinin ekonomik olmamasından kaynaklanmaktadır. Sunulan YSA modellerinin literatürde mevcut olan deneysel sonuçlar ve quasi-statik bir yaklaşım olan CMT, frekans bağımlı çözümler olan SDA ve FEM ile karşılaştırılması ve kabul edilebilir sonuçlar üretmeleri modellerin doğruluklarının ortaya koymaktadır.

Tablo 7.1’de iletim hatlarına göre en iyi performansa sahip YSA yapılarının karşılaştırılması yer almaktadır. Bu tabloda CPW_1 ile gösterilen iletim hattı yapısı sonsuz kalınlıktaki dielektrik tabana sahip CPW ’leri, CPW_2 ile gösterilen iletim hattı yapısı ise sonlu kalınlıktaki dielektrik tabana sahip CPW ’leri temsil etmektedir. YSA yapılarındaki gösterim ise sırasıyla giriş, ara katman/katmanlardaki ve çıkış katmanındaki işlemci eleman sayılarıdır. Bu tabloda model oluşturulurken kullanılan ve en iyi performansı sergileyen öğrenme algoritmaları yer almaktadır. Bu tablodan mikrodalga iletim hatları için sunulan YSA modelleri için genel bir değerlendirme yapılacak olursa LM, BD ve EDBD algoritmalarıyla eğitilmiş olan ÇKP YSA yapıları bu tip problemler için iyi bir performans sergilemektedir. Modelin analizini gerçekleştirmesi istenilen iletim hattının kompleks olmaması durumunda yani dielektrik taban sayısı ve alt veya üst koruma içermesi gibi durumlarda iki veya daha fazla sayıda katman kullanılarak oluşturulan ÇKP YSA yapıları tercih edilmelidir. Ara katmanlardaki işlemci eleman sayılarının seçilmesinde herhangi bir zorunluluk olmamasına karşın giriş katında giriş sayısı kadar, çıkış katmanlarında ise analiz sonucu elde edilecek olan parametre sayısı kadar işlemci eleman kullanılması gerekmektedir. Giriş katı tampon (buffer) görevi taşıdığı için bir transfer fonksiyonu kullanılmamasına karşın ara katmanlarda tanjant sigmoid veya logaritmik sigmoid fonksiyonu çıkış katında ise lineer eşik fonksiyonu tercih edilmelidir. Bölüm 5 ve 6’da yer alan YSA model yapılarında tampon görevi gören giriş katmanları gösterim olarak verilmemiştir. Bilindiği gibi YSA yapılarında kullanılacak olan işlemci eleman sayısı arttıkça modelin işlem süresi artmakta ve bu modelin kabul edilebilirliğini azaltmaktadır. Fakat bu tip iletim hatlarında olduğu gibi iki parametre değerinin tek bir modelle elde edilmesi gereken problemlerde iki parametrenin tek bir modelden elde edilmesi durumunda hata oranı çok büyük çıkıyorsa YSA yapısını basitleştirmek için çok giriş tek çıkışlı modeller sunularak hata oranı azaltılabilir.

Tablo 7.1. İletim hatlarına göre en iyi performansa sahip YSA yapılarının karşılaştırılması

	İletim hattı	YSA model yapısı	En iyi öğrenme algoritması
1	CPW ₁	3x3x6x2	LM
2	CPW ₂	3x3x6x4x2	LM
3	Alt korumalı CPW	5x5x10x2	LM
4	Alt ve üst korumalı CPW	6x6x12x2	LM
5	SCPW	5x5x5x10x2	LM
6	Alt korumalı SCPW	7x7x12x2	LM
7	Üst korumalı SCPW	7x7x12x2	LM
8	CBSCPW	6x6x12x2	LM
9	Alt ve üst korumalı SCPW	6x6x12x2	BD
10	CCPW	5x5x10x1	LM
11	ACCPW	5x5x10x10x1	EDBD
12	MCCPW	6x6x10x6x2	BD
13	MCCPS	6x6x10x2	BD

Ayrıca YSA modellerinin eğitimleri için kullanılacak olan veri seti hazırlanırken mümkün olabilecek tüm fiziksel boyutları içine alan bir veri seti en az sayıda veri içerecek şekilde belirlenmelidir. Hem eğitim hem de test veri setleri YSA yapısına uygulanmadan önce bir ön işleme tabi tutularak 0-1 veya (-1)-(+1) aralığına alındığı takdirde modelin eğitimi daha kolay gerçekleştirilebilir. Ancak YSA çıkışlarının gerçekçi bir şekilde değerlendirilmesi için modelden elde edilen sonuçların son işlem ile gerçek değerlerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Aksi takdirde YSA modeli normalize edilmiş sonuçlara göre değer üreteceği için hata oranı düşük gibi görülebilir fakat gerçek değerlerde istenilmeyen sapmalar oluşabilir. Diğer bütün YSA uygulamalarında olduğu gibi mikrodalga iletim hatlarının YSA'ları ile modellenmesinde de problemin tam olarak tanımlanması ve uygun eğitim ve test veri setlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu durum modelin amacına uygun olarak kullanılabilmesi için son derece önemlidir. Model için yapılan sınırlamaların sayısı arttıkça kabul edilebilirliği azalacaktır. Yani sunulan modeller piyasada bulunabilecek ve pratikte yaygın olarak

kullanılmakta olan dielektrik taban malzemelerinin yanı sıra mümkün olabilecek tüm fiziksel boyutlar da dikkate alınarak ortaya konulmalıdır.

