

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OPTİK KUPLÖRLERİN
ANALİZİ VE MODELLENMESİ**

Elektronik ve Haberleşme Mühendisi Bahar Yeşim ARTUÇ

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

YÜKSEK LİSANS TEZİ

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

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖNSÖZ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
2. OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİ	4
2.1 Elektromagnetik Spektrum.....	5
2.2 Transmisyon Prensipleri	5
2.2.1 Işığın Yansıma ve Kırılması.....	5
2.2.2 Faz Kayması	7
2.2.3 Sayısal Açıklık.....	7
2.3 Optik Dalga Kılavuzlarının Yapısı	9
2.4 Optik Fiber Çeşitleri	9
2.4.1 Basamak İndisli Tek Modlu Optik Fiberler	10
2.4.2 Basamak İndisli Çok Modlu Optik Fiberler.....	10
2.4.3 Dereceli İndisli (Yumuşak Geçişli) Çok Modlu Optik Fiberler	11
2.5 Optik Fiber Kullanım Avantajları.....	12
2.6 Optik Fiberlerin Dezavantajları	13
2.7 Optik Fiber Dalga Kılavuzlarında İletim Karakteristikleri ve Kayıplar	13
2.7.1 Zayıflama	14
2.7.2 Malzeme Soğurum Kayıpları	15
2.7.3 Lineer Saçılma Kayıpları	15
2.7.4 Optik Fiberlerde Bükülme Kayıpları	17
2.8 Dispersiyon (Modal yayılma).....	18
2.9 Ek Kayıpları	18
2.9 Optik Fiber Malzemeler ve Özellikleri	18
3. OPTİK FİBERLERDE DALGA KILAVUZU ANALİZİ.....	20
3.1 Mod Kavramı ve Çeşitleri.....	20
3.1.1 Mod Çeşitleri.....	20
3.1.2 Modların Fiziksel Yorumları.....	21
3.2 Maddenin Elektriksel Özellikleri.....	22
3.3 Maxwell Denklemleri	23

3.4	Dielektrik-Dielektrik Sınır Koşulları	23
3.5	Dalga Kılavuzları İçin Temel Eşitlikler	23
3.6	Simetrik Slab Dalga Kılavuzlarının Yayılım Modları	25
3.6.1	Dielektrik Slab Dalga Kılavuzunda TE Modları	26
3.6.1.1	Dielektrik Slab Dalga Kılavuzunda Tek TE Modları	28
3.6.1.2	Dielektrik Slab Dalga Kılavuzunda Çift TE Modları	29
3.6.1.3	TE Modlarının Karakteristik Denklemleri	31
3.6.2	Dielektrik Slab Dalga Kılavuzunda TM Modlar	33
3.6.2.1	Dielektrik Slab Dalga Kılavuzunda Tek TM Modları	34
3.6.2.2	Dielektrik Slab Dalga Kılavuzunda Çift TM Modları	35
4.	SİLİNDİRİK OPTİK FİBERLERDE MODAL ANALİZ	36
4.1	Basamak İndisli Silindirik Yapıda Çok Modlu Optik Fiberlerde Modal Analiz	36
4.1.1	Basamak İndisli Optik Fiberin Çekirdek ve Kılıfındaki Alanlar	38
4.1.2	Basamak İndisli Optik Fiber İçin Sınır Koşulları ve Karakteristik Denklemleri	40
4.1.3	Basamak İndisli Optik Fiberde Mod Karakteristikleri	42
4.1.4	Mod Kesim Koşulları	43
4.2	Dereceli İndisli Silindirik Yapıda Çok Modlu Optik Fiberlerde WKB Analizi	48
4.2.1	Yumuşak Geçişli Optik Fiber Yapısı	48
4.2.2	Yumuşak Geçişli Optik Fiberin WKB Analizi	49
4.2.3	Yumuşak Geçişli Optik Fiberde Propagasyon Sabitleri	51
4.2.4	Yumuşak Geçişli Optik Fiberde Sızıntılı Modlar	55
5.	OPTİK DALGA KILAVUZLARINDA RADYASYON MODLARI	56
5.1.	Düzlemsel Yapıdaki Katmanlı (Slab) Dalga Kılavuzlarında Radyasyon Modları	57
5.1.1	Çift TE Radyasyon Modları	57
5.1.2	Tek TE Radyasyon Modları	58
5.1.3	Çift TM Radyasyon Modları	59
5.1.4	Tek TM Radyasyon Modları	60
6.	DİELEKTRİK DALGA KILAVUZLARI ARASINDAKİ KUPLAJ	61
6.1	Kuple Mod Teorisi	61
6.1.1	Modların Uzay Domeninde Kuplajı	62
6.1.2	Modların Zaman Domeninde Kuplajı	64
6.1.3	Modların Frekans Domeninde Kuplajı	65
6.2	Optik Dalga Kılavuzlarında Kuplaj Analizi	66
6.2.1	Propagasyon Sabitindeki Değişim	67
6.2.2	Kuplaj Katsayıları	68
6.3	Kuple Katmanlı Yapıdaki Optik Dalga Kılavuzlarında Faz Sabiti Değişiminin ve Kuplaj Katsayısının İncelenmesi	69
6.3.1	Kuple Kılıflı Düzlemsel Yapıdaki Optik Dalga Kılavuzlarında Faz Sabiti Değişiminin ve Kuplaj Katsayısının İncelenmesi	70

6.3.1.1	Çift ve Tek TE Modları.....	70
6.3.1.2	Çift ve Tek TM Modları.....	74
6.3.2	Kuple Kılıfsız Düzlemsel Yapıdaki Optik Dalga Kılavuzlarında Faz Sabiti Değişiminin ve Kuplaj Katsayısının İncelenmesi	77
6.3.2.1	Çift ve Tek TE Modları.....	78
6.3.2.2	Çift ve Tek TM Modları.....	79
6.3.3	Güç Kaybı	81
6.3.3.1	Kuple Kılıflı Optik Fiberlerde Güç Kaybı	81
6.3.3.2	Kuple Kılıfsız Optik Fiberlerde Güç Kaybı	81
7.	KUPLE DALGA KILAVUZLARININ ANALİZİ	83
7.1	Kuple, Düzlemsel Yapıdaki, Katmanlı, Özdeş ve Özdeş Olmayan, Kılıflı ve Kılıfsız Optik Dalga Kılavuzlarında, TE ve TM Modlarının Kuplajında, Kuplaj Katsayısının, Çekirdek Bölgesi Yarıçaplarına Göre Değişiminin İncelenmesi.....	83
7.2	Kuple, Düzlemsel Yapıdaki, Katmanlı, Özdeş ve Kılıflı Optik Dalga Kılavuzlarında, TE ve TM Modlarının Kuplajında, Faz Sabitinin, Çekirdek Bölgesi Yarıçapına Göre Değişiminin İncelenmesi	93
7.3	Kuple, Düzlemsel Yapıdaki, Katmanlı, Özdeş ve Kılıflı Optik Dalga Kılavuzlarında TE ve TM Modlarının Kuplajında Faz Sabitinin Kılıf Bölgesinin Yarıçapına Göre Değişiminin İncelenmesi	96
7.4	Kuple, Düzlemsel Yapıdaki, Katmanlı, Özdeş, Kılıflı ve Kılıfsız, Optik Dalga Kılavuzlarında, TE ve TM Modlarının Kuplajında, Kuplaj Katsayısının, Faz Sabitine Göre Değişiminin İncelenmesi.....	98
7.5	Kuple, Düzlemsel Yapıdaki, Katmanlı, Özdeş ve Kılıflı Optik Dalga Kılavuzlarında TE Modlarının Kuplajında Kuplaj Katsayısının Kırılma İndislerine Göre Değişiminin İncelenmesi.....	103
7.6	Kuple, Düzlemsel Yapıdaki, Katmanlı, Özdeş ve Kılıflı Optik Dalga Kılavuzlarında, TE ve TM Modlarının Kuplajında, Faz Sabitinin, İki Çekirdek Eksenleri Arasındaki Uzaklığa Göre Değişiminin İncelenmesi.....	109
8.	OPTİK KUPLÖRLERİN ANALİZİ.....	111
8.1	Optik Doğrultu Kuplörü.....	111
8.2	Birinci Tasarım.....	112
8.3	İkinci Tasarım.....	117
8.4	Üçüncü Tasarım.....	125
8.5	Dördüncü Tasarım	135
9.	SONUÇLAR	139
	KAYNAKLAR	140
	ÖZGEÇMİŞ.....	141

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 bölgesinin dielektrik sabiti
ϵ_2	Kılıf bölgesinin dielektrik sabiti
σ	İletkenlik
α_{dB}	Birim uzunluk başına işaret zayıflaması
N	Optik fiberde yayılabilecek maksimum mod sayısı
V	Normalize frekans
ω_c	Kesim frekansı
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 eksenleri arasındaki mesafe
c	Işık hızı
h	Planck sabiti
λ	Dalgaboyu
δ	Faz kayması
δ_N	Yansıma yüzeyinin normaline doğrultusundaki dalga bileşenlerinin faz kayması
δ_P	Yansıma yüzeyine paralel doğrultudaki dalga bileşenlerinin faz kayması
ϕ_1	Gelme açısı
ϕ_2	Kırılma açısı
ϕ_c	Kritik açı

KISALTMA LİSTESİ

LAN	Local Area Network (Yerel Alan Ağı)
EMI	Electromagnetic Interference (Elektromagnetik Girişim)
RFI	Radio Frequency Interference (Radyo Frekans Girişim)
FDM	Frequency Division Multiplexing (Frekans Bölmeli Çoğullama)
PCM	Pulse Code Modulation (Darbe Kod Modülasyonu)
PDH	Plesiochronous Digital Hierarshy (Yarı Senkron Sayısal Hiyerarşi)
SDH	Synchronous Digital Hierarshy (Senkron Sayısal Hiyerarşi)
TE	Transverse Electric (Enine Elektrik)
TM	Transverse Magnetic (Enine Magnetik)
TEM	Transverse Electromagnetic (Enine Elektromagnetik)
EH	Elektrik Magnetik Hibrid Modları
HE	Magnetik Elektrik Hibrid Modları
WKBJ	Wentzel, Kramers, Brillouin, Jeffrey Yaklaşımı
WDM	Wave Division Multiplexing (Dalga Bölmeli Çoğullama)
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier (Erbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendirici)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Alexander Graham Bell'in fotofonu	1
Şekil 2.2	Elektromagnetik Spektrum (www.innova-teknoloji.com)	5
Şekil 2.3	Yoğunlukları farklı iki ortamda ışığın izlediği yol	6
Şekil 2.4	Sayısal açıklık	8
Şekil 2.5	Gelme açısının maksimum giriş açısından büyük olması durumu	8
Şekil 2.6	Gelme açısının maksimum giriş açısından küçük olması durumu.....	8
Şekil 2.7	Optik fiberin yapısı	9
Şekil 2.8	Optik fiberlerin sınıflandırılması	10
Şekil 2.9	Basamak indisli tek modlu optik fiber	10
Şekil 2.10	Basamak indisli çok modlu optik fiber.....	11
Şekil 2.11	Dereceli indisli çok modlu optik fiber.....	12
Şekil 2.12	Optik fiberlerde kayıp mekanizmaları.....	14
Şekil 2.13	Işığın optik fiber içinde saçılımı	16
Şekil 2.14	Soğurma ve saçılma kayıpları.....	16
Şekil 2.15	Makro ve mikro bükülme kayıpları.....	17
Şekil 3.1	Dielektrik dalga kılavuzlarında eksenel (meridyenel) ışın	21
Şekil 3.2	Dielektrik dalga kılavuzunda helisel ışınlar	21
Şekil 3.3	Simetrik dielektrik slab dalga kılavuzunun geometrisi	25
Şekil 3.4	Dielektrik slab dalga kılavuzunun TE modlarının karakteristik eşitlik diyagramı.....	32
Şekil 3.5	Dielektrik slab dalga kılavuzunda TE modlarının x 'e bağlı fonksiyonları	33
Şekil 4.1	Modların kesim frekanslarının belirlenmesi için kullanılan Bessel fonksiyonları	45
Şekil 4.2	Yumuşak geçişli optik fiberin kırılma indisi profili.....	48
Şekil 4.3	Yumuşak geçişli fiberler için dalga sayısı diyagramları	52
Şekil 4.4	Yumuşak geçişli optik fiber için dalga sayısı diyagramı	53
Şekil 4.5	Basamak indisli optik fiberde meridyenel modlar	54
Şekil 4.6	Yumuşak geçişli optik fiberdeki sızıntı modları gösteren dalga sayısı diyagramı	55
Şekil 5.1	Kılavuzlanmış modlar ve radyasyon modları (Marcuse, 1972).....	56
Şekil 6.1	Kuple kılıflı düzlemsel yapıdaki özdeş optik dalga kılavuzları.....	70
Şekil 6.2	Kuple kılıfsız düzlemsel yapıdaki özdeş optik dalga kılavuzları.....	77
Şekil 7.1	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıfsız optik fiberlerde, çift TE modları için, kuplaj katsayısının optik fiber yarıçapına göre değişimi	83
Şekil 7.2	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıfsız optik fiberlerde, tek TE modları için, kuplaj katsayısının optik fiber yarıçapına göre değişimi	84
Şekil 7.3	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıfsız optik fiberlerde, çift TM modları için, kuplaj katsayısının optik fiber yarıçapına göre değişimi	84
Şekil 7.4	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıfsız optik fiberlerde, tek TM modları için, kuplaj katsayısının optik fiber yarıçapına göre değişimi	85
Şekil 7.5	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş olmayan ve kılıfsız optik fiberlerde, çift TE modları için, kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek yarıçapına göre değişimi	86

Şekil 7.6	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş olmayan ve kılıfsız optik fiberlerde, tek TE modları için, kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek yarıçapına göre değişimi	86
Şekil 7.7	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş olmayan ve kılıfsız optik fiberlerde, çift TM modları için, kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek yarıçapına göre değişimi	87
Şekil 7.8	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş olmayan ve kılıfsız optik fiberlerde, tek TM modları için, kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek yarıçapına göre değişimi	87
Şekil 7.9	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde, çift TE modları için, kuplaj katsayısının optik fiber yarıçapına göre değişimi	88
Şekil 7.10	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde, tek TE modları için, kuplaj katsayısının optik fiber yarıçapına göre değişimi	89
Şekil 7.11	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde, çift TM modları için, kuplaj katsayısının optik fiber yarıçapına göre değişimi	89
Şekil 7.12	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde, tek TM modları için, kuplaj katsayısının optik fiber yarıçapına göre değişimi	90
Şekil 7.13	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş olmayan ve kılıflı optik fiberlerde, çift TE modları için, kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek yarıçapına göre değişimi	91
Şekil 7.14	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş olmayan ve kılıflı optik fiberlerde, tek TE modları için, kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek yarıçapına göre değişimi	91
Şekil 7.15	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş olmayan ve kılıflı optik fiberlerde, çift TM modları için, kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek yarıçapına göre değişimi	92
Şekil 7.16	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş olmayan ve kılıflı optik fiberlerde, tek TM modları için, kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek yarıçapına göre değişimi	92
Şekil 7.17	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde TE modlarının kuplajında, faz sabitindeki değişimin optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	94
Şekil 7.18	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde TM modlarının kuplajında, faz sabitindeki değişimin optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	95
Şekil 7.19	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde, TE modlarının kuplajında, faz sabitinin, optik fiberin kılıf bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	96
Şekil 7.20	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde, TM modlarının kuplajında, faz sabitinin, optik fiberin kılıf bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	97
Şekil 7.21	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıfsız optik fiberlerde, çift TE modları için, kuplaj katsayısının faz sabitine göre değişim.....	98
Şekil 7.22	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıfsız optik fiberlerde, tek TE modları için, kuplaj katsayısının faz sabitine göre değişimi	99
Şekil 7.23	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıfsız optik fiberlerde, çift TM modları için, kuplaj katsayısının faz sabitine göre değişimi.....	99

Şekil 7.24	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıfsız optik fiberlerde, tek TM modları için, kuplaj katsayısının faz sabitine göre değişimi	100
Şekil 7.25	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde, çift TE modları için, kuplaj katsayısının faz sabitine göre değişimi.....	101
Şekil 7.26	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde, tek TE modları için, kuplaj katsayısının faz sabitine göre değişimi	101
Şekil 7.27	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde, çift TM modları için, kuplaj katsayısının faz sabitine göre değişimi	102
Şekil 7.28	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde, tek TM modları için, kuplaj katsayısının faz sabitine göre değişimi	102
Şekil 7.29	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde TE modlarının kuplajında, kuplaj katsayısının kılıfı saran dış ortamın kırılma indisine göre değişimi	104
Şekil 7.30	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde TE modlarının kuplajında, kuplaj katsayısının kılıf bölgesi kırılma indisine göre değişimi.....	105
Şekil 7.31	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde TE modlarının kuplajında, kılıf bölgesinin kırılma indisi değeri 1.45 olduğunda kuplaj katsayısının, çekirdek bölgesi kırılma indisine göre değişimi	106
Şekil 7.32	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde TE modlarının kuplajında, kılıf bölgesinin kırılma indisi değeri 1.46 olduğunda, kuplaj katsayısının çekirdek bölgesi kırılma indisine göre değişimi	107
Şekil 7.33	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde TE modlarının kuplajında, kılıf bölgesinin kırılma indisi değeri 1.47 olduğunda, kuplaj katsayısının çekirdek bölgesi kırılma indisine göre değişimi	108
Şekil 7.34	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde TE modlarının kuplajında, faz sabitinin iki çekirdek eksen arasındaki uzaklığa göre değişimi.....	109
Şekil 7.35	Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde TM modlarının kuplajında, faz sabitinin iki çekirdek eksen arasındaki uzaklığa göre değişimi.....	110
Şekil 8.1	(a) Doğrultu kuplörleri için genel model (b) bulk tipi doğrultu kuplörü (c) fused-fiber tipi doğrultu kuplörü	111
Şekil 8.2	Optik doğrultu kuplörü düzeneği	112
Şekil 8.3	193.1 THz’de çalışan sürekli işaretli lazerin çıkış gücünün dalgaboyuna göre değişimi.....	113
Şekil 8.4	Optik doğrultu kuplörünün birinci çıkış kapısındaki gücün dalgaboyuna göre değişimi.....	114
Şekil 8.5	Optik doğrultu kuplörünün ikinci çıkış kapısındaki gücün dalgaboyuna göre değişimi	115
Şekil 8.6	Kuplaj katsayısı 0,5 olan optik doğrultu kuplörünün birinci ve ikinci çıkış kapılarındaki toplam güç bilgisi	116
Şekil 8.7	Kuplaj katsayısı 0,4 olan optik doğrultu kuplörünün birinci ve ikinci çıkış kapılarındaki toplam güç bilgisi	116
Şekil 8.8	Optik haberleşme sistemi modeli	117
Şekil 8.9	Sürekli işaretli lazer dizisinin, 193.1 THz’de çalışan birinci kanalı için çıkış gücünün dalgaboyuna göre değişimi.....	118

