

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OPTİK KUPLÖR TASARIMI

Elektronik ve Haberleşme Müh. Pınar ÖZKAN BAKBAK

**FBE Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı Haberleşme Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. N. Özlem ÜNVERDİ

İSTANBUL, 2008

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OPTİK KUPLÖR TASARIMI

Elektronik ve Haberleşme Müh. Pınar ÖZKAN BAKBAK

**FBE Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı Haberleşme Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. N. Özlem ÜNVERDİ

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖNSÖZ	xii
ÖZET	xi
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ.....	14
2 OPTİK DALGA KILAVUZLARINDA MODAL ANALİZ.....	17
2.1 Optik Dalga Kılavuzlarının Özellikleri ve Maxwell Eşitlikleri.	17
2.2 Düzlemsel Yapıdaki Katmanlı (Slab) Optik Dalga Kılavuzu.	19
2.3 TE Modları.	21
2.3.1 Kılavuzlanmış Çift TE Modları.	21
2.3.2 Kılavuzlanmış Tek TE Modları.....	22
2.3.3 TE Modları Karakteristik Denklemi.	24
2.4 TM Modları.....	25
2.4.1 Kılavuzlanmış Çift TM Modları.....	26
2.4.2 Kılavuzlanmış Çift TM Modları.....	26
3 SİLİNDİRİK YAPIDAKİ OPTİK DALGA KILAVUZLARINDA MODAL ANALİZ.....	28
3.1 Basamak İndisli Silindirik Yapıdaki Optik Fiberlerde Modal Analiz.	28
3.2 Basamak İndisli Fiberler için Sınır Koşulları ve Karakteristik Denklem.	28
3.3 Mod Kesim Koşulları.....	34
3.4 Silindirik Yapıdaki Optik Dalga Kılavuzlarında İletilen Modlar ve Kesim Koşulları.....	36
3.5 Zayıfça Kılavuzlama Yaklaşımı ve Hibrid Modlar.....	38
3.6 Yumuşak Geçişli Optik Fiberde WKBJ (Wentzel, Kramers, Brillouin, Jefferies) Analizi.....	39
3.7 Sızıntılı Modlar.....	41
3.8 Radyasyon Alanları	42
3.8.1 Katmanlı Dalga Kılavuzlarında Radyasyon Modları	42
3.8.1.1 Çift TE Radyasyon Modları.....	43
3.8.1.2 Tek TE Radyasyon Modları.....	44
3.8.1.3 Çift TM Radyasyon Modları.....	45
3.8.1.4 Tek TM Radyasyon Modları.....	45
4 OPTİK DALGA KILAVUZLARI ARASINDA KUPLAJLAMA.....	47
4.1 Kuple Mod Teorisi.....	47

4.1.1	Modların Uzay Domeninde Kuplajı.....	47
4.1.2	Modların Zaman Domeninde Kuplajı.....	49
4.1.3	Modların Frekans Domeninde Kuplajı	50
4.2	Propagasyon Sabitindeki Değişim.....	51
4.3	Kuplaj Katsayıları.....	52
4.4	Kuple Katmanlı Yapıdaki Optik Dalga Kılavuzları	54
4.4.1	Kuple Kılıflı Düzlemsel Yapıdaki Katmanlı (Slab) Optik Dalga Kılavuzlarında Propagasyon Sabiti Değişiminin ve Kuplaj Katsayısının İncelenmesi.....	54
4.4.1.1	TE Çift ve Tek Modları.....	55
4.4.1.2	TM Çift ve Tek Modları	58
4.4.2	Kuple Kılıfsız Optik Dalga Kılavuzlarında Propagasyon Sabitinin Değişiminin İncelenmesi	60
4.4.2.1	TE Çift ve Tek Modları	61
4.4.2.2	TM Çift ve Tek Modları	62
5	TASARIM UYGULAMALARI	65
5.1	Tasarım 1.....	65
5.2	Tasarım 2.....	76
5.3	Tasarım 3.....	78
5.4	Tasarım 4.....	84
6	YAPAY SİNİR AĞLARI	87
6.1	Yapay Sinir Ağlarının Genel Özellikleri	87
6.2	Radyal Fonksiyon Tabanlı Ağlar.....	88
6.3	Yapay Sinir Ağı Modeli.....	88
7	SONUÇLAR	91
	KAYNAKLAR	92
	EKLER	94
Ek 1	Kuple Optik Dalga Kılavuzları için Tasarım Uygulaması Yazılımları	95
Ek 2	RBF yapay sinir ağına kullanılmak üzere hazırlanan veri kümesi örneği.....	97
Ek 3	Modal analiz ve YSA(RBF) sonuçları	99
	ÖZGEÇMİŞ.....	100

SİMGE LİSTESİ

γ	Optik fiberin kılıf bölgesinin özdeğeri
κ	Optik fiberin çekirdek bölgesinin özdeğeri
ρ	Optik fiberin kılıf bölgesini saran ortamın özdeğeri
ω	Açısal frekans
ν	Azimutal mod sayısı
$J_\nu(x)$	ν . dereceden birinci cins Bessel fonksiyonu
$H_\nu^{(1)}(x)$	ν . dereceden birinci cins Hankel fonksiyonu
$H_\nu^{(2)}(x)$	ν . dereceden ikinci cins Hankel fonksiyonu
E	Elektrik alan
H	Magnetik alan
n_1	Optik fiberin çekirdek bölgesinin kırılma indisi
n_2	Optik fiberin kılıf bölgesinin kırılma indisi
n_3	Optik fiberin kılıf bölgesini saran ortamın kırılma indisi
μ	Ortamın magnetik geçirgenliği (permeabilite)
μ_0	Serbest uzayın magnetik geçirgenliği
ϵ	Ortamın dielektrik sabiti (permittivite)
ϵ_1	Çekirdek bölgesi dielektrik sabiti
ϵ_2	Kılıf bölgesi dielektrik sabiti
k	Dalga sayısı
k_0	Serbest uzaydaki dalga sayısı
β	Propagasyon sabiti (faz sabiti)
α	Zayıflama sabiti
c_{ik}	i. mod ile k. mod arasındaki kuplaj katsayısı
c_{ii}	Öz kuplaj katsayısı
$a_i(z)$	β_i propagasyon sabitine sahip modun genlik fonksiyonu
A	Silindirik optik dalga kılavuzunun çekirdek bölgesindeki elektrik alanın katsayısı
B	Silindirik optik dalga kılavuzunun çekirdek bölgesindeki magnetik alanın katsayısı
C	Silindirik optik dalga kılavuzunun kılıf bölgesindeki elektrik alanın katsayısı
D	Silindirik optik dalga kılavuzunun kılıf bölgesindeki magnetik alanın katsayısı
d	Optik dalga kılavuzunun çekirdek bölgesinin yarıçapı
A_1	Katmanlı (slab) dalga kılavuzunda çift TE modu çekirdek bölgesi elektrik alan katsayısı
A_2	Katmanlı dalga kılavuzunda çift TE modu kılıf bölgesi elektrik alan katsayısı
B_1	Katmanlı dalga kılavuzunda tek TE modu çekirdek bölgesi elektrik alan katsayısı
B_2	Katmanlı dalga kılavuzunda tek TE modu kılıf bölgesi elektrik alan katsayısı
C_1	Katmanlı dalga kılavuzunda çift TM modu çekirdek bölgesi magnetik alan katsayısı
C_2	Katmanlı dalga kılavuzunda çift TM modu kılıf bölgesi magnetik alan katsayısı
D_1	Katmanlı dalga kılavuzunda tek TM modu çekirdek bölgesi magnetik alan katsayısı
D_2	Katmanlı dalga kılavuzunda tek TM modu kılıf bölgesi magnetik alan katsayısı

$\Delta\beta$	Propagasyon sabiti değişimi
d_1	Katmanlı kuple optik dalga kılavuzlarında birinci kılavuzun yarıçapı
d_2	Katmanlı kuple optik dalga kılavuzlarında ikinci kılavuzun yarıçapı
S_1	Kılıflı katmanlı kuple optik dalga kılavuzlarında birinci kılavuzun kılıfla beraber yarıçapı
S_2	Kılıflı katmanlı kuple optik dalga kılavuzlarında ikinci kılavuzun kılıfla beraber yarıçapı
U	Katmanlı kuple optik dalga kılavuzlarında iki çekirdek eksenindeki mesafe
N	Tasarlanan optik kuplörde kılavuzların dış yüzeyleri arasındaki değişken mesafe
N_1	Tasarlanan optik kuplörde kılavuzların dış yüzeyleri arasındaki min mesafe
N_2	Tasarlanan optik kuplörde kılavuzların dış yüzeyleri arasındaki max mesafe
ϕ	Tasarlanan optik kuplörde kılavuzların uzantılarının kesişim açısı

KISALTMA LİSTESİ

TE	Transverse Electric (Enine Elektrik)
TM	Transverse Magnetic (Enine Magnetik)
EH	Elektrik Magnetik Hibrid Modları
HE	Magnetik Elektrik Hibrid Modları
WKB	Wentzel, Kramers, Brillouin
YSA	Yapay Sinir Ağları
RBF	Radyal Fonksiyon Tabanlı Ağlar

Şekil 2.1	Katmanlı (Slab) yapıdaki optik dalga kılavuzu modeli.....	20
Şekil 2.2	Katmanlı yapıdaki optik dalga kılavuzlarında TE tek ve çift modlarının karakteristik denklemi grafiği.....	25
Şekil 3.1	Silindirik yapıdaki optik fiber.....	28
Şekil 3.2	Kırılma indisi profili.....	28
Şekil 3.3	Silindirik yapıdaki optik dalga kılavuzlarında iletilen modlar ve kesim koşulları.....	36
Şekil 3.4	Yumuşak geçişli indis profilili fiber.....	39
Şekil 3.5	Yumuşak geçişli indise sahip fiberde k 'nın değişimi.....	41
Şekil 3.6	Yumuşak geçişli fiberlerde sızıntılı modlar.....	42
Şekil 3.7	Kılavuzlanmış ve radyasyon modların propagasyon sabiti.....	43
Şekil 4.1	Kuple kılıflı ve düzlemsel yapıdaki katmanlı paralel dalga kılavuzunun kuplajı.....	54
Şekil 4.2	Kuple kılıfsız özdeş optik dalga kılavuzları.....	59
Şekil 4.3	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_1 = 130\mu m$ durumunda, TE modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.....	64
Şekil 4.4	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_1 = 130\mu m$ durumunda, TM modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.....	65
Şekil 4.5	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_2 = 132,5\mu m$ durumunda, TE modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.....	65
Şekil 4.6	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_2 = 132,5\mu m$ durumunda, TM modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.....	66
Şekil 4.7	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_3 = 135\mu m$ durumunda, TE modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.....	66
Şekil 4.8	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_3 = 135\mu m$ durumunda, TM modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.....	67
Şekil 4.9	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_1 = 130\mu m$ durumunda, TE modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin kılıf bölgesinin yarıçapına göre değişim.....	68
Şekil 4.10	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_1 = 130\mu m$ durumunda, TM modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin kılıf bölgesinin yarıçapına göre değişimi.....	68
Şekil 4.11	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_2 = 132,5\mu m$ durumunda, TE modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin kılıf bölgesinin yarıçapına göre değişimi.....	69
Şekil 4.12	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_2 = 132,5\mu m$ durumunda, TM modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin kılıf bölgesinin yarıçapına göre değişimi.....	69
Şekil 4.13	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_3 = 135\mu m$ durumunda, TE modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin kılıf bölgesinin yarıçapına göre değişimi.....	70
Şekil 4.14	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda,	

	$U_3 = 135\mu m$ durumunda, TM modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin kılıf bölgesinin yarıçapına göre değişimi.....	70
Şekil 4.15	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U = 135\mu m$ durumunda, kılıf bölgesinde TE modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin optik fiberlerin arasındaki mesafeye göre değişimi.....	71
Şekil 4.16	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U = 135\mu m$ durumunda, kılıf bölgesinde TM modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin optik fiberlerin arasındaki mesafeye göre değişimi.....	72
Şekil 4.17	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $n_1=1.5$ ve $n_2=1.49$ durumunda, TE modlarının kuplajlanması durumunda, propagasyon sabitindeki değişimin kılıf bölgesini saran dış ortamın kırılma indisine göre değişimi.....	73
Şekil 4.18	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $n_1=1.5$ ve $n_3=1$ durumunda TE modlarının kuplajlanması durumunda, propagasyon sabitindeki değişimin kılıf bölgesinin kırılma indisine göre değişimi.....	73
Şekil 4.19	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $n_2=1.49$ ve $n_3=1$ durumunda TE modlarının kuplajlanması durumunda, propagasyon sabitindeki değişimin çekirdek bölgesinin kırılma indisine göre değişimi.....	74
Şekil 4.20	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, paralel ve özdeş olmayan iki optik dalga kılavuzunda, $U_1 = 130\mu m$ mesafesinde, TE modlarının kuplajlanması durumunda, propagasyon sabitindeki değişimin ikinci kılavuzun çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.....	75
Şekil 4.21	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, paralel ve özdeş olmayan iki optik dalga kılavuzunda, $U_2 = 132.5\mu m$ mesafesinde, TE modlarının kuplajlanması durumunda, propagasyon sabitindeki değişimin ikinci kılavuzun çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.....	76
Şekil 4.22	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, paralel ve özdeş olmayan iki optik dalga kılavuzunda, $U_3 = 135\mu m$ mesafesinde, TE modlarının kuplajlanması durumunda propagasyon sabitindeki değişimin ikinci kılavuzun çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.....	76
Şekil 4.23	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, paralel ve özdeş iki optik dalga kılavuzunda, belirtilen propagasyon sabiti değerlerinde TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısının çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi..	77
Şekil 4.24	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, paralel ve özdeş iki optik dalga kılavuzunda, belirtilen propagasyon sabiti değerlerinde TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısının kılıf bölgesinin yarıçapına göre değişimi.....	78
Şekil 4.25	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, paralel ve özdeş iki optik dalga kılavuzunda, $n_1=1.5$ ve $n_2=1.49$ durumunda, TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısındaki değişimin kılıfı saran dış ortamın kırılma indisine göre değişimi.....	78
Şekil 4.26	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, paralel ve özdeş iki optik dalga kılavuzunda, $n_1=1.5$ ve $n_3=1$ durumunda, çekirdek bölgesinde TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısındaki değişimin kılıf bölgesi kırılma indisine göre değişimi.....	79

Şekil 4.27	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, paralel ve özdeş iki optik dalga kılavuzunda, $n_2=1.45$ ve $n_3=1$ durumunda, TE modlarının kuplajında meydana gelen kuplaj katsayısındaki değişimin çekirdek bölgesi kırılma indisi değişimine göre grafiği.....	80
Şekil 4.28	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, paralel ve özdeş iki optik dalga kılavuzunda, $n_2=1.47$ ve $n_3=1$ durumunda, TE modlarının kuplajında meydana gelen kuplaj katsayısındaki değişimin çekirdek bölgesi kırılma indisi değişimine göre grafiği.....	81
Şekil 4.29	Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, paralel ve özdeş iki optik dalga kılavuzunda, $n_2=1.49$ ve $n_3=1$ durumunda, TE modlarının kuplajında meydana gelen kuplaj katsayısındaki değişimin çekirdek bölgesi kırılma indisi değişimine göre grafiği.....	81
Şekil 4.30	Uzantıları kesişen düzlemsel yapıdaki katmanlı, kılıfsız, özdeş ve uzantıları kesişen kuple optik dalga kılavuzları.....	83
Şekil 4.31	Uzantıları kesişen düzlemsel yapıdaki katmanlı, kılıfsız, özdeş ve kuple optik dalga kılavuzlarında çift TE modlarının kuplajlanması durumunda propagasyon sabiti değişimi.....	84
Şekil 4.32	Uzantıları kesişen düzlemsel yapıdaki katmanlı, kılıfsız, özdeş ve kuple optik dalga kılavuzlarında çift TE modlarının kuplajlanması durumunda kuplaj katsayısı değişimi.....	85
Şekil 5.1	RBF yapay sinir ağı modeli.....	88
Şekil 5.2	Modal analiz sonuçları ve RBF ağı sonuçlarının karşılaştırmalı gösterim grafiği.....	89

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 RBF ağının bazı giriş ve çıkış değerleri.....	88
---	----

ÖNSÖZ

Haberleşme alanında kaliteli, güvenli ve yüksek band genişliği özellikleri ile tercih edilen optik haberleşme karşımıza optik devre elemanlarını çıkarmıştır. Optik devre elemanlarından biri olan optik kuplör tasarımını ele alan tezimin hazırlanmasında yardımcı olan Tez Danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. N. Özlem ÜNVERDİ hocama çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında yardımlarını ve fedakarlıklarını esirgemeyen eşime ve aileme çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim süresince yurt içi yüksek lisans burs programından destek aldığım TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurulu)'a teşekkür eder ve yüksek lisans tezimin bilime katkıda bulunan tüm araştırmacılara faydalı olmasını dilerim.

ÖZET

Bu tezde optik kuplör tasarlanmış ve tasarımda gerekli olan parametreler, modal analiz çalışmalarının sonucunda grafiklerle modellenmiştir. Tasarım kısmında, matematik programlarıyla farklı tasarım uygulamaları yapılmıştır. Ayrıca alternatif bir yöntem olarak RBF yapay sinir ağı kullanılarak ağ performansı değerlendirilmiştir.

Tezin Birinci Bölümü'nde, konuya giriş yapılarak optik haberleşmenin tarihçesinden bahsedilmiştir. İkinci Bölüm'de, katmanlı yapıdaki optik dalga kılavuzlarının modal analizi yapılmıştır. Üçüncü Bölüm'de, silindirik yapıdaki optik dalga kılavuzlarının modal analizi yapılarak radyasyon ve sızıntılı modlar incelenmiştir. Dördüncü Bölüm'de, kuple optik dalga kılavuzları ele alınarak optik kuplör tasarımı için gerekli olan parametreler matematiksel analiz sonucu belirlenmiştir. Beşinci Bölümde farklı tasarımlarla konu zenginleştirilmiş ve grafikleriyle modellenmiştir. Altıncı Bölüm'de, alternatif bir yöntem olarak kuple optik dalga kılavuzu tasarımı, RBF yapay sinir ağıyla modellenmiştir. Yedinci bölüm olan son bölümde, optik kuplör tasarımının değerlendirilmesi yapılarak sonuçlar yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dielektrik optik dalga kılavuzlarında modal analiz, kuple optik dalga kılavuzları, optik kuplör, propagasyon sabiti değişimi, kuplaj katsayısı, Yapay Sinir Ağları (YSA), Radyal Fonksiyon Tabanlı Ağlar (RBF)

ABSTRACT

In this work optical coupler is designed by various methods. The parameters needed to design optical coupler are found by the modal analysis. Matlab application programs that are written for the coupler constant and the difference of propagation constant are used for analysis and graphics. And also radial based function (RBF) artificial neural network is used to design optical coupler which is an alternative method.

In the first section, the history of optical communication is given. In the second section the modal analysis in the planar slab optical waveguides are studied. Also modal analysis of cylindrical optical waveguides are studied in the third section. At the end of the third section leaky and radiation modes are observed. In the fourth section parameters needed to design optical coupler are found by the modal analysis. Coupler constant and the difference of propagation constant are examined. In the fifth section different couplers are designed using Matlab. In the sixth section the RBF is used to design optical coupler as an alternative method. In the last section the results are explained.

Keywords: Modal analysis of dielectric optical waveguides, couple optical waveguides, optical coupler, the change of propagation constant, coupling coefficient, Radial Based Function (RBF), Artificial Neural Networks (ANN)

1. GİRİŞ

Optik haberleşmenin tarihçesi günümüzden çok öncelere dayanır. 1880 yılında A. Graham Bell, “Photophone” olarak isimlendirdiği optik telefon sisteminin patentini almıştır. Aynı zamanlarda, W. Wheeler, içi kaplanmış ışık borusunu kullanarak ışığı yönlendiren deneyler yapmıştır. Ancak optik haberleşmede o yılların haberleşme tekniklerine göre iletim problemleri yaşanmıştır. Zamanla optik haberleşmedeki iletim problemleri çözülmüştür. Buna rağmen haberleşme sistemlerine uyum göstermesi uzun bir süreç gerektirmiştir. Bunun nedeni, çekirdeği çevreleyen kılıf kavramının zamanla oluşmasına dayanmaktadır. 1895’te, Fransız mühendis H.S. Rene, bükülmüş cam borulardan yararlanarak görüntüleri aktarmaya yarayan bir sistem tasarımı gerçekleştirmiştir. Bu olay ilk televizyon denemesi olarak belirtilebilir. Optik fiberler bu tarihlerden sonra biraz daha gelişim göstermiştir. 1920’li yıllarda, J.L. Baird İngiltere’de ve W. Hansell Amerika’da içi boş boru veya saydam çubukların içerisinden, görüntü veya faks bilgisinin iletilmesi fikrinin patentini almıştır. A. Heel ve H.H. Hopkins’in 1954 yılında İngiltere’deki Nature gazetesinde demec vermiştir. Hopkins, üzeri başka bir camla kaplanmamış fiber kablo içinde ışığın iletimini üzerinde durmuş; Heel, fiber kablonun üzerine kırılma indisi daha düşük olan bir cam kaplamanın dış etkenlerden ve diğer fiber kablolardan etkilenmesini azaltacağını bulmuştur. O günlerde fiberlerle ilgili en büyük sorun, ışığın fiber boru içinde yol alırken sinyalin azalmasına dayanır. Bu sorunu çözen önemli icat Heel tarafından yapılarak Amerikalı optik fizikçisi B. O’Brien tarafından da desteklenmiştir. İlk tasarlanan fiberlerin dış kabukları bulunmayıp sadece cam hava arayüzü ile yansıma gerçekleştirilmiştir. Heel, bu fiberi saydam ve kırılma indisi daha düşük olan bir madde ile kaplamıştır. Bu olay toplam yansıma yüzeyini gürültüden korumuştur ve fiberler arasındaki çapraz karışmayı önemli derecede azaltmıştır. Bir sonraki aşama cam örtü fiberlerin L. Curtiss tarafından geliştirilmesidir. 1960’da cam örtü fiberler metre başına bir desibel zayıflamaktaydı. Bu fiber optik kablo, ışığı vücuda cerrahi müdahale olmaksızın, erişilemeyen bölgelere iletmekte ve oranın görüntüsünü doktora getirmekte kullanılmıştır. Daha sonraları fiber optiklerden lazer tedavisinde de yararlanılmıştır.

Schawlow ve Townes, kızılötesi ve görünür spektrumdaki lazer işlevi ile ilgili yayın yapmıştır. Daha sonra görünür spektrumda ilk lazer cihazı yakut maddesinden yapılmıştır.

İlk başarılı optik lazer A. Maiman tarafından yapılmıştır. Bu optik lazer, cilalanmış alüminyum bir boşlukta bulunan spiral bir flaş tüpünün içindeki yakut kristali içermekteydi. Yakut silindiri, üçüncü bir ışığın dalga boyunun içine paralel olarak sonları cilalandığı zaman, optik olarak Fabry-Perot bir boşluk oluşmaktaydı. Yakutun her iki ucu da buharlaşmış gümüş

ile kaplanmıştı. Uçlardan bir tanesi, radyasyonun bir kısmının ışın olarak çıkabilmesi için daha düşük yansıma katsayısına sahip olarak yapılmıştı. 1950'lerin sonu 1960'ların başında bir RF (Radyo Frekans) jeneratörünün optik eşdeğerini sağlayan lazerin keşfi teknolojiyi optik haberleşmeye yöneltmiştir.

Optik haberleşme üzerinde ciddi çalışmalar sürekli dalga üreten helyum neon lazerinin üretilmesiyle başlamıştır. Hava milimetrik dalgalara göre optik dalga boylarında daha saydam olmuştur.

1961 yılında E. Snitzer fiberlerden sadece bir dalga kılavuzu modunda ışığı taşımıştır. Bununla birlikte her metre başında halen 1 desibel kaybedildiği için sadece insan vücudu için kullanılabilmiştir. Fakat uzak mesafe haberleşme sistemlerinde kilometre başına 10 veya 20 desibelden fazla kayıp olmaması gerektiği için halen yeterli değildi.

Standart Telekomünikasyon Laboratuvarları'nda, C.K. Kao fiberlerdeki kayıpların silis camın kendisiyle değil, bu cama yapılan katkılarla ilişkili olduğunu bulmuştur.

Kao ve İngiliz Postahanesi'nin fiber optik haberleşmesi ile ilgili yaptıkları araştırmalar sonucu, 1970 yılının Eylül ayında 633 nm helyum neon özelliğinde tek modlu fiberleri 20 dB/km'nin altında imal ettikleri duyurulmuştur. Bu kablo, bakır kabloya göre 65000 kat daha fazla bilgiyi binlerce kilometre uzaklığa iletebilmekteydi.

Corning şirketinin çalışmaları fiber optik haberleşmesinin gelişmesine yol açan önemli bir gelişme olmuştur. Aynı yıllarda, Bell Laboratuvarları ve Ioffe Fizik Enstitüsü'nde bir proje grubu, ilk yarı iletken diyot lazerlerin oda sıcaklığında sürekli dalga yayabilmesini sağlamıştır. Sonraki yıllarda, fabrikasyon metotları ve fiberlerin daha düşük zayıflamaya uğradığı dalga boylarına kayılması ile fiber kayıpları ciddi derecede azalmıştır.

1975'de, Amerika Birleşik Devletleri hükümeti, Cheyenne Mountain'da bulunan NORAD karargahındaki bilgisayarları elektronik gürültüyü azaltmak amacıyla fiber kablo kullanarak birbirlerine bağlamaya karar vermiştir. 1977 yılındaki ilk nesil telefon alanındaki denemelerde fiberler 850 nm galyum-alüminyum-arsenit lazer diyotun ürettiği ışığın gönderilmesi için kullanılmıştır. 2 km uzunluğundaki fiber telefon iletişim hattı Chicago'da 672 ses kanalıyla kullanılmaya başlanmıştır.

Bu ilk nesil sistemler, ışığı birkaç kilometrede tekrarlayıcı olmadan taşıyabilmekteydi, fakat yaklaşık olarak fiberde 2dB/km kayıp mevcuttu. İkinci nesil, sonraları 1.3 mikrometreden yayılan yeni InGaAsP lazerler ile belirlemiştir. Fiber kayıpları, bu sistemle 0.5 dB/km'e kadar düşmekte olup darbe saçılması 850 nm'den düşük durumdaydı. İlk transatlantik fiber kablo

için donanım geliştirilmesi, tek mod sistemlerin mümkün olduğunu göstermiştir. Böylece 1980’li yılların başında uzak mesafe telefon haberleşmesi yeniden düzenlenince, taşıyıcılar ulusal temel sistemleri 1300 nm kaynaklı tek modlu fiber ile inşa etmiştir. Bu teknoloji diğer telekomünikasyon uygulamalarına yayılmıştır ve çoğu fiber sistemi için standart olarak kabul edilmiştir.

Son otuz yıl boyunca elektro-optik sistemlerde büyük gelişmeler yaşanmıştır. Işık sinyalli haberleşme cihazları artık çoğu uygulamada, telefon donanımlarında ve bilgisayar sistemlerinde kullanılmaktadır. Optik haberleşme devam eden çalışmalarla gelişimini sürdürmektedir.

Optik haberleşmenin gelişmesi optik ağları ve optik ağlarda kullanılan optik devre elemanlarını önemli kılmıştır. Bu tezde optik devre elemanlarından optik kuplör tasarımı yapılmıştır. Modal analiz tasarımı yanında yapay sinir ağı alternatif olarak sunulmuştur. Yapay sinir ağı veri kümesi tasarlanan programla oluşturulmuştur. Test lm sonuçlarıyla da yapay sinir ağı tasarımının geliştirilmesi mümkündür.