Bu tez çalışmasında sunulan alt korumalı CPW'lere, alt ve üst korumalı CPW'lere, SCPW'lere, alt korumalı SCPW'lere, üst korumalı SCPW'lere, iletken destekli SCPW'lere, alt ve üst korumalı SCPW'lere, MCCPW'lere ve MCCPS'lere ait YSA modelleriyle, uygun geometrik boyutların giriş olarak uygulanmasıyla birden fazla mikrodalga iletim hattı yapısının analizleri de gerçekleştirebilmektedir. Sunulan modellere bu gibi avantajların kazandırılmasıyla bu tez çalışmasında özel olarak ele alınmayan iletken destekli CPW (Conductor-Backed CPW; CBCPW)'lerin, üst korumalı CPW'lerin ve üst korumalı CBCPW'lerin analizleri de gerçekleştirilmiştir.

Buradan edinilen fikirle tez çalışmasından sonraki aşamada tüm iletim hattı yapılarının analizleri için tek bir YSA modeli geliştirilmesi düşünülmektedir. Bu amaca uygun olarak incelenen yapılardan düzlemsel iletim hatlarının en genel hali olarak kabul edilebilecek iletim hattı konfigürasyonu alt ve üst korumalı SCPW yapısıdır. Bu iletim hattı için oluşturulacak olan bir modelde uygun dielektrik taban malzemelerinin bağlı dielektrik sabitinin bir seçilmesi ve uygun iletken korumaların merkez iletken düzlemine olan uzaklıklarının sonsuz olarak seçilebilmesi durumunda yapı on üç farklı düzlemsel iletim hattına dönüşmektedir. Dolayısıyla ilk olarak düzlemsel iletim hatları için geçerli olabilecek bir model ortaya konulması düşünülmektedir. Ardından silindirik geometriye sahip iletim hatları içinde CPW ve CPS yapıları ayrı ayrı incelenebilir veya model girişlerinden biri seçici değişken gibi kullanılarak tek bir modelde birbirlerinin komplementeri olan bu iletim hattı yapılarının analizleri gerçekleştirilebilir. En son aşamada ise düzlemsel ve silindirik geometriler için geliştirilecek olan modellerin yine seçici giriş değişkeni yardımı ile birleştirilmesi düşünülebilir ancak böyle bir modelde giriş sayısının artması ayrıca mümkün olabilecek tüm fiziksel boyutları içine alabilecek eğitim ve test veri setlerinin hazırlanması sırasında da kullanılması gereken veri sayının artmasıyla modelin işlem süresinin daha fazla olmasına karşın performansı daha düşük olacaktır. Bu tür zorlukların aşılmasıyla ortaya konulabilecek olan modellemelerin mikrodalga iletim hattı yapıları için oldukça kullanışlı olacağı açıktır. Ayrıca farklı optimizasyon tekniklerinin de kullanılmasıyla bu tür iletim hatlarının analiz ve sentezlerinin gerçekleştirilmesi düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Barrett, R. M., Barnes M. H., Microwave Circuits, National Conference on Airborne Electronics, IRE, Ohio, May 1951.
2. Peters, R. W. et al., Sander Associates, Handbook of tri-Plate Microwave Components, Nashua, New Hampshire, 1956.
3. Wheeler, H. A., Directional Coupler, US patent 2 606 974 filed 16 May 1946, August 12, 1952.
4. Greig, D. D., Engelmann H. F., Microstrip-A New Transmission Technique for Kilomegacycle Range, Proc. IRE, 40, 1644-1650, 1952.
5. Assadourian, F., Rimai, E., Simplified Theory of Microstrip Transmission Systems, Proc. IRE, 40, 1644-1650, 1952.
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., Microwave Integrated Circuits, Wiley Eastern Ltd., New Delhi, 1974.
9. Frey, J., et al., Microwave Integrated Circuits, Artech House, Dedham, 1974.
10. Wen C. P., Coplanar Waveguide: A Surface Transmission Line Suitable for Nonreciprocal Gyromagnetic Device Applications, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-17 (12), 1087-1090, 1969.
11. Duncan, B. J., et al., Design Considerations for Broad-band Ferrite Coaxial Line Isolators, Proc. IRE, 45, 483-490, 1957.
12. Gupta, K. C., et al., Microstrip Lines and Slot Lines, 5-23, Artech House, Boston, 1996.
13. Dipolalo, F., Networks and Devices Using Planar Transmission Lines, CRC Press, 2000.
14. Gupta, K. C., Microwaves, Wiley Eastern Ltd., Ch. 10, New Delhi, 1979.
15. Duyar, M., Çok Katlı Koplanar Dalga Kılavuzları ve Koplanar Şeritlerin Quasi-Statik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Niğde, 1999.
16. Perlman, B. S., Gelnovatch, V. G., Computer Aided Design, Simulation and Optimization, in Advances Microwaves, L. Young and H. Sobol, 8, New York Academic Pres, 1974.

