T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEĞİŞİK KESİTLİ EŞDÜZLEMSEL İLETİM HATLARININ KONFORMAL DÖNÜŞÜM TEKNİĞİ KULLANILARAK ANALİZİ

Mehmet DUYAR

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

Konya, 2006

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEĞİŞİK KESİTLİ EŞDÜZLEMSEL İLETİM HATLARININ KONFORMAL DÖNÜŞÜM TEKNİĞİ KULLANILARAK ANALİZİ

Mehmet DUYAR

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

Bu tez, 26/07/2006 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

……...…	……..…..……	……..……
Prof.Dr.Mehmet BAYRAK	Prof.Dr.Erdem YAZGAN	Yrd.Doç.Dr.Yüksel ÖZBAY
(Danışman)	(Üye)	(Üye)

……..…..……...……	……..……...
Yrd.Doç.Dr. Ercan YALDIZ	Yrd.Doç.Dr. Musa AYDIN
(Üye)	(Üye)

ÖZET

Doktora Tezi

DEĞİŞİK KESİTLİ EŞDÜZLEMSEL İLETİM HATLARININ KONFORMAL DÖNÜŞÜM TEKNİĞİ KULLANILARAK ANALİZİ

Mehmet DUYAR

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman:Prof. Dr. Mehmet BAYRAK

2006, 233 sayfa

Jüri: Prof. Dr. Mehmet BAYRAK
Prof. Dr. Erdem YAZGAN
Yrd.Doç.Dr. Yüksel ÖZBAY
Yrd.Doç.Dr. Ercan YALDIZ
Yrd.Doç.Dr. Musa AYDIN

Günümüzde kullanılan elektronik düzenekler, çok yüksek frekanslarda verimli bir şekilde çalışabilmektedir. Yüksek frekanslarda, işaretin doğruluğunu kaybetmemek amacıyla devre elemanlarının birbirleri ile ve kullanılan iletim hattı ile doğru olarak birleştirilmesi zorunludur.

Son zamanlarda, şerit ve mikroşerit yapılara ciddi bir alternatif oluşturan eşdüzlemli iletim hatları, çeşitli üretim yöntemleriyle uyumlu ve elektronik düzeneklerle birlikte kullanılabilir olmalarından dolayı, milimetrik-dalga ve mikrodalga entegre devre uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Eşdüzlemli iletim hatları içerisinde en popüler olanları, CPW, CPS'ler ve CPW'lerin farklı geometrideki kuplajlı konfigürasyonlarıdır.

Günümüzde, uydu, mobil ve telsiz haberleşmeleri ile navigasyon ve benzeri sistemlerde kullanılmak üzere, monte edileceği yüzeylere göre değişim gösteren farklı kesitlere sahip iletim hatlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, söz konusu sistemler için düzlemsel kesitli iletim hatlarına ek olarak silindirik, eliptik ve yay kesitli iletim hatlarının tasarımları ve bunların CAD uyumlu analizlerinin doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi pratikte büyük önem taşımaktadır. Çünkü, MIC ve MMIC'lerde, hassas olarak karakterize edilmiş düzeneklere ihtiyaç vardır.

Yukarıda özet olarak verilen ihtiyaçlar doğrultusunda yapılan bu çalışmada, farklı geometrik kesitli eşdüzlemli iletim hatlarının tasarımları yapılmıştır. Tasarımı yapılan iletim hatlarının elektriksel karakteristikleri, quasi-statik yaklaşımı içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak CAD uyumlu analitik bağıntılar formunda elde edilmiştir.

İlk olarak tasarımı yapılan iletim hatları; tam ekranlı kuplajlı CPW, tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW ile toprak düzlemlere dikey iletken ilaveli CPW yapılarıdır.

İkinci olarak tasarımı gerçekleştirilen iletim hatları; sonlu yanal toprak düzlemli kuplajlı CPW, eliptik kesitli kuplajlı CPW, sonlu yanal toprak düzlemli hattan hatta kuplajlı CPW ile eliptik ve silindirik kesitli hattan hatta kuplajlı CPW yapılarıdır.

Üçüncü olarak tasarlanan iletim hatları; yay kesitli CPW, yay kesitli CPS ile yay kesitli iletken destekli CPW yapılarıdır.

Dördüncü olarak tasarlanan iletim hattı; konvansiyonel CPW yapısına göre daha esnek bir geometriye sahip olan tam asimetrik CPW yapısıdır. Bu yapının elektriksel karakteristikleri, iletken kayıplarını da kapsayacak şekilde elde edilmiştir.

Son olarak tasarımı yapılan iletim hatları; eliptik ve silindirik kesitli CPW ile eliptik ve silindirik kesitli CPS yapılarıdır. Bu yapıların tasarımları sonlu iletken kalınlıklı olarak yapılmış olup, yapıların elektriksel karakteristikleri iletken kayıplarını da kapsayacak şekilde elde edilmiştir.

Bu çalışmada tasarlanan eşdüzlemli yapıların elektriksel karakteristiklerini elde etmek için türetilen analitik bağıntıların geçerliliği, Sonnet simülasyon programı, yüksek doğruluk değerlerine sahip tam dalga analiz yöntemleri ve quasi-statik analiz yöntemleriyle karşılaştırma yapılarak kanıtlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Eşdüzlemli İletim Hattı, Eşdüzlemli Dalga Kılavuzu, Eşdüzlemli Şerit Hat, Konformal Dönüşüm Tekniği, Mikrodalga Entegre Devre, CAD, MIC, MMIC.

Bu doktora tez çalışması, **105 E 022 nolu TÜBİTAK Araştırma Projesi** tarafından desteklenmiştir.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

ANALYSIS OF DIFFERRING CROSS SECTIONAL COPLANAR TRANSMISSION LINES BY CONFORMAL TRANSFORMATION TECHNIQUE

Mehmet DUYAR

Selçuk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical – Electronics Engineering

Supervisor:Prof. Dr. Mehmet BAYRAK

2006, 233 pages

Jury: Prof. Dr. Mehmet BAYRAK
Prof. Dr. Erdem YAZGAN
Yrd.Doç.Dr. Yüksel ÖZBAY
Yrd.Doç.Dr. Ercan YALDIZ
Yrd.Doç.Dr. Musa AYDIN

The electronics systems used today can work efficiently at very high frequencies. At higher frequencies, to obtain the appropriate transmission of the signal, the circuit components employed in the system must be properly integrated each other and an efficient transmission line must be employed.

Recently, coplanar transmission lines have been widely used for both the millimetric-wave and the microwave integrated circuit applications. This is because, the coplanar transmission lines can appropriatelly be produced using different techniques in the practice. Also, They can easily be attached to the other related electronic systems and their integration to the systems reflects a good alternative to

those of the strip and/or microstrip transmission lines. Most populer coplanar transmission lines used in practice are conventional CPW's, CPS's and CPW's having differring geometrical coupled configuration.

To use in satellite, mobile, wireless communications as well as in navigations and other similar systems; transmission lines with different cross sectional configurations are needed for properly overlaping the related surface geometries. Thus, in addition to the above mentioned planar transmission lines; design and CAD oriented analysis of cylindrical, elliptical and arc shaped transmission lines play also an important role in the practical applications. This is because MIC and MMIC structures need very sensitively characterized equipments.

Therefore, the aim of this thesis was firstly to design transmission line having differring geometrical cross sectional constructions, secondly to analys them employing the Conformal Transformations Techniques in the form of CAD oriented analytical expressions as mentioned above.

In this thesis the following research works have been undertaken and reported;

- Completely Shielded Coupled CPW, Completely Shielded Broad-side Coupled CPW and CPW with Vertical Conductors Added to Ground Planes type structure were designed and analyzed.
- Coupled CPW with Finite Ground Planes, Elliptical Coupled CPW, Line-to-Line Coupled CPW with Finite Ground Planes and also Line-to-Line Coupled Elliptical as well as cylindrical CPW's were designed and analyzed.
- Arc-shaped CPW, Arc-sahaped CPS and also Arc-shaped Conductor-backed CPW structures were designed and analyzed.
- An asymmetrical CPW structure was designed and its electrical parameters including conductor losses were obtained.
- CPW and CPS structures both having elliptical and cylindrical cross sections were designed and their electrical parameters including conductor losses were obtained.

All the analytical expressions obtained in this thesis for the coplanar transmission lines in order to calculate their electrical parameters were truly verified by comparing the appropriate results obtained from those of the SONNET EM simulation program, most commonly used Full-wave analysis method and the Quasi-static analysis methods, respectively.

Key Words: Coplanar Transmission Line, Coplanar Waveguide, Coplanar Stripline, Conformal Transformation Technique, Microwave Integrated Circuits, CAD-oriented, MIC, MMIC.

The research work undertaken in this thesis has been supported by **TUBITAK Project number 105 E 022**.

ÖNSÖZ

Bir çok araştırmacı tarafından eşdüzlemli iletim hatlarının tasarımı, modellenmesi ve analizleri üzerinde yapılan yoğun çalışmalar, günümüzde de büyük bir hızla devam etmektedir. Söz konusu çalışmalar ile tasarımı ve modellenmesi yapılan eşdüzlemli iletim hatları, RF/Mikrodalga haberleşme sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Literatürde, sağlam ve köklü bir şekilde yer edinen şerit, mikroşerit ve eşdüzlemli iletim hatları, bugünün Mikrodalga Mühendisliği kitaplarında yerini almıştır. Ülkemizde ise, eşdüzlemli iletim hatlarının tasarımı, modellenmesi, analizi ve uygulaması ile ilgili çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır.

Bu nedenle, yapılan bu tez çalışmasının literatüre bir yenilik ve açılım getireceği ve aynı zamanda ulusal ve uluslararası araştırmalara bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasının bilime katkısı, SCI'ye giren "IEEE Transactions on Microwave Theory And Techniques", "Microwave and Optical Technology Letters" gibi uluslararası dergilerde yapılan yayınlarla pekiştirilmeye çalışılmıştır (Duyar ve ark. 2006).

Doktora çalışması süresince her zaman olumlu yaklaşım ve katkılarıyla desteğini benden esirgemeyen tez danışmanım **Prof.Dr. Mehmet BAYRAK**'a, bilgisi, tecrübesi ve engin hoşgörüsüyle çalışmalarıma yön veren ve açılım kazandıran **Prof.Dr. Erdem YAZGAN**'a, bu konularda çalışmama vesile olan Yüksek Lisans tez danışmanım **Prof.Dr. Adnan GÖRÜR**'e, tez çalışması boyunca beni cesaretlendiren ve teşvik eden **Prof.Dr. Sefa ERTÜRK**'e, çalışmalarım süresince yardımlarını benden esirgemeyen **Yrd.Doç.Dr. Ceyhun KARPUZ**, **Yrd.Doç.Dr. Yusuf Erkan YENİCE**, **Arş.Gör. Volkan AKAN** ile **Dr. Selman TEZEKİCİ**'ye ve emeği geçen tüm arkadaşlarıma, ayrıca; her zaman maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen eşim **Arzu** ile çalışmalarım süresince kendisine yeterli zaman ayıramadığım biricik oğlum **Fatih Burkay**'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu Doktora tez çalışması, 2005 yılında genç yaşta ani olarak aramızdan ayrılan **Yrd.Doç.Dr. Selma ARICAN**'nın hatırasına adanmıştır.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ……iii

ABSTRACT ……...v

ÖNSÖZ ……...…vii

İÇİNDEKİLER ……viii

SİMGELER VE KISALTMALAR ……...xi

1.GİRİŞ ……1

1.1. Tezin Amacı ve Yapılandırılması ……7

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI ……..……10

2.1. Konvansiyonel Eşdüzlemli İletim Hatları ……..……..10

2.2. Tam Ekranlı Eşdüzlemli İletim Hatları ……..……...14

2.3. Eliptik ve Silindirik Kesitli Eşdüzlemli İletim Hatları …….……...15

2.4. Yay Kesitli Eşdüzlemli İletim Hatları ……..…….……17

2.5. Sonlu İletken Kalınlıklı Eşdüzlemli İletim Hatları ……..……18

3. EŞDÜZLEMLİ İLETİM HATLARI …….……22

3.1. Eşdüzlemli İletim Hattı Analiz Teknikleri ve Elektriksel Karakteristikleri ….24

3.2. Konformal Dönüşüm Tekniği ve Schwarz-Christoffel Dönüşümü ……26

3.3. Kuplajlı İletim Hatları ……...29

3.3.1. Kuplajlı hat teorisi ……..30

4. TAM EKRANLI KUPLAJLI İLETİM HATLARININ TASARIMI VE ANALİZİ ...……..33

4.1. Tam Ekranlı Kuplajlı CPW'nin Analizi ……...35

4.1.1. Tek (Odd) mod durumu için analiz ……...…….36

4.1.2. Çift (Even) mod durumu için analiz ……..39

4.1.3. Tam ekranlı kuplajlı CPW için nümerik sonuçlar ve tartışmalar ……..41

4.2. Tam Ekranlı Geniş-Yanlı Kuplajlı CPW'nin Analizi ……...49

4.2.1. Tek (Odd) mod durumu için analiz ……...…….50
4.2.2. Çift (Even) mod durumu için analiz ……..52
4.2.3. Tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW yapısı için nümerik sonuçlar ve tartışmalar ……..55
4.3. Toprak Düzlemlere Dikey İletken İlaveli Yeni Tip CPW'lerin Analizi ….....64
4.3.1. Alt ve üst toprak düzlemlere dikey iletken ilaveli CPW'nin analizi …….65
4.3.2. Alt toprak düzleme dikey iletken ilaveli CPW'nin analizi ……67
4.3.3 Toprak düzlemlere dikey iletken ilaveli CPW yapıları için nümerik sonuçlar ve tartışmalar ……69

5. DÜZLEMSEL, SİLİNDİRİK VE ELİPTİK KESİTLİ KUPLAJLI İLETİM HATLARININ TASARIMI VE ANALİZİ …….……73
5.1. Sonlu Dielektrik Taban Kalınlıklı ve Sonlu Toprak Düzlem Genişlikli Kuplajlı CPW'nin Analizi …….76
5.1.1. Tek (Odd) mod durumu için analiz ……77
5.1.2. Çift (Even) mod durumu için analiz ……..82
5.1.3. Eliptik kesitli kuplajlı CPW'nin analizi ……..……...87
5.1.4. Düzlemsel, eliptik ve silindirik kesitli kuplajlı CPW için nümerik sonuçlar ve tartışmalar ……...……89
5.2. Sonlu Dielektrik Taban Kalınlıklı ve Sonlu Toprak Düzlem Genişlikli Hattan Hatta Kuplajlı CPW'nin Analizi …….100
5.2.1. Tek (Odd) mod durumu içi analiz ……..……..101
5.2.2. Çift (Even) mod durumu için analiz ……106
5.2.3. Eliptik ve silindirik kesitli hattan hatta kuplajlı CPW'nin analizi ……..…..111
5.2.4. Düzlemsel, eliptik ve silindirik kesitli hattan hatta kuplajlı CPW için nümerik sonuçlar ve tartışmalar …….114

6. YENİ BİR TİP OLARAK TASARIMLANAN YAY KESİTLİ CPW VE CPS İLETİM HATLARININ ANALİZİ …….123
6.1. Yay Kesitli CPW'nin Analizi …….……125
6.1.1. Yay kesitli CPW için nümerik sonuçlar ve tartışmalar ……..…….....130
6.2. Yay Kesitli CPS'nin Analizi …….……..135

6.2.2. Yay kesitli CPS için nümerik sonuçlar ve tartışmalar ….……..139
6.3. Yay Kesitli İletken Destekli CPW'nin Analizi …….……145
6.3.2. Yay kesitli iletken destekli CPW için nümerik sonuçlar ve tartışmalar ….150

7. EŞDÜZLEMLİ İLETİM HATLARININ İLETKEN KAYIP ANALİZİ ..155
7.1. Tam Asimetrik CPW'nin İletken Kayıp Analizi ……158
7.1.1. Tam asimetrik CPW için nümerik sonuçlar ve tartışmalar …….176

8. ELİPTİK VE SİLİNDİRİK KESİTLİ CPW VE CPS İLETİM HATLARININ İLETKEN KAYIP ANALİZİ ……..…184
8.1. Eliptik ve Silindirik Kesitli CPW Yapıları İçin İletken Kayıp Analizi ...…..185
8.1.1. Eliptik ve silindirik kesitli CPW yapılarının iletken kayıp analizi için nümerik sonuçlar ve tartışmalar …….193
8.2. Eliptik ve Silindirik Kesitli CPS Yapıları İçin İletken Kayıp Analizi ….…..199
8.2.1. Eliptik ve silindirik kesitli CPS yapılarının iletken kayıp analizi için nümerik sonuçlar ve tartışmalar ……..207

9.YAPILAN ANALİZLERLE İLGİLİ GENEL TARTIŞMALAR ……..212

10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER ……..220
10.1. Sonuçlar ……..…..220
10.2. Öneriler ……..…..222

11. KAYNAKLAR ……...223

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler :

Z_0 : Karakteristik empedans

ε_{eff} : Efektif dielektrik sabiti

$\varepsilon_{eff\,(çift)}$: Çift mod efektif dielektrik sabiti

$\varepsilon_{eff\,(tek)}$: Tek mod efektif dielektrik sabiti

ε_r : Bağıl dielektrik sabiti

ε_0 : Serbest ortam dielektrik sabiti

μ_0 : Serbest ortam magnetik geçirgenlik katsayısı

$C_{çift}$: Çift mod toplam hat kapasitesi

C_{tek} : Tek mod toplam hat kapasitesi

C_0 : Serbest ortam (hava) kapasitesi

C_d : Dielektrik ortam kapasitesi

L : İndüktans

V_f : Faz Hızı

c_0 : Serbest ortam ışık hızı

α_c : İletken zayıflaması

α_0 : Serbest ortam iletken zayıflaması

α_d : Dielektrik ortam zayıflaması

I : Akım

R_s : Yüzey rezistansı

J : Akım yoğunluğu

f : Frekans

w : Açısal frekans

δ : Deri kalınlığı

σ : Öz iletkenlik katsayısı

$F(\phi,k)$: I. nevi tam olmayan eliptik integral

$K(k)$: I. nevi tam eliptik integral

k : I. nevi tam eliptik integral modülü

k' : I. nevi tam eliptik integral bütünleyen modülü

t : Eşdüzlemli iletim hattı iletken metal kalınlığı

q : Efektif dielektrik bağıntısı için dolgu faktörü

Δ : İletken kayıp hesaplamaları için durdurma mesafesi

λ_0 : Serbest ortam dalga boyu

e : Eliptik kesitli yapılar için eksantrisite katsayısı

K : Kuplaj katsayısı

Q : Kalite faktörü

Kısaltmalar :

MIC : Mikrodalga entegre devresi (Microwave integrated circuits)

M MIC : Monolitik mikrodalga entegre devresi (Monolithic microwave integrated circuits)

H MIC : Hibrid mikrodalga entegre devresi (Hybrid microwave integrated circuits)

CAD : Bilgisayar destekli tasarım (Computer aided design)

CPW : Eşdüzlemli dalga kılavuzu (Coplanar waveguide)

CPS : Eşdüzlemli şerit hat (Coplanar strip line)

C CPW : Kuplajlı eşdüzlemli dalga kılavuzu (Coupling coplanar waveguide)

GaAs: : Galyum arsenit (Gallium arsenide)

FEM : Sonlu elemanlar yöntemi (Finite element method)

FDTD : Sonlu farklar zaman domeni (Finite difference time domain)

SDM : Spektral domen yaklaşımı (Spectral domain approach)

TEM : TEM modu (Transverse electric magnetic)

MIMO : Çok girişli çok çıkışlı (Multiple input multiple output)

RF : Radyo Frekans (Radio frequency)

DEOS : Diferansiyel elektro-optik örnekleme (Differential electro-optic sampling)

1. GİRİŞ

Elektromagnetik enerjinin transferinde kullanılan dalga kılavuzunun keşfi ve gelişimi, Mikrodalga Mühendisliği tarihinde meydana gelen en önemli olaylardan biridir. Günümüz Mikrodalga Mühendisliği uygulamalarında, "Mikrodalga Devreleri" ile "Dalga Kılavuzu Devreleri" çoğu kez aynı anlamda kullanılmaktadır. 1930'lu yıllarda dalga kılavuzu, mikrodalga frekanslardaki işaret iletimi için uygun bir iletim hattı olarak düşünülmüştür. Dalga kılavuzları üzerinde yapılan ilk çalışmalar, Bell telefon laboratuarında gerçekleştirilmiştir. Modern dalga kılavuzu devrelerinin geliştirilmesindeki temel amaç, mikrodalga gücünün dalga kılavuzu vasıtasıyla bir kaynaktan etkin bir şekilde alınması ve alıcı yük tarafına yönlendirilmesidir. Bu durum, yürüyen dalgalı dedektörler, frekansmetre ve sonlandırma elemanları gibi çeşitli mikrodalga devre elemanlarının gelişmesini sağlamıştır (Pozar 1993).

II. Dünya Savaşı yıllarında, dalga kılavuzu ve koaksiyel TEM hatlar, mikrodalga devrelerin gelişiminde sıkça kullanılan iki temel iletim hattı olarak ortaya çıkmıştır. Dalga kılavuzları yüksek Q (kalite faktörü)'lu boşluk rezonatörleri için, düşük kayıplı yüksek güç kapasitesi sağlamıştır. Koaksiyel hatlar, dispersiyon etkileri olmadığından dolayı, doğal olarak geniş bir band aralığında kullanılabilmektedir ve ayrıca empedans kavramı koaksiyel hatlarda kolayca izah edilmiştir. Bu iki tip iletim hattı, mikrodalga devreleri için önemli devre elemanları olarak yer edinmiş olup, özelliklerinden dolayı çoğu zaman birbirini bütünleyici eşdeğer yapılar olarak kabul edilmişlerdir.

İki-iletkenli iletim hat teorisinin özel bir adaptasyonundan meydana gelen çok yararlı mikrodalga teknikleri bu aşamada ortaya çıkmıştır. İletken kaplı iki dielektrik plaka arasına ince bir iletken şeridin yerleştirilmesinden meydan gelen şerit hatlar, 1950'li yılların başında Barrett ve Barnes tarafından tasarlanmıştır. Şerit hat teknikleri ilk olarak, baskı devre için geliştirilen bakır kaplı levhaların kullanılmasıyla ortaya çıkmıştır. Şerit hat elektriksel karakteristiklerinin detaylı bir şekilde hesaplanması, ilk olarak 1950'li yılların ortasında Peters ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Şerit iletim hattının en önemli özelliği, hat karakteristik

empedansının merkez şerit aralığı ile kolay bir şekilde kontrol edilmesidir. Şerit hat devre konfigürasyonunun iki boyutlu yapısı, dış iletken korumaların kesilmesine gerek kalmadan, bir çok elemanın ara bağlantısına ve giriş çıkış portlarının rahat bir şekilde yerleştirilmesine imkan sağlar (Karpuz 1995).

1950'li yıllarda, bir başka tip iletim hattı olarak, dielektrik tabanın bir yüzeyine iletken bir şerit yerleştirilmesiyle ve diğer yüzeyine ise, tamamen iletken kaplama yapılmasıyla elde edilen mikroşerit yapılar tasarlanmıştır. Mikroşerit yapılarda ışımanın sebep olduğu birim uzunluk başına düşen kaybın yüksek olması ve düşük dielektrik sabitli taban malzemelere (yaklaşık ε_r=2,5) ihtiyaç duyulması nedeniyle, uygulamada mikrodalga kullanımı için pek kabul görmemiştir. Ancak, sonraki gelişmeler, işlem ve üretim aşamasındaki zorlukları büyük boyutta ortadan kaldırmış ve düşük kayıplı yüksek dielektrik sabitli malzemelerin kullanımına imkan tanımıştır.

Mikroşerit yapının elektriksel karakteristiklerini elde etmek için, Konformal Dönüşüm Tekniğine dayalı kapsamlı bir analiz, ilk olarak 1960'lı yıllarda Wheeler tarafından yapılmıştır. Düşük kayıplı, yüksek dielektrik sabitli malzemeler ve metalik film yoğunlaştırılması ile ilgili teknolojik gelişmeler, mikroşerit hatların kullanımını yaygınlaştırmıştır (Karpuz 1995).

Mikrodalga yarı iletken elemanlar, ince film yoğunlaştırma ve fotolitografi tekniğindeki hızlı gelişmelerle birlikte MIC (Microwave Integrated Circuits: Mikrodalga Entegre Devreleri) teknolojisi doğmuştur (Frey 1974). MIC'ler, hibrid entegre devre teknolojisinin mikrodalga frekanslara genişletilmesini sağlamıştır. Günümüzde MIC'ler, çoğunlukla seramik veya dielektrik taban üzerinde yoğunlaştırılmış iletken modeller (paternler) şeklindeki devreleri, pasif elemanları ve ayrıca çip formunda özel olarak tasarlanmış paketler şeklindeki devrelerle monte edilmiş aktif elemanları içerir. MIC'lerde mikroşerit yapıların yanısıra, yarık hat (slot line) ve eşdüzlemli dalga kılavuzu (CPW: Coplanar Waveguide) gibi diğer tip iletim hatları da kullanılmaktadır (Cohn 1969, Gupta ve ark. 1996).

Şerit, mikroşerit ve CPW'ler, MIC'lerin özünü oluşturmakta ve bu tür yapılar beklenilen devre fonksiyonlarını elde etmek amacıyla ya tek başlarına birer iletim hattı olarak, ya da bunların birleştirildiği grup devreleri olarak kullanılmaktadırlar (Akan 2003).

Mikrodalga devrelerdeki diğer bir eğilim, toplu elemanların kullanılmasıdır. Kapasitör ve indüktör gibi toplu elemanların boyutları, fotolitografi ve ince film teknikleri kullanılarak küçültülebilir ve bu elemanlarla J-Band frekanslarında kullanılabilen yapılar dahi dizayn edilebilir (Aitchison ve ark. 1971). Toplu elemanların dielektrik tabanlar üzerine monte edilmiş çip formundaki yarı iletken elemanlarla birlikte kullanımı, MIC'ler için cazip bir seçenektir ve bu durum maliyeti % 50 oranında düşürmüştür. Boyut indirgeme özelliklerinin yanısıra, düşük frekanslarda geliştirilmiş olan devre tasarımı ve optimizasyon tekniklerinin doğrudan mikrodalga frekans bandında da kullanılabilmesi, toplu elemanların bir diğer avantajı olarak karşımıza çıkmaktadır (Karpuz 1995).

Toplu elemanlar ve tek-boyutlu iletim hattı elemanlarına ek olarak, mikrodalga devrelerinde kullanılmak üzere iki boyutlu düzlemsel elamanlar da tasarlanmıştır (Okishi ve Miyoshi 1972). Bu elemanlar, şerit ve mikroşerit iletim hatlarıyla iyi bir uyum sağlamakta ve MIC devre tasarımı için de yararlı bir seçenek oluşturmaktadır.

MIC'lerin bir sonraki aşaması, yarı iletken tabanlar üzerinde gerçekleştirilen hibrid mikrodalga entegre devreleri (Hybrid MIC:Hybrid Microwave Integrated Circuit) ile monolitik mikrodalga entegre devreleri (MMIC:Monolithic Microwave Integrated Circuit) olmuştur (Mehali ve Wacker 1968). Hibrid MIC'ler, devre yüzeylerinin dielektrik tabanı üzerine bazı yoğunlaştırma tekniklerinin uygulandığı düzlemsel devreleri temsil etmektedir. Transistör gibi katı-hal devre elemanları ile kapasitans gibi diğer pasif devre elemanları hariç olmak üzere, Hibrid MIC'lerde kullanılan iletken şerit düzlemler, dielektrik taban üzerine monte edilmiştir. Burada, katı-hal devre elemanları ile pasif devre elemanları farklı bileşenler olup, bu elemanların iletim hatlarına bağlantıları, birbirlerine yapıştırılarak, lehimlenerek veya iletken epoksi tekniği kullanılarak yapılmaktadır. (Akan 2003).

Monolitik MIC'lerde (MMIC) kullanılan yarı iletken tabanlar, yüksek rezistiviteli bir silikon ve galyum arsenit tabaka ile bir silisyum dioksit ve düşük rezistiviteli bir silikon tabakadan oluşur. Yapılan çalışmalar, GaAs teknolojisinin MMIC'ler için temel öneme sahip olduğunu ve GaAs MESFET'lerin yüksek band genişliğine sahip analog kuvvetlendiricilerde ve yüksek hızlı dijital entegre devrelerde önemli bir rol oynadığını göstermektedir (IEEE T. Microw Theory 1976).

Hibrid veya Monolitik MIC'ler, alçak frekans entegre devreleriyle hemen hemen aynı avantajları sunmaktadır. Bu avantajlar; geliştirilmiş sistem güvenirliği, büyük oranda standartlaştırma, düşük maliyet, küçültülmüş hacim ve ağırlık şeklinde ifade edilebilir (Gupta ve ark. 1996).

Bilindiği gibi, hem sivil hem de askeri amaçlı MIC ve MMIC uygulamalarında son yıllarda hızlı bir ilerleme meydana gelmiştir. Günümüzde kullanılan değişik elektronik düzenler, 100 GHz ve daha yüksek frekanslarda verimli bir şekilde çalışabilmektedir. Yüksek frekanslarda, işaretin doğruluğunu kaybetmemek amacıyla devre elemanlarının birleştirilmesi ve işaret iletimi için bir iletim hattının kullanılması zorunludur. İletim hattı olarak kullanılan seçenekler arasında, şerit hat ile mikroşerit hattın yanı sıra, yarık hat, CPW ve CPS'lerden oluşan eşdüzlemli iletim hatları ile bu hatların kuplajlı konfigürasyonları önemli bir yer tutmaktadır. Eşdüzlemli iletim hatları; çeşitli imalat yöntemleriyle uyumlu olmaları ve elektronik düzeneklerle birlikte kullanılabilirliklerinden dolayı uygulamada cazip hale gelmiştir. Eşdüzlemli iletim hatları, yüksek hızdaki işaret karakterizasyonları ve MMIC'ler için önemli elemanlardır.

MMIC tasarımı için mikroşerit ve eşdüzlemli (coplanar) yaklaşım, yaklaşık olarak son otuz yıl içerisinde iki alternatif yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Mikroşerit yapılarda, hat yapısının doğası gereği, yüksek frekanslardaki birim uzunluk başına düşen ışıma kayıplarının yüksek oluşu, araştırmacıların ilgisini eşdüzlemli iletim hatlarına çekmiştir. Eşdüzlemli iletim hatlarına olan bu ilgi, çeşitli konfigürasyonlarda bu tip iletim hatlarının quasi-TEM parametrelerinin elde edilmesi için, analitik yaklaşımların yapılmasını ve CAD (CAD:Computer Aided Design: Bilgisayar Destekli Tasarım) uyumlu modellerin gelişmesini sağlamıştır (Ghione 1993).

Düzlemsel kesitli iletim hatlarının yanısıra, eliptik ve silindirik kesitli iletim hatları, günümüzde; uzay aracı, roket, ve telsiz haberleşmesi uygulamalarında kullanılan yeni tip antenler ve bu antenlerin besleme devreleri için ilgi odağı oluşturmaktadır. Eşdüzlemli iletim hatları, temel olarak düşük güçlü devrelerde önemli uygulama alanları bulmakla birlikte, elektrooptik modülatörlerde de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu duruma bağlı olarak, eşdüzlemli iletim hatlarının kullanıldığı elektrooptik modülatörler de geliştirilmiştir. Ayrıca, bu tip hatların

kuplajlı konfigürasyonları filtre, yönlü kuplör ve empedans uygunlama devrelerinde de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Günümüz MIC ve MMIC teknolojisindeki hızlı gelişmelerin paralelinde ortaya çıkabilecek teknik ve teknolojik problemlere bir çözüm bulmak amacıyla, yeni tip iletim hatları tasarlanmalı ve bu hatların analizleri, doğru sonuçlar veren analiz yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmelidir. Çünkü, MIC ve MMIC'lerde, hassas olarak karakterize edilmiş düzenlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, MIC ve MMIC'lerde kullanılan devreler daha düzenli ve hassas bir şekilde tasarlanmak zorundadır. Söz konusu problemleri gidermek için, simülasyon ve optimizasyon teknikleri ile CAD paketlerinin kullanımı zorunlu hale gelmiştir.

Bilindiği üzere, iletim hatlarının elektriksel karakteristiklerinin teorik hesaplamalarında, tam dalga veya quasi-statik yaklaşım yapılarak analizler gerçekleştirilir. Tam dalga yaklaşımı yapılarak gerçekleştirilen analiz yöntemlerinde, nümerik hesaplamalar uzun zaman aldığından dolayı, iletim hatlarının elektriksel karakteristiklerinin teorik hesaplamalarında, genellikle kapalı-form analitik formüller içeren quasi-statik yaklaşım tercih edilmektedir. İletim hatlarının elektriksel karakteristiklerinin hesaplanması için, quasi-statik yaklaşımı içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak elde edilen kapalı-form analitik ifadeler, CAD-uyumlu tasarım araçlarında kullanılmak için mükemmel bir seçenektir.

Literatürde, konvansiyonel eşdüzlemli iletim hatlarının yanı sıra, tam ekranlı eşdüzlemli iletim hatlarının tasarımlarına da sıklıkla rastlanmaktadır. Konvansiyonel iletim hatlarına göre, düzlemsel kuplajlı iletim hatlarının ekranlanmış konfigürasyonları, iletim hattı yapılarına bir çok avantajlar sağlamaktadır. Bu avantajlar; iletim hattının toprak düzlemlerini aynı potansiyelde tutması, ışıma kayıplarını büyük ölçüde azaltması, devreyi dıştan gelebilecek mekanik bozulmalara karşı koruması, elektromagnetik girişimlerden dolayı devreye dışarıdan gelebilecek gürültüleri önemli ölçüde yok etmesi ve devrenin ortalama güç taşıma kapasitesini arttırması şeklinde ifade edilebilir.

Günümüzde, mobil haberleşmesi ve navigasyon sistemlerinde; taşıt, hava aracı, roket ve uyduların yüzeylerine monte edilebilen elemanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Çeşitli yüzeylere monte edilebilen bu elemanlar, değişik geometrik şekillere sahip olmak zorundadır. Bu tür problemlerin üstesinden gelebilmek için,

düzlemsel kesitli iletim hatlarına göre, daha esnek bir uygulama alanı bulabileceği düşünülen eliptik, silindirik ve yay kesitli iletim hatlarının tasarımları ve bu tasarımların matematiksel analizlerinin doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Literatürde, gerek düzlemsel iletim hatları, gerekse düzlemsel kuplajlı iletim hatlarının silindirik ve eliptik kesitli konfigürasyonları ile ilgili olarak halen doyurucu bilgi bulunmamaktadır. Silindirik ve eliptik kesitli iletim hatlarıyla ilgili çalışmalar sınırlı sayıda olsa da, günümüz MIC ve MMIC uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu tip iletim hatlarının tasarımları ve analizleri ile ilgili çalışmaların artması, günümüz MMIC teknolojisi açısından önemli bir konudur.

Günümüzde bir çok araştırmacı, düzlemsel CPW ve CPS iletim hatları ile bu yapıların eliptik ve silindirik kesitli tasarımlarının analizinde şerit iletkenleri sonsuz ince kalınlıklı olarak kabul etmiş ve bu kabule dayalı olarak iletim hattının analizini gerçekleştirmişlerdir. Oysa, mikrodalga iletim hattı uygulamalarında sıkça kullanılan ve belirli bir iletken kalınlığına sahip CPW ve CPS iletim hatlarında, şerit metal iletkenlerin neden olduğu bir iletken zayıflaması söz konusudur. Şerit iletkenlerde oluşan iletken kayıplarının hesaplanması, mikrodalga devreleri için önemli bir konudur. Gerek şerit ve mikroşerit iletim hatlarında, gerekse eşdüzlemli iletim hatlarında meydana gelen iletken kayıpları, hem tam dalga analiz yöntemleri, hem de quasi-statik analiz yöntemleri kullanılarak hesaplanabilir. Oldukça karmaşık ve uzun işlemler gerektiren tam dalga analiz yöntemi ile gerçekleştirilen analizlerin en büyük dezavantajı, iletken kayıp hesaplamalarında büyük miktarda bilgisayar kaynaklarına ihtiyaç duyulmasıdır. Quasi-statik yaklaşımı içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniği ile gerçekleştirilen analizler ise, hem zaman israfını, hem de çok fazla karmaşık nümerik işlem yapmayı önlemektedir. Ayrıca, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak elde edilen kapalı-form şeklindeki analitik ifadelerin doğruluğu, yapılan deneysel veri sonuçları ve yüksek doğruluk değerlerine sahip tam dalga analiz yöntemleri ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır (Simons 2001).

Bu nedenle, quasi-statik yaklaşımı içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak, tam asimetrik düzlemsel CPW, eliptik ve silindirik kesitli CPW ile eliptik ve silindirik kesitli CPS'lerin iletken zayıflamalarının hesaplanması, pratik mikrodalga devre tasarımları için önemli bir konudur.

1.1. Tezin Amacı ve Yapılandırılması

Giriş bölümünde ifade edilen bilgiler ve ihtiyaçlar doğrultusunda, bu tez çalışmasının amacını aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür;

1. Tüm çevresi ekranlanmış kuplajlı CPW, ekranlanmış geniş-yanlı kuplajlı CPW ile toprak düzlemlere dikey iletken ilaveli CPW'nin elektriksel karakteristiklerinin analitik ifadeler formunda elde edilmesi,

2. Sonlu toprak düzlemli ve sonlu dielektrik taban kalınlıklı kuplajlı CPW, eliptik ve silindirik kesitli kuplajlı CPW, sonlu toprak düzlemli ve sonlu dielektrik taban kalınlıklı hattan hatta kuplajlı CPW ile eliptik ve silindirik kesitli hattan hatta kuplajlı CPW'nin tasarımlarının yapılması ve elektriksel karakteristiklerinin analitik ifadeler formunda elde edilmesi,

3. Yay biçimli CPW, yay biçimli CPS ile yay biçimli iletken destekli CPW'nin tasarımlarının yapılması ve elektriksel karakteristiklerinin analitik ifadeler formunda elde edilmesi,

4. Asimetrik sonlu toprak düzlemli ve asimetrik aralıklı CPW yapısı için, literatürdeki mevcut olan analitik bağıntılara göre daha sade analitik ifadelerin elde edilmesi ve tam asimetrik CPW'nin iletken kayıplarının analitik ifadeler formunda bulunması,

5. Eliptik ve silindirik kesitli CPW ile eliptik ve silindirik kesitli CPS'nin iletken kayıplarının analitik ifadeler formunda hesaplanması,

6. Bu çalışmada sunulan eşdüzlemli iletim hatlarının elektriksel karakteristiklerini elde etmek için türetilen analitik bağıntıların doğruluğunun, frekans bağımlı Sonnet simülasyon programı sonuçları, frekans bağımlı tam dalga analiz sonuçları ve diğer quasi-statik analiz sonuçları ile karşılaştırmalar yapılarak kanıtlanması.

Bu bağlamda, tez çalışmasını oluşturan bölümler aşağıda özetlenmiştir;

Birinci bölümde, bu tez çalışması kapsamında tasarımları yapılan ve analizleri gerçekleştirilen iletim hatlarının tarihçesi, mikrodalga uygulamalarındaki yeri ve önemi hakkında kısaca genel bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde, yine tez çalışması kapsamında sunulan ve analizleri gerçekleştirilen eşdüzlemli iletim hatları ile ilgili olarak genel bir kaynak araştırmasına yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, eşdüzlemli iletim hatlarının genel bir tanıtımı yapılmış ve eşdüzlemli iletim hatlarının mikrodalga devrelerindeki uygulamalarına değinilmiştir. Ayrıca, bu tez çalışmasının analiz yöntemini oluşturan Konformal Dönüşüm Tekniği ve Schwarz-Christoffel dönüşümlerinin matematiksel ifadeleri üzerinde durulmuş ve kuplajlı iletim hattı teorisi ile ilgili genel bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde, tam ekranlı kuplajlı CPW'nin elektriksel karakteristikleri ile tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW'nin elektriksel karakteristikleri Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen analitik bağıntıların sonuçları, 41 GHz'e kadar olan frekanslarda Sonnet Simülasyon programı sonuçları ile test edilmiştir. Tam ekranlı kuplajlı CPW ile tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW'nin analizlerini içeren bu çalışmalar, SCI (Science Citition Index)'e giren dergilerden "Microwave and Optical Technology Letters" dergisinde yayınlanarak mikrodalga literatürüne kazandırılmıştır (Duyar ve ark. 2006). Yine, toprak düzlemlere dikey iletken ilaveli CPW'nin tasarımı da, ilk olarak bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilmiş olup, teklif edilen yapının elektriksel karakteristikleri Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak elde edilmiştir.

Beşinci bölümde, düzlemsel kesitli kuplajlı CPW yapısı, sonlu yanal toprak düzlemli ve sonlu dielektrik taban kalınlıklı olarak tasarlanmış ve elektriksel karakteristikleri analitik bağıntılar formunda elde edilmiştir. Ayrıca, kuplajlı CPW yapısının eliptik kesitli tasarımı da yapılmış ve elektriksel karakteristikleri analitik bağıntılar formunda elde edilmiştir. Tasarımı ve analizi gerçekleştirilen bu çalışma, SCI'ye giren yayınlar kategorisinde yer alan "IEEE Transactions on Microwave Theory And Techniques" dergisinde yayınlanarak literatüre kazandırılmıştır (Duyar ve ark. 2006). Diğer bir çalışma ise, hattan hatta kuplajlı CPW yapısının, sonlu yanal toprak düzlemli ve sonlu dielektrik taban kalınlıklı olarak yapılan tasarımıdır. Hattan hatta kuplajlı CPW yapısının eliptik ve silindirik kesitli tasarımları da, yine ilk olarak bu tez çalışmasında yapılmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen bu yapıların elektriksel karakteristikleri, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analitik bağıntılar formunda elde edilmiştir

Altıncı bölümde, konvansiyonel CPW, CPS ve iletken destekli CPW yapıları, yine ilk olarak bu tez çalışmasında yay biçimli bir konfigürasyonda

tasarlanmış olup, tasarımı yapılan bu hatların elektriksel karakteristikleri analitik olarak elde edilmiştir.

Yedinci bölümde, tam asimetrik CPW iletim hattının elektriksel karakteristikleri, literatürdeki mevcut analitik bağıntılara kıyasla daha sade bir şekilde elde edilmiştir. Ayrıca, bu yapının iletken kayıpları da Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analitik bağıntılar formunda bulunmuştur. Tam asimetrik CPW yapısının Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak iletken kayıplarının hesaplanmasındaki, düşük frekanslar bölgesinde meydana gelen hata oranlarının düzeltilmesi amacıyla literatürde önerilen (Holloway ve Kuester 1995) tablo değerleri, bu çalışmada ampirik bağıntılar formunda elde edilmiştir.

Sekizinci bölümde, eliptik ve silindirik kesitli CPW iletim hattı, sonlu iletken kalınlıklı olarak tasarlanmış ve bu hatların elektriksel karakteristikleri, iletken kayıplarını da kapsayacak şekilde elde edilmiştir. Ayrıca, eliptik ve silindirik kesitli CPS yapısının sonlu iletken kalınlıklı tasarımı da bu bölümde yapılmış ve tasarımı yapılan bu yapıların elektriksel karakteristikleri, iletken kayıpları ile birlikte hesaplanmıştır.

Dokuzuncu bölümde ise, bu tez çalışması kapsamında tasarımları yapılan ve analizleri gerçekleştirilen tüm eşdüzlemli iletim hatları ile ilgili olarak genel bir tartışma yapılmış, bulgular ve bilime yapılan katkılar bir bütün olarak rapor edilmiştir.

Son olarak, onuncu bölümde sonuçlara, önerilere ve konularda ileride yapılabilecek çalışmalara özet olarak yer verilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu tez çalışmasında tasarımları yapılan ve analizleri gerçekleştirilen eşdüzlemli iletim hatları için kaynak araştırması, yapıların türüne göre beş grup içerisinde yapılmıştır. Çünkü, tez çalışmasında değerlendirilen yapılar, eşdüzlemli iletim hatları olarak tek başlık altında değerlendirilse de, konfigürasyonları gereği düzlemsel, tam ekranlı, silindirik, eliptik ve yay kesitli olarak farklı gruplara ayrılmaktadır. Ayrıca, eşdüzlemli iletim hatlarının iletken kayıp hesaplamaları da ayrı bir kaynak araştırması gerektirir.

2.1. Konvansiyonel Eşdüzlemli İletim Hatları

Hibrid yada Monolitik MIC'lerde CPW, ilk olarak 1969 yılında Wen tarafından kullanılmış olsa da, gerçekte CPW'nin tasarımı daha eskiye dayanmaktadır. CPW'nin yarık anten devrelerinde besleme hattı olarak kullanılmasının izleri 1950'li yıllarda literatüre girmiştir. Özellikle, Owyang ve Wu (1958), günümüzde CPW ve CPS (CPS:Coplanar Stripline:Eşdüzlemli Şerit Hat) olarak adlandırılan eşdüzlemli iletim hatlarının elektriksel karakteristikleri ve iletken kayıp hesaplarını da içeren bir analiz sunmuşlardır. Söz konusu çalışmada, CPW ve CPS'nin tasarımında alt ve üst ortamlar, serbest hava ortamı olarak düşünülmüştür. Sonsuz dielektrik taban kalınlıklı ve sonsuz toprak düzlem genişlikli simetrik CPW'nin karakteristik empedans ve efektif dielektrik sabitinin Konformal Dönüşüm Tekniğiyle hesaplanması, ilk olarak Wen (1969) tarafından yapılmıştır. Davis ve arkadaşları (1971), Wen'in yapmış olduğu analizi, sonsuz toprak düzlem genişlikli ve sonlu dielektrik taban kalınlıklı simetrik CPW için genişletmişlerdir.

Veyres ve Hanna (1980), Konformal Dönüşüm Tekniği uygulamasını sonlu toprak düzlem genişlikli ve sonlu dielektrik taban kalınlıklı CPW için genişletmiştir. Veyres ve Hanna tarafından elde edilen formüllerin doğruluğu, çeşitli araştırmacılar tarafından ispatlanmıştır. Hanna, bir başka çalışmasında, sonlu dielektrik taban kalınlıklı CPS için Konformal Dönüşüm Tekniğini kullanarak analitik ifadeler türetmiştir (Hanna 1980). Ghione ve Naldi (1984), Hanna'nın (1980) yapmış olduğu

çalışmada elde edilen sonuçların, dielektrik taban kalınlıklarının hat boyutlarından daha büyük olması durumunda geçerli olduğunu, diğer durumlarda ise, doğruluk derecesinin azaldığını göstermiştir. Ghione ve Naldi (1984), bu problemi çözmek için birbirini bütünleyici (komplementer) hatların faz hızlarının eşit olduğunu belirten Dualite prensibini kullanarak daha genelleştirilmiş analitik formüller elde etmiştir. Ancak, elde edilen bu analitik formüller sadece tek dielektrik tabanlı yapılar için geçerlidir. 1987 yılında Ghione ve Naldi, Konformal Dönüşüm Tekniğini kullanarak iletken destekli CPW, sonlu dielektrik taban kalınlıklı CPW ile sonlu toprak düzlemli CPW'nin elektriksel karakteristiklerini veren analitik ifadeler türetmiştir. Bu çalışmada, söz konusu yapılar için uygulanan Konformal Dönüşüm Tekniği uygulamaları, bir çok araştırmacılar tarafından yaygın bir şekilde kullanılmış ve bugünün Mikrodalga Mühendisliği kitaplarında yerini almıştır. Görür ve Karpuz (2000), sonlu toprak düzlemli simetrik CPW için türetilen analitik ifadeleri, asimetrik toprak düzlemli ve asimetrik aralıklı CPW için genişletmişlerdir.

Literatürde şerit, mikroşerit ve eşdüzlemli iletim hatlarının yanı sıra, iletken şerit düzlemleri dik olarak tasarımlanan yapılarla ilgili çalışmalar da mevcuttur. Bu tip iletim hatlarına örnek teşkil edebilecek bir çalışma, Horno ve Medina (1986) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, yönlü kuplör tasarımları için teklif edilen çeşitli kuplajlı iletim hatları, Spektral-domen yaklaşımı kullanılarak Varyasyonel analiz yöntemi ile incelenmiştir. Dik düzlem şeritli iletim hatları üzerinde yapılan bir başka çalışma ise, Gillick ve arkadaşları (1993) tarafından yapılmıştır. Bu yapılan çalışmada, iki adet yeni kuplajlı iletim hattı tasarlanmış ve bu hatların elektriksel karakteristikleri, analitik ifadeler formunda Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak elde edilmiştir.

Günümüz MMIC uygulamalarındaki bazı teknolojik problemlerin üstesinden gelebilmek için, bir çok araştırmacı tarafından tasarlanmış çok katlı düzlemsel iletim hatlarının kullanımı da yaygındır. Çok dielektrik katmanlı CPW, tam dalga analiz metodu kullanılarak bazı araştırmacılar tarafından analiz edilmiştir (Yamashita ve Atsuki 1976, Das ve Pozar 1977, Frankel ve ark. 1994). Tek katlı CPW ile karşılaştırıldığında, çok katlı yapıların avantajı; iletim hattının alt ve üst ortamları için uygun dielektrik tabanların seçilmesiyle temel frekans bölgesinin kontrol edilmesi ve kaçak alanların önlenebilmesidir.

Bedair ve Wolff (1992), çok katlı CPW'nin elektriksel karakteristiklerini Konformal Dönüşüm Tekniği kullanarak elde etmiştir. Bu çalışmada elde edilen kapalı-form analitik ifadelerin sonuçları, tam dalga analiz metotlarından biri olan Spektral-domen tekniği ile karşılaştırılmış ve sonuçların uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir. Gevorgian ve arkadaşları (1995) tarafından yapılan benzer bir çalışmada ise, alt ve üst toprak düzlemli çok katlı CPW'nin elektriksel karakteristikleri için analitik ifadeler türetmek amacıyla Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan Konformal Dönüşüm Tekniği uygulaması, temeli Veyers ve Hanna (1980) tarafından ortaya konulan kısmi kapasitans yaklaşımının genişletilmesine dayanmaktadır. Kısmi kapasitans yaklaşımı, kompleks dalga kılavuzu yapıları için kesin olarak geçerli olmamasına rağmen kabul edilebilir bir doğruluk sağlamakta ve bu yaklaşım CPW, CPS'ler ile bu yapıların kuplajlı konfigürasyonları için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Ghione ve Naldi 1987, Gevorgian ve Mirenenko 1990).

Literatürde, çok katlı CPW'in Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analizinin gerçekleştirildiği bir çalışma da, Görür ve arkadaşları (1996) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, literatürde simetrik olarak tasarlanan çok katlı CPW, asimetrik olarak düşünülmüştür. Chen ve Chou (1997) tarafından sunulan bir başka çalışmada ise, çok katlı CPW ve CPS'lerin elektriksel karakteristikleri analitik formüller şeklinde Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen analitik formüllerin doğruluğu, diferansiyel elektro optik örnekleme (DEOS) similatörü yardımıyla, değişik çok katlı eşdüzlemli iletim hatları kullanılarak yapılan deneysel çalışma ile kanıtlanmıştır.

Devre performansını verimli kılmak için, konvansiyonel CPW'den türetilerek elde edilen yeni bir kuplajlı CPW yapısı, ilk olarak Wen (1970) tarafından tasarlanmış olup, analizi ise Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonraki yıllarda bir çok araştırmacılar tarafından Orijinal CPW'den türetilen bu modifikasyonlar; açık geniş-yanlı kuplajlı CPW, ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW, kuplajlı CPW ve hattan hatta kuplajlı CPW şeklinde genişletilmiştir. CPW kullanılarak geniş-yanlı kuplajlı konfigürasyon, ilk olarak Hatsuda (1975) tarafından sunulmuştur. Ayrıca, geniş-yanlı kuplajlı CPW, Bedair ve Wolf tarafından (1989) Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analiz

edilmiştir. Tran ve Nguyan (1993) tarafından sunulan bir çalışmada ise, geniş-yanlı kuplajlı CPW'nin bir başka modifikasyonu, quasi-statik yaklaşımı kullanılarak Spektral-domen tekniği ile analiz edilmiştir.

Wen (1970) tarafından teklif edilen ve analizi gerçekleştirilen sonsuz dielektrik taban kalınlıklı ve sonsuz toprak düzlem genişlikli kuplajlı CPW'nin bir değişik modifikasyonu, Kitazawa ve Mittra (1985) tarafından Varyasyonel analiz yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Yuan ve arkadaşları (1995), alt ve üst ortamı hava olarak düşünülen sonsuz toprak düzlem genişlikli kuplajlı CPW ile alt ve üst toprak düzlemli sonsuz yanal toprak düzlem genişlikli kuplajlı CPW'nin karakteristik empedans ve efektif dielektrik sabitini veren formülleri, analitik ifadeler şeklinde Konformal Dönüşüm Tekniğini kullanarak bulmuşlardır. 1996 yılında Cheng tarafından sunulan bir çalışmada ise, sonsuz yanal toprak düzlem genişlikli ve sonlu dielektrik taban kalınlıklı kuplajlı CPW'nin analizi, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, kuplajlı CPW için uygulanan Konformal Dönüşüm Tekniği, konvansiyonel Konformal Dönüşüm Tekniği uygulamalarına ek bir katkı sağlamıştır. Cheng (1996) tarafından teklif edilen Konformal Dönüşüm Tekniği uygulamaları, bu tez çalışmasında tasarımları yapılan yeni tip iletim hatlarının analizlerinde de kullanılmıştır.

CPW'nin bir başka modifikasyonu olan hattan hatta kuplajlı paralel CPW, sonsuz taban kalınlıklı ve sonsuz toprak düzlem genişlikli olarak, Ghione ve Naldi (1987) tarafından sunulmuş ve analizi Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan, hattan hatta kuplajlı paralel CPW'nin elektriksel karakteristikleri, Spectral-domain metodu ve Sonlu farklar metodu gibi çeşitli analiz teknikleri kullanılarak da incelenmiştir. Cheng (1996) tarafından sunulan bir çalışmada, hattan hatta kuplajlı paralel CPW, sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonsuz yanal toprak düzlem genişlikli bir konfigürasyonda tasarlanmış olup, yapının analizi Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cheng tarafından 1997 yılında, hattan hatta kuplajlı paralel CPW ile ilgili olarak iki adet makale yayınlanmıştır. Bu çalışmalarda, hattan hatta kuplajlı paralel CPW'nin elektriksel karakteristikleri Konformal Dönüşüm Tekniği ile analitik ifadeler formunda elde edilmiştir. Söz konusu çalışmaların birinde, iletim hattına iletken destek eklenmiş, diğer çalışmada ise iletken destek seçenekli olarak düşünülmüştür.

2.2. Tam Ekranlı Eşdüzlemli İletim Hatları

Düzlemsel iletim hatlarının MMIC teknolojinde kullanılmasıyla birlikte bir takım problemler meydana gelmiştir. Bu problemler; iletim hatlarında meydana gelen ışıma kayıpları, iletim hattının mekaniksel dayanımında zayıflık, elektromagnetik girişim, dispersiyon, ortalama güç taşıma kapasitesinin düşük oluşu ve toprak potansiyellerin aynı seviyede olmaması şeklinde ifade edilebilir. Literatürde, bu problemlerin üstesinden gelebilmek için, CPW'den türetilen ekranlanmış iletim hatları sunulmuş ve analiz edilmiştir. Ekranlı kuplajlı CPW'nin Konformal Dönüşüm Tekniğine dayalı bir analizi, Homentcovschi ve arkadaşları (1988) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, söz konusu yapının yanal toprak düzlem genişliklerinin sonsuz uzunluklu kabulüne dayalı bir çözüm gerçekleştirilmiştir. Ekranlanmış CPW'nin Konformal Dönüşüm Tekniğine dayalı analizi, farklı bilimsel dergilerde olmak üzere Dib ve Katehi (1992) ile Cheng ve Robertson (1995) tarafından yapılmıştır. Cheng ve Robertson (1995), ekranlanmış CPW için Konformal Dönüşümü uygulamalarında ters Schwartz-Christoffel dönüşümünü kullanarak yapının elektriksel karakteristiklerini analitik ifadeler şeklinde elde etmiştir. Bu çalışmada, ters Schwartz-Christoffel dönüşümü sonucunda meydana gelen I. tür tam olmayan eliptik integrallerin çözümü için analitik yaklaşıklıklar da verilmiştir. Cheng ve Robertson'un (1995) sunmuş olduğu analitik yaklaşıklıklar, bu çalışmada tasarımı ve analizi yapılan yeni tip iletim hatları için de uygulanmıştır.

Ekranlı geniş-yanlı CPW'nin band geçiren filtre uygulamaları ile ilgili olarak, Nguyen (1992) tarafından bir çalışma yapılmıştır. Aynı yapı, Tran ve Nguyen (1993) tarafından asimetrik olarak düşünülmüş ve analizi quasi-statik yaklaşım yapılarak Spektral domen tekniği ile gerçekleştirmiştir. Ekranlı geniş-yanlı CPW'nin dispersiyon karakteristiklerinin incelendiği bir çalışma ise, Nguyen (1993) tarafından yapılmıştır. 1994 yılında Gentili ve Macchiarella, ekranlanmış düzlemsel iletim hatları ile ilgili şerit iletkenlerin metal kalınlığını da hesaba katan bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, yaklaşım olarak quasi-statik, analiz yöntemi olarak da karma Spektral-domen tekniği kullanılmıştır. Çok katlı paralel CPW'nin Konformal Dönüşüm Tekniğine dayalı bir analizi de, Shan ve arkadaşları (2004) tarafından gerçekleştirilmiştir.

2.3. Eliptik ve Silindirik Kesitli Eşdüzlemli İletim Hatları

Literatürde, önceki yıllarda eliptik ve silindirik kesitli iletim hatları üzerinde yapılan çok yönlü çalışmalara ek olarak, Zeng ve Wang (1986) tarafından sunulan bir çalışmada, eliptik ve silindirik kesitli şerit ve mikroşerit iletim hatlarının karakteristik empedans ifadesi Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çalışma, eliptik ve silindirik kesitli şerit, mikroşerit ve eşdüzlemli iletim hatlarında Konformal Dönüşüm Tekniği uygulamalarının adeta temelini teşkil etmektedir.

1989 yılında Homentcovschi'nin yapmış olduğu bir çalışmada, eliptik ve silindirik kesitli eşdüzlemli iletim hatlarının analizi quasi-statik yaklaşımı içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aynı yıl içerisinde, bugünün Mikrodalga Mühendisliği kitaplarında yerini alan, silindirik kesitli CPW ve CPS'nin tasarım ve analizinin sunulduğu bir makale yayınlanmıştır (Zargari ve Rao 1989). Ancak, bizim tespitimize göre, bu makale silindirik kesitli CPW ve CPS iletim hatlarının temelini oluşturmasına rağmen, literatürde hak ettiği yeri alamamıştır. Bu çalışmada, silindirik kesitli CPW ve CPS'nin analizleri Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

1990 yılında Medina ve Horno, genelleştirilmiş eliptik ve silindirik kesitli şerit-mikroşerit iletim hattı analizlerini, Spektral domen ve Varyasyonel yöntemleri kullanarak gerçekleştirmiştir. Wong ve arkadaşları (1994), dielektrik taban ile toprak düzlem arası hava aralıklı silindirik kesitli mikroşerit iletim hattının tasarımını yapmış olup, yapının elektriksel parametrelerini, tam dalga yaklaşımı içerisinde Moment metodunu kullanarak hesaplamıştır. 1995 yılında Homentcovschi ve arkadaşları (1995), çok katlı dielektrik tabanlar üzerinde gerçekleştirilen çok iletkenli iletim hattını, düzlemsel ve silindirik kesitli olarak tasarlamış olup, yapıların analizinde ise, Konformal Dönüşüm Tekniği ve Maxwell kapasitans matrisi tekniğini birlikte kullanmışlardır. Bir sonraki yıl, Su ve Wong (1996) tarafından sunulan bir çalışmada, silindirik kesitli CPW'nin dispersiyon karakteristikleri tam dalga yaklaşımı içerisinde Galerkin moment metodu kullanılarak analiz edilmiş ve bu teorik analiz sonuçlarının doğruluğu, yapılan deneysel veri sonuçlarıyla kanıtlanmıştır. 1997 yılı içerisinde, Su ve Wong tarafından yayınlanan bir makale ise oldukça dikkat çekicidir. Çünkü, bu makalede, silindirik kesitli CPW'nin elektriksel

karakteristikleri, daha önce Zargari ve Rao (1989) tarafından sunulan çalışmadaki benzer yaklaşımlar kullanılarak Konformal Dönüşüm Tekniği ile elde edilmiştir.

Daha sonraki yıllarda, Karpuz ve arkadaşları (1998) tarafından sunulan bir çalışmada, silindirik kesitli CPS'nin elektriksel karakteristikleri Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analitik bağıntılar şeklinde elde edilmiştir. Aynı yıl içerisinde Alkan ve arkadaşları (1998), silindirik kesitli çok katlı CPW'nin analizini, quasi-TEM yaklaşımı içerisinde, Konformal Dönüşüm Tekniği ile gerçekleştirmiştir. 1998 yılı içerisinde yapılan bir başka çalışma ise, Lee ve arkadaşları (1998) tarafından sunulmuştur. Bu çalışmada, silindirik kesitli kuplajlı mikroşerit yapı, Spektral domen integral denklem formülasyonu kullanılarak analiz edilmiştir.

Literatürde, CPW'nin eliptik kesitli olarak ilk tasarımı ve analizi, 1999 yılında Karpuz ve Görür tarafından gerçekleştirilmiştir. Aynı yıl içerisinde düzlemsel olmayan iletim hatları ile ilgili olarak, Görür ve arkadaşları (1999) tarafından iki makale yayınlanmıştır. Bu çalışmaların ilkinde, silindirik kesitli bir kuplajlı yapının, ikincisinde ise silindirik kesitli çok katlı CPS'nin tasarımı yapılmış olup, söz konusu her iki yapının da analizi Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak yapılmıştır. Bu yapılan çalışmaları, Dib ve arkadaşları (1999) ile Zoubi ve Dib (1999) tarafından sunulan iki çalışma izlemiştir. Dib ve arkadaşları (1999) tarafından yapılan çalışmada, silindirik kesitli CPW, Sonlu-farklar zaman-domen yöntemi ile analiz edilmiş ve elde edilen teorik sonuçların doğruluğu, aynı çalışma içerisinde yapılan deneysel veri sonuçlarıyla kanıtlanmıştır. Zoubi ve Dib (1999) tarafından yapılan çalışmada ise, silindirik kesitli CPW'nin aralık analizi Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yapılan çalışmaları, Karpuz ve arkadaşlarının (2000) silindirik kesitli iletken destekli CPW'nin analizini Konformal Dönüşüm Tekniği kullanarak gerçekleştirdiği bir çalışma izlemiştir. Aynı araştırmacılar tarafından aynı yıl içerisinde yapılan farklı bir çalışmada ise, silindirik kesitli kuplajlı CPW yapısı tasarlanmış olup, tasarlanan bu yapının elektriksel parametreleri, analitik bağıntılar şeklinde elde edilmiştir (Karpuz ve ark. 2000). 2000 yılı içerisinde yapılan bir başka çalışmada ise, Du ve arkadaşları (2000), silindirik, eliptik ve konik kesitli CPS'nin elektriksel parametrelerini quasi-TEM yaklaşımı içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniği kullanarak elde etmiştir. 2002 yılında Dib ve Omar, magnetik ferrit tabanlı silindirik kesitli çok katlı CPW'nin dispersiyon özelliklerini hem

Sonlu-farklar zaman-domen yöntemi, hem de Spektral-domen analiz yöntemi ile incelemiştir. Kiang ve arkadaşları (2003) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada ise, silindirik kesitli şerit ve kuplajlı şerit iletim hattının değişik konfigürasyonlarının analizi, Galerkin yöntemi ile birleştirilmiş Mod-uygunlama tekniği kullanılarak yapılmıştır.

2004 yılında Akan ve Yazgan, eliptik kesitli asimetrik CPS ile eliptik kesitli asimetrik çok katlı CPW'nin analizini içeren iki makale yayınlamıştır. Her iki çalışmada da, söz konusu yapıların elektriksel karakteristikleri, quasi-TEM yaklaşımı içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analitik ifadeler şeklinde elde edilmiştir. 2005 yılında Yamamoto ve arkadaşları, silindirik kesitli CPW'nin iletken kalınlıklarını da hesaba katan bir analiz gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilen bu analizde, tam dalga yaklaşımı içerisinde Spektral-domen yöntemi kullanılmıştır. 2005 yılında yapılan bir başka çalışmada ise, silindirik kesitli şerit ve kuplajlı mikroşerit yapıların elektriksel parametreleri, quasi-statik yaklaşımı içerisinde Fourier serilerinden faydalanılarak Sonlu-elemanlar yöntemi ile elde edilmiştir (Xue ve Ma 2005). Yapılan literatür incelemesine göre, 2005 yılından bu yana, eliptik ve silindirik kesitli iletim hatları ile ilgili olarak yapılan son çalışma, Akan ve Yazgan (2005) ile Duyar ve arkadaşları (2006) tarafından yapılmıştır. Yapılan bu çalışmaların ilkinde, eliptik kesitli çok katlı asimetrik CPS'nin elektriksel karakteristikleri, quasi-TEM yaklaşımı içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analitik bağıntılar şeklinde elde edilmiştir. İkincisinde ise, kuplajlı CPW yapısı eliptik olarak tasarlanmış olup, yapının analizi Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.4. Yay Kesitli Eşdüzlemli İletim Hatları

Literatürde, yay kesitli iletim hatları üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlı sayıdadır. Yapılan literatür incelemesinde yay kesitli iletim hatları ile ilgili olarak, ilk çalışma Wang (1978) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, şerit yapı, yay kesitli olarak tasarlanmış ve analizi quasi-TEM yaklaşımı içerisinde temel Integrasyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 1980 yılında Joshi ve Das, yay kesitli şerit

yapının analizini Laplace denkleminin çözümüne dayalı olarak gerçekleştirmiştir. Burada, sınır değer problemi, modifiye edilmiş rezidü hesaplama tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Reddy ve Deshpande (1986), şerit yapının çok katlı dielektrik tabanlı konfigürasyonunu yay kesitli olarak tasarlamış ve yapının analizini ise, Laplace denkleminin çözümüne dayalı olarak gerçekleştirmiştir. 1988 yılında Reddy ve Deshpande, kuplajlı şerit, kuplajlı mikroşerit ve yüz yüze yerleştirilmiş geniş yanlı CPW yapısını yay kesitli olarak tasarlamıştır. Bu yapıların analizlerinde ise, Varyasyonel yöntem kullanılmıştır.

2.5. Sonlu İletken Kalınlıklı Eşdüzlemli İletim Hatları

Düzlemsel eşdüzlemli iletim hatlarında iletken şeritlerin metal kalınlığından dolayı meydana gelen iletken kayıpları (omik kayıplar) üzerindeki çalışmaların temelini, 1958 yılında Owyang ve Wu'nun yapmış olduğu bir çalışma oluşturmaktadır. Bu çalışmada, alt ve üst ortamları hava olarak kabul edilmiş simetrik CPW ve CPS'nin karakteristik empedans ve iletken kayıpları, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analitik ifadeler formunda elde edilmiştir.

Gupta ve arkadaşları (1996) tarafından yayınlamış olan bir kitapta, farklı bir analitik yaklaşım kullanılarak mikroşerit ve eşdüzlemli iletim hatları için iletken kayıplarını veren formüller yer almaktadır. Bu kitapta, Owyang ve Wu (1958) tarafından sunulan simetrik CPW ve CPS'nin iletken kayıplarını veren sonuç formüllerindeki katsayı hatası da düzeltilmiştir.

1958 yılından 1983 yılına kadar literatürde, eşdüzlemli iletim hatlarının iletken kayıp hesaplamalarında Konformal Dönüşüm Tekniğinin kullanıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu geleneği, Ghione ve arkadaşları (1983), Owyang ve Wu'nun (1958) sunmuş olduğu Konformal Dönüşüm Tekniği uygulamasını, sonsuz toprak düzlem genişlikli ve sonlu dielektrik taban kalınlıklı simetrik CPW'nin iletken kayıp hesaplamalarında kullanarak bozmuştur. İletken kayıp hesaplanması ile ilgili yapılan bu çalışmaları, tam-dalga yaklaşımı içerisinde Mod-uygunlama analiz tekniğinin kullanılmasıyla iletken kayıp hesaplamalarını içeren bir önemli çalışma izlemektedir (Heinrich 1990). 1991 yılında Kitazawa ve

Itoh tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, tam-dalga analiz yaklaşımı yapılarak Spektral-domen tekniği vasıtasıyla yarık hat, simetrik CPW ve asimetrik CPW'nin elektriksel karakteristikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu yapılan çalışmada, söz konusu yapıların karakteristik empedansı ve efektif dielektrik sabitinin yanısıra, iletken kayıpları da detaylı bir şekilde incelenmiştir. 1993 yılında Heinrich'in sunmuş olduğu bir çalışmada ise, eşdüzlemli iletim hattındaki dağılmış eşdeğer devre elemanlarının hesaplanması, quasi-TEM yaklaşımı içinde kapalı-form analitik ifadeler şeklinde yapılmıştır.

1993 yılında Ghione tarafından sunulan kapsamlı bir çalışmanın sonuçları, bugünün Mikrodalga Mühendisliği kitaplarında yerini almıştır. Bu yapılan çalışmada; asimetrik CPW, asimetrik CPS ile asimetrik tek toprak düzlemli CPW'nin elektriksel karakteristikleri, iletken kayıplarını da içerecek şekilde hesaplanmıştır. Bu çalışmada elde edilen CAD-yönlü analitik ifadeler, MMIC tasarımı için oldukça uygun bulunmuştur. Tuncer ve arkadaşları (1994) tarafından sunulan bir çalışmada ise, farklı bir Konformal Dönüşüm Tekniği uygulaması ile simetrik CPW ve simetrik CPS'nin iletken kayıpları elde edilmiştir.

1995 yılında, Holloway ve Kuester tarafından simetrik CPW'nin iletken kayıplarını içeren önemli bir makale yayınlanmıştır. Bu makalede, simetrik CPW'nin iletken kayıp hesaplamalarında iletken şeritlerdeki köşe kesitlerin açısal değişimi tablolar halinde verilmiş ve ayrıca iletken kayıp hesaplamalarında temel parametre olan yüzey rezistans ifadesini elde etmek için yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Ayrıca, söz konusu bu çalışmada, iletken kayıp hesaplamaları için quasi-statik yaklaşımı içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak elde edilen analitik bağıntıların düşük frekanslar bölgesindeki hata oranları da düzeltilmiştir. Holloway ve Kuester (1995)'in sunmuş oldukları bu çalışmadaki iletken kayıplarının düşük frekanslar bölgesindeki hata oranlarının düzeltilmesi için verilen tablo değerleri, ampirik bağıntılar şeklinde bu tez çalışması içerisinde sunulmuştur. Ayrıca, söz konusu ampirik bağıntılar, bu tez çalışması içerisinde analizi gerçekleştirilen yapılar için de uygulanmıştır.

1997 yılında Ghione ve Goano, sonsuz dielektrik taban kalınlıklı ve sonsuz toprak düzlem genişlikli simetrik kuplajlı CPW'nin iletken kayıplarını analitik bağıntılar formunda elde etmiştir. Aynı yıl içerisinde yapmış oldukları bir başka

çalışmada ise, sonlu toprak düzlemli ve sonlu dielektrik taban kalınlıklı simetrik CPW'nin iletken kayıplarını Konformal Dönüşüm Tekniği ile hesaplamışlardır. Bu çalışmaları, Bernal ve arkadaşlarının (1997) çok iletkenli iletim hatlarında iletken kayıplarının hesaplanması üzerine yapmış oldukları bir çalışma izlemektedir. 1998 yılında Milanoviç ve arkadaşları, Konformal Dönüşüm Tekniğini kullanarak sonlu toprak düzlemli simetrik CPW ile çok katlı simetrik CPW'nin elektriksel karakteristiklerini iletken kayıplarını da kapsayacak şekilde incelemiştir. 1999 yılında Ponchak ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada ise, simetrik sonlu toprak düzlemli ve sonlu dielektrik taban kalınlıklı CPW'nin iletken kayıpları, deneysel çalışma yapılarak elde edilen ölçüm sonuçları eğri uydurma yöntemi ile ifade edilmiştir (Ponchak ve ark. 1999).

1999 yılında Booth ve Holloway, süper iletkenli CPW'nin iletken kayıplarını Konformal Dönüşüm Tekniği kullanarak hesaplamıştır. Yapılan bu çalışmanın teorik sonuçları, aynı araştırmacılar tarafından yapılan deneysel veri sonuçlarıyla karşılaştırılmış olup, teorik sonuçlar ile ölçme sonuçlarının uyum içerisinde olduğu gösterilmiştir. 1999 yılında yapılan bir başka çalışmada ise, Ghione ve arkadaşları, simetrik CPW'deki dielektrik taban malzemesinin üzerine farklı dielektrik materyaller ilave etmiştir. Yapmış oldukları bu uygulamanın etkisi Konformal Dönüşüm Tekniği ile incelenmiş olup, elde edilen teorik sonuçların doğruluğu yapılan deneysel veri sonuçlarıyla desteklenmiştir.

2000 yılında Holloway tarafından yapılan bir çalışmada, şerit hat ile simetrik CPS'nin iletken kayıpları, kapalı-form analitik ifadeler şeklinde elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen teorik sonuçların geçerliliği, deneysel ölçme sonuçları ile de test edilmiştir. 2001 yılında Raj ve arkadaşları, simetrik CPW'yi alt ve üst dielektrik katmanlı olarak tasarlamış olup, söz konusu yapının iletken, dielektrik ve ışıma kayıplarını Konformal Dönüşüm Tekniği kullanarak elde etmiştir. Elde edilen teorik sonuçların MMIC tasarımlarında kullanılabilirliği, deneysel ölçme sonuçları ile gösterilmiştir. 2002 yılında Kunze ve Heinrich, simetrik sonlu toprak düzlemli CPW'nin iletken zayıflamasını, Sonlu-farklar frekans-domen analiz yöntemini kullanarak elde etmiştir. Rautio ve Demir (2003), çok katmanlı bir konfigürasyonda mikroşerit iletim hattının iletken kayıplarını hesaplamış ve elde edilen teorik sonuçların doğruluğunu deneysel ölçme sonuçları ile göstermiştir. 2003 yılında

yapılan bir başka çalışmada Schnieder ve arkadaşları, iletken destekli CPW yapısının iletken kayıplarını, quasi-statik yaklaşımı içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniğini kullanarak analitik bağıntılar formunda elde etmişlerdir. 2005 yılında Zhang ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada ise, sonsuz toprak düzlemli ve sonlu dielektrik taban kalınlıklı simetrik CPW ile sonlu toprak düzlemli ve sonlu dielektrik taban kalınlıklı simetrik CPW'nin iletken kayıpları, yapılan deneysel çalışma sonuçları ile irdelenmiştir.

Literatür incelemesi sonucunda, iletim hatlarındaki iletken kayıpları üzerine yapılan son çalışma, Plaza ve arkadaşları (2005) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, çok katlı asimetrik CPW'nin elektriksel karakteristikleri, iletken kayıplarını da kapsayacak şekilde quasi-TEM yaklaşımı yapılarak Moment yöntemi ile Hat yöntemi birlikte kullanılarak elde edilmiştir.

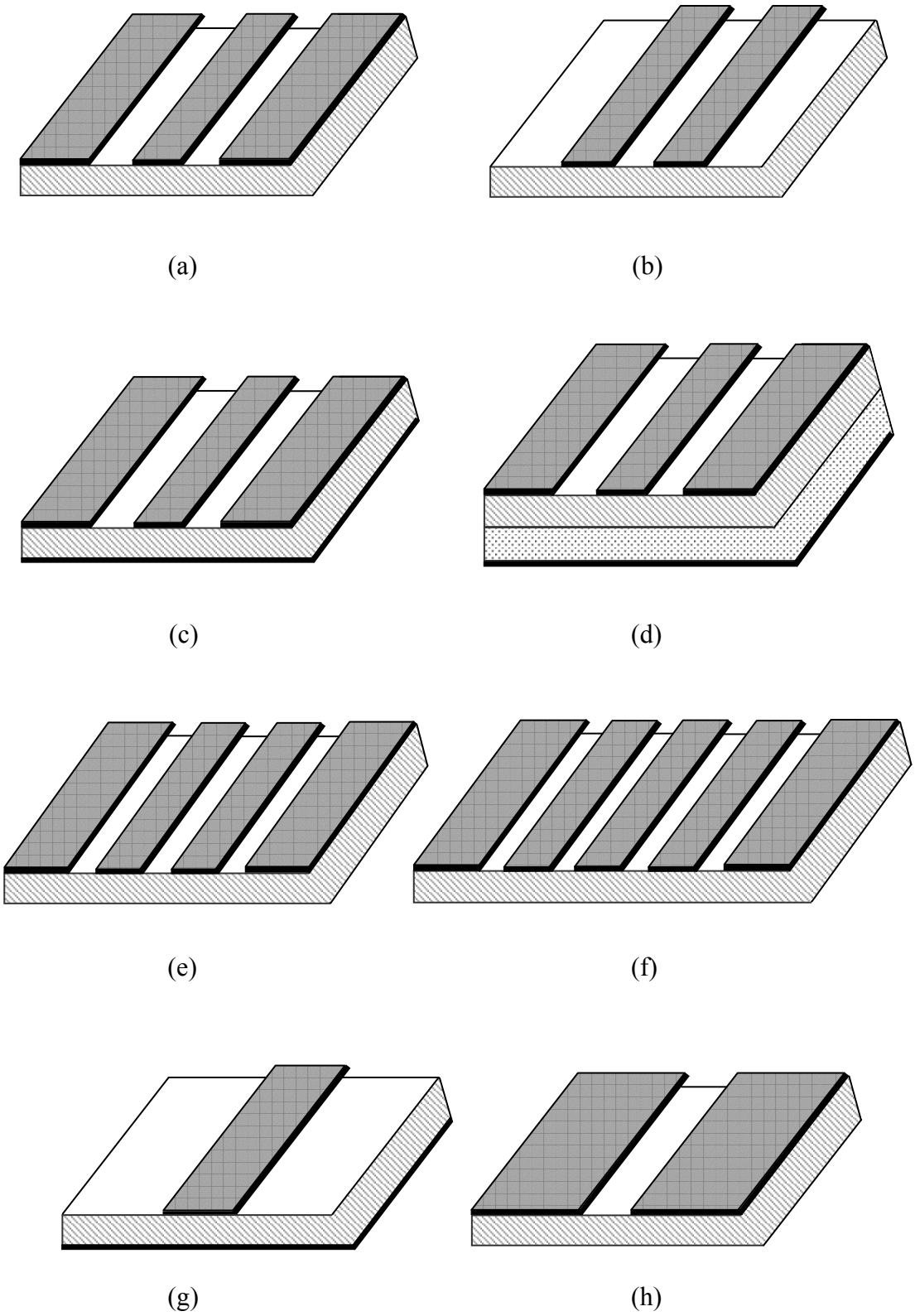
3. EŞDÜZLEMLİ İLETİM HATLARI

İletken şeritlerinin tamamı aynı düzlem üzerinde olan (bir başka ifadeyle iletken şeritleri dielektrik tabanın sadece bir yüzeyinde bulunan) yapılar, eşdüzlemli iletim hatları olarak bilinir. Eşdüzlemli iletim hatları Şekil 3.1'deki çizimlerde görüldüğü gibi, yarık hat, eşdüzlemli dalga kılavuzu (CPW), eşdüzlemli şerit hat (CPS) ile bu iletim hatlarının kuplajlı konfigürasyonlarını kapsamaktadır. Eşdüzlemli iletim hatlarının en belirgin avantajı, paralel veya seri konfigürasyonlu toplu elemanların (aktif yada pasif) montajlarının çok kolay yapılabilmesidir. Eşdüzlemli iletim hatlarına başka bir devre elemanının bağlanması için, tüm iletken şeritler aynı düzlem üzerinde bulunduğundan, dielektrik tabanı boyunca herhangi bir delik yada yarık açmaya gerek yoktur. Eşdüzlemli iletim hatları dengeli yapılar olduğundan, karıştırıcılar ve besleme hatları gibi dengeli devreler için oldukça kullanışlıdır.

Eşdüzlemli iletim hatları içerisinde en popüler olan CPW ve CPS'nin kesit görünümleri sırasıyla Şekil 3.1a ve Şekil 3.1b'de verilmiştir. CPW, dielektrik tabanın bir yüzeyine paralel olarak yerleştirilmiş iki toprak düzlem ve bir merkez şerit iletkenden oluşur. Dalga yayılması (propagasyon) yönünde magnetik alan bileşeni bulunmadığı için CPW'deki yayılım modu, yüksek frekanslarda TEM olarak kabul edilmektedir. CPW'de magnetik alan, hava-dielektrik ara yüzeyindeki yarıklarda eliptik olarak polarize edildiğinden, CPW'ler karşılıksız ferrit düzenler için daha uygundur.

CPS yapıları, dielektrik tabanın sadece bir yüzeyinde paralel olarak yerleştirilmiş iki iletken şeritten meydana gelir (Şekil 3.1b). CPS yapısının kullanımı, mikrodalga frekans bandının daha düşük bölgelerinde, yüksek-hızlı bilgisayar devrelerindeki işaret iletimi için uygun düşmektedir. CPW yapılarında olduğu gibi, CPS yapıları da, seri ve paralel bağlantıları kolayca gerçekleştirilebilen kompleks düzlemsel mikrodalga ve milimetrik dalga devre tasarımlarına gerekli esnekliği kazandırır. İyi bir yayılım ve düşük dispersiyon CPS'lerin temel karakteristik özelliğidir.

CPW yapılarına göre yüksek empedans değerlerinin elde edilmesi, CPS yapıları ile daha kolay olduğundan, yüksek empedanslı iletim hatlarının tasarımı



Şekil 3.1: Eşdüzlemli, Mikroşerit ve Yarık Hat Yapıların Kesit Görünümleri, (a) CPW, (b) CPS, (c) İletken Destekli CPW, (d) İletken Destekli Çok Katlı CPW, (e) Kuplajlı CPW, (f) Hattan Hatta Kuplajlı Paralel CPW, (g) Mikroşerit, (h) Yarık Hat

ve üretimi için CPS yapıları daha uygun düşmektedir. Ayrıca, dengeli CPS'ler; elektrooptik elemanlar, tek düzlemli karıştırıcılar (mixer) ve baskı-anten beslemesi gibi uygulamalar için oldukça kullanışlıdır (Yıldız 2005).

Günümüz RF ve mikrodalga teknolojileri için büyük önem taşıyan kuplajlı CPW ile hattan hatta kuplajlı CPW yapılarının kesit görünümleri sırasıyla Şekil 3.1d ve Şekil 3.1e'de verildiği gibidir. Eşdüzlemli kuplajlı iletim hatları; yönlü kuplör, filtre, faz kaydırıcı ve empedans-uygunlama devreleri gibi pratik hibrid ve monolitik MIC uygulamalarında yaygın olarak kullanılırlar.

3.1. Eşdüzlemli İletim Hattı Analiz Teknikleri ve Elektriksel Karakteristikleri

Günümüzde, RF ve mikrodalga uygulamalarında sıklıkla kullanılan eşdüzlemli iletim hatları, Monolitik MIC (MMIC) teknolojisinin gelişmesiyle kompleks yapılar haline gelmiştir. Eşdüzlemli iletim hatları üzerindeki yoğun çalışmalar, söz konusu iletim hatlarının elektriksel karakteristikleri için analitik yaklaşımların ve ayrıca CAD uyumlu modellerin gelişimini hızlandırmıştır.

Şerit, mikroşerit ve eşdüzlemli iletim hatlarının elektriksel karakteristikleri, tam dalga veya quasi-statik yaklaşım yapılarak elde edilebilir. Tam dalga analiz yöntemleri; İntegral denklem yöntemi, Spektral domende Galerkin yöntemi, Sonlu farklar yöntemi, Mod uygunlama yöntemi ve Relaksiyon yöntemi şeklinde sıralanabilir. Tam dalga yaklaşımları frekans bağımlı analizler olup, nümerik hesaplamaları çok uzun zaman almaktadır. İletim hatlarının analizlerinde, genellikle analitik formüller içeren quasi-statik yaklaşımlar tercih edilmektedir. Quasi-statik yaklaşıma dayalı analiz yöntemleri; Konformal Dönüşüm Tekniği, İntegral eşitlik yöntemi, Varyasyonel yöntem ve Sonlu farklar yöntemi olarak sıralanabilir.

Bilindiği üzere, quasi-statik analiz, tam olarak sıfır frekanslarda geçerlidir. Bundan dolayı, quasi-statik analizin yüksek frekanslarda (C bandı ve hatta X bandı üzerindeki frekanslar) doğru sonuçlar verip vermeyeceği kesin değildir. Doğruluk derecesi yüksek olan frekans bağımlı tam dalga analiz sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, quasi-statik yaklaşıma dayalı analizlerin, yüksek doğruluk değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, quasi-statik yaklaşım, X

bandından çok daha ileri frekans bölgesinde oldukça doğru sonuçlar verebilmektedir. Eşdüzlemli iletim hatları için, literatürdeki yüksek doğruluk değerlerine sahip frekans bağımlı tam dalga analiz sonuçları ve deneysel veri sonuçlarından hareket edilerek, quasi-statik yaklaşımın yaklaşık olarak 100 GHz frekanslara kadar geçerli olduğu ifade edilebilir (Chen ve Chou 1997).

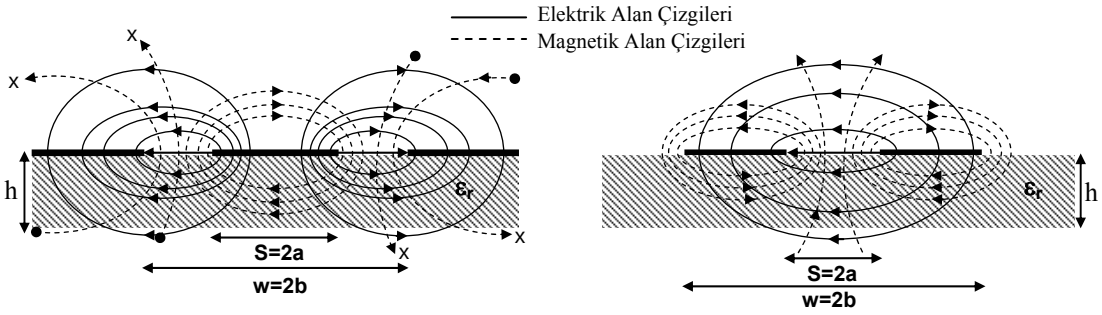
Genel olarak, literatürde çok sık kullanılan ve bu tez çalışmasının da analiz yöntemini oluşturan Konformal Dönüşüm Tekniği, quasi-statik yaklaşımlardan biridir. Bu yöntem ile, çözümlenmesi zor olan bir iletim hattının geometrik yapısı, daha kolay çözümlenebilir veya çözümü bilinen bir geometrik yapıya dönüştürülür. Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak elde edilen analitik ifadeler, CAD uyumlu olduğu için, iletim hatlarının elektriksel karakteristiklerinin hesaplanmasında hızlı ve doğru sonuçlar verir.

Quasi-statik yaklaşım kullanılarak bir iletim hattının efektif dielektrik sabiti, faz hızı ve karakteristik empedansı;

$$\varepsilon_{eff} = \frac{C}{C_0}, \qquad V_f = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}}, \qquad Z_0 = \frac{1}{CV_f} \tag{3.1}$$

bağıntıları ile hesaplanabilir. Burada, c :serbest ortamdaki elektromagnetik dalganın hızı, C :birim uzunluktaki toplam hat kapasitesi ve C_0 ise, dielektrik ortam olmadığı durumdaki (boşluk yada hava ortamı) hat kapasitesidir. Denklem (3.1) ile verilen bağıntılarda da görüldüğü gibi, bir iletim hattının elektriksel karakteristiklerini elde etmek için sadece, C ve C_0 kapasitelerini bulmak yeterlidir.

Quasi-statik yaklaşıma dayalı analiz yöntemlerinde, iletim hattının hava ortamı ve dielektrik ortamı ayrı ayrı düşünülerek dalga yayılımının tamamen TEM modunda olduğu varsayılmaktadır. Quasi-statik yaklaşıma dayalı analiz yöntemleri ile elde edilen iletim hattının elektriksel karakteristiklerinin frekansla ilişkisi yoktur ve bu yaklaşım, hattın fiziksel parametrelerinin dalga boyundan yeteri kadar küçük olduğu frekanslarda analiz yapmak için uygundur. Bununla beraber, özellikle eşdüzlemli iletim hatlarının karakteristik parametreleri frekansa bağımlı olarak çok az değişim göstermektedir. Ayrıca frekans bağımlı formüller, quasi-statik formüllerin değiştirilmesiyle kolayca elde edilir (Hasnain ve ark. 1986).



(a) (b)

Şekil 3.2: (a) Simetrik CPW'nin Kesit Görünümü ve Alan Dağılımı, (b) Simetrik CPS'nin Kesit Görünümü ve Alan Dağılımı

3.2. Konformal Dönüşüm Tekniği ve Schwarz-Christoffel Dönüşümü

Konformal dönüşüm, herhangi bir kompleks düzlem ile tanımlanmış belirli bir bölgeyi, uygun bir fonksiyon vasıtasıyla orijinal düzlemdeki parametreler cinsinden, bir başka bölgeye çeviren dönüşüm olarak tanımlanabilir. Konformal dönüşümlerdeki en büyük avantajlardan biri, çözümü karmaşık olan geometrik bir yapının, çözümü daha kolay olan veya çözümü bilinen geometrik bir yapıya kolaylıkla dönüştürülmesidir. İletim hattı hesaplamaları için Konformal Dönüşüm Tekniği uygulamalarındaki dönüşümler sırasında, eş potansiyel çizgileri ve akı çizgileri arasındaki açı (elektriksel potansiyel ve elektrik alan çizgileri arasındaki açı gibi) korunur.