2. KATMANLI (SLAB) YAPILI OPTİK DALGA KILAVUZLARINDA MODAL ANALİZ

2.1 Optik Dalga Kılavuzlarının Özellikleri ve Maxwell Eşitlikleri

Dielektrik optik dalga kılavuzlarında modal analiz, Maxwell denklemleri, ortamın elektriksel özellikleri ile ışığın yansıma ve kırılma yasaları doğrultusunda incelenir. İnceleme ortamı, serbest yüklerin bulunmadığı, kayıpsız, lineer, izotrop ve homojen ortam olarak kabul edilir. Lineer, izotrop ve homojen ortamlarda, ortam parametreleri olan dielektrik sabiti (ϵ , permittivity), magnetik geçirgenlik (μ , permeability) ve iletkenlik (σ , conductivity), ortamdaki alanın şiddetine, doğrultusuna ve koordinatlarına göre değişmeyip sabittir.

Ortamın özelliklerini veren bünye denklemleri,

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.1)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.2)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.3)$$

şeklindedir. Kayıpsız dielektrik ortamda,

$$\sigma = 0 \quad [S / m] \quad (2.4)$$

dir.

Serbest uzayın dielektrik sabiti ve magnetik geçirgenliği,

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \quad [F / m] \quad (2.5)$$

ve

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \quad [H / m] \quad (2.6)$$

olmak üzere ϵ_r bağıl dielektrik sabiti ve μ_r bağıl magnetik geçirgenlik,

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad [F / m] \quad (2.7)$$

ve

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 \quad [H / m] \quad (2.8)$$

şeklinde tanımlanır.

Frekans spektrumunun optik bandında çalışırken ϵ_r 'den ziyade ortamın kırılma indisinden bahsedilir:

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (2.9)$$

Optik dalga kılavuzu, çekirdek bölgesi ve çekirdek bölgesini saran dış ortamdan oluşur. Çekirdek bölgesini saran dış ortam özel bir dielektrik maddeden yapılmışsa kılıf diye adlandırılır ve kılıflı optik dalga kılavuzu adını alır. Ancak özel bir dielektrik madde içinde olmayan optik çekirdek fiberi kılıfsız optik dalga kılavuzu olarak tanımlanır. Optik modun kılavuz içinde tam yansıma kuralına göre ilerlemesi için çekirdek bölgesinin kırılma indisi çekirdeği çevreleyen bölgenin kırılma indisinden büyük olmalıdır.

Zamanla değişim $\exp(j\omega t)$, z doğrultusuna göre değişim $\exp(\pm j\beta z)$ biçimindedir. İncelemelerde kolaylık olması açısından $(+z)$ yönündeki alan bileşenleri ele alınmıştır. Bu durumda,

$$\vec{E} = \vec{E}_0(x, y) \exp[j(\omega t - \beta z)] \quad [V / m] \quad (2.10)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0(x, y) \exp[j(\omega t - \beta z)] \quad [A / m] \quad (2.11)$$

alan ifadeleridir.

(2.10) ve (2.11) alan ifadelerine Ampère Yasası ve Faraday Yasası uygulanırsa,

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega \epsilon \vec{E} \quad (2.12)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H} \quad (2.13)$$

elde edilir.

(2.12) ve (2.13) rotasyonel ifadelerin vektörel açılımları sonucu

$$E_x = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial x} + \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \quad (2.14)$$

$$E_y = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial y} - \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (2.15)$$

$$H_x = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial x} - \omega \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (2.16)$$

$$H_y = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial y} + \omega \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (2.17)$$

alan bileşenlerine ulaşılır. Burada κ çekirdek bölgesi özdeğeridir.

$$\kappa^2 = k_1^2 - \beta^2 = (n_1 k_0)^2 - \beta^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_1 - \beta^2 \quad (2.18)$$

Propagasyon doğrultusundaki bileşenler boyuna bileşenler, diğerleri enine bileşenler olmak üzere enine bileşenler boyuna bileşenler cinsinden elde edilmiştir. Boyuna bileşenlerin bulunmasıyla diğerleri de bulunmuş olacaktır. Bunun için kaynak bulunmayan homojen ortamlarda geçerli olan Helmholtz denkleminde yararlanılır.

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + k^2 E_z = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + \kappa^2 E_z = 0 \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + \kappa^2 H_z = 0 \quad (2.21)$$

(2.20) ve (2.21) denklemleri enine Laplace operatörü

$$\nabla_T^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (2.22)$$

kullanılarak düzenlenirse,

$$\nabla_T^2 E_z + \kappa^2 E_z = 0 \quad (2.23)$$

$$\nabla_T^2 H_z + \kappa^2 H_z = 0 \quad (2.24)$$

olarak elde edilir.

2.2 Düzlemsel Yapıdaki Katmanlı (Slab) Optik Dalga Kılavuzu

Şekil 1.1'de, y yönünde sonsuza uzanan $2d$ çaplı düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzu örneği görülmektedir. Çekirdek bölgesinin kırılma indisi n_1 , çekirdeği saran ortamın kırılma indisi n_2 olup tam yansıma kurallarına göre

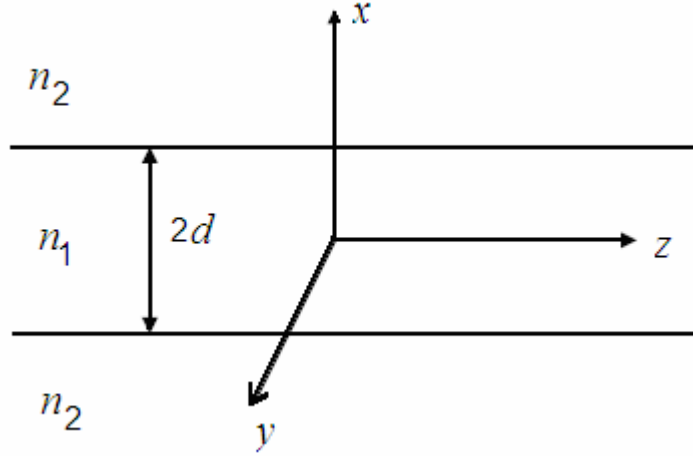
$$n_1 > n_2 \quad (2.25)$$

dir.

Propagasyon doğrultusu z yönündedir. Elektromagnetik özellikler y doğrultusunda değişim göstermemektedir. Bu durumda matematiksel düzenlemelere

$$\frac{\partial}{\partial y} \equiv 0 \quad (2.26)$$

kabulü getirilir.



Şekil 2.1 Katmanlı (slab) yapıdaki optik dalga kılavuzu modeli.

z yönünde propagasyon yapan (2.10) ve (2.11) eşitlikleriyle belirtilen elektrik ve magnetik alan ifadelerinin Ampère ve Faraday Yasaları'na uygulanması neticesinde elde edilen (2.14), (2.15), (2.16) ve (2.17) denklem takımı, (2.26) kabulü ile yeniden düzenlenirse,

$$E_x = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (2.27)$$

$$E_y = \frac{j}{\kappa^2} \left(\omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (2.28)$$

$$H_x = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (2.29)$$

$$H_y = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\omega \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (2.30)$$

elde edilir. Böylece düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzlarındaki enine bileşenler boyuna bileşenler cinsinden ifade edilir.

Mod, dalga kılavuzunun geometrik özelliklerine uyan, Maxwell eşitlikleriyle tanımlı ve sınır koşulu problemlerini sağlayan alan konfigürasyonudur. Tezde, mod yapılarının basitçe anlaşılması için TE ve TM modlarının analizi ele alınmıştır.

2.3 TE Modları

TE modunda propagasyon doğrultusundaki elektrik alan bileşeni $E_z=0$ 'dır. E_y, H_x ve H_z bileşenleri bulunur. (2.26) kabulü ve gerekli düzenlemeler sonucu Helmholtz eşitliği,

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \kappa^2 E_y = 0 \quad (2.31)$$

şeklinde bulunur. Bulunan E_y alan bileşeni ile

$$H_x = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} E_y \quad (2.32)$$

$$H_z = \frac{j}{\omega\mu_0} \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (2.33)$$

bileşenlerine ulaşılır.

(2.31) eşitliğinin çekirdek ve kılıf bölgelerinde çözümleri farklıdır. Çünkü elektrik alan ifadesi çekirdek bölgesi ve kılıf bölgesinde farklı davranışlardadır.

2.3.1 Kılavuzlanmış Çift TE Modları

d yarıçaplı düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzunda, çekirdek bölgesindeki ($|x| \leq d$), E_y alan ifadesi (2.31) eşitliğinin çözümü ile bulunur:

$$E_{y1} = A_1 \cos(\kappa x) \quad (2.34)$$

$$H_{x1} = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} A_1 \cos(\kappa x) \quad (2.35)$$

$$H_{z1} = -\frac{j\kappa}{\omega\mu_0} A_1 \sin(\kappa x) \quad (2.36)$$

Çekirdek bölgesini saran kılıf bölgesinde ($|x| \geq d$), özdeğer ifadesi γ olmak üzere eksponansiyel olarak zayıflayan elektrik ve magnetik alan bileşenleri bulunur.

$$\gamma^2 = \beta^2 - k_2^2 = \beta^2 - (n_2 k_0)^2 = \beta^2 - \omega^2 \mu_0 \epsilon_2 \quad (2.37)$$

$$E_{y2} = A_2 \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (2.38)$$

$$H_{x2} = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} A_2 \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (2.39)$$

$$H_{z2} = \frac{j\gamma}{\omega\mu_0} \left(\frac{-x}{|x|} \right) A_2 \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (2.40)$$

Dielektrik-dielektrik sınır koşulları ile tam sınırdaki ($x = d$) çekirdek bölgesi ile çekirdek bölgesini saran dış ortamın yani kılıfın elektrik alan bileşenlerinin teğetsel bileşenleri eşit olmalıdır.

Elektriksel alanın teğetsel bileşenleri eşitlenir.

$$E_{y1} = E_{y2} \quad (2.41)$$

ise

$$A_2 = A_1 \cos(\kappa d) \quad (2.42)$$

dir.

Magnetik alanın teğetsel bileşenleri eşitlenir.

$$H_{z1} = H_{z2} \quad (2.43)$$

ise

$$-\frac{j\kappa}{\omega\mu_0} A_1 \sin(\kappa d) = \frac{j\gamma}{\omega\mu_0} \left(\frac{-d}{|d|} \right) A_2 \exp(-\gamma(|d| - d)) \quad (2.44)$$

dir. (2.44) eşitliğinde (2.42) ifadesinden yararlanılırsa,

$$\frac{\sin(\kappa d)}{\cos(\kappa d)} = \tan(\kappa d) = \frac{\gamma}{\kappa} \quad (2.45)$$

karakteristik denklemi elde edilir.

2.3.2 Kılavuzlanmış Tek TE Modları

Kılavuzlanmış çift TE modları için çıkarılan benzer eşitlikler tek TE modları için de çıkarılır.

Çekirdek bölgesinde $|x| \leq d$ alan ifadeleri,

$$E_{y1} = B_1 \sin(\kappa x) \quad (2.46)$$

$$H_{x1} = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} B_1 \sin(\kappa x) \quad (2.47)$$

$$H_{z1} = \frac{j\kappa}{\omega\mu_0} B_1 \cos(\kappa x) \quad (2.48)$$

dir. Kılıf bölgesinde $|x| \geq d$ alan ifadeleri,

$$E_{y2} = B_2 \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (2.49)$$

$$H_{x2} = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} B_2 \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (2.50)$$

$$H_{z2} = \frac{j\gamma}{\omega\mu_0} \left(\frac{-x}{|x|} \right) B_2 \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (2.51)$$

dir. Dielektrik-dielektrik sınır koşulları gereğince, $x = d$ 'de, elektrik alanın teğetsel bileşenleri eşitlenir:

$$E_{y1} = E_{y2} \quad (2.52)$$

ise

$$B_2 = B_1 \sin(\kappa d) \quad (2.53)$$

dir.

Magnetik alanın teğetsel bileşenleri eşitlenir:

$$H_{z1} = H_{z2} \quad (2.54)$$

$$\frac{j\kappa}{\omega\mu_0} B_1 \cos(\kappa d) = \frac{j\gamma}{\omega\mu_0} \left(\frac{-d}{|d|} \right) B_2 \exp(-\gamma(|d| - d)) \quad (2.55)$$

(2.55) eşitliğinde (2.53) eşitliği kullanılırsa,

$$\frac{\sin(\kappa d)}{\cos(\kappa d)} = \tan(\kappa d) = -\frac{\kappa}{\gamma} \quad (2.56)$$

karakteristik denklemi elde edilir.

2.3.3 TE Modları Karakteristik Denklemi

TE modlarının karakteristik denklemi çıkarılırken çekirdek bölgesi ve çekirdek bölgesini saran ortamın özdeğer ifadeleri olan

$$\gamma^2 = \beta^2 - n_2^2 k_0^2 \quad (2.57)$$

$$\kappa^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (2.58)$$

den yararlanılır.

(2.57) ve (2.58) denklemleri d^2 ile çarpılarak düzenlenir.

$$(\kappa^2 + \gamma^2)d^2 = (n_1^2 - n_2^2)k_0^2 d^2 \quad (2.59)$$

Merkezi çember benzetimi elde edilir. Merkezi çember yarıçapı R olmak üzere κd ve γd eksenleri üzerinden tanımlanır.

$$R = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} k_0 d \quad (2.60)$$

(2.45) ve (2.56) eşitlikleri yardımıyla

$$\gamma d = \kappa d \tan(\kappa d) \quad (2.61)$$

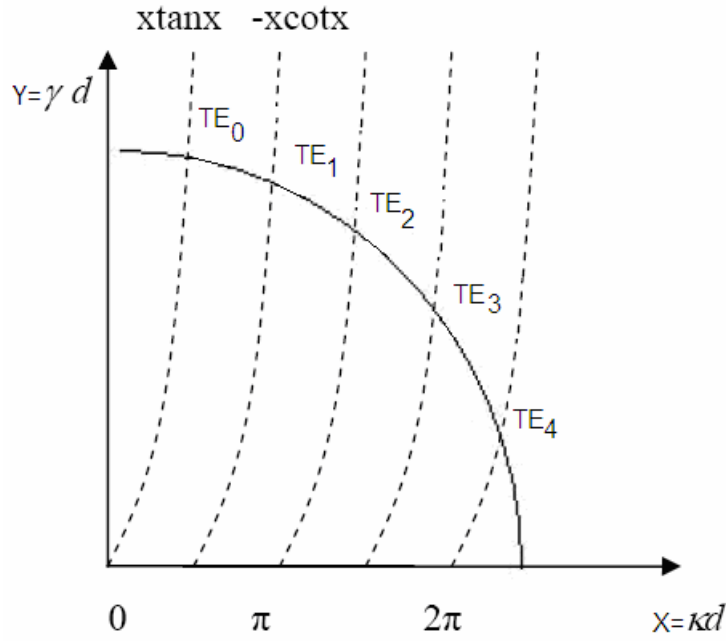
$$\gamma d = -\kappa d \cot(\kappa d) \quad (2.62)$$

denklemleri elde edilir ve bu denklemler

$$Y = X \tan(X) \quad (2.63)$$

$$Y = -X \cot(X) \quad (2.64)$$

formuna dönüştürülerek Şekil 2.2'deki grafik çizilir.



Şekil 2.2 Katmanlı yapıdaki optik dalga kılavuzlarında TE tek ve çift modlarının karakteristik denklemi grafiği.

Şekil 2.2, kılavuzlanmış TE modlarının propagasyon sabitini bulmak açısından önemlidir. Örneğin, birinci çift modu (TE_0) ele alalım. Belirtilen d değeriyle κ_0 ve γ_0 değerlerine, ilk kesişim noktasının koordinatlarından ulaşmak mümkündür.

Burada propagasyon yapan mod sayısı R ile belirlenir. $R < \frac{\pi}{2}$ olması durumunda bir tane mod (TE_0) iletilir. (2.60) eşitliğinden de görüldüğü gibi, n_1 ve d artarken iletilen mod sayısı artmakta n_2 ve λ_0 (kaynak dalga boyu) artarken iletilen mod sayısı azalmaktadır. Fiberin yapısına ait parametrelerin değişimi yayılan mod sayısına etki etmektedir.

2.4 TM Modları

TM modunda propagasyon doğrultusundaki magnetik alan bileşeni $H_z = 0$ 'dır. E_x, E_z ve H_y alan bileşenleri mevcuttur. TE modlarının karakteristik denklemi bulunurken izlenen yöntem TM modları için de tekrarlanır. (2.26) kabulü ve gerekli düzenlemeler sonucunda Helmholtz eşitliği,

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \kappa^2 H_y = 0 \quad (2.65)$$

şeklinde bulunur. Bulunan H_y alan bileşeni ile

$$E_x = \frac{\beta}{\omega\epsilon} H_y \quad (2.66)$$

$$E_z = -\frac{j}{\omega\epsilon} \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (2.67)$$

bileşenlerine ulaşılır.

(2.65) eşitliğinin çekirdek ve kılıf bölgelerinde çözümleri farklıdır.

2.4.1 Kılavuzlanmış Çift TM Modları

Çekirdek bölgesindeki ($|x| \leq d$), çift TM modunun H_y alan ifadesi (2.65) eşitliğinin çözümü ile bulunur:

$$H_{y1} = C_1 \cos(\kappa x) \quad (2.68)$$

Kılıf bölgesinde ($|x| \geq d$),

$$H_{y2} = C_2 \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (2.69)$$

dir. Dielektrik-dielektrik sınır koşulları ile

$$\tan(\kappa d) = \frac{n_1^2}{n_2^2} \left(\frac{\gamma}{\kappa} \right) \quad (2.70)$$

karakteristik denklemi elde edilir.

2.4.2 Kılavuzlanmış Tek TM Modları

(2.65) denkleminin çekirdek bölgesinde ($|x| \leq d$), TM tek modları için çözümü,

$$H_{y1} = D_1 \sin(\kappa x) \quad (2.71)$$

dir. Kılıf bölgesinde $|x| \geq d$,

$$H_{y2} = D_2 \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (2.72)$$

dir. Dielektrik-dielektrik sınır koşulları ile

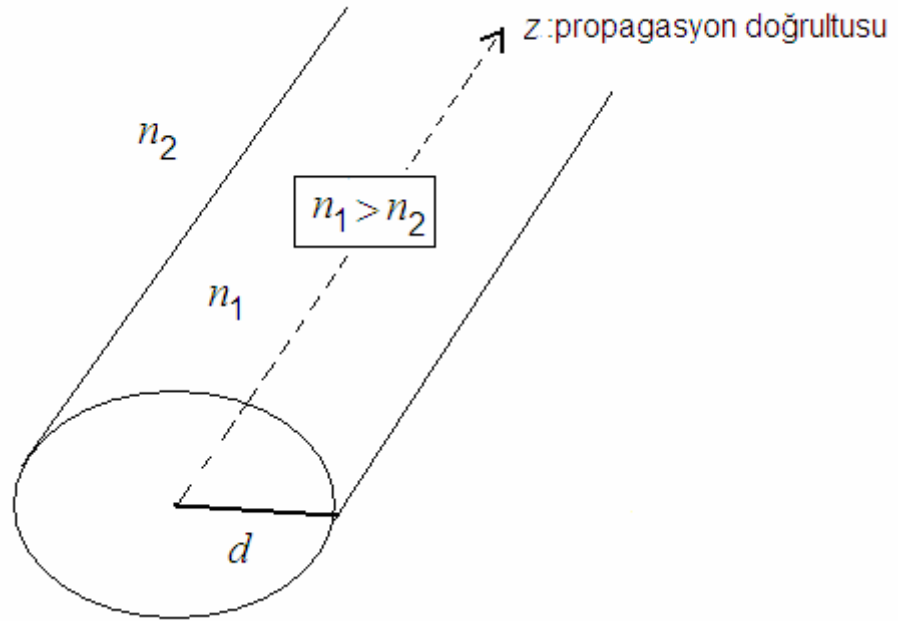
$$\tan(\kappa d) = -\frac{n_2^2}{n_1^2} \left(\frac{\gamma}{\kappa} \right) \quad (2.73)$$

karakteristik denklemi elde edilir.

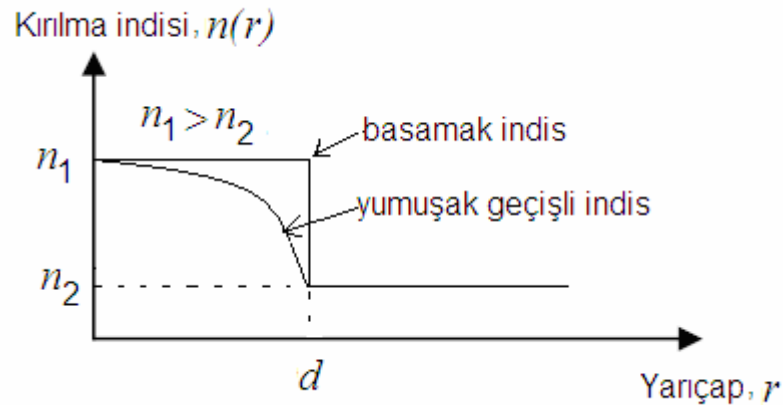
3. SİLİNDİRİK YAPIDAKİ OPTİK DALGA KILAVUZLARINDA MODAL ANALİZ

3.1 Basamak İndisli Silindirik Yapıdaki Optik Fiberlerde Modal Analiz

Şekil 3.1’de z doğrultusunda elektromagnetik alan kılavuzlayan d yarıçaplı silindirik yapıdaki optik dalga kılavuzu görülmektedir. Şekil 3.2’de optik dalga kılavuzunun çekirdek indisinin yarıçapa göre alabileceği indis değerlerinin profili yer almaktadır.



Şekil 3.1 Silindirik yapıdaki optik fiber.



Şekil 3.2 Kırılma indisi profili.

Bu bölümde, silindirik yapıdaki basamak indisli optik fiberler için matematiksel model incelenmiştir. İkinci Bölüm’de, kartezyen koordinatlar kullanılarak matematiksel model bulunmuştur. Bu kartezyen koordinatlar, alanın enine bileşenlerinin, boyuna bileşenler cinsinden ifade edildiği eşitlikleri içerir. Bu ifadeleri, içinde bulundukları kartezyen koordinatlardan silindirik koordinatlara çevirerek silindirik yapıdaki optik fiberin geometrisine uyarlamak mümkündür.

Kayıpsız ve silindirik yapıdaki optik dalga kılavuzlarında kılavuzlanan elektromagnetik dalgalarda, β , propagasyon sabiti olmak üzere, $+z$ yayılma doğrultusuna göre değişim, $\exp(-j\beta z)$ biçimindedir. Bu durumda, her alan bağıntısında $\exp[j(\omega t - \beta z)]$ ifadesi mevcuttur.

Silindirik koordinat sisteminde Ampère ve Faraday Yasaları’nın sonucu olarak

$$E_r = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + \omega \mu \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right) \quad (3.1)$$

$$E_\phi = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial r} \right) \quad (3.2)$$

$$H_r = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial r} - \omega \epsilon \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} \right) \quad (3.3)$$

$$H_\phi = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} + \omega \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial r} \right) \quad (3.4)$$

alan bileşenlerine ulaşılır.

Ayrıca (2.20) ve (2.21) denklemleri silindirik koordinatlar için modifiye edilirse,

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + \kappa^2 E_z = 0 \quad (3.5)$$

ve

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \phi^2} + \kappa^2 H_z = 0 \quad (3.6)$$

biçimine dönüşür. (3.5) ve (3.6) denklemlerinden E_z ve H_z boyuna bileşenleri bulunduktan sonra E_ϕ, E_r, H_ϕ ve H_r enine bileşenlerine ulaşılır.

E_z ve H_z ’in ϕ ve r ’ye bağlı olarak çözümü için Değişkenlere Ayırma Metodu kullanılır:

$$E_z(\phi, r) = A\Phi(\phi)R(r) \quad (3.7)$$

ve

$$\Phi(\phi) = \exp(j\nu\phi) \quad (3.8)$$

olduğu kabul edilir. Burada, ν , azimutal mod sayısı, pozitif veya negatif tam sayıdır.

Elektrik alan ifadesi,

$$E_z(\phi, r) = AR(r)\exp(j\nu\phi) \quad (3.9)$$

olmak üzere,

$$\frac{\partial E_z}{\partial r} = A \frac{dR(r)}{dr} \exp(j\nu\phi) \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} = A \frac{d^2 R(r)}{dr^2} \exp(j\nu\phi) \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} = -A\nu^2 R(r) \exp(j\nu\phi) \quad (3.12)$$

bulunur. (3.5) numaralı modifiye dalga denkleminde türev ifadeleri kullanılır:

$$A \frac{d^2 R(r)}{dr^2} \exp(j\nu\phi) + \frac{1}{r} A \frac{dR(r)}{dr} \exp(j\nu\phi) - \frac{1}{r^2} A\nu^2 R(r) \exp(j\nu\phi) + \kappa^2 AR(r) \exp(j\nu\phi) = 0 \quad (3.13)$$

ve buradan

$$\frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR(r)}{dr} + \left(\kappa^2 - \frac{\nu^2}{r^2} \right) R(r) = 0 \quad (3.14)$$

ikinci dereceden Bessel diferansiyel denkleminde ulaşılır ve kökleri bulunurken elektromagnetik alanın şu özelliklerine dikkat edilir:

- 1) Alan değişimi, fiberin çekirdeğinde sonlu değerler almalıdır, $r = 0$ için elektromagnetik alan sonlu değer almalıdır.
- 2) Alan, kılıfta eksponansiyel olarak zayıflamalıdır ve kılıf çok ince olmayıp çekirdekten ayırt edilecek kadar geniş olmalıdır. $r \rightarrow \infty$ durumunda $E_z \rightarrow 0$ ve $H_z \rightarrow 0$ olmalıdır.