17. Ho, P., et al., Extremely High Gain 0.15 μm Gate-length InAlAs/InGaAs/InP/HEMT's, *Electronic Letters*, 27, 325-327, 1991.
18. Ahmari, D. A., et al., High Speed In GaP/GaAs HBT's with a Strained $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ Base, *IEEE Electronic Device Letters*, 17(5), 226-228, 1996.
19. Gill, D. M., et al., High Performance 0.15 μm InAlAs/InGaAs High Electron Mobility Transistors on GaAs, *IEEE Electronic Device Letters*, 17(7), 328-330, 1996.
20. Valdmanis, J. A., Electro-Optic Measurement Techniques for Picoseconds Materials Devices and Integrated Circuits, in *Measurement of High Speed Signals in Solid States Devices*, 136-137, R. B. Marcus, Ca: Academic, San Diego, 1990.
21. Frankel, M. Y., Whitaker, J. F., Mourou, G. A., Optoelectronic Transient Characterization of Ultra fast Devices, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 28, 2313-2324, 1992.
22. Jackson, R. W., Consideration on The Use of CPW for Millimeter-wave Integrated Circuits, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, MTT-34, 1450-1456, 1986.
23. Majidi-Ahy, R., et al., 5-100 GHz InP Coplanar Waveguide MMIC Distributed Amplifier, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, MTT-38, 1986-1993, 1990.
24. Riazat, M., Majidi-Ahy, Feng, I. J., Propagation modes and Dispersion Characteristics of Coplanar Waveguides, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, MTT-38, 245-251, 1990.
25. Alferness, R. C., Waveguide Electrooptic Modulators, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 30(8), 1121-1137, 1982.
26. Newman, N., Lyons, G. W., High Temperature Superconducting Microwave Devices: Fundamental Issues in Materials, Physics and Engineering, *Journal of Super Conducting*, 6(3), 119-160, 1993.
27. Kebler, J., Dill, R., Russer, P., Influence of Buffer Layers within YBCO Coplanar Waveguide Structures, *IEEE Micro and Guided Wave Letters*, 2, 1992.
28. Ramer, O. G., Integrated Optics Electrooptic Modulator Electrodo Analysis, *Journal of Quantum Electronics*, 18, 386-392, 1982.

29. Chung, H., Chang, W. S. C., Bettes, G. E., Microwave Properties of Traveling Wave Electrodes in LiNbO₃ Electrooptic Modulators, *Journal of Lightwave Technology*, 11(8), 1274-1278, 1993.
30. Special Issue on, Application of Lightwave Technology to Microwave Devices, Circuits and Systems, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, MTT-38, 1990.
31. Itoh, T., *Numerical Technique for Microwave and Millimeter-wave Passive Circuits*, Wiley, New York, 1989.
32. Soghomonian, M. S., Robertson, I. D., Finite Differences Modelling of Novel Waveguiding Structures for MMIC Applications, *Journal of Microwave and Millimeter-wave Computer Aided Eng.*, 3, 271-286, 1993.
33. Davis, M. E., Williams, E. W., Celestini, A. C., Finite-Boundary Corrections to The Coplanar Waveguide Analysis, *IEEE Transactions on Microwave Theory Tech.*, MTT-21(10), 594-596, 1973.
34. Chang, C. N., Chang, W. C., Chen, C. H., Full-wave analysis of multilayer coplanar lines, *IEEE Transactions on Microwave Theory Tech.*, 39, 1991.
35. Su, H. C., Wong, K. L., Full-wave Analysis of The Effective Relative Permittivity of A Coplanar Waveguide Printed Inside A Cylindrical Substrate, *Microwave and Optical Technology Letters*, 12(4), 94-97, 1996.
36. Dib, N., et al., Analysis of Cylindrical Transmission Lines with The Finite Difference Time Domain Method, *IEEE Transactions on Microwave Theory Tech.*, 47, 509-512, 1997.
37. Hanna, V. F., Thebault, D., Theoretical and Experimental Investigation of Asymmetric Coplanar Waveguides, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 32, 1649-1651, 1984.
38. Hanna, V. F., Veyers, C., Extension of the Application of Conformal Mapping Techniques to Coplanar Lines with Finite Dimensions, *International Journal of Electronics*, 48, 47-56, 1980.
39. Kitazawa, T. et al., Planar Transmission Line with Finitely Thick Conductors and Lossy Substrates, *IEEE Transactions on Microwave Symposium Digest*, 769-772, June 1991.
40. Su, H. C., Wong, K. L., Quasi-Static Solutions of Cylindrical Coplanar Waveguides, *Microwave and Optical Technology Letters*, 14(6), 347-351, 1997.