Konformal dönüşümün en önemli özelliği olan açı korunum ilkesi, Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi, eğri1 ve eğri2'nin kesiştiği noktadan bu eğrilere çizilen teğetlerin aralarındaki açı, yön ve büyüklük olarak dönüşüm sonrası da aynı kalmaktadır. Burada kullanılan dönüşüm fonksiyonunun analitik olup olmadığı, Cauchy- Riemann bağıntısıyla belirlenebilir. Cauchy-Riemann bağıntısı sağlanıyorsa fonksiyonun analitik olduğu söylenir.

Schwarz-Christoffel dönüşümü Şekil 3.4'de görüldüğü gibi Z-düzlemindeki reel ekseni, W-düzlemindeki bir çokgene (Z-düzleminin üst yarısını da çokgenin iç

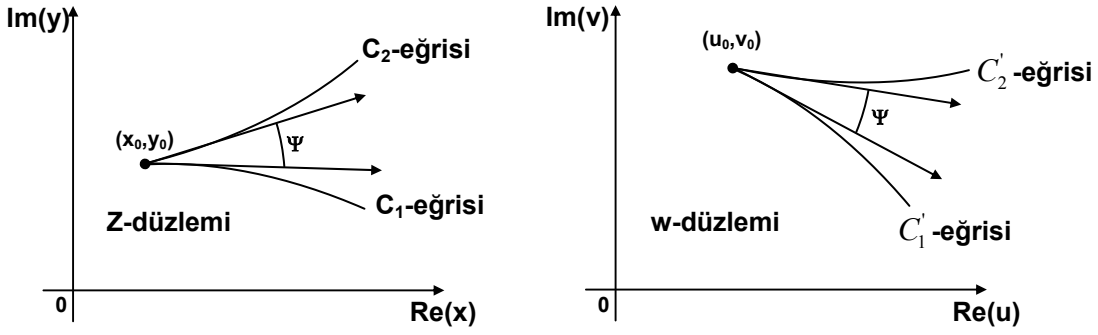
bölgesine) dönüştüren bir Konformal dönüşümdür. Bu dönüşüm yöntemi, iletim hatlarının analizlerinde yaygın olarak kullanılan güçlü bir yöntemdir.

Schwarz-Christoffel dönüşümü ile, orijinal düzlemde verilen karmaşık bir yapı, çözümü daha kolay olan bir yapıya dönüştürülür. Şekil 3.4a ile verilen bir çokgen, A ve D arasındaki bir noktadan açılmıştır. Şekil 3.4'de de görüldüğü gibi, açılma noktası bir köşe noktası değildir. Açılma işlemi herhangi bir köşe noktasından yapılırsa, bu köşe noktası, dönüşüm sırasında dikkate alınmaz. $W = f(Z)$ dönüşüm fonksiyonu için Konformal dönüşüm eşitliği aşağıdaki bağıntılar şeklinde yazılabilir (Spiegel 1994):

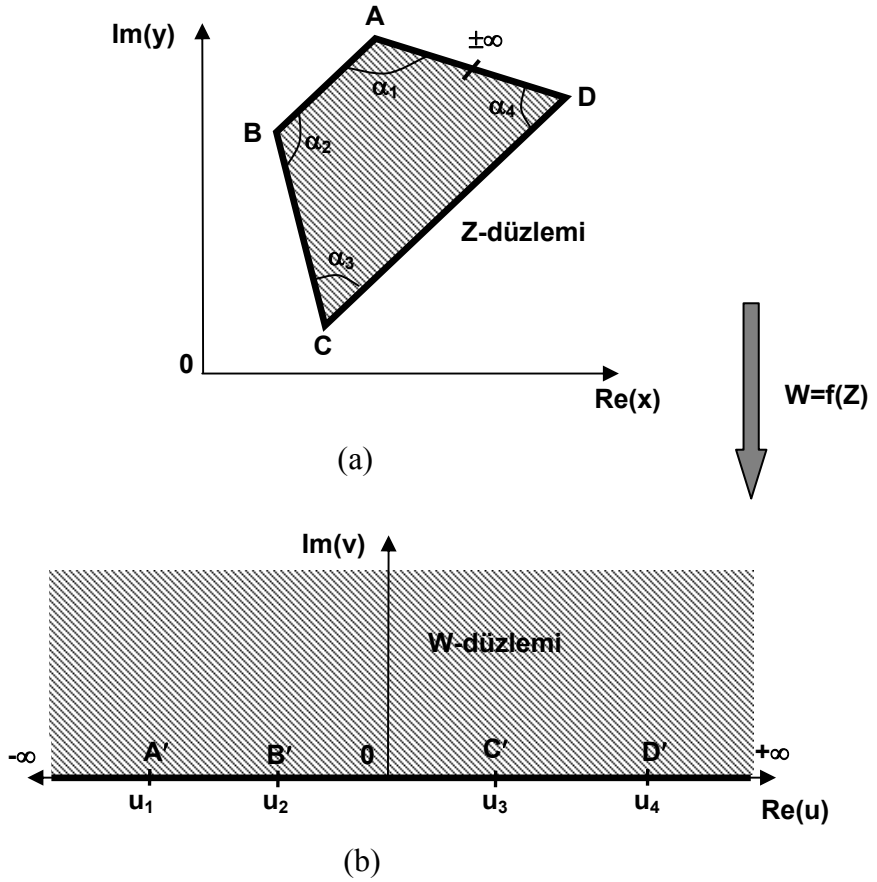
$$\frac{dZ}{dW} = A(w-u_1)^{(\alpha_1/\pi)-1}(w-u_2)^{(\alpha_2/\pi)-1}(w-u_3)^{(\alpha_3/\pi)-1}(w-u_4)^{(\alpha_4/\pi)-1}$$

$$Z = A\int (w-u_1)^{(\alpha_1/\pi)-1}(w-u_2)^{(\alpha_2/\pi)-1}(w-u_3)^{(\alpha_3/\pi)-1}(w-u_4)^{(\alpha_4/\pi)-1}\,dW \tag{3.2}$$

Denklem (3.2) bağıntısında yer alan A katsayısı, şekli döndürmeye ve büyütmeye yarar. Denklem (3.2) bağıntısındaki çarpan sayısı, çokgenin köşe sayısını ifade etmektedir. Şekil 3.4'deki çokgen dört köşeli olduğu için, Denklem (3.2)'deki çarpan sayısı da dörttür.



Şekil 3.3: Z- Düzlemindeki Eğrilerin W- Düzlemindeki Görüntüleri



Şekil 3.4: Schwarz-Christoffel Dönüşümü, (a) Z-Düzleminde Tanımlı bir Çokgen, (b) Z-Düzleminde Tanımlı Çokgenin W-Düzlemindeki Görüntüsü

Bir iletim hattının dağılmış kapasitans ve indüktans değerlerini hesaplamak için, iki boyutlu Laplace denkleminin çözümü gerekir. Çoğu düzlemsel iletim hatlarında olduğu gibi, hat konfigürasyonunun tanımlanmasında yapının orijinal koordinat sistemi kullanılmış ise, bu tür yapılarda Laplace denkleminin çözümünü yapmak oldukça karmaşık ve zordur. Bu tür yapılarda iki-boyutlu potansiyel problemlerini çözmek için, güçlü bir yöntem olan Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılabilir. Burada orijinal yapının sınırları, Laplace denklemi ile çözümü daha kolay bulunabilen basit bir konfigürasyona dönüştürülmektedir (Collin 1992).

Şekil 3.4'de ve Denklem (3.2)'de görüldüğü gibi, Schwarz-Christoffel dönüşümü kullanılarak Z-düzlemi ile verilen bir çokgenin iç bölgesi, W-düzlemi ile verilen reel eksenin üst yarı bölgesine dönüştürülür. Bu dönüşüm tekniği, çözümü zor ve karmaşık olan değişik geometrilerdeki yapıların, çözümü iyi-bilinen paralel plakalı yapılara dönüştürülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.3. Kuplajlı İletim Hatları

Ekranlanmamış iki iletim hattı birbirine yakın olduğunda, her bir hattın elektromagnetik alan etkileşiminden dolayı, hatlar arasındaki güç kuplajlanabilir. Böyle bir durumda, iki hattın elektromagnetik alanları arasında sürekli bir kuplaj söz konusu olup, bu şekilde tasarlanan yapılar kuplajlı hatlar olarak bilinir. Birden fazla iletkene sahip olan bu tür hatlar, genellikle birbirine yakın olarak yerleştirilmiş üç iletkenden meydana gelmektedir. Kuplajlı iletim hatlarının (şerit hat yapıları veya mikroşerit hat yapılarında olduğu gibi) TEM modunda çalıştığı kabul edilmektedir. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi, elektromagnetik alanların oluşturduğu kuplaj etkisinden dolayı, kuplajlı iletim hatları, iki farklı propagasyon modunu desteklemektedir. Çift (even) ve tek (odd) mod olarak adlandıran bu modların kapasite ve karakteristik empedans değerleri birbirinden farklıdır. Homojen dielektrik ortama sahip hatlarda (örneğin kuplajlı şerit yapılarda olduğu gibi), bu iki modun propagasyon hızları birbirine eşittir. Söz konusu bu durum, devre tasarımları (örneğin yönlü kuplörler gibi) için önemli bir özelliktir. Ancak, kuplajlı mikroşerit yapılarda olduğu gibi, bazı iletim hatlarında ortam homojen değildir. Elektrik alan çizgilerinin bir kısmı, dielektrik taban üzerindeki hava ortamına yayılır. Kuplajlı yapılarda hava ortamında yayılan elektrik alan çizgileri davranışı, çift ve tek mod durumunda birbirinden farklıdır. Sonuç olarak, homojen olmayan ortamlara sahip iletim hatlarında çift ve tek mod için efektif dielektrik sabiti ve faz hızı eşit değildir. Bu nedenle, çalışma frekansları da farklıdır. Frekanstaki farklılık, bu tür kuplajlı hatların devrelerde kullanılması durumunda devre performansını olumsuz yönde etkiler.

Kuplajlı iletim hatların propagasyon karakteristiklerini tanımlamak için, çeşitli analitik teknikler mevcuttur. Genel olarak dört farklı yöntem vardır. Bu yöntemler; çift ve tek mod yöntemi, kuplajlı mod formülasyonu, grafik dönüşüm tekniği ve benzer dönüşüm tekniğidir. Çift ve tek mod yöntemi, simetrik kuplajlı hatların davranışlarını tanımlanmak için en kullanışlı yoldur. Bu analiz yöntemleri; homojen ortamdaki kuplajlı hatlar (kuplajlı şerit hatlar gibi) ve homojen olmayan bir ortamdaki kuplajlı hatlar (kuplajlı mikroşerit, kuplajlı CPW ve kuplajlı paralel CPW yapıları gibi) için uygulanabilir.

3.3.1. Kuplajlı hat teorisi

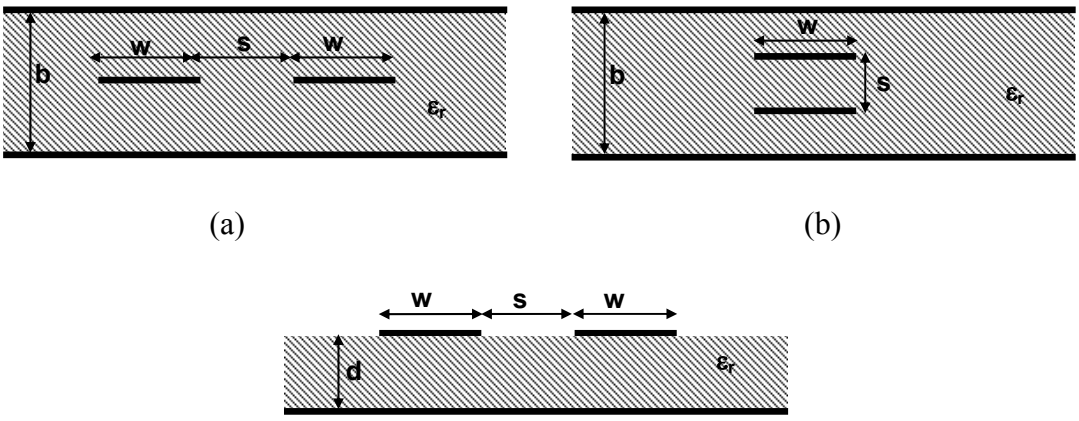
Elektromagnetik dalga yayılmasının TEM modunda varsayıldığı bir durumda kuplajlı hat elektriksel karakteristikleri, hat üzerindeki yayılım hızı ve hatlar arasında oluşan toplam kapasite ile belirlenebilir. Şekil 3.5 ile verilen kuplajlı hatlar, Şekil 3.6'daki eşdeğer bir devreyle gösterilebilir. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi, C_{11} kapasitesi; II. şerit iletkenin olmadığı bir durumda, I. şerit iletken ile toprak düzlem arasındaki kapasiteyi temsil etmektedir. C_{22} kapasitesi; I. şerit iletkenin olmadığı bir durumda, II. şerit iletken ile toprak düzlem arasındaki kapasiteyi temsil etmektedir. C_{12} kapasitesi ise; toprak düzlem olmadığı bir durumda, iki şerit iletken arasındaki kapasiteyi temsil etmektedir. Şerit iletkenlerin aynı büyüklükte ve aynı konumda olduğu bir durumda, C_{11} kapasitesi C_{22} kapasitesine eşit olur.

Kuplajlı iletim hatlarında çift ve tek mod olmak üzere iki tür besleme söz konusudur. Çift mod durumunda şerit iletkenlerdeki akım, aynı yönde ve aynı genliktedir. Tek mod durumunda, şerit iletkenlerdeki akım zıt yönlü, genlikleri ise aynıdır. Bu iki mod durumunun elektrik alan çizgileri Şekil 3.7'de gösterilmektedir.

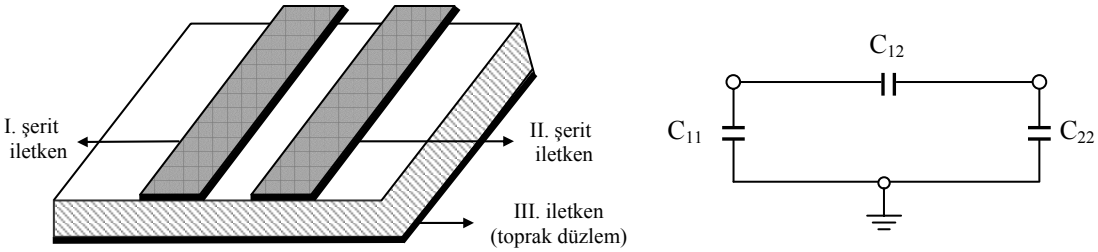
Kuplajlı bir iletim hattında iki şerit iletkenin de eşit uzunluklu olması durumunda, simetrik bir konfigürasyon meydana gelmektedir. Simetrik konfigürasyon, kuplajlı hatların analizini ve tasarımını oldukça kolaylaştırmaktadır. Çift mod durumunda elektrik alan, merkez çizgi etrafında düz veya paralel bir simetriye sahip olup, iki şerit iletken arasında herhangi bir akım akışı söz konusu değildir. Bu durumun eşdeğer devresi Şekil 3.7a ile verilmiştir. Burada C_{12} kapasitesi açık devredir. Şekil 3.7a'da görüldüğü gibi, şerit iletkenler arasında oluşan magnetik duvardan dolayı, her bir şerit iletken ayrı bir iletim hattıymış gibi davranış sergilemektedir. Böylece, çift mod durumu için toplam hat kapasitesi, her bir şerit iletken ile toprak düzlem arasında oluşan kapasiteden meydana gelir.

$$C_{çift} = C_{11} = C_{22} \tag{3.3}$$

Çift mod durumunda, iki şerit iletkenin aynı boyutta ve aynı konumda olduğu kabul edilir. Çift mod için karakteristik empedans;



Şekil 3.5: Kuplajlı Yapıların Kesit Görünümleri, (a) Kenar Kuplajlı Şerit Hat, (b) Geniş-Kenar Kuplajlı Şerit Hat, (c) Kuplajlı Mikroşerit Hat

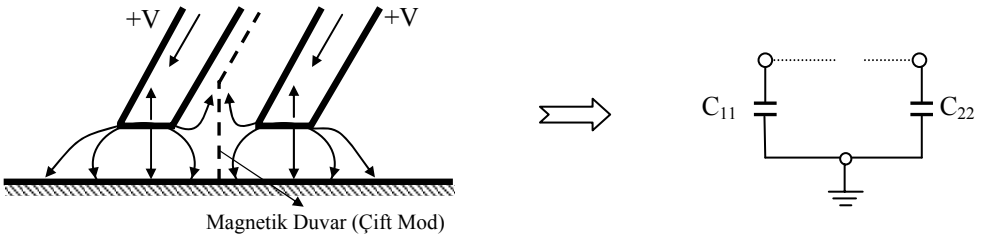


Şekil 3.6: Üç İletkenli Kuplajlı İletim Hattı ve Eşdeğer Devresi

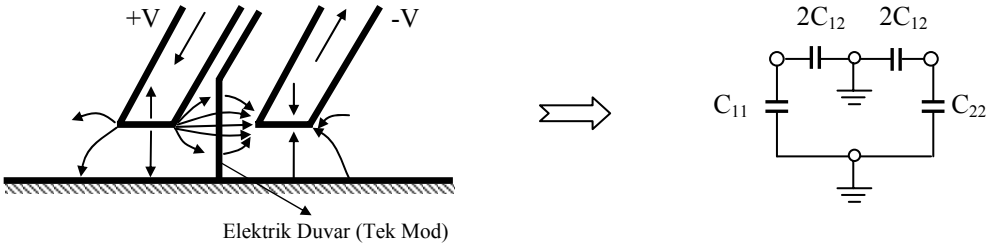
$$Z_{0çift} = \sqrt{\frac{L}{C_{çift}}} = \frac{\sqrt{LC_{çift}}}{C_{çift}} = \frac{1}{vC_{çift}} \tag{3.4}$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada v:hattın yayılım hızıdır.

Tek mod durumunda, elektrik alan çizgileri merkez çizgi etrafında düz bir simetriye sahiptir ve iki şerit iletken arasında değeri önemli olmayan bir voltaj meydana gelmektedir. Söz konusu bu durum, Şekil 3.7b'deki eşdeğer devre ile temsil edilmiştir. Şekil 3.7b'de görüldüğü gibi, tek mod durumunda şerit iletkenlerin ortasında bir elektrik duvar varmış gibi düşünülür. Burada, elektrik duvar nedeniyle, her bir şerit iletken ile toprak düzlemler arasında oluşan kapasiteler birbirinden izole olduğu için, her iki kapasite değeri de birbirine eşittir.



(a)



(b)

Şekil 3.7: Kuplajlı Mikroşerit Yapının Çift ve Tek Mod Beslemesi ile Eşdeğer Kapasite Devresi, (a) Çift Mod, (b) Tek Mod

Her bir şerit iletken ve toprak düzlemler arasında oluşan toplam kapasite;

$$C_{tek} = C_{11} + 2C_{12} = C_{22} + 2C_{12} \tag{3.5}$$

şeklinde ifade edilir. Tek mod için karakteristik empedans ise;

$$Z_{0tek} = \frac{1}{vC_{tek}} \tag{3.6}$$

şeklindedir. Denklem (3.4) ve Denklem (3.6) bağıntılarında geçen çift mod karakteristik empedans ($Z_{0çift}$) ile tek mod karakteristik empedans (Z_{0tek}) ifadeleri kullanılarak, kuplajlı iletim hatları için kuplaj katsayısı;

$$K(dB) = -20\log\left(\frac{Z_0(çift) - Z_0(tek)}{Z_0(çift) + Z_0(tek)}\right), \quad K = \left(\frac{Z_0(çift) - Z_0(tek)}{Z_0(çift) + Z_0(tek)}\right) \tag{3.7}$$

bağıntıları ile ifade edilir.

4. TAM EKRANLI KUPLAJLI İLETİM HATLARININ TASARIMI VE ANALİZİ

Mikrodalga ve milimetrik-dalga devreleri, genellikle çevreden dolayı meydana gelen mekaniksel bozulma ve elektromagnetik girişimlere karşı bir dikdörtgen dalga kılavuzu kullanılarak ekranlanmaktadır. Tüm kenarları toprak düzlem ile çevrilmiş olan tam ekranlı iletim hatları, bu tür ek tedbirlerin ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Tam ekranlı iletim hatları, Şekil 3.1 ile verilen konvansiyonel mikroşerit, CPW yada bu tür yapıların kuplajlı konfigürasyonlarıyla karşılaştırıldığında, bir çok avantajlara sahiptir. Bu avantajlar, aşağıda verilen maddeler halinde sıralanabilir:

- Tüm kenarlar toprak düzlem ile çevrildiği için, tam ekranlı yapılar, iletim hatlarında meydana gelen ışıma kayıplarını, büyük bir oranda azaltabilme yeteneğine sahiptirler ve böylece bu tür yapılarda dispersiyon düşük seviyededir,
- Tam ekranlı yapılar, iletim hatlarının mekaniksel dayanımına ve sağlamlığına ek katkı sağlarlar ve böylece yapıların ortalama güç taşıma kapasitesini artırabilirler,
- Bu tür yapılar, doğası gereği devreyi dıştan gelebilecek olan elektromagnetik girişimlerden korur. Aynı zamanda, hattı komşu devrelerden izole etme görevini de yaparlar ve böylece iletim hattında oluşabilecek olan gürültü, parazit işaretler, kuplaj, hat karışması ve parazit modlar önemli bir oranda azaltılabilir,
- Tam ekranlı yapılarda doğal olarak tüm kenarlar ekranlandığı için, bu tür iletim hatları, konvansiyonel yapılarda gerek duyulan alt ve üst toprak düzlemler ile yanal toprak düzlemleri aynı potansiyelde tutmak için, kanal-delik yada hava-köprü bağlantı işlemine ihtiyaç duymaksızın çalışma yeteneğine sahiptirler,
- Bu tür yapıların yanal toprak düzlemleri sonlu boyutlara sahip olduğu için, bu tür iletim hatları, geniş bir empedans aralığına sahip olabilir. Aynı zamanda, yapının diğer elektriksel karakteristikleri de yanal ekranlanmış duvarların boyutları değiştirilerek ayarlanabilir.

Yukarıda sıralanan avantajlardan dolayı, hem tam ekranlı CPW yapısı, hem de tam ekranlı CPW yapısının kuplajlı konfigürasyonları bazı araştırmacılar tarafından tasarlanmış ve analizleri değişik analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. İkinci bölüm ile verilen kaynak araştırmasında belirtildiği gibi, tüm çevresi ekranlanmış tam ekranlı kuplajlı CPW ile tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW'nin elektriksel karakteristikleri değişik analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Ancak, quasi-statik yaklaşım içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak, söz konusu yapıların analizleri henüz yapılmamıştır. Daha öncede ifade edildiği gibi, tam ekranlı kuplajlı CPW Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analiz edilmiştir (Homentcovschi ve ark. 1988). Ancak yapılan bu çalışmada, tam ekranlı kuplajlı CPW'nin analizinde yanal toprak düzlemlerin genişliği sonsuz alınmıştır. Bu şekilde modellenerek tasarlanan ve analizi gerçekleştirilen tam ekranlı kuplajlı CPW yapısının pratik olarak gerçeklenmesinde ve üretiminde bir takım problemler çıkabilir.

Bu nedenle, tam ekranlı kuplajlı CPW ile yüz yüze yerleştirilmiş iki CPW yapısından meydana gelen geniş-yanlı kuplajlı CPW'nin elektriksel karakteristiklerinin quasi-statik yaklaşımı içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak elde edilmesi, pratikteki mikrodalga uygulamaları için önemli bir konudur. Çünkü, daha öncede ifade edildiği gibi, Konformal Dönüşüm Tekniği, mikrodalga frekanslarda oldukça doğru sonuçlar verir ve CAD-uyumlu yazılım paketleri için uygun olan kapalı-form analitik çözümlere imkan sağlar.

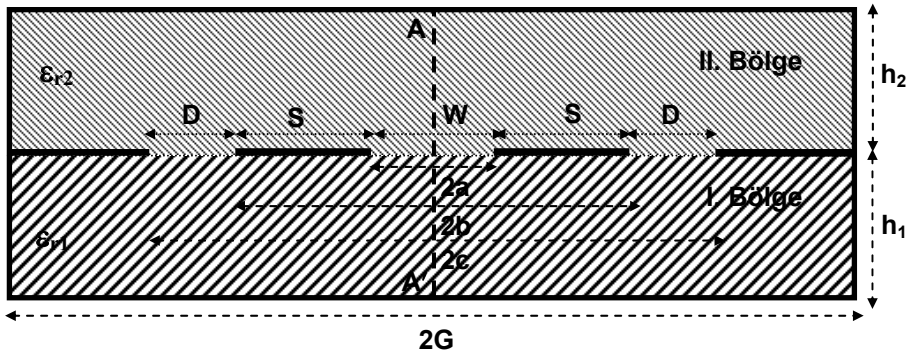
Bu bölümde, ilk olarak tam ekranlı kuplajlı CPW yapısının çift ve tek mod elektriksel karakteristikleri, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak kapalı-form analitik ifadeler formunda elde edilmiştir. Bölümün ikinci kısmında, tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW'nin çift ve tek mod elektriksel karakteristikleri, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak kapalı-form analitik ifadeler formunda elde edilmiştir. Bölümün üçüncü kısmında ise, konvansiyonel iletken destekli CPW yapısına esneklik kazandırmak amacıyla alt ve üst toprak düzlemlere ek dik toprak düzlemler yerleştirilerek bir modelleme ve tasarım gerçekleştirilmiş ve modellenen bu yapının elektriksel karakteristikleri, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analitik ifadeler formunda elde edilmiştir. Yapılan tüm analizlerde, yapıların geometrik boyutlarına bağlı olarak, değişik analiz yöntemleri ile karşılaştırmalar da

yapılmıştır. Çünkü, yapılan karşılaştırmalar, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak elde edilen analitik bağıntıların doğruluğunu görmek açısından önemlidir. Ayrıca, tam ekranlı kuplajlı CPW ile tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW yapıları için elde edilen analitik bağıntıların doğruluğu, farklı geometrik boyutlarda ve frekans değerlerinde Sonnet simülasyon program sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. Sonnet simülasyon programı kullanılarak frekans bağımlı olarak elde edilen söz konusu yapıların elektriksel karakteristikleri, bu tür yapılardaki dispersiyon etkilerini irdelememize yardımcı olabilir. Çünkü, tam ekranlı yapıların avantajları sıralanırken, bu tip yapıların doğası gereği ışıma kayıplarını azaltabileceği ifade edilmiştir.

4.1. Tam Ekranlı Kuplajlı CPW'nin Analizi

Analizi gerçekleştirilecek olan tam ekranlı kuplajlı CPW'nin kesit görünümü, Şekil 4.1 ile verilmiştir. Şekil 4.1'de de görüldüğü gibi, $S(b-a)$ genişliğine sahip iki iletken şerit, iki yanal toprak düzlem arasına simetrik olarak yerleştirilmiştir. Yanal toprak düzlemler ile şerit iletkenler arasındaki aralık $D(c-b)$ olarak verilmiş olup, iki iletken şerit arasındaki aralık ise $W(2a)$ genişliğindedir. I. bölge, h_1 yüksekliğinde olup, ε_{r1} bağıl dielektrik sabitine sahiptir. II. bölge ise, h_2 yüksekliğinde olup, ε_{r2} bağıl dielektrik sabitine sahiptir. Tam ekranlı kuplajlı CPW'nin boyu $h_1 + h_2$ yüksekliğinde olup, genişliği ise $2G$ olarak verilmiştir.

Quasi-statik yaklaşımı içerisinde gerçekleştirilen analizlerde, yapının tüm metal iletkenleri sonsuz ince kalınlıklı ve mükemmel iletken olarak kabul edilmiş olup, dalga yayılımının ise TEM modunda olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, analizi kolaylaştırmak için, dielektrik taban bölgesi izotropik ve kayıpsız ortam olarak düşünülmüştür. Yapılan analizlerde, yapının simetrik özelliğinden dolayı, dik boyuna kesitin sadece yarısı göz önüne alınmıştır. Bu nedenle, Şekil 4.1'de AA' ile ifade edilen boyuna simetrik çizgisi, Bölüm 3.3.1'de kuplajlı yapıların teorik hesaplamalarında kullanılan mod yaklaşımı gereği, çift mod durumunda magnetik duvar, tek mod durumunda ise elektrik duvar gibi davranış sergilemektedir.



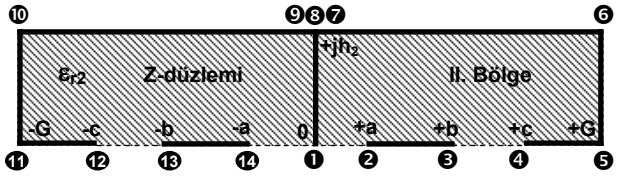
Şekil 4.1: Tam Ekranlı Kuplajlı CPW'nin Kesit Görünümü

4.1.1. Tek (Odd) mod durumu için analiz

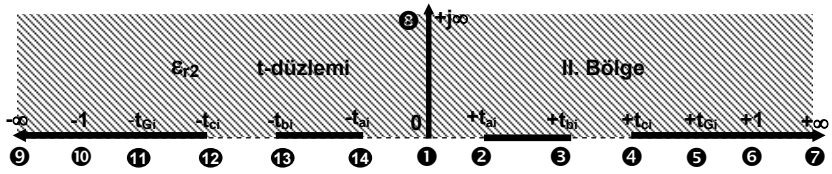
Tam ekranlı kuplajlı CPW'nin tek mod birim uzunluk başına düşen toplam kapasite hesaplamalarında, AA' boyuna simetrik çizgisi, bir elektrik duvar olarak düşünülmüştür. Kısmi kapasite yaklaşımına göre, her bir mod için yapının birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi, Şekil 4.1 ile verilen I. bölge ve II. bölge ile temsil edilen dielektrik ortam kapasitelerinin toplamı şeklindedir. I. bölge ve II. bölge ile temsil edilen dielektrik ortam kapasitelerinin hesaplanması için şöyle bir yol izlenebilir; her iki bölgenin de geometrik özellikleri birbirine benzer olup, sadece farklı olan parametreler bölgelerin yükseklikleri(h_1, h_2) ve bağıl dielektrik sabitleridir($\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}$). Bu nedenle, sadece bir bölge için (alt yada üst), kapasite hesaplaması yapmak yeterlidir. Kapasite hesaplamaları sırasında, farklı olan parametrelerin gerekli bağıntılarda yerlerine konulmasıyla diğer bölge kapasitesi de elde edilmiş olur. İlk olarak, Şekil 4.2 ile verilen ve Z-düzlemi ile tasvir edilen II. bölge, ters Schwartz-Christoffel dönüşümü kullanılarak, aşağıda verilen integral bağıntısı vasıtasıyla t-düzleminin (Şekil 4.2b) üst yarı bölgesine dönüşür:

$$Z = A\int_0^t \frac{dt}{\sqrt{(t^2-1)(t^2-t_{Gi}^2)}} \tag{4.1}$$

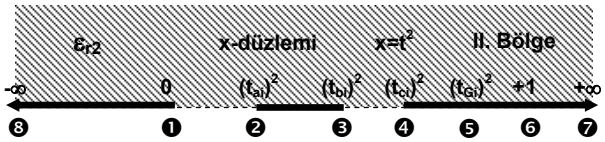
Burada $i = 1, 2$ olmak üzere, sırasıyla birinci ve ikinci bölgeleri temsil etmektedir. Şekil 4.2b ile verilen t-düzlemindeki t_{Gi} ifadesi, Cheng ve Robertson (1995)



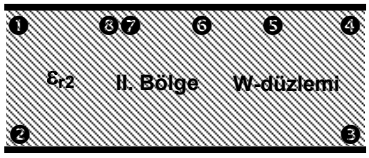
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.2: Tek Mod Durumu için bir Seri Konformal Dönüşümler, (a) Orijinal Yapı, (b) Ters Schwarz-Christoffel Dönüşümü, (c) Ara Dönüşüm, (d) Dönüştürülmüş Paralel Plakalı Yapı

tarafından verilen bağıntılardan faydalanılarak;

$$t_{Gi} = \left[\frac{\exp(\pi G / h_i) - 2}{\exp(\pi G / h_i) + 2}\right]^2, \qquad 1 < \frac{G}{h_i} < \infty,$$

$$t_{Gi} = \sqrt{1 - \left[\frac{\exp(\pi h_i / G) - 2}{\exp(\pi h_i / G) + 2}\right]^4}, \qquad 0 < \frac{G}{h_i} < 1 \tag{4.2}$$

şeklinde ifade edilir. Şekil 4.2b'de verilen t_{ai}, t_{bi} ve t_{ci} ifadeleri ise;

$$\frac{G}{h_i} = \frac{K(t_{Gi})}{K(t'_{Gi})}, \qquad \frac{a}{G} = \frac{F\left(\arcsin(\arcsin(t_{ai} / t_{Gi}), t_{Gi}\right)}{K(t_{Gi})},$$
$$\frac{b}{G} = \frac{F\left(\arcsin(\arcsin(t_{bi} / t_{Gi}), t_{Gi}\right)}{K(t_{Gi})}, \quad \frac{c}{G} = \frac{F\left(\arcsin(\arcsin(t_{ci} / t_{Gi}), t_{Gi}\right)}{K(t_{Gi})} \tag{4.3}$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (4.3) ile verilen $t_{Gi}^{'}$ ifadesi, $t_{Gi}^{'}=\sqrt{1-t_{Gi}^{2}}$ eşitliği ile ifade edilir. Ayrıca, $F(\phi,k)$ ifadeleri ise, Jakobi notasyonunda yazılmış tam olmayan eliptik integrali temsil etmektedir. Bu integral ifadesi, Cheng ve Robertson (1995) tarafından verilen yaklaşık çözümlerden faydalanılarak hesaplanabilir. t-düzleminin üst yarı bölgesindeki ❶-❽ arası noktalar ile temsil edilen dönüştürülmüş elektrik duvarın sol ve sağ bölgeleri, y sanal (imajiner) eksenine göre simetrik olduğu için, II. bölge kapasite hesaplanmasında mod yaklaşımı gereği, II. bölgenin sadece üst sağ yarı bölgesi alınır. II. bölgenin üst sağ yarı bölgesi ise, $x=t^{2}$ dönüşüm fonksiyonu ile Şekil 4.2c ile verilen x-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür. Buradaki x-düzlemindeki noktalar; $x_{ai}=t_{ai}^{2}$, $x_{bi}=t_{bi}^{2}$ ve $x_{ci}=t_{ci}^{2}$ şeklindedir. Son olarak, x-düzleminin üst yarı bölgesi, aşağıda verilen Schwartz-Christoffel dönüşümü vasıtasıyla W-düzlemi ile tasvir edilen paralel plakalı bir yapıya dönüşür:

$$W=A\int_{0}^{x}\frac{dx}{\sqrt{x(x-x_{ai})(x-x_{bi})(x-x_{ci})}} \tag{4.4}$$

Şekil 4.2d ile tasvir edilen paralel plakalı yapılarda, iyi-bilinen kapasite bağıntısından faydalanılarak, I. ve II. bölgede oluşan tek mod kapasitesi;

$$C_{i\,tek}=\varepsilon_{0}\varepsilon_{ri}\frac{K(k_{i})}{K(k_{i}^{'})} \tag{4.5}$$

şeklinde bulunur. Denklem (4.5) içerisinde yer alan $K(k_{i})/K(k_{i}^{'})$ oranı için yaklaşık çözümler Hilberg (1969) tarafından verilmiştir. Denklem (4.5) içerisinde geçen k_{i} modülü;

$$k_{i}=\sqrt{\frac{t_{ci}^{2}(t_{bi}^{2}-t_{ai}^{2})}{t_{bi}^{2}(t_{ci}^{2}-t_{ai}^{2})}},\qquad k_{i}^{'}=\sqrt{1-k_{i}^{2}} \tag{4.6}$$

şeklindedir. Sonuç olarak, tam ekranlı kuplajlı CPW'nin tek mod durumu için birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi;

$$C_{tek}=C_{1(tek)}+C_{2(tek)} \tag{4.7}$$

şeklinde elde edilir. Böylece, tam ekranlı kuplajlı CPW'nin tek mod durumu için efektif dielektrik sabiti, faz hızı ve karakteristik empedansı;

$$\varepsilon_{eff(tek)} = \frac{C_{tek}(\varepsilon_{ri})}{C_{tek}(1)}, \quad v_{faz(tek)} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff(tek)}}}, \quad Z_{0(tek)} = \frac{1}{v_{faz(tek)} C_{tek}} \tag{4.8}$$

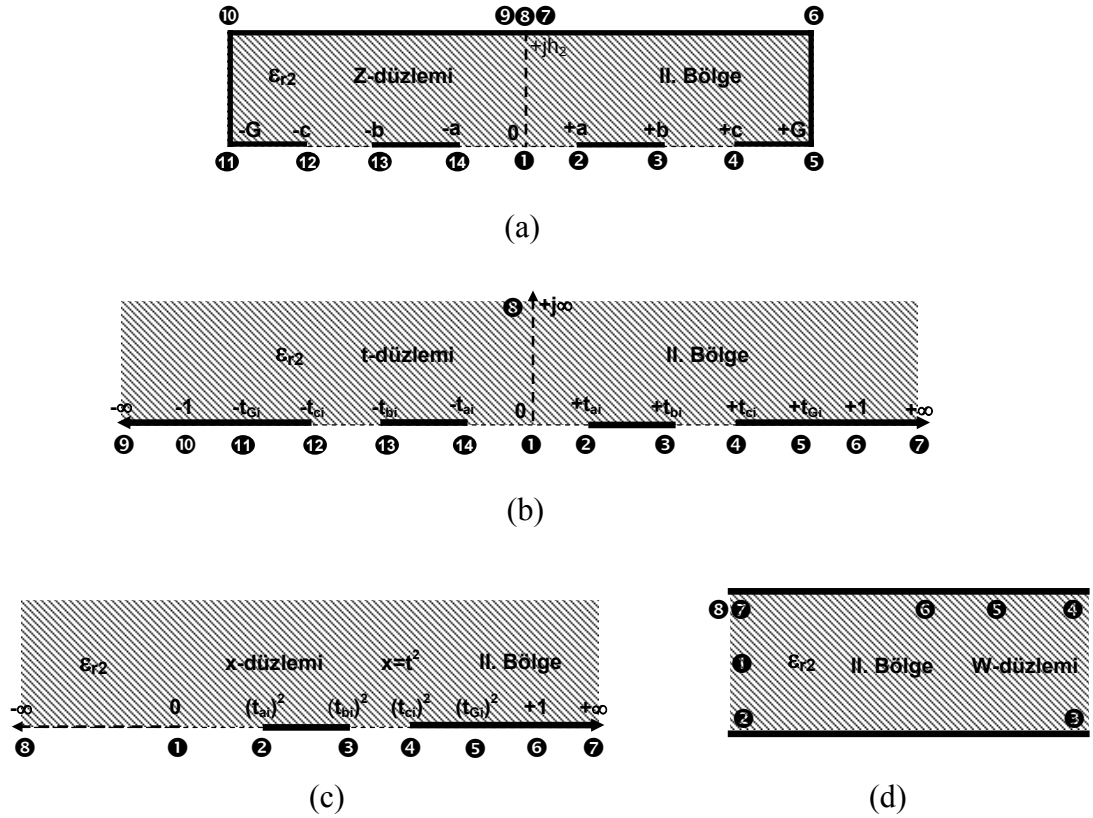
şeklinde ifade edilir. Burada c terimi, ışık hızını ifade etmektedir.

4.1.2. Çift (Even) mod durumu için analiz

Tam ekranlı kuplajlı CPW'nin çift mod birim uzunluk başına düşen toplam kapasitesi, tek mod kapasite hesaplamalarındaki benzer işlemler kullanılarak elde edilebilir. Şekil 4.1 ile verilen yapıda AA' boyuna simetrik çizgisi, mod yaklaşımı gereği, çift mod durumunda magnetik bir duvarmış gibi davranış sergiler. Toplam çift mod kapasitesi, tek mod kapasite hesaplamalarında olduğu gibi, sadece II. bölge üzerinden yapılabilir. Çünkü, çift mod durumunda, her iki bölgenin de geometrik özellikleri benzerdir. Farklı olan parametreler, bölgelerin yükseklikleri(h_1, h_2) ve bağıl dielektrik sabitleridir ($\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}$). Çift mod kapasite hesaplamalarında, Şekil 4.3a-c ile verilen Z-düzleminden t-düzlemine geçiş ile t-düzleminden x-düzlemine geçiş için kullanılan dönüşümler, yapıların geometrik benzerliklerinden dolayı, tek mod için gerçekleştirilen işlemler ile aynıdır. Farklı olan geometrik özellik ise, tek mod için elektrik duvarın yerini, çift mod için magnetik duvarın almasıdır. Geometrik özellikteki bu farklılık, kendisini x-düzleminden W-düzlemine geçiş sırasında göstermektedir. x-düzleminden W-düzlemine geçiş, Şekil 4.3c-d'de görüldüğü gibi, Schwartz-Christoffel dönüşümü kullanılarak;

$$W = A\int_0^x \frac{dx}{\sqrt{(x - x_{ai})(x - x_{bi})(x - x_{ci})}} \tag{4.9}$$

integrali vasıtasıyla gerçekleşir. x-düzleminin üst yarı bölgesi, W-düzlemi ile tasvir edilen paralel plakalı bir yapıya dönüşür. Burada $i = 1, 2$ olmak üzere, sırasıyla I. ve II. bölgeleri temsil etmektedir. Böylece, çift mod için I. ve II. bölge kapasitesi;



Şekil 4.3: Çift Mod Durumu için bir Seri Konformal Dönüşümler, (a) Orijinal Yapı, (b) Ters Schwarz-Christoffel Dönüşümü, (c) Ara Dönüşüm, (d) Dönüştürülmüş Paralel Plakalı Yapı

$$C_{i\,tek} = \varepsilon_0 \varepsilon_{ri} \frac{K(k_i)}{K(k_i^{'})} \tag{4.10}$$

şeklinde elde edilir. Yukarıdaki bağıntıda geçen $K(k_i)/K(k_i^{'})$ oranı için yaklaşık çözümler, Hilberg (1969) tarafından verilmiştir. Çift mod için k_i modülü ise;

$$k_{ei} = \sqrt{\frac{t_{bi}^2 - t_{ai}^2}{t_{ci}^2 - t_{ai}^2}}\ , \qquad k_{ei}^{'} = \sqrt{1 - k_{ei}^2} \tag{4.11}$$

şeklindedir. Tam ekranlı kuplajlı CPW'nin çift mod için birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi;

$$C_{çift} = C_{1(çift)} + C_{2(çift)} \tag{4.12}$$

şeklinde yazılabilir. Tam ekranlı kuplajlı CPW'nin çift mod durumunda efektif dielektrik sabiti, faz hızı ve karakteristik empedans ifadeleri ise;

$$\varepsilon_{eff(çift)} = \frac{C_{çift}(\varepsilon_{ri})}{C_{çift}(1)}, \quad v_{faz(çift)} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff(çift)}}}, \quad Z_{0(çift)} = \frac{1}{v_{faz(çift)} C_{çift}} \tag{4.13}$$

bağıntıları ile verilir. Burada c, boşluktaki ışık hızıdır. Çift ve tek mod karakteristik empedans bağıntıları kullanılarak, tam ekranlı kuplajlı CPW'nin kuplaj katsayısı, aşağıdaki bağıntılar şeklinde ifade edilir:

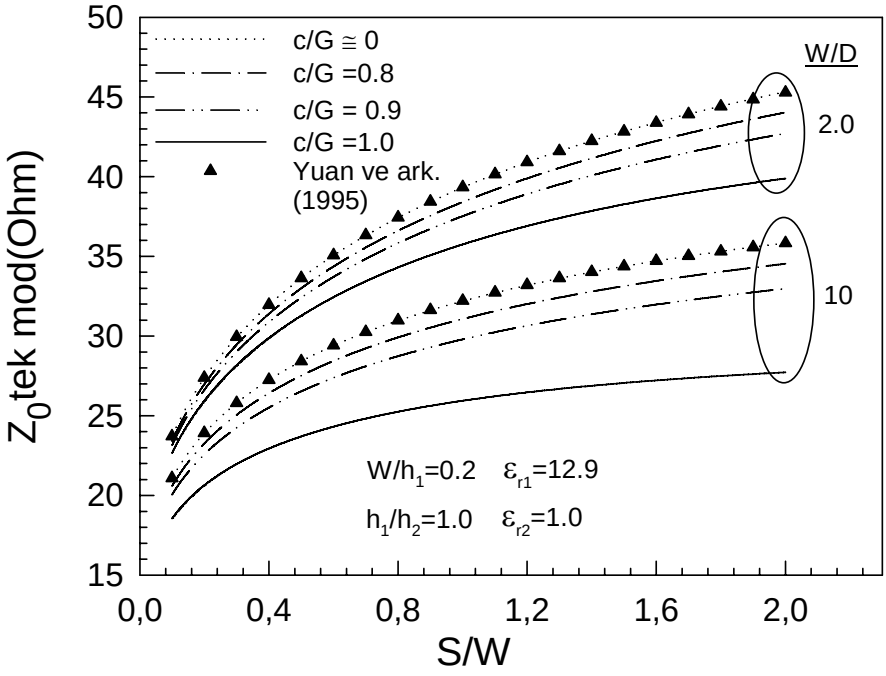
$$C_{db} = -20\log\left(\frac{Z_{0(çift)} - Z_{0(tek)}}{Z_{0(çift)} + Z_{0(tek)}}\right), \qquad C = \frac{Z_{0(çift)} - Z_{0(tek)}}{Z_{0(çift)} + Z_{0(tek)}} \tag{4.14}$$

4.1.3. Tam ekranlı kuplajlı CPW için nümerik sonuçlar ve tartışmalar

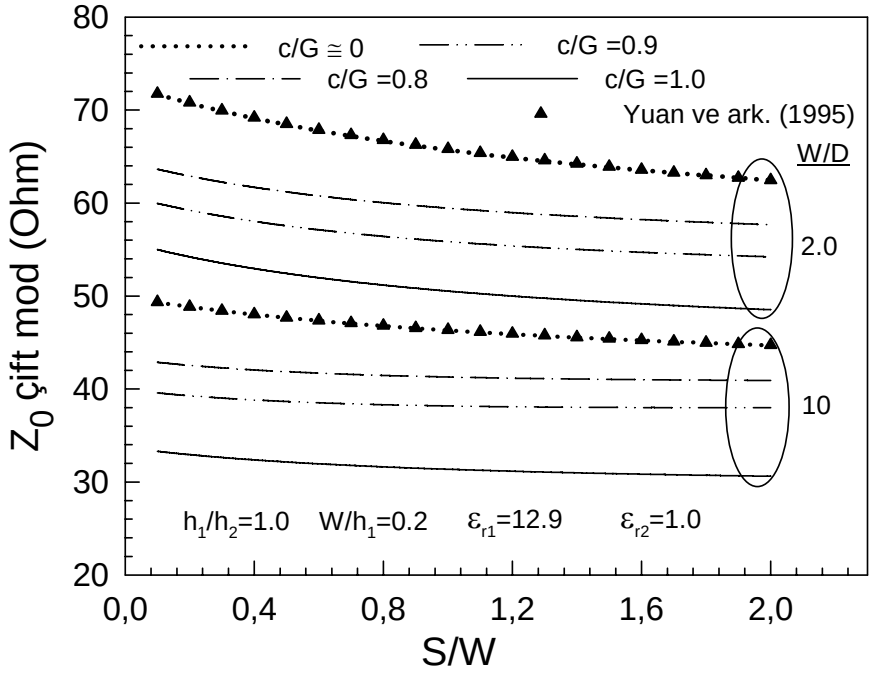
Şekil 4.1 ile tasvir edilen tam ekranlı kuplajlı CPW'nin elektriksel karakteristikleri, quasi-statik yaklaşımı içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analitik bağıntılar formunda elde edilmiştir. Bu bölüm içerisinde elde edilen formüllerin doğruluğunu kanıtlamak için üç ayrı karşılaştırma yapılmıştır. İlk olarak yapılan karşılaştırma, Şekil 4.1'deki yapı ile Yuan ve arkadaşları (1995) tarafından Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analizi gerçekleştirilen sonsuz yanal toprak düzlem genişliğine sahip kuplajlı CPW yapısı arasında yapılmıştır. Şekil 4.1 ile verilen tam ekranlı kuplajlı CPW yapısında, c/G oran değeri sıfıra (c/G≅0) yaklaştığı zaman, yapının geometrik özellikleri, Yuan ve arkadaşları (1995) tarafından analiz edilen yapıya dönüşmektedir. Bu nedenle, her iki yapı arasında karşılaştırma yapabilmek için c/G≅0 oran değerleri, Şekil 2.4-6 ile verilen grafiklerde birlikte verilmiştir. İkinci karşılaştırma, Gentili ve Macchiarella (1994) tarafından Green fonksiyonları yardımıyla karışık spektral-domen metodu kullanılarak analiz edilen tam ekranlı kuplajlı CPW yapısı ile olmuştur. Karşılaştırma yapabilmek için, Şekil 4.1 ile verilen yapının geometrik boyutları, söz konusu çalışmadaki yapının geometrik boyutları ile aynı alınmıştır. Son karşılaştırma ise, tam ekranlı kuplajlı

CPW'nin farklı geometrik boyutlarda ve frekans değerlerinde, Sonnet simülasyon programında modellenmesiyle yapılmıştır.

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 ile verilen grafiklerde, ε_{r1}=12,9, ε_{r2}=1.0, h_1/h_2=1.0 ve W/h_1=0.2 oran değeri için, W/D ile c/G'nin farklı oran değerlerinde S/W oranının bir fonksiyonu olarak, tam ekranlı kuplajlı CPW'nin tek ve çift mod karakteristik empedans değişim eğrileri görülmektedir. Şekil 4.1 ile verilen yapıda da görüldüğü gibi, c/G oran değeri sıfıra yaklaştığı zaman tam ekranlı kuplajlı CPW yapısı, Yuan ve arkadaşları (1995) tarafından analiz edilen yapıya dönüşmektedir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 ile verilen grafiklerde, c/G oranı sıfıra yaklaştığı zaman, bu çalışmada elde edilen tek ve çift mod empedans değerleri ile Yuan ve arkadaşları (1995) tarafından elde edilen empedans değerlerinin üst üste çakıştığı görülmektedir. c/G oranının artması durumunda, tek ve çift mod empedans değerlerinde önemli ölçüde azalma meydana gelmektedir. S/W oranının artması durumunda, çift mod empedans değerlerinde belli bir oranda azalma görülmekte, tek mod empedans değerlerinde ise, dikkate değer bir ölçüde artış görülmektedir. Ayrıca, W/D oranındaki artışın da tek ve çift mod empedans değerlerini önemli ölçüde azalttığı görülmektedir.

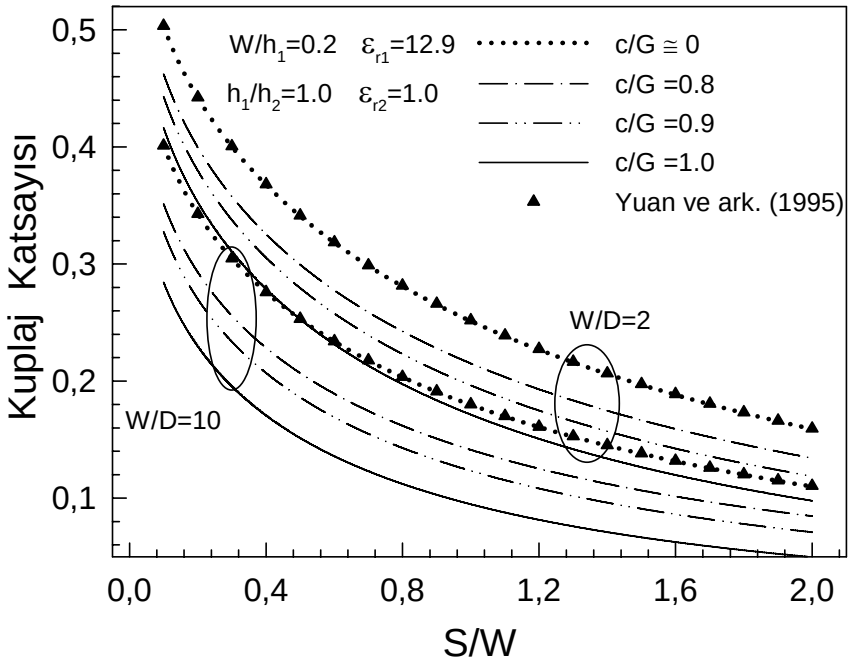


Şekil 4.4: S/W Oranının bir Fonksiyonu Olarak Tam Ekranlı Kuplajlı CPW Yapısı için Tek Mod Karakteristik Empedans Değişimi



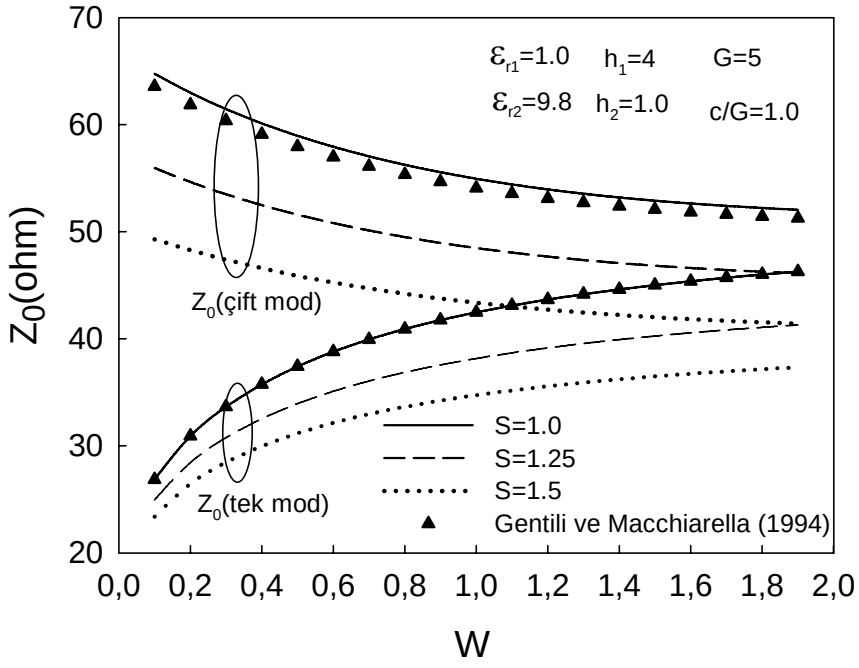
Şekil 4.5: S/W Oranının bir Fonksiyonu Olarak Tam Ekranlı Kuplajlı CPW Yapısı için Çift Mod Karakteristik Empedans Değişimi

Şekil 4.6 ile verilen grafikte, Şekil 4.4-5 ile verilen tek ve çift mod karakteristik empedans değişim grafiklerindeki aynı geometrik parametre ve oran değerleri alınmıştır. Şekil 4.6 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, c/G oran değerinin artması durumunda, kuplaj katsayısı değerleri geniş bir aralıkta azalmaktadır. Tek ve çift mod karakteristik empedans değişim eğrilerini veren grafiklerde olduğu gibi, kuplaj katsayısı değişim eğrilerini veren grafikte de, c/G oranının sıfıra yaklaşması durumunda, bu bölümde elde edilen analitik bağıntıların nümerik sonuçları ile Yuan ve arkadaşları (1995) tarafından elde edilen analitik bağıntıların nümerik sonuçları üst üste çakışmaktadır. Ayrıca, Şekil 4.6'da da görüldüğü gibi, W/D ve S/W oran değerlerinin artması durumunda, kuplaj katsayısı değerleri önemli bir ölçüde azalmaktadır.



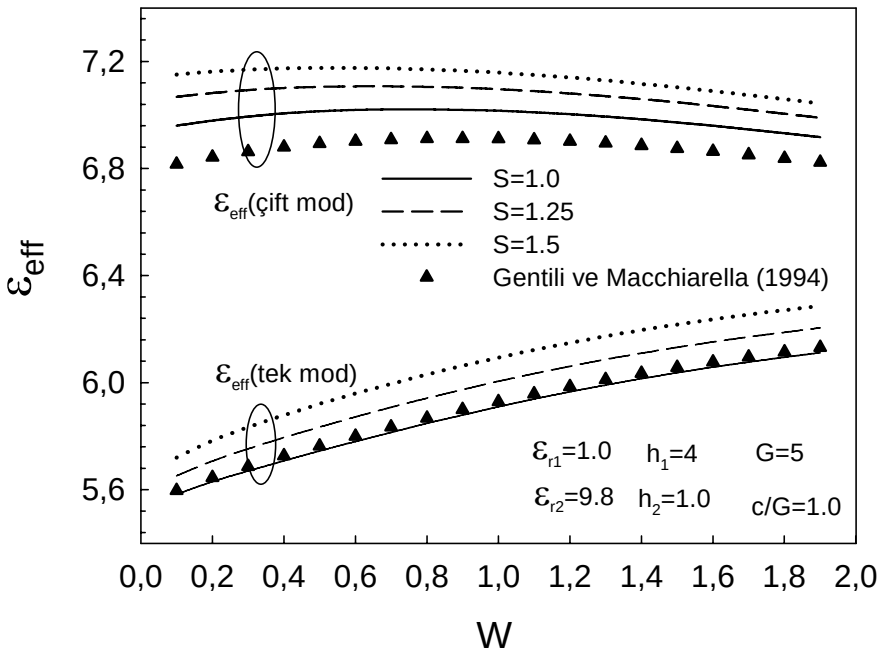
Şekil 4.6: S/W Oranının bir Fonksiyonu Olarak Tam Ekranlı Kuplajlı CPW Yapısı için Kuplaj Katsayısı Değişimi

Şekil 4.7 ile verilen grafik, ε_{r1}=1.0, ε_{r2}=9.8, h_1=4, h_2=1.0, c/G=1.0, G=5, S=1.0, S=1.25 ve S=1.5 değerlerinde, şeritler arası aralığı ifade eden W'nın bir fonksiyonu olarak, tam ekranlı kuplajlı CPW'nin tek ve çift mod karakteristik empedans değişim eğrilerini vermektedir. Bu grafikteki geometrik boyutlar, Gentili ve Macchiarella (1994) tarafından analiz edilen tam ekranlı kuplajlı CPW yapısının boyutları ile aynı alınmıştır. Şekil 4.7 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, bu bölüm içerisinde türetilen analitik bağıntı sonuçları ile Green fonksiyonları vasıtasıyla karışık spektral-domen metodu kullanılarak elde edilen sonuçlar arasında iyi bir uyum görülmektedir. Sonuçlar arasındaki uyum, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak elde edilen analitik ifadelerin doğruluğunu ortaya koymaktadır. Kuplajlı CPW yapısındaki şerit genişliğini temsil eden S'in artması durumunda, tek ve çift mod empedans değerlerinde önemli bir oranda azalma meydana gelmektedir. Şeritler arası aralığı ifade eden W'ın artması ile birlikte, tek mod empedans değerlerinde önemli bir miktarda artış görülürken, çift mod empedans değerlerinde daha az bir miktarda azalma görülmektedir.



Şekil 4.7: Şerit İletkenler Arası Aralığın bir Fonksiyonu Olarak Tam Ekranlı Kuplajlı CPW'nin Çift ve Tek Mod Karakteristik Empedans Değişimi

Şekil 4.8 ile verilen grafikte, tam ekranlı kuplajlı CPW yapısının efektif dielektrik sabiti değişim eğrileri görülmektedir. Bu grafikteki geometrik parametreler ile Şekil 4.7 ile verilen grafikteki geometrik parametreler aynı alınmıştır. Şekil 4.8 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, tam ekranlı kuplajlı CPW yapısında şerit genişliklerini ifade eden S'in artması durumunda, tek ve çift mod efektif dielektrik sabiti değerlerinde önemli bir ölçüde artma görülmektedir. Şeritler arası aralığı ifade eden W'ın artması durumunda ise, tek mod efektif dielektrik sabiti değerlerinde önemli bir ölçüde artma gözlenirken, çift mod efektif dielektrik sabiti değerlerinde daha az bir değişim gözlenmektedir. Şekil 4.7'deki empedans değişimlerini veren grafik analizin de olduğu gibi, bu bölümde türetilen efektif dielektrik sabiti değerleri ile Gentili ve Macchiarella (1994) tarafından Green fonksiyonları yardımıyla karışık spektral-domen metodu kullanılarak elde edilen efektif dielektrik sabiti değerleri uyum içerisindedir.



Şekil 4.8: Şerit İletkenler Arası Aralığın bir Fonksiyonu Olarak Tam Ekranlı Kuplajlı CPW'nin Çift ve Tek Mod Efektif Dielektrik Sabiti Değişimi

Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de, tam ekranlı kuplajlı CPW yapısı için tek ve çift mod efektif dielektrik sabiti ve karakteristik empedans değişimleri, Sonnet simülasyon program sonuçları ile birlikte verilmiştir. Her iki tabloda da, değişik geometrik boyutlardaki ve farklı frekans (1 GHz, 21 GHz ve 41 GHz) değerlerindeki tek ve çift mod karakteristik empedans ve efektif dielektrik sabiti değişimleri görülmektedir. Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de de görüldüğü gibi, yüksek frekanslardaki sonnet simülasyon sonuçları ile bu çalışmada türetilen analitik bağıntılar arasında iyi bir uyum görülmektedir. Ayrıca, her iki mod için bağıl hata oranları da tablolar içerisinde verilmiştir. Tablolarda verilen bağıl hata oranlarındaki oldukça düşük değerler, bu bölüm içerisinde türetilen analitik ifadelerin doğruluğunu kanıtlamaktadır. Her iki tablodaki değerler, tam ekranlı kuplajlı CPW yapısının düşük dispersiyona sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.1: Tek Mod Durumu için Tam Ekranlı Kuplajlı CPW'nin Değişik Geometrik Boyutlarında ve Frekans Değerlerinde Konformal Dönüşüm Tekniği ile Sonnet Simülasyon Program Sonuçlarının Karşılaştırılması

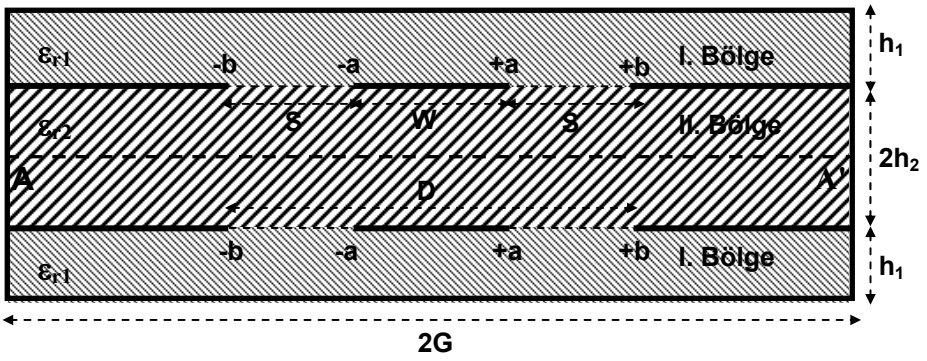
S=30 μm, h_2=100 μm, 2a=W=40 μm, D=30 μm, 2G=200 μm, ε_{r2} =1, ε_{r1} =12.9							
FREKANS (GHz)	**Tek (Odd) Mod**						
	Efektif Dielektrik Sabiti				**Karakteristik Empedans (Ω)**		
	h_1 (μm)	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Sonnet Simülasyon Sonucu**	**Δ (%)**	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Sonnet Simülasyon Sonucu**	**Δ (%)**
1	25	7.794	7.741	-0.68	35.853	35.619	0.66
	50	7.121	7.102	-0.27	42.451	42.561	0.26
	100	6.950	6.950	0.00	44.246	44.306	0.14
	250	6.947	6.943	-0.06	44.278	44.433	0.35
	500	6.947	6.943	-0.06	44.278	44.434	0.35
21	25	7.794	7.749	-0.58	35.853	36.019	0.46
	50	7.121	7.103	-0.25	42.451	42.731	0.66
	100	6.950	6.951	0.01	44.246	44.344	0.22
	250	6.947	6.944	-0.04	44.278	44.420	0.32
	500	6.947	6.944	-0.04	44.278	44.421	0.32
41	25	7.794	7.750	-0.57	35.853	35.981	0.36
	50	7.121	7.105	-0.23	42.451	42.693	0.57
	100	6.950	6.953	0.04	44.246	44.307	0.14
	250	6.947	6.946	-0.01	44.278	44.379	0.23
	500	6.947	6.946	-0.01	44.278	44.379	0.23
S=30μm, h_2=100μm, 2a=W=40μm, D=50μm, 2G=200μm, ε_{r2} =1, ε_{r1} =12.9 (Yanal Toprak Düzlemlerin Olmadığı Durum)							
1	100	6.950	6.950	0.00	45.169	45.228	0.13
21	100	6.950	6.951	0.01	45.169	45.258	0.20
41	100	6.950	6.954	0.06	45.169	45.219	0.11

Tablo 4.2: Çift Mod Durumu için Tam Ekranlı Kuplajlı CPW'nin Değişik Geometrik Boyutlarında ve Frekans Değerlerinde Konformal Dönüşüm Tekniği ile Sonnet Simülasyon Program Sonuçlarının Karşılaştırılması

S=30μm, h_2=100μm, 2a=W=40μm, D=30μm, 2G=200μm, ε_{r2} =1, ε_{r1} =12.9							
FREKANS (GHz)	**Çift (Even) Mod**						
	Efektif Dielektrik Sabiti				**Karakteristik Empedans (Ω)**		
	h_1 (μm)	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Sonnet Simülasyon Sonucu**	**Δ (%)**	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Sonnet Simülasyon Sonucu**	**Δ (%)**
1	25	8.831	8.753	-0.89	40.774	40.106	-1.67
	50	7.692	7.705	0.17	55.917	56.770	1.50
	100	6.950	6.953	0.04	67.201	69.184	2.87
	250	6.767	6.761	-0.09	70.194	73.208	4.12
	500	6.766	6.760	-0.09	70.222	73.220	4.09
21	25	8.831	8.641	-2.20	40.774	40.418	-0.88
	50	7.692	7.681	-0.14	55.917	56.040	0.22
	100	6.950	6.964	0.20	67.201	67.278	0.11
	250	6.767	6.772	0.07	70.194	70.346	0.22
	500	6.766	6.770	0.06	70.222	70.378	0.22
41	25	8.831	8.653	-2.06	40.774	40.304	-1.17
	50	7.692	7.706	0.18	55.917	55.852	-0.12
	100	6.950	6.997	0.67	67.201	66.996	-0.31
	250	6.767	6.801	0.50	70.194	70.074	-0.17
	500	6.766	6.799	0.49	70.222	70.102	-0.17
S=30μm, h_2=100μm, 2a=W=40μm, D=50μm, 2G=200μm, ε_{r2} =1, ε_{r1} =12.9 (Yanal Toprak Düzlemlerin Olmadığı Durum)							
1	100	6.950	6.953	0.04	70.022	72.084	2.86
21	100	6.950	6.965	0.22	70.022	70.060	0.05
41	100	6.950	7.002	0.74	70.022	69.748	-0.39

4.2. Tam Ekranlı Geniş-Yanlı Kuplajlı CPW'nin Analizi

Tam ekranlı geniş yanlı-kuplajlı CPW'nin kesit görünümü, Şekil 4.9'da görüldüğü gibidir. Tam ekranlı geniş yanlı-kuplajlı CPW, $2h_2$ kalınlıklı ve ε_{r2} bağıl dielektrik sabitine sahip bir dielektrik taban üzerine yüz yüze yerleştirilmiş iki konvansiyonel CPW'den meydana gelmektedir. Yüz yüze yerleştirilmiş her bir CPW yapısı, $W(2a)$ şerit genişliğine sahip olup, yanal toprak düzlemler ile merkez şerit arasındaki aralık genişlikleri $S(b-a)$ olarak verilmiştir. Yanal toprak düzlem genişlikleri ise $G-b$ dir. Şekil 4.9'da görüldüğü gibi, I. bölge ile temsil edilen ε_{r1} bağıl dielektrik sabitine sahip dielektrik tabanların yükseklikleri h_1 dir. Analiz sırasında, tüm metal iletkenler sonsuz ince kalınlıklı ve mükemmel iletken kabul edilmiş olup, dalga yayılımının TEM modunda olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, analizi kolaylaştırmak için dielektrik taban bölgesi izotropik ve kayıpsız ortam olarak düşünülmüştür. Şekil 4.9 ile verilen AA' simetrik çizgisi, mod yaklaşımı gereği çift mod durumunda bir magnetik duvar, tek mod durumunda ise, bir elektrik duvar gibi davranmaktadır. Bölüm 3.3.1 ile verilen kuplajlı hat teorisinde ifade edildiği gibi, AA' simetrik çizgisinin alt ve üst bölgeleri, birbirinden tamamen izole olmaktadır. Böylece, AA' simetrik çizgisi ile birbirinden izole olan alt ve üst bölgelerdeki kapasite değerleri birbirine eşittir. Tam ekranlı geniş yanlı-kuplajlı CPW'nin çift ve tek mod elektriksel karakteristikleri, yapının çift ve tek mod birim uzunluk başına düşen kapasite değerlerinin hesaplanmasıyla elde edilebilir.



Şekil 4.9: Tam Ekranlı Geniş-Yanlı Kuplajlı CPW'nin Kesit Görünümü

4.2.1. Tek (Odd) mod durumu için analiz

Kısmi kapasitans yaklaşımına göre, her bir mod için yapının toplam kapasitesi, I. ve II. bölgelerde oluşan kapasitelerin toplamı şeklindedir. Böylece, birim uzunluk başına düşen toplam tek mod kapasitesi, I. ve II. bölgede oluşan kapasitelerin toplamına eşittir. Tek mod durumu için, AA' simetrik çizgisinin bir elektrik duvar olarak kabul edilmesi durumunda, I. bölge ile II. bölgenin geometrik özelliklerini aynı olur. Burada farklı olan parametreler, I. bölge için ε_{r1} bağıl dielektrik sabiti ile h_1 dielektrik taban yüksekliği, II. bölge için ε_{r2} bağıl dielektrik sabiti ile h_2 dielektrik taban yüksekliğidir. Bu nedenle, tek mod kapasitesini elde etmek için, sadece I. bölge, yada II. bölgede analiz yapmak yeterlidir. İlk olarak, ters Schwartz-Christoffel dönüşümü kullanılarak, I. ve II. bölge ile temsil edilen yapılar, aşağıda verilen bağıntı vasıtasıyla z-düzleminden t-düzlemi ile verilen yapının (Şekil 4.10) üst yarı bölgesine dönüşür:

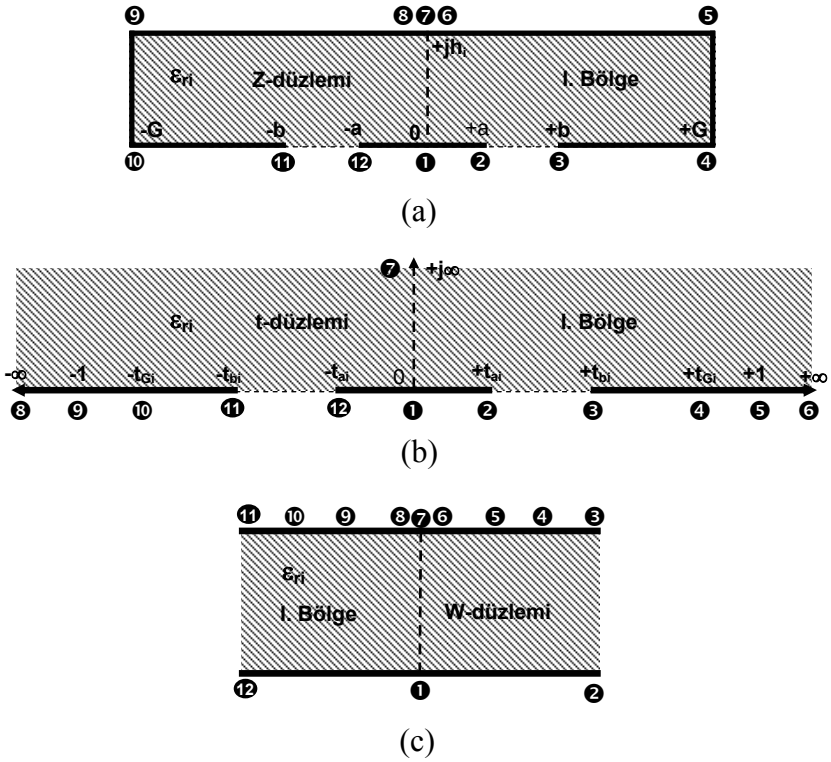
$$Z = A\int_0^t \frac{dt}{\sqrt{(t^2-1)(t^2-t_{Gi}^2)}} \tag{4.15}$$

Denklem (4.15) içerisinde yer alan ve t- düzleminde verilen t_{Gi} ifadesi;

$$t_{Gi} = \left[\frac{\exp(\frac{\pi G}{h_i})-2}{\exp(\frac{\pi G}{h_i})+2}\right]^2, \qquad 1<\frac{G}{h_i}<\infty,$$
$$t_{Gi} = \sqrt{1-\left[\frac{\exp(\frac{\pi h_i}{G})-2}{\exp(\frac{\pi h_i}{G})+2}\right]^4}, \qquad 0<\frac{G}{h_i}<1 \tag{4.16}$$

şeklindedir. Şekil 4.10 ile verilen t- düzlemindeki t_{bi} ve t_{ai} ifadeleri ise;

$$F\left(\arcsin\left(\frac{t_{bi}}{t_{Gi}}\right),t_{Gi}\right)=\frac{b}{G}K(t_{Gi}), \qquad F\left(\arcsin\left(\frac{t_{ai}}{t_{Gi}}\right),t_{Gi}\right)=\frac{a}{G}K(t_{Gi}) \tag{4.17}$$



Şekil 4.10: Çift ve Tek Mod Durumunda I. Bölge Kapasitesini Elde Etmek için bir Seri Konformal Dönüşümler

şeklinde yazılabilir. Burada $i = 1,2$ olmak üzere sırasıyla, I. bölge ile II. bölgeyi temsil etmektedir. $F(\phi,k)$ şeklinde verilen integraller, Jakobi notasyonunda yazılmış I. tür tam olmayan eliptik integrallerdir. Bu integraller, Cheng ve Robertson (1995) tarafından verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir.

Şekil 4.10b ile verilen t-düzleminin üst yarı bölgesi, Schwartz-Christoffel dönüşümü kullanılarak aşağıda verilen bağıntı vasıtasıyla, W-düzlemi ile tasvir edilen paralel plakalı bir yapıya dönüşür:

$$W = \int_0^t \frac{dt}{\sqrt{(t^2 - t_{ai}^2)(t^2 - t_{bi}^2)}} \tag{4.18}$$

Böylece, tek mod durumu için I. bölge, II. bölge ve toplam hat kapasitesi sırasıyla;

$$C_{o1} = 2\varepsilon_0 \varepsilon_{r1} \frac{K(k_{o1})}{K(k_{o1}^{'})} \tag{4.19a}$$

$$C_{o2} = 2\varepsilon_0\varepsilon_{r2}\frac{K(k_{o2})}{K(k_{o2}^{'})} \tag{4.19b}$$

$$C_{tek} = C_{o1} + C_{o2} \tag{4.19c}$$

bağıntıları şeklinde elde edilir. Denklem (4.19a-b) içerisinde yer alan k_{oi} ve $k_{oi}^{'}$ modülleri;

$$k_{oi} = \frac{t_{ai}}{t_{bi}}, \qquad k_{oi}^{'} = \sqrt{1-k_{oi}^2} \tag{4.20}$$

şeklindedir. Sonuç olarak, tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW yapısının tek mod durumunda efektif dielektrik sabiti, faz hızı ve karakteristik empedansı;

$$\varepsilon_{eff(tek)} = \frac{C_{tek}(\varepsilon_{ri})}{C_{tek}(1)}, \qquad v_{faz(tek)} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff(tek)}}}, \qquad Z_{0(tek)} = \frac{1}{v_{faz(tek)}C_{tek}} \tag{4.21}$$

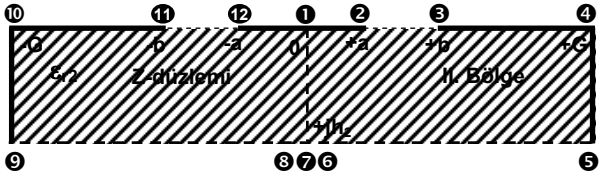
bağıntıları ile ifade edilir. Burada c terimi, boşluktaki ışık hızını ifade etmektedir.

4.2.2. Çift (Even) mod durumu için analiz

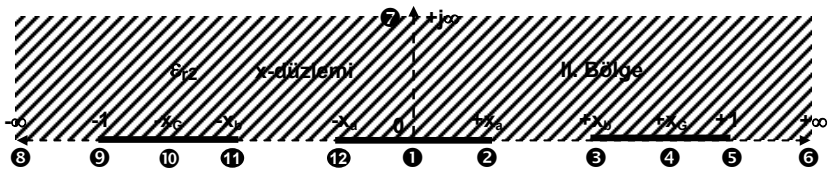
Şekil 4.9 ile verilen orijinal yapıdaki $AA^{'}$ çizgisi, çift mod durumunda magnetik bir duvar gibi davranmaktadır. Tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW'nin çift mod kapasitesi, tek mod kapasite hesaplamalarında kullanılan benzer işlemler yapılarak elde edilebilir. II. bölgede oluşan çift mod kapasitesi, Şekil 4.11 ile verilen bir seri Konformal dönüşümler kullanılarak hesaplanabilir. İlk olarak, Z-düzlemi ile verilen orta bölge (II. bölge), ters Schwartz-Christoffel dönüşümü kullanılarak, aşağıda verilen bağıntı vasıtasıyla x-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür:

$$Z = A\int_0^x \frac{dx}{\sqrt{(x^2-1)(x^2-x_G^2)}} \tag{4.22}$$

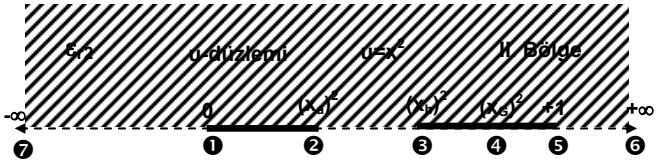
Denklem (4.22) içerisinde yer alan ve x-düzlemi ile verilen x_G ifadesi;



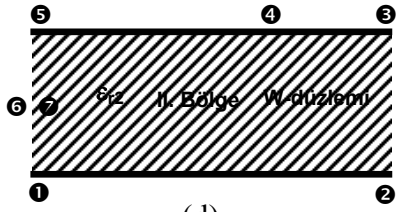
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.11: Çift Mod Durumunda II. Bölge Kapasitesini Elde Etmek için bir Seri Konformal Dönüşümler

$$x_G = \left[\frac{\exp(\frac{\pi G}{h_2}) - 2}{\exp(\frac{\pi G}{h_2}) + 2}\right]^2, \qquad 1 < \frac{G}{h_2} < \infty,$$

$$x_G = \sqrt{1 - \left[\frac{\exp(\frac{\pi h_2}{G}) - 2}{\exp(\frac{\pi h_2}{G}) + 2}\right]^4}, \qquad 0 < \frac{G}{h_2} < 1 \tag{4.23}$$

şeklindedir. Şekil 4.11 ile verilen x-düzlemindeki, x_b ve x_a ifadeleri ise;

$$F\left(\arcsin\left(\frac{x_b}{x_G}\right), x_G\right) = \frac{b}{G}K(x_G), \qquad F\left(\arcsin\left(\frac{x_a}{x_G}\right), x_G\right) = \frac{a}{G}K(x_G) \tag{4.24}$$

şeklindedir. Denklem (4.24) bağıntılarındaki $F(\phi, k)$ şeklindeki integral ifadeleri, Cheng ve Robertson (1995) tarafından verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir.

Şekil 4.11b ile verilen x-düzleminin üst yarı bölgesinde oluşan kapasite, ❶-❼ noktaları arası sanal (imajiner) eksen çizgisinin üst sol ve sağ simetrik yarı bölgelerinde oluşan kapasitelerden meydana gelmektedir. Kapasite hesaplaması, sadece bir bölge üzerinden yapılır ve elde edilen bölge kapasitesi 2 katsayısı ile çarpılarak, x-düzleminin toplam kapasite değeri elde edilir. Buradan hareketle, x- düzleminin üst sağ yarı bölgesi, $u = x^2$ dönüşüm fonksiyonu vasıtasıyla, u-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür. Şekil 4.11c'de görüldüğü gibi, u-düzlemindeki geometrik noktalar; $u_a = x_a^2$, $u_b = x_b^2$ ve $u_G = x_G^2$ şeklinde ifade edilir. Şekil 4.11c ile verilen u-düzleminin üst yarı bölgesi, Schwartz-Christoffel dönüşümü kullanılarak aşağıda verilen integral vasıtasıyla;

$$w = A\int_0^u \frac{du}{\sqrt{u(u-1)(u-u_a)(u-u_b)}} \tag{4.25}$$

W-düzlemi ile tasvir edilen paralel plakalı bir yapıya dönüşür. Böylece, II. bölgede oluşan çift mod kapasitesi;

$$C_{e2} = 2\varepsilon_0\varepsilon_{r2}\frac{K(k_{e2})}{K(k_{e2}^{'})} \tag{4.26}$$

şeklinde elde edilir. Burada k_{e2} ve $k_{e2}^{'}$ modülleri;

$$k_{e2} = \sqrt{\frac{x_a^2(1-x_b^2)}{x_b^2(1-x_a^2)}}, \qquad k_{e2}^{'} = \sqrt{1-k_{e2}^2} \tag{4.27}$$

şeklindedir. Şekil 4.9'da da görüldüğü gibi, tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW yapısının çift mod I. bölge kapasitesi, yapının geometrik özelliğinden dolayı tek mod I. bölge kapasitesine eşittir. I. Bölge çift mod kapasitesi;

$$C_{e1} = C_{o1} \tag{4.28}$$

şeklinde ifade edilir. Tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW'nin toplam çift mod kapasitesi ise;

$$C_e = C_{e1} + C_{e2} \tag{4.29}$$

şeklinde bulunur. Sonuç olarak, tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW yapısı için çift mod efektif dielektrik sabiti, faz hızı ve karakteristik empedans ifadeleri;

$$\varepsilon_{eff(çift)} = \frac{C_{çift}(\varepsilon_{ri})}{C_{çift}(1)}, \quad v_{faz(çift)} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff(çift)}}}, \quad Z_{0(çift)} = \frac{1}{v_{faz(çift)} C_{çift}} \tag{4.30}$$

bağıntıları şeklindedir. Yukarıdaki bağıntıda yer alan $v_{faz(çift)}$ ifadesi, çift mod durumunda yapının faz hızını, c terimi ise, boşluktaki ışık hızını vermektedir. Tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW yapısı için kuplaj katsayısı, çift ve tek mod empedans bağıntıları kullanılarak aşağıda verilen bağıntılar şeklinde ifade edilir:

$$C_{db} = -20\log\left(\frac{Z_{0e} - Z_{0o}}{Z_{0e} + Z_{0o}}\right), \qquad C = -\frac{Z_{0e} - Z_{0o}}{Z_{0e} + Z_{0o}} \tag{4.31}$$

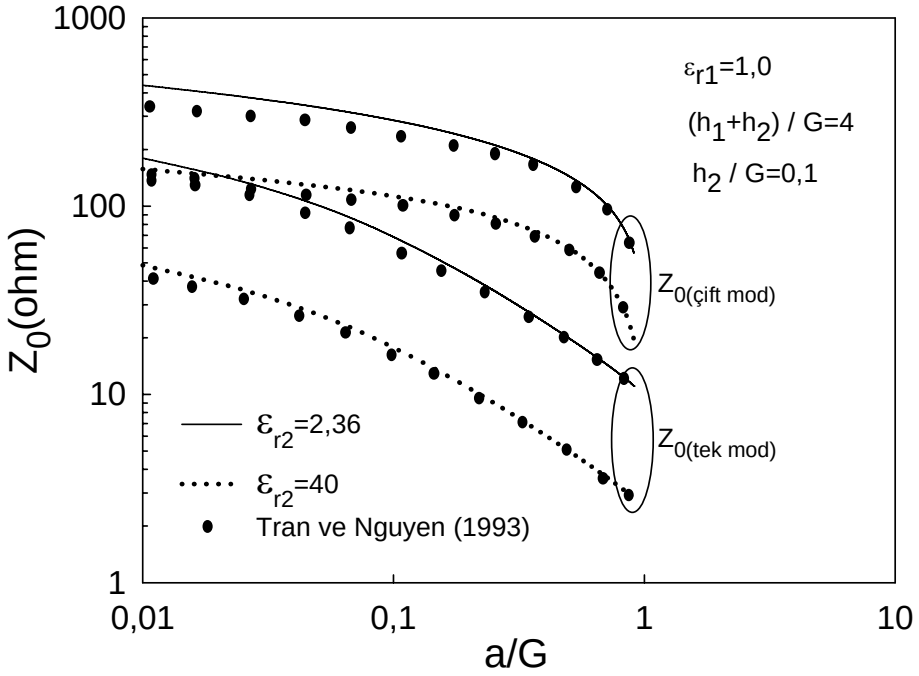
4.2.3. Tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW yapısı için nümerik sonuçlar ve tartışmalar

Şekil 4.9 ile verilen tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW'nin quasi-TEM parametreleri analitik bağıntılar formunda elde edilmiştir. Şekil 4.1 ile verilen tam ekranlı kuplajlı CPW yapısında olduğu gibi, tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW yapısı için elde edilen analitik bağıntıların doğruluğu üç ayrı karşılaştırma yapılarak kanıtlanmıştır. İlk olarak yapılan karşılaştırma, Tran ve Nguyen (1993) tarafından Quasi-statik spektral domen tekniği kullanılarak analiz edilen tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW yapısı ile yapılmıştır. Karşılaştırmada, Tran ve Nguyen (1993) tarafından analiz edilen yapı ile Şekil 4.9 ile verilen yapının geometrik boyutları aynı alınmıştır. İkinci karşılaştırma, Bedair ve Wolff (1989) tarafından Konformal

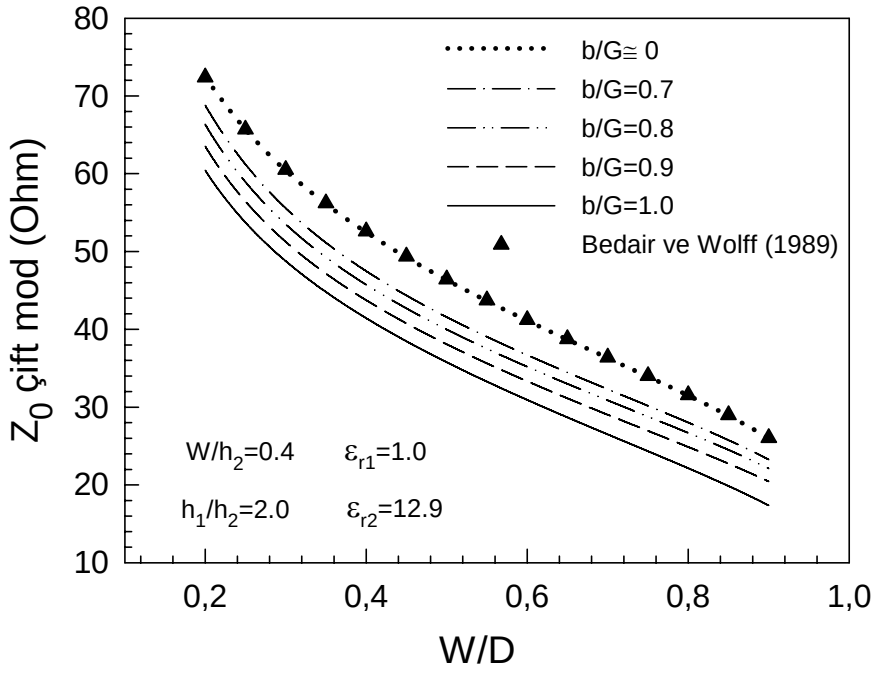
Dönüşüm Tekniği kullanılarak analiz edilen yanal toprak düzlemleri sonsuz genişliğe sahip geniş-yanlı kuplajlı CPW yapısı ile yapılmıştır. Şekil 4.9 ile verilen tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW yapısında, b/G oran değeri sıfıra (b/G≅0) yaklaştığı zaman, yapının geometrik özellikleri, Bedair ve Wolff (1989) tarafından analizi gerçekleştirilen yapıya dönüşmektedir. Bu nedenle, söz konusu her iki yapı arasında karşılaştırma yapabilmek için, b/G≅0 oran değeri tüm grafik analizlerinde verilmiştir. Son karşılaştırma ise, Şekil 4.9 ile verilen yapının değişik geometrik boyutlarında ve frekans değerlerinde Sonnet simülasyon programında modellenmesiyle yapılmıştır.

Şekil 4.12 ile verilen grafik, ε_{r1}=1.0, $(h_1+h_2)/G$=4.0, h_2/G=0.1, b/G=1.0 oran değerleri ile ε_{r2}=2.36 ve ε_{r2}=40 değerlerinde W/2G'nin bir fonksiyonu olarak, tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW'nin tek ve çift mod karakteristik empedans değişim eğrilerini vermektedir. Şekil 4.12 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, Tran ve Nguyen (1993) tarafından analiz edilen yapı ile Şekil 4.9 ile verilen yapının geometrik boyutları aynı alınmıştır. Aynı geometrik boyutlarda, tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW yapısı için uygulanan Konformal Dönüşüm Tekniği ile Quasi-statik spektral domen tekniği nümerik sonuçları arasında oldukça iyi bir uyum görülmektedir. Farklı analiz yöntemleri arasındaki bu uyum, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak elde edilen analitik ifadelerin doğruluğunu göstermektedir.

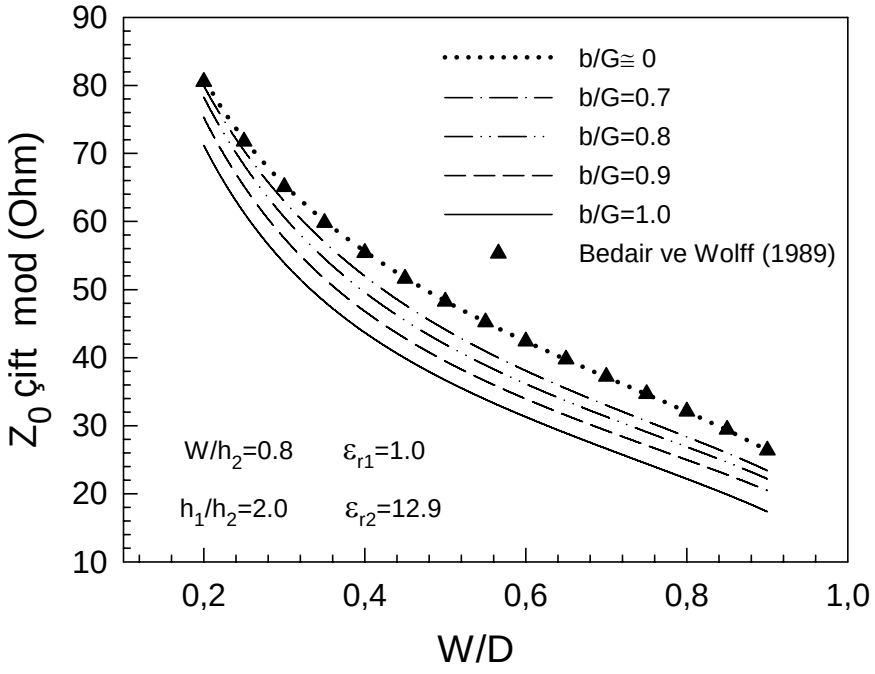
Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 ile verilen grafikler, ε_{r1}=1.0, ε_{r2}=12.9 ve h_1/h_2=2.0, W/h_2=0.4 ve W/h_2=0.8 oran değerleri ile b/G'nin farklı oran değerlerinde, W/D oranının bir fonksiyonu olarak tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW'nin çift mod karakteristik empedans değişim eğrilerini vermektedir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de de görüldüğü gibi, b/G oran değeri sıfıra yaklaştığı zaman, Denklem (4.30) ile verilen çift mod empedans değerleri ile Bedair ve Wolff (1989) tarafından analiz edilen yapının empedans değerlerinin üst üste çakıştığı görülmektedir. W/D ile b/G oran değerlerinin artması durumunda, çift mod karakteristik empedans değeri geniş bir aralıkta azalmaktadır. W/h_2 oran değerindeki artış miktarı ise, çift mod karakteristik empedans değerlerini önemli bir ölçüde arttırmaktadır.



Şekil 4.12: a/G Oranının bir Fonksiyonu Olarak Ekranlı Geniş Yanlı Kuplajlı CPW'nin Çift ve Tek Mod Karakteristik Empedans Değişimi



Şekil 4.13: W/D Oranının bir Fonksiyonu Olarak Tam Ekranlı Geniş-Yanlı Kuplajlı CPW Yapısı için Çift Mod Karakteristik Empedans Değişimi (W/h_2=0.4)

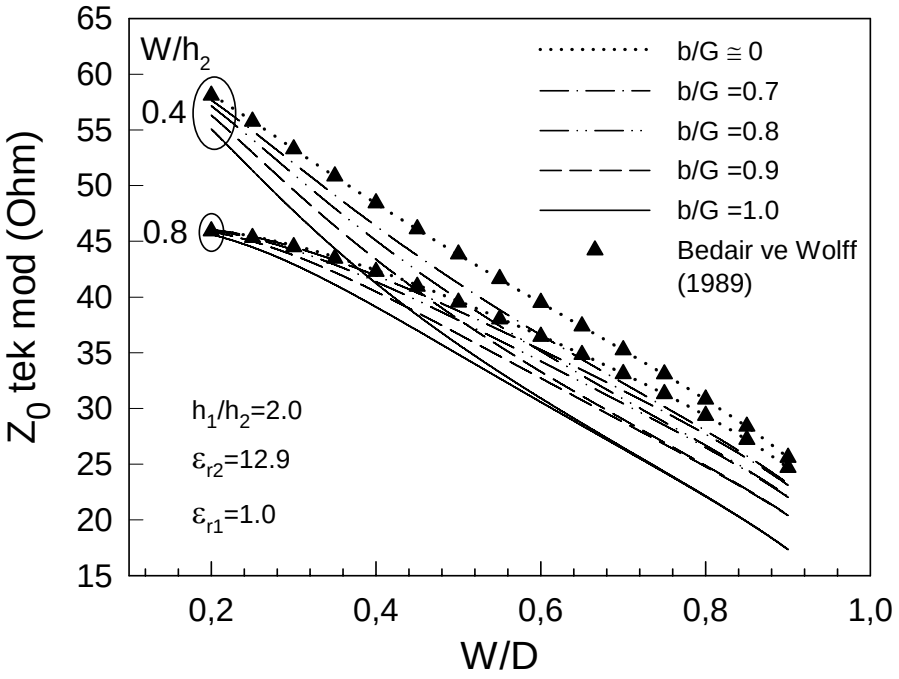


Şekil 4.14: W/D Oranının bir Fonksiyonu Olarak Tam Ekranlı Geniş-Yanlı Kuplajlı CPW Yapısı için Çift Mod Karakteristik Empedans Değişimi (W/h_2=0.8)

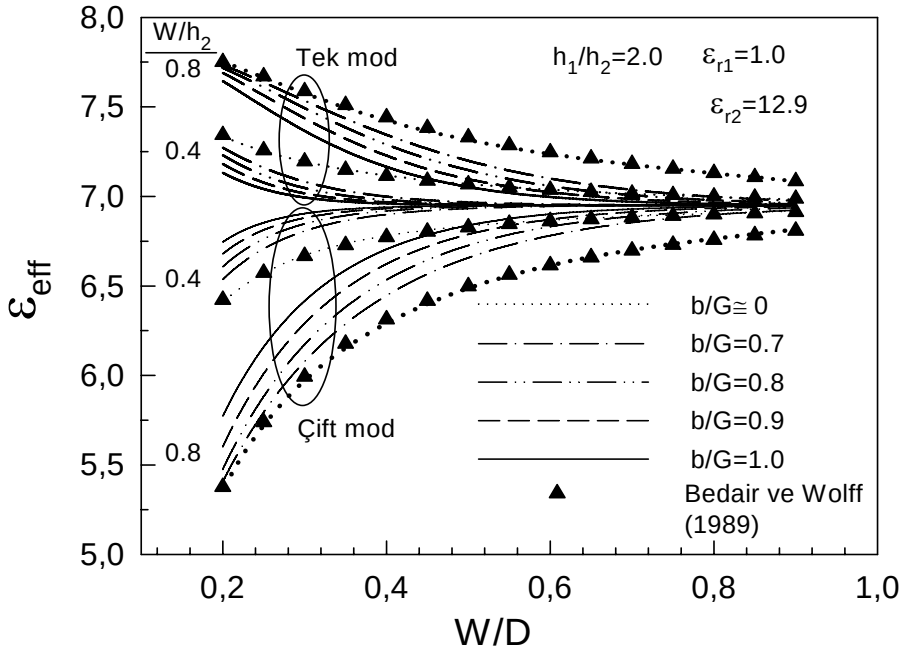
Şekil 4.15 ile verilen grafikte, W/D oranının bir fonksiyonu olarak, tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW'nin tek mod karakteristik empedans değişim eğrileri görülmektedir. Bu grafikte verilen geometrik parametreler ile çift mod karakteristik empedans değişim grafiklerindeki geometrik parametreler aynı alınmıştır. Şekil 4.15 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, b/G oran değeri sıfıra yaklaştığı zaman, Denklem (4.21) ile verilen tek mod karakteristik empedans değerleri ile Bedair ve Wolff (1989) tarafından analiz edilen yapının karakteristik empedans değerleri üst üste çakışmaktadır. W/D oran değerinin artması durumunda, tek mod karakteristik empedans değerlerinde geniş bir aralıkta azalma meydana gelmektedir. b/G ile W/h_2 oran değerlerinin artması durumunda ise, tek mod empedans değerlerinde önemli bir ölçüde azalma meydana gelmektedir.

Şekil 4.16 ile verilen grafikte, W/D oranının bir fonksiyonu olarak tam ekranlı geniş yanlı-kuplajlı CPW yapısının tek ve çift mod efektif dielektrik sabiti değişim eğrileri görülmektedir. Bu grafiklerdeki geometrik parametreler,

Şekil 4.13-15 ile verilen karakteristik empedans değişimlerindeki geometrik parametreler ile aynı alınmıştır. Şekil 4.16 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, W/D oran değerinin artması durumunda, tek mod efektif dielektrik sabiti değerlerinde önemli bir oranda düşüş görülürken, çift mod efektif dielektrik sabiti değerlerinde önemli bir ölçüde artış görülmektedir. b/G oran değerinin artması durumunda ise, tek mod efektif dielektrik sabiti değeri önemli bir miktarda azalmakta, çift mod efektif dielektrik sabiti değeri önemli bir ölçüde artmaktadır. Karakteristik empedans değişim grafiklerinde olduğu gibi, b/G oran değeri sıfıra yaklaştığı zaman, çift ve tek mod efektif dielektrik sabiti değerleri ile Bedair ve Wolff (1989) tarafından analiz edilen yapının efektif dielektrik sabiti değerleri üst üste çakışmaktadır. Ayrıca, W/h_2 oran değerinin artması durumunda, çift mod efektif dielektrik sabiti değerlerinde önemli bir ölçüde düşüş görülürken, tek mod efektif dielektrik sabiti değerlerinde ise önemli bir ölçüde artış görülmektedir.

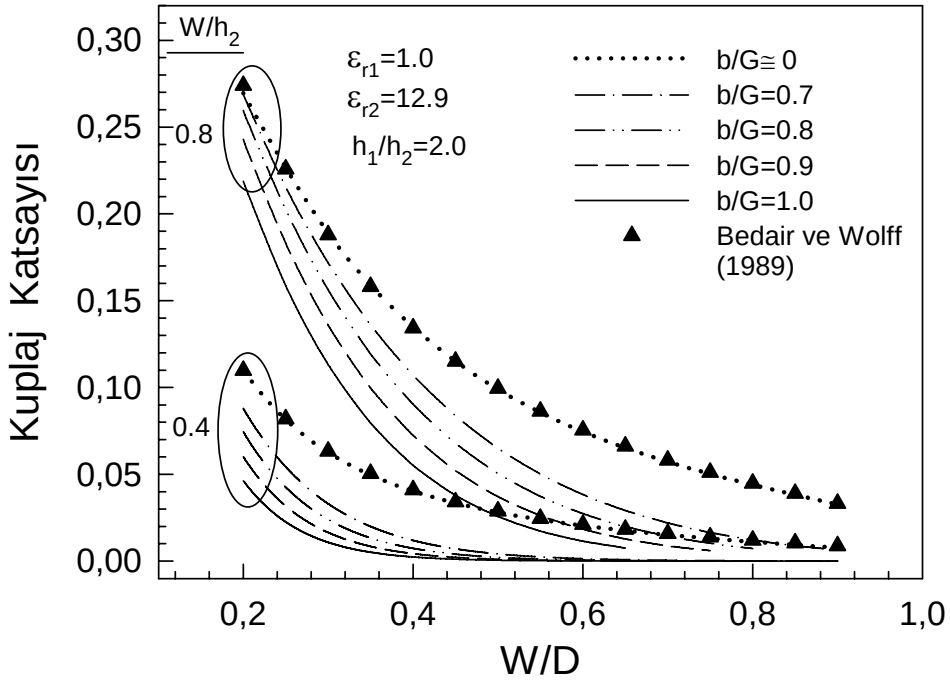


Şekil 4.15: W/D Oranının bir Fonksiyonu Olarak Tam Ekranlı Geniş-Yanlı Kuplajlı CPW Yapısı için Tek Mod Karakteristik Empedans Değişimi



Şekil 4.16: W/D Oranının bir Fonksiyonu Olarak Tam Ekranlı Geniş-Yanlı Kuplajlı CPW Yapısı için Çift ve Tek Mod Efektif Dielektrik Sabiti Değişimi

Şekil 4.17 ile verilen grafikte, W/D oranının bir fonksiyonu olarak tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW yapısının kuplaj katsayısı değişim eğrileri görülmektedir. Grafikte verilen geometrik boyutlar, empedans ve efektif dielektrik sabiti değişim grafiklerindeki geometrik boyutlar ile aynı alınmıştır. Şekil 4.17 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, W/D ve b/G oran değerlerinin artması durumunda, kuplaj katsayısı değerleri önemli bir ölçüde azalmaktadır. Karakteristik empedans ve efektif dielektrik sabiti değişim grafiklerinde olduğu gibi, b/G oran değeri sıfıra yaklaştığı zaman, kuplaj katsayısı değerleri ile Bedair ve Wolff (1989) tarafından analiz edilen yapının kuplaj katsayısı değerleri üst üste çakışmaktadır. W/h_2 değerinin artması durumunda ise, kuplaj katsayısı değeri önemli bir ölçüde artmaktadır.



Şekil 4.17: W/D Oranının bir Fonksiyonu Olarak Tam Ekranlı Geniş-Yanlı Kuplajlı CPW Yapısı için Kuplaj Katsayısı Değişimi

Tablo 4.3'de, Denklem (4.21) bağıntısı kullanılarak elde edilen tek mod efektif dielektrik sabiti ve karakteristik empedans değerleri, Sonnet simülasyon programı kullanılarak elde edilen nümerik sonuçlar ile birlikte verilmiştir. Tablo 4.4'de ise, aynı nümerik sonuçlar Denklem (4.30) kullanılarak elde edilmiştir. Her iki tabloda da, tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW yapısının değişik geometrik boyutlarında ve farklı frekans (1 GHz, 21 GHz ve 41 GHz) değerlerindeki, tek ve çit mod efektif dielektrik sabiti ve empedans değişimleri görülmektedir. Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'de de görüldüğü gibi, sonnet simülasyon sonuçları ile bu bölümde elde edilen analitik bağıntı sonuçları arasında iyi bir uyum görülmektedir. Ayrıca, sonnet simülasyon sonuçları ile analitik bağıntı sonuçları arasındaki sapmaları görmek için, bağıl hata oranları da tablolar içerisinde verilmiştir. Tablolarda verilen bağıl hata oranlarındaki düşük değerler, bu bölümde elde edilen analitik ifadelerin doğruluğunu kanıtlamaktadır. Yüksek frekanslarda, her iki sonuç arasında görülen uyum ise, tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW yapısındaki ışıma kayıplarının düşük olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.3: Tek Mod Durumu için Tam Ekranlı Geniş-Yanlı Kuplajlı CPW'nin Değişik Geometrik Boyutlarında ve Frekans Değerlerinde Konformal Dönüşüm Tekniği ile Sonnet Simülasyon Program Sonuçlarının Karşılaştırılması

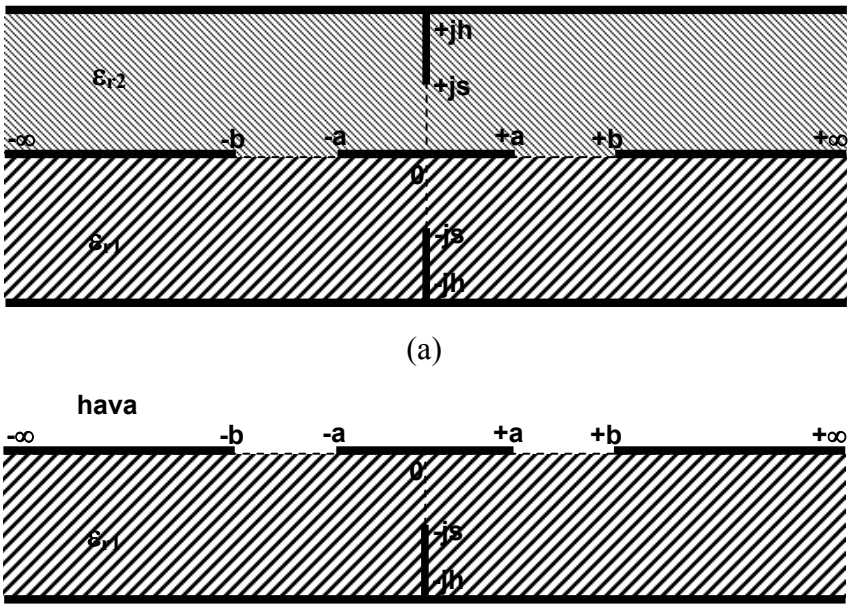
S=25 μm, h_1=100 μm, 2a=W=30 μm, 2G=200 μm, ε_{r1}=1, ε_{r2}=12.9							
FREKANS (GHz)	**Tek (Odd) Mod**						
	Efektif Dielektrik Sabiti				**Karakteristik Empedans (Ω)**		
	h_2 (μm)	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Sonnet Simülasyon Sonucu**	**Δ (%)**	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Sonnet Simülasyon Sonucu**	**Δ (%)**
1	12.5	9.319	9.083	-2,60	26.143	26.223	0.31
	25	8.089	8.052	-0.46	37.698	37.931	0.61
	50	7.282	7.288	0.08	46.399	46.853	0.97
	125	6.908	6.909	0.01	50.808	50.845	0.07
	250	6.874	6.876	0.03	51.219	51.095	-0.24
21	12.5	9.319	9.079	-2.64	26.143	25.915	-0.88
	25	8.089	8.059	-0.37	37.698	37.482	-0.58
	50	7.282	7.294	0.16	46.399	46.462	0.14
	125	6.908	6.913	0.07	50.808	51.012	0.40
	250	6.874	6.880	0.09	51.219	51.423	0.40
41	12.5	9.319	9.079	-2.64	26.143	25.874	-1.04
	25	8.089	8.074	-0.19	37.698	37.417	-0.75
	50	7.282	7.310	0.38	46.399	46.379	-0.04
	125	6.908	6.925	0.25	50.808	50.947	0.27
	250	6.874	6.891	0.25	51.219	51.347	0.25
S=85 μm, h_1=100 μm, 2a=W=30 μm, 2G=200 μm, ε_{r1}=1, ε_{r2}=12.9 (Yanal Toprak Düzlemlerin Olmadığı Durum)							
1	50	7.581	7.554	-0.36	51.948	52.356	0.78
21	50	7.581	7.564	-0.22	51.948	51.749	-0.38
41	50	7.581	7.592	0.14	51.948	51.607	-0.66

Tablo 4.4: Çift Mod Durumu için Tam Ekranlı Geniş-Yanlı Kuplajlı CPW'nin Değişik Geometrik Boyutlarında ve Frekans Değerlerinde Konformal Dönüşüm Tekniği ile Sonnet Simülasyon Program Sonuçlarının Karşılaştırılması

S=25 μm, h_1=100 μm, 2a=W=30 μm, 2G=200 μm, ε_{r1}=1, ε_{r2}=12.9							
FREKANS (GHz)	**Çift (Even) Mod**						
	Efektif Dielektrik Sabiti				**Karakteristik Empedans (Ω)**		
	h_2 (μm)	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Sonnet Simülasyon Sonucu**	**Δ (%)**	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Sonnet Simülasyon Sonucu**	**Δ (%)**
1	12.5	4.890	4.867	-0.47	80.729	79.604	-1.41
	25	5.923	5.932	0.15	63.890	62.304	-2.55
	50	6.536	6.535	-0.02	55.474	53.694	-3.32
	125	6.843	6.843	0.00	51.609	50.956	-1.28
	250	6.873	6.873	0.00	51.234	50.426	-1.60
21	12.5	4.890	4.867	-0.47	80.729	80.786	0.07
	25	5.923	5.933	0.17	63.890	63.704	-0.29
	50	6.536	6.537	0.02	55.474	55.622	0.27
	125	6.843	6.846	0.04	51.609	51.826	0.42
	250	6.873	6.876	0.04	51.234	51.412	0.35
41	12.5	4.890	4.871	-0.39	80.729	80.690	-0.05
	25	5.923	5.938	0.25	63.890	63.618	-0.43
	50	6.536	6.542	0.09	55.474	55.574	0.18
	125	6.843	6.854	0.16	51.609	51.748	0.27
	250	6.873	6.888	0.22	51.234	51.350	0.23
S=85 μm, h_1=100 μm, 2a=W=30 μm, 2G=200 μm, ε_{r1}=1, ε_{r2}=12.9 (Yanal Toprak Düzlemlerin Olmadığı Durum)							
1	50	5.858	5.818	-0.69	78.232	80.914	3.31
21	50	5.858	5.824	-0.58	78.232	77.634	-0.77
41	50	5.858	5.843	-0.26	78.232	77.324	-1.17

4.3. Toprak Düzlemlere Dikey İletken İlaveli Yeni Tip CPW'lerin Analizi

İlk olarak, bu çalışmada teklif edilen toprak düzlemlere dikey iletken ilaveli CPW yapılarının kesit görünümü Şekil 4.18'de görüldüğü gibidir. Şekil 4.18a'da, alt ve üst toprak düzlemlere dikey iletken ilaveli CPW yapısı, Şekil 4.18b'de ise, sadece alt toprak düzleme dikey iletken ilaveli CPW yapısı görülmektedir. Her iki yapının da merkez şerit iletken genişliği $2a$ olup, merkez şerit iletken ile yanal toprak düzlemler arasındaki aralık ise $b-a$ olarak verilmiştir. Şekil 4.18a'da görüldüğü gibi, dikey iletkenlerin orijine olan uzaklığı s, alt ve üst toprak düzlemlerin orijine olan uzaklığı ise h olarak verilmiştir. Şekil 4.18b ile verilen yapının dielektrik bölge geometrik boyutları, Şekil 4.18a ile verilen yapının dielektrik bölge geometrik boyutları ile aynıdır. Şekil 4.18a ile verilen yapının bağıl dielektrik sabitleri sırasıyla, alt ve üst bölgeler için ε_{r1} ve ε_{r2} dir. Şekil 4.18b ile verilen yapıda, alt bölge bağıl dielektrik sabiti ε_{r1} olup, üst bölge ise serbest hava ortamı olarak verilmiştir.



Şekil 4.18: Toprak Düzlemlere Dikey İletken İlaveli CPW'lerin Kesit Görünümü, (a) Alt ve Üst Toprak Düzlemli CPW, (b) Alt Toprak Düzlemli CPW

4.3.1. Alt ve üst toprak düzlemlere dikey iletken ilaveli CPW'nin analizi

Şekil 4.18a ile verilen alt ve üst toprak düzlemlere dikey iletken ilaveli CPW yapısının analizi sırasında, tüm metal iletkenler sonsuz ince kalınlıklı ve mükemmel iletken olarak kabul edilmiş olup, dalga yayılımının TEM modunda olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, analizi kolaylaştırmak için dielektrik bölgeler, izotropik ve kayıpsız ortam olarak düşünülmüştür. Şekil 4.18a ile verilen CPW'nin elektriksel karakteristikleri, yapının birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitelerinin elde edilmesiyle hesaplanabilir. Yapının toplam hat kapasitesi, alt ve üst bölgelerde oluşan kapasitelerinin toplamı şeklindedir. ε_{r2} bağıl dielektrik sabitli üst bölgenin kapasiteni elde etmek için, Şekil 4.19a ile verilen Z- düzlemindeki üst sağ yarı bölge göz önüne alınabilir. Üst sağ yarı bölgenin kapasite değeri 2 katsayısı ile çarpılarak, üst bölgede oluşan toplam kapasite elde edilir. Şekil 4.19a ile verilen üst sağ yarı bölge;

$$t = \cosh^2(\pi z/2h) \tag{4.32}$$

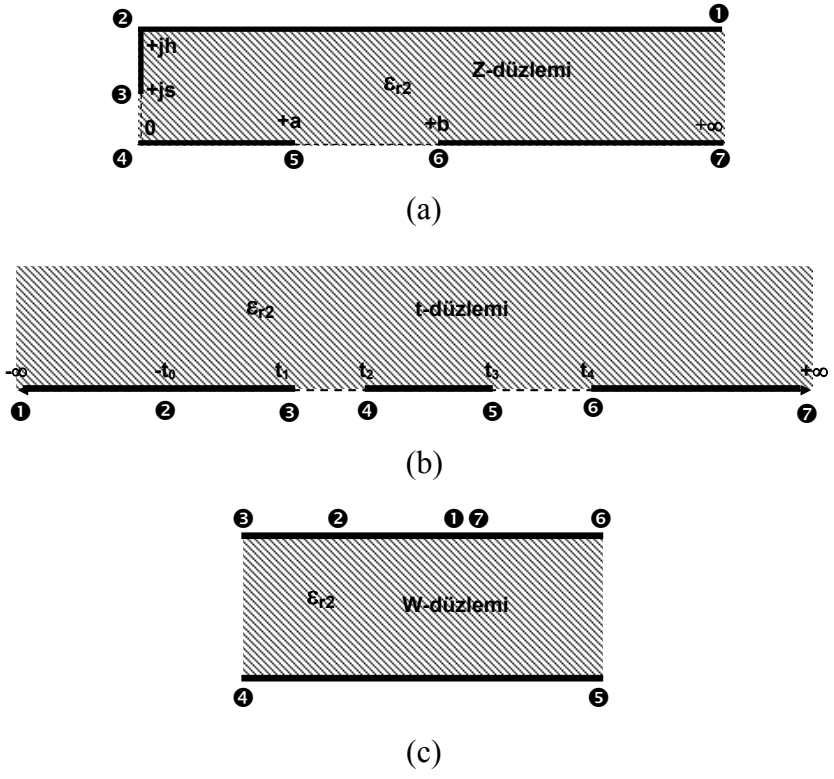
dönüşüm fonksiyonu vasıtasıyla, Şekil 4.19b ile verilen t-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür. Şekil 4.19b ile verilen t-düzlemindeki t_0, t_1, t_2, t_3 ve t_4 ifadeleri;

$$\begin{aligned} &t_0 = 0, && t_1 = \cos^2(\pi s/2h), && t_2 = 1, \\ &t_3 = \cosh^2(\pi a/2h), && t_4 = \cosh^2(\pi b/2h) \end{aligned} \tag{4.33}$$

şeklindedir. Şekil 4.19b ile verilen t-düzleminin üst yarı bölgesi;

$$w = \int_{t_0}^{t} \frac{dt}{\sqrt{(t-t_1)(t-t_2)(t-t_3)(t-t_4)}} \tag{4.34}$$

integrali ile verilen Schwarz-Christoffel dönüşümü vasıtasıyla, Şekil 4.19c ile verilen paralel plakalı yapının iç kısmına dönüşür. Şekil 4.19c'deki W-düzlemi ile tasvir edilen yapı için, paralel plakalı yapılardaki iyi-bilinen kapasite bağıntısı kullanılarak, Şekil 4.18a ile verilen yapının toplam üst bölge kapasitesi;



Şekil 4.19: Toprak Düzlemlere Dikey İletken İlaveli CPW Yapısının Üst Sağ Yarı Bölgesi için bir Seri Konformal Dönüşümler

$$C_{02} = 2\varepsilon_0 \varepsilon_{r2} \frac{K(k)}{K(k')} \tag{4.35}$$

şeklinde ifade edilir. Burada verilen k modülü ise;

$$k = \frac{\sinh(\pi a/2h)}{\sinh(\pi b/2h)} \sqrt{\frac{\sinh^2(\pi b/2h) + \sin^2(\pi s/2h)}{\sinh^2(\pi a/2h) + \sin^2(\pi s/2h)}}, \qquad k' = \sqrt{1-k^2} \tag{4.36}$$

şeklindedir. Alt bölgede oluşan toplam kapasite ise, alt ve üst bölgelerin geometrik benzerliklerinden dolayı üst bölge kapasitesine eşittir. Alt ve üst bölgeler arasındaki farklı olan parametre ise, bölgelerin bağıl dielektrik sabitleridir. Böylece, alt bölge kapasitesi;

$$C_{01} = 2\varepsilon_0 \varepsilon_{r1} \frac{K(k)}{K(k')} \tag{4.37}$$

şeklinde yazılabilir. Şekil 4.18a ile verilen yapının toplam hat kapasitesi;

$$C_T = C_{01} + C_{02} = 2\varepsilon_0\varepsilon_{r1}\frac{K(k)}{K(k')} + 2\varepsilon_0\varepsilon_{r2}\frac{K(k)}{K(k')} \tag{4.38}$$

şeklinde elde edilir. Efektif dielektrik sabiti ise;

$$\varepsilon_{eff} = \frac{C_T(\varepsilon_r)}{C_T(1)} = \frac{\varepsilon_{r1} + \varepsilon_{r2}}{2} \tag{4.39}$$

şeklindedir. Sonuç olarak, alt ve üst toprak düzlemlere dikey iletken ilaveli CPW'nin karakteristik empedansı;

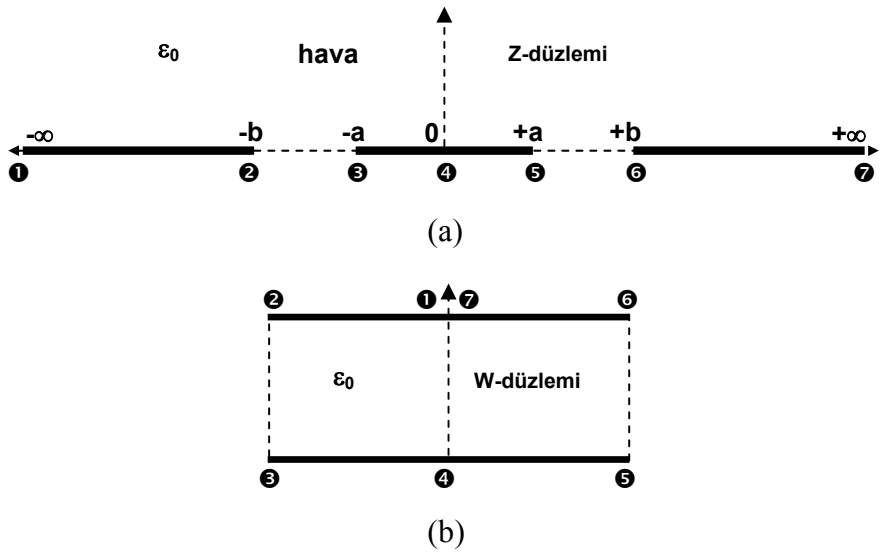
$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}}, \qquad Z_0 = \frac{1}{C_T v_p} \tag{4.40}$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (4.40) bağıntısındaki v_p terimi faz hızını, c terimi ise, serbest ortamdaki ışık hızını ifade etmektedir.

4.3.2. Alt toprak düzleme dikey iletken ilaveli CPW'nin analizi

Şekil 4.18a ile verilen yapının analizinde olduğu gibi, Şekil 4.18b ile verilen yapının analizi sırasında, tüm metal iletkenler sonsuz ince kalınlıklı ve mükemmel iletken olarak kabul edilmiş olup, dalga yayılımının TEM modunda olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, analizi kolaylaştırmak için dielektrik taban bölgesi, izotropik ve kayıpsız ortam olarak düşünülmüştür. Alt toprak düzleme dikey iletken ilaveli CPW yapısının analizi, Şekil 4.18a ile verilen yapının analizine benzer şekilde gerçekleştirilebilir. Analizi gerçekleştirilecek olan yapının toplam hat kapasitesi, üst bölge (serbest hava ortamı) ile alt bölgede (dielektrik ortam) oluşan kapasitelerin toplamı şeklindedir. Alt bölgede oluşan kapasite, Şekil 4.18a ile verilen yapının alt bölge kapasitesi ile aynıdır. Çünkü, her iki yapının da alt bölge geometrik özellikleri aynıdır. Böylece, alt bölgede oluşan toplam kapasite;

$$C_{01} = 2\varepsilon_0\varepsilon_{r1}\frac{K(k)}{K(k')} \tag{4.41}$$



Şekil 4.20: Alt Toprak Düzlemlere Dikey İletken Destek İlaveli CPW'nin Üst Serbest Hava Ortamı için bir Seri Konformal Dönüşümler

şeklinde yazılabilir. Üst bölgede oluşan toplam kapasite ise, Şekil 4.20 ile verilen bir seri Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak hesaplanabilir. Üst bölge kapasitesi;

$$C_{02} = 2\varepsilon_0 \frac{K(k_1)}{K(k_1^{'})} \tag{4.42}$$

şeklindedir. Burada k_1 modülü;

$$k_1 = \frac{a}{b}, \qquad k_1^{'} = \sqrt{1-k_1^2} \tag{4.43}$$

şeklindedir. Böylece, Şekil 4.18b ile verilen yapının toplam hat kapasitesi;

$$C_T = C_{01} + C_{02} = 2\varepsilon_0 \frac{K(k_1)}{K(k_1^{'})} + 2\varepsilon_0\varepsilon_{r1} \frac{K(k)}{K(k^{'})} \tag{4.44}$$

şeklinde elde edilir. Sonuç olarak, alt toprak düzlemlere dikey iletken ilaveli CPW'nin efektif dielektrik sabiti, faz hızı ve karakteristik empedansı;

$$\varepsilon_{eff} = \frac{C_T(\varepsilon_{r1})}{C_T(1)}, \qquad Z_0 = \frac{1}{C_T v_p}, \qquad v_p = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \tag{4.45}$$

şeklindedir. Burada v_p terimi, faz hızını c terimi ise, ışık hızını ifade etmektedir.

4.3.3 Toprak düzlemlere dikey iletken ilaveli CPW yapıları için nümerik sonuçlar ve tartışmalar

Şekil 4.18 ile verilen toprak düzlemlere dikey iletken ilaveli CPW'nin elektriksel karakteristikleri, quasi-statik yaklaşımı içerisinde analitik bağıntılar formunda elde edilmiştir. Bu bölümde analizi gerçekleştirilen yapılar için elde edilen formüllerin doğruluğu, iki ayrı karşılaştırma yapılarak kanıtlanmıştır. İlk olarak yapılan karşılaştırma, s/h oran değerinin 1.0 olması durumunda, Şekil 4.18a ile verilen yapı ile Ghione ve Naldi (1987) tarafından Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analiz edilen alt ve üst iletken destekli CPW yapısı arasında olmuştur. İkinci karşılaştırma ise, s/h oran değerinin 1.0 olması durumunda, Şekil 4.18b ile verilen yapı ile Bedair ve Wolf (1992) tarafından Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analiz edilen iletken destekli CPW yapısı arasında olmuştur.

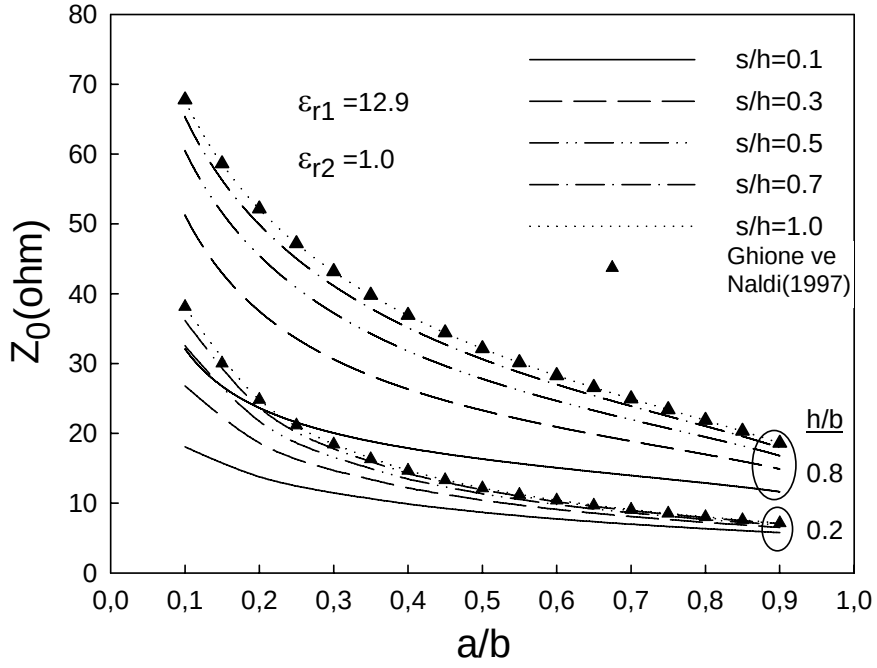
Şekil 4.21 ile verilen grafikte, ε_{r1}=12,9, ε_{r2}=1.0, h/b=0.2 ve h/b=0.8 oran değerleri ile s/h oranının değişik değerlerinde, a/b oranının bir fonksiyonu olarak alt ve üst toprak düzlemlere dikey iletken ilaveli CPW'nin karakteristik empedans değişim eğrileri görülmektedir. Şekil 4.21 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, a/b oran değerinin artması durumunda, karakteristik empedans değerinde geniş bir aralıkta azalma görülmektedir. h/b oran değerinin artması durumunda ise, empedans değerlerinde önemli bir oranda artış gözlenmektedir. Ayrıca, s/h oran değerinin artması durumunda, karakteristik empedans değerlerinde önemli bir ölçüde artış gözlenmektedir. Şekil 4.21'de de görüldüğü gibi, s/h oran değerinin 1.0 olduğu durumda, Şekil 4.18a ile verilen yapının karakteristik empedans değerleri ile Ghione ve Naldi (1987) tarafından analiz edilen yapının karakteristik empedans değerleri arasında üst üste çakışma görülmektedir.

Şekil 4.22 ile verilen grafikteki geometrik parametreler, Şekil 4.21 ile verilen grafikteki geometrik parametreler ile aynı alınmıştır. Her iki grafik arasındaki farklılık ise, üst bölge bağıl dielektrik sabitinin ilk grafik (Şekil 4.21) için ε_{r2}=1.0, ikinci grafik (Şekil 4.22) için ε_{r2}=12,9 alınmasıdır. Üst bölge bağıl dielektrik sabitinin ε_{r2}=12.9 seçilmesi durumunda, Şekil 4.18a ile verilen yapı homojen bir ortama sahip olmaktadır. Şekil 4.22 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, a/b oran

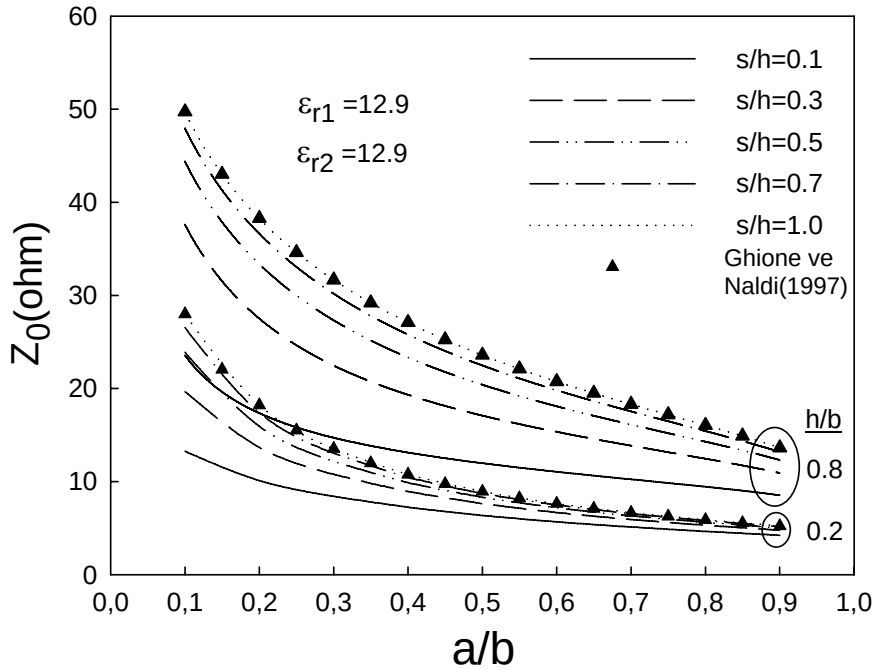
değerinin artması durumunda, karakteristik empedans değerlerinde geniş bir aralıkta düşüş görülmektedir. Ayrıca, h/b ve s/h oran değerlerinin artması durumunda ise, karakteristik empedans değerlerinde önemli bir oranda artış görülmektedir. Şekil 4.22 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, s/h oran değerinin 1.0 olduğu durumda, bu bölümde elde edilen karakteristik empedans değerleri ile Ghione ve Naldi (1987) tarafından analiz edilen yapının karakteristik empedans değerleri üst üste çakışmaktadır. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22 ile verilen grafikler üzerindeki nümerik sonuçların çakışması, bu bölümde elde edilen analitik bağıntıların doğruluğunu kanıtlamaktadır.

Şekil 4.23 ile verilen grafikte, ε_r=12,9, h/b=0.2 ve h/b=0.8 oran değerleri ile s/h=0.1, 0.3, 0.5, 0.7 ve 1.0 değişik oran değerlerinde, a/b oranının bir fonksiyonu olarak, alt toprak düzleme dikey iletken ilaveli CPW'nin karakteristik empedans değişim eğrileri görülmektedir. Şekil 4.23 ile verilen grafikte görüldüğü gibi, a/b oran değerinin artması durumunda, karakteristik empedans değerlerinde geniş bir aralıkta azalma görülmektedir. h/b ve s/h oran değerlerinin artması durumunda ise, karakteristik empedans değerlerinde önemli bir ölçüde artış görülmektedir. Şekil 4.23 ile verilen empedans değişim eğrilerinde de görüldüğü gibi, s/h oran değerinin 1.0 olduğu durumda, Şekil 4.18b ile verilen CPW yapısı, Bedair ve Wolf (1992) tarafından analizi yapılan iletken destekli CPW yapısına dönüşmektedir.

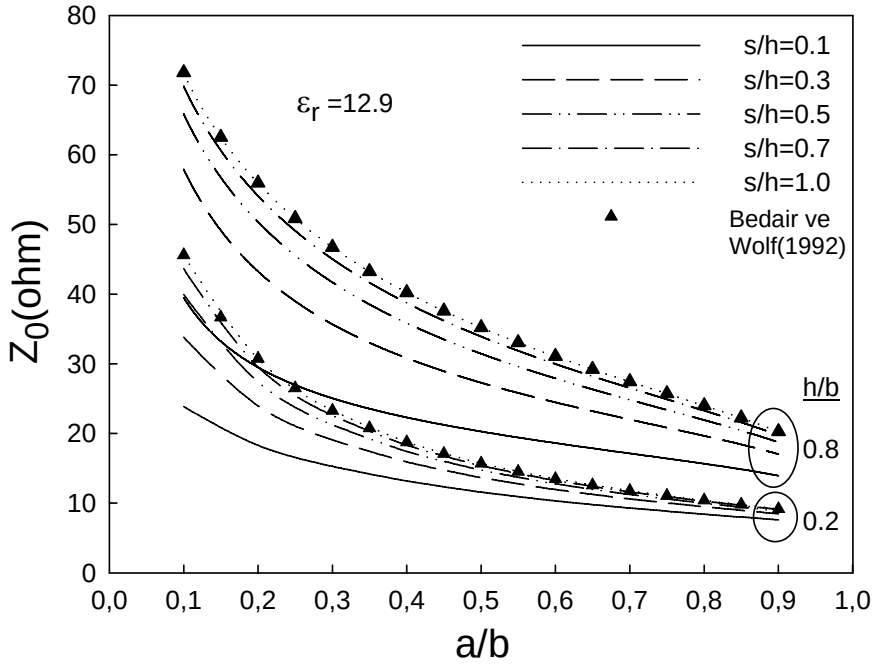
Şekil 4.24 ile verilen grafik, a/b oranının bir fonksiyonu olarak, alt toprak düzleme dikey iletken ilaveli CPW'nin efektif dielektrik sabiti değişim eğrilerini vermektedir. Bu grafikteki geometrik parametreler ile Şekil 4.24 ile verilen karakteristik empedans değişim grafiğindeki geometrik parametreler aynı alınmıştır. a/b oran değerinin artması durumunda, efektif dielektrik sabiti değerleri, belirli bir ölçüde artış yönünde değişim gösterirken, daha sonra bu değişim kendini azalma yönünde göstermektedir. h/b oran değerinin artması durumunda ise, efektif dielektrik sabiti değerlerinde önemli bir ölçüde azalma görülmektedir. Ayrıca, s/h oran değerinin artması durumunda, efektif dielektrik sabiti değeri geniş bir aralıkta azalmaktadır. Şekil 4.23 ve Şekil 4.24 ile verilen grafiklerdeki s/h oran değerinin 1.0 olduğu durumda, bu bölümde elde edilen karakteristik empedans ve efektif dielektrik sabiti değerleri ile Bedair ve Wolf (1992) tarafından analiz edilen yapının karakteristik empedans ve efektif dielektrik sabiti değerleri üst üste çakışmaktadır.



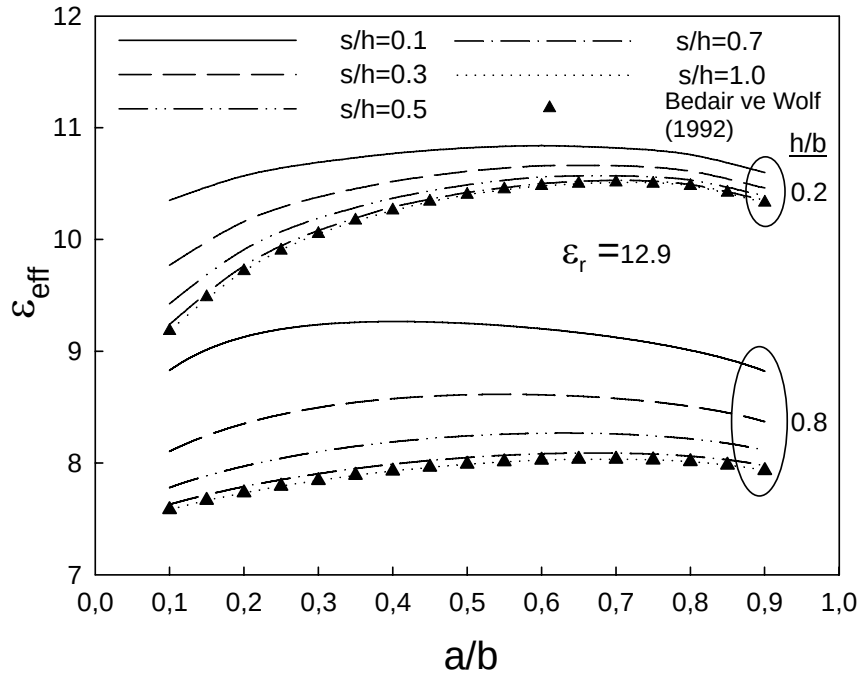
Şekil 4.21: a/b Oranının bir Fonksiyonu Olarak Alt ve Üst Toprak Düzlemlere Dikey İletken İlaveli CPW'nin Karakteristik Empedans Değişimi (ε_{r2}=1.0)



Şekil 4.22: a/b Oranının bir Fonksiyonu Olarak Alt ve Üst Toprak Düzlemlere Dikey İletken İlaveli CPW'nin Karakteristik Empedans Değişimi (ε_{r2}=12.9)



Şekil 4.23: a/b Oranının bir Fonksiyonu Olarak Alt Toprak Düzlemlere Dikey İletken İlaveli CPW Yapısının Karakteristik Empedans Değişimi



Şekil 4.24: a/b Oranının bir Fonksiyonu Olarak Alt Toprak Düzlemlere Dikey İletken İlaveli CPW Yapısının Efektif Dielektrik Sabiti Değişimi

5. DÜZLEMSEL, SİLİNDİRİK VE ELİPTİK KESİTLİ KUPLAJLI İLETİM HATLARININ TASARIMI VE ANALİZİ

RF/Mikrodalga haberleşme sistemlerinde uygulama alanları bulabilen, düzlemsel platformlar üzerine monte edilmiş şerit, mikroşerit ve eşdüzlemli iletim hatlarına ek olarak, düzlemsel olmayan eliptik ve silindirik kesitli şerit, mikroşerit ve eşdüzlemli iletim hatları, mikrodalga araştırmacıların büyük bir ilgi odağını oluşturmaktadır. Bu ilginin temel nedenlerinden biri, bugünün ve geleceğin RF/Mikrodalga haberleşme sistemlerinde kullanılmak üzere, farklı geometrik kesitli iletim hatlarına ihtiyaç duyulmasıdır. Günümüz mikrodalga teknolojisindeki birçok sivil ve ticari uygulamalarda (mobil baz istasyonları, Çok Girişli Çok Çıkışlı (MIMO) iletişim linklerinin alıcı ve verici kısımları), askeri uygulamaların bir kısmında (hava araçları, uydu ve füzeler üzerine konuşlandırılmış antenler) ve hatta bazı biyomedikal sistemlerde, taşıyıcı platformun yüzeyine uyumlu (konformal) antenlere ve bu antenlerin besleme veya uyarılma devrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Düzlemsel, eliptik yada silindirik tabanlar üzerine basılmış antenler ile bu antenlerin besleme veya uyarılma devreleri; hafiflik, küçük boyut ve geometrik uyumluluklarına bağlı olarak, araç yüzeylerine veya taşıyıcı platformların üzerine daha kolay monte edilebilirlik gibi özelliklerinden dolayı, hava aracı, roket, uydu, telsiz haberleşmesi ve navigasyon sistemlerinde rahatlıkla uygulama alanı bulabilmektedir. Ayrıca, düzlemsel kesitli şerit, mikroşerit ve eşdüzlemli iletim hatları ile eliptik ve silindirik kesitli şerit, mikroşerit ve eşdüzlemli iletim hatlarının kuplajlı konfigürasyonları da yönlü kuplör, sensör, filtre, faz kaydırıcı, balun, geçiş adaptörleri ve uygunlama devreleri gibi, pratik MIC ve MMIC uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu uygulamalara ek olarak, bu tip kuplajlı iletim hatları düzlemsel, eliptik ve silindirik yüzeyler üzerinde bulunan baskı antenlerin uyarılması için de kullanılabilir.

Mikrodalga uygulamaları için, düzlemsel kesitli iletim hatlarına göre daha esnek bir uygulama alanı bulabilen, yeni tip eliptik ve silindirik kesitli iletim hatlarının tasarımları ve modellenmesi büyük önem arz etmektedir. Ancak, tasarımları ve modellemesi yapılan yeni tip kuplajlı eşdüzlemli iletim hatlarının,

uygun tasarım ve modellemesinin yanında, matematiksel analizleri de doğru bir şekilde yapılmalıdır.

Bu bölüm içerisinde, tasarımları ve modellemesi yapılan yeni tip kuplajlı eşdüzlemli iletim hatlarının elektriksel karakteristikleri, quasi-statik yaklaşımı içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak elde edilebilir. Daha öncede belirtildiği gibi, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak gerçekleştirilen analizler, mikrodalga frekanslarda oldukça doğru sonuçlar verir ve CAD-uyumlu yazılım paketleri için uygun olan kapalı-form analitik çözümlere imkan sağlar.

Yukarıda ifade edilen uygulamalara yönelik olarak, bu bölüm içerisinde tasarımları ve analizleri yapılan değişik geometrik kesitli eşdüzlemli yeni tip iletim hatlarının teklif edilmesinin ana hedefi, literatürde var olan yapılardan daha etkin ve yeterli yapılar geliştirmektir.

Kaynak araştırması bölümünde de verildiği gibi, düzlemsel kesitli kuplajlı CPW yapısı, ilk olarak sonsuz dielektrik taban kalınlıklı ve sonsuz yanal toprak düzlemli olarak Wen (1970) tarafından tasarlanmış ve analizi Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cheng (1996), Wen'in teklif etmiş olduğu yapıyı, sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonsuz yanal toprak düzlemli olarak tasarlamış ve Konformal Dönüşüm Tekniği ile analiz etmiştir. Karpuz ve arkadaşları (2000) kuplajlı CPW iletim hattını, silindirik kesitli olarak tasarlamış ve söz konusu yapının analizini Konformal Dönüşüm Tekniği kullanarak gerçekleştirmiştir. Ayrıca, CPW'den türetilme bir başka kuplajlı yapı ise, hattan hatta kuplajlı paralel CPW dir. Sonsuz dielektrik taban kalınlıklı ve sonsuz yanal toprak düzlem genişlikli hattan hatta kuplajlı paralel CPW, Ghione ve Naldi (1987) tarafından sunulmuş ve analizi Konformal Dönüşüm tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan, Cheng (1996) tarafından sunulan bir çalışmada ise, hattan hatta kuplajlı paralel CPW, sonlu taban kalınlıklı ve sonsuz toprak düzlem genişlikli bir konfigürasyonda tasarlanmış olup, söz konusu yapının elektriksel karakteristikleri Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Kuplajlı CPW ile hattan hatta kuplajlı paralel CPW yapıları, Spectral-domain yöntemi ve Sonlu farklar yöntemi gibi değişik analiz teknikleri kullanılarak da incelenmiştir.

Bu bölümde, ilk olarak sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlemli kuplajlı CPW yapısının çift ve tek mod elektriksel karakteristikleri,

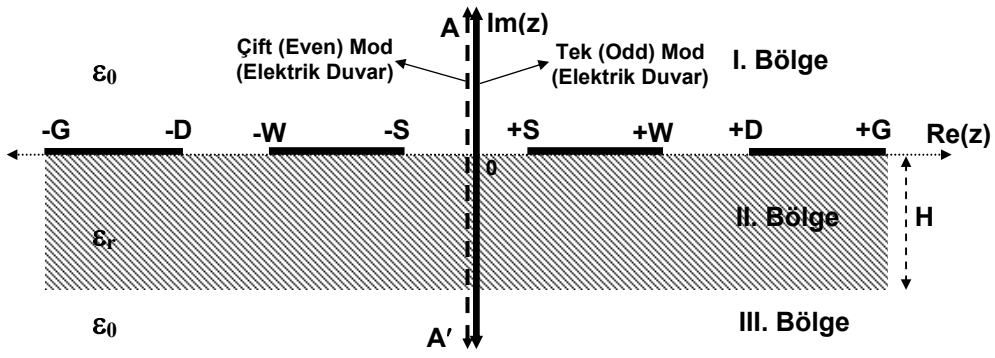
Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak kapalı-form analitik ifadeler formunda elde edilmiştir. İkinci kısımda, kuplajlı CPW yapısı, eliptik kesitli olarak tasarlanmış ve tasarımı yapılan eliptik kesitli kuplajlı CPW'nin çift ve tek mod elektriksel karakteristikleri, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak kapalı-form analitik ifadeler formunda elde edilmiştir. Üçüncü kısımda, sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli hattan hatta kuplajlı paralel CPW'nin çift ve tek mod elektriksel karakteristikleri, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analitik ifadeler formunda elde edilmiştir. Son kısmında ise, hattan hatta kuplajlı paralel CPW yapısı, eliptik ve silindirik kesitli olarak tasarlanmış ve tasarımları yapılan bu yapıların çift ve tek mod elektriksel karakteristikleri, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analitik ifadeler formunda elde edilmiştir.

Bu bölüm içerisinde sunulan ve henüz literatürde bulunmayan, farklı geometrik yüzeylere uyumlu kuplajlı eşdüzlemli iletim hatlarının Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak gerçekleştirilen analizlerinin doğruluğu, farklı geometrik boyutlarda, literatürde mevcut olan analiz yöntemleri ile test edilmiştir. Ayrıca, düzlemsel konfigürasyonda tasarımları yapılan sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlemli kuplajlı CPW yapısı ile sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli hattan hatta kuplajlı paralel CPW yapısının çift ve tek mod elektriksel karakteristikleri için elde edilen analitik bağıntıların doğruluğu, farklı geometrik boyutlarda ve frekans değerlerinde, Sonnet simülasyon program sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonnet simülasyon programı kullanılarak frekans bağımlı olarak elde edilen söz konusu yapıların elektriksel karakteristikleri, bu tür kuplajlı yapılardaki dispersiyon etkilerini irdelememize yardımcı olabilir.

Bu bölüm içerisinde, ilk olarak düzlemsel kesitli yapıların analizi gerçekleştirilmiş olup, daha sonra eliptik ve silindirik kesitli yapıların analizleri gerçekleştirilmiştir. Konformal dönüşümler kullanılarak eliptik ve silindirik kesitli yapılar, düzlemsel kesitli bir yapıya dönüştürülebilir. Dönüştürülmüş düzlemsel kesitli yapının geometrik özellikleri, düzlemsel kesitli yapıların geometrik özellikleri ile benzer olduğu için, analizler sadece düzlemsel kesitli yapılar üzerinden yapılabilir. Böylece, analizlerdeki benzer işlem tekrarları engellenmiş olur.

5.1. Sonlu Dielektrik Taban Kalınlıklı ve Sonlu Toprak Düzlem Genişlikli Kuplajlı CPW'nin Analizi

Sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlemli kuplajlı CPW'nin kesit görünümü Şekil 5.1 ile verilmiştir. Şekil 5.1'de de görüldüğü gibi, $W-S$ genişliğine sahip iki iletken şerit, iki yanal toprak düzlem arasına simetrik olarak yerleştirilmiştir. Yanal toprak düzlemler ile şerit iletkenler arasındaki aralık, $D-W$ olarak verilmiştir. İki iletken şerit arasındaki aralık $2S$ genişliğindedir. Yanal toprak düzlemler ise $G-D$ genişliğindedir. Kuplajlı CPW'nin boyu H yüksekliğinde olup, genişliği ise $2G$ uzunluğundadır. II. bölge ile temsil edilen dielektrik ortam ε_r bağıl dielektrik sabitli olup, I. ve III. bölgeler ise serbest hava ortamı olarak düşünülmüştür. Quasi-statik yaklaşımı içerisinde gerçekleştirilen analizler sırasında, tüm metal iletkenler sonsuz ince kalınlıklı ve mükemmel iletken olarak kabul edilmiş olup, dalga yayılımının ise TEM modunda olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, analizi kolaylaştırmak için dielektrik taban bölgesi, izotropik ve kayıpsız ortam olarak düşünülmüştür. Analizlerde, yapının simetrik özelliğinden dolayı, dik boyuna kesitin sadece yarısı göz önüne alınmıştır. Bu yüzden Şekil 5.1 ile verilen dik boyuna AA' çizgisi, Bölüm 3.3.1'deki, kuplajlı yapıların teorik hesaplamalarında kullanılan mod yaklaşımı gereği; çift mod durumunda bir magnetik duvar, tek mod durumunda ise bir elektrik duvar olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5.1: Sonlu Dielektrik Taban Kalınlıklı ve Sonlu Toprak Düzlem Genişlikli Kuplajlı CPW'nin Kesit Görünümü

5.1.1. Tek (Odd) mod durumu için analiz

Sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli kuplajlı CPW'nin tek mod birim uzunluk başına düşen toplam kapasite hesaplamalarında, AA' boyuna simetrik çizgisi bir elektrik duvar gibi davranmaktadır. Kısmi kapasite yaklaşımına göre, her bir mod için yapının birim uzunluk başına düşen toplam kapasitesi, I. bölge (C_{01}) ve III. bölgeyle (C_{03}) temsil edilen serbest ortam hava kapasiteleri ile II. bölgeyle (C_{02}) temsil edilen dielektrik ortam kapasitesinin toplamı olarak düşünülebilir. I. bölge (C_{01}) ile temsil edilen serbest ortam hava kapasitesinin hesaplanması için, yapının simetrik özelliğinden dolayı Şekil 5.2a ile verilen z-düzleminin üst sağ yarı bölgesi, $t = z^2$ dönüşüm fonksiyonu vasıtasıyla, Şekil 5.2b ile verilen t-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür. t-düzlemindeki her bir geometrik noktanın karşılığı;

$$t_0 = 0, \quad t_S = S^2, \quad t_W = W^2, \quad t_D = D^2, \quad t_G = G^2 \tag{5.1}$$

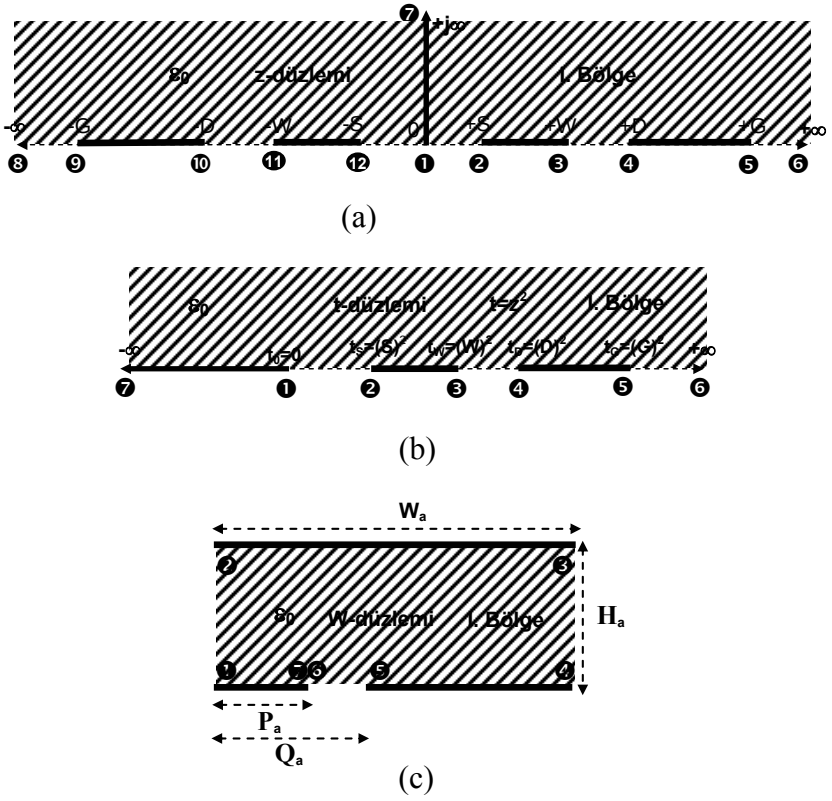
şeklinde yazılır. t-düzleminin üst yarı bölgesi;

$$\frac{W_a}{H_a} = \frac{K(k_{0a})}{K(k_{0a}^{'})} = \alpha_a, \qquad \frac{P_a}{W_a} = \frac{F(\arcsin(\sqrt{\frac{D^2 - S^2}{D^2}}), k_{0a})}{K(k_{0a})} = \beta_{1a},$$
$$\frac{Q_a}{W_a} = \frac{F(\arcsin(\sqrt{\frac{G^2(D^2 - S^2)}{D^2(G^2 - S^2)}}), k_{0a})}{K(k_{0a})} = \beta_{2a} \tag{5.2}$$

bağıntıları vasıtasıyla, W-düzlemi ile tasvir edilen paralel plakalı yapının iç bölgesine dönüşür. Denklem (5.2) içerisinde yer alan k_{0a} modülü;

$$k_{0a} = \frac{D}{W}\sqrt{\frac{W^2 - S^2}{D^2 - S^2}}, \qquad k_{0a}^{'} = \sqrt{1 - k_{0a}^2} \tag{5.3}$$

şeklindedir. I. bölgenin tek mod birim uzunluk başına düşen hat kapasitesi;



(a)

(b)

(c)

Şekil 5.2: Kuplajlı CPW'nin Tek Mod Hava Kapasite Hesaplaması için bir Seri Konformal Dönüşümler

$$C_{01} = \varepsilon_0 \left(\frac{K(k_{01})}{K(k_{01}^{'})} + \frac{K(k_{03})}{K(k_{03}^{'})} \right) \tag{5.4}$$

şeklinde elde edilir. Burada k_{01} ve k_{03} modülleri, aşağıda verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir;

$$\frac{F(\arcsin\left(\frac{k_{01}}{k_{02}}\right), k_{02})}{K(k_{02})} = \frac{\beta_{1a}}{\beta_{3a}}, \qquad \frac{F(\arcsin\left(\frac{k_{03}}{k_{04}}\right), k_{02})}{K(k_{04})} = \frac{1-\beta_{2a}}{1-\beta_{3a}},$$

$$\frac{K(k_{02})}{K(k_{02}^{'})} = \alpha_a \beta_{3a}, \qquad \frac{K(k_{04})}{K(k_{04}^{'})} = \alpha_a (1-\beta_{3a}), \qquad \beta_{3a} = \frac{\beta_{1a} + \beta_{2a}}{2} \tag{5.5}$$

III. bölge ile verilen hava kapasitesi, dielektrik tabanın kaldırılması ile elde edilebilir. Dielektrik tabanın yok sayılmasıyla ortaya çıkan konfigürasyon, I. bölge konfigürasyonu ile aynıdır. Böylece, III. bölge serbest ortam hava kapasitesi;

$$C_{01} = C_{03} \tag{5.6}$$

şeklinde yazılabilir.

II. bölge ile temsil edilen dielektrik bölge kapasitesi, I. bölge kapasite hesaplanmasındaki benzer işlemler yapılarak elde edilebilir. Şekil 5.3a ile verilen dielektrik bölge, ters Schwarz-Christoffel dönüşümü kullanılarak aşağıda verilen integral bağıntısı vasıtasıyla;

$$Z = \int \frac{dt}{\sqrt{(t^2 - 1)(t^2 - t_G^2)}} \tag{5.7}$$

Şekil 5.3b ile verilen t-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür. Şekil 5.3b ile verilen t-düzlemindeki t_G ifadesi;

$$t_G = \left[\frac{\exp(\pi G/H) - 2}{\exp(\pi G/H) + 2}\right]^2, \qquad 1 < \frac{G}{H} < \infty,$$

$$t_G = \sqrt{1 - \left[\frac{\exp(\pi H/G) - 2}{\exp(\pi H/G) + 2}\right]^4}, \qquad 0 < \frac{G}{H} < 1, \tag{5.8}$$

şeklindedir. t-düzlemindeki t_D, t_W ve t_S ifadeleri ise;

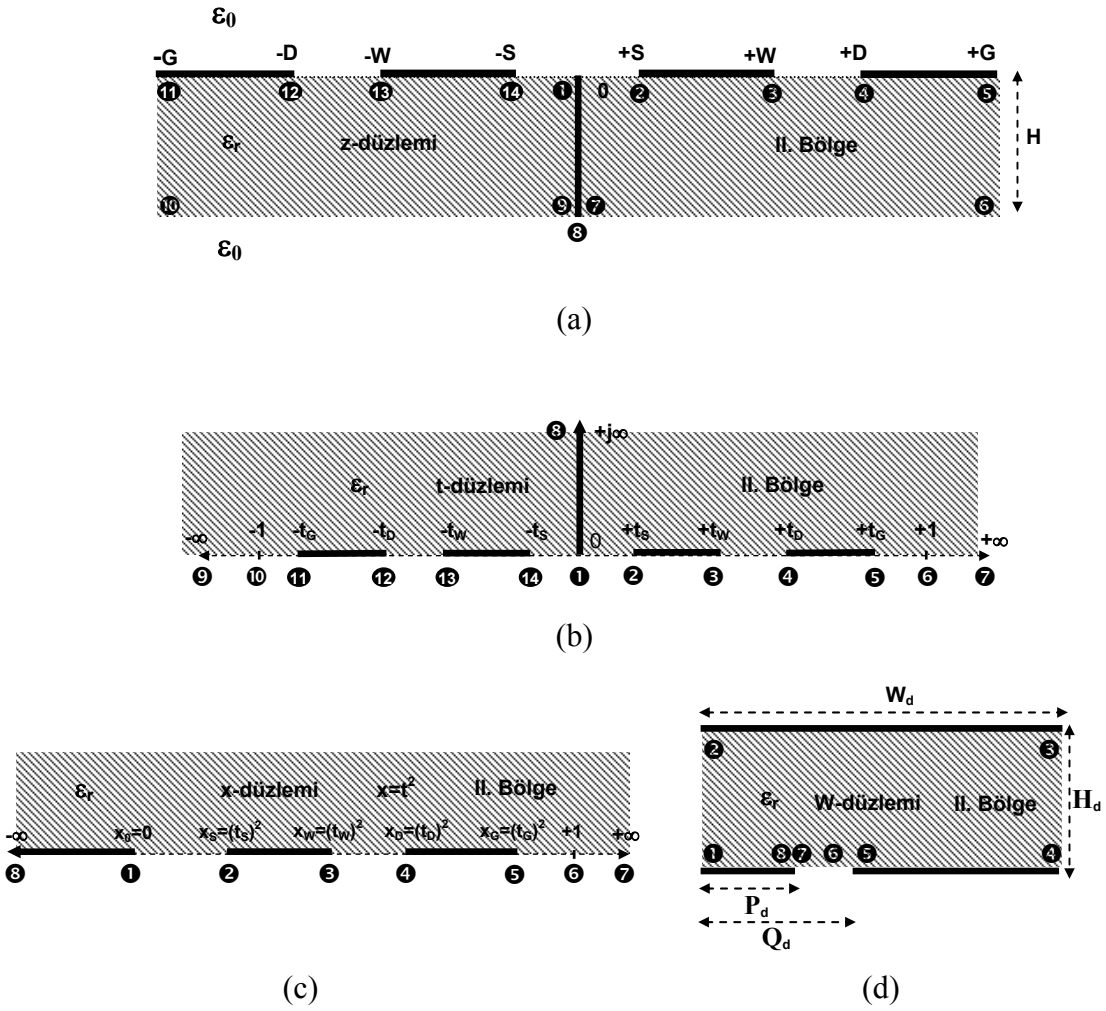
$$F(\arcsin(t_D/t_G), t_G) = \frac{D}{G} K(t_G),$$

$$F(\arcsin(t_W/t_G), t_G) = \frac{W}{G} K(t_G), \tag{5.9}$$

$$F(\arcsin(t_S/t_G), t_G) = \frac{S}{G} K(t_G),$$

şeklinde yazılabilir. Şekil 5.3b ile verilen yapının üst sağ yarı bölgesi, $x = t^2$ dönüşüm fonksiyonu vasıtasıyla, x-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür. Burada, her bir geometrik noktanın t-düzlemindeki karşılığı;

$$x_0 = 0, \qquad x_S = t_S^2, \qquad x_W = t_W^2, \qquad x_D = t_D^2, \qquad x_G = t_G^2 \tag{5.10}$$



Şekil 5.3: Kuplajlı CPW'nin Tek Mod Dielektrik Bölge Kapasite Hesaplanması için bir Seri Konformal Dönüşümler

şeklindedir. *x*-düzleminin üst yarı bölgesi;

$$\frac{W_d}{H_d}=\frac{K(k_{0d})}{K(k_{0d}^{'})}=\alpha_d,\qquad \frac{P_d}{W_d}=\frac{F(\arcsin(\sqrt{\frac{t_D^2-t_S^2}{t_D^2}}),k_{0d})}{K(k_{0d})}=\beta_{1d},\tag{5.11}$$

$$\frac{Q_d}{W_d}=\frac{F(\arcsin(\sqrt{\frac{t_G^2(t_D^2-t_S^2)}{t_D^2(t_G^2-t_S^2)}}),k_{0d})}{K(k_{0d})}=\beta_{2d}$$

şeklinde verilen bağıntılar kullanılarak, W-düzlemi ile tasvir edilen paralel plakalı bir yapıya dönüşür. Denklem (5.11) ile verilen k_{0d} modülü;

$$k_{0d} = \frac{t_D}{t_W}\sqrt{\frac{t_W^2 - t_S^2}{t_D^2 - t_S^2}}, \qquad k_{0d}^{'} = \sqrt{1 - k_{0d}^2} \tag{5.12}$$

şeklindedir. II. bölgenin tek mod birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi;

$$C_{0d} = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)\left(\frac{K(k_{01d})}{K(k_{01d}^{'})} + \frac{K(k_{03d})}{K(k_{03d}^{'})}\right) \tag{5.13}$$

şeklinde elde edilir. Denklem (5.13) ile verilen k_{01d} ve k_{03d} modülleri, aşağıda verilen bağıntılar vasıtasıyla hesaplanabilir:

$$\frac{F(\arcsin\left(\frac{k_{01d}}{k_{02d}}\right), k_{02d})}{K(k_{02d})} = \frac{\beta_{1d}}{\beta_{3d}}, \qquad \frac{F(\arcsin\left(\frac{k_{03d}}{k_{04d}}\right), k_{02d})}{K(k_{04d})} = \frac{1-\beta_{2d}}{1-\beta_{3d}},$$
$$\frac{K(k_{02d})}{K(k_{02d}^{'})} = \alpha_d\beta_{3d}, \qquad \frac{K(k_{04d})}{K(k_{04d}^{'})} = \alpha_d(1-\beta_{3d}), \qquad \beta_{3d} = \frac{\beta_{1d}+\beta_{2d}}{2} \tag{5.14}$$

Denklem (5.2), Denklem (5.5), Denklem (5.9), Denklem (5.11) ve Denklem (5.14) bağıntılarında geçen $F(\phi,k)$ ifadeleri, Jakobi notasyonunda yazılmış I. tür tam olmayan eliptik integrali temsil etmektedir. I. tür tam olmayan integral ifadeleri, Cheng ve Robertson (1995) tarafından verilen yaklaşık çözümlerden faydalanılarak hesaplanabilir.

Sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli kuplajlı CPW'nin tek mod durumu için birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi;

$$\begin{aligned} C_{tek} &= C_{01} + C_{02} + C_{03} \\ &= 2\varepsilon_0\left(\frac{K(k_{01})}{K(k_{01}^{'})} + \frac{K(k_{03})}{K(k_{03}^{'})}\right) + \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)\left(\frac{K(k_{01d})}{K(k_{01d}^{'})} + \frac{K(k_{03d})}{K(k_{03d}^{'})}\right) \end{aligned} \tag{5.15}$$

şeklinde elde edilir. Böylece, sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli kuplajlı CPW'nin tek mod durumu için, efektif dielektrik sabiti, faz hızı ve karakteristik empedansı aşağıda verilen bağıntılar şeklinde ifade edilir:

$$\varepsilon_{eff(tek)} = \frac{C_{tek}(\varepsilon_r)}{C_{tek}(1)}, \quad v_{faz(tek)} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff(tek)}}}, \quad Z_{0(tek)} = \frac{1}{v_{faz(tek)} C_{tek}} \tag{5.16}$$

Burada c boşluktaki ışık hızını, v_{faz} ise faz hızını ifade etmektedir.

5.1.2. Çift (Even) mod durumu için analiz

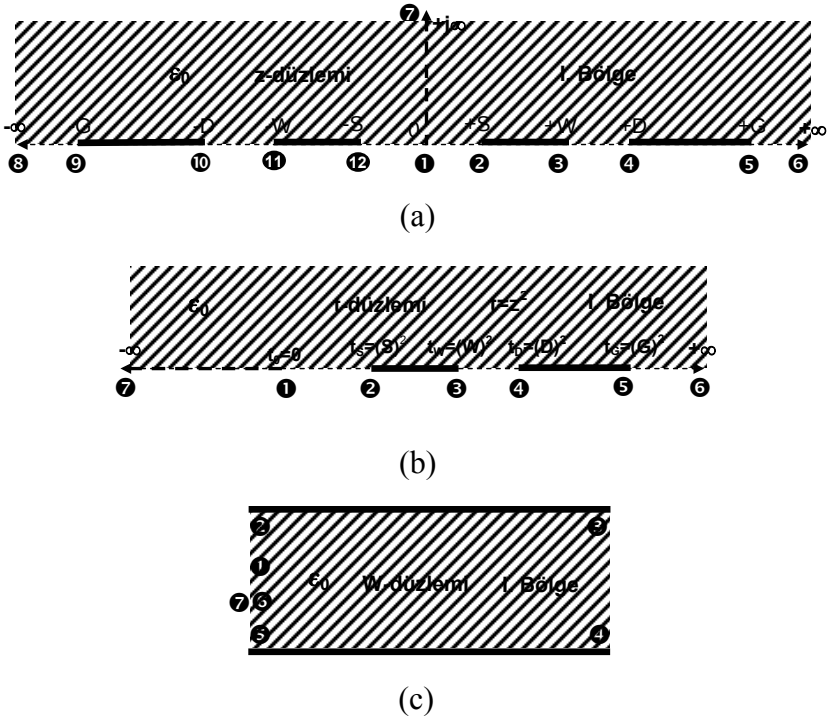
Sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli kuplajlı CPW'nin çift mod birim uzunluk başına düşen toplam kapasite hesaplamalarında, AA' boyuna simetrik çizgisi, mod yaklaşımı gereği magnetik bir duvar gibi davranır. Tek mod kapasite hesaplamalarında olduğu gibi, çift mod durumu için yapının birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi, I. bölge (C_{01}) ve III. bölgede (C_{03}) oluşan serbest ortam hava kapasiteleri ile II. bölgede (C_{02}) oluşan dielektrik ortam kapasitesinin toplamı şeklinde ifade edilir. I. bölge (C_{01}) ile temsil edilen serbest hava ortam kapasitesinin hesaplanması için, yapının simetrik özelliğinden dolayı, Şekil 5.4a ile verilen z-düzleminin üst sağ yarı bölgesi, $t = z^2$ dönüşüm fonksiyonu vasıtasıyla, Şekil 5.4b ile verilen t-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür. Burada her bir geometrik noktanın t-düzlemindeki karşılığı;

$$t_0 = 0, \quad t_S = S^2, \quad t_W = W^2, \quad t_D = D^2, \quad t_G = G^2 \tag{5.17}$$

şeklinde yazılabilir. t-düzleminin üst yarı bölgesi;

$$W = \int \frac{dt}{\sqrt{(t - t_S)(t - t_W)(t - t_D)(t - t_G)}} \tag{5.18}$$

integral bağıntısı vasıtasıyla, W-düzlemi ile tasvir edilen paralel plakalı bir yapıya dönüşür. Böylece, I. bölgenin çift mod birim uzunluk başına düşen hat kapasitesi;



(a)

(b)

(c)

Şekil 5.4: Kuplajlı CPW'nin Çift Mod Hava Kapasite Hesaplanması için bir Seri Konformal Dönüşümler

$$C_{01} = \varepsilon_0 \frac{K(k_{0a})}{K(k_{0a}^{'})} \tag{5.19}$$

şeklinde elde edilir. Denklem (5.19) ile verilen k_{0a} modülü ise, Denklem (5.18) ile verilen integralin tam eliptik integrale indirgenmesiyle;

$$k_{0a} = \sqrt{\frac{(G^2 - D^2)(W^2 - S^2)}{(G^2 - W^2)(D^2 - S^2)}}, \qquad k_{0a}^{'} = \sqrt{1 - k_{0a}^2} \tag{5.20}$$

şeklinde elde edilir. Şekil 5.1 ile verilen yapıda, III. bölge ile temsil edilen serbest ortam hava kapasitesi ise, tek mod kapasite hesaplamalarında olduğu gibi, dielektrik tabanın yok sayılmasıyla elde edilebilir. Dielektrik tabanın ortadan kaldırılmasıyla oluşan konfigürasyon, I. bölge konfigürasyonu ile aynı olduğu için, III. bölge serbest ortam hava kapasitesi, aşağıda verilen bağıntı ile ifade edilir:

$$C_{01} = C_{03} \tag{5.21}$$

II. bölge ile temsil edilen dielektrik bölge kapasite hesaplaması, Şekil 5.5 ile verilen bir seri Konformal dönüşümler kullanılarak hesaplanabilir. Şekil 5.5a ile verilen dielektrik bölge, ters Schwarz-Christoffel dönüşümü kullanılarak aşağıda verilen integral vasıtasıyla;

$$Z = \int \frac{dt}{\sqrt{(t^2-1)(t^2-t_G^2)}} \tag{5.22}$$

Şekil 5.5b ile verilen *t*-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür. Şekil 5.5b ile verilen *t*-düzlemindeki t_G ifadesi;

$$t_G = \left[\frac{\exp(\pi G/H)-2}{\exp(\pi G/H)+2}\right]^2, \qquad 1 < \frac{G}{H} < \infty,$$
$$t_G = \sqrt{1-\left[\frac{\exp(\pi H/G)-2}{\exp(\pi H/G)+2}\right]^4}, \qquad 0 < \frac{G}{H} < 1, \tag{5.23}$$

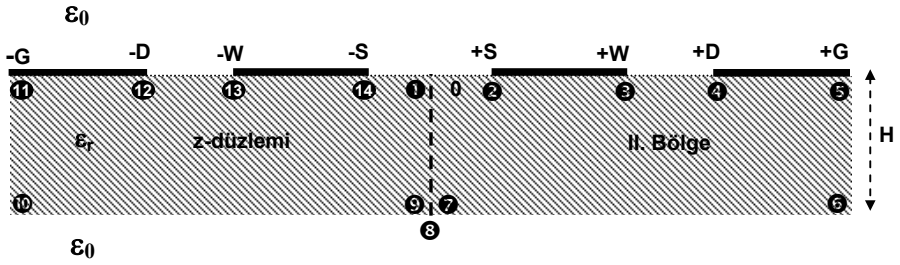
şeklindedir. Şekil 5.5b'deki, t_D, t_W ve t_S ifadeleri ise;

$$F(\arcsin(t_D/t_G), t_G) = \frac{D}{G}K(t_G),$$
$$F(\arcsin(t_W/t_G), t_G) = \frac{W}{G}K(t_G), \tag{5.24}$$
$$F(\arcsin(t_S/t_G), t_G) = \frac{S}{G}K(t_G),$$

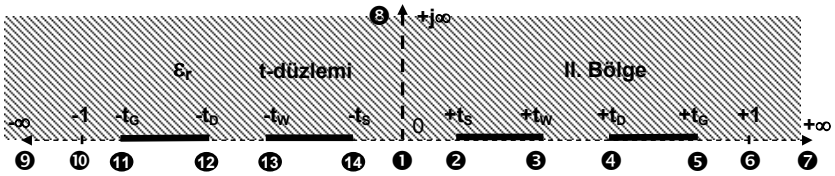
şeklinde yazılabilir. $x = t^2$ dönüşüm fonksiyonu kullanılarak, Şekil 5.5b ile verilen yapının üst sağ yarı bölgesi, *x*-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür. Burada her bir geometrik noktanın *t*-düzlemindeki karşılığı;

$$x_0 = 0, \quad x_S = t_S^2, \quad x_W = t_W^2, \quad x_D = t_D^2, \quad x_G = t_G^2 \tag{5.25}$$

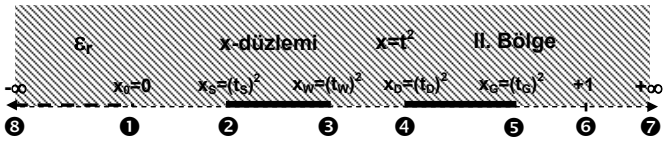
şeklindedir. Şekil 5.5c ile verilen *x*-düzleminin üst yarı bölgesi ise;



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.5: Kuplajlı CPW'nin Çift Mod Dielektrik Bölge Kapasite Hesaplanması için bir Seri Konformal Dönüşümler

$$W = \int \frac{dx}{\sqrt{(x - x_S)(x - x_W)(x - x_D)(x - x_G)}} \tag{5.26}$$

integrali vasıtasıyla, W-düzlemi ile tasvir edilen paralel plakalı yapının iç bölgesine dönüşmektedir. Paralel plakalı yapılardaki iyi-bilinen kapasite bağıntısı kullanılarak, II. bölge ile temsil edilen dielektrik bölge kapasitesi;

$$C_d = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)\frac{K(k_d)}{K(k_d^{'})} \tag{5.27}$$

şeklinde elde edilir. Denklem (5.26) ile verilen integralin, I. tür tam eliptik integrale indirgenmesiyle k_d modülü;

$$k_d = \sqrt{\frac{(t_G^2 - t_D^2)(t_W^2 - t_S^2)}{(t_G^2 - t_W^2)(t_D^2 - t_S^2)}}, \qquad k_d^{'} = \sqrt{1 - k_d^2} \tag{5.28}$$

şeklinde elde edilir. Yukarıdaki bağıntılarda geçen, $K(k)/K(k^{'})$ oran değeri için yaklaşık çözümler Hilberg (1969) tarafından verilmiştir

Sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli kuplajlı CPW'nin çift mod için birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi;

$$C_{çift} = C_{01} + C_{02} + C_{03} = 2\varepsilon_0 \frac{K(k_{0a})}{K(k_{0a}^{'})} + \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)\left(\frac{K(k_d)}{K(k_d^{'})}\right) \tag{5.29}$$

şeklinde elde edilir. Böylece, çift mod kapasite bağıntısı kullanılarak, sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli kuplajlı CPW'nin çift mod durumu için efektif dielektrik sabiti, faz hızı ve karakteristik empedansı aşağıda verilen bağıntılar şeklinde ifade edilir:

$$\varepsilon_{eff(çift)} = \frac{C_{çift}(\varepsilon_r)}{C_{çift}(1)}, \qquad v_{faz(çift)} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff(çift)}}}, \qquad Z_{0(çift)} = \frac{1}{v_{faz(çift)} C_{çift}} \tag{5.30}$$

Denklem (5.30) içerisinde yer alan v_{faz} ve c terimi, sırasıyla, faz hızını ve ışık hızını ifade etmektedir.

Çift ve tek mod karakteristik empedans bağıntıları kullanılarak, sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli kuplajlı CPW'nin kuplaj katsayısı;

$$C_{db} = -20\log\left(\frac{Z_{0(çift)} - Z_{0(tek)}}{Z_{0(çift)} + Z_{0(tek)}}\right), \qquad C = \frac{Z_{0(çift)} - Z_{0(tek)}}{Z_{0(çift)} + Z_{0(tek)}} \tag{5.31}$$

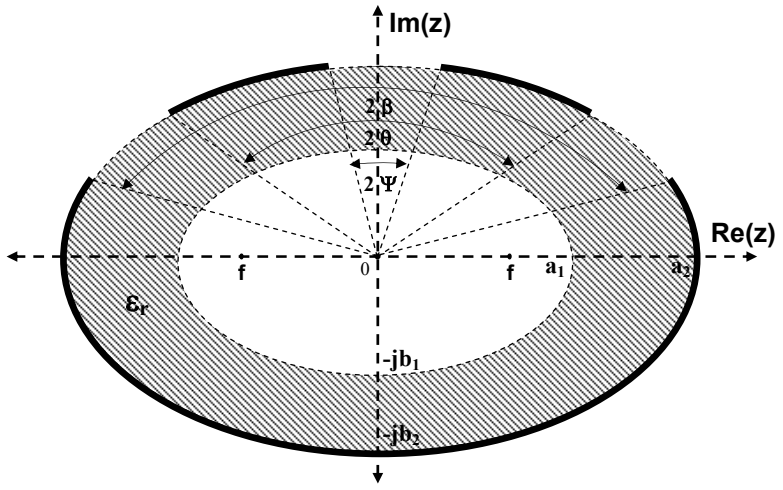
bağıntıları ile ifade edilir.

5.1.3. Eliptik Kesitli kuplajlı CPW'nin analizi

Eliptik kesitli kuplajlı CPW'nin kesit görünümü Şekil 5.6 ile verilmiştir. Şekil 5.6'da da görüldüğü gibi, eliptik kesitli kuplajlı CPW eş-odaklı iki elipsten meydana gelmektedir. Elipslerin sırasıyla küçük yarıçapları b_1 ve b_2, büyük yarıçapları ise a_1 ve a_2 dir. Şerit iletken yaylar arasındaki açı 2Ψ, yay şeritlerin her biri ise $\theta - \Psi$ açısı ile verilmiştir. Toprak düzlem ile şerit iletken yaylar arasındaki aralık açısı $\beta - \theta$ dır. Eliptik yapıdaki dielektrik tabanın bağıl dielektrik sabiti ε_r olup, elipslerin odak mesafeleri ise,

$$f = \sqrt{a_1^2 - b_1^2} = \sqrt{a_2^2 - b_2^2} \tag{5.32}$$

şeklinde ifade edilir. Eliptik kesitli kuplajlı CPW'nin tek ve çift mod elektriksel karakteristiklerini elde etmek için şu şekilde bir yol izlenebilir: İlk olarak eliptik kesitli kuplajlı CPW yapısı, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak uygun bir dönüşüm fonksiyonu vasıtasıyla, silindirik kesitli bir yapıya dönüştürülür. Bir sonraki adımda ise, silindirik kesitli yapı, uygun bir dönüşüm fonksiyonu kullanılarak düzlemsel kesitli bir yapıya dönüştürülür. Bu dönüşümlerin amacı orijinal düzlemde geometrisi karmaşık (eliptik yada silindirik) olan bir yapıyı, geometrisi bilinen bir yapıya dönüştürmektir.