Diferansiyel denklemin birbirinden bağımsız iki çözümü vardır:

Elektromagnetik alanın fiziksel ifadeleri yorumlanarak çekirdek bölgesindeki çözümler duran dalga özelliği gösteren ν . dereceden birinci cins Bessel fonksiyonu $J_\nu(\kappa r)$ ile ifade edilir:

$$E_z = AJ_\nu(\kappa r) \exp(j\nu\phi) \quad (3.15)$$

$$H_z = BJ_\nu(\kappa r) \exp(j\nu\phi) \quad (3.16)$$

Kılıf bölgesindeki çözümler yürüyen dalga özelliği gösteren ν . dereceden birinci cins Hankel fonksiyonu $H_\nu^{(1)}(j\mathcal{R})$ ile ifade edilir. Hankel fonksiyonlarında, $\kappa = j\gamma$ olarak tanımlanmaktadır. Hankel fonksiyonunun birinci ve ikinci cinsi argümanın büyük değerleri için birbirinden farklı davranır. Bu durumlar,

$$H_\nu^{(1)}(j\mathcal{R}), \quad \exp(-\mathcal{R}) \quad (3.17)$$

$$H_\nu^{(2)}(j\mathcal{R}), \quad \exp(+\mathcal{R}) \quad (3.18)$$

şeklindedir. Bu nedenle, çekirdeği saran kılıf bölgesinde alan ifadeleri, birinci cins modifiye Hankel fonksiyonu ile ifade edilir:

$$E_z = CH_\nu^{(1)}(j\mathcal{R}) \exp(j\nu\phi) \quad (3.19)$$

$$H_z = DH_\nu^{(1)}(j\mathcal{R}) \exp(j\nu\phi) \quad (3.20)$$

A, B, C ve D silindirik yapıdaki optik fiberlerde kılavuzlanan alan ifadelerinde dielektrik-dielektrik sınır koşullarına göre belirlenecek olan sabit sayılardır. Çekirdek-kılıf sınırında elektrik alanının teğet ve normal bileşenleri birbirine eşit olmalıdır:

$$E_{z1} = E_{z2} \quad (3.21)$$

$$E_{\phi1} = E_{\phi2} \quad (3.22)$$

Aynı koşulla magnetik alanın teğet ve normal bileşenleri birbirine eşit olmalıdır:

$$H_{z1} = H_{z2} \quad (3.23)$$

$$H_{\phi1} = H_{\phi2} \quad (3.24)$$

(3.1), (3.2), (3.3) ve (3.4) eşitliklerinde

$$\frac{\partial E_z}{\partial r} = A\kappa J'_\nu(\kappa r) \exp(j\nu\phi) \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial r} = B\kappa J'_\nu(\kappa r) \exp(j\nu\phi) \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial \phi} = j\nu A J_\nu(\kappa r) \exp(j\nu\phi) \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial \phi} = j\nu BJ_\nu(\kappa r) \exp(j\nu\phi) \quad (3.28)$$

İfadelerinden yararlanılırsa,

$$E_r = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \kappa A J'_\nu(\kappa r) + j\omega\mu_0 \frac{\nu}{r} B J_\nu(\kappa r) \right) \exp(j\nu\phi) \quad (3.29)$$

$$E_\phi = -\frac{j}{\kappa^2} \left(j\beta \frac{\nu}{r} A J_\nu(\kappa r) - \kappa\omega\mu_0 B J'_\nu(\kappa r) \right) \exp(j\nu\phi) \quad (3.30)$$

$$H_r = -\frac{j}{\kappa^2} \left(-j\omega\epsilon_1 \frac{\nu}{r} A J_\nu(\kappa r) + \kappa\beta B J'_\nu(\kappa r) \right) \exp(j\nu\phi) \quad (3.31)$$

$$H_\phi = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\kappa\omega\epsilon_1 A J'_\nu(\kappa r) + j\beta \frac{\nu}{r} B J_\nu(\kappa r) \right) \exp(j\nu\phi) \quad (3.32)$$

olarak elde edilir. Kılıf bölgesindeki çözümlere ulaşmak için (3.19) ve (3.20) denklemleri kullanılır:

$$E_r = -\frac{1}{\gamma^2} \left(\beta \gamma CH^{(1)}_\nu(j\gamma r) + \omega\mu_0 \frac{\nu}{r} DH^{(1)}_\nu(j\gamma r) \right) \exp(j\nu\phi) \quad (3.33)$$

$$E_\phi = -\frac{1}{\gamma^2} \left(\beta \frac{\nu}{r} CH^{(1)}_\nu(j\gamma r) - \gamma\omega\mu_0 DH^{(1)}_\nu(j\gamma r) \right) \exp(j\nu\phi) \quad (3.34)$$

$$H_r = -\frac{1}{\gamma^2} \left(-\omega\epsilon_2 \frac{\nu}{r} CH^{(1)}_\nu(j\gamma r) + \gamma\beta DH^{(1)}_\nu(j\gamma r) \right) \exp(j\nu\phi) \quad (3.35)$$

$$H_\phi = -\frac{1}{\gamma^2} \left(\gamma\omega\epsilon_2 CH^{(1)}_\nu(j\gamma r) + \beta \frac{\nu}{r} DH^{(1)}_\nu(j\gamma r) \right) \exp(j\nu\phi) \quad (3.36)$$

3.2 Basamak İndisli Fiberler İçin Sınır Koşulları ve Karakteristik Denklem

Silindirik yapıdaki d yarıçaplı optik dalga kılavuzunda çekirdek-kılıf ara yüzeyi olan $r = d$ 'de sınır koşulları sağlanmalıdır.

$$\left. \begin{array}{l} E_{z1} = E_{z2} \\ E_{\phi1} = E_{\phi2} \\ H_{z1} = H_{z2} \\ H_{\phi1} = H_{\phi2} \end{array} \right\} \text{A,B,C ve D sabitlerini içeren dört denklemin oluşturduğu matris determinanı}$$

sıfırdır.

Determinantın çözümünden

$$\left[\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \frac{d\gamma^2}{\kappa} \frac{J'_\nu(\kappa d)}{J_\nu(\kappa d)} + j\gamma d \frac{H^{(1)\prime}_\nu(j\gamma d)}{H^{(1)}_\nu(j\gamma d)} \right] \left[\frac{d\gamma^2}{\kappa} \frac{J'_\nu(\kappa d)}{J_\nu(\kappa d)} + j\gamma d \frac{H^{(1)\prime}_\nu(j\gamma d)}{H^{(1)}_\nu(j\gamma d)} \right] = \left[\nu \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \frac{\beta k_2}{\kappa^2} \right]^2 \quad (3.37)$$

özdeğer denklemi, diğer bir ifadeyle dalga kılavuzunun karakteristik denklemi elde edilir. Bu denklem, kılavuz içindeki modları ve her moda ait β , κ ve γ 'nın değerlerini tanımlar.

Sınır koşullarından yararlanılarak

$$C = \frac{J_\nu(\kappa d)}{H^{(1)}_\nu(j\gamma d)} A \quad (3.38)$$

$$D = \frac{J_\nu(\kappa d)}{H^{(1)}_\nu(j\gamma d)} B \quad (3.39)$$

eşitlikleri yazılır ve A ile B katsayıları birbirini cinsinden

$$B = \frac{j d \kappa \gamma \left[\varepsilon_1 \gamma J'_\nu(\kappa d) H^{(1)}_\nu(j\gamma d) + j \varepsilon_2 \kappa J_\nu(\kappa d) H^{(1)\prime}_\nu(j\gamma d) \right]}{\nu \omega (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \mu_0 \beta J_\nu(\kappa d) H^{(1)}_\nu(j\gamma d)} A \quad (3.40)$$

ya da

$$B = j \nu \frac{\omega (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \beta J_\nu(\kappa d) H^{(1)}_\nu(j\gamma d)}{d \kappa \gamma \left[\gamma J'_\nu(\kappa d) H^{(1)}_\nu(j\gamma d) + j \kappa J_\nu(\kappa d) H^{(1)\prime}_\nu(j\gamma d) \right]} A \quad (3.41)$$

şeklinde ifade edilir. (3.40) veya (3.41) denklemlerinden basamak indisli silindirik yapıdaki optik fiberde propagasyon yapan mod çeşitleri tanımlanabilir.

Silindirik yapıdaki optik dalga kılavuzlarında TE ve TM modları ile HE ve EH hibrid modları kılavuzlanmaktadır. Hibrid modların E_z ve H_z bileşenleri, optik dalga kılavuzunun çekirdek ekseninde her zaman sıfırdır. Böylece hibrid modlarda ışın optik eksene değmeden yayılır. Optik fiber çekirdeği içinde spiral yol izleyen bu ışınlar çapraz ışınlar denir. TE ve TM modlarında ışın optik eksenden geçtiği için meridyenel ışın olarak adlandırılır.

$\nu = 0$ için yalnız TE ve TM modları mevcuttur, $\nu = 0$ durumunda (3.37) karakteristik denklemin sağ tarafı sıfıra eşit olur ve TE ile TM modlarını tanımlayan iki denklem elde edilir:

$$\text{TE Modları} \Leftrightarrow E_z = 0$$

$$\left[\frac{d\gamma^2}{\kappa} \frac{J_0'(\kappa d)}{J_0(\kappa d)} + j\gamma d \frac{H_0^{(1)'}(j\gamma d)}{H_0^{(1)}(j\gamma d)} \right] = 0 \quad (3.42)$$

TM Modları $\Leftrightarrow H_z = 0$

$$\left[\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \frac{d\gamma^2}{\kappa} \frac{J_0'(\kappa d)}{J_0(\kappa d)} + \frac{j\gamma d H_0^{(1)'}(j\gamma d)}{H_0^{(1)}(j\gamma d)} \right] = 0 \quad (3.43)$$

(3.15) ve (3.16) denklemlerinde,

$\nu = 0$ ve $A = 0$ için $E_z = 0$ 'dır. (3.42) denklemi durumu sağlar ve TE modlarının karakteristik denklemi olarak adlandırılır.

$\nu = 0$ ve $B = 0$ için $H_z = 0$ 'dır. (3.43) denklemi durumu sağlar ve TM modlarının karakteristik denklemi olarak adlandırılır.

Basamak indisli silindirik yapıdaki optik dalga kılavuzunda propagasyon yapan hibrid modlarında altı alan bileşeni mevcuttur. Yayılan modun hiçbir bileşeni sıfıra gitmez. Hibrid modlarında A ve B katsayıları sıfırdan farklı olup $\nu \neq 0$ dır. $A > B$ ise elektrik alanın boyuna bileşeni magnetik alanın boyuna bileşeninden daha büyüktür ve yayılan mod EH olarak isimlendirilir. $B > A$ ise magnetik alanın boyuna bileşeni elektrik alanın boyuna bileşeninden daha büyüktür ve yayılan mod HE olarak isimlendirilir.

3.3 Mod Kesim Koşulları

Kılıflı ve silindirik yapıdaki optik dalga kılavuzunda kılıf bölgesindeki alanın yayılma sabiti γ tarafından belirlenir. Modifiye Hankel fonksiyonunun r 'nin büyük değerleri için geliştirilen asimptotik yaklaşımı,

$$H_V^{(1)}(j\gamma r) = \sqrt{\frac{2}{\pi\gamma r}} \left(\exp(-j(\frac{\pi\nu}{2} + \frac{\pi}{4})) \exp(-\gamma r) \right) \quad (3.44)$$

şeklinde (Cherin, 1983). γ 'nın büyük değerleri için alan çekirdek bölgesi içinde sınırlıdır.

γ 'nın azalan değerleri ile kılıftan dışarı çıkmaya başlar. $\gamma = 0$ için alan kılavuzdan ayrılır.

Bu durumdaki frekans, kesim frekansıdır. Kesim koşulunda,

$$\gamma = \sqrt{\beta_c^2 - k_{2c}^2} = 0 \quad (3.45)$$

$$\beta_c^2 = k_{2c}^2 \quad (3.46)$$

olur. Kesim koşulunda çekirdek bölgesinin özdeğer ifadesi

$$\kappa_c^2 = k_{1c}^2 - \beta_c^2 \quad (3.47)$$

dir.

$$k_{2c}^2 = \omega_c^2 \mu_0 \varepsilon_2 \quad (3.48)$$

ve

$$k_{1c}^2 = \omega_c^2 \mu_0 \varepsilon_1 \quad (3.49)$$

ise

$$\kappa_c^2 = k_{1c}^2 - k_{2c}^2 = \omega_c^2 \mu_0 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (3.50)$$

$$f_c = \frac{\kappa_c}{2\pi\sqrt{\mu_0(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}} \quad (3.51)$$

olur. f_c , kesim frekansında mod oluşumunun en alt sınırını gösterir.

$\omega_c = 0$ için optik fiberde sadece temel mod olan HE_{11} modu mevcuttur.

Özetle, $\gamma = 0$ için, bir modun (3.51) eşitliğindeki kesim frekansını elde ettik. κ_c , fiberin fiziksel parametrelerinin ifadesidir ve d yarıçapı, n_1 çekirdek bölgesi kırılma indisi, n_2 kılıf bölgesi kırılma indisi ve λ_0 kaynak dalga boyu cinsinden ifade edilebilir:

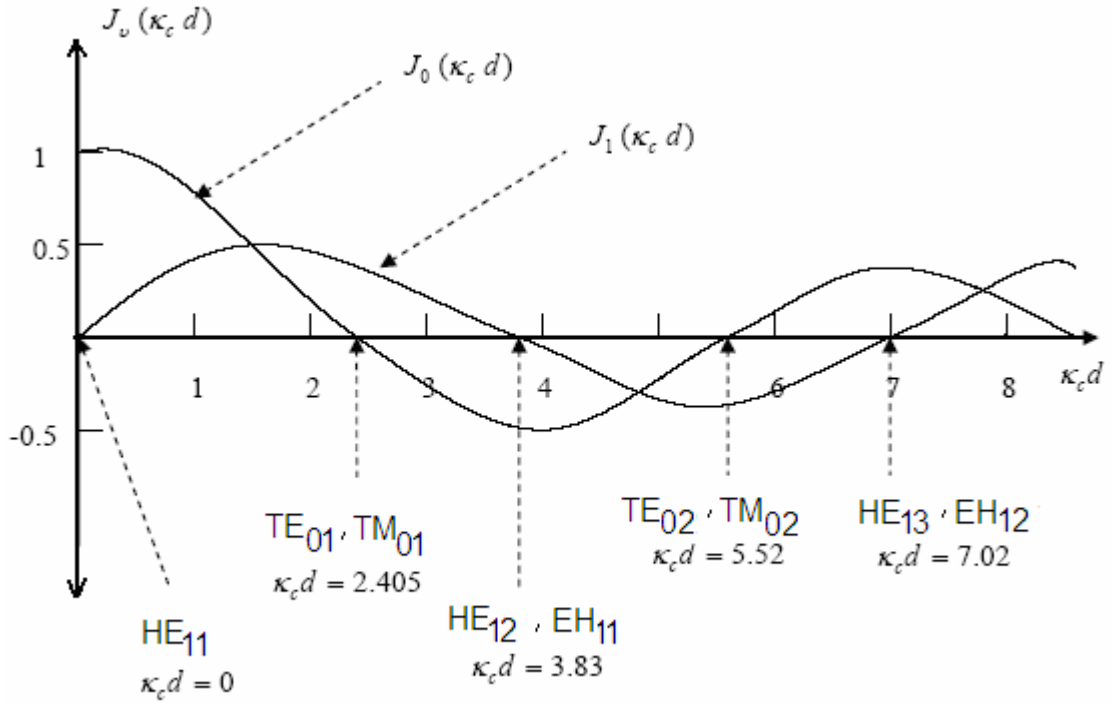
$$\kappa_c d = \omega_c \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} d \quad (3.52)$$

$$\omega_c \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (3.53)$$

$$V \equiv \kappa_c d = \frac{2d\pi}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3.54)$$

dir. Burada, V , normalize frekans parametresi olarak adlandırılır ve katmanlı yapıdaki dielektrik dalga kılavuzundaki R parametresi ile paralellik gösterir. Basamak indisli optik dalga kılavuzu içinde kılavuzlanan modların sayısı V ile doğru orantılıdır. (3.54) eşitliğinden de görüldüğü gibi, d yarıçap ve n_1 kırılma indisinin artmasıyla artar; n_2 kırılma indisi ve λ_0 dalga boyunun artmasıyla azalır.

3.4 Silindirik Yapıdaki Optik Dalga Kılavuzlarında İletilen Modlar ve Kesim Koşulları



Şekil 3.3 Silindirik yapıdaki optik dalga kılavuzlarında iletilen modlar ve kesim koşulları.

Şekil 3.3’de TE, TM, EH ve HE modlarının kesim koşulları görülmektedir(Ünverdi, N.Ö, 1991). Silindirik yapıdaki optik dalga kılavuzunun çekirdek bölgesinde tanımlanan ν dereceden Bessel fonksiyonunun $\kappa_c d$ eksenini kestiği noktalar silindirik yapıdaki optik dalga kılavuzunun kesim koşullarıdır.

TE ve TM modlarında, $\nu = 0$ ’dır.

$$J_0(\kappa d) = 0 \quad (3.55)$$

(3.55) eşitliğinde Bessel fonksiyonunun 0. dereceden açılımında, fonksiyonu 0 yapan $\kappa_c d$ değerleri için TE ve TM modları kesimdedir.

Hibrid modlarda $\nu \neq 0$ ’dır. γ ifadesi sıfıra yaklaşırken $\nu = 1$ ve $\nu > 1$ için kesim koşulu iki aşamada incelenir.

$$\nu = 1 \quad (3.56)$$

iken

$$\kappa d = 0 \quad (3.57)$$

ve

$$J_1(\kappa d) = 0 \quad (3.58)$$

İçin,

$$\blacksquare \quad HE_{11} : \kappa_c d = x_{11} = 0 \quad (3.59)$$

Bessel fonksiyonunun 1.dereceden açılımında $\kappa_c d = 0$ için $J_1(0) = 0$ değerini alır.

$\kappa_c d = 0$ şartında HE_{11} modu kesimdedir. HE_{11} modu $\omega_c = 0$ için kesime girdiğine göre, fiber içinde tüm frekanslarda mevcuttur.

$$\blacksquare \quad \left. \begin{matrix} HE_{1\mu} \\ EH_{1\mu} \end{matrix} \right\} \kappa_c d = x_{1\mu} \quad (3.60)$$

$\kappa_c d \neq 0$ olmak üzere Bessel fonksiyonunun 1. dereceden açılımında $J_1(\kappa_c d)$ 'yı sıfır yapan μ . dereceden kök $x_{1\mu} = \kappa_c d$ değerleri $HE_{1\mu}$ ve $EH_{1\mu}$ modunun kesim koşuluna karşı düşer.

$\nu > 1$ için

$$\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} + 1 \right) J_{\nu-1}(\kappa d) - \frac{\kappa d}{\nu-1} J_{\nu}(\kappa d) = 0 \quad (3.61)$$

dir. Bu eşitlik dahilinde

$$\bullet \quad J_{\nu}(\kappa d) = 0 \quad \kappa d \neq 0 \quad \nu = 2, 3, 4, \dots \quad (3.62)$$

ve

$$\bullet \quad \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} + 1 \right) J_{\nu-1}(\kappa d) = \frac{\kappa d}{\nu-1} J_{\nu}(\kappa d) \quad \nu = 2, 3, 4, \dots \quad (3.63)$$

olmak üzere iki çözüm ve bunlara karşılık gelen iki tip hibrid mod vardır.

$\kappa d \neq 0$ için,

$$EH_{\nu\mu} : \kappa_c a = x_{\nu\mu} \quad \nu = 2, 3, 4, \dots \quad (3.64)$$

(3.63) eşitliğini sağlayan $\kappa_c d$ 'nın verdiği kesim frekansı $EH_{\nu\mu}$ modlarınınkine karşı düşer.

Bu durum Şekil 3.3 ile anlaşılmaktadır.

$$HE_{\nu\mu} : \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} + 1\right) J_{\nu-1}(\kappa d) = \frac{\kappa d}{\nu-1} J_{\nu}(\kappa d) \quad \nu = 2, 3, 4, \dots \quad (3.65)$$

eşitliğinde her ν için eşitliği sağlayan μ 'üncü $\kappa_c d$ değerinden $HE_{\nu\mu}$ modlarının kesim frekansı elde edilir. $\nu \geq 2$ için bulunan her iki eşitlikte $\nu < 2$ için bulunan çözümler karşılaştırıldığında; $\kappa_c d$ değerleri,

$HE_{\nu\mu}$, $\nu \geq 2$ dışındaki tüm çözümler için, Bessel fonksiyonunu sıfır yapan köklere karşı düşmektedir.

$EH_{1\mu}$ ve $HE_{\nu\mu+1}$ modlarının her ikisi de aynı kesim frekansına sahiptir, ancak dejenere mod değildirler. Çünkü, kesimdeyken farklı frekanslarda, farklı propagasyon sabitine sahiptirler. Aynı β propagasyon sabitiyle yayılan, farklı kesim frekansına sahip modlara dejenere mod denir.

3.5 Zayıfça Kılavuzlama Yaklaşımı ve Hibrid Modlar

Zayıfça kılavuzlama yaklaşımıyla hibrid modlara ilişkin karakteristik denklem elde edilir. Zayıfça kılavuzlama yaklaşımını ilk olarak D. Gloge kullanmıştır (Gloge, 1971). Devamında zayıfça kılavuzlayan optik fiber ifadesi, çekirdek ve kılıf bölgeleri kırılma indisleri arasındaki farkın küçük olması nedeniyle ışının eksen civarındaki çok dar bir açısal bölgede kılavuzlanması olarak tanımlanmıştır, (Snyder, 1978, 1983; Sammut, 1981; Love, 1982).

A.W. Snyder, özdeğer denklemini,

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \cong \frac{n_1 - n_2}{n_1} \ll 1 \quad (3.66)$$

koşulu altında basitleştirmiştir (Snyder, 1969, 1980).

Bu koşullar altında incelenen hibrid modlarının karakteristik denklemleri, (3.67) ve (3.68) ifadeleriyle tanımlanır.

HE modları için özdeğer denklemi,

$$\frac{J_{\nu-1}(\kappa d)}{\kappa d J_{\nu}(\kappa d)} = \frac{H_{\nu-1}^{(1)}(j\gamma d)}{j\gamma d H_{\nu}^{(1)}(j\gamma d)} \quad (3.67)$$

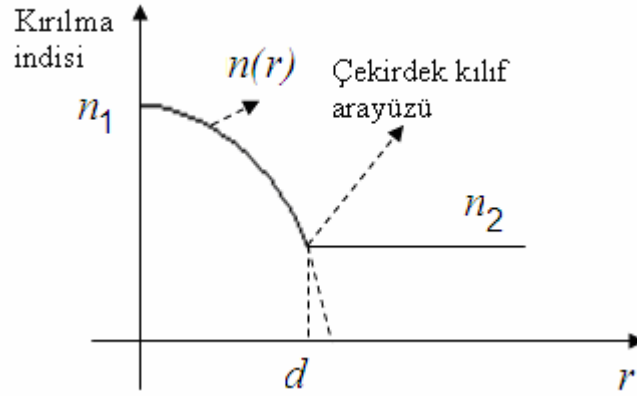
EH modları için özdeğer denklemi,

$$\frac{J_{\nu+1}(\kappa d)}{\kappa d J_{\nu}(\kappa d)} = \frac{H_{\nu+1}^{(1)}(j\gamma d)}{j\gamma d H_{\nu}^{(1)}(j\gamma d)} \quad (3.68)$$

olarak elde edilir.

3.6 Yumuşak Geçişli Optik Fiberde WKB (Wentzel, Kramers, Brillouin, Jefferies) Analizi

Şekil 3.4'de yer alan yumuşak geçişli indis profiline sahip fiber çekirdeği, fiberin bant genişliği kapasitesini artıran ve yayılan bir mod grubundaki grup gecikmelerini eşitleyen etkiye sahiptir.



Şekil 3.4 Yumuşak geçişli indis profilli fiber.

Kırılma indisi çekirdek bölgesi eksenini boyunca değişen fiberlere yumuşak geçişli indis fiberler denir. Kırılma indisi, optik ekseninde en büyük değeri alacak şekilde belli bir fonksiyona göre değişim gösterir ve yarıçap ile değiştiği için $n(r)$ ile ifade edilir. Çok modlu fiber için, indis değişimi dalga genişliğinin oldukça küçük mesafelerinde geometrik optik yaklaşım WKB (Wentzel, Kramers, Brillouin, Jefferies) Metodu ile incelenir.

Yumuşak geçişli indise sahip optik dalga kılavuzunda elektrik alan

$$E = G(r) \begin{pmatrix} \cos(\nu\phi) \\ \sin(\nu\phi) \end{pmatrix} \exp(-j\beta z) \quad (3.69)$$

şeklinde yazılabilir. Kayıpsız kabul edilen silindirik yapıdaki fiberde β için Helmholtz denkleminin $n(r)$ 'ye bağlı çözümü incelenir:

$$G'' + \frac{1}{r}G' + \left[k^2(r) - \beta^2 - \frac{v^2}{r^2} \right] G = 0 \quad (3.70)$$

$$\frac{d^2 G(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dG(r)}{dr} + \left[k^2(r) - \beta^2 - \frac{v^2}{r^2} \right] G(r) = 0 \quad (3.71)$$

dir. WKBJ Metodu'nun genel yaklaşımında çekirdeğin kırılma indis dağılımı sabitse veya r 'ye bağlı yavaş bir değişim gösteriyorsa, $G(r)$ ifadesi,

$$G(r) = \exp(jk_0 S(r)) \quad (3.72)$$

şeklindedir. Bu ifade, (3.71) eşitliğinde yerine yazılmak için türev ifadeleri,

$$\frac{dG(r)}{dr} = jk_0 \exp(jk_0 S(r)) \frac{dS(r)}{dr} \quad (3.73)$$

ve

$$\frac{d^2 G(r)}{dr^2} = jk_0 \exp(jk_0 S(r)) \frac{d^2 S(r)}{dr^2} - k_0^2 \left[\frac{dS(r)}{dr} \right]^2 \exp(jk_0 S(r)) \quad (3.74)$$

şeklindedir. (3.73) ve (3.74) eşitlikleri, (3.71) eşitliğinde yerine yazılır:

$$jk_0 \frac{d^2 S(r)}{dr^2} - k_0^2 \left[\frac{dS(r)}{dr} \right]^2 + jk_0 \frac{dS(r)}{dr} + \left[k^2(r) - \beta^2 - \frac{v^2}{r^2} \right] = 0 \quad (3.75)$$

Burada,

$$k(r) = k_0 n(r) = \frac{2\pi}{\lambda_0} n(r) \quad (3.76)$$

dir. $S(r)$ fonksiyonu asimptotik seridir ve seriye açılır:

$$S(r) = S_0(r) + \frac{1}{k_0} S_1(r) + \frac{1}{k_0^2} S_2(r) + \dots \quad (3.77)$$

Serinin ilk iki terimi kullanılarak $S_0(r)$ ifadesi hesaplanır:

$$S_0(r) = \pm \frac{1}{k_0} \int \left[\sqrt{k^2(r) - \beta^2 - \frac{v^2}{r^2}} \right] dr \quad (3.78)$$

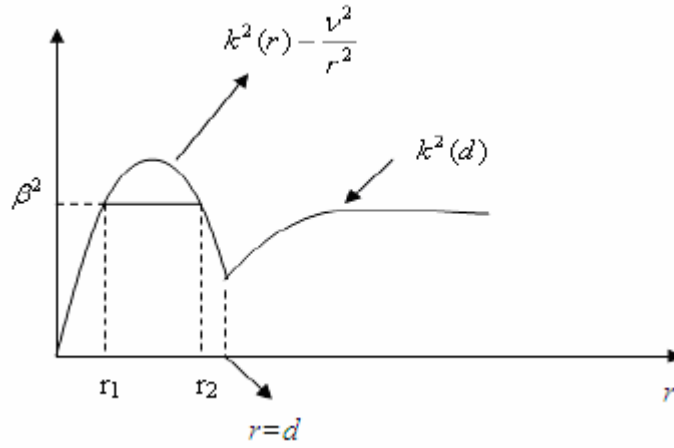
Yumuşak geçişli indise sahip kılavuzlarda ışın yayılımının fiziksel yapısını çıkarmak için, mod propagasyon sabitlerinin davranışı ile bağlantısını kurmak gerekir. Bu nedenle sıfırıncı dereceden WKJB Metodu'nun çözümü ele alınır (Cherin, 1983).

$G(r)$ elektrik alanın propagasyon yapması için $S(r)$ 'nin reel olması gerekir. Bu durumda (3.78) eşitliğindeki karekök içindeki ifadenin pozitif değer alması gerekir. Ters durumda alan evanescent yapıda olur:

$$k^2(r) - \beta^2 - \frac{\nu^2}{r^2} > 0 \quad (3.79)$$

Modların fiziksel yorumu için, (3.78) ifadesinin grafik analizi yapılır.