41. Svacina, J., Parameters of Multilayer Asymmetric Coplanar Waveguide, Modeling, Measurements and Control, AMSE Press, 48(2), 37-45, 1992.
42. Kiang, J. F., Quasi-TEM Analysis of Coplanar Waveguides with An Inhomogeneous Semiconductor Substrate, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 44(9), 1586-1589, 1996.
43. Ghione, G., Goano, M., Pirola, M., Exact, Conformal-Mapping Models for The High-frequency Losses of Coplanar Waveguides with Thick Electrodes of Rectangular or Trapezoidal Cross Section, Microwave Symposium Digest, 1999 IEEE MTT-S International, 3, 1311-1314, 1999.
44. Fang, S. J., Wang, B. S., Analysis of Asymmetric Coplanar Waveguide with Conductor Backing, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 47(2), 238-240, 1999.
45. Bedair, S. S., Wolff, I., Fast, Accurate and Simple Approximate Analysis Formulas for Calculating The Parameters of Supported Coplanar Waveguides for (M)MIC's, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 40, 41-48, 1992.
46. Dupuis, P. A. J., Campbell, C. K., Characteristic Impedance of Surface-Strip Coplanar Waveguides, Electronic Letters, 9(16), 354-355, 1973.
47. Becker, J. P., Jager, D., Electrical properties of Coplanar Transmission Lines on Lossless and Lossy Substrate, Electronic Letters, 15(3), 88-90, 1979.
48. Riad, A. A., et al., Thick-Film Coplanar Strip and Slot Lines for Microwave and Wideband Integrated Circuits, Int. Microelectronics Symposium Dig., 18-21, Reno, Nevada, Nov. 15-17, 1982.
49. Linnér, L. J. P., A Method for The Computation of The Characteristic Immitance Matrix of Multiconductor Striplines with Arbitrary Widths, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 22, 930-937, 1992.
50. Ghione, G., A CAD Oriented Analytical Model for the Losses of General Asymmetric Coplanar Lines in Hybrid and Monolithic MIC's, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 41(9), 1499-1510, 1993.
51. Gevorgian, S. S., Kaparkov, D. I., Electrically Controlled HTSC/Ferroelectric Coplanar Waveguides, Instruments of Electronic Engineering Proc., 141, 501-503, 1994.

52. Karpuz, C., Duyar, M., Görür, A., Analysis of Cylindrical Conductor-Backed Coplanar Waveguides, *Microwave and Optical Technology Letters*, 27(2), 144-146, 2000.
53. Karpuz, C., Duyar, M., Görür, A., Analysis of Coplanar-Coupled Lines on A Cylindrical Substrate, *Microwave and Optical Technology Letters*, 27(3), 187-190, 2000.
54. Karpuz, C., Görür, A., Quasi-Static Solutions of Elliptical Coplanar Waveguides, *Microwave and Optical Technology Letters*, 20(6), 385-389, 2000.
55. Owyang, G. H., Wu, T. T., The Approximate Parameters of Slot Lines and Their Complement, *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-6(1), 49, 1958.
56. Gupta, K. C., Garg, R., Bahl, I. J., *Microstrip Lines and Slot Lines*, Artech House, Dedham, 1979.
57. Ghione, G., Naldi, C., Zich, R., Q-Factor Evaluation for Coplanar Resonators, *Alfa Frequanza*, L2 (3), 191-193, 1983.
58. Hoffmann, R., *Integrierte Mikro wellenschaltungen*, New York: Springer, Verlag, 1983; English Translation: *Handbook of MIC*, Artech House, New York, 1987.
59. Veyers, C., Hanna, V. F., Extension of Application of Conformal Mapping Techniques to Coplanar Lines with Finite Dimensions, *International Journal of Electronics*, 48, 47-56, 1980.
60. Ghione, G., Naldi, C. U., Analytic Formulas for Coplanar Lines in Hybrid and Monolithic MIC's, *Electronic Letters*, 20, 179-181, 1984.
61. Yamashita, E., Atsuki, K., Analysis of Microstrip-like Transmission Lines by Nonuniform Discretization of Integral Equations, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, MTT-24, 195-200, 1976.
62. Das, N. K., Pozar, M. D., A Generalized Spectral-Domain Green's Function for Multilayer Transmission Lines, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, MTT-35, 326-335, 1987.
63. Frankel, M. Y., Voelker, R. H., Hilfiker, J. N., Coplanar Transmission Lines on Thin Substrates for High-Speed Low-Loss Propagation, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, MTT-42, 396-402, 1994.
64. Ghione, G., Naldi, C. U., Coplanar Waveguides for MMIC Applications: Effect of Upper Shielding, Conductor Backing, Finite-Extent Ground Planes, and Line-to-