Şekil 8.10	(a) Dalga bölmeli çoğullayıcının gücünün zaman domenindeki değişimi (b) Dalgaboyu bölmeli çoğullayıcı gücünün dalgaboyuna göre değişimi	119
Şekil 8.11	(a) Dalga bölmeli çoğullayıcının çıkış gücü (b) Optik fiberin çıkış gücü	120
Şekil 8.12	Yarıiletken optik kuvvetlendiricinin çıkışındaki işaretin gücü.....	120
Şekil 8.13	Yarıiletken optik kuvvetlendirici çıkışındaki işaretin gücünün dalgaboyuna göre değişimi	121
Şekil 8.14	(a) Kuplaj katsayısının 0,5 olduğu durumda, optik doğrultu kuplörünün birinci çıkış kapısının gücünün, dalgaboyuna göre değişimi (b) Optik doğrultu kuplörünün birinci çıkış kapısının gücü	122
Şekil 8.15	(a) Kuplaj katsayısının 0,5 olduğu durumda, optik doğrultu kuplörünün ikinci çıkış kapısının gücünün, dalgaboyuna göre değişimi (b) Optik doğrultu kuplörünün ikinci çıkış kapısının gücü	123
Şekil 8.16	Optik doğrultu kuplörünün gücünün kuplaj katsayısına göre değişimi	124
Şekil 8.17	Pompa kuplörü genel çalışma mekanizması.....	125
Şekil 8.18	Pompa kuplörü teknik altyapısı	125
Şekil 8.19	Optik haberleşme sistemi içinde yer alan pompa lazer ile beslenmiş erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici (EDFA)	126
Şekil 8.20	Mach-Zehnder modülatör	127
Şekil 8.21	Mach-Zehnder modülatörün gücünün dalga boyuna göre değişimi	128
Şekil 8.22	İdeal çoğullayıcının gücünün dalgaboyuna göre değişimi	128
Şekil 8.23	EDFA çıkış işaretinin gücünün dalgaboyuna göre değişimi	129
Şekil 8.24	EDFA çıkış işaretinin gücü.....	129
Şekil 8.25	Optik haberleşme sistemi içinde yer alan pompa kuplörü alt sistemi ile beslenmiş erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici	130
Şekil 8.26	Pompa kuplörü çıkış gücünün dalgaboyuna göre değişimi	131
Şekil 8.27	EDFA'nın çıkış işaretinin gücü	132
Şekil 8.28	EDFA çıkış işaretinin gücünün dalgaboyuna göre değişimi	132
Şekil 8.29	Optik pompa kuplörünün giriş sinyali ve pompa işareti için zayıflatma parametrelerinin farklı değerlerinde pompa kuplörü alt sistemi	134
Şekil 8.30	Ayrık bandlı kuvvetlendirici tasarımı	136
Şekil 8.31	Çift yönlü X kuplörünün birinci çıkış kapısındaki gücün dalgaboyuna göre değişimi	137
Şekil 8.32	WDM analizörün çıkışı	138

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1	Artan fiziksel parametrelerin propagasyon modu sayısına etkisi	32
Çizelge 4.1	İletilen mod sayısının optik fiberin özellikleri ile değişimi.....	45
Çizelge 4.2	Modların kesim parametreleri.....	47

ÖNSÖZ

Öncelikle, lisans ve yüksek lisans eğitimim sırasında daima beni yüreklendiren, ilgi, hoşgörü ve desteğini esirgemeyen, tez danışmanım, çok değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. N. Özlem ÜNVERDİ'ye hayatın birçok alanında bana öğrettiği her şey için teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında, her türlü desteği sunan işyerim Hamitabat Elektrik Üretim ve Ticaret Anonim Şirketi'ne, özellikle Genel Müdürüm Sayın Abdürrezzak KATIRCIOĞLU'na, biricik annem Sayın Yurdanur K. ARTUÇ'a, babam Sayın Yılmaz ARTUÇ'a, kardeşim Yeliz ARTUÇ'a, teşekkürü bir borç bilirim.

Bahar Yeşim ARTUÇ
15.10.2010

ÖZET

Optik fiber kullanımı, icat edildiği 1960'lı yıllardan günümüze kadar hızla artarak devam etmektedir. Yüksek band genişliği, yüksek iletim hızı, elektromagnetik girişimden etkilenmeme, elektriksel izolasyon kolaylığı ve küçük boyut gibi birçok avantajı nedeniyle optik fiberlerin kullanımı oldukça yaygındır.

Bu çalışmada, optik haberleşme sistemleri içinde önemli bir yeri olan, optik kuplörlerin analizi yapılmış ve çeşitli uygulamalarla konu zenginleştirilmiştir.

Tezin Birinci Bölümü'nde, optik haberleşmenin tarihsel gelişim sürecine değinilmiştir.

İkinci Bölüm'de, temel transmisyon prensipleri verilerek, optik haberleşme sistemlerinin genel özellikleri incelenmiştir.

Üçüncü Bölüm'de, mod kavramı açıklanarak, düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzlarında, ışığın propagasyon özellikleri, elektromagnetik teori yardımıyla tanımlanmış ve modların fiziksel yorumları yapılmıştır.

Dördüncü Bölüm'de, silindirik yapıdaki optik dalga kılavuzlarının modal analizi yapılmış ve sızıntılı modlar incelenmiştir. Değişken Ayrırma Metodu'na başvurularak, silindirik yapıdaki, basamak indisli optik fiberlerin mod analizi yapılmış, sınır koşulları ve karakteristik denklemleri elde edilmiştir. Mod kesim koşulları verilmiştir. Yumuşak geçişli optik fiberlerde WKBJ analizi yapılmıştır.

Beşinci Bölüm'de, silindirik optik fiber dalga kılavuzlarında, kılıf bölgesinde oluşan radyasyon modları irdelenmiştir.

Altıncı Bölüm'de, Kuple Mod Teorisi açıklanmış, uzay, zaman ve frekans domeninde, dielektrik optik dalga kılavuzları arasındaki kuplaj incelenmiştir. Kuple optik dalga kılavuzlarının analizi için gerekli olan parametreler ve matematiksel ifadeler elde edilmiştir.

Yedinci Bölüm'de kuple, özdeş ve özdeş olmayan, kılıflı ve kılıfsız, düzlemsel yapıdaki, katmanlı optik dalga kılavuzlarında, TE ve TM modlarının kuplajında, parametrelerin değişimleri grafiklerle incelenerek elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Sekizinci Bölüm'de OptiSystem 7.0 simülasyon programı kullanılarak, optik kuplörlerin yer aldığı düzenekler tasarlanmış ve temel çalışma prensipleri analiz edilmiştir.

Dokuzuncu Bölüm olan son bölümde, optik kuplör analizinin ve uygulamalarının değerlendirilmesi yapılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dielektrik optik dalga kılavuzlarında modal analiz, kuple optik dalga kılavuzları, optik kuplör, faz sabiti değişimi, kuplaj katsayısı

ABSTRACT

Since its invention in the early 1960s, the use of optical fiber technology increasingly has continued. Due to its advantages such as large bandwidth, high transmission speed, immunity to electromagnetic interference, easy electrical isolation and small size, the use of optical fiber is considerably widespread.

In this study, optical couplers are examined.

In the first section, the historical development of optical communication is given.

In the second section, the general information of optical communication systems by giving the basic principles of transmission are investigated.

In the third section, the mode concept is examined, propagation characteristics of light in the planar slab optical waveguides are described by using electromagnetic theory. Physical interpretations of modes are given.

In the fourth section, modal analysis of cylindrical optical waveguides are studied and leaky modes are observed. Mode analysis of cylindrical optical fibers with step index profile are made by applying technique of separation of variables and for the cylindrical optical fibers with step index profile and boundary conditions and characteristic equations are studied. Modes cut off conditions are explained. Cylindrical optical fibers with graded index are analyzed with using the WKB approximation.

In the fifth section, the radiation mode in the cladding area of cylindrical fiber is explained.

In the sixth section, Coupled Mode Theory is defined. Coupling analyzes of parallel coupled optical dielectric waveguides are given using the Coupled Mode Theory. The parameters needed for the analysis of coupled optical waveguides and mathematical expressions are obtained.

In the seventh section, for the coupling of TE and TM modes, for the identical and non-identical, with cladding and non-cladding optic fibers, changes in the parameters examined and the results were interpreted with graphics.

In the eighth section, optical couplers are examined by using OptiSystem 7.0 simulation program.

In the last section the results are explained.

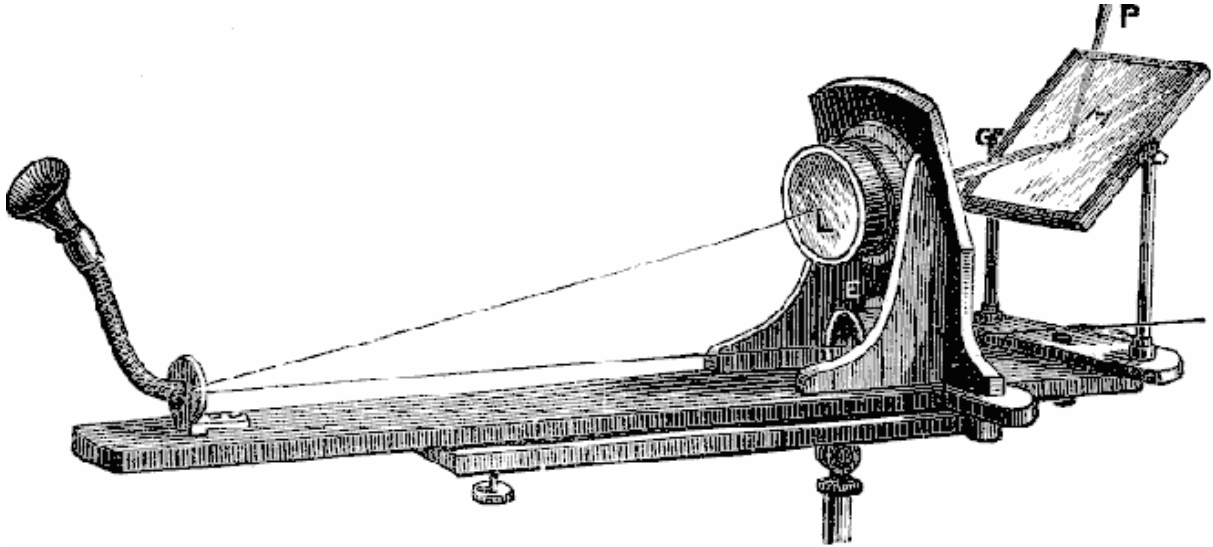
Keywords: Modal analysis of dielectric optical waveguides, couple optical waveguides, optical coupler, the change of propagation constant, coupling coefficient

1.GİRİŞ

Günümüzde optik haberleşme sistemleri, veri iletim teknolojileri içinde önemli bir yere sahiptir. Optik iletim, elektriksel işaretin, bir ışık kaynağı aracılığı ile ışık işaretine dönüştürülerek bir transmisyon hattı üzerinden alıcıya iletilmesi ve tekrar elektriksel işarete dönüştürülmesi yoluyla verinin aktarılması prensibine dayanır. Söz konusu iki merkez arasında bulunan transmisyon ortamı, optik fiberdir.

Optik fiber kullanımı, yüksek band genişliği, yüksek iletim hızı, elektromagnetik girişime duyarlılık, izolasyon kolaylığı ve küçük boyut gibi birçok kullanım avantajı nedeniyle artmaktadır. En yaygın kullanım alanları telekomünikasyon, tıp, askeri ve endüstriyel uygulamalardır.

Optik sistemlerin gelişimi, 1880 yılında Alexander Graham Bell'in, verinin ışık işareti yardımıyla taşınabileceğini öne sürmesiyle başlamıştır. Şekil 1.1'de görülen Bell'in "fotofon" adını verdiği aygıt, ses dalgalarını ışık huzmesi üzerinden ileten, aynalardan ve selenyumlu detektörlerden yapılmış bir düzendir. Bu aygıt kullanışsızdır, güvenilir değildir ve gerçekte pratik uygulaması yoktur, fakat bilgi taşımak için bir ışık huzmesi kullanma yolundaki ilk girişim olması dolayısıyla haberleşme sistemleri için bir dönüm noktasıdır.



Şekil 1.1 Alexander Graham Bell'in fotofonu

Işık dalgalarının yeryüzü atmosferinde uzak bir mesafeye iletimi pratikte mümkün değildir, çünkü su buharı, oksijen ve havadaki küçük parçacıklar ultra yüksek ışık frekanslarını soğurarak zayıflatır, bu sebeple optik iletişim için optik dalga kılavuzları kullanmak gereklidir. 1930 yılında İngiliz bilim adamı J. L. Baird ile Amerikalı bilim adamı C. W. Hansell, kaplamasız optik fiber kablolar aracılığı ile televizyon görüntülerini tarayarak ve

ileterek patent almışlardır. Birkaç yıl sonra Alman bilim adamı H. Lamm, tek bir cam optik fiberden görüntüleri başarılı bir biçimde iletmiştir fakat o tarihte optik fiber daha çok bir oyuncak ya da laboratuvar sınırları içinde sergilenen bir hüner gösterisi olarak değerlendirilmektedir. Dolayısıyla optik fiber alanında esaslı bir atılım ancak 1950'li yılların ilk yarısında gerçekleştirilebilmiştir.

1951 yılında Hollanda'dan A. C. S. Van Hell ile İngiltere'den H. H. Hopkins ve N. S. Kapany optik fiber demetleri aracılığı ile ışık iletimi üzerinde deneyler yapmışlardır. Bu bilim adamlarının araştırmaları tıp alanında geniş bir kullanıma sahip olan esnek fiberskop'un geliştirilmesine olanak sağlamıştır. 1956 yılında Kapany "optik fiber" terimini ilk kez kullanmıştır.

1960'da lazer (uyarılmış yayılım emisyonu ile ışık yükseltilmesi) icat edilmiştir. Nispeten yüksek çıkış gücü, yüksek çalışma frekansı ve aşırı büyük band genişliğine sahip sinyalleri taşıma yeteneği, lazeri yüksek kapasiteli iletişim sistemleri için çok uygun hale getirmektedir. Lazerin bulunması optik fiber iletişimle ilgili araştırma çabalarını geniş ölçüde hızlandırmıştır. Bununla birlikte optik iletişimde ilk önemli aşama ancak 1967 yılında İngiltere'deki standart telekomünikasyon laboratuvarından K. C. Kao ile G. A. Bockham'ın koruyucu kılıflı optik fiber kabloların kullanıldığı yeni bir iletişim ortamını önermesi ile ortaya çıkmıştır (Sharma, 1987).

1960'lı yıllarda kullanılan optik fiber kabloların aşırı kayıplı olması, iletişim mesafesini sınırlamıştır. 1970 yılında New York eyaletinin Corning kentindeki Corning Glass Works'dan Kapron Keck ve Maurer, 20 dB/km'den daha az kaybı olan bir optik fiber geliştirmişlerdir, bu optik haberleşmenin gelişimi için büyük bir adımdır.

1970'lerin son yılları ile 1980'lerin ilk yıllarında daha iyi optik kabloların üretilmesi, yüksek kaliteli, aynı zamanda daha ucuz ışık kaynaklarının ve detektörlerinin geliştirilmesi, yüksek kaliteli, yüksek kapasiteli ve verimli optik iletişim sistemlerinin geliştirilmesine imkan sağlamıştır. 1975'de, Amerika Birleşik Devletleri hükümeti, Cheyenne Mountain'da bulunan NORAD karargahındaki bilgisayarları elektronik gürültüyü azaltmak amacıyla optik fiber kablo kullanarak birbirlerine bağlamaya karar vermiştir. 1977 yılındaki ilk nesil telefon alanındaki denemelerde optik fiberler, 850 nm galyum-alüminyum-arsenit lazer diyotun ürettiği ışığın iletilmesi için kullanılmıştır. 2 km uzunluğundaki optik fiber telefon iletişim hattı Chicago'da 672 ses kanalıyla kullanılmaya başlanmıştır. Bu ilk nesil sistemler, ışığı birkaç kilometrede tekrarlayıcı olmadan taşıyabilmekteydi, fakat yaklaşık olarak optik fiberde 2dB/km kayıp mevcuttu. İkinci nesilde ise 1.3 mikrometre olan yeni InGaAsP lazerler

kullanılmış ve optik fiber kayıpları, bu sistemle 0.5 dB/km'e kadar düşmüştür. İlk transatlantik optik fiber kablo için donanım geliştirilmesi, tek mod sistemlerin mümkün olduğunu göstermiştir.

1980'lerde ışık dalgaları ile haberleşme ortaya çıkmıştır. ABD ve diğer sanayileşmiş ülkeler optik fiber kullanmaya başlamışlar ve kullanım o derecede artmıştır ki son on yıl “camın on yılı” olarak adlandırılmıştır. Koaksiyel veya başka türden binlerce mil uzunluğundaki bakır kablolar, uzun mesafe haberleşmelerinde modası geçmiş olarak kabul edilmiştir. Bakır kablolar, çok fazla bilgi-taşıma kapasitesine sahip olmadıkları için, optik fiber kablolar ile değiştirilmişlerdir.

1990'lı yıllarda kızılötesi ve uzak kızılötesi bölgelerinde iletişim sağlayan optik fiberlerde iletim kaybı 0.1 dB/km'ye düşülerek Gbit/sn'ler düzeyinde bilgi iletim hızına ulaşılmış, darbe kod modülasyonunun kullanıldığı optik haberleşme sistemlerinde çoğullama teknikleri ile kanal kapasitesi artırılmıştır.

1970'den bu yana optik fiber teknolojisi olağanüstü gelişmeler kaydetmiştir. Son yıllarda Bell laboratuvarları, tekrar üreteç kullanmaksızın bir milyar bps'yi bir fiber kablo üzerinden 120 km'lik mesafeye iletmeyi başarmıştır. Son otuz yıl boyunca elektro-optik sistemlerde büyük gelişmeler yaşanmıştır. Optik haberleşme cihazları artık çoğu uygulamada, telefon donanımlarında ve bilgisayar sistemlerinde kullanılmaktadır.

Optik haberleşme sistemleri devam eden çalışmalarla gelişimini sürdürmektedir ve bu ilerlemeler, optik ağları gündeme getirerek, bu ağlarda kullanılan optik devre elemanlarını önemli kılmıştır. Bu tezde optik devre elemanlarından optik kuplör analizi ve modellenmesi yapılmıştır.