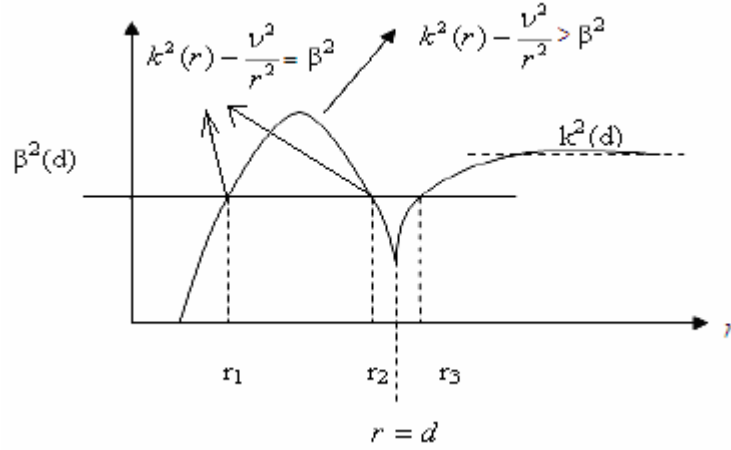
β 'nın sabit bir değeri için r , r_1 ve r_2 olmak üzere iki değer alır. Elektrik alan ifadelerinin değişim gösterdiği bu dönüm noktalarına kostik adı verilir. Kılavuzlanan helisel ışınlar, bu iki dönme noktası arasında yer alır. Helisel ışınlar optik fiberin merkezi ekseninden geçmeyen ışınlardır. $\nu = 0$ durumunda TE ve TM modlarını ifade eden aksenal (meridyenel) ışınlar mevcuttur.



Şekil 3.5 Yumuşak geçişli indise sahip fiberde k 'nın değişimi.

3.7 Sızıntılı Modlar

Sızıntılı modlar, $n_2 k_0 < \beta < n_1 k_0$ koşulu kılavuzlanmış moda karşılık gelir. $\beta < n_2 k_0$ durumunda sızıntılı mod çözümü mevcuttur.



Şekil 3.6 Yumuşak geçişli fiberlerde sızıntılı modlar.

$r_2 < r < r_3$ bölgesinde $S_0(r)$ reel değildir. Bu bölge tünel olarak adlandırılır ve bu bölgedeki alan davranışı eksponansiyel azalandır.

3.8 Radyasyon Alanları

Bir dalga kılavuzunda elektromagnetik alan, kılavuzlanmış alanlar ile radyasyon alanlarının toplamıdır. Radyasyon alanları, kesim frekansı altındaki bölgede oluşan radyasyon ve sızıntılı (leaky) modlar olmak üzere ikiye ayrılır:

$$\sum E = E_{\text{kılavuzlanmış}}(x, y, z) + E_{\text{rad}}(x, y, z) \quad (3.80)$$

3.8.1 Katmanlı Dalga Kılavuzlarında Radyasyon Modları

Radyasyon modlarında kılavuzlanmış modlardan farklı olarak β değerleri sürekli. Kılavuzlanmış bir modun propagasyon sabiti β 'nın değişim aralığı,

$$n_2 k_0 < |\beta| < n_1 k_0 \quad (3.81)$$

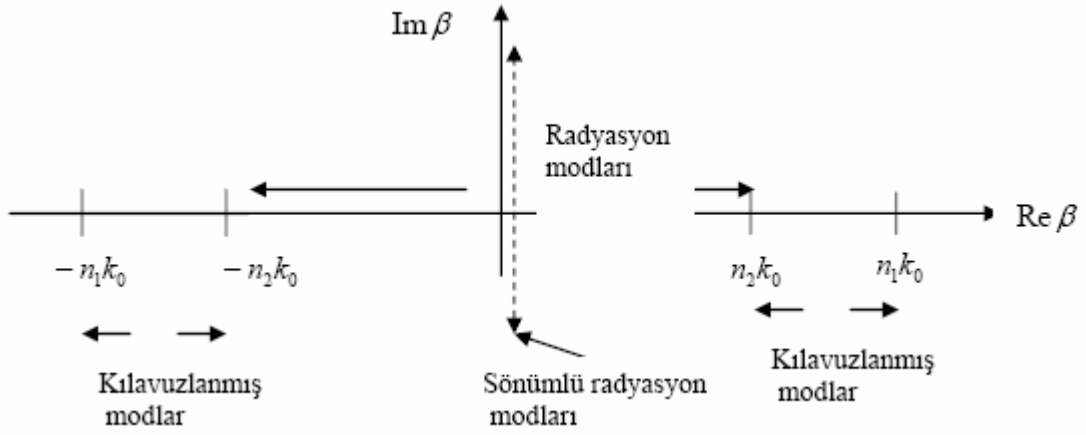
dir. Radyasyon modlarında β değerleri kompleks yapıdadır. β 'nın reel ve imajiner kısımlarının değer aralıkları,

$$0 \leq \text{Re}\{\beta\} < n_2 k_0 \quad (3.82)$$

$$0 \leq \text{Im}\{\beta\} < \infty \quad (3.83)$$

şeklindedir.

$\text{Re}\{\beta\} = 0$ olduğu durumda oluşan modlara sönümlü (evanescent) radyasyon modları denir.



Şekil 3.7 Kılavuzlanmış ve radyasyon modların propagasyon sabiti (Marcuse, 1972).

3.8.1.1 Çift TE Radyasyon Modları

Katmanlı dalga kılavuzunun $|x| < d$ ve $|x| > d$ bölgelerinde E_{y1} ve E_{y2} bileşenleri çift modlar için,

$$E_{y1} = a_1 \cos(\varpi x) \quad (3.84)$$

ϖ : çekirdek bölgesi özdeğeri

$$\varpi^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (3.85)$$

$$E_{y2} = a_2 \exp(-j\xi|x|) + a_3 \exp(j\xi|x|) \quad (3.86)$$

ξ : kılıf bölgesi özdeğeri

$$\xi^2 = n_2^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (3.87)$$

şeklindedir.

Diğer alan bileşenleri Maxwell denklemleri yardımıyla; a_1 , a_2 ve a_3 katsayıları sınır koşulları yardımıyla belirlenir.

$$H_{z1} = -\frac{j\varpi}{\omega\mu_0} a_1 \sin(\varpi x) \quad (3.88)$$

$$H_{z2} = \frac{x}{|x|} \frac{\xi}{\omega\mu_0} [a_2 \exp(-j\xi|x|) - a_3 \exp(j\xi|x|)] \quad (3.89)$$

$$a_2 = \frac{a_1}{2} \exp(j\xi d) \left[\cos(\varpi d) - j \frac{\varpi}{\xi} \sin(\varpi d) \right] \quad (3.90)$$

$$a_3 = a_2^* \quad (3.91)$$

P Poynting vektörü yardımıyla kılavuzda iletilen güçten a_1 katsayısı elde edilir.

$$a_1 = \left[\frac{2\xi^2 \varpi \mu_0}{\pi \beta [\xi^2 \cos^2(\varpi d) + \varpi^2 \sin^2(\varpi d)]} P \right]^{1/2} \quad (3.92)$$

3.8.1.2 Tek TE Radyasyon Modları

Katmanlı dalga kılavuzunun $|x| < d$ ve $|x| > d$ bölgelerinde E_{y1} ve E_{y2} bileşenleri tek modlar için,

$$E_{y1} = b_1 \sin(\varpi x) \quad (3.93)$$

$$E_{y2} = \frac{x}{|x|} (b_2 \exp(-j\xi|x|) + b_3 \exp(j\xi|x|)) \quad (3.94)$$

şeklindedir. Diğer alan bileşenleri Maxwell denklemleri yardımıyla; b_1 , b_2 ve b_3 katsayıları sınır koşulları yardımıyla belirlenir.

$$H_{z1} = \frac{j\varpi}{\omega \mu_0} b_1 \cos(\varpi x) \quad (3.95)$$

$$H_{z2} = \frac{\xi}{\omega \mu_0} [b_2 \exp(-j\xi|x|) - b_3 \exp(j\xi|x|)] \quad (3.96)$$

$$b_2 = \frac{b_1}{2} \exp(j\xi d) \left[\sin(\varpi d) - j \frac{\varpi}{\xi} \cos(\varpi d) \right] \quad (3.97)$$

$$b_3 = b_2^* \quad (3.98)$$

$$b_1 = \left[\frac{2\xi^2 \varpi \mu_0}{\pi \beta [\xi^2 \sin^2(\varpi d) + \varpi^2 \cos^2(\varpi d)]} P \right]^{1/2} \quad (3.99)$$

3.8.1.3 Çift TM Radyasyon Modları

Katmanlı dalga kılavuzunun $|x| < d$ ve $|x| > d$ bölgelerinde H_{y1} ve H_{y2} bileşenleri çift modlar için,

$$H_{y1} = c_1 \cos(\varpi x) \quad (3.100)$$

$$H_{y2} = c_2 \exp(-j\xi|x|) + c_3 \exp(j\xi|x|) \quad (3.101)$$

şeklindedir. Diğer alan bileşenleri Maxwell denklemleri yardımıyla, c_1 , c_2 ve c_3 katsayıları sınır koşulları yardımıyla belirlenir.

$$E_{z1} = \frac{j\varpi}{n_1^2 \omega \epsilon_0} c_1 \sin(\varpi x) \quad (3.102)$$

$$E_{z2} = -\frac{x}{|x|} \frac{\xi}{n_2^2 \omega \epsilon_0} [c_2 \exp(-j\xi|x|) - c_3 \exp(j\xi|x|)] \quad (3.103)$$

$$c_2 = \frac{c_1}{2} \exp(j\xi d) \left[\cos(\varpi d) - j \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \frac{\varpi}{\xi} \sin(\varpi d) \right] \quad (3.104)$$

$$c_3 = c_2^* \quad (3.105)$$

P Poynting vektörü yardımıyla kılavuzda iletilen güçten c_1 katsayısı elde edilir:

$$c_1 = \left[\frac{2n_1^2 \xi^2 \varpi \mu_0}{\pi \beta \left[\left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \xi^2 \cos^2(\varpi d) + \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \varpi^2 \sin^2(\varpi d) \right]} P \right]^{1/2} \quad (3.106)$$

3.8.1.4 Tek TM Radyasyon Modları

Katmanlı dalga kılavuzunun $|x| < d$ ve $|x| > d$ bölgelerinde H_{y1} ve H_{y2} bileşenleri tek modlar için,

$$H_{y1} = d_1 \sin(\varpi x) \quad (3.107)$$

$$H_{y2} = \frac{x}{|x|} (d_2 \exp(-j\xi|x|) + d_3 \exp(j\xi|x|)) \quad (3.108)$$

şeklindedir. Diğer alan bileşenleri Maxwell denklemleri yardımıyla, d_1 , d_2 ve d_3 katsayıları sınır koşulları yardımıyla belirlenir.

$$E_{z1} = -\frac{j\varpi}{n_1^2 \omega \epsilon_0} d_1 \cos(\varpi x) \quad (3.109)$$

$$E_{z2} = -\frac{\xi}{n_2^2 \omega \epsilon_0} [d_2 \exp(-j\xi|x|) - d_3 \exp(j\xi|x|)] \quad (3.110)$$

$$d_2 = \frac{d_1}{2} \exp(j\xi d) \left[\sin(\varpi d) - j \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \frac{\varpi}{\xi} \cos(\varpi d) \right] \quad (3.111)$$

$$d_3 = d_2^* \quad (3.112)$$

$$d_1 = \left[\frac{2n_1^2 \xi^2 \varpi \mu_0}{\pi \beta \left[\left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \xi^2 \sin^2(\varpi d) + \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \varpi^2 \cos^2(\varpi d) \right]} P \right]^{1/2} \quad (3.113)$$

4. OPTİK DALGA KILAVUZLARI ARASINDA KUPLAJLAMA

Optik dalga kılavuzları arasındaki mesafe, çalışma dalga boyuna göre çok küçükse birbirini etkiler. Bir kılavuzda propagasyon yapan modun alan uzantısının diğer kılavuzdaki modun etki alanına ulaşması kuplaja neden olur. Kuplaj, farklı kılavuzlardaki modlar arasında olabildiği gibi aynı kılavuz içindeki modlar arasında da olabilir. Tezde birbirine paralel iki optik dalga kılavuzu arasındaki kuplaj incelenmiştir ve bu sistem, kuple optik fiberler olarak adlandırılmıştır.

4.1 Kuple Mod Teorisi

Kuple Mod Teorisi, anahtarlama ve modülasyon devrelerindeki doğrultu kuplörleri, optik sensörler, filtreler, kuple elektrik devreleri gibi birçok alanda yaygın biçimde kullanılır.

Kuple Mod Teorisi'ne göre sistemi oluşturan elemanlar veya bölümler birbirinden izole edilir. Zayıf kuplaj altında her bir bölümün ayrı ayrı analizinden sonra orijinal kompleks sistem aynı şekilde zayıf kuplaj altında incelenir. Zayıfça kuplajlama durumunda iki dalga kılavuzu arasındaki etkileşim fazla değildir ve kuple mod teorisine uygulandığında oldukça doğru sonuçlar verir. Kuple Mod Teorisi'ne göre modlar arasındaki kuplaj mekanizması uzay, zaman ve frekans domenlerinde incelenebilir(Ünverdi, N.Ö.1998, Cheo,P.K,1990.).

4.1.1 Modların Uzay Domeninde Kuplajı

+z yönünde ilerleyen ve zamana göre değişimi $\exp(j\omega t)$ olan iki modun propagasyon sabitleri β_1 ve β_2 olmak üzere genlik fonksiyonları,

$$a_1(z) = a_0 \exp(-j\beta_1 z) \quad (4.1)$$

ve

$$a_2(z) = a_0 \exp(-j\beta_2 z) \quad (4.2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, a_0 katsayıdır.

z yönündeki değişim

$$\frac{da_1}{dz} = -j\beta_1 a_1 \quad (4.3)$$

ve

$$\frac{da_2}{dz} = -j\beta_2 a_2 \quad (4.4)$$

şeklinde kuple denklemlerdir. Bu iki optik fiber, birbirlerini etkileyecek şekilde çok yakın olduğu zaman yukarıdaki eşitlikler yerine

$$\frac{da_1}{dz} = -j\beta_1 a_1 + c_{12} a_2 \quad (4.5)$$

ve

$$\frac{da_2}{dz} = -j\beta_2 a_2 + c_{21} a_1 \quad (4.6)$$

kuple denklemleri kullanılır. Burada,

$c_{11} = -j\beta_1$ öz kuplaj katsayısı

c_{12} : Birim uzunlukta II. optik fiberin I. optik fiber üzerindeki etkisini ifade eden kuplaj katsayısı

c_{21} : Birim uzunlukta I. optik fiberin II. optik fiber üzerindeki etkisini ifade eden kuplaj katsayısı

$c_{22} = -j\beta_2$ öz kuplaj katsayısıdır.

Zayıf kuplaj kabulü ile c_{12} ve c_{21} , β_1 ve β_2 değerlerine göre çok küçüktür ve z 'den bağımsızdır (Marcuse, 1974).

İkiden fazla modun kuplajı için kuple denklem,

$$\frac{da_i}{dz} = -j\beta_i a_i + \sum_{i \neq k} c_{ik} a_k \quad (4.7)$$

şeklinde genelleştirilebilir.

Kayıpsız optik dalga kılavuzunda

$$|a_1(z)|^2 = 1 - |a_2(z)|^2 \quad (4.8)$$

ve

$$|a_2(z)|^2 = F_{12} \sin^2 \left(\frac{|c_{12}|}{(F_{12})^{1/2}} z \right) \quad (4.9)$$

dir. F_{12} transfer faktörü olup

$$F_{12} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\beta_1 - \beta_2}{2|c_{12}|} \right)^2} \quad (4.10)$$

açılımındadır. Eşitlikten anlaşıldığı gibi, $\beta_1 = \beta_2$ olduğu durumda maksimum güç transferi gerçekleşmektedir. $|F_{12}| \ll 1$ olduğu zaman kuplaj etkisi çok küçüktür.

Modlar arasındaki güç korunumu, kuple mod yaklaşımına göre,

$$\frac{dP}{dz} = 0 \quad (4.11)$$

şeklindedir. Kuple mod denklemindeki kuplaj katsayıları arasındaki ilişkiyi bulmak için

$$\frac{d}{dz} \left[|a_1(z)|^2 + |a_2(z)|^2 \right] = 2 \operatorname{Re} \left[(c_{12} + c_{21}^*) a_1^* a_2 \right] \quad (4.12)$$

ifadesinden faydalanılır.

Modların grup hızları aynı doğrultuda ise,

$$c_{12} = -c_{21}^* \quad (4.13)$$

ve modların grup hızları farklı doğrultuda ise,

$$c_{12} = c_{21}^* \quad (4.14)$$

dir.

4.1.2 Modların Zaman Domeninde Kuplajı

Optik fiberlerde a_1 ve a_2 modlarının zamana göre değişimleri $\exp(j\omega_1 t)$ ve $\exp(j\omega_2 t)$ olduğunda,

$$\frac{da_1}{dt} = j\omega_1 a_1 \quad (4.15)$$

ve

$$\frac{da_2}{dt} = j\omega_2 a_2 \quad (4.16)$$

olur. Zayıf kuplaj koşulunda ve kaybın sıfır olduğu ortamda, (4.15) ve (4.16) eşitlikleri,

$$\frac{da_1}{dt} = j\omega_1 a_1 + c_{12} a_2 \quad (4.17)$$

ve

$$\frac{da_2}{dt} = j\omega_2 a_2 + c_{21} a_1 \quad (4.18)$$

şeklindedir. Burada,

$c_{11} = j\omega_1$ öz kuplaj katsayısı

c_{12} : Birim zamanda a_2 ve a_1 modları arasındaki kuplaj katsayısı

c_{21} : Birim zamanda a_1 ve a_2 modları arasındaki kuplaj katsayısı

$c_{22} = j\omega_2$ öz kuplaj katsayısıdır.

Maksimum kuplaj $\omega_1 = \omega_2$ durumundadır. İki den fazla modun kuplajı için kuple denklem

$$\frac{da_i}{dt} = j\omega_i a_i + \sum_{i \neq k} c_{ik} a_k \quad (4.19)$$

şeklinde genelleştirilebilir.

Enerji korunumuna göre,

$$\frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt} \left[|a_1(t)|^2 + |a_2(t)|^2 \right] = 0 \quad (4.20)$$

dir. Kuplaj katsayıları arasında

$$c_{12} = -c_{21}^* \quad (4.21)$$

bağıntısı bulunur.

4.1.3 Modların Frekans Domeninde Kuplajı

Optik fiberlerde a_1 ve a_2 modlarının zamana göre değişimleri $\exp(j\omega_1 t)$ ve $\exp(j\omega_2 t)$ olduğunda,

$$\frac{da_1}{d\omega} = jt_1 a_1 \quad (4.22)$$

ve

$$\frac{da_2}{d\omega} = jt_2 a_2 \quad (4.23)$$

olur. Zayıf kuplaj koşulunda ve kaybın sıfır olduğu ortamda, (4.22) ve (4.23) eşitlikleri,

$$\frac{da_1}{d\omega} = jt_1 a_1 + c_{12} a_2 \quad (4.24)$$

ve

$$\frac{da_2}{d\omega} = jt_2 a_2 + c_{21} a_1 \quad (4.25)$$

şeklindedir. Burada,

$c_{11} = jt_1$ öz kuplaj katsayısı

c_{12} : Gözlemlenen frekansta a_2 ve a_1 modları arasındaki kuplaj katsayısı

c_{21} : Gözlemlenen frekansta a_1 ve a_2 modları arasındaki kuplaj katsayısı

$c_{22} = jt_2$ öz kuplaj katsayısıdır.

İkiden fazla modun kuplajı için kuple denklem,

$$\frac{da_i}{d\omega} = jt_i a_i + \sum_{i \neq k} c_{ik} a_k \quad (4.26)$$

şeklinde genelleştirilebilir. Kuplaj katsayıları arasında (4.21) bağıntısı mevcuttur.

4.2 Propagasyon Sabitindeki Değişim

(4.5) ve (4.6) denklemlerindeki propagasyon sabitlerinin aynı olduğu kabul edildiğinde,

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta \quad (4.27)$$

olur ve kuple mod denklemleri,

$$\frac{da_1}{dz} = -j\beta a_1 + c_{12} a_2 \quad (4.28)$$

ve

$$\frac{da_2}{dz} = -j\beta a_2 + c_{21} a_1 \quad (4.29)$$

olarak yazılır. Buradan

$$a_1 = M_1 \exp[(c_{12} c_{21})^{1/2} - j\beta]z + M_2 \exp[-(c_{12} c_{21})^{1/2} - j\beta]z \quad (4.30)$$

ve

$$a_2 = M_1 \left(\frac{c_{21}}{c_{12}} \right)^{1/2} \exp[((c_{12}c_{21})^{1/2} - j\beta)z] - M_2 \left(\frac{c_{21}}{c_{12}} \right)^{1/2} \exp[-((c_{12}c_{21})^{1/2} - j\beta)z] \quad (4.31)$$

olarak bulunur.

$z=0$ için M_1 ve M_2 katsayıları,

$$M_1 = \frac{1}{2} \left[a_1(0) + \left(\frac{c_{12}}{c_{21}} \right)^{1/2} a_2(0) \right] \quad (4.32)$$

ve

$$M_2 = \frac{1}{2} \left[a_1(0) - \left(\frac{c_{12}}{c_{21}} \right)^{1/2} a_2(0) \right] \quad (4.33)$$

dir. Kuplaj etkisiyle propagasyon sabitinde

$$\Delta\beta = j(c_{12}c_{21})^{1/2} \quad (4.34)$$

değişimi meydana gelir. $\Delta\beta$ kuple iki modun propagasyon sabitlerinde, kuplajın durumuna göre artma veya azalma şeklinde meydana gelen değişimdir. Kuple kılavuzların kayıplı ve kayıpsız olmasına göre $\Delta\beta$ farklı değerler alır. $\Delta\beta$, kılavuzlar, kayıpsız ise reel, kayıplı ise kompleks değer alır (Yuen 1994).

4.3 Kuplaj Katsayıları

Pertürbasyon Teorisi, düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzlarının ve silindirik yapıdaki optik dalga kılavuzlarının karşılıklı etkileşmelerinde kullanılan önemli bir teoridir. Burada amaç, matematiksel ifadeleri basit formlara indirgemektir. Pertürbasyon Teorisi'nin uygulandığı kuple kılavuzlarda alan ifadeleri,

$$E = aE_1 + bE_2 + E_0 \quad (4.35)$$

ve

$$H = aH_1 + bH_2 + H_0 \quad (4.36)$$

şeklindedir. a ve b , Pertürbasyon Teorisi yardımıyla bulunan katsayılar, E_0 ve H_0 pertürbasyon terimleridir.

Alan ifadeleri matematiksel olarak basite indirgendikten sonra uygulanan Maxwell denklemleri sonucu propagasyon sabiti,

$$\Delta\beta = \pm \frac{\omega\epsilon_0}{4P} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} (n_{II}^2 - n_3^2) E_2^* E_1 dx dy \quad (4.37)$$

olarak bulunur. (4.34) ve (4.37) denklemleri ile propagasyon doğrultusundan bağımsız olan kuplaj katsayıları elde edilir:

$$|c_{12}| = \frac{\omega\epsilon_0}{4P} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} (n_I^2 - n_3^2) E_1^* E_2 dx dy \quad (4.38)$$

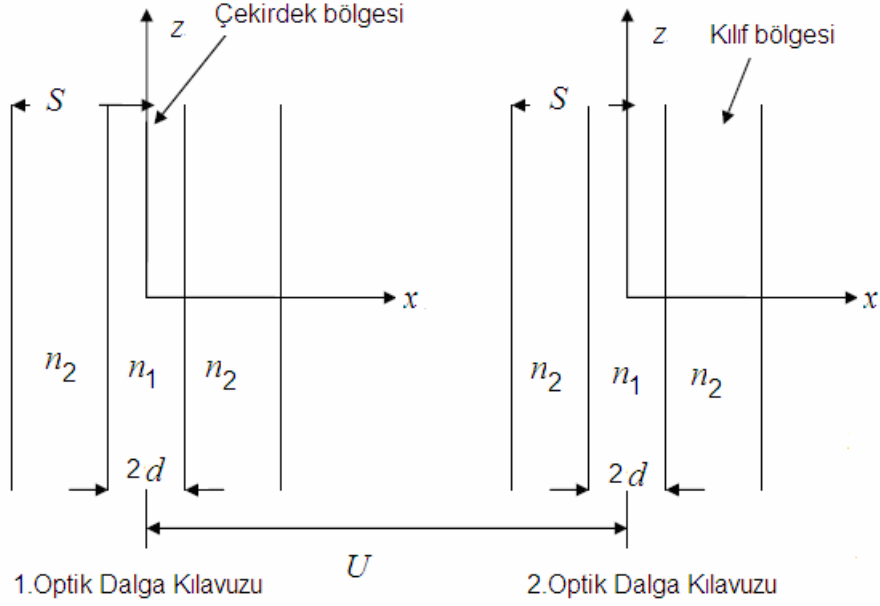
ve

$$|c_{21}| = \frac{\omega\epsilon_0}{4P} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} (n_{II}^2 - n_3^2) E_2^* E_1 dx dy \quad (4.39)$$

4.4 Kuple Katmanlı Yapıdaki Optik Dalga Kılavuzları

Düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzlarının kuplajı, kılıflı ve kılıfsız olarak incelenmiştir.

4.4.1 Kuple Kılıflı Düzlemsel Yapıdaki Katmanlı (Slab) Optik Dalga Kılavuzlarında Propagasyon Sabiti Değişiminin ve Kuplaj Katsayısının İncelenmesi



Şekil 4.1 Kuple kılıflı ve düzlemsel yapıdaki katmanlı paralel iki dalga kılavuzunun kuplajı.

Şekil 4.1’de kuple kılıflı düzlemsel yapıdaki katmanlı iki optik dalga kılavuzu bulunmaktadır, d yarıçaplı bu optik kılavuzların kılıfla beraber çekirdek yarıçapı S ve iki çekirdek eksenleri arasındaki mesafe U ’dur. Çekirdeğin kırılma indisi n_1 ve kılıfın kırılma indisi n_2 ’dir ve y doğrultusunda sonsuza doğru uzanan kılavuzlarda z doğrultusunda propagasyon mevcuttur.

4.4.1.1 Çift ve Tek TE Modları

Çekirdek bölgesi, kılıf bölgesi ve kılıfı saran bölgede elektrik alan ifadesi,

$$E_y = \begin{cases} A \begin{Bmatrix} \cos(\kappa x) \\ \sin(\kappa x) \end{Bmatrix} & 0 \leq x \leq d \\ B \exp(\gamma x) + C \exp(-\gamma x) & d \leq x \leq S \\ F \exp(-\rho x) & S \leq x \leq \infty \end{cases} \quad (4.40)$$

şeklindedir. Burada,

$$\rho = (\beta^2 - n_3^2 k_0^2)^{1/2} \quad (4.41)$$

dir. Burada, n_3 optik fiberlerin kılıflarını saran dış ortamın kırılma indisidir ve ρ da bu dış ortamın öz değeridir.

Elektrik alanın diğer bileşenleri ve magnetik alan bileşenleri Maxwell denklemleriyle bulunur ve sınır koşulları gereğince

$$B = \frac{A}{2} \frac{\kappa}{(\kappa^2 + \gamma^2)^{1/2}} \frac{\gamma - \rho}{\gamma + \rho} \exp(-\gamma d) \exp[-2\gamma(S - d)] \quad (4.42)$$

$$C = A \exp(\gamma d) \begin{Bmatrix} \cos(\kappa d) \\ \sin(\kappa d) \end{Bmatrix} \quad (4.43)$$

ve

$$F = \frac{2\kappa\gamma A}{(\gamma + \rho)(\kappa^2 + \gamma^2)^{1/2}} \exp(\rho S) \exp[-\gamma(S - d)] \quad (4.44)$$

katsayıları elde edilir. Burada (4.42) eşitliğinden görüldüğü gibi, kılıf bölgesinin kalınlığı olan S değeri arttıkça B katsayısı sıfıra yakınsar.