- Line Coupling, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-35(3), 260-267, 1987.
65. Gevorgian, S., Linnér, L. J. P., Kollberg, CAD Models for Shielded Multilayered CPW, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-43(4), 326-335, 1995.
 66. Chen, E., Chou, S. Y., Characteristics of Coplanar transmission Lines on Multilayer Substrates: Modelling and Experiments, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-45(6), 939-945, 1997.
 67. Chang, C. N., Wong, Y. C., Chen, C. H., Hybrid Quasi-Static Analysis for Multilayer Coplanar Lines, IEE Proc., 138(4), 307-312, 1991.
 68. Görür, A., Karpuz, C., Alkan, M., Quasi-Static TEM Characteristics of Overlaid Supported Asymmetric Coplanar Waveguide, International Journal of MMICAE, 6(5), 297-303, 1996.
 69. Barrett, R. M., Etched Sheets Serve As Microwave Components, Electronics, 114-118, 1952.
 70. Clements, T. E., Paul, C. R., Adams, A., Computation of The Capacitance Matrix for Systems of Dielectric-Coated Cylindrical Conductors, IEEE Transactions on Electromagnetic Compability, EMC-17, 238-248, 1975.
 71. Karpuz, C., Görür, A., Alkan, M., Quasi-Static Analysis of Coplanar Striplines, Microwave and Optical Technology Letters, 17(2), 148-151, 1997.
 72. Dib, N., Al-Zoubi, A., Quasi-Static Analysis of Asymmetric Cylindrical Coplanar Waveguides with Finite-Extent Ground, International Journal of Electronics, 87(2), 185-198, 2000.
 73. Simons, R. N., Coplanar Waveguide Circuits, Components and Systems, John Wiley and Sons. Inc. ISBNs: 0-47-16121-7, 2001.
 74. Zhang, Q. J., Gupta, K. C., Neural Networks for RF and Microwave Design, Artech House, Norwood, MA, 2000.
 75. Gupta, K. C., Emerging Trends in Millimeter-Wave CAD, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 46, 747-755, 1998.
 76. Wang, F., Zhang, Q. J., Knowledge-Based Neural Models for Microwave Design, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 45, 2333-2343, 1997.

77. Antonini G., Orlandi, A., Gradient evaluation for Neural-Networks-Based Electromagnetic Optimization procedures, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 48, 874-876, 2000.
78. Zhang, Q. J., Wang, F., Nakhla, M. S., Optimization of high-speed VLSI interconnects: A review, *International Journal of Microwave Millimeter-Wave CAE*, 7, 83-107, 1997.
79. Zaabab, A. H., Zhang, Q. J., Nakhla, M. S., Device and Circuit level Modeling using Neural Networks with Faster Training Based on Network Sparsity, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 45, 1696-1704, 1997.
80. Bandler, J., et al., New Directions in Model Development for RF-Microwave Components Utilizing Artificial Neural Networks and Space Mapping, *IEEE APS International Symposium Dig.*, Orlando, 2572-2575, July 1999.
81. Watson, P. M., Gupta, K. C., EM-ANN Models for Microstrip Vias and Interconnects in Dataset Circuits, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 44, 2495-2503, 1996.
82. Watson, P. M., Gupta, K. C., Mahajan, R. L., Applications of knowledge-Based Artificial Neural Network Modeling to Microwave components, *International Journal RF Microwave CAE*, 9, 254-260, 1999.
83. Watson, P., Gupta, K. C., EM-ANN Models for Via Interconnects in Microstrip Circuits, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Dig.*, San Francisco, 1819-1822, June 1996.
84. Watson, P. M., Gupta, K. C., Design and Optimization of CPW Circuits Using EM-ANN Models for CPW Components, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 45, 2515-2523, 1997.
85. Watson, P., Creech, G., Gupta, K., Knowledge Based EM-ANN Models for the Design of Wide Bandwidth CPW Patch-Slot Antennas, *IEEE APS International Symposium Dig.*, Orlando, 2588-2591, July 1999.
86. Creech, G. L., et al., Artificial Neural Networks for Accurate Microwave CAD Applications, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Dig.*, San Francisco, 733-736, June 1996.
87. Creech, G. L., et al., Artificial Neural Networks for Fast and Accurate EM-CAD of Microwave Circuits, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 45, 794-802, 1997.

88. Harkouss, Y., et al., Modeling Microwave Devices and Circuits for Telecommunications System Design, Proc. IEEE International Conf. Neural Networks, Anchorage, Alaska, 128-133, May 1998.
89. Litovski, V. B., et al., MOS Transistor Modeling Using Neural Network, Electronic Letters, 28, 1766-1768, 1992.
90. Creech, G. L., Zurada, J. M., Neural Network Modeling of GaAs IC Material and MESFET Device Characteristics, International Journal RF and Microwave CAE, 9, 241-253, 1999.
91. Zaabab, A. H., Zhang, Q. J., Nakhla, M., A Neural Network Modeling Approach to Circuit Optimization and Statistical Design, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 43, 1349-1358, 1995.
92. Garcia, J. A., et al., Modeling MESFET's and HEMTs Intermodulation Distortion Behavior Using A Generalized Radial Basis Function Network, International Journal RF and Microwave CAE, 9, 261-276, 1999.
93. Shirakawa, K., et al., A large-signal characterization of an HEMT Using a Multilayered Network, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 45, 1630-1633, 1997.
94. Shirakawa, K., et al., Structural Determination of Multilayered Large-Signal Neural- Network HEMT Model, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 46, 1367-1375, 1998.
95. Zhang, Q. J., et al., Ultra Fast Neural Models for Analysis of Electro-Optical Interconnects, Proc. IEEE Electronic Components and Tech. Conf., San Jose, 1134-1137, May 1997.
96. Fedi, G., et al., Direct-Coupled Cavity Filters Design Using a Hybrid Feed Forward Neural Network Finite Elements Procedure, International Journal RF and Microwave CAE, 9, 287-296, 1999.
97. Bila, S., et al., An Accurate Wavelet Neural Network Based Model for Electromagnetic Optimization of Microwave Circuits, International Journal RF and Microwave CAE, 9, 297-306, 1999.
98. Burrascano, P., Fiori, S., Mongiardo, M., A Review of Artificial Neural Networks Applications in Microwave Computer-Aided Design, International Journal RF and Microwave CAE, 9, 158-174, 1999.