Şekil 5.6: Eliptik Kesitli Kuplajlı CPW'nin Kesit Görünümü

Eliptik kesitli kuplajlı CPW'den silindirik kesitli kuplajlı CPW'ye, silindirik kesitli kuplajlı CPW'den düzlemsel kesitli kuplajlı CPW'ye dönüşümleri gösteren konfigürasyon Şekil 5.7 ile verilmiştir. Şekil 5.7a ile verilen eliptik kesitli kuplajlı CPW;

$$z_2 = (z_1 \mp \sqrt{z_1^2 - f^2})/f \tag{5.33}$$

dönüşüm fonksiyonu vasıtasıyla, Şekil 5.7b ile verilen silindirik kesitli kuplajlı CPW yapısına dönüşür. Şekil 5.7b'de de görüldüğü gibi, tüm yay uzunluklarının açısal değeri korunmuştur. Şekil 5.7b ile verilen silindirik kesitli yapının büyük ve küçük yarıçapları, eliptik kesitli yapının geometrisine bağlı olarak;

$$r_1 = \sqrt{\frac{a_1 + b_1}{a_1 - b_1}}, \qquad r_2 = \sqrt{\frac{a_2 + b_2}{a_2 - b_2}} \tag{5.34}$$

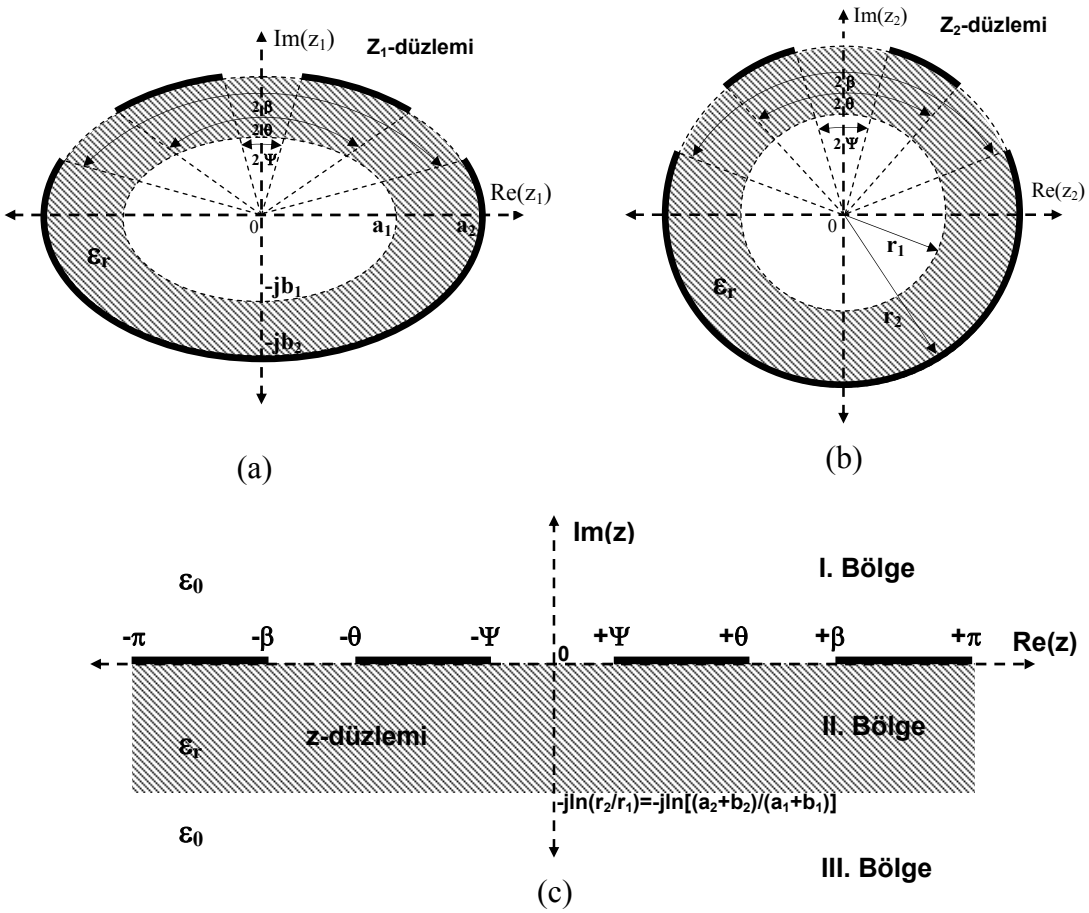
şeklinde ifade edilir. Silindirik kesitli kuplajlı CPW yapısı;

$$z = j\ln(z_2/r_2) \tag{5.35}$$

dönüşüm fonksiyonu vasıtasıyla, Şekil 5.7c ile verilen düzlemsel kesitli kuplajlı CPW yapısına dönüşür. Şekil 5.7c ile verilen düzlemsel kesitli kuplajlı CPW yapısının geometrik özellikleri, Şekil 5.1 ile verilen sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlemli kuplajlı CPW yapısının geometrik özellikleri ile aynıdır. Her iki yapı arasındaki farklı olan parametreler ise, eliptik ve silindirik kesitli yapılarda açısal değerlere karşılık gelen, düzlemsel kesitli yapının geometrik değerleridir. Şekil 5.1 ile verilen düzlemsel kesitli yapı ile Şekil 5.7 ile verilen eliptik kesitli yapı arasında aşağıda verilen özdeşlikler ifade edilebilir:

$$S = \Psi, \quad W = \theta, \quad D = \beta, \quad G = \pi, \quad H = \ln(r_2/r_1) = \ln\left(\frac{a_2 + b_2}{a_1 + b_1}\right) \tag{5.36}$$

Şekil 5.1 ve Şekil 5.7c ile verilen yapıların geometrik benzerliğinden ve Denklem (5.36) ile verilen özdeşliklerden dolayı, eliptik ve silindirik kesitli kuplajlı CPW yapısının analizi, sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli kuplajlı CPW yapısının analizinden faydalanılarak yapılabilir.



Şekil 5.7: Eliptik Kesitli Kuplajlı CPW Yapısı için bir Seri Konformal Dönüşümler

Sonuç olarak, eliptik ve silindirik kesitli kuplajlı CPW yapısının tek mod elektriksel karakteristikleri, işlem tekrarından kaçınmak için Denklem (5.36) ile verilen özdeş parametrelerin, Denklem (5.1-16) ile verilen bağıntılardaki yerlerine konulması ile elde edilebilir. Eliptik ve silindirik kesitli kuplajlı CPW yapısının çift mod elektriksel karakteristikleri ise, Denklem (5.36) ile verilen özdeş parametrelerin Denklem (5.17-31) ile verilen bağıntılardaki yerlerine konulması ile elde edilebilir.

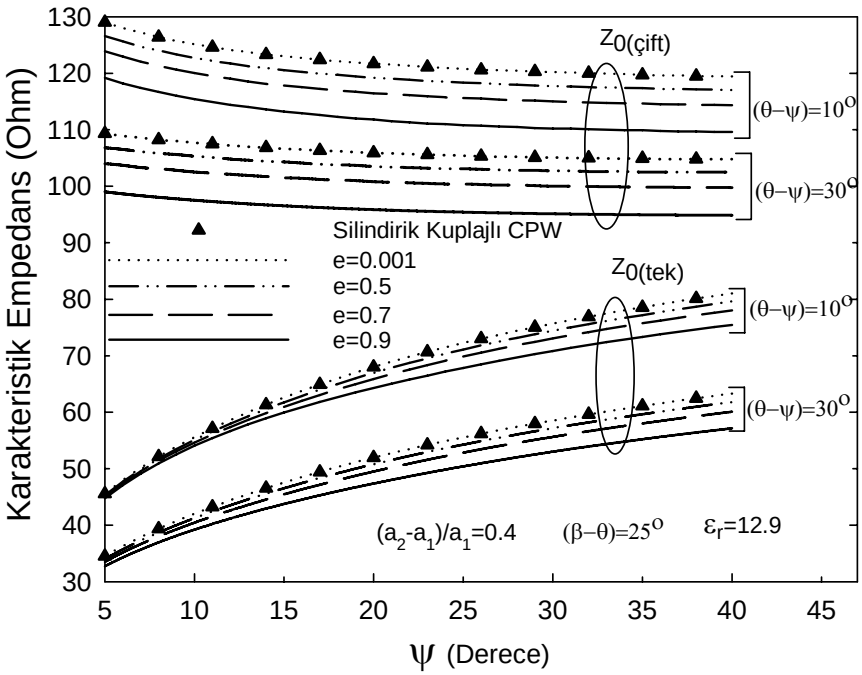
5.1.4. Düzlemsel, eliptik ve silindirik kesitli kuplajlı CPW için nümerik sonuçlar ve tartışmalar

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 ile kesit görünümleri verilen eliptik ve silindirik kesitli kuplajlı CPW'nin elektriksel karakteristikleri, analitik bağıntılar formunda elde

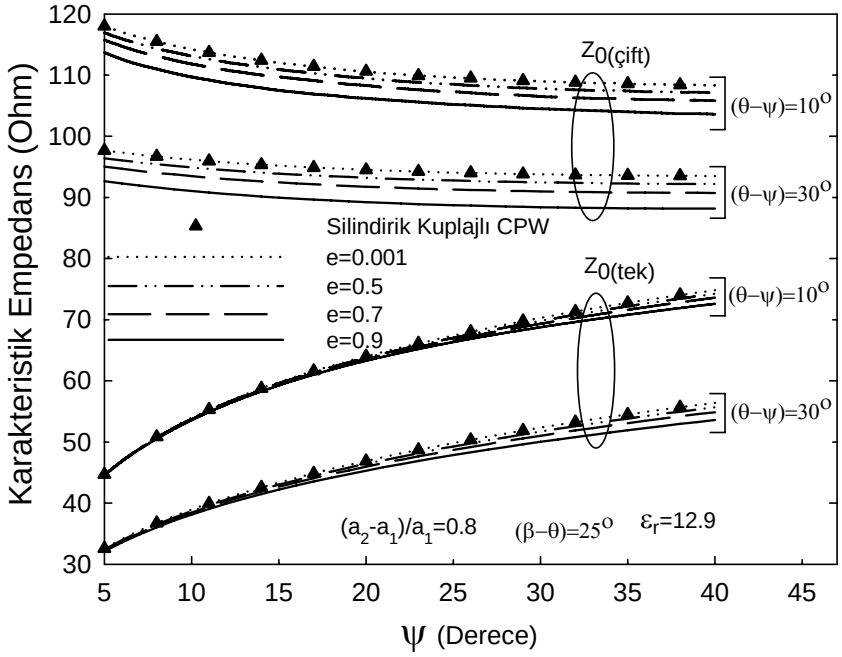
edilmiştir. Eliptik ve silindirik kesitli kuplajlı CPW yapısının elektriksel karakteristik değişim eğrileri Şekil 5.8-15'deki grafiklerde verilmiştir. Grafik analizlerinde, eliptik kesitli yapı ile silindirik kesitli yapının elektriksel karakteristik değişim eğrileri birlikte verilmiştir. Çünkü, eliptik kesitli yapıda eksantrisite katsayısı ($e_i = f / a_i$) sıfıra yaklaşırken, eliptik kesitli yapının geometrisi silindirik kesitli yapıya dönüşmektedir.

Bu bölümde, Şekil 5.1 ile verilen sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli CPW yapısının elektriksel karakteristikleri de elde edilmiştir. CAD uyumlu analitik bağıntılar formunda elde edilen bağıntıların geçerliliği, değişik geometrik boyutlar ve farklı frekans değerlerinde, düzlemsel kuplajlı CPW yapısının Sonnet simülasyon programında modellenmesiyle doğrulanmıştır. Ayrıca, sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli CPW yapısı, farklı geometrik boyutlarda, Cheng (1996) tarafından analizi gerçekleştirilen sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonsuz yanal toprak düzlem genişlikli CPW yapısı ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 5.8 ve Şekil 5.9 ile verilen grafiklerde, ε_r=12,9, $(\theta - \Psi) = 10^0$, $(\theta - \Psi) = 30^0$, $(\beta - \theta) = 25^0$, $(a_2 - a_1)/a_1 = 0.4$ ve $(a_2 - a_1)/a_1 = 0.8$ oran değerleri ile eksantrisite katsayısının değişik değerlerinde ($e_i = f / a_i$ = 0.9, 0.7, 0.5 ve 0.001), Ψ açısının bir fonksiyonu olarak, eliptik ve silindirik kesitli kuplajlı CPW'nin tek ve çift mod karakteristik empedans değişim eğrileri görülmektedir. Şekil 5.8 ve Şekil 5.9 ile verilen grafiklerde de görüldüğü gibi, Ψ açısının artması durumunda, tek mod karakteristik empedans değeri önemli bir ölçüde yükselmekte, çift mod karakteristik empedans değeri ise, dar bir aralıkta düşüş eğilimi göstermektedir. Şerit iletken yay uzunluklarını ifade eden $\theta - \Psi$ açısının artması durumunda, çift ve tek mod karakteristik empedans değerlerinde önemli bir ölçüde azalma görülmektedir. $(a_2 - a_1)/a_1$ oran değerinin artması durumunda ise, çift ve tek mod karakteristik empedans değerlerinde bir düşüş görülmektedir. Eksantrisite katsayısının azalması durumunda, çift ve tek mod karakteristik empedans değerlerinde önemli bir oranda artış görülmektedir. Eksantrisite katsayısının sıfıra (0.001) yaklaşması durumunda ise, eliptik kesitli yapının empedans değerleri ile silindirik kesitli yapının empedans değerlerinin üst üste çakıştığı görülmektedir.

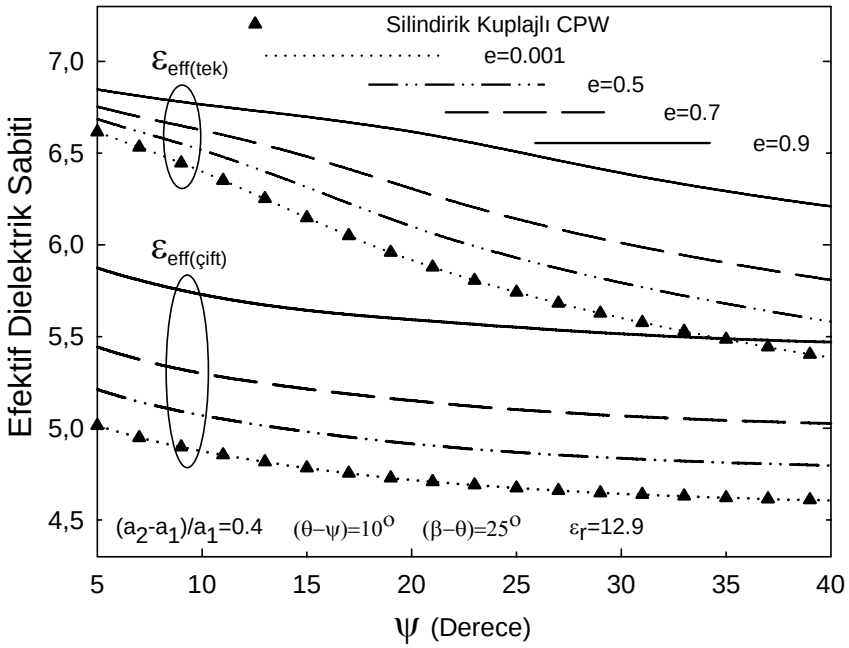


Şekil 5.8: Ψ Açısının bir Fonksiyonu Olarak Eliptik ve Silindirik Kesitli Kuplajlı CPW'nin Çift ve Tek Mod Empedans Değişimi [$(a_2-a_1)/a_1=0.4$]

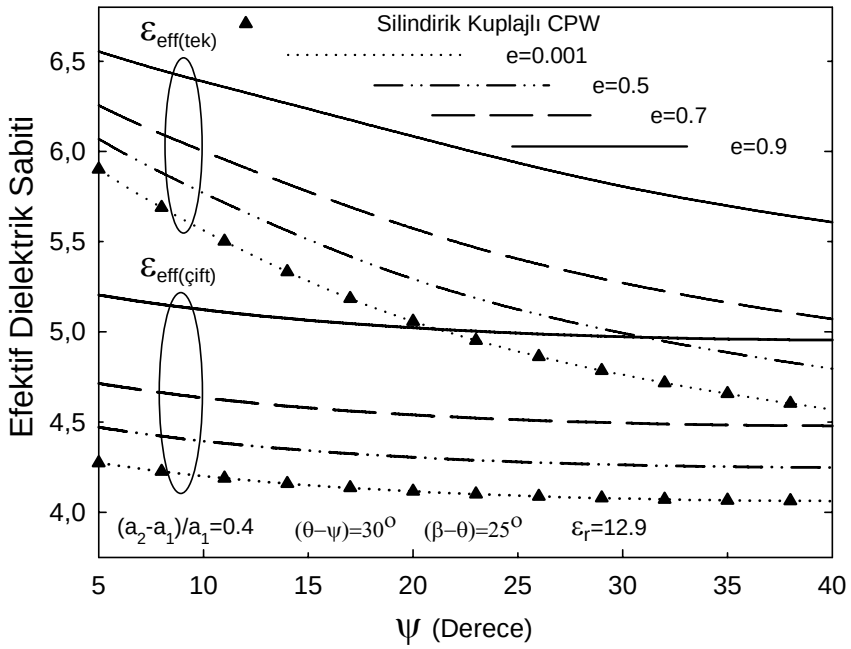


Şekil 5.9: Ψ Açısının bir Fonksiyonu Olarak Eliptik ve Silindirik Kesitli Kuplajlı CPW'nin Çift ve Tek Mod Empedans Değişimi [$(a_2-a_1)/a_1=0.8$]

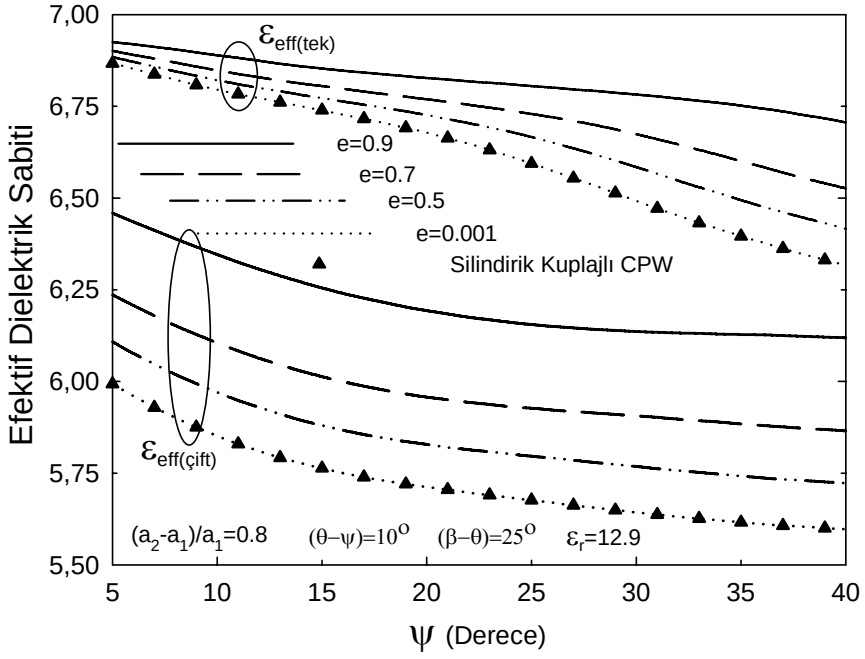
Şekil 5.10-13 ile verilen grafikler, Ψ açısının bir fonksiyonu olarak, eliptik ve silindirik kesitli kuplajlı CPW'nin tek ve çift mod efektif dielektrik sabiti değişim eğrilerini vermektedir. Bu grafiklerdeki geometrik parametreler, empedans değişimlerini veren grafiklerdeki geometrik parametreler ile aynıdır. Şekil 5.10-13 ile verilen grafiklerde de görüldüğü gibi, Ψ açısının artması durumunda, tek ve çift mod efektif dielektrik sabiti değerlerinde önemli bir ölçüde düşüş görülmektedir. Ancak, bu düşüş oranı, çift mod durumuna göre, tek mod durumunda daha dar bir aralıkta gerçekleşmektedir. $\theta - \Psi$ açısının artması durumunda, çift ve tek mod efektif dielektrik sabiti değerleri önemli bir oranda azalmaktadır. $(a_2 - a_1)/a_1$ oran değerinin artması durumunda ise, çift ve tek mod efektif dielektrik sabiti değerleri dar bir aralıkta artmaktadır. Ayrıca, eksantrisite katsayısı e'nin azalması durumunda ise, çift ve tek mod efektif dielektrik sabiti değerlerinde önemli bir ölçüde azalma görülmektedir. Empedans değişim grafiklerinde olduğu gibi, eksantrisite katsayısının sıfıra (0.001) yaklaşması durumunda, eliptik yapının efektif dielektrik sabiti değerleri ile silindirik yapının efektif dielektrik sabiti değerleri üst üste çakışmaktadır.



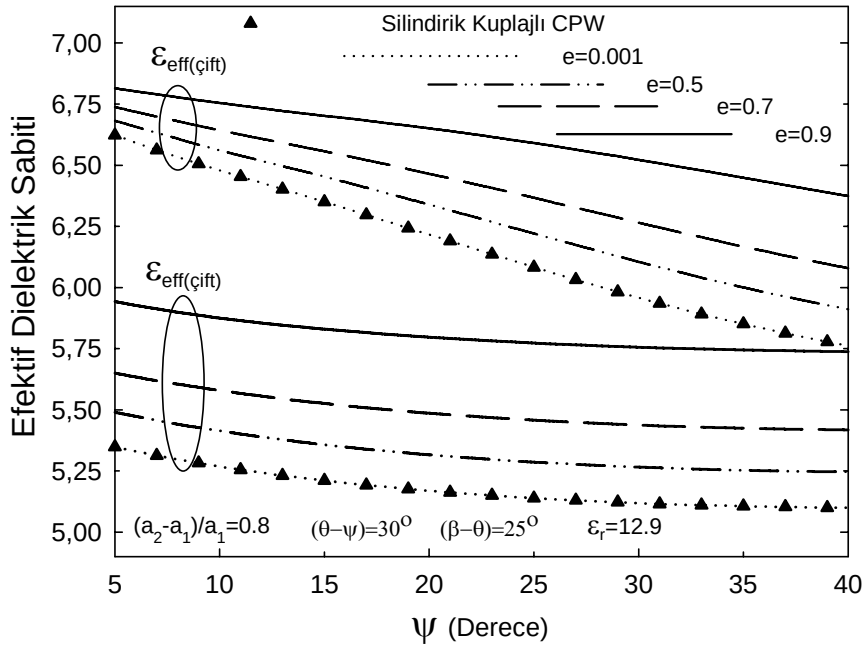
Şekil 5.10: Ψ Açısının bir Fonksiyonu Olarak Eliptik ve Silindirik Kesitli Kuplajlı CPW'nin Çift ve Tek Mod Efektif Dielektrik Sabiti Değişimi [$(a_2-a_1)/a_1=0.4$, $\theta-\Psi=10^0$]



Şekil 5.11: Ψ Açısının bir Fonksiyonu Olarak Eliptik ve Silindirik Kesitli Kuplajlı CPW Yapısı için Çift ve Tek Mod Efektif Dielektrik Sabiti Değişimi $[(a_2-a_1)/a_1=0.4, \quad \theta-\Psi=30^0]$

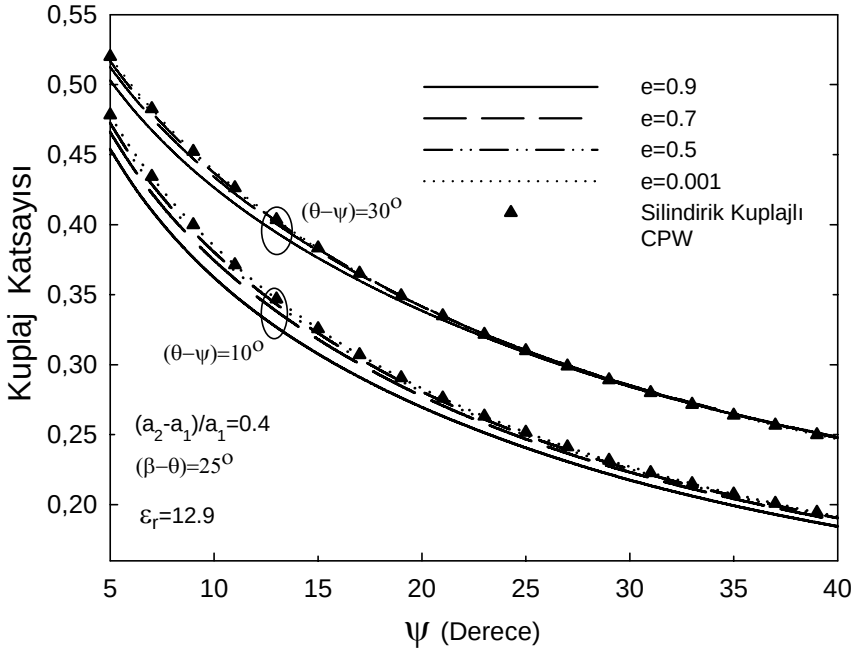


Şekil 5.12: Ψ Açısının bir Fonksiyonu Olarak Eliptik ve Silindirik Kesitli Kuplajlı CPW Yapısı için Çift ve Tek Mod Efektif Dielektrik Sabiti Değişimi $[(a_2-a_1)/a_1=0.8, \quad \theta-\Psi=10^0]$

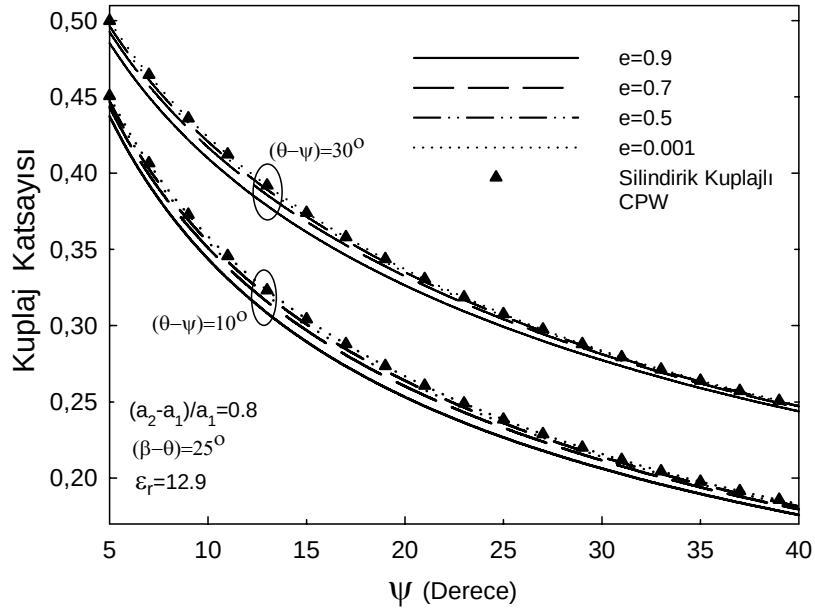


Şekil 5.13: Ψ Açısının bir Fonksiyonu Olarak Eliptik ve Silindirik Kesitli Kuplajlı CPW Yapısı için Çift ve Tek Mod Efektif Dielektrik Sabiti Değişimi $[(a_2-a_1)/a_1=0.8, \quad \theta-\Psi=30^0]$

Şekil 5.14 ve Şekil 5.15 ile verilen grafik analizlerinde, eliptik ve silindirik kesitli kuplajlı CPW yapısının kuplaj katsayısı değişimi görülmektedir. Bu grafiklerde verilen geometrik parametreler, empedans ve efektif dielektrik sabiti grafik analizlerinde verilen geometrik parametreler ile aynıdır. Şekil 5.6 ile verilen eliptik kesitli kuplajlı CPW yapısında da görüldüğü gibi, Ψ açısının artması, şerit iletken yaylar arasındaki aralığın artmasını ifade etmektedir. Şerit iletken yaylar arasındaki aralığın artması ise, doğal olarak yapının kuplaj katsayısı değerlerinde bir azalmaya neden olmaktadır. Şekil 5.14 ve Şekil 5.15 ile verilen kuplaj katsayısı değişim grafikleri bu durumu doğrulamaktadır. $\theta - \Psi$ açısının artması durumunda, eliptik kesitli yapının kuplaj katsayısı değerlerinde önemli oranda bir artış görülmektedir. $(a_2 - a_1)/a_1$ oran değerinin artması durumunda ise, kuplaj katsayısı değerleri daha dar bir aralıkta azalmaktadır. Eliptik kuplajlı yapı için eksantrisite katsayısı e'nin azalması durumunda, kuplaj katsayısı değerlerinde az da olsa bir artış görülmektedir. Eksantrisite katsayısının sıfıra (0.001) yaklaşması durumunda ise, eliptik yapının sonuçları ile silindirik yapının sonuçları üst üste çakışmaktadır.



Şekil 5.14: Ψ Açısının bir Fonksiyonu Olarak Eliptik ve Silindirik Kesitli Kuplajlı CPW Yapısı için Kuplaj Katsayısı Değişimi [$(a_2-a_1)/a_1=0.4$]



Şekil 5.15: Ψ Açısının bir Fonksiyonu Olarak Eliptik ve Silindirik Kesitli Kuplajlı CPW Yapısı için Kuplaj Katsayısı Değişimi [$(a_2-a_1)/a_1=0.8$]

Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de, sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli kuplajlı CPW yapısının tek ve çift mod efektif dielektrik sabiti ve karakteristik empedans nümerik sonuçları, Sonnet simülasyon program sonuçları ile birlikte verilmiştir. Her iki tabloda da, değişik geometrik boyutlarda ve farklı frekans (1 GHz, 7 GHz, 13 GHz ve 21 GHz) değerlerinde, tek ve çift mod efektif dielektrik sabiti ve karakteristik empedans nümerik sonuçları görülmektedir. Tablolarda da görüldüğü gibi, sonnet simülasyon program sonuçları ile bu bölüm içerisinde elde edilen analitik bağıntılar arasında oldukça iyi bir uyum görülmektedir. Ayrıca, çift ve tek mod durumundaki bağıl hata oranları da tablolar içerisinde verilmiştir. Tablolarda verilen bağıl hata oranlarındaki düşük değerler, bu bölüm içerisinde türetilen analitik bağıntıların doğruluğunu kanıtlamaktadır. Bu bölümde elde edilen analitik bağıntılar ile sonnet simülasyon program sonuçları arasındaki yüksek frekans (21 Ghz) değerlerinde görülen uyum, hem quasi-statik yaklaşım içerisinde elde edilen analitik ifadelerin geçerliliğini kanıtlamakta, hem de sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli kuplajlı CPW'nin düşük dispersiyona sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.3'de, Şekil 5.1 ile verilen sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli kuplajlı CPW ile sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonsuz yanal toprak düzlem genişlikli kuplajlı CPW'nin aynı geometrik boyutlarda bir karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 5.1 ile verilen yapıda, yanal toprak düzlem genişliğinin çok büyük seçilmesi durumunda, yapının geometrisi, Cheng (1996) tarafından analiz edilen sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonsuz yanal toprak düzlem genişlikli kuplajlı CPW yapısına dönüşmektedir. Tablo 5.3 ile verilen karşılaştırma sonuçları bu durumu doğrulamaktadır. Ayrıca, Tablo 5.3 ile verilen bağıl hata oranlarındaki düşük değerler, bu bölümde edilen analitik bağıntıların doğruluğunu göstermektedir.

Tablo 5.1: Tek Mod Durumunda Sonlu Dielektrik Kalınlıklı ve Sonlu Yanal Toprak Düzlemli CPW Yapısı için Elde Edilen Analitik Bağıntılar ile Sonnet Simülasyon Program Sonuçlarının Karşılaştırılması

S=20 μm, W=50 μm, D=70 μm, G=470 μm, ε_r=12.9							
FREKANS (GHz)	**Tek (Odd) Mod**						
	Efektif Dielektrik Sabiti				**Karakteristik Empedans (Ω)**		
	H (μm)	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Sonnet Simülasyon Sonucu**	**Δ (%)**	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Sonnet Simülasyon Sonucu**	**Δ (%)**
1	100	6.899	6.919	0.29	43.444	44.438	2.24
	200	6.950	6.948	-0.03	43.283	44.347	2.40
	300	6.950	6.950	0.00	43.284	44.341	2.38
	400	6.950	6.950	0.00	43.285	44.340	2.38
	500	6.950	6.950	0.00	43.285	44.340	2.38
7	100	6.899	6.919	0.29	43.444	44.436	2.23
	200	6.950	6.948	-0.03	43.283	44.345	2.39
	300	6.950	6.949	-0.01	43.284	44.339	2.38
	400	6.950	6.950	0.00	43.285	44.338	2.37
	500	6.950	6.950	0.00	43.285	44.338	2.37
13	100	6.899	6.919	0.29	43.444	44.430	2.22
	200	6.950	6.947	-0.04	43.283	44.340	2.38
	300	6.950	6.949	-0.01	43.284	44.334	2.37
	400	6.950	6.950	0.00	43.285	44.333	2.36
	500	6.950	6.950	0.00	43.285	44.332	2.36
21	100	6.899	6.919	0.29	43.444	44.416	2.19
	200	6.950	6.947	-0.04	43.283	44.327	2.36
	300	6.950	6.949	-0.01	43.284	44.321	2.34
	400	6.950	6.949	-0.01	43.285	44.320	2.34
	500	6.950	6.950	0.00	43.285	44.320	2.34
S=60 μm, W=120 μm, D=150 μm, G=1150 μm, ε_r=12.9							
1	100	6.637	6.613	-0.36	46.437	47.105	1.42
	200	6.881	6.906	0.36	45.604	46.094	1.06
	300	6.934	6.940	0.09	45.432	45.981	1.19
	400	6.949	6.947	-0.03	45.380	45.957	1.26
	500	6.951	6.949	-0.03	45.376	45.950	1.25
7	100	6.637	6.614	-0.35	46.437	47.097	1.40
	200	6.881	6.907	0.38	45.604	46.089	1.05
	300	6.934	6.941	0.10	45.432	45.976	1.18
	400	6.949	6.948	-0.01	45.380	45.952	1.24
	500	6.951	6.950	-0.01	45.376	45.944	1.24
13	100	6.637	6.617	-0.30	46.437	47.076	1.36
	200	6.881	6.909	0.41	45.604	46.074	1.02
	300	6.934	6.943	0.13	45.432	45.962	1.15
	400	6.949	6.951	0.03	45.380	45.939	1.22
	500	6.951	6.953	0.03	45.376	45.932	1.21
21	100	6.637	6.624	-0.20	46.437	47.029	1.26
	200	6.881	6.915	0.49	45.604	46.041	0.95
	300	6.934	6.949	0.22	45.432	45.933	1.09
	400	6.949	6.956	0.10	45.380	45.911	1.16
	500	6.951	6.958	0.10	45.376	45.905	1.15

Tablo 5.2: Çift Mod Durumunda Sonlu Dielektrik Kalınlıklı ve Sonlu Yanal Toprak Düzlemli CPW Yapısı için Elde Edilen Analitik Bağıntılar ile Sonnet Simülasyon Program Sonuçlarının Karşılaştırılması

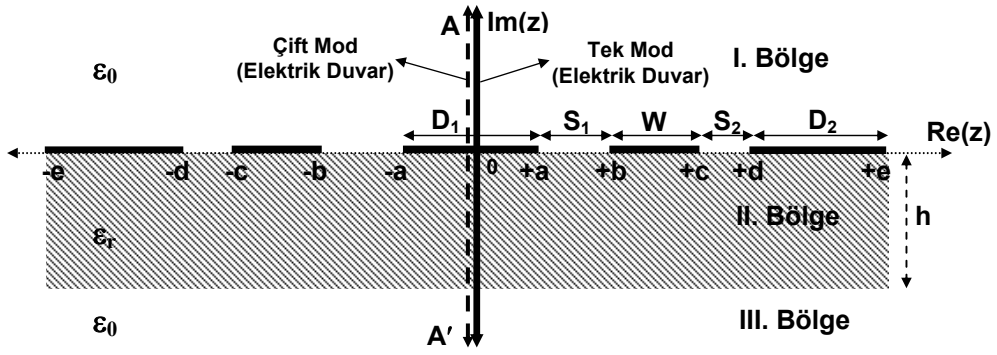
S=20 μm, W=50 μm, D=70 μm, G=470 μm, ε_r=12.9							
FREKANS (GHz)	**Çift (Even) Mod**						
	Efektif Dielektrik Sabiti				**Karakteristik Empedans (Ω)**		
	H (μm)	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Sonnet Simülasyon Sonucu**	**Δ (%)**	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Sonnet Simülasyon Sonucu**	**Δ (%)**
1	100	6.545	6.577	0.49	76.322	77.778	1.87
	200	6.869	6.866	-0.04	74.497	76.126	2.14
	300	6.916	6.925	0.13	74.245	75.802	2.05
	400	6.928	6.942	0.20	74.180	75.706	2.02
	500	6.931	6.949	0.26	74.164	75.672	1.99
7	100	6.545	6.578	0.50	76.322	77.766	1.86
	200	6.869	6.867	-0.03	74.497	76.114	2.12
	300	6.916	6.926	0.14	74.245	75.792	2.04
	400	6.928	6.944	0.23	74.180	75.696	2.00
	500	6.931	6.950	0.27	74.164	75.664	1.98
13	100	6.545	6.580	0.53	76.322	77.734	1.82
	200	6.869	6.869	0.00	74.497	76.086	2.09
	300	6.916	6.928	0.17	74.245	75.768	2.01
	400	6.928	6.946	0.26	74.180	75.674	1.97
	500	6.931	6.952	0.30	74.164	75.642	1.95
21	100	6.545	6.584	0.59	76.322	77.662	1.73
	200	6.869	6.874	0.07	74.497	76.022	2.01
	300	6.916	6.934	0.26	74.245	75.712	1.94
	400	6.928	6.952	0.35	74.180	75.624	1.91
	500	6.931	6.959	0.40	74.164	75.594	1.89
S=60 μm, W=120 μm, D=150 μm, G=1150 μm, ε_r=12.9							
1	100	5.853	5.895	0,71	73.205	73.492	0,39
	200	6.520	6.564	0,67	69.359	69.644	0,41
	300	6.770	6.792	0,32	68.067	68.466	0,58
	400	6.860	6.900	0,58	67.617	67.926	0,45
	500	6.895	6.958	0,91	67.445	67.642	0,29
7	100	5.853	5.898	0.76	73.205	73.454	0.34
	200	6.520	6.568	0.73	69.359	69.612	0.36
	300	6.770	6.796	0.38	68.067	68.446	0.55
	400	6.860	6.904	0.64	67.617	67.920	0.45
	500	6.895	6.963	0.98	67.445	67.644	0.29
13	100	5.853	5.907	0.91	73.205	73.364	0.22
	200	6.520	6.577	0.87	69.359	69.534	0.25
	300	6.770	6.805	0.51	68.067	68.402	0.49
	400	6.860	6.914	0.78	67.617	67.906	0.43
	500	6.895	6.975	1.15	67.445	67.650	0.30
21	100	5.853	5.926	1.23	73.205	73.170	-0.05
	200	6.520	6.599	1.20	69.359	69.370	0.02
	300	6.770	6.826	0.82	68.067	68.312	0.36
	400	6.860	6.936	1.10	67.617	67.896	0.41
	500	6.895	6.999	1.49	67.445	67.706	0.39

Tablo 5.3: Sonlu Dielektrik Taban Kalınlıklı ve Sonlu Yanal Toprak Düzlemli CPW Yapısı ile Sonlu Dielektrik Taban Kalınlıklı ve Sonsuz Yanal Toprak Düzlemli CPW Yapısının Karşılaştırılması

Tek (Odd) Mod						
S=60 μm, W=120 μm, D=150 μm, G=1150 μm, ε_r=12.9						
Efektif Dielektrik Sabiti				**Karakteristik Empedans (Ω)**		
H (μm)	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Cheng (1996)**	**Δ (%)**	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Cheng (1996)**	**Δ (%)**
100	6.637	6.604	-0.50	23.218	23.275	0.24
200	6.881	6.906	0.36	22.802	22.761	-0.18
300	6.934	6.939	0.07	22.716	22.706	-0.04
400	6.949	6.946	-0.04	22.690	22.695	0.02
500	6.951	6.948	-0.04	22.688	22.691	0.01
Çift (Even) Mod						
S=60 μm, W=120 μm, D=150 μm, G=1150 μm, ε_r=12.9						
Efektif Dielektrik Sabiti				**Karakteristik Empedans (Ω)**		
H (μm)	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Cheng (1996)**	**Δ (%)**	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Cheng (1996)**	**Δ (%)**
100	5.853	5.844	-0.15	36.602	36.510	-0.25
200	6.520	6.531	0.17	34.679	34.537	-0.41
300	6.770	6.741	-0.43	34.034	33.995	-0.11
400	6.860	6.827	-0.48	33.808	33.780	-0.08
500	6.895	6.869	-0.38	33.723	33.675	-0.14
Kuplaj katsayısı						
S=60 μm, W=120 μm, D=150 μm, G=1150 μm, ε_r=12.9						
H (μm)	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Cheng (1996)**	**Δ (%)**			
100	0.224	0.221	-1.36			
200	0.207	0.206	-0.49			
300	0.199	0.199	0.00			
400	0.197	0.196	-0.51			
500	0.196	0.195	-0.51			

5.2. Sonlu Dielektrik Taban Kalınlıklı ve Sonlu Toprak Düzlem Genişlikli Hattan Hatta Kuplajlı CPW'nin Analizi

Sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli hattan hatta kuplajlı CPW'nin kesit görünümü Şekil 5.16 ile verilmiştir. Şekil 5.16'da da görüldüğü gibi, $W\,(c-b)$ genişliğine sahip iki iletken şerit, genişlikleri $D_2\,(e-d)$ olarak verilen iki yanal toprak düzlem arasına simetrik olarak yerleştirilmiştir. Yanal toprak düzlemler ile şerit iletkenler arasındaki aralık $S_2\,(d-c)$ olarak verilmiştir. Şekil 5.16 ile verilen yapıda, Şekil 5.1 ile verilen yapıdan farklı olarak, iki iletken şerit arasına $D_1\,(2a)$ genişliğine sahip ek bir toprak düzlem yerleştirilmiştir. Yapının merkezine yerleştirilmiş toprak düzlem ile her iki şerit iletken arasıdaki aralık ise $S_1\,(b-a)$ genişliğindedir. Hattan hatta kuplajlı CPW'nin dielektrik taban kalınlığı h yüksekliğinde olup, genişliği ise $2e$ uzunluğundadır. II. bölge ile temsil edilen dielektrik taban ε_r bağıl dielektrik sabitine sahip olup, I. ve III. bölgeler ise serbest hava ortamı olarak düşünülmüştür. Analizler sırasında, yapının tüm metal iletkenleri sonsuz ince kalınlıklı ve mükemmel iletken olarak kabul edilmiş olup, dalga yayılımının ise TEM modunda gerçekleştiği varsayılmıştır. Ayrıca, analizi kolaylaştırmak için dielektrik taban izotropik ve kayıpsız ortam olarak göz önüne alınmıştır.



Şekil 5.16: Sonlu Toprak Düzlemli ve Sonlu Dielektrik Taban Kalınlıklı Hattan Hatta Kuplajlı CPW'nin Kesit Görünümü

5.2.1. Tek (Odd) mod durumu için analiz

Sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli hattan hatta kuplajlı CPW yapısının birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi elde edilerek, yapının tek mod elektriksel karakteristikleri hesaplanabilir. Daha öncede ifade edildiği gibi, mod yaklaşımı gereği yapının tek mod birim uzunluk başına düşen toplam kapasite hesaplamalarında, Şekil 5.16 ile verilen dik boyuna AA' çizgisi, bir elektrik duvar gibi davranır.

Kısmi kapasite yaklaşımı kullanılarak, tek mod durumu için, yapının birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi, I. bölge (C_{01}) ve III. bölgeyle (C_{03}) temsil edilen serbest ortam hava kapasiteleri ile II. bölgeyle (C_{02}) temsil edilen dielektrik ortam kapasitesinin toplamı olarak düşünülebilir. I. bölge (C_{01}) ile temsil edilen serbest hava ortam kapasitesinin hesaplanması için, yapının simetrik özelliğinden dolayı, Şekil 5.17a ile verilen *z*-düzleminin üst sağ yarı bölgesi, $t = z^2$ dönüşüm fonksiyonu kullanılarak, Şekil 5.17b ile verilen *t*-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür. Burada, her bir geometrik noktanın *t*-düzlemindeki karşılığı;

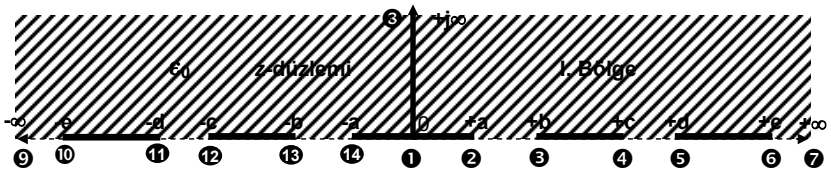
$$t_0 = 0, \quad t_a = a^2, \quad t_b = b^2, \quad t_c = c^2, \quad t_d = d^2, \quad t_e = e^2 \tag{5.37}$$

şeklinde yazılır. *t*-düzleminin üst yarı bölgesi, aşağıda verilen bağıntılar vasıtasıyla W-düzlemi ile tasvir edilen paralel plakalı bir yapının iç bölgesine dönüşür:

$$\frac{W_a}{H_a} = \frac{K(k_{0a})}{K(k'_{0a})} = \alpha_a, \qquad \frac{P_a}{W_a} = \frac{F\left(\arcsin\left(\sqrt{\frac{d^2-b^2}{d^2-a^2}}\right), k_{0a}\right)}{K(k_{0a})} = \beta_{1a}$$

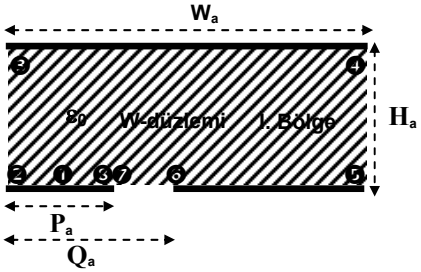
$$\frac{Q_a}{W_a} = \frac{F\left(\arcsin\left(\sqrt{\frac{(e^2-a^2)(d^2-b^2)}{(e^2-b^2)(d^2-a^2)}}\right), k_{0a}\right)}{K(k_{0a})} = \beta_{2a} \tag{5.38}$$

Denklem (5.38)'de yer alan k_{0a} modülü;



(a)





(b) (c)

Şekil 5.17: Hattan Hatta Kuplajlı CPW'nin Tek Mod Hava Kapasite Hesaplanması için bir Seri Konformal Dönüşümler

$$k_{0a} = \sqrt{\frac{(d^2 - a^2)(c^2 - b^2)}{(d^2 - b^2)(c^2 - a^2)}}, \qquad k_{0a}^{'} = \sqrt{1 - k_{0a}^2} \tag{5.39}$$

şeklindedir. I. bölgenin tek mod durumu için birim uzunluk başına düşen kapasitesi;

$$C_{01} = \varepsilon_0 \left(\frac{K(k_{01})}{K(k_{01}^{'})} + \frac{K(k_{03})}{K(k_{03}^{'})} \right) \tag{5.40}$$

şeklinde elde edilir. Denklem (5.40) bağıntısında yer alan k_{01} ve k_{03} modülleri, aşağıda verilen bağıntılar vasıtasıyla hesaplanabilir:

$$\frac{F(\arcsin\left(\frac{k_{01}}{k_{02}}\right), k_{02})}{K(k_{02})} = \frac{\beta_{1a}}{\beta_{3a}}, \qquad \frac{F(\arcsin\left(\frac{k_{03}}{k_{04}}\right), k_{02})}{K(k_{04})} = \frac{1 - \beta_{2a}}{1 - \beta_{3a}},$$

$$\frac{K(k_{02})}{K(k_{02}^{'})} = \alpha_a \beta_{3a}, \qquad \frac{K(k_{04})}{K(k_{04}^{'})} = \alpha_a (1 - \beta_{3a}), \qquad \beta_{3a} = \frac{\beta_{1a} + \beta_{2a}}{2} \tag{5.41}$$

III. bölge ile temsil edilen serbest ortam hava kapasitesi, kısmi kapasite yaklaşımı gereği, dielektrik taban yok sayılarak elde edilebilir. Dielektrik tabanın kaldırılmasıyla ortaya çıkan konfigürasyon, I. bölge konfigürasyonu ile aynıdır. Böylece, III. bölge serbest ortam hava kapasitesi, aşağıda verilen eşitlik ile ifade edilir:

$$C_{01} = C_{03} \tag{5.42}$$

II. bölge ile temsil edilen dielektrik bölge kapasitesi, I. bölge kapasite hesaplamalarındaki benzer işlemler yapılarak elde edilebilir. Şekil 5.18a ile verilen ve II. bölge ile temsil edilen dielektrik bölge, ters Schwarz-Christoffel dönüşümü kullanılarak;

$$Z = \int \frac{dt}{\sqrt{(t^2-1)(t^2-t_e^2)}} \tag{5.43}$$

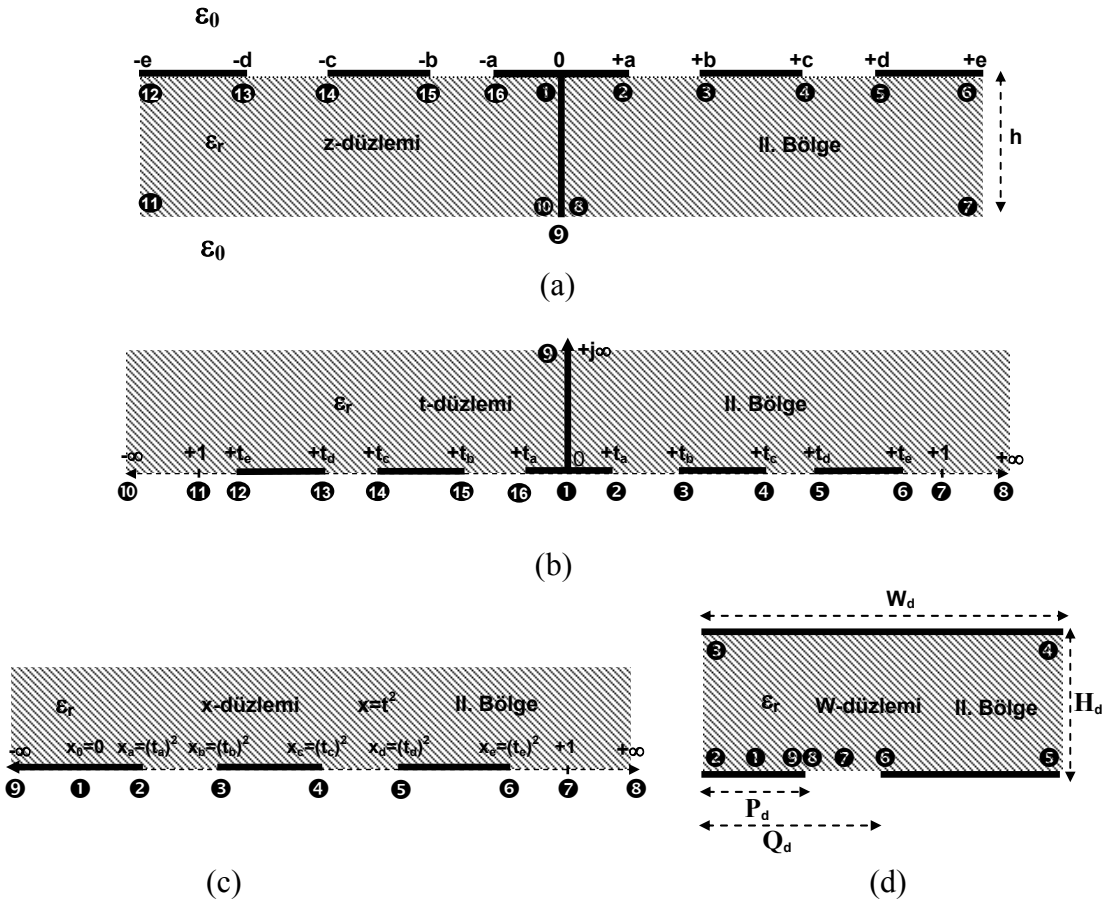
bağıntısı vasıtasıyla Şekil 5.18b ile verilen *t*-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür. Şekil 5.18b ile verilen *t*-düzlemindeki t_e ifadesi;

$$\begin{aligned} t_e &= \left[\frac{\exp(\pi e/h)-2}{\exp(\pi e/h)+2}\right]^2, \qquad 1 < \frac{e}{h} < \infty, \\ t_e &= \sqrt{1-\left[\frac{\exp(\pi h/e)-2}{\exp(\pi h/e)+2}\right]^4}, \qquad 0 < \frac{e}{h} < 1, \end{aligned} \tag{5.44}$$

şeklindedir. *t*-düzlemindeki t_d, t_c, t_b ve t_a ifadeleri ise;

$$\begin{aligned} F(\arcsin(t_d/t_e),t_e) &= \frac{d}{e}K(t_e), \quad F(\arcsin(t_c/t_e),t_e) = \frac{c}{e}K(t_e), \\ F(\arcsin(t_b/t_e),t_e) &= \frac{b}{e}K(t_e), \quad F(\arcsin(t_a/t_e),t_e) = \frac{a}{e}K(t_e), \end{aligned} \tag{5.45}$$

şeklinde ifade edilir. Şekil 5.18b ile verilen *t*-düzleminin üst sağ yarı bölgesi, $x = t^2$ dönüşüm fonksiyonu kullanılarak, *x*-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür. *x*-düzlemindeki her bir geometrik noktanın *t*-düzlemindeki karşılıkları;



Şekil 5.18: Hattan Hatta Kuplajlı CPW'nin Tek Mod Dielektrik Bölge Kapasite Hesaplanması için bir Seri Konformal Dönüşümler

$$x_0 = 0, \quad x_a = t_a^2, \quad x_b = t_b^2, \quad x_c = t_c^2, \quad x_d = t_d^2, \quad x_e = t_e^2 \tag{5.46}$$

şeklinde yazılabilir. Dielektrik bölge kapasitesini elde etmek için son olarak yapılan dönüşüm ise, *x*-düzlemi ile verilen üst yarı bölgenin, aşağıdaki bağıntılar vasıtasıyla W-düzlemi ile tasvir edilen paralel plakalı yapının iç bölgesine dönüştürülmesidir:

$$\frac{W_d}{H_d} = \frac{K(k_{0d})}{K(k_{0d}^{'})} = \alpha_d, \qquad \frac{P_d}{W_d} = \frac{F\left(\arcsin\left(\sqrt{\frac{t_d^2 - t_b^2}{t_d^2 - t_a^2}}\right), k_{0d}\right)}{K(k_{0d})} = \beta_{1d},$$

$$\frac{Q_d}{W_d} = \frac{F\left(\arcsin\left(\sqrt{\frac{(t_e^2 - t_a^2)(t_d^2 - t_b^2)}{(t_e^2 - t_b^2)(t_d^2 - t_a^2)}}\right), k_{0d}\right)}{K(k_{0d})} = \beta_{2d} \tag{5.47}$$

Denklem (5.47) bağıntısında yer alan k_{0d} modülü;

$$k_{0d} = \sqrt{\frac{(t_d^2 - t_a^2)(t_c^2 - t_b^2)}{(t_d^2 - t_b^2)(t_c^2 - t_a^2)}}, \qquad k_{0d}^{'} = \sqrt{1 - k_{0d}^2} \tag{5.48}$$

şeklindedir. II. bölge ile temsil edilen dielektrik bölgenin, tek mod birim uzunluk başına düşen hat kapasitesi;

$$C_{0d} = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)\left(\frac{K(k_{01d})}{K(k_{01d}^{'})} + \frac{K(k_{03d})}{K(k_{03d}^{'})}\right) \tag{5.49}$$

şeklinde elde edilir. Burada k_{01d} ve k_{03d} modülleri;

$$\frac{F(\arcsin\left(\frac{k_{01d}}{k_{02d}}\right), k_{02d})}{K(k_{02d})} = \frac{\beta_{1d}}{\beta_{3d}}, \qquad \frac{F(\arcsin\left(\frac{k_{03d}}{k_{04d}}\right), k_{02d})}{K(k_{04d})} = \frac{1-\beta_{2d}}{1-\beta_{3d}},$$
$$\frac{K(k_{02d})}{K(k_{02d}^{'})} = \alpha_d\beta_{3d}, \qquad \frac{K(k_{04d})}{K(k_{04d}^{'})} = \alpha_d(1-\beta_{3d}), \qquad \beta_{3d} = \frac{\beta_{1d}+\beta_{2d}}{2} \tag{5.50}$$

bağıntıları kullanılarak hesaplanabilir. Denklem (5.38), Denklem (5.41), Denklem (5.45), Denklem (5.47) ve Denklem (5.50) bağıntılarında geçen $F(\phi,k)$ integral ifadeleri, Cheng ve Robertson (1995) tarafından verilen yaklaşık çözümler kullanılarak elde edilir. Böylece, sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli hattan hatta kuplajlı CPW'nin tek mod durumu için birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi;

$$\begin{aligned} C_{tek} &= C_{01} + C_{02} + C_{03} \\ &= 2\varepsilon_0\left(\frac{K(k_{01})}{K(k_{01}^{'})} + \frac{K(k_{03})}{K(k_{03}^{'})}\right) + \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)\left(\frac{K(k_{01d})}{K(k_{01d}^{'})} + \frac{K(k_{03d})}{K(k_{03d}^{'})}\right) \end{aligned} \tag{5.51}$$

şeklinde elde edilir. Sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli hattan hatta kuplajlı CPW'nin tek mod durumu için, efektif dielektrik

sabiti, faz hızı ve karakteristik empedans ifadeleri ise, Denklem (5.51) ile verilen kapasite bağıntısından faydalanılarak aşağıdaki bağıntılar şeklinde ifade edilir:

$$\varepsilon_{eff\,(tek)} = \frac{C_{tek}(\varepsilon_r)}{C_{tek}(1)}, \quad v_{faz(tek)} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff\,(tek)}}}, \quad Z_{0(tek)} = \frac{1}{v_{faz(tek)} C_{tek}} \tag{5.52}$$

5.2.2. Çift (Even) mod durumu için analiz

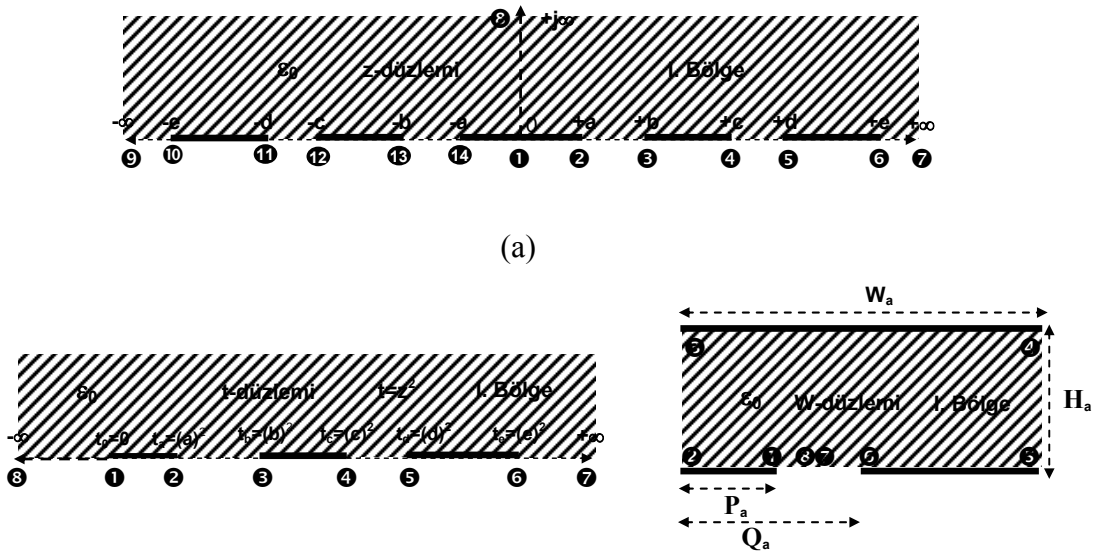
Şekil 5.16 ile verilen hattan hatta kuplajlı CPW'nin çift mod birim uzunluk başına düşen toplam kapasite hesaplamalarında, dik boyuna AA' çizgisi, mod yaklaşımı gereği magnetik duvar olarak değerlendirilir. Tek mod kapasite hesaplamalarında olduğu gibi, çift mod kapasite hesaplamalarında da kısmi kapasite yaklaşımına göre, yapının birim uzunluk başına düşen toplam kapasitesi, I. bölge (C_{01}) ve III. bölgeyle (C_{03}) temsil edilen serbest ortam hava kapasiteleri ile II. bölgeyle (C_{02}) temsil edilen dielektrik ortam kapasitesinin toplamı şeklindedir. I. bölge (C_{01}) ile temsil edilen serbest ortam hava kapasitesinin hesaplanması için, yapının simetrik özelliğinden dolayı, Şekil 5.19a ile verilen z-düzleminin üst sağ yarı bölgesi, $t = z^2$ dönüşüm fonksiyonu vasıtasıyla, Şekil 5.19b ile verilen t-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür. Burada her bir geometrik noktanın t-düzlemindeki karşılığı;

$$t_0 = 0, \quad t_a = a^2, \quad t_b = b^2, \quad t_c = c^2, \quad t_d = d^2, \quad t_e = e^2 \tag{5.53}$$

şeklinde yazılabilir. Şekil 5.19b ile verilen t-düzleminin üst yarı bölgesi;

$$\frac{W_a}{H_a} = \frac{K(k_{0a})}{K(k_{0a}^{'})} = \alpha_a, \qquad \frac{P_a}{W_a} = \frac{F\left(\arcsin\left(\sqrt{\frac{a^2(d^2-b^2)}{b^2(d^2-a^2)}}\right), k_{0a}\right)}{K(k_{0a})} = \beta_{1a},$$

$$\frac{Q_a}{W_a} = \frac{F\left(\arcsin\left(\sqrt{\frac{(e^2-a^2)(d^2-b^2)}{(e^2-b^2)(d^2-a^2)}}\right), k_{0a}\right)}{K(k_{0a})} = \beta_{2a} \tag{5.54}$$



(a)

(b) (c)

Şekil 5.19: Hattan Hatta Kuplajlı CPW'nin Çift Mod Durumunda Serbest Hava Ortam Kapasite Hesaplanması için bir Seri Konformal Dönüşümler

bağıntıları kullanılarak, W-düzlemi ile tasvir edilen paralel plakalı yapının iç bölgesine dönüşür. Denklem (5.54) ile verilen bağıntıdaki k_{0a} modülü;

$$k_{0a} = \sqrt{\frac{(d^2 - a^2)(c^2 - b^2)}{(d^2 - b^2)(c^2 - a^2)}}, \qquad k'_{0a} = \sqrt{1 - k_{0a}^2} \tag{5.55}$$

şeklindedir. I. bölgenin çift mod durumundaki kapasitesi;

$$C_{01} = \varepsilon_0 \left(\frac{K(k_{01})}{K(k'_{01})} + \frac{K(k_{03})}{K(k'_{03})} \right) \tag{5.56}$$

şeklinde elde edilir. Burada k_{01} ve k_{03} modülleri aşağıda verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir:

$$\frac{F(\arcsin\left(\frac{k_{01}}{k_{02}}\right), k_{02})}{K(k_{02})} = \frac{\beta_{1a}}{\beta_{3a}}, \qquad \frac{F(\arcsin\left(\frac{k_{03}}{k_{04}}\right), k_{02})}{K(k_{04})} = \frac{1 - \beta_{2a}}{1 - \beta_{3a}},$$

$$\frac{K(k_{02})}{K(k'_{02})} = \alpha_a \beta_{3a}, \qquad \frac{K(k_{04})}{K(k'_{04})} = \alpha_a (1 - \beta_{3a}), \qquad \beta_{3a} = \frac{\beta_{1a} + \beta_{2a}}{2} \tag{5.57}$$

III. bölge ile temsil edilen serbest ortam hava kapasitesi, dielektrik taban yok sayılarak hesaplanabilir. Tek mod durumunda olduğu gibi, dielektrik tabanın kaldırılmasıyla ortaya çıkan konfigürasyon, I. bölge konfigürasyonu ile aynıdır. Böylece, çift mod durumu için, III. bölge serbest ortam hava kapasitesi;

$$C_{01} = C_{03} \tag{5.58}$$

şeklinde yazılabilir.

II. bölge ile temsil edilen dielektrik bölge kapasitesi, I. bölge kapasite hesaplanmasındaki benzer işlemler yapılarak elde edilebilir. Şekil 5.20a ile verilen dielektrik bölge, ters Schwarz-Christoffel dönüşümü kullanılarak, aşağıda verilen integral bağıntısı vasıtasıyla;

$$Z = \int \frac{dt}{\sqrt{(t^2-1)(t^2-t_e^2)}} \tag{5.59}$$

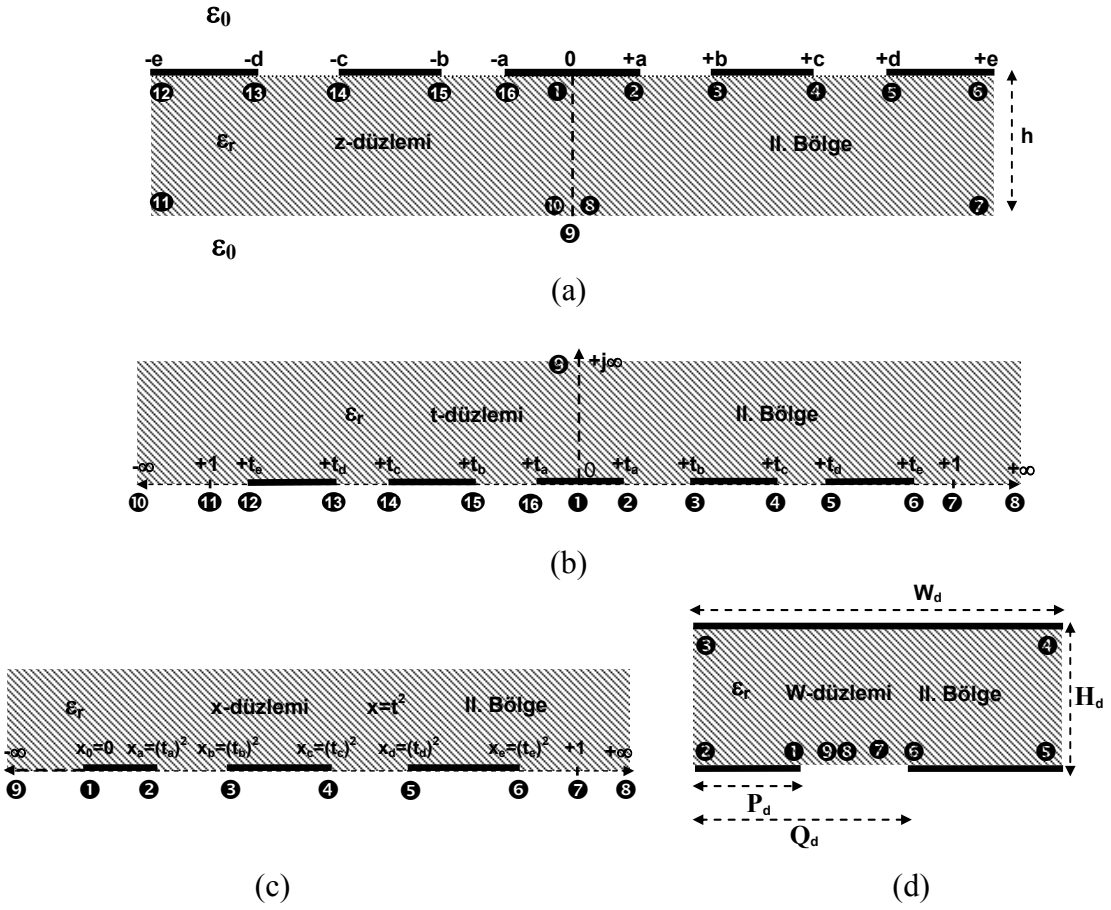
Şekil 5.20b ile verilen t-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür. Şekil 5.20b ile verilen t-düzlemindeki t_e ifadesi;

$$\begin{aligned} t_e &= \left[\frac{\exp(\pi e/h)-2}{\exp(\pi e/h)+2}\right]^2, \qquad 1 < \frac{e}{h} < \infty, \\ t_e &= \sqrt{1-\left[\frac{\exp(\pi h/e)-2}{\exp(\pi h/e)+2}\right]^4}, \qquad 0 < \frac{e}{h} < 1, \end{aligned} \tag{5.60}$$

şeklindedir. t-düzlemindeki t_d, t_c, t_b ve t_a ifadeleri ise;

$$\begin{aligned} F(\arcsin(t_d/t_e),t_e) &= \frac{d}{e}K(t_e), \quad F(\arcsin(t_c/t_e),t_e) = \frac{c}{e}K(t_e), \\ F(\arcsin(t_b/t_e),t_e) &= \frac{b}{e}K(t_e), \quad F(\arcsin(t_a/t_e),t_e) = \frac{a}{e}K(t_e), \end{aligned} \tag{5.61}$$

bağıntıları kullanılarak hesaplanabilir. Çift mod dielektrik bölge kapasitesini elde etmek için bir sonraki dönüşümde ise, Şekil 5.20b ile verilen t-düzleminin üst sağ yarı bölgesi, $x = t^2$ fonksiyonu vasıtasıyla x-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür.



Şekil 5.20: Hattan Hatta Kuplajlı CPW'nin Çift Mod Dielektrik Bölge Kapasite Hesaplanması için bir Seri Konformal Dönüşümler

Burada, her bir geometrik noktanın *t*-düzlemindeki karşılığı;

$$x_0 = 0, \quad x_a = t_a^2, \quad x_b = t_b^2, \quad x_c = t_c^2, \quad x_d = t_d^2, \quad x_e = t_e^2 \tag{5.62}$$

şeklinde yazılabilir. Son olarak, *x*-düzleminin üst yarı bölgesi;

$$\frac{W_d}{H_d} = \frac{K(k_{0d})}{K(k_{0d}^{'})} = \alpha_d, \qquad \frac{P_d}{W_d} = \frac{F\left(\arcsin\left(\sqrt{\frac{t_a^2(t_d^2 - t_b^2)}{t_b^2(t_d^2 - t_a^2)}}\right), k_{0d}\right)}{K(k_{0d})} = \beta_{1d},$$

$$\frac{Q_d}{W_d} = \frac{F\left(\arcsin\left(\sqrt{\frac{(t_e^2 - t_a^2)(t_d^2 - t_b^2)}{(t_e^2 - t_b^2)(t_d^2 - t_a^2)}}\right), k_{0d}\right)}{K(k_{0d})} = \beta_{2d} \tag{5.63}$$

bağıntıları kullanılarak, Şekil 5.20d ile verilen ve W-düzlemi ile tasvir edilen paralel plakalı yapının iç bölgesine dönüşür. Denklem (5.63) ile verilen bağıntıdaki k_{0d} modülü;

$$k_{0d} = \sqrt{\frac{(t_d^2 - t_a^2)(t_c^2 - t_b^2)}{(t_d^2 - t_b^2)(t_c^2 - t_a^2)}}, \qquad k_{0d}^{'} = \sqrt{1 - k_{0d}^2} \tag{5.64}$$

şeklindedir. II. bölge ile temsil edilen dielektrik bölgenin çift mod kapasitesi;

$$C_{0e} = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)\left(\frac{K(k_{01d})}{K(k_{01d}^{'})} + \frac{K(k_{03d})}{K(k_{03d}^{'})}\right) \tag{5.65}$$

şeklinde elde edilir. Burada k_{01d} ve k_{03d} modülleri;

$$\frac{F(\arcsin\left(\frac{k_{01d}}{k_{02d}}\right), k_{02d})}{K(k_{02d})} = \frac{\beta_{1d}}{\beta_{3d}}, \qquad \frac{F(\arcsin\left(\frac{k_{03d}}{k_{04d}}\right), k_{02d})}{K(k_{04d})} = \frac{1-\beta_{2d}}{1-\beta_{3d}},$$
$$\frac{K(k_{02d})}{K(k_{02d}^{'})} = \alpha_d \beta_{3d}, \qquad \frac{K(k_{04d})}{K(k_{04d}^{'})} = \alpha_d(1-\beta_{3d}), \qquad \beta_{3d} = \frac{\beta_{1d} + \beta_{2d}}{2} \tag{5.66}$$

bağıntıları kullanılarak hesaplanabilir. Denklem (5.54), Denklem (5.57), Denklem (5.61), Denklem (5.63) ve Denklem (5.66) bağıntılarında geçen $F(\phi, k)$ ifadeleri, Cheng ve Robertson (1995) tarafından verilen yaklaşık çözümler kullanılarak hesaplanabilir. Yukarıdaki bağıntılarda geçen $K(k)/K(k^{'})$ oranı için yaklaşık değerler, Hilberg (1969) tarafından verilmiştir.

Böylece, sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli hattan hatta kuplajlı CPW'nin çift mod durumu için birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi,

$$\begin{aligned} C_{çift} &= C_{01} + C_{02} + C_{03} \\ &= 2\varepsilon_0\left(\frac{K(k_{01})}{K(k_{01}^{'})} + \frac{K(k_{03})}{K(k_{03}^{'})}\right) + \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)\left(\frac{K(k_{01d})}{K(k_{01d}^{'})} + \frac{K(k_{03d})}{K(k_{03d}^{'})}\right) \end{aligned} \tag{5.67}$$

şeklinde elde edilir. Sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlemli hattan hatta kuplajlı CPW'nin çift mod durumu için efektif dielektrik sabiti, faz hızı ve karakteristik empedans ifadeleri ise, aşağıda verilen bağıntılar şeklinde ifade edilir:

$$\varepsilon_{eff\,(çift)} = \frac{C_{çift}(\varepsilon_r)}{C_{çift}(1)}, \quad v_{faz(çift)} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff\,(çift)}}}, \quad Z_{0(çift)} = \frac{1}{v_{faz(çift)} C_{çift}} \tag{5.68}$$

Yukarıdaki bağıntılarda geçen v_{faz} ve c terimleri sırasıyla, faz hızını ve boşluktaki ışık hızını ifade etmektedir. Tek ve çift mod karakteristik empedans bağıntıları kullanılarak, sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli hattan hatta kuplajlı CPW'nin kuplaj katsayısı;

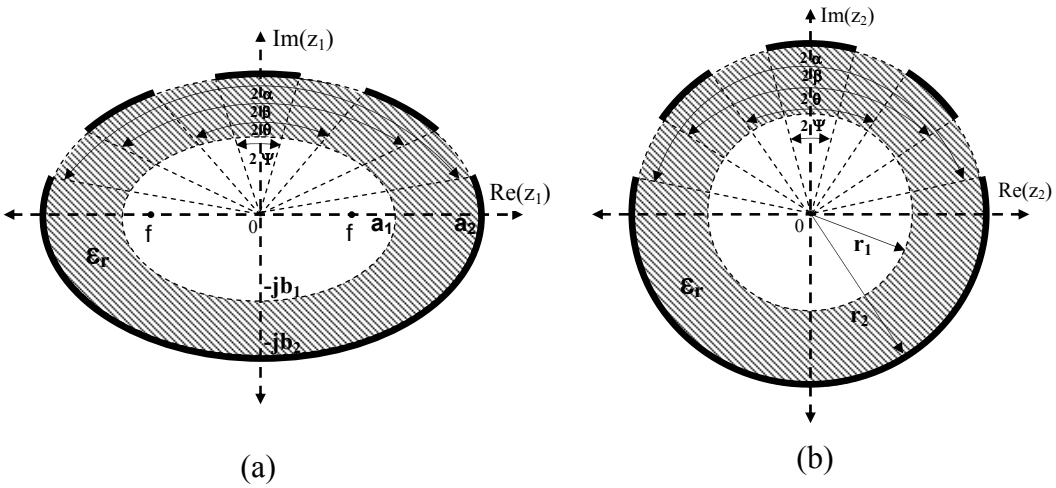
$$C_{db} = -20\log\left(\frac{Z_{0(çift)} - Z_{0(tek)}}{Z_{0(çift)} + Z_{0(tek)}}\right), \qquad C = \frac{Z_{0(çift)} - Z_{0(tek)}}{Z_{0(çift)} + Z_{0(tek)}} \tag{5.69}$$

şeklinde ifade edilir.

5.2.3. Eliptik ve silindirik kesitli hattan hatta kuplajlı CPW'nin analizi

Eliptik ve silindirik kesitli hattan hatta kuplajlı CPW'nin kesit görünümü Şekil 5.21 ile verilmiştir. Şekil 5.21'de de görüldüğü gibi, eliptik kesitli hattan hatta kuplajlı CPW, iki eş-odaklı elipsten meydana gelmektedir. Elipslerin sırasıyla küçük yarıçapları b_1 ve b_2, büyük yarıçapları a_1 ve a_2 olarak verilmiştir. Silindirik kesitli yapıda ise, küçük ve büyük yarıçaplar sırasıyla r_1 ve r_2 olarak verilmiştir. Eliptik ve silindirik kesitli yapılarda, $\beta - \theta$ açısı ile ifade edilen şerit iletken yaylar eşdüzlemli olarak yerleştirilmiştir. Ayrıca, şerit iletken yaylar arasına 2Ψ açısıyla verilen ek bir toprak düzlem yerleştirilmiştir. Ek toprak düzlem ile şerit iletken yaylar arasındaki aralık ise $\theta - \Psi$ dir. Her iki yapıda da dielektrik tabanın bağıl dielektrik sabiti ε_r dir. Şekil 5.21a ile verilen elipslerin odak mesafeleri;

$$f = \sqrt{a_1^2 - b_1^2} = \sqrt{a_2^2 - b_2^2} \tag{5.70}$$



Şekil 5.21: Eliptik ve Silindirik Kesitli Hattan Hatta Kuplajlı CPW'nin Kesit Görünümleri

şeklinde ifade edilir. Eliptik ve silindirik kesitli hattan hatta kuplajlı CPW'nin tek ve çift mod elektriksel karakteristiklerini elde etmek için, ilk olarak eliptik kesitli yapının analizini gerçekleştirmek işlem kolaylığı açısından daha uygundur. Bilindiği üzere, silindirik kesitli yapı, eliptik kesitli yapının özel bir geometrisidir. Bu geometrik özellik, eliptik kesitli yapıda eksantrisite katsayısının ($e_i = f / a_i = 0$) sıfır olması ile ifade edilir. Çünkü, eliptik kesitli yapı için eksantrisite katsayısının sıfır olması durumunda, eliptik kesitli yapı silindirik kesitli yapıya dönüşmektedir.

Şekil 5.7 ile verilen eliptik ve silindirik kesitli kuplajlı CPW'nin analizinde olduğu gibi, Şekil 5.21 ile verilen eliptik kesitli yapı, ilk olarak uygun bir dönüşüm fonksiyonu kullanılarak silindirik kesitli bir yapıya dönüştürülür. Bir sonraki adımda ise, silindirik kesitli yapı uygun bir dönüşüm fonksiyonu kullanılarak düzlemsel kesitli bir yapıya dönüştürülür. Eliptik ve silindirik kesitli yapılar için söz konusu bu dönüşümler Şekil 5.22 ile verilmiştir.

Yukarıda ifade edilen dönüşümler için, ilk olarak Şekil 5.22a ile verilen eliptik kesitli hattan hatta kuplajlı CPW yapısı;

$$z_2 = (z_1 \mp \sqrt{z_1^2 - f^2}) / f \tag{5.71}$$

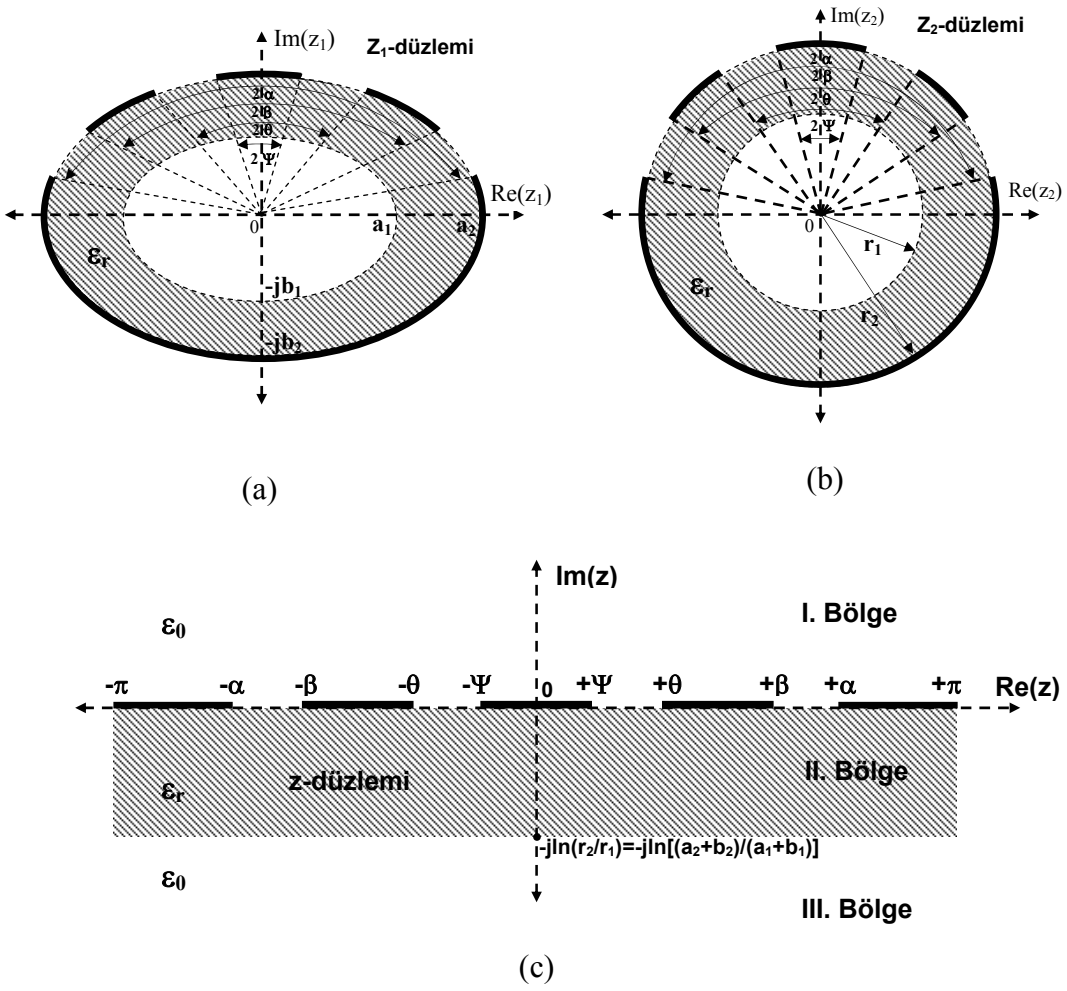
dönüşüm fonksiyonu vasıtasıyla, Şekil 5.22b ile verilen silindirik kesitli hattan hatta kuplajlı CPW yapısına dönüşür. Şekil 5.22b'de de görüldüğü gibi, tüm yay

uzunluklarının açısal değeri korunmuştur. Silindirik kesitli yapının yarıçapları, eliptik kesitli yapının küçük ve büyük yarıçap ifadeleri cinsinden;

$$r_1 = \sqrt{\frac{a_1 + b_1}{a_1 - b_1}}, \qquad r_2 = \sqrt{\frac{a_2 + b_2}{a_2 - b_2}} \tag{5.72}$$

şeklinde ifade edilir. Bir sonraki dönüşümde ise, silindirik kesitli hattan hatta kuplajlı CPW yapısı;

$$z = j\ln(z_2 / r_2) \tag{5.73}$$



Şekil 5.22: Eliptik ve Silindirik Kesitli CPW'nin Düzlemsel Kesitli bir Yapıya Dönüşümünü Gösteren Konformal Dönüşümler

dönüşüm fonksiyonu kullanılarak, Şekil 5.22c ile verilen düzlemsel kesitli hattan hatta kuplajlı CPW yapısına dönüşür. Şekil 5.22c ile verilen düzlemsel kesitli hattan hatta kuplajlı CPW yapısının geometrik özellikleri, Şekil 5.16 ile verilen sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlemli hattan hatta kuplajlı CPW yapısının geometrik özellikleri ile aynıdır. Geometrik özellikleri özdeş olan bu yapılardaki farklı olan parametreler ise, eliptik ve silindirik kesitli yapılarda açısal değerlere karşılık gelen düzlemsel kesitli yapının metrik parametreleridir. Geometrik benzerliklerinden dolayı, her iki yapı arasındaki ilişki aşağıda verilen özdeşlikler şeklinde ifade edilir:

$$a = \Psi, \quad b = \theta, \quad c = \beta, \quad d = \alpha, \quad e = \pi, \quad h = \ln\left(r_2/r_1\right) = \ln\left(\frac{a_2 + b_2}{a_1 + b_1}\right) \quad (5.74)$$

Şekil 5.16 ve Şekil 5.22c ile verilen yapılardaki geometrik benzerlikler ve Denklem (5.74) ile verilen özdeşlikler kullanılarak, eliptik ve silindirik kesitli hattan hatta kuplajlı CPW'nin analizi, sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlemli hattan hatta kuplajlı CPW yapısının analizinden faydalanılarak yapılabilir.

Sonuç olarak, Şekil 5.22c ve Şekil 5.16 ile verilen yapılardaki geometrik benzerlikler göz önünde bulundurularak, eliptik ve silindirik kesitli hattan hatta kuplajlı CPW yapısının tek mod elektriksel karakteristikleri, işlem tekrarından kaçınmak için, Denklem (5.74) ile verilen özdeş parametrelerin Denklem (5.37-52) ile verilen bağıntılardaki yerlerine konulması ile elde edilir. Eliptik ve silindirik kesitli hattan hatta kuplajlı CPW yapısının çift mod elektriksel karakteristikleri ise, Denklem (5.74) ile verilen özdeş parametrelerin Denklem (5.53-69) ile verilen bağıntılardaki yerlerine konulması ile elde edilir.

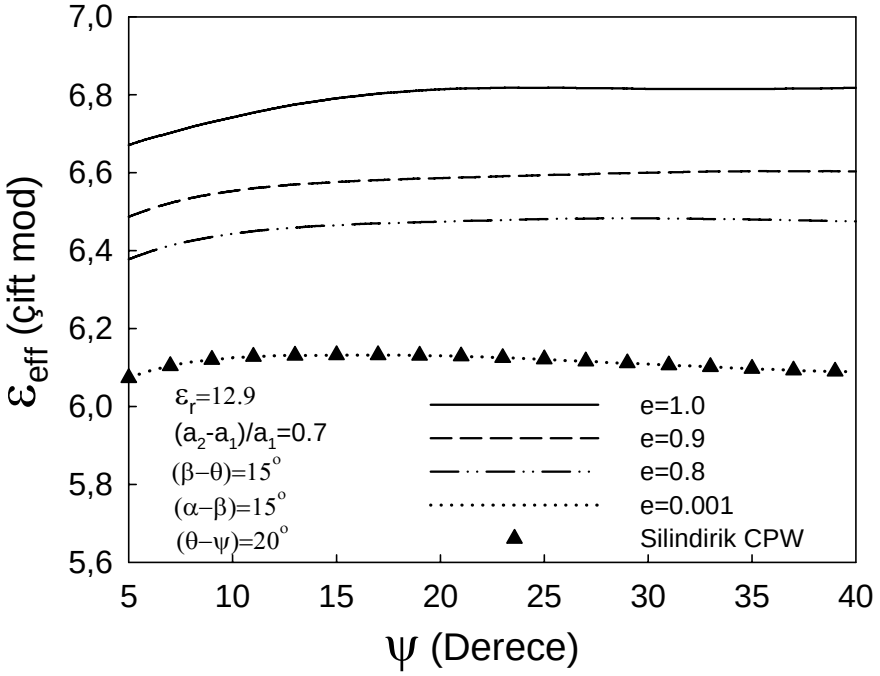
5.2.4. Düzlemsel, eliptik ve silindirik kesitli hattan hatta kuplajlı CPW için nümerik sonuçlar ve tartışmalar

Şekil 5.21 ile tasvir edilen eliptik ve silindirik kesitli hattan hatta kuplajlı CPW'nin elektriksel karakteristikleri CAD uyumlu kapalı-form analitik bağıntılar şeklinde elde edilmiştir. Eliptik ve silindirik kesitli hattan hatta kuplajlı CPW yapısı

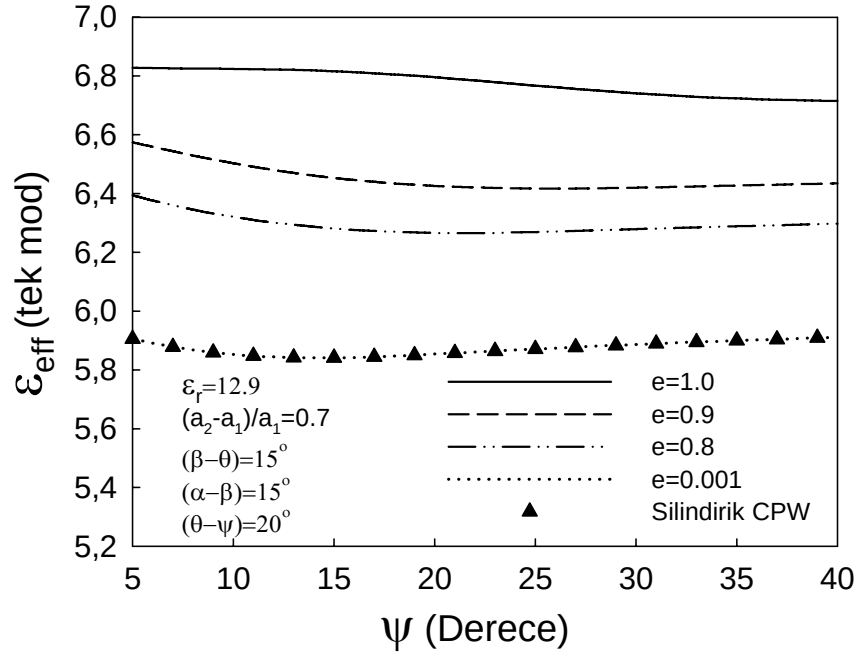
için elde edilen formüller kullanılarak, yapıların elektriksel karakteristik değişim eğrilerini veren grafikler Şekil 5.23-26 ile verilmiştir. Grafik analizlerinde, eliptik kesitli yapı ile silindirik kesitli yapının elektriksel karakteristik değişim eğrileri birlikte incelenmiştir. Çünkü, eliptik kesitli yapıda eksantrisite katsayısının ($e_i = f / a_i$) sıfıra yaklaşması durumunda, doğal olarak eliptik kesitli yapı silindirik kesitli yapıya dönüşmektedir. Her iki yapı arasındaki geometrik ilişkiyi gözlemlemek için, eksantrisite katsayısı farklı değerlerde seçilmiştir.

Bu bölümde, Şekil 5.16 ile verilen sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlemli hattan hatta kuplajlı CPW yapısı için elde edilen analitik ifadelerin doğruluğunu görmek için iki ayrı karşılaştırma yapılmıştır. İlk olarak yapılan karşılaştırma, bu bölümde elde edilen analitik bağıntı sonuçları ile Sonnet simülasyon programı kullanılarak elde edilen nümerik sonuçlar arasında yapılmıştır. İkinci olarak yapılan karşılaştırma ise, Şekil 5.16 ile verilen sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlemli hattan hatta kuplajlı CPW yapısı ile Cheng (1996) tarafından analiz edilen sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonsuz yanal toprak düzlemli hattan hatta kuplajlı CPW yapısı arasında yapılmıştır.

Şekil 5.23 ve Şekil 5.24 ile verilen grafiklerde, ε_r=12,9, $(\theta - \Psi) = 20^0$, $(\beta - \theta) = 15^0$, $(\alpha - \beta) = 15^0$, $(a_2 - a_1)/a_1 = 0.7$ ve eksantrisite katsayısının farklı değerlerinde (1.0, 0.9, 0.8 ve 0.001), merkez toprak düzlem genişliğini ifade eden Ψ açısının bir fonksiyonu olarak, eliptik ve silindirik kesitli hattan hatta kuplajlı CPW'nin çift mod ve tek mod efektif dielektrik sabiti değişim eğrileri görülmektedir. Şekil 5.23 ve Şekil 5.24 ile verilen grafiklerde de görüldüğü gibi, Ψ açısının artması durumunda, çift mod efektif dielektrik sabiti değeri dar bir aralıkta artış yönünde bir değişim göstermekte, tek mod efektif dielektrik sabiti değeri ise, dar bir aralıkta azalma yönünde bir değişim göstermektedir. Eliptik yapının geometrik özelliğini ifade eden eksantrisite katsayısının azalması durumunda, çift ve tek mod efektif dielektrik sabiti değerlerinde, geniş bir aralıkta azalma görülmektedir. Eksantrisite katsayısının sıfıra (0.001) yaklaşması durumunda ise, grafiklerde de görüldüğü gibi, eliptik kesitli yapı silindirik kesitli yapıya dönüşmektedir. Bu durum, eliptik kesitli yapının nümerik sonuçları ile silindirik kesitli yapının nümerik sonuçlarının üst üste çakışması ile doğrulanmaktadır.



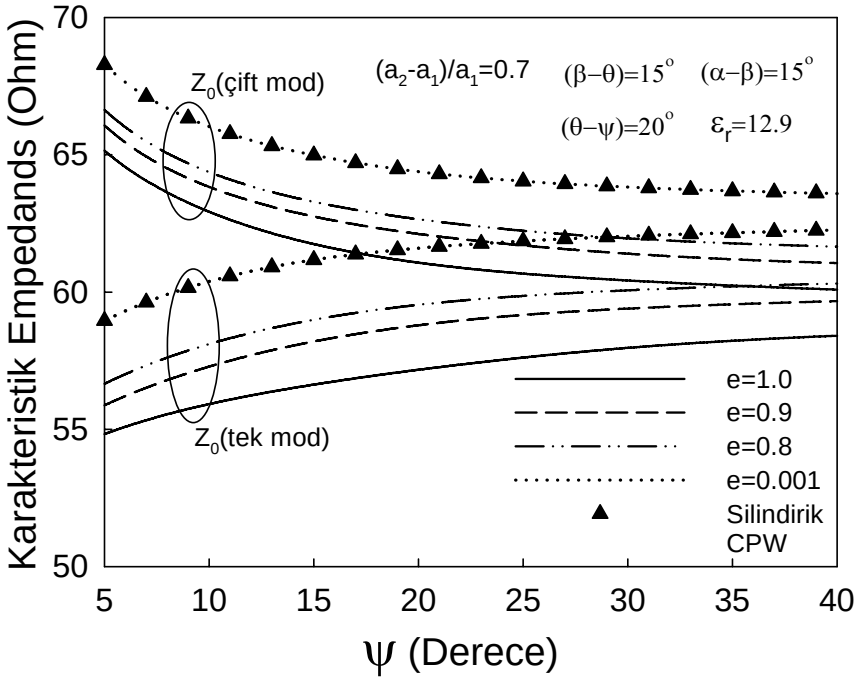
Şekil 5.23: Ψ Açısının bir Fonksiyonu Olarak Eliptik ve Silindirik Kesitli Hattan Hatta Kuplajlı CPW'nin Çift Mod Efektif Dielektrik Sabiti Değişimi



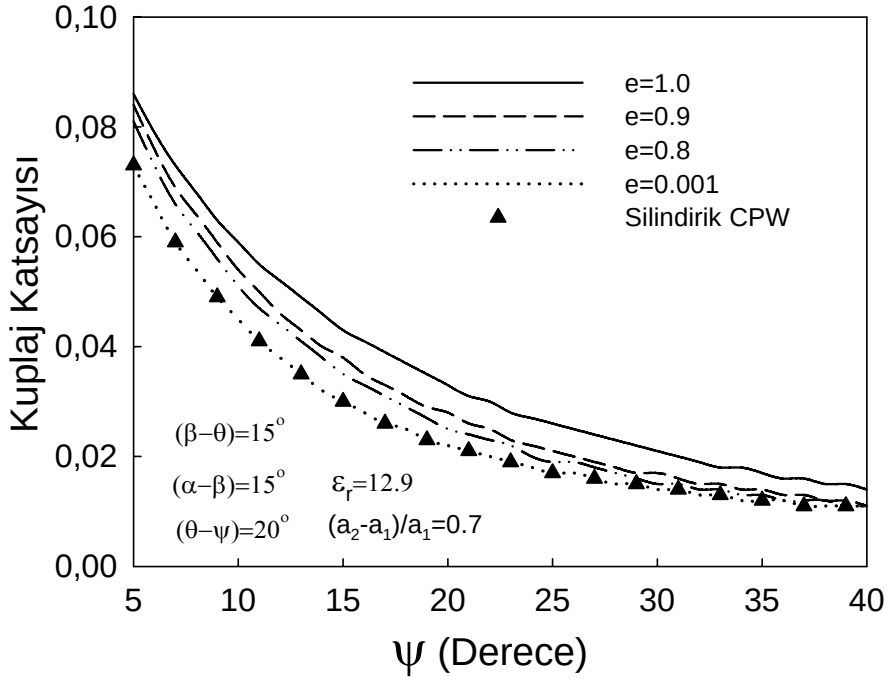
Şekil 5.24: Ψ Açısının bir Fonksiyonu Olarak Eliptik ve Silindirik Kesitli Hattan Hatta Kuplajlı CPW'nin Tek Mod Efektif Dielektrik Sabiti Değişimi

Şekil 5.25 ile verilen grafikte, Ψ açısının bir fonksiyonu olarak, eliptik ve silindirik kesitli yapıların tek ve çift mod karakteristik empedans değişim eğrileri görülmektedir. Bu grafikteki geometrik parametreler ile efektif dielektrik sabiti değişim eğrilerini veren grafiklerdeki geometrik parametreler aynı alınmıştır. Şekil 5.25 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, Ψ açısının artması durumunda, çift mod karakteristik empedans değeri önemli bir ölçüde azalmaktadır. Tek mod karakteristik empedans değeri ise önemli bir ölçüde artış göstermektedir. Eliptik kesitli yapı için eksantrisite katsayısı e'nin azalması durumunda, çift ve tek mod karakteristik empedans değerlerinde geniş bir aralıkta yükselme görülmektedir. Eksantrisite katsayısının sıfıra (0.001) yaklaşması durumunda, eliptik kesitli yapının nümerik sonuçları ile silindirik kesitli yapının nümerik sonuçları üst üste çakışmaktadır.

Şekil 5.26 ile verilen grafik, eliptik ve silindirik kesitli hattan hatta kuplajlı CPW yapısının kuplaj katsayısı değişim eğrilerini vermektedir. Ψ açısının bir fonksiyonu olarak kuplaj katsayısı değişim eğrilerini veren bu grafikteki geometrik parametreler ile efektif dielektrik sabiti ve karakteristik empedans değişim eğrileri grafiklerindeki geometrik parametreler aynı alınmıştır. Şekil 5.26 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, merkez toprak düzlem genişliğini ifade eden Ψ açısının artması durumunda, şerit iletkenler arasındaki aralıkta artmaktadır. Şerit iletkenler arasındaki arağın artması ise, doğal olarak kuplaj katsayısı değerlerinde bir azalmaya neden olmaktadır. Bu durum, Şekil 5.26 ile verilen grafikteki kuplaj katsayısı değerlerinin geniş bir aralıkta azalması ile doğrulanmaktadır. Eliptik yapı için eksantrisite katsayısı e'nin azalması durumunda ise, kuplaj katsayısı değerleri önemli bir oranda düşüş eğilimine girmektedir. Efektif dielektrik sabiti ve karakteristik empedans değişimlerini veren grafik analizlerinde olduğu gibi, eksantrisite katsayısının sıfıra (0.001) yaklaşması durumunda, eliptik kesitli yapının silindirik kesitli yapıya dönüştüğü görülmektedir. Her iki yapının geometrik olarak birbirine dönüşümü, kuplaj katsayısı grafiğindeki nümerik sonuçların üst üste çakışması ile doğrulanmaktadır.



Şekil 5.25: Ψ Açısının bir Fonksiyonu Olarak Eliptik ve Silindirik Kesitli Hattan Hatta Kuplajlı CPW'nin Çift ve Tek Mod Empedans Değişimi



Şekil 5.26: Ψ Açısının bir Fonksiyonu Olarak Eliptik ve Silindirik Kesitli Hattan Hatta Kuplajlı CPW Yapısı için Kuplaj Katsayısı Değişimi

Tablo 5.4 ve Tablo 5.5'de, Şekil 5.16 ile verilen yapı için elde edilen tek ve çift mod efektif dielektrik sabiti ve karakteristik empedans ifadelerinin nümerik sonuçları ile Sonnet simülasyon programı kullanılarak elde edilen nümerik sonuçlar birlikte verilmiştir. Her iki tabloda da, değişik geometrik boyutlarda ve farklı frekans (1 GHz, 21 GHz, ve 41 GHz) değerlerinde, tek ve çift mod efektif dielektrik sabiti ve karakteristik empedans ifadelerinin nümerik sonuçları görülmektedir. Analitik bağıntılardan elde edilen sonuçlar ile sonnet simülasyon program sonuçları arasında oldukça iyi bir uyum görülmektedir. Ayrıca, çift ve tek mod efektif dielektrik sabiti ve karakteristik empedans ifadeleri için bağıl hata oranları da tablolar içerisinde verilmiştir. Bağıl hata oranlarındaki düşük değerler, bu bölüm içerisinde türetilen analitik bağıntıların doğruluğunu kanıtlamaktadır. Bu bölümde elde edilen analitik bağıntılar ile sonnet simülasyon program sonuçları arasındaki yüksek frekans (21 Ghz) değerlerinde görülen bu uyum, quasi-statik yaklaşım içerisinde elde edilen analitik ifadelerin geçerliliğini kanıtlamakta ve buna bağlı olarak da, sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlemli hattan hatta kuplajlı CPW'nin düşük dispersiyona sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.6'da, Şekil 5.16 ile verilen sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlemli hattan hatta kuplajlı CPW yapısı ile Cheng (1996) tarafından analizi gerçekleştirilen sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonsuz yanal toprak düzlemli hattan hatta kuplajlı CPW yapısının nümerik sonuçları birlikte verilmiştir. Şekil 5.16 ile verilen sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlemli hattan hatta kuplajlı CPW yapısında, yanal toprak düzlemlerin fiziksel boyutları büyük değerler seçildiğinde, söz konusu yapının geometrisi Cheng (1996) tarafından analiz edilen sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonsuz yanal toprak düzlemli hattan hatta kuplajlı CPW yapısına dönüşmektedir. Fiziksel olarak gerçeklenen geometrik dönüşüm, Tablo 5.6 ile verilen değerlerden açıkça görülmektedir. Tablo 5.6 içerisinde verilen bağıl hata oranlarının düşük değerlere sahip oluşu, elde edilen analitik bağıntıların doğruluğunu göstermektedir.

Tablo 5.4: Tek Mod Durumunda Sonlu Dielektrik Taban Kalınlıklı ve Sonlu Yanal Toprak Düzlemli Hattan Hatta Kuplajlı CPW Yapısı için Elde Edilen Analitik Bağıntılar ile Sonnet Simülasyon Program Sonuçlarının Karşılaştırılması

D_1=20 μm, S_1=20 μm, W=30 μm, S_2=20 μm, D_2=20 μm, ε_r=12.9							
FREKANS (GHz)	Tek (Odd) Mod						
	Efektif Dielektrik Sabiti				Karakteristik Empedans (Ω)		
	H (μm)	Analitik Bağıntı Sonucu	Sonnet Simülasyon Sonucu	Δ (%)	Analitik Bağıntı Sonucu	Sonnet Simülasyon Sonucu	Δ (%)
1	25	5.530	5.613	1.48	52.292	53.265	1.83
	75	6.682	6.773	1.34	47.569	48.491	1.90
	200	6.842	6.934	1.33	47.010	47.294	1.91
21	25	5.530	5.656	2.23	52.292	53.063	1.45
	75	6.682	6.781	1.46	47.569	48.428	1.77
	200	6.842	6.934	1.33	47.010	47.897	1.85
41	25	5.530	5.849	5.45	52.292	52.728	0.83
	75	6.682	6.851	2.47	47.569	48.284	1.48
	200	6.842	6.935	1.34	47.010	47.820	1.69
D_1=20 μm, S_1=20 μm, W=30 μm, S_2=20 μm, D_2=160 μm, ε_r=12.9							
1	25	5.543	5.602	1.05	51.735	52.747	1.92
	75	6.821	6.827	0.09	46.636	47.822	2.48
	200	6.927	6.945	0.26	46.280	47.414	2.39
21	25	5.543	5.613	1.25	51.735	52.723	1.87
	75	6.821	6.830	0.13	46.636	47.787	2.41
	200	6.927	6.945	0.26	46.280	47.390	2.34
41	25	5.543	5.648	1.86	51.735	52.593	1.63
	75	6.821	6.844	0.34	46.636	47.703	2.24
	200	6.927	6.945	0.26	46.280	47.316	2.19
D_1=100 μm, S_1=20 μm, W=30 μm, S_2=20 μm, D_2=20 μm, ε_r=12.9							
1	25	5.606	5.663	1.01	55.146	56.382	2.19
	75	6.504	6.661	2.36	51.198	51.984	1.51
	200	6.770	6.912	2.05	50.182	51.032	1.67
21	25	5.606	5.699	1.63	55.146	56.197	1.87
	75	6.504	6.677	2.59	51.198	51.885	1.32
	200	6.770	6.914	2.08	50.182	50.994	1.59
41	25	5.606	5.862	4.37	55.146	55.888	1.33
	75	6.504	6.793	4.25	51.198	51.677	0.93
	200	6.770	6.922	2.20	50.182	50.898	1.41
D_1=100 μm, S_1=20 μm, W=30 μm, S_2=20 μm, D_2=160 μm, ε_r=12.9							
1	25	5.603	5.631	0.50	54.373	55.700	2.38
	75	6.732	6.733	0.01	49.605	50.935	2.61
	200	6.906	6.936	0.43	48.973	50.186	2.42
21	25	5.603	5.636	0.59	54.373	55.644	2.28
	75	6.732	6.739	0.10	49.605	50.886	2.52
	200	6.906	6.937	0.45	48.973	50.155	2.36
41	25	5.603	5.656	0.94	54.373	55.525	2.07
	75	6.732	6.762	0.44	49.605	50.774	2.30
	200	6.906	6.942	0.52	48.973	50.062	2.18

Tablo 5.5: Çift Mod Durumunda Sonlu Dielektrik Taban Kalınlıklı ve Sonlu Yanal Toprak Düzlemli Hattan Hatta Kuplajlı CPW Yapısı için Elde Edilen Analitik Bağıntılar ile Sonnet Simülasyon Program Sonuçlarının Karşılaştırılması

D_1=20 μm, S_1=20 μm, W=30 μm, S_2=20 μm, D_2=20 μm, ε_r=12.9							
FREKANS (GHz)	Çift (Even) Mod						
	Efektif Dielektrik Sabiti				Karakteristik Empedans (Ω)		
	H (μm)	Analitik Bağıntı Sonucu	Sonnet Simülasyon Sonucu	Δ (%)	Analitik Bağıntı Sonucu	Sonnet Simülasyon Sonucu	Δ (%)
1	25	6.227	6.020	-3.44	62.852	62.394	-0.73
	75	6.680	6.626	-0.81	60.683	59.472	-2.04
	200	6.677	6.814	2.01	60.696	58.649	-3.49
21	25	6.227	6.100	-2.08	62.852	62.046	-1.30
	75	6.680	6.678	-0.03	60.683	59.242	-2.43
	200	6.677	6.829	2.23	60.696	58.558	-3.65
41	25	6.227	6.374	2.31	62.852	61.754	-1.78
	75	6.680	6.862	2.65	60.683	59.050	-2.77
	200	6.677	6.904	3.29	60.696	58.428	-3.88
D_1=20 μm, S_1=20 μm, W=30 μm, S_2=20 μm, D_2=160 μm, ε_r=12.9							
1	25	5.871	5.855	-0.27	59.451	60.724	2.10
	75	6.682	6.656	-0.39	55.725	56.952	2.15
	200	6.879	6.885	0.09	54.921	55.996	1.92
21	25	5.871	5.910	0.66	59.451	60.446	1.65
	75	6.682	6.673	-0.13	55.725	56.842	1.97
	200	6.879	6.893	0.20	54.921	55.928	1.80
41	25	5.871	6.214	5.52	59.451	59.984	0.89
	75	6.682	6.786	1.53	55.725	56.658	1.65
	200	6.879	6.924	0.65	54.921	55.780	1.54
D_1=100 μm, S_1=20 μm, W=30 μm, S_2=20 μm, D_2=20 μm, ε_r=12.9							
1	25	6.010	5.905	-1.78	57.970	58.136	0.29
	75	6.756	6.750	-0.09	54.675	54.376	-0.55
	200	6.803	6.858	0.80	54.487	53.944	-1.01
21	25	6.010	5.944	-1.11	57.970	57.962	-0.01
	75	6.756	6.783	0.40	54.675	54.234	-0.81
	200	6.803	6.869	0.96	54.487	53.876	-1.13
41	25	6.010	6.061	0.84	57.970	57.798	-0.30
	75	6.756	6.890	1.94	54.675	54.100	-1.06
	200	6.803	6.920	1.69	54.487	53.764	-1.34
D_1=100 μm, S_1=20 μm, W=30 μm, S_2=20 μm, D_2=160 μm, ε_r=12.9							
1	25	5.806	5.802	-0.07	55.805	56.994	2.09
	75	6.808	6.773	-0.52	51.535	52.750	2.30
	200	6.900	6.901	0.01	51.190	52.258	2.04
21	25	5.806	5.816	0.17	55.805	56.908	1.94
	75	6.808	6.788	-0.29	51.535	52.670	2.15
	200	6.900	6.906	0.09	51.190	52.206	1.95
41	25	5.806	5.862	0.96	55.805	56.770	1.70
	75	6.808	6.851	0.63	51.535	52.550	1.93
	200	6.900	6.929	0.42	51.190	52.088	1.72

Tablo 5.6: Sonlu Dielektrik Taban Kalınlıklı ve Sonlu Yanal Toprak Düzlemli Hattan Hatta Kuplajlı CPW Yapısı ile Sonlu Dielektrik Taban Kalınlıklı ve Sonsuz Yanal Toprak Düzlemli Hattan Hatta Kuplajlı CPW Yapısının Karşılaştırılması

Tek (Odd) Mod						
D_1=30 μm, S_1=20 μm, W=30 μm, S_2=20 μm, D_2=265 μm ε_r=12.9						
Efektif Dielektrik Sabiti				**Karakteristik Empedans (Ω)**		
h (μm)	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Cheng (1996)**	**Δ (%)**	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Cheng (1996)**	**Δ (%)**
30	5.838	5.859	0,36	51.210	51.118	-0,18
60	6.726	6.688	-0,57	47.711	47.844	0,28
90	6.852	6.868	0,23	47.270	47.213	-0,12
120	6.896	6.918	0,32	47.117	47.042	-0,16
150	6.924	6.935	0,16	47.024	46.983	-0,09
Çift (Even) Mod						
D_1=30 μm, S_1=20 μm, W=30 μm, S_2=20 μm, D_2=265 μm ε_r=12.9						
Efektif Dielektrik Sabiti				**Karakteristik Empedans (Ω)**		
h (μm)	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Cheng (1996)**	**Δ (%)**	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Cheng (1996)**	**Δ (%)**
30	6.098	6.095	-0,05	56.781	56.529	-0,45
60	6.638	6.589	-0,74	54.423	54.371	-0,10
90	6.734	6.733	-0,01	54.035	53.788	-0,46
120	6.815	6.807	-0,12	53.713	53.494	-0,41
150	6.870	6.850	-0,29	53.496	53.325	-0,32

Kuplaj katsayısı			
D_1=30 μm, S_1=20 μm, W=30 μm, S_2=20 μm, D_2=265 μm ε_r=12.9			
h (μm)	**Analitik Bağıntı Sonucu**	**Cheng (1996)**	**Δ (%)**
30	0.052	0.050	-4.00
60	0.066	0.064	-3.12
90	0.067	0.065	-3.08
120	0.065	0.064	-1.56
150	0.064	0.063	-1.59

6. YENİ BİR TİP OLARAK TASARIMLANAN YAY KESİTLİ CPW VE CPS İLETİM HATLARININ ANALİZİ

Bölüm 5'de, yeni tip eliptik ve silindirik kesitli eşdüzlemli kuplajlı iletim hatları modellenerek tasarımları yapılmış ve elektriksel karakteristikleri kapalı-form analitik bağıntılar formunda elde edilmiştir. Bu bölümde, düzlemsel, eliptik ve silindirik kesitli CPW ve CPS iletim hatlarına göre, daha esnek uygulama alanı bulabileceği düşünülen, yay kesitli CPW ve CPS iletim hatlarının tasarımları yapılmış olup, söz konusu yapıların elektriksel karakteristikleri analitik bağıntılar formunda elde edilmiştir.

Kaynak araştırması bölümünde de belirtildiği gibi, literatürde yay kesitli iletim hatları ile ilgili olarak doyurucu bilgi bulunmamaktadır. Ayrıca, literatürde tasımları yapılan yay kesitli iletim hatları, sadece şerit ve mikroşerit yapılar ile bu yapıların kuplajlı konfigürasyonlarını kapsamaktadır.

Bölüm 5'de, düzlemsel kesitli yapılara ek olarak, silindirik ve eliptik kesitli yapıların tasarım nedenleri detaylı bir şekilde ifade edilmiştir. Daha öncede belirtildiği gibi, günümüz mikrodalga teknolojisindeki birçok sivil, ticari ve askeri uygulamalar ile bazı biyomedikal sistemlerde, taşıyıcı platformun yüzeyine uyumlu (konformal) antenlere ve söz konusu bu antenlerin besleme veya uyarılma devrelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Düzlemsel, eliptik yada silindirik tabanlar üzerine basılmış antenler ve bu antenlerin besleme veya uyarılma devreleri; hafiflik, küçük boyut ve geometrik uyumluluklarına bağlı olarak araç yüzeylerine veya taşıyıcı platformların üzerine daha kolay monte edilebilirlik gibi özelliklerinden dolayı, hava aracı, roket, uydu, telsiz haberleşmesi ve navigasyon sistemlerinde kullanım alanı bulabilmektedir. Söz konusu bu anten düzeneklerinin taşıyıcı platformları, düzlemsel, silindirik ve eliptik geometrilerden daha farklı geometrik özelliklere sahip olabilir. Farklı geometrik özelliklere sahip taşıyıcı platformlar üzerine monte edilebilen düzenekler ve bu düzeneklerin besleme veya uyarılma devreleri de değişik geometrik özelliklere sahip olmak zorundadır.

Bu nedenle, yay kesitli iletim hatlarının modellenmesi ve tasarımı, yukarıda belirtilen problemler için bir çözüm olabilir. Çünkü, yay kesitli iletim hatlarındaki

yarıçap ve şerit iletken yayların fiziksel boyutları ayarlanarak, daha esnek yüzeylere monte edilebilir.

Bu bölümde, tasarımları yapılan ve analizleri gerçekleştirilen yay geometrik kesitli yeni tip CPW ve CPS iletim hatlarının sunulmasının başlıca nedenlerinden biri, yukarıda sıralanan mikrodalga iletim hat uygulamalarındaki teknik ve teknolojik problemlere daha etkin bir çözüm geliştirmektir. Ayrıca, bu bölüm içerisinde, ilk olarak bu tez çalışması kapsamında tasarımı yapılan yay kesitli CPW iletim hattının iletken destekli konfigürasyonu da analiz edilmiştir. Bilindiği üzere, iletken destekli CPW yapıları konvansiyonel CPW yapılarına göre, bir takım avantajlara sahiptir. İletken destekli yapılar, iletim hattı yapısının ortalama güç taşıma kapasitesini artırmaktadır. İletken destekli yapıların bir başka avantajı ise, iletken destek kullanılarak, iletim hattı yapılarının mekaniksel dayanımlarının arttırılmasıdır.

Bu bölümde, ilk olarak sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlemli yay kesitli CPW iletim hattının elektriksel karakteristikleri, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak CAD uyumlu kapalı-form analitik ifadeler formunda elde edilmiştir.

İkinci kısımda, sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal dielektrik taban genişlikli yay kesitli CPS iletim hattının elektriksel karakteristikleri, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak kapalı-form analitik ifadeler formunda elde edilmiştir.

Bölümün son kısmında ise, sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlemli iletken destekli yay kesitli CPW iletim hattının elektriksel karakteristikleri, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak kapalı form analitik ifadeler formunda elde edilmiştir.

Bu bölüm içerisinde sunulan ve henüz literatürde bulunmayan yeni tip iletim hatlarının, quasi-statik yaklaşımı içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak gerçekleştirilen analizlerinin doğruluğu, literatürde mevcut olan silindirik kesitli CPW ve CPS iletim hatlarının nümerik sonuçlarıyla test edilerek doğrulanmıştır.

6.1. Yay Kesitli CPW'nin Analizi

Quasi-statik yaklaşımı yapılarak analizi gerçekleştirilen yay kesitli CPW iletim hattının kesit görünümü, Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Şekil 6.1 ile verilen yay kesitli CPW iletim hattının elektriksel karakteristikleri;

$$\varepsilon_{eff} = \frac{C}{C_0}, \qquad V_f = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}}, \qquad Z_0 = \frac{1}{CV_f} \tag{6.1}$$

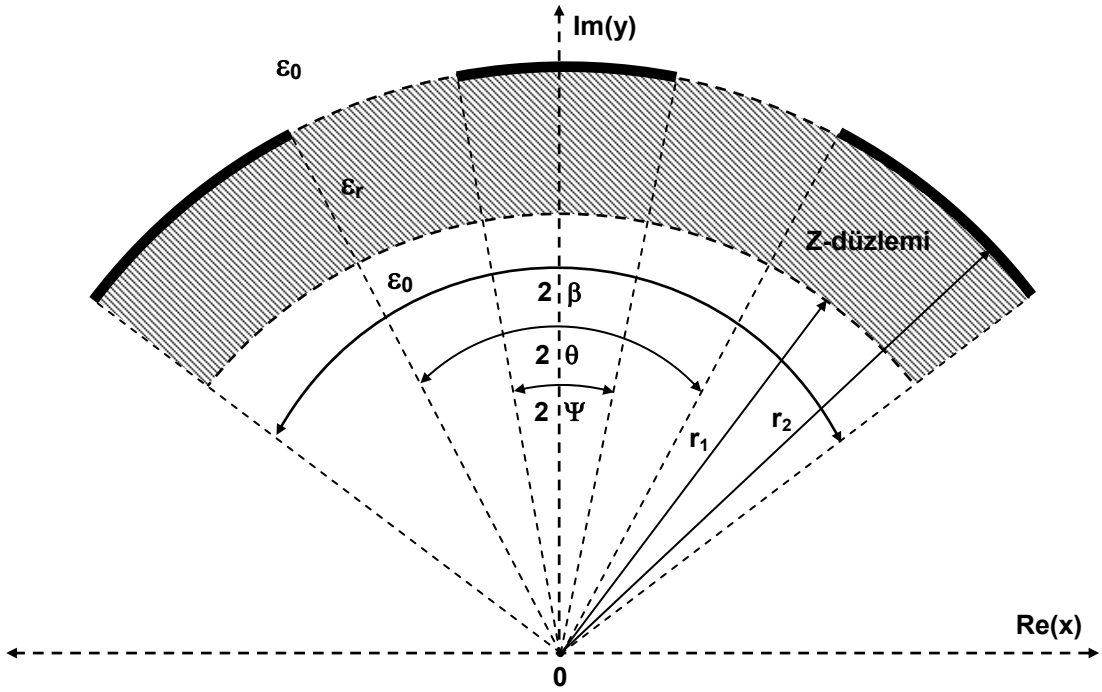
bağıntıları vasıtasıyla elde edilebilir. Denklem (6.1) ile verilen bağıntılarda da görüldüğü gibi, yay kesitli CPW'nin elektriksel karakteristiklerini elde etmek için, ilk olarak yapının birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi elde edilmelidir. Yay kesitli CPW'nin toplam hat kapasitesi, dielektrik bölgede oluşan kapasite ile serbest ortam hava kapasitelerinin toplamından meydana gelmektedir.

Bu bölüm içerisinde, quasi-statik yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilen analizler sırasında, yay kesitli CPW yapısında tüm metal iletkenler sonsuz ince kalınlıklı ve mükemmel iletken olarak kabul edilmiş olup, dalga yayılımının ise, TEM modunda gerçekleştiği varsayılmıştır. Ayrıca, analizi kolaylaştırmak için dielektrik taban bölgesi izotropik ve kayıpsız ortam olarak düşünülmüştür.

Şekil 6.1 ile verilen yay kesitli CPW'nin merkez şerit iletken yay genişliğini gören açı 2Ψ, toprak düzlem yay genişliği ile merkez şerit iletken yay genişliği arasındaki yarık yay genişliklerini gören açı ise $\theta - \Psi$ dir. Toprak düzlem genişliklerini ifade eden yay uzunluğu gören açı $\beta - \theta$ olarak verilmiştir. Yay kesitli CPW'de dielektrik taban kalınlığı $h(r_2 - r_1)$ olarak verilmiştir. Dielektrik tabanın bağıl dielektrik sabiti ε_r dir. Şekil 6.1 ile verilen yapının birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesini elde etmek için, ilk olarak Şekil 6.2a ile verilen orijinal düzlemdeki yapı;

$$t = j\ln(z / r_2) \tag{6.2}$$

fonksiyonu kullanılarak, Şekil 6.2b ile verilen düzlemsel kesitli CPW yapısına dönüşür. Şekil 6.2b ile verilen düzlemsel yapının analizi, Ghione ve Naldi (1987) tarafından sonlu toprak düzlemli ve sonlu dielektrik taban kalınlıklı CPW yapısı için



Şekil 6.1: Yay Kesitli CPW İletim Hattının Kesit Geometrik Görünümü

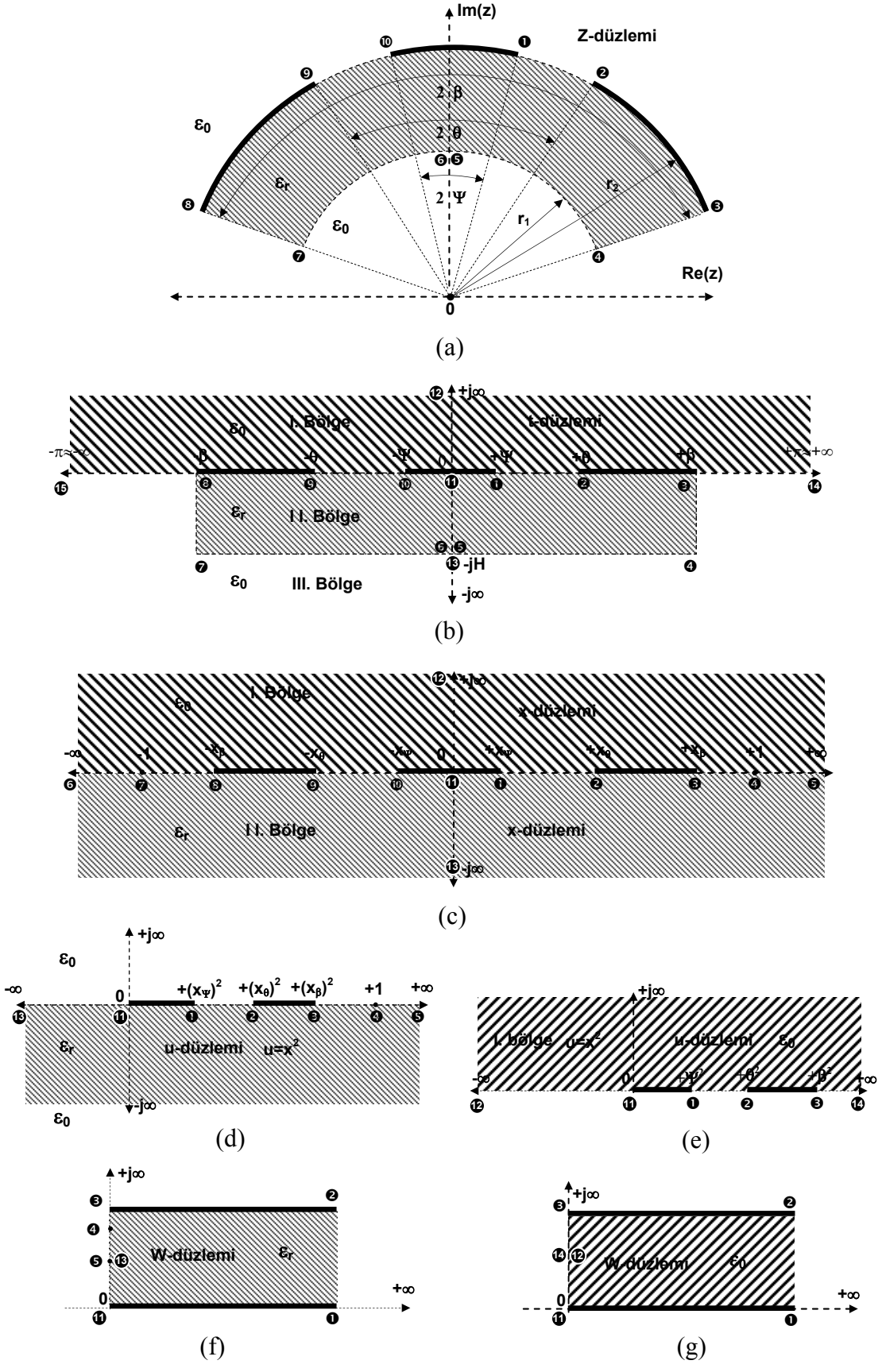
elde edilen Konformal dönüşümler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Şekil 6.2b'deki sonlu toprak düzlemli ve sonlu dielektrik taban kalınlıklı CPW'nin birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi;

$$C_T = C_{01} + C_{03} + C_d \tag{6.3}$$

bağıntısı kullanılarak, I., II. ve III. bölge kapasitelerinin toplamı şeklinde ifade edilir. I. bölge (üst yarı bölge serbest ortam hava kapasitesi) kapasitesini elde etmek için, ilk olarak Şekil 6.2c ile verilen I. bölgenin sağ yarı bölgesi, $u = x^2$ dönüşüm fonksiyonu kullanılarak, Şekil 6.2e ile verilen u-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür. Son olarak, u-düzleminin üst yarı bölgesi ise, Schwarz-Christoffel dönüşümü kullanılarak;

$$w = \int \frac{du}{\sqrt{u(u-\Psi^2)(u-\theta^2)(u-\beta^2)}} \tag{6.4}$$

bağıntısı vasıtasıyla, Şekil 6.2g ile verilen ve W-düzlemi ile tasvir edilen paralel plakalı bir yapıya dönüşür.



Şekil 6.2: Yay Kesitli CPW Yapısının Hava ve Dielektrik Ortam Kapasitesini Elde Etmek için bir Seri Konformal Dönüşümler

Şekil 6.2b'de de görüldüğü gibi, dielektrik tabanın olmadığı durumdaki I. ve III. bölge serbest ortam hava kapasiteleri, her iki bölgenin de geometrik yapısı aynı olduğu için birbirine eşittir. Böylece, I. ve III. bölge ile toplam hava kapasitesi;

$$C_{01} = C_{03} = 2\varepsilon_0 \frac{K(k_0)}{K(k_0^{'})}, \qquad C_{hava} = C_{01} + C_{03} = 4\varepsilon_0 \frac{K(k_0)}{K(k_0^{'})} \tag{6.5}$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (6.5) bağıntısında geçen k_0 ve $k_0^{'}$ modülleri;

$$k_0 = \sqrt{\frac{\Psi^2(\beta^2 - \theta^2)}{\theta^2(\beta^2 - \Psi^2)}}, \qquad k_0^{'} = \sqrt{1 - (k_0)^2} \tag{6.6}$$

şeklindedir.

Şekil 6.2b ile verilen düzlemsel yapının taban kalınlığını ifade eden H terimi, yay kesitli CPW'nin geometrik parametrelerine bağlı olarak;

$$H = \ln(\frac{r_2}{r_1}) \tag{6.7}$$

şeklindedir. Şekil 6.2b ile verilen yapının II. bölgeyle temsil edilen dielektrik taban bölgesi, Şekil 3.16 ile tasvir edilen ters Schwarz-Christoffel dönüşümü kullanılarak Şekil 6.2c ile tasvir edilen, x-düzleminin alt yarı bölgesine dönüşür. Şekil 6.2c ile verilen x-düzlemindeki, x_β, x_Ψ ve x_θ ifadeleri ters Schwarz-Christoffel dönüşümünden faydalanılarak;

$$x_\beta = \left[\frac{\exp(\pi\beta / H) - 2}{\exp(\pi\beta / H) + 2}\right]^2, \qquad 1 < \frac{\beta}{H} < \infty, \tag{6.8a}$$

$$x_\beta = \sqrt{1 - \left[\frac{\exp(\pi H / \beta) - 2}{\exp(\pi H / \beta) + 2}\right]^4}, \qquad 0 < \frac{\beta}{H} < 1$$

$$F(\arcsin(x_\Psi / x_\beta), x_\beta) = \frac{\Psi}{\beta} K(x_\beta), \quad F(\arcsin(x_\theta / x_\beta), x_\beta) = \frac{\theta}{\beta} K(x_\beta) \tag{6.8b}$$

şeklinde ifade edilir.

Denklem (6.8) bağıntısındaki $F(\phi,k)$ ifadeleri ise, Jakobi notasyonunda yazılmış I. tür tam olmayan eliptik integrali temsil etmektedir. Bu integral ifadesi, Cheng ve Robertson (1995) tarafından verilen yaklaşık çözümlerden faydalanılarak hesaplanabilir. II. bölge ile temsil edilen dielektrik bölge kapasitesini elde etmek için, Şekil 6.2c ile verilen II. bölgenin alt sağ yarı bölgesi, $u = x^2$ dönüşüm fonksiyonu kullanılarak, Şekil 6.2d ile tasvir edilen u-düzleminin alt yarı bölgesine dönüşür. u-düzleminin alt yarı bölgesi ise;

$$w = \int \frac{du}{\sqrt{u(u - x_\Psi^2)(u - x_\theta^2)(u - x_\beta^2)}} \tag{6.9}$$

bağıntısıyla verilen Schwarz-Christoffel dönüşümü kullanılarak, Şekil 6.2f'deki, W-düzlemi ile tasvir edilen paralel plakalı bir yapıya dönüşür. Böylece, kısmi kapasitans yaklaşımı kullanılarak dielektrik taban bölgesinde oluşan kapasite;

$$C_d = 2\varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)\frac{K(k_d)}{K(k_d^{'})} \tag{6.10}$$

şeklinde elde edilir. Denklem (6.5) ve Denklem (6.10) bağıntılarındaki, $K(k)/K(k^{'})$ oran ifadeleri için yaklaşık çözümler Hilberg (1969) tarafından verilmiştir. Denklem (6.10) bağıntısında yer alan k_d ve $k_d^{'}$ modülleri;

$$k_d = \sqrt{\frac{x_\Psi^2(x_\beta^2 - x_\theta^2)}{x_\theta^2(x_\beta^2 - x_\Psi^2)}}, \qquad k_d^{'} = \sqrt{1 - (k_d)^2} \tag{6.11}$$

şeklindedir. Yay kesitli CPW'nin efektif dielektrik sabiti;

$$\varepsilon_{eff} = \frac{C_T}{C_{hava}} = 1 + \frac{(\varepsilon_r - 1)}{2}\frac{K(k_d)K(k_0^{'})}{K(k_d^{'})K(k_0)} \tag{6.12}$$

şeklinde elde edilir. Efektif dielektrik sabiti kullanılarak yay kesitli CPW'nin faz hızı;

$$V_{faz} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \tag{6.13}$$

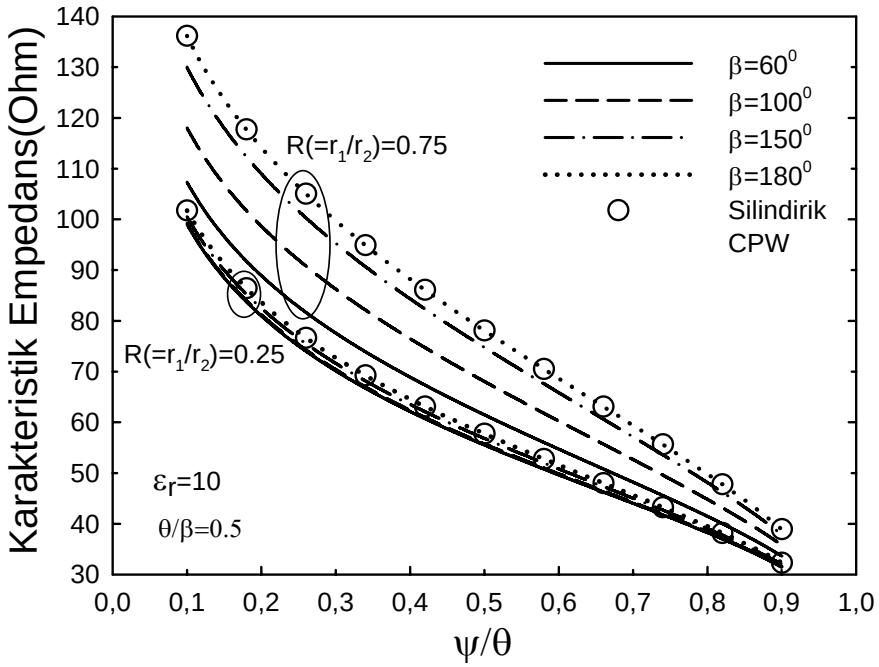
ile ifade edilir. Böylece, yay kesitli CPW'nin karakteristik empedansı aşağıda verilen bağıntı şeklinde ifade edilir:

$$Z_0 = \frac{c}{V_{faz} C_T} = \frac{30\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \frac{K(k_0')}{K(k_0)} \tag{6.14}$$

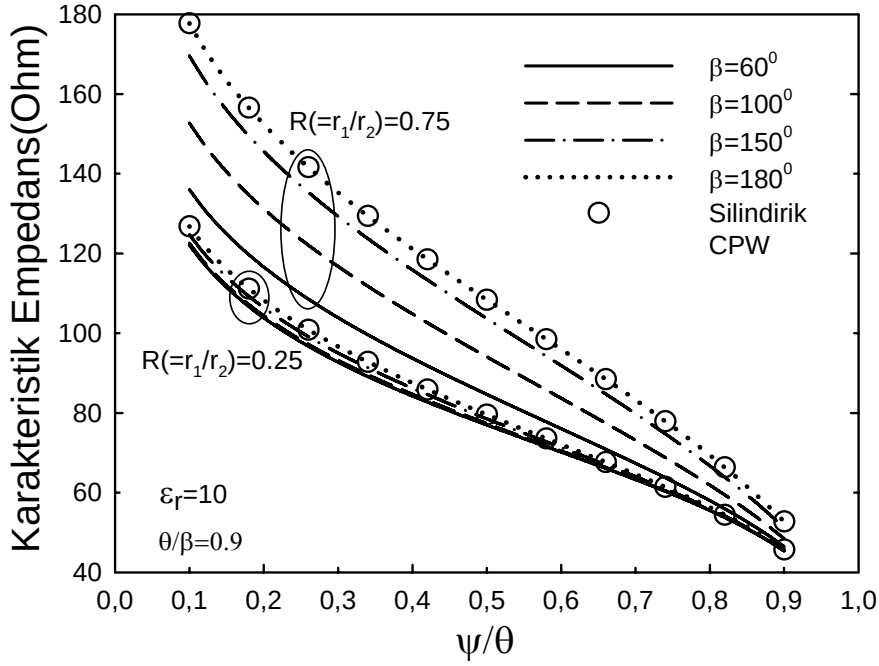
6.1.1. Yay kesitli CPW için nümerik sonuçlar ve tartışmalar

Şekil 6.1 ile verilen sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlemli yay kesitli CPW'nin elektriksel karakteristikleri, quasi-statik yaklaşımı içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analitik bağıntılar formunda elde edilmiştir. Yay kesitli CPW için elde edilen analitik bağıntılar kullanılarak yapının geometrik boyutuna bağlı olarak, efektif dielektrik sabiti, faz hızı ve karakteristik empedans değişim eğrilerini veren grafikler Şekil 6.3-8 ile verilmiştir.

Şekil 6.3 ve Şekil 6.4 ile verilen grafikler, ε_r=10, θ/β=0.5, θ/β=0.9, R(r_1/r_2)=0.25 ve R(r_1/r_2)=0.75 ile β=60^0, 100^0, 150^0 ve 180^0 olmak üzere, Ψ/θ oran değerinin bir fonksiyonu olarak, yay kesitli CPW'nin karakteristik empedans değişim eğrilerini vermektedir. Şekil 6.3-4 ile verilen grafiklerde de görüldüğü gibi, Ψ/θ oran değerinin artması durumunda, karakteristik empedans değeri geniş bir aralıkta azalmaktadır. Yay kesitli CPW yapısının eğrilik biçimini ifade eden R (r_1/r_2) değerinin 0.25'den 0.75'e çıkması durumunda, karakteristik empedans değerinde önemli bir ölçüde artış gözlenmektedir. Grafiklerdeki β açı değerinin artması durumunda, karakteristik empedans değeri de önemli bir ölçüde artmaktadır. θ/β oran değerinin 0.5'den 0.9'a yükselmesi durumunda, karakteristik empedans değeri de geniş bir aralıkta yükselmektedir. Ayrıca, yay kesitli CPW yapısı için Denklem (6.14) ile verilen karakteristik empedans ifadesinin doğruluğunu test etmek için, grafikler üzerinde silindirik CPW yapısının nümerik sonuçları da birlikte verilmiştir. Söz konusu grafiklerde de görüldüğü gibi, β=180^0 olarak verilen açı değeri, yay kesitli yapının silindirik yapıya dönüşeceği açısal bir değerdir. Şekil 6.3-4'de, β=180^0 olması durumunda, yay kesitli CPW için elde edilen nümerik sonuçlar ile silindirik kesitli CPW'nin nümerik sonuçları üst üste çakışmaktadır.



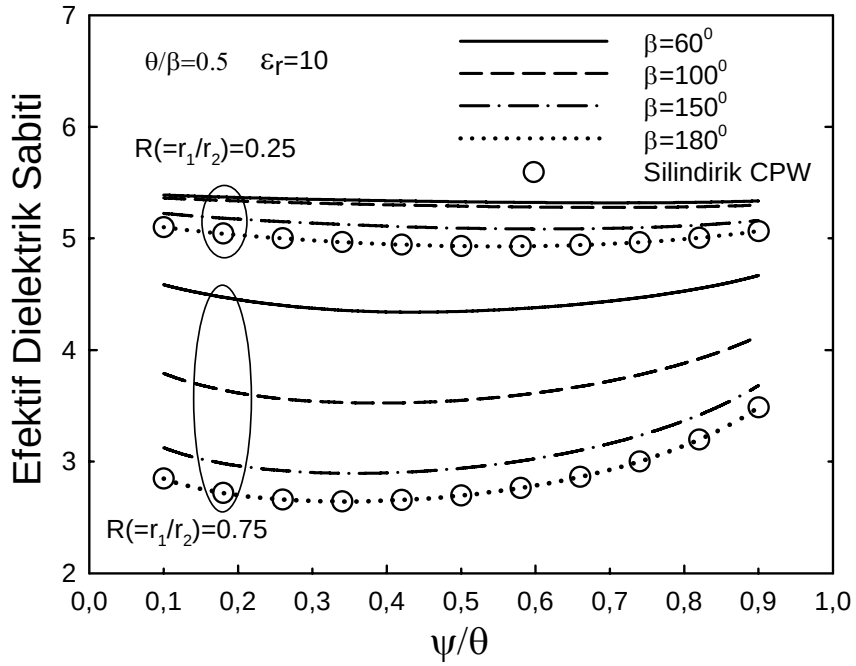
Şekil 6.3: Yay Kesitli CPW Yapısı için Ψ/θ Açısal Oranının bir Fonksiyonu Olarak Karakteristik Empedans Değişimi (θ/β=0.5)



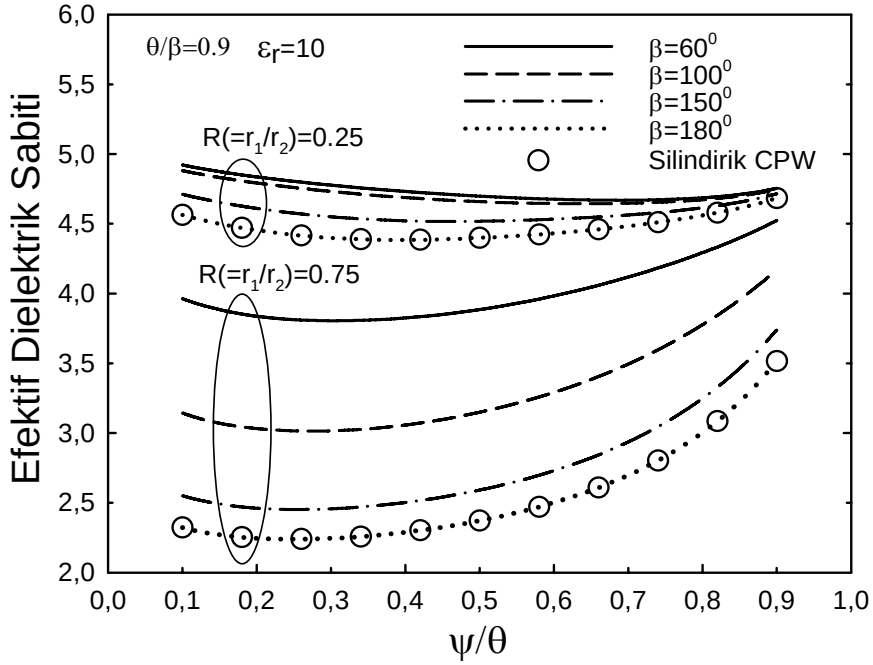
Şekil 6.4: Yay Kesitli CPW Yapısı için Ψ/θ Açısal Oranının bir Fonksiyonu Olarak Karakteristik Empedans Değişimi (θ/β=0.9)

Şekil 6.5 ve Şekil.6.6 ile verilen grafiklerde, yay kesitli CPW'nin efektif dielektrik sabiti değişim eğrileri görülmektedir. Bu grafiklerdeki geometrik parametreler ile empedans değişim eğrilerini veren grafiklerdeki geometrik parametreler aynı alınmıştır. Şekil 6.5-6 ile verilen grafiklerde de görüldüğü gibi, Ψ/θ oran değerinin artması durumunda, efektif dielektrik sabiti değeri, çok dar bir aralıkta önce azalma sonra artma yönünde bir eğilim göstermektedir. Eğrilik biçimini ifade eden R (r_1/r_2) değerinin 0.25'den 0.75'e çıkması durumunda, efektif dielektrik sabiti değerinde önemli bir ölçüde azalma görülmektedir. β açı değerinin artması durumunda, yay kesitli CPW'nin efektif dielektrik sabiti değeri geniş bir aralıkta azalmaktadır. Grafiklerde görüldüğü gibi, θ/β oran değerinin 0.5'den 0.9'a yükselmesi durumunda ise, efektif dielektrik sabiti değeri, önemli bir ölçüde azalmaktadır. Ayrıca, yay kesitli CPW yapısının efektif dielektrik sabiti ifadesinin doğruluğunu test etmek için, grafik üzerinde silindirik kesitli CPW'nin nümerik sonuçları da verilmiştir. Empedans değişim grafiklerinde olduğu gibi, $\beta=180^0$ olması durumunda, yay kesitli CPW yapısı için elde edilen nümerik değerler ile silindirik kesitli CPW'nin nümerik değerleri üst üste çakışmaktadır.

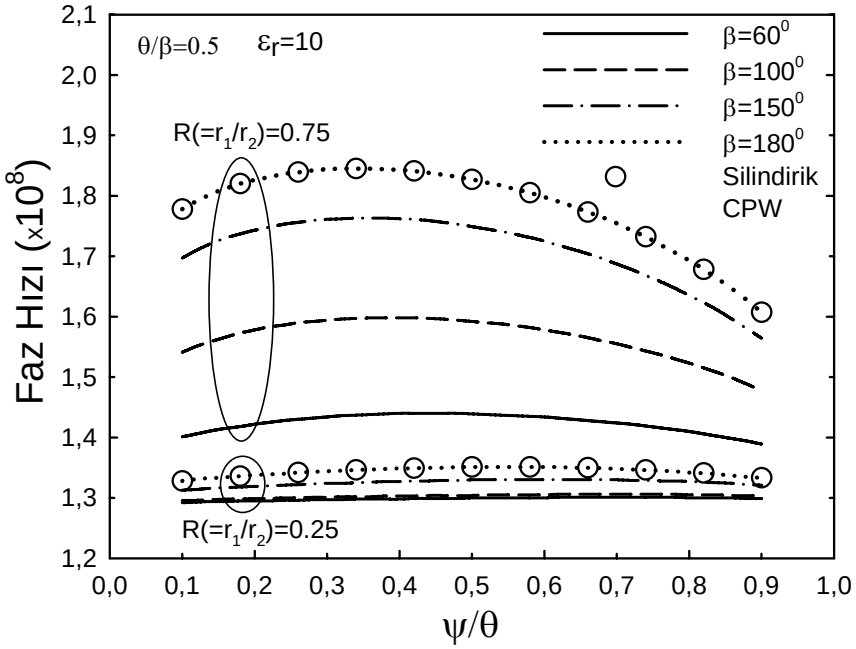
Şekil 6.7 ve Şekil 6.8 ile verilen grafik analizleri, Ψ/θ oran değerinin bir fonksiyonu olarak, yay kesitli CPW'nin faz hızı değişim eğrilerini vermektedir. Bu grafiklerde verilen geometrik parametreler, karakteristik empedans ve efektif dielektrik sabiti değişim eğrilerini veren grafiklerdeki geometrik parametreler aynı alınmıştır. Denklem (6.13) ile verilen bağıntıda, efektif dielektrik sabiti ile faz hızının ters orantılı olduğu görülmektedir. Bu nedenle, Şekil 6.7-8 ile verilen faz hızı değişim eğrileri, efektif dielektrik sabiti değişim eğrilerinin tam tersi yönünde bir değişim göstermektedir. Faz hızı değişim grafiklerinde de görüldüğü gibi, Ψ/θ oran değerinin artması durumunda, faz hızı değerleri çok dar bir aralıkta önce artma, sonra azalma yönünde bir eğilim göstermektedir. Yay kesitli CPW yapısında eğrilik biçimini ifade eden R (r_1/r_2) değerinin 0.25'den 0.75'e çıkması durumunda, faz hızı değerlerinde önemli bir ölçüde artma görülmektedir. β açı değerinin artması durumunda ise, faz hızı değerlerinde önemli bir ölçüde artma görülmektedir. Empedans ve efektif dielektrik sabiti değişim grafiklerinde olduğu gibi, $\beta=180^0$ olması durumunda, yay kesitli CPW için elde edilen nümerik sonuçlar ile silindirik kesitli CPW yapısının nümerik sonuçları üst üste çakışmaktadır.



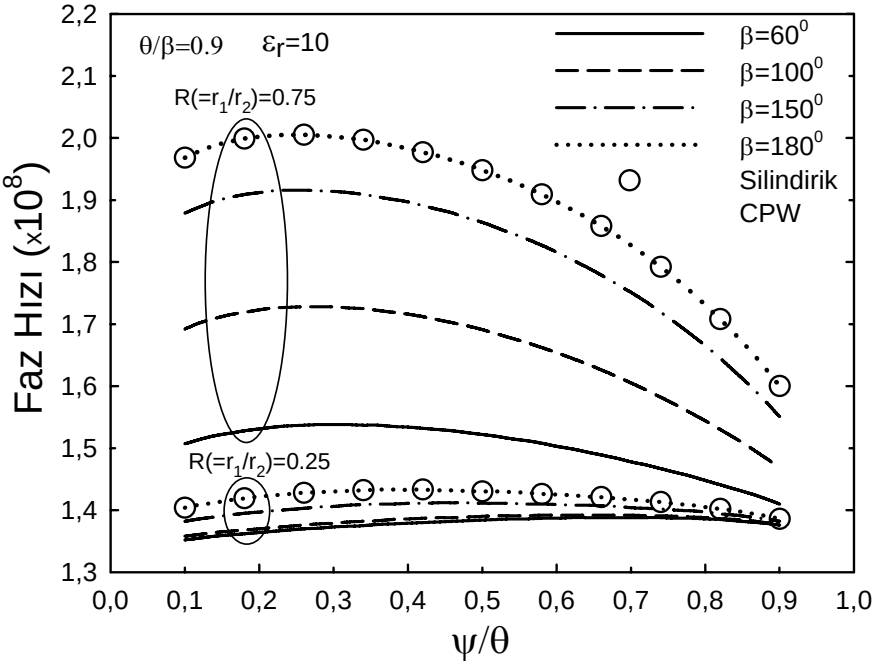
Şekil 6.5: Yay Kesitli CPW Yapısı için Ψ/θ Açısal Oranının bir Fonksiyonu Olarak Efektif Dielektrik Sabiti Değişimi (θ/β=0.5)



Şekil 6.6: Yay Kesitli CPW Yapısı için Ψ/θ Açısal Oranının bir Fonksiyonu Olarak Efektif Dielektrik Sabiti Değişimi (θ/β=0.9)



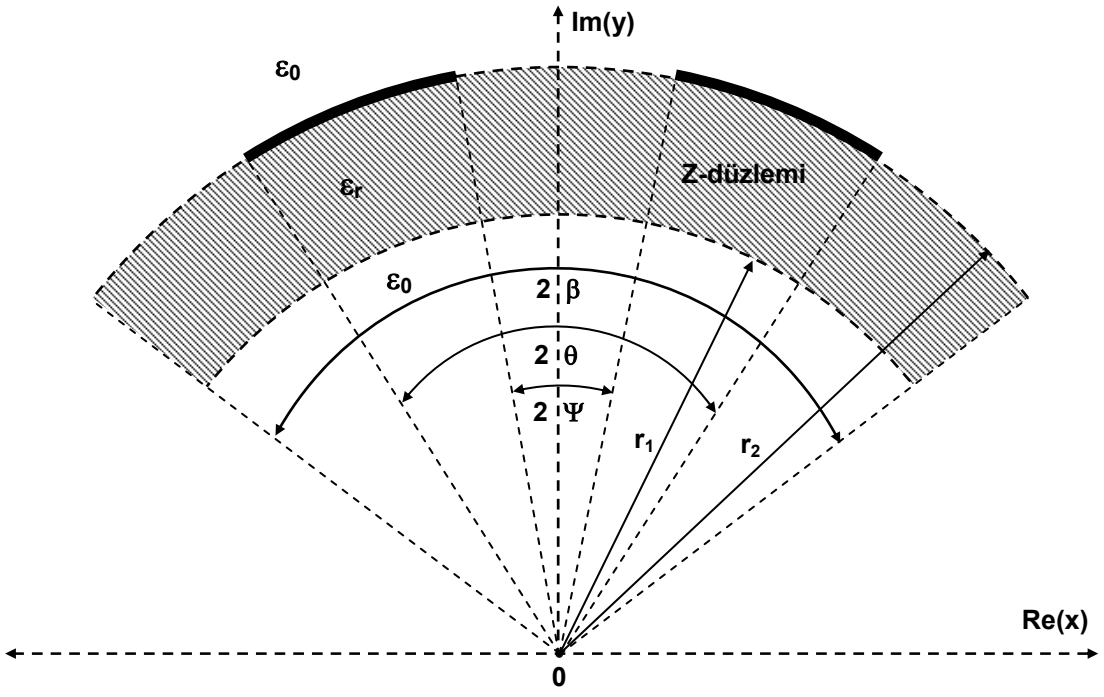
Şekil 6.7: Yay Kesitli CPW Yapısı için Ψ/θ Açısal Oranının bir Fonksiyonu Olarak Faz Hızı Değişimi (θ/β=0.5)



Şekil 6.8: Yay Kesitli CPW Yapısı için Ψ/θ Açısal Oranının bir Fonksiyonu Olarak Faz Hızı Değişimi (θ/β=0.9)

6.2. Yay Kesitli CPS'nin Analizi

Kesit görünümü Şekil 6.9 ile verilen yay kesitli CPS'nin elektriksel karakteristikleri, Denklem (6.1) ile verilen bağıntılar kullanılarak elde edilebilir. Yay kesitli CPS yapısının elektriksel karakteristikleri, yay kesitli CPW'nin elektriksel karakteristiklerinin hesaplanmasında kullanılan benzer işlemler yapılarak elde edilebilir. Bu nedenle, ilk olarak yapının birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi elde edilmelidir. Analizlerde, tüm metal iletkenler sonsuz ince kalınlıklı ve mükemmel iletken olarak kabul edilmiştir. Dalga yayılımının ise, TEM modunda olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, analizi kolaylaştırmak için dielektrik taban izotropik ve kayıpsız ortam olarak düşünülmüştür. Şekil 6.9 ile kesit görünümü verilen yay kesitli CPS'nin şerit iletken yay genişlikleri arasındaki yarık yay genişliğini gören açı 2Ψ dir. Şerit iletkenlerin yay uzunluğunu gören açı $\theta - \Psi$ olup, dielektrik tabanın yanal yay genişlikleri ise β açısı ile sonlandırılmıştır. Yay kesitli CPS'nin dielektrik taban kalınlığı $h(r_2 - r_2)$, dielektrik tabanın bağıl dielektrik sabiti ise ε_r dir.



Şekil 6.9: Yay Kesitli CPS İletim Hattının Kesit Görünümü

Şekil 6.9 ile verilen yapının birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesini elde etmek için, ilk olarak Şekil 6.10a ile verilen orijinal düzlemdeki yay kesitli CPS yapısı;

$$t = j\ln(z / r_2) \tag{6.15}$$

fonksiyonu vasıtasıyla, Şekil 6.10b ile tasvir edilen düzlemsel kesitli CPS yapısına dönüşür. Chen ve Chou (1997) tarafından düzlemsel CPS için kullanılan Konformal Dönüşüm Tekniği uygulamalarından faydalanılarak, Şekil 6.10b ile verilen düzlemsel kesitli CPS yapısının analizi gerçekleştirilebilir. Şekil 6.10b ile verilen düzlemsel kesitli CPS'nin birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi, I., II. ve III. bölge kapasitelerinin,

$$C_T = C_{01} + C_{03} + C_d \tag{6.16}$$

toplamı şeklinde ifade edilir. I. bölge ile tasvir edilen üst yarı bölge serbest ortam hava kapasitesini elde etmek için, ilk olarak I. bölgenin üst yarı bölgesi, aşağıda verilen integral bağıntısı (Schwarz-Christoffel dönüşümü) vasıtasıyla Şekil 6.10e ile verilen ve W -düzlemi ile tasvir edilen paralel plakalı bir yapıya dönüşür:

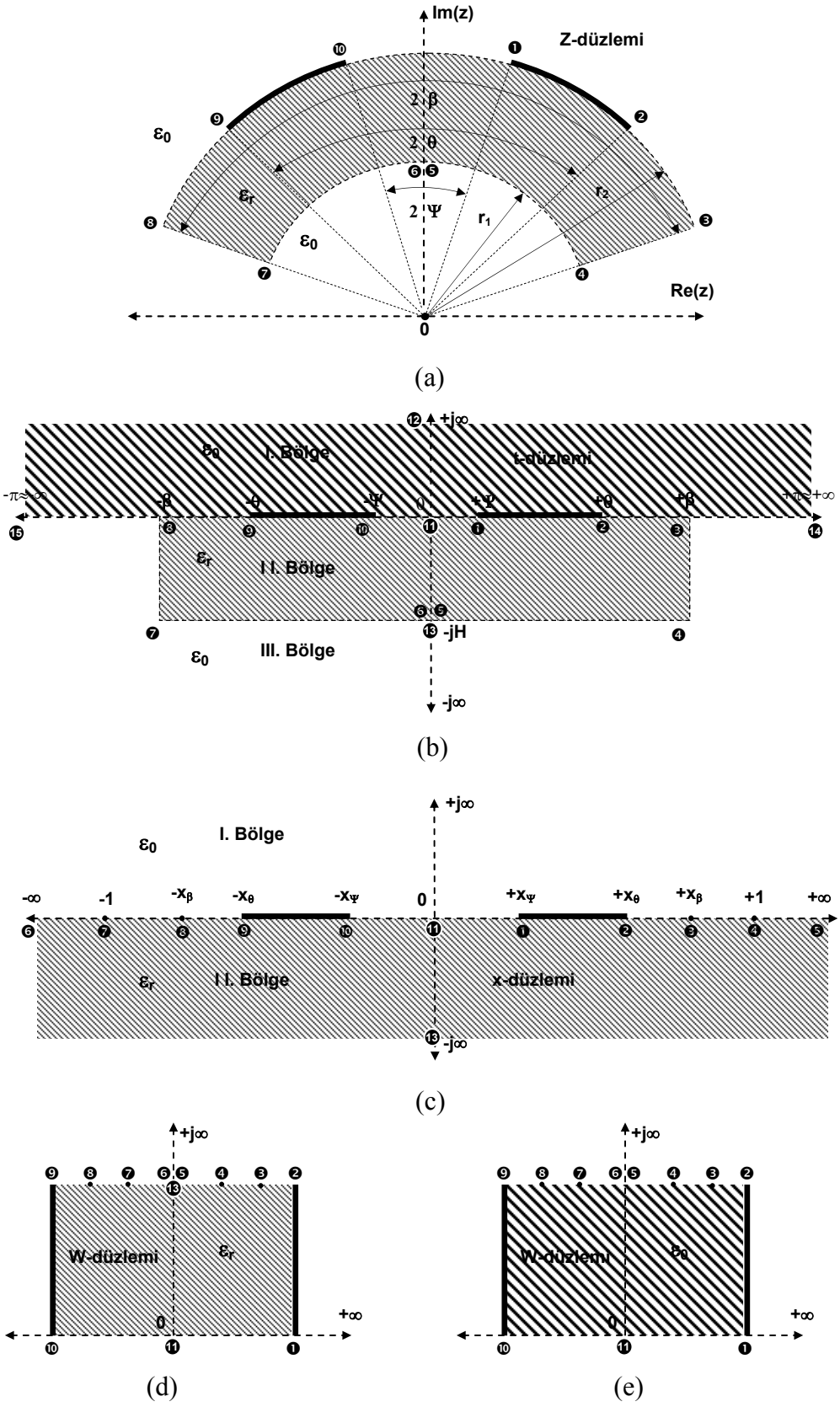
$$w = \int \frac{dt}{\sqrt{(t^2 - \Psi^2)(t^2 - \theta^2)}} \tag{6.17}$$

Şekil 6.10b ile verilen düzlemsel CPS yapısında da görüldüğü gibi, dielektrik taban olmadığı durumundaki I. bölge ile III. bölge serbest ortam hava kapasiteleri birbirine eşittir. Böylece, I. bölge ve III. bölge serbest ortam hava kapasiteleri paralel plakalı yapılar için verilen iyi-bilinen kapasite bağıntısından faydalanılarak;

$$C_{01} = C_{03} = \frac{\varepsilon_0}{2}\frac{K(k_0^{'})}{K(k_0)}, \qquad C_{hava} = C_{01} + C_{03} = \varepsilon_0 \frac{K(k_0^{'})}{K(k_0)} \tag{6.18}$$

şeklinde ifade edilir. Burada k_0 ve $k_0^{'}$ modülleri;

$$k_0 = \frac{\Psi}{\theta}, \qquad k_0^{'} = \sqrt{1-(k_0)^2} \tag{6.19}$$



Şekil 6.10: Yay Kesitli CPS Yapısının Serbest Ortam Hava Kapasitesi ve Dielektrik Ortam Kapasitesini Elde Etmek için bir Seri Konformal Dönüşümler

şeklindedir. Şekil 6.10b ile verilen düzlemsel kesitli CPS yapısının dielektrik taban kalınlığı ifade eden H, yay kesitli CPS'nin orijinal geometrik boyutlarına bağlı olarak;

$$H = \ln(\frac{r_2}{r_1}) \tag{6.20}$$

şeklinde ifade edilir. Şekil 6.10b ile verilen yapının II. bölge ile temsil edilen dielektrik taban bölgesi, Şekil 3.16 ile tasvir edilen ters Schwarz-Christoffel dönüşümü kullanılarak, Şekil 6.10c ile tasvir edilen x-düzleminin alt yarı bölgesine dönüşür. Şekil 6.10c ile verilen x- düzlemindeki x_β, x_Ψ ve x_θ ifadeleri, ters Schwarz-Christoffel dönüşümünden faydalanılarak;

$$x_\beta = \left[\frac{\exp(\pi\beta/H)-2}{\exp(\pi\beta/H)+2}\right]^2, \qquad 1<\frac{\beta}{H}<\infty,$$

$$x_\beta = \sqrt{1-\left[\frac{\exp(\pi H/\beta)-2}{\exp(\pi H/\beta)+2}\right]^4}, \qquad 0<\frac{\beta}{H}<1 \tag{6.21a}$$

$$F(\arcsin(x_\Psi/x_\beta),x_\beta) = \frac{\Psi}{\beta}K(x_\beta), \qquad F(\arcsin(x_\theta/x_\beta),x_\beta) = \frac{\theta}{\beta}K(x_\beta) \tag{6.21b}$$

şeklinde elde edilir. Denklem (6.21) bağıntısında geçen $F(\phi,k)$ ifadeleri, I. tür tam olmayan eliptik integrallerdir. Bu integral ifadeleri, Cheng ve Robertson (1995) tarafından verilen yaklaşık çözümlerden faydalanılarak hesaplanabilir. II. bölge ile temsil edilen dielektrik bölge kapasitesini elde etmek için, Şekil 6.10c ile verilen II. bölgenin alt yarı bölgesi;

$$w = \int \frac{dx}{\sqrt{(x^2-x_\Psi^2)(x^2-x_\theta^2)}} \tag{6.22}$$

Schwarz-Christoffel dönüşümü vasıtasıyla, W-düzlemi (Şekil 6.2d) ile tasvir edilen paralel plakalı bir yapıya dönüşür. Böylece, kısmi kapasitans yaklaşımı ve paralel plakalı yapılardaki iyi-bilinen kapasite bağıntısından faydalanılarak, dielektrik taban bölgesinde oluşan kapasite;

$$C_d = \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)}{2}\frac{K(k_d^{'})}{K(k_d)} \tag{6.23}$$

şeklinde elde edilir. Denklem (18) ve Denklem (23) bağıntılarında geçen $K(k)/K(k^{'})$ oranı için yaklaşık çözümler Hilberg (1969) tarafından verilmiştir. Denklem (6.23) bağıntısındaki k_d ve $k_d^{'}$ modülleri;

$$k_d = \frac{x_\Psi}{x_\theta}, \qquad k_d^{'} = \sqrt{1-(k_d)^2} \tag{6.24}$$

şeklindedir. Yay kesitli CPS yapısı için efektif dielektrik sabiti;

$$\varepsilon_{eff} = \frac{C_T}{C_{hava}} = 1 + \frac{(\varepsilon_r - 1)}{2}\frac{K(k_d^{'})K(k_0)}{K(k_d)K(k_0^{'})} \tag{6.25}$$

şeklinde elde edilir. Yay kesitli CPS'nin faz hızı ise;

$$V_{faz} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \tag{6.26}$$

ile ifade edilir. Sonuç olarak, efektif dielektrik sabiti ve faz hızı bağıntılarından faydalanılarak, yay kesitli CPS'nin karakteristik empedansı aşağıdaki bağıntı şeklinde ifade edilir:

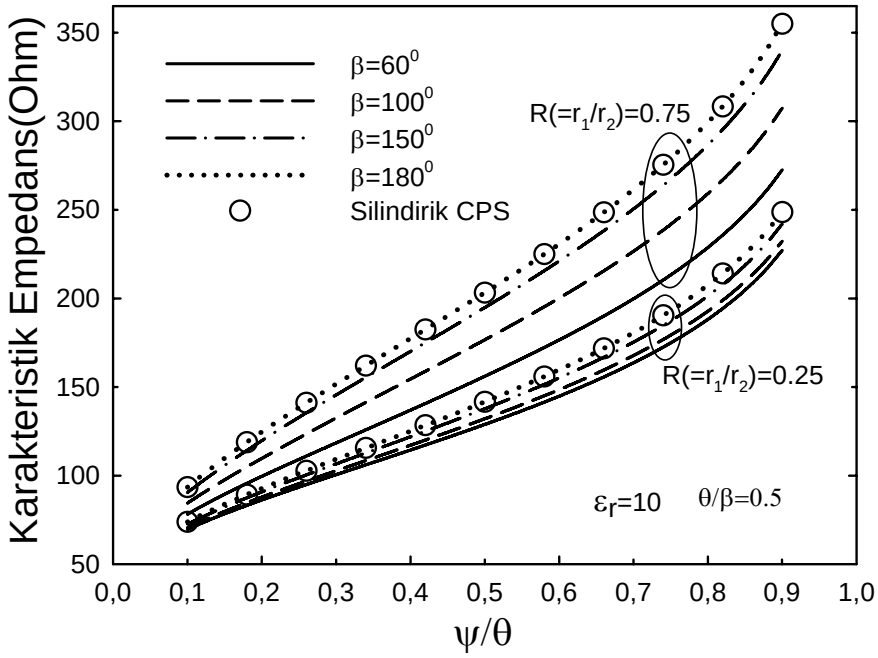
$$Z_0 = \frac{c}{V_{faz}C_T} = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}}\frac{K(k_0)}{K(k_0^{'})} \tag{6.27}$$

6.2.2. Yay kesitli CPS için nümerik sonuçlar ve tartışmalar

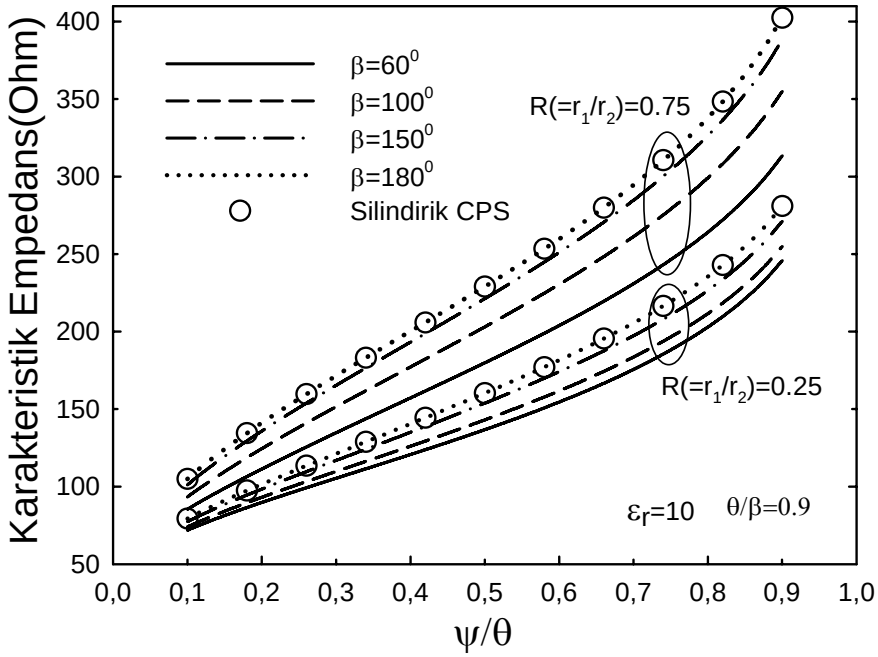
Şekil 6.9 ile verilen yay kesitli CPS'nin elektriksel karakteristikleri, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analitik bağıntılar formunda elde edilmiştir. Bu bölümde, Denklem (6.25-27) ile verilen bağıntılar kullanılarak, yay kesitli CPS'nin efektif dielektrik sabiti, faz hızı ve karakteristik empedans değişim eğrilerini veren grafikler Şekil 6.11-16 ile verilmiştir.

Bu bölümde verilen grafik analizlerinde, yay kesitli CPS yapısı için elde edilen elektriksel karakteristik bağıntılarının doğruluğu, yay kesitli CPW yapısında olduğu gibi, belli geometrik boyutlarda silindirik kesitli CPS yapısının nümerik sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar, yay kesitli CPS yapısı için türetilen analitik bağıntıların geçerliliğini doğrulamaktadır.

Şekil 6.11 ve Şekil 6.12 ile verilen grafiklerde, ε_r=10, θ/β=0.5 ve θ/β=0.9, $R(r_1/r_2)$=0.25 ve $R(r_1/r_2)$=0.75 ile $\beta=60^0$, 100^0, 150^0 ve 180^0 olmak üzere, Ψ/θ oran değerinin bir fonksiyonu olarak karakteristik empedans değişim eğrileri görülmektedir. Şekil 6.11 ve Şekil 6.12 ile verilen grafiklerde de görüldüğü gibi, Ψ/θ oran değerinin artması durumunda, karakteristik empedans değeri yaklaşık olarak, 50 Ohm'dan 400 Ohm'a kadar geniş bir aralıkta artış göstermektedir. Daha öncede ifade edildiği gibi, yüksek empedans gerektiren mikrodalga iletim hat uygulamalarında CPS yapıları kullanılabilir. Şekil 6.11 ve Şekil 6.12 ile verilen empedans değişim eğrileri bu durumu doğrulamaktadır. Yay kesitli CPS yapısının eğrilik biçimini ifade eden $R(r_1/r_2)$ oran değerinin 0.25'den 0.75'e çıkması durumunda, karakteristik empedans değerinde önemli bir ölçüde artış gözlenmektedir. Yay kesitli CPS yapısında dielektrik taban malzemesinin yanal genişliğini ifade eden β açı değerinin artması durumunda ise, karakteristik empedans değeri geniş bir aralıkta artış göstermektedir. Şekil 6.11 ve Şekil 6.12 ile verilen grafikler arasındaki tek fark θ/β oran değerleridir. Şekil 6.11'deki grafikte θ/β=0.5, Şekil 6.12'deki grafikte ise θ/β=0.9 değeri alınmıştır. θ/β oran değerinin 0.5'den 0.9'a yükselmesi durumunda, karakteristik empedans değeri de önemli bir ölçüde yükselmektedir. Ayrıca, yay kesitli CPS yapısı için Denklem (6.27) ile verilen karakteristik empedans ifadesinin doğruluğu görmek için, silindirik kesitli CPS yapısının karakteristik empedans nümerik sonuçları da birlikte verilmiştir. Karakteristik empedans değişim grafiklerinde de görüldüğü gibi, β açı değerinin 180^0 olması durumunda, yay kesitli CPS yapısının, silindirik kesitli CPS yapısına dönüştüğü görülmektedir. Her iki yapının birbirine dönüşümü, grafikler üzerindeki yay kesitli CPS yapısının empedans nümerik sonuçları ile silindirik kesitli CPS yapısının empedans nümerik sonuçlarının üst üste çakışması ile doğrulanmaktadır.



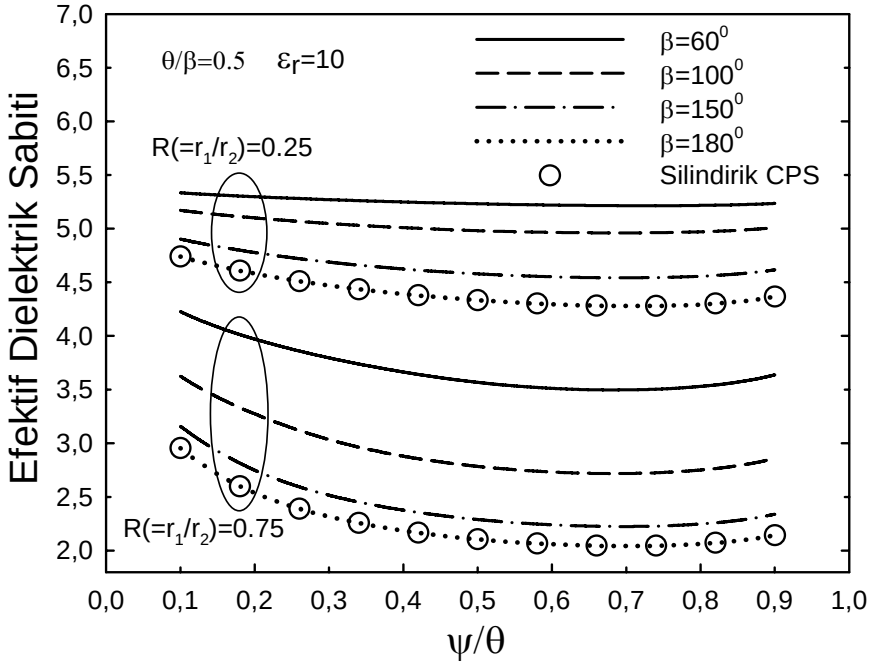
Şekil 6.11: Yay Kesitli CPS Yapısı için Ψ/θ Açısal Oranının bir Fonksiyonu Olarak Karakteristik Empedans Değişimi (θ/β=0.5)



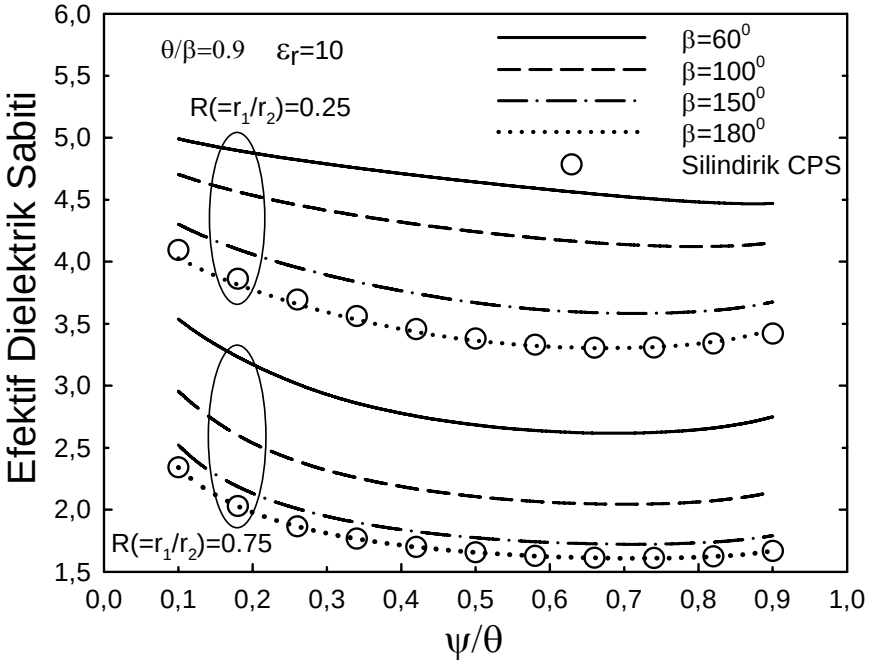
Şekil 6.12: Yay Kesitli CPS Yapısı için Ψ/θ Açısal Oranının bir Fonksiyonu Olarak Karakteristik Empedans Değişimi (θ/β=0.9).

Şekil 6.13 ve Şekil 6.14 ile verilen grafiklerde, empedans değişim grafiklerinde verilen aynı geometrik parametreler alınarak, Ψ/θ oran değerinin bir fonksiyonu olarak, efektif dielektrik sabiti değişim eğrileri görülmektedir. Her iki grafikte de görüldüğü gibi, Ψ/θ oran değerinin artması durumunda, efektif dielektrik sabiti değerleri çok dar bir aralıkta azalma yönünde bir eğilim göstermektedir. Eğrilik biçimini ifade eden R (r_1/r_2) oran değeri ile β açı değerinin artması durumunda, efektif dielektrik sabiti değerlerinde önemli bir ölçüde azalma görülmektedir. Şekil 6.13 ve Şekil 6.14 ile verilen grafiklerde, θ/β oran değerleri sırasıyla 0.5 ve 0.9 alınmıştır. θ/β oran değerinin 0.5'den 0.9'a yükselmesi durumunda, efektif dielektrik sabiti değerleri önemli bir ölçüde azalmaktadır. Empedans değişim grafiklerinde olduğu gibi, efektif dielektrik sabiti değişimlerini veren grafiklerde de silindirik kesitli CPS yapısının nümerik sonuçları birlikte verilmiştir. Şekil 6.13 ve Şekil 6.14 ile verilen grafiklerde de görüldüğü gibi, β açı değerinin 180^0 olması durumunda, yay kesitli CPS yapısının nümerik sonuçları, silindirik kesitli CPS yapısının nümerik sonuçları ile üst üste çakışmaktadır.

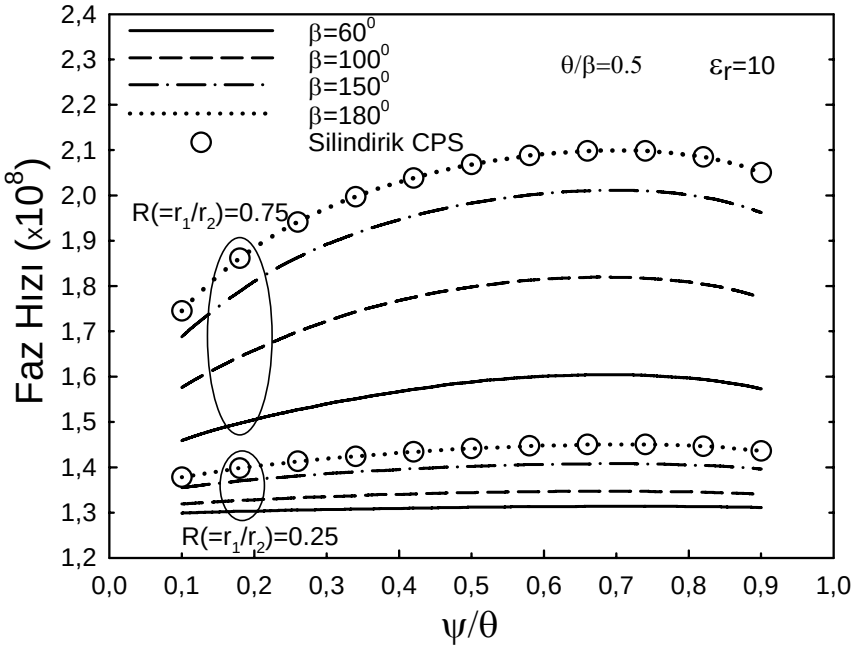
Şekil 6.15 ve Şekil 6.16 ile verilen grafiklerde, θ/β=0.5 ve θ/β=0.9 oran değerlerinde Ψ/θ oranının bir fonksiyonu olarak, yay kesitli CPS'nin faz hızı değişim eğrileri görülmektedir. Bu grafiklerde verilen geometrik parametreler, empedans ve efektif dielektrik sabiti değişim grafiklerinde verilen geometrik parametreler ile aynıdır. Denklem (6.26) ile verilen bağıntıda, efektif dielektrik sabiti ile faz hızı ifadesinin ters orantılı olduğu görülmektedir. Şekil 6.15 ve Şekil 6.16 ile verilen grafikler, bu durumu doğrulamaktadır. Şekil 6.15 ve Şekil 6.16 ile verilen grafiklerde de görüldüğü gibi, Ψ/θ oran değerinin artması durumunda, faz hızı belli bir aralıkta artış göstermektedir. Eğrilik biçimini ifade eden R (r_1/r_2) oran değerinin 0.25'den 0.75'e yükselmesi ile dielektrik tabanın yanal genişliğini ifade eden β açı değerinin $60^{0'}$den $180^{0'}$ye yükselmesi durumunda, faz hızı değerleri önemli bir ölçüde artmaktadır. Ayrıca, θ/β oran değerlerinin 0.5'den 0.9'a yükselmesi durumunda, faz hızı değeri de önemli bir ölçüde artış göstermektedir. Faz hızı değişimlerini veren grafikler üzerinde, silindirik kesitli CPS yapısının nümerik sonuçları da birlikte verilmiştir. Her iki grafikte de görüldüğü gibi, β açı değerinin 180^0 olması durumunda, yay kesitli CPS'nin nümerik sonuçları ile silindirik kesitli CPS'nin nümerik sonuçları üst üste çakışmaktadır.



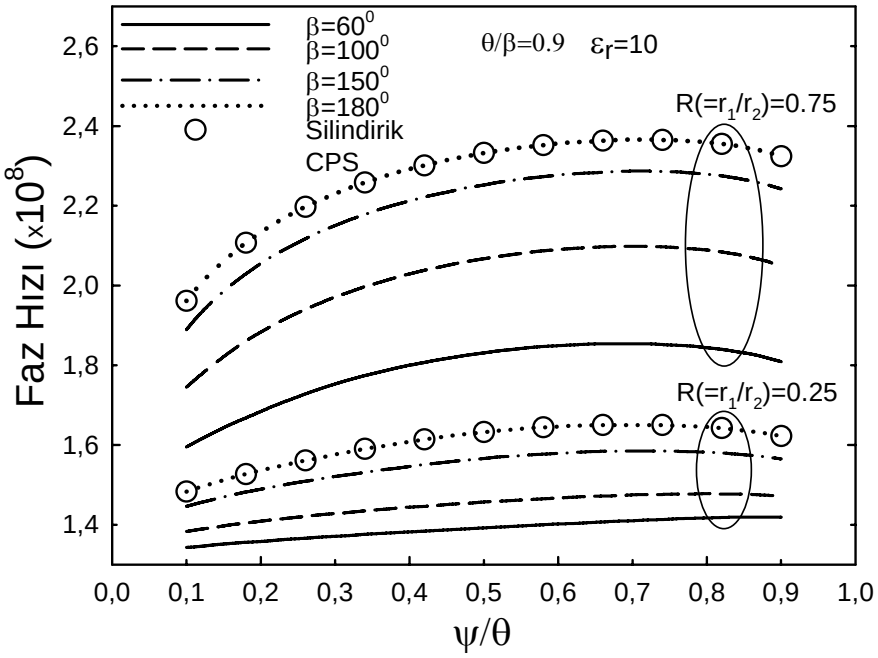
Şekil 6.13: Yay Kesitli CPS Yapısı için Ψ/θ Açısal Oranının bir Fonksiyonu Olarak Efektif Dielektrik Sabiti Değişimi (θ/β=0.5)



Şekil 6.14: Yay Kesitli CPS Yapısı için Ψ/θ Açısal Oranının bir Fonksiyonu Olarak Efektif Dielektrik Sabiti Değişimi (θ/β=0.9)



Şekil 6.15: Yay Kesitli CPS Yapısı için Ψ/θ Açısal Oranının bir Fonksiyonu Olarak Faz Hızı Değişimi (θ/β=0.5)



Şekil 6.16: Yay Kesitli CPS Yapısı için Ψ/θ Açısal Oranının bir Fonksiyonu Olarak Faz Hızı Değişimi (θ/β=0.9)

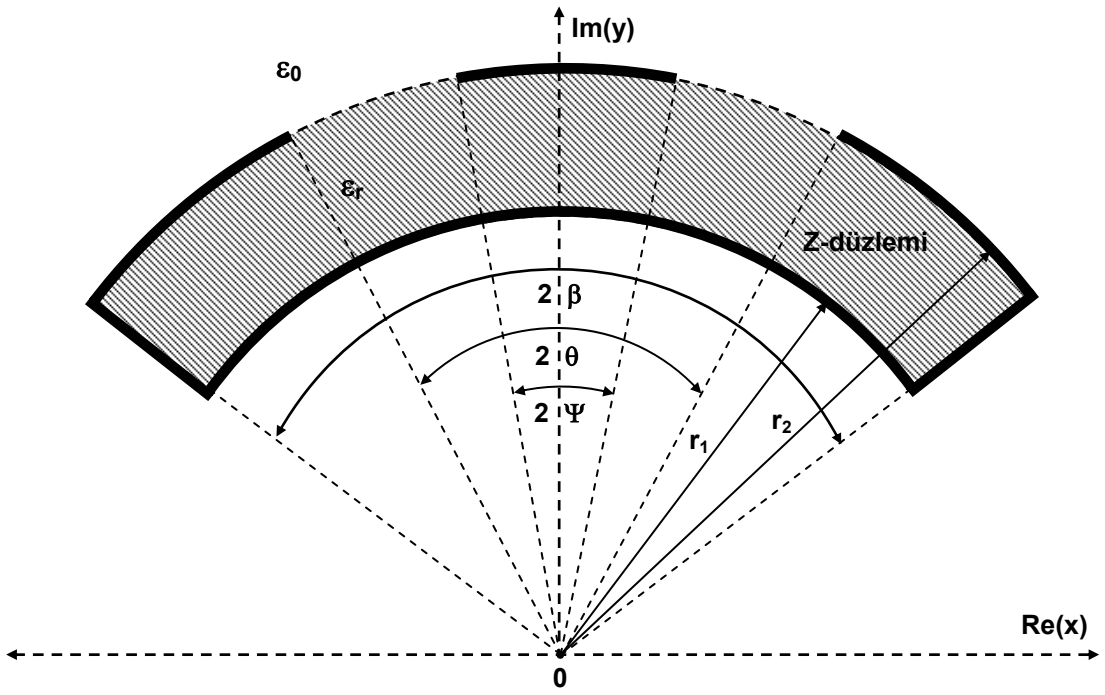
6.3. Yay Kesitli İletken Destekli CPW'nin Analizi

Yay kesitli iletken destekli CPW yapısının kesit görünümü, Şekil 6.17'de görüldüğü gibidir. Şekil 6.17 ile verilen yapının elektriksel karakteristikleri, Denklem (6.1) bağıntıları kullanılarak elde edilebilir. Yay kesitli CPW ve CPS yapılarında olduğu gibi, yay kesitli iletken destekli CPW'nin elektriksel karakteristiklerini elde etmek için, ilk olarak yapının birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi elde edilmelidir. Yay kesitli iletken destekli CPW'nin toplam hat kapasitesi, dielektrik bölgede oluşan kapasite ile serbest ortam hava kapasitesinin toplamından meydana gelmektedir.

Yay kesitli iletken destekli CPW'nin analizi sırasında, tüm metal iletkenler sonsuz ince kalınlıklı ve mükemmel iletken olarak kabul edilmiştir. Quasi-TEM yaklaşımına dayalı olarak, dalga yayılımının tamamen TEM modunda olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, analizi kolaylaştırmak için dielektrik taban bölgesi, izotropik ve kayıpsız ortam olarak düşünülmüştür. Yay kesitli iletken destekli CPW yapısında merkez şerit iletkenin yay genişliğini gören açı 2Ψ, toprak düzlem yay genişliği ile merkez şerit iletken yay genişliği arasındaki yarık yay genişliklerini gören açı ise $\theta - \Psi$ dir. Toprak düzlem genişliklerinin yay uzunluğu gören açı ise $\beta - \theta$ olarak verilmiştir. Yapının dielektrik taban kalınlığı $h(r_2 - r_1)$ olarak verilmiş olup, dielektrik tabanın bağıl dielektrik sabiti ise ε_r dir. Şekil 6.17 ile verilen yapının birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesini elde etmek için, ilk olarak Şekil 6.18a ile verilen orijinal geometrideki yapı;

$$t = j \ln(z / r_2) \tag{6.28}$$

fonksiyonu vasıtasıyla, Şekil 6.18b ile verilen düzlemsel kesitli iletken destekli CPW yapısına dönüşür. Şekil 6.18b ile verilen düzlemsel yapının analizi, Ghione ve Naldi (1987) tarafından iletken destekli CPW yapısı için elde edilen analitik bağıntılar kullanılarak gerçekleştirilebilir. Şekil 6.18b ile verilen düzlemsel kesitli iletken destekli CPW yapısının birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi, aşağıda verilen bağıntı ile ifade edilir:



Şekil 6.17: Yay Kesitli İletken Destekli CPW Yapısının Kesit Görünümü

$$C_T = C_0 + C_d \tag{6.29}$$

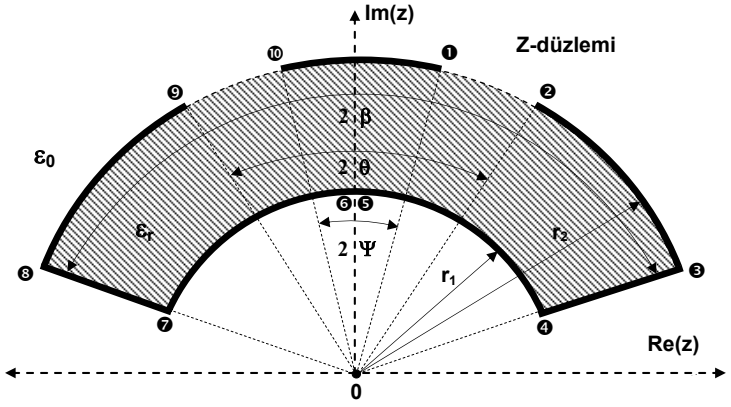
Şekil 6.18b'de I. bölge ile temsil edilen serbest ortam hava kapasitesini elde etmek için, ilk olarak Şekil 6.18b ile verilen I. bölgenin sağ yarı kısmı, $u = x^2$ dönüşüm fonksiyonu kullanılarak Şekil 6.18d ile verilen u-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür. u-düzleminin üst yarı bölgesi ise, Schwarz-Christoffel dönüşümü kullanılarak;

$$w = \int \frac{du}{\sqrt{u(u-\Psi^2)(u-\theta^2)(u-\beta^2)}} \tag{6.30}$$

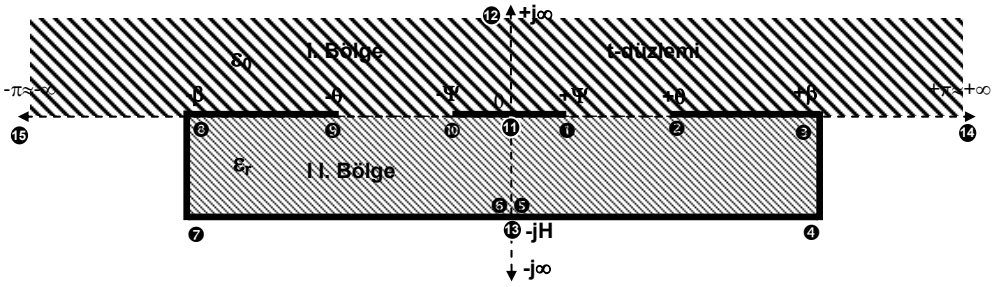
bağıntısı vasıtasıyla, Şekil 6.18f ile verilen ve W-düzlemi ile tasvir edilen paralel plakalı bir yapıya dönüşür. Böylece, I. bölge ile temsil edilen serbest ortam hava kapasitesi;

$$C_0 = 2\varepsilon_0 \frac{K(k_0)}{K(k_0^{'})} \tag{6.31}$$

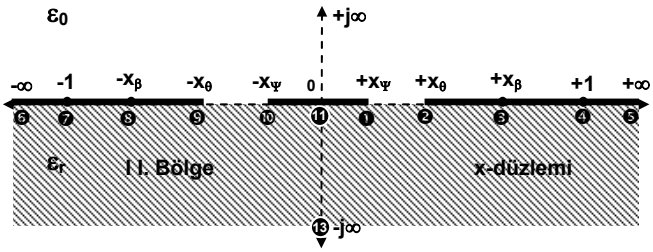
şeklinde ifade edilir. Denklem (6.31) bağıntısında geçen k_0 ve $k_0^{'}$ modülleri;



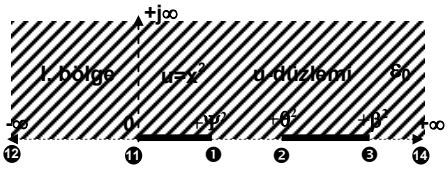
(a)



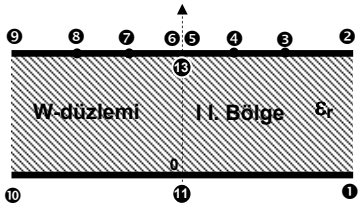
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 6.18: Yay Kesitli İletken Destekli CPW Yapısının Hava ve Dielektrik Ortam Kapasitesini Elde Etmek için bir Seri Konformal Dönüşümler

$$k_0 = \sqrt{\frac{\Psi^2(\beta^2 - \theta^2)}{\theta^2(\beta^2 - \Psi^2)}}, \qquad k_0^{'} = \sqrt{1-(k_0)^2} \tag{6.32}$$

şeklindedir.

Şekil 6.18b ile verilen düzlemsel yapının taban kalınlığı H , yay kesitli iletken destekli CPW'nin geometrik parametrelerine bağlı olarak;

$$H = \ln(\frac{r_2}{r_1}) \tag{6.33}$$

şeklinde ifade edilir. Şekil 6.18b ile verilen yapının II. bölge ile temsil edilen dielektrik taban bölgesi, ters Schwarz-Christoffel dönüşümü kullanılarak Şekil 6.18c ile tasvir edilen x-düzleminin alt yarı bölgesine dönüşür. Şekil 6.18c ile verilen x- düzlemindeki x_β, x_Ψ ve x_θ ifadeleri, ters Schwarz-Christoffel dönüşümünden faydalanılarak;

$$x_\beta = \left[\frac{\exp(\pi\beta/H)-2}{\exp(\pi\beta/H)+2}\right]^2, \qquad 1 < \frac{\beta}{H} < \infty,$$

$$x_\beta = \sqrt{1-\left[\frac{\exp(\pi H/\beta)-2}{\exp(\pi H/\beta)+2}\right]^4}, \qquad 0 < \frac{\beta}{H} < 1 \tag{6.34a}$$

$$F(\arcsin(x_\Psi / x_\beta), x_\beta) = \frac{\Psi}{\beta}K(x_\beta), \quad F(\arcsin(x_\theta / x_\beta), x_\beta) = \frac{\theta}{\beta}K(x_\beta) \tag{6.34b}$$

bağıntıları şeklinde ifade edilir.

Denklem (6.34) bağıntısındaki $F(\phi,k)$ ifadeleri ise, I. tür tam olmayan eliptik integrallerdir. I. tür tam olmayan eliptik integrallerin çözümü, Cheng ve Robertson (1995) tarafından verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir. II. bölge ile temsil edilen dielektrik bölge kapasitesini elde etmek için, Şekil 6.18c ile verilen x-düzleminin alt yarı bölgesi;

$$w = \int \frac{dx}{\sqrt{(x^2 - x_\Psi^2)(x^2 - x_\theta^2)}} \tag{6.35}$$

bağıntısıyla verilen Schwarz-Christoffel dönüşümü kullanılarak, Şekil 6.18e'deki W-düzlemi ile tasvir edilen paralel plakalı bir yapıya dönüşür. Böylece, kısmi kapasitans yaklaşımı ve paralel plakalı yapılarda iyi-bilinen kapasite bağıntısı kullanılarak, dielektrik taban bölgesinde oluşan kapasite;

$$C_d = 2\varepsilon_0\varepsilon_r \frac{K(k_d)}{K(k_d^{'})} \tag{6.36}$$

şeklinde elde edilir. Denklem (6.31) ve Denklem (6.36) bağıntılarında geçen $K(k)/K(k^{'})$ oran ifadeleri ise, Hilberg (1969) tarafından verilen yaklaşık çözümler kullanılarak hesaplanabilir. Denklem (6.36) bağıntısında yer alan k_d ve $k_d^{'}$ modülleri;

$$k_d = \frac{x_\Psi}{x_\theta}, \qquad k_d^{'} = \sqrt{1-(k_d)^2} \tag{6.37}$$

şeklindedir. Yay kesitli iletken destekli CPW'nin efektif dielektrik sabiti;

$$\varepsilon_{eff} = \frac{C_T}{C_{hava}} = 1 + q(\varepsilon_r - 1), \qquad q = \frac{\dfrac{K(k_d)}{K(k_d^{'})}}{\dfrac{K(k_d)}{K(k_d^{'})} + \dfrac{K(k_0^{'})}{K(k_0)}} \tag{6.38}$$

şeklinde elde edilir. Yay kesitli iletken destekli CPW'nin faz hızı ise;

$$V_{faz} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \tag{6.39}$$

ile ifade edilir. Sonuç olarak, yay kesitli iletken destekli CPW'nin karakteristik empedansı, aşağıda verilen bağıntı şeklinde elde edilir:

$$Z_0 = \frac{c}{V_{faz}C_T} = \frac{60\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \frac{1}{\dfrac{K(k_d)}{K(k_d^{'})} + \dfrac{K(k_0^{'})}{K(k_0)}} \tag{6.40}$$

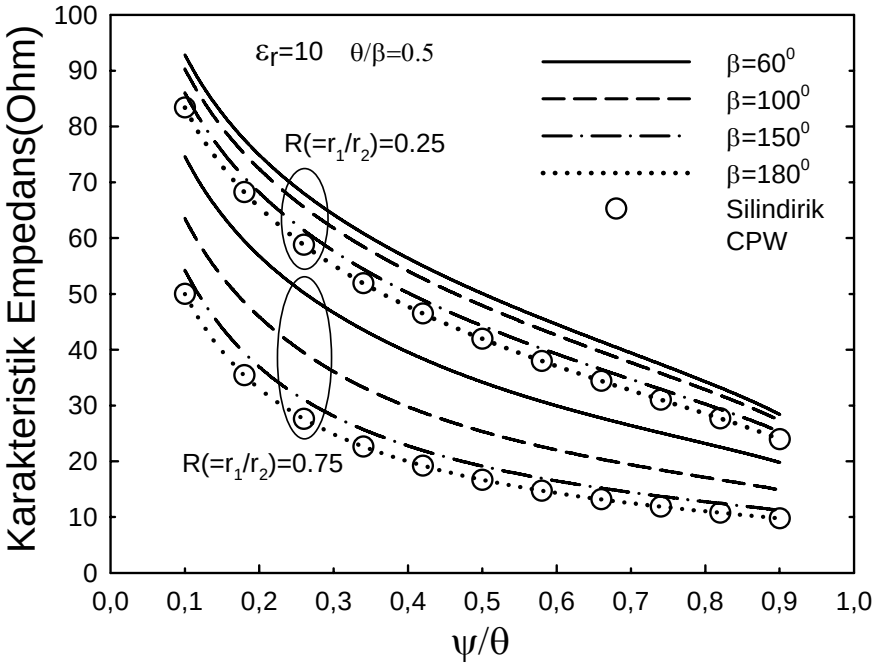
Yukarıdaki bağıntıda geçen c terimi, serbest ortamdaki ışık hızıdır.

6.3.2. Yay kesitli iletken destekli CPW için nümerik sonuçlar ve tartışmalar

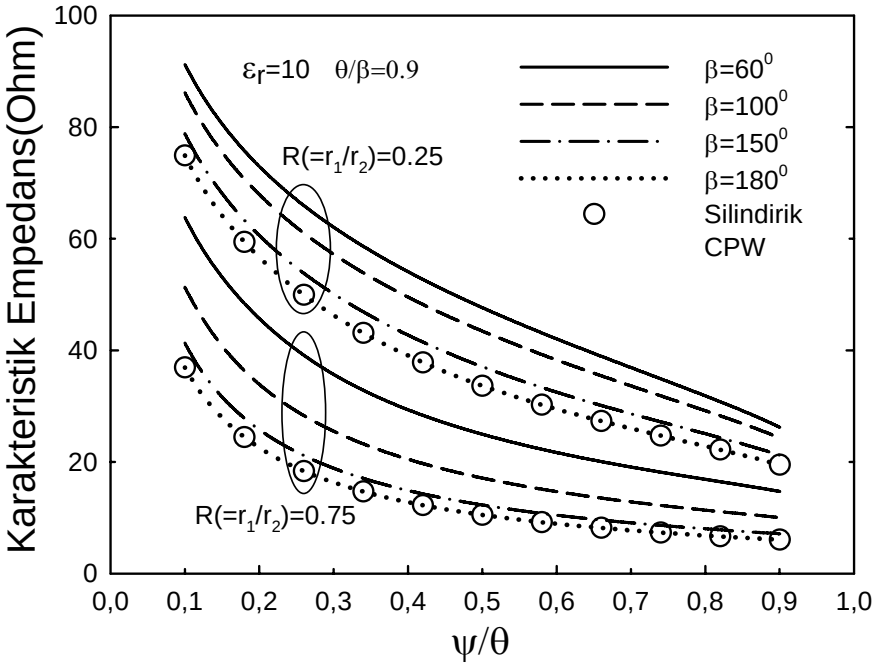
Şekil 6.17 ile verilen yay kesitli iletken destekli CPW'nin elektriksel karakteristikleri, quasi-statik yaklaşımı içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analitik bağıntılar formunda elde edilmiştir. Şekil 6.19-24 ile verilen grafiklerde, yay kesitli iletken destekli CPW yapısının geometrik boyutuna bağlı olarak, karakteristik empedans, efektif dielektrik sabiti ve faz hızı değişim eğrileri verilmiştir.

Bu bölümde verilen grafik analizlerinde, Şekil 6.17 ile verilen yapı için elde edilen elektriksel karakteristik bağıntılarının doğruluğu, belli geometrik şartlar altında silindirik kesitli iletken destekli CPW'nin elektriksel karakteristikleri ile test edilmiştir.

Şekil 6.19 ve Şekil 6.20 ile verilen grafiklerde, $\varepsilon_r=10$, $\theta/\beta=0.5$, $\theta/\beta=0.9$, $R(r_1/r_2)=0.25$ ve $R(r_1/r_2)=0.75$ ile $\beta=60^0$, 100^0, 150^0 ve 180^0 olmak üzere, Ψ/θ oran değerinin bir fonksiyonu olarak, yay kesitli iletken destekli CPW'nin karakteristik empedans değişim eğrileri görülmektedir. Şekil 6.19 ve Şekil 6.20 ile verilen grafiklerde de görüldüğü gibi, Ψ/θ oran değerinin artması durumunda, karakteristik empedans değeri 100 Ohm'dan 10 Ohm'a kadar geniş bir aralıkta azalmaktadır. Şekil 6.17 ile verilen yapının eğrilik biçimini ifade eden R (r_1/r_2) değerinin 0.25'den 0.75'e yükselmesi durumunda, empedans değerinde önemli bir ölçüde düşüş görülmektedir. θ/β oranının 0.5'den 0.9'a yükselmesi durumunda da, empedans değerinde önemli bir ölçüde düşme görülmektedir. Ayrıca, β açı değerinin artması durumunda, karakteristik empedans değeri önemli bir ölçüde azalmaktadır. Denklem (6.40) ile verilen karakteristik empedans bağıntısının doğruluğu, grafikler üzerinde silindirik kesitli iletken destekli CPW yapısının empedans nümerik sonuçları birlikte verilerek kanıtlanmıştır. Şekil 6.17 ile verilen yapıda da görüldüğü gibi, $\beta=180^0$ olarak verilen açı değeri, yay kesitli yapının silindirik kesitli yapıya dönüşümünü ifade eden bir değerdir. Şekil 6.19 ve Şekil 6.20 ile verilen grafiklerde, $\beta=180^0$ olması durumunda, yay kesitli iletken destekli CPW için elde edilen nümerik sonuçlar ile silindirik kesitli iletken destekli CPW yapısı için elde edilen nümerik sonuçların üst üste çakıştığı görülmektedir.



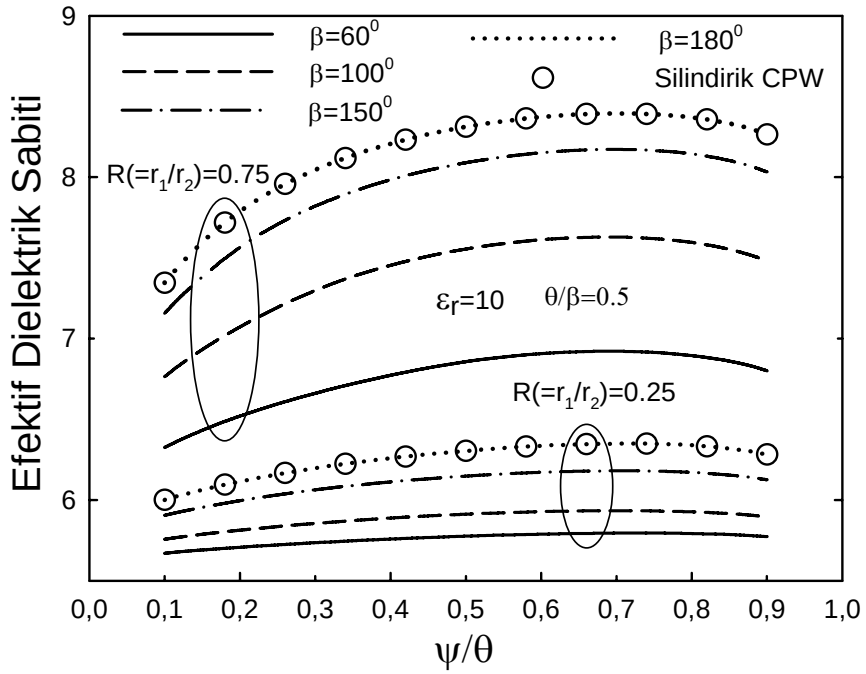
Şekil 6.19: Yay Kesitli İletken Destekli CPW Yapısı için Ψ/θ Açısal Oranının bir Fonksiyonu Olarak Karakteristik Empedans Değişimi (θ/β=0.5)



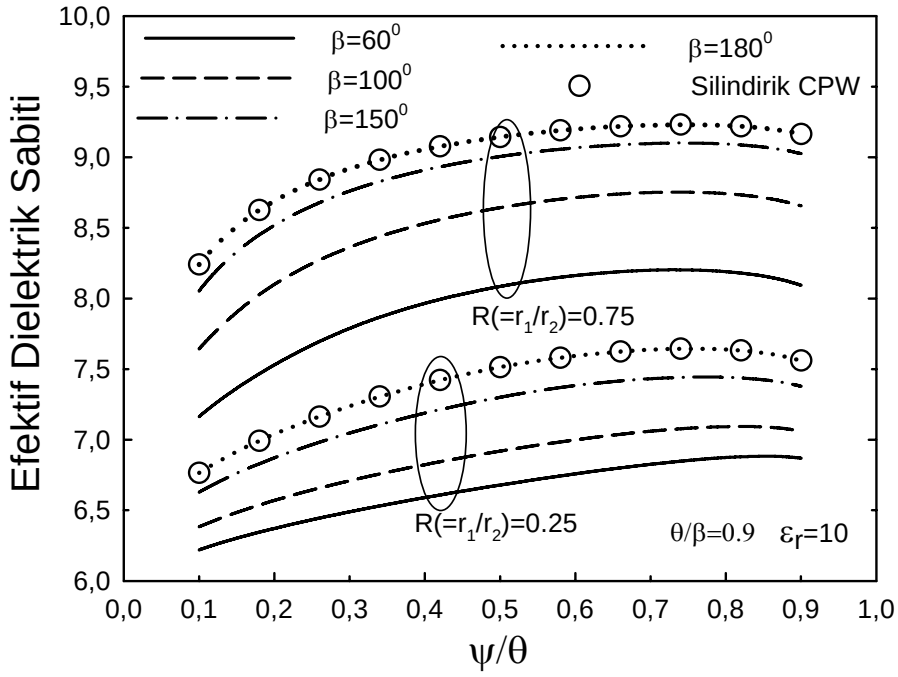
Şekil 6.20: Yay Kesitli İletken Destekli CPW Yapısı için Ψ/θ Açısal Oranının bir Fonksiyonu Olarak Karakteristik Empedans Değişimi (θ/β=0.9)

Şekil 6.21 ve Şekil 6.22 ile verilen grafiklerde, ε_r=10, θ/β=0.5, θ/β=0.9, R (r_1/r_2)=0.25 ve R(r_1/r_2)=0.75 ile β=60^0, 100^0, 150^0 ve 180^0 olmak üzere, Ψ/θ oran değerinin bir fonksiyonu olarak, yay kesitli iletken destekli CPW'nin efektif dielektrik sabiti değişim eğrileri görülmektedir. Grafiklerde de görüldüğü gibi, Ψ/θ oran değerinin artması durumunda, efektif dielektrik sabiti değeri önemli bir ölçüde artmaktadır. Yay kesitli iletken destekli CPW yapısının eğrilik biçimini ifade eden R (r_1/r_2) oran değerinin 0.25'den 0.75'e yükselmesi durumunda, efektif dielektrik sabiti değeri geniş bir aralıkta artmaktadır. θ/β oran değerinin 0.5'den 0.9'a yükselmesi durumunda, efektif dielektrik sabiti değerinde önemli bir ölçüde artma meydana gelmektedir. β açı değerinin artması durumunda da, yay kesitli iletken destekli CPW'nin efektif dielektrik sabiti değeri önemli bir ölçüde artış göstermektedir. Ayrıca, Denklem (6.38) ile verilen efektif dielektrik sabiti ifadesinin doğruluğunu test etmek için, grafikler üzerinde silindirik kesitli iletken destekli CPW yapısının nümerik sonuçları da birlikte verilmiştir. Empedans değişim grafiklerinde olduğu gibi, β=180^0 olması durumunda, yay kesitli iletken destekli CPW yapısı için elde edilen nümerik değerler, silindirik kesitli iletken destekli CPW yapısının nümerik değerleri ile üst üste çakışmaktadır.

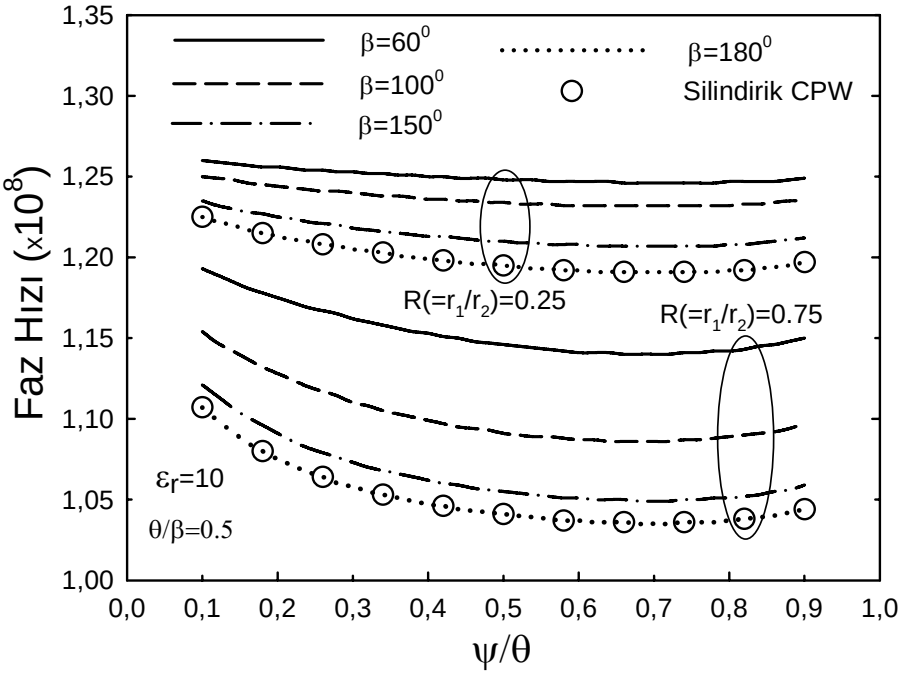
Şekil 6.23 ve Şekil 6.24 ile verilen grafikler, Ψ/θ oran değerinin bir fonksiyonu olarak, yay kesitli iletken destekli CPW'nin faz hızı değişim eğrilerini vermektedir. Bu grafiklerde verilen geometrik parametreler, karakteristik empedans ve efektif dielektrik sabiti değişim eğrilerini veren grafiklerdeki geometrik parametreler ile aynı alınmıştır. Denklem (6.39) ile verilen bağıntıda, efektif dielektrik sabiti ile faz hızı ifadesinin ters orantılı olduğu görülmektedir. Bu nedenle, Şekil 6.23 ve Şekil 6.24 ile verilen grafiklerdeki faz hızı değişim eğrileri, Şekil 6.21 ve Şekil 6.22 ile verilen efektif dielektrik sabiti değişim eğrilerinin tam tersi yönündedir. Ayrıca, Denklem (6.39) ile verilen faz hızı ifadesinin doğruluğunu görmek için, grafikler üzerinde silindirik kesitli iletken destekli CPW yapısının nümerik sonuçları da birlikte verilmiştir. Empedans ve efektif dielektrik sabiti değişim eğrilerinde olduğu gibi, β=180^0 olması durumunda, yay kesitli iletken destekli CPW'nin nümerik değerleri ile silindirik kesitli iletken destekli CPW'nin nümerik değerleri üst üste çakışmaktadır.



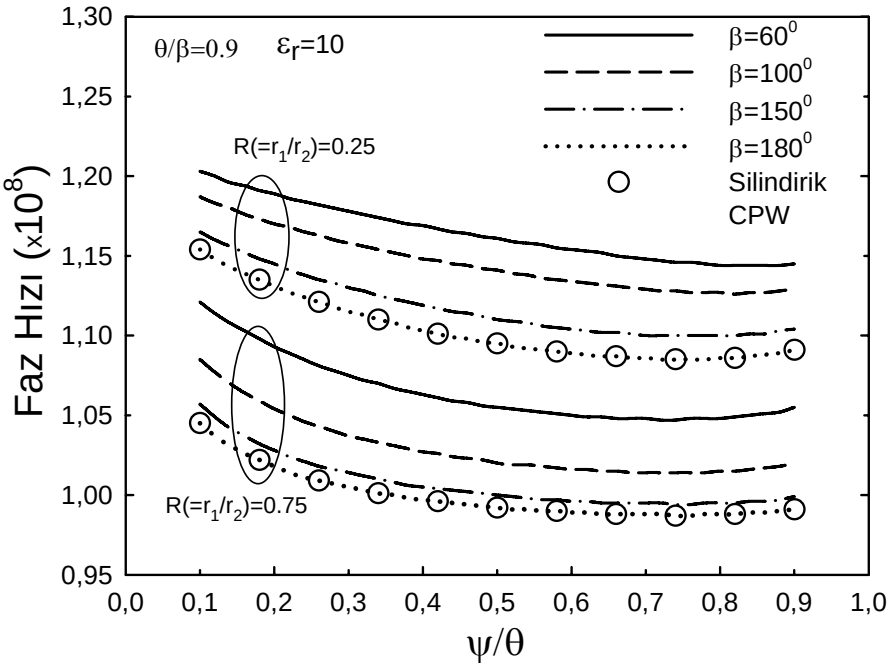
Şekil 6.21: Yay Kesitli İletken Destekli CPW Yapısı için Ψ/θ Açısal Oranının bir Fonksiyonu Olarak Efektif Dielektrik Sabiti Değişimi (θ/β=0.5)



Şekil 6.22: Yay Kesitli İletken Destekli CPW Yapısı için Ψ/θ Açısal Oranının bir Fonksiyonu Olarak Efektif Dielektrik Sabiti Değişimi (θ/β=0.9)



Şekil 6.23: Yay Kesitli İletken Destekli CPW Yapısı için Ψ/θ Açısal Oranının bir Fonksiyonu Olarak Faz Hızı Değişimi (θ/β=0.5)



Şekil 6.24: Yay Kesitli İletken Destekli CPW Yapısı için Ψ/θ Açısal Oranının bir Fonksiyonu Olarak Faz Hızı Değişimi (θ/β=0.9)

7. EŞDÜZLEMLİ İLETİM HATLARININ İLETKEN KAYIP ANALİZİ

Çok yüksek hızlı entegre devreler ile monolitik mikrodalga ve milimetrik-dalga entegre devrelerin ortaya çıkmasıyla birlikte, yüksek frekanslarda çalışabilen paketlere artan bir talep söz konusudur. Bu entegre devreler ile $LiNbO_3$ tabanlar üzerinde bulunan elektro-optik bileşenlerde, CPW ve CPS'ler sıkça kullanılmaktadır.

Mikrodalga iletim hattı uygulamalarında kullanılmak üzere CPW ve CPS yapılarının tasarımı, modellenmesi ve analizlerinin doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi oldukça önemli bir konudur. Kaynak araştırması bölümünde, CPW ve CPS'lerin literatürdeki mevcut analizleri ile ilgili olarak detaylı bilgi verilmiştir. CPW ve CPS'lerin elektriksel karakteristikleri (birim uzunluk başına düşen hat kapasitesi, efektif dielektrik sabiti, faz hızı ve karakteristik empedans), farklı analiz yöntemleri kullanılarak bir çok araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Yapılan analizlerin çoğunda, CPW ve CPS yapılarındaki şerit iletkenler ile toprak düzlemlerin metal kalınlıkları sonsuz ince kalınlıklı olarak düşünülmüştür. Oysa, pratikteki mikrodalga iletim hattı uygulamalarında, şerit iletkenler ve toprak düzlemler belli bir metal kalınlığına sahiptir. Şerit iletkenlerin ve toprak düzlemlerin metal kalınlıkları, CPW ve CPS yapılarının elektriksel karakteristiklerini önemli ölçüde etkilemektedir. CPW ve CPS'lerin metal kalınlıklarını hesaba katan analizler, metal kalınlıklarındaki artışın efektif dielektrik sabiti ve karakteristik empedans değerlerinde, önemli ölçüde bir azalma meydana getirdiğini göstermiştir (Gupta ve ark. 1996, Ünlü 2003).

Şerit, mikroşerit ve eşdüzlemli iletim hatlarında meydana gelen iletken kayıpları, hem tam dalga analiz teknikleri, hem de quasi-statik analiz teknikleri kullanılarak hesaplanabilir. Oldukça karmaşık ve uzun işlemler gerektiren tam dalga analiz tekniği ile gerçekleştirilen analizlerin en büyük dezavantajı, iletken kayıp hesaplamalarında büyük miktarda bilgisayar kaynaklarına ihtiyaç duyulmasıdır. Oysa, quasi-statik yaklaşımı içerisinde Konformal dönüşümlerle gerçekleştirilen analizler, hem zaman israfını, hem de çok fazla karmaşık nümerik işlem yapmayı önlemektedir. Ayrıca, eşdüzlemli iletim hatlarının iletken kayıplarını elde etmek için, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak elde edilen kapalı-form şeklindeki analitik

ifadelerin doğruluğu, yapılan deneysel veri sonuçları ve yüksek doğruluk değerlerine sahip tam dalga analiz teknikleri ile kanıtlanmıştır (Simons 2001).

Sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonsuz yanal toprak düzlemli asimetrik aralıklı CPW'nin efektif dielektrik sabiti, karakteristik empedansı ve metal kalınlıklarının neden olduğu iletken zayıflamasını veren hesaplamalar, Ghione (1993) tarafından yapılmıştır. İdeal CPW yapısı ile pratikte kullanılan uygulamalar arasındaki temel farklılıklardan biri, pratikteki CPW'lerin yanal toprak düzlemlerinin sonlu genişlikli olmasıdır. Yanal toprak düzlemler, eşdüzlemli devrelerde meydana gelen maksimum hat yoğunluğu üzerinde direk bir etkiye sahip olduğu için, mümkün olduğu kadar küçük seçilmelidir. Yanal toprak düzlem uçlarının kesilerek sonlandırılması, hat empedans seviyesinin daha yüksek olmasına neden olur ve böylece hattan hatta kuplaj artar. Komşu hatlar arasında meydana gelen kuplaj etkisinden kaçınmak için, CPW yapısındaki yanal toprak düzlemler, devre boyutunun gereksiz yere genişlemesine meydan vermeyecek şekilde, yeterince uygun genişlikte seçilmelidir. Genlik ve faz modülatörleri gibi elektro-optik bileşenlerin performans optimizasyonu, çoğu kez dar genişlikli yanal toprak düzlemlerin kullanımını gerektirmektedir. Ayrıca, daha önce belirtildiği gibi, simetrik ve asimetrik CPW yapısının performansı bakımından yanal toprak düzlem genişliklerinin azalması, hat empedans değeri ile hat kayıp değerinin önemli bir ölçüde artmasına neden olur. Görüldüğü gibi, sonlu yanal toprak düzlemlerin CPW yapısı üzerindeki bu tür karmaşık etkilerinin irdelenmesi, oldukça önemli bir konudur. Bu amaç için, sonlu dielektrik taban kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlem genişlikli simetrik CPW'nin yüksek frekanslardaki iletken zayıflaması, Ghione ve Goano (1997) tarafından yapılan bir çalışmada, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak elde edilmiştir.

Bilindiği üzere, eşdüzlemli iletim hatlarında genel olarak ışıma/yüzey dalga kayıpları, dielektrik kayıpları ve iletken kayıpları (omik kayıplar) olmak üzere üç çeşit kayıp söz konusudur. Eşdüzlemli iletim hatlarında yapıların doğası gereği, düşük dispersiyondaki ışıma kayıpları ihmal edilebilir. Böylece, eşdüzlemli iletim hat yapısında dielektrik taban malzemesinden kaynaklanan dielektrik kayıp ile metal iletkenlerden kaynaklanan iletken kayıpları söz konusudur.

Bu bölümde ilk olarak, Şekil 7.1a ile verilen CPW yapısının elektriksel karakteristikleri (efektif dielektrik sabiti, faz hızı ve karakteristik empedans),

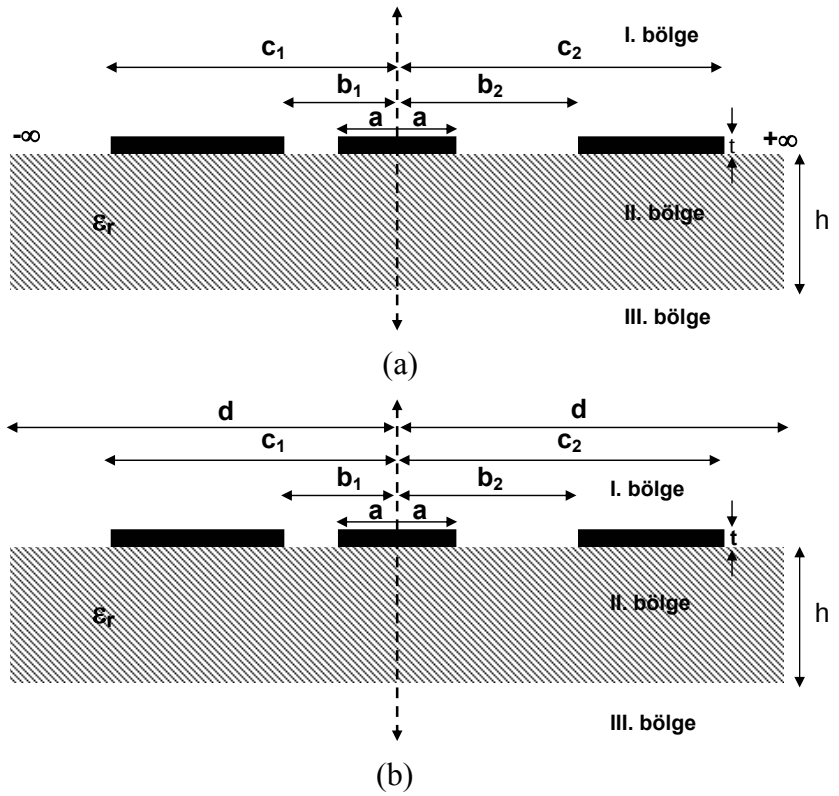
literatürde mevcut olan analitik bağıntılara göre daha sade bir şekilde elde edilmiştir. Şekil 7.1b ile verilen CPW yapısı, literatürdeki mevcut CPW yapılarına göre, mikrodalga iletim hattı uygulamalarında kullanılmak üzere daha esnek bir konfigürasyona sahiptir. Ayrıca, Şekil 7.1 ile verilen her iki CPW yapısının metal kalınlıklarının neden olduğu iletken zayıflamaları da, (omik kayıplar) ilk olarak bu tez çalışmasında, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak kapalı-form analitik ifadeler formunda elde edilmiştir.

Bu bölümde yapılan bir başka inceleme ise, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analitik bağıntılar şeklinde elde edilen iletken zayıflama sonuçlarındaki, düşük frekanslar bölgesinde meydana gelen yüksek hata oranlarıdır. Düşük frekanslar bölgesinde meydana gelen bu hataların düzeltilmesi için, Holloway ve Kuester (1995) deneysel veri sonuçları ile tam dalga analiz teknikleri sonuçlarından faydalanarak, eşdüzlemli yapılardaki t/δ (t:iletim hat metal kalınlığı, δ:deri kalınlığı) oranı için nümerik değerler içeren bir tablo türetmiştir. Ancak, söz konusu tablodaki nümerik değerlerden, iletken zayıflamaları veren hesaplamalar yapmak oldukça güçtür. Bu nedenle, bu bölümde söz konusu tablodaki nümerik değerler kullanılarak, eğri uydurma yöntemi ile yeni ampirik bağıntılar elde edilmiştir. Elde edilen bu ampirik bağıntılar, Şekil 7.1 ile verilen düzlemsel CPW'lerin iletken zayıflama hesaplamalarındaki, düşük frekanslar bölgesinde oluşan yüksek hata oranlarının düzeltilmesi için de kullanılmıştır. Ayrıca, tam asimetrik CPW yapıları için elde edilen analitik ifadelerin doğruluğu, literatürdeki tam dalga analiz ve diğer quasi-statik yaklaşım sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bu bölümde Şekil 7.1 ile verilen asimetrik sonlu toprak düzlemli ve asimetrik aralıklı CPW yapılarının analizleri sırasında, dalga yayınımının TEM modunda olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, analizi kolaylaştırmak için dielektrik taban bölgesi izotropik ve kayıpsız ortam olarak düşünülmüştür. Tam asimetrik CPW yapısında yanal toprak düzlemler sonlu boyutlara sahip olduğu için, yapının analizi Ghione ve Naldi (1987) ile Ponchak ve arkadaşları (2005) tarafından sunulan çift mod (tipik CPW modu) veya tek mod (parazitik mod) yaklaşımı yapılarak gerçekleştirilebilir. Literatürdeki CPW yapılarının iletken kayıp analizleri, çoğunlukla çift mod durumunda gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle, bu bölümdeki tam asimetrik CPW yapılarının iletken kayıp analizleri de çift mod durumunda gerçekleştirilmiştir.

7.1. Tam Asimetrik CPW'nin İletken Kayıp Analizi

Asimetrik yanal toprak düzlem genişlikli ve asimetrik aralıklı CPW yapılarının kesit görünümü Şekil 7.1 ile verilmiştir. Şekil 7.1a ile verilen yapıda, merkez şerit iletken ile yanal toprak düzlemlerin metal kalınlıkları t olarak verilmiştir. Dielektrik taban genişliği sonsuz genişlikte olup, dielektrik taban kalınlığı ise h olarak verilmiştir. Merkez şerit iletken $W\,(2a)$ genişliğinde olup, sol ve sağ yanal toprak düzlem genişlikleri, sırasıyla $D_1\,(c_1 - b_1)$ ve $D_2\,(c_2 - b_2)$ olarak verilmiştir. Merkez şerit iletken ile sol ve sağ yanal toprak düzlemler arasındaki aralık genişlikleri ise, sırasıyla $S_1\,(b_1 - a)$ ve $S_2\,(b_2 - a)$ olarak verilmiş olup, yapının bağıl dielektrik sabiti ε_r dir. Şekil 7.1b ile verilen CPW yapısı, Şekil 7.1a ile verilen CPW yapısından farklı olarak, $2d$ genişlikli dielektrik tabana sahiptir. Her iki yapının diğer geometrik parametreleri ise aynı alınmıştır.



Şekil 7.1: t-İletken Kalınlıklı Asimetrik CPW'nin Kesit Görünümleri, (a) Sonsuz Yanal Dielektrik Genişlikli, (b) Sonlu Yanal Dielektrik Genişlikli

Bilindiği üzere, quasi-TEM yaklaşımı içerisinde, şerit iletkenlerdeki akım yoğunluğu dağılımı ve buna bağlı olarak metallerdeki güç kaybı, dielektrik tabanın yok sayıldığı bir durumdan etkilenmemektedir. Bu nedenle, Şekil 7.1a ile verilen tam asimetrik CPW yapısının iletken kayıp parametresi, dielektrik taban yok sayılarak serbest hava ortamında hesaplanabilir (Gupta ve ark. 1996).

Dielektrik tabanlı eşdüzlemli iletim hatlarında, efektif dielektrik sabitinin hesaplanmasıyla, iletim hat yapılarının faz hızı, karakteristik empedansı ve iletken zayıflaması serbest hava ortamı elektriksel parametreleri kullanılarak;

$$V_f = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} c_0, \qquad Z_c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} Z_{c0}, \qquad \alpha_c = \alpha_{c0} \sqrt{\varepsilon_{eff}} \tag{7.1}$$

bağıntıları vasıtasıyla elde edilebilir. Denklem (7.1) bağıntısında yer alan; ε_{eff} efektif dielektrik sabitini, V_f faz hızını, c_0 ($c_0 \approx 3x10^8\ cm/s$) ışık hızını, Z_{c0} serbest ortam (hava ortamı) karakteristik empedansını ve α_{c0} serbest ortam iletken zayıflamasını ifade etmektedir. Şekil 7.1 ile verilen tam asimetrik CPW yapılarının iletken kayıplarını hesaplamadan önce, söz konusu yapıların birim uzunluk başına düşen hat kapasitesi, efektif dielektrik sabiti, faz hızı ve karakteristik empedans bağıntılarının hesaplanması gerekmektedir.

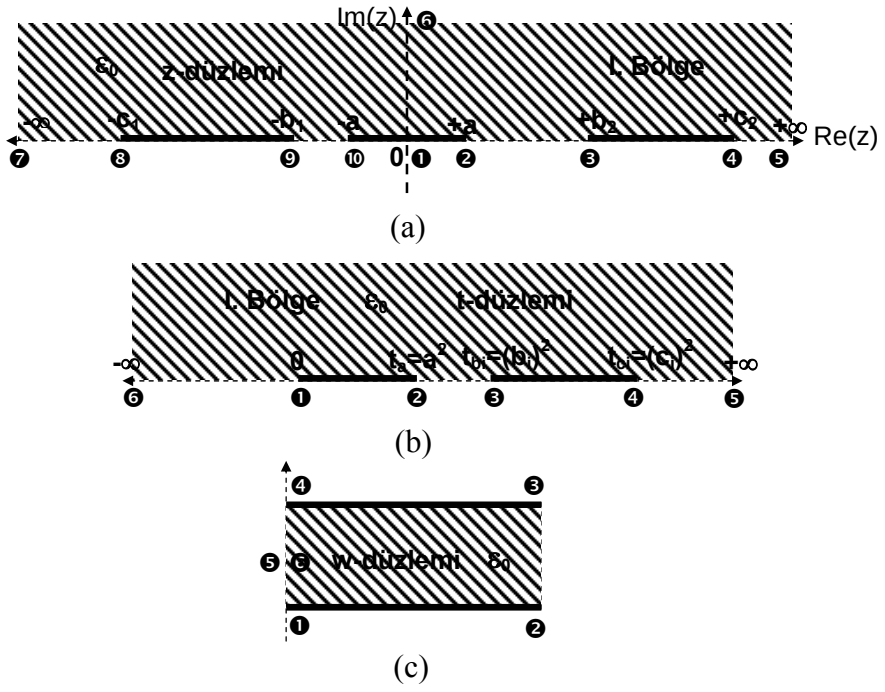
Şekil 7.1a ile verilen yapının birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi, quasi-statik yaklaşımı içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak elde edilebilir. Şekil 7.1 ile verilen yapıların toplam hat kapasitesi, üst ve alt bölgelerde oluşan serbest ortam hava kapasiteleri ile alt dielektrik bölgede oluşan dielektrik taban kapasitelerinin toplamından meydana gelmektedir. Şekil 7.2'de, Şekil 7.1a ile verilen CPW yapısının üst sağ yarı bölgesindeki serbest ortam hava kapasitesinin hesaplanması için, bir seri Konformal dönüşümler verilmiştir. Şekil 7.2'de de görüldüğü gibi, I. bölge ile temsil edilen z-düzleminin üst yarı bölgesi, $t = z^2$ dönüşüm fonksiyonu kullanılarak, Şekil 7.2b ile verilen t- düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür. Burada, z-düzlemindeki her bir geometrik noktanın t-düzlemindeki karşılıkları, Şekil 7.2b üzerinde verilmiştir. t-düzleminin üst yarı bölgesi;

$$w = \int \frac{dt}{\sqrt{t(t-t_a)(t-t_{bi})(t-t_{ci})}} \tag{7.2}$$

bağıntısı vasıtasıyla, W-düzlemi ile tasvir edilen paralel plakalı yapının iç bölgesine dönüşür. Şekil 7.2a ile verilen yapıda, I. bölge ile temsil edilen üst sol ve sağ bölgelerin geometrik özellikleri aynıdır. Geometrik benzerlikten dolayı ve işlem tekrarından kaçınmak için, bu bölgeler sırasıyla üst sol ve sağ bölgeler olmak üzere, $i = 1, 2$ şeklinde verilen alt indislerle ifade edilmiştir. Ayrıca, Şekil 7.2a'da da görüldüğü gibi, z-düzlemi ile tasvir edilen üst yarı bölge ile alt yarı bölgenin geometrik özellikleri de aynıdır. Böylece, Şekil 7.1a ile verilen yapıda, I. ve III. bölgelerin geometrik benzerliklerden faydalanılarak, I. ve III. bölgelerin serbest ortam hava kapasitesi;

$$C_0 = C_{01} + C_{02} = 2\varepsilon_0 \frac{K(k_{01})}{K(k_{01}^{'})} + 2\varepsilon_0 \frac{K(k_{02})}{K(k_{02}^{'})} = 2\varepsilon_0 \left(\frac{K(k_{01})}{K(k_{01}^{'})} + \frac{K(k_{02})}{K(k_{02}^{'})} \right) \tag{7.3}$$

şeklinde elde edilir. Burada k_{01} ve k_{02} modülleri;



Şekil 7.2: Tam Asimetrik CPW Yapısının Serbest Ortam Hava Kapasite Hesaplamaları için bir Seri Konformal Dönüşümler

$$k_{01}=\frac{a}{b_1}\sqrt{\frac{c_1^2-b_1^2}{c_1^2-a^2}},\qquad k_{01}^{'}=\sqrt{1-k_{01}^2},$$
$$k_{02}=\frac{a}{b_2}\sqrt{\frac{c_2^2-b_2^2}{c_2^2-a^2}},\qquad k_{02}^{'}=\sqrt{1-k_{02}^2} \tag{7.4}$$

şeklindedir. Şekil 7.1a ile verilen yapının II. bölge ile temsil edilen dielektrik bölge kapasitesi ise, I. ve III. bölge serbest ortam hava kapasite hesaplamalarında kullanılan benzer işlemler yapılarak hesaplanabilir. II. bölge kapasitesi elde etmek için ilk olarak, Şekil 7.3a ile verilen dielektrik bölge, $t=\sinh(\pi z/2h)$ dönüşüm fonksiyonu kullanılarak, Şekil 7.3b ile verilen alt yarı sonsuz dielektrik taban kalınlıklı bir yapıya dönüşür. Şekil 7.3b ile verilen t-düzlemindeki her bir geometrik noktalar;

$$t_a=\sinh(\pi a/2h),\qquad t_{b1}=\sinh(\pi b_1/2h),\qquad t_{c1}=\sinh(\pi c_1/2h),$$
$$t_{b2}=\sinh(\pi b_2/2h),\qquad t_{c1}=\sinh(\pi c_2/2h), \tag{7.5}$$

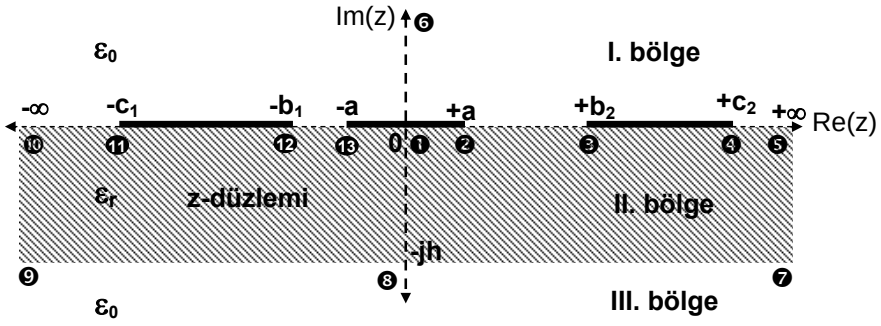
şeklinde ifade edilir. t-düzlemi ile tasvir edilen sonsuz yanal dielektrik taban genişlikli ve sonsuz dielektrik taban kalınlıklı alt yarı bölgenin sağ kısmı ise, $x=t^2$ dönüşüm fonksiyonu kullanılarak, x-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür. x-düzlemindeki her bir geometrik noktaya karşılık gelen parametreler Şekil 7.3c üzerinde verilmiştir. Son olarak, Şekil 7.3c ile verilen x-düzleminin üst yarı bölgesi;

$$w=\int\frac{1}{\sqrt{x(x-x_a)(x-x_{bi})(x-x_{ci})}}dx \tag{7.6}$$

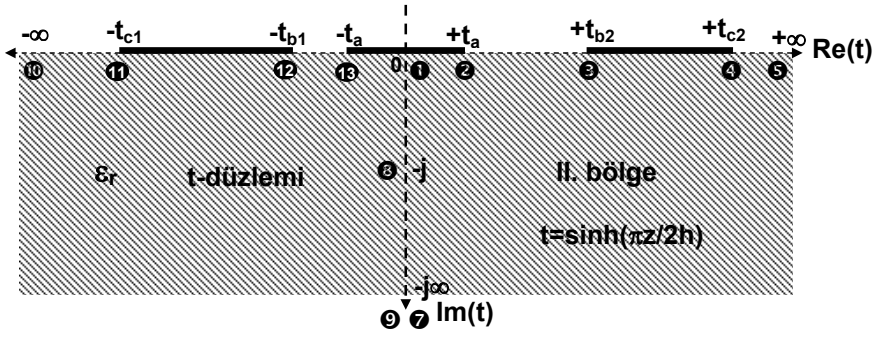
integrali vasıtasıyla, Şekil 7.3d ile verilen paralel plakalı bir yapının iç bölgesine dönüşür. Şekil 7.3b ile verilen ve II. bölge ile temsil edilen konfigürasyonda, alt sağ ve sol bölgelerin geometrik benzerliğinden dolayı ve işlem tekrarından kaçınmak için bu bölgeler sırasıyla, $i=1,2$ şeklinde verilen alt indislerle ifade edilmiştir. Böylece, her bir sağ ve sol dielektrik bölge kapasiteleri, benzer işlemler yapılarak hesaplanabilir. Böylece, Şekil 7.1a ile verilen yapının dielektrik bölge kapasitesi;

$$C_d = C_{d1} + C_{d2} = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)\frac{K(k_{d1})}{K(k_{d1}^{'})} + \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)\frac{K(k_{d2})}{K(k_{d2}^{'})}$$
$$= \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)\left(\frac{K(k_{d1})}{K(k_{d1}^{'})} + \frac{K(k_{d2})}{K(k_{d2}^{'})}\right) \tag{7.7}$$

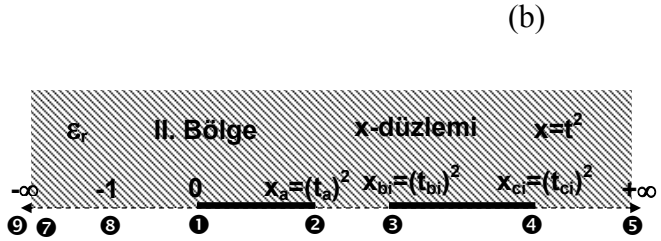
şeklinde elde edilir. Burada k_{d1} ve k_{d2} modülleri;



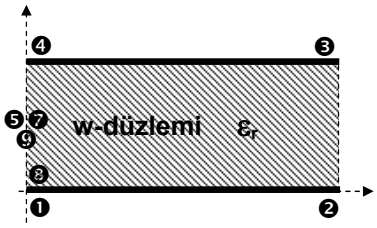
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 7.3 Tam Asimetrik CPW Yapısının Dielektrik Bölge Kapasite Hesaplamaları için bir Seri Konformal Dönüşümler

$$k_{d1} = \frac{\sinh(\pi a/2h)}{\sinh(\pi b_1/2h)}\sqrt{\frac{\sinh(\pi c_1/2h)^2 - \sinh(\pi b_1/2h)^2}{\sinh(\pi c_1/2h)^2 - \sinh(\pi a/2h)}}, \quad k'_{d1} = \sqrt{1-k_{d1}^2},$$

$$k_{d2} = \frac{\sinh(\pi a/2h)}{\sinh(\pi b_2/2h)}\sqrt{\frac{\sinh(\pi c_2/2h)^2 - \sinh(\pi b_2/2h)^2}{\sinh(\pi c_2/2h)^2 - \sinh(\pi a/2h)}}, \quad k'_{d2} = \sqrt{1-k_{d2}^2} \tag{7.8}$$

şeklindedir. Şekil 7.1a ile verilen tam asimetrik CPW'nin efektif dielektrik sabiti,

$$\varepsilon_{eff1} = \frac{C_t(\varepsilon_r)}{C_t(1)} = 1 + q_1(\varepsilon_r - 1), \qquad q_1 = \frac{1}{2}\frac{\dfrac{K(k_{d1})}{K(k'_{d1})} + \dfrac{K(k_{d2})}{K(k'_{d2})}}{\dfrac{K(k_{01})}{K(k'_{01})} + \dfrac{K(k_{02})}{K(k'_{02})}} \tag{7.9}$$

şeklinde elde edilir. Sonuç olarak, efektif dielektrik sabiti bağıntısı kullanılarak tam asimetrik CPW'nin karakteristik empedansı;

$$Z_{01} = \frac{60\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff1}}}\frac{1}{\left[\dfrac{K(k_{01})}{K(k'_{01})} + \dfrac{K(k_{02})}{K(k'_{02})}\right]} \tag{7.10}$$

şeklinde elde edilir.

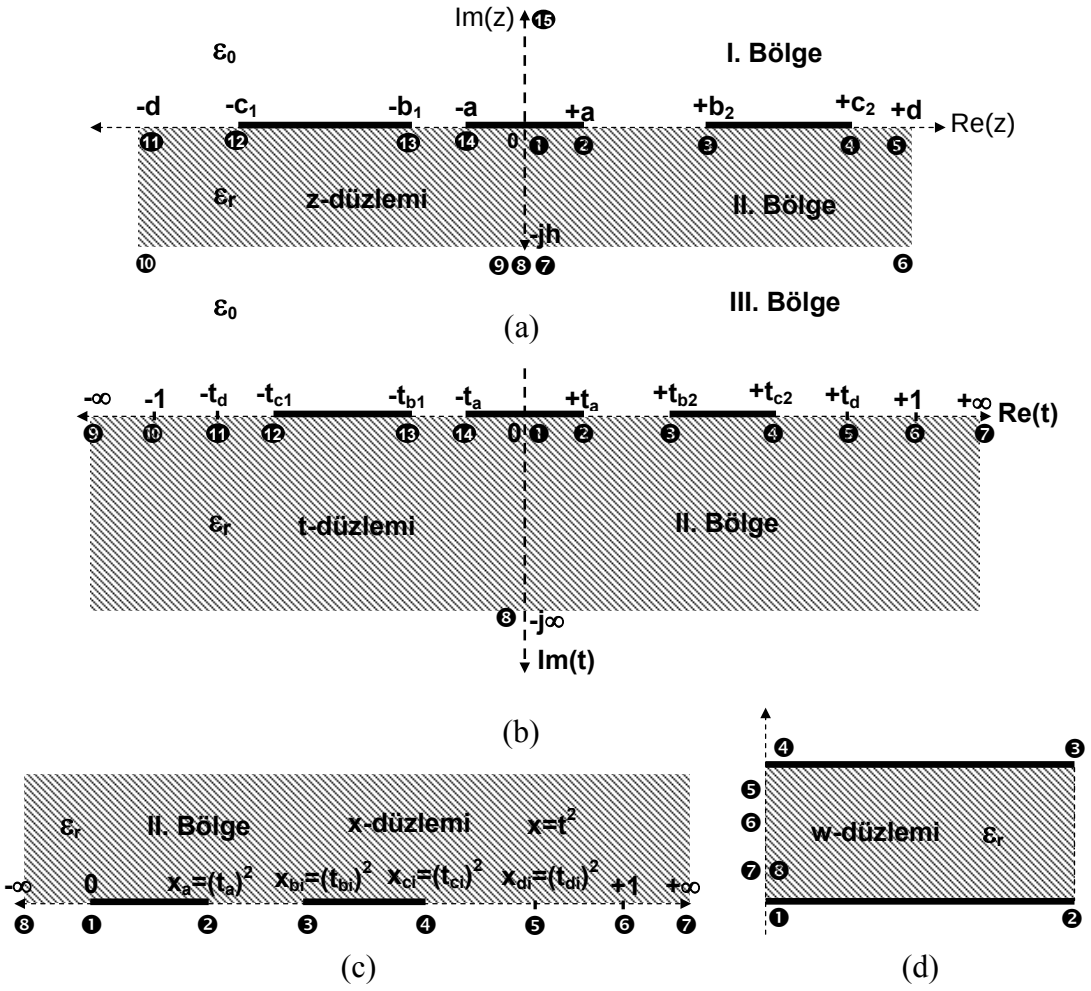
Şekil 7.1b ile verilen sonlu dielektrik taban genişlikli ve sonlu dielektrik taban kalınlıklı tam asimetrik CPW'nin birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi, Şekil 7.1a ile verilen yapının kapasite hesaplamalarındaki benzer işlemler kullanılarak elde edilebilir. Şekil 7.1 ile verilen her iki yapının geometrik benzerliğinden dolayı, serbest ortam hava kapasiteleri birbirine eşittir. Her iki yapı arasındaki farklılık, dielektrik bölgelerde oluşan kapasite değerleridir. Şekil 7.1b ile verilen yapının dielektrik bölge kapasitesi, Şekil 7.4 ile verilen bir seri Konformal dönüşümler kullanılarak hesaplanabilir. İlk olarak, Şekil 7.4a ile verilen yapının II. bölge ile temsil edilen dielektrik taban bölgesi, ters Schwarz-Christoffel dönüşümünden faydalanılarak aşağıda verilen integral vasıtasıyla;

$$Z = \int \frac{dt}{\sqrt{(t^2-1)(t^2-t_d^2)}} \tag{7.11}$$

Şekil 7.4b ile verilen t-düzleminin alt yarı bölgesine dönüşür. Şekil 7.4b ile verilen t-düzlemindeki t_d ifadesi;

$$t_d = \left[\frac{\exp(\pi d/h)-2}{\exp(\pi d/h)+2}\right]^2, \qquad 1 < \frac{d}{h} < \infty,$$

$$t_d = \sqrt{1-\left[\frac{\exp(\pi h/d)-2}{\exp(\pi h/d)+2}\right]^4}, \qquad 0 < \frac{d}{h} < 1, \tag{7.12}$$



Şekil 7.4: Sonlu Yanal Dielektrik Taban Genişlikli Asimetrik CPW'nin Dielektrik Bölge Kapasite Hesaplamaları için bir Seri Konformal Dönüşümler

şeklindedir. t-düzlemindeki t_a, t_{b1}, t_{c1}, t_{b2} ve t_{c2} ifadeleri ise;

$$F(\arcsin(t_a/t_d),t_d)=\frac{a}{d}K(t_d),\qquad F(\arcsin(t_{b1}/t_d),t_d)=\frac{b_1}{d}K(t_d),$$

$$F(\arcsin(t_{c1}/t_d),t_d)=\frac{c_1}{d}K(t_d),\qquad F(\arcsin(t_{b2}/t_d),t_d)=\frac{b_2}{d}K(t_d),\qquad (7.13)$$

$$F(\arcsin(t_{c2}/t_d),t_d)=\frac{c_2}{d}K(t_d),\qquad \frac{K(t_d)}{K(t_d^{'})}=\frac{d}{h}$$

şeklindedir. Şekil 7.4b ile verilen yapıda alt yarı düzlemin sağ bölgesi, $x=t^2$ dönüşüm fonksiyonu vasıtasıyla, x-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür. x-düzlemindeki her bir geometrik noktanın karşılığı, Şekil 7.4c üzerinde verilmiştir. x-düzleminin üst yarı bölgesi ise;

$$w=\int\frac{dx}{\sqrt{x(x-x_a)(x-x_{bi})(x-x_{ci})}} \qquad (7.14)$$

integrali vasıtasıyla, Şekil 7.4d ile verilen w-düzleminin iç bölgesine dönüşür. Şekil 7.4b'deki II. bölge ile temsil edilen konfigürasyonda, alt sağ ve sol bölgelerin geometrik özellikleri benzerdir. Geometrik benzerliklerden faydalanılarak, alt sağ ve sol bölgeler sırasıyla, $i=1,2$ şeklinde verilen alt indislerle ifade edilebilir. İşlem tekrarından kaçınmak için, her bir bölgenin kapasiteleri benzer işlemler yapılarak hesaplanabilir. Böylece, Şekil 7.1b ile verilen yapının dielektrik bölge kapasitesi, aşağıda verilen bağıntı şeklinde ifade edilir:

$$\begin{aligned}C_d &= C_{d3}+C_{d4}=\varepsilon_0(\varepsilon_r-1)\frac{K(k_{d3})}{K(k_{d3}^{'})}+\varepsilon_0(\varepsilon_r-1)\frac{K(k_{d4})}{K(k_{d4}^{'})}\\ &=\varepsilon_0(\varepsilon_r-1)\left(\frac{K(k_{d3})}{K(k_{d3}^{'})}+\frac{K(k_{d4})}{K(k_{d4}^{'})}\right)\end{aligned} \qquad (7.15)$$

Yukarıdaki bağıntıda geçen k_{d3} ve k_{d4} modülleri;

$$k_{d3} = \frac{t_a}{t_{b1}}\sqrt{\frac{t_{c1}^2 - t_{b1}^2}{t_{c1}^2 - t_a^2}}, \qquad k_{d3}^{'} = \sqrt{1-k_{d3}^2},$$

$$k_{d4} = \frac{t_a}{t_{b2}}\sqrt{\frac{t_{c2}^2 - t_{b2}^2}{t_{c2}^2 - t_a^2}}, \qquad k_{d4}^{'} = \sqrt{1-k_{d4}^2}, \tag{7.16}$$

şeklindedir. Şekil 7.1b ile verilen tam asimetrik CPW'nin efektif dielektrik sabiti;

$$\varepsilon_{eff2} = \frac{C_t(\varepsilon_r)}{C_t(1)} = 1 + q_2(\varepsilon_r - 1), \qquad q_2 = \frac{1}{2}\frac{\dfrac{K(k_{d3})}{K(k_{d3}^{'})} + \dfrac{K(k_{d4})}{K(k_{d4}^{'})}}{\dfrac{K(k_{01})}{K(k_{01}^{'})} + \dfrac{K(k_{02})}{K(k_{02}^{'})}} \tag{7.17}$$

şeklinde elde edilebilir. Sonuç olarak, Şekil 7.1b ile verilen tam asimetrik CPW'nin karakteristik empedansı, aşağıda verilen bağıntı şeklinde ifade edilir:

$$Z_{02} = \frac{60\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff2}}}\frac{1}{\left[\dfrac{K(k_{01})}{K(k_{01}^{'})} + \dfrac{K(k_{02})}{K(k_{02}^{'})}\right]} \tag{7.18}$$

Şekil 7.1'de kesit görünümleri verilen tam asimetrik CPW yapılarının iletken zayıflama hesaplamalarında, ilk olarak yapıların serbest ortamdaki karakteristik empedans ifadelerini hesaplamak gerekmektedir. Her iki yapının da serbest ortamdaki karakteristik empedans ifadeleri, Denklem (7.1), Denklem (7.10) ve Denklem (7.18) bağıntılarından faydalanılarak;

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\left[\dfrac{K(k_{01})}{K(k_{01}^{'})} + \dfrac{K(k_{02})}{K(k_{02}^{'})}\right]} \tag{7.19}$$

şeklinde elde edilir.

Bilindiği üzere, şerit ve mikroşerit yapılarda olduğu gibi, Şekil 7.1 ile verilen tam asimetrik CPW yapılarındaki iletken metal kalınlıkları, deri kalınlığından daha büyük ise, metal iletkenlerin neden olduğu iletken zayıflama ifadesi aşağıda verilen bağıntı şeklinde yazılabilir (Ghione 1993):

$$\alpha_{c0} = \frac{P_c}{2P(z)} = \frac{R_s}{2Z_0 I^2} \oint_{\gamma} |J|^2 dl \qquad Neper/metre,$$

$$R_s = \frac{1}{\delta\sigma} \quad ohm, \qquad \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad metre \tag{7.20}$$

Denklem (7.20) bağıntısında geçen, I hat tarafından taşınan toplam akımı (rms), J hattın γ olarak verilen iletken çevresi üzerindeki akım yoğunluğunu, R_s yüzey rezistansını, σ simens/metre olarak metallerin iletkenlik katsayısını, δ metre cinsinden deri kalınlığını, $\omega(2\pi f)$ radyan cinsinden açısal frekansı ve $\mu(\mu_0\mu_r)$ ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ $Henry/metre$) iletkenlerin geçirgenlik katsayısını ifade etmektedir.

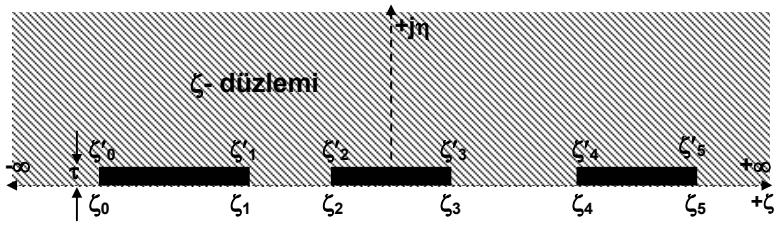
Tam asimetrik CPW yapısı için iletken kayıp ifadesi hesaplamalarında, ilk olarak Denklem (7.20) bağıntısında yer alan J akım yoğunluğunu normalize etmek gerekmektedir. Normalize işlemi, ince metal kalınlıklı iletim hatlarında, yaklaşık olarak sonsuz ince metal kalınlıklı hatlar üzerinden yapılabilir. Her iki yapı için de, J akım yoğunluğunun normalizasyonu;

$$J(z) = \pm\bar{I}\left|\frac{1}{\sqrt{(z_0 - z)(z_1 - z)(z_2 - z)(z_3 - z)(z_4 - z)(z_5 - z)}}\right| \tag{7.21}$$

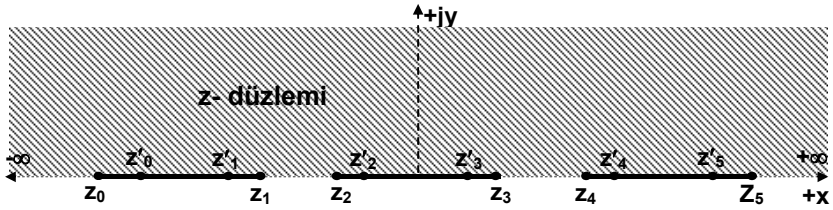
bağıntısı vasıtasıyla yapılabilir. Burada $\bar{I}$, pozitif bir değer olarak normalizasyon sabitidir. Şekil 7.2a ile verilen sonsuz ince kalınlıklı tam asimetrik CPW'nin akım yoğunluğu, $[-\infty, -c_1]$, $[-b_1, -a]$ ve $[a, b_2]$ ve $[c_2, +\infty]$ aralıklarında sıfır olup, toprak düzlemler ile merkez şerit iletken üzerinde ise zıt işaretlidir. Tam asimetrik CPW için, merkez şerit iletken üzerindeki J akım yoğunluğunun integrasyonu yapılarak aşağıda verilen bağıntıya ulaşılabilir:

$$I = 2\int_{-a}^{+a} |J\|dz| = 2\bar{I}\left[\frac{K(k_{01})}{b_1\sqrt{c_1^2 - a^2}} + \frac{K(k_{02})}{b_2\sqrt{c_2^2 - a^2}}\right] \tag{7.22}$$

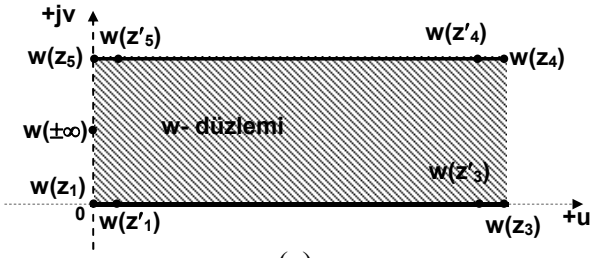
Burada k_{01} ve k_{02} modülleri, Denklem (7.4) ile verilmiştir. Denklem (7.22)'deki 2 katsayısı, iletken metallerin alt ve üst yüzeylerinden akan akımı hesaba katmak



(a)



(b)



(c)

Şekil 7.5: *t*- Metal Kalınlıklı Asimetrik CPW'nin İletken Zayıflamasını Hesaplamak için bir Seri Konformal Dönüşümler, (a) Orijinal ζ-Düzlem, (b) Dönüştürülmüş Z-Düzlemi, (c) W-Düzlemindeki Paralel Plakalı Yapı

için verilmiştir. Denklem (7.20) bağıntısında yer alan $Z_0 I^2$ ifadesi, Denklem (7.19) ve Denklem (7.22) bağıntılarından faydalanılarak;

$$Z_0 I^2 = \frac{240\pi \bar{I}^2}{\left[\dfrac{K(k_{01})}{K(k_{01}^{'})} + \dfrac{K(k_{02})}{K(k_{02}^{'})}\right]} \left[\frac{K(k_{01})}{b_1\sqrt{c_1^2 - a^2}} + \frac{K(k_{02})}{b_2\sqrt{c_2^2 - a^2}}\right]^2 \tag{7.23}$$

şeklinde elde edilir. *t* metal kalınlıklı tam asimetrik CPW yapısının akım yoğunluğu, iki adımlı Konformal dönüşüm kullanılarak hesaplanabilir. İlk olarak, Şekil 7.5a ile tasvir edilen orijinal düzlemin (ζ-düzlemi) üst yarı bölgesi, *z*-düzlemi ile tasvir edilen sonsuz ince kalınlıklı yapının üst yarı bölgesine dönüştürülür. İkinci adımda ise, *z*-düzlemi ile tasvir edilen sonsuz ince kalınlıklı yapının üst yarı bölgesi,

w-düzlemi ile tasvir paralel plakalı bir yapıya dönüştürülür. z-düzleminden w-düzlemine dönüşüm için, sonsuz ince metal kalınlıklı (sıfır kalınlıklı) yapılardaki benzer Konformal dönüşümler kullanılabilir. ζ-düzleminden z-düzlemine geçişi ifade eden Konformal dönüşümlerde ise, bazı yaklaşımların yapılması gerektirmektedir. Ayrıca, ζ-düzleminden z-düzlemine geçişi veren integral bağıntılarının çözümü oldukça karmaşık işlemler gerektirmektedir. Şekil 7.5a ile verilen orijinal düzlemdeki yapıda, τ yarım şerit kalınlığı ($\tau = t/2$) olmak üzere, $\zeta_i^{'} = \zeta_i + j\tau$ $(i = 0,1,2,3,4,5)$ ifadesi yazılabilir. z-düzlemi ile verilen noktalar $z_i = z(\zeta_i)$ ve $z_i^{'} = z(\zeta_i^{'})$ $(i = 0,1,2,3,4,5)$ olmak üzere, ζ-düzleminin üst yarı bölgesi;

$$\zeta = \int_{z_0}^{z} \frac{d\zeta}{dz} dz = B\int_{z_0}^{z} \sqrt{\frac{(z_0^{'}-z)(z_1^{'}-z)(z_2^{'}-z)(z_3^{'}-z)(z_4^{'}-z)(z_5^{'}-z)}{(z_0-z)(z_1-z)(z_2-z)(z_3-z)(z_4-z)(z_5-z)}}\, dz \qquad (7.24)$$

Schwarz-Christoffel dönüşümü kullanılarak, z-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür. Burada B katsayısı ölçek faktörüdür. Denklem (7.24) ile verilen bağıntının çözümü, oldukça güç ve karmaşıktır. Bu nedenle, $\tau << |\zeta_1 - \zeta_0|$, $\tau << |\zeta_3 - \zeta_2|$ ve $\tau << |\zeta_5 - \zeta_4|$ yaklaşıklıkları ile $z_0 < z < z_0^{'}$ yaklaşıklığı yapılarak, Denklem (7.24) ile verilen ifade;

$$\zeta = \int \frac{z_0^{'} - z}{z_0 - z} dz \qquad (7.25)$$

bağıntısı şekline indirgenebilir. Denklem (7.24) ile verilen integral ifadesine göre, Denklem (7.25) ile verilen bağıntısının çözümü daha kolaydır. Denklem (7.25) ile verilen integral bağıntısının sadece bir geometrik noktası için çözümü;

$$j\tau = \int_{\zeta_0}^{\zeta_0 + j\tau} d\zeta = \int_{z_0}^{z_0^{'}} \frac{d\zeta}{dz} dz \approx \int_{z_0}^{z_0^{'}} \sqrt{\frac{z_0^{'} - z}{z_0 - z}}\, dz = j\frac{\pi}{2}(z_0^{'} - z_0) \qquad (7.26)$$

şeklinde yapılabilir. Denklem (7.26) ile verilen integral çözümünden faydalanılarak, z-düzlemindeki parametrelerin tümü, orijinal düzlemdeki (ζ-düzlemi) t şerit kalınlığına bağlı olarak, aşağıda verilen bağıntılar şeklinde ifade edilir:

$$\begin{aligned} z_0^{'} - z_0 &= 2\tau/\pi, \qquad z_1^{'} - z_1 = 2\tau/\pi, \qquad z_2 - z_2^{'} = 2\tau/\pi, \\ z_3^{'} - z_3 &= 2\tau/\pi, \qquad z_4 - z_4^{'} = 2\tau/\pi, \qquad z_5^{'} - z_5 = 2\tau/\pi \end{aligned} \tag{7.27}$$

Denklem (7.27) ile verilen yaklaşık ifadeler, iletken kayıp analizin ilerleyen kısımlarında kullanılacaktır.

Denklem (7.20) içerisinde yer alan $\oint_{\gamma} |J|^2 dl$ akım yoğunluğu ifadesi, aşağıda verilen bağıntı şeklinde ifade edilir:

$$\oint_{\gamma} |J|^2 dl = 2\left(\int_{\zeta_0}^{\zeta_1} J^2(\zeta) |d\zeta| + \int_{\zeta_2}^{\zeta_3} J^2(\zeta) |d\zeta| + \int_{\zeta_4}^{\zeta_5} J^2(\zeta) |d\zeta| \right) \tag{7.28}$$

Denklem (7.28) içinde yer alan integraller, $J(\zeta) = \bar{I} |dw/dz| |dz/d\zeta|$ şeklinde verilen ara dönüşüm ifadesi kullanılarak;

$$\oint_{\gamma} |J|^2 dl = 2\bar{I}^2 \left(\int_{z_0}^{z_1} P(z) |dz| + \int_{z_2}^{z_3} P(z) |dz| + \int_{z_4}^{z_5} P(z) |dz| \right),$$

$$P(z) = \left| \frac{1}{\sqrt{(z-z_0)(z-z_0^{'})(z-z_1)(z-z_1^{'})(z-z_2)(z-z_2^{'})}} \right| \cdot \left| \frac{1}{\sqrt{(z-z_3)(z-z_3^{'})(z-z_4)(z-z_4^{'})(z-z_5)(z-z_5^{'})}} \right| \tag{7.29}$$

şeklinde yazılabilir. Yukarıdaki bağıntılarda geçen $\bar{I}$ ifadesi, Denklem (7.22) içerisinde verilen toplam şerit akımı ile ilişkili olup, $|dw/dz|$ ve $|dz/d\zeta|$ ifadeleri ise, sırasıyla, Denklem (7.2) ve Denklem (7.24) ile verilmiştir. Denklem (7.29) ile verilen bağıntıdaki integral ifadeleri, tam asimetrik CPW yapısının merkez şerit ile sol ve sağ toprak düzlemleri için, normalize kayıp faktörünü ifade etmektedir. Normalize kayıp faktörünü ifade eden bu integrallerin çözümü için, bazı yaklaşıklıkların yapılması gereklidir. Tam asimetrik CPW yapısında, τ yarım metal kalınlığı $(\tau = t/2)$ için $\tau << W(2a)$, $\tau << D_1(c_1 - b_1)$, $\tau << D_2(c_2 - b_2)$, $\tau << S_1(b_1 - a)$ ve $\tau << S_2(b_2 - a)$ yaklaşıklıkları yapılabilir. Bu yaklaşıklıklar

yapılarak, Denklem (7.29) bağıntısında yer alan integral ifadeleri, tam asimetrik CPW yapısı için orijinal düzlemdeki (ζ-düzlemi) parametrelere bağlı olarak, aşağıda verilen bağıntılar şeklinde ifade edilir:

$$\begin{aligned}
\int_{z_0}^{z_1} P(z)dz \approx & \frac{1}{(\zeta_1-\zeta_0)(\zeta_2-\zeta_0)(\zeta_3-\zeta_0)(\zeta_4-\zeta_0)(\zeta_5-\zeta_0)}\left\{\ln\left[\frac{2\pi}{\tau}(\zeta_1-\zeta_0)\right]+\pi\right\} \\
& + \frac{1}{(\zeta_1-\zeta_0)(\zeta_2-\zeta_1)(\zeta_3-\zeta_1)(\zeta_4-\zeta_1)(\zeta_5-\zeta_1)}\left\{\ln\left[\frac{2\pi}{\tau}(\zeta_1-\zeta_0)\right]+\pi\right\} \\
& + \frac{1}{(\zeta_2-\zeta_0)(\zeta_2-\zeta_1)(\zeta_3-\zeta_2)(\zeta_4-\zeta_2)(\zeta_5-\zeta_2)}\ln\left(\frac{\zeta_2-\zeta_1}{\zeta_2-\zeta_0}\right) \\
& + \frac{1}{(\zeta_3-\zeta_0)(\zeta_3-\zeta_1)(\zeta_3-\zeta_2)(\zeta_4-\zeta_3)(\zeta_5-\zeta_3)}\ln\left(\frac{\zeta_3-\zeta_0}{\zeta_3-\zeta_1}\right) \\
& + \frac{1}{(\zeta_4-\zeta_0)(\zeta_4-\zeta_1)(\zeta_4-\zeta_2)(\zeta_4-\zeta_3)(\zeta_5-\zeta_4)}\ln\left(\frac{\zeta_4-\zeta_1}{\zeta_4-\zeta_0}\right) \\
& + \frac{1}{(\zeta_5-\zeta_0)(\zeta_5-\zeta_1)(\zeta_5-\zeta_2)(\zeta_5-\zeta_3)(\zeta_5-\zeta_4)}\ln\left(\frac{\zeta_5-\zeta_0}{\zeta_5-\zeta_1}\right)
\end{aligned} \tag{7.30a}$$

$$\begin{aligned}
\int_{z_2}^{z_3} P(z)dz \approx & \frac{1}{(\zeta_3-\zeta_0)(\zeta_3-\zeta_1)(\zeta_3-\zeta_2)(\zeta_4-\zeta_3)(\zeta_5-\zeta_3)}\left\{\ln\left[\frac{2\pi}{\tau}(\zeta_3-\zeta_2)\right]+\pi\right\} \\
& + \frac{1}{(\zeta_2-\zeta_0)(\zeta_2-\zeta_1)(\zeta_3-\zeta_2)(\zeta_4-\zeta_2)(\zeta_5-\zeta_2)}\left\{\ln\left[\frac{2\pi}{\tau}(\zeta_3-\zeta_2)\right]+\pi\right\} \\
& + \frac{1}{(\zeta_1-\zeta_0)(\zeta_2-\zeta_0)(\zeta_3-\zeta_0)(\zeta_4-\zeta_0)(\zeta_5-\zeta_0)}\ln\left(\frac{\zeta_3-\zeta_2}{\zeta_2-\zeta_0}\right) \\
& + \frac{1}{(\zeta_1-\zeta_0)(\zeta_2-\zeta_1)(\zeta_3-\zeta_1)(\zeta_4-\zeta_1)(\zeta_5-\zeta_1)}\ln\left(\frac{\zeta_2-\zeta_1}{\zeta_3-\zeta_1}\right) \\
& + \frac{1}{(\zeta_4-\zeta_0)(\zeta_4-\zeta_1)(\zeta_4-\zeta_2)(\zeta_4-\zeta_3)(\zeta_5-\zeta_4)}\ln\left(\frac{\zeta_4-\zeta_3}{\zeta_4-\zeta_2}\right) \\
& + \frac{1}{(\zeta_5-\zeta_0)(\zeta_5-\zeta_1)(\zeta_5-\zeta_2)(\zeta_5-\zeta_3)(\zeta_5-\zeta_4)}\ln\left(\frac{\zeta_5-\zeta_2}{\zeta_5-\zeta_3}\right)
\end{aligned} \tag{7.30b}$$

$$\int_{z_4}^{z_5} P(z)dz \approx \frac{1}{(\zeta_4-\zeta_0)(\zeta_4-\zeta_1)(\zeta_4-\zeta_2)(\zeta_4-\zeta_3)(\zeta_5-\zeta_4)}\left\{\ln\left[\frac{2\pi}{\tau}(\zeta_5-\zeta_4)\right]+\pi\right\}$$
$$+\frac{1}{(\zeta_5-\zeta_0)(\zeta_5-\zeta_1)(\zeta_5-\zeta_2)(\zeta_5-\zeta_3)(\zeta_5-\zeta_4)}\left\{\ln\left[\frac{2\pi}{\tau}(\zeta_5-\zeta_4)\right]+\pi\right\}$$
$$+\frac{1}{(\zeta_1-\zeta_0)(\zeta_2-\zeta_0)(\zeta_3-\zeta_0)(\zeta_4-\zeta_0)(\zeta_5-\zeta_0)}\ln\left(\frac{\zeta_5-\zeta_0}{\zeta_4-\zeta_0}\right)$$
$$+\frac{1}{(\zeta_1-\zeta_0)(\zeta_2-\zeta_1)(\zeta_3-\zeta_1)(\zeta_4-\zeta_1)(\zeta_5-\zeta_1)}\ln\left(\frac{\zeta_4-\zeta_1}{\zeta_5-\zeta_1}\right) \quad (7.30c)$$
$$+\frac{1}{(\zeta_2-\zeta_0)(\zeta_2-\zeta_1)(\zeta_3-\zeta_2)(\zeta_4-\zeta_2)(\zeta_5-\zeta_2)}\ln\left(\frac{\zeta_5-\zeta_2}{\zeta_4-\zeta_2}\right)$$
$$+\frac{1}{(\zeta_3-\zeta_0)(\zeta_3-\zeta_1)(\zeta_3-\zeta_2)(\zeta_4-\zeta_3)(\zeta_5-\zeta_3)}\ln\left(\frac{\zeta_4-\zeta_3}{\zeta_5-\zeta_3}\right)$$

Denklem (7.30) ile elde edilen ifadeler, Denklem (7.29) ile verilen bağıntıdaki yerlerine konularak, iletken kayıp faktörü elde edilir. $z_i - z_j \approx \zeta_i - \zeta_j$ $(i, j = 0,1, 2, 3, 4,5)$ yaklaşıklıkları yapılarak, tam asimetrik CPW'nin iletken kayıp zayıflaması, Denklem (7.29) ve Denklem (7.23) ile elde edilen ifadelerin, Denklem (7.20)'deki yerlerine konulmasıyla elde edilir. Sonuç olarak, serbest hava ortamındaki tam asimetrik CPW'nin iletken kayıp bağıntısı, Şekil 7.5a'daki parametreler ile Şekil 7.1'de kesit görünümleri verilen tam asimetrik CPW yapılarının geometrik boyutlarına bağlı olarak;

$$\alpha_{c0} = \frac{R_s}{240\pi}\frac{\left[\frac{K(k_{01})}{K(k_{01}^{'})}+\frac{K(k_{02})}{K(k_{02}^{'})}\right]}{\left[\frac{K(k_{01})}{b_1\sqrt{c_1^2-a^2}}+\frac{K(k_{02})}{b_2\sqrt{c_2^2-a^2}}\right]^2}[A] \quad (7.31)$$

şeklinde ifade edilir.