Özdeş iki optik fiberde, $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ propagasyon sabitiyle ilerleyen modlar için propagasyon sabiti değişimi,

$$|\Delta\beta| = \frac{4\kappa^2 \gamma^3 \rho}{\beta(1 + \gamma d)(\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2)^{1/2}} \exp[-2\gamma(S - d)] \exp[-\rho(U - 2S)] \quad (4.45)$$

olarak ifade edilir.

(4.39) ve (4.40) eşitlikleri ile özdeş iki optik fiberde çift TE modu için kuplaj katsayısı,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{2\alpha \mu_0 P d}{\beta(1 + \gamma d)} + \frac{\alpha \mu_0 P \sin(2\kappa d)}{\kappa \beta(1 + \gamma d)} + \frac{2\alpha \mu_0 P \cos(\kappa d)}{\gamma \beta(1 + \gamma d)} (1 - \exp(2\gamma(d - S))) + \frac{4\kappa^2 \gamma^2 2\alpha \mu_0 P}{\beta(1 + \gamma d)(\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2)} \frac{\exp(-2\gamma(S - d))}{\rho} \right] \quad (4.46)$$

ve tek TE modu için kuplaj katsayısı,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{2\alpha \mu_0 P d}{\beta(1 + \gamma d)} - \frac{\alpha \mu_0 P \sin(2\kappa d)}{\kappa \beta(1 + \gamma d)} + \frac{2\alpha \mu_0 P \sin(\kappa d)}{\gamma \beta(1 + \gamma d)} (1 - \exp(2\gamma(d - S))) + \frac{4\kappa^2 \gamma^2 2\alpha \mu_0 P}{\beta(1 + \gamma d)(\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2)} \frac{\exp(-2\gamma(S - d))}{\rho} \right] \quad (4.47)$$

şeklinde elde edilir.

Özdeş olmayan iki optik fiberde β_1 ve β_2 propagasyon sabitleriyle ilerleyen modlar için propagasyon sabiti değişimi,

$$|\Delta\beta| = 2k_0^2 (n_2^2 - n_3^2) \frac{\kappa_1 \kappa_2 \gamma_1^{3/2} \gamma_2^{3/2}}{[\beta_1 \beta_2 (1 + \gamma_1 d_1)(1 + \gamma_2 d_2)]^{1/2} (\gamma_1 + \rho_1)(\gamma_2 + \rho_2) [(\kappa_1^2 + \gamma_1^2)(\kappa_2^2 + \gamma_2^2)]^{1/2}} \frac{1}{\exp(\rho_1 S_1 + \rho_2 S_2) \exp(-[\gamma_1(S_1 - d_1) + \gamma_2(S_2 - d_2)]) \exp\left[-\frac{(\rho_1 + \rho_2)U}{2}\right]} \quad (4.48)$$

ile ifade edilir.

Çift TE modları için kuplaj katsayısı,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{4\alpha \mu_0 P \sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\kappa^2 \beta(1 + \gamma d_1)^{1/2} (1 + \gamma d_2)^{1/2}} + \frac{4\alpha \mu_0 P [\exp(\gamma d_2) - \exp(\gamma(d_1 + d_2 - S_1))] \cos(\kappa d_1)}{\beta(1 + \gamma d_1)^{1/2} (1 + \gamma d_2)^{1/2}} \frac{[\exp(\gamma d_1) - \exp(\gamma(d_1 + d_2 - S_2))] \cos(\kappa d_2)}{\gamma^2} + \frac{16\kappa^2 \gamma^2 \alpha \mu_0 P \exp(\gamma(d_1 + d_2 - S_1 - S_2))}{\rho(\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2) \beta(1 + \gamma d_1)^{1/2} (1 + \gamma d_2)^{1/2}} \right] \quad (4.49)$$

formundayken tek TE modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{4\alpha \mu_0 P \cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\kappa^2 \beta(1 + \gamma d_1)^{1/2} (1 + \gamma d_2)^{1/2}} + \frac{4\alpha \mu_0 P [\exp(\gamma d_2) - \exp(\gamma(d_1 + d_2 - S_1))] \cos(\kappa d_1)}{\beta(1 + \gamma d_1)^{1/2} (1 + \gamma d_2)^{1/2}} \right]$$

$$\left[\frac{[\exp(\gamma d_1) - \exp(\gamma(d_1 + d_2 - S_2))]\sin(\kappa d_2)}{\gamma^2} + \frac{16\kappa^2 \gamma^2 \omega \mu_0 P \exp(\gamma(d_1 + d_2 - S_1 - S_2))}{\rho(\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2) \beta (1 + \gamma d_1)^{1/2} (1 + \gamma d_2)^{1/2}} \right] \quad (4.50)$$

şeklindedir (Bayır, N., 2003).

4.4.1.2 Çift ve Tek TM Modları

Magnetik alan ifadesi çekirdek bölgesi, kılıf bölgesi ve kılıfı saran dış ortamda

$$H_y = \begin{cases} A_1 \begin{Bmatrix} \cos(\kappa x) \\ \sin(\kappa x) \end{Bmatrix} & 0 \leq x \leq d \\ B_1 \exp(\gamma x) + C_1 \exp(-\gamma x) & d \leq x \leq S \\ F_1 \exp(-\rho x) & S \leq x \leq \infty \end{cases}, \quad (4.51)$$

dir. Özdeş olan kuple optik fiberlerde propagasyon sabiti değişimi çift ve tek TM modları için,

$$|\Delta\beta| = \frac{n_1^2 n_2^2 \kappa^2 \gamma^2 [2 \exp((\gamma - \rho)(S - d)) - 1] \exp(-2\gamma(S - d)) \exp(-\rho(U - 2S))}{\beta [(n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2) \gamma d + n_1^2 n_2^2 (\kappa^2 + \gamma^2)]} \quad (4.52)$$

bulunur. Özdeş olan kuple optik fiberlerde kuplaj katsayısı çift TM modu için

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{2\omega \epsilon_0 n_1^2 P d}{\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} + \frac{\omega \epsilon_0 n_1^2 P \sin(2\kappa d)}{\kappa \beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} \right. \\ \left. \frac{2\omega \epsilon_0 n_1^2 P \cos^2(\kappa d) (1 - \exp(2\gamma(d - S)))}{\gamma \beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} + \frac{4\kappa^2 \gamma^2 \omega \epsilon_0 n_1^2 P \exp(-2\gamma(S - d))}{\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} \right. \\ \left. \frac{1}{\rho(\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2)} \right] \quad (4.53)$$

ve tek TM modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{2\omega \epsilon_0 n_1^2 P d}{\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} + \frac{\omega \epsilon_0 n_1^2 P \sin(2\kappa d)}{\kappa \beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} \right. \\ \left. \frac{2\omega \epsilon_0 n_1^2 P \sin^2(\kappa d)(1 - \exp(2\gamma(d - S)))}{\gamma \beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} + \frac{4\kappa^2 \gamma^2 \omega \epsilon_0 n_1^2 P \exp(-2\gamma(S - d))}{\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} \right. \\ \left. \frac{1}{\rho(\gamma + \rho)^2(\kappa^2 + \gamma^2)} \right] \quad (4.54)$$

dir.

Özdeş olmayan kuple optik fiberlerde çift TM modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{4\omega \epsilon_0 n_1^2 P \sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\kappa^2 \beta \left[d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{1/2} \left[d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{1/2}} + \right. \\ \left. \frac{4\omega \epsilon_0 n_1^2 P [\exp(\gamma d_2) - \exp(\gamma(d_1 + d_2 - S_1))] [\exp(\gamma d_1) - \exp(\gamma(d_1 + d_2 - S_1))] \cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\gamma^2 \beta \left[d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{1/2} \left[d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{1/2}} \right. \\ \left. \frac{16\kappa^2 \gamma^2 \omega \epsilon_0 n_1^2 P \exp(\gamma(d_1 + d_2 - S_1 - S_2))}{\rho \beta \left[d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{1/2} \left[d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{1/2} (\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2)} \right] \quad (4.55)$$

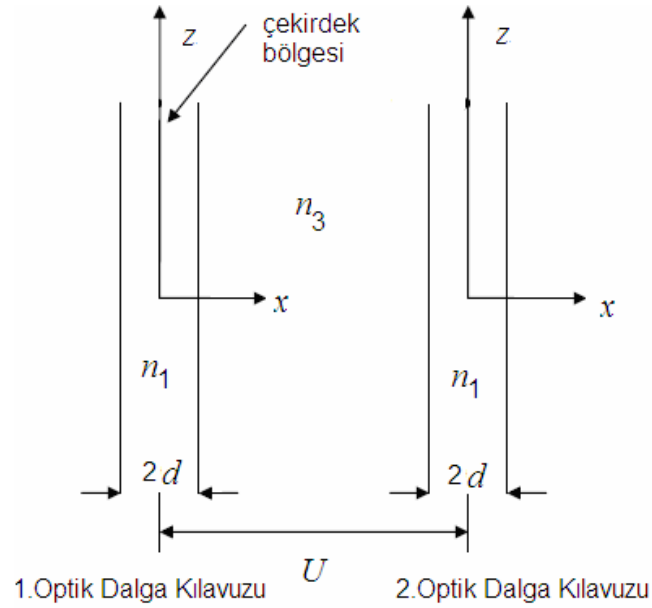
şeklinde ifade edilirken, tek TM modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{4\omega \epsilon_0 n_1^2 P \cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\kappa^2 \beta \left[d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{1/2} \left[d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{1/2}} + \right.$$

$$\begin{aligned}
& \frac{4\omega\epsilon_0 n_1^2 P [\exp(\gamma d_2) - \exp(\gamma(d_1 + d_2 - S_1))] [\exp(\gamma d_1) - \exp(\gamma(d_1 + d_2 - S_1))] \sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\gamma^2 \beta \left[d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{1/2} \left[d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{1/2}} + \\
& \frac{16\kappa^2 \gamma^2 \omega\epsilon_0 n_1^2 P \exp(\gamma(d_1 + d_2 - S_1 - S_2))}{\rho \beta \left[d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{1/2} \left[d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{1/2} (\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2)} \quad (4.56)
\end{aligned}$$

ile elde edilir.

4.4.2 Kuple Kılıfsız Optik Dalga Kılavuzlarında Propagasyon Sabitinin Değişiminin İncelenmesi



Şekil 4.2 Kuple kılıfsız özdeş optik dalga kılavuzları

4.4.2.1 Çift ve Tek TE Modları

$$E_y = \begin{cases} A \begin{cases} \cos(\kappa x) \\ \sin(\kappa x) \end{cases} & 0 \leq x \leq d \\ B \exp(-\gamma(|x| - d)) & d \leq x \leq \infty \end{cases}, \quad (4.57)$$

Sınır koşuluna göre katsayılar arasındaki bağıntı

$$B = A \begin{cases} \cos(\kappa d) \\ \sin(\kappa d) \end{cases} \quad (4.58)$$

şeklindedir.

Sırasıyla β_1 ve β_2 propagasyon sabitlerine sahip özdeş olmayan iki optik dalga kılavuzunun kuplajında propagasyon sabitinde meydana gelen değişim,

$$|\Delta\beta| = \frac{k_0^2}{2(\gamma_1 + \gamma_2)} (n_1^2 - n_2^2) \left[\frac{\gamma_1 \gamma_2}{\beta_1 \beta_2 (1 + \gamma_1 d_1)(1 + \gamma_2 d_2)} \right]^{1/2} \begin{Bmatrix} \cos(\kappa_1 d_1) \cos(\kappa_2 d_2) \\ \sin(\kappa_1 d_1) \sin(\kappa_2 d_2) \end{Bmatrix} \exp(\gamma_1 d_1) \exp(\gamma_2 d_2) \exp(-((\gamma_1 + \gamma_2) \frac{U}{2})) \quad (4.59)$$

olarak ifade edilir.

Özdeş olan fiberlerde kuplaj katsayısı çift TE modu için

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{2\omega \mu_0 P d}{\beta(1 + \gamma d)} + \frac{\omega \mu_0 P \sin(2\kappa d)}{\kappa \beta(1 + \gamma d)} + \frac{\omega \mu_0 P \cos^2(\kappa d)}{\gamma \beta(1 + \gamma d)} \right] \quad (4.60)$$

ve tek TE modu için

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{2\omega \mu_0 P d}{\beta(1 + \gamma d)} - \frac{\omega \mu_0 P \sin(2\kappa d)}{\kappa \beta(1 + \gamma d)} + \frac{\omega \mu_0 P \sin^2(\kappa d)}{\gamma \beta(1 + \gamma d)} \right] \quad (4.61)$$

şeklinde ifade edilirken, özdeş olmayan fiberlerde çift TE modu için

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{4\omega \mu_0 P \sin(\kappa l_1) \sin(\kappa l_2)}{\kappa^2 \beta (1 + \gamma l_1)^{1/2} (1 + \gamma l_2)^{1/2}} + \frac{4\omega \mu_0 P \cos(\kappa l_1) \cos(\kappa l_2)}{\gamma^2 \beta (1 + \gamma l_1)^{1/2} (1 + \gamma l_2)^{1/2}} \right] \quad (4.62)$$

tek TE modu için

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{4\omega \mu_0 P \cos(\kappa l_1) \cos(\kappa l_2)}{\kappa^2 \beta (1 + \gamma l_1)^{1/2} (1 + \gamma l_2)^{1/2}} + \frac{4\omega \mu_0 P \sin(\kappa l_1) \sin(\kappa l_2)}{\gamma^2 \beta (1 + \gamma l_1)^{1/2} (1 + \gamma l_2)^{1/2}} \right] \quad (4.63)$$

ile ifade edilir.

4.4.2.2 Çift ve Tek TM Modları

$$H_y = \begin{cases} A_1 \begin{Bmatrix} \cos(\kappa x) \\ \sin(\kappa x) \end{Bmatrix} & 0 \leq x \leq d \\ B_1 \exp(-\gamma(|x| - d)) & d \leq x \leq \infty \end{cases}, \quad (4.64)$$

Sınır koşuluna göre katsayılar arasındaki bağıntı,

$$B_1 = A_1 \begin{Bmatrix} \cos(\kappa l) \\ \sin(\kappa l) \end{Bmatrix} \quad (4.65)$$

şeklindedir.

Sırasıyla β_1 ve β_2 propagasyon sabitlerine sahip özdeş olmayan iki optik dalga kılavuzunun kuplajında propagasyon sabitinde meydana gelen değişim,

$$|\Delta\beta| = \frac{\omega^2 \epsilon_0^2 n_1^2 (n_1^2 - n_2^2)}{2(\gamma_1 + \gamma_2)} \frac{1}{\left[\beta_1 \beta_2 \left(d_1 + \frac{n_1^2 n_2^2}{\gamma_1} \frac{\kappa_1^2 + \gamma_1^2}{n_2^4 \kappa_1^2 + n_1^4 \gamma_1^2} \right) \left(d_2 + \frac{n_1^2 n_2^2}{\gamma_2} \frac{\kappa_2^2 + \gamma_2^2}{n_2^4 \kappa_2^2 + n_1^4 \gamma_2^2} \right) \right]^{1/2}} \quad (4.66)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos(\kappa_1 d_1) \cos(\kappa_2 d_2) \\ \sin(\kappa_1 d_1) \sin(\kappa_2 d_2) \end{array} \right\} \exp(\gamma_1 d_1) \exp(\gamma_2 d_2) \exp(-((\gamma_1 + \gamma_2) \frac{U}{2}))$$

olarak ifade edilir.

Özdeş olan fiberlerde çift TM modu için kuplaj katsayısı,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{2\omega \epsilon_0 n_1^2 P d}{\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} + \frac{\omega \epsilon_0 n_1^2 P \sin(2\kappa d)}{\kappa \beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} + \right. \\ \left. \frac{2\omega \epsilon_0 n_1^2 P \cos^2(\kappa d)}{\gamma \beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} \right] \quad (4.67)$$

ve tek TM modu için

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{2\omega \epsilon_0 n_1^2 P d}{\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} - \frac{\omega \epsilon_0 n_1^2 P \sin(2\kappa d)}{\kappa \beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} + \right. \\ \left. \frac{2\omega \epsilon_0 n_1^2 P \sin^2(\kappa d)}{\gamma \beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} \right] \quad (4.68)$$

şeklindeyken özdeş olmayan optik fiberlerde kuplaj katsayısı çift TM modu için

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{4\omega \epsilon_0 n_1^2 P \sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\kappa^2 \beta \left[d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{1/2} \beta \left[d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{1/2}} + \right.$$

$$\frac{4\omega\epsilon_0 n_1^2 P \cos(\kappa l_1) \cos(\kappa l_2)}{\gamma^2 \beta \left[d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{1/2} \beta \left[d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{1/2}} \quad] \quad (4.69)$$

ve tek TM modu için

$$c_{21} = \frac{\omega\epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{4\omega\epsilon_0 n_1^2 P \cos(\kappa l_1) \cos(\kappa l_2)}{\kappa^2 \beta \left[d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{1/2} \beta \left[d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{1/2}} + \right. \\ \left. \frac{4\omega\epsilon_0 n_1^2 P \sin(\kappa l_1) \sin(\kappa l_2)}{\gamma^2 \beta \left[d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{1/2} \beta \left[d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{1/2}} \right] \quad (4.70)$$

şeklindedir.

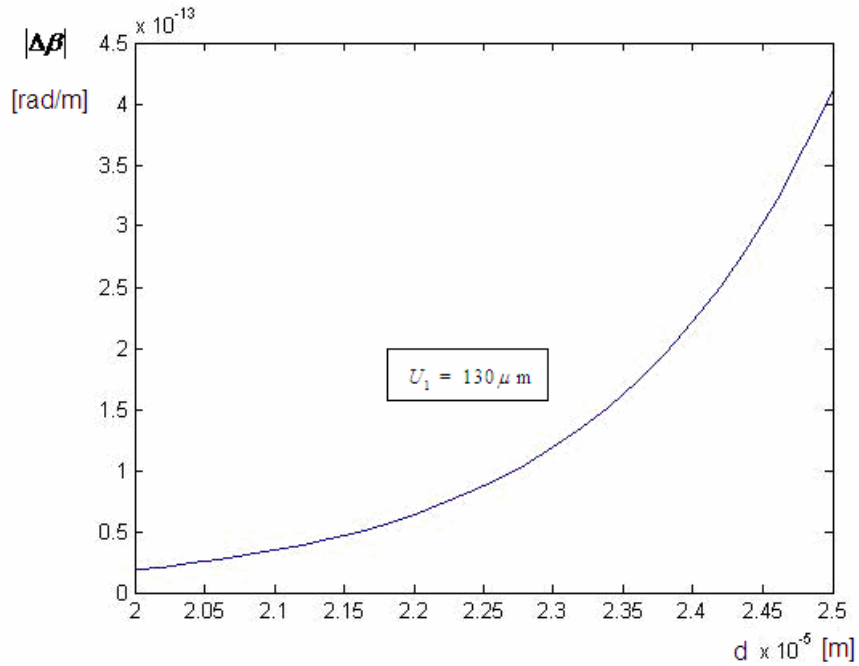
5 TASARIM UYGULAMALARI

5.1 Tasarım 1:

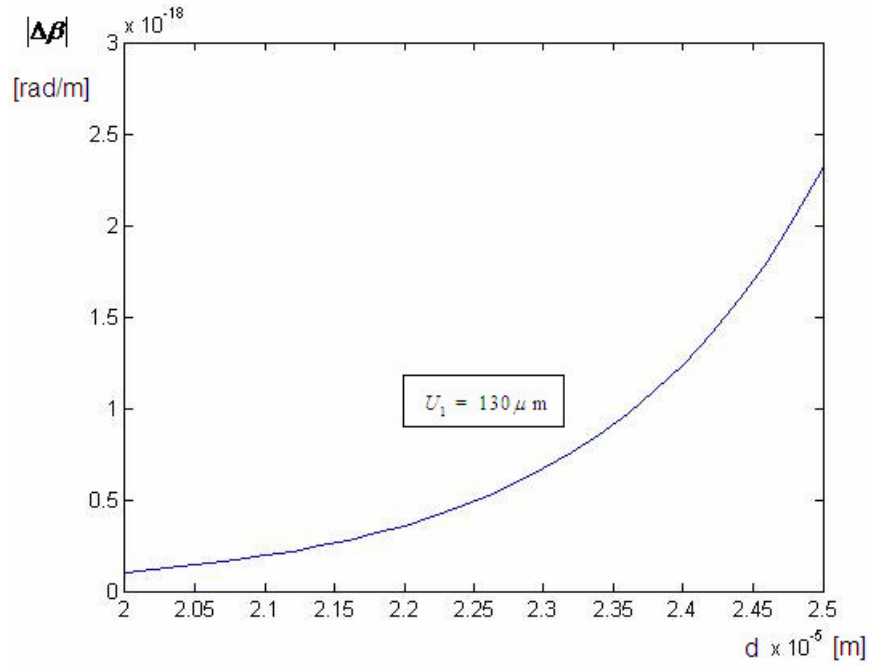
Kuple paralel optik dalga kılavuzlarının analiz incelemeleri neticesinde Matlab matematik programı kullanılarak çeşitli tasarım uygulamaları yapılmıştır.

200 THz’de çalışılan kuple paralel kılıflı iki özdeş optik fiberde $n_1 = 1.5$, $n_2 = 1.49$, $n_3 = 1$,

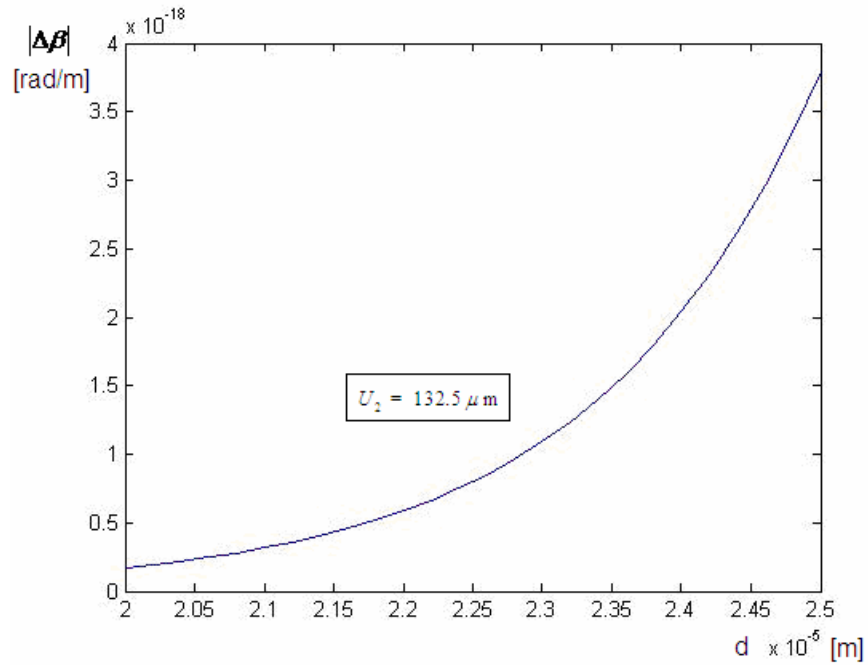
$\beta = 0.625 \times 10^7$, $d = 25 \times 10^{-6}$ m, $S = 62.5 \times 10^{-6}$ m olup kılavuzlanan TE ve TM modlarının kuplajıyla oluşan propagasyon sabiti değişimini $U_1 = 130 \times 10^{-6}$ m, $U_2 = 132.5 \times 10^{-6}$ m, $U_3 = 135 \times 10^{-6}$ m mesafeleri için incelenmiştir. Optik fiber çekirdek yarıçapında $d = 20 \times 10^{-6}$ m’den $d = 25 \times 10^{-6}$ m ye kadar değişim gözlenmiştir.



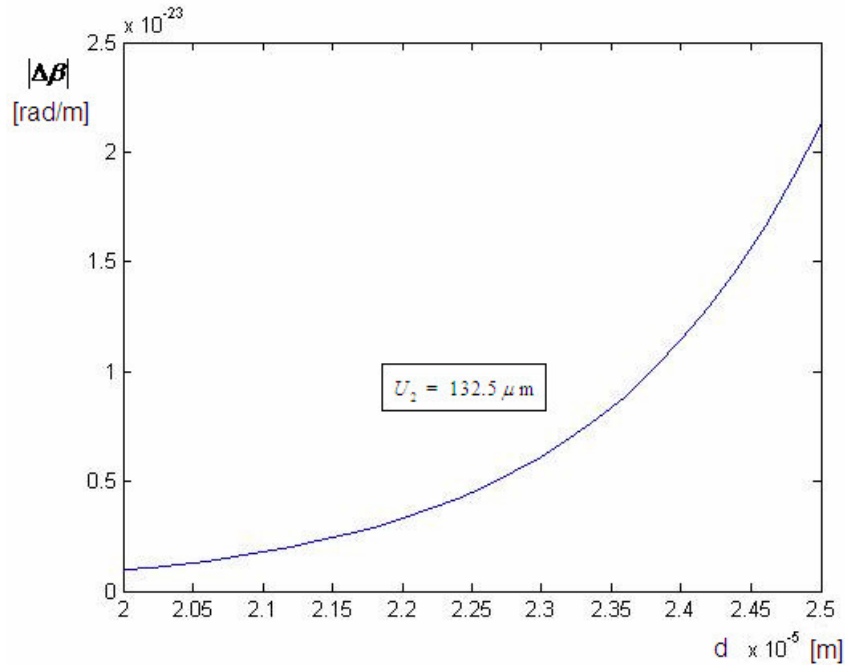
Şekil 4.3 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_1 = 130 \mu m$ durumunda, TE modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.



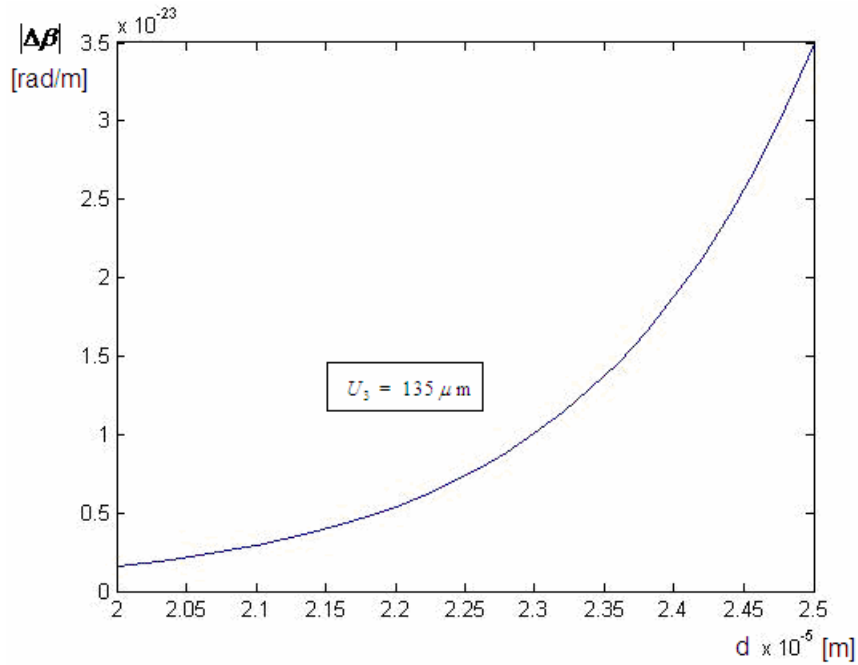
Şekil 4.4 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_1 = 130 \mu\text{m}$ durumunda, TM modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.