99. Harkouss, Y., et al., The Use of Artificial Neural Networks in Nonlinear Microwave Devices and Circuits Modeling: An application to Telecommunication System Design, *International Journal RF and Microwave CAE*, 9, 198-215, 1999.
100. Fang, Y., et al., A New Macro Modeling Approach for Nonlinear Microwave Circuits Based on Recurrent Neural Networks, *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Dig.*, Boston, 883-886, June 2000.
101. Washington, G., Aperture Antenna Shape Prediction by Feed Forward Neural Networks, *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 45, 683-688, 1997.
102. Mishra, R. K., Patnaik, A., Neural Network Based CAD Model for the Design of Square-Patch Antennas, *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 46, 1890-1891, 1998.
103. El-Zooghby, A. H., Christodoulou, C. G., Georgiopoulos, M., Neural Network-Based Adaptive Beam Forming for One and Two Dimensional Antenna Arrays, *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 46, 1891-1893, 1998.
104. Charpentier, E., Laurin, J. J., An implementation of A Direction-Finding Antenna for Mobile Communications Using A Neural Network, *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 47(7), 1152-1159, 1999.
105. Sagiroglu, S, Guney, K., Erler, M., Calculation of Bandwidth for Electrically Thin and Thick Rectangular Microstrip Antennas with The Use of Multilayered Perceptrons, *International Journal RF and Microwave CAE*, 9, 277-286, 1999.
106. Chang, P. R., Yang, W. H., Chan, K. K., A Neural Network Approach to MVDR beam forming problem, *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 40, 313-322, 1992.
107. Southall, H. L., Simmers, J. A., O'Donnell, T. H., Direction Finding in Phased Arrays with a Neural Network Beam Former, *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 43, 1369-1374, 1995.
108. Günel T., Combination of Artificial Neural Network Model with Genetic Algorithm for The Synthesis of Microstrip Radial Stub, *AEÜ. International Journal of Electronics and Communications*, 54, 241-243, 2000.
109. Devabhaktuni, V. K., et al., Neural Networks for Microwave Modelling: development Issues and Nonlinear Modeling techniques, John Wiley & Sons, Inc. *International Journal of RF and Microwave CAE*, 11, 4-21, 2001.

110. Yildiz, C., et al., Neural Models for the Resonant Frequency of Electrically Thin and Thick Circular Microstrip Antennas and Characteristic Parameters of Asymmetric Coplanar Waveguides Backed with A Conductor, AEÜ. International Journal of Electronics and Communications, 56(6), 396-406, 2002.
111. Gültekin, S., Çeşitli Tipteki Mikroşerit Antenlerin Karakteristik Parametrelerinin Farklı Algoritmalarla Eğitilen Yapay Sinir Ağları ile Hesaplanması, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2002.
112. Sagioglu, S., Yildiz, C., A Multilayered Perceptron Neural Network for a Microcoplanar Strip-line, Electromagnetics, 22(7), 553-563, 2002.
113. Knorr, B. J., Kuchler, D. K., Analysis of Coupled and Coplanar Strips on Dielectric Substrate, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-23(7), 541-548, 1975.
114. Simons, R. N., Suspended Coupled Slotline Using Double Layer Dielectric, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-29(2), 162-165, 1981.
115. Saraçoğlu, O., Mikroşerit Hatların ve Ortak Düzlemli Dİaga Kılavuzlarının Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2003.
116. Hasnain, G., Dienes, A., Whinnery, J. R., Dispersion of Picosecond Pulses in Coplanar Transmission Lines, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-34, 738-741, 1986.
117. Frankel, M. Y., Gupta, S., Terahertz Attenuation and Dispersion Characteristics of Coplanar Transmission Lines, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-39, 910-916, 1991.
118. Keil, U. D., et al., High-Speed Coplanar Transmission Lines, IEEE Quantum Electron., 28, 2333-2342, 1992.
119. Smythe, R. W., Static and Dynamic Electricity, New York, McGraw-Hill, 1950.
120. Jhanke, E., Emde, F., Tables of Functions Formulae and Curves, 4th Ed., New York, Dover, 1945.
121. Hilberg, W., From Approximations to Exact Relations for Characteristic Impedances, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-17, 259-265, 1969.
122. Shih, Y. C., Itoh, T., Analysis of Coplanar Transmission Lines for Monolithic Integrated Circuits, Electronic Letters, 18(12), 538-540, 1982.