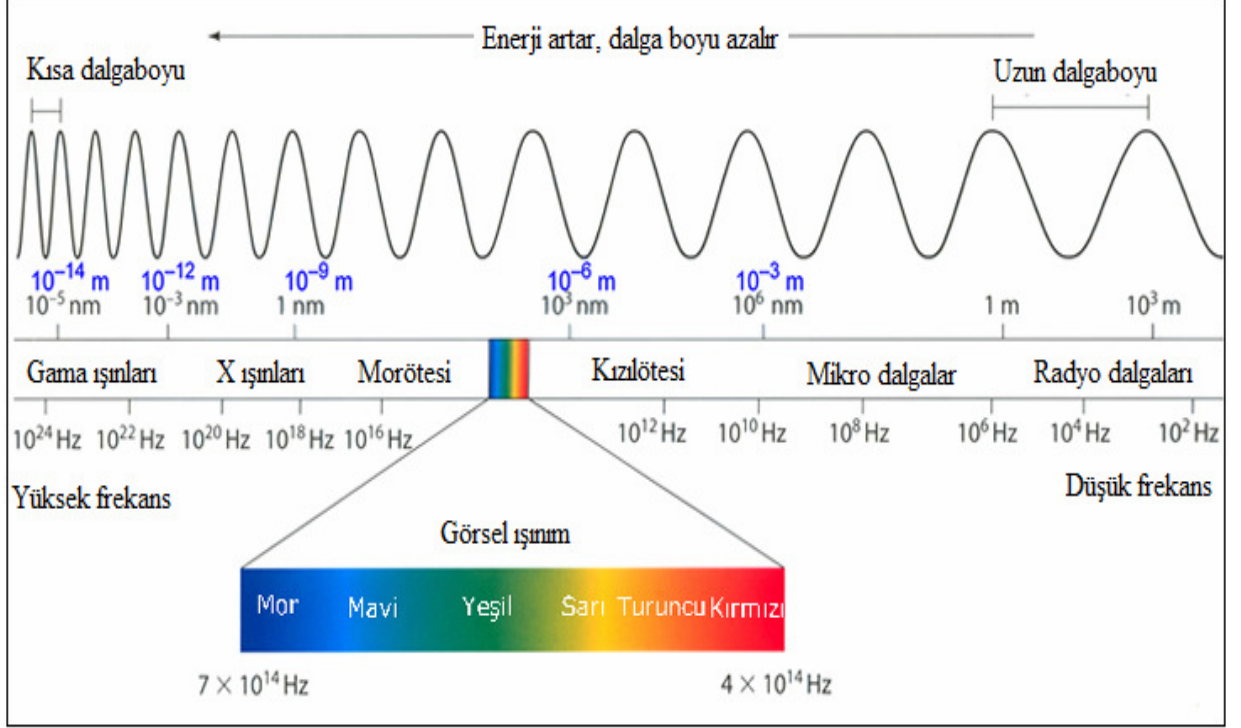
2. OPTİK HABERLEŞME SİSTEMLERİ

Fiber optik sistemlerin amacı, diğer iletim hatları gibi veri haberleşmesini sağlamaktır. Teknolojinin gelişimiyle birlikte haberleşmeden beklenen özellikler artmaktadır. İletim hatlarının özellikle de telefon hatlarının büyük bir kısmını koaksiyel kablo kullanılan hatlar oluşturmaktadır. Koaksiyel kablo çeşitli koruma kılıfları içinde alınmasına hatta çelik örtülerle zırhlanmasına rağmen yağmur ve nem gibi nedenlerle bu koruma tabakalarını kaybedebilmektedir. Bunun sonucu olarak dış etkilerle, iletilen işaret bozulmaya uğramaktadır. Optik fiberler, düşük kayıplı ve yüksek band geçiren iletim ortamları oldukları için yüksek bilgi kapasiteli bir sistemde ses, bilgi ve video işaretlerini taşımak için çok uygundur. Ayrıca bakır kablo ve koaksiyel kablo kullanımında görülen girişim etkileri optik fiber kablolarda görülmemektedir. Optik fiberin tercih edilmesinin önemli nedenlerinden birisi de herhangi bir bozulma meydana geldiğinde kolay tamir edilebilme özelliğidir. Optik sensörler sayesinde kesintiye uğramış nokta kolaylıkla bulunabilmekte ve hat kolaylıkla onarılabilmektedir. Saç teli kalınlığında olabilen optik fiber çok az yer kaplamaktadır. Tasarımda, bina içinde kullanılırken az yer kaplaması kolaylık sağlamaktadır. Bakır iletkenli (bakır tel, eşeksenli kablo v.b) ve diğer iletim sistemleri (elektromagnetik dalga v.b) magnetik etkiden bozulurken optik iletimde bozulma yok denilebilecek kadar azdır. Ayrıca optik fiberlerin kayıpları da diğer iletim ortamlarına göre oldukça azdır. Bakır koaksiyel kablolarda kayıp 5-10 dB/km iken, optik fiberlerde yaklaşık olarak 0.1 dB/km'dir.

Optik fiber haberleşme teknolojisi yerel alan ağı (local area network, LAN) sistemi içerisinde, geniş ticari organizasyon taleplerini karşılamak ve merkezi kaynaklara erişim sağlamak için uygulama alanları bulmuştur. Uzak mesafe optik ağ çözümleri, fotonik ağlar, değişime hızla uyum sağlayan optik anahtarlar, ağ yönetimi ve kontrolü gibi özellikler birleştirilerek ağları daha akıllı, kullanımı daha kolay ve daha güvenli kılmaktadır. Şebeke sağlayıcıları, sürekli artan kullanıcı sayısı ve telefon trafiğiyle baş etmek zorundadırlar. Haberleşme mühendisliğinde frekans bölmeli çoğullama yönteminin (Frequency Division Multiplexing, FDM) ortaya çıkması, çok sayıda telefon görüşmesinin bir kablo üzerinden gerçekleştirilmesine olanak sağlamıştır. Darbe kod modülasyonu (Pulse Code Modulation, PCM) tek hattın çoklu kullanımına, zaman domenli çoğullaması kullanarak izin verir. Dünyanın her tarafında band genişliği için artan istekler çoğullamanın daha fazla seviyelere ihtiyacı olduğunu göstermiştir. Bunun sonucunda yarı senkron olarak adlandırılabilir olan PDH (plesiochronous digital hierarshy) ortaya çıkmıştır. 1980'lerin sonlarına doğru senkron sayısal hiyerarşi (Synchronous Digital Hierarshy, SDH) ile ekonomik ve etkili şebeke idaresi sağlanmıştır. Haberleşme sistemlerinin hızlı, güvenilir ve ekonomik olmaları beklenmektedir.

2.1 Elektromagnetik Spektrum

Elektromagnetik dalgalar, çok uzun dalga boylarına sahip radyo dalgalarından, atomun boyutundan daha küçük dalgaboyuna sahip gamma ışınlarına kadar değişmektedir. Şekil 2.2’de elektromagnetik spektrum görülmektedir.



Şekil 2.2 Elektromagnetik Spektrum (www.innova-teknoloji.com)

Elektromagnetik spektrumun görünür kısmı, gökkuşağının sahip olduğu portakal rengi ve kırmızıdan, mor ve maviye kadar bütün renkleri içermektedir. Bu renklerin her biri gerçekten ışığın farklı dalga boylarına karşılık gelmektedir. Elektromagnetik dalgalar, sadece dalga boylarına göre değil, aynı zamanda frekans ve enerjilerine göre de tanımlanmaktadır. Bu üç nicelik arasında,

$$E = ch/\lambda \quad (2.1)$$

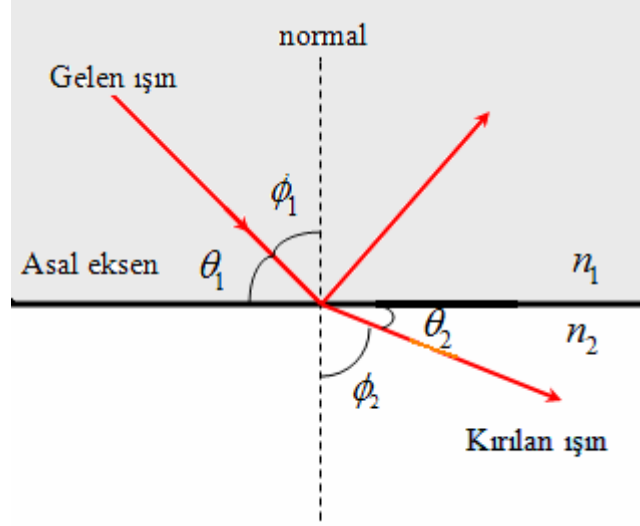
bağıntısı bulunmaktadır. Burada E elektromagnetik dalgaanın taşıdığı enerjiyi, c ışık hızını, λ ise dalgaboyunu ifade eder.

2.2 Transmisyon Prensipleri

2.2.1 Işığın Yansıma ve Kırılması

Işığın bir optik fiber içindeki davranışı, Işın teorisi modeli kullanılarak incelenir. Bir ışık ışını, optik olarak yoğun olan ortamda, az yoğun ortama oranla daha yavaş hareket eder. Bir

ortamın kırılma indisi ise, ışığın vakumdaki hızının, o ortamdaki hızına oranıdır. Işın, kırılma indisleri farklı iki dielektrik arasındaki ara yüzeye ulaştığında yoğunluk farkı nedeniyle, dalganın bir kısmı yansır, geri kalan kısmı ise kırılarak ikinci ortama geçer. Kırılma veya yansıma oranını, bu iki ortamın yoğunluk farkları belirler. Işık ışınının bir ortamdan diğerine geçerken, izlediği yol Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Burada kırılma indisleri arasında $n_1 > n_2$ ilişkisi bulunur.



Şekil 2.3 Yoğunlukları farklı iki ortamda ışığın izlediği yol

Işğın kırılma indisleri farklı olan iki ortamda izlediğı yol Snell Yasası ile ilişkilendirilir,

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (2.2)$$

Yansıma kanununa göre, bir yüzeye çarpan ışın eşit açı ile yansır. Bir ortamda hareket eden ışğın, optik olarak yoğun dolayısıyla kırılma indisi büyük olan bir ortamdan yansımasına “içe yansıma” denirken, tam tersi duruma yani optik olarak daha az yoğun ortamdan yansımasına “dışa yansıma” denir.

Optik olarak yoğun bir ortamdan, daha az yoğun bir ortama geçişlerde gelme açısı ϕ_1 , büyüdükçe, kırılma açısı ϕ_2 değeri de büyür ve $\phi_2, \frac{\pi}{2}$ ’ye ulaştığında, gelen ışın olduğu gibi yansır, bu olaya “tam iç yansıma” denir. Bu durumda kırılma açısının değeri $\frac{\pi}{2}$ olduğunda, gelen ışının tümüyle yansır. Snell yasası kullanılarak tam yansıma koşulu elde edilir:

$$\phi_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2.3)$$

Burada, ϕ_c kritik açı değeridir. Gelen ışının, ara yüzeyin normali ile yaptığı açı kritik açıdan büyük ise, tam iç yansımaya koşulu sağlanmış olur. Bu durumda ışın tamamen ilk ortamda kalarak, tümüyle yansır.

2.2.2 Faz Kayması

Gelen ışın, sınır yüzeyden tam yansımaya koşulu ile yansırken oluşan dalgada bir faz değişimi (δ) meydana gelir. Bu faz değişimi,

$$\tan \frac{\delta_N}{2} = \frac{\sqrt{n^2 \cos^2 \theta_1 - 1}}{n \sin \theta_1} \quad (2.4)$$

$$\tan \frac{\delta_P}{2} = \frac{\sqrt{n^2 \cos^2 \theta_1 - 1}}{\sin \theta_1} \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilir (Keiser, 1983).

Burada δ_N , yansımaya yüzeyinin normali doğrultusundaki dalga bileşenlerinin faz kaymasıdır.

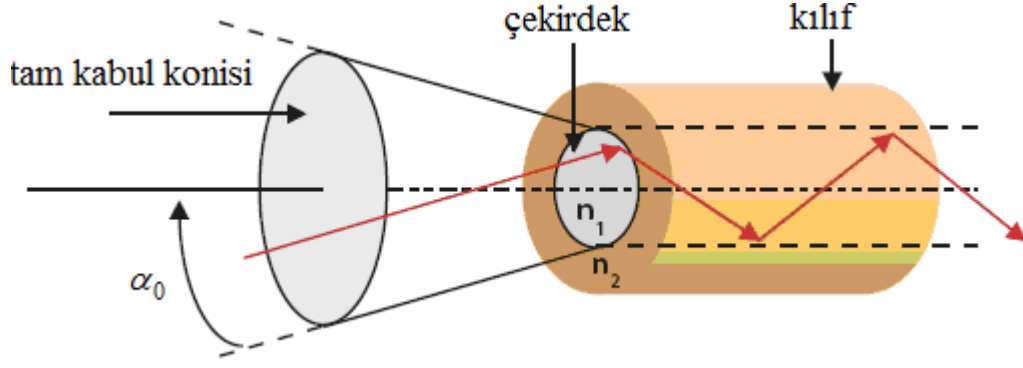
δ_P , ise yansımaya yüzeyine paralel doğrultudaki dalga bileşenlerinin faz kaymasıdır, kullanılan

diğer bir parametre olan n ise ve $n = \frac{n_1}{n_2}$ 'dir.

2.2.3 Sayısal Açıklık

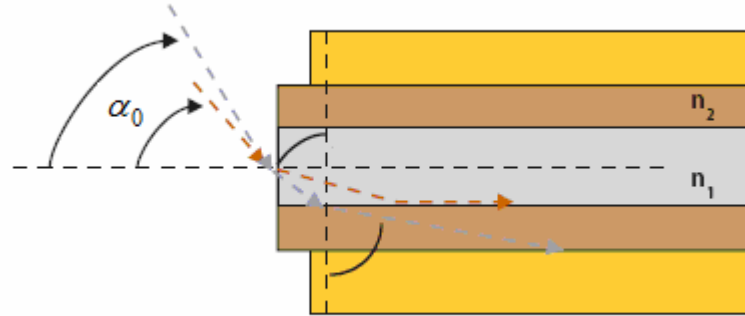
Çekirdek bölgesinin boyutu, ışığın optik fiber içine girmesinde çok önemlidir. Optik fiber çekirdeği ile kaynak arasındaki uyumsuzluklar dördüncü bölümde incelenecektir. Işığın optik fiber tarafından verimli bir şekilde toplanabilmesi için, çekirdek en azından ışık kaynağının çapı kadar geniş olmalıdır. Işık kaynağı çekirdekten geniş olduğunda, ışın kılıf bölgesine girerek kolaylıkla optik fiber dışına çıkar ve bu durumda dalganın anlamlı bir bölümü kaybedilmiş olur. Işık kaynağının, ışığın toplandığı açıklık ile uyumlu olması (geometrik uyum) gerekmektedir. Çekirdeğin geniş olması, geometrik uyumu kolaylaştırır.

Işığın transmisyonunda optik fiberin kabul edeceği ışık miktarını belirleyen faktörlerden birisi sayısal açıklıktır. Sayısal açıklık, ışığın optik fiber içine girebileceği ve çekirdekte ilerleyebileceği maksimum açı, yani kabul açısıdır. Tam kabul açısı, maksimum giriş açısının iki katına eşittir. Tam kabul açısının oluşturduğu giriş bölgesine, tam kabul konisi denir. Şekil 2.4'de sayısal açıklık ve kabul konisi görülmektedir.

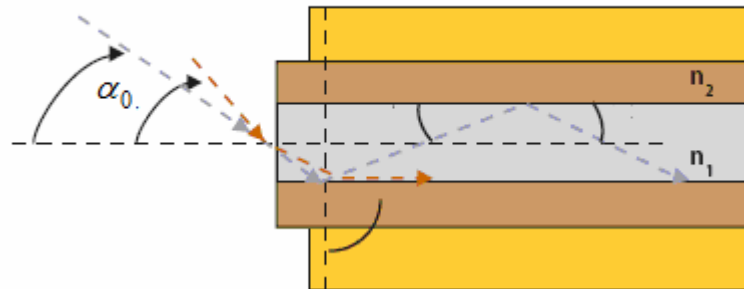


Şekil 2.4 Sayısal açıklık

Şekil 2.4’de verilen α_0 , maksimum giriş açısıdır. Işının gelme açısının, maksimum giriş açısından daha büyük olması durumunda tam iç yansıma gerçekleşmez ve kırılma olayı meydana gelerek ışın kılıf bölgesine geçer. Şekil 2.5’de gelme açısının maksimum giriş açısından büyük olma durumunda, ışının kılıf bölgesine geçişi görülmektedir. Şekil 2.6’da ise, gelme açısının maksimum giriş açısından küçük olma durumunda, ışının optik fiber içinde tam yansıma yaparak ilerlemesi görülmektedir.



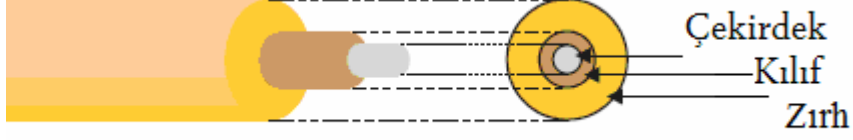
Şekil 2.5 Gelme açısının maksimum giriş açısından büyük olması durumu



Şekil 2.6 Gelme açısının maksimum giriş açısından küçük olması durumu

2.3 Optik Dalga Kılavuzlarının Yapısı

Optik fiberler, optik frekanslarda çalışan dielektrik dalga kılavuzlarıdır. Genel olarak silindirik yapıdadırlar.



Şekil 2.7 Optik fiberin yapısı

Şekil 2.7’de görüldüğü gibi, klasik bir optik fiber, çekirdek, kılıf ve ceket olmak üzere üç bölgeden oluşur.

- Çekirdek bölgesi, merkez bölgedir ve ışık burada iletilir.
- Kılıf bölgesi ise ışığın çekirdek içinde kalmasını ve dışarı sızmasını sağlayarak, onu çevresel etkenlerden korur. Kılıf bölgesinin, ikinci görevi ise, optik fiberin çapını genişleterek dayanıklılığını ve kullanım kolaylığını artırmaktır.
- Zırh bölgesi, optik fiberi kimyasal ve mekanik etkilerden koruyan en dış tabakadır.

Işığın ilerlediği kısım olan çekirdek bölgesinin kırılma indisi, kılıf bölgesinin kırılma indisinden daha büyüktür. Kırılma indisleri arasında,

$$n_1 = n_2(1 - \Delta) \quad (2.6)$$

ilişkisi vardır.

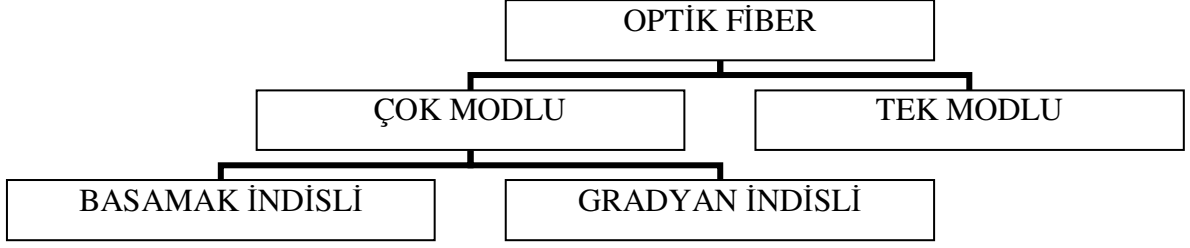
Δ , bağıl kırılma indis farkıdır ve,

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilir. Δ , değerinin büyük olması dispersiyona sebep olur.

2.4 Optik Fiber Çeşitleri

Optik fiberler taşıdıkları sinyal sayısına ve kırılma indislerine göre sınıflandırılırlar. Şekil 2.8’de optik fiberlerin sınıflandırılması yer almaktadır.



Şekil 2.8 Optik fiberlerin sınıflandırılması

2.4.1 Basamak İndisli Tek Modlu Optik Fiberler

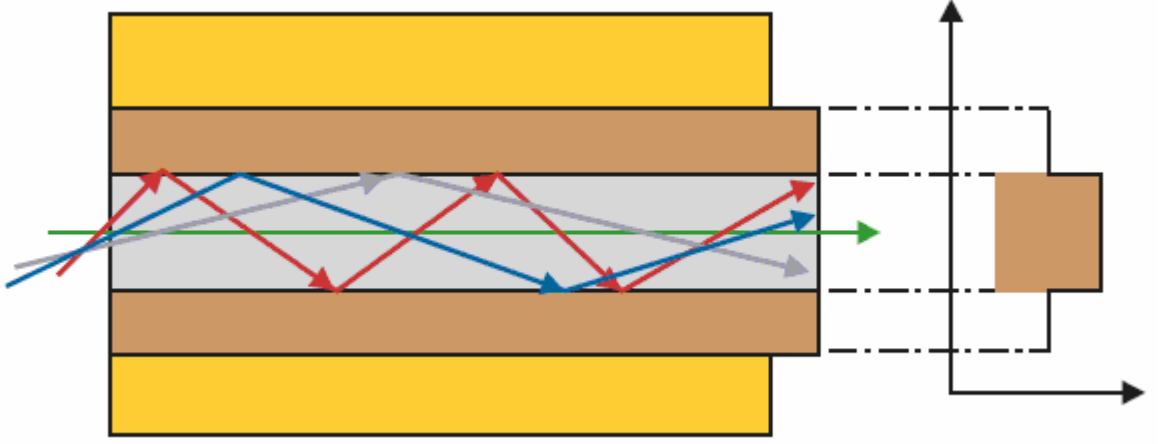
Çekirdek bölgesinde tek modun propagasyonu sağlayan optik fiberlerdir. Dalga çekirdeğin merkezinde ilerler. Tek modlu optik fiberlerin diğer optik fiberlerden üstün tarafı farklı modlar arasındaki gecikme farklarından kaynaklanan işaret dispersiyonundan korunabilmeleridir. Şekil 2.9’da basamak indisli tek modlu optik fiberin yapısı görülmektedir.