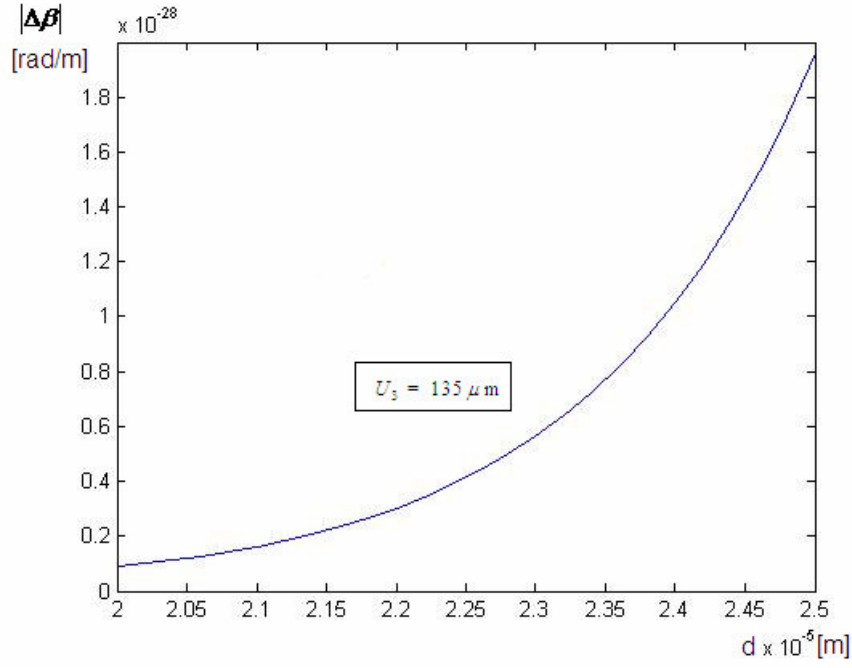
Şekil 4.5 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_2 = 132.5 \mu\text{m}$ durumunda, TE modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.



Şekil 4.6 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_2 = 132.5 \mu\text{m}$ durumunda, TM modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.



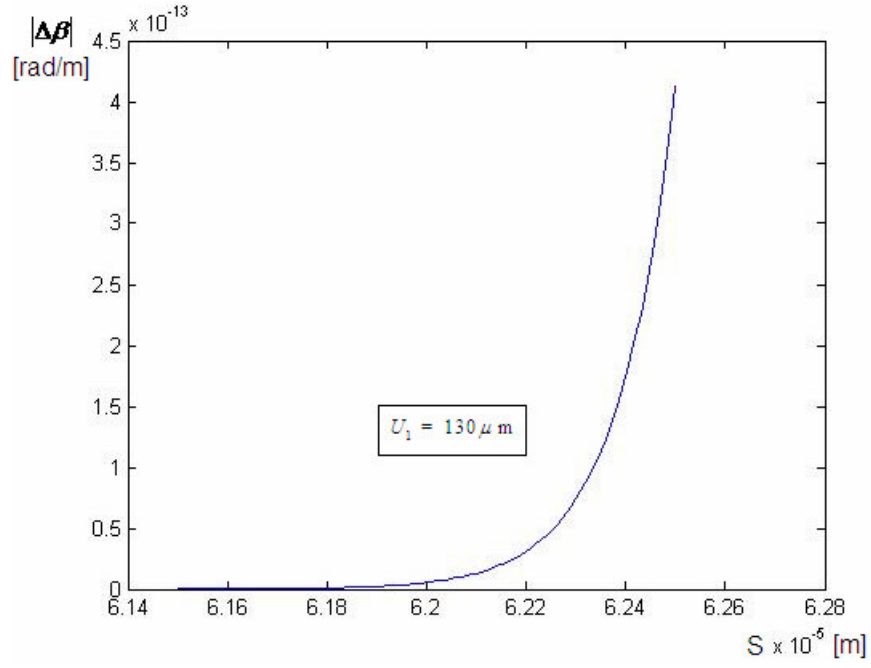
Şekil 4.7 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_3 = 135 \mu\text{m}$ durumunda, TE modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.



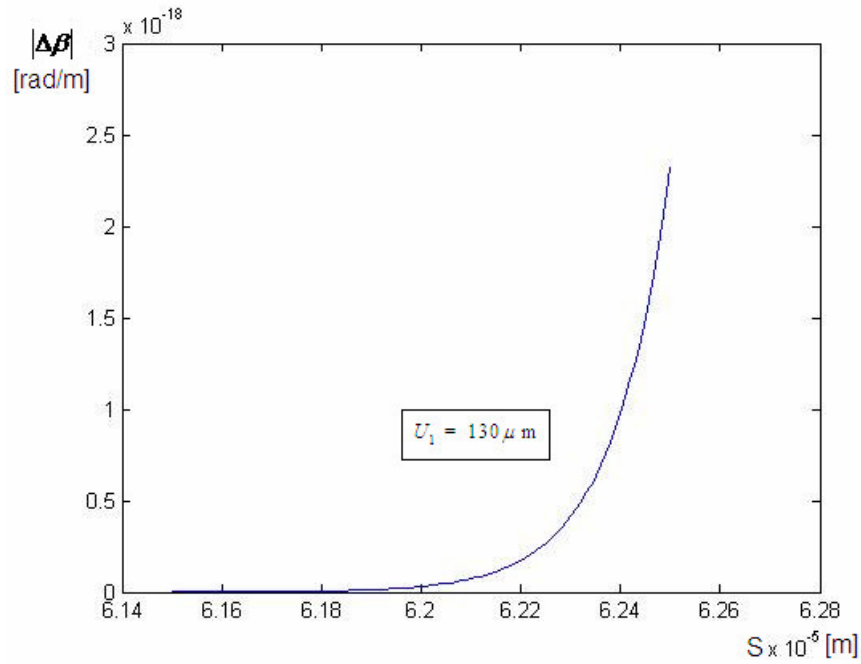
Şekil 4.8 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_3 = 135 \mu\text{m}$ durumunda, TM modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.

Grafiklerden de anlaşıldığı gibi, $U_1 = 130 \times 10^{-6}$, $U_2 = 132.5 \times 10^{-6}$, $U_3 = 135 \times 10^{-6}$ değişimi ile kuple paralel kılıflı iki özdeş optik fiberin kılıfları arasındaki mesafe sırasıyla $U_1 - 2S = 5 \times 10^{-6}$, $U_2 - 2S = 7.5 \times 10^{-6}$, $U_3 - 2S = 10 \times 10^{-6}$ dır. Böylece sabit d ve S değerlerinde kuple paralel kılıflı iki özdeş optik fiber arasındaki mesafe arttıkça propagasyon sabitindeki değişim azalmaktadır. Grafiklerden çıkarılan diğer sonuç ise, TE ve TM modlarının kuplajında; sabit S ve U değerlerinde, optik fiber çekirdeğinin yarıçapındaki artış ile propagasyon sabitinin artmasıdır. Bunun nedeni, çekirdeğin merkezinden uzaklaşarak kuplajın etki alanına yaklaşılmasıdır.

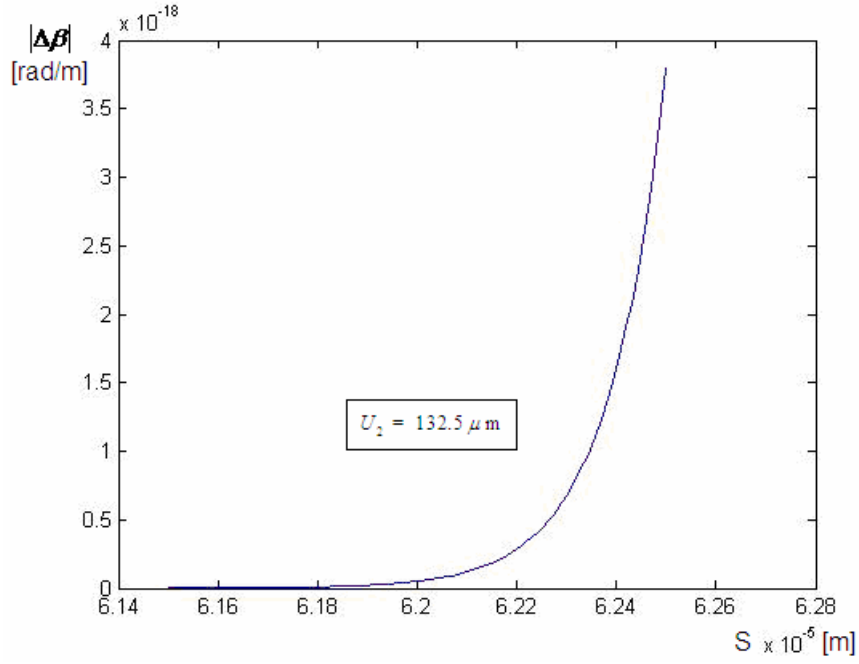
Tasarımın bir sonraki adımında S parametresi değişimindeki propagasyon sabiti bulunmuştur.



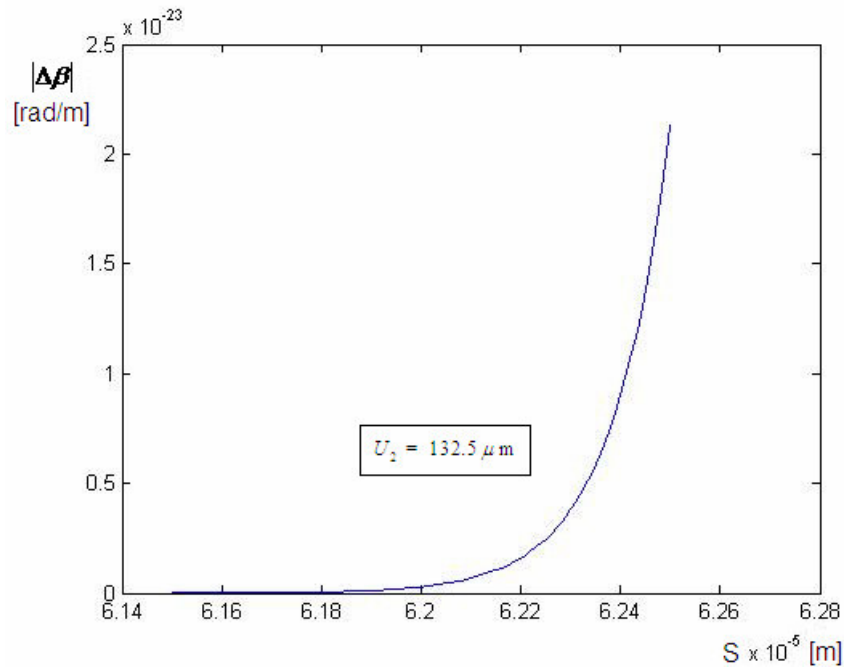
Şekil 4.9 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_1 = 130 \mu\text{m}$ durumunda, TE modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin kılıf bölgesinin yarıçapına göre değişimi.



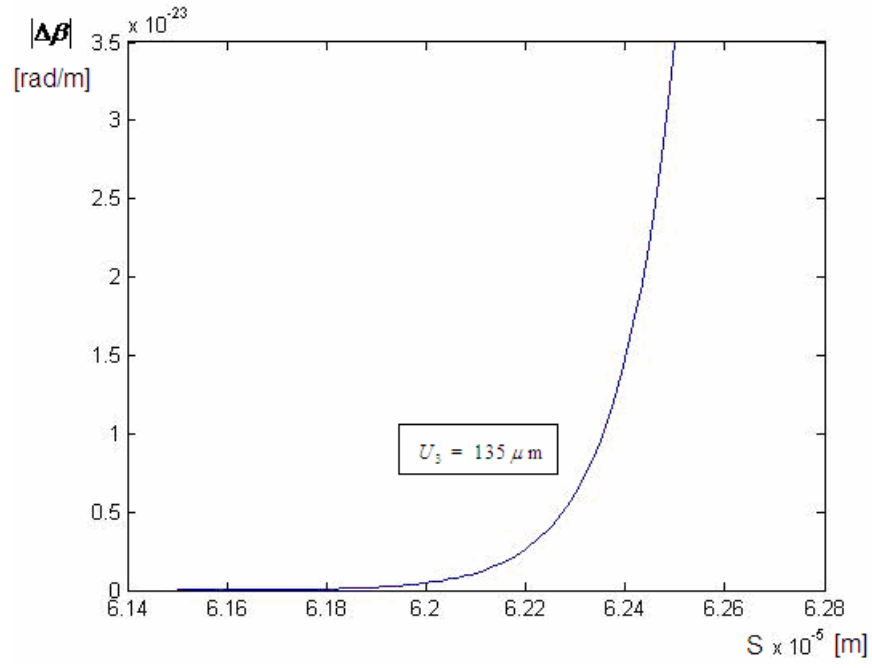
Şekil 4.10 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_1 = 130 \mu\text{m}$ durumunda, TM modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin kılıf bölgesinin yarıçapına göre değişimi.



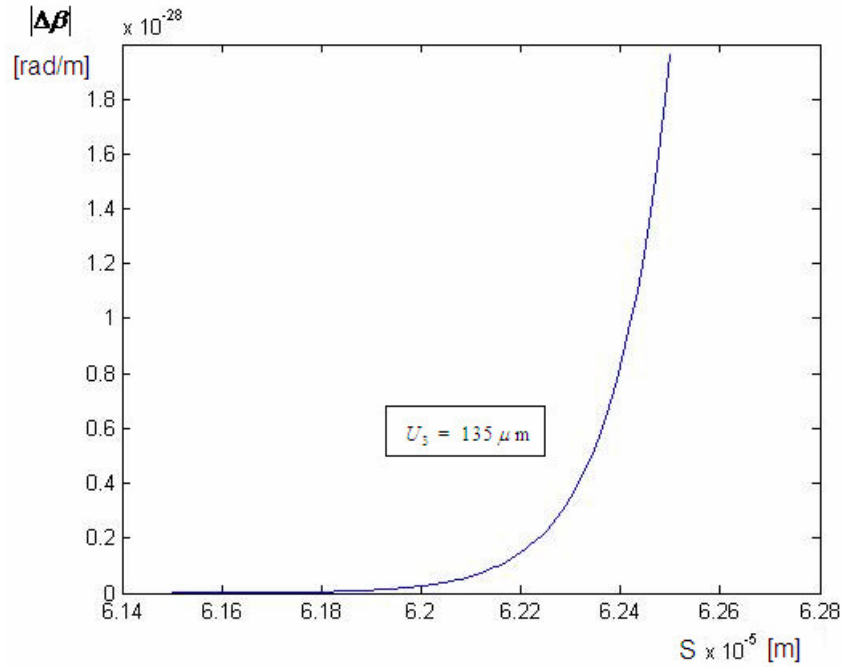
Şekil 4.11 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_2 = 132.5 \mu\text{m}$ durumunda, TE modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin kılıf bölgesinin yarıçapına göre değişimi.



Şekil 4.12 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_2 = 132.5 \mu\text{m}$ durumunda, TM modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin kılıf bölgesinin yarıçapına göre değişimi.

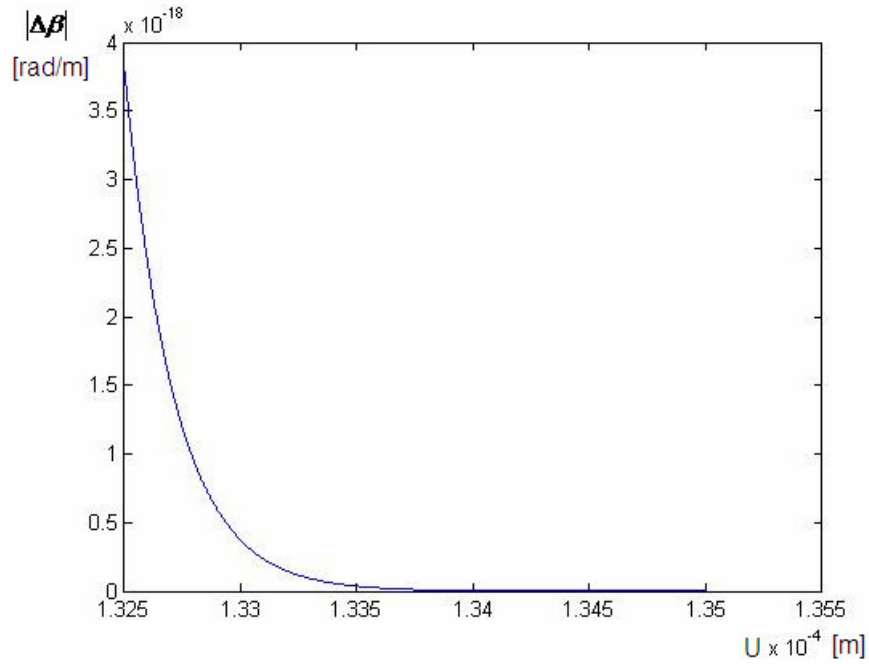


Şekil 4.13 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_3 = 135 \mu m$ durumunda, TE modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin kılıf bölgesinin yarıçapına göre değişimi.

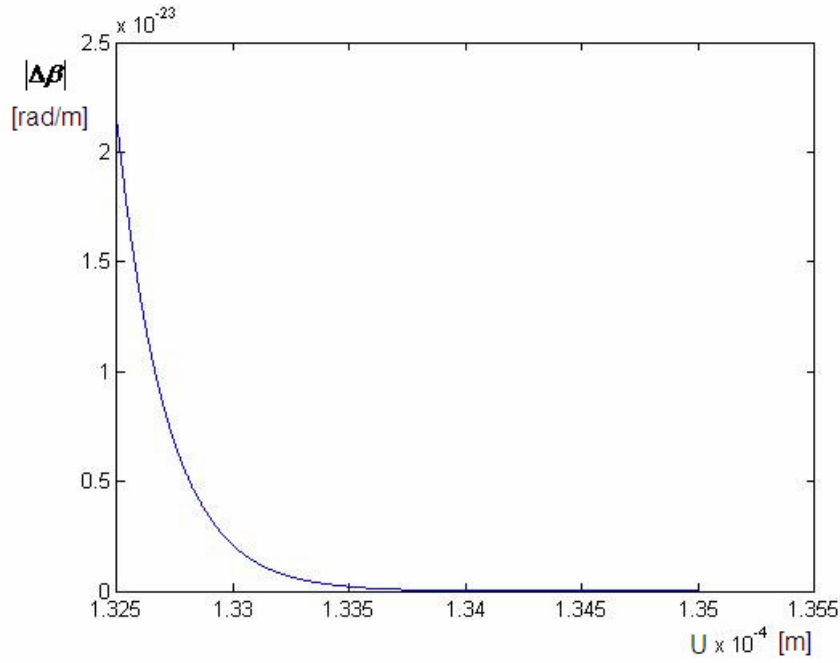


Şekil 4.14 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U_3 = 135 \mu m$ durumunda, TM modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin kılıf bölgesinin yarıçapına göre değişimi.

Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’te kuple paralel kılıflı özdeş iki optik fiberde U değerinin artışıyla S ’deki ve TE ve TM modlarının kuplajında propagasyon sabiti değişimi incelenmiştir. U değerinin artmasıyla fiberler arasındaki mesafe arttığından kuplaj etkisi azalmakta ve bu nedenle, propagasyon sabitindeki değişim azalmaktadır. Ayrıca d ve U sabitken S ’deki artış ile propagasyon sabitinde meydana gelen değişimin, S ve U sabitken d ’deki artış ile propagasyon sabitinde meydana gelen değişimden daha dik ve keskin olduğu görülmektedir.



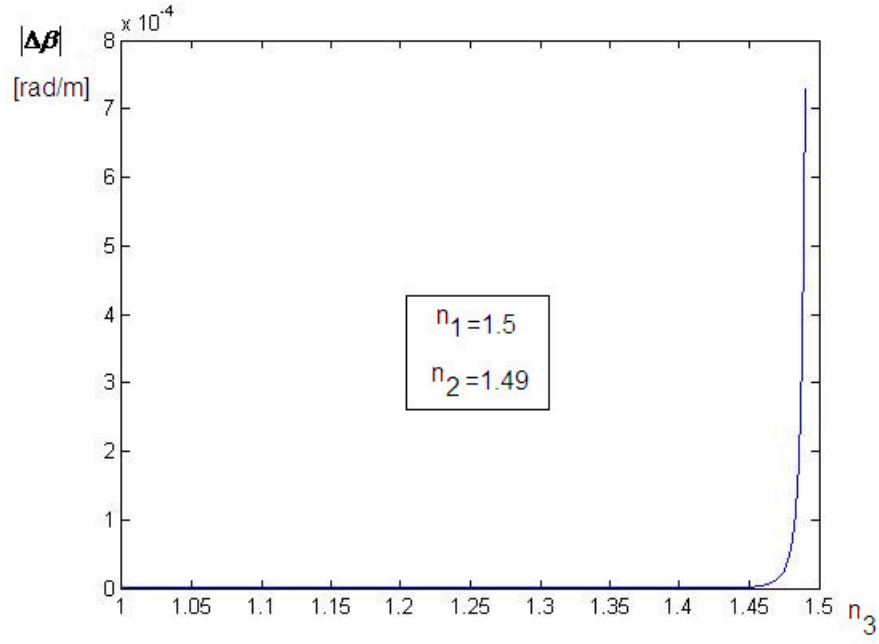
Şekil 4.15 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U = 135 \mu\text{m}$ durumunda, kılıf bölgesinde TE modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin optik fiberlerin arasındaki mesafeye göre değişimi.



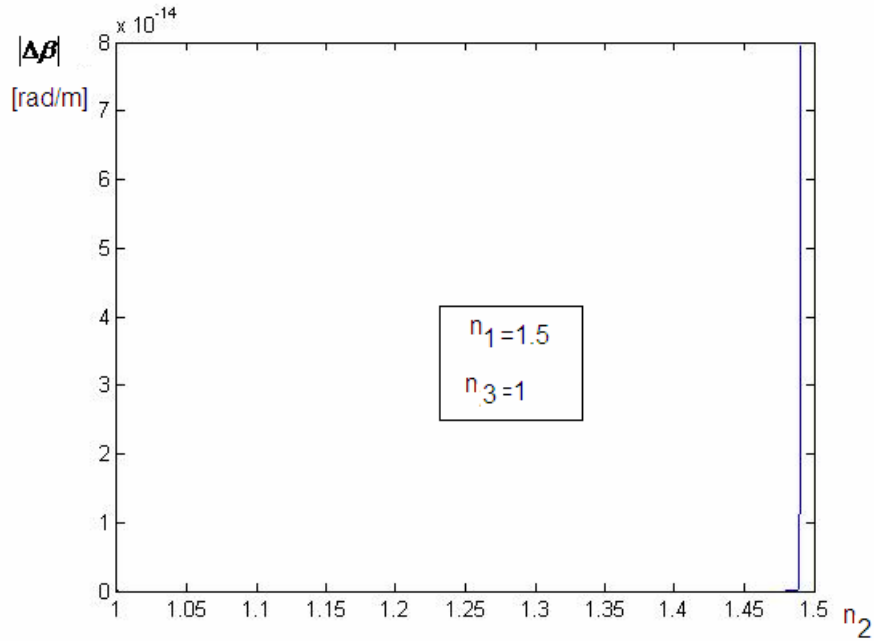
Şekil 4.16 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $U = 135 \mu\text{m}$ durumunda, kılıf bölgesinde TM modlarının kuplajında propagasyon sabitindeki değişimin optik fiberlerin arasındaki mesafeye göre değişimi.

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16, sabit d ve S değerlerinde U değerinin artışıyla propagasyon sabitindeki değişimi göstermektedir. Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzu arasındaki mesafe arttıkça propagasyon sabitinde değişim azalma şeklinde gözlenmiştir.

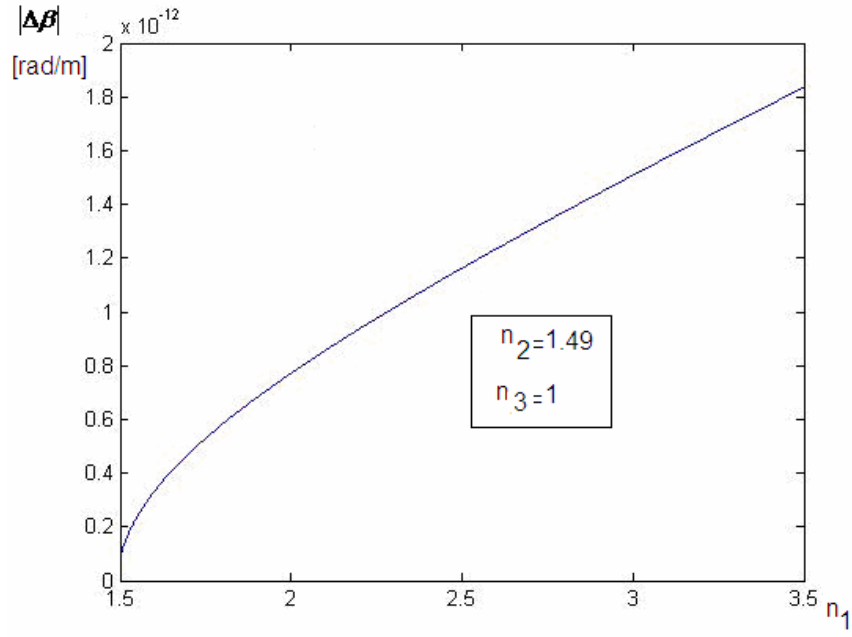
Şekil 4.3'ten Şekil 4.16'ya kadar TE ve TM modlarının karşılaştırmaları kuplajında, TE modları arasındaki kuplajın TM modları arasındaki kuplajdan daha etkin olduğu görülmüştür.



Şekil 4.17 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $n_1=1.5$ ve $n_2=1.49$ durumunda, TE modlarının kuplajlanması durumunda, propagasyon sabitindeki değişimin kılıf bölgesini saran dış ortamın kırılma indisine göre değişimi.



Şekil 4.18 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $n_1=1.5$ ve $n_3=1$ durumunda TE modlarının kuplajlanması durumunda, propagasyon sabitindeki değişimin kılıf bölgesinin kırılma indisine göre değişimi.



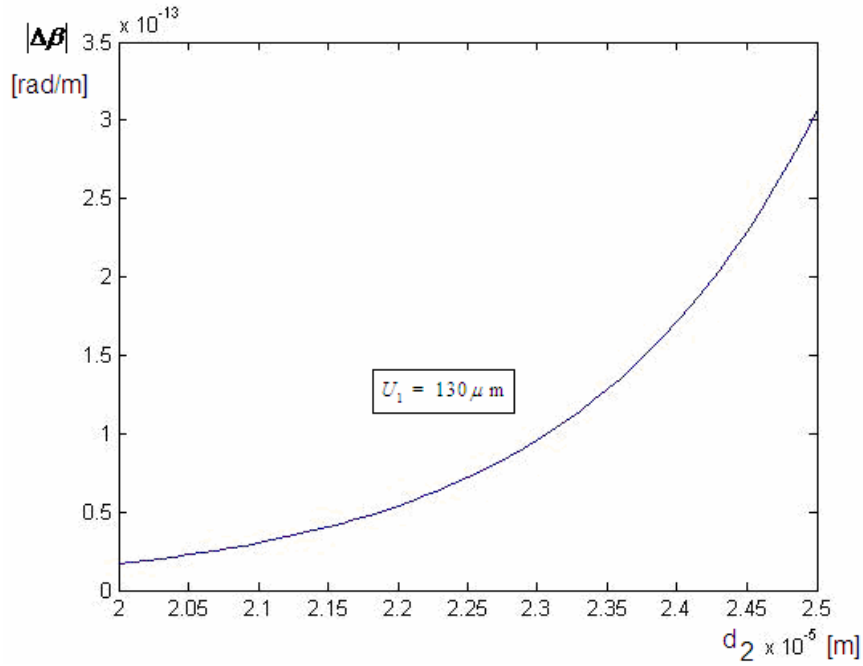
Şekil 4.19 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, özdeş ve paralel iki optik dalga kılavuzunda, $n_2=1.49$ ve $n_3=1$ durumunda TE modlarının kuplajlanması durumunda, propagasyon sabitindeki değişimin çekirdek bölgesinin kırılma indisine göre değişimi.

5.2 Tasarım 2:

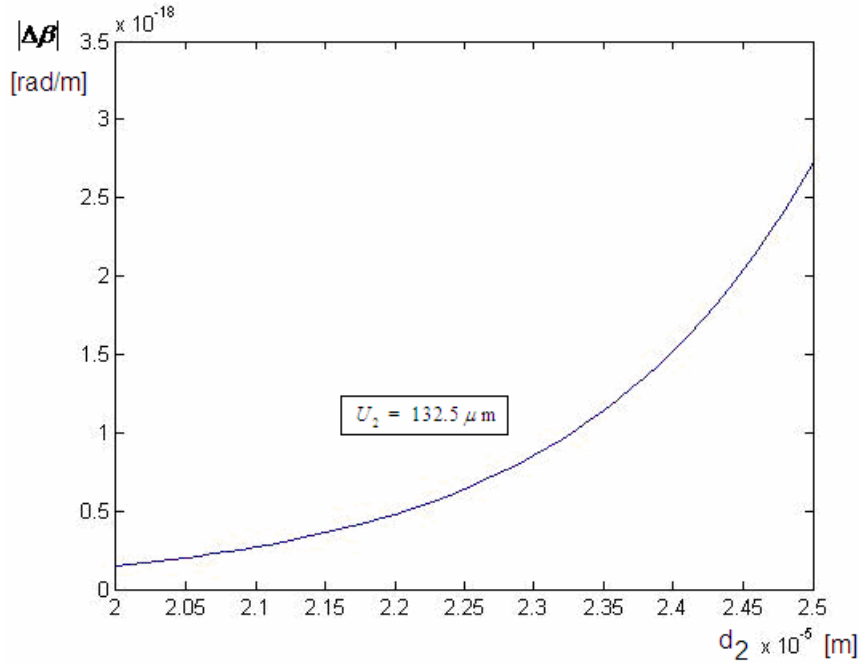
200 THz’de çalışılan kuple paralel iki kılıflı ve özdeş olmayan optik dalga kılavuzlarının kırılma indisleri eşittir ve değerleri $n_1 = 1.5$, $n_2 = 1.49$, $n_3 = 1$ dir. Optik fiberler kayıpsız

olup fiber boyunca ilerleyen çift TE modların propagasyon sabitleri $\beta_1 = 0.625 \times 10^7$ ve $\beta_2 = 0.627 \times 10^7$ dir. Diğer parametreler, $d_1 = 20 \mu m$, $d_2 = 25 \mu m$, $S_1 = 62,5 \mu m$ ve

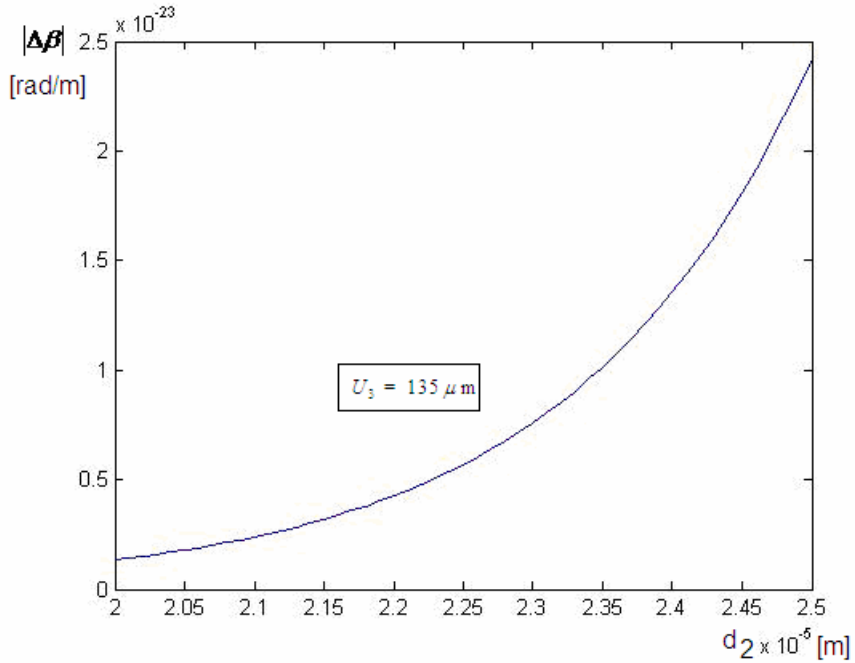
$S_2 = 65 \mu m$ ’dir. Sırasıyla $U_1 = 130 \times 10^{-6}$ m, $U_2 = 132.5 \times 10^{-6}$ m, $U_3 = 135 \times 10^{-6}$ m değerlerinde propagasyon sabiti değişimini ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi boyunca incelenmiştir.



Şekil 4.20 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, paralel ve özdeş olmayan iki optik dalga kılavuzunda, $U_1 = 130 \mu m$ mesafesinde, TE modlarının kuplajlanması durumunda, propagasyon sabitindeki değişimin ikinci kılavuzun çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.



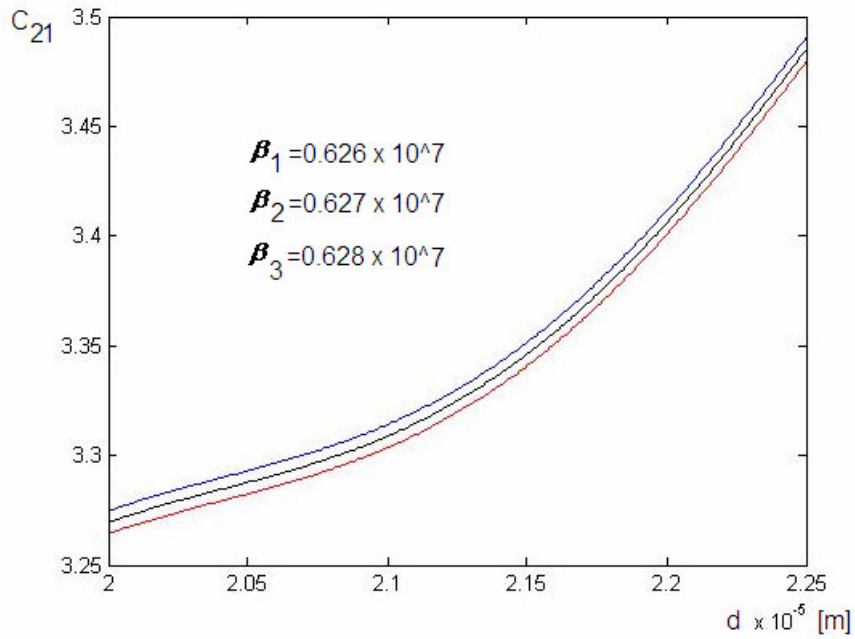
Şekil 4.21 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, paralel ve özdeş olmayan iki optik dalga kılavuzunda, $U_2 = 132.5 \mu m$ mesafesinde, TE modlarının kuplajlanması durumunda, propagasyon sabitindeki değişimin ikinci kılavuzun çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.



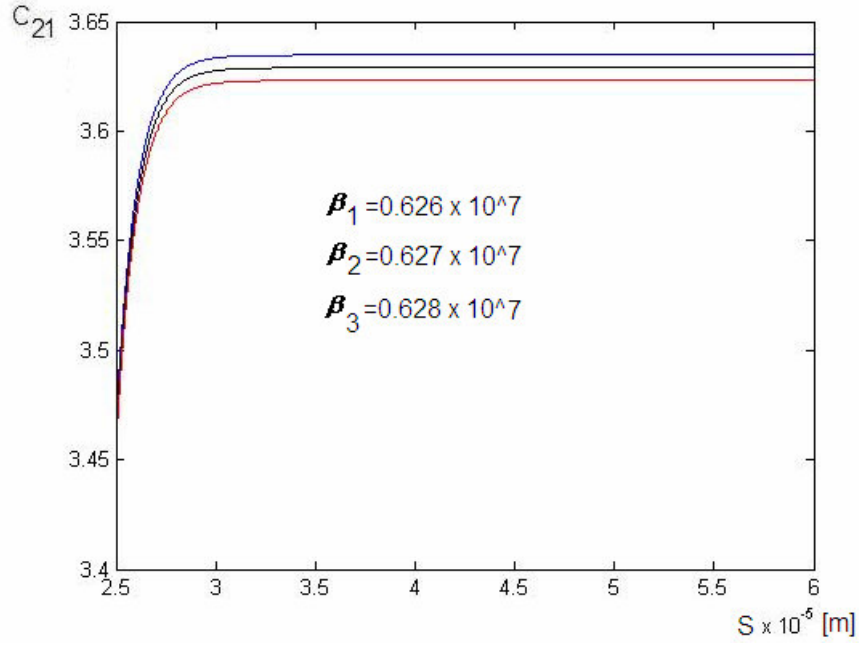
Şekil 4.22 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, paralel ve özdeş olmayan iki optik dalga kılavuzunda, $U_3 = 135 \mu m$ mesafesinde, TE modlarının kuplajlanması durumunda propagasyon sabitindeki değişimin ikinci kılavuzun çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.

5.3 Tasarım 3:

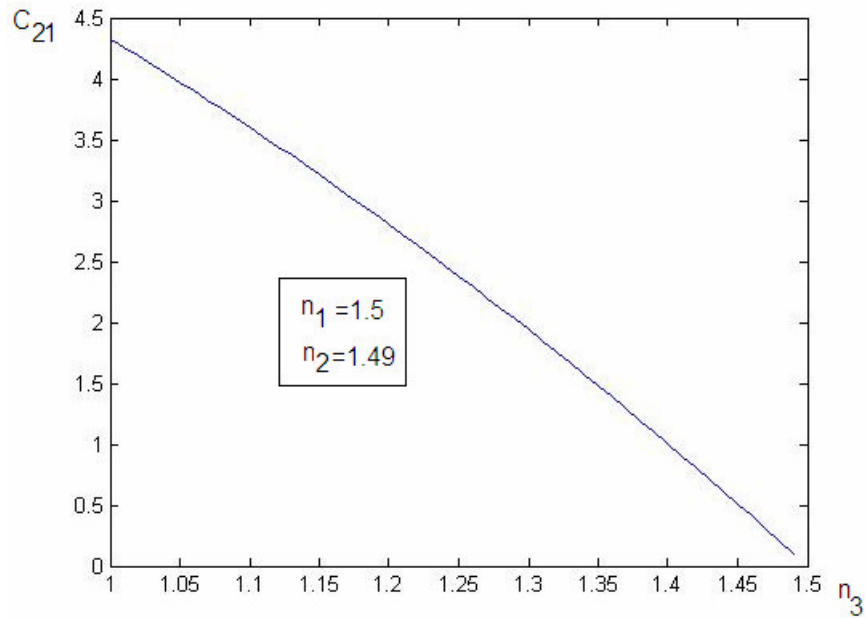
200 THz de çalışılan kuple paralel kılıflı özdeş iki optik fiberde kırılma indisleri eşittir ve değerleri $n_1 = 1.5$ (çekirdek bölgesi), $n_2 = 1.49$ (kılıf bölgesi) dir. Kuple paralel kılıflı optik dalga kılavuzları kayıpsız olup kılavuzlanan çift TE modların propagasyon sabiti, $n_2 k_0 \leq \beta \leq n_1 k_0$ dikkate alınarak sırasıyla $\beta_1 = 0.626 \times 10^7$, $\beta_2 = 0.627 \times 10^7$, $\beta_3 = 0.628 \times 10^7$ değerlerindedir. Kuplörün fiziksel parametreleri $d_1 = d_2 = 22.5 \mu m$, $S_1 = S_2 = 60 \mu m$ ve $U = 130 \times 10^{-6}$ m'dir.



Şekil 4.23 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, paralel ve özdeş iki optik dalga kılavuzunda, belirtilen propagasyon sabiti değerlerinde TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısının çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi.



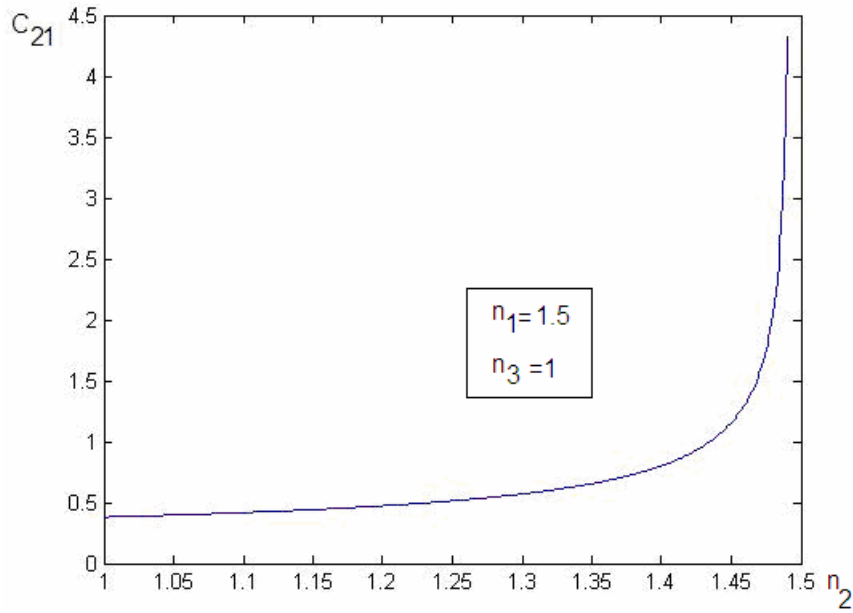
Şekil 4.24 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, paralel ve özdeş iki optik dalga kılavuzunda, belirtilen propagasyon sabiti değerlerinde TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısının kılıf bölgesinin yarıçapına göre değişimi.



Şekil 4.25 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, paralel ve özdeş iki optik dalga kılavuzunda, $n_1=1.5$ ve $n_2=1.49$ durumunda, TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısındaki değişimin kılıfı saran dış ortamın kırılma indisine göre değişimi.

Optik dalga kılavuzlarını saran ortamın kırılma indisi $1 \leq n_3 \leq 1.49$ arasında değerler alınarak c_{21} kuplaj katsayısı çizdirilmiştir. Fiziksel olarak ifade etmek gerekirse kuple kılıflı paralel ve özdeş optik dalga kılavuzları, kırılma indisi $1 \leq n_3 \leq 1.49$ arasında değer alan herhangi bir sıvı yada madde içine yerleştirilmiştir. Şekil 4.25’den görüldüğü gibi n_3 değeri artarak n_2 değerine yaklaştıkça kuplaj katsayısı değeri azalmaktadır. Kılavuzların fiziksel parametreleri olan U , S ve d değerleri sabitken kılıflı özdeş fiberleri saran ortamın kırılma indisi artarak kılıfın kırılma indisine yaklaşırsa kuplaj katsayısını değer olarak azaltmak mümkündür.

Optik kuplör tasarımına, çekirdek ve kılıf bölgesi kırılma indisleri değişiminin kuplaj katsayısı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla Şekil 4.26, Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29’de grafikleri verilen tasarımlar yapılmıştır.

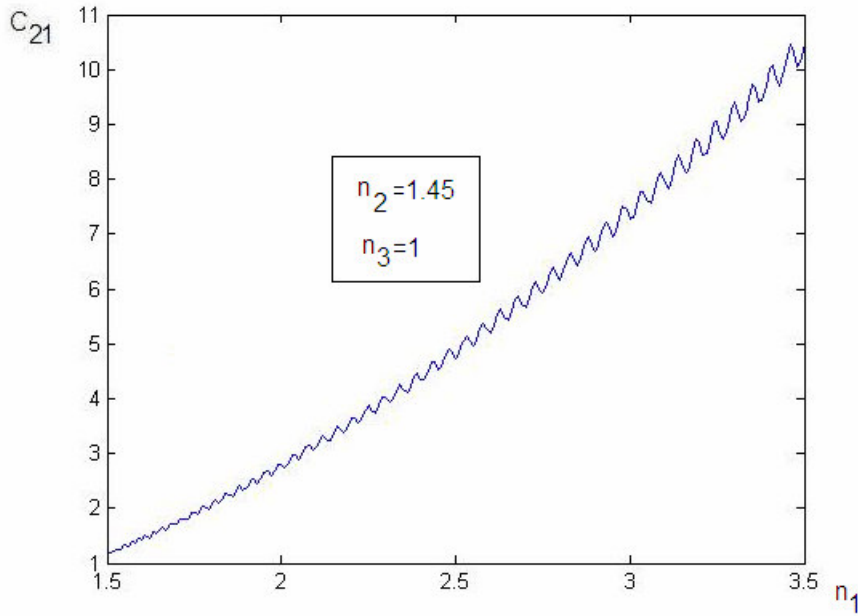


Şekil 4.26 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, paralel ve özdeş iki optik dalga kılavuzunda, $n_1=1.5$ ve $n_3=1$ durumunda, çekirdek bölgesinde TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısındaki değişimin kılıf bölgesi kırılma indisine göre değişimi.

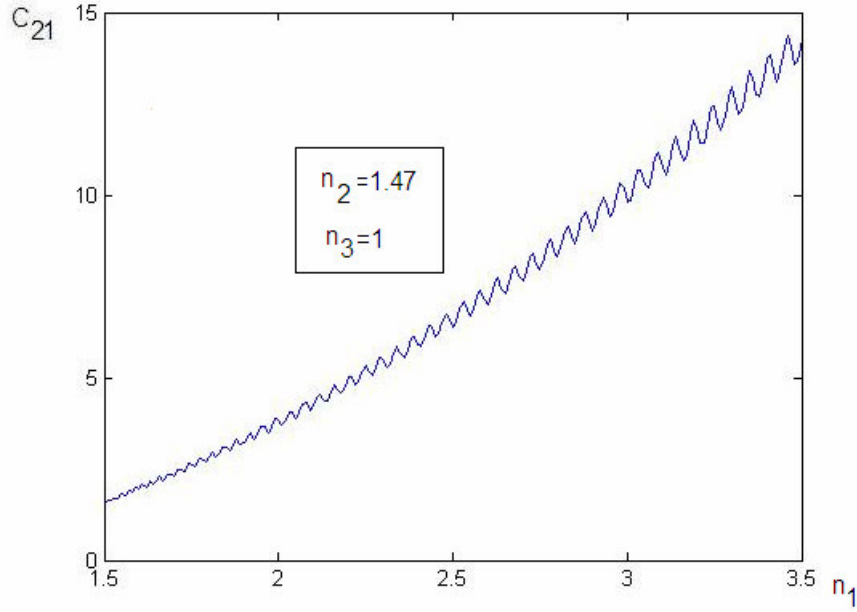
Şekil 4.26’da kılıf bölgesi kırılma indisi olan n_2 değeri değişkendir ve $1 \leq n_2 \leq 1.49$ aralığında değerler almaktadır. Görüldüğü gibi kılıf bölgesi kırılma indisi arttıkça ve çekirdek bölgesi kırılma indisine yaklaştıkça kuplaj katsayısı artmaktadır. İfadenin daha belirgin olabilmesi için grafik şu şekilde yorumlanabilir. Kılıf bölgesi kırılma indis değeri 1

olduğunda diğer bir ifadeyle $n_3 = n_2 = 1$ olduğunda kuple paralel dalga kılavuzları kılıfsız gibi düşünülebilir. Çekirdek bölgeleri arasındaki mesafe $U - 2d = 85\mu m$ değerindedir ve n_1 ile n_3 kırılma indisleri arasında çok keskin bir fark vardır. Bu durumda kuplaj katsayısının küçük değerde olması beklendiği gibidir. $n_2 = 1.49 \cong 1.5$ kabulü ile $U - 2d = 5\mu m$ değerindedir ve çekirdek bölgeleri arasındaki mesafe oldukça küçülmüş gibi düşünülebilir. Bu durumda kuplaj katsayısının büyük değerde olması beklendiği gibidir.

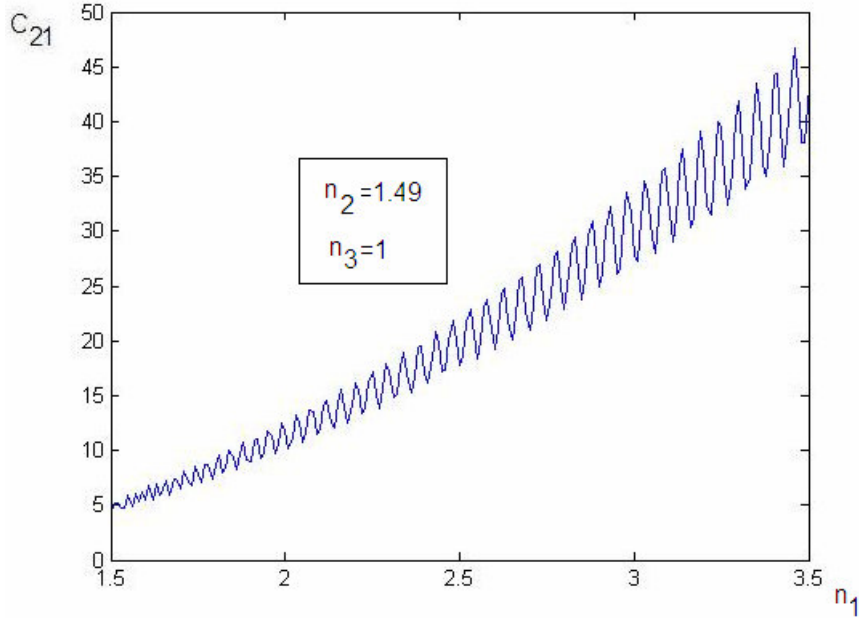
Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29’de çekirdek bölgesi ve kılıf bölgesi kırılma indislerinin kuplaj katsayısı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çekirdek bölgesi tür olarak camdan plastiğe kadar herhangi bir madde kabul edilerek kırılma indisi $1.5 \leq n_1 \leq 3.5$ değer aralığında alınmıştır. $n_3 = 1$ kabul edilmiştir. Sırasıyla $n_2 = 1.45$, $n_2 = 1.47$, $n_2 = 1.49$ kırılma indisleriyle inceleme yapılmıştır. Propagasyon sabiti $n_2 k_0 \leq \beta \leq n_1 k_0$ dikkate alınarak $\beta = 0.625 \times 10^7$ değerinde tutulmuştur. Optik dalga kılavuzlarının fiziksel parametrelerinde değişiklik yapılmamıştır.



Şekil 4.27 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, paralel ve özdeş iki optik dalga kılavuzunda, $n_2=1.45$ ve $n_3=1$ durumunda, TE modlarının kuplajında meydana gelen kuplaj katsayısındaki değişimin çekirdek bölgesi kırılma indisi değişimine göre grafiği.



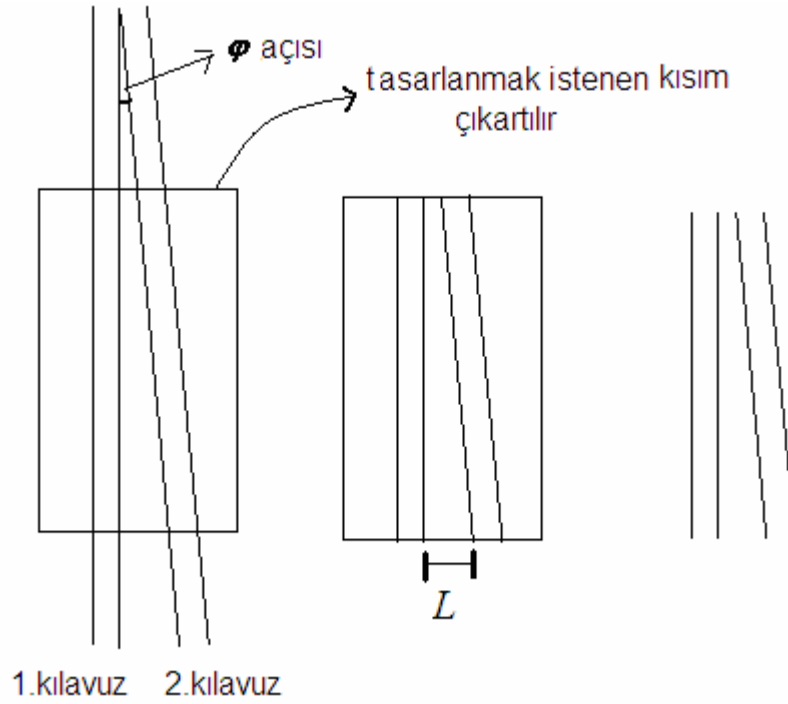
Şekil 4.28 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, paralel ve özdeş iki optik dalga kılavuzunda, $n_2=1.47$ ve $n_3=1$ durumunda, TE modlarının kuplajında meydana gelen kuplaj katsayısındaki değişimin çekirdek bölgesi kırılma indisi değişimine göre grafiği.



Şekil 4.29 Düzlemsel yapıda katmanlı, kılıflı, paralel ve özdeş iki optik dalga kılavuzunda, $n_2=1.49$ ve $n_3=1$ durumunda, TE modlarının kuplajında meydana gelen kuplaj katsayısındaki değişimin çekirdek bölgesi kırılma indisi değişimine göre grafiği.

Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29' de görüldüğü gibi çekirdek bölgesi kırılma indisi ve kılıf bölgesi kırılma indisi, kuplaj katsayısı üzerinde önemli etkilere sahiptir. Çekirdek bölgesi tür olarak camdan plastiğe kadar herhangi bir dielektrik maddedir. Kılıf bölgesi sırasıyla $n_2 = 1.45$, $n_2 = 1.47$, $n_2 = 1.49$ kırılma indislerine sahip dielektrik maddedir. Kuplaj katsayısının Şekil 4.27'den Şekil 4.29'a doğru değer olarak arttığı ve yaptığı osilasyon aralığının daha belirgin olduğu görülmektedir.

5.4 Tasarım 4:



Şekil 4.30 Uzantıları kesişen düzlemsel yapıdaki katmanlı, kılıfsız, özdeş ve uzantıları kesişen kuple optik dalga kılavuzları

Şekil 4.30’da görülen optik kuplörde 1.kılavuz ve uzantısı 1.kılavuz ile φ açısı yaparak kesişen 2.kılavuz mevcuttur. Her ikisi de özdeş ve kılıfsız olan katmanlı kılavuzların yarı genişliği $d = 25\mu m$ dir. $n_1 = 1.5$, $n_2 = 1.49$ ve kılavuzlarda ilerleyen çift TE modların propagasyon sabiti $\beta = 0,625 \times 10^7$ dir. Kılavuzların dış yüzeyleri arasındaki en büyük mesafe olan L parametresine tasarlanmak istenen kuplöre göre kuplör başlangıcında ve bitiminde değer atanır.

Katmanlı kılavuzların çekirdek eksenleri arasındaki mesafe olan U değeri;

$$U = d_1 + L + d_2$$

dir. Burada

d_1 : 1.kılavuzun yarı genişliği

d_2 : 2.kılavuzun yarı genişliği’dir.

$$d_1 = d = 25\mu m$$

$$d_2 = d / \cos \varphi$$

$$\varphi = \pi / 360$$

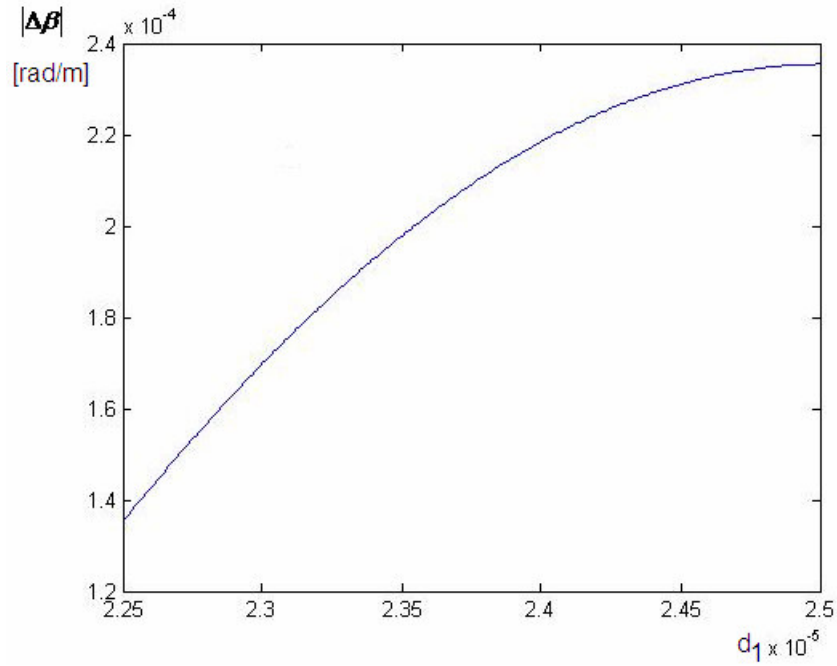
değerleri alınmıştır.

Kılavuzların dış yüzeyleri arasındaki mesafe olan L değerine $L_1 : L_2$ arası değer atanır.

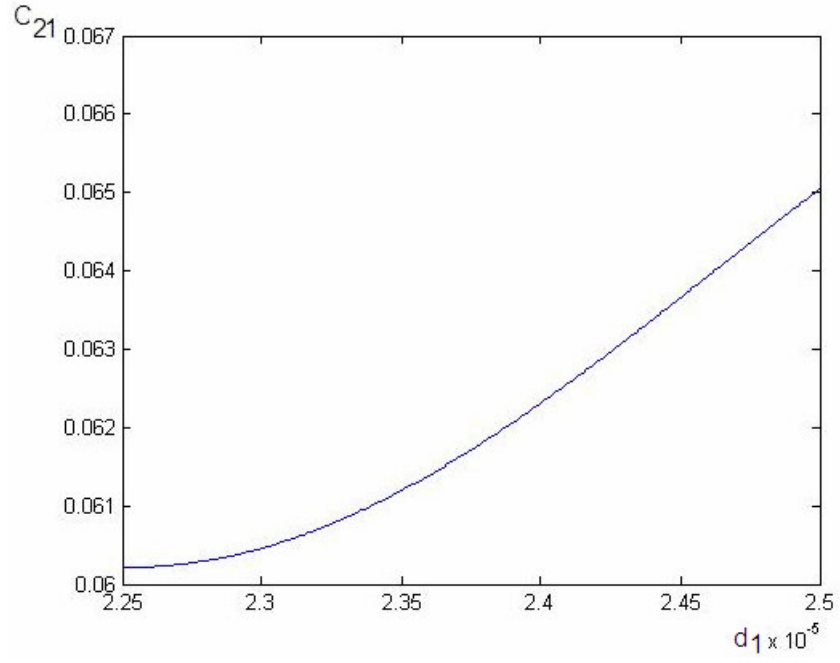
$$L = L_1 : L_2$$

$$L = 25\mu m : 27\mu m$$

Şekil 4.30'da tasarlanan uzantıları kesişen düzlemsel yapıdaki katmanlı, kılıfsız, özdeş ve kuple optik dalga kılavuzlarında propagasyon sabiti değişimini bulmak için Matlab uygulama yazılımı Ekler bölümünde verilmiştir.



Şekil 4.31 Uzantıları kesişen düzlemsel yapıdaki katmanlı, kılıfsız, özdeş ve kuple optik dalga kılavuzlarında çift TE modlarının kuplajlanması durumunda propagasyon sabiti değişimi.



Şekil 4.32 Uzantıları kesişen düzlemsel yapıdaki katmanlı, kılıfsız, özdeş ve kuple optik dalga kılavuzlarında çift TE modlarının kuplajlanması durumunda kuplaj katsayısı değişimi.

6. YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA)

Yapay sinir ağları beynin fizyolojik yapısından hareketle oluşturulan bir modeldir. YSA'ların geliştirilmesinde insan beyninin çalışma prensibi esas alınmıştır. 1940'lı yıllarda ortaya çıkan ve o zamandan bu yana yazılımsal ve donanımsal olarak geliştirilen YSA'ların öğrenme özelliği, en önemli özelliklerinden biridir. Öğrenme özelliğini, elde bulunan mevcut giriş ve çıkışlar arasındaki bağıntıdan kazanır ve elde bulunmayan problemlere çözümler sunar.

6.1 Yapay Sinir Ağlarının Genel Özellikleri

Yapay sinir ağlarında yapay sinir hücreleri, bilgi işleyen en küçük işlem elemanlarıdır. Birbirleri ile çeşitli şekillerde bağlanarak katmanlar oluşturur. Yapay hücre modeli en basit haliyle girdiler, ağırlıklar, birleştirme fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıktılardan oluşur. YSA'lar hesaplama, öğrenme, genelleme, doğrusal olmama ve uyarlanabilirlik özelliklerine sahiptir.

Yapay sinir ağları eğitici ve eğitici olmak üzere iki şekilde eğitilmektedirler. Eğitici öğrenmede, giriş ve çıkış bilgisi birlikte verilir. Ağ, kendi çıkışı ile doğru cevapları karşılaştırarak çıkış hatasını en aza indirmeye çalışır. Eğitici öğrenmede hiçbir hedef vektörü yoktur. Giriş vektörü sisteme uygulanır ve sistem, girişin benzer veya ayrılan özelliklerinden yararlanarak uyumlu bir çıkış üretecek şekilde kendisini düzenler.

Yapay sinir ağlarının özelliklerinden biri olan genelleme, eğitim kümesinde mevcut olmayan durumlar için tahmini sonuçlar üretmenin performansı olarak tanımlanabilir. Zaten YSA kullanmanın amaçlarından biri de genelleme yapmaktır. Diğer bir ifadeyle, ağın çıkışlarını, eğitim kümesinde verilmeyen girişler için hedef değerlere yaklaştırmaktır.

YSA, doğrusal olmayan karmaşık problemlerin çözümünde kullanılır. Çünkü YSA doğrusal değildir. Bunun sebebi en küçük birimi olan işlem elemanının doğrusal olmamasıdır. YSA, işlem elemanları ve onların oluşturduğu katmanlardan oluştuğu için bu özellik bütün ağa yayılmış durumdadır.

YSA'nın bir diğer özelliği uyarlanabilirlik özelliğidir. Böylece YSA'nın uyarlamalı örnek tanıma, sinyal işleme, sistem tanımlama ve denetim gibi alanlarda kullanılmasında etkin olmuştur. Uyarlanabilirlik özelliği ilgili problemdeki değişikliklere göre ağırlıkların ayarlanmasıdır.

YSA, çok sayıda işlem elemanının çeşitli şekillerde bağlanması ile oluşmuştur. Bu işlem elemanlarından bazılarının etkisiz hale gelmesi, ağın doğru bilgi üretmesini önemli ölçüde

etkilemez. Çünkü ağıın katmanlı yapısı ve paralel dağılmış yapısı nedeniyle sahip olduğu bilgi bütün ağı yayılmıştır. Bu sebeple, hatayı tolere etme yetenekleri son derece yüksektir.

Yapay sinir ağlarının birçok farklı yapısı mevcuttur. En en çok bilinen ve uygulanan türleri Çok Katmanlı Algılayıcı (MLP), Radyal Tabanlı Fonksiyon (RBF) ve Hopfield ağlarıdır.

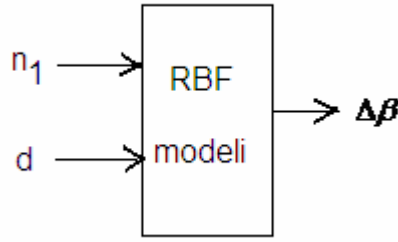
6.2 Radyal Fonksiyon Tabanlı Ağlar (RBF)

RBF, giriş, saklı ve çıkış katmanlarından oluşur ancak, giriş katmanından saklı katmana dönüşüm, radyal tabanlı aktivasyon fonksiyonları ile gerçekleştirilir ve doğrusal değildir. Saklı katmandan çıkış katmanına ise adaptif ve doğrusal bir dönüşüm gerçekleştirilir. Giriş katmanından orta katmana dönüşüm herhangi bir ağırlıkla çarpılmadan direkt olarak yapılmaktayken orta katmandan çıkış katmanına dönüşüm ise bir ağırlıkla çarpılarak yapılır. RBF’de saklı katman aktivasyon fonksiyonu genellikle standart öklid uzaklıklarını üstel fonksiyondan geçiren Gauss fonksiyonudur. Saklı katmanda bulunan radyal temelli fonksiyonları kullanan nöronlar lokal haritalama işlemini gerçekleştirir. Bu fonksiyonlar özellik uzayında algılama bölgelerinin merkezine yerleştirilmiştir. Her özellik uzayı algılama bölgesi, bir radyal temelli fonksiyon içeren saklı katman nöronunu harekete geçirir.

Radyal temelli fonksiyon ağları çok boyutlu uzayda eğri uydurma yaklaşımıdır. Bu nedenle RBF’in eğitimi çok boyutlu uzayda eğitim verilerine en uygun bir yüzeyi bulma problemine dönüşür. Radyal fonksiyon temelli ağlar, çok katmanlı ağlara benzer bir şekilde haritalama işlemini yapar.

6.3 Yapay Sinir Ağı Modeli

Şekil 5.1’de RBF yapay sinir ağı modeli görülmektedir. Ağı giriş olarak çekirdek bölgesi kırılma indisi ve çekirdek bölgesi yarıçapı sunularak ağdan çıkış olarak propagasyon sabiti değişimi alınmıştır. Giriş değerleri Matlab programının rand() komutu ile rasgele üretilerek ağı doğrusal olmayan farklı girişler vermeye çalışılmıştır. Ek 2’de veri kümesini oluşturmak için Matlab uygulama programı ve RBF modeli yazılımı mevcuttur.



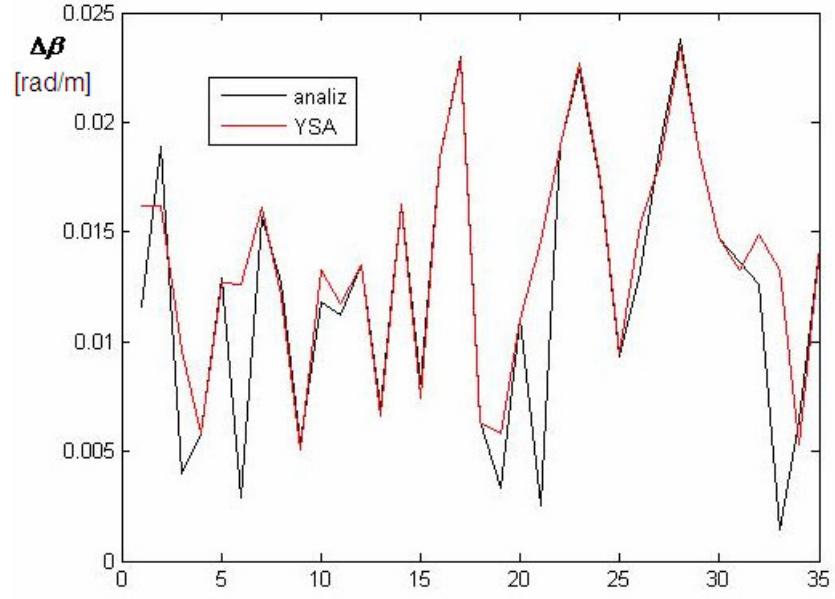
Şekil 5.1 RBF yapay sinir ağı modeli

Çizelge 5.1’de RBF ağıının bazı giriş ve çıkış değerleri tablo halinde görülmektedir.

Çizelge 5.1 RBF ağıının bazı giriş ve çıkış değerleri

n_1	$d(\mu m)$	$\Delta\beta(rad / m)$ Analiz sonucu	$\Delta\beta(rad / m)$ YSA çıkışı
1.6358	25.39	0.0058	0.0058
2.3583	25.06	0.0129	0.0127
2.2283	25.52	0.0157	0.0161
1.6162	25.41	0.0054	0.0051
2.2739	25.22	0.0135	0.0135
1.7853	25.08	0.007	0.0066
2.3244	25.47	0.0163	0.0163
2.3636	25.61	0.0184	0.0184
2.2924	25.34	0.0147	0.0147
1.9319	25.87	0.0144	0.0144

Yapay sinir ağı uygulamasının amacı çok karmaşık analitik çözümlere sahip kuple optik dalga kılavuzlarının analizi ve sentezi diğer bir ifadeyle tasarımı için hızlı ve oldukça iyi bir yaklaşıma sahip alternatif bir yöntem denemektir. RBF tasarımının iyi bir sonuç verdiği Çizelge 5.1 sonuçlarıyla görülmektedir.



Şekil 5.2 Modal analiz sonuçları ve RBF ağı sonuçlarının karşılaştırmalı gösterim grafiği

Şekil 5.2’de analiz sonuçları ve RBF sonuçlarının karşılaştırmalı gösteriminin grafiği verilmiştir ve RBF ile tasarımın iyi bir sonuç verdiği görülmektedir.

7. SONUÇLAR

Optik dalga kılavuzları arasındaki mesafe, çalışma dalga boyuna göre çok küçükse, optik fiberler birbirini etkiler. Bir optik dalga kılavuzunda propagasyon yapan modun alan uzantısının diğer kılavuzdaki modun etki alanına ulaşması kuplaja neden olur. Kuplaj, farklı kılavuzlardaki modlar arasında olabildiği gibi aynı kılavuz içindeki modlar arasında da olabilir.

Bu tezde, zayıfça kılavuzlayan, kayıpsız, özdeş ve özdeş olmayan optik dalga kılavuzlarının birbirine paralel olmaları durumunda karşılıklı kuplaj Kupla Mod Teorisi ışığında incelenmiştir. Yapılan analizin sonucunda, TE modları arasındaki kuplajın TM modları arasındaki kuplajdan daha etkin olduğu görülmüştür. Dalga kılavuzunun fiziksel özelliği gereği kılıfsız optik fiberlerdeki kuplajın kılıflı optik fiberlerdeki kuplaja göre daha etkin olduğu ortaya konmuştur.

Kupla optik dalga kılavuzlarında, propagasyon sabitindeki değişim optik fiberin çekirdek yarıçapının ve kılıf yarıçapının artması ile eksponansiyel olarak artmakta, kupla iki fiberin arasındaki mesafenin artması ile azalmaktadır. Aynı şekilde kuplaj katsayısı, optik fiberin çekirdek yarıçapının ve kılıf yarıçapının artması ile eksponansiyel olarak artmakta, kupla iki fiberin arasındaki mesafenin artması ile azalmaktadır.

Kuplör tasarımı aşamasında modal analiz incelemesi sonrasında tasarımlar Matlab’la desteklenmiş ve grafiklerle modellenmiştir. Modal analiz tasarımının yanında ayrıca yapay sinir ağının bir türü olan RBF ile modelleme yapılmıştır. Yapay sinir ağı uygulamasının amacı çok karmaşık analitik çözümlere sahip kupla optik dalga kılavuzlarının analizi ve sentezi diğer bir ifadeyle tasarımı için hızlı ve oldukça iyi bir yaklaşıma sahip alternatif bir yöntem denemektir. RBF tasarımının iyi bir sonuç verdiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Agrawal, G. P., 2002, "Fiber Optic Communication Systems", Wiley-Interscience, New York.
- Bakbak Ö. P., 2008, "Optik Dalga Kılavuzunda İletilen Kılavuzlanmış Modlardaki Sınır Koşullarının Yapay Sinir Ağı (YSA) ile Modellenmesi", SIU 2008, Didim
- Bayır, N., 2003, "Optik Dalga Kılavuzlarında Karşılıklı Kuplaj Analizi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Buck, J. A., 1995, "Fundamentals of Optical Fibers", Wiley Interscience, New York.
- Cheng, D.K., 1983, "Field and Wave Electromagnetics", Addison-Wesley, Massachusetts.
- Cheo, P.K., 1990, "Fiber Optics and Optoelectronics", Prentice-Hall, New Jersey.
- Cherin, A.H., 1983, "An Introduction to Optical Fibers", Mcgraw Hill, New York.
- Einarson, G., (1996), "Principles of Light Wave Communication", Wiley Interscience, New York.
- Elmas, Çetin., 2003, "Yapay Sinir Ağları", Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- Gloge, D., 1971, "Weakly Guiding Fibers", Appl. Opt., vol. 10, no. 10, p.p. 2252-2258.
- Louisell, W.H., 1960, "Coupled Mode and Parametric Electronics", John Wiley&Sons, New York.
- Kashima, N., (1995), "Passive Optical Components for Optical Fibers", Artech House, Boston.
- Marcuse, D., 1974, "Theory of Dielectric Optical Waveguides", Academic Press, New York.
- Schalkoff R.J., 1997, "Artificial Neural Networks", McGraw- Hill Inc., Singapore.
- Snitzer, E., 1961, "Cylindrical Dielectric Waveguide Modes", Journal of The Optical Society of America, Vol. 51, No. 5, pp. 491-498.
- Snyder, A.W., Love, J.D., 1983, "Optical Waveguide Theory", J.W. Arrowsmith, Bristol.
- Snyder, A.W., Young, W.R., 1978, "Modes of Optical Waveguides", Journal of The Optical Society of America, Vol. 68, No. 3, pp. 297 -309.
- Ünverdi, N. Ö., 1998, "Düz ve Bükülmüş Optik Dalga Kılavuzlarının Karşılıklı Kuplajına Kılavuzlanmış Modların, Evanescent Alanların ve Sızıntılı Modların Etkisi", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Yuen, W.P., 1994, "On the Different Formulations of the Coupled Mode Theory for Parallel Dielectric Waveguides ", J. Lightwave Tech., vol.12, no.1, p.p. 82-85.

EKLER

- Ek 1 Uzantıları kesişen düzlemsel yapıdaki katmanlı, kılıfsız, özdeş ve kuple optik dalga kılavuzlarında çift TE modlarının kuplajlanması durumunda propagasyon sabiti değişimi ve kuplaj katsayısı
- Ek 2 RBF yapay sinir ağına kullanılmak üzere hazırlanan veri kümesi örneği
- Ek 3 Modal analiz ve YSA (RBF) sonuçları

Ek 1 Uzantıları kesişen düzlemsel yapıdaki katmanlı, kılıfsız, özdeş ve kuple optik dalga kılavuzlarında çift TE modlarının kuplajlanması durumunda propagasyon sabiti değişimi

%Uzantıları kesişen düzlemsel yapıdaki katmanlı, kılıfsız, özdeş ve kuple optik dalga kılavuzlarında çift TE modlarının kuplajlanması durumunda propagasyon sabiti değişimi.

$$f=200*(10^{12});$$

$$\lambda=(3*10^8)/f;$$

$$k_0=2*\pi/\lambda;$$

$$\mu_0=4*\pi*(10^{-7});$$

$$\epsilon_0=1/(36*\pi*(10^9));$$

$$n_1=1.5;$$

$$n_2=1.49;$$

$$\theta_i=\pi/360;$$

$$B=0.6272*(10^7);$$

$$P_{watt}=10^{-3};$$

$$B_1=B;$$

$$B_2=B;$$

$$K=((n_1*k_0)^2-B^2)^{0.5};$$

$$K_1=K;$$

$$K_2=K;$$

$$G=(B^2-(n_2*k_0)^2)^{0.5};$$

$$G_1=G;$$

$$G_2=G;$$

$$d_1=22.5*10^{-6}+.01*10^{-6}:25*10^{-6};$$

$$d_2=25*10^{-6}/\cos(\theta_i);$$

$$L=25*10^{-6};$$

$$U=d_1+L+d_2;$$

$$P_1=k_0^2/(2*(G_1+G_2))*(n_1^2-n_2^2);$$

```

P2=(G1.*G2./(B1.*B2.*(1+G1.*d1).*(1+G2*d2))).^0.5;
P3=cos(K1*d1)*cos(K2*d2);
P4=exp(G1.*d1).*exp(G2*d2).*exp(-(G1+G2).*U/2);
deltaB=P1.*P2.*P3.*P4;
plot(d1,deltaB);

```

%Uzantıları kesişen düzlemsel yapıdaki katmanlı, kılıfsız, özdeş ve kuple optik dalga kılavuzlarında çift TE modlarının kuplajlanması durumunda kuplaj katsayısı değişimi.

```

f=200*(10^12);
lamda=(3*10^8)/f;
k0=2*pi/lamda;
mu0=4*pi*(10^-7);
epsi0=1/(36*pi*(10^9));
n1=1.5;
n2=1.49;
fi=pi/360;
B=0.6272*(10^7);
Pwatt=10^-3;
B1=B;
B2=B;
K=((n1*k0)^2-B^2)^0.5;
K1=K;
K2=K;
G=(B^2-(n2*k0)^2)^0.5;
G1=G;

```

```

G2=G;

d1=22.5*10^-6:.01*10^-6:25*10^-6;

d2=25*10^-6/cos(fi);

L=25*10^-6

U=d1+L+d2;

P1=((2*pi*f*epsi0)./(4*Pwatt)).*(n1^2-n2^2);

P2=2*2*pi*f*mu0*Pwatt*d1;

P3=B*(1+G*d1);

P4=2*pi*f*mu0*Pwatt*sin(2*K*d1);

P5=B*K*(1+G*d1);

P6=2*pi*f*mu0*Pwatt*(cos(K*d1)).^2;

P7=B*G*(1+G*d1);

c21=P1.*((P2./P3)+(P4./P5)+(P6./P7));

plot(d1,c21)

```

Ek 2 RBF yapay sinir ağında kullanılmak üzere hazırlanan veri kümesi örneği

Veri kümesinde yer alan sütunlar sırasıyla çekirdek bölgesi kırılma indisi, çekirdek bölgesi yarı çapı(μm) ve propagasyon sabiti değişimidir.

1,5786	25,43	0,0046
1,8022	25,88	0,0119
1,8004	25,07	0,0072
1,5232	25,34	0,0025
1,6761	25,18	0,0058
2,3609	25,25	0,0146
2,1559	25,73	0,0168
2,3565	25,29	0,0149
1,7709	25,24	0,0076
2,3959	25,14	0,014
1,7088	25,22	0,0065
2,4642	25,82	0,0224
1,9144	25,38	0,0104
1,7296	25,67	0,009
2,3184	25,94	0,0218
1,8604	25,43	0,0099
2,0015	25,61	0,0133
2,2477	25,97	0,0211
2,3318	25,36	0,0154
1,8945	25,66	0,0121
1,5966	25,31	0,0047
1,7654	25,89	0,0112
2,2919	25,3	0,0143
2,4369	25,3	0,0159
2,0683	25,91	0,0173
2,438	25,49	0,0179
2,0972	25,21	0,0115
2,488	25,03	0,0138
2,2623	25,17	0,0129
1,6856	25,3	0,0065
2,0168	25,96	0,0169
2,1402	25,78	0,0171
2,369	25,67	0,0192
2,1001	25,84	0,0171
2,4997	25,42	0,0178
1,6292	25,7	0,0069
1,7934	25,48	0,0092
1,9769	25,82	0,0148
1,6296	25,44	0,0059
1,7281	25,86	0,0102
1,6811	25,01	0,0053
2,172	26	0,0201
1,8258	25,28	0,0085
2,2906	25,03	0,0121
2,046	25,15	0,0105
1,7306	25,48	0,0081
2,1868	25,9	0,019

1,5491	25,28	0,0033
2,0726	25,78	0,0161
2,4938	25,17	0,0152
1,863	25,73	0,012
2,0587	25,25	0,0113
2,4273	25,08	0,0138
1,7599	25,85	0,0108
2,3325	25,69	0,0188
1,6751	25,96	0,0094
2,3798	25,99	0,0235
1,7796	25,53	0,0092
2,3495	25,91	0,0219
2,3067	25,48	0,0162
1,6891	25,89	0,0094
2,4786	25,02	0,0137
1,7537	25,13	0,0068
2,2785	25,74	0,0187
2,3108	25,39	0,0154
1,998	0,2539	0,0116
2,4157	0,256	0,0189
1,601	25,02	0,004
1,6358	25,39	0,0058
2,3583	25,06	0,0129
1,5186	25,69	0,0029
2,2283	25,52	0,0157
2,3167	25,08	0,0127
1,6162	25,41	0,0054
1,9886	25,43	0,0118
1,8474	25,66	0,0112
2,2739	25,22	0,0135
1,7853	25,08	0,007
2,3244	25,47	0,0163
1,6731	25,73	0,0081
2,3636	25,61	0,0184
2,4261	25,9	0,023
1,6911	25,25	0,0064
1,5504	25,22	0,0033
2,0484	25,24	0,0111
1,5095	25,81	0,0025
2,3284	25,7	0,019
2,4085	25,88	0,0224
2,2053	25,71	0,0173
1,7433	25,66	0,0093
2,0892	25,44	0,0132
2,4389	25,56	0,0188
2,3955	25,99	0,0238
2,1062	25,96	0,0185
2,2924	25,34	0,0147
2,3362	25,16	0,0136
2,0601	25,42	0,0126
1,5007	25,55	0,0014
1,7513	25,03	0,0064
1,9319	25,87	0,0144

Ek 3 Modal analiz ve YSA (RBF) sonuçları

Tabloda yer alan sütunlar sırasıyla çekirdek bölgesi kırılma indisi, çekirdek bölgesi yarı çapı(μm), propagasyon sabiti değişiminin modal analiz sonucu ve propagasyon sabiti değişiminin RBF sonucudur.

1,998	25,39	0,0116	0,0162
2,4157	25,6	0,0189	0,0162
1,601	25,02	0,004	0,0096
1,6358	25,39	0,0058	0,0058
2,3583	25,06	0,0129	0,0127
1,5186	25,69	0,0029	0,0126
2,2283	25,52	0,0157	0,0161
2,3167	25,08	0,0127	0,0121
1,6162	25,41	0,0054	0,0051
1,9886	25,43	0,0118	0,0133
1,8474	25,66	0,0112	0,0117
2,2739	25,22	0,0135	0,0135
1,7853	25,08	0,007	0,0066
2,3244	25,47	0,0163	0,0163
1,6731	25,73	0,0081	0,0074
2,3636	25,61	0,0184	0,0184
2,4261	25,9	0,023	0,0229
1,6911	25,25	0,0064	0,0063
1,5504	25,22	0,0033	0,0058
2,0484	25,24	0,0111	0,011
1,5095	25,81	0,0025	0,0146
2,3284	25,7	0,019	0,0189
2,4085	25,88	0,024	0,027
2,2053	25,71	0,0173	0,0174
1,7433	25,66	0,0093	0,0095
2,0892	25,44	0,0132	0,0154
2,4389	25,56	0,0188	0,0181
2,3955	25,99	0,0238	0,0234
2,1062	25,96	0,0185	0,0185
2,2924	25,34	0,0147	0,0147
2,3362	25,16	0,0136	0,0133
2,0601	25,42	0,0126	0,0149
1,5007	25,55	0,0014	0,0133
1,7513	25,03	0,0064	0,0053
1,9319	25,87	0,0144	0,0144

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 10.02.1981

Doğum yeri Milas

Lise 1992-1999 Milas Anadolu Lisesi

Lisans 2000-2004 Yıldız Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Fakültesi
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2005-2008 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik ve Haberleşme Müh. Anabilim Dalı
Haberleşme Programı

Çalıştığı kurum(lar)

2005-2005 Borusan Telekomünikasyon Hizmetleri A.Ş.

2005-Devam ediyor Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Araştırma Görevlisi