123. Hanna, V. F., Thebault, D., Analysis of asymmetrical coplanar waveguides, *Int. Jour. of Electronics*, 50, 221-224, 1981.
124. Jansen, R., Hybrid Mode Analysis of End Effects of Planar Microwave and Millimeter Wave Transmission Line, *Proc. IEE*, 128, 77-86, 1981.
125. Simons, R. N., Ponchak, G. E., Modeling of Some Coplanar Waveguide Discontinuities, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, MTT-36(12), 1796-1803, 1988.
126. Lyons, M. R., et al., Enhanced Domain Mode Operation of a Shielded Multilayer Coplanar Waveguide Via Substrate Compression, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 41, 1589-1592, 1993.
127. Wang, Y. C., Okoro, J. A., Impedance Calculations for Modified Coplanar Waveguides, *Int. Journal of Electronics*, 68(5), 861-875, 1990.
128. Walker, J. L. B., A Survey of European Activity on Coplanar Waveguide, *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 2, Atlanta, 693-696, June 14-18, 1993.
129. Chen, E., Chou, S. Y., Group Velocities in Coplanar Transmission Lines on Si and Si/SiO₂/Si Substrates Measured Using Differential Electro-Optic Sampling, *Appl. Phys. Letters*, 69, 2861-2863, 1996.
130. Su, H. C., Wong, K. L., Dispersion Characteristics of Cylindrical Coplanar Waveguide, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 44(11), 2120-2122, 1996.
131. Wang, Y. C., Cylindrically Waped Strip and Microstriplines, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 26, 20-23, 1978.
132. Zeng, L. R., Wang, Y. C., Accurate Solutions of Elliptical and Cylindrical Striplines and Microstrips, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 34, 259-265, 1986.
133. Alexopoulos, N. G., Nakatini, A., Cylindrical Substrates Microstrip Line Characterization, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 35, 843-849, 1987.
134. Görür, A., Duyar, M., Karpuz, C., Analytic Formulas for Calculating The Quasi-Static Parameters of a Multilayer Cylindrical Coplanar Strip Line, *Microwave and Optical Technology Letters*, 22(6), 432-436, 1999.
135. Zurada, J. M., *Introduction to Artificial Neural Networks*, West Publishing Company, 1992.

136. Haykin, S., *Neural Networks: A comprehensive Foundation*, New York, USA, Macmillan College Publishing Comp. Inc., 1994.
137. Karna, K. N., Breen, D. M., *An Artificial Neural Network Tutorial: Basics*, *Neural Networks*, 1(1), 4-23, 1989.
138. Simpson, P. S., *Artificial Neural Networks, A Foundation, Paradigm, Applications and Implementation*, Pergamon Pres, 1990.
139. McCulloch, W., Pitts, W., *A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity*, *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5, 115-133, 1943.
140. Widrow, B., Hoff, M. E., *Adaptive Switching Circuits*, In: *Proc. IRE WESCON Convention Record, Part 4*, 96-104, IRE, New York, 1960.
141. Kohonen T., *Correlation Matrix Memories*, *IEEE Transactions on Computers*, 21, 353-359, 1972.
142. Anderson, C., *Learning Problem Solving with Multilayer Connectionist Systems*, Technical Report COINS TR 86-50, University of Massachusetts, Amherst, MA., 1986.
143. Minsky, M. L., Papert, S. A., *Perceptron*, Expanded Edition, Cambridge, MA : MIT Pres., London, 1969.
144. Carpenter, G. A., Grossberg, S., *The ART of Adaptive Pattern Recognition by a Self-Organizing Neural Network*, *Computers*, 1, 77-88, 1988.
145. Hopfield, J. J., *Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities*, In: *Proc. National Academy of Sciences, USA*, 79, 2554-2558, April 1982.
146. Rumelhart, D. E., McClelland, J. L., *Parallel Distributed Processing: Explorations in The Microstructure of Cognition*, 1, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1986.
147. Langari, R., Wang, L., Yen, J., *Radial Basis Function Networks, Regression Weights and the Expectation-Maximization Algorithm*, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybern Part A: Syst. and Humans*, 27(5), 613-623, 1997.
148. Zhang, Q., *Using Wavelet Network in Nonparametric Estimation*, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 8(2), 227-236, 1997.
149. Yang, Z. J., Sagara, S., Tsuji, T., *System Impulse Response Identification Using A Multiresolution Neural Network*, *Automatica*, 33(7), 1345-1350, 1997.

150. Narendra, K. S., Parthasarathy, K., Identification and Control Of Dynamic Systems Using Neural Networks, IEEE Transactions on Neural Networks, 1, 4-27, 1990.
151. Sağıroğlu S., Identification of Linear Dynamic Systems Using Multi-Layered Perceptrons, ISCIS XI, 2, 517-526, 1996.
152. Chen, S., Billings, S. A., Neural Networks for Nonlinear Dynamic System Modeling and Identification, International J. Control, 2, 319-346, 1992.
153. Pham, D.T., Liu, X., Neural Networks for Identification, Prediction and Control, Springer-Verlog, London Limiting, UK, 1995.
154. Pham, D.T., Neural Networks in Engineering, In: Proc. 9th Int. Conf. on Artificial Intelligence in Engineering, Pennsylvania State University, Malvern, July 1984.
155. Elman, J. L., Finding Structure in Time, Cognitive Science, 14(2), 179-211, 1990.
156. Oh., S., H., Improving the Error Backpropagation Algorithm with Modified Error Function, IEEE Trans. on Neural Network, 8(3), 799-802, 1997.
157. Moody, J., Darken, C., Fast-learning in Neural Networks, Neural Computation, 1,281-294, 1989.
158. Powell, M. J. D., Restart Procedures for the Conjugate Gradient Method, Mathematical Programming, 12, 241-254, 1977.
159. Broomhead, D. S., Lowe, D., Multivariable Functional Interpolation and Adaptive Networks, Complex Systems, 2, 321-355, 1988.
160. Riedmiller, M., Braun, H., A Direct Adaptive Method for Faster Backpropagation Learning: The Rprop Algorithm, Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, 1993.
161. Hagan, M. T., Demuth, H. B., Beale, M. H., Neural Network Design, Boston, Ma: Pws Publishing, 1996.
162. Beale E. M., A Derivation of Conjugate Gradients, Numerical Methods for Nonlinear Optimization, London : Academic Press, 1972.
163. Himmelblau, D., M., Applied Non-linear Programming, Mc. Graw Hill, 1972.
164. Jacobs, R. A., Increased Rate of Convergence Through Learning Rate Adaptation, Neural Networks, 1, 295-307, 1988.
165. Neural Ware Handbook, Neural Computing: A Technology Handbook for Professional II/Plus and Neural Networks Explorer, Pittsburg, USA, 1996.

166. Minia, A. A., Williams, R. D., Acceleration of Backpropagation Through Learning Rate Momentum Adaptation, International Joint Conf. on Neural Networks, 1, 676-679, 1990.
167. Levenberg, K., A Method for the Solution of Certain Nonlinear Problems in Least Squares, Quart. Appl. Math., 2, 164-168, 1944.
168. Marquardt, D. W., An Algorithm for Least Squares Estimation of Nonlinear Parameters, J. Soc: Ind. Appl. Math., 11, 431-441, 1963.
169. Mackay, D. J. C., Bayesian Interpolation, Neural Computation, 4(3), 415-447, 1992.
170. Batiti, R., First and Second Order Methods for Learning: Between Steepest Descent and Newton's Method, Neural Computation, 4, 141-166, 1992.
171. Yıldız, C., et. al., Yapay Sinir Ağları İle Sonlu Dielektrik Tabanlı Geleneksel Eş Düzlemli Dalga Kılavuzlarının Quasi-Statik Analizlerinin Gerçekleştirilmesi, Eleco 2002 Elektrik, Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 154-159, Bursa, Aralık 2002.
172. Turkmen, M., Yıldız, C., Sagioglu, S., Neural Model for Conventional Coplanar Waveguides Between Two Dielectric Substrates, 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Istanbul, 11-16 May, 2003.
173. Turkmen, M., Yıldız, C., Sagioglu, S., Neural Models for Characteristics of Top Shielded Multilayered Coplanar Waveguides, International Twelfth Syposium on Artificial Intelligence and Neural Networks, Çanakkale, 02-04 July, 2003.
174. Yıldız, C., et. al., Yapay Sinir Ağları ile Eş Düzlemli Silindirik Dalga Kılavuzlarının Quasi-Statik Analizlerinin Gerçekleştirilmesi, Ursi-Türkiye 2002 Birinci Ulusal Kongresi, 38-41, İstanbul, Eylül 2002.
175. Yıldız, C., Sağiroğlu, Ş., Türkmen, M., Analysing An Asymmetric Cylindrical Coplanar Waveguide With Artificial Neural Networks, Creating the Future 2nd FAE International Symposium, 419-424, Lefke/Cyprus, 06-08 Nov. 2002.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Türkmen, 1978 yılında Kayseri’de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kayseri ve Mersin’deki çeşitli okullarda tamamladı. 1996 yılında girdiği Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde bir yıl İngilizce hazırlık sınıfı dahil olmak üzere beş yıl öğrenim görerek 2001 yılı Temmuz ayında mühendis ünvanını almaya hak kazandı. Aynı yıl Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans eğitime başladı. 2001 yılı sonunda Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başlayan Mustafa Türkmen, halen bu kadroda görevine devam etmektedir.

Tel : 0 352 437 4901 / 32278

Fax : 0 352 437 5784

E-posta : turkmen@erciyes.edu.tr

Adres : Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik Mühendisliği
Bölümü, 38039, Melikgazi / Kayseri