

155476

**FARKLI KESİTLERDEKİ ŞERİT İLETİM HATLARINA
KONFORMAL DÖNÜŞÜM TEKNİKLERİNİN UYGULANMASI**

**APPLICATIONS OF CONFORMAL TRANSFORMATION
TECHNIQUES TO STRIP TRANSMISSION LINES THAT HAVE
DIFFERENT CROSS SECTION SHAPES**

VOLKAN AKAN

155476

Hacettepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetmeliğinin

ELEKTRİK ve ELEKTRONİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2004

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından **ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan (Danışman) :.....
Prof. Dr. Erdem Yazgan

Üye :.....
Prof. Dr. Adnan Köksal

Üye :.....
Doç. Dr. Birsen Saka

Üye :.....
Yrd. Doç. Erkan Afacan

Üye :.....
Dr. Çiğdem Seçkin Gürel

ONAY

Bu tez/...../..... tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen yukarıdaki jüri üyeleri tarafından tarihinde kabul edilmiştir.

...../...../.....



Prof.Dr. Ahmet R. ÖZDURAL

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

FARKLI KESİTLERDEKİ ŞERİT İLETİM HATLARINA KONFORMAL DÖNÜŞÜM TEKNİKLERİNİN UYGULANMASI

Volkan Akan

ÖZ

Bu çalışmada eliptik, silindirik ve düzlemsel geometrilere çeşitli şerit iletim hatlarının yarı değişken-TEM analizleri *Konformal Dönüşüm* yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu iletim hatları yüksek frekans sinyali iletiminde, anten uyumlandırmalarında ve çeşitli özel devrelerde karma bağlayıcılar gibi görevler için kullanılmaktadır. Yapılan bu tez, literatürde bulunan çeşitli iletim hatlarının *Konformal Dönüşüm* analizlerinin daha kısa yollarının araştırılmasını ve *Konformal Dönüşüm* yöntemiyle daha önce analizleri yapılmamış olan iletim hatlarının incelenmesini amaçlamaktadır. Bu analizler için öncelikle gerekli kapalı formdaki analitik ifadeler elde edilmiş ve bilgisayar yardımıyla bu iletim hatlarının elde edilen yarı değişken-TEM parametrelerinin değişimi incelenmiştir. Çalışmadaki tüm analizlerin uygulamaları MATLAB® 6.5 yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürde yer alan çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve analitik olarak doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Konformal Dönüşüm, Yarı değişken-TEM, Eliptik Eş-düzlemli Şerit İletim Hatları, Silindirik Eş-düzlemli Şerit İletim Hatları, Eş-Düzlemli Şerit İletim Hatları, Eliptik Eş-düzlemli Dalga Kılavuzu, Silindirik Eş-düzlemli Dalga Kılavuzu, Eş-Düzlemli Dalga Kılavuzu, Eliptik Ekranlanmış Şerit İletim Hattı, Silindirik Ekranlanmış Şerit İletim Hattı, Ekranlanmış Şerit İletim Hattı.

Danışman: Prof. Dr. Erdem Yazgan, Hacettepe Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elektronik Ana Bilim Dalı

APPLICATIONS OF CONFORMAL TRANSFORMATION TECHNIQUES TO STRIP TRANSMISSION LINES THAT HAVE DIFFERENT CROSS SECTION SHAPES

Volkan Akan

ABSTRACT

In this study, quasistatic-TEM analyses of various strip lines in elliptical, cylindrical and planar geometries have been analysed by using *Conformal Mapping* method. These transmission lines are used for matching of antennas, transmitting high frequency signals and in various specific functions of circuits like couplers. This thesis aims investigating the new application procedures of Conformal Mapping shorter than the obtained ones beforehand in the general literature and also strip lines that were not analysed before by using Conformal Mapping in the literature. For these analyses, firstly, required closed form analytic equations have been obtained and then the variations of quasistatic-TEM parameters of these transmission lines have been observed. All implementations of analyses have been realized in MATLAB[®] 6.5 software. The obtained results have been compared with the ones in the literature they have been verified analytically.

Keywords: Conformal Mapping, Quasistatic-TEM, Elliptical Coplanar Strip Lines, Cylindrical Coplanar Strip Lines, Coplanar Striplines, Elliptical Coplanar Wave-guides, Cylindrical Coplanar Wave-guides, Coplanar Wave-guides, Elliptical Shielded Strip Lines, Cylindrical Shielded Strip Lines, Shielded Strip Lines.

Advisor: Prof.Dr. Erdem Yazgan, Hacettepe University, Department of Electrical and Electronics Engineering

TEŞEKKÜR

Değerli fikir, yardım ve yol göstericiliği ile tezin sonuca ulaşmasında büyük katkıları olan Sayın Prof. Dr. Erdem Yazgan' a teőekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olan eőim Aslı ER AKAN' a ve aileme gösterdikleri büyük fedakarlık ve destekleri için sonsuz teőekkürler.



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KONFORMAL DÖNÜŞÜM TEKNİKLERİ ve SCHWARZ-CHRISTOFFEL DÖNÜŞÜMÜ.....	4
2.1 Birbirlerinin Karmaşık Eşleniği Olarak Potansiyel Ve Akı Fonksiyonları.....	5
2.2 Konformal Dönüşüm.....	10
2.3 Konformal Dönüşüm ve Sınır Koşulları.....	11
2.4 Schwarz-Christoffel Dönüşümü.....	13
3. ŞERİT İLETİM HATLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ.....	15
3.1 TEM Hatları ve TEM Modları.....	15
3.2 Yarı TEM İletim Hatları ve Yarı TEM Modları	16
3.3 Homojen Olmayan Dielektrik Dolgulu Şerit Hatlar İçin Yarı-değişken TEM Yaklaşım.....	23
3.3.1 Karakteristik Empedans ve Faz Hızı.....	23
3.3.2 Etkin Elektriksel Geçirgenlik.....	26
3.3.3 Dielektrik Dolum Çarpanı.....	28
3.4 Kısmi Sığaların Üstdüşüm Yöntemi.....	30
3.5 Şerit İletim Hatları ve Mikrodalga Tümlleşik Devreler.....	32
4. ELİPTİK, SİLİNDİRİK VE ASİMETRİK EŞ-DÜZLEMLİ ŞERİT İLETİM HATLARININ YARI DEĞİŞKEN-TEM ANALİZLERİ.....	37

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (DEVAM EDİYOR)

4.1 Sonlu Boyutlara Sahip Çok Katmanlı Dielektrikten Oluşan Asimetrik Eş-Düzlemlî Şerit İletim Hattının Analizi...	38
4.2 Çok Katmanlı Eliptik ve Silindirik Asimetrik Eş-Düzlemlî Şerit İletim Hatlarının Analizleri.....	43
4.3 Sonuç.....	46
5. ELİPTİK VE SİLİNDİRİK ASİMETRİK EŞ-DÜZLEMLİ DALGA KILAVUZLARININ YARI DEĞİŞKEN-TEM ANALİZLERİ	54
5.1 Analiz.....	54
5.2 Sonuç.....	59
6. ELİPTİK, SİLİNDİRİK VE SONLU BOYUTLARA SAHİP ASİMETRİK EKSPANLANMIŞ ŞERİT İLETİM HATLARININ YARI DEĞİŞKEN-TEM ANALİZLERİ: ÇOK KATMANLI DURUM.....	69
6.1 Sonlu Boyutlara Sahip Çok Katmanlı Dielektrikten Oluşan Asimetrik Ekspanlanmış Şerit İletim Hattının Analizi...	69
6.2 Çok Katmanlı Eliptik ve Silindirik Asimetrik Ekspanlanmış Şerit İletim Hatlarının Analizleri.....	75
6.3 Sonuç.....	77
7. SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	84
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	87
EK AÇIKLAMALAR.....	91
ELİPTİK FONKSİYONLAR.....	91
EK 1.....	95
SÖZLÜK.....	95
ÖZGEÇMİŞ.....	97

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AEDK	Asimetrik Eş-düzlemli Dalga Kılavuzu
AEŞİH	Asimetrik Eş-düzlemli Şerit İletim Hattı
AR	Asimetri Oranı
BDT	Bilgisayar Destekli Tasarım
ÇKAEDK	Çok Katmanlı Asimetrik Eş-düzlemli Dalga Kılavuzu
ÇKAEKŞİH	Çok Katmanlı Asimetrik Ekranlanmış Şerit İletim Hattı
ÇKAEŞİH	Çok Katmanlı Asimetrik Eş-düzlemli Şerit İletim Hattı
ÇKEAEDK	Çok Katmanlı Eliptik Asimetrik Eş-düzlemli Dalga Kılavuzu
ÇKEAEKŞİH	Çok Katmanlı Eliptik Asimetrik Ekranlanmış Şerit İletim Hattı
ÇKEAEŞİH	Çok Katmanlı Eliptik Asimetrik Eş-düzlemli Şerit İletim Hattı
ÇKSAEDK	Çok Katmanlı Silindirik Asimetrik Eş-düzlemli Dalga Kılavuzu
ÇKSAEKŞİH	Çok Katmanlı Silindirik Asimetrik Ekranlanmış Şerit İletim Hattı
ÇKSAEŞİH	Çok Katmanlı Silindirik Asimetrik Eş-düzlemli Şerit İletim Hattı
KD	Konformal Dönüşüm
KDT	Konformal Dönüşüm Teknikleri
MTD	Mikrodalga Tümeleşik Devre
SR	Boşluk Oranı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Bir KD için Eğri1 ve Eğri2 ile bunların dönüşümden sonra görünümleri olan Eğri1* ve Eğri2*	11
Şekil 2.2.	Schwarz-Christoffel dönüşümü. (a) w-düzleminde tanımlı bir çokgen, (b) z-düzlemindeki dönüştürülmüş yapı.....	14
Şekil 3.1.	Şerit hat iletkenlerin başlıca çeşitleri (a) Mikroşerit, (b) Üç plakalı, (c) Askılı şerit.....	17
Şekil 3.2.	Mikroşerit iletim hatlarında fazladan eleman üretmek için kullanılan çeşitli iletken yapılar. (a) Eş-düzlemlerli, (b) İki iletkenli eş-düzlemlerli, (c) Simetrik olmayan eş düzlemlerli, (d) Toprak düzlemlerli yuvalı mikroşerit hat, (e) Düzlemsel.....	18
Şekil 3.3.	Yarı-TEM Modları. (a) Yarı-TEM hattı olarak mikroşerit, (b) Tipik frekans bağımlılığı, (c) Mod çeşitleri.....	20
Şekil 3.4.	Etkin elektriksel geçirgenliğin (ϵ_{eff}) tanımı için (a) Enine homojen olmayan devre, (b) Hava ile doldurulmuş aynı devre, (c) Bağlı elektriksel geçirgenlik sabiti ϵ_{eff} olan dielektrik malzeme ile doldurulmuş aynı devre.....	23
Şekil 3.5.	Enine homojen olmayan devrelerin dielektrik dolun çarpanı q_e ' nin tanımı için (a) Elektrik alan çizgisi (E) boyunca dielektrik sınır çizgileri, (b) Dielektrik sınırın elektrik alan çizgisi (E) boyunca olmama durumu.....	28
Şekil 3.6.	Kısmi sığaçların üstdüşüm yöntemi. (a) Simetrik ekranlanmış mikroşerit hattın tam kullanımı, (b) Eş-düzlemlerli şerit hatta yaklaşık kullanımı.....	31

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM EDİYOR)

Sayfa

Şekil 3.7.	Karma MTD örnekleri. (a) RF MEMS (<i>Micro Electro-Mechanical Systems</i>) paralel, eş-düzlemli dalga kılavuzu toprak hattı üzerinde tetikleyici sinyal yastıklı anahtar, (b) RF topraklar üzerinde tetikleme yastıklı "T-Wing" olarak adlandırılan paralel sinyal anahtar ve eş-düzlemli dalga-kılavuzu aktif hattı üzerindeki çapa noktası.....	35
Şekil 3.8.	Tektaş MTD örnekleri. (a) Tektaş MTD voltaj kontrollü salıngaç, (b) Tektaş MTD yükselteç.....	36
Şekil 4.1.	ÇKAESİH' nin z-düzlemindeki kesit alanının görünüşü.....	38
Şekil 4.2.	Farklı yüksekliklere sahip katmanların canlandırılması için yapının z-düzlemindeki genel kesit gösterimi.....	40
Şekil 4.3.	Jacobi Eliptik fonksiyon kullanılarak yapılan dönüşümden sonra elde edilen yapının t-düzlemindeki kesiti.....	40
Şekil 4.4.	ÇKEAESİH' nin ç-düzlemindeki kesiti.....	43
Şekil 4.5.	Dönüşümden sonra ÇKSAESİH' nin v -düzlemindeki kesit görünüşü.....	45
Şekil 4.6.	AEŞİH' nin etkin dielektrik sabitinin $h_1 / (s+w_1)$ oranına göre değişimi.....	46
Şekil 4.7.	AEŞİH' nin karakteristik empedansının $h_1 / (s+w_1)$ oranına göre değişimi.....	47
Şekil 4.8.	ÇKAESİH' nin etkin dielektrik sabitinin $(h_2 - h_1) / (s+w_1)$ oranına göre değişimi.....	47
Şekil 4.9.	ÇKAESİH' nin karakteristik empedansının $(h_2 - h_1) / (s+w_1)$ oranına göre değişimi.....	48
Şekil 4.10.	ÇKAESİH' nin etkin dielektrik sabitinin $h_3 / (s+w_1)$ oranına göre değişimi.....	48
Şekil 4.11.	ÇKAESİH' nin karakteristik empedansının $h_3 / (s+w_1)$ oranına göre değişimi.....	49

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM EDİYOR)Sayfa

Şekil 4.12.	ÇKEAEŞİH' nin ve ÇKSAEŞİH' nin etkin dielektrik sabitinin $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$ için $2\phi/(2\phi + \theta_1 + \theta_2)$ oranına göre değişimi.....	49
Şekil 4.13.	ÇKEAEŞİH' nin ve ÇKSAEŞİH' nin karakteristik empedansının $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$ için $2\phi/(2\phi + \theta_1 + \theta_2)$ oranına göre değişimi.....	50
Şekil 4.14.	ÇKEAEŞİH' nin ve ÇKSAEŞİH' nin etkin dielektrik sabitinin $\epsilon_{r2} = 1, \epsilon_{r3} = 3.78$ için $2\phi/(2\phi + \theta_1 + \theta_2)$ oranına göre değişimi.....	50
Şekil 4.15.	ÇKEAEŞİH' nin ve ÇKSAEŞİH' nin karakteristik empedansının $\epsilon_{r2} = 1, \epsilon_{r3} = 3.78$ için $2\phi/(2\phi + \theta_1 + \theta_2)$ oranına göre değişimi.....	51
Şekil 4.16.	ÇKEAEŞİH' nin ve ÇKSAEŞİH' nin etkin dielektrik sabitinin $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 3.78$ için $2\phi/(2\phi + \theta_1 + \theta_2)$ oranına göre değişimi.....	51
Şekil 4.17.	ÇKEAEŞİH' nin ve ÇKSAEŞİH' nin karakteristik empedansının $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 3.78$ için $2\phi/(2\phi + \theta_1 + \theta_2)$ oranına göre değişimi.....	52
Şekil 4.18.	ÇKEAEŞİH' nin ve ÇKSAEŞİH' nin etkin dielektrik sabitinin $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$ için $2\phi/(2\phi + \theta_1 + \theta_2)$ oranına göre değişiminin karşılaştırılması.....	52
Şekil 4.19.	ÇKEAEŞİH' nin ve ÇKSAEŞİH' nin karakteristik empedansının $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$ için $2\phi/(2\phi + \theta_1 + \theta_2)$ oranına göre değişiminin karşılaştırılması.....	53
Şekil 5.1.	ÇKEAEDK' nin ζ -düzlemindeki kesit görünüşü.....	55
Şekil 5.2.	ÇKSAEDK' nin z -düzlemindeki kesit görünüşü.....	56
Şekil 5.3.	Konformal dönüşümlerden sonra elde edilen ÇKAEDK' nin w -düzlemindeki kesit görünüşü.....	57
Şekil 5.4a.	ÇKEAEDK ve eşdeğer ÇKSAEDK' nin h_1/a_2 oranına göre karakteristik empedans değerinin değişimi.....	60

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM EDİYOR)**Sayfa**

Şekil 5.4b.	ÇKEAEDK ve eşdeğer ÇKSAEDK' nin h_1/a_2 oranına göre etkin dielektrik sabitinin değişimi.....	60
Şekil 5.5a.	ÇKEAEDK ve eşdeğer ÇKSAEDK' nin h_2/a_1 oranına göre karakteristik empedans değerinin değişimi.....	61
Şekil 5.5b.	ÇKEAEDK ve eşdeğer ÇKSAEDK' nin h_2/a_1 oranına göre etkin dielektrik sabitinin değişimi	62
Şekil 5.6a.	ÇKEAEDK ve eşdeğer ÇKSAEDK' nin h_3/a_1 oranına göre karakteristik empedans değerinin değişimi.....	62
Şekil 5.6b.	ÇKEAEDK ve eşdeğer ÇKSAEDK' nin h_3/a_1 oranına göre etkin dielektrik sabitinin değişimi.....	63
Şekil 5.7a.	Farklı SR değerleri ve $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$ için ÇKEAEDK ve ÇKSAEDK' nin karakteristik empedans değerinin biçim çarpanına göre değişimi.....	64
Şekil 5.7b.	Farklı SR değerleri ve $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$ için ÇKEAEDK ve ÇKSAEDK' nin etkin dielektrik sabitinin biçim çarpanına göre değişimi.....	64
Şekil 5.8a.	Farklı SR değerleri ve $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = 1$, $\epsilon_{r3} = 3.78$ için ÇKEAEDK ve ÇKSAEDK' nin karakteristik empedans değerinin biçim çarpanına göre değişimi.....	65
Şekil 5.8b.	Farklı SR değerleri ve $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = 1$, $\epsilon_{r3} = 3.78$ için ÇKEAEDK ve ÇKSAEDK' nin etkin dielektrik sabitinin biçim çarpanına göre değişimi.....	65
Şekil 5.9a.	Farklı SR değerleri ve $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 3.78$ için ÇKEAEDK ve ÇKSAEDK' nin karakteristik empedans değerinin biçim çarpanına göre değişimi.....	66
Şekil 5.9b.	Farklı SR değerleri ve $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 3.78$ için ÇKEAEDK ve ÇKSAEDK' nin etkin dielektrik sabitinin biçim çarpanına göre değişimi.....	67

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM EDİYOR)

Sayfa

- Şekil 5.10. Bu kısımda kullanılan yöntem ve Karpuz et. al. [21] tarafından kullanılan yöntemle ÇKEAEDK ve ÇKSAEDK için elde edilen karakteristik empedans değerlerinin $\epsilon_1 = 0.65$, $h_1 / a_2 = 0.037$, $(2\theta + \phi_1 + \phi_2) = 75^0, 65^0, 55^0, 45^0$ ve $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$ için $2\theta / (2\theta + \phi_1 + \phi_2)$ ' ye göre karşılaştırılması..... 67
- Şekil 5.11. $\epsilon_2 = 0.45$, $SR = 0.5$, $\theta = 10^0$, $\phi_1 = 10^0$, $\epsilon_{r1} = 2.5$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$ (kesikli çizgi), ve $\epsilon_2 = 0.45$, $SR = 0.5$, $\theta = 40^0$, $\phi_1 = 50^0$, $\epsilon_{r1} = 2.5$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$ (düz çizgi) değerleri için ÇKEAEDK ve ÇKSAEDK' nin etkin dielektrik sabitinin h_1/a_2 ' ye göre değişimi..... 68
- Şekil 6.1. ÇKA EKŞİH' nin z_3 -düzlemindeki kesit görünüşü..... 70
- Şekil 6.2. ÇKA EKŞİH' nin eşdeğer sığa devresi..... 70
- Şekil 6.3. Kısmi sığa değerlerini hesaplamak için z -düzlemindeki genel yapı..... 71
- Şekil 6.4. Kısmi sığa değerlerini hesaplamak için elde edilen t -düzlemindeki simetrik eş-düzlemlili dalga kılavuzu..... 71
- Şekil 6.5. ÇKEAEKŞİH' nin z_1 -düzlemindeki kesit görünüşü..... 75
- Şekil 6.6. Dönüşümden sonra ÇKSAEKŞİH' nin z_2 -düzlemindeki kesit görünüşü..... 76
- Şekil 6.7. $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = 1$, $w/w_1 = 15$, $h_2/w_1 = 8$ ve farklı AR değerleri için ÇKA EKŞİH' nin ϵ_{eff} değerinin h_1/h_2 ' ye göre değişimi..... 77
- Şekil 6.8. $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$, $w/w_1 = 15$, $h_2/w_1 = 8$ ve farklı AR değerleri için ÇKA EKŞİH' nin ϵ_{eff} değerinin h_1/h_2 ' ye göre değişimi..... 78
- Şekil 6.9. Farklı AR ve $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = 1$, $h_1/h_2 = 0.5$, $h_2/w_1 = 8$ değerleri için ÇKA EKŞİH' nin ϵ_{eff} ' nin w/w_1 oranına göre değişimi..... 79

ŞEKİLLER DİZİNİ (DEVAM EDİYOR)

Sayfa

- Şekil 6.10. Farklı AR ve $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = 1$, $h_1/h_2 = 0.5$,
 $h_2/w_1 = 8$ değerleri için ÇKAEKŞİH' nin Z_0 ' nın w/w_1
oranına göre değişimi..... 79
- Şekil 6.11. Farklı ϵ_2 ve $p_1/a_2 = 0.6$, $p_2/a_2 = 0.2$, $p_3/a_2 = 0.8$
değerleri için ÇKAEKŞİH ve eşdeğer
ÇKSAEKŞİH'nin ϵ_{eff} ' nin θ' ya göre değişimi..... 80
- Şekil 6.12. Farklı ϵ_2 ve $p_1/a_2 = 0.6$, $p_2/a_2 = 0.2$, $p_3/a_2 = 0.8$ değerleri
için ÇKAEKŞİH ve eşdeğer ÇKSAEKŞİH'nin Z_0 ' nın
 θ' ya göre değişimi..... 80
- Şekil 6.13. Farklı ϵ_2 ve $p_1/a_2 = 0.6$, $p_2/a_2 = 0.2$, $p_3/a_2 = 0.8$ değerleri
için ÇKAEKŞİH ve eşdeğer ÇKSAEKŞİH'nin
 ϵ_{eff} ' nin θ' ya göre değişimi..... 81
- Şekil 6.14. Farklı ϵ_2 ve $p_1/a_2 = 0.6$, $p_2/a_2 = 0.2$, $p_3/a_2 = 0.8$ değerleri
için ÇKAEKŞİH ve eşdeğer ÇKSAEKŞİH'nin Z_0 ' nın
 θ' ya göre değişimi..... 81
- Şekil 6.15. Farklı ϵ_2 ve $p_1/a_2 = 0.6$, $p_2/a_2 = 0.2$, $p_3/a_2 = 0.8$ değerleri
için ÇKAEKŞİH ve eşdeğer ÇKSAEKŞİH'nin
 ϵ_{eff} ' nin θ' ya göre değişimi..... 82
- Şekil 6.16. Farklı ϵ_2 ve $p_1/a_2 = 0.6$, $p_2/a_2 = 0.2$, $p_3/a_2 = 0.8$ değerleri
için ÇKAEKŞİH ve eşdeğer ÇKSAEKŞİH'nin Z_0 ' nın
 θ' ya göre değişimi..... 82
- Şekil 6.17. ÇKAEKŞİH' nin farklı AR ve $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 12.9$, $\epsilon_{r3} = 1$
değerleri için, Nguyen tarafından kullanılan metot [29]
ile bu çalışmada kullanılan yöntem sonuçlarının; Z_0 için
 w/h_2 oranına göre karşılaştırılması..... 83

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Şerit iletim hatlarının karşılaştırmalı özellikleri	33
---	----



1. GİRİŞ

Genel olarak şerit iletim hatları üçüncü bölümde anlatıldığı gibi mikrodalga tümleşik devrelerin yapıtaşları olmakla beraber temel olarak yüksek frekans sinyal iletiminde, anten uyumlandırmalarında ve çeşitli özel devrelerde karma bağlaştırıcılar gibi görevler için kullanılmaktadır. Bu iletim hatlarına eş-düzlemliler şerit iletim hattı, eş-düzlemliler dalga kılavuzu, mikroşerit iletim hattı ve ekranlanmış şerit iletim hattı örnek olarak verilebilir. Ayrıca bu iletim hatları artık sadece eş düzlemliler değil, aynı zamanda eliptik ve silindirik yüzeyler gibi farklı geometrilere uyumlandırılacak şekilde tasarlanmaktadır [1].

Bu devrelerin analizi için literatürde yarı değişken-TEM yaklaşımına dayanan birçok yöntem mevcuttur. Bunlar Konformal Dönüşüm metodu, Integral Eşitlik yöntemi, Varyasyonel yöntem ve Sonlu Farklar yöntemi olarak sıralanabilir. Yarı değişken-TEM yaklaşımına dayanan bu yöntemlerde hava ve dielektrik malzeme ayrı ayrı düşünülerek dalganın yayılımı tamamen TEM modunda olduğu varsayılır. Daha sonra statik sığa değeri hesaplanarak devrenin karakteristik parametreleri (etkin dielektrik sabiti, karakteristik empedans ve hat sığası) elde edilir. Bu yaklaşımda elde edilen karakteristik parametrelerin frekansla ilişkileri yoktur ve bu yaklaşım hattın fiziksel parametrelerinin dalga boyundan yeteri kadar küçük olduğu frekanslarda analiz yapmak için uygundur. Bununla beraber özellikle eş-düzlemliler şerit iletim hattı, eş-düzlemliler dalga kılavuzu ve ekranlanmış şerit iletim hattının karakteristik parametreleri frekansa bağımlı olarak çok az değişim göstermektedir.

Genel olarak literatürde çok sıkça bulunan ve bu çalışmanın da analiz yöntemi olan Konformal Dönüşüm yöntemi yukarıda belirtildiği gibi yarı değişken-TEM yaklaşımlardan bir tanesidir. Bu yöntemde çözümlenmesi zor olan yapı daha kolay çözümlenebilecek veya çözümü bilinen bir yapıya dönüştürülmektedir. Bu metod Carter tarafından ilk kez gerçek bir mühendislik uygulamasında kullanılmıştır [2].

Daha sonra da eş düzlemlı şerit iletım hatları, eş düzlemlı dalga kılavuzlarının ve mikroşerit iletım hatların yarı değişken-TEM parametrelerinin hesaplanması ile mikroşerit yama anten ve rezonatörlerin rezonans frekanslarının hesaplanması gibi çok geniş bir kullanım alanına yayılmaya başlamıştır [1, 3-26].

Bu çalışmanın ikinci kısmında Konformal Dönüşüm teknikleri ve tezin devamında çok sık kullanılacak olan Schwarz-Christoffel dönüşümü genel olarak tanımlanmıştır [27]. Ayrıca Konformal Dönüşümün temelini oluşturan potansiyel ve akı fonksiyonlarının tanımı yapılmış ve dönüşümden sonra bunların nasıl etkilendiği anlatılmıştır.

Tezin üçüncü bölümünde genel olarak şerit iletım hatlarının özellikleri özetlenmiştir. Homojen olmayan hatlarda dalğanın hangi modda ilerlediği ve bu hatların karakteristik parametrelerinin durağan sığa değerinin hesaplanmasından yola çıkarak nasıl elde edildiği gösterilmiştir. Bu hesaplamada kullanılan kısmi sığaların üstdüşüm yöntemi de ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Ayrıca şerit iletım hatlarında yarı değişken-TEM analiz yapılırken çok sık kullanılan dielektrik dolum çarpanının tanımı yapılmış ve bunun diğer devre parametreleri ile ilişkileri gösterilmiştir. Yine bu bölümde şerit iletım hatlarının özellikleri, aralarında kıyaslanmış ve bu hatların kullanım yerleri ile ilgili örnekler verilmiştir [28, 29].

Tezin ilerleyen bölümlerinde eliptik, silindirik ve düzlemsel geometrilerde çeşitli iletım hatlarının analizi yapılmıştır. Bu analizlerde iletken kalınlıkları sonsuz küçüklükte, dielektrik materyaller kayıpsız ve izotropik olarak kabul edilmiştir.

Dördüncü bölümde ise özellikle son yıllarda üstünde çok sıkça durulmaya başlanan eliptik, silindirik ve sonlu dielektrik boyutları (hem yükseklik hem de genişlik olarak) olan düzlemsel asimetrik şerit iletım hatlarının yarı değişken-TEM analizleri, D_u ve diğerleri tarafından kullanılan ifadeler daha da kısaltılarak ve geliştirilerek yapılmıştır [23]. Ayrıca çok katmanlı eliptik, silindirik ve asimetrik eş-düzlemlı şerit iletım hatlarının yarı değişken-TEM parametrelerinin KD teknikleri kullanılarak elde edilmesi gösterilmiştir. Bu parametrelerin fiziksel büyüklüklere göre nasıl değiştirdiği incelenmiş ve sonuçlar literatürde bulunan çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Beşinci bölümde yine son zamanlarda üzerinde çok sık durulan; eliptik ve silindirik asimetrik eş-düzlemlı şerit iletim hatlarının tamamlayıcı yapıları olan eliptik ve silindirik asimetrik eş-düzlemlı dalga kılavuzlarının (genelleştirilerek çok katmanlı oldukları durumlar incelenmiştir) Konformal Dönüşüm metodu kullanılarak yarı değişken-TEM analizleri yapılmıştır. Bu dalga kılavuzlarının yarı değişken-TEM parametrelerinin kılavuzların yapısal büyüklüklerine göre nasıl değiştiği gösterilmiştir. Analiz yapılırken Görür ve diğerleri [19] tarafından kullanılan uygulama temel alınmış ve Karpuz ve Görür [21] tarafından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Tezin altıncı bölümünde ise çok katmanlı eliptik, silindirik ve sonlu boyutlara sahip asimetrik ekranlanmış şerit iletim hatlarının yarı değişken-TEM analizleri Konformal Dönüşüm kullanılarak yapılmıştır. Literatürde bu yapının homojen olmayan asimetrik hali için önerilen metot bu bölümde *geliştirilerek* eliptik, silindirik ve sonlu boyutlara sahip çok katmanlı olan asimetrik ekranlanmış şerit iletim hatlarının analizinde kullanılmıştır. Bu yapıların yarı değişken-TEM analizleri için gerekli eşitlikler elde edilmiş, elde edilen ifadeler bu yapıların karakteristik parametrelerinin, fiziksel parametrelere bağlı olarak nasıl değiştiğini incelemek için kullanılmıştır ve sonuçlar literatürdekilerle karşılaştırılmıştır.