Şekil 7.1 ile verilen tam asimetrik CPW'nin serbest hava ortamındaki kayıp ifadeleri, Denklem 7.1 içerisinde yer alan $\alpha_c = \alpha_{c0}\sqrt{\varepsilon_{eff}}$ bağıntısı kullanılarak, dielektrik tabanlı hatlar için genişletilebilir. Böylece, Şekil 7.1 ile verilen dielektrik tabanlı tam asimetrik CPW yapılarının iletken kayıp ifadesi;

$$\alpha_{c(i)} = \frac{R_s\sqrt{\varepsilon_{eff\,(i)}}}{240\pi} \frac{\left[\dfrac{K(k_{01})}{K(k_{01}^{'})} + \dfrac{K(k_{02})}{K(k_{02}^{'})}\right]}{\left[\dfrac{K(k_{01})}{b_1\sqrt{c_1^2 - a^2}} + \dfrac{K(k_{02})}{b_2\sqrt{c_2^2 - a^2}}\right]^2} [A] \tag{7.32}$$

şeklinde elde edilir. Burada $i = 1, 2$ olmak üzere, Şekil 7.1 ile verilen tam asimetrik CPW yapıları için, Denklem (7.9) ve Denklem (7.17) ile verilen efektif dielektrik sabiti bağıntılarını ifade etmektedir. Ayrıca, Denklem (7.31) ve Denklem (7.32) bağıntılarında geçen A ifadesi, $A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6$ olmak üzere;

$$A_1 = \frac{1}{(c_1 - b_1)(c_1 - a)(c_1 + a)(c_1 + b_2)(c_2 + c_1)} \left\{ \ln\left[\frac{4\pi}{t} \frac{(c_1 - b_1)(c_1 + a)(c_2 + c_1)}{(c_1 - a)(c_1 + b_2)} \right] + \pi \right\}$$

$$A_2 = \frac{1}{(c_1 - b_1)(b_1 - a)(b_2 + b_1)(c_2 + b_1)(b_1 + a)} \left\{ \ln\left[\frac{4\pi}{t} \frac{(c_1 - b_1)(b_1 - a)(b_2 + b_1)}{(b_1 + a)(c_2 + b_1)} \right] + \pi \right\}$$

$$A_3 = \frac{1}{(c_1 - a)(b_1 - a)(2a)(c_2 + a)(b_2 + a)} \left\{ \ln\left[\frac{4\pi}{t} \frac{(2a)(b_1 - a)(c_2 + a)}{(c_1 - a)(b_2 + a)} \right] + \pi \right\} \tag{7.33}$$

$$A_4 = \frac{1}{(c_1 + a)(2a)(b_2 - a)(c_2 - a)(b_1 + a)} \left\{ \ln\left[\frac{4\pi}{t} \frac{(2a)(c_1 + a)(b_2 - a)}{(b_1 + a)(c_2 - a)} \right] + \pi \right\}$$

$$A_5 = \frac{1}{(c_1 + b_2)(b_2 + b_1)(b_2 - a)(c_2 - b_2)(b_2 + a)} \left\{ \ln\left[\frac{4\pi}{t} \frac{(c_2 - b_2)(b_1 + b_1)(b_2 - a)}{(c_1 + b_2)(b_2 + a)} \right] + \pi \right\}$$

$$A_6 = \frac{1}{(c_2 + c_1)(c_2 + b_1)(c_2 + a)(c_2 - a)(c_2 - b_2)} \left\{ \ln\left[\frac{4\pi}{t} \frac{(c_2 - b_2)(c_2 + a)(c_2 + c_1)}{(c_2 + b_1)(c_2 - a)} \right] + \pi \right\}$$

şeklindedir. Şekil 7.1 ile verilen tam asimetrik CPW yapısı için, yüzey empedans sınır şartlarında, şerit iletken köşelerin geometrik özelliğinden dolayı (köşe açılarının farklı olması) Denklem (7.32) bağıntısı ile ifade edilen iletken kayıp ifadesinin doğruluk derecesi, düşük frekanslar bölgesinde azalmaktadır. Bu tür problemlerin

üstesinden gelmek için, Holloway ve Kuester (1995), simetrik CPW yapısı için durdurma mesafesi (Δ) olarak tanımlanan t/δ (t:iletim hat metal kalınlığı, δ:deri kalınlığı) oranı için nümerik değerler içeren bir tablo sunmuştur. Holloway ve Kuester (1995) tarafından sunulan yaklaşım, Şekil 7.1 ile verilen tam asimetrik CPW yapıları için de uygulanabilir. Bu yaklaşımlar kullanılarak, Denklem (7.32) ile verilen bağıntı;

$$\alpha_{c(i)}^{'} \approx \mathrm{Re}\left(\frac{H_i}{Z_{0(i)}} \frac{2}{1+\sqrt{1+\dfrac{4H_i}{Z_{0(i)}\gamma_i}}} \right), \qquad \gamma_i = j\lambda_0 \sqrt{\varepsilon_{eff}^{i}} \tag{7.34}$$

şekline dönüşür. Yukarıdaki bağıntıda geçen λ_0 ifadesi, serbest ortamın dalga boyudur. H_i ifadesi ise;

$$\mathrm{H_i} = \frac{\mathrm{R_s}}{4} \frac{[\mathrm{A}]}{\left[\dfrac{\mathrm{K(k_{01})}}{\mathrm{b_1}\sqrt{\mathrm{c_1^2 - a^2}}} + \dfrac{\mathrm{K(k_{02})}}{\mathrm{b_2}\sqrt{\mathrm{c_2^2 - a^2}}} \right]^2} \tag{7.35}$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (7.32) bağıntısında yer alan A ifadesindeki $4\pi/t$ terimi, $1/\Delta$ durdurma mesafesi ile değiştirilerek, iletken kayıp bağıntısı;

$$\alpha_{c(i)}^{'} = \frac{R_s \sqrt{\varepsilon_{eff(i)}}}{240\pi} \frac{\left[\dfrac{K(k_{01})}{K(k_{01}^{'})} + \dfrac{K(k_{02})}{K(k_{02}^{'})} \right]}{\left[\dfrac{K(k_{01})}{b_1\sqrt{c_1^2 - a^2}} + \dfrac{K(k_{02})}{b_2\sqrt{c_2^2 - a^2}} \right]^2} \left[A^{'} \right] \tag{7.36}$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (7.36) bağıntısında yer alan $A^{'}$ terimi ise, $\mathrm{A^{'} = A_1^{'} + A_2^{'} + A_3^{'} + A_4^{'} + A_5^{'} + A_6^{'}}$ olmak üzere, aşağıda verilen bağıntı şeklinde ifade edilir:

$$A_1' = \frac{1}{(c_1 - b_1)(c_1 - a)(c_1 + a)(c_1 + b_2)(c_2 + c_1)} \left\{ \ln\left[\frac{1}{\Delta} \frac{(c_1 - b_1)(c_1 + a)(c_2 + c_1)}{(c_1 - a)(c_1 + b_2)} \right] \right\}$$

$$A_2' = \frac{1}{(c_1 - b_1)(b_1 - a)(b_2 + b_1)(c_2 + b_1)(b_1 + a)} \left\{ \ln\left[\frac{1}{\Delta} \frac{(c_1 - b_1)(b_1 - a)(b_2 + b_1)}{(b_1 + a)(c_2 + b_1)} \right] \right\}$$

$$A_3' = \frac{1}{(c_1 - a)(b_1 - a)(2a)(c_2 + a)(b_2 + a)} \left\{ \ln\left[\frac{1}{\Delta} \frac{(2a)(b_1 - a)(c_2 + a)}{(c_1 - a)(b_2 + a)} \right] \right\}$$

$$A_4' = \frac{1}{(c_1 + a)(2a)(b_2 - a)(c_2 - a)(b_1 + a)} \left\{ \ln\left[\frac{1}{\Delta} \frac{(2a)(c_1 + a)(b_2 - a)}{(b_1 + a)(c_2 - a)} \right] \right\} \qquad (7.37)$$

$$A_5' = \frac{1}{(c_1 + b_2)(b_2 + b_1)(b_2 - a)(c_2 - b_2)(b_2 + a)} \left\{ \ln\left[\frac{1}{\Delta} \frac{(c_2 - b_2)(b_1 + b_1)(b_2 - a)}{(c_1 + b_2)(b_2 + a)} \right] \right\}$$

$$A_6' = \frac{1}{(c_2 + c_1)(c_2 + b_1)(c_2 + a)(c_2 - a)(c_2 - b_2)} \left\{ \ln\left[\frac{1}{\Delta} \frac{(c_2 - b_2)(c_2 + a)(c_2 + c_1)}{(c_2 + b_1)(c_2 - a)} \right] \right\}$$

Holloway ve Kuester (1995) tarafından sunulan tablo değerlerinden veri türetimi yapmak, oldukça zor ve karmaşıktır. Bu nedenle, $1/\Delta$ durdurma mesafesi ifadesi, eğri uydurma yöntemi kullanılarak, aşağıda verilen bağıntı şeklinde ifade edilir:

$$X = \frac{t}{2\delta},$$

$$T = -316{,}97X^6 + 818.42X^5 - 852.3X^4$$
$$+ 632.83X^3 - 97.326X^2 + 5.856X + 9.0718, \qquad 0 < X \le 1.22$$
$$T = 9.5702X^6 - 7.6528X^5 - 748.28X^4$$
$$+ 4840.8X^3 - 12626X^2 + 14978X - 6329.1, \qquad 1.22 < X \le 3 \qquad (7.38)$$
$$T = 0.0055X^6 - 0.1948X^5 + 3.0462X^4$$
$$- 27.424X^3 + 148.64X^2 - 436.53X + 689.06, \qquad 3 < X \le 9$$
$$T = -0.0305X^3 + 1.3961X^2 - 17.265X + 261.13, \qquad 9 < X \le 16$$
$$\Delta = \frac{t}{T}$$

Şekil 7.1 ile verilen her iki CPW yapısının dielektrik kayıpları, şerit ve mikroşerit yapılarda olduğu gibi, Gupta ve arkadaşları (1996) tarafından sunulan bağıntı kullanılarak;

$$\alpha_d = 2.73 \frac{\varepsilon_r}{\sqrt{\varepsilon_{eff\,i}}} \frac{\varepsilon_{eff\,i} - 1}{\varepsilon_r - 1} \frac{\tan\delta}{\lambda_0} = \frac{\pi}{\lambda_0} \frac{\varepsilon_r}{\sqrt{\varepsilon_{eff\,i}}} q_i \tan\delta \quad \frac{dB}{birim\,uzunluk} \tag{7.39}$$

şeklinde ifade edilir. Burada, λ_0 serbest ortamın dalga boyunu, ε_r taban malzemesi için bağıl dielektrik sabitini, ε_{eff} efektif dielektrik sabitini, $\tan\delta$ kayıp açısını ve q terimi ise, her bir iletim hattı için farklı olmak üzere, efektif dielektrik sabiti ifadelerindeki dolgu faktörünü ifade etmektedir.

Sonuç olarak, Şekil 7.1 ile verilen tam asimetrik CPW yapıları için toplam zayıflama ifadesi, iletken kayıpları ve dielektrik kayıplarının toplamı şeklinde, aşağıda verilen bağıntı ile ifade edilir:

$$\alpha_T = \alpha_c + \alpha_d \tag{7.40}$$

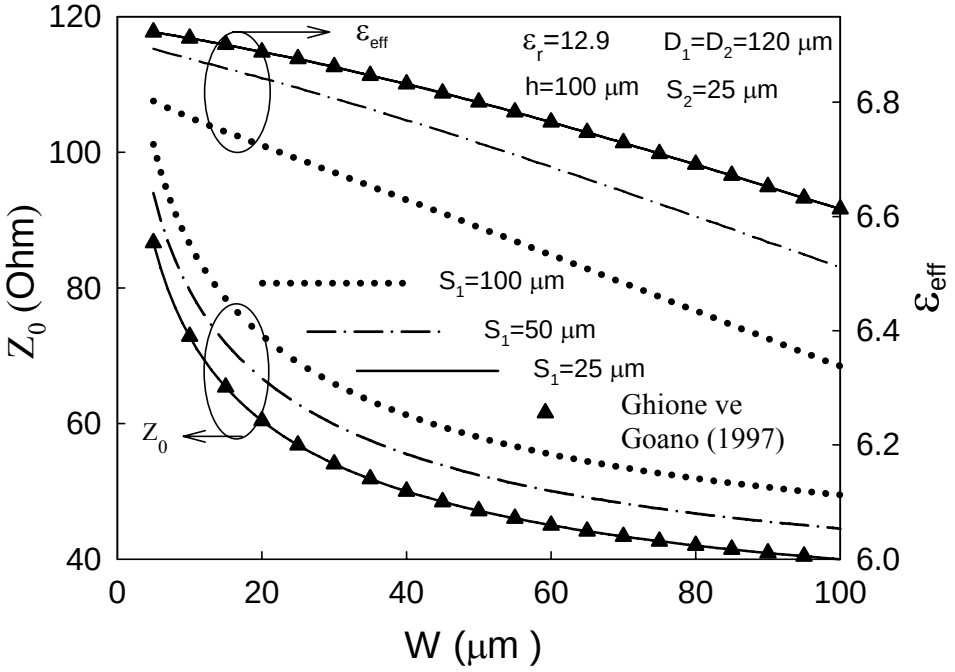
7.1.1. Tam asimetrik CPW için nümerik sonuçlar ve tartışmalar

Şekil 7.1 ile kesit görünümleri verilen tam asimetrik CPW yapılarının elektriksel karakteristikleri (birim uzunluk başına düşen hat kapasitesi, efektif dielektrik sabiti, karakteristik empedans ve iletken kayıp ifadeleri), quasi-statik yaklaşımı içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analitik bağıntılar formunda elde edilmiştir. Tam asimetrik CPW yapısı için elde edilen formüller kullanılarak, yapının geometrik boyutlarına bağlı olarak, elektriksel karakteristik değişim eğrilerini veren grafikler Şekil 7.6-12 ile verilmiştir.

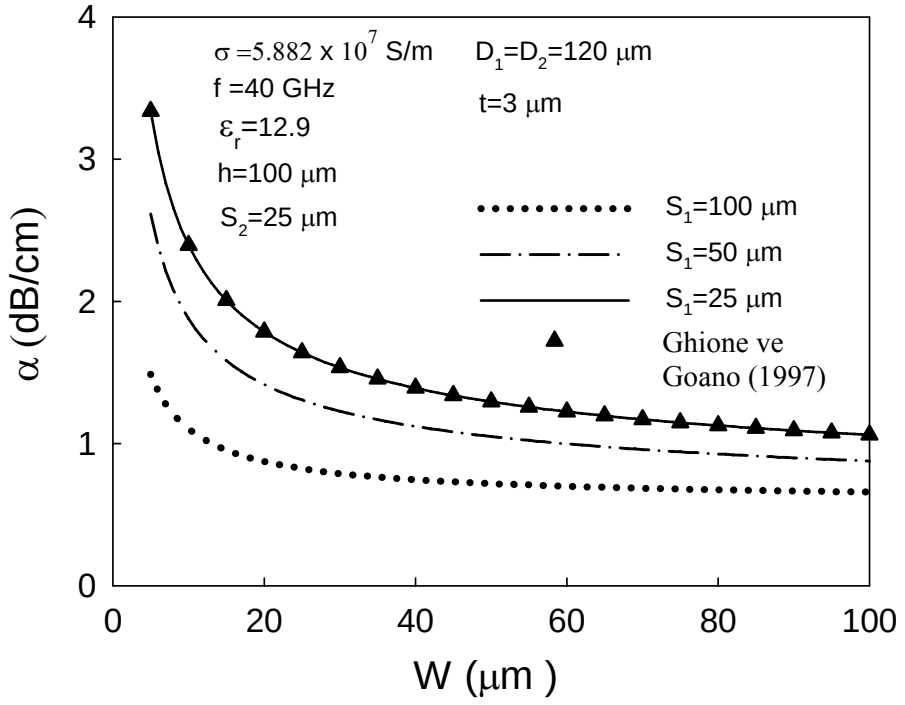
Bu bölümde verilen grafik analizlerinde, tam asimetrik CPW yapısı için Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analitik ifadeler formunda elde edilen iletken kayıp bağıntılarının doğruluğu, tam dalga analiz ve diğer quasi-statik analiz teknikleri ile test edilmiştir. Diğer analiz yöntemleri ile bu bölümde elde edilen analitik ifadelerin sonuçları arasındaki ilişki, Konformal Dönüşüm Tekniği ile elde edilen analitik ifadelerin geçerliliğini görmek açısından önemlidir.

Şekil 7.6 ile verilen grafikte; ε_r=12,9, D_1=D_2=120μm, S_2=25μm, h=100μm ve S_1=25μm, S_1=50μm, S_1=100μm olmak üzere, merkez şerit iletken genişliği W'nın bir fonksiyonu olarak, tam asimetrik CPW'nin karakteristik empedans ve efektif dielektrik sabiti değişim eğrileri görülmektedir. Şekil 7.6 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, W'nın artması durumunda karakteristik empedans değeri geniş bir aralıkta azalma gösterirken, efektif dielektrik sabiti ifadesi ise, dar bir aralıkta azalma göstermektedir. Ayrıca, sol toprak düzlem ile merkez şerit genişliği arasındaki aralığı ifade eden S_1 değerinin artması durumunda, karakteristik empedans değeri önemli bir ölçüde yükselirken, efektif dielektrik sabiti ifadesi ise önemli bir ölçüde azalmaktadır. Grafik üzerinde de görüldüğü gibi, S_1 değerinin S_2 değerine eşit olması durumunda, Şekil 7.1a ile verilen tam asimetrik CPW yapısının Ghione ve Goano (1997) tarafından analiz edilen simetrik CPW yapısına dönüştüğü görülmektedir. Tam asimetrik CPW yapısının sonuçları ile simetrik CPW yapısının sonuçları arasındaki mükemmel uyum, karakteristik empedans ve efektif dielektrik sabiti ifadelerinin doğruluğunu kanıtlamaktadır.

Şekil 7.7 ile verilen grafikte, merkez şerit iletken genişliği W'nın bir fonksiyonu olarak, tam asimetrik CPW'nin iletken kayıp değişim eğrileri görülmektedir. Şekil 7.7 ile verilen grafikteki geometrik parametreler ile Şekil 7.6'daki geometrik parametreler aynı alınmıştır. Şekil 7.7 ile verilen grafikte görüldüğü gibi, merkez şerit genişliğini ifade eden W'nın artması, tam asimetrik CPW yapısındaki metal iletken yüzeyin artmasını ifade etmektedir. Bu durumda, doğal olarak, iletken kayıp ifadesinin önemli bir aralıkta azaldığı görülmektedir. Ayrıca, sol toprak düzlem ile merkez şerit genişliği arasındaki aralığı ifade eden S_1 değerinin artması durumunda, iletken kayıp ifadesinde önemli bir ölçüde azalma görülmektedir. Grafik üzerinde de görüldüğü gibi, S_1 değerinin S_2 değerine eşit olması durumunda, tam asimetrik CPW yapısının, Ghione ve Goano (1997) tarafından analiz edilen simetrik CPW yapısına dönüştüğü görülmektedir. Her iki yapının sonuçları arasında görülen mükemmel uyum, bu bölümde elde edilen iletken kayıp ifadesinin doğruluğunu ortaya koymaktadır.



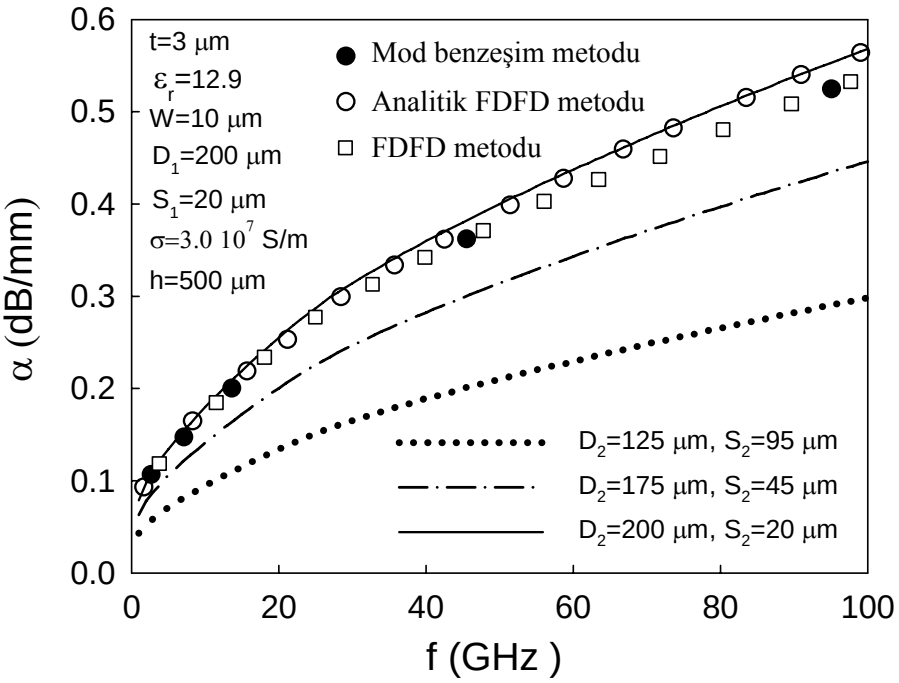
Şekil 7.6: Tam Asimetrik CPW Yapısı için, Merkez Şerit Genişliği W'nın bir Fonksiyonu Olarak Empedans ve Efektif Dielektrik Sabiti Değişimi



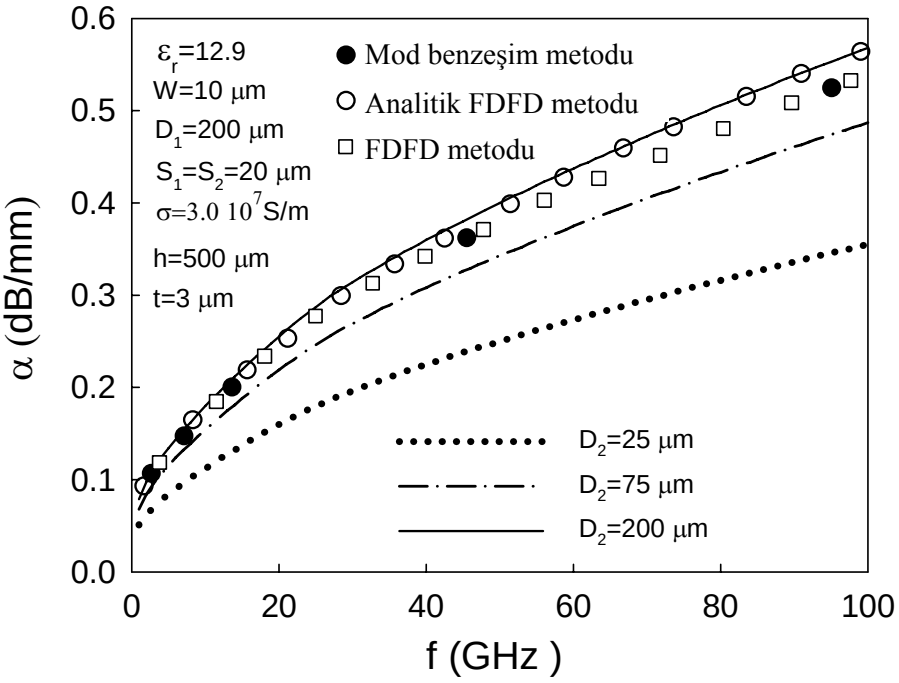
Şekil 7.7: Tam Asimetrik CPW Yapısı için, Merkez Şerit Genişliği W'nın bir Fonksiyonu Olarak İletken Kayıp İfadesi Değişimi

Şekil 7.8 ve Şekil 7.9 ile verilen grafik analizlerinde, tam asimetrik CPW yapısı için, frekans ifadesinin bir fonksiyonu olarak, iletken kayıp ifadesi değişim eğrileri görülmektedir. Her iki grafik üzerinde de, tam asimetrik CPW yapısının geometrik parametreleri verilmiştir. Şekil 7.8 ve Şekil 7.9 ile verilen grafiklerde de görüldüğü gibi, frekans değerinin artması durumunda, doğal olarak, iletken kayıp ifadesi de önemli bir aralıkta artmaktadır. Şekil 7.8 ile verilen grafikte, tam asimetrik CPW yapısındaki sağ yanal toprak düzlem ve merkez şerit iletken arasındaki aralığı ifade eden S_2 ile sağ yanal toprak düzlem genişliğini ifade eden D_2 ifadelerinin üç farklı değerdeki değişimleri görülmektedir. D_2 değerinin artması ve S_2 değerinin azalması durumunda, iletken kayıp ifadesi geniş bir aralıkta artmaktadır. Şekil 7.9 ile verilen grafikte ise, sadece sağ yanal toprak düzlem genişliğini ifade eden D_2 ifadesinin üç farklı değerdeki değişimleri görülmektedir. Şekil 7.9 ile verilen grafikteki değişimlerde görüldüğü gibi, D_2 (toprak düzlem genişliği) değerinin artması durumunda, doğal olarak, iletken kayıp ifadesi de geniş bir aralıkta artmaktadır. Şekil 7.8 ve Şekil 7.9 ile verilen her iki grafik analizinde, bu bölümde elde edilen iletken kayıp ifadelerinin doğruluğu, Kunze ve Heinrich (2002) tarafından sonlu toprak düzlemli CPW yapısı için gerçekleştirilen üç ayrı analiz yöntemi (tam dalga analiz yöntemlerinden biri olan mod benzeşim ve sonlu farklar frekans domen yöntemi ile bir başka analitik yöntem olan sonlu farklar frekans domen yöntemi) ile test edilmiştir. Grafiklerde de görüldüğü gibi, Konformal Dönüşüm Tekniği ile diğer analiz teknikleri arasında oldukça iyi bir uyum görülmektedir.

Şekil 7.10 ile verilen grafikte, tam asimetrik CPW yapısı için, frekans ifadesi ile t iletken kalınlığının bir fonksiyonu olarak, iletken kayıp ifadesi değişim eğrileri görülmektedir. Grafik üzerinde, yapının tüm geometrik parametreleri verilmiştir. Şekil 7.10 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, frekans değerinin artması durumunda, doğal olarak, iletken kayıp ifadesi de geniş bir aralıkta artmakta, t iletken kalınlığının artması durumunda ise, iletken kayıp ifadesi önemli bir ölçüde azalmaktadır. Diğer grafiklerde olduğu gibi, bu bölümde de analitik bağıntılar formunda elde edilen iletken kayıp ifadelerinin doğruluğu, Heinrich (1990) tarafından sonlu toprak düzlemli CPW yapısı için elde edilen tam dalga analiz yöntemi ile test edilerek kanıtlanmıştır.



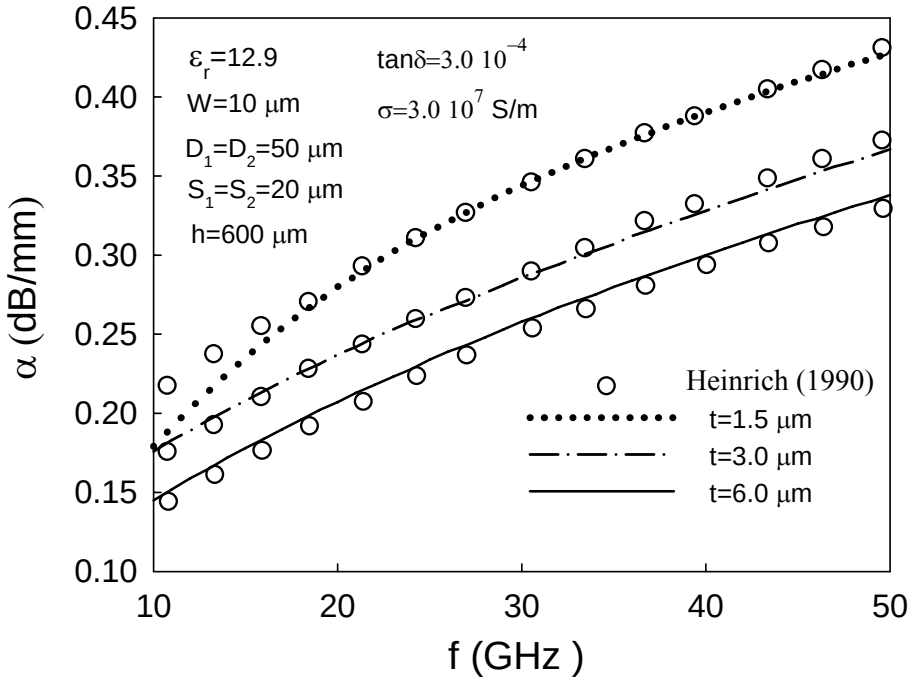
Şekil 7.8: Tam Asimetrik CPW Yapısı için, Frekansın bir Fonksiyonu Olarak, İletken Kayıp İfadesi Değişimi [D_2=125μm, S_2=95μm, D_2=175μm, S_2=45μm, D_2=200μm, S_2=20μm, S_1=20μm]



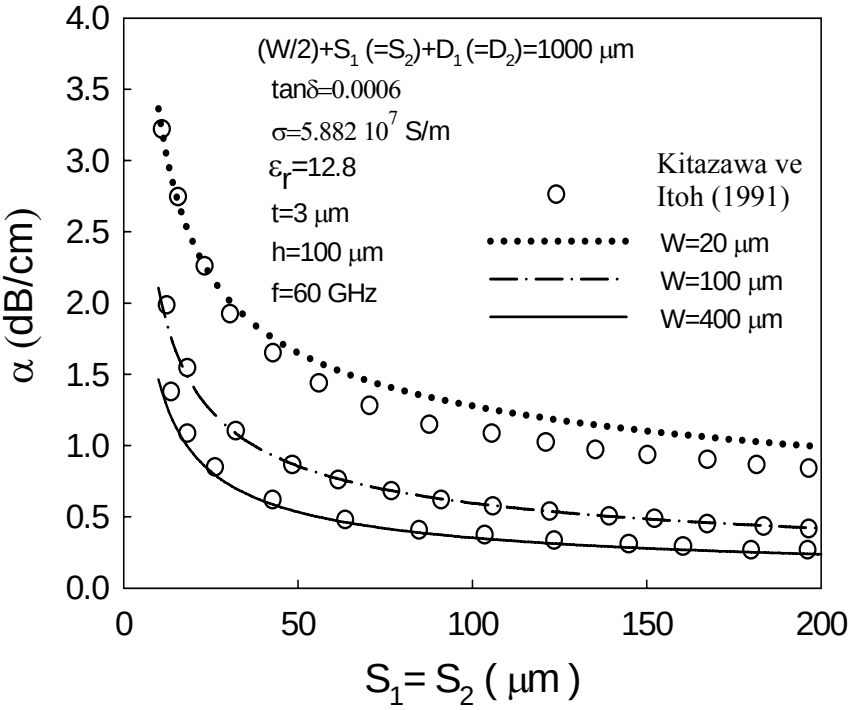
Şekil 7.9: Tam Asimetrik CPW Yapısı için Frekansın bir Fonksiyonu Olarak İletken Kayıp İfadesi Değişimi [D_2=25μm, D_2=75μm, D_2=200μm, S_1=S_2=20μm]

Şekil 7.11 ile verilen grafikte, tam asimetrik CPW yapısındaki merkez şerit iletken ile yanal toprak düzlemler arasındaki aralığın eşitliğini ifade eden $S_1=S_2$ ifadesinin bir fonksiyonu olarak, iletken kayıp ifadesi değişim eğrileri görülmektedir. Ayrıca, grafik üzerinde, merkez şerit genişliğini ifade eden W'nın farklı değerleri de incelenmiştir. Tam asimetrik CPW yapısının tüm geometrik parametreleri, grafik üzerinde verilmiştir. Şekil 7.11 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, $S_1=S_2$ ifadesinin artması durumunda, iletken kayıp ifadesi geniş bir aralıkta azalmaktadır. Merkez şerit genişliğini ifade eden W'nın artması durumunda ise, doğal olarak, iletken kayıp ifadesi önemli bir ölçüde azalmaktadır. Şekil 7.11 ile verilen grafik üzerinde, Kitazawa ve Itoh (1991) tarafından sonsuz yanal toprak düzlem genişlikli simetrik CPW için elde edilen tam dalga analiz yöntemi sonuçları da verilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi, analitik bağıntı sonuçları ile tam dalga analiz sonuçları arasında iyi bir uyum görülmektedir.

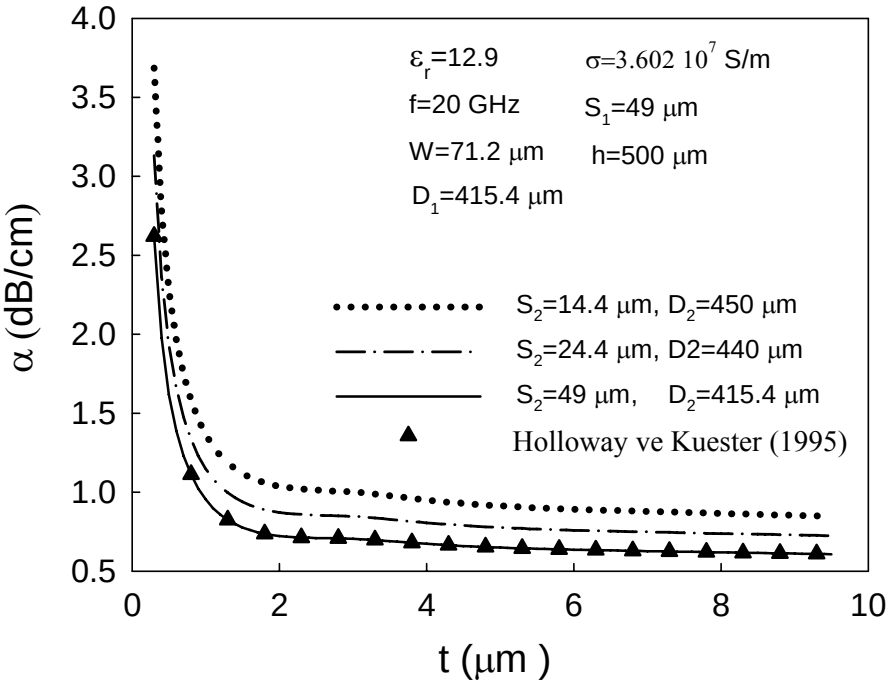
Şekil 7.12 ile verilen grafik analizinde, tam asimetrik CPW yapısı için t iletken metal kalınlığının bir fonksiyonu olarak, iletken kayıp ifadesindeki değişim eğrileri görülmektedir. Yapının tüm geometrik parametreleri, grafik üzerinde verilmiştir. Tam asimetrik CPW yapısında, t iletken metal kalınlığının artması, yapının iletken kesitini arttırdığından dolayı, doğal olarak, iletken kayıp ifadesi önemli bir ölçüde azalmaktadır. Ayrıca, Şekil 7.12 ile verilen grafikte, S_2 ile D_2 ifadelerinin üç farklı değerdeki değişimleri de görülmektedir. D_2 değerinin artması ve S_2 değerinin azalması durumunda, iletken kayıp ifadesi de önemli bir ölçüde artmaktadır. Tam asimetrik CPW yapısı için iletken kayıp değişimlerini veren diğer grafik analizlerinde olduğu gibi, Şekil 7.12 ile verilen grafikte de, bu bölüm içerisinde elde edilen analitik bağıntıların doğruluğu, Holloway ve Kuester (1995) tarafından sunulan analitik kayıp bağıntı sonuçları ile test edilerek kanıtlanmıştır. Grafikte de görüldüğü gibi, her iki sonuç arasında iyi bir uyum görülmektedir.



Şekil 7.10: Tam Asimetrik CPW Yapısı için, Frekansın bir Fonksiyonu Olarak İletken Kayıp İfadesi Değişimi [D_1= D_2=50μm 25μm, S_1=S_2=20μm]



Şekil 7.11: Tam Asimetrik CPW Yapısı için, S_1=S_2 Aralık Genişliğinin bir Fonksiyonu Olarak İletken Kayıp İfadesi Değişimi



Şekil 7.12: Tam Asimetrik CPW Yapısı için, İletken Metal Kalınlığı t'nin bir Fonksiyonu Olarak İletken Kayıp İfadesi Değişimi

Sonuç olarak, bu bölüm içerisinde analitik bağıntılar formunda elde edilen iletken kayıp ifadelerinin doğruluğu, teorik olarak da kanıtlanabilir. Şekil 7.1 ile verilen tam asimetrik CPW yapısı için, Denklem (7.32) ile verilen iletken kayıp ifadesinde; $D_1=D_2$ ve $S_1=S_2$ alınarak, Denklem (7.32) ile verilen kayıp ifadesinin Ghione ve Goano (1997) tarafından analiz edilen simetrik sonlu toprak düzlemli CPW yapısı için türetilen kayıp ifadesine dönüştüğü, D_1 ve D_2 değerlerinin sonsuz alınmasıyla, Ghione (1993) tarafından analiz edilen sonsuz toprak düzlemli asimetrik CPW yapısı için elde edilen iletken kayıp ifadesine indirgendiği, son olarak, D_1 ve D_2 değerlerinin sonsuz S_1 ve S_2 değerlerinin de eşit alınmasıyla, Holloway ve Kuester (1995) tarafından analiz edilen sonsuz yanal toprak düzlem genişlikli simetrik CPW yapısı için elde edilen iletken kayıp ifadesine indirgendiği açıkça görülmektedir.

8. ELİPTİK VE SİLİNDİRİK KESİTLİ CPW VE CPS İLETİM HATLARININ İLETKEN KAYIP ANALİZİ

Bölüm 5'de, eliptik ve silindirik kesitli eşdüzlemli iletim hatlarının tasarım nedenleri, detaylı bir şekilde anlatılmıştır. MIC ve MMIC uygulamalarında kullanım alanları bulabilen eliptik ve silindirik kesitli CPW ve CPS yapılarının tasarımlarında, iletken kalınlıkları dikkate alınmak zorundadır. Çünkü, Bölüm 7'de verilen tam asimetrik CPW yapısının iletken kayıp analizi sonucunda, iletken kayıplarının devre performanslarını ciddi bir şekilde etkilediği görülmüştür. Bu nedenle, eliptik ve silindirik kesitli CPW ve CPS'lerdeki iletken kayıplarının ne tür davranış sergileyeceği, devre performansları açısından oldukça önemli bir konudur.

Kaynak araştırması bölümünde de belirtildiği gibi, eşdüzlemli CPW ve CPS'ler, değişik analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Yapılan bu analizlerde, yapılardaki iletken kalınlıkları sonsuz ince kalınlıklı olarak alınmıştır. Yamamoto ve arkadaşları (2005) tarafından yapılan bir çalışmada, tam dalga yaklaşımı içerisinde Spektral-domen yöntemi kullanılarak, silindirik kesitli CPW'nin iletken kalınlıkları da hesaba katılmıştır. Söz konusu çalışmada, iletken kalınlıklarının silindirik kesitli CPW yapısının efektif dielektrik sabiti, faz sabiti ve karakteristik empedansı üzerinde bir etki oluşturduğu görülmüştür.

Daha öncede belirtildiği gibi, frekans bağımlı tam dalga analiz yöntemleri, yüksek doğruluk değerlerine sahip olmasına rağmen, içerdikleri karmaşık işlemler yüzünden CAD paketleri için pek uygun bulunmamıştır. Oysa, quasi-statik yaklaşımı içerisinde Konformal dönüşümler kullanılarak, söz konusu yapıların elektriksel karakteristikleri, iletken kayıplarını da içerecek şekilde hesaplanabilir. Konformal dönüşümler kullanılarak elde edilen analitik bağıntılar formundaki iletken kayıp ifadeleri, CAD uyumlu tasarım araçlarında kullanılmak için iyi bir seçenektir.

Bu bölümün ilk kısmında, eliptik ve silindirik kesitli CPW yapısının iletken kayıpları, analitik bağıntılar formunda elde edilmiştir. Bölümün ikinci kısmında ise, eliptik ve silindirik kesitli CPS yapısının iletken kayıpları, analitik bağıntılar formunda elde edilmiştir. Her bir yapı için türetilen iletken kayıp ifadeleri, bölüm sonlarında verilen grafik analizleriyle detaylı bir şekilde incelenmiştir.

8.1. Eliptik ve Silindirik Kesitli CPW Yapıları İçin İletken Kayıp Analizi

Bilindiği üzere, quasi-statik yaklaşımı içerisinde şerit iletkenlerdeki akım yoğunluğu dağılımı ve iletken metallerdeki güç kaybı, dielektrik tabana bağlı olarak değişim göstermemektedir. Bu nedenle, Şekil 8.1 ile verilen eliptik ve silindirik kesitli CPW yapısının iletken kayıp ifadesi, dielektrik taban yok sayılarak, serbest hava ortamında hesaplanabilir.

Düzlemsel yapılarda olduğu gibi, dielektrik tabanlı eliptik ve silindirik kesitli eşdüzlemli iletim hatlarında, serbest ortam hava parametreleri ($c_0 \approx 3x10^8\, cm/s$, Z_{c0} ve α_{c0}) ve efektif dielektrik sabitinin (ε_{eff}) hesaplanması sonucunda, Denklem (7.1) ile verilen bağıntılar kullanılarak, yapıların faz hızı, karakteristik empedansı ve iletken zayıflaması elde edilebilir. Bu nedenle, Şekil 8.1 ile verilen eliptik ve silindirik kesitli CPW yapılarının iletken kayıplarını hesaplamak için, ilk olarak yapıların elektriksel karakteristiklerini (birim uzunluk başına hat kapasitesi, efektif dielektrik sabiti, faz hızı ve karakteristik empedans) elde etmek gerekmektedir.

Eliptik ve silindirik kesitli CPW'nin elektriksel karakteristikleri (efektif dielektrik sabiti, faz hızı, karakteristik empedansı ve iletken zayıflaması), quasi-statik yaklaşımı yapılarak analitik bağıntılar formunda elde edilebilir. Eliptik ve silindirik kesitli CPW'nin kesit görünümleri Şekil 8.1 ile verilmiştir. Eliptik ve silindirik kesitli CPW'nin merkez şerit yay genişliğini gören açı 2Ψ dir. Toprak düzlem yay genişliği ile merkez şerit yay genişliği arasındaki yarık yay genişliklerini gören açı ise $\theta - \Psi$ olarak verilmiştir. Şekil 8.1 ile verilen her iki yapının toprak düzlem genişliklerini gören açı ise $2\pi - 2\theta$ dır. Eliptik kesitli CPW'de, iletken metal kalınlığı büyük yarıçap için $a_3 - a_2$, küçük yarıçap için $b_3 - b_2$ olarak verilmiştir. Silindirik kesitli CPW yapısında ise, iletken metal kalınlığı $r_3 - r_2$ dir. Dielektrik taban kalınlıkları ise, eliptik kesitli CPW'de büyük yarıçap için $a_2 - a_1$, küçük yarıçap için $b_2 - b_1$ olarak verilmiş olup, silindirik kesitli CPW yapısında ise $r_2 - r_1$ dir. Her iki yapıda da, dielektrik tabanın bağıl dielektrik sabiti ε_r dir. Şekil 8.1a ile verilen elipsler eş odaklı olup, odak mesafeleri;

$$f = \sqrt{a_1^2 - b_1^2} = \sqrt{a_2^2 - b_2^2} = \sqrt{a_3^2 - b_3^2} \tag{8.1}$$

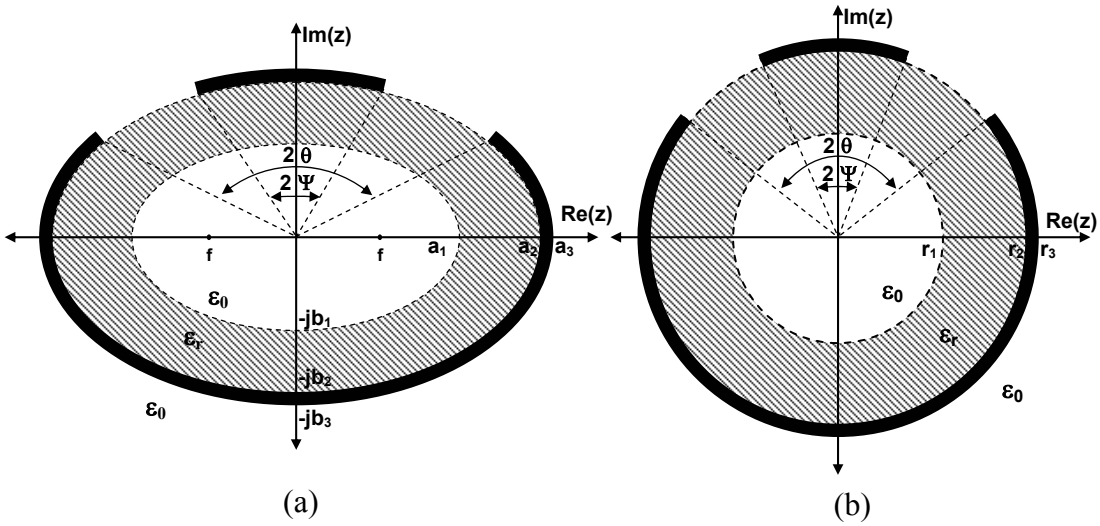
şeklinde ifade edilir.

Sonlu iletken kalınlıklı eliptik ve silindirik kesitli iletim hatlarının iletken zayıflamasını elde etmek için, iletken kalınlıklarının sonsuz ince kabulüne dayalı olarak, iletim hattı yapısının elektriksel karakteristiklerinin hesaplanması gerekmektedir. Sonsuz ince iletken kalınlıklı eliptik ve silindirik kesitli CPW yapılarının elektriksel karakteristikleri, Şekil 8.2 ile verilen bir seri Konformal dönüşümler kullanılarak hesaplanabilir. Bu nedenle, ilk olarak Şekil 8.2a ile verilen ve z_1 düzlemi ile tasvir edilen eliptik kesitli CPW yapısı;

$$z_2 = \left(z_1 \pm \sqrt{z_1^2 - f^2}\right) \Big/ f \tag{8.2}$$

dönüşüm fonksiyonu vasıtasıyla, Şekil 8.2b'de z_2 düzlemi ile tasvir edilen silindirik kesitli bir yapıya dönüşür. Şekil 8.2b ile verilen silindirik kesitli CPW'nin r_1 ve r_2 yarıçap ifadeleri, eliptik kesitli yapının geometrik boyutlarına bağlı olarak;

$$r_1 = \sqrt{\frac{a_1 + b_1}{a_1 - b_1}}, \qquad r_2 = \sqrt{\frac{a_2 + b_2}{a_2 - b_2}} \tag{8.3}$$



(a) (b)

Şekil 8.1: Sonlu İletken Kalınlıklı CPW'nin Kesit Görünümü, (a) Eliptik Kesitli Yapı, (b) Silindirik Kesitli Yapı

şeklinde ifade edilir. Şekil 8.2b ile verilen silindirik kesitli yapı, aşağıdaki bağıntı kullanılarak, Şekil 8.2c ile verilen düzlemsel kesitli bir yapıya dönüşür:

$$t = j\ln(z_2 / r_2) \tag{8.4}$$

Şekil 8.2c ile verilen düzlemsel yapının analizi, Ghione ve Naldi (1987) tarafından sonlu toprak düzlemli ve sonlu dielektrik taban kalınlıklı CPW için sunulan Konformal dönüşümler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Şekil 8.2c ile verilen sonlu toprak düzlemli ve sonlu dielektrik taban kalınlıklı CPW'nin birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi, I., II. ve III bölge kapasitelerinin toplamı;

$$C_T = C_{01} + C_{03} + C_d \tag{8.5}$$

şeklinde ifade edilir. I. bölge (üst yarı bölge serbest ortam hava kapasitesi) kapasitesini elde etmek için, ilk olarak Şekil 8.2d ile verilen I. bölgenin sağ yarı kısmı, $x_1 = t^2$ dönüşüm fonksiyonu kullanılarak, Şekil 8.2f ile verilen x_1-düzleminin üst yarı bölgesine dönüşür. Bir sonraki adımda ise, x_1-düzleminin üst yarı bölgesi;

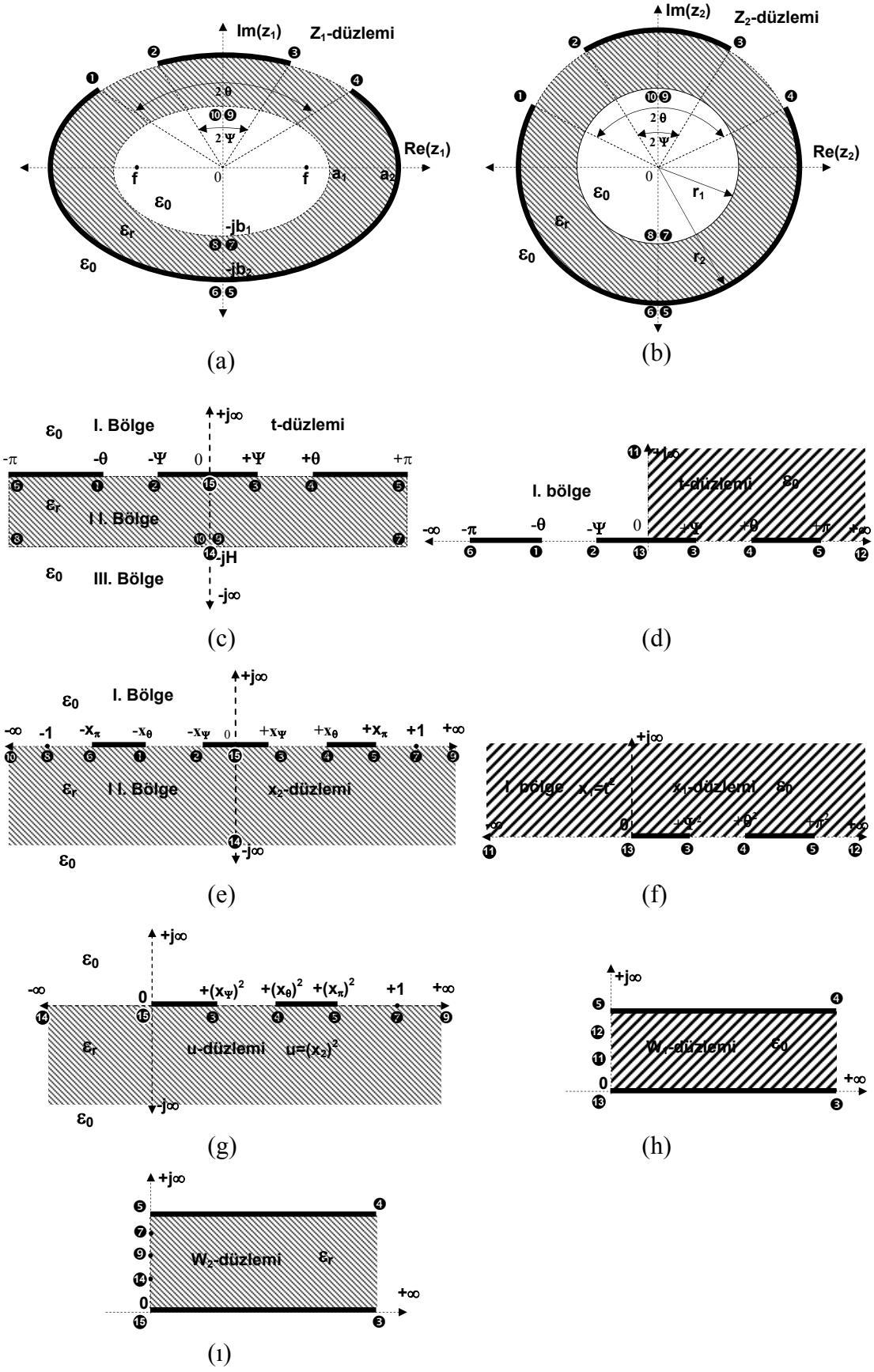
$$w_1 = \int \frac{dx_1}{\sqrt{x_1(x_1 - \Psi^2)(x_1 - \theta^2)(x_1 - \pi^2)}} \tag{8.6}$$

Schwarz-Christoffel dönüşümü vasıtasıyla, Şekil 8.2h ile verilen ve w_1-düzlemi ile tasvir edilen paralel plakalı bir yapıya dönüşür. Şekil 8.2c'de de görüldüğü gibi, dielektrik taban olmadığı durumdaki, I. bölge ile III. bölge kapasiteleri birbirine eşittir. Böylece, I. bölge ile III. bölge serbest ortam hava kapasiteleri aşağıdaki bağıntı şeklinde ifade edilir:

$$C_{01} = C_{03} = 2\varepsilon_0 \frac{K(k_0)}{K(k_0^{'})} \tag{8.7}$$

Yukarıdaki bağıntıda geçen k_0 ve $k_0^{'}$ modülleri;

$$k_0 = \sqrt{\frac{\Psi^2(\pi^2 - \theta^2)}{\theta^2(\pi^2 - \Psi^2)}}, \qquad k_0^{'} = \sqrt{1 - (k_0)^2} \tag{8.8}$$



Şekil 8.2: Eliptik ve Silindirik Kesitli CPW'ler için bir Seri Konformal Dönüşümler

şeklindedir. Şekil 8.2c ile verilen düzlemsel yapının taban kalınlığı H, eliptik ve silindirik kesitli CPW'nin geometrik boyutlarına bağlı olarak;

$$H = \ln(\frac{r_2}{r_1}) = \ln(\frac{a_2 + b_2}{a_1 + b_1}) \tag{8.9}$$

şeklinde yazılabilir. Şekil 8.2c ile verilen yapının II. bölge ile temsil edilen dielektrik taban bölgesi, Cheng ve Robertson (1995) tarafından sunulan ters Schwarz-Christoffel dönüşümü kullanılarak, Şekil 8.2e ile verilen x_2-düzleminin alt yarı bölgesine dönüşür. Şekil 8.2e ile verilen x_2-düzlemindeki x_π, x_Ψ ve x_θ geometrik parametreleri, ters Schwarz-Christoffel dönüşüm uygulamalarından faydalanılarak;

$$x_\pi = \left[\frac{\exp(\pi^2 / H) - 2}{\exp(\pi^2 / H) + 2}\right]^2, \qquad 1 < \frac{\pi}{H} < \infty,$$

$$x_\pi = \sqrt{1 - \left[\frac{\exp(H) - 2}{\exp(H) + 2}\right]^4}, \qquad 0 < \frac{\pi}{H} < 1 \tag{8.10a}$$

$$F(\arcsin(x_\Psi / x_\pi), x_\pi) = \frac{\Psi}{\pi} K(x_\pi),$$

$$F(\arcsin(x_\theta / x_\pi), x_\pi) = \frac{\theta}{\pi} K(x_\pi) \tag{8.10b}$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (8.10) bağıntısında yer alan $F(\phi, k)$ ifadeleri, Jakobi notasyonunda yazılmış, I. tür tam olmayan eliptik integrallerdir. Bu integral ifadeleri, Cheng ve Robertson (1995) tarafından verilen yaklaşık çözümler kullanılarak hesaplanabilir. II. bölge (dielektrik bölge) kapasitesini elde etmek için, Şekil 8.2e ile verilen II. bölgenin alt sağ yarı bölgesi, $u = (x_2)^2$ dönüşüm fonksiyonu kullanılarak, Şekil 8.2g ile verilen u-düzleminin alt yarı bölgesine dönüşür. u-düzleminin alt yarı bölgesi ise,

$$w_2 = \int \frac{du}{\sqrt{u(u - x_\Psi^2)(u - x_\theta^2)(u - x_\pi^2)}} \tag{8.11}$$

Schwarz-Christoffel dönüşümü vasıtasıyla, w_2-düzlemi (Şekil 8.2ı) ile tasvir edilen paralel plakalı bir yapıya dönüşür. Böylece, kısmi kapasitans yaklaşımı ve paralel plakalı yapılardaki iyi-bilinen kapasitans bağıntısından faydalanılarak, II. bölge ile temsil edilen dielektrik taban kapasitesi;

$$C_{d2} = 2\varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)\frac{K(k_d)}{K(k_d^{'})} \tag{8.12}$$

şeklinde elde edilir. Burada k_d ve $k_d^{'}$ modülleri;

$$k_d = \sqrt{\frac{x_\Psi^2(x_\pi^2 - x_\theta^2)}{x_\theta^2(x_\pi^2 - x_\Psi^2)}}, \qquad k_d^{'} = \sqrt{1-(k_d)^2} \tag{8.13}$$

şeklindedir. Denklem (8.7) ve Denklem (8.12) bağıntılarındaki $K(k)\big/K(k^{'})$ oranı için yaklaşık çözümler, Hilberg (1969) tarafından verilmiştir. Eliptik ve silindirik kesitli CPW'nin efektif dielektrik sabiti;

$$\varepsilon_{eff} = \frac{C_T}{C_0} = 1 + q(\varepsilon_r - 1), \qquad q = \frac{1}{2}\frac{K(k_d)K(k_0^{'})}{K(k_d^{'})K(k_0)} \tag{8.14}$$

şeklinde ifade edilir. Burada q terimi, dolgu faktörüdür. Sonuç olarak, eliptik ve silindirik kesitli CPW'nin faz hızı ve karakteristik empedansı, aşağıdaki bağıntılar şeklinde elde edilir:

$$V_{faz} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}}, \qquad Z_0 = \frac{c}{V_{faz}C_T} = \frac{30\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}}\frac{K(k_0^{'})}{K(k_0)} \tag{8.15}$$

Burada c terimi, boşluktaki ışık hızıdır.

Eliptik ve silindirik kesitli simetrik CPW yapısındaki iletken zayıflamasını elde etmek için, ilk olarak Şekil 8.1 ile verilen eliptik kesitli CPW yapısı, Denklem (8.2) bağıntısı kullanılarak silindirik kesitli CPW yapısına, bir sonraki adımda ise, silindirik kesitli CPW yapısı, Denklem (8.4) bağıntısı kullanılarak Şekil 8.3 ile verilen sonlu iletken kalınlıklı düzlemsel CPW yapısına dönüştürülür. Şekil 8.1a ile verilen sonlu iletken kalınlıklı eş-odaklı elipslerin odak mesafesi;

$$f = \sqrt{a_1^2 - b_1^2} = \sqrt{a_2^2 - b_2^2} = \sqrt{a_3^2 - b_3^2} \tag{8.16}$$

şeklinde ifade edilir. Şekil 8.1b ile verilen silindirik kesitli CPW yapısındaki yarıçap ifadeleri, eliptik kesitli CPW yapısının geometrik boyutlarına bağlı olarak;

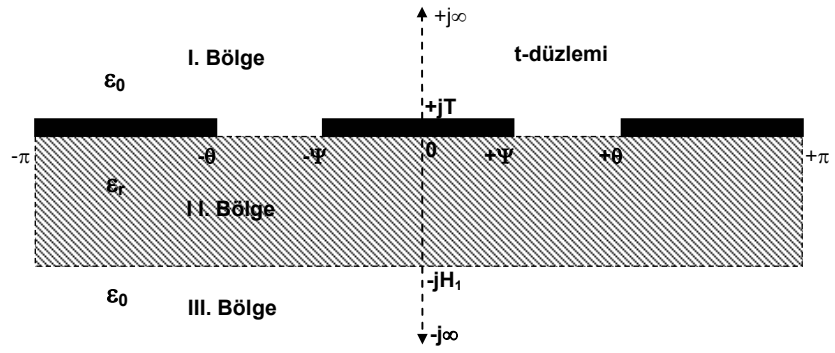
$$r_1 = \sqrt{\frac{a_1 + b_1}{a_1 - b_1}}, \qquad r_2 = \sqrt{\frac{a_2 + b_2}{a_2 - b_2}}, \qquad r_3 = \sqrt{\frac{a_3 + b_3}{a_3 - b_3}}, \tag{8.17}$$

şeklinde yazılabilir. Şekil 8.3 ile tasvir edilen düzlemsel kesitli yapıdaki T ve H_1 ifadeleri;

$$T = \ln(\frac{r_3}{r_2}) = \ln(\frac{a_3 + b_3}{a_2 + b_2}), \qquad H_1 = \ln(\frac{r_2}{r_1}) = \ln(\frac{a_2 + b_2}{a_1 + b_1}) \tag{8.18}$$

şeklinde yazılabilir. Şekil 8.3 ile verilen sonlu iletken kalınlıklı düzlemsel CPW yapısının iletken kayıp ifadesi, işlem tekrarından kaçınmak için, Şekil 7.1 ile verilen tam asimetrik CPW yapısındaki iletken zayıflaması için elde edilen Denklem (7.20-40) bağıntılarından faydalanılarak;

$$\alpha_c = \frac{R_s \sqrt{\varepsilon_{eff}}}{480\pi} \frac{\theta^2}{K(k_0)K(k_0^{'})(\theta^2 - \Psi^2)}(A) \tag{8.19}$$



Şekil 8.3: Konformal Dönüşümler Kullanılarak Sonlu İletken Kalınlıklı Eliptik ve Silindirik Kesitli CPW Yapısından Sonlu İletken Kalınlıklı Düzlemsel CPW Yapısına Dönüşüm

şeklinde ifade edilir. Denklem (8.19) içerisinde yer alan A ifadesi, $A = A_1 + A_2 + A_3$ olmak üzere;

$$A_1 = \frac{1}{\Psi}\left\{\ln\left[\frac{8\pi\Psi}{\ln(r_3/r_2)}\frac{(\theta-\Psi)(\pi+\Psi)}{(\theta+\Psi)(\pi-\Psi)}\right]+\pi\right\}$$

$$A_2 = \frac{(\pi^2-\Psi^2)}{(\pi^2-\theta^2)\theta}\left\{\ln\left[\frac{8\pi\theta}{\ln(r_3/r_2)}\frac{(\theta-\Psi)(\pi-\theta)}{(\theta+\Psi)(\pi+\theta)}\right]+\pi\right\} \tag{8.20}$$

$$A_3 = \frac{(\theta^2-\Psi^2)}{(\pi^2-\theta^2)\pi}\left\{\ln\left[\frac{8\pi^2}{\ln(r_3/r_2)}\frac{(\pi-\theta)(\pi+\Psi)}{(\pi+\theta)(\pi-\Psi)}\right]+\pi\right\}$$

şeklinde ifade edilir.

Bölüm 7'de, Şekil 7.1 ile verilen tam asimetrik CPW yapısındaki iletken kayıp hesaplamalarında, düşük frekanslar bölgesinde oluşan hata oranlarının düzeltilmesi için, Holloway ve Kuester (1995) tarafından sunulan yaklaşımlar kullanılmıştır. Bu yaklaşımlar, Şekil 8.1 ile verilen eliptik ve silindirik kesitli CPW yapısındaki iletken kayıp ifadeleri için de uygulanabilir. Söz konusu yaklaşımlar kullanılarak, Denklem (8.19-20) ile verilen bağıntı;

$$\alpha_c' \approx \mathrm{Re}\left(\frac{Q}{Z_0}\frac{2}{1+\sqrt{1+\dfrac{4Q}{Z_0\gamma}}}\right), \qquad \gamma = j\lambda_0\sqrt{\varepsilon_{eff}} \tag{8.21}$$

şekline dönüşür. Burada λ_0 ifadesi, serbest ortamın dalga boyu olup, Q ifadesi ise;

$$Q = \frac{R_s}{16}\frac{\theta^2}{K(k_0)^2(\theta^2-\Psi^2)}(A') \tag{8.22}$$

şeklinde verilir. Denklem (8.19) bağıntısında yer alan A ifadesindeki $4\pi/\ln(r_3/r_2)$ terimi, $1/\Delta$ durdurma mesafesi ile değiştirilerek, Denklem (8.22) ile verilen bağıntıda yer alan A' ifadesi, $A' = A_1' + A_2' + A_3'$ olmak üzere, aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$A_1^{'} = \frac{1}{\Psi}\left\{\ln\left[\frac{2\Psi}{\Delta}\frac{(\theta-\Psi)(\pi+\Psi)}{(\theta+\Psi)(\pi-\Psi)}\right]\right\}$$

$$A_2^{'} = \frac{(\pi^2-\Psi^2)}{(\pi^2-\theta^2)\theta}\left\{\ln\left[\frac{2\theta}{\Delta}\frac{(\theta-\Psi)(\pi-\theta)}{(\theta+\Psi)(\pi+\theta)}\right]\right\} \tag{8.23}$$

$$A_3^{'} = \frac{(\theta^2-\Psi^2)}{(\pi^2-\theta^2)\pi}\left\{\ln\left[\frac{2\pi}{\Delta}\frac{(\pi-\theta)(\pi+\Psi)}{(\pi+\theta)(\pi-\Psi)}\right]\right\}$$

8.1.1. Eliptik ve silindirik kesitli CPW yapılarının iletken kayıp analizi için nümerik sonuçlar ve tartışmalar

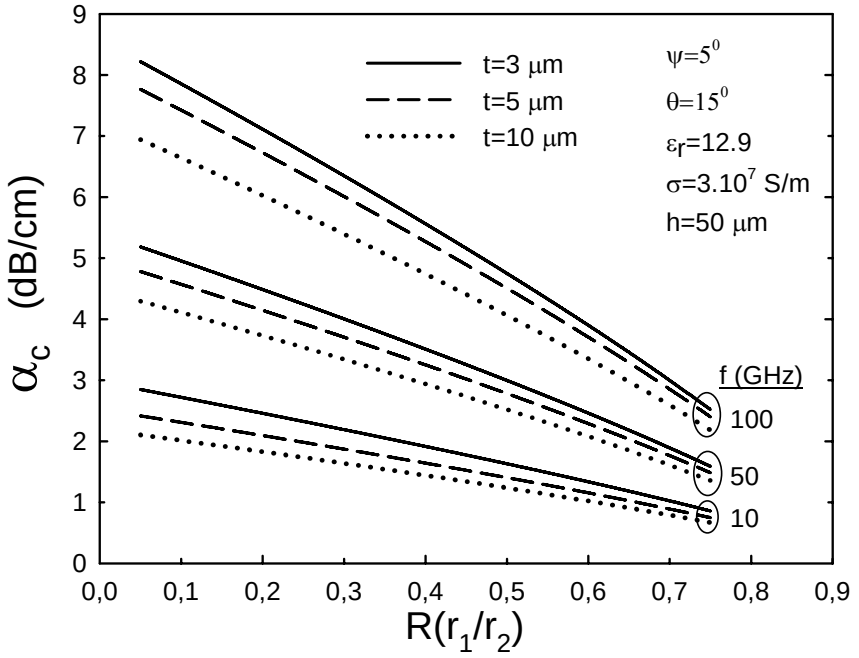
Şekil 8.1 ile verilen sonlu iletken kalınlıklı eliptik ve silindirik kesitli CPW yapılarının elektriksel karakteristikleri (efektif dielektrik sabiti, karakteristik empedans ve iletken kayıp ifadeleri), quasi-statik yaklaşımı içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak analitik bağıntılar formunda elde edilmiştir. Eliptik ve silindirik kesitli CPW yapıları için elde edilen formüller kullanılarak, yapıların geometrik boyutlarına bağlı olarak, elektriksel karakteristik değişim eğrilerini veren grafikler Şekil 8.4-9 ile verilmiştir. Bu bölümde verilen grafik analizlerinde, eliptik ve silindirik kesitli CPW yapısı için elde edilen analitik bağıntıların geçerliliği, belli geometrik şartlar altında, düzlemsel kesitli CPW yapısının analitik bağıntı sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Şekil 8.4 ile verilen grafikte, ε_r=12.9, σ=3.10^7 S/m, Ψ=5^0, θ=15^0, h (r_2-r_1)=50 μm, t (r_3-r_2)=3, 5 ve 10 μm, f=10, 50 ve 100 GHz olmak üzere, eğrilik oranı R (r_1/r_2)'nin bir fonksiyonu olarak, sonlu iletken kalınlıklı silindirik kesitli CPW'nin iletken kayıp ifadesi değişim eğrileri görülmektedir. Şekil 8.4 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, eğrilik oran biçimi R (r_1/r_2)'nin artması durumunda, iletken kayıp ifadesi geniş bir aralıkta azalmaktadır. İletken metallerin yüzey rezistansına bağlı olarak değişim gösteren frekans ifadesinin artması durumunda, iletken kayıp değeri önemli bir ölçüde artmaktadır. Ayrıca, silindirik kesitli yapının iletken kalınlığını veren $t\,(r_3 - r_2)$ ifadesinin artması durumunda ise, iletken kayıp ifadesi önemli bir ölçüde azalmaktadır.

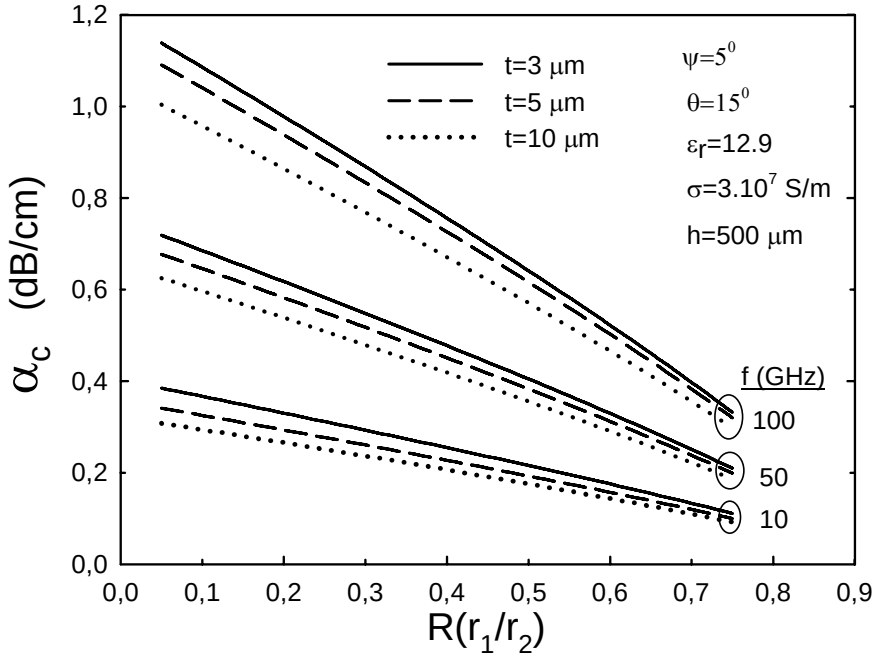
Şekil 8.5 ile verilen grafikteki geometrik parametreler ile Şekil 8.4 ile verilen grafikteki geometrik parametreler aynı alınmıştır. Her iki grafik arasındaki farklı olan parametre ise, dielektrik taban kalınlığını veren $h\,(r_2 - r_1)$ ifadesidir. Şekil 8.5 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, $R\,(r_1 / r_2)$, $t\,(r_3 - r_2)$ ve f (frekans) ifadelerine bağlı olarak görülen değişimler, Şekil 8.4 ile verilen grafikteki değişimlerle benzerlik göstermektedir. $h\,(r_2 - r_1)$ değerinin 50 μm'den 500 μm'ye çıkması durumunda, iletken kayıp değeri önemli bir ölçüde azalmaktadır.

Şekil 8.6 ile verilen grafikte, ε_r=12.9, σ=3.10^7 S/m, θ/π=4, h (r_2-r_1)=500μm, t (r_3-r_2)=3μm, f=60 GHz ve R (r_1/r_2)=0.25, 0.5 ve 0.778 olmak üzere, Ψ/θ oran ifadesinin bir fonksiyonu olarak, sonlu iletken kalınlıklı silindirik kesitli CPW'nin iletken kayıp ifadesi değişim eğrileri görülmektedir. Şekil 8.6 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, Ψ/θ oran değerinin artması durumunda, iletken kayıp değerinde önce azalma yönünde, daha sonra artma yönünde bir eğilim görülmektedir. $R\,(r_1 / r_2)$ oran değerinin artması durumunda, iletken zayıflaması değeri önemli bir ölçüde azalmaktadır. Silindirik kesitli CPW yapısı için elde edilen kayıp ifadesinin geçerliliğini görmek için, grafik üzerinde Ghione ve Goano (1997) tarafından analizi gerçekleştirilen sonlu toprak düzlemli simetrik düzlemsel CPW yapısı için elde edilen iletken kayıp ifadesinin sonuçları birlikte verilmiştir. Şekil 8.6 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, $R\,(r_1 / r_2)$ oran değerinin 1.0'e doğru yaklaşması durumunda, silindirik kesitli yapının sonuçları ile düzlemsel kesitli yapının sonuçları üst üste çakışmaktadır.

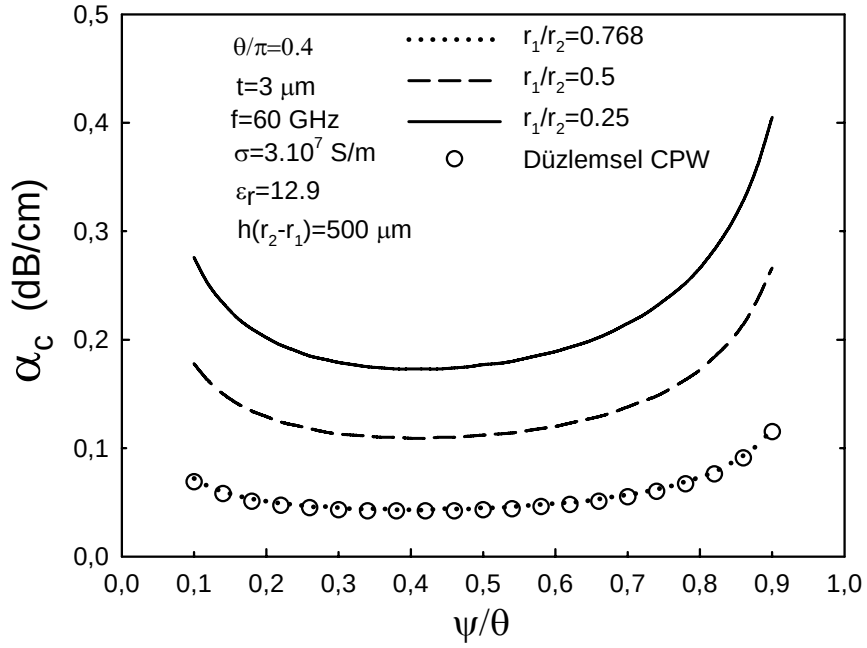
Şekil 8.7 ile verilen grafikte, ε_r=12.9, σ=3.10^7 S/m, θ/π=4, (a_2-a_1)/a_1=0.4, a_2-a_1=500 μm, f=60 GHz, Ψ/θ=0.2 ve 0.8, e=0.001, 0.7 ve 0.9 olmak üzere, $t\,(a_3 - a_2)$ iletken kalınlığının bir fonksiyonu olarak, sonlu iletken kalınlıklı eliptik kesitli CPW'nin iletken kayıp ifadesi değişim eğrileri görülmektedir. Şekil 8.7 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, $t\,(a_3 - a_2)$ iletken kalınlığının artması durumunda, iletken kayıp değeri önemli bir ölçüde azalmaktadır. Ayrıca, Ψ/θ oran değeri ve eksantrikte katsayısı e'nin artması durumunda ise, iletken kayıp ifadesi önemli bir ölçüde artmaktadır. Şekil 8.7 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, eksantrikte katsayısı e=0.001 olması durumunda, eliptik kesitli CPW'nin nümerik sonuçlarıyla, silindirik kesitli CPW'nin nümerik sonuçları üst üste çakışmaktadır.



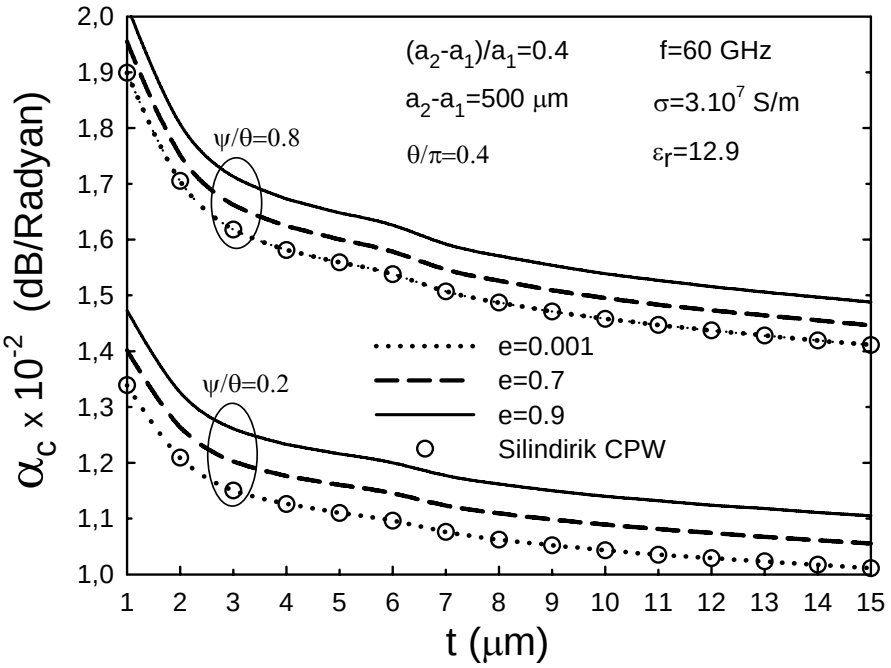
Şekil 8.4: Silindirik Kesitli CPW Yapısı için, R (r_1/r_2) Eğrilik Oranının bir Fonksiyonu Olarak İletken Kayıp İfadesi Değişimi (h=50 μm)



Şekil 8.5: Silindirik Kesitli CPW Yapısı için, R(r_1/r_2) Eğrilik Oranının bir Fonksiyonu Olarak, İletken Kayıp İfadesi Değişimi (h=500 μm)



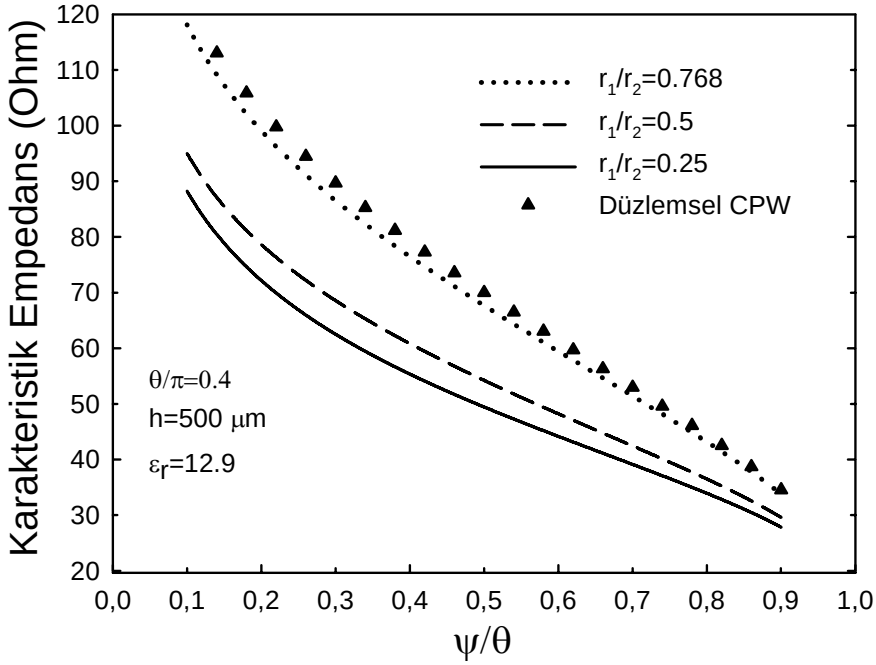
Şekil 8.6: Silindirik Kesitli CPW Yapısı için, Ψ/θ Oranının bir Fonksiyonu Olarak İletken Kayıp İfadesi Değişimi



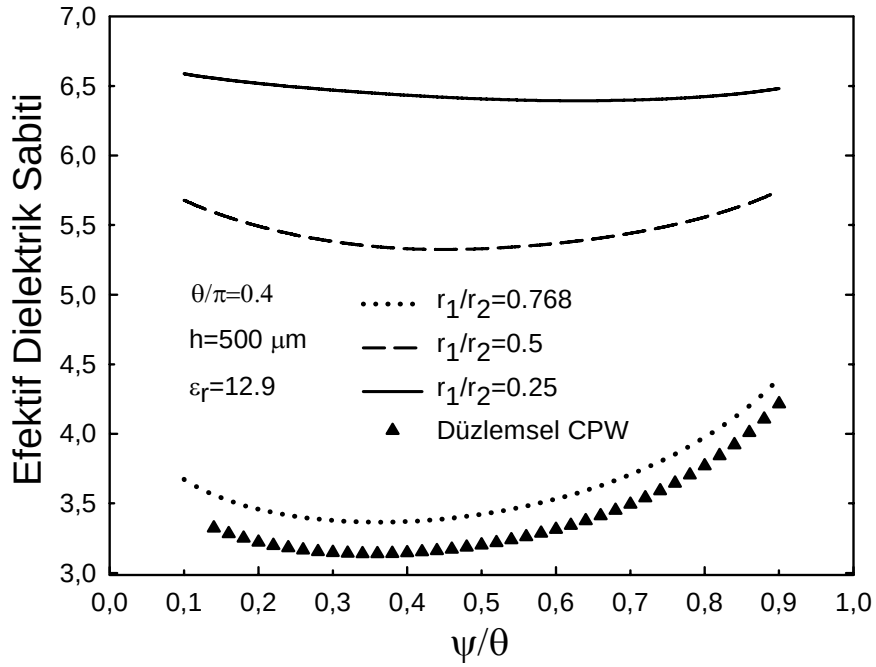
Şekil 8.7: Eliptik ve Silindirik Kesitli CPW Yapısı için, t (r_3-r_2) İletken Metal Kalınlığının bir Fonksiyonu Olarak İletken Kayıp İfadesi Değişimi

Şekil 8.8 ile verilen grafikte, ε_r=12.9, θ/π=4, h (r_2-r_1)=500μm, R (r_1/r_2)=0.25, 0.5 ve 0.778 olmak üzere, Ψ/θ oran değerinin bir fonksiyonu olarak, silindirik kesitli CPW'nin karakteristik empedans değişim eğrileri görülmektedir. Şekil 8.8 ile verilen grafikte de görüldüğü, Ψ/θ oran değerinin artması durumunda, karakteristik empedans değeri 20 ile120 Ohm arası gibi geniş bir aralıkta azalmaktadır. $R(r_1/r_2)$ eğrilik oran değerinin artması durumunda ise, karakteristik empedans değeri önemli bir ölçüde artış göstermektedir. Silindirik kesitli CPW yapısı için elde edilen karakteristik empedans bağıntısının geçerliliği, grafik üzerinde Ghione ve Goano (1997) tarafından analizi gerçekleştirilen sonlu toprak düzlemli simetrik düzlemsel CPW yapısının sonuçları birlikte verilerek gösterilmiştir. Şekil 8.8 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, $R(r_1/r_2)$ oran değerinin 1.0'e doğru yaklaşması durumunda, silindirik kesitli yapının nümerik sonuçlarının, düzlemsel kesitli yapının nümerik sonuçlarına yaklaştığı görülmektedir.

Şekil 8.9 ile verilen grafikte, Ψ/θ oran değerinin bir fonksiyonu olarak, silindirik kesitli CPW'nin efektif dielektrik sabiti değişim eğrileri görülmektedir. Şekil 8.8 ile verilen grafikteki geometrik parametreler ile Şekil 8.9 ile verilen grafikteki geometrik parametreler aynı alınmıştır. Şekil 8.9 ile verilen grafikte görüldüğü gibi, Ψ/θ oran değerinin artması durumunda, efektif dielektrik sabiti değeri önce azalma yönünde, daha sonra artma yönünde bir eğilim göstermektedir. $R(r_1/r_2)$ eğrilik oran değerinin artması durumunda ise, efektif dielektrik sabiti değeri önemli bir ölçüde azalmaktadır. Silindirik kesitli CPW yapısı için elde edilen efektif dielektrik sabiti bağıntısının geçerliliği, karakteristik empedans değişim grafiğinde olduğu gibi, Ghione ve Goano (1997) tarafından analizi gerçekleştirilen sonlu toprak düzlemli simetrik düzlemsel CPW yapısının sonuçlarıyla karşılaştırılarak gösterilmiştir. Şekil 8.9 ile verilen grafikten de görüldüğü gibi, $R(r_1/r_2)$ oran değerinin 1.0'e doğru yaklaşması durumunda, silindirik kesitli CPW yapısının nümerik sonuçlarının, düzlemsel kesitli CPW yapısının nümerik sonuçlarına yaklaştığı görülmektedir. Hem empedans değişim eğrisinde, hem de efektif dielektrik sabiti değişim eğrisinde verilen silindirik kesitli yapının sonuçlarının, düzlemsel kesitli yapının sonuçlarına yaklaşması, analitik bağıntıların doğruluğunu kanıtlamaktadır.



Şekil 8.8: Silindirik Kesitli CPW Yapısı için, Ψ/θ Oranının bir Fonksiyonu Olarak Karakteristik Empedans Değişimi



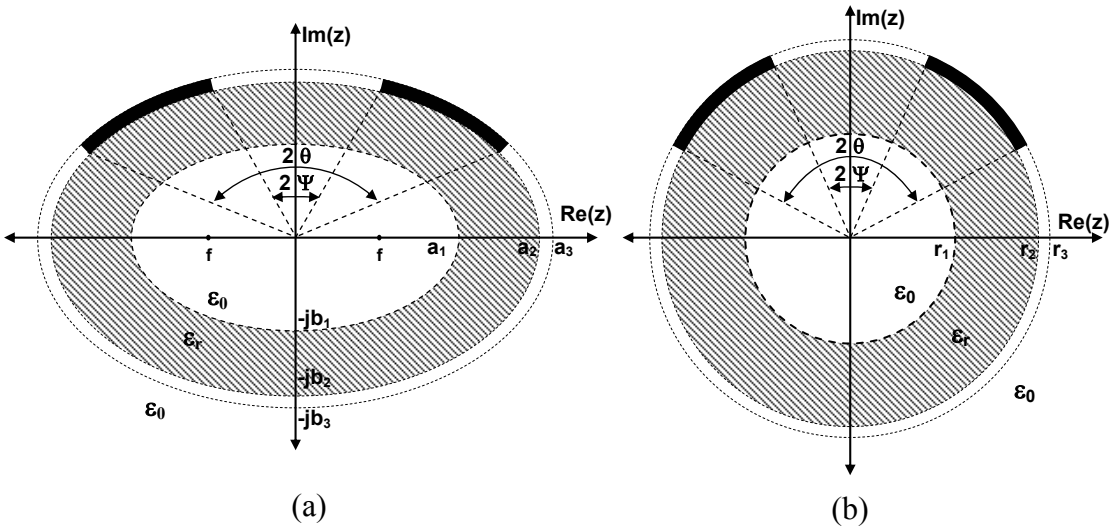
Şekil 8.9: Silindirik Kesitli CPW Yapısı için, Ψ/θ Oranının bir Fonksiyonu Olarak Efektif Dielektrik Sabiti Değişimi

8.2. Eliptik ve Silindirik Kesitli CPS Yapıları İçin İletken Kayıp Analizi

Eliptik ve silindirik kesitli CPW yapılarında olduğu gibi, quasi-statik yaklaşımı içerisinde eliptik ve silindirik kesitli CPS yapılarının şerit iletkenlerdeki akım yoğunluğu dağılımı ve buna bağlı olarak iletken metallerdeki güç zayıflaması, dielektrik taban yok sayılarak serbest hava ortamında hesaplanabilir. Şekil 8.10 ile verilen eliptik ve silindirik kesitli CPS yapılarının serbest ortam hava parametreleri, Denklem (7.1) ile verilen bağıntılar kullanılarak elde edilebilir.

Eliptik ve silindirik kesitli CPS yapılarının iletken kayıplarını elde etmek için, ilk olarak yapıların elektriksel karakteristiklerinin (birim uzunluk başına düşen hat kapasitesi, efektif dielektrik sabiti ve karakteristik empedansı) hesaplanması gerekmektedir. Eliptik ve silindirik kesitli CPS yapılarının elektriksel karakteristikleri, Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak hesaplanabilir.

Kesit görünümleri Şekil 8.10 ile verilen sonlu iletken kalınlıklı eliptik ve silindirik kesitli CPS yapılarında şerit iletkenler arasındaki yarık yay genişliğini gören açı 2Ψ dir. Her bir şerit iletkenin yay genişliğini gören açı ise $\theta - \Psi$ dir. Eliptik kesitli yapının iletken metal kalınlığı, büyük yarıçap için $a_3 - a_2$, küçük yarıçap için $b_3 - b_2$ dir. Silindirik kesitli yapının iletken metal kalınlığı ise $r_3 - r_2$ dir.



Şekil 8.10: Sonlu İletken Kalınlıklı CPS'nin Kesit Görünümü, (a) Eliptik Kesitli Yapı, (b) Silindirik Kesitli Yapı

Dielektrik taban kalınlıkları eliptik kesitli CPS yapısında büyük yarıçap için $a_2 - a_1$, küçük yarıçap için $b_2 - b_1$ olarak verilmiştir. Silindirik kesitli CPS yapısında ise $r_2 - r_1$ olarak verilmiştir. Her iki yapı için de dielektrik tabanın bağıl dielektrik sabiti ε_r dir. Şekil 8.10a ile verilen elipslerin odak mesafesi;

$$f = \sqrt{a_1^2 - b_1^2} = \sqrt{a_2^2 - b_2^2} = \sqrt{a_3^2 - b_3^2} \tag{8.24}$$

şeklindedir.

Sonlu iletken kalınlıklı eliptik ve silindirik kesitli yapıların iletken kayıplarını hesaplamak için, iletken kalınlıklarının sonsuz ince varsayımına dayalı olarak, yapıların elektriksel karakteristiklerinin elde edilmesi gerekir. Sonsuz ince iletken kalınlıklı eliptik ve silindirik kesitli CPS yapılarının elektriksel karakteristikleri, Şekil 8.11 ile verilen bir seri Konformal dönüşümler kullanılarak elde edilebilir. Bu nedenle, ilk olarak Şekil 8.11a ile verilen ve z_1 düzlemi ile tasvir edilen eliptik kesitli CPS yapısı;

$$z_2 = \left(z_1 \pm \sqrt{z_1^2 - f^2}\right) \Big/ f \tag{8.25}$$

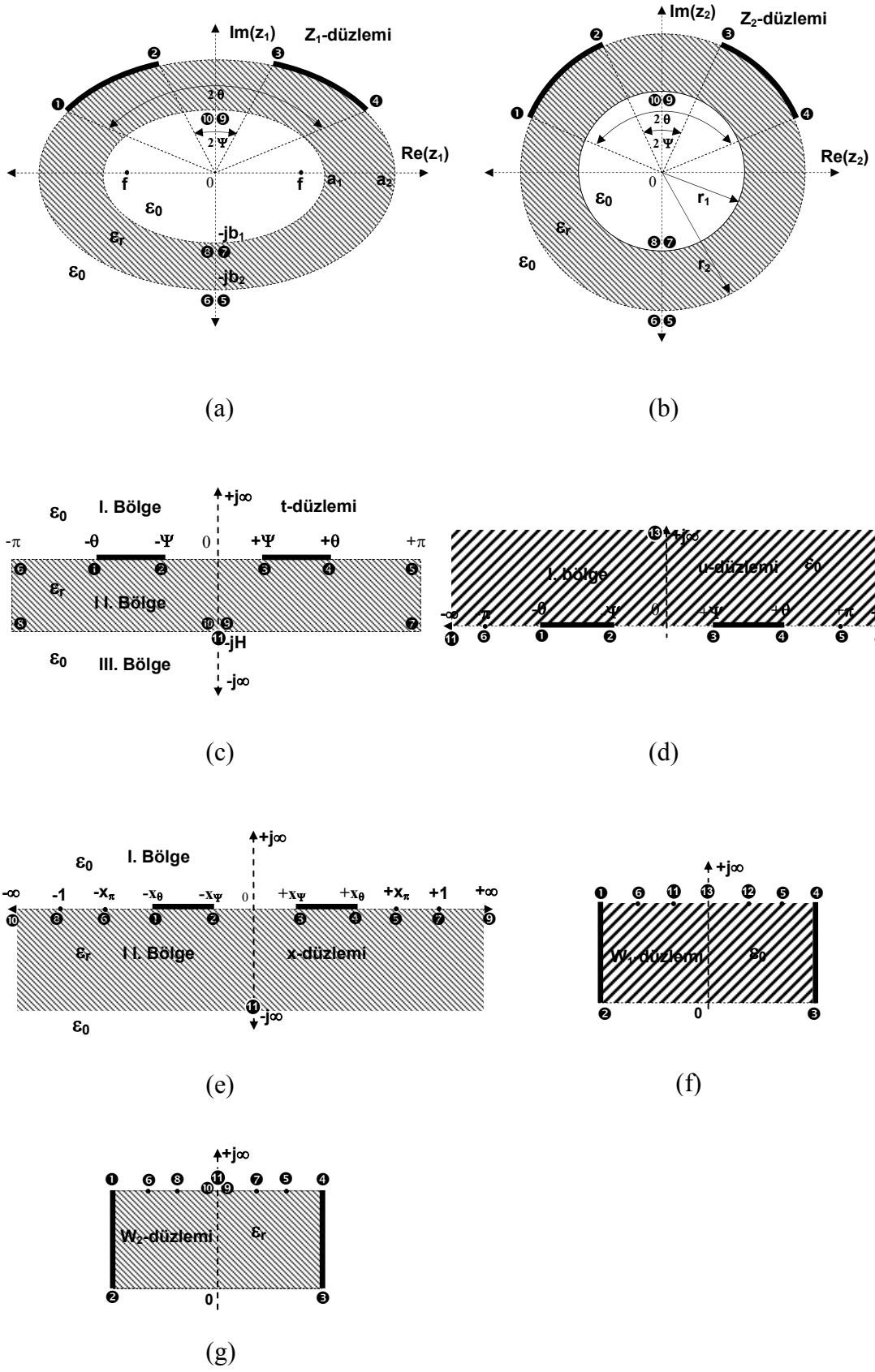
fonksiyonu kullanılarak, Şekil 8.11b ile verilen silindirik kesitli CPS yapısına dönüşür. Silindirik kesitli CPS yapısının r_1 ve r_2 yarıçap ifadeleri, eliptik kesitli yapının geometrik parametrelerine bağlı olarak;

$$r_1 = \sqrt{\frac{a_1 + b_1}{a_1 - b_1}}, \qquad r_2 = \sqrt{\frac{a_2 + b_2}{a_2 - b_2}} \tag{8.26}$$

şeklinde ifade edilir. Silindirik kesitli yapıdan Şekil 8.11c ile verilen düzlemsel kesitli yapıya dönüşüm ise;

$$t = j \ln(z_2 / r_2) \tag{8.27}$$

fonksiyonu vasıtasıyla gerçekleştirilir. Şekil 8.11c ile verilen düzlemsel kesitli yapının birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi, Chen ve Chou (1997) tarafından düzlemsel CPS yapısı için sunulan Konformal dönüşümler kullanılarak hesaplanabilir. Şekil 8.11c ile verilen yapının toplam hat kapasitesi I., II. ve III. bölge



Şekil 8.11: Eliptik ve Silindirik Kesitli CPS'ler için bir Seri Konformal Dönüşümler

kapasitelerinin toplamı şeklinde, aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir:

$$C_T = C_{01} + C_{03} + C_d \tag{8.28}$$

Şekil 8.11d ile verilen ve I. bölge ile temsil edilen u-düzleminin üst yarı bölgesi;

$$w_1 = \int \frac{du}{\sqrt{(u^2 - \Psi^2)(u^2 - \theta^2)}} \tag{8.29}$$

Schwarz-Christoffel dönüşümü vasıtasıyla Şekil 8.11f ile verilen ve w_1-düzlemi ile tasvir edilen paralel plakalı bir yapıya dönüşür. Şekil 8.11c ile verilen düzlemsel kesitli yapıda da görüldüğü gibi, dielektrik tabanın yok sayıldığı bir durumda, I. bölge ile III. bölge hava kapasiteleri birbirine eşittir. Böylece, I. ve III. bölge serbest ortam hava kapasiteleri;

$$C_{01} = C_{03} = \frac{\varepsilon_0}{2} \frac{K(k_0^{'})}{K(k_0)} \tag{8.30}$$

şeklinde ifade edilir. Burada k_0 ve $k_0^{'}$ modülleri;

$$k_0 = \frac{\Psi}{\theta}, \qquad k_0^{'} = \sqrt{1 - (k_0)^2} \tag{8.31}$$

şeklindedir. Şekil 8.11c ile verilen düzlemsel yapının dielektrik taban kalınlığı H,, eliptik ve silindirik kesitli CPS'nin geometrik boyutlarına bağlı olarak;

$$H = \ln(\frac{r_2}{r_1}) = \ln(\frac{a_2 + b_2}{a_1 + b_1}) \tag{8.32}$$

şeklinde ifade edilir.

II. bölge ile temsil edilen dielektrik taban kapasitesini elde etmek için, Şekil 8.11c ile verilen düzlemsel yapının dielektrik taban bölgesi, ters Schwarz-Christoffel dönüşümü kullanılarak, Şekil 8.11e ile verilen x-düzleminin alt yarı bölgesine dönüşür. Şekil 8.11e ile verilen x- düzlemindeki x_π, x_Ψ ve x_θ ifadeleri ise;

$$x_\pi = \left[\frac{\exp(\pi^2/H)-2}{\exp(\pi^2/H)+2}\right]^2, \qquad 1<\frac{\pi}{H}<\infty,$$
$$x_\pi = \sqrt{1-\left[\frac{\exp(H)-2}{\exp(H)+2}\right]^4}, \qquad 0<\frac{\pi}{H}<1 \tag{8.33a}$$

$$F(\arcsin(x_\Psi / x_\pi), x_\pi) = \frac{\Psi}{\pi}K(x_\pi),$$
$$F(\arcsin(x_\theta / x_\pi), x_\pi) = \frac{\theta}{\pi}K(x_\pi) \tag{8.33b}$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (8.33) bağıntısında yer alan $F(\phi,k)$ ifadeleri, I. tür tam olmayan eliptik integrallerdir. Bu integraller, Cheng ve Robertson (1995) tarafından verilen yaklaşık çözümler kullanılarak hesaplanabilir. Son olarak, Şekil 8.11e ile tasvir edilen x- düzleminin alt yarı bölgesi;

$$w_2 = \int \frac{dx}{\sqrt{(x^2-x_\Psi^2)(x^2-x_\theta^2)}} \tag{8.34}$$

Schwarz-Christoffel dönüşümü vasıtasıyla, Şekil 8.11g ile verilen ve w_2-düzlemi ile tasvir edilen paralel plakalı bir yapıya dönüşür. Böylece, kısmi kapasitans yaklaşımı kullanılarak dielektrik taban bölgesinde oluşan kapasite;

$$C_d = \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_r-1)}{2}\frac{K(k_d')}{K(k_d)} \tag{8.35}$$

şeklinde elde edilir. Burada k_d ve k_d' modülleri;

$$k_d = \frac{x_\Psi}{x_\theta}, \qquad k_d' = \sqrt{1-(k_d)^2} \tag{8.36}$$

şeklindedir. Denklem (8.30) ve Denklem (8.35) bağıntılarında geçen $K(k)/K(k')$ oranı için yaklaşık çözümler, Hilberg (1969) tarafından verilmiştir. Eliptik ve silindirik kesitli CPS'nin efektif dielektrik sabiti;

$$\varepsilon_{eff} = \frac{C_T}{C_0} = 1 + q(\varepsilon_r - 1), \qquad q = \frac{1}{2}\frac{K(k_d^{'})K(k_0)}{K(k_d)K(k_0^{'})} \tag{8.37}$$

şeklinde elde edilir. Sonuç olarak, eliptik ve silindirik kesitli CPS yapılarının faz hızı ve karakteristik empedans ifadeleri;

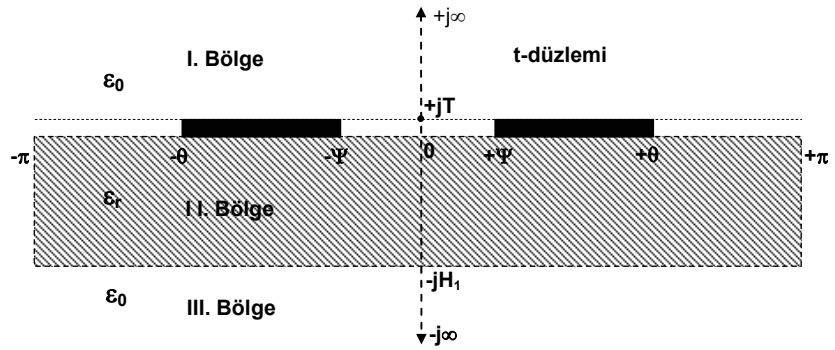
$$V_{faz} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}}, \qquad Z_0 = \frac{c}{V_{faz}C_T} = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}}\frac{K(k_0)}{K(k_0^{'})} \tag{8.38}$$

şeklinde elde edilir. Burada c terimi, serbest ortamdaki ışık hızıdır.

Eliptik ve silindirik kesitli CPS yapısının iletken kayıp ifadesini elde etmek için, ilk olarak Şekil 8.10 ile verilen eliptik kesitli CPS yapısı, Denklem (8.25) bağıntısı vasıtasıyla, silindirik kesitli CPS yapısına dönüştürülür. Silindirik kesitli CPS yapısı ise, Denklem (8.27) bağıntısı kullanılarak, Şekil 8.12 ile verilen sonlu iletken kalınlıklı düzlemsel CPS yapısına dönüştürülür. Şekil 8.10a ile verilen sonlu iletken kalınlıklı elipslerin odak mesafesi;

$$f = \sqrt{a_1^2 - b_1^2} = \sqrt{a_2^2 - b_2^2} = \sqrt{a_3^2 - b_3^2} \tag{8.39}$$

şeklindedir. Şekil 8.10b'de kesit görünümü verilen silindirik kesitli CPS yapısının yarıçap ifadeleri, eliptik kesitli CPS'nin geometrik boyutlarına bağlı olarak;



Şekil 8.12: Konformal Dönüşümler Kullanılarak Sonlu İletken Kalınlıklı Eliptik ve Silindirik Kesitli CPS Yapısından Sonlu İletken Kalınlıklı Düzlemsel CPS Yapısına Dönüşüm

$$r_1 = \sqrt{\frac{a_1 + b_1}{a_1 - b_1}}, \qquad r_2 = \sqrt{\frac{a_2 + b_2}{a_2 - b_2}}, \qquad r_3 = \sqrt{\frac{a_3 + b_3}{a_3 - b_3}}, \tag{8.40}$$

şeklinde yazılabilir. Şekil 8.12 ile tasvir edilen düzlemsel CPS yapısındaki T ve H_1 ifadeleri, eliptik ve silindirik kesitli yapının geometrik boyutlarına bağlı olarak;

$$T = \ln(\frac{r_3}{r_2}) = \ln(\frac{a_3 + b_3}{a_2 + b_2}), \qquad H_1 = \ln(\frac{r_2}{r_1}) = \ln(\frac{a_2 + b_2}{a_1 + b_1}) \tag{8.41}$$

şeklinde ifade edilir. Şekil 8.12 ile verilen sonlu iletken kalınlıklı düzlemsel CPS yapısının iletken kayıp ifadesi, benzer işlem tekrarı yapmamak amacıyla, Şekil 7.1 ile verilen tam asimetrik CPW yapısının iletken zayıflaması için elde edilen Denklem (7.20-40) bağıntıları ile Ghione (1993) tarafından asimetrik düzlemsel CPS yapısının iletken kayıpları için elde edilen analitik bağıntılardan faydalanılarak;

$$\alpha_c = \frac{R_s \sqrt{\varepsilon_{eff}}}{480\pi} \frac{\theta^2}{K(k_0)K(k_0^{'})(\theta^2 - \Psi^2)}(A) \tag{8.42}$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (8.42) bağıntısındaki A ifadesi $A = A_1 + A_2$ olmak üzere;

$$A_1 = \frac{1}{\Psi}\left\{\ln\left[\frac{8\pi\Psi}{\ln(r_3 / r_2)}\frac{(\theta - \Psi)}{(\theta + \Psi)}\right] + \pi\right\}$$
$$A_2 = \frac{1}{\theta}\left\{\ln\left[\frac{8\pi\theta}{\ln(r_3 / r_2)}\frac{(\theta - \Psi)}{(\theta + \Psi)}\right] + \pi\right\} \tag{8.43}$$

şeklindedir.

Bölüm 7'de Şekil 7.1 ile verilen tam asimetrik CPW yapısı ile Şekil 8.1 ile verilen eliptik ve silindirik kesitli CPW yapısındaki iletken kayıp hesaplamalarında, düşük frekanslar bölgesinde meydana gelen hata oranlarının düzeltilmesi için, Holloway ve Kuester (1995) tarafından sunulan yaklaşımlar kullanılmıştır. Bu yaklaşımlar, Şekil 8.10 ile verilen eliptik ve silindirik kesitli CPS yapısı için de uygulanabilir. Bu yaklaşımlar kullanılarak, Denklem (8.42-43) ile verilen bağıntı;

$$\alpha_c^{'} \approx \mathrm{Re}\left(\frac{Q}{Z_0} \frac{2}{1+\sqrt{1+\dfrac{4Q}{Z_0 \gamma}}} \right), \qquad \gamma = j\lambda_0 \sqrt{\varepsilon_{eff}} \tag{8.44}$$

şekline dönüşür. Burada λ_0 ifadesi, serbest ortamın dalga boyudur. Q ifadesi ise;

$$Q = \frac{R_s}{4} \frac{\theta^2}{K(k_0)^2(\theta^2 - \Psi^2)}(A') \tag{8.45}$$

şeklinde verilir. Denklem (8.42) bağıntısında verilen A ifadesindeki $4\pi / \ln(r_3 / r_2)$ terimi, $1/\Delta$ durdurma mesafesi ile değiştirilerek, Denklem (8.45) ile verilen bağıntıda yer alan $A^{'}$ ifadesi, $A^{'} = A_1^{'} + A_2^{'}$ olmak üzere;

$$A_1^{'} = \frac{1}{\Psi}\left\{ \ln\left[\frac{2\Psi}{\Delta} \frac{(\theta - \Psi)}{(\theta + \Psi)(\pi - \Psi)} \right] \right\}, \qquad A_2^{'} = \frac{1}{\theta}\left\{ \ln\left[\frac{2\theta}{\Delta} \frac{(\theta - \Psi)}{(\theta + \Psi)} \right] \right\} \tag{8.46}$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (8.23) ve Denklem (8.46) bağıntılarında yer alan Δ durdurma mesafesi, Denklem (7.38) ile verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir.

Şekil 8.1'deki eliptik ve silindirik kesitli CPW yapısı ile Şekil 8.10'daki eliptik ve silindirik kesitli CPS yapısının dielektrik kayıpları, şerit, mikroşerit ve eşdüzlemli yapılarda olduğu gibi, Denklem (7.39) bağıntısı kullanılarak elde edilebilir. Dielektrik kayıp hesaplamalarında, Denklem (7.39) bağıntısında geçen efektif dielektrik sabiti ifadeleri, eliptik ve silindirik kesitli CPW yapısı için Denklem (8.14), eliptik ve silindirik kesitli CPS yapısı için Denklem (8.37) ile verilen bağıntılar kullanılarak hesaplanabilir.

Sonuç olarak, eliptik ve silindirik kesitli CPW yapısı ile eliptik ve silindirik kesitli CPS yapısı için toplam zayıflama;

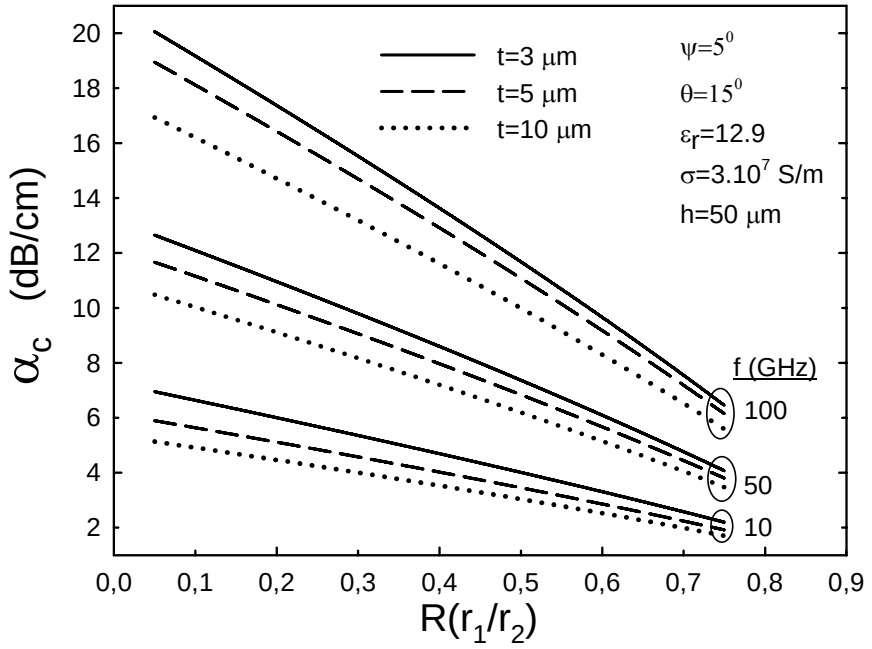
$$\alpha_T = \alpha_c + \alpha_d \tag{8.47}$$

şeklinde ifade edilir. Burada α_c iletken kayıplarını, α_d ise dielektrik kayıplarını ifade etmektedir.

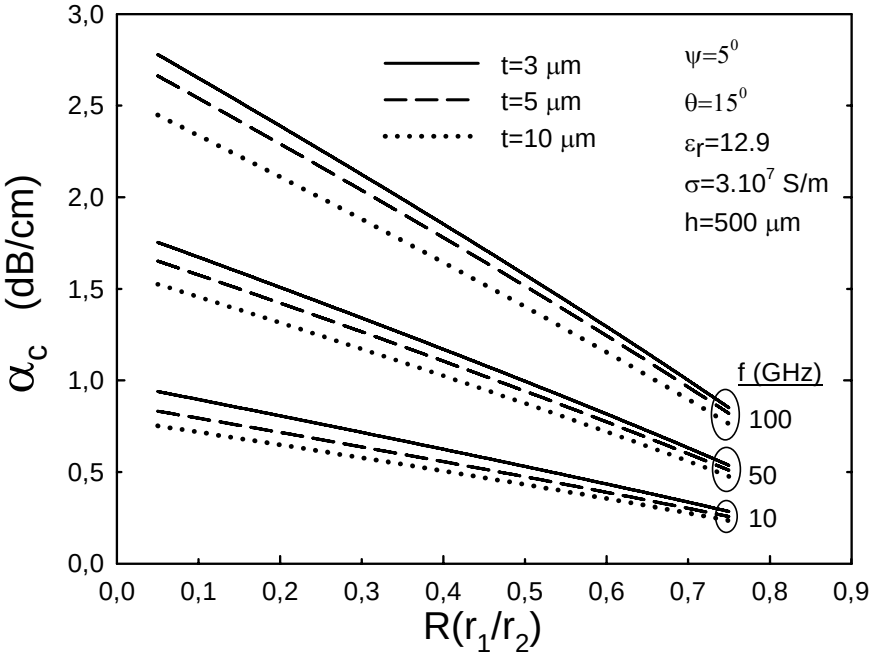
8.2.1. Eliptik ve silindirik kesitli CPS yapılarının iletken kayıp analizi için nümerik sonuçlar ve tartışmalar

Şekil 8.10 ile verilen sonlu iletken kalınlıklı eliptik ve silindirik kesitli CPS'nin elektriksel karakteristikleri, quasi-statik yaklaşımı içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak kapalı form analitik bağıntılar formunda elde edilmiştir. Şekil 8.13-18 ile verilen grafiklerde, sonlu iletken kalınlıklı eliptik ve silindirik kesitli CPS yapısının geometrik boyutlarına bağlı olarak, iletken kayıp, karakteristik empedans ve efektif dielektrik sabiti ifadelerinin değişim eğrileri verilmiştir. Bu bölümde verilen grafik analizlerinde, eliptik ve silindirik kesitli CPS yapıları için elde edilen analitik bağıntıların geçerliliği, farklı geometrik boyutlarda, düzlemsel ve silindirik kesitli CPS yapılarının nümerik sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Şekil 8.13 ve Şekil 8.14 ile verilen grafiklerde, ε_r=12.9, σ=3.10^7 S/m, Ψ=5^0, θ=15^0, t (r_3-r_2)=3, 5 ve 10μm, f=10, 50 ve 100 GHz olmak üzere, eğrilik biçim oranı R (r_1/r_2)'nın bir fonksiyonu olarak, sonlu iletken kalınlıklı silindirik kesitli CPS'nin iletken kayıp ifadesi değişim eğrileri görülmektedir. Şekil 8.13 ile verilen grafikte h (r_2-r_1)=50 μm, Şekil 8.14 ile verilen grafikte ise h (r_2-r_1)=500 μm alınmıştır. Şekil 8.13 ve Şekil 8.14 ile verilen grafiklerde de görüldüğü gibi, $R(r_1 / r_2)$ oran değerinin artması durumunda, iletken kayıp ifadesi geniş bir aralıkta azalmaktadır. Silindirik kesitli CPS yapısındaki iletken metal malzemenin yüzey rezistansına bağlı olarak değişim gösteren frekans değerinin artması durumunda, iletken kayıp değeri önemli bir ölçüde artmaktadır. Ayrıca, silindirik kesitli CPS'nin iletken metal kalınlığını ifade eden $t(r_3 - r_2)$ kalınlığının artması durumunda ise, iletken kayıp ifadesinde önemli bir ölçüde azalma görülmektedir. İletken kayıp değerlerindeki azalmanın nedeni, t iletken kalınlığının artması sonucunda, iletkenlerdeki metal yüzeyin artmasından kaynaklanmaktadır. Grafiklerde de görüldüğü gibi, dielektrik taban kalınlığını ifade eden $h(r_2 - r_1)$ değerinin 50 μm'den 500 μm'ye yükselmesi durumunda, silindirik kesitli CPS yapısının iletken kayıp değeri büyük bir ölçüde azalmaktadır.



Şekil 8.13: Silindirik Kesitli CPS Yapısı için, $R(r_1/r_2)$ Eğrilik Oranının bir Fonksiyonu Olarak İletken Kayıp İfadesi Değişimi (h=50 μm)

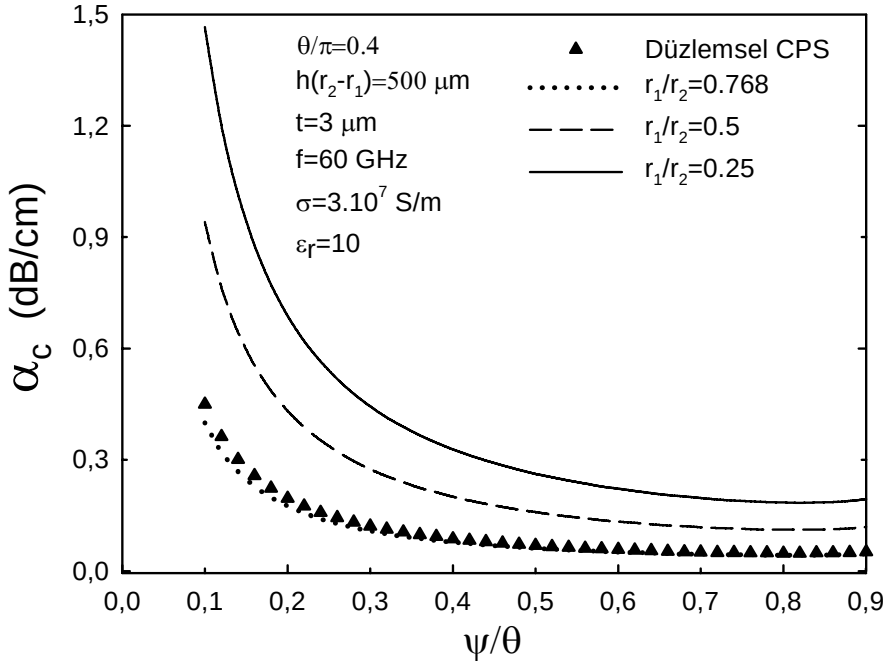


Şekil 8.14: Silindirik Kesitli CPS Yapısı için, $R(r_1/r_2)$ Eğrilik Oranının bir Fonksiyonu Olarak, İletken Kayıp İfadesi Değişimi (h=500 μm)

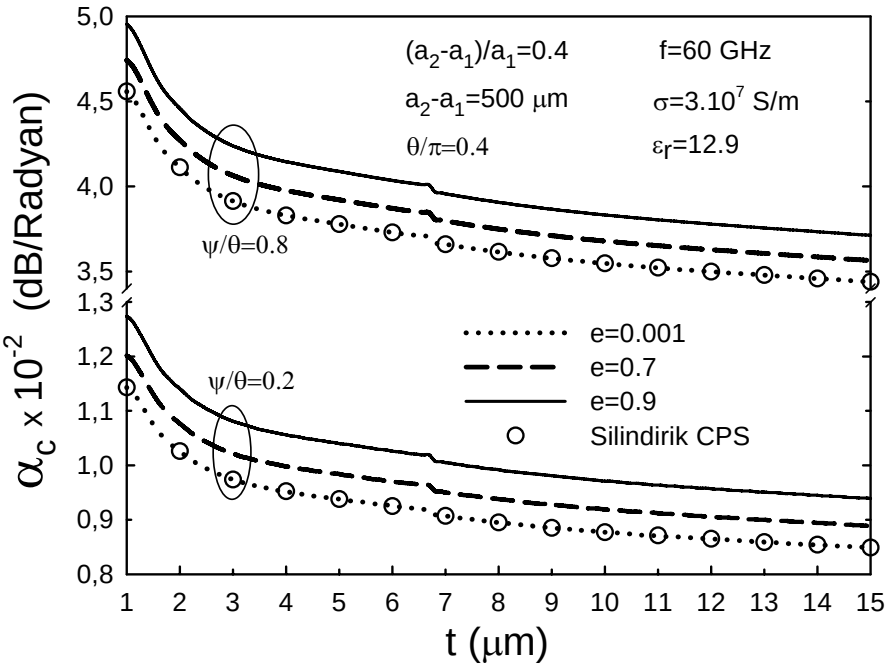
Şekil 8.15 ile verilen grafikte, ε_r=12.9, σ=3.10^7 S/m, θ/π=4, h (r_2-r_1)=500μm, t (r_3-r_2)=3μm, f=60 GHz ve R (r_1/r_2)=0.25, 0.5 ve 0.778 olmak üzere, Ψ/θ oranının bir fonksiyonu olarak, silindirik kesitli CPS'nin iletken kayıp ifadesi değişim eğrileri görülmektedir. Şekil 8.15 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, Ψ/θ ile $R\,(r_1 / r_2)$ oran değerinin artması durumunda, iletken kayıp değeri önemli bir ölçüde azalmaktadır. Silindirik kesitli yapının eğrilik biçimini ifade eden $R\,(r_1 / r_2)$ oran değerinin 1.0'e doğru yaklaşması durumunda ise, silindirik kesitli CPS yapısının düzlemsel kesitli CPS yapısına dönüştüğü görülmektedir.

Şekil 8.16 ile verilen grafikte, ε_r=12.9, σ=3.10^7 S/m, θ/π=4, (a_2-a_1)/a_1=0.4, a_2-a_1=500 μm, f=60 GHz, Ψ/θ=0.2 ve 0.8 ile e=0.001, 0.7 ve 0.9 olmak üzere, t (a_3-a_2) iletken kalınlığının bir fonksiyonu olarak, eliptik kesitli CPS'nin iletken kayıp ifadesi değişim eğrileri görülmektedir. Şekil 8.16 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, $t\,(a_3 - a_2)$ iletken kalınlığının artması durumunda, iletken kayıp değerleri önemli bir ölçüde azalmaktadır. Ayrıca, Ψ/θ oran değeri ile eliptik yapı için eksantrikte katsayısı e'nin artması durumunda, iletken kayıp değerlerinde önemli bir ölçüde artma görülmektedir. Eliptik kesitli CPS yapısı için elde edilen iletken kayıp bağıntılarının doğruluğunu görmek için, silindirik kesitli CPS yapısının nümerik değerleri de grafik üzerinde verilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi, eksantrikte katsayısı e=0.001 olması durumunda, eliptik kesitli CPS'nin nümerik sonuçları ile silindirik kesitli CPS'nin nümerik sonuçları üst üste çakışmaktadır.

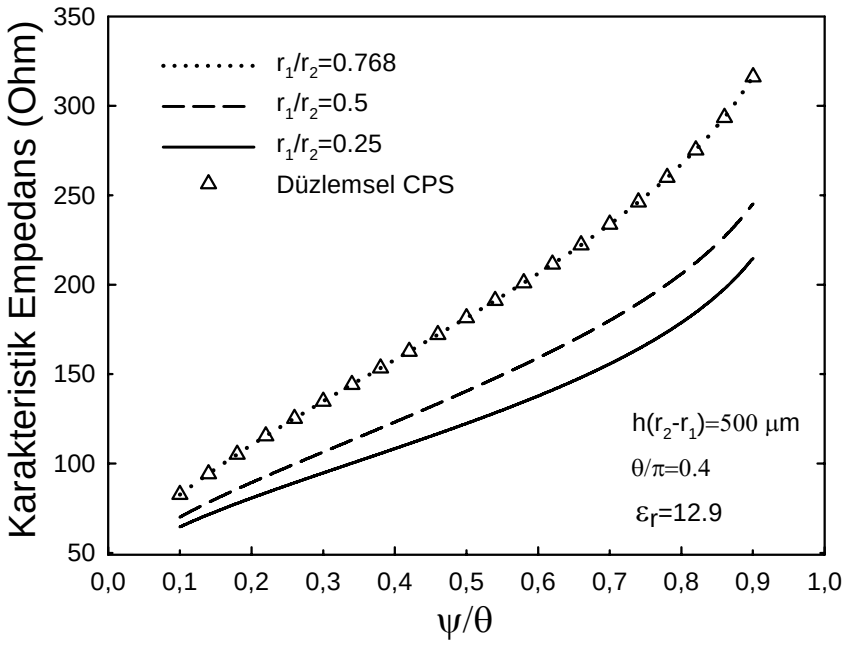
Şekil 8.17 ve Şekil 8.18 ile verilen grafiklerde, ε_r=12.9, θ/π=4, h (r_2-r_1)=500 μm, R(r_1/r_2)=0.25, 0.5 ve 0.778 olmak üzere, Ψ/θ oran değerinin bir fonksiyonu olarak, silindirik kesitli CPS'nin empedans ve efektif dielektrik sabiti değişim eğrileri görülmektedir. Her iki grafikte de görüldüğü gibi, Ψ/θ oran değerinin artması durumunda, empedans değerlerinde geniş bir aralıkta artış görülmekte, efektif dielektrik sabiti değerlerinde belirli bir oranda azalma eğilimi görülmektedir. $R\,(r_1 / r_2)$ oran değerinin artması durumunda, empedans değerleri geniş bir aralıkta artış göstermekte, efektif dielektrik sabiti değerleri ise önemli bir ölçüde azalmaktadır. Silindirik kesitli yapıda, eğrilik biçim oranı $R\,(r_1 / r_2)$'nin 1.0'e doğru yaklaşması durumunda, silindirik kesitli CPS'nin nümerik sonuçları ile düzlemsel kesitli CPS'nin nümerik sonuçları üst üste çakışmaktadır.



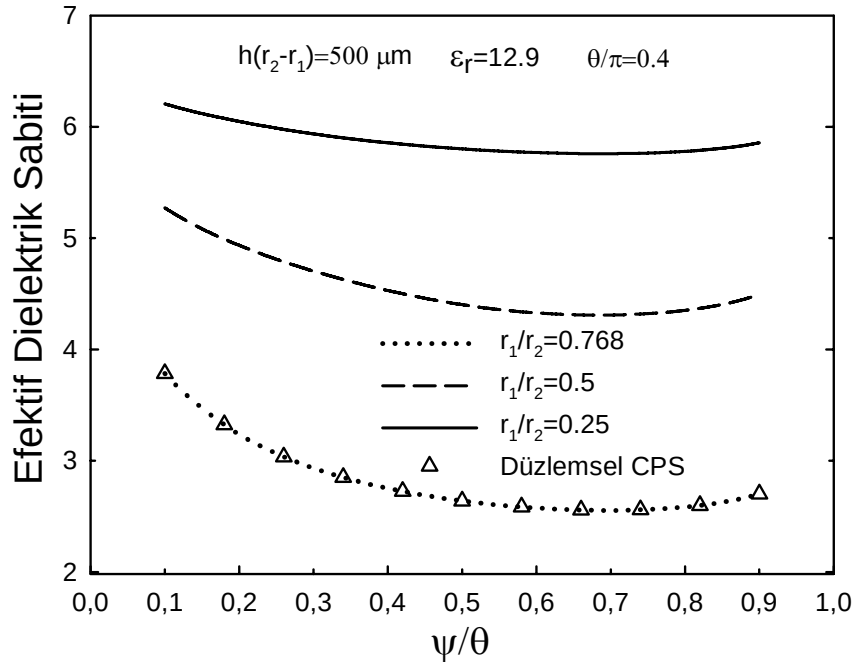
Şekil 8.15: Silindirik Kesitli CPS Yapısı için, Ψ/θ Oranının bir Fonksiyonu Olarak İletken Kayıp İfadesi Değişimi



Şekil 8.16: Eliptik ve Silindirik Kesitli CPS Yapısı için, t (r_3-r_2) İletken Kalınlığının bir Fonksiyonu Olarak İletken Kayıp İfadesi Değişimi



Şekil 8.17: Silindirik Kesitli CPS Yapısı için Ψ/θ Oranının bir Fonksiyonu Olarak Karakteristik Empedans İfadesi Değişimi



Şekil 8.18: Silindirik Kesitli CPS Yapısı için Ψ/θ Oranının bir Fonksiyonu Olarak Efektif Dielektrik Sabiti Değişimi

9. YAPILAN ANALİZLERLE İLGİLİ GENEL TARTIŞMALAR

Bu tez çalışması kapsamında tasarımları yapılarak analizleri gerçekleştirilen eşdüzlemli iletim hatlarının elektriksel karakteristiklerini ifade eden grafikler, Bölüm 4-8 içerisinde verilmiştir. Bu grafiklerdeki değişimler, her bir yapı için ayrı ayrı olmak üzere, nümerik sonuçlar ve tartışmalar bölümünde bir tespit olarak anlatılmıştır. Her bir eşdüzlemli iletim hattı için, ilgili bölümlerin sonralarında verilen grafik analizlerinden aşağıdaki sonuçlar çıkartılabilir.

Bölüm 4'ün ilk kısmında, analizi gerçekleştirilen ve kesit görünümü Şekil 4.1 ile verilen tam ekranlı kuplajlı CPW yapısının elektriksel karakteristiklerini veren analitik bağıntıların doğruluğu, üç ayrı karşılaştırma yapılarak kanıtlanmıştır. İlk olarak yapılan karşılaştırmada, Şekil 4.1 ile verilen tam ekranlı kuplajlı CPW yapısında c/G oran değeri sıfıra (c/G≅0) yaklaştığı zaman, yapının geometrik özellikleri, Yuan ve arkadaşları (1995) tarafından analiz edilen yapıya dönüşmektedir. Bu nedenle, her iki yapının nümerik sonuçlarının grafikler üzerinde çakıştığı görülmektedir. İkinci olarak yapılan karşılaştırma, Gentili ve Macchiarella (1994) tarafından analiz edilen tam ekranlı kuplajlı CPW yapısı ile olmuştur. Karşılaştırmada, her iki yapının geometrik boyutları aynı alınmıştır. Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 ile verilen grafiklerde görüldüğü gibi, analitik bağıntı sonuçları ile Spektral-domen yöntemi sonuçları arasında iyi bir uyum görülmektedir. Son olarak yapılan karşılaştırma ise, tam ekranlı kuplajlı CPW'nin farklı geometrik boyutlarında ve frekans değerlerinde Sonnet simülasyon programında modellenmesiyle yapılmıştır. Analitik bağıntıların nümerik sonuçları ile simülasyon sonuçları arasındaki uyum, Tablo 4.1-2'de açıkça görülmektedir.

Şekil 4.4-8 ile verilen grafiksel değişimler ile Tablo 4.1-2'deki nümerik sonuçlar, tam ekranlı kuplajlı CPW yapısında c/G oranı ile temsil edilen yanal toprak düzlemlerin değiştirilmesiyle, yapının çift ve tek mod karakteristik empedans ve kuplaj katsayısının geniş bir aralıkta ayarlanabileceğini göstermektedir. Ayrıca, kuplajlı CPW yapısının tam ekranlanmasıyla, yapının dispersif özellikleri de azaltılabilir. Bu durumu, Tablo 4.1-2 içerisinde verilen nümerik sonuçlar doğrulamaktadır.

Bölüm 4'ün ikinci kısmında, kesit görünümü Şekil 4.9 ile verilen tam ekranlı geniş yanlı kuplajlı CPW yapısı için türetilen analitik bağıntıların doğruluğu, üç ayrı karşılaştırma yapılarak kanıtlanmıştır. İlk olarak yapılan karşılaştırma, Tran ve Nguyen (1993) tarafından Quasi-statik spektral domen tekniği kullanılarak analiz edilen yapı ile tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW yapısı arasında olmuştur. Her iki yapının da geometrik boyutları aynı alınmıştır. Şekil 4.12 ile verilen grafikte de görüldüğü gibi, her iki yapının sonuçları arasında iyi bir uyum görülmektedir. İkinci olarak yapılan karşılaştırma, Bedair ve Wolff (1989) tarafından analiz edilen sonsuz yanal toprak düzlemli geniş-yanlı kuplajlı CPW ile yapılmıştır. Şekil 4.9 ile verilen tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW yapısında b/G oran değeri sıfıra ($b/G \cong 0$) yaklaştığı zaman, yapının geometrik özellikleri, Bedair ve Wolff (1989) tarafından analizi gerçekleştirilen yapıya dönüşmektedir. Fiziksel olarak gerçekleşen bu durumu, Şekil 4.13-17 ile verilen grafikler doğrulamaktadır Son olarak yapılan karşılaştırma ise, değişik geometrik boyutlarda ve frekans değerlerinde, Şekil 4.9 ile verilen yapının analitik bağıntı sonuçları ile Sonnet simülasyon sonuçları arasında yapılmıştır. Tablo 4.3-4'de, analitik bağıntıların nümerik sonuçları ile simülasyon sonuçları arasında görülen uyum, analitik ifadelerin doğruluğunu göstermektedir.

Şekil 4.12-17'deki grafikler ile Tablo 4.3-4'deki sayısal sonuçlar, tam ekranlı geniş yanlı kuplajlı CPW yapısında W/D ve b/G oran değerlerinin değiştirilmesiyle, yapının çift ve tek mod empedansının, efektif dielektrik sabiti değerlerinin ve kuplaj katsayısının geniş bir aralıkta ayarlanabileceğini göstermektedir. Ayrıca, geniş yanlı kuplajlı CPW yapısının tam ekranlanmasıyla, yapıdaki dispersif özelliklerin azaltılabileceği, Tablo 4.3-4 içerisinde verilen nümerik sonuçlardan açıkça görülmektedir. Çünkü, tablolarda verilen yüksek frekanslardaki (41 Ghz) simülasyon sonuçları ile analitik bağıntı sonuçları arasındaki uyum, bu durumu doğrulamaktadır.

Bölüm 4'ün son kısmında ise, kesit görünümü Şekil 4.18 ile verilen toprak düzlemlere dikey iletken ilaveli CPW'nin analizi gerçekleştirilmiş ve yapının elektriksel karakteristiklerini veren analitik bağıntıların doğruluğu, iki ayrı karşılaştırma yapılarak kanıtlanmıştır. İlk olarak yapılan karşılaştırma, Şekil 4.18a'daki yapı ile Ghione ve Naldi (1987) tarafından analiz edilen alt ve üst iletken destekli CPW yapısı arasında olmuştur. İkinci olarak yapılan karşılaştırma ise, Şekil 4.18b'deki yapı ile Bedair ve Wolf (1992) tarafından analiz edilen iletken

destekli CPW yapısı arasında olmuştur. Her iki karşılaştırmada da, s/h oran değerinin 1.0 olması durumunda, Şekil 4.18 ile verilen yapılar, Ghione ve Naldi (1987) ile Bedair ve Wolf (1992) tarafından analiz edilen yapılara dönüşmektedir. Şekil 4.21-24'deki grafikler üzerinde verilen s/h=1.0 oran değerlerindeki nümerik sonuçlar ile literatürdeki (Ghione ve Naldi 1987, Bedair ve Wolf 1992) nümerik sonuçların üst üste çakışması, analitik bağıntıların geçerliliğini doğrulamaktadır.

Şekil 4.21-24 ile verilen grafiklerde, konvansiyonel CPW yapısının alt ve üst toprak düzlemlerine ilave dikey toprak düzlemlerin eklenmesiyle, yapının empedans değerlerinin geniş bir aralıkta değişim gösterdiği görülmektedir. İlk olarak bu tez çalışması kapsamında ele alınan ve tasarımı yapılan Şekil 4.18'deki yapılar, mikrodalga iletim hat uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilir. Çünkü, bu tip yapılardaki dikey toprak düzlemlerin değiştirilmesiyle, yapıların karakteristik empedansları geniş bir aralıkta ayarlanabilir. Bilindiği üzere, mikrodalga iletim hat uygulamalarında kullanılan dielektrik taban malzemeleri, genellikle standart boyutlardadır. Standart dielektrik taban malzeme boyutlarının değiştirilmesine gerek kalmadan, yapının elektriksel karakteristikleri, ilave dikey toprak düzlemlerin değiştirilmesiyle ayarlanabilir. Ayrıca, dikey iletken toprak düzlemler, CPW yapılarına ek mekaniksel dayanım da kazandırmaktadır. Böylece, CPW yapılarının ortalama güç taşıma kapasitesi artabilir.

Bölüm 5'in ilk kısmında, kesit görünümü Şekil 5.1 ile verilen sonlu toprak düzlem genişlikli kuplajlı CPW ile kesit görünümü Şekil 5.6 ile verilen eliptik kesitli kuplajlı CPW yapılarının tasarımları yapılmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1 ile verilen yapı için elde edilen analitik bağıntıların geçerliliği, yapının değişik geometrik boyutlarında ve farklı frekans değerlerinde, Sonnet simülasyon programında modellenmesiyle doğrulanmıştır. Çünkü, Tablo 5.1-2'de, Sonnet simülasyon programı kullanılarak elde edilen frekans bağımlı nümerik sonuçlar ile analitik bağıntıların sonuçları arasıda iyi bir uyum görülmektedir. Ayrıca, Şekil 5.1 ile verilen sonlu dielektrik kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlemli CPW yapısı farklı geometrik boyutlarda, Cheng (1996) tarafından analizi gerçekleştirilen sonlu dielektrik kalınlıklı ve sonsuz yanal toprak düzlemli CPW yapısı ile de karşılaştırılmıştır. Tablo 5.3'de, her iki yapının sonuçları arasında iyi bir uyum

görülmektedir. Sonuç olarak, Tablo 5.1-3'deki nümerik sonuçlar, Şekil 5.1 ile verilen yapı için dispersiyonun düşük olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.8-15'deki grafikler, eliptik kesitli kuplajlı CPW'nin elektriksel karakteristiklerini veren değişim eğrilerini göstermektedir. Grafiklerde, eliptik kesitli yapı için eksantrikte katsayısı e'nin sıfıra yaklaşması durumunda, eliptik kesitli yapı ile silindirik kesitli yapının sayısal sonuçlarının çakıştığı görülmektedir. Bu durum, eliptik kesitli yapı için elde edilen analitik bağıntıların doğruluğunu kanıtlamaktadır. Şekil 5.8-15 ile verilen grafiklerde, eliptik kesitli CPW yapısında eksantrikte katsayısı e, Ψ açısı ve $\theta - \Psi$ fark açısının değiştirilmesiyle, yapının elektriksel karakteristiklerinin geniş bir aralıkta kolayca ayarlanabileceği görülmektedir.

Bölüm 5'in ikinci kısmında, kesit görünümü Şekil 5.16 ile verilen sonlu toprak düzlemli hattan hatta kuplajlı paralel CPW ile kesit görünümü Şekil 5.21 ile verilen eliptik ve silindirik kesitli hattan hatta kuplajlı paralel CPW yapılarının tasarımları ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.16 ile verilen düzlemsel yapı için elde edilen analitik ifadelerin geçerliliği, yapının değişik geometrik boyutlarında ve farklı frekans değerlerinde, Sonnet simülasyon programında modellenmesiyle doğrulanmıştır. Tablo 5.4-5'de, frekans bağımlı Sonnet simülasyon programının nümerik sonuçları ile kapalı-form analitik bağıntıların sonuçları arasıda iyi bir uyum görülmektedir. Ayrıca, Şekil 5.16 ile verilen sonlu dielektrik kalınlıklı ve sonlu yanal toprak düzlemli hattan hatta kuplajlı paralel CPW yapısı, farklı geometrik boyutlarda, Cheng (1996) tarafından analizi yapılan sonlu dielektrik kalınlıklı ve sonsuz yanal toprak düzlemli hattan hatta kuplajlı paralel CPW yapısıyla da karşılaştırılmıştır. Tablo 5.6'da, her iki yapının nümerik sonuçları arasında iyi bir uyum görülmektedir. Tablo 5.4-6'daki nümerik sonuçlar, Şekil 5.16 ile verilen sonlu yanal toprak düzlemli hattan hatta kuplajlı paralel CPW yapısında düşük dispersiyonun olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.23-26 ile verilen grafiklerde, eliptik ve silindirik kesitli hattan hatta kuplajlı paralel CPW yapısının elektriksel karakteristik değişim eğrileri görülmektedir. Grafiklerde de görüldüğü gibi, eksantrikte katsayısı e'nin sıfıra yaklaşması durumunda eliptik kesitli yapı ile silindirik kesitli yapının sonuçları üst üste çakışmaktadır. Şekil 5.23-26 ile verilen grafiklerden, eliptik kesitli CPW

yapısında eksantrikte katsayısı *e* ve Ψ açısının değiştirilmesiyle, yapının elektriksel karakteristiklerinin geniş bir aralıkta ayarlanabileceği anlaşılmaktadır.

Bölüm 6'da, literatürde ilk olarak bu tez çalışması kapsamında tasarımları yapılan yay kesitli eşdüzlemli iletim hatlarının matematiksel olarak analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümün ilk kısmında, kesit görünümü Şekil 6.1 ile verilen yay kesitli CPW yapısı analizi edilmiş ve elektriksel karakteristikleri analitik bağıntılar formunda bulunmuştur. Yay kesitli CPW yapısı için elde edilen analitik bağıntılarının geçerliliği, belirli geometrik şartlar altında, silindirik kesitli CPW yapısının sayısal sonuçlarıyla karşılaştırmalar yapılarak doğrulanmıştır.

Şekil 6.3-8 ile verilen grafikler, yay kesitli CPW yapısının elektriksel karakteristik değişim eğrilerini vermektedir. Bu grafiklerde, Şekil 6.1 ile verilen yay kesitli CPW yapısının θ/β, Ψ/θ ve $R(r_1/r_2)$ oran değerleri ile β açısının farklı değerlerinde elektriksel karakteristik değişimleri incelenmiştir. θ/β, Ψ/θ ve $R\,(r_1/r_2)$ oran değerleri ile β açısının, yay kesitli CPW yapısının elektriksel karakteristiklerini geniş bir aralıkta değiştirdiği görülür.

Bölüm 6'nın ikinci kısmında, yay kesitli CPS yapısının tasarımı ve analizi yapılarak, yapının elektriksel karakteristikleri elde edilmiştir. Yay kesitli CPS yapısının grafik analizlerindeki geometrik parametreler, yay kesitli CPW yapısındaki geometrik parametreler ile aynı alınmıştır. Çünkü, aynı geometrik parametrelerin alınması, her iki yapının elektriksel karakteristik davranışları arasındaki farkı görmek açısından önemlidir. Şekil 6.3-8 ile verilen grafiklerde, yay kesitli CPW yapısı için Ψ/θ oran değerinin 0.1'den 0.9'a yükselmesi durumunda, empedans değerlerinin 30 ile 180 Ohm arasında değiştiği, Şekil 6.11-16 ile verilen grafiklerde ise, yay kesitli CPS yapısı için empedans değerlerinin 50 ile 400 Ohm arasında değiştiği görülmektedir. Grafikler üzerinde verilen empedans değerleri, yüksek empedans gerektiren mikrodalga iletim hattı uygulamalarında, CPS'lerin rahatlıkla kullanılabileceğini göstermektedir.

Bölüm 6'nın son kısmında ise, kesit görünümü Şekil 6.17 ile verilen yay kesitli iletken destekli CPW yapısının tasarımı ve analizi yapılarak, yapının elektriksel karakteristikleri elde edilmiştir. İletim hatlarında kullanılan iletken destekler, konvansiyonel yapılara göre, iletim hatlarına ek mekaniksel dayanım kazandırmaktadır. Böylece, iletim hattının ortalama güç taşıma kapasitesi

artmaktadır. Ayrıca, yay kesitli CPW yapısında kullanılan iletken destekler, yapının birim uzunluk başına düşen hat kapasitesini de arttırmaktadır. Birim uzunluk başına düşen hat kapasite değerinin artması, doğal olarak karakteristik empedans değerlerinde bir azalmaya neden olmuştur. Yay kesitli iletken destekli CPW yapısının elektriksel karakteristiklerini veren Şekil 6.19-24'deki grafikler, bu durumu doğrulamaktadır. Bu nedenle, mikrodalga iletim hat uygulamalarında, düşük empedans gerektiren yerlerde iletken destekli yapılar kullanılabilir.

Yay kesitli yapılar, geometrik özelliklerinden dolayı eliptik ve silindirik yapılara göre daha esnek bir uygulama alanı bulabilirler. Çünkü, Bölüm 6'da sunulan yay kesitli iletim hatlarında, şerit iletken yayların boyutları ve yarıçapları (r_1 ve $r_{2)}$ ayarlanarak, bu tür yapıların daha esnek yüzeylere monte edilmesi sağlanabilir.

Bölüm 7'de, kesit görünümü Şekil 7.1 ile verilen sonlu toprak düzlemli tam asimetrik CPW yapısının tasarımı ve analizi yapılarak, elektriksel karakteristikleri analitik bağıntılar formunda elde edilmiştir. Elde edilen analitik bağıntıların geçerliliği, değişik analiz yöntemlerinin sayısal sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Konvansiyonel CPW'ye göre, tam asimetrik CPW yapısı, doğası gereği mikrodalga iletim hat uygulamalarında daha esnek bir uygulama alanı bulabilir. Bölüm 7'de, tam asimetrik CPW yapısının birim uzunluk başına düşen toplam hat kapasitesi, literatürdeki mevcut analitik ifadelere göre daha sade bir şekilde elde edilmiştir. Ayrıca, tam asimetrik CPW yapısının iletken kayıp ifadesi de bu bölüm içerisinde elde edilmiştir.

Şekil 7.6-12 ile verilen grafiklerde, tam asimetrik CPW yapısının empedans, efektif dielektrik sabiti ve iletken kayıp ifadelerinin değişim eğrileri görülmektedir. Grafiklerde de görüldüğü gibi, tam asimetrik CPW yapısında, t iletken metal kalınlığı, W merkez şerit genişliği ve $S_1 = S_2$ aralık genişliğinin arttırılmasıyla, iletken zayıflamasının azaltılabileceği görülmektedir. Yanal toprak düzlem genişliklerinin ($D_1 = D_2$) artması ise, iletken zayıflamasını arttırmaktadır. Grafik analizlerindeki bu veriler, mikrodalga iletim hattı tasarımlarında, tam asimetrik CPW yapısındaki iletken metal kalınlığının, merkez şerit genişliğinin ve aralık genişliklerinin dikkatli bir şekilde seçilmesini gerektirmektedir. Çünkü, bu geometrik parametreler, iletken kayıp ifadesi üzerinde ciddi bir etki yapmakta ve böylece devre performansını önemli bir ölçüde etkilemektedir. Ayrıca, bu bölümde, yüzey reziztans

ifadesine bağlı olarak değişim gösteren frekans ifadesinin iletken kayıpları üzerindeki etkisi de, Şekil 7.7-12 ile verilen grafiklerde verilmiştir. Tam asimetrik CPW yapısında frekans değerinin artması durumunda, iletken kayıplarının da önemli bir ölçüde arttığı görülmektedir. Bu nedenle, iletim hattı tasarımlarında kullanılan iletken metallerin seçiminde, Denklem (7.20) ile verilen yüzey reziztans ifadesinin dikkate alınması gerekmektedir.

Bölüm 8'nin ilk kısmında, kesit görünümü Şekil 8.1 ile verilen sonlu iletken kalınlıklı eliptik ve silindirik kesitli CPW yapısının tasarımı ve analizi yapılarak, elektriksel karakteristikleri elde edilmiştir. Şekil 8.4-9 ile verilen grafiklerde, eliptik ve silindirik kesitli CPW yapısının efektif dielektrik sabiti, karakteristik empedans ve iletken kayıp ifadesi değişim eğrileri görülmektedir. Şekil 8.4-6 ile verilen grafiklerde görüldüğü gibi, silindirik kesitli CPW yapısındaki eğrilik biçim oranı R (r_1/r_2)'nin artması durumunda, iletken kayıp ifadesinin önemli bir ölçüde azaldığı görülmektedir. Silindirik kesitli yapılarda, dielektrik taban kalınlığının sabit olması durumunda, R (r_1/r_2) oran değerinin artması, silindirik yapının düzlemsel yapıya dönüşümünü ifade etmektedir. Şekil 8.4-6 ile verilen grafikler, düzlemsel kesitli yapılara göre, silindirik kesitli CPW yapılarındaki iletken kayıplarının daha yüksek değerlerde olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Şekil 8.7 ile verilen grafikte, silindirik kesitli CPW yapısına göre, eliptik kesitli CPW yapısının iletken kayıplarının daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Silindirik ve eliptik kesitli CPW yapılarında dielektrik taban kalınlığının artması ise, iletken zayıflamasını büyük bir ölçüde azaltmaktadır. Eliptik ve silindirik kesitli CPW yapıları için elde edilen iletken kayıp bağıntılarının doğruluğu, grafikler üzerinde düzlemsel yapının sonuçları verilerek kanıtlanmıştır. Düzlemsel kesitli CPW yapılarına göre, eliptik ve silindirik kesitli CPW yapılarındaki iletken kayıpların yüksek değerlerde olması, mikrodalga iletim hattı uygulamalarında, devre performansları açısından oldukça önemli bir konudur. Bu nedenle, mikrodalga iletim hattı tasarımlarında, eliptik ve silindirik kesitli CPW yapılarındaki yüksek iletken kayıpları dikkate alınarak, yapıların geometrik parametreleri dikkatli seçilmek zorundadır.

Bölüm 8'in son kısmında, kesit görünümü Şekil 8.10 ile verilen sonlu iletken kalınlıklı eliptik ve silindirik kesitli CPS yapısının tasarımı ve analizi yapılarak, elektriksel karakteristikleri elde edilmiştir. Şekil 8.13-18 ile verilen grafiklerde, sonlu

iletken kalınlıklı eliptik ve silindirik kesitli CPS yapısının geometrik boyutlarına bağlı olarak, iletken kayıp, karakteristik empedans ve efektif dielektrik sabiti ifadelerinin değişim eğrileri görülmektedir. Şekil 8.10 ile verilen yapılar için elde edilen analitik bağıntıların geçerliliği, farklı geometrik boyutlarda düzlemsel ve silindirik kesitli CPS yapısının nümerik sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Şekil 8.13-15 ile verilen grafiklerde görüldüğü gibi, silindirik kesitli CPS yapısının eğrilik biçimini ifade eden R (r_1/r_2) oran değerinin artması durumunda, iletken kayıp ifadesi geniş bir aralıkta azalmaktadır. Silindirik kesitli CPS yapısında R (r_1/r_2) oran değerinin artması, silindirik kesitli CPS yapısının düzlemsel kesitli CPS yapısına dönüşümü ifade etmektedir. Düzlemsel kesitli CPS yapılarına göre, silindirik kesitli CPS yapılarındaki iletken kayıpların daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Şekil 8.16 ile verilen grafikte ise, silindirik kesitli CPS yapısına göre, eliptik kesitli CPS yapısındaki iletken kayıpların daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Silindirik ve eliptik kesitli CPS yapısının dielektrik taban kalınlığının artması durumunda, iletken kayıp ifadesi önemli bir ölçüde azalmaktadır. Ayrıca, iletken kalınlığını ifade eden *t* 'nin artması, iletken kayıplarını azaltmakta, frekans değerinin artması ise, doğal olarak iletken kayıp değerini önemli bir ölçüde arttırmaktadır. Şekil 8.13-16 ile verilen grafiklerde de görüldüğü gibi, düzlemsel kesitli CPS yapılarına göre, eliptik ve silindirik kesitli CPS yapılarındaki iletken kayıpların yüksek olması, mikrodalga iletim hattı uygulamaları açısından önemli bir konudur. Eliptik ve silindirik kesitli CPS yapılarının kullanıldığı devrelerdeki performansları yükseltmek için, söz konusu yapıların geometrik parametreleri dikkatli seçilerek, iletken kayıpları belirli bir oranda azaltılabilir.

Şekil 8.4-7 ile verilen grafikler ile Şekil 8.13-15 ile verilen grafikler karşılaştırıldığında, eliptik ve silindirik kesitli CPW yapılarına göre, eliptik ve silindirik kesitli CPS yapılarındaki iletken kayıpların daha yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Eliptik ve silindirik kesitli CPW ve CPS yapıları arasında görülen bu durum, mikrodalga iletim hattı uygulamalarında, göz önüne alınması gereken önemli bir husustur.

10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

10.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, eşdüzlemli iletim hatları ve bu hatların kuplajlı konfigürasyonları ile ilgili olarak, Bölüm 1-3'de genel bilgiler sunulmuş ve bu tür iletim hatlarının milimetrik ve mikrodalga entegre devre uygulamalarındaki yeri ve önemi detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Bu bölümlerde verilen bilgiler ile yapılan tez çalışmasının önemi ve amacı doğrultusunda, Bölüm 4-8'de ise, eşdüzlemli iletim hatlarının modellenmesi ve tasarımları yapılmış olup, tasarlanan eşdüzlemli iletim hatlarının analizleri, quasi-statik yaklaşımı içerisinde Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizleri gerçekleştirilen yapıların elektriksel karakteristikleri (birim uzunluk başına düşen hat kapasitesi, efektif dielektrik sabiti, faz hızı, kuplaj katsayısı ve iletken kayıpları), kapalı-form analitik bağıntılar formunda elde edilmiştir. CAD uyumlu kapalı-form analitik bağıntıların matematiksel analizlerinde, "Mathcad 2001 Professional" paket programı kullanılmıştır. "Mathcad 2001 Professional" paket programı kullanılarak matematiksel analizleri yapılan eşdüzlemli iletim hatlarının grafik çizimlerinde, "SigmaPlot 2002" paket programı seçilmiştir. Ayrıca, Bölüm 4-5'de, tam ekranlı kuplajlı CPW, tam ekranlı geniş-yanlı kuplajlı CPW, sonlu toprak düzlemli kuplajlı CPW ile sonlu toprak düzlemli hattan hatta kuplajlı paralel CPW yapılarının simülasyonlarında "Sonnet EM yazılım" programı benimsenmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında tasarımları ve analizleri yapılan eşdüzlemli iletim hatlarının grafik analizleri, her bir yapı için ayrı ayrı olarak Bölüm 4-8'deki sonuçlar ve tartışmalar bölümünde verilmiştir.

Bölüm 4'de, tam ekranlı kuplajlı CPW ile tam ekranlı geniş yanlı kuplajlı CPW yapısının elektriksel karakteristikleri, kapalı-form analitik bağıntılar formunda elde edilmiştir. Elde edilen bu analitik bağıntıların doğruluğu, tam dalga analiz yöntemleri, quasi-statik analiz yöntemleri ve Sonnet simülasyon programı sonuçları ile karşılaştırılarak kanıtlanmıştır. Ayrıca, Bölüm 4'de, toprak düzlemlere dikey iletken ilaveli CPW yapısının elektriksel karakteristikleri de kapalı-form analitik bağıntılar formunda sonuçlandırılmıştır. Söz konusu yapılar için elde edilen analitik

ifadelerin doğruluğu ise, belirli geometrik şartlar altında literatürdeki (Ghione ve Naldi 1987, Bedair ve Wolf 1992) ilgili çalışmaların nümerik sonuçlarıyla karşılaştırılarak kanıtlanmıştır.

Bölüm 5'de, sonlu toprak düzlem genişlikli kuplajlı CPW, eliptik kesitli kuplajlı CPW, sonlu toprak düzlemli hattan hatta kuplajlı paralel CPW ile eliptik ve silindirik kesitli hattan hatta kuplajlı paralel CPW yapılarının elektriksel karakteristikleri Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak kapalı-form analitik bağıntılar formunda elde edilmiş ve bu bağıntıların doğruluğu, tam dalga analiz yöntemleri, quasi-statik analiz yöntemleri ve Sonnet simülasyon programı sonuçları ile karşılaştırılarak kanıtlanmıştır.

Bölüm 6'da, yay kesitli olarak tasarımları yapılan konvansiyonel CPW, CPS ve iletken destekli CPW yapılarının elektriksel karakteristikleri, yine Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak kapalı-form analitik bağıntılar formunda bulunmuştur. Söz konusu yay kesitli eşdüzlemli iletim hatları için elde edilen analitik bağıntıların geçerliliği, belirli geometrik şartlarda silindirik kesitli eşdüzlemli iletim hatlarının nümerik sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Bölüm 7'de, tam asimetrik CPW yapısının elektriksel karakteristikleri ele alınmış, iletken kayıp ifadesini de kapsayacak şekilde yine Konformal Dönüşüm Tekniği kullanılarak kapalı-form analitik bağıntılar bulunmuştur. Elde edilen analitik bağıntıların geçerliliği ise, tam dalga analiz yöntemleri ve değişik quasi-statik analiz yöntemlerinin sayısal sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Ayrıca, bu bölümde, tam asimetrik CPW yapısının Konformal Dönüşüm Tekniği ile hesaplanan iletken kayıpları için düşük frekanslar bölgesinde meydana gelen hata oranlarının düzeltilmesi, literatürde sunulan (Holloway ve Kuester 1995) tablo değerleri yerine ampirik bağıntılar şeklinde elde edilmiştir.

Son olarak Bölüm 8'de, sonlu iletken kalınlıklı eliptik ve silindirik kesitli CPW ile sonlu iletken kalınlıklı eliptik ve silindirik kesitli CPS'nin elektriksel karakteristikleri, iletken kayıplarını da kapsayacak şekilde Konformal Dönüşüm Tekniği ile hesaplanmış ve yine kapalı-form analitik bağıntılar şeklinde rapor edilmişlerdir. Elde edilen analitik bağıntıların doğruluğu ise, değişik geometrik boyutlarda düzlemsel ve silindirik kesitli CPW ve CPS yapılarının nümerik sonuçlarıyla karşılaştırılmak suretiyle kanıtlanmıştır.

10.2. Öneriler

Bölüm 4-8'de tasarımları yapılan ve analizleri gerçekleştirilen eşdüzlemli iletim hatları ile ilgili olarak aşağıdaki yorumlar yapılabilir:

Bölüm 4'de sunulan tam ekranlı kuplajlı yapılar, fiziksel boyutlarını ayarlamak suretiyle RF/Mikrodalga haberleşme sistemlerinde ve MMIC devre elemanlarının oluşturulmasında rahatlıkla kullanılabilirler. Toprak düzlemlere dikey iletken ilaveli CPW yapılarında ise, bu kez de dikey iletkenlerin boyutları ayarlanarak, geniş bir empedans aralığının oluşmasına imkan tanınabilir.

Bölüm 5 ve Bölüm 6'da sunulan düzlemsel, silindirik, eliptik ve yay kesitli iletim hatları, değişik kesitli ve/veya boyutlu iletim hattı gerektiren bugünün ve geleceğin RF/Mikrodalga haberleşme sistemlerinde ve MMIC uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilirler.

Bölüm 7'de sunulan tam asimetrik CPW'nin esnek geometrik yapısından dolayı, bu tür yapıların ya tek başına bir iletim hattı olarak ya da MMIC devrelerinde bir grup elemanı olarak kullanımı sağlanabilir. Tam asimetrik CPW yapısının elektriksel karakteristikleri, iletken ve dielektrik kayıpları ile birlikte hesaplandığı için, bu tür yapılar hassas MMIC düzenekleri için uygun olabilir.

Benzer şekilde bu görüş, Bölüm 8'de sunulan sonlu iletken kalınlıklı eliptik ve silindirik kesitli CPW ve CPS'ler için de geçerlidir ve yine bu yapılar MMIC düzeneklerinde rahatlıkla kullanılabilirler. Ayrıca, eliptik ve silindirik kesitli CPW ve CPS'lerdeki iletken kayıpların düzlemsel yapılara göre daha yüksek olması, bu tür yapıların mikrodalga devre uygulamalarındaki performanslarının tespiti açısından önem taşır.

Bu tez çalışması kapsamında tasarımlanan eşdüzlemli iletim hatları, RF/Mikrodalga haberleşme sistemlerinde ve MMIC uygulamalarında tamamen kullanıma açıktır. Ayrıca, iletken destekli kuplajlı eşdüzlemli iletim hatlarının ve yay kesitli eşdüzlemli kuplajlı iletim hatlarının tasarım ve analizleri üzerinde çalışmalar yapılabilir. İletken destekli eşdüzlemli iletim hatlarının ve kuplajlı eşdüzlemli iletim hatlarının iletken kayıp analizleri, süre yetersizliğinden dolayı bu tez çalışmasında ele alınamamıştır.

11. KAYNAKLAR

Akan V. 2004. Farklı kesitlerdeki şerit iletim hatlarına konformal dönüşüm tekniklerinin uygulanması. Yüksek lisans tezi. Hacettepe Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Akan, V., and Yazgan, E. 2004. A simple formulation for quasistatic parameters of elliptical, cylindrical and asymmetrical coplanar strip lines. Microwave Optical Technology Lett., Vol.41, No.1, pp.18-21.

Akan, V., and Yazgan, E. 2004. Quasistatic TEM characteristics of multilayer elliptical and cylindrical coplanar waveguides. Microwave Optical Technology Lett., Vol.42, No.4, pp.317-322.

Akan, V., and Yazgan, E. 2005. Quasi-static solutions of multilayer elliptical, cylindrical coplanar striplines and multilayer coplanar striplines with finite dielectric dimensions–asymmetrical case. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 53, no.12, pp.3681–3686.

Alkan, M., Görür, A., and Karpuz, C. 1998. Quasistatic analysis of cylindrical coplanar waveguide with multilayer dielectrics. Int J. MIMICAE, vol.8, no.4, pp.297-304.

Al-Zoubi A., and Dib, N. 1999. CAD model of gap in cylindrical coplanar waveguide. Electronics letters, vol.35, no.21, pp.1857-1858.

Bedair, S.S., and Wolff, I. 1989. Fast and accurate analytic formulas for calculating the parameters of a general broadside-coupled coplanar waveguide for (M)MIC applications. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.37, pp.843-850.

Bedair, S.S., and Wolf, I.1992. Fast accurate and simple approximate analytic formulas for calculating parameters of supported coplanar waveguides for MMIC's . IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.40, pp.41-48.

Bernal, J., Medina, F., and Horno, M. 1997. Quick quasi-TEM analysis multiconductor transmission lines with rectangular cross section. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 45, no.9, pp.1619-1626.

Booth, J.C., and Holloway, C.L. 1999. Conductor loss in superconducting planar structures:Calculations and measurements. IEEE Trans. Microwave Tech., vol.47, no.6, pp.769-774.

Chen, E., and Chou, S.Y. 1997. Characteristics of coplanar transmission lines on multilayer substrates:modelling and experiments, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 45, pp.939-945.

Cheng, K.K.M., and Robertson, I.D. 1995. Quasi-TEM study of microshield lines with practical cavity sidewall profiles. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.43, pp.2689-2694.

Cheng, K.K.M. 1996. Analytical formula for calculating the coupling characteristics between parallel coplanar lines. Electronics Lett., vol.32, no.13, pp.1208-1209.

Cheng, K.K.M. 1996. Analysis and synthesis of coplanar coupled lines on substrates of finite thicknesses. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.44, pp.636-639.

Cheng, K.K.M. 1997. Characteristic parameters of symmetrical triple coupled CPW lines. Electronics Lett., vol.33, no.8, pp.685-687.

Cheng, K.K.M. 1997. Effect of conductor backing on the line-to-line coupling between parallel coplanar lines. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.45, pp.1132-1134.

Cohn , S.B. 1969. Slot line on a dielectric substrate. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.MTT-17, pp.768-778.

Collin, R.E. 1992. Foundations for Microwave Engineering. New York, McGraw-Hill.

Das, N.K.,and Pozar, D.M..1977. A generalized spectral-domen green's function for multilayer dielectric substrates with application to multilayer transmission lines. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.35, pp.326-335.

Das, B.N., and. . Prasad, K.V.S.V.R. 1984. Even- and odd mode ımpedances of coupled elliptic arc strips. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.MTT-32, no.11, pp.1475-1479.

Davis, M.E., Williams, E.W., and Celestini A.C. 1971. Finite-boundary corrections to the coplanar waveguide analyses. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.MTT-21, No.10, pp.594-596.

Dib, N.I., and, Katehi, L.P.B. 1992. Impedance caculation for the microshield line. IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol. 2, pp.406-408.

Dib, N., Weller, T., Scardelleti M., and Imparato, M. 1999. Analysis of cylindrical transmission lines with the finite-difference time-domain method. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.47, no.4, pp.509-512.

Dib, N., and Omar, A. 2002. Dispersion analysis of multilayer cylindrical transmission lines containing magnetized ferrite substrates. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 50, no.7, pp.1730–1736.

Du, Z., Gong, K., Fu, J.S., Feng, Z., and Gao, B. 2000. CAD models for asymmetrical, elliptical, cylindrical, and elliptical cone coplanar strip lines, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.48, pp.312–316.

Duyar M. 1999. Çok katlı koplanar dalga kılavuzları ve koplanar şerit hatların quasi-statik analizi.Yüksek lisans tezi. Niğde Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.

Duyar, M., Akan V., Yazgan, E., and Bayrak, M. 2006. Analyses of elliptical coplanar coupled waveguides and coplanar coupled waveguides with finite ground width.IEEE Trans.Microwave Theory Tech.,vol.54, No.4,pp.1388-1395.

Duyar, M., Akan V., Yazgan, E., and Bayrak, M. 2006. New accurate analytical analyses of shielded planar transmission lines. Microwave and Optical Technology Letters, vol.48, No.6, pp.1079-1085.

Frankel, M.Y., Voelker, R.H., and Hilfiker, J.N.1994. Coplanar transmission lines on thin substrates for high-speed low loss propagation. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.42, pp.396-402.

Frey, J. 1974. Microwave İntegrated Circuits, Mass:Artech House, Dedham.

Gentili, G.G., and Macchiarella, G. 1994. Quasi-static analysis of shielded planar transmission lines with finite metalization thickness by a mixed spectral-space domain method. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.42, pp.249-255.

Gevorgian, S., and Mirenenko I.G. 1990. Asymmetric coplanar-strip transmission lines for MMIC and integrated optics applications. Electron Lett., vol.26, no.22, pp.1516-1517.

Gevorgian, S., Peter Linner L.J., and Kolberg E.L. 1995. CAD models for shielded multilayered CPW . IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.43, pp.772-779.

Gillick, M., Robertson, J.D., and Joshi, J.S.1993. Design analysis of novel coupling structures for multilayer MMIC's. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.41, no.2, pp.346-349.

Ghione, G., Naldi, C,, and Zich R. 1983. Q-factor evaluation for coplanar resonators. Alta Frequena, vol.LII, no.3, pp.191-193.

Ghione, G. and Naldi, C. 1984. Analytical formulas for coplanar lines in hybrid and monolithic MICs. Electron. Lett., Vol.20, No.4, pp.179-181.

Ghione, G., and Naldi, C.U. 1987. Coplanar waveguide for MMIC applications: effect upper shielding, conductor backing, finite extent-ground planes, and line-to-line coupling.IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.MTT-35, pp.260-267.

Ghione, G. 1993. A CAD-oriented analytical model for the losses of general asymmetric coplanar lines in hybrid and monolithic MIC's. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.41, No.9, pp.1449-1510.

Ghione, G., and Goano, M. 1997. A closed-form CAD-oriented model for the high-frequency conductor attenuation of symmetrical coupled coplanar waveguides. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.45, no.7, pp.1065-1070.

Ghione, G., and Goano, M. 1997. The influence of ground-plane width on the ohmic losses of coplanar waveguides with finite lateral ground planes. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 45, no. 9, pp.1460-1462.

Ghione, G., Goano, M., Madonna, G., Omegna, G., Pirola, M., Bosso, S., Frassati, D., and Perasso, A. 1999. Microwave modeling and characterization of thick coplanar waveguides on oxide-coated lithium niobate substrate for electrooptical applications. IEEE Trans. Microwave Tech., vol.47, no.12, pp.2287-2292.

Gorur, A., Karpuz C., and Alkan M. 1996. Quasi-static TEM characteristics of overlayed supported asymmetric coplanar waveguide. Int. J. MIMICAE, vol.6, no.5, pp.297-303.

Gorur, A., Duyar, M. and Karpuz C. 1999. Analysis of a cylindrical coupling structure. Microwave Optical Technology Lett., vol. 22, no.5, pp.298–301.

Gorur, A., Duyar, M., and Karpuz, C. 1999. Analytic formulas for the quasistatic parameters of a multilayer cylindrical coplanar strip line. Microwave Optical Technology Lett., vol. 22, pp.432-436.

Gorur, A., and Karpuz, C. 2000. Effect of finite and different ground-plane widths on quasistatic parameters of asymmetrical coplanar waveguides. Int. Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, Vol.10, no.6, pp.383-389.

Gupta, K.C., Garg, R., Bahl, I., and Bhartia, P. 1996. Microstrip Lines and Slotlines, 2and ed. Boston-London, Mass:Artech House.

Hanna, V. F. 1980. Finite boundary corrections to coplanar stripline analyses. Electron Lett., Vol.16, pp.604-606.

Hasnain, G., Dienes, A., and Whinnery, J. R. 1986. Dispersion of picosecond pulses in coplanar transmission lines. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-34, pp.738–741.

Heinrich, W. 1990. Full-wave analysis of conductor losses on MIMIC transmission lines. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.38, No.10, pp.1468-1472.

Heinrich, W. 1993. Quasi-TEM description of MMIC coplanar lines including conductor loss effects. IEEE Trans. Microwave Theory Tech, vol. 41, No.1, pp. 45-52.

Hilberg, W. 1969. From approximations to exact relations for characteristic Impedances. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-17, pp.259-265.

Holloway, C.L., and Kuester, E.F. 1995. A Quasi-closed form expression for the conductor loss of cpw lines, with an investigation of edge shape effects. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 43, no. 12, pp.2695-2701.

Holloway, C.L. 2000. Expressions for the conductor loss of stripline and coplanar-strip (CPS) structures. Microwave Optical Technology Lett., Vol.25, No.3, pp.162-168.

Homentcovschi, D., Manolescu, A., Manolescu, A.M., and Kreindler, L. 1988. An analytical solution for the coupled stripline-like microstrip line problem. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.36, no.6, pp.1002–1007.

Homentcovschi, D. 1989. A cylindrical multiconductor stripline-like microstrip transmission line. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.37, no.3, pp.497-503.

Homentcvoschi, D., Ghione, G., Naldi, C. and Oprea, R. 1995. Analytic determination of the capacitance matrix of planar or cylindrical multiconductor lines on multilayered substrates. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.43, no.2, pp.363-373.

Horno, M., and Medina, F.1986. Multilayer planar structures for high-directivity directional coupler design. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.MTT-34, no.12, pp.1442-1449.

Joshi, K.K., and Das, B.N. 1980. Analysis of elliptic and cylindrical striplines using laplace's equation. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.MTT-28, no.4, pp.381-386.

Karpuz C. 1995. Yavaş-dalgalı transmisyon hatları. Yüksek lisans tezi. Erciyes Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

Karpuz, C., Gorür, A., and Alkan, M. 1998. Quasistatic analysis of cylindrical coplanar strip lines. Microwave Opt. Technol. Lett., vol. 17, no. 2, pp.148–151.

Karpuz, C., and Görür, A. 1999. Quasistatic solutions of elliptical coplanar waveguides. Microwave and Optical Technology Letters, vol.20, no.6, pp. 385-389.

Karpuz, C., Duyar, M., and Görür, A. 2000. Analysis of cylindrical conductor-backed coplanar waveguide. Microwave Optical Technology Lett., vol.22, pp.144-146.

Karpuz, C., Duyar, M., and Görür, A. 2000. Analysis of coplanar-coupled lines on a cylindrical substrate. Microwave Optical Technology Lett., vol.27, pp.187-190.

Kiang, J-F., Lee, C-R., and Chen, C.H. 2003. Characteristics of striplines with inhomogeneous cylindrical substrate. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 51, no.5, pp.1496–1505.

Kitazawa, T., and Mittra, R. 1985. Quasi-static characteristics of asymetrical and coupled type coplanar transmission lines, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.33, pp.771-778.

Kitazawa, K., and Itoh, T. 1991. Propagation characteristics of coplanar-type transmission lines with lossy media. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-39, no.10, pp. 1694-1700.

Kunze, M., and Heinrich, W. 2002. Analytical description of metal loss in finite-difference transmission-line analysis. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.50, no.5, pp.1275-1279.

Lee, C-H., Hsu, C.G., Kiang J-F., and Wang, Y-W. 1998. Analysis of coupled cylindrical microstrip lines with a substrate-superstrate configuration. Microwave Optical Technology Lett., vol. 18, no. 2, pp.104–108.

Medina, F. and Horno, M. 1990. Spectral and variational analysis of generalized cylindrical and elliptical strip and microstrip lines. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.38, no.9, pp.1287-1293.

Mehali, E.V., and Wacker, R.W. 1968. GaAs ıntegrated microwave circuits. IEEE Trans. Electron Devices, vol.ED-15, pp.513-516.

Microwave Field-Effect Transistors. 1976. Special Issue. IEEE Trans Microwave Theory Tech., vol.MTT-24.

Milanoviç, J., Ozgur, M., and Degroot, D.C., Jargon, J.A., Gaitan, M., and Zaghloul, M.E. 1998. Characterization of broadiband transmission for coplanar waveguides on CMOS silicon substrate. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 46, no.5, pp.632-640.

Nguyen, C. 1992. Broadside coupled coplanar waveguides and their end-coupled band-pass filter applications. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.40, pp.2181-2189.

Nguyen, C. 1993. Dispersion characteristics of the broadside-coupled coplanar waveguide. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.41, pp.1630-1632.

Okishi, T., and Miyoshi, T. 1972. The planar circuit-an approach to microwave ıntegrated circuitry. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.MTT-20, pp.245-252.

Owyang, G.H., and Wu, T.T. 1958. The approximate parameters of slot lines and their complement. IRE Transactions on Antennas and Propagation, pp. 49-55.

Plaza, G., Marques R., and Medina, F. 2006. Quasi-TM MoL/MoM Approach for Computing the Transmission-Line Parameters of Lossy Lines. IEEE Trans Microwave Theory Tech, vol. 54, no.1, pp.198-209.

Ponchak, G.E. Matloubian, M., and Katehi, L. P. B. 1999. A measurement- based design equation for the attenuation of MMIC-compatible coplanar waveguides. IEEE Trans. Microwave Tech., vol.47, no.2, pp.241-243.

Ponchak, G.E., Papapolymerou, J. and Tentzeris, M.M. 2005. Excitation of coupled slotline mode in finite-ground CPW with unequal ground-plane widths. IEEE Trans. Microwave Tech., vol.53, no.2, pp.713-717.

Pozar, D.M. 1993. Microwave Engineering, Reprinted with Corrections. New York, Addison-Wesley Publishing Company.

Raj, A., Holmes, W.S., and Judah, S.R. 2001. Wide bandwidth measurement of comlex permittivity of liquids using coplanar lines. IEEE Trans. Microwave Tech., vol.50, no.4, pp.905-909.

Rautio, J., and Demir, V. 2003. Microstrip conductor loss models for electromagnetic analysis. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.51, no.3, pp.915-921.

Reddy, C.J., and Deshpande, M.D. 1986. Analysis of cylindrical stripline with multilayer dielectrics. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.MTT-34, no.6, pp.701-706.

Reddy, C.J., and Deshpande, M.D. 1988. Analysis of coupled cylindrical striplines filled with multilayered dielectrics. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.36, no.9, pp.1301-1310.

Schnider, F., Tischler, T., and Heinrich, W. 2003. Modeling dispersion and radiation characteristics of conductor-backed CPW with finite ground width. IEEE Trans Microwave Theory Tech, vol. 51, no.1, pp.137-143.

Shan, Z., Zhang Y., Zhou, X., and Yao, J. 2004. Analytical analyses of a rectangular shielded multilayer coupled coplanar waveguide. Microwave and Optical Technology Letters, vol.41, No.5, pp.392-395.

Simons, R.N. 2001. Coplanar Waveguide Circuits, Compenents, and Systems. New York, Wiley-Interscience.

Spiegel, M.R. 1994. Complex Variables with an Introduction to Conformal Mapping and its Applications. 28th printing. New York, McGraw-Hill, Inc.

Su, H-C., and Wong, K-L. 1996. Dispersion characteristics of cylindrical coplanar waveguides. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.44, no.11, pp.2120-2122.

Su, H-C., and Wong, K-L. 1997. Quasistatic solutions of cylindrical coplanar waveguides. Microwave and Optical Technology Lett., vol.14, no.16, pp.347-351.

Train, M., and Nguyen, C. 1993. Modified broadside-coupled microstrips lines suitable for MIC and MMIC applications and a new class of broadside-coupled band-pass filters. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.41, pp.1336-1342.

Tuncer, E., Lee, B-T., Islam M.S., and Neikirk D.P. 1994. Quasi-static conductor loss calculations in transmission lines using a new conformal mapping technique. IEEE Trans. Microwave Theory Tech, vol. 42, No.9, pp. 1807-1815.

Ünlü, M. 2003. RF MEMS teknolojisi ile ayarlanabilir empedans uyumlama devresi. Yüksek lisans tezi. Orta Doğu Teknik Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Veyres, C. and Hanna, V. F. 1980. Extension of the application of conformal mapping technique to coplanar lines with finite. Int. J. Electronics, Vol.48, no.1, pp.47-56.

Wang, Y-C. 1978. Cylinrical and cylindrically warped strip and microstriplines. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.MTT-26, no.1, pp.20-23.

Wen, C.P. 1969. Coplanar waveguide:A surface strip transmission line suitable for nonreciprocal gyromagnetic device applications. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.MTT-17, No.12, pp.1087-1090.

Wen, C.P. 1970. Coplanar waveguide directional couplers. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-18, pp.318-322.

Wong, K-L. and Cheng, Y-T., and Row, J-S. 1994. Analysis of cylindrical-rectangular microstrip structure with an airgap. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.42, no.6, pp.1032-1037.

Xue, W., and Ma, X. 2005. Improved finite-element method for the analysis of multilayer coupled cylindrical striplines and microstrip lines. Microwave Optical Technology Lett., Vol.47, No.3, pp.265-270.

Yamamoto, H., Miyagawa, H., Nishikawa T., Wakino K., and Kitazawa, T. 2005. Full-wave analysis of propagation characteristics of a cylindrical coplanar waveguides with finite thickness of conductor. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 53, no.6, pp.2187–2195.

Yamashita, E., and Atsuki, K.1976. Analysis of microstrip-like transmission lines by nonuniform discretization of ıntegral equations . IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.24, pp.195-200.

Yıldız, C. 2005. New and very simple synthesis formulas for coplanar strip line. Microwave Optical Technology Lett., Vol.44, No.2, pp.199-202.

Yuan, N., Ruan, C., Lin, W., He, J., He, and C. 1995. Coplanar coupled lines:The effects of the presence of the lateral ground planes, upper and lower ground planes and the V-shaped microshield ground walls. Proc IEE, vol.142, pp.63–66.

Zargari, V., and Rao, T.C. 1989. Characteristic Impedance of a tubular dielectric cylinder covered with conducting arcstrip. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.37, no.10, pp.1645-1647.

Zeng, L-R., and Wang, Y. 1986. Accurete solutions of elliptical and cylindrical striplines and microstrip lines. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.MTT-34, no.2, pp.259-265.

Zhang, J., Alexandrou, S., and Hsiang, T.Y. 2005. Attenuation characteristics of coplanar waveguides at subterahertz frequencies. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.53, no.11, pp.3281-3287.