Şekil 2.9 Basamak indisli tek modlu optik fiber

2.4.2 Basamak İndisli Çok Modlu Optik Fiberler

Çekirdeğin kırılma indisinin çekirdek kesiti boyunca sabit kaldığı optik dalga kılavuzlarıdır. Keskin bir ışın darbesi her biri farklı dalgaboyuyla yayılan ışınlarla temsil edilebilir. Bunlara mod adı verilir. Farklı modların yayılma hızları da farklı olduğundan, alıcı tarafına ulaşma süreleri de farklıdır. Kullanılan iletim ortamının boyu uzadıkça bu zaman farkı da artar ve gecikmeler arasındaki bu fark, alıcı tarafında ışık darbelerinin genişleyip yayılmasına neden olur. Bu durum, bir optik lifin taşıyabileceği maksimum bit hızını sınırlar. Şekil 2.10’da basamak indisli çok modlu optik fiberin yapısı görülmektedir.



Şekil 2.10 Basamak indisli çok modlu optik fiber

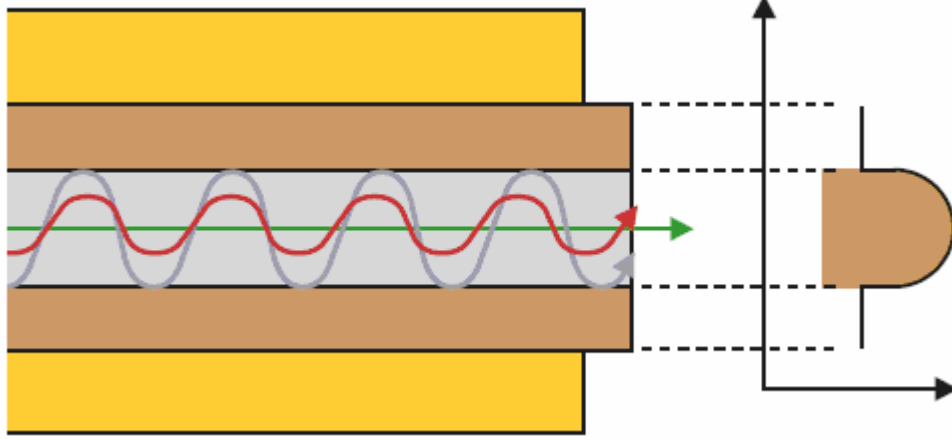
Çekirdeğin çapı kullanılan dalgaboyuna göre çok büyük olduğundan mod sayısı artar ve zayıflamalara neden olur. Böylece iletim kapasitesi ve tekrarlayıcı uzaklığı olumsuz şekilde etkilenir. d çekirdek bölgesinin yarıçapı, λ dalgaboyu ve NA sayısal açıklık olmak üzere, yayılabilecek maksimum mod sayısı N ,

$$N = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi d NA}{\lambda} \right)^2 \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilir. Basamak indisli çok modlu optik fiberlerde band genişliğini sınırlayan önemli miktarda dispersiyon vardır, bu durum uzak mesafelerde kullanımlarını güçleştirir.

2.4.3 Dereceli İndisli (Yumuşak Geçişli) Çok Modlu Optik Fiberler

Dereceli indisli (yumuşak geçişli) çok modlu optik fiberler, basamak indisli çok modlu optik fiberlerde görülen dispersiyonun giderilmesi amacı ile geliştirilmiştir. Çekirdek bölgesinin merkezinden kılıf bölgesine doğru kırılma indisi dereceli olarak küçülür, dolayısıyla ışığın almış olduğu toplam yol azaldığından, alıcıya ulaşma süresi de kısalmış olur. Böylece değişik yollar izleyen ışınlar alıcıya hemen hemen aynı sürede ulaşırlar. Dereceli indisli optik fiberler, ışık darbelerinin genişleyip yayılmalarını büyük ölçüde önlediğinden, tekrarlayıcılara ihtiyaç duyulmadan, basamak indisli çok modlu optik fiberlere oranla daha uzun mesafelerde kullanılırlar. Şekil 2.12’de dereceli indisli çok modlu optik fiberin yapısı görülmektedir.



Şekil 2.11 Dereceli indisli çok modlu optik fiber

2.5 Optik Fiberlerin Kullanım Avantajları

1. Optik fiberler, geniş band aralığı sayesinde çok fazla sayıda işareti aynı anda iletme yeteneğine sahiptir. Optik taşıyıcı frekansı band genişliği aralığı 10^{13} - 10^{16} Hz iken, koaksiyel kablo için band genişliği 500 MHz civarında, milimetrik dalga radyo sistemleri için ise 700 MHz civarındadır.
2. Optik fiber dalga kılavuzlarının en önemli özelliği elektromagnetik alanlardan etkilenmemeleridir. Optik fiberlerin dielektrik olmaları nedeniyle parazit meydana gelmemektedir.
3. Optik fiberler, yıldırımdan etkilenmemektedir.
4. Optik fiberler enerji yaymadıkları için, diğer iletişim sistemleriyle girişime yol açmaları mümkün değildir. EMI (elektromagnetik girişim), RFI (radyo frekans girişim), etkileşimleri ve diyafori (sinyal karışması) oluşmamaktadır.
5. Optik fiberler, hiçbir patlama ya da yangın tehlikesi oluşturmadan, uçucu sıvıların ya da gazların çevresinde veya askeri uygulamalarda, nükleer silahların bulunduğu alanlarda kullanılabilirler. Metalik kablolarda, iletkenler arasında kapasitans ve iletkenler boyunca indüktans meydana gelir. Bu özellikler metalik kabloların, band genişliklerini sınırlayan alçak geçiren filtreler gibi hareket etmelerine neden olur.
6. Diğer kabloların aksine, optik fiberden bilgi çalmak çok daha zordur.
7. Optik fiberlerde kullanılan koruyucu tabaka aynı zamanda kemirgenlerin ısırılmalarına engel olmak için özel kimyasal maddeler içerir. Dolayısıyla optik fiberler, aşındırıcı sıvılardan ve gazlardan daha az etkilenir. Optik fiberler üzerlerine fiziksel bir kuvvet uygulanmadıkça ömür boyu garantilidir ve sağlam izolasyona sahiptir, -40°C 'den

+110⁰ C'ye kadar olan sıcaklık değişimlerine, yer altı, su altı, beton içi ve nemli mekanlar gibi zor şartlara dayanıklıdırlar.

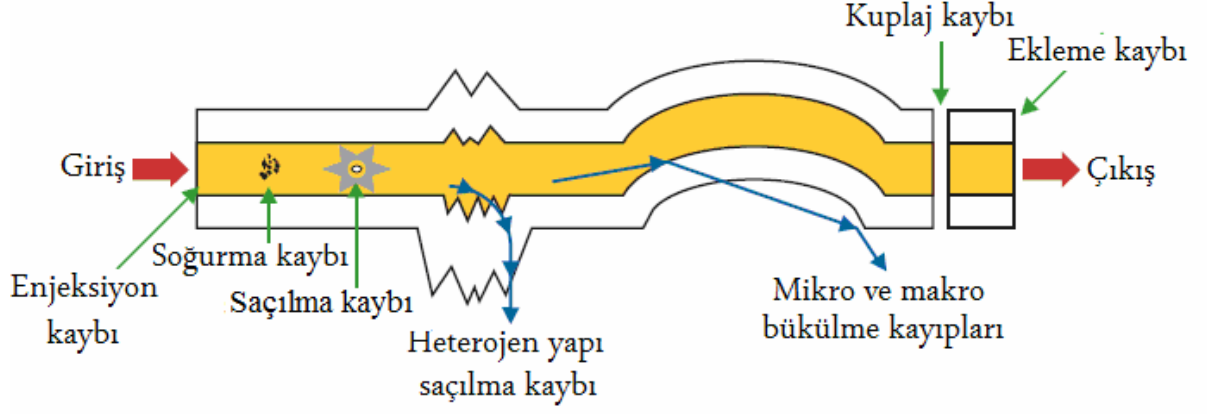
8. Optik fiberler, metalik kablolardan daha küçük ve çok daha hafiftir.
9. Optik fiberlerin ham maddesi olan kum doğada bol miktarda olduğu için üretim maliyeti düşüktür
10. Optik fiberler daha az saklama alanı gerektirir ve daha ucuza nakledilebilir.
11. Optik fiberler, gerilme ve bükülmeye karşı dayanıklı ve esneklerdir.
12. Optik fiberlerin en önemli özellikleri düşük iletim kaybıdır (0.1 dB/km) ki bu özellik maliyeti azaltır.
13. Optik haberleşme sistemleri var olan sistemlerle uyumlu çalışır.

2.6 Optik Fiberlerin Dezavantajları

1. Optik fiber'in en büyük dezavantajı, optik fiber sistemin kurulmasında başlangıç maliyetinin daha yüksek olmasıdır.
2. Her iki uçtan ışığın geçmesi için optik fiber kurulumunda özel ekipmana gerek vardır. Optik fiberlerin uç uca eklenmesi kolay değildir.
3. Kemirgen hayvanların bulunduğu alanlarda optik fiberlerin zırhlanması gereklidir.
4. Coğrafi açıdan uygun olmayan alanlarda, yeraltında kullanımı zordur.

2.7 Optik Fiber Dalga Kılavuzlarında İletim Karakteristikleri ve Kayıplar

Optik fiberlerde ışığın iletiminde, verici, alıcı ve sinyalin taşındığı transmisyon ortamı olmak üzere üç temel bileşen söz konusudur. İletim ortamında zayıflama, iletilen sinyalin gücünü ve bilgi iletim hızının verimliliğini değiştirir, dispersiyon ise band genişliğini sınırlar. Optik fiberlerde görülen başlıca kayıp mekanizmaları Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 Optik fiberlerde kayıp mekanizmaları

2.7.1 Zayıflama

Optik fiberlerin en önemli iletim karakteristikleri, zayıflama ve band genişliğidir. Zayıflamanın ana nedenleri, demir, bakır, manganez ve diğer geçiş metalleri gibi camdaki safsızlıkların sebep olduğu soğurumdur.

Zayıflama, işaretin yeniden kuvvetlendirilmeden önce iletilebileceği maksimum mesafeyi belirleyen temel faktördür. Optik fiberlerde işaret zayıflaması, genellikle desibel cinsinden logaritmik olarak ifade edilir. Özel bir dalgaboyu için,

$$\text{Desibel (dB)} = 10 \log \frac{P_i}{P_0} \quad (2.8)$$

ile tanımlanır. Burada, P_i , optik fibere aktarılan güç, P_0 ise optik fiberden alınan çıkış gücüdür. (2.8) eşitliği kullanılarak,

$$\frac{P_i}{P_0} = 10^{(dB/10)} \quad (2.9)$$

elde edilir. Optik haberleşmede zayıflama, genellikle “birim uzunluk başına desibel” cinsinden ifade edilir,

$$\alpha_{dB} = \frac{1}{L} 10 \log \frac{P_i}{P_0} \quad (2.10)$$

Bu eşitlikte, α_{dB} birim uzunluk başına işaret zayıflaması ve L optik fiberin uzunluğudur. Optik fiberlerde işaretin zayıflamasına neden olan birçok mekanizma vardır; malzeme kompozisyonu, hazırlama ve saflaştırma tekniği ve dalga kılavuzu yapısı bu mekanizmalara etki eder.

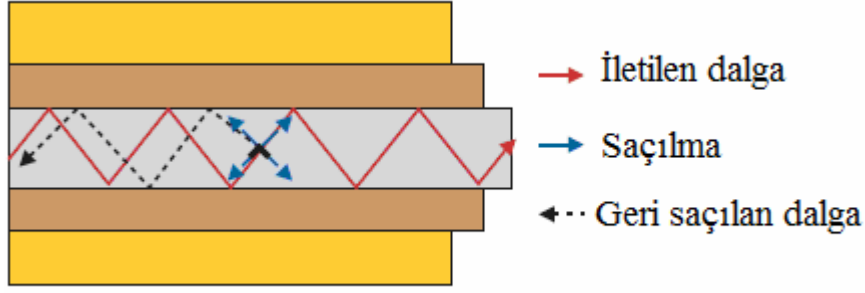
2.7.2 Malzeme Soğurum Kayıpları

Malzeme soğurumu, optik fiberin malzeme kompozisyonu ve fabrikasyon işlem biçimi ile ilgili kayıp mekanizmasıdır. Optik fiberlerdeki soğurma kaybı, bakır kablolardaki güç kaybına benzer; optik fiberin saf olmaması nedeniyle içinde bulunan maddeler, ışığı soğurarak ısıya dönüştürmektedir. Optik fiberleri imal etmede kullanılan aşırı saf cam, yaklaşık %99.9999 saflıktadır. Optik fiberlerde soğurma kayıplarına yol açan üç faktör vardır. Bunlar morötesi soğurma, kızılaltı soğurma ve iyon rezonans soğurmasıdır.

- **Morötesi soğurma:** Morötesi soğurmaya, optik fiberin imal edildiği silika malzemesindeki valans elektronları neden olur. Işık, valans elektronlarını iyonize ederek iletkenlik yaratır. İyonizasyon, toplam ışık alanındaki bir kayba eşdeğerdir ve bu nedenle optik fiberin iletim kayıplarından birini oluşturur.
- **Kızılaltı soğurma:** Cam çekirdek moleküllerinin atomları tarafından soğurulan ışık fotonları, nedeniyle kızılaltı soğurma söz konusu olur. Soğurulan fotonlar, ısınmaya özgü rastgele mekanik titreşimlere dönüşerek iletilen ışında bozulmalara yol açar.
- **İyon rezonans soğurması:** İyon rezonans soğurmasına, malzemedeki OH⁻ iyonları neden olur. OH⁻ iyonlarının kaynağı, imalat sürecinde camın içinde sıkışıp kalan su molekülleridir. İyon soğurmasına demir, bakır ve krom molekülleri de yol açar.

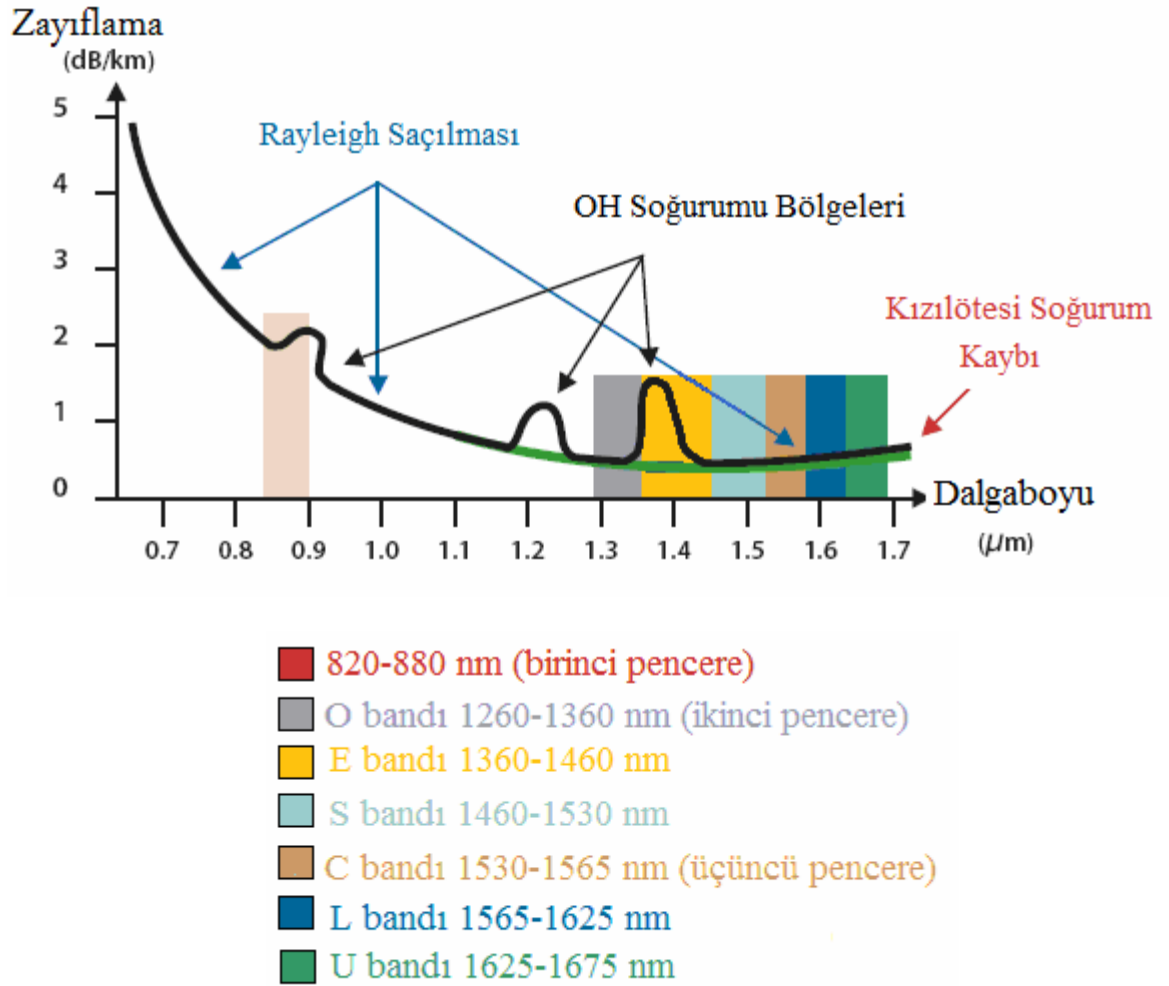
2.7.3 Lineer Saçılma Kayıpları

İmalat sürecinde, cam çekilerek çok küçük çaplı uzun optik fiberler haline getirilir. Bu süreç sırasında, cam, plastik haldedir sıvı ya da katı halde değildir. Bu süreçte, cama uygulanan germe kuvveti, soğuyan camda mikroskopla görülmeyecek kadar küçük düzensizliklerin oluşmasına neden olur; bu düzensizlikler, optik fiberde kalıcı olarak oluşur. Işık, optik fiberde ilerlerken bu düzensizliklerden birine çarparsa kırınım meydana gelir. Kırınım, ışığın birçok yönde dağılmasına ya da saçılmasına yol açar. Kırınım yapan ışığın bir kısmı optik fiberde yoluna devam ederken, bir kısmı da koruyucu kılıf üzerinden dışarı çıkar. Kaçan ışık ışınları, ışık gücünde bir kayba karşılık gelirler. Buna Rayleigh Saçılım Kaybı adı verilir. Şekil 2.13'de ışığın optik fiber içinde saçılması gösterilmiştir.



Şekil 2.13 Işığın optik fiber içinde saçılımı

Şekil 2.14’de verilen grafikte soğurum ve saçılma kayıpları dalgaboyuna bağlı olarak görülmektedir.



Şekil 2.14 Soğurma ve saçılma kayıpları

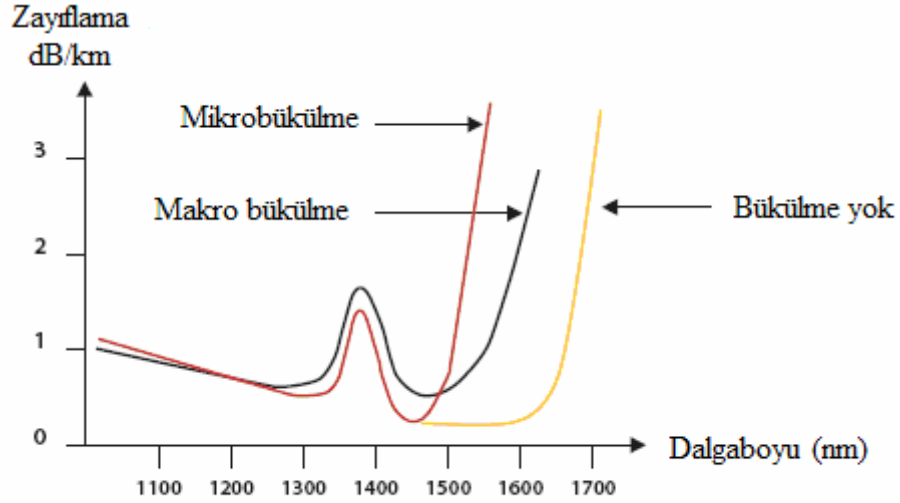
Şekil 2.14’de yer alan birinci, ikinci ve üçüncü pencere bölgeleri, zayıflamanın az olduğu dalgaboylarını ifade eder. Bu dalgaboyları haberleşme pencereleri olarak bilinir. ITU-T.S G.692 standardı bunlara ek olarak başka pencereler de tanımlamıştır ve bunlar band olarak

tanımlanır. Bu bandlar, DWDM transmisyonu için tahsis edilmişler ve grafiğin altında liste ile gösterilmişlerdir.

Grafikte OH⁻ ile gösterilen bölümler, dalgaboyunun 950 nm, 1244 nm ve 1383 nm olduğu bölgelerde hidrojen ve hidroksil iyonlarının varlığından kaynaklanan zayıflama piklerini göstermektedir. Bu iyonlar, üretim sırasında optik fiber malzeme ve su iyonlarının ya da havadaki nemin kimyasal reaksiyonunun bir sonucudur. 1383 nm civarında oluşan büyük zayıflama etkisi üretim teknikleri ile en aza indirilmeye çalışılır. Bunun için, düşük su piki fiberler (low water peak fiber) üretilmektedir.

2.7.4 Optik Fiberlerde Bükülme Kayıpları

Optik fiberlerde bir diğer kayıp mekanizması, küçük bükümler ve burulmaların neden olduğu zayıflamalardır. Optik fiberin çapı ile karşılaştırıldığında daha büyük olan bükülmelere makro bükülme, daha küçük olanlarına ise mikro bükülme denir. Bu bükülmeler, ışığın optik fiber dışına yayılmasına ve bir kılavuzlanmış moddan diğerine enerji transferine neden olur (Cherin, 1983).



Şekil 2.15 Makro ve mikro bükülme kayıpları

Şekil 2.15'de Makro ve mikro bükülme kayıplarının dalgaboyuna göre zayıflama etkileri verilmiştir.

2.8 Dispersiyon (Modal yayılma)

Modal yayılmanın nedeni, bir optik fiberde farklı yollar izleyen ışık ışınlarının yayılım sürelerindeki farktır. Modal yayılma, bir optik fiberde yayılım yapmakta olan bir ışık darbesinin enerjisinin yayılarak dağılmasına neden olur. Çok modlu basamak indisli bir optik fiberde, doğrudan optik fiber eksenini üzerinden yayılım yapan bir ışık ışını, optik fiberi bir ucundan diğer ucuna en kısa sürede kat eder. Maksimum giriş açısı ile çekirdek/koruyucu arayüzüne ulaşan bir ışık ışını ise, maksimum sayıda dahili yansımaya maruz kalarak, optik fiberi bir ucundan diğer ucuna en uzun sürede kat eder. İşaret, bu iki ışının toplam band genişliğinin artmasına bağlı olarak yayılır.

Modal yayılmanın yalnızca çok modlu optik fiberlerde meydana gelebileceği açıktır. Dereceli indisli optik fiberler kullanılmak suretiyle modal yayılma önemli ölçüde azaltılır, tek modlu optik fiberler kullanıldığında ise hemen hemen bütünüyle bertaraf edilir.

2.9 Ek Kayıpları

Optik fiber hatları, sürekli veya sökülebilir bağlantılar yardımıyla birbirine eklenen birçok parçadan oluşur. Işık kaynağı ile optik fiber bağlantıları, optik fiber ile optik fiber bağlantıları ve optik fiber ile fotodedektör bağlantıları sırasında kayıp meydana gelir.

2.10 Optik Fiber Malzemeler ve Özellikleri

Haberleşme amaçlı optik fiberler, dielektrik bir malzeme olan camdan yapılır. Haberleşme amaçlı optik fiberlerde, malzemenin sahip olması gereken temel özellikler, kullanılan spektral bölgede mükemmel şeffaflık, kimyasal etkilere direnç, iyi kararlılık, iyi mekanik özellikler, düşük fiyat ve endüstriyel işlemlere iyi uyumluluktur (Özsoy, 1998).

Günümüzde kullanılan fiber malzemeleri,

- Camlar,
- Yüksek silikalı camlar,
- Oksit camlar (Çoklu oksit camlar)
- Halojen camlar

Çinko Klorür Camlar

1. Çinko klorür camlar
2. Berilyum florür camlar

3. Alüminyum florür camlar
4. Ağır metal florür camlar
5. Florürden başka halojen camlar

- Kalkojen camlar
- Kristaller
- Plastikler

olarak özetlenebilir.

3. OPTİK FİBERLERDE DALGA KILAVUZU ANALİZİ

Optik dalga kılavuzunun analizini yapmak için Maxwell denklemleri, maddenin elektriksel özellikleri ve sınır koşullarından yararlanılır. Optik dalga kılavuzunun çekirdek kalınlığı dalgaboyunun derecesinde ise, iletilen birden çok mod varken, çekirdek yarıçapının dalgaboyundan büyük olması durumunda ise iletilen tek bir mod vardır. İkinci Bölüm’de bahsedildiği gibi, ışığın kırılma ve yansıma şartlarına bağlı olarak çekirdek bölgesinin kırılma indisi kılıf bölgesinin kırılma indisinden büyük olmalıdır.

Düzlemsel yapıdaki katmanlı (slab) dalga kılavuzlarının propagasyon davranışları, üç boyutlu optik fiberler ile benzer özellik gösterir ve bir sınır değer problemi gibi incelenir. Ayrıca slab dalga kılavuzlarının incelenmesi silindirik yapıdaki dalga kılavuzlarına oranla daha kolaydır. Dalga denklemleri, yayılma modlarının alanlarını elde etmek için sınır koşulları kullanılarak çözülür. Yayılma modları, tek ve çift TE ve tek ve çift TM modları olarak ayrılmıştır. Dalga için elde edilen karakteristikler veya özdeğer denklemleri, modlarla ilişkili yayılma sabitleri için eşitlikler oluştururlar.

3.1 Mod Kavramı ve Çeşitleri

İletim ortamları için herhangi iki noktada elektromagnetik özellikler aynı ve aradaki tek fark bu noktalar arası mesafeden kaynaklanan faz farkı ise bu iki noktanın aynı modun içinde yer aldığından söz edilir. Sadece yayılma yönündeki koordinata periyodik olarak bağımlı olan ve yayılma yönüne dik doğrultuda alan dağılımına “mod” denir.

3.1.1 Mod Çeşitleri

TE (Enine Elektrik) Modu, yayılma yönünde elektrik alan değeri sıfıra eşittir:

$$E_z=0$$

$$H_z \neq 0$$

TM (Enine Magnetik) Modu, yayılma yönünde magnetik alan değeri sıfıra eşittir:

$$E_z \neq 0$$

$$H_z=0$$

TEM (Enine Elektromagnetik) Modu, yayılma yönünde elektrik ve magnetik alan değeri sıfıra eşittir:

$$E_z=0$$

$$H_z=0$$

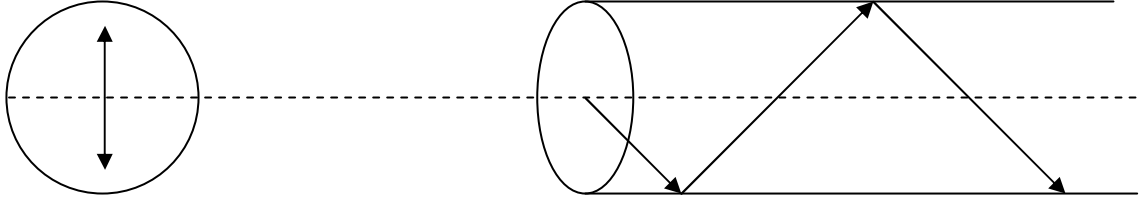
Hibrid (Hybrid, Melez) Modlar, yayılma yönünde elektrik ve magnetik alan değeri sıfırdan farklıdır:

$$E_z \neq 0$$

$$H_z \neq 0$$

3.1.2 Modların Fiziksel Yorumları

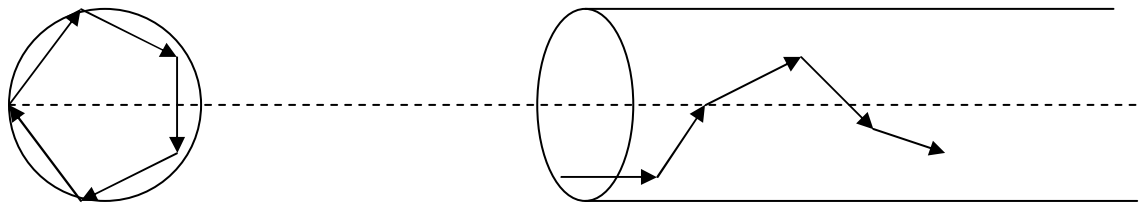
Düzlem yapıdaki katmanlı dalga kılavuzlarında E ve H modu olarak bilinen TE ve TM modları elektrik ve magnetik alanın boyuna bileşenlerine göre oluşurlar. İdeal durumda TE ve TM modunun birbirine karışması mümkün değildir. Bu tür dalga kılavuzlarında TE ve TM modlarının oluşumu düzlem dalganın yansımalarının polarizasyonuna bağlıdır. Bu tür kılavuzlarda, TE ve TM modunun davranışı dielektrik dalga kılavuzunda aynıdır. Bu modların oluşumunda eksenel (meridyenel) ışın rol oynar. Optik eksenini keserek ilerleyen ışınlar meridyenel ışınlar olarak adlandırılır. Şekil 3.1’de eksenel ışınlar görülmektedir.



Şekil 3.1 Dielektrik dalga kılavuzlarında eksenel (meridyenel) ışın

Silindirik yapıdaki dielektrik dalga kılavuzlarında, düzlemsel yapıdaki katmanlı dalga kılavuzlarında oluşmayan helisel ışınlar meydana gelir. Bu ışınlar, E_z ve H_z bileşeninin sıfırdan farklı olduğu modları, bir başka deyişle daha önce tanımlanmış olan hibrid modları meydana getirir. Bu modların oluşumuna neden olan ışınlar Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

Dielektrik dalga kılavuzlarında TEM modu geçersizdir. Bunun nedeni, aynı anda E_z ve H_z bileşeninin sıfır olamamasıdır. TEM modları koaksiyel kablolar gibi genelde iki iletkenli dalga kılavuzlarında geçerlidir.



Şekil 3.2 Dielektrik dalga kılavuzunda helisel ışınlar

3.2 Maddenin Elektriksel Özellikleri

Optik fiberlerde yayılım modlarını incelemekten öncelikle temel dalga denklemi incelenmelidir. Cam fiberlerde atomlar arası mesafe 0.1 nm civarındadır. Bu mesafe, 1000 nm olan ışığın dalgaboyu ile karşılaştırıldığında çok küçüktür. Bu sebeple, dalga kılavuzu analizlerinde ortam olarak cam seçilmiştir. Ayrıca seçilen camın homojen, izotropik, lineer ve zamanla değişmeyen bir ortam olduğu kabul edilmiştir. Bu tür bir maddenin elektriksel özellikleri ϵ (elektriksel geçirgenlik, permittivity), μ (magnetik geçirgenlik, permeability) ve σ (iletkenlik, conductivity) değişkenleri ile tanımlanır. Maddenin elektrik ve magnetik alanları süreklilik denklemlerine uyum sağlar.

Bünye denklemleri,

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3.1)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.2)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilir. Serbest uzayda elektriksel geçirgenlik, magnetik geçirgenlik ve iletkenlik değerleri, kayıpsız ve dielektrik ortamlar için,

$$\sigma = 0 \text{ (S/m)} \quad (3.4)$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ olmak üzere,}$$

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \text{ (F/m)} \quad (3.5)$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ (H/m) olmak üzere,}$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \text{ (H/m)} \quad (3.6)$$

olarak ifade edilir. Bu eşitliklerde kullanılan ϵ_r bağıl elektriksel geçirgenlik sabiti, μ_r ise bağıl magnetik geçirgenlik sabitidir.

3.3 Maxwell Denklemleri

Dalga kılavuzları incelenirken Maxwell eşitliklerinden faydalanılır. Zamana göre değişmeyen (statik koşullarda) ve kaynağın olmadığı ortamda Maxwell eşitlikleri,

$$\text{rot } \vec{E} = \vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (3.7)$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{\nabla} \times \vec{H} = -j\omega\epsilon\vec{E} \quad (3.8)$$

$$\text{div } \vec{D} = \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad (3.9)$$

$$\text{div } \vec{B} = \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.10)$$

şeklindedir.

3.4 Dielektrik-Dielektrik Sınır Koşulları

Dielektrik-dielektrik sınır yüzeyinde elektrik ve magnetik alanın teğetsel bileşenleri, elektrik akı yoğunluğu ve magnetik akı yoğunluğunun ise normal bileşenleri süreklidir:

$$E_{t_1} = E_{t_2} \quad (3.11)$$

$$H_{t_1} = H_{t_2} \quad (3.12)$$

$$D_{n_1} = D_{n_2} \quad (3.13)$$

$$B_{n_1} = B_{n_2} \quad (3.14)$$

3.5 Dalga Kılavuzları İçin Temel Eşitlikler

Dalga kılavuzları için temel eşitlikler, Maxwell Denklemleri, sınır koşulları ve bünye denklemleri kullanılarak elde edilir. Dalga kılavuzunun +z yönünde propagasyon yaptığı kabul edilmiştir. Propagasyon doğrultusunda bileşenler aksenal bileşenlerdir. Kılavuzlanmış elektromagnetik dalganın z doğrultusunda değişimi $\exp(\pm j\beta z)$ şeklindedir. (Ünverdi, 1991) Zamana göre değişim ise $\exp(j\omega t)$ şeklinde ifade edilebilir. Bu şekilde tanımlanan dalga için alan bağıntıları;

$$\vec{E} = \vec{E}_0(x, y) \exp(-j\beta z) (V/m) \quad (3.15)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0(x, y) \exp(-j\beta z) (A/m) \quad (3.16)$$

şeklinde yazılır. $\vec{F}$ herhangi bir fonksiyon olmak üzere bu fonksiyonun kartezyen koordinatlarda rotasyonel ifadesi,

$$\vec{\nabla} \times \vec{F} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \\ \frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \\ \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

şeklindedir. Maxwell denklemlerinden ve yukarıda verilen rotasyonel ifadesinden yararlanılarak enine (transverse) alan ifadeleri, boyuna (longitudinal) bileşenler cinsinden elde edilmiştir:

$$E_x = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial y} + \beta \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (3.18)$$

$$E_y = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial y} - \omega \mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (3.19)$$

$$H_x = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial x} - \omega \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (3.20)$$

$$H_y = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial y} + \omega \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (3.21)$$

Burada kullanılan κ değeri, çekirdek bölgesinin özdeğeri olmak üzere,

$$\kappa^2 = \omega^2 \mu \epsilon - \beta^2 = k^2 - \beta^2 \quad (3.22)$$

olarak ifade edilir.

Laplasyen operatörü,

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (3.23)$$

olmak üzere dalga denklemleri,

$$\nabla^2 E_z + \kappa^2 E_z = 0 \quad (3.24)$$

$$\nabla^2 H_z + \kappa^2 H_z = 0 \quad (3.25)$$

olur.

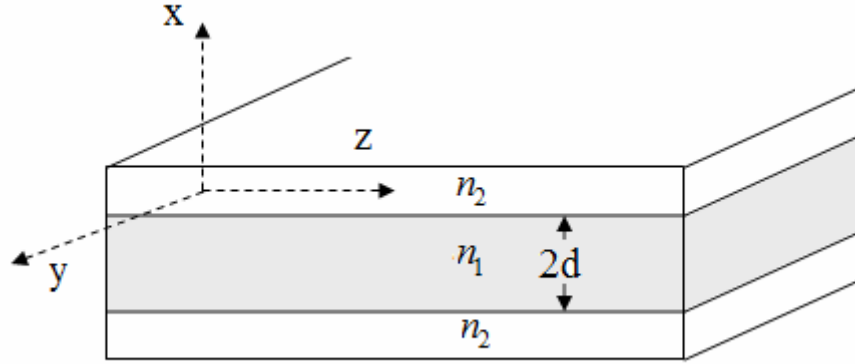
Her iki denklemde laplasyen operatörü kullanılırsa Helmholtz eşitlikleri,

$$\nabla^2 E_z + \kappa^2 E_z = 0 \quad (3.26)$$

$$\nabla^2 H_z + \kappa^2 H_z = 0 \quad (3.27)$$

olarak elde edilir.

3.6 Simetrik Slab Dalga Kılavuzlarının Yayılım Modları



Şekil 3.3 Simetrik dielektrik slab dalga kılavuzunun geometrisi

Şekil 3.3’de görülen slab dalga kılavuzundaki dalgalar z eksenine doğrultusunda yayılırlar. Bu bölümde, kılavuzun y eksenine doğrultusunda sonsuz uzunlukta olduğu varsayılarak işlem yapılacaktır. Dalga kılavuzu geometrisinde simetriden dolayı y eksenine doğrultusundaki alan dağılımlarında değişiklik yoktur. Kılavuzun simetrisinden dolayı kabul edilen sınırlama,

$$\frac{\partial}{\partial y} = 0 \quad (3.28)$$

ile ifade edilir. Dalga kılavuzunda elektrik alan ifadesi, β , modal propagasyon sabiti olmak üzere,

$$\vec{E} = \vec{E}_0(x) \exp(-j\beta z) \exp(j\omega t) \quad (3.29)$$

formundadır. Ortamın magnetik geçirgenliğinin, serbest uzayinkine (μ_0) eşit olduğu varsayımı kullanılmıştır.

Simetri koşulu $\frac{\partial}{\partial y} = 0$ dalga kılavuzunun alanlarını TE ve TM modlarına ayırmaya izin verir.

Böylece slab dalga kılavuzları için alan bileşenleri,

$$E_x = -\frac{j\beta}{\kappa^2} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (3.30)$$

$$E_y = \frac{j\omega\mu}{\kappa^2} \left(\frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (3.31)$$

$$H_x = -\frac{j\beta}{\kappa^2} \left(\frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (3.32)$$

$$H_y = -\frac{j\omega\epsilon}{\kappa^2} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (3.33)$$

şeklinde elde edilir.

3.6.1 Dielektrik Slab Dalga Kılavuzunda TE Modları

TE modları için propagasyon doğrultusunda elektrik alan bileşeni sıfırdır.

TE modu için $E_z = 0$ ve $H_z \neq 0$ 'dır. Buna bağlı olarak, E_y , H_x ve H_z bileşenleri mevcuttur.

TM modu için $H_z = 0$ ve $E_z \neq 0$ 'dır. Dolayısıyla, E_x , E_z ve H_y bileşenleri vardır.

Helmholtz denklemi,

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (3.34)$$

olarak ifade edilir.

TE modu durumundaki elektrik alanın sadece y eksenı doğrultusundaki bileşeni (E_y) vardır.

Buna göre (3.28) eşitliği dikkate alınarak (3.34) eşitliği,

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + k^2 E_y = 0 \quad (3.35)$$

şekline dönüşür. (3.29) eşitliği de düzenlendiğinde,

$$E_y(x, z) = E_y(x) \exp(-j\beta z) \quad (3.36)$$

elde edilir. (3.36) eşitliği (3.35) eşitliğinde yerine konulduğunda,

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} \exp(-j\beta z) + k^2 E_y(x) \exp(-j\beta z) = 0 \quad (3.37)$$

ifadesinden,

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + k^2 E_y = 0 \quad (3.38)$$

eşitliği bulunur.

Slab yapının çekirdek ve kılıf bölgeleri için farklı çözümler elde edilir. Öncelikle E_y için çözülür ve sonra H_z Maxwell denklemlerinden elde edilir.

$$H_x = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} E_y \quad (3.39)$$

$$H_z = \frac{j}{\omega\mu_0} \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (3.40)$$

$|x| \leq d$ için, slab yapının içinde genel çözüm,

$$E_{y_1} = A \cos(\kappa x) + B \sin(\kappa x) \quad (3.41)$$

şeklindedir. Burada,

$$\kappa^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (3.42)$$

olmak üzere, (3.41) eşitliğinde, $A \cos(\kappa x)$ çift TE modlarını, $B \sin(\kappa x)$ tek TE modlarını ifade eder.

Kılıf bölgesinde x 'in artan değerlerine karşılık, alan sönümlü ve $|x| \geq d$ için, elektrik alan,

$$E_{y_2} = C \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (3.43)$$

yapısında olur.

Burada γ , bölgenin özdeğerini ifade eder.

Bu problem doğrudan (3.41) ve (3.43) eşitlikleri ile çözülmek istenirse, elektrik ve magnetik alanlarının teğetsel bileşenleriyle $x = \pm d$ sınırında ilişkilendirilmiş sınır koşulları uygulanır. Bu yöntemle dalga kılavuzu için karakteristik özdeğer denklemleri elde edilir ve yayılan TE modu için κ ve δ değerleri bulunur (Marcuse, 1972). Bu yöntem Marcuse tarafından izlenmiştir ve aşağıdaki eşitlik bulunmuştur:

$$\tan(2dk) = \frac{2\gamma\kappa}{\kappa^2 - \delta} \quad (3.44)$$

Slab dalga kılavuzu için basit bir fiziksel model ve karakteristik denklemleri elde etmek için çekirdekteki çözümler tek ve çift modlar için ayrılır ve her durum için karakteristik denklem bulunur. Toplam alanı bulmak için süperpozisyon teoremi kullanılır.

3.6.1.1 Dielektrik Slab Dalga Kılavuzunda Tek TE Modları

Kılavuz içinde çekirdek bölgesinde, $|x| \leq d$ için elektrik alan TE modu çözümü,

$$E_{y_1} = A_e \cos(\kappa x) \quad (3.45)$$

dir. (3.45) eşitliği, (3.39) ve (3.40) eşitliklerinde yerine yazılarak magnetik alan bileşenlerine ulaşılır:

$$H_{x_1} = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} A_e \cos(\kappa x) \quad (3.46)$$

$$H_{z_1} = -\frac{jk_1}{\omega\mu_0} A_e \sin(\kappa x) \quad (3.47)$$

Dalga kılavuzunun kılıfında $|x|$ sonsuza yaklaşırken, değeri sıfıra yaklaşan bir sönümlü alanın oluşması beklenir. Bu nedenle elektrik alan ifadesi, $|x| \geq d$ için,

$$E_{y_2} = B_e \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (3.48)$$

şekline dönüşür. Alanın z eksenindeki değişiminin $\exp(-jBz)$ olduğu düşünülerek, (3.48) eşitliği (3.35) eşitliğinde kullanılırsa,

$$\gamma^2 = \beta^2 - n_2^2 k_0^2 \quad (3.49)$$

olur. Kılıf bölgesindeki magnetik alanlar ise,

$$H_{x_2} = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} B_e \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (3.50)$$

$$H_{z_2} = \frac{j\gamma}{\omega\mu_0} \left(-\frac{x}{|x|} \right) B_e \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (3.51)$$

şeklindedir.

Çekirdek-kılıf ara yüzeyinde sınır koşulları uygulanarak TE modu için karakteristik denklem elde edilir. Alanların teğetsel bileşenleri için, sınır koşulları, E_y ve H_z alanlarının $|x| = d$ sınırında sürekli olmalarını gerektirir. Bu durumda $x=d$ için elektrik alanının sürekliliği,

$$E_{y_1} = E_{y_2} \quad (3.52)$$

$$A_e \cos(\kappa d) = B_e \quad (3.53)$$

ile ifade edilir. Sınır koşulları uygulanırsa $x=d$ sınırında magnetik alanlar,

$$H_{z_1} = H_{z_2} \quad (3.54)$$

$$-\frac{j\kappa}{\omega\mu_0} A_e \sin(\kappa d) = A_e \cos(\kappa d) \left(-\frac{d}{|d|} \right) \left(\frac{j\gamma}{\omega\mu_0} \right) \quad (3.55)$$

olarak elde edilir ve bu eşitlik düzenlenirse dalga kılavuzunun tek TE modları için,

$$\frac{\sin(\kappa d)}{\cos(\kappa d)} = \tan(\kappa d) = \frac{\gamma}{\kappa} \quad (3.56)$$

karakteristik denklemi (özdeğer denklemi) elde edilir,

3.6.1.2 Dielektrik Slab Dalga Kılavuzunda Çift TE Modları

Çift TE modları için dalga kılavuzunun çekirdeğindeki alanlar $|x| \leq d$ için,

$$E_{y_1} = A_0 \sin(\kappa x) \quad (3.57)$$

$$H_{x_1} = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} E_{y_1} = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} A_0 \sin(\kappa x) \quad (3.58)$$

$$H_{z_1} = \frac{j}{\omega\mu_0} \frac{\partial E_{y_1}}{\partial x} = \frac{j\kappa}{\omega\mu_0} A_0 \cos(\kappa x) \quad (3.59)$$

ve $|x| \geq d$ için dalga kılavuzunun kılıfındaki alanlar,

$$E_{y_2} = B_0 \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (3.60)$$

$$H_{x_2} = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} B_0 \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (3.61)$$

$$H_{z_2} = \frac{j\gamma}{\omega\mu_0} \left(-\frac{x}{|x|} \right) B_0 \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (3.62)$$

dir. Alanların teğetsel bileşenlerine $x = \pm d$ sınırında sınır koşulları uygulandığında, $E_{y_1} = E_{y_2}$ olur ve aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$A_0 \sin(\kappa d) = B_0 \quad (3.63)$$

$x = -d$ için sınır koşulları uygulandığında,

$$-A_0 \sin(\kappa d) = B_0 \quad (3.64)$$

bağıntısına ulaşılır. (3.63) ve (3.64) eşitlikleri yardımıyla B_0 için $x = \pm d$ 'de genel bir eşitlik elde edilir:

$$B_0 = \frac{x}{|x|} A_0 \sin(\kappa d) \quad (3.65)$$

(3.65) eşitliği, (3.62) eşitliğinde kullanılır ve $H_{z_1} = H_{z_2}$ için $x=d$ sınırında sınır koşulları uygulanırsa,

$$\frac{j\kappa_1}{\omega\mu_0} A_0 \cos(\kappa d) = -\frac{j\gamma}{\omega\mu_0} A_0 \sin(\kappa d) \quad (3.66)$$

olur. (3.66) eşitliği sadeleştirilirse dielektrik slab dalga kılavuzunun çift TE modları için,

$$\frac{\sin(\kappa d)}{\cos(\kappa d)} = \tan(\kappa d) = \frac{-\kappa}{\gamma} \quad (3.67)$$

karakteristik denklemi (özdeğer denklemi) elde edilir, (3.56) ve (3.67) eşitliklerinde verilen karakteristik denklemler, TE modlarında yayılım sabitlerini elde etmek için gerekli bilgileri verir.

3.6.1.3 TE Modlarının Karakteristik Denklemleri

Düzlemsel yapıdaki katmanlı dalga kılavuzlarının çift ve tek TE modları için karakteristik denklemlerin analizinde daha önce elde edilen,

$$\kappa^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (3.68)$$

$$\gamma^2 = \beta^2 - n_2^2 k_0^2 \quad (3.69)$$

$$\tan(\kappa d) = \frac{\gamma}{\kappa} \quad (3.70)$$

$$\tan(\kappa d) = -\frac{\kappa}{\gamma} \quad (3.71)$$

eşitliklerinden yararlanılır. TE çift modlarının karakteristik denklemleri, (3.68) eşitliğinden (3.71) eşitliğine kadar olan eşitlikler grafik formunda bir çözüm bulmak için yeniden düzenlenmelidir. (3.68) ve (3.69) eşitlikleri toplanır ve d^2 ile çarpılırsa,

$$\gamma^2 d^2 + \kappa^2 d^2 = (n_1^2 - n_2^2) k_0^2 d^2 \quad (3.72)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik, $X = \kappa d$ ve $Y = \gamma d$ değişkenleri kullanılarak merkezli çember denklemi şeklinde ifade edilir ve

$$R = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2) k_0^2} d \quad (3.73)$$

eşitliğine ulaşılır. Bu eşitlik, çember formunda grafik olarak çizilebilir ve $X^2 + Y^2 = R^2$ şeklinde ifade edilir.

Tek TE modları için (3.70) eşitliği d ile çarpılarak yeniden düzenlendiğinde,

$$\gamma d = \kappa d \tan(\kappa d) \quad (3.74)$$

ve çift TE modları için (3.71) eşitliği d ile çarpılarak yeniden düzenlendiğinde ise,

$$\gamma d = -\kappa d \cot(\kappa d) \quad (3.75)$$

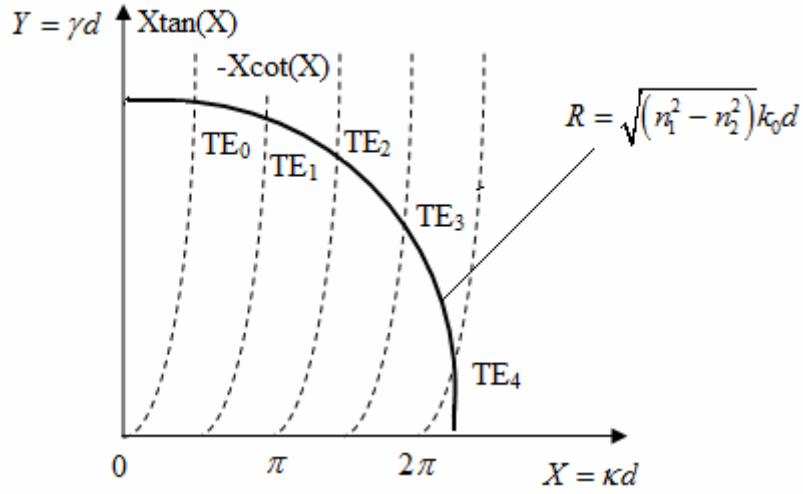
ifadeleri elde edilir.

Bu denklemler, yukarıda tanımlanan, X ve Y terimleri kullanılarak yeniden düzenlendiğinde,

$$Y = X \tan(x) \quad (3.76)$$

$$Y = -X \cot(x) \quad (3.77)$$

denklem çifti bulunur. (3.73), (3.76) ve (3.77) eşitlikleri, dalga kılavuzunun TE modlarını elde etmek için X-Y diyagramında çizilebilir. Eşitliklerin kesişimi, dalga kılavuzundaki modlar için propagasyon koşullarını belirler. Örnek olarak ilk tek mod için (TE_0 modu) κ_{10} ve δ_0 verilmiş bir d uzaklığı için Şekil 3.4'deki ilk kesişim noktasından bulunur. β_0 ise (3.68) eşitliği kullanılarak hesaplanabilir. Diğer TE_m modları için yayılım sabitleri aynı şekilde elde edilir.



Şekil 3.4 Dielektrik slab dalga kılavuzunun TE modlarının karakteristik eşitlik diyagramı

Çizelge 3.1 Artan fiziksel parametrelerin propagasyon modu sayısına etkisi

Artırılan Parametre	Yayılan Modların Sayısı
Çekirdek bölgesi kırılma indisi, n_1	Artar
Kılıf bölgesi kırılma indisi, n_2	Azalır
Slab yarıçapı, d	Artar
Çalışma dalgaboyu, λ	Azalır

Dalga kılavuzunda yayılan modların sayısı, R ile orantılıdır.

$$R = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} k_0 d < \frac{\pi}{2} \quad (3.78)$$

için tek yayılan mod TE_0 'dır. Çünkü çember $X_{tan}(X)$ eğrisinin ilk dalıyla kesişir. Çizelge 3.1'de fiziksel parametreler n_1, n_2, d ve λ_0 'ın arttırılmasının propagasyon modları sayısını nasıl etkilediği gösterilmiştir (Cherin, 1983).

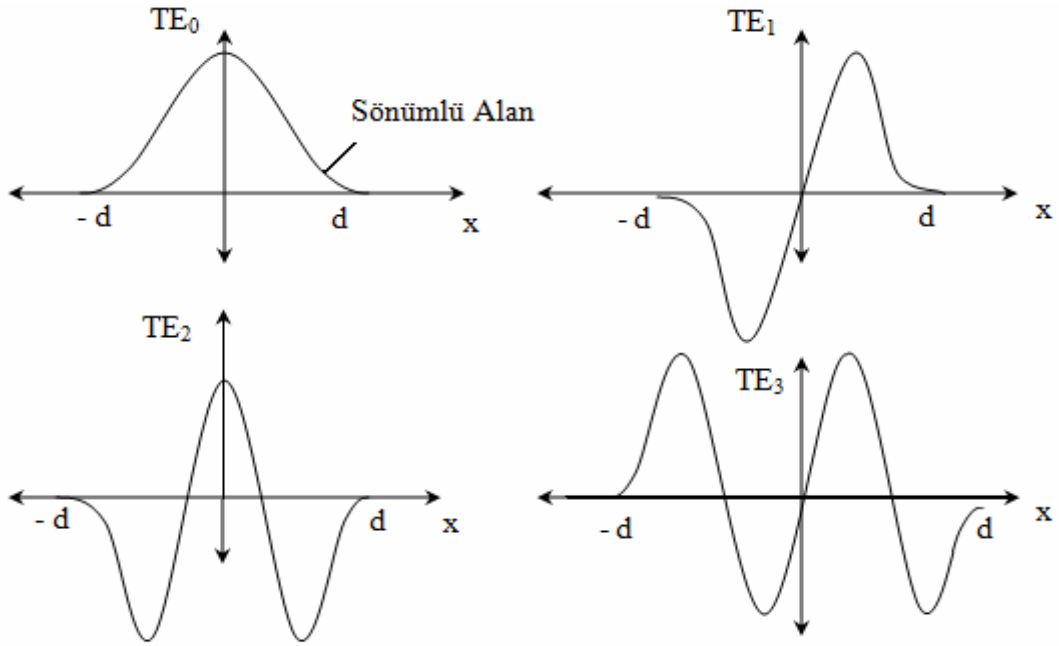
$d > 2\pi$ için,

$$R = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \right) \quad (3.79)$$

birçok yayılma modu olur. Çok modlu dalga kılavuzu tasarımında,

$$d > \frac{\lambda_0}{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = \frac{\lambda_0}{NA} \quad (3.80)$$

olmalıdır. Burada NA , dalga kılavuzunun sayısal açıklığıdır. Şekil 3.5'de ilk birkaç TE_m modu için alanlar gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Dielektrik slab dalga kılavuzunda TE modlarının x 'e bağlı fonksiyonları

3.6.2 Dielektrik Slab Dalga Kılavuzunda TM Modları

TM modları için H_y , E_x ve E_z alanları vardır. Magnetik alan bileşeni,

$$H_y(x, z) = H_y(x) \exp(-jBx) \quad (3.81)$$

dir. Bu durumda Helmholtz denklemi,

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + (n^2 k_0^2 - \beta^2) H_y = 0 \quad (3.82)$$

olur. H_y 'nin, dalga kılavuzunun çekirdek ve kılıf bölgesindeki çözümünde TE modlarının çözümünde izlenen yol kullanılır. $\partial/\partial y = 0$ yaklaşımı altında, E_x ve E_z 'nin H_y cinsinden ifadeleri,

$$E_x = \frac{\beta}{\omega \epsilon} H_y \quad (3.83)$$

$$E_z = -\frac{j}{\omega \epsilon} \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (3.84)$$

şeklindedir.

3.6.2.1 Dielektrik Slab Dalga Kılavuzunda Tek TM Modları

Çekirdek bölgesinde, $|x| \leq d$ için,

$$H_y = B_e \cos(\kappa x) \quad (3.85)$$

$$E_x = \frac{\beta}{\omega \epsilon_1} B_e \cos(\kappa x) \quad (3.86)$$

$$E_z = \frac{jk_1}{\omega \epsilon_1} B_e \sin(\kappa x) \quad (3.87)$$

dir. Burada çekirdek bölgesinin özdeğeri,

$$\kappa = (n_1^2 k_0^2 - \beta^2)^{1/2} \quad (3.88)$$

dir. Kılıf bölgesinde, $|x| \geq d$ için,

$$H_y = \frac{x}{|x|} B_e \cos(\kappa d) \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (3.89)$$

$$E_x = \frac{\beta}{\omega \epsilon_2} \frac{x}{|x|} [B_e \cos(\kappa d)] \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (3.90)$$

$$E_z = \left(\frac{j\gamma}{\omega \epsilon_2} \right) (B_e \cos(\kappa d)) \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (3.91)$$

dir. Burada kılıf bölgesinin özdeğeri,

$$\gamma = \left(\beta^2 - n_2^2 k_0^2 \right)^{1/2} \quad (3.92)$$

dir. TM tek modları için karakteristik denklem,

$$\tan(\kappa d) = -\frac{n_2^2}{n_1^2} \left(\frac{\kappa}{\gamma} \right) \quad (3.93)$$

yapısında olur.

3.6.2.2 Dielektrik Slab Dalga Kılavuzunda Çift TM Modları

Çekirdek bölgesinde, $|x| \leq d$ için,

$$H_y = B_0 \sin(\kappa x) \quad (3.94)$$

$$E_x = \frac{\beta}{\omega \epsilon_1} B_0 \sin(\kappa x) \quad (3.95)$$

$$E_z = \frac{-j\kappa}{\omega \epsilon_1} B_0 \cos(\kappa x) \quad (3.96)$$

ve kılıf bölgesinde, $|x| \geq d$ için,

$$H_y = B_0 \sin(\kappa d) \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (3.98)$$

$$E_x = \left(\frac{\beta}{\omega \epsilon_2} \right) (B_0 \sin(\kappa d)) \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (3.99)$$

$$E_z = \frac{x}{|x|} \frac{j\gamma}{\omega \epsilon_2} [B_0 \sin(\kappa d)] \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (3.100)$$

dir. çift TM modları için karakteristik denklem,

$$\tan(\kappa d) = \frac{n_1^2}{n_2^2} \left(\frac{\gamma}{\kappa} \right) \quad (3.101)$$

formunda bulunur. TE ve TM modları, düzlemsel yapıdaki katmanlı dalga kılavuzundaki kılavuzlanmış modların durumunu belirler. Bir dielektrik slab dalga kılavuzundaki modlar, sonlu sayıda kılavuzlanmış mod ve sonsuz sayıda radyasyon modunu içerir.

4. SİLİNDİRİK OPTİK FİBERLERDE MODAL ANALİZ

Silindirik bir dalga kılavuzunda $+z$ doğrultusunda propagasyon yapan elektromagnetik alanların ifadesi, Maxwell eşitlikleri ve verilen geometride sınır koşullarının birlikte uygulanması ile bulunur.

Kılavuzlanmış elektromagnetik dalganın z yönündeki değişimi, $\exp(-j\beta z)$ olduğundan her alan ifadesinde,

$$\exp(j(\omega t - \beta z)) \quad (4.1)$$

eşitliği yer alacaktır.

4.1. Basamak İndisli Silindirik Yapıda Çok Modlu Optik Fiberlerde Modal Analiz

Homojen çekirdek profiline sahip olan silindirik optik fiberleri analizinde, düzlemsel yapıda uygulanan yöntem kullanılır. Dalga kılavuzunun karakteristik denklemini elde etmek için, çekirdek ve kılıf bölgesinde dalga denklemlerinin çözümleri bulunur ve bu çözümler için çekirdek bölgesi ile kılıf bölgesi ara yüzeyindeki sınır koşulları uygulanır.

İlk olarak optik fiberin kılıfının yarıçapı b 'nin, kılıftaki alanın eksponansiyel azalması ve kılıf bölgesi ile dış ortamın ara yüzeyinde sifıra yaklaşması için gerekli uzunlukta olduğu varsayılır. Bu durumda dalga kılavuzunun karakteristik denkleminin çözümü için optik fiberin iki ortamı sınır değer problemi şeklinde düşünülebilir.

Basamak indisli optik fiberin modlarını analizi için aşağıdaki E_z ve H_z denklemleri çekirdek bölgesi ve kılıf bölgesinde çözülmelidir:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + \kappa^2 E_z = 0 \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \phi^2} + \kappa^2 H_z = 0 \quad (4.3)$$

E_z, H_z boyuna bileşenleri elde edildikten sonra E_r, E_ϕ, H_r ve H_ϕ enine bileşenlerine geçilir.

(4.2) ve (4.3) eşitlikleri aynı matematiksel forma sahip olduğundan sadece 4.2 eşitliğinin çözülmesi yeterlidir, bu eşitliğin çözümü (4.3) için de geçerli olacaktır. (4.2) eşitliğini elde etmek için silindirik simetrik optik sistem düşünülmüştür. Propagasyonun z 'ye ve zamana bağımlılığı $\exp[j(\omega t - \beta z)]$ şeklindedir.

(4.2) eşitliğinin çözümü için Değişkenlere Ayrılma Yöntemi'den E_z 'in ϕ ve r 'de bağımsız çözümleri elde edilir. Elektrik alan,

$$E_z(\phi, r) = A\Phi(\phi)F(r) \quad (4.4)$$

olarak yazılır. Optik fiber, dairesel simetriye sahip olduğundan $\Phi(\phi)$,

$$\Phi(\phi) = \exp(j\nu\phi) \quad (4.5)$$

olarak seçilir. Burada, ν (azimutal mod sayısı), pozitif veya negatif bir tam sayıdır. (4.4) ve (4.5) eşitlikleri yardımıyla elektrik alan ifadesi,

$$E_z = AF(r)\exp(j\nu\phi) \quad (4.6)$$

olur. Buradan,

$$\frac{\partial E_z}{\partial r} = A\exp(j\nu\phi)\frac{\partial F(r)}{\partial r} \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} = A\exp(j\nu\phi)\frac{\partial^2 F(r)}{\partial r^2} \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} = -A\nu^2 \exp(j\nu\phi)F(r) \quad (4.9)$$

eşitlikleri elde edilir. (4.7), (4.8) ve (4.9) eşitlikleri (4.2) ifadesinde kullanılarak, elde edilen sonuç $\frac{1}{Ae^{j\nu\phi}}$ ile genişletilerek,

$$\frac{\partial^2 F(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial F(r)}{\partial r} + \left(\kappa^2 - \frac{\nu^2}{r^2} \right) F(r) = 0 \quad (4.10)$$

ifadesi bulunur. Bessel fonksiyonlarının bir formu olan (4.10) eşitliği, Bessel diferansiyel denklemi olarak isimlendirilir. Bu ikinci dereceden diferansiyel denklemin iki bağımsız çözümü vardır. Bu fonksiyonun kökleri bulunurken elektromagnetik alanın aşağıda yer alan özelliklerine dikkat edilir:

1) Alan, optik fiberin çekirdek bölgesinde sonlu olmalıdır dolayısıyla, optik fiberin çekirdek bölgesinde geçerli olan silindirik fonksiyon $r=0$ için sonlu olmalıdır.

2) Alan, kılıf bölgesinde eksponansiyel olarak zayıflamalıdır. Kılıf bölgesi, çekirdekten ayırt edilecek kalınlıkta olmalıdır. r yarıçapı sonsuza yakınsarken E_z ve H_z değerleri de sıfıra yakınsamalıdır.

4.1.1 Basamak İndisli Optik Fiberin Çekirdek ve Kılıfındaki Alanlar

Silindirik optik fiberde alan ifadelerini elde etmek için, Bessel diferansiyel denkleminin çekirdek ve kılıftaki istenilen özellikleri sağlayan çözümlerinden biri seçilmelidir. 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:

$$E_z = AJ_\nu(\kappa r)\exp(j\nu\phi) \quad (4.11)$$

$$H_z = BJ_\nu(\kappa r)\exp(j\nu\phi) \quad (4.12)$$

Kılıf bölgesindeki çözümler ise yürüyen dalga özelliği gösteren ν . dereceden birinci tip, modifiye Hankel fonksiyonu $H_\nu^{(1)}(j\gamma r)$ ile ifade edilir. Çekirdeği saran kılıf bölgesinde, $\kappa = j\gamma$ olmak üzere, birinci tip modifiye Hankel fonksiyonu çözülerek elde edilen alan ifadeleri,

$$E_z = CH_\nu^{(1)}(j\gamma r)\exp(j\nu\phi) \quad (4.13)$$

$$H_z = DH_\nu^{(1)}(j\gamma r)\exp(j\nu\phi) \quad (4.14)$$

şeklindedir. A , B , C ve D silindirik yapıdaki optik fiberlerde kılavuzlanan alan ifadelerinde dielektrik-dielektrik sınır koşullarına göre belirlenecek olan sabitlerdir. Çekirdek bölgesi ile kılıf bölgesinin arayüzeyinde elektrik alanın ve magnetik alanın teğetsel ve normal bileşenleri sürekli olmalıdır. E_r 'i elde etmek için dik alan bileşeninin, r ve ϕ 'e göre türevi alınır ve

$$E_r = -\frac{j}{\kappa^2} \left[\beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + \omega\mu \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right] \quad (4.15)$$

ifadesi elde edilir. Çekirdek bölgesinde $r < d$ için,

$$\frac{\partial E_z}{\partial r} = A\kappa J'_\nu(\kappa r)\exp(j\nu\phi) \quad (4.16)$$

olur. Burada,

$$J'_\nu(\kappa r) = \frac{\partial J_\nu(\kappa r)}{\partial(\kappa r)} \quad (4.17)$$

dir. Aynı bölgede,

$$\frac{\partial H_z}{\partial r} = B\kappa J'_\nu(\kappa r) \exp(j\nu\phi) \quad (4.18)$$

dir. (4.16) ve (4.18) ifadeleri (4.15) eşitliğinde kullanılarak,

$$E_r = -\frac{j}{\kappa^2} \left[A\beta\kappa J'_\nu(\kappa r) + (j\omega\mu_0) \frac{\nu}{r} B J_\nu(\kappa r) \right] \exp(j\nu\phi) \quad (4.14)$$

eşitliği bulunur. Benzer şekilde işlemler yardımıyla,

$$E_\phi = -\frac{j}{\kappa^2} \left[j\beta \frac{\nu}{r} A J_\nu(\kappa r) + \kappa\omega\mu_0\beta J'_\nu(\kappa r) \right] \exp(j\nu\phi) \quad (4.20)$$

$$H_r = -\frac{j}{\kappa^2} \left[-j\omega\epsilon_1 \frac{\nu}{r} A J_\nu(\kappa r) + \kappa\beta B J'_\nu(\kappa r) \right] \exp(j\nu\phi) \quad (4.21)$$

$$H_\phi = -\frac{j}{\kappa^2} \left[\kappa\omega\epsilon_1 A J'_\nu(\kappa r) + j\beta \frac{\nu}{r} B J_\nu(\kappa r) \right] \exp(j\nu\phi) \quad (4.22)$$

eşitliklerine ulaşılır. Burada,

$$(k_1)^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_1 \quad (4.23)$$

olmak üzere,

$$\kappa^2 = (k_1)^2 - \beta^2 \quad (4.24)$$

olarak tanımlıdır.

Optik fiberin kılıf bölgesindeki alanların çözümleri için, (4.13) ve (4.14) eşitliklerinin r ve ϕ 'e göre türevleri alınır. Bu bölgede, $r > d$ için,

$$E_r = -\frac{1}{\gamma^2} \left[\beta\gamma C H_\nu^{(1)'}(j\gamma r) + \omega\mu_0 \frac{\nu}{r} D H_\nu^{(1)}(j\gamma r) \right] \exp(j\nu\phi) \quad (4.25)$$

$$E_\phi = -\frac{1}{\gamma^2} \left[\beta \frac{\nu}{r} C H_\nu^{(1)}(j\gamma r) + \omega\mu_0 \frac{\nu}{r} D H_\nu^{(1)'}(j\gamma r) \right] \exp(j\nu\phi) \quad (4.26)$$

$$H_r = -\frac{1}{\gamma^2} \left[-\omega \epsilon_2 \frac{\nu}{r} C H_\nu^{(1)}(j\gamma r) + \gamma \beta D H_\nu^{(1)'}(j\gamma r) \right] \exp(j\nu\phi) \quad (4.27)$$

$$H_\phi = -\frac{1}{\gamma^2} \left[-\gamma \omega \epsilon_2 C H_\nu^{(1)'}(j\gamma r) + D \beta \frac{\nu}{r} H_\nu^{(1)}(j\gamma r) \right] \exp(j\nu\phi) \quad (4.28)$$

eşitlikleri bulunur. Burada,

$$\frac{\partial H_\nu^{(1)}(j\nu r)}{\partial(j\nu r)} = H_\nu^{(1)'}(j\nu r) \quad (4.29)$$

$$(k_2)^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_2 \quad (4.30)$$

olmak üzere,

$$\gamma^2 = \beta^2 - (k_2)^2 \quad (4.31)$$

dir.

A , B , C , D ve β sabitleri, elektrik ve magnetik alanın $r=d$ çekirdekbölgesi ile kılıf bölgesi ara yüzeyinde iki dik olmayan bileşen için sınır koşullarının uygulanmasıyla bulunur.

4.1.2 Basamak İndisli Optik Fiber İçin Sınır Koşulları ve Karakteristik Denklemleri

Silindirik yapıda ve d yarıçaplı optik dalga kılavuzunda çekirdek kılıf arayüzeyinde sınır koşulları sağlanmalı, başka bir ifade ile

$$\left. \begin{aligned} E_{z_1} &= E_{z_2} \\ E_{\phi_1} &= E_{\phi_2} \\ H_{z_1} &= H_{z_2} \\ H_{\phi_1} &= H_{\phi_2} \end{aligned} \right\} r = d \text{ için,}$$

olmalıdır. Burada, birinci ortam çekirdek bölgesini, ikinci ortam ise kılıf bölgesini temsil eder. Bu koşullar, bilinmeyen A , B , C ve D 'yi bulmak için denklemlere uygulanır. Bu dört sabiti içeren denklemlerin oluşturduğu matrisin determinantı sıfırdır.

Sınır koşullarına göre, (4.11) ve (4.13) eşitlikleri ile,

$$J\nu(\kappa d)A - H_\nu^{(1)}(j\gamma d)C = 0 \quad (4.32)$$

eşitliği elde edilir ve (4.20) ve (4.26) eşitlikleri ile,

$$\left(\frac{\beta}{\kappa^2} \frac{\nu}{d}\right) J_\nu(\kappa d) A + j \frac{\omega \mu_0}{\kappa} J'_\nu(\kappa d) B + \left(\frac{\beta}{\gamma^2} \frac{\nu}{d}\right) H_\nu^{(1)}(j\gamma d) C - \frac{\omega \mu_0}{\gamma} H_\nu^{(1)'}(j\gamma d) D = 0 \quad (4.33)$$

ifadesi elde edilir. (4.12) ve (4.14) eşitlikleri ile,

$$J_\nu(\kappa d) B - H_\nu^{(1)}(j\gamma d) D = 0 \quad (4.34)$$

ifadesi, (4.22) ve (4.28) eşitlikleri ile,

$$\left(\frac{-j\omega \epsilon_1}{\kappa} \frac{\nu}{d}\right) J'_\nu(\kappa d) A + \frac{\beta}{\kappa^2} \frac{\nu}{d} J_\nu(\kappa d) B + \left(\frac{\omega \epsilon_2}{\gamma}\right) H_\nu^{(1)}(j\gamma d) C - \frac{\beta}{\gamma^2} \frac{\nu}{d} H_\nu^{(1)'}(j\gamma d) D = 0 \quad (4.35)$$

eşitliği elde edilir. (4.32), (4.33), (4.34) ve (4.35) eşitliklerinden yararlanılarak ,

$$\begin{vmatrix} J_\nu(\kappa d) & 0 & -H_\nu^{(1)}(j\gamma d) & 0 \\ \frac{\nu}{d} \frac{\beta}{\kappa^2} J_\nu(\kappa d) & \frac{j\omega \mu_0}{\kappa} & \frac{\nu}{d} \frac{\beta}{\gamma^2} H_\nu^{(1)}(j\gamma d) & \frac{-\omega \mu_0}{\gamma} H_\nu^{(1)'}(j\gamma d) \\ 0 & J_\nu(\kappa d) & 0 & -H_\nu^{(1)}(j\gamma d) \\ \frac{-j\omega \epsilon_1}{\kappa} J'_\nu(\kappa d) & \frac{\nu}{d} \frac{\beta}{\kappa^2} J_\nu(\kappa d) & \frac{\omega \epsilon_2}{\gamma} H_\nu^{(1)}(j\gamma d) & \frac{\nu \beta}{d \gamma^2} H_\nu^{(1)'}(j\gamma d) \end{vmatrix} = 0 \quad (4.36)$$

determinantına ulaşılır. Bu determinantın çözülmesi ile karakteristik denklem veya özdeğer denklemi olarak bilinen çözüm bulunur. Bu denklem, kılavuzdaki modları ve her moda ilişkin β, κ ve γ değerlerini tanımlar. Karakteristik denklem,

$$\left[\frac{\epsilon_1 d \gamma^2 J'_\nu(\kappa d)}{\epsilon_2 \kappa J_\nu(\kappa d)} + j\gamma d \frac{H_\nu^{(1)'}(j\gamma d)}{H_\nu^{(1)}(j\gamma d)} \right] \left[\frac{a \gamma^2 J'_\nu(\kappa d)}{\kappa J_\nu(\kappa d)} + j\gamma d \frac{H_\nu^{(1)'}(j\gamma d)}{H_\nu^{(1)}(j\gamma d)} \right] = \left[\nu \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} - 1 \right) \frac{\beta k_2}{\kappa^2} \right]^2 \quad (4.37)$$

olarak bulunur.

(4.32), (4.33), (4.34) ve (4.35) eşitliklerindeki bileşenler A tek bilinmeyen bileşen olacak şekilde düzenlenebilir. Sınır koşullarından faydalanılarak, katsayılar arasında,

$$C = \frac{J_\nu(\kappa d)}{H_\nu^{(1)}(j\gamma d)} A \quad (4.38)$$

$$D = \frac{J_\nu(\kappa d)}{H_\nu^{(1)}(j\gamma d)} B \quad (4.39)$$

bağıntıları elde edilir. A cinsinden B katsayısı,

$$B = \frac{j d \kappa \gamma [\varepsilon_1 \gamma J'_\nu(\kappa d) H_\nu^{(1)}(j\gamma d) + j \varepsilon_2 \kappa J_\nu(\kappa d) H_\nu^{(1)'}(j\gamma d)]}{\nu \omega (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \mu_0 \beta J_\nu(\kappa d) H_\nu^{(1)}(j\gamma d)} A \quad (4.40)$$

ya da,

$$B = j\nu \frac{\omega (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \beta J_\nu(\kappa d) H_\nu^{(1)}(j\gamma d)}{\kappa \gamma d [\gamma J'_\nu(\kappa d) H_\nu^{(1)}(j\gamma d) + j \kappa J_\nu(\kappa d) H_\nu^{(1)'}(j\gamma d)]} A \quad (4.41)$$

şeklinde ifade edilir. (4.40) ve (4.41) eşitlikleri dikkate alınarak, basamak indisli silindirik yapıdaki optik fiberlerde propagasyon yapan mod çeşitleri tanımlanabilir.

4.1.3 Basamak İndisli Optik Fiberde Mod Karakteristikleri

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. Bu durumda, ışın, optik eksene değmeden yayılır, spiral yol izleyen bu ışınlar çapraz ışınlar denir. TE ve TM modlarında ise ışın optik eksenden geçtiği için meridyenel ışın olarak adlandırılır.

$\nu = 0$ özel durumunda, sadece meridyenel ışınlar kılavuzda yayılırlar. Bu durumda (4.37) eşitliğinin sağ tarafı sıfıra eşit olur ve TE ve TM modlarını tanımlayan iki karakteristik denklem elde edilir (Snyder, 1978, 1983; Sammut, 1981; Love, 1982).

TE Modları için, $E_z = 0$ 'dır ve,

$$\left[\frac{d\gamma^2}{\kappa} \frac{J'_0(\kappa d)}{J_0(\kappa d)} + j\gamma d \frac{H_0^{(1)'}(j\gamma d)}{H_0^{(1)}(j\gamma d)} \right] = 0 \quad (4.42)$$

dır. TM Modları için, $H_z = 0$ 'dır ve,

$$\left[\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \frac{d\gamma^2}{\kappa} \frac{J'_0(\kappa d)}{J_0(\kappa d)} + j\gamma d \frac{H_0^{(1)'}(j\gamma d)}{H_0^{(1)}(j\gamma d)} \right] = 0 \quad (4.43)$$

dır. propagasyon doğrultusundaki alan bileşenleri,

$$E_z = A J_\nu(\kappa r) \exp(j\nu\phi) \quad (4.44)$$

$$H_z = BJ_\nu(\kappa r) \exp(j\nu\phi) \quad (4.45)$$

olur.

(4.42) eşitliği, TE modlarının, (4.43) eşitliği ise TM modlarının karakteristik denklemdir.

(4.42) ve (4.43) eşitlikleri, basitleştirmek için silindirik fonksiyonlar dikkate alınarak yeniden düzenlenir ve,

$$Z'_0 = -Z_1 \quad (4.46)$$

bağıntısından yararlanılır. Bu durumda, TE modları için,

$$\left[\frac{\gamma J_1(\kappa d)}{\kappa J_0(\kappa d)} + j \frac{H_1^{(1)}(j\gamma d)}{H_0^{(1)}(j\gamma d)} \right] = 0 \quad (4.47)$$

olur. TM modları için ise,

$$\left[\frac{\epsilon_1 \gamma J_1(\kappa d)}{\epsilon_2 \kappa J_0(\kappa d)} + j \frac{H_1^{(1)'}(j\gamma d)}{H_0^{(1)}(j\gamma d)} \right] = 0 \quad (4.48)$$

olur. (4.37) karakteristik eşitliği basamak indisli optik fiberde propagasyon modlarını tanımlar, $\nu \neq 0$ için genel çözüm altı alan bileşenine sahiptir ve HE ile EH hibrid modları için de propagasyon şartlarını tanımlarlar. Hibrid modlarda, yayılan modun hiçbir bileşeni sıfıra gitmez; $\nu = 0$ özel durumu için, (4.47) ve (4.48) olmak üzere TE ve TM modlarının propagasyon şartlarını belirler.

4.1.4 Mod Kesim Koşulları

Mod, optik fiberin kılıf bölgesindeki alan sönümlü alana dönüştüğü ve yok olmadığı zaman kesim koşulunu sağlar. Kılıf bölgesindeki alanın sönüm hızı γ sabitinin değerine bağlıdır. Modifiye Hankel fonksiyonunun, r 'nin büyük değerleri için geliştirilen asimptotik yaklaşımı,

$$H_\nu^{(1)}(j\gamma r) = \sqrt{\frac{2}{\pi j r}} \exp\left(-j\left(\frac{\pi\nu}{2} + \frac{\pi}{4}\right)\right) \exp(-\gamma r) \quad (4.49)$$

şeklindedir (Cherin, 1983). γ 'nın büyük değerleri için alan, çekirdek bölgesinde yoğunlaşmıştır. γ 'nın değeri küçültüldüğünde, alan, kılıfın dışındaki uzak yerlere ulaşır. $\gamma = 0$ olduğunda ise alan, kılavuzdan ayrılır. Bu durumun oluştuğu frekans, kesim frekansı olarak adlandırılır.

Kesim koşulunda,

$$\gamma = 0 = \sqrt{\beta_c^2 - k_{2c}^2} \quad (4.50)$$

dir. Dolayısıyla,

$$\beta_c^2 = k_{2c}^2 \quad (4.51)$$

dir. Kesim koşulunda çekirdek bölgesinin özdeğeri,

$$\kappa_c^2 = k_{1c}^2 - \beta_c^2 \quad (4.52)$$

dir. Bu durumda, çekirdek bölgesinde,

$$k_{1c}^2 = \omega_c^2 \mu_0 \epsilon_1 \quad (4.53)$$

ve kılıf bölgesinde,

$$k_{2c}^2 = \omega_c^2 \mu_0 \epsilon_2 \quad (4.54)$$

dir. (4.51) eşitliği (4.54) eşitliğinde yerine konularak modun kesim frekansı için,

$$\kappa_c^2 = k_{1c}^2 - k_{2c}^2 = \omega_c^2 \mu_0 (\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (4.55)$$

eşitliği elde edilir. Burada kesim frekansı,

$$\omega_c = \frac{\kappa_c}{\sqrt{\mu_0 (\epsilon_1 - \epsilon_2)}} \quad (4.56)$$

olarak bulunur. $\omega_c = 0$ için, sadece temel mod olan, HE_{11} hibrid modu mevcuttur. κ_c , optik fiberin fiziksel parametrelerinin ifadesidir ve d yarıçapı, çekirdek bölgesinin kırılma indisi, kılıf bölgesinin kırılma indisi ve kaynak dalgaboyu cinsinden,

$$\kappa_c d = \omega_c \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} d \quad (4.57)$$

olarak ifade edilir. Burada,

$$\omega_c \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (4.58)$$

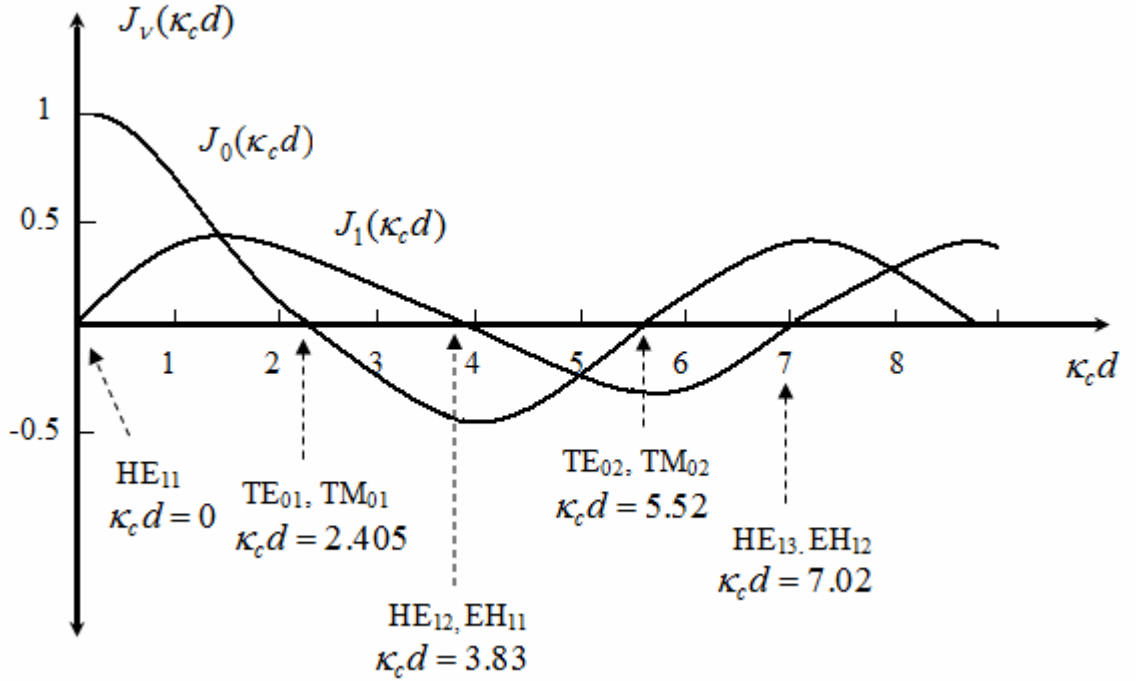
dır. Normalize frekans,

$$V \equiv \kappa_c d = \frac{2d\pi}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (4.59)$$

formundadır ve düzlemsel yapıdaki katmanlı dielektrik dalga kılavuzundaki R parametresi ile benzerlik gösterir. Basamak indisli optik dalga kılavuzu içinde yayılan modların sayısı normalize frekans ile doğru orantılıdır ve normalize frekans, V (4.59) eşitliğinde görüldüğü gibi, d yarıçapı ve n_1 kırılma indisi ile doğru orantılı olarak artarken, n_2 kırılma indisi ve dalgaboyunun artmasıyla ters orantılı olarak azalır.

Çizelge 4.1 İletilen mod sayısının optik fiberin özellikleri ile değişimi

Artan Fiziksel Parametre	İletilen Modların Sayısı
Çekirdek bölgesi yarıçapı, d	Artar
Çekirdek bölgesi kırılma indisi, n_1	Artar
Kılıf bölgesi kırılma indisi, n_2	Azalır
Çalışma dalgaboyu, λ_0	Azalır



Şekil 4.1 Modların kesim frekanslarının belirlenmesi için kullanılan Bessel fonksiyonları

Şekil 4.1’de TE, TM, EH, ve HE modlarının kesim koşulları görülmektedir (Ünverdi, 1991) Bessel fonksiyonunun $\kappa_c d$ eksenini kestiği noktalar optik dalga kılavuzunun kesim koşullarıdır.

TE ve TM modlarında $\nu = 0$ ’dır. Dolayısıyla,

$$J_0(\kappa d) = 0 \quad (4.60)$$

dır. Bu eşitlikte, Bessel fonksiyonunun 0. dereceden açılımında, fonksiyonu 0 yapan $\kappa_c d$ değerleri için TE ve TM modları kesimdedir.

Hibrid modlarında $\nu \neq 0$ ’dır. γ ifadesi sıfıra yaklaşırken iki bölümde incelenir:

$\nu = 1$ için,

$$\kappa d = 0 \quad (4.61)$$

ve

$$J_1(\kappa d) = 0 \quad (4.62)$$

koşulları altında,

$$HE_{11} : \kappa_c d = x_{11} = 0 \quad \kappa_c d = x_{11} = 0 \quad (4.63)$$

dır. Bessel fonksiyonunun birinci dereceden açılımında $\kappa_c d = 0$ için $J_1(0) = 0$ olur. Bu koşullarda, HE_{11} modu kesimdedir ve $\omega_c = 0$ için kesime girdiğinden tüm frekanslarda mevcuttur. Hibrid modlarda,

$$\left\{ \begin{matrix} HE_{1\mu} \\ EH_{1\mu} \end{matrix} \right\} \kappa_c d = x_{1\mu} \quad (4.64)$$

şeklinde ifade edilir. $\kappa_c d \neq 0$ olmak üzere, Bessel fonksiyonunun birinci dereceden açılımında, $J_1(\kappa_c d)$ değerini sıfır yapan ve μ . dereceden kök olan, $x_{1\mu} = \kappa_c d$ değerleri, $HE_{1\mu}$ ve $EH_{1\mu}$ modunun kesim koşuluna karşılık gelir.

$\nu > 0$ için,

$$\left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} + 1 \right) J_{\nu-1}(\kappa d) = \frac{\kappa d}{\nu - 1} j_{\nu}(\kappa d) \quad (4.65)$$

dir. Bu eşitlikte,

$$J_\nu(\kappa d) = 0 \quad \kappa d \neq 0 \quad \nu = 2, 3, 4, \dots \quad (4.66)$$

ve

$$\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} + 1 \right) J_{\nu-1}(\kappa d) = \frac{\kappa d}{\nu-1} j_\nu(\kappa d) \quad \nu = 2, 3, 4, \dots \quad (4.67)$$

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

$\kappa d \neq 0$ için,

$$EH_{\nu\mu} : \quad \kappa_c d = x_{\nu\mu} \quad \nu = 2, 3, 4, \dots \quad (4.68)$$

şeklindedir. (4.67) eşitliğini sağlayan $\kappa_c d$ 'nin verdiği kesim frekansı, $EH_{\nu\mu}$ modlarınıninkine karşı düşer. Modların kesim frekansları ile ilgili bilgiler Şekil 4.1 'de görülmektedir.

Çizelge 4.2'de, $\frac{n_1}{n_2} = 1.02$ $\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = 1.0404$ seçilerek, ilk birkaç alçak dereceli mod ve kesim parametre değeri listelenmiştir.

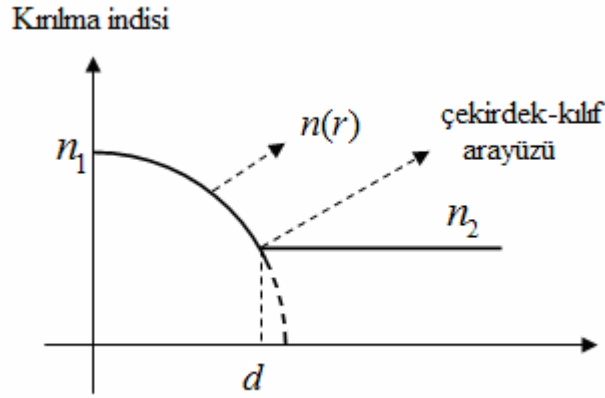
Çizelge 4.2 Modların kesim parametreleri

Mod	Kesim Parametresi $\kappa_c d$	Mod	Kesim Parametresi $\kappa_c d$
HE_{11}	0.0	EH_{31}	6.38
TE_{01}, TM_{01}	2.405	E_{51}	6.41
HE_{21}	2.42	HE_{13}, EH_{12}	7.02
HE_{12}, EH_{11}	3.83	HE_{32}	7.02
HE_{31}	3.86	HE_{41}	7.59
EH_{21}	5.14	HE_{61}	7.61
HE_{41}	5.16	EH_{22}	8.42
TE_{02}, TM_{02}	5.552	HE_{52}	8.43
HE_{22}	5.53	TE_{03}, TM_{03}	8.59

4.2 Dereceli İndisli Silindirik Yapıda Çok Modlu Optik Fiberlerde WKBJ Analizi

Kırılma indisi çekirdek bölgesi yarıçap eksenini boyunca değişen optik fiberlere dereceli indisli (yumuşak geçişli) optik fiberler denir. Kırılma indisi, optik ekseninde en büyük değeri alacak şekilde yarıçapa bağlı değişim gösterdiğinden $n(r)$ fonksiyonu ile ifade edilir. Yumuşak geçişli optik fiberler, büyük band genişliğine ve çekirdek çapına sahip olduklarından optik haberleşme sistemlerinin büyük kısmında kullanılırlar. Basamak indisli optik fiberin band genişliği modal gecikme bozulmasından dolayı sınırlandırılmıştır. Optik fiber çekirdeğinin kırılma indisi grafiğinin, yumuşak geçişli olması yayılan çeşitli mod gruplarının grup gecikmelerini eşitleyerek optik fiberin band genişliğinin artmasına olanak verir. Dalga sayısı diyagramları, optik fiberin genel yayılma karakteristiklerini örneklemek için kullanılır.

4.2.1 Yumuşak Geçişli Optik Fiber Yapısı



Şekil 4.2 Yumuşak geçişli optik fiberin kırılma indisi profili

Şekil 4.2’de yumuşak geçişli optik fiberin kırılma indisi profili görülmektedir. Düzlemsel yapıdaki katmanlı dalga kılavuzu ve basamak indisli optik fiber çalışmalarından sınır modunun faz sabiti β için,

$$n_1 k_0 \geq \beta \geq n_2 k_0 \quad (4.69)$$

olması gerekir. Dalga denkleminin $n(r)$ kırılma indisi profiline sahip silindirik yapı için çözülerek β belirlenir.

$$\frac{d^2 F(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF(r)}{dr} + \left[k^2(r) - \frac{\beta^2}{r^2} \right] F(r) = 0 \quad (4.70)$$

eşitliği kırılma indisinin r ile değiştiğini gösterecek şekilde,

$$\frac{d^2 F(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF(r)}{dr} + \left[k^2(r) - \beta^2 - \frac{\nu^2}{r^2} \right] F(r) = 0 \quad (4.71)$$

olarak yazılır. Burada,

$$k(r) = \frac{2\pi}{\lambda_0} n(r) = k_0 n(r) \quad (4.72)$$

dir. ortamın kırılma indisi ile özdeğer arasında,

$$\kappa = \left(k^2(r) - \beta^2 \right)^{1/2} \quad (4.73)$$

bağıntısı vardır.

Dalga denkleminin çözümü ile kılavuzun karakteristik denklemini elde edilir.

4.2.2 Yumuşak Geçişli Optik Fiberin WKBJ Analizi

WKBJ, konu üzerinde çalışan Gregor Wentzel, Hendrik Kramers, Léon Brillouin ve Harold Jeffries'in soyadlarının baş harflerini ifade eder. Çok modlu optik fiberler için, kırılma indisi değişimi, dalga genişliğinin oldukça küçük mesafelerinde geometrik optik yaklaşım, WKBJ Metodu ile incelenir.

Çok modlu optik fiberlerde aşağıdaki basitleştirme yaklaşımları yapılır:

1. Kırılma indisi profili dairesel simetriye sahiptir.
2. Optik fiber, dalgaboyunun elli katı veya daha fazla çekirdek çapına sahip ve çok modlu yapıya sahiptir.
3. Çekirdek bölgesindeki toplam indis değişimi küçüktür ($\Delta \ll 1$). Böylece modlar, enine elektromagnetik olarak düşünülebilir.
4. Bir dalgaboyundaki uzaklıklar boyunca indis değişimi çok küçüktür. Böylece geometrik optik koşulları uygulanabilir.

Yumuşak geçişli optik dalga kılavuzunun Değişkenlere Ayırma Metodu kullanılarak elektrik alanın z bileşeni,

$$E = AF(r) \begin{pmatrix} \cos(\nu\phi) \\ \sin(\nu\phi) \end{pmatrix} \exp(-j\beta z) \quad (4.74)$$

şeklinde yazılır. Burada $F(r)$, alanın (4.71) denklemini sağlayan radyal değişimidir. Kayıpsız kabul edilen silindirik WKBJ metodunun genel yaklaşımında, çekirdeğin kırılma indisi

dağılımı sabitse veya r ile yavaş değişiyorsa, genel çözüm $F(r)$ homojen olmayan düzlem dalgalarının süperpozisyonu olarak,

$$F(r) = \exp(jk_0 S(r)) \quad (4.75)$$

formunda yazılır. (4.75) eşitliği dikkate alınarak,

$$\frac{dF(r)}{dr} = jk_0 \exp(jk_0 S(r)) \frac{dS(r)}{dr} \quad (4.76)$$

ve

$$\frac{d^2 F(r)}{dr^2} = jk_0 \frac{d^2 S(r)}{dr^2} \exp(jk_0 S(r)) - k_0^2 \left(\frac{dS(r)}{dr} \right)^2 \exp(jk_0 S(r)) \quad (4.77)$$

eşitlikleri bulunur. (4.75), (4.76) ve (4.77) eşitlikleri (4.71) eşitliğinde kullanılarak,

$$jk_0 \frac{d^2 S(r)}{dr^2} - k_0^2 \left[\frac{dS(r)}{dr} \right]^2 + \frac{jk_0}{r} \frac{dS(r)}{dr} + \left[k^2(r) - \beta^2 - \frac{v^2}{r} \right] = 0 \quad (4.78)$$

eşitliği elde edilir.

r ile indis değişimi yumuşak bir değişim gösterdiğinde $S(r)$ bir dalgaboyunun uzaklığında yaklaşık olarak sabittir. $S(r)$, k_0^{-1} 'in terimleri olarak güç serisine açılabilir. Burada k_0^{-1} ,

serbest uzay dalgaboyu λ_0 , $\left(\lambda_0 = \frac{2\pi}{k_0} \right)$ ile orantılıdır.

Radyal doğrultudaki değişim,

$$S(r) = S_0(r) + \frac{1}{k_0} S_1(r) + \frac{1}{k_0^2} S_2(r) + \dots \quad (4.79)$$

şeklinde seriye açılır. Bu serinin ilk iki terimi kullanılarak ve (4.77) eşitliğinde yerine yazılarak türevleri bulunduğunda,

$$\frac{dS(r)}{dr} = \frac{dS_0}{dr} + \frac{1}{k_0} \frac{dS_1}{dr} \quad (4.80)$$

$$-\left(\frac{dS(r)}{dr} \right)^2 = \left(\frac{dS_0}{dr} \right)^2 + \frac{1}{k_0^2} \left(\frac{dS_1}{dr} \right)^2 + \frac{2}{k_0} \frac{dS_0}{dr} \frac{dS_1}{dr} \quad (4.81)$$

$$\frac{d^2 S(r)}{dr^2} = \frac{d^2 S_0}{dr^2} + \frac{1}{k_0} \frac{d^2 S_1}{dr^2} \quad (4.82)$$

eşitlikleri elde edilir.

(4.80), (4.81) ve (4.82) eşitlikleri kullanılarak,

$$\begin{aligned} jk_0 \frac{d^2 S_0}{dr^2} + j \frac{d^S S_1}{dr^2} - k_0^2 \left(\frac{dS_0}{dr} \right)^2 - \left(\frac{dS_1}{dr} \right)^2 - 2k_0 \frac{dS_0}{dr} \frac{dS_1}{dr} + j \frac{k_0}{r} \frac{dS_0}{dr} + j \frac{1}{r} \frac{dS_1}{dr} \\ + \left[k^2(r) - \beta^2 - \frac{v^2}{r^2} \right] = 0 \end{aligned} \quad (4.83)$$

eşitliği elde edilir ve bu eşitliğin k_0 bileşenli güçleri eşitlenirse,

$$-\left(\frac{dS_0}{dr} \right)^2 k_0^2 + \left[k^2(r) - \beta^2 - \frac{v^2}{r^2} \right] = 0 \quad (4.84)$$

$$jk_0 \frac{d^2 S_0}{dr^2} - 2k_0 \frac{dS_0}{dr} \frac{dS_1}{dr} + j \frac{k_0}{r} \frac{dS_0}{dr} = 0 \quad (4.85)$$

eşitlikleri bulunur.

Dalgaların bir yumuşak geçişli optik fiberde nasıl davrandıklarını anlamak için modların propagasyon sabitlerinin davranışları anlaşılmalıdır. (4.84) eşitliği $S_0(r)$, sıfırıncı derece WKBJ yaklaşımı için çözülürse propagasyon sabiti için gerekli bilgi sağlanır. Kılavuzdaki modların genel alan ifadesinin bulunması sırasında, $S_1(r)$ 'i elde etmek için (4.85) eşitliğinin çözümü gereklidir.

4.2.3 Yumuşak Geçişli Optik Fiberde