Son bölümde ise çalışmanın sonuçları genel olarak özetlenmiş ve irdelenmiştir. Ayrıca bu tezde yapılan çalışmayı ilerletmek için bir sonraki aşama olacak öneriler verilmiştir.

2. KONFORMAL DÖNÜŞÜM TEKNİKLERİ ve SCHWARZ-CHRISTOFFEL DÖNÜŞÜMÜ

KD (Konformal Dönüşüm) genel olarak, uygun bir fonksiyon kullanarak karmaşık düzlemde tanımlı belirli bir bölgeyi farklı karmaşık değişkenlere bağlı referans düzleminde tanımlı başka bir alana çeviren dönüşümdür. 1867 yılında Christoffel'dan [27] itibaren KDT (Konformal Dönüşüm Teknikleri) birçok matematikçi ve mühendis tarafından kullanılmıştır. Sınır değer problemleri ve bileşenleri belirli ve sınırlı bir düzlemde tanımlanmış elektromanyetik problemleri gibi bir çok mühendislik uygulaması KDT kullanılarak çözümlenebilmektedir. Bu yöntemdeki en önemli özellik çözümlenmesi zor olan yapının daha kolay çözümlenebilecek veya çözümünü bilinen bir yapıya dönüştürülebilmesidir. Dönüşüm sırasında önemli bir özellik korunmaktadır: eş potansiyel çizgileri ve akı çizgileri arasındaki açı (elektriksel potansiyel ve elektrik alan çizgileri arasındaki açı gibi). KDT elektromanyetik problemlerde kullanıldığı gibi ısı, sıvı akışı gibi fiziksel problemlerde de sıkça kullanılmaktadır. Bilinen genel literatüre göre Schinzinger [30] tarafından belirtildiği gibi ilk olarak Routh [31] titreşim yapan ince zar yapısını KDT kullanarak analiz etmiştir. Daha sonra Carter [2] ilk kez gerçek bir mühendislik uygulamasında KD kullanmıştır. Daha sonra KDT, düzensiz sınırlarda dalga yayılması [32-35], akustik kanallar [36], radyo dalgalarının dünya çevresinde yayılımı [37, 38], dalga kılavuzlarının köşelerinden yansımanın hesaplanması [39], eş düzlemlili şerit iletim hatları, eş düzlemlili dalga kılavuzlarının ve mikroşerit iletim hatlarının yarı değişken-TEM parametrelerinin hesaplanması ile mikroşerit yama anten ve rezonatörlerin rezonans frekanslarının hesaplanması [3-26] gibi çok geniş bir kullanım alanına yayılmaya başlamıştır.

2.1 Birbirlerinin Karmaşık Eşleniği Olarak Potansiyel ve Akı Fonksiyonları

Bu bölümde ilk önce birbirlerinin karmaşık eşleniği olan potansiyel ve akı fonksiyonlarını tanıtmak için temel matematiksel tanımlamalar verilecektir.

Aşağıdaki gibi iki karmaşık sayı olduğu düşünölsün.

$$\begin{aligned} p &= x + jy \\ r &= x - jy \end{aligned} \quad (2.1)$$

Burada $j = \sqrt{-1}$ 'dir. p ve r 'nin Laplace eşitliğini sağladığını göstermek çok kolaydır. Ayrıca bu karmaşık sayıların (p ve r) gerçek ve sanal kısımları da Laplace eşitliğini sağlar.

Eğer $F = u + jv$, $z = x + jy$ 'nin bir fonksiyonu ise aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$\begin{aligned} F &= G(x + jy), \\ F &= G(z) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Ayrıca F 'nin, x 'e göre kısmi türevi aşağıdaki gibi verilebilir,

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x} &= \frac{\partial G(z)}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial x}, \\ \frac{\partial F}{\partial x} &= G'(z) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Daha sonra F 'nin, x 'e göre ikinci dereceden kısmi türevi

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = G''(z) \quad (2.4)$$

şeklinde yazılabilir ve sanal kısım için

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial y} &= \frac{\partial G(z)}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial y}, \\ \frac{\partial F}{\partial y} &= j G'(z) \quad . \end{aligned} \quad (2.5)$$

ifadesi yazılabilir ve buradan F' nin y' ye göre ikinci dereceden kısmi türevi aşağıdaki gibi elde edilebilir;

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} &= j \frac{\partial G'(z)}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial y}, \\ \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} &= j^2 \frac{\partial G'(z)}{\partial z}, \\ \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} &= -G''(z) \quad . \end{aligned} \quad (2.6)$$

Eş. (2.4) ve (2.6)' dan

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = 0 \quad . \quad (2.7)$$

elde edilir. Bunlar u ve v cinsinden incelenirse

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + j \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (2.8)$$

ve

$$\frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + j \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (2.9)$$

eşitlikleri elde edilir. Eğer Eş. (2.8) ve (2.9) toplanıp Eş. (2.7) kullanılırsa aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + j \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = 0 . \quad (2.10)$$

Eş. (2.10)' dan aşağıdaki sonuçlara ulaşılır.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (2.11)$$

ve

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = 0 . \quad (2.12)$$

Eş. (2.11) ve (2.12)' den $x + jy$ gibi karmaşık değişkenli herhangi bir fonksiyonun gerçek ve sanal kısımlarının Laplace eşitliğini sağladığı söylenebilir.

Özet olarak, eğer F , $F = u + jv$ ve $z = x + jy$ olmak üzere, z' nin bir fonksiyonu ise aşağıdaki eşitliği yazmak mümkündür.

$$\nabla^2 u = 0 \text{ ve } \nabla^2 v = 0 . \quad (2.13)$$

Eş. (2.13)' te u *potansiyel fonksiyonu* ve onun karmaşık eşlenik fonksiyonu v , *akı fonksiyonu* olarak isimlendirilir.

Potansiyel ve akı fonksiyonları arasındaki bağıntılar Cauchy-Riemann eşitlikleri olarak adlandırılırlar ve oldukça önemlidirler.

Tekrar $F = G(z)$ fonksiyonu kompleks düzlemde tanımlanırsa,

$$\begin{aligned} F &= u + jv \quad (F = G(z)), \\ z &= x + jy \end{aligned}$$

ve

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial x} + j \frac{\partial v}{\partial x} . \quad (2.14)$$

Ayrıca, F' nin x' e göre birinci dereceden kısmi türevi

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial G(z)}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial x},$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial G(z)}{\partial z}$$
(2.15)

şeklindedir ve buradan

$$\frac{\partial u}{\partial x} + j \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial G(z)}{\partial z}$$
(2.16)

yazılabilir. Benzer olarak F' nin y' ye göre birinci dereceden kısmi türevi yazılırsa

$$\frac{\partial F}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial y} + j \frac{\partial v}{\partial y},$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} = \frac{\partial G(z)}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial y},$$

$$\frac{\partial F}{\partial y} = j \frac{\partial G(z)}{\partial z}$$

olarak elde edilir. Bu nedenle

$$\frac{\partial u}{\partial y} + j \frac{\partial v}{\partial y} = j \frac{\partial G(z)}{\partial z}$$
(2.17)

yazılabilir. Eğer Eş. (2.17) j ile çarpıldıktan sonra Eş. (2.16) ile toplanırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}\right) + j\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) = 0 . \quad (2.18)$$

Daha sonra

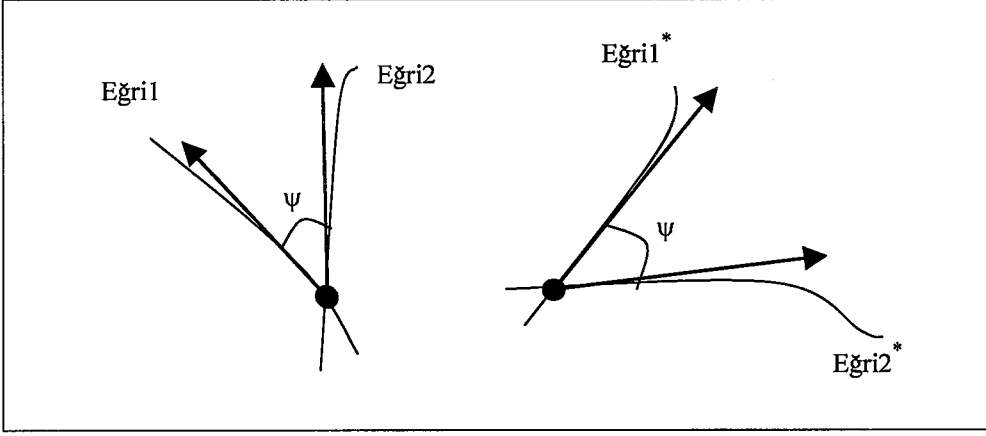
$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} , \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.20)$$

eşitlikleri yazılabilir. Eş. (2.19) ve (2.20) Cauchy-Riemann eşitlikleri olarak adlandırılırlar.

2.2 Konformal Dönüşüm

Karmaşık eşlenikli fonksiyonlar tanıtıldıktan sonra KD' nin tanımı yapılabilir. Kreyszig [40] tarafından belirtildiği gibi *KD analitik bir $f(z)$ fonksiyonu tarafından kritik noktalar, ki bunlar $f'(z)$ ' nin sıfır olduğu noktalardır, dışındaki noktalarda tanımlanmış dönüşüm* olarak ifade edilmektedir. Başka bir deyişle eğer fonksiyon z noktasında analitik ve $f'(z) = df/dz \neq 0$ ise dönüşüm konformaldir. KD' nin bahsedilen en önemli özelliği aşağıdaki şekille açıklanabilir.



Şekil 2.1 Bir KD için Eğri1 ve Eğri2 ile bunların dönüşümden sonra görünüşleri olan Eğri1* ve Eğri2*.

Şekil 2.1' de görüldüğü gibi Eğri1 ve Eğri2' nin kesiştiği noktadan bu eğrilere çizilen teğetlerin aralarındaki açının dönüşümden sonra yön ve büyüklük olarak korunduğu görülmektedir. Dönüşüm fonksiyonunun analitik olup olmadığı Cauchy-Riemann eşitlikleriyle belirlenebilir. Eğer bu eşitlikler sağlanıyorsa fonksiyon analitiktir.

2.3 Konformal Dönüşüm ve Sınır Koşulları

Elektromanyetik problemlerde ve iletim hattı problemlerinde genellikle sınır koşulları, sınır koşul fonksiyonunun kendisiyle veya bu fonksiyonun sınırın normaline göre türevi olarak verilir. Bunlar sırasıyla Dirichlet ve Neumann problemleri olarak adlandırılır. Konformal dönüşüm altında bu koşullar dönüşümün sağlandığı son bölgede değişmeden kalır [29, 41]. Bu durum aşağıdaki gibi gösterilebilir. Bunun için aşağıdaki gibi z düzlemindeki bir C eğrisini, w düzlemindeki C' eğrisine dönüştüren analitik bir dönüşüm fonksiyonu olsun.

$$w = f(z) = u(x, y) + jv(x, y) \quad (2.21)$$

Ayrıca $h(u, v)$, C' üzerinde türevlenebilir bir fonksiyon olarak tanımlansın. Eğer $h(u, v)$, Dirichlet ve Neumann sınır koşullarından birini sağlıyorsa C' boyunca aşağıdaki eşitlikler yazılabilir,

$$h(u, v) = d \quad (2.22)$$

burada d bir sabiti göstermektedir, veya

$$\frac{d h(x, y)}{d n} = 0 \quad (2.23)$$

$H(x, y) = h[u(x, y), v(x, y)]$ fonksiyonu C boyunca karşılık gelen sınır koşullarını sağlar. Bu aşağıdaki gibi gösterilebilir,

$$H(x, y) = d \quad (2.24)$$

$$\frac{d H(x, y)}{d n} = 0. \quad (2.25)$$

Yukarıda verilen temel bilgilere dayalı olarak karmaşık düzlemlerdeki dönüşümleri kolaylaştıran Schwarz-Christoffel dönüşümü aşağıdaki gibi özetlenebilir.

2.4 Schwarz-Christoffel Dönüşümü

Schwarz-Christoffel dönüşümü karmaşık düzlemde bir çokgenin içinde kalan bölgeyi başka bir karmaşık düzlemde tanımlı yarı düzleme dönüştürür. Bu yöntem iletim hatlarının karakteristik parametrelerinin hesaplamasında oldukça sık kullanılmakta olan ve güçlü bir yöntemdir.

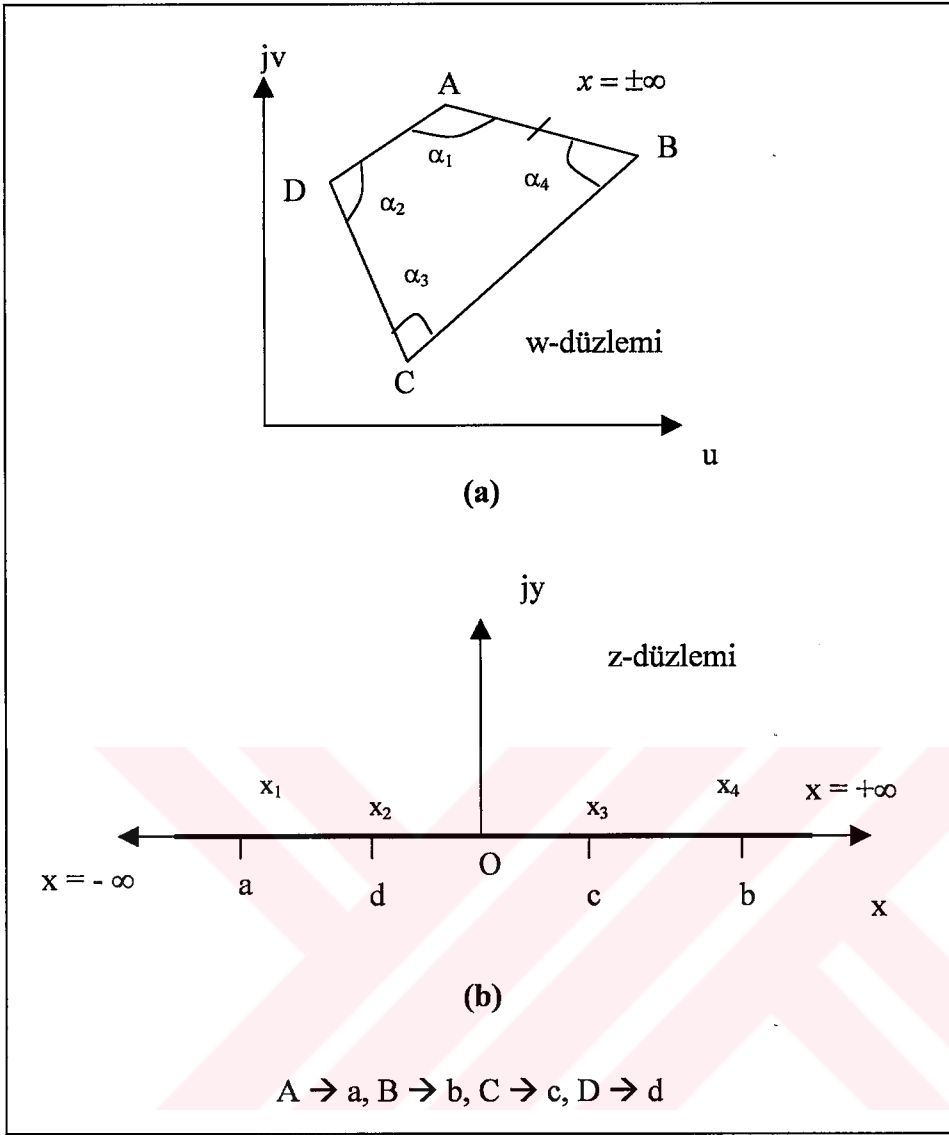
Bu metot iki yapı arasında (asıl yapı ile çözümü daha kolay olan dönüştürülmüş yapı) dönüşümü yapmak için bir yordamın oluşturulmasını sağlar. Şekil 2.2' de görüldüğü gibi çokgen A ve B arasındaki bir noktadan açılmıştır. Bu şekilden anlaşılacağı gibi açılma noktası bir köşe değildir. Eğer köşeden açmak gerekiyorsa, bu köşe dönüşüm esnasında dikkate alınmaz. Buradan konformal dönüşüm eşitliği yazılırsa,

$$w = f(z) \quad (2.26)$$

Daha sonra [42]' de belirtildiği gibi aşağıdaki diferansiyel eşitliği yazılabilir:

$$\frac{dw}{dz} = M(z - x_1)^{(\alpha_1/\pi)-1} (z - x_2)^{(\alpha_2/\pi)-1} (z - x_3)^{(\alpha_3/\pi)-1} \dots \quad (2.27)$$

Bu eşitlikte dikkat edilmesi gereken nokta çarpan sayısıdır. İfadedeki çarpan sayısı çokgenin kenar sayısı ve bir sabit olan M' den oluşmaktadır.



Şekil 2.2 Schwarz-Christoffel dönüşümü. (a) w-düzleminde tanımlı bir çokgen, (b) z-düzlemindeki dönüştürülmüş yapı.

Özet olarak Şekil 2.2'den görüldüğü gibi w düzleminde tanımlı bir çokgenin iç bölgesi z düzleminin üst yarı bölgesine dönüştürülmektedir. Buradan, daha sonraki kısımlarda gösterileceği gibi özellikle iletim hattı problemlerinde kullanılan paralel plakalı sığaca dönüşüm kolaylıkla sağlanabilmektedir.

3. ŞERİT İLETİM HATLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ

Hafifliği, kolay yapımı, çeşitli geometrik yüzeylere sorunsuz uyarlanabilmesi ve geniş frekans aralığında çalışabilmeleri nedeniyle son yıllarda yoğun bir biçimde tercih edilen şerit hat ve antenler bu özellikleri nedeniyle oldukça geniş kullanım alanı bulmuştur [24, 28, 29].

Şekil 3.1 ve 3.2' de kesitleri görülen çeşitli şerit iletim hatları üzerinde iletkenlerin konumlandırılmasına ve elektrik alanın yolu üzerine konulan dielektrik katmanların yapısına bağlı olarak çeşitli modlar oluşturulur. Bu modlar üçe ayrılır: ideal TEM modu, yarı-TEM modu ve genel karma modları. Bu çalışmada sadece kayıpsız iletken elektrotlar (özgül direnç $\rho = 0$) ve izotropik, kayıpsız ideal dielektrik alttaşı materyallerle oluşturulmuş iletim hatlarından söz edilecektir. Bu kısımda şerit iletim hatlarının genel özellikleri ve bu hatlarda yarı değişken-TEM analizin nasıl gerçekleştirildiği gösterilecektir. Bu hatların yarı değişken-TEM analizleri Nguyen [29] ve Hoffmann [28] tarafından ayrıntılı olarak yapılmıştır.

3.1 TEM Hatları ve TEM Modları

İdeal TEM iletim hatları (L hatları olarak da adlandırılırlar) iki ayrı iletken elektrottan ve tüm elektrik alanının homojen bir dielektrik içinde oluşturacak şekildedir. Üç plakalı hat (ekranlanmış şerit iletim hattı) bu gruba aittir. İletken elektrotların birbirinden izole olması koşulunun anlamı geniş yüzeyli elektrotlardan en az birisinin sonlu genişlikte olmasıdır. Bu durumu açıklamak için örnek olarak yuvalı hat verilebilir. Bu iletim hattı aralarında açıklık bulunan iki çok geniş elektrottan oluşur. Bu iki elektrotun çok geniş olmasından dolayı aralarında çok fazla sayıda etkileşim ortaya çıkar. Bunun anlamı $\epsilon_r = 1$ koşulunda bile TEM modunun oluşamayacağıdır.

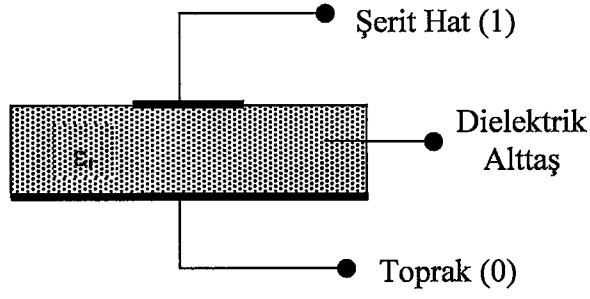
TEM modları sadece elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin dalganın ilerleme doğrultusuna dik olmasıyla ayırt edilebilirler. Elektrotlar üzerinde sadece boyuna akım (dalganın ilerleme yönünde) söz konusudur. İki elektrot arasındaki potansiyel referans noktasından bağımsızdır. TEM hattı karakteristik empedans Z_0 ve faz

hızıyla $v_p = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$ karakterize edilir.

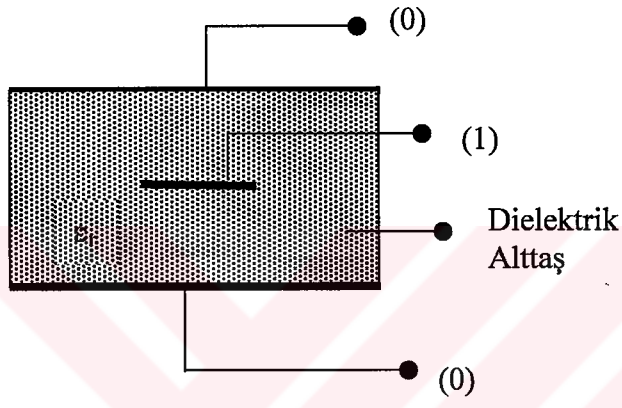
3.2 Yarı-TEM İletim Hatları ve Yarı-TEM Modları

Yarı-TEM iletim hatları da iki ayrı (izole) elektrota sahiptir. Fakat ideal TEM hatlarından farklı olarak alanları (elektrik ve manyetik) içeren bölge homojen olmayan dielektrikten meydana gelmektedir. Bu hatlar Şekil 3.1 (a, c), Şekil 3.2 (a-e)' de görülmektedir. Bu gösterimlerden anlaşıldığı gibi bu hatlar bir alttaş dielektrik tabakadan ve kalan kısımları da havadan ibarettir. $0 \leq f < \infty$ frekans aralığında, bir karma dalga olan yarı-TEM modu yayılır.

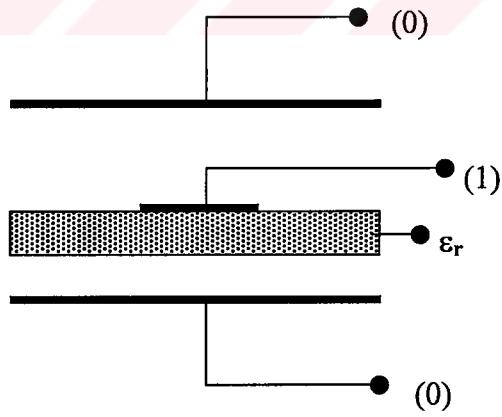
Genel karma modları boyuna bileşenler olan E_L ve H_L ile dalganın iletim yönüne dik enine bileşenler olan E_T ve H_T ' den oluşur. Her iki elektrik ve manyetik alan genelde mevcuttur. Boyuna akımlar (akım yoğunluğu g_L) ve enine akımlar (akım yoğunluğu g_T) elektrotlar üzerinde akmaktadır. Şekil 3.3 (a)' da bir mikroşerit örneği görülmektedir. Oluşan enine akımlar nedeniyle, toplam iletken akımı tek bir değer olarak belirlenemez. E_L nedeniyle, $U = \int \vec{E} \cdot d\vec{s}$ olarak tanımlanan gerilim, integral yolu s' ye bağlıdır (dalga kılavuzlarında olduğu gibi). Bu, iki elektrot arasındaki potansiyel farkının ölçüm yapılan noktalara bağlı olduğu anlamına gelir. Buna göre Şekil 3.3 (a)' da gösterildiği gibi ($U_1 \neq U_2 \neq U_3 \neq U_n$)' dir. Bu yüzden iletken gerilimi tek olarak belirlenemez.



(a)



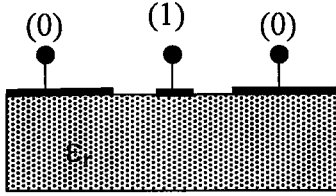
(b)



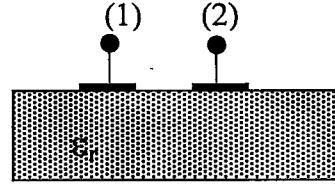
(c)

Şekil 3.1 Şerit hat iletkenlerin başlıca çeşitleri. (a) Mikroşerit, (b) Üç plakalı, (c) Askılı şerit.

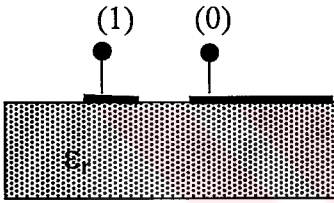
U ve I birden fazla değere sahip oldukları için karakteristik empedans $Z_0 = U/I$ da karma modlar için birden çok değere sahiptir. Sadece faz hızı v_p , karma modda frekansın fonksiyonu olarak tek değere sahiptir.



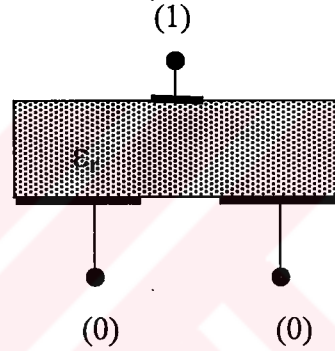
(a)



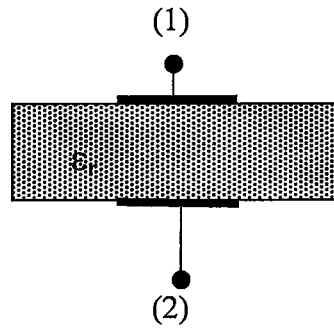
(b)



(c)



(d)



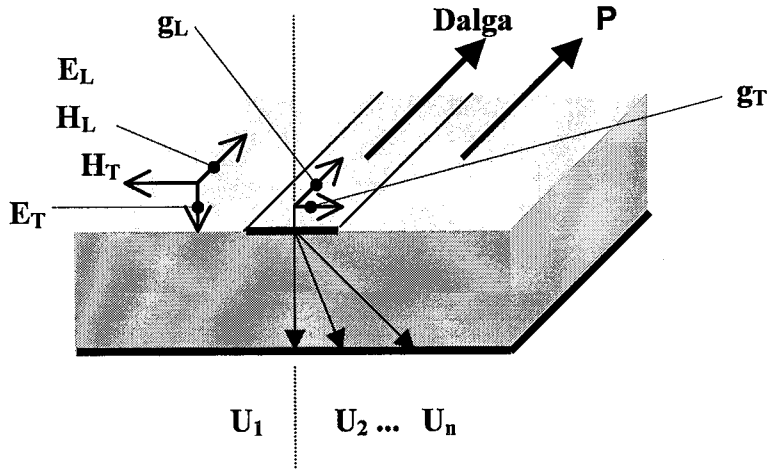
(e)

Şekil 3.2 Mikroşerit iletim hatlarında fazlardan eleman üretmek için kullanılan çeşitli iletken yapılar. (a) Eş-düzlemli, (b) İki iletkenli eş-düzlemli, (c) Simetrik olmayan eş düzlemli, (d) Toprak düzlemi yuvalı mikroşerit hat, (e) Düzlemsel.

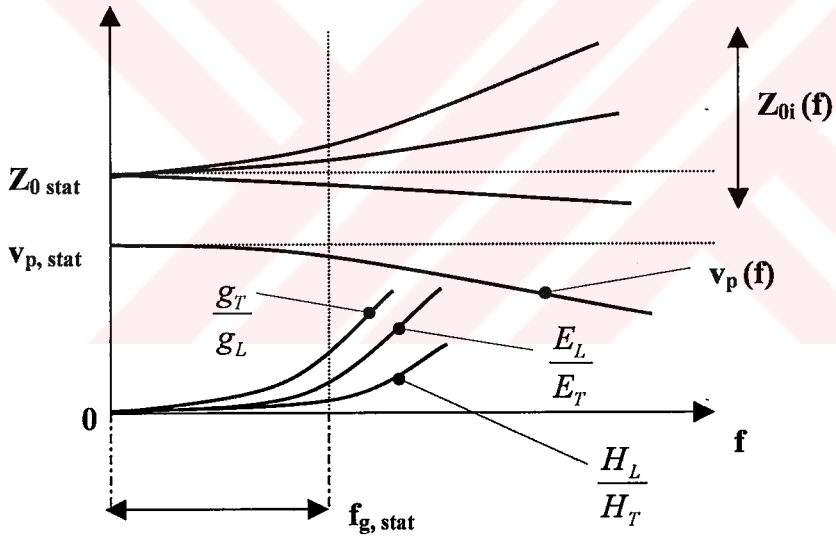
Yarı-TEM modu karma dalganın özel bir çeşididir ve iki birbirinden yalıtılmış elektrotun mevcut bulunduğu ideal TEM moduna çok benzer. Karma modların genel yapısı, ki bunlar homojen olmayan dalga kılavuzları ve dielektrik çubuklardan oluşur, bu koşulu içermez. Yarı-TEM modu belirgin TEM özelliklerinin karma moda baskın çıktığı bir durumdur. Yani $E_L/E_T \ll 1$, $H_L/H_T \ll 1$ (enine alan bileşenleri yanal bileşenlere göre baskındır.) ve $g_T/g_L \ll 1$ dir.

Frekans küçüldükçe ilerleyen dalganın özellikleri ideal TEM moduna daha çok benzer. Yani E_L/E_T , H_L/H_T ve g_T/g_L , $f \rightarrow 0$ 'da sadece bir TEM modu kalana kadar küçülmeye devam ederler (Şekil 3.3 (b)). Bu durumda potansiyelin konuma bağımlılığı küçüktür ve f sıfıra yaklaşıncaya bu bağımlılık ortadan kalkar. Burada yine (ideal TEM modundaki gibi) karakteristik empedans Z_0 kullanılır. Bununla beraber Z_0 birden fazla değeri vardır ve Z_0 'ın çeşitli ifadeleri olan $Z_0 = U/I = 2P/I^2 = U^2/2P$ (P dalganın ilerleme yönündeki güç iletimi) farklı değerler verirler. Bunlar arasındaki fark küçüktür ve frekansın azalmasıyla daha da azalır. $f \rightarrow 0$ durumunda bu değerler birbirine eşitlenir. Faz hızı v_p ' nin frekansa göre değişimi de azdır ve azalan frekans değeriyle beraber küçülür. $f \rightarrow 0$ durumunda durağan (statik) değeri $v_{p,stat}$ ' a eşitlenir (Şekil 3.3 (b)). Mikroşerit hattın bazı analizleri ilerleyen dalgalar kadar sürekli yayılma tipleri ve kaçak dalgaları da içermektedir (Şekil 3.3(c)). Yayılma yapan tipler yanal zayıflaması olmayan fakat boyuna ilerleme yapan dalgalardır. Bu tiplerin hemen hemen hiç uygulamaları yoktur. Bu iletim hatlarının kullanılabilirdiği frekans aralığı yarı-TEM modunun ilerlediği bölgededir.

İdeal-TEM modu, kesit alanı alttaş bir dielektrik ve havadan oluşan şekliyle gösterilebilecek homojen olmayan bir dielektrikte $f > 0$ için yayılamaz. Bir TEM dalgasının havadaki hızı c_0 ve alttaş dielektrik malzemedeki hızı $c_0 / \sqrt{\epsilon_r}$ olmalıdır. Bu farklı hızlardaki dalganın bölümleri tek bir mod oluşturamaz. c_0 ' dan farklı dalga hızları dalga kılavuzunda olduğu gibi eğer boyuna bileşenler oluşursa havada üretilebilirler. Bu sayede karma modlar TE ve TM modlarının üst üste bindirilmesiyle oluşturulabilirler.



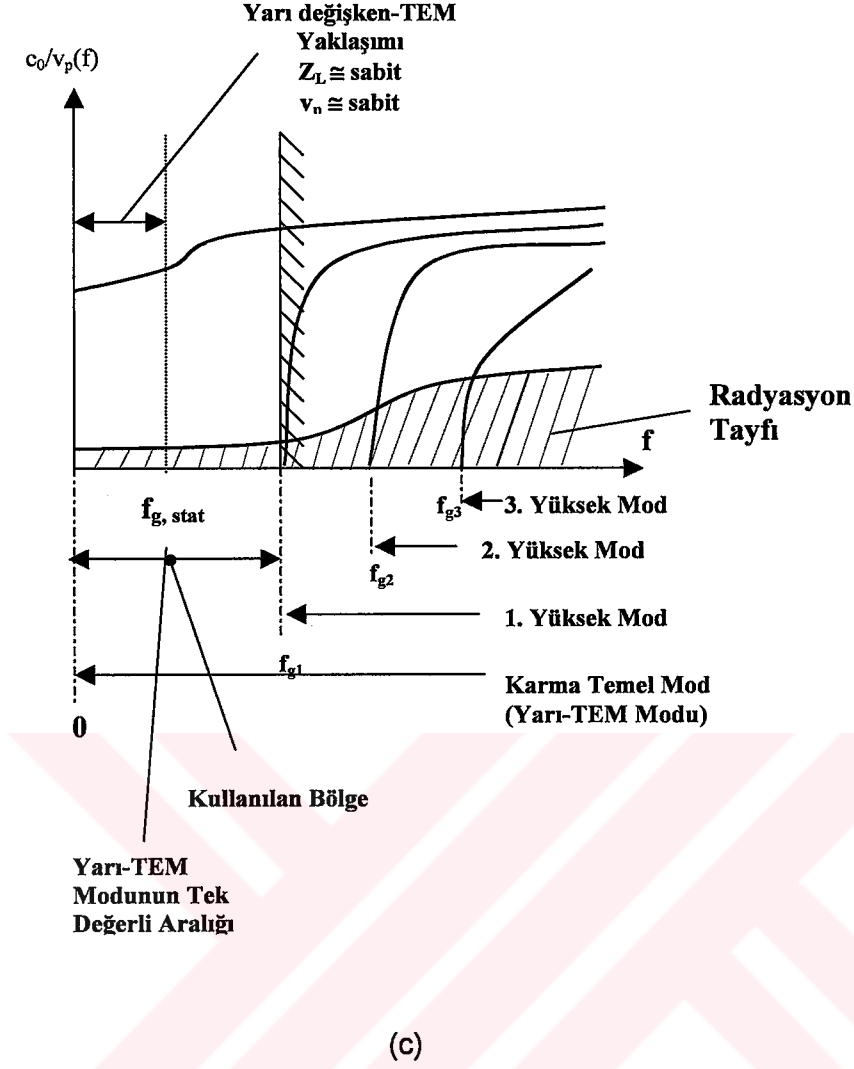
(a)



Yarı değişken Yaklaşım $Z_0(f) \cong \text{sabit}$; $v_p(f) \cong \text{sabit}$

(b)

Şekil 3.3 Yarı-TEM Modları. (a) Yarı-TEM hattı olarak mikroşerit, (b) Tipik frekans bağımlılığı, (c) Mod çeşitleri.



Şekil 3.3 (Devam Ediyor) Yarı-TEM Modları. (a) Yarı-TEM hattı olarak mikroşerit, (b) Tipik frekans bağımlılığı, (c) Mod çeşitleri.

Yarı-TEM iletim hatlarının hem durağan, hem de dinamik çözümlenmeleri mevcuttur. Bunlarla alan dağılımları, faz hızı ve karakteristik empedans hesaplanabilmektedir. Dinamik analiz bunlar içerisinde en genel olanıdır. Karma temel modu (yarı-TEM mod) ve daha çok karma yüksek modları bütün alan bileşenleri dikkate alınarak hesaplanırlar. Bu tanımlamalardan bir tanesi kullanılarak frekansa bağımlı faz hızı $v_p(f)$ ve karakteristik empedans $Z_0(f)$ değerlerine ulaşılır.

Dinamik analizde, karma modlar elektrik alan E ve manyetik alan H' nin karakteristik çözümlenmeleri ile iletken yapısıyla tanımlanan sınır koşullarıyla oluşturulurlar. Karakteristik çözümler; bilgisayarlar üzerinde sayısal yöntemler kullanılarak elde edilen Helmholtz dalga eşitliklerinin çözümleridir. Özellikle düzlemsel iletkenler için fark metodu, sonlu eleman yöntemi, moment yöntemiyle integral eşitliklerinin çözümlenmeleri, varyasyonel yöntemler, mod-uyumlandırma yöntemleri ve hat yöntemleri kullanılır. Karakteristik empedans ve faz hızının $v_p(f)$ basit yaklaşık değerleri dağılım modeli olarak da bilinen basit bir dalga iletken modeli kullanılarak elde edilebilir.

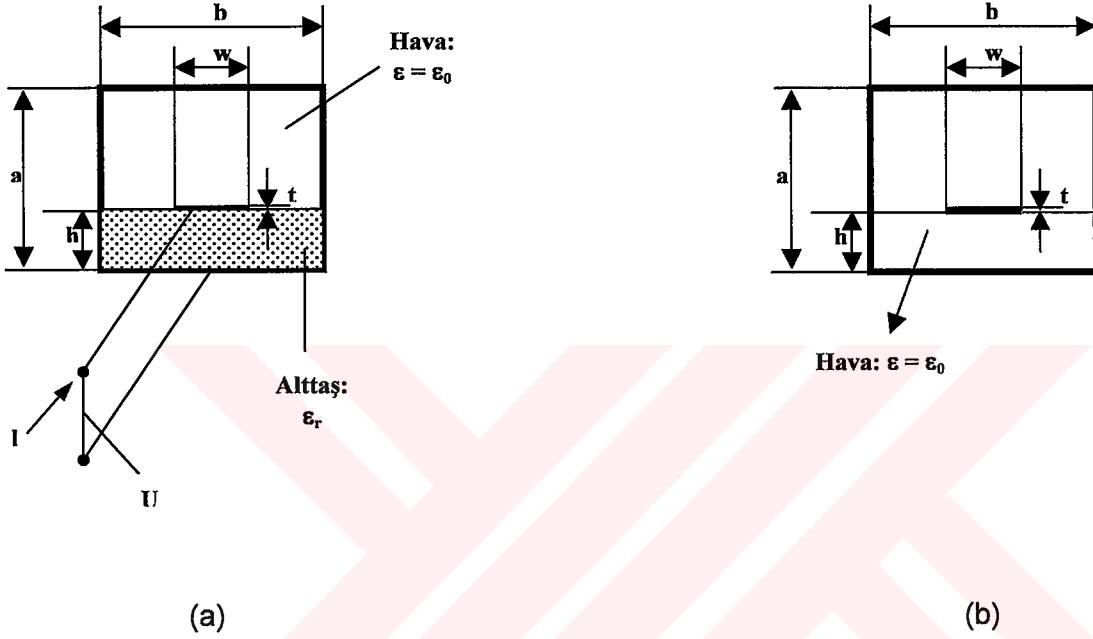
Düşük frekanslarda, yarı-TEM hatlarının yaklaşık analizi için durağan veya TEM analizi kullanılır. Bu yöntem ideal-TEM modunun (yarı değişken koşul $f=0$) varlığını dikkate alır ve boyuna bileşenler E_L , H_L ile enine akım g_T 'yi ihmal eder. Bu da frekanstan bağımsız tek değerli karakteristik empedans $Z_{0,stat}$ ve faz hızı $v_{p,stat}$ anlamına gelmektedir. Durağan analizde (Helmholtz eşitliği yerine Laplace eşitliği çözülür.), esas iletkenin birim uzunluktaki sığası C' ve iletkenin alttaş dielektrik materyal olmadan sığası C_0' tanımlanır. Bu ifadeler elde edildikten sonra $Z_{0,stat}$ ve $v_{p,stat}$ hesaplanır. Ortamın homojen olmayan doğası nedeniyle C' hesaplamaları genellikle iletkenin kesit alanının tanımlanmasına dayalı olan alan teorisi metotlarının bilgisayar üzerinde sayısal olarak yapılır. Bu sayısal yöntemler yukarıda değinilen sonlu farklar yöntemi, varyasyonel yöntem, integral eşitlikler yöntemi, analog ağlar yöntemi ve hatlar yöntemidir.

C' , $Z_{0,stat}$ ve $v_{p,stat}$ için yaklaşık analitik eşitlikler, konformal dönüşüm ve kısmi sığaları üst üste bindirme yöntemi gibi çeşitli yaklaşık durağan analizler ile elde edilebilir. Durağan yaklaşımla yapılan analizde hata oranı dinamik analizle karşılaştırıldığında frekans arttıkça artmaktadır. Bu yüzden, durağan analiz, iletkenin kesit boyutu x_i' nin $x_i \ll \lambda_0 = c_0/f$ olacak şekilde bir azami frekans değerine kadar, yani $f < f_0$ için yapılmalıdır.

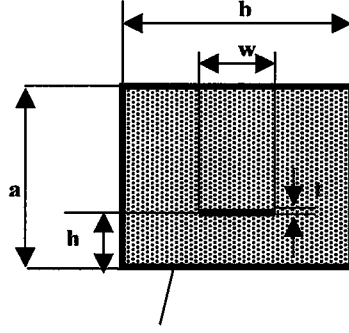
3.3 Homojen Olmayan Dielektrik Dolgulu Şerit Hatlar İçin Yarı değişken-TEM Yaklaşım

3.3.1 Karakteristik Empedans ve Faz Hızı

Bu kısımda homojen olmayan dielektriğe sahip yarı-TEM tipindeki şerit hatlarda (Şekil 3.1 (a-c), Şekil 3.2 (a-e)) yarı değişken yaklaşımın nasıl kullanıldığına ilişkin temel bilgiler özetlenecektir.



Şekil 3.4 Etkin elektriksel geçirgenliğin (ϵ_{eff}) tanımı için (a) Enine homojen olmayan devre, (b) Hava ile doldurulmuş aynı devre, (c) Bağlı elektriksel geçirgenlik sabiti ϵ_{eff} olan dielektrik malzeme ile doldurulmuş aynı devre.



Homojen Dolu:
 ϵ_{eff}

(c)

Şekil 3.4 (Devam Ediyor) Etkin elektriksel geçirgenliğin (ϵ_{eff}) tanımı için (a) Enine homojen olmayan devre, (b) Hava ile doldurulmuş aynı devre, (c) Bağlı elektriksel geçirgenlik sabiti ϵ_{eff} olan dielektrik malzeme ile doldurulmuş aynı devre.

Örnek olarak Şekil 3.4(a) alanın, hattın hacmi içerisinde kapladığı yerleri dolduran bir alttaş tabaka ($\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$) ve havadan ($\epsilon = \epsilon_0$) oluşan şerit hattı göstermektedir. Bu devre L' , C' , R' , G' ve az kayıplı durumda frekanstan bağımsız Z_0 yine frekanstan bağımsız v_p ve f ile orantılı olan kayıp faktörü α ile tanımlanır. Burada sadece Z_0 ve v_p ele alınacaktır. Burada C' = birim uzunluktaki sığa; L' = birim uzunluktaki indüktans; R' birim uzunluktaki boyuna direnç ve G' = birim uzunluktaki enine iletkenlik. Ayrıca karakteristik empedans ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{(R' + j\omega L')}{(G' + j\omega C')}} \quad (3.1)$$

Kayıpsız durum için $R'=G'=0$ dır. Eş.(3.1)' de aşağıdaki gibi olur.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (3.2)$$

Homojen olmayan dielektrik materyale sahip devrelerin homojen dielektriğe sahip olanlardan farkı sadece faz hızı v_p ' nin alttaşın dielektrik sabiti ϵ_r ' a bağlı olması değil , aynı zamanda alttaşın alan içindeki bölgede dağılımı ve iletken elektrotların boyutlarına bağlı olarak değişmesidir. Her zaman $c_0 / \sqrt{\epsilon_r} < v_p < c_0$ biçimindedir.

Alttaşın hacmi genişledikçe, faz hızı $c_0 / \sqrt{\epsilon_r}$ değerine yaklaşır. Bu yüzden kayıpsız, enine homojen olmayan devrenin tam tanımını için ya C' , L' çiftini ya da esas devrenin C' ile aynı boyuttaki devrenin alttaş materyali olmadan hesaplanan C_0' , çiftine ihtiyaç vardır. Çünkü L' , ϵ_r ' dan bağımsızdır ve L' ile C_0' değerlerinden birisi diğerinden $c_0 = 1 / \sqrt{L'C_0'}$ veya

$$L' / \mu_0 = \epsilon_0 / C_0' \quad (3.3)$$

kullanılarak elde edilir. Bu devre C_0' ile C' in sayısal yöntemler veya konformal dönüşüm yöntemi ile hesaplanmasıyla incelenebilir. Eş. (3.2), $v_p = 1 / \sqrt{L'C'}$, $Z_0' = \sqrt{L'/C_0'}$ ve $v_{p0} = c_0 = 1 / \sqrt{L'C_0'}$ eşitlikleriyle aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$v_p = c_0 \sqrt{C_0' / C'} \quad (3.4)$$

ve

$$Z_0 = \eta_0 / \sqrt{(C' / \epsilon_0) \cdot (C_0' / \epsilon_0)} \quad (3.5)$$

Bu eşitliklerde $\eta_0 = 120\pi \Omega$ ve serbest uzayda karakteristik empedansı ifade eder, c_0 ise ışık hızıdır.

3.3.2 Etkin Elektriksel Geçirgenlik

Enine homojen olmayan TEM devreleri için genellikle dalganın faz hızı v_p yerine etkin (bağıl) elektriksel geçirgenlik ϵ_{eff} kullanılır.

$$\epsilon_{eff} = (c_0 / v_p)^2 = (\lambda_0 / \lambda)^2 \quad (3.6)$$

eşitliği elde edilir. Burada λ_0 serbest uzayda, λ etkin dielektriğin içindeki dalganın dalga boyunu göstermektedir. Bu eşitlikte ϵ_{eff} esas homojen yapıda (Şekil 3.4(a)) olduğu gibi aynı faz hızını elde etmek için devreyi doldurması gereken (Şekil 3.4(c)) homojen materyalin bağıl geçirgenliğini ifade eder. Eş. (3.6) $v_p = c_0 / \sqrt{\epsilon_{eff}}$ ve $\lambda = \lambda_0 / \sqrt{\epsilon_{eff}}$, ϵ_{eff} ile doldurulmuş homojen bir devreyi tanımlamaktadır. Çünkü $Z_0 = Z'_0 / \sqrt{\epsilon_{eff}}$ ve $C' = C'_0 \epsilon_{eff}$ ifadeleri yazıldıktan sonra ϵ_{eff} aşağıdaki eşitliklerdeki gibi tanımlanabilir.

$$\epsilon_{eff} = (Z'_0 / Z_0)^2 \quad (3.7)$$

$$\epsilon_{eff} = C' / C'_0 \quad (3.8)$$

Eş. (3.7) karakteristik empedans ve Eş. (3.8) sığa tanımıdır. C'_0 , C_0 , λ_0 ve Z'_0 aynı boyutlardaki (Şekil 3.4(b)) havayla doldurulmuş devreyi tanımlamaktadır.

Eş. (3.6)'daki faz hızı tanımı enine homojen olmayan devrelerin (aynı zamanda yarı-TEM olmayan hatların da) hem yarı değişken hem de dinamik analizlerinde

uygulanmaktadır. Eş. (3.7) ve Eş. (3.8)' deki diğer tanımlar sadece yarı-TEM hatlar için kullanılır. Çünkü, bu durumda sadece sığa ve karakteristik empedans tanımlıdır. Yarı değişken analizde her üç eşitlikte ϵ_{eff} için aynı değeri verirler ki bu her zaman aşağıdaki gibidir:

$$1 < \epsilon_{eff} < \epsilon_r \quad (3.9)$$

Z_0 ve ϵ_{eff} veya Z'_0 ve ϵ_{eff} ile $Z'_0 = \sqrt{L'/C'_0}$, $C_0 = 1/\sqrt{L'_0 C'_0}$, Eş. (3.6) ve Eşitlik (3.7)

$$L'/M_0 = (Z_0/\eta_0)(v_p/c_0) = Z_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}/\eta_0 = Z'_0/\eta_0 \quad (3.10)$$

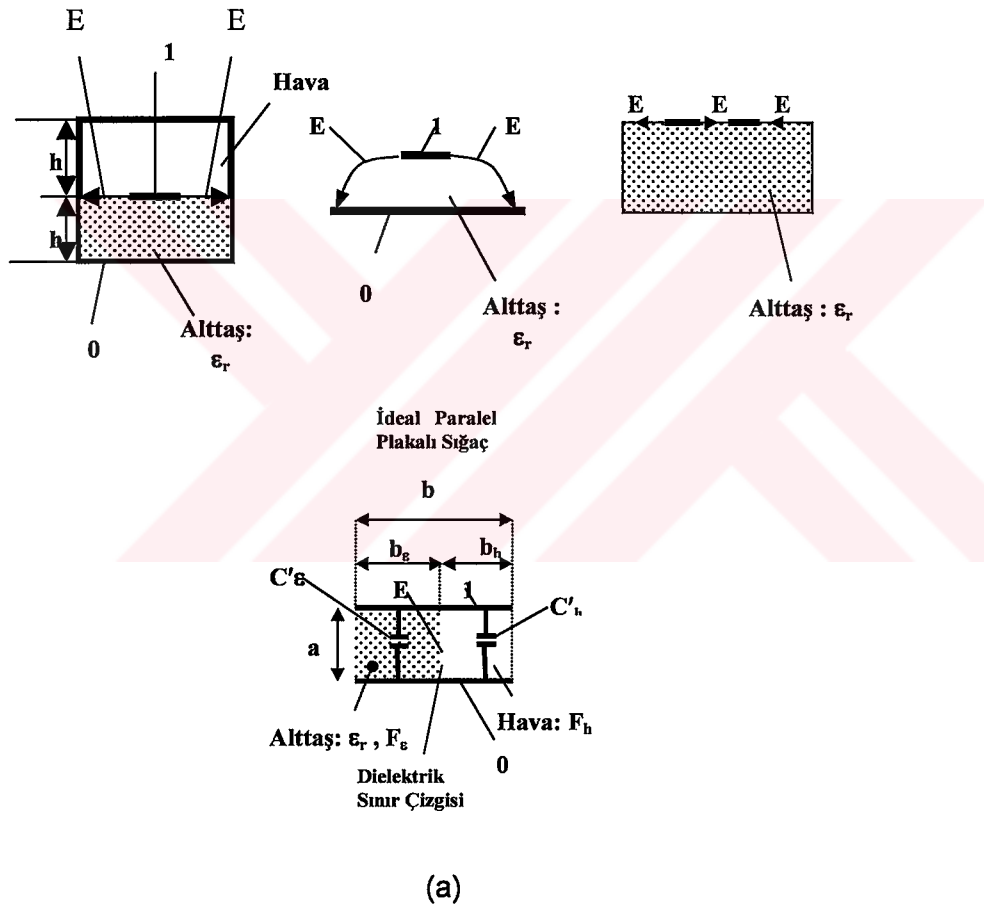
$$C'/\epsilon_0 = 1/\{(Z_0/\eta_0)(v_p/c_0)\} = \eta_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}/Z_0 = \eta_0 \epsilon_{eff}/Z'_0 \quad (3.11)$$

şeklinde devrenin parametrelerini verir.

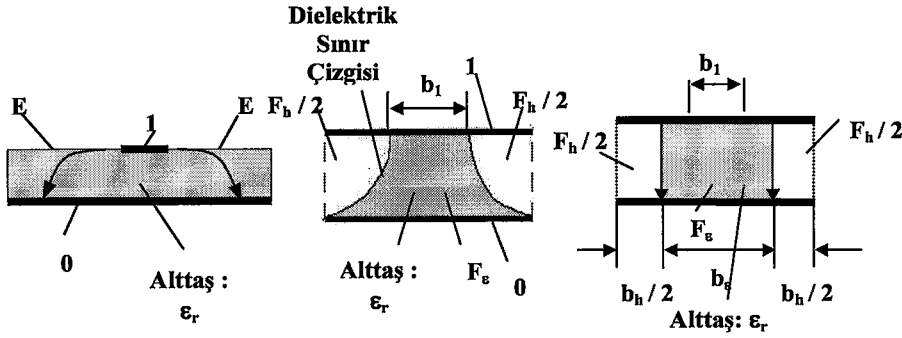
3.3.3 Dielektrik Dolum Çarpanı

Enine homojen olmayan devrelerin yarı değişken analizinde, alanın içinde kalan kesitteki dielektrik miktarını tanımlamak için etkin elektriksel geçirgenlik sabiti ϵ_{eff} 'nin yerine dielektrik dolum çarpanı diğer bir seçenektir.

Dielektrik dolum çarpanını (q_e) havayla alttaş destek arasında kalan sınırın oluşan elektrik alana paralel özel enine homojen olmayan iletim hatlarında basit bir şekilde tanımlamak mümkündür. Böyle bir hat kesiti mikroşeritin varsayımsal şekli olan bükülmüş alttaş yüzeyli ve eş-düzlemli sonsuz kalınlıktaki alttaş üzerinde çift şeritli hat Şekil 3.5 (a)'da görülmektedir.



Şekil 3.5 Enine homojen olmayan devrelerin dielektrik dolum çarpanı q_e 'nin tanımı için (a) Elektrik alan çizgisi (E) boyunca dielektrik sınır çizgileri, (b) Dielektrik sınırın elektrik alan çizgisi (E) boyunca olmama durumu.



(b)

Şekil 3.5 (Devam Ediyor) Enine homojen olmayan devrelerin dielektrik dolmuş çarpanı q_e 'nin tanımı için (a) Elektrik alan çizgisi (E) boyunca dielektrik sınır çizgileri, (b) Dielektrik sınırın elektrik alan çizgisi (E) boyunca *olmama* durumu.

Eğer bu konformal olarak varsayımsal paralel plakalı sığaca dönüştürülürse, dielektrik ve hava arasındaki sınır sığaç plakalarına dik bir çizgi halini alır. Ayrıca, konformal imgedeki sınır bir elektrik alan çizgisi boyunca uzanır. Bu iki bölümden oluşan paralel plakalı sığacı verir: birisi $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ dielektrik sabitli ve diğeri havadır, yani $\epsilon = \epsilon_0$ 'dır.

Dielektrik dolmuş çarpanı q_e konformal imgenin ki bu paralel plakalı sığaçtır, yüzey alanlarının oranından elde edilir.

$$q_e = F_e / F = F_e / (F_e + F_h) = b_e / b = b_e / (b_e + b_h) \quad (3.12)$$

Bu eşitlikte Şekil 3.5(a)'da görüldüğü üzere toplam alan $F = ba$ ve alttaş dielektriğin kapladığı yüzey $F_e = b_e a$ 'dır. $F_h = b_h a$ hava tarafından kaplanan yüzey ifadesidir. Esas iletkenin etkin elektriksel geçirgenlik sabiti ϵ_{eff} paralel plakalı

sığacın konformal imgesinden çıkarılabilir. İfadeler yazılacak olursa $\epsilon_{eff} = C'/C'_0$ ile $C' = C'_e + C'_h$ ve $C'_e = \epsilon_0 \epsilon_r b_e / a$, $C'_h = \epsilon_0 b_h / a$ ve $C'_0 = \epsilon_0 b / a$ dır. Daha sonra

$$\epsilon_{eff} = \frac{C'}{C'_0} = \frac{C'_e + C'_h}{C'_0} = \frac{(\epsilon_0 \epsilon_r b_e / a) + \epsilon_0 b_h / a}{(\epsilon_0 b / a)} = 1 + \frac{\epsilon_r b_e}{b} - \frac{b_e}{b} \quad (3.13)$$

Eğer $q_\epsilon = b_e / b$ ise, dielektrik sınırın bir elektrik alan çizgisi boyunca uzandığı devre için q_ϵ ve ϵ_{eff} arasındaki ilişki aşağıdaki gibi yazılabilir.

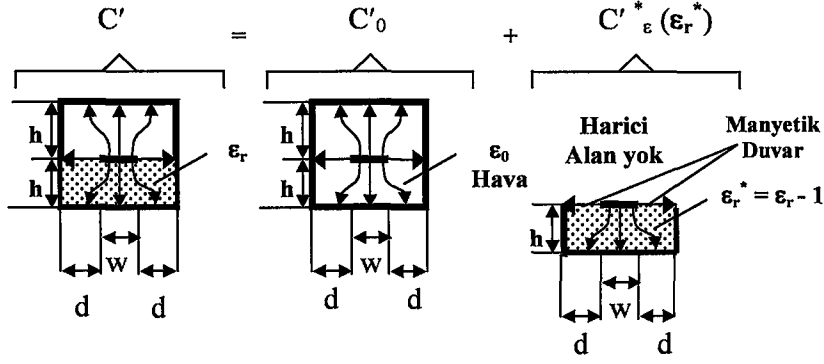
$$\epsilon_{eff} = 1 + q_\epsilon (\epsilon_r - 1) \quad \text{ve} \quad q_\epsilon = (\epsilon_{eff} - 1) / (\epsilon_r - 1) \quad (3.14)$$

Bu iki ifadeden birisi yarı değişken-TEM analizde mutlaka hesaplanması gereken parametrelerden bir tanesidir.

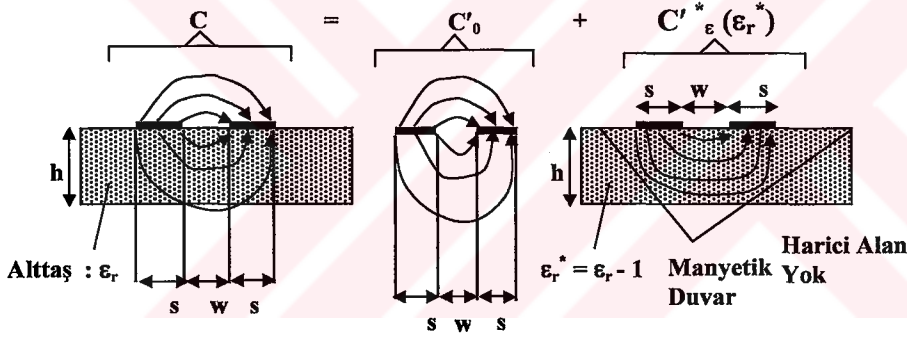
3.4 Kısmi Sığaların Üstdüşüm Yöntemi

Bu yöntem dielektrik ve havadan oluşan yarı-TEM hatların C' , Z_0 ve ϵ_{eff} için yaklaşık çözümlenmeli ifadelerine ulaşılmasını sağlar. Birinci durumda Şekil 3.5(a) ve Şekil 3.6(a)' da görüldüğü gibi kısmi sığa üstdüşüm yöntemi tam sonuç verir. Dielektrik sınır boyunca bir manyetik duvar çizilebilir ve C' sığalı tüm yapı iki parçaya bölünebilir: bir tanesi homojen olarak havayla doldurulmuş $C' = C'_h + C'_e$ dır. Toplam sığa C' ayrıca tüm yapının alttaşsız sığası C'_0 ve geçirgenlik sabiti ϵ_r 'in $\epsilon_r^* = \epsilon_r - 1$ e azaltıldığı alttaşla homojen olarak doldurulmuş kısmın sığası C'_e^* ile elde edilebilir. Bu indirgeme alttaş materyalle doldurulan esas kısmın sığası C'_0 ' in fazla değerini de dikkate almaktadır. Bu nedenle aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$\begin{aligned}
C' &= C'_h + C'_\epsilon = C'_h + C'_{\epsilon_0} \epsilon_r \\
&= (C'_h + C'_{\epsilon_0}) + C'_{\epsilon_0} \epsilon_r - C'_{\epsilon_0} \\
&= C'_0 + C'_{\epsilon_0} (\epsilon_r - 1)
\end{aligned}
\tag{3.15}$$



(a)



(b)

Şekil 3.6 Kısmi sığağların üstdüşüm yöntemi. (a) Simetrik ekranlanmış mikroşerit hattın tam kullanımı, (b) Eş-düzlemli şerit hatta yaklaşık kullanımı.

Kısmi sığaların üstdüşümleri ile şu ifadeye ulaşılır.

$$C' = C'_0 + C'_{\epsilon} \epsilon_r^* \quad (3.16)$$

burada $\epsilon_r^* = \epsilon_r - 1$ ' dir.

Yapının alttaş materyalle doldurulmuş kısmı dielektrik sınır boyunca manyetik duvarların çizilmesi ve Şekil 3.6(a)' da gösterildiği gibi kalan kısmın yapıdan çıkartılmasıyla elde edilir. C'_{ϵ} ' nin hesaplanması manyetik duvarların dışında kalan hacimde alan (elektrik) olmaması koşulu altında gerçekleştirilir. C'_0 ve C'_{ϵ} ' nin her ikisi de tam olarak homojen doldurulmuş bir devre KD ile hesaplanır.

Kısmi sığaların üstdüşüm yöntemi ayrıca dielektrik sınırın yaklaşık olarak sadece bir alan çizgisi boyunca uzandığı yarı-TEM şerit hatlar içinde iyi bir yaklaşım olarak kullanılabilir. Şekil 3.6(b)' de görülen sonlu alttaş kalınlığına sahip eş düzlemlerli şerit hat buna bir örnektir. Burada iletkenlerle beraber alttaş kısmında paralellik koşulu yerine getirilir. Fakat iletken olmayan kısımlarda bu koşul sağlanmaz. Eşdeğer düzenlemeler, C'_0 için serbest uzayda şerit hat çifti, $\epsilon_r^* = \epsilon_r - 1$ ' li bir alttaş ve harici alanın almadığı manyetik duvarlarla sınırlandırılmış bir şerit hat çiftinden oluşmaktadır.

3.5 Şerit İletim Hatları ve Mikrodalga Tümüleşik Devreler

Şerit iletim hatları (özellikle düzlemsel olanları) mikrodalga tümleşik devrelerin (MTD' lerin) özünü oluşturmaktadır. Bu yapılar basitçe sinyal taşımak için kullanıldığı gibi *balun* (BALanced-UNbalanced), karma bağlaştırıcılar gibi çeşitli devre fonksiyonlarını oluşturmak için de kullanılmaktadır. Çizelge 3.1 iletim hatlarının özelliklerini özetlemektedir. Her bir iletim hattının en iyi başarımı göstermesi istenmektedir. Beklenen devre fonksiyonlarını yerine getirmesi sırasında ya tek başına bir iletim hattı olarak ya da bunların birleştirildiği grup devrelerinde, devrelerin tiplerine bağlı olarak kendilerine has üstünlükleri ve zayıflıkları vardır.

Çizelge 3.1 Şerit iletim hatlarının karşılaştırmalı özellikleri [29].

İletim Hattı	Çalışma Frekansı	Karakteristik Empedans Aralığı (Ω)	Boyut	Kayıp	Güç Kullanma Yeteneği	Katı-Hal Aygıtı Takılması	Düşük Maliyetli Üretim
Mikroşerit Hat	≤ 110 Ghz	10-100	Küçük	Yüksek	Düşük	Oldukça İyi	İyi
Şerit Hat	≤ 60 Ghz	20-150	Orta	Düşük	Düşük	Orta	İyi
Askılı Şerit Hat	≤ 220 Ghz	20-150	Orta	Düşük	Düşük	Orta	Oldukça İyi
Fin Hattı	≤ 220 Ghz	20-400	Orta	Orta	Düşük	Kolay	Oldukça İyi
Yuvalı Hat	≤ 110 Ghz	60-200	Küçük	Yüksek	Düşük	Kolay	İyi
Ters-Çevrilmiş Mikroşerit Hat	≤ 220 Ghz	25-130	Küçük	Orta	Düşük	Orta	Oldukça İyi
Eş-Düzlemli Dalgakılavuzu	≤ 110 Ghz	40-150	Küçük	Yüksek	Düşük	Çok kolay	İyi
Eş-Düzlemli Şerit Hat	≤ 110 Ghz	30-250	Küçük	Yüksek	Düşük	Kolay	İyi

Birçok diğer düzlemsel iletim hattından farklı olarak en yaygın kullanılan iletim hatları mikroşerit hat ve eş-düzlemlı dalga kılavuzudur. Çok katmanlı şerit iletim hatları esnekliklerini ve yüksek yoğunluklu karmaşık devrelerin yapılmasına olanak vermelerinden dolayı özellikle MTD' ler için çok çekicidirler. Çok yoğun MTD' lerin yapımı için iletken destekli yarı iletken alttaş materyallerin üzerine konan çok ince dielektrik katmanların yapımına olanak tanırırlar. Üstelik, çok katmanlı iletim hatlarında dielektrik katmanlarının uygun seçilmesiyle çapraz karışma ve sinyal bozulmasında kayda değer bir azalma görülür.

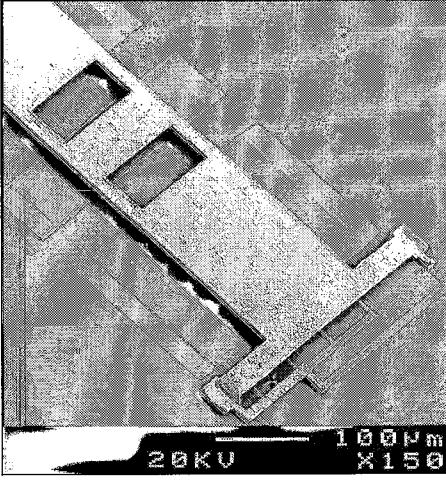
MTD' ler iki sınıfa ayrılmaktadır:

- Karma Devreler
- Tektaş Devreler

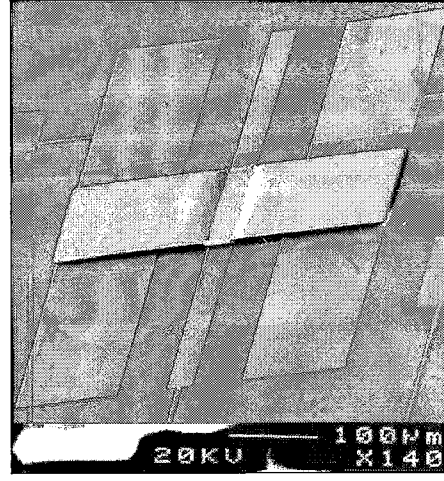
Karma sınıfındaki devreler, devre kısımlarının alttaş üzerine bazı yoğunlaştırma yöntemlerinin uygulandığı düzlemsel devreleri temsil eder. Transistör gibi katı hal araçları ile sığaç gibi diğer pasif bileşenler haricindeki sıradan bir karma MTD' nin tüm iletim hatları dielektrik yüzey üzerine çökeltilmiştir. Bu katı-hal araçları ve pasif elemanlar farklı bileşenlerdir ve yapıştırarak, lehimleyerek veya iletken epoksi kullanılarak iletim hatlarına bağlantıları yapılır. Karma devreleri genellikle, sadece devre elemanlarını desteklemek ve sinyalleri iletmek için kullanılan düşük kayıplı yalıtkanlardır. Karma MTD' lerin avantajları aşağıdaki gibidir:

- Küçük yapıda olmaları,
- Hafif olmaları,
- Kolay üretilmeleri,
- Düşük maliyetleri,
- Yüksek hacimde üretilebilmeleridir.

Uygulamada karma MTD' ler olarak belirtilir. Şekil 3.7'de karma MTD örnekleri görölmektedir.



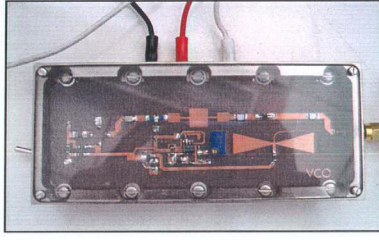
(a)



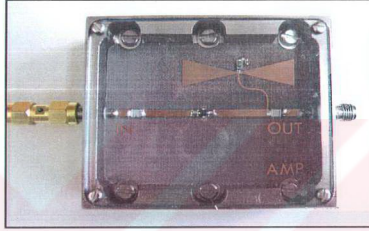
(b)

Şekil 3.7 Karma MTD örnekleri (a) RF MEMS (*Micro ElectroMechanical Systems*) paralel, eş-düzlemlı dalga kılavuzu toprak hattı üzerinde tetikleyici sığal yastıklı anahtar, (b) RF topraklar üzerinde tetikleme yastıklı "T-Wing" olarak adlandırılan paralel sığal anahtar ve eş-düzlemlı dalga-kılavuzu aktif hattı üzerindeki çapa noktası. (Fotoğraflar: <http://www.eee.metu.edu.tr/~emt/rfmems.html>)

Tektaş MTD' ler, MTD' ler içinde katı hal araçları ve pasif devre bileşenleri dahil olmak üzere tüm devre elemanları bir hacim içerisinde veya bazı çökeltme teknikleri ile yarı yalıtkan yüzey üzerinde bir araya getirilen özel bir sınıftır. Karma MTD' lerin tersine tektaş MTD' ler de alttaşlar sadece sinyalin ilerlemesini sağlayan bir ortam ve pasif bileşenler için destekleyici yapı değillerdir, aynı zamanda mikrodalga katı-hal araçlarının yapımı için iyi özellikli yarı iletken malzemeler olarak kullanılırlar. Karma MTD' lerle karşılaştırıldıklarında, küme halinde işlendiklerinden düşük maliyetli olmaları, geliştirilen uygulamaları, daha küçük yapıda ve ağırlıkta olmaları, devre tasarımında esnekliklere daha uygun olmaları, tek yonga üzerinde çok fonksiyonlu başaşım göstermeleri gibi üstünlükleri vardır.



(a)



(b)

Şekil 3.8 Tektaş MTD örnekleri. (a) Tektaş MTD voltaj kontrollü salıngaç, (b) Tektaş MTD yükselteç. (Fotoğraflar: **Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü Mikrodalga ve Anten Laboratuvarı**)

Karma MTD' lerle karşılaştırdıklarında, küme halinde işlendiklerinden düşük maliyetli olmaları, geliştirilen uygulamaları, daha küçük yapıda ve ağırlıkta olmaları, devre tasarımında esnekliklere daha uygun olmaları, tek yonga üzerinde çok fonksiyonlu başarımlar göstermeleri gibi üstünlükleri vardır. Tektaş MTD'ler mikrodalga teknolojisi için çok önemlidir. Şekil 3.8'de sırasıyla, tektaş MTD voltaj kontrollü salıngaç ve yine tektaş MTD yükselteç görülmektedir.

4. ELİPTİK, SİLİNDİRİK VE ASİMETRİK EŞ-DÜZLEMLİ ŞERİT İLETİM

HATLARININ YARI DEĞİŞKEN-TEM ANALİZLERİ

Bu kısımda, özellikle son yıllarda üstünde çok sık durulmaya başlanan eliptik, silindirik ve sonlu dielektrik boyutları (hem yükseklik hem de genişlik olarak) olan düzlemsel asimetrik şerit iletim hatlarının yarı değişken-TEM analizleri yapılmıştır. Zeng ve Wang [1] ve Akan ve Yazgan [26] tarafından belirtildiği gibi bu iletim hatları filtre, anten, mikser ve opto-elektronik araçların tasarımında kullanılmaktadır. Ayrıca tektaş MTD' deki gelişmeler çok çeşitli eş düzlemlerli iletim hattının pratikte uygulanmasını mümkün kılmıştır. Bunlardan biri olan eş düzlemlerli şerit iletim hatlarının uygulamadaki üstünlükleri şöyle sıralanabilir: doğrusal dağılımlı mükemmel dalga yayılımı, alt ve üst dielektrik materyallerin delinmesine gerek olmaması (metal şeritler eş düzlemlerli olduğu için), süreksizlik parasitik etkilerinin küçük olması vb. gibi.

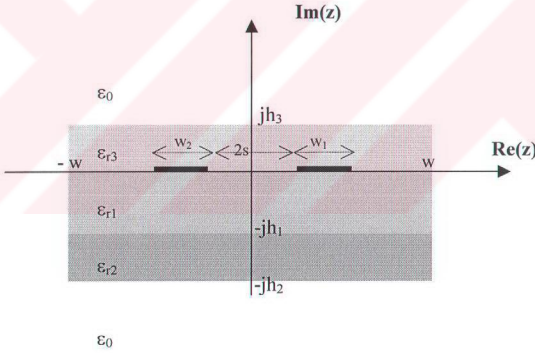
Knorr ve Kuchler [43] tarafından yapılan çalışmada eş düzlemlerli şerit iletim hatlarının dalga dağılımı karakteristiğine dayanarak hemen hemen bütün frekans aralığı için bunların yarı değişken-TEM parametrelerinin (karakteristik empedans, etkin dielektrik sabiti gibi) frekansa bağlı değişiminin çok az olduğunu göstermişlerdir. Bu yüzden etkin dielektrik sabiti ve karakteristik empedans, KD yöntemi kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bilindiği gibi KD yöntemi kullanılarak elde edilen kapalı ifadeler Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT) uygulamaları için uygundur. Sonlu Farklar Yöntemi, İntegral Eşitlik Yöntemi ve tam dalga analizi gibi yöntemler KD yöntemine göre çok daha fazla hafıza (bilgisayar analizi için) ve hesaplama süresine ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle bu kısımda çok katmanlı eliptik, silindirik ve asimetrik eş-düzlemlerli şerit iletim hatlarının yarı değişken-TEM parametrelerinin KDT kullanılarak elde edilmesi gösterilecektir.

4.1 Sonlu Boyutlara Sahip Çok Katmanlı Dielektrikten Oluşan Asimetrik Eş-Düzlemli Şerit İletim Hattının Analizi

Şekil 4.1' de çok katmanlı asimetrik eş-düzlemli şerit iletim hattının (ÇKAESİH) kesit alanı görülmektedir. Bu şekilden anlaşıldığı üzere asimetrik şeritler dielektrik sabitleri ϵ_{r1} ve ϵ_{r2} olan alt alta iki dielektrik katmanının üzerine yerleştirilmişlerdir. Ayrıca bu şeritlerin üzerinde dielektrik sabiti ϵ_{r3} olan bir üstteş dielektrik katman bulunmaktadır. Bu yapının toplam genişliği $2w$, şeritlerin her birinin genişliği w_1 ve w_2 ' dir. Dielektrik katmanların yükseklikleri ϵ_{r1} , ϵ_{r2} ve ϵ_{r3} için sırasıyla h_1 , h_2-h_1 ve h_3 ' tür.

ÇKAESİH' nin birim uzunluktaki toplam hat sığası C' Chen ve Chou tarafından [44] belirtildiği gibi C'_0 , C_1 , C_2 ve C_3 ' nin toplamıyla aşağıdaki şekliyle elde edilebilir:

$$C' = C'_0 + C_1 + C_2 + C_3 . \quad (4.1)$$



Şekil 4.1 ÇKAESİH' nin z-düzlemindeki kesit alanının görünüşü.

Burada C'_0 bütün dielektrik katmanları yapıdan çıkardıktan sonraki hava sığasını; C_1 , kalınlığı h_1 ve eşdeğer dielektrik sabiti ($\epsilon'_{r1} = \epsilon_{r1} - \epsilon_{r2}$) olan dielektrik katmanın sığasını; C_2 , kalınlığı h_2 ve eşdeğer dielektrik sabiti ($\epsilon'_{r2} = \epsilon_{r2} - 1$) olan katmanın sığasını ve son olarak C_3 , kalınlığı h_3 ve eşdeğer dielektrik sabiti ($\epsilon'_{r3} = \epsilon_{r3} - 1$) olan katmanın sığasını ifade etmektedir. Bu tanımlardan sonra kısmi sığalar hesaplanabilir. Hava sığası C'_0 ' nın hesaplanması için [26]' deki benzer eşitlik aşağıdaki gibi yazılır:

$$t_1^{(0)} = s, t_2^{(0)} = s + w_1, t_3^{(0)} = -(s + w_2). \quad (4.2)$$

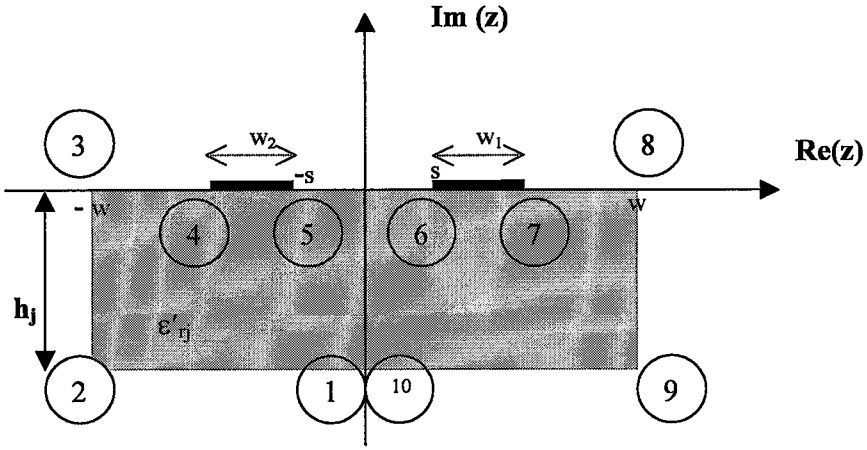
C_1 , C_2 ve C_3 ' ün hesaplanmasında ilk olarak Şekil 4.2' nin farklı yüksekliklere sahip katmanlar ile ayrı ayrı düşünülmesi yararlı olacaktır. Eş. (4.3)' te yazılan Jacobian Eliptik fonksiyonu Du ve diğerleri [23] ile Akan ve Yazgan [26] çalışmalarındaki gibi kullanılarak sınırlı dielektrik katmanlar sonsuz uzunluk ve yükseklikteki yapılara dönüştürülür,

$$t_{1,2,3}^{(j)} = sn \left(\left(K_{(m_j)} / w \right) z, m_j \right) \quad (4.3)$$

Burada $K(m_j)$ birinci dereceden tam eliptik integraldir ve h_1 , h_2 , h_3 için sırasıyla $K(m_j) / K(m'_j) = w/h_j$ ve $j = 1, 2, 3$ ' tür, m_j de eliptik modülü ifade etmektedir (bkz. *Ek Açıklamalar-Eliptik Fonksiyonlar*). Burada, m_j ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir

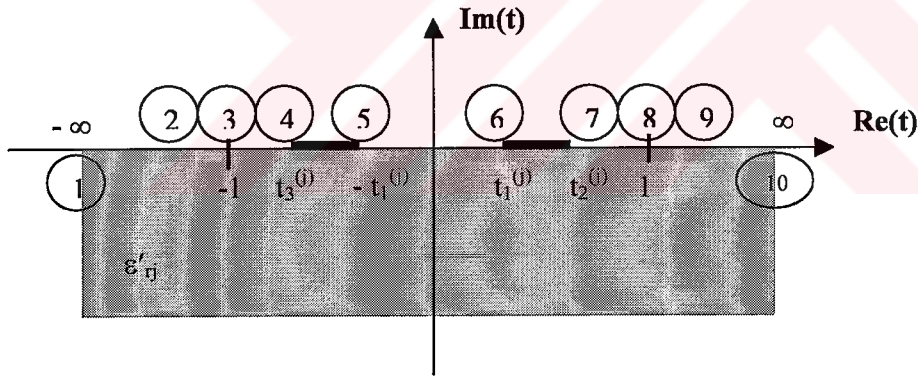
$$m_j = \left[\frac{\exp(\pi w / h_j) - 2}{\exp(\pi w / h_j) + 2} \right]^2, \quad 1 \leq w / h_j < \infty \text{ için} \quad (4.4)$$

$$m_j = \sqrt{1 - \left[\frac{\exp(\pi h_j / w) - 2}{\exp(\pi h_j / w) + 2} \right]^4}, \quad 0 < w / h_j < 1 \text{ için}$$



Şekil 4.2 Farklı yüksekliklere sahip katmanların canlandırılması için yapının z-düzlemindeki genel kesit gösterimi.

Dielektrik-hava sınırları manyetik duvar varsayılarak Şekil 4.2, Şekil 4.3' e dönüştürülür.



Şekil 4.3 Jacobi Eliptik fonksiyon kullanılarak yapılan dönüşümden sonra elde edilen yapının t-düzlemindeki kesiti.

Schwarz-Christoffel dönüşümü kullanılarak kısmi sığa ifadeleri aşağıdaki gibi elde edilir. Eşdeğer dielektrik sabitin $\epsilon_{r1} - \epsilon_{r2}'$ e eşit olduğu durum için ki burada katmanın yüksekliği h_1' e eşittir, C_1 şu şekilde yazılabilir,

$$C_1 = \epsilon_0 (\epsilon_{r1} - \epsilon_{r2}') \frac{K(k_1')}{K(k_1)} \quad (4.5)$$

Dielektrik katman yüksekliğinin h_2 ve eşdeğer dielektrik sabitin $\epsilon_{r2} - 1$ olduğu durum için hesaplanması gereken sığa C_2 aşağıdaki gibi yazılır,

$$C_2 = \epsilon_0 (\epsilon_{r2} - 1) \frac{K(k_2')}{K(k_2)} \quad (4.6)$$

ve son olarak dielektrik katman yüksekliğinin h_3 , eşdeğer dielektrik sabitinin $\epsilon_{r3} - 1$ olduğu durum için hesaplanması gereken sığa C_3 ifadesi aşağıdaki gibi yazılır:

$$C_3 = \epsilon_0 (\epsilon_{r3} - 1) \frac{K(k_3')}{K(k_3)} \quad (4.7)$$

Ayrıca hava sığası yazılacak olursa,

$$C_0' = 2\epsilon_0 \frac{K(k_0')}{K(k_0)} \quad (4.8)$$

burada

$$k_i = \sqrt{\frac{2t_1^{(i)}(t_2^{(i)} + t_3^{(i)})}{(t_1^{(i)} + t_2^{(i)})(t_1^{(i)} - t_3^{(i)})}} \quad i=0,1,2,3. \quad (4.9)$$

$K(k_i)$ birinci dereceden tam eliptik integrali ifade eder, k_i eliptik modülü ve $K(k'_i)$, $K(k_i)$ ' nin, $k'_i = \sqrt{1-k_i^2}$ olmak üzere, tamamlayıcıdır (bkz. *Ek Açıklamalar-Eliptik Fonksiyonlar*). Sonuç olarak birim uzunluktaki toplam hat sığası aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$C' = 2\varepsilon_0 \frac{K(k'_0)}{K(k_0)} + \varepsilon_0 (\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{r2}) \frac{K(k'_1)}{K(k_1)} + \varepsilon_0 (\varepsilon_{r2} - 1) \frac{K(k'_2)}{K(k_2)} + \varepsilon_0 (\varepsilon_{r3} - 1) \frac{K(k'_3)}{K(k_3)} \quad (4.10)$$

Ayrıca etkin dielektrik ifadesi de aşağıdaki gibidir,

$$\varepsilon_{eff} = 1 + q_1 \frac{(\varepsilon_{r1} - \varepsilon_{r2})}{2} + q_2 \frac{(\varepsilon_{r2} - 1)}{2} + q_3 \frac{(\varepsilon_{r3} - 1)}{2} \quad (4.11)$$

ve dielektrik dolun çarpanı

$$q_j = \frac{K(k'_j) K(k_0)}{K(k_j) K(k'_0)}, \quad j=1,2,3 \quad (4.12)$$

biçiminde yazılabilir. Karakteristik empedans ifadesi de

$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} \quad (4.13)$$

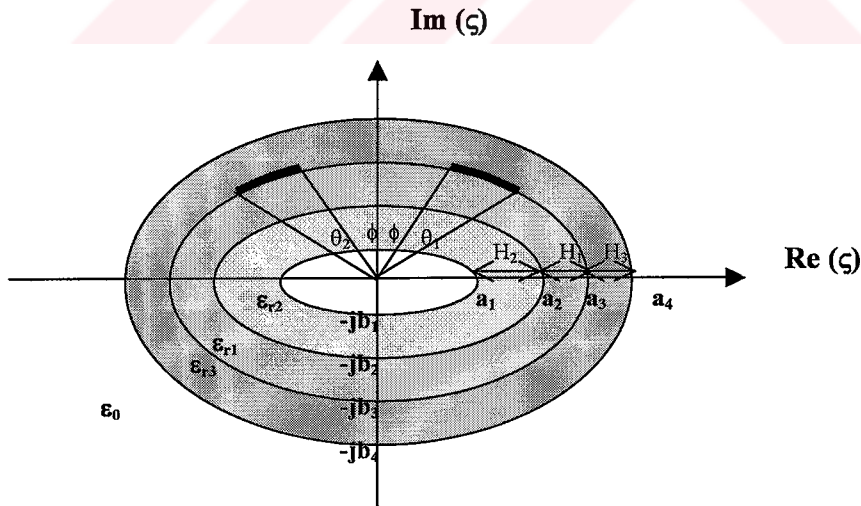
olarak ifade edilir.

4.2 Çok Katmanlı Eliptik ve Silindirik Asimetrik Eş-Düzlemli Şerit İletim Hatlarının Analizleri

Çok katmanlı eliptik asimetrik eş-düzlemli şerit iletim hattının (ÇKEAEŞİH) kesiti Şekil 4.4' te görülmektedir. Buradaki eş odaklı eliptik silindirlerin odak uzaklıkları

$$f = \sqrt{a_i^2 - b_i^2}, \quad i=1,2,3,4 . \quad (4.14)$$

şeklinindedir. Yukarıda $i = 1, 2, 3, 4$ olduğu durumda a_i ve b_i eliptik silindirlerin yarı büyük ve yarı küçük eksenlerini ifade etmektedir.



Şekil 4.4 ÇKEAEŞİH' nin z -düzlemindeki kesiti.

Eşitlik (4.15)' teki dönüşüm fonksiyonu kullanılarak ÇKEAŞİH, Şekil 4.5' de görülen çok katmanlı silindirik asimetrik eş-düzlemlı şerit iletim hattına (ÇKSAEŞİH) dönüştürülür.

$$v = \frac{1}{f} (s \mp \sqrt{s^2 - f^2}) . \quad (4.15)$$

Elde edilen son yapıdaki yarıçap ifadeleri

$$r_i = \sqrt{\frac{a_i + b_i}{a_i - b_i}}, \quad i=1,2,3,4 \quad (4.16)$$

şeklinde yazılabilir. Ayrıca, ÇKSAEŞİH aşağıdaki dönüşüm fonksiyonu ile

$$z = j \ln(v / r_3) + \pi / 2 \quad (4.17)$$

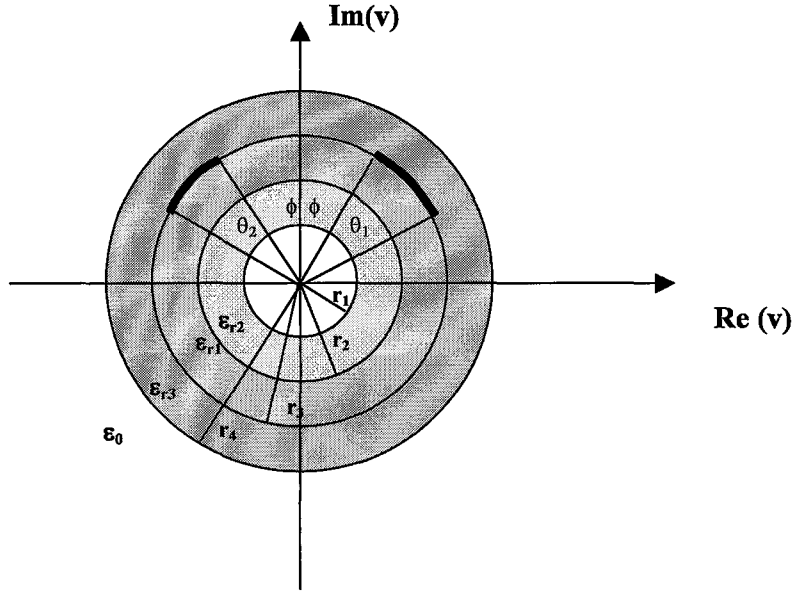
Şekil 4.6' da görülen ÇKAEŞİH' ye dönüştürülür. Şekil 4.5' teki ilgili parametreler

$$h_1 = \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right), \quad h_2 = \ln\left(\frac{r_3}{r_1}\right) \text{ ve } h_3 = \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right) \quad (4.18)$$

ve

$$w_1 = \theta_1, w_2 = \theta_2, s = \phi . \quad (4.19)$$

olarak ifade edilir.



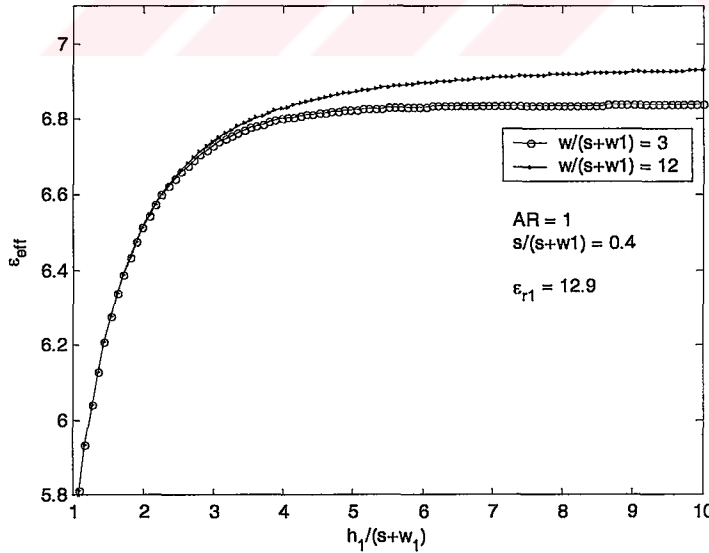
Şekil 4.5 Dönüşümden sonra ÇKSAEŞİH' nin v-düzlemindeki kesit görünüşü.

Bu ifadeleri yazdıktan sonra KD kullanılarak ÇKEAEŞİH' nin ve ÇKSAEŞİH' nin yarı değişken-TEM parametrelerini hesaplamak için izlenecek yol oldukça açıktır.

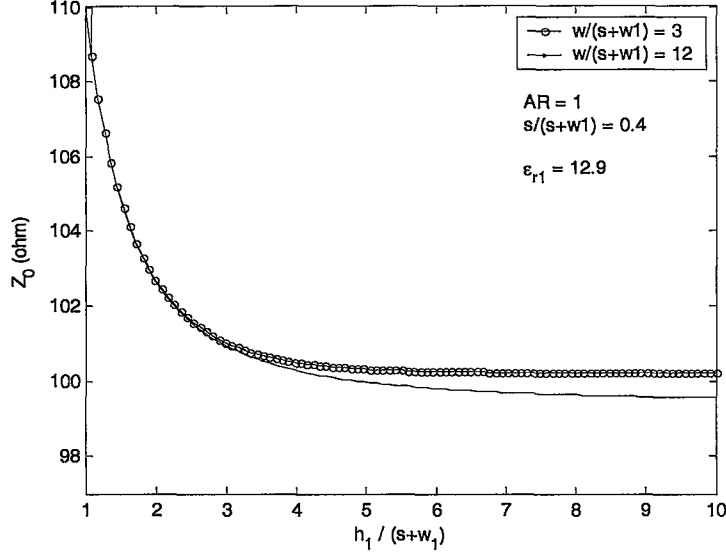
Bölüm 4.1 ve 4.2' de elde edilen ifadeler bir sonraki bölümde w , s , h' in değişiminin asimetrik eş-düzlemlili şerit iletim hattı (AEŞİH), ÇKEAEŞİH ve ÇKSAEŞİH' nin etkin elektriksel geçirgenlik sabiti ϵ_{eff}' e ve karakteristik empedansı Z_0' a etkisini incelemek için kullanılacaktır.

4.3 Sonuç

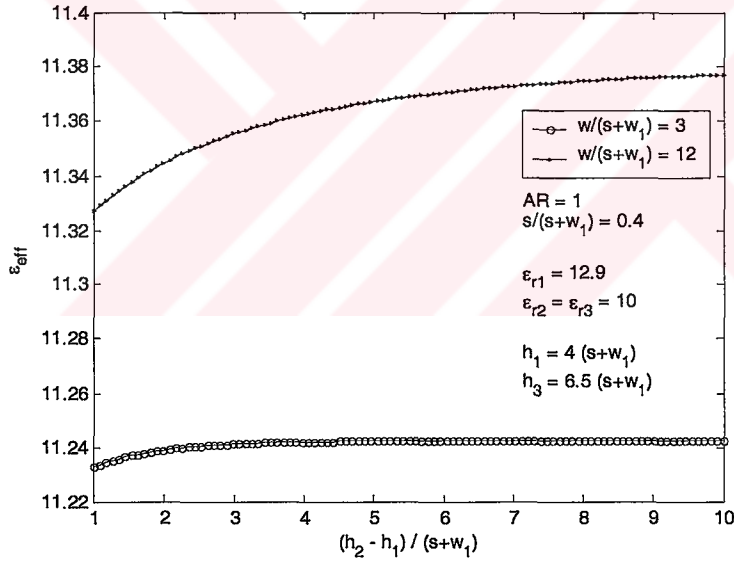
Bu kısımda kullanılan yöntemin doğruluğunu göstermek için ilk önce sonlu dielektrik katman boyutlarına sahip AEŞİH' nin boyutları $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$ değerleri için arttırılmıştır. Şekil 4.6' da olduğu gibi her iki boyut arttırıldıkça ϵ_{eff} ' nin Akan ve Yazgan tarafından belirtildiği gibi $(\epsilon_{r1} + 1) / 2$ değerine yaklaştığı görülmektedir [26]. Ayrıca Şekil 4.7' de ÇKAESİH' nin karakteristik empedansı Z_0 , $h_1 / (s+w_1)$ oranına göre elde edilmiştir ve burada $h_1 / (s+w_1)$ değeri arttıkça beklenildiği gibi Z_0 azalmaktadır. Yöntemin analitik doğrulamasını gösterdikten sonra, yapıya birinci dielektrik alttaşın altına dielektrik sabiti $\epsilon_{r2} = 10$ olan ve yapının üstüne yine dielektrik sabiti $\epsilon_{r3} = 10$ olan bir üstteş eklendiği zaman Şekil 4.8' de görüldüğü gibi etkin dielektrik sabiti artmaktadır. Fakat eklenen bu alttaş ve üstteş dielektrik materyaller Şekil 4.9' da görüldüğü gibi Z_0 değerini düşürmektedir. Bu arada Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 tekrar incelencek olursa h_2 değeri arttırıldığı zaman ϵ_{eff} artmakta ve Z_0 ' ın azalmakta olduğu söylenebilir. Buradaki önemli noktalardan bir diğeri de bu değişimlerin $(h_2 - h_1)$ farkından oldukça az etkilenmeleridir. h_3 , ϵ_{eff} ve Z_0 ı benzer şekilde etkilemekle beraber $(h_2 - h_1)$ farkının etkisinden daha baskındır. Bu durum Şekil 4.10 ve Şekil 4.11' de açıkça görülmektedir. Ayrıca, Şek. 4.6-4.11' de w değerinin arttırılması etkin dielektrik sabitini arttırmakta ve karakteristik empedans değerini düşürmektedir.



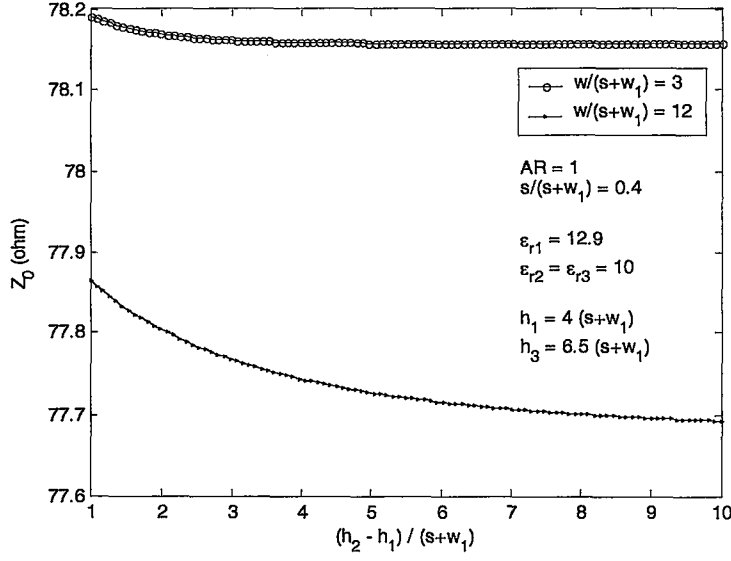
Şekil 4.6 AEŞİH' nin etkin dielektrik sabitinin $h_1 / (s+w_1)$ oranına göre değişimi.



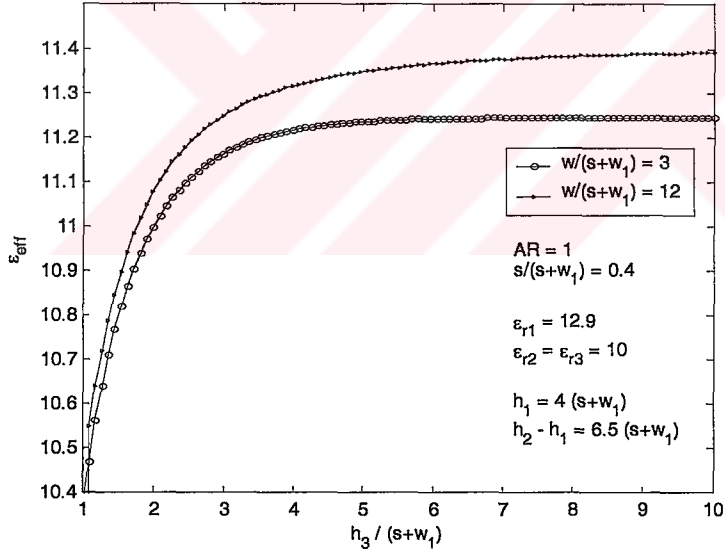
Şekil 4.7 AEŞİH' nin karakteristik empedansının $h_1 / (s+w_1)$ oranına göre değişimi.



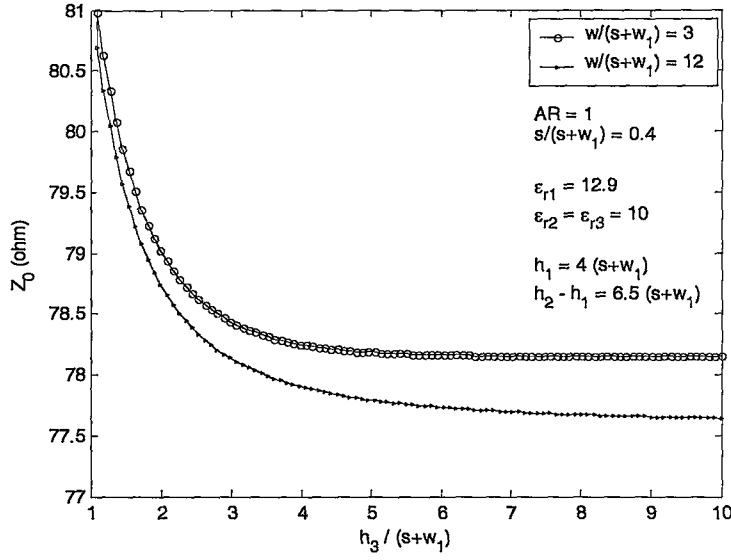
Şekil 4.8 ÇKAESİH' nin etkin dielektrik sabitinin $(h_2 - h_1) / (s+w_1)$ oranına göre değişimi.



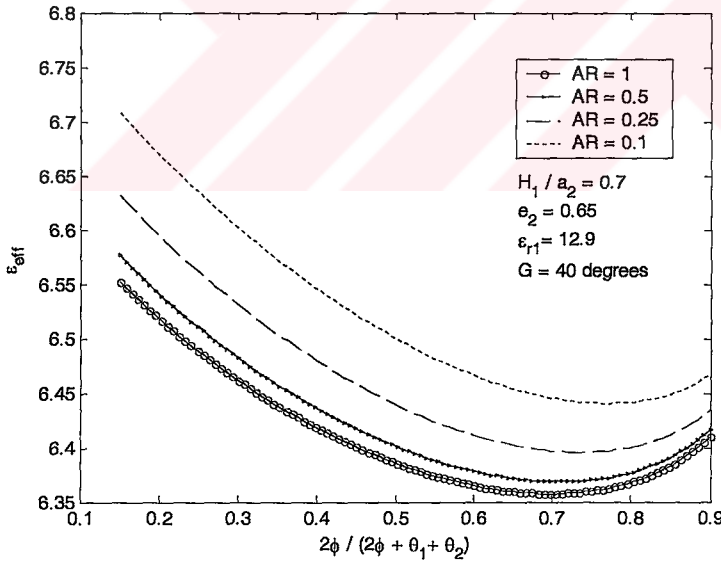
Şekil 4.9 ÇKAESİH' nin karakteristik empedansının $(h_2 - h_1) / (s+w_1)$ oranına göre değişimi.



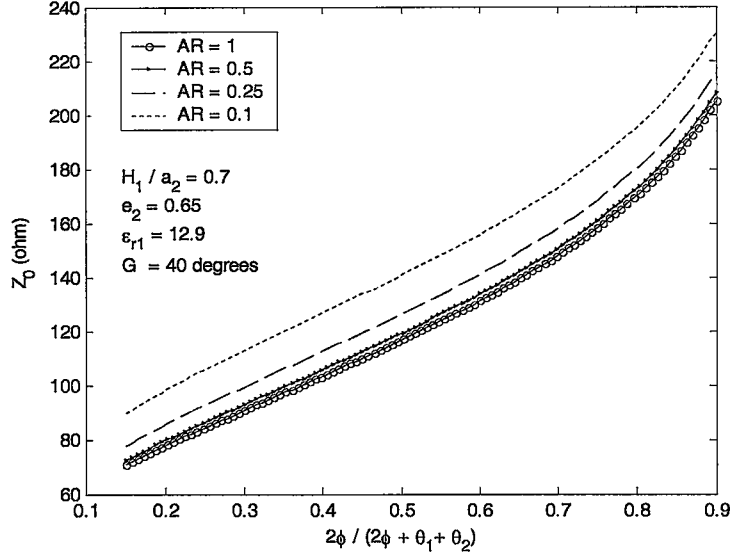
Şekil 4.10 ÇKAESİH' nin etkin dielektrik sabitinin $h_3 / (s+w_1)$ oranına göre değişimi.



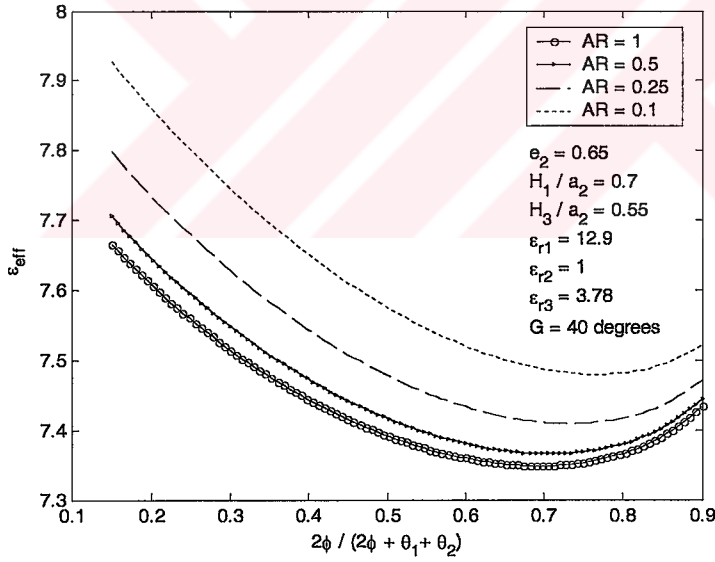
Şekil 4.11 ÇKAESLİH' nin karakteristik empedansının $h_3 / (s+w_1)$ oranına göre değişimi.



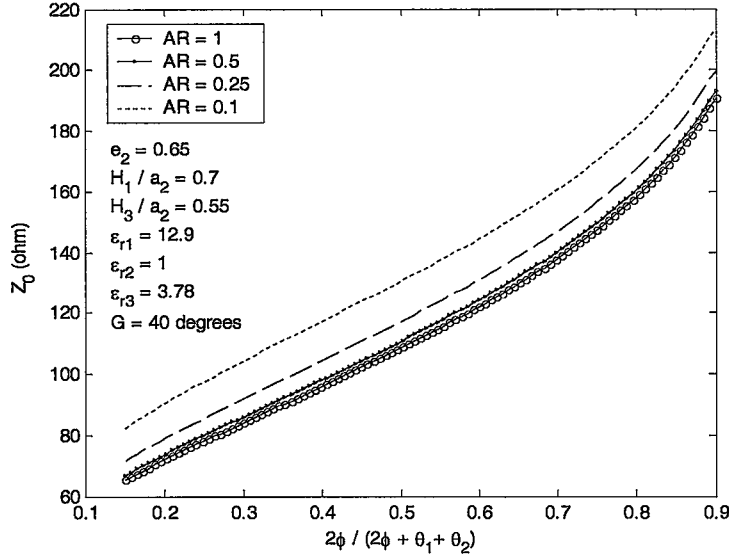
Şekil 4.12 ÇKAESLİH' nin ve ÇKSAESLİH' nin etkin dielektrik sabitinin $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$ için $2\phi / (2\phi + \theta_1 + \theta_2)$ oranına göre değişimi.



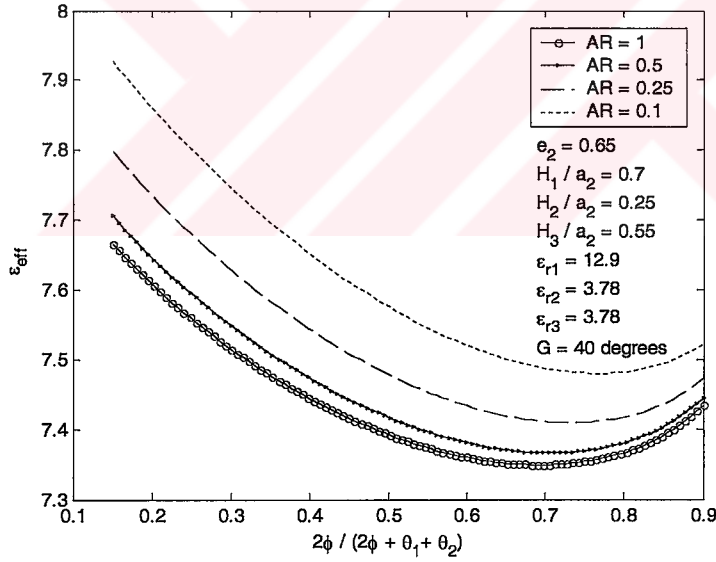
Şekil 4.13 ÇKEAEŞİH' nin ve ÇKSAEŞİH' nin karakteristik empedansının $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$ için $2\phi/(2\phi + \theta_1 + \theta_2)$ oranına göre değişimi.



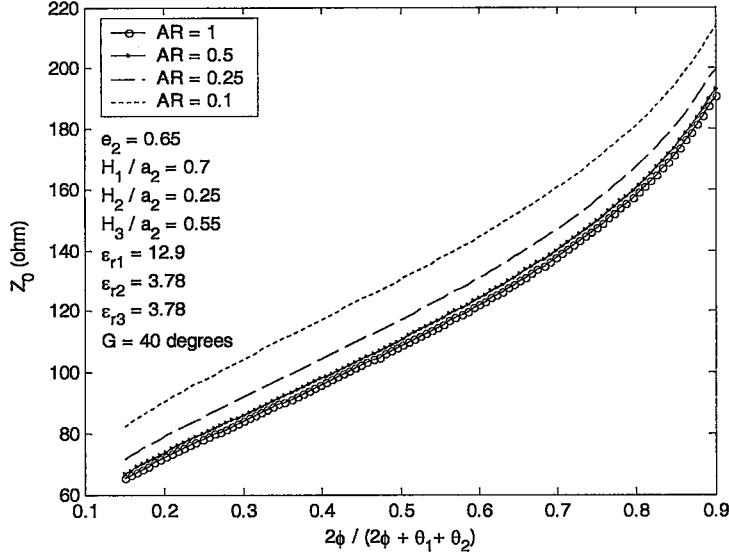
Şekil 4.14 ÇKEAEŞİH' nin ve ÇKSAEŞİH' nin etkin dielektrik sabitinin $\epsilon_{r2} = 1$, $\epsilon_{r3} = 3.78$ için $2\phi/(2\phi + \theta_1 + \theta_2)$ oranına göre değişimi.



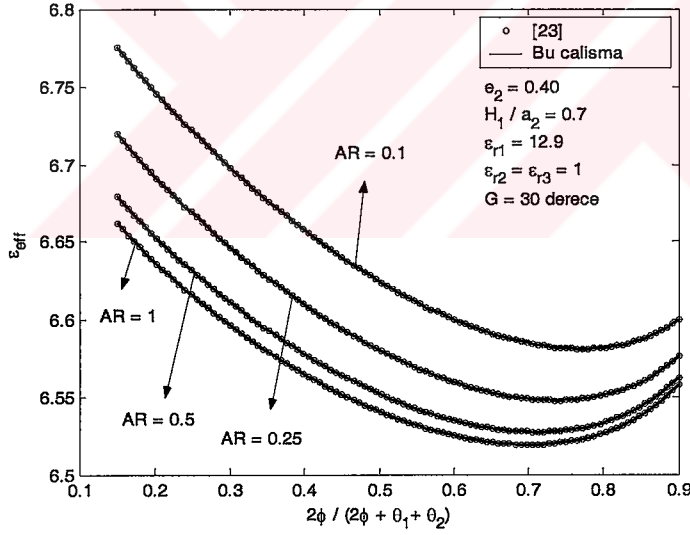
Şekil 4.15 ÇKEAŞİH' nin ve ÇKSAEŞİH' nin karakteristik empedansının $\epsilon_{r2} = 1$, $\epsilon_{r3} = 3.78$ için $2\phi / (2\phi + \theta_1 + \theta_2)$ oranına göre değişimi.



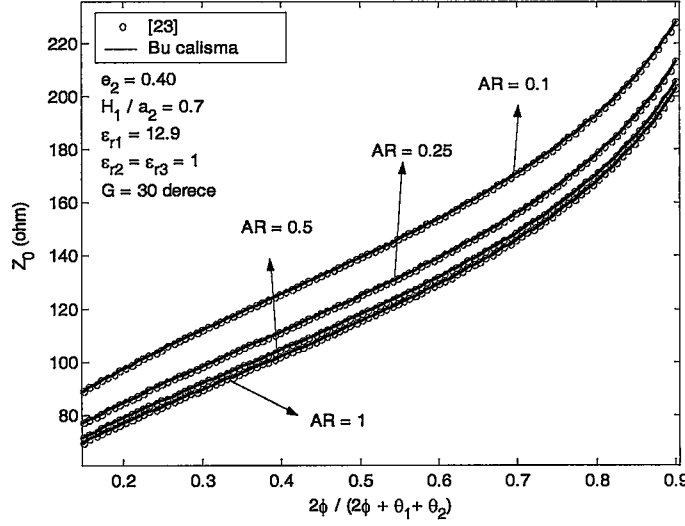
Şekil 4.16 ÇKEAŞİH' nin ve ÇKSAEŞİH' nin etkin dielektrik sabitinin $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 3.78$ için $2\phi / (2\phi + \theta_1 + \theta_2)$ oranına göre değişimi.



Şekil 4.17 ÇKEAEŞİH' nin ve ÇKSAEŞİH' nin karakteristik empedansının $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 3.78$ için $2\phi / (2\phi + \theta_1 + \theta_2)$ oranına göre değişimi.



Şekil 4.18 ÇKEAEŞİH' nin ve ÇKSAEŞİH' nin etkin dielektrik sabitinin $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$ için $2\phi / (2\phi + \theta_1 + \theta_2)$ oranına göre değişiminin karşılaştırılması.



Şekil 4.19 ÇKEAEŞİH' nin ve ÇKSAEŞİH' nin karakteristik empedansının $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$ için $2\phi / (2\phi + \theta_1 + \theta_2)$ oranına göre değişiminin karşılaştırılması.

Şekil 4.12-4.17' de ÇKEAEŞİH ve ÇKSAEŞİH' nin ϵ_{eff} ve Z_0 için elde edilen sonuçları görülmektedir. Bu sonuçlar şekillerden anlaşıldığı gibi farklı dielektrik katmanların kombinasyonları oluşturularak elde edilmiştir. Burada e_i ($i = 1, 2, 3, 4$ olmak üzere) elipsin eğrilik derecesini (eksentrisitesini) ifade eder ve $e_i = f / a_i = (a_i^2 - b_i^2)^{1/2} / a_i$ olarak yazılır. Öncelikle, $2\phi / (2\phi + \theta_1 + \theta_2)$ oranı ($G = 2\phi + \theta_1 + \theta_2$) arttırıldığı taktirde ϵ_{eff} azalmakta ve Z_0 artmaktadır. Ayrıca, asimetri oranı ($AR = \theta_1 / \theta_2$) azaltıldığında, ϵ_{eff} artmakta ve Z_0 azalmaktadır.

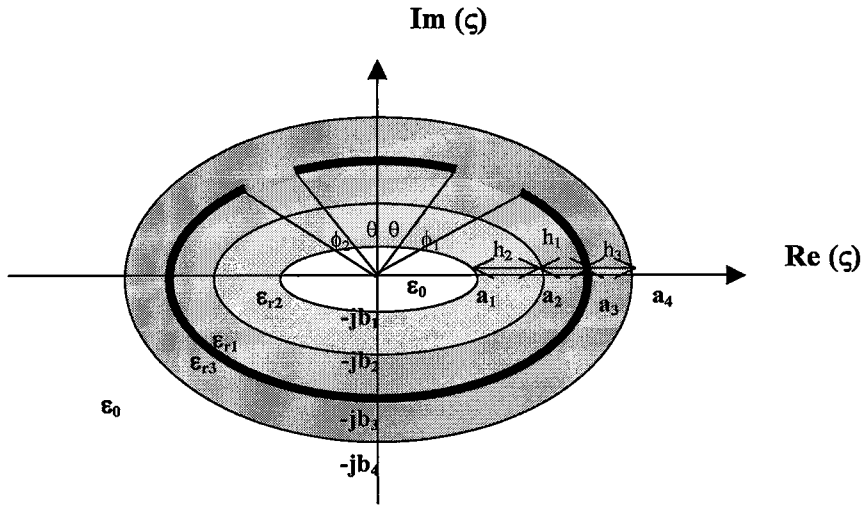
Şekil 4.18 ve Şekil 4.19' da D_u ve diğerleri [23] tarafından kullanılan yöntemin sonuçları Akan ve Yazgan [26] tarafından kullanılan metodun sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. Sonuçlar birbirine çok yakındır. Bu da Akan ve Yazgan [26] tarafından ve bu kısımda kullanılan metodun doğruluğunun ikinci bir göstergesi olarak düşünülmektedir.

5. ELİPTİK VE SİLİNDİRİK ASİMETRİK EŞ-DÜZLEMLİ DALGA KILAVUZLARININ YARI DEĞİŞKEN-TEM ANALİZLERİ

Bu bölümde, son zamanlarda üzerinde çok sık durulan diğer iletim hatları; eliptik ve silindirik asimetrik eş-düzlemlı şerit iletim hatlarının tamamlayıcı yapıları olan eliptik ve silindirik asimetrik eş-düzlemlı dalga kılavuzlarının (genelleştirilerek çok katmanlı oldukları durumlar incelenmiştir) KD metodu kullanılarak yarı değişken-TEM analizleri yapılmıştır. Karpuz ve Görür [18, 21] tarafından belirtildiği gibi bu iletim hatları filtre, anten, balun ve opto-elektronik kipleyci tasarımında kullanılmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi yarı değişken-TEM yaklaşımı düşük frekanslarda kullanılmaktadır. Bu iletim hatları da bir önceki bölümde anlatılan hatlar gibi doğrusal dağılımlı mükemmel dalga yayılımına sahip oldukları için yarı değişken-TEM parametreleri (karakteristik empedans, etkin dielektrik sabiti gibi) frekansa bağımlı olarak çok az değişmektedir. Bu bölümde çok katmanlı eliptik, silindirik ve asimetrik eş-düzlemlı dalga kılavuzlarının (sırasıyla ÇKEAEDK, ÇKSAEDK ve ÇKAEDK) yarı değişken-TEM parametrelerinin KD teknikleri kullanılarak elde edilmesi gösterilecek ve analizleri yapılacaktır.

5.1 Analiz

Şekil 5.1' de ÇKEAEDK' nin kesiti görülmektedir. Bu yapıda eliptik dalga kılavuzu dielektrik sabitleri sırasıyla ϵ_{r1} ve ϵ_{r2} olan katmanlı iki alttaşı çevrelemektedir. Eliptik dalga kılavuzunun üst tarafında dielektrik sabiti ϵ_{r3} olan başka bir dielektrik üstteş vardır. Eliptik silindirlerin yarı büyük eksenleri sırasıyla a_1 , a_2 , a_3 ve a_4 ve yarı küçük eksenleri b_1 , b_2 , b_3 ve b_4 ' den oluşmaktadır. Bu dalga kılavuzunun merkezi eliptik şeridinin yay uzunluğu $2\theta'$ dır.

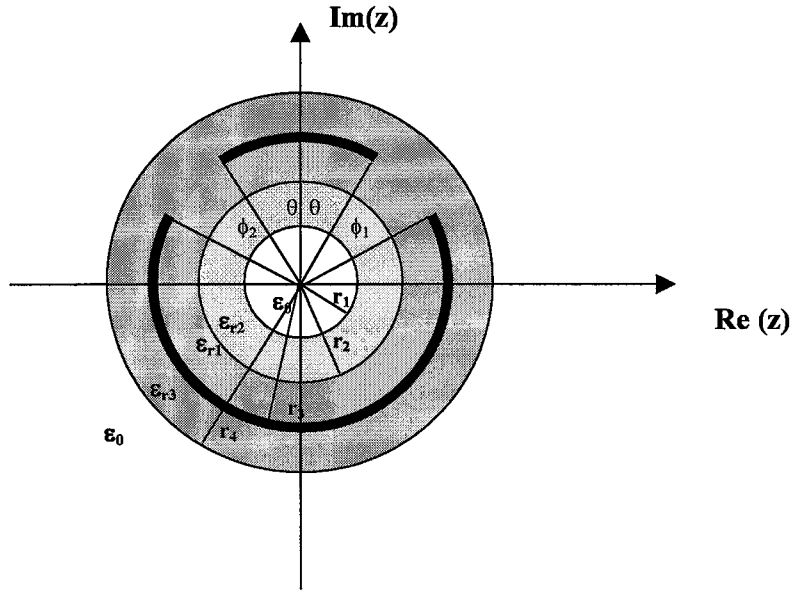


Şekil 5.1 ÇKEAEDK' nin s -düzlemindeki kesit görünüşü.

Ayrıca Şekil 5.1' de görüldüğü gibi dört eliptik silindirin odak uzaklıkları Eş. (4.14)' teki gibidir. Şekil 5.1' deki eliptik yapı, Şekil 5.2' deki çok katmanlı ÇKSAEDK' ye bir önceki bölümde olduğu gibi

$$z = \frac{1}{f} (s \mp \sqrt{s^2 - f^2}) \quad (5.1)$$

fonksiyonu ile transfer edilir. Bu yüzden, s -düzlemindeki dört eş-odaklı eliptik silindirler dairesel silindirlere dönüştürüldükten sonra bu silindirlerin yarıçapları Eş. (4.16)' daki gibi ifade edilebilir.



Şekil 5.2 ÇKSAEDK' nin z-düzlemindeki kesit görünüşü.

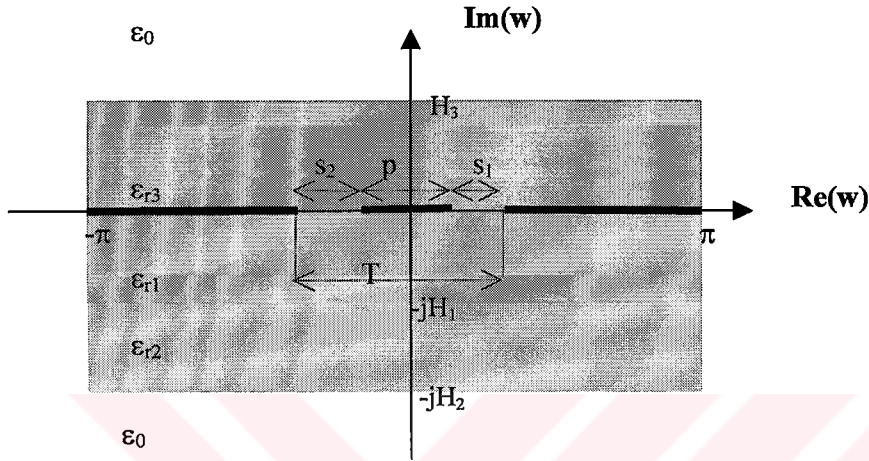
Daha sonra

$$w = j \ln(z/r_3) + \pi/2 \quad (5.2)$$

kullanılarak ÇKSAEDK, ilgili parametreleri aşağıdaki gibi ifade edilebilecek çok katmanlı asimetrik eş-düzlemlı dalga kılavuzuna (ÇKAEDK) dönüştürülür.

$$\begin{aligned}
 p = 2\theta & & H_1 = \ln(r_3/r_2) \\
 s_1 = \phi_1 & & H_2 = \ln(r_3/r_1) \\
 s_2 = \phi_2 & & H_3 = \ln(r_4/r_3)
 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Artık Şekil 5.3' te gösterilen ÇKAEDK için Görür ve diğerleri [19] tarafından kullanılan yöntem uygulanabilir. ÇKAEDK' nin birim uzunluktaki toplam sığası, C' , Eş. (4.1)' deki gibi üç farklı asimetrik dalga kılavuzunun ve serbest uzay sığa değerlerinin toplamına eşittir.



Şekil 5.3 Konformal dönüşümlerden sonra elde edilen ÇKAEDK' nin w -düzlemindeki kesit görünüşü.

Burada Chen ve Chou [44] tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi C'_0 dielektrik katmanları kaldırdıktan sonraki serbest uzay sığasını; C_1 , dielektrik altaşın kalınlığı H_1 ve dielektrik sabitinin $(\epsilon_{r1} - \epsilon_{r2})$ olduğu durumdaki sığayı; C_2 , dielektrik altaşın kalınlığının H_2 ve dielektrik sabitinin $(\epsilon_{r2}-1)$ olduğu durumdaki sığayı ve son olarak da C_3 dielektrik altaşın kalınlığının H_3 ve dielektrik sabitinin $(\epsilon_{r3}-1)$ olduğu durumdaki sığayı ifade etmektedir. Bu yöntemle dayanarak serbest uzay sığası

$$C'_0 = 2\epsilon_0 \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} \quad (5.4)$$

olarak yazılır. Burada,

$$k_0 = \sqrt{\frac{p(p+s_1+s_2)}{(p+s_1)(p-s_2)}} \quad (5.5)$$

ve

$$k'_0 = \sqrt{1-k_0^2} \quad (5.6)$$

biçiminde ifade edilir. Ayrıca birim uzunluktaki toplam sığa

$$C = 2\varepsilon_0\varepsilon_{eff} \frac{K(k_0)}{K(k'_0)} \quad (5.7)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada $K(k_0)$ birinci dereceden tam eliptik integraldir ve k_0 de eliptik modülü ifade etmektedir (bkz. *Ek Açıklamalar-Eliptik Fonksiyonlar*). Etkin dielektrik sabiti ise Eş. (4.11)' deki gibi yazılır. Dielektrik dolun çarpanları

$$q_i = \frac{K(k_i)}{K(k'_i)} \frac{K(k'_0)}{K(k_0)}, \quad i=1,2,3. \quad (5.8)$$

burada

$$k_i = \frac{2 \sinh\left(\frac{\pi p}{4H_i}\right) \left[\sinh\left(\frac{\pi(w+2s_1)}{4H_i}\right) + \sinh\left(\frac{\pi(w+2s_2)}{4H_i}\right) \right]}{\left[\sinh\left(\frac{\pi p}{4H_i}\right) + \sinh\left(\frac{\pi(p+2s_1)}{4H_i}\right) \right] \left[\sinh\left(\frac{\pi p}{4H_i}\right) + \sinh\left(\frac{\pi(p+2s_2)}{4H_i}\right) \right]} \quad (5.9)$$

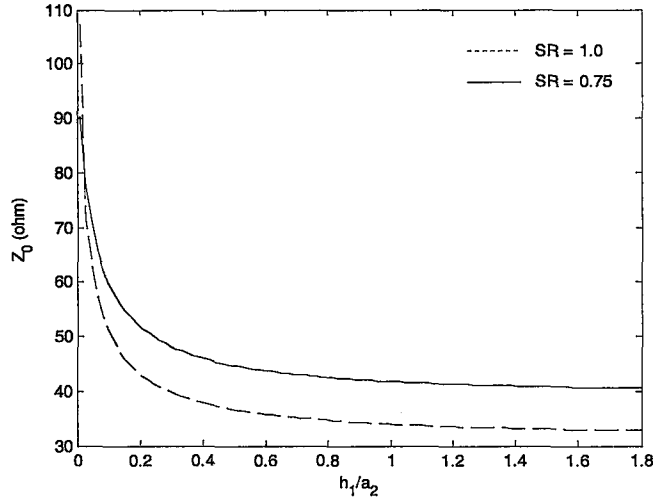
şeklindedir. Burada $K(k_i)$ birinci dereceden tam eliptik integraldir ve H_1, H_2, H_3 için sırasıyla $K(k_i) / K(k'_i) = w/h_i$ ve $i = 1, 2, 3'$ tür, m_i de eliptik modülü (bkz. *Ek Açıklamalar-Eliptik Fonksiyonlar*) ifade etmektedir. Bunun için karakteristik empedans ifadesi şu şekilde yazılabilir:

$$Z_0 = \frac{60 \pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \frac{K(k'_0)}{K(k_0)} \quad (5.10)$$

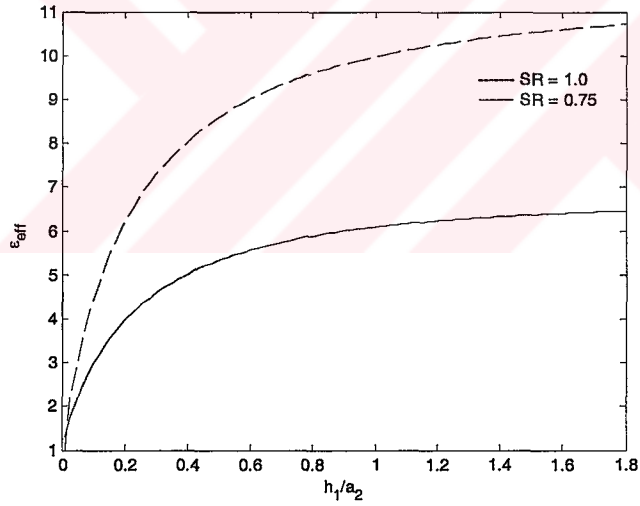
Eelde edilen çıkarımlar bir sonraki kısımda ÇKEAEDK ve ÇKSAEDK' nin ϵ_{eff} ve Z_0 değerlerinin h_1, h_2, h_3 , ve $2\theta/(2\theta + \phi_1 + \phi_2)$ parametrelerine göre değişimini incelemek için kullanılacaktır.

5.2 Sonuç

Şekil 5.4a ve Şekil 5.4b' de $\theta = 30^\circ$, $\phi_1 = 20^\circ$, $e_2 = 0.65$, $h_3 = h_1$, $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3} = 12.9$ (SR boşluk oranı olmak üzere, $SR = \phi_1/\phi_2$ olarak yazılır ve $SR = 1$ için) ve $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r3} = 1$ ($SR = 0.75$ için), $\epsilon_{r2} = 1$ değerleri için ÇKEAEDK ve eşdeğer ÇKSAEDK' nin yarı değişken-TEM parametrelerinin h_1/a_2 oranına göre değişimleri görülmektedir.

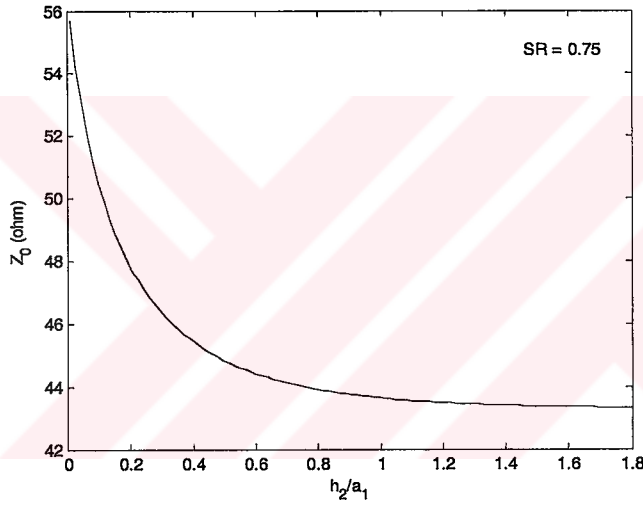


Şekil 5.4a ÇKEAEDK ve eşdeğer ÇKSAEDK' nin h_1/a_2 oranına göre karakteristik empedans değerinin değişimi.

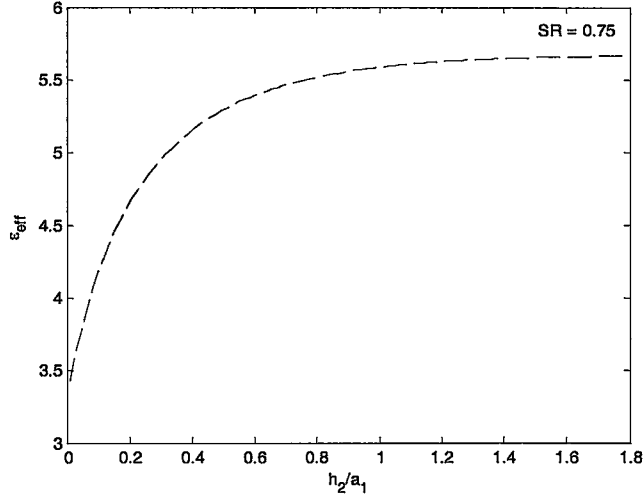


Şekil 5.4b ÇKEAEDK ve eşdeğer ÇKSAEDK' nin h_1/a_2 oranına göre etkin dielektrik sabitinin değişimi.

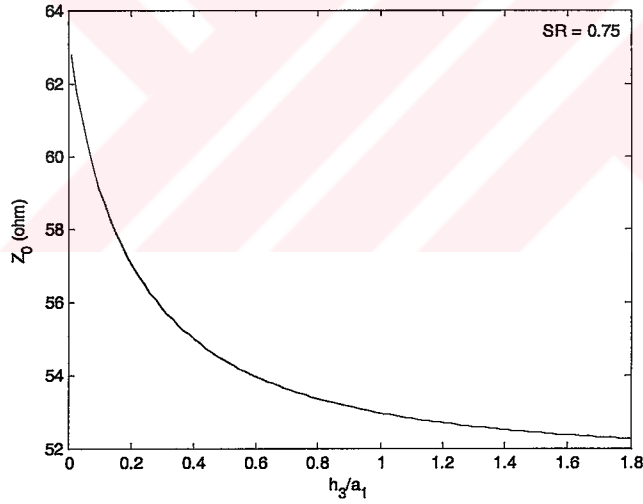
Şekil 5.5a ve Şekil 5.5b, $\theta = 30^\circ$, $\phi_1 = 20^\circ$, $e_1 = 0.65$, $h_3/a_1 = 0.07$, $h_1/a_1 = 0.05$, $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = 10$, $\epsilon_{r3} = 10$ değerleri için ÇKEAEDK ve eşdeğer ÇKSAEDK' nin yarı değişken-TEM parametrelerinin h_2/a_1 oranına göre değişimini göstermektedir. Şekil 5.6a ve Şekil 5.6b' de ise $\theta = 30^\circ$, $\phi_1 = 20^\circ$, $e_1 = 0.65$, $h_1/a_2 = 0.07$, $h_2/a_1 = 0.05$, $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = 3.78$, $\epsilon_{r3} = 3.78$ değerleri için ÇKEAEDK ve eşdeğer ÇKSAEDK' nin yarı değişken-TEM parametrelerinin h_3/a_1 oranına göre değişimi görülmektedir. Bu şekillerden anlaşıldığı üzere h_1/a_2 , h_2/a_1 ve h_3/a_1 oranları arttırıldıkça karakteristik empedans değeri azalmakta buna karşın etkin dielektrik sabiti artmaktadır. Ayrıca, bu sonuçlar Görür ve diğerleri [19] tarafından elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir.



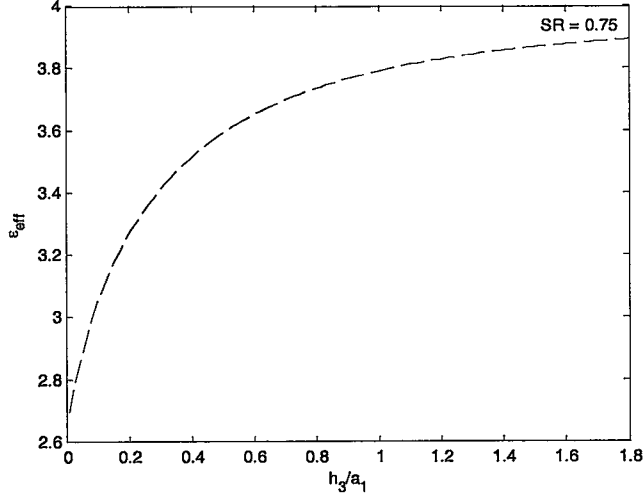
Şekil 5.5a ÇKEAEDK ve eşdeğer ÇKSAEDK' nin h_2/a_1 oranına göre karakteristik empedans değerinin değişimi.



Şekil 5.5b ÇKEAEDK ve eşdeğer ÇKSAEDK' nin h_2/a_1 oranına göre etkin dielektrik sabitinin değişimi.

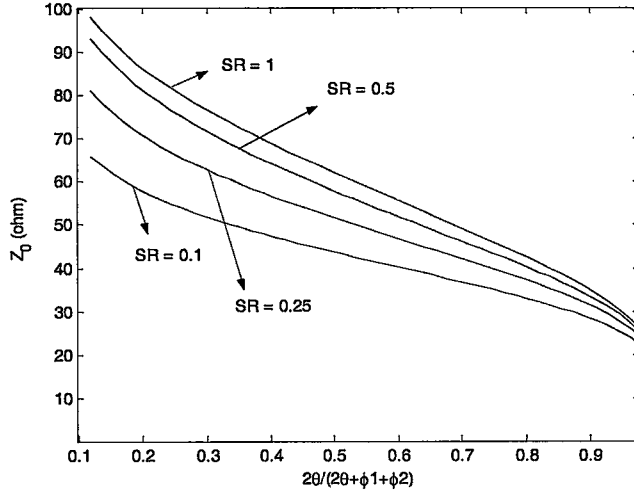


Şekil 5.6a ÇKEAEDK ve eşdeğer ÇKSAEDK' nin h_3/a_1 oranına göre karakteristik empedans değerinin değişimi.

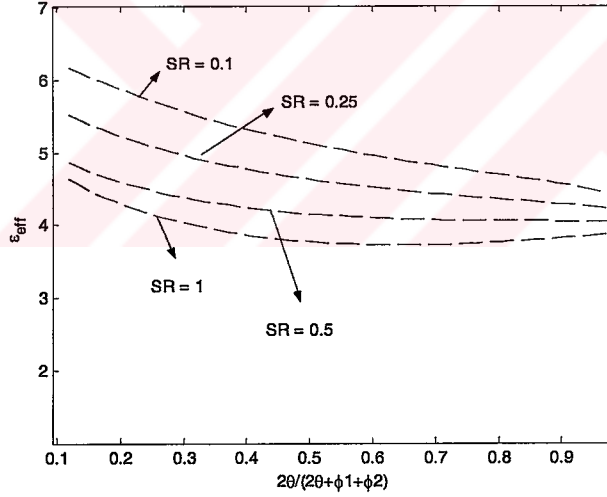


Şekil 5.6b ÇKEAEDK ve eşdeğer ÇKSAEDK' nin h_3/a_1 oranına göre etkin dielektrik sabitinin değişimi.

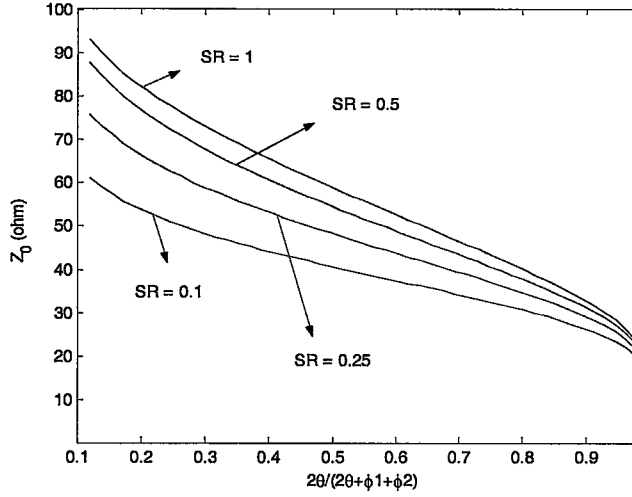
Şekil 5.7a ve Şekil 5.7b' de sırasıyla ÇKEAEDK ve ÇKSAEDK' nin karakteristik empedansının ve dielektrik sabitinin $\epsilon_1 = 0.65$, $h_1/a_2 = 0.09$, $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$ ve farklı SR değerleri için biçim çarpanı $2\theta/(2\theta + \phi_1 + \phi_2)$ ' e göre değişimi görülmektedir. Şekil 5.8a ve Şekil 5.8b' de ise sırasıyla ÇKEAEDK ve ÇKSAEDK' nin karakteristik empedansının ve dielektrik sabitinin $\epsilon_1 = 0.65$, $h_1/a_1 = 0.09$, $h_3/a_2 = 0.05$, $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = 1$, $\epsilon_{r3} = 3.78$ ve farklı SR değerleri için biçim çarpanı $2\theta/(2\theta + \phi_1 + \phi_2)$ ' e göre değişimi görülmektedir. Şekil 5.8a' ya dayanarak; üsttaş bir dielektrik malzemenin ele alınan yapıların karakteristik empedans değerini azaltırken Şekil 5.8' de görüldüğü gibi aynı yapıların etkin dielektrik değerini arttırmaktadır.



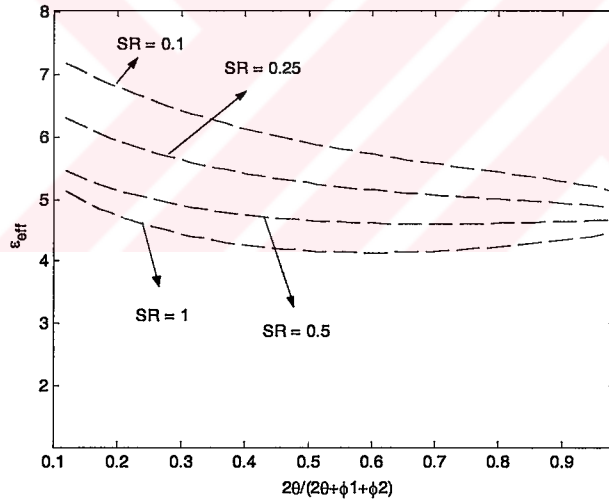
Şekil 5.7a Farklı SR değerleri ve $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$ için ÇKEAEDK ve ÇKSAEDK' nin karakteristik empedans değerinin biçim çarpanına göre değişimi.



Şekil 5.7b Farklı SR değerleri ve $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$ için ÇKEAEDK ve ÇKSAEDK' nin etkin dielektrik sabitinin biçim çarpanına göre değişimi.

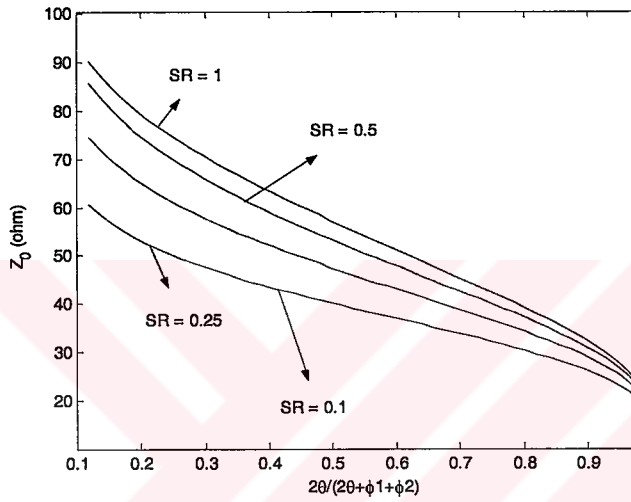


Şekil 5.8a Farklı SR değerleri ve $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = 1$, $\epsilon_{r3} = 3.78$ için ÇKEAEDK ve ÇKSAEDK' nin karakteristik empedans değerinin biçim çarpanına göre değişimi.

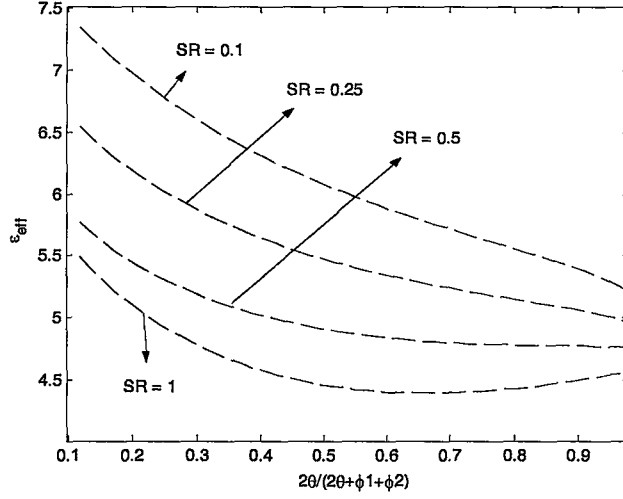


Şekil 5.8b Farklı SR değerleri ve $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = 1$, $\epsilon_{r3} = 3.78$ için ÇKEAEDK ve ÇKSAEDK' nin etkin dielektrik sabitinin biçim çarpanına göre değişimi.

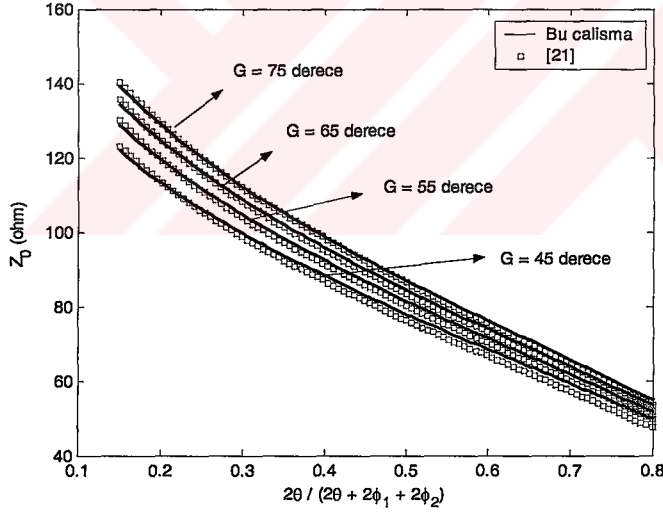
Şekil 5.9a ve Şekil 5.9b' de sırasıyla ÇKEAEDK ve ÇKSAEDK' nin karakteristik empedansının ve dielektrik sabitinin $\epsilon_1 = 0.65$, $h_1/a_1 = 0.09$, $h_2/a_1 = 0.045$, $h_3/a_1 = 0.065$, $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = 3.78$, $\epsilon_{r3} = 3.78$ ve farklı SR değerleri için biçim çarpanı $2\theta/(2\theta + \phi_1 + \phi_2)$ ' ye göre değişimi görülmektedir. Ayrıca bu şekillerde destekleyici alttaş dielektriğin yarı değişken-TEM parametrelerine etkisi görülmektedir. Fakat bu etki Görür ve diğerleri [19] tarafından açıklandığı gibi üsttaş dielektrik materyalin etkisinden daha azdır.



Şekil 5.9a Farklı SR değerleri ve $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 3.78$ için ÇKEAEDK ve ÇKSAEDK' nin karakteristik empedans değerinin biçim çarpanına göre değişimi.

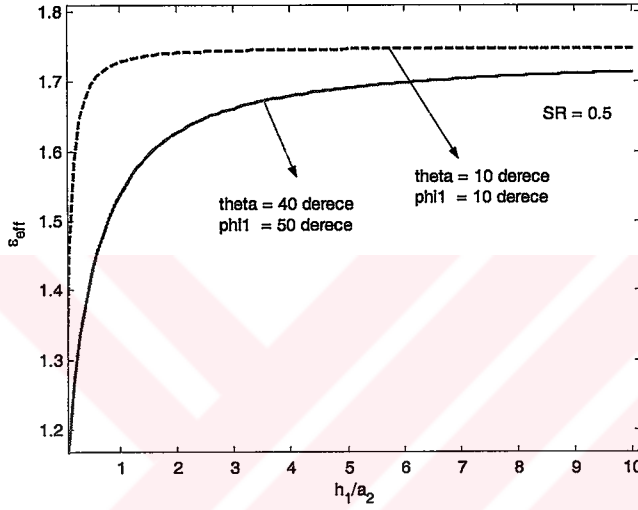


Şekil 5.9b Farklı SR değerleri ve $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 3.78$ için ÇKEAEDK ve ÇKSAEDK' nin etkin dielektrik sabitinin biçim çarpanına göre değişimi.



Şekil 5.10 Bu kısımda kullanılan yöntem ve Karpuz ve Görür [21] tarafından kullanılan yöntemle ÇKEAEDK ve ÇKSAEDK için elde edilen karakteristik empedans değerlerinin $e_1 = 0.65$, $h_1/a_2 = 0.037$, $(G = 2\theta + \phi_1 + \phi_2) = 75^\circ, 65^\circ, 55^\circ, 45^\circ$ ve $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$ için $2\theta/(2\theta + \phi_1 + \phi_2)$ ' ye göre karşılaştırılması.

Şekil 5.10' da bu kısımdaki çalışmada kullanılan yöntemle Karpuz ve Görür [21] tarafından kullanılan yöntemin sonuçları kıyaslanmaktadır. Görüldüğü gibi karşılaştırılan karakteristik empedans değerleri birbirlerine çok yakındır. Bu kısımda kullanılan metodun bir diğer doğrulayıcısı da Şekil 5.11' de görülmektedir. Daha önce Hanna ve Thebault [9, 12] tarafından yapılan çalışmalarda gösterildiği gibi tek katmanlı dielektrik bulunan yapı için dielektrik alttaşın kalınlığı arttıkça etkin dielektrik sabiti de $(\epsilon_{r1} + 1)/2$ değerine yaklaşır.



Şekil 5.11 $e_2 = 0.45$, $SR = 0.5$, $\theta = 10^0$, $\phi_1 = 10^0$, $\epsilon_{r1} = 2.5$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$ (kesikli çizgi), ve $e_2 = 0.45$, $SR = 0.5$, $\theta = 40^0$, $\phi_1 = 50^0$, $\epsilon_{r1} = 2.5$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$ (düz çizgi) değerleri için ÇKEAEDK ve ÇKSAEDK' nin etkin dielektrik sabitinin h_1/a_2 ' ye göre değişimi.

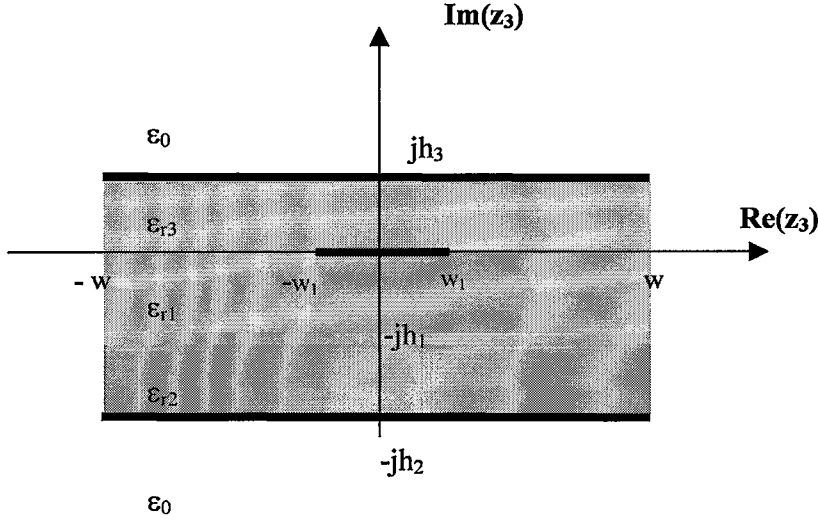
Şekil 5.11' de h_1 yeterince büyük ve θ ile sinyal aralıkları ϕ_1 ve ϕ_2 (eş-düzlemler dalga kılavuzunda olduğu gibi) yeterince küçük olduğunda etkin dielektrik sabiti yapının sonsuz dielektrik kalınlığına sahip olduğu değere yaklaşmaktadır.

6. ELİPTİK, SİLİNDİRİK VE SONLU BOYUTLARA SAHİP ASİMETRİK EKSPANLANMIŞ ŞERİT İLETİM HATLARININ YARI DEĞİŞKEN-TEM ANALİZLERİ: ÇOK KATMANLI DURUM

Bu kısımda, çok katmanlı eliptik, silindirik ve sonlu boyutlara sahip asimetrik ekranlanmış şerit iletim hatlarının (sırasıyla ÇKEAEKŞİH, ÇKSAEKŞİH ve ÇKAEKŞİH) yarı değişken-TEM analizleri KD kullanılarak yapılacaktır. Cohn [3] tarafından simetrik ekranlanmış şerit iletim hattının analizi yapılmıştır. Özellikle UHF ve mikrodalga devrelerinde sıkça kullanılan ekranlanmış şerit iletim hattının çok katmanlı asimetrik olanının kesiti Şekil 6.1' de görülmektedir. Bu yapının herhangi bir radyasyon kaybı olmadığı için çok çeşitli devrelerde özellikle yüksek-Q' ya sahip filtrelerin tasarımında tercih edilmektedir. Ayrıca ekonomik üretim yöntemleriyle kolay ve ucuz olarak üretilebilmektedir. Nguyen [29] tarafından bu yapının homojen olmayan asimetrik hali için önerilen metot bu bölümde *geliştirilerek* eliptik, silindirik ve sonlu boyutlara sahip çok katmanlı olan şerit iletim hatlarının analizinde kullanılmıştır. Zeng ve Wang [1] tarafından eliptik ve silindirik ekranlanmış şerit iletim hatları simetrik durum için KD kullanılarak incelenmiş fakat eliptik ve silindirik yapıların en son dönüştürülmüş şekli olan ekranlanmış şerit iletim hattının sonlu boyutları dikkate alınmamıştır. Aşağıda ÇKEAEKŞİH, ÇKSAEKŞİH ve ÇKAEKŞİH yapılarının yarı değişken-TEM analizleri için gerekli eşitlikler sonlu boyutlar da göz önüne alınarak elde edilmiş ve sonuçlar literatürdekilerle karşılaştırılmıştır.

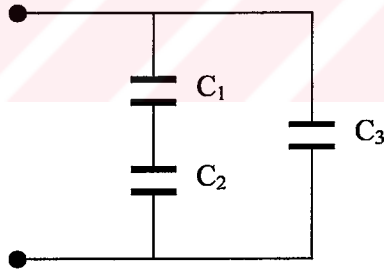
6.1 Sonlu Boyutlara Sahip Çok Katmanlı Dielektrikten Oluşan Asimetrik Ekranlanmış Şerit İletim Hattının Analizi

Şekil 6.1' de ÇKAEKŞİH' nin kesiti görülmektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi iki toprak iletken arasında dielektrik sabitleri ϵ_{r1} ve ϵ_{r2} olan katmanlı iki alttaşın üstüne metalik şerit yerleştirilmiş ve bunun üzerine de dielektrik sabiti ϵ_{r3} olan başka bir üstteş yerleştirilmiştir. Bu yapının toplam genişliği $2w$, şerit genişliği $2w_1$ ' dir. Dielektrik katmanların yükseklikleri ϵ_{r1} , ϵ_{r2} ve ϵ_{r3} için sırasıyla h_1 , h_2-h_1 ve h_3 ' tür.



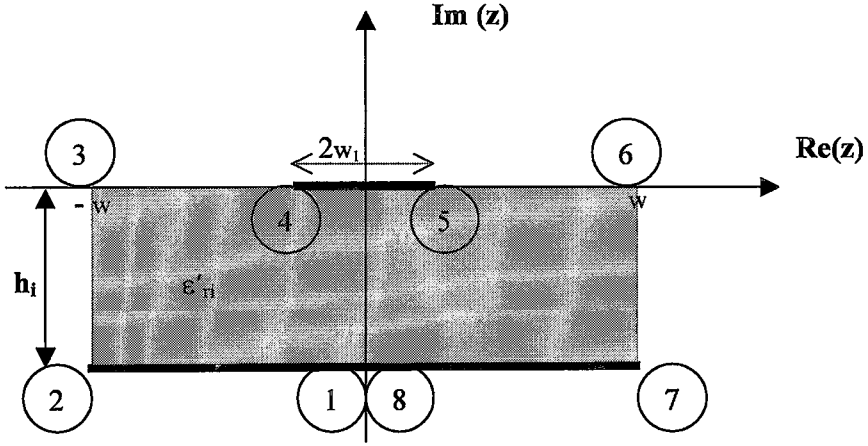
Şekil 6.1 ÇKAEKŞİH' nin z_3 -düzlemindeki kesit görünüşü.

ÇKAEKŞİH' nin toplam sığası, ϵ_{r1} ve ϵ_{r2} arasındaki dielektrik sınır mükemmel elektrik duvarı; ϵ_{r3} ve ϵ_{r1} arasındaki sınır mükemmel manyetik duvar olarak kabul edildiğinde Şekil 6.2' deki gibi modellenebilir.



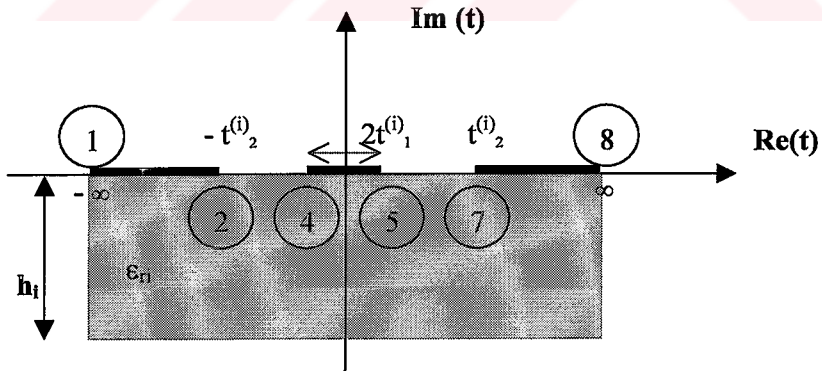
Şekil 6.2 ÇKAEKŞİH' nin eşdeğer sığa devresi.

Burada C_1 yüksekliği h_1 eşdeğer dielektrik sabiti $\epsilon'_{r1} = \epsilon_{r1}\epsilon_{r2} / (\epsilon_{r2}-\epsilon_{r1})$ olan sığayı, C_2 yüksekliği h_2 dielektrik sabiti $\epsilon'_{r2} = \epsilon_{r2}$ olan sığayı ve son olarak da C_3 yüksekliği h_3 dielektrik sabiti $\epsilon'_{r3} = \epsilon_{r3}$ olan sığayı ifade etmektedir.



Şekil 6.3 Kısmi sığa değerlerini hesaplamak için z-düzlemindeki genel yapı.

Bu sığa değerlerini hesaplamak için Şekil 6.3' deki genel yapı Şekil 6.4' de görülen simetrik eş-düzlemlili dalga kılavuzuna dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm için dördüncü bölümde kullanılan Eş. (4.3) ve (4.4)' ten yararlanılmaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta Şekil 6.3' teki 2. ve 7. noktaların birer karmaşık (kompleks) değer olmalarıdır.



Şekil 6.4 Kısmi sığa değerlerini hesaplamak için elde edilen t-düzlemindeki simetrik eş-düzlemlili dalga kılavuzu.

Bu noktalar için Eş. (4.3) ve Eş. (4.4)' teki ifadeler *kullanılamaz*. Bu yüzden yapıdaki gerçek değerli noktalar için Eş. (4.3) ve Eş. (4.4) dönüşüm fonksiyonu kullanılırken, karmaşık değerli noktalar için aşağıdaki dönüşüm [45]

$$t_2^{(j)} = sn \left((K_{(m_j)} / w) (w - h_j \sqrt{-1}), m_j \right) \quad (6.1)$$

$j=1,2,3.$

başka bir gösterimle

$$(K_{(m_j)} / w) (w - h_j \sqrt{-1}) = a_j = u_j + v_j \sqrt{-1} \quad (6.2)$$

olmak üzere

$$t_2^{(j)} = \frac{sn(u_j, m_j).dn(v_j, m'_j) - \sqrt{-1} cn(u_j, m_j).dn(u_j, m_j).sn(v_j, m'_j).cn(v_j, m'_j)}{1 - sn^2(v_j, m'_j).dn^2(u_j, m_j)} \quad (6.3)$$

dönüşümü kullanılmalıdır. Burada sn, cn ve dn eliptik fonksiyonları (bkz. *Ek Açıklamalar-Eliptik Fonksiyonlar*) ifade etmektedir. Artık simetrik eş-düzlemli dalga kılavuzu için kullanılan KD dönüşümü kullanılarak elde edilen yarı-TEM parametreleri kullanılabilir [16].

$$k_j = \frac{t_1^{(j)}}{t_2^{(j)}}, \quad j=1,2,3 \quad (6.4)$$

olmak üzere kısmi sığalar aşağıdaki eşitliklerdeki gibi yazılabilir:

$$C_1 = 2\varepsilon_0 \varepsilon_r' \frac{K(k_1)}{K(k_1')} \quad (6.5)$$

$$C_2 = 2\varepsilon_0 \varepsilon_{r2} \frac{K(k_2)}{K(k_2')} \quad (6.6)$$

ve son olarak

$$C_3 = 2\varepsilon_0 \varepsilon_{r3} \frac{K(k_3)}{K(k_3')} \quad (6.7)$$

şeklinde yazılır. $K(k_i)$ birinci dereceden tam eliptik integrali ifade eder, k_i eliptik modülü ve $K(k_i)'$, $K(k_i)$ ' nin $k_i' = \sqrt{1 - k_i^2}$ olmak üzere tamamlayandır (bkz. *Ek Açıklamalar-Eliptik Fonksiyonlar*). Birim uzunluktaki toplam hat sığası

$$C' = C_{1,2} + C_3 \quad (6.8)$$

olarak ifade edilebilir. Burada $C_{1,2}$ Şekil 6.2' deki birbirine seri olarak bağlı C_1 ve C_2 sığalarının eşdeğerini göstermektedir. $C_{1,2}$

$$C_{1,2} = 2\varepsilon_0 \varepsilon_{r2} M \quad (6.9)$$

$$M = \frac{\frac{K(k_1) K(k_2)}{K(k'_1) K(k'_2)}}{\frac{K(k_1)}{K(k'_1)} + \frac{\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r1}} \frac{K(k_2)}{K(k'_2)}}$$

olarak yazılır. Dielektrik materyaller kaldırıldıktan sonra hesaplanan hava sığası C'_0

$$C'_0 = 2\varepsilon_0 \left(\frac{K(k_2)}{K(k'_2)} + \frac{K(k_3)}{K(k'_3)} \right) \quad (6.10)$$

olarak ifade edilirken etkin dielektrik sabiti

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_{r2} M + \varepsilon_{r3} \frac{K(k_3)}{K(k'_3)}}{\frac{K(k_2)}{K(k'_2)} + \frac{K(k_3)}{K(k'_3)}} \quad (6.11)$$

olarak yazılır. Son olarak karakteristik empedans

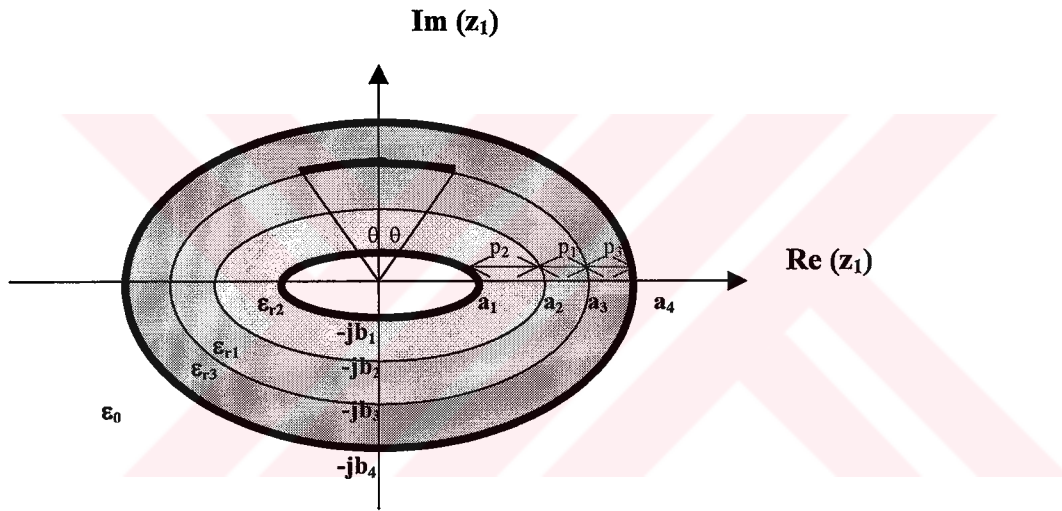
$$Z_0 = \frac{60\pi}{\sqrt{\varepsilon_{eff}} \cdot \left[\frac{K(k_2)}{K(k'_2)} + \frac{K(k_3)}{K(k'_3)} \right]} \quad (6.12)$$

şeklinde ifade edilir.

6.2 Çok Katmanlı Eliptik ve Silindirik Asimetrik Ekranlanmış Şerit İletim Hatlarının Analizleri

ÇKEAEKŞİH' nin kesiti Şekil 6.5' te görülmektedir. Buradaki eş-odaklı eliptik silindirlerin odak uzaklıkları Eş. (4.14)' teki ifade ile gösterilebilir. Burada $i = 1, 2, 3, 4$ olmak üzere a_i ve b_i eliptik silindirlerin yarı büyük ve yarı küçük eksenlerini ifade etmektedir. ÇKEAEKŞİH Eş. 6.13' teki dönüşüm fonksiyonu ile Şekil 6.6' da kesiti görülen ÇKSAEKŞİH' ye dönüştürülür.

$$z_2 = \frac{1}{f}(z_1 \mp \sqrt{z_1^2 - f^2}) . \quad (6.13)$$

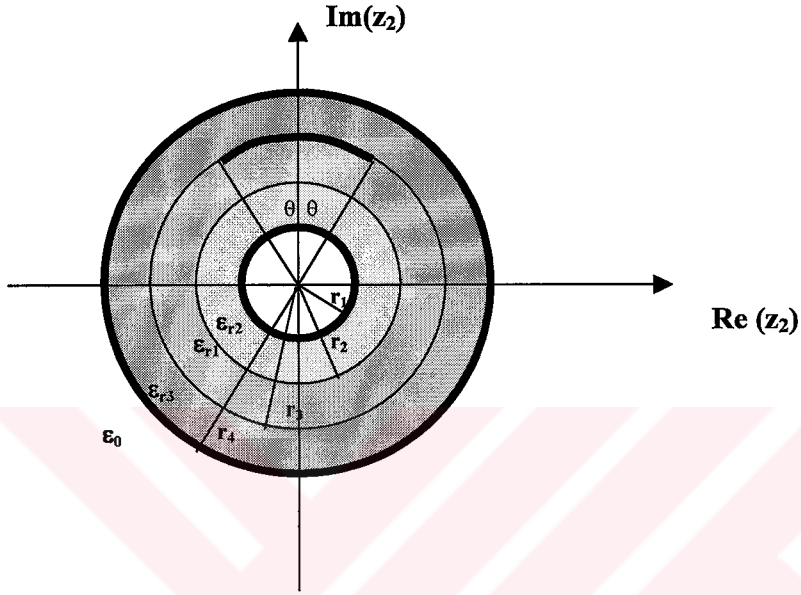


Şekil 6.5 ÇKEAEKŞİH' nin z_1 -düzlemindeki kesit görünüşü.

Elde edilen son yapıdaki yarıçap ifadeleri Eş. (4.16)' daki gibi yazılabilir. Ayrıca, Eş. 6.14' teki dönüşüm fonksiyonu ile ÇKSAEKŞİH

$$z_3 = j \ln(z_2 / r_3) + \pi / 2 \quad (6.14)$$

Şekil 6.1' de görülen ÇKAEKŞİH' ye dönüştürülür.



Şekil 6.6 Dönüşümden sonra ÇKSAEKŞİH' nin z_2 -düzlemindeki kesit görünüşü.

Şekil 6.6' daki ilgili parametreler; dielektrik katmanların kalınlıkları Eş. (4.18)' deki ifadelerle ve

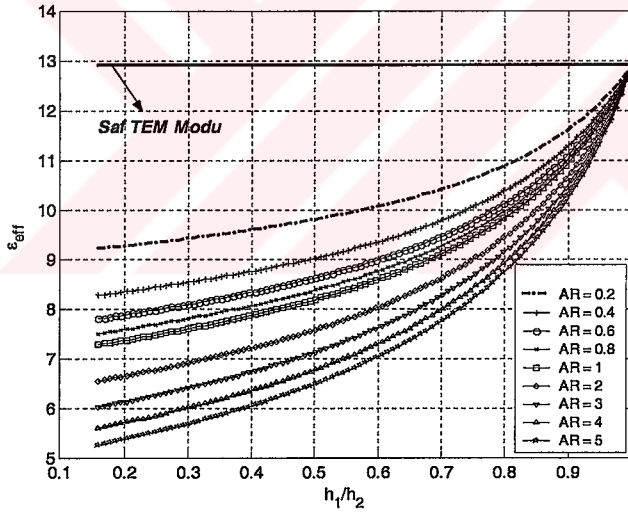
$$w_1 = \theta, w = \pi \quad (6.15)$$

olarak gösterilebilir. Bu ifadeleri yazdıktan sonra Bölüm 6.1' deki eşitliklerle beraber bunları kullanarak ÇKAEKŞİH ve ÇKSAEKŞİH' nin yarı değişken-TEM parametrelerini hesaplamak oldukça kolaydır.

Bölüm 6.1 ve 6.2' de elde edilen ifadeler bir sonraki bölümde, incelenen ÇKAEKŞİH, ÇKSAEKŞİH ve ÇKAEKŞİH' nin fiziksel parametre değişimlerinin bu yapıların etkin dielektrik sabiti ϵ_{eff} ' e ve karakteristik empedansı Z_0' a etkisini incelemek için kullanılacaktır.

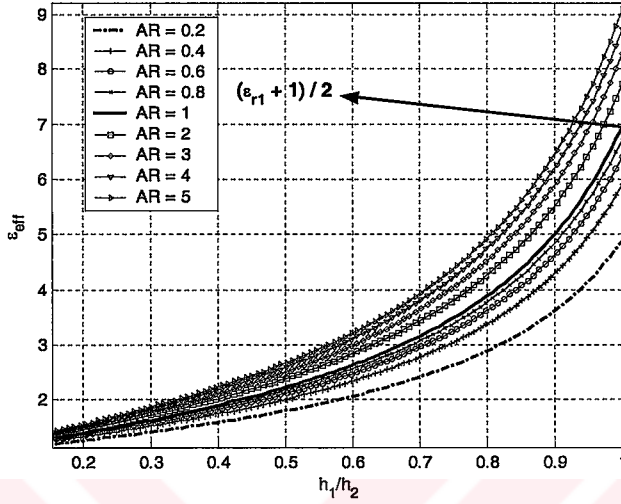
6.3 Sonuç

Şekil 6.7' de görüldüğü gibi ÇKAEKŞİH' nin ϵ_{eff} değeri, h_1/h_2 oranı arttıkça ideal TEM moduna ($\epsilon_r = 12.9$) yaklaşmakta ve $h_1/h_2 = 1$ ' de ((h_2-h_1) ' in sıfır olduğu durum) beklenildiği gibi $\epsilon_{eff} = 12.9$ olmaktadır. Şekil 6.8' de $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$, $w/w_1 = 15$ ve $h_2/w_1 = 8$ değerleri için ϵ_{eff} ' nin h_1/h_2 oranına göre değişimi görülmektedir. Yine burada beklenildiği gibi asimetri oranınının ($AR = h_3/h_2$) ve h_1/h_2 ' nin değeri 1 olduğu zaman ϵ_{eff} ' nin değeri $(\epsilon_{r1} + 1)/2 = 6.95$ olmaktadır.



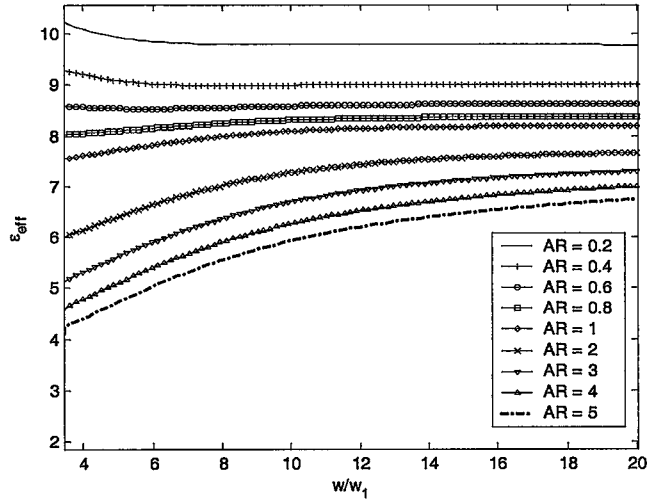
Şekil 6.7 $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = 1$, $w/w_1 = 15$, $h_2/w_1 = 8$ ve farklı AR değerleri için ÇKAEKŞİH' nin ϵ_{eff} değerinin h_1/h_2 ' ye göre değişimi.

Şekil 6.7 ve Şekil 6.8 bu çalışmada elde edilen yöntemi doğrular niteliktedir. Şekil 6.9 ve Şekil 6.10 farklı AR ve $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = 1$, $h_1/h_2 = 0.5$, $h_2/w_1 = 8$ değerleri için ÇKAEKŞİH' nin ϵ_{eff} ve Z_0 değerlerinin w/w_1 oranına göre değişimini göstermektedir.

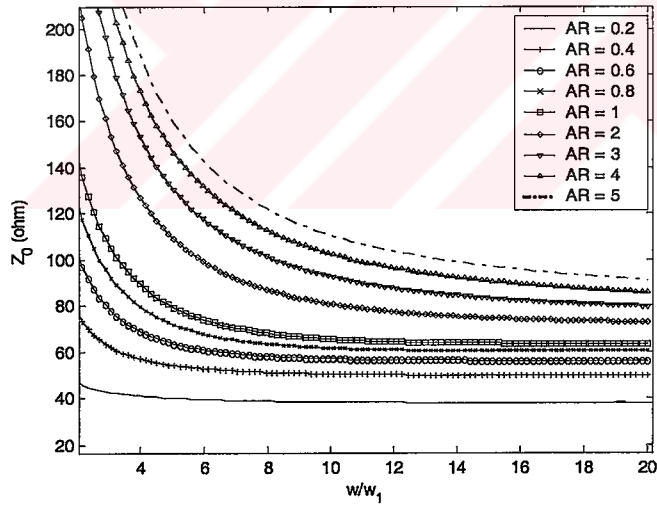


Şekil 6.8 $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$, $w/w_1 = 15$, $h_2/w_1 = 8$ ve farklı AR değerleri için ÇKAEKŞİH' nin ϵ_{eff} değerinin h_1/h_2 ' ye göre değişimi.

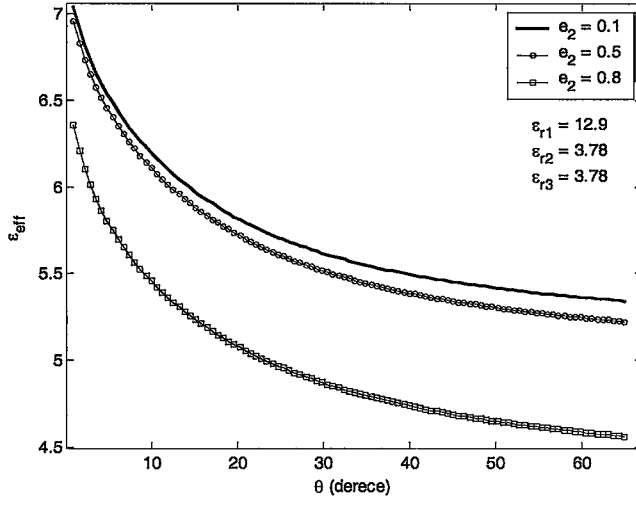
Şekil 6.9' da görüldüğü gibi AR' nin 1 ve 1' den büyük olduğu değerler için w/w_1 arttıkça ϵ_{eff} artmakta, AR' nin diğer değerleri için w/w_1 arttıkça ϵ_{eff} azalmaktadır. w/w_1 oranı belli bir değere kadar arttırıldıktan ($w \rightarrow \infty$) sonra da ϵ_{eff} çok az değişim göstermektedir. Şekil 6.10' da ise w/w_1 arttıkça Z_0 değerinin azaldığı görülmektedir. Yine bir önceki şekilde olduğu gibi w/w_1 oranı belli bir değere kadar arttırıldıktan ($w \rightarrow \infty$) sonra Z_0 çok az değişim göstermektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta AR' nin 0.2 ile 5 arasında değişmesinin dikkate alınmasıdır. Hesaplamaların sadece bu aralıkta yapılmasının nedeni AR' nin 0.2' den küçük ve 5' ten büyük değerler için Nguyen [29] tarafından belirtildiği gibi iki topraktan birisinin ekranlanmış şerit için fonksiyonunu yitirmesi ve yapının artık mikroşerit iletim hattı gibi davranmasıdır.



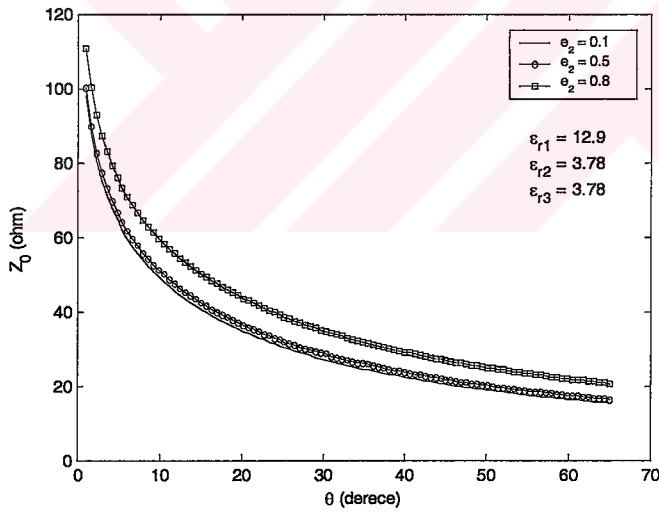
Şekil 6.9 Farklı AR ve $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = 1$, $h_1/h_2 = 0.5$, $h_2/w_1 = 8$ değerleri için ÇKA EKŞİH' nin ϵ_{eff} ' nin w/w_1 oranına göre değişimi.



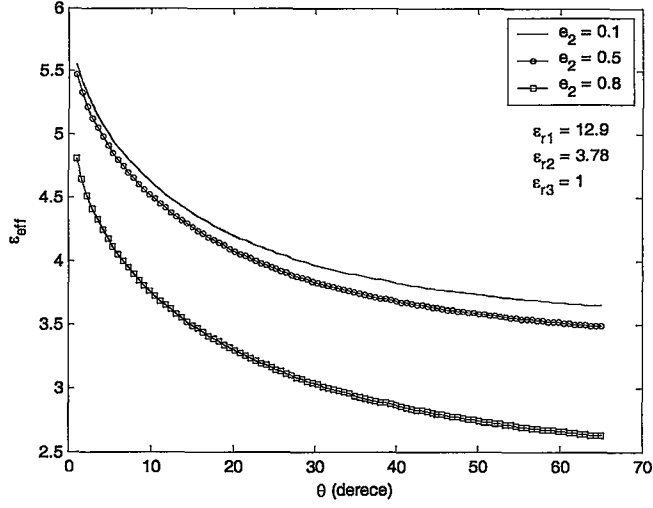
Şekil 6.10 Farklı AR ve $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = 1$, $h_1/h_2 = 0.5$, $h_2/w_1 = 8$ değerleri için ÇKA EKŞİH' nin Z_0 ' ın w/w_1 oranına göre değişimi.



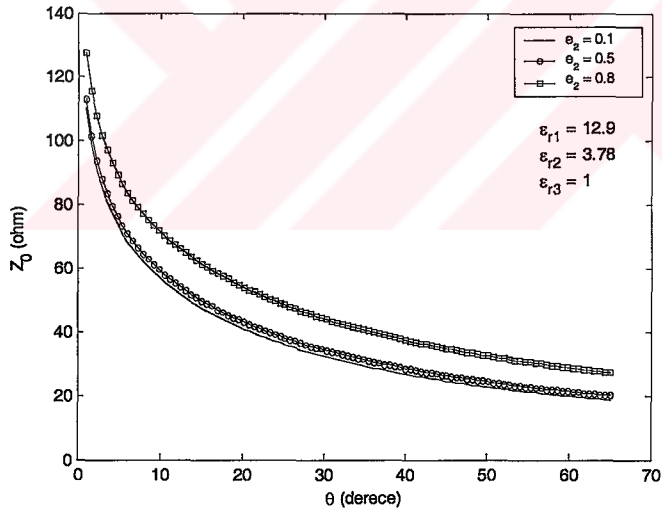
Şekil 6.11 Farklı e_2 ve $p_1/a_2 = 0.6$, $p_2/a_2 = 0.2$, $p_3/a_2 = 0.8$ değerleri için ÇKEAEKŞİH ve eşdeğer ÇKSAEKŞİH' nin ϵ_{eff} ' nin θ ' ya göre değişimi.



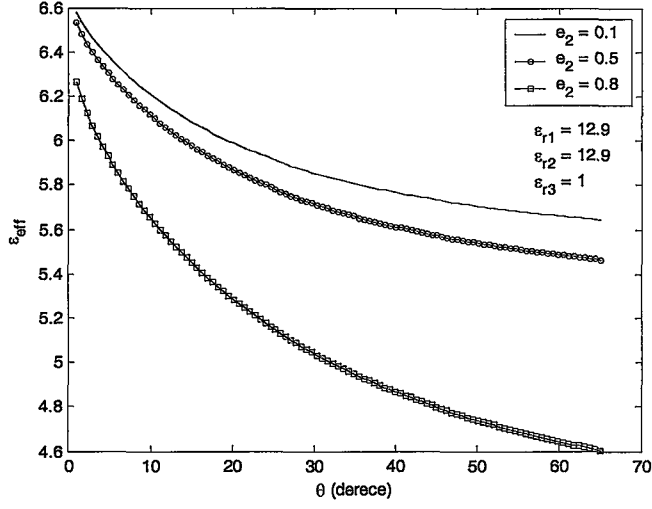
Şekil 6.12 Farklı e_2 ve $p_1/a_2 = 0.6$, $p_2/a_2 = 0.2$, $p_3/a_2 = 0.8$ değerleri için ÇKEAEKŞİH ve eşdeğer ÇKSAEKŞİH' nin Z_0 ' ın θ ' ya göre değişimi.



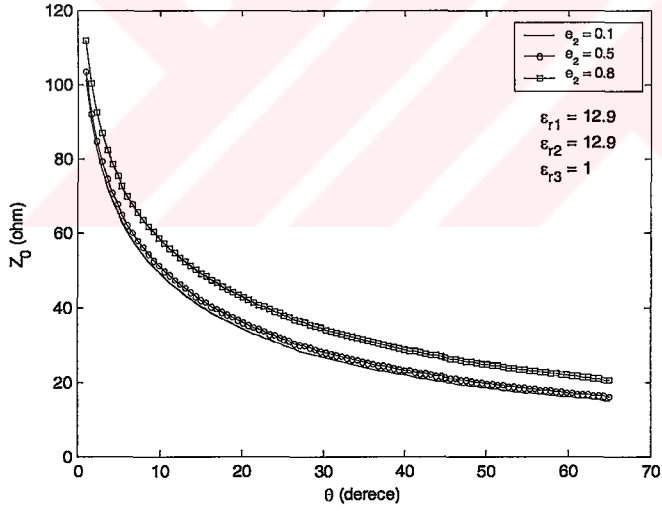
Şekil 6.13 Farklı e_2 ve $p_1/a_2 = 0.6$, $p_2/a_2 = 0.2$, $p_3/a_2 = 0.8$ değerleri için ÇKEAEKŞİH ve eşdeğer ÇKSAEKŞİH' nin ϵ_{eff} ' nin θ ' ya göre değişimi.



Şekil 6.14 Farklı e_2 ve $p_1/a_2 = 0.6$, $p_2/a_2 = 0.2$, $p_3/a_2 = 0.8$ değerleri için ÇKEAEKŞİH ve eşdeğer ÇKSAEKŞİH' nin Z_0 ' ın θ ' ya göre değişimi.

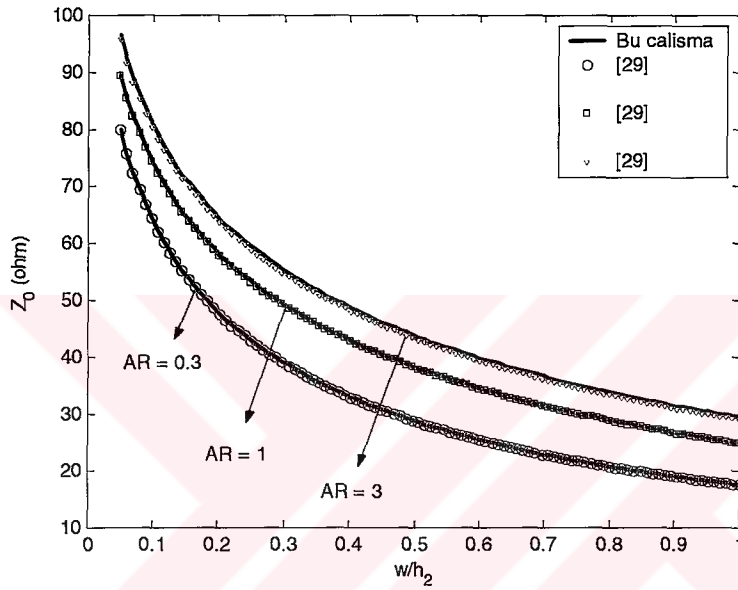


Şekil 6.15 Farklı e_2 ve $p_1/a_2 = 0.6$, $p_2/a_2 = 0.2$, $p_3/a_2 = 0.8$ değerleri için ÇKEAEKŞİH ve eşdeğer ÇKSAEKŞİH' nin ϵ_{eff} ' nin θ ' ya göre değişimi.



Şekil 6.16 Farklı e_2 ve $p_1/a_2 = 0.6$, $p_2/a_2 = 0.2$, $p_3/a_2 = 0.8$ değerleri için ÇKEAEKŞİH ve eşdeğer ÇKSAEKŞİH' nin Z_0 ' ın θ ' ya göre değişimi.

Şekil 6.11-6.16 arasındaki şekillerde farklı dielektrik sabitlerine sahip materyallerin kombinasyonlarıyla oluşturulmuş ÇKEAEKŞİH ve eşdeğer ÇKSAEKŞİH' nin ϵ_{eff} ve Z_0 değerlerinin θ' ya göre değişimi görülmektedir. Burada $p_1 = a_3 - a_2$, $p_2 = a_2 - a_1$ ve $p_3 = a_4 - a_3$ tür. Bu şekillerden anlaşıldığı üzere θ değeri arttıkça ϵ_{eff} ve Z_0 azalmaktadır. Ayrıca, ÇKEAEKŞİH e_2 (ikinci eliptik silindirin eğrilik derecesi) arttıkça ϵ_{eff} değeri azalmakta fakat Z_0 artmaktadır.



Şekil 6.17 ÇKAEKŞİH' nin farklı AR ve $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 12.9$, $\epsilon_{r3} = 1$ değerleri için, Nguyen tarafından kullanılan metot [29] ile bu çalışmada kullanılan yöntemin sonuçlarının Z_0 için w/h_2 oranına göre karşılaştırılması.

Şekil 6.17' de belirtilen değerler için Nguyen [29] tarafından kullanılan metot ile bu çalışmada kullanılan metot w yeterince büyük bir değer alınarak ($w/h_2 = 3$) karakteristik empedans değeri için karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi sonuçlar birbirine çok yakındır. Şekil 6.17' de yapılan karşılaştırmanın sonucu bu kısımda kullanılan yöntemi doğrulayan bir diğer noktadır.

7. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada öncelikle çeşitli geometrilere sahip farklı iletim hatlarının yarı değişken-TEM parametrelerini hesaplamak için kapalı formda mümkün olan en kısa ifadelerin elde edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca KD yöntemiyle daha önce analizleri yapılmamış olan iletim hatlarının da yarı değişken-TEM parametreleri için kapalı formda eşitliklerin elde edilmesi de bu tezin diğer bir amacını oluşturmaktadır. Bu amaçlar doğrultusunda üç farklı geometride (eliptik, silindirik ve sınırlı boyutlarda düzlemsel) üç farklı iletim hattının (şerit iletim hattı, dalga kılavuzu ve ekranlanmış şerit iletim hattı) KD yöntemi kullanılarak yarı değişken-TEM parametreleri için kapalı formda ve BDT için kolay uygulanabilir eşitlikler elde edilmiştir. Elde edilen bu eşitlikler kullanılarak iletim hatlarının karakteristik parametrelerinin bu hatların çeşitli fiziksel büyüklüklerine göre değişimi incelenmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde eliptik, silindirik ve sonlu dielektrik boyutları (hem yükseklik hem de genişlik olarak) olan düzlemsel asimetrik şerit iletim hatlarının yarı değişken-TEM analizleri yapılmıştır. Elde edilen eşitlikler çok katmanlı dielektrik durum için genelleştirilmiştir. Bu kısımda kullanılan yöntemin doğruluğunu göstermek için ilk önce sonlu dielektrik katman boyutlarına sahip asimetrik eş düzlemlerli şerit iletim hattının boyutları $\epsilon_{r1} = 12.9$, $\epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = 1$ değerleri için artırılmıştır. Şekil 4.6' da olduğu gibi her iki boyut arttırıldıkça ϵ_{eff} Akan ve Yazgan tarafından belirtildiği gibi $(\epsilon_{r1} + 1) / 2$ değerine yaklaştığı görülmektedir [26]. Bu bölümde, Du ve diğerleri [23] tarafından kullanılan yöntemin sonuçları Akan ve Yazgan [26] tarafından kullanılan metodun sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. *MATLAB 6.5*[®] kullanılarak yazılan programlar yardımıyla bu iletim hatlarının yarı değişken-TEM parametrelerinin (ϵ_{eff} ve Z_0) çeşitli fiziksel büyüklüklere (dielektrik materyallerin kalınlıklarına, şeritlerin genişliklerine göre vb. gibi) göre değişimleri grafiksel olarak gösterilmiştir. Elde edilen grafiklerin ayrıntılı açıklamaları dördüncü bölümün sonuç kısmında verilmiştir.

Beşinci bölümde ise şerit iletim hatlarının tamamlayıcı yapıları olan dalga kılavuzlarının düzlemsel olmayan geometrideki eliptik ve silindirik yapıdaki asimetrik iletim hatları incelenmiştir. Ayrıca KD yöntemi kullanılarak bu yapıların yarı değişken-TEM parametreleri için kapalı formda eşitlikler elde edilmiş olup elde edilen eşitlikler çok katmanlı dielektrik durum için genelleştirilmiştir. Bu bölümde yapılan çalışmayı doğrulamak için ilk önce elde edilen eşitlikler kullanılarak karakteristik empedans değerleri Karpuz ve Görür [21] tarafından elde edilen değerlerle karşılaştırılmış ve kıyaslanan karakteristik empedans değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Ayrıca Hanna ve Thebault [9, 12] tarafından yapılan çalışmalarda gösterildiği gibi tek katmanlı dielektrik bulunan dalga kılavuzu için dielektrik alttaşı materyalin kalınlığı arttırıldıkça yapının etkin dielektrik sabitinin değerinin $(\epsilon_{r1} + 1) / 2$ 'ye yakınlaştığı bilinmektedir. Şekil 5.11' de görüldüğü gibi bir eliptik dalga kılavuzunun h_1 yeterince büyük ve θ ile sinyal aralıkları ϕ_1 ve ϕ_2 (eş-düzlemli dalga kılavuzunda olduğu gibi) yeterince küçük olduğunda etkin dielektrik sabiti yapının sonsuz dielektrik alttaşı kalınlığına sahip olduğu değere yaklaşmaktadır. *MATLAB 6.5*[®] yazılımı yardımıyla eliptik ve silindirik eş-düzlemli asimetrik dalga kılavuzlarının yarı değişken-TEM parametrelerinin (ϵ_{eff} ve Z_0) bu iletim hatlarının farklı fiziksel büyüklüklerine göre değişimi grafiksel olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu grafikler beşinci bölümün sonuç kısmında kapsamlı olarak irdelenmiştir.

Altıncı bölümde eliptik, silindirik ve sonlu boyutlara sahip asimetrik ekranlanmış şerit iletim hatlarının yarı değişken-TEM parametrelerini hesaplamak için yine KD yöntemi kullanılarak kapalı formda eşitlikler elde edilmiştir. Literatürde homojen olmayan asimetrik ekranlanmış şerit iletim hattı için kullanılan metot geliştirilerek eliptik, silindirik ve sonlu boyutlara sahip asimetrik ekranlanmış şerit iletim hatlarının çok katmanlı dielektriğe sahip olanları için genelleştirilmiştir. Yapıların karakteristik parametrelerini hesaplamak amacıyla kullanılan eşitliklerin doğruluğunu sınamak için ilk olarak Şekil 6.7' de gösterildiği gibi ÇKA EKŞİH' nin ϵ_{eff} değeri, h_1/h_2 oranı arttırıldıkça ideal TEM moduna yaklaşmakta ve h_2 ' nin sıfır olduğu durumda beklenildiği gibi saf TEM moduna ulaşılmaktadır. Bir başka doğrulama için Şekil 6.8' de gösterildiği gibi asimetri oranı AR ve h_1/h_2 ' nin değeri 1 olduğu zaman ϵ_{eff} , $(\epsilon_{r1} + 1) / 2$ ' nin değerini almaktadır. Şekil 6.7 ve Şekil 6.8 bu çalışmada elde edilen eşitlikleri doğrular niteliktedir.

Bunlara ek olarak Şekil 6.17' de görüldüğü gibi Nguyen [29] tarafından kullanılan metot ile bu kısımda kullanılan metodun sonuçları karakteristik empedans değeri için karşılaştırılmış ve kıyaslanan bu değerlerin birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür.

Hazırlanan programlar yardımıyla eliptik, silindirik ve sonlu boyutlara sahip asimetric ekranlanmış şerit iletim hatlarının yarı değişken-TEM parametrelerinin (ϵ_{eff} ve Z_0) bu iletim hatlarının farklı fiziksel büyüklüklerine göre değişimi grafiksel olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu grafikler beşinci bölümün sonuç kısmında kapsamlı olarak yorumlanmıştır. Bu bölümde yapılan analizlerde asimetri oranı AR' nin değerleri 0.2 ile 5 arasında değiştirilmiştir. Bunun nedeni de AR' nin 0.2' den küçük ve 5' ten büyük değerler için Nguyen [29] tarafından belirtildiği gibi iki topraktan birisinin ekranlanmış şerit için fonksiyonunu yitirmesi ve yapının artık mikroşerit iletim hattı gibi davranmasıdır.

Bu tezde çeşitli iletim hatlarının farklı geometrilere uyumlandırılmış durumları ve sınırlı boyutlara sahip düzlemsel olanları için yarı değişken-TEM parametrelerini hesaplamak üzere KD yöntemi kullanılarak kapalı formda kolay ve hızlı uygulanabilir eşitlikler elde edilmiştir. Elde edilen eşitlikler yardımıyla bu iletim hatlarının analizleri yapılmış ve sonuçlar genel literatürdeki metotlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları bu çalışmada kullanılan yöntemleri doğrular niteliktedir. Ayrıca bu çalışma KD yöntemi yardımıyla yapılan analizlerin nümerik metotlara göre BDT uygulamalarında zaman ve hafıza (bilgisayar hesaplamalarında) tasarrufu sağladığını göstermektedir. Bu çalışmanın doğrultusunda elde edilen yöntem ve eşitlikler çalışmayı bir ileri aşamaya taşımak için üzerinde çalışılan iletim hatlarının kayıplarının hesaplanmasında kullanılabilir. Bir başka adım olarak da iletim hatlarının uyumlandırılacağı geometriler daha farklı yapılar olarak seçilebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] L. Zeng and Y. Wang, "Accurate Solutions of Elliptical and Cylindrical Striplines and Microstrip Lines" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-34, No.2, pp. 259-264 Feb. 1986.
- [2] F. W. Carter, "A Note on Airgap and Interpolar Induction", J. Instn Elect. Engrs., 29 (1900), pp.925.
- [3] S.B. Cohn, "Characteristic Impedance of Shielded Strip Transmission Line", IRE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-2, pp. 52-55, July 1954.
- [4] S.B. Cohn, "Shielded Coupled-Strip Transmission Line", IRE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-3, pp. 29-38, Oct. 1955
- [5] G.H. Owyang. and T.T. Wu "The Approximate Parameters of Slot Lines and Their Complement" IRE Trans. Antennas and Propagat., pp. 49-55, Jan. 1958.
- [6] H.A. Wheeler "Transmission-Line Properties of Parallel Wide Strips by a Conformal-Mapping Approximation", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-12, pp. 280-287, Mar. 1964.
- [7] W. Hilberg "From Approximations to Exact Relations for Characteristic Impedances", IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. Vol. MTT-17, No. 5, pp. 259-265 May 1969.
- [8] C. Veyres and V. F. Hanna, "Extension of the Application of Conformal Mapping Technique to Coplanar Lines with Finite", Int. J. Electronics, Vol.48, No.1, pp.47-56, 1980.
- [9] V. F. Hanna and D. Thebault "Analysis of Asymmetrical Coplanar Waveguides" Int. J. Electronics, Vol.50, No.3, pp. 221-224, 1981.
- [10] M.Kirschning and R.H. Jansen, "Accurate Model for Effective Dielectric Constant of Microstrip with Validity Up to Millimeter-Wave Frequencies" Electron. Lett., vol. 18, pp. 272-273, Mar.1982.
- [11] G. Ghione and C. Naldi "Analytical Formulas For Coplanar Lines in Hybrid and Monolithic MICs" Electron. Lett., Vol.20, No.4, pp.179-181, Feb. 1984.
- [12] V.F. Hanna and D. Thebault "Theoretical and Experimental Investigation of Asymmetric Coplanar Waveguides" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-32, No.12, pp. 1649-1651 Dec. 1984.
- [13] G. Ghione and C. Naldi "Coplanar Waveguides for MMIC Applications: Effect of Upper Shielding, Conductor Backing, Finite-Extent Ground Planes, and Line-to-Line Coupling" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-35, No.3, pp. 260-267 March 1987.

- [14] S. Rawal and D. R. Jackson "An Exact TEM Calculation of Loss in a Stripline of Arbitrary Dimensions" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 39, No. 4, pp. 694-699, Apr. 1991.
- [15] J. Svacina "Analysis of Multilayer Microstrip Lines by a Conformal Mapping Method" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 40, No.4, pp. 769-772, Apr. 1992.
- [16] G. Ghione "A CAD-Oriented Analytical Model for the Losses of General Asymmetric Coplanar Lines in Hybrid and Monolithic MICs" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol.41, No.9, pp. 1499-1510 Sep. 1993.
- [17] S.S.Zhong, G. Liu, and G. Qasim "Closed Form Expressions for Resonant Frequency of Rectangular Patch Antennas with Multidielectric Layers" IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. 42, No.9, pp.1360-1363, Sep. 1994.
- [18] C. Karpuz, A.Görür, H. Görür and M. Alkan "Fast and Simple Analytical Expressions For Quasistatic Parameters of Asymmetric Coplanar Lines" Microwave Opt. Tech. Lett. Vol. 9, Vol.6, pp. 334-336, Aug. 20, 1995.
- [19] Görür, C. Karpuz and M. Alkan "Quasistatic TEM Characteristics of Overlaid Supported Asymmetric Coplanar Waveguides" Int. J. Micr. And Milli.- Wave Comp.-Aid. Eng., Vol.6, No. 5, pp. 297-304, 1996.
- [20] J.T. Bernhard and C.J. Tousignant "Resonant Frequencies of Rectangular Microstrip Antennas with Flush and Spaced Dielectric Superstrates" IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. 47, No. 2, pp., Feb. 1999.
- [21] C. Karpuz and A. Görür, "Quasistatic Solutions of Elliptical Coplanar Waveguides", Microwave and Optical Tech. Letters, Vol.20, No.6, pp.385-389, March 1999.
- [22] G. Ghione, M. Goana, GL. Madonna, G. Omegna, M. Pirola, S. Boss, D. Frassati and A. Perasso "Microwave Modelling and Characterization of Thick Coplanar Waveguides on Oxide-Coated Lithium Niobate Substrates for Electrooptical Applications" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 47, No. 12, pp. 2287- 2293 Dec. 1999.
- [23] Z.W. Du, K. Gong, J. S. Fu, Z. Feng and B. Gao, "CAD Models for Asymmetrical, Elliptical, Cylindrical, and Elliptical Cone Coplanar Strip Lines", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 48, No.2, Feb. 2000.
- [24] R.N. Simons "Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems" New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [25] M. Goana, F. Bertazzi, P. Caravelli, G. Ghione and T. A. Driscoll "A General Conformal-Mapping Approach to the Optimum Electrode Design of Coplanar Waveguides With Arbitrary Cross Section" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 49, No. 9, pp. 1573-1580, Sept. 2001.

- [26] V. Akan and E. Yazgan "A Simple Formulation For Quasistatic Parameters of Elliptical, Cylindrical and Asymmetrical Coplanar Strip Lines", *Microwave Opt. Tech. Lett.*, Vol.41, No.1, pp.18-21, Apr. 5, 2004.
- [27] E. B. Christoffel, *Ann. Mat. Pura appl.*, 1, 1867.
- [28] R. K. Hoffmann (translated by G. A. Ediss and N. J. Keen), "Handbook of Microwave Integrated Circuits", Artech House, 1987.
- [29] C. Nguyen, "Analysis Methods for RF, Microwave, and Millimeter-Wave Planar Transmission Line Structures", USA: John Wiley & Sons, 2000.
- [30] R. Schinzinger "Conformal Transformations in the Presence Of Field Components Along A Third Axis-Part I", *Int. J. Elect. Enging. Educ.* Vol.13, pp.76-89, Manchester U.P., 1976.
- [31] E. J. Routh, "The Advanced part of a Treatise on the Dynamics of a System of Rigid Bodies", as Part II of a Treatise on the Whole Subject, pp 461-467, 6th, edition Dover (1905).
- [32] H. H. Meinke "Die Anwendung der konformen abbildung auf Wellenfelder", *Zeitschrift F. Angew., Physik*, 1, pp.245-252 (1949).
- [33] H.H. Meinke "Ein allgemeines Loesungsverfahren fuer inhomogene Zylindersymmetrizche Wellenfelder", *Zeitschrift F. Angew., Physik*, 1, pp.509-516 (1949).
- [34] R. Piloty jun. "Die Anwendung der konformen Abbildung auf die Feldgleichungen in inhomogenen Rechteckrohren", *Zeitschrift F. Angew., Physik*, 1, pp.441-448 (1949).
- [35] H.H. Meinke "Das Verhalten elektromagnetischer Wellen instark inhomogenen Leitungsbauerelementen", *Zeitschrift F. Angew., Physik*, 2, pp.473-478 (1950).
- [36] P.A. Laura "Calculations of Eigenvalues for Uniform Fluid Waveguides with Complicated Cross Sections", *J. Acoustical Soc. Am.*, 42, pp. 21-26 (1967).
- [37] J.H. Richter "Application Conformal Mapping to Earth-Flatening Procedures in Radio Propagation Problems", *Radio Science*, 1, pp.1435-1438 (1966).
- [38] R.A. Pappert "A Numerical Study of VLF Mode Structure and Polarization Below an Anisotropic Ionosphere", *Radio Science*, 3, pp.219-233 (1968).
- [39] S.O. Rice "Reflection From Corners in Rectangular Wave Guides – Conformal Transformation", *Bell System Tech. J.*, 28, pp. 104-135 (1949).
- [40] E. Kreyszig, "Advanced Engineering Mathematics" Singapore: John Wiley & Sons, 1993.

- [41] R.V. Churchill and J.W. Brown, "Complex Variables and Applications", USA: Mc Graw Hill, 1990.
- [42] W. J. Gibbs, "Conformal Mappings in Electrical Engineering" London, Chapman & Hall, 1958.
- [43] J.B. Knorr and K.D. Kuchler, "Analysis of Coupled Slots and Coplanar Strips on Dielectric Substrate", IEEE Trans. On Microwave Theory Tech., MTT-23 (1975), pp.541-547.
- [44] E. Chen and S.Y. Chou, "Characteristics of Coplanar Transmission Lines on Multilayer Substrates: Modelling and Experiments", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 45, No.6, June 1997.
- [45] P. F. Byrd and M. D. Friedman, "Handbook of Elliptic Integrals for Engineers and Scientists", Second Edition, Revised, New York: 1971.
- [46] D. Schaum' s, Complex Variables, Mc-Graw Hill, 1964.



EK AÇIKLAMALAR

ELİPTİK FONKSİYONLAR

Aşağıda verilen integral

$$z = \int_0^w \frac{dt}{\sqrt{(1-t^2)(1-k^2t^2)}} \quad |k| < 1 \quad (\text{E.1})$$

birinci derece eliptik integral olarak adlandırılır. Bu integral w gerçektir ve $|w| < 1$ ise mevcuttur. Analitik süreklilikle beraber bu ifade w 'nin başka değerleri olarak yazılabilir. $t = \sin \theta$ ve $w = \sin \phi$ eşitlikleri yazılırsa Eş. (E.1)'deki integral aşağıdaki gibi ifade edilebilir [46].

$$z = \int_0^w \frac{d\theta}{\sqrt{(1-k^2 \sin^2 \theta)}} \quad (\text{E.2})$$

burada $\phi = \text{am } z$ olarak ifade edilir.

Eş. (E.1)'de $k = 0$ durumunda $z = \sin^{-1} w$ veya $w = \sin z$ ifadeleri yazılabilir. Bir diğer deyişle trigonometrideki benzerlikle beraber $k \neq 0$ olduğu zaman Eş. (E.1), $\text{sn}^{-1}(w, k)$ (k değişiklik göstermediği takdirde) veya kısaca $\text{sn}^{-1}(w)$ olarak yazılır. Bu nedenle

$$z = sn^{-1} w = \int_0^w \frac{dt}{\sqrt{(1-t^2)(1-k^2t^2)}} \quad (\text{E.3})$$

yazılabilir. Bu eşitlikten de *eliptik fonksiyon* veya *Jacobian eliptik fonksiyonu* olarak adlandırılan $w = sn z$ ifadesine ulaşılır.

Trigonometrik fonksiyonlar da olduğu gibi diğer eliptik fonksiyonlar tanımlanacak olursa

$$cn z = \sqrt{1 - sn^2 z}, \quad dn z = \sqrt{1 - k^2 sn^2 z} \quad (\text{E.4})$$

olarak yazılabilir. Kullanılan bir diğer fonksiyon ise

$$tn z = \frac{(sn z)}{(cn z)} \quad (\text{E.5})$$

şeklinde dir.

Aşağıda bu fonksiyonların çeşitli özellikleri sıralanmıştır:

1. $sn(0) = 0, cn(0) = 1, dn(0) = 1, sn(-z) = -sn z,$
 $cn(-z) = cn z, dn(-z) = dn z$

$$2. \quad \frac{d}{dz} sn z = cn z \, dn z, \quad \frac{d}{dz} cn z = -sn z \, dn z,$$

$$\frac{d}{dz} dn z = -k^2 sn z \, dn z$$

$$3. \quad sn z = \sin(am z), \quad cn z = \cos(am z)$$

$$4. \quad sn(z_1 + z_2) = \frac{sn z_1 \, cn z_2 \, dn z_2 + cn z_1 \, dn z_1 \, sn z_2}{1 - k^2 sn^2 z_1 \, sn^2 z_2} \quad (\text{E.6})$$

$$cn(z_1 + z_2) = \frac{cn z_1 \, cn z_2 - sn z_1 \, sn z_2 \, dn z_1 \, dn z_2}{1 - k^2 sn^2 z_1 \, sn^2 z_2} \quad (\text{E.7})$$

$$dn(z_1 + z_2) = \frac{dn z_1 \, dn z_2 - k^2 sn z_1 \, sn z_2 \, cn z_1 \, cn z_2}{1 - k^2 sn^2 z_1 \, sn^2 z_2} \quad (\text{E.8})$$

En son yazılan eşitlikler eliptik fonksiyonlar için kullanılan *toplam formülleri* olarak adlandırılırlar.

5. Eliptik fonksiyonlar iki ayrı periyoda sahiptirler ve bu nedenle *çift-peryotlu* fonksiyonlar olarak adlandırılırlar.

$$K = \int_0^1 \frac{dt}{\sqrt{(1-t^2)(1-k^2 t^2)}} = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \theta}} \quad (\text{E.9})$$

$$K' = \int_0^1 \frac{dt}{\sqrt{(1-t^2)(1-k'^2 t^2)}} = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{(1-k'^2 \sin^2 \theta)}} \quad (\text{E.10})$$

burada k ve k' sırasıyla modül ve tamamlayıcı modül olarak isimlendirilirler. Aralarındaki ilişki $k' = \sqrt{1-k^2}$ şeklindedir. $\text{Sn } z$ fonksiyonunun periyotları $4K$ ve $2jK'$, $\text{cn } z$ fonksiyonunun $4K$ ve $2K + 2jK'$ ve $\text{dn } z$ fonksiyonunun periyotları $2K$ ve $4jK'$ dir. Karmaşık düzlemde bir eliptik fonksiyonunun değerlerini tekrar ettiği periyodik paralelogramlar kümesi (periyot paralelogramları olarak adlandırılırlar) mevcuttur. Bunlardan en küçük olanı *birim hücre* veya kısaca *hücre* olarak isimlendirilir.



EK 1

SÖZLÜK

Asymmetric Coplanar Strip Line	:	Asimetrik Eş-düzlemli Şerit İletim Hattı
Asymmetric Coplanar Waveguide	:	Asimetrik Eş-düzlemli Dalga Kılavuzu
Asymmetric Shielded Strip Line	:	Asimetrik Ekranlanmış Şerit İletim Hattı
Boundary value problem	:	Sınır değer problemi
Capacitor, Capacity, Capacitive	:	Sığaç, Sığa, Sıgal
Characteristic Impedance	:	Karakteristik Empedans
Chip	:	Yonga
Complex	:	Karmaşık
Computer Aided Design (CAD)	:	Bilgisayar Destekli Tasarım (BDT)
Conformal Transformation Method	:	Konformal Dönüşüm Yöntemi
Coupler	:	Bağlaştırıcı
Cross Talk	:	Çapraz Karışma
Cylindrical Asymmetric Coplanar Strip Line	:	Silindirik Asimetrik Eş-düzlemli Şerit İletim Hattı
Cylindrical Asymmetric Coplanar Waveguide	:	Silindirik Asimetrik Eş-düzlemli Dalga Kılavuzu
Cylindrical Asymmetric Shielded Strip Line	:	Silindirik Asimetrik Ekranlanmış Şerit İletim Hattı
Deposit	:	Çökeltmek
Differential Equation	:	Türevsel Denklem
Eccentricity	:	Eğrilik Derecesi
Effective Dielectric Constant	:	Etkin Dielektrik Sabiti
Effective Permittivity	:	Etkin Elektriksel Geçirgenlik
Elliptical Asymmetric Coplanar Strip Line	:	Eliptik Asimetrik Eş-düzlemli Şerit İletim Hattı

Elliptical Asymmetric Coplanar Waveguide	:	Eliptik Asimetrik Eş-düzlemlî Dalga Kılavuzu
Elliptical Asymmetric Shielded Strip Line	:	Eliptik Asimetrik Ekranlanmış Şerit İletim Hattı
Finite Difference Method	:	Sonlu Farklar Yöntemi
Guide Wavelength	:	Kılavuz Dalga Boyu
Hybrid Circuit	:	Karma Devre
Insulator	:	Yalıtkan
Integral Equation Method	:	İntegral Eşitlik Yöntemi
Line Capacitance	:	Hat Sığası
Monolithic Circuit	:	Tektaş Devre
Multilayer	:	Çok Katmanlı
Oscillator	:	Salıngaç
Quasi-static TEM	:	Yarı-değişken TEM
Semi-major Axis	:	Yarı-büyük eksen
Semi-minor Axis	:	Yarı-küçük eksen
Slot Line	:	Yuvalı Hat
Substrate	:	Alttaş
Superposition Method	:	Üstdüşüm Yöntemi
Superstrate	:	Üsttaş
Suspended Substrate Strip Line	:	Askılı Şerit Kılavuz İletim Hattı
Variational Method	:	Varyasyonel Yöntemi

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Volkan Akan

Doğum Yeri : Konya

Doğum Yılı : 1979

Medeni Hali : Evli

Eğitim ve Akademik Durumu:

Lise :1994-1997 Antalya Karatay Lisesi

Lisans:1997-2001 Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil: İngilizce

İş Tecrübesi:

2001-... Araştırma Görevlisi - Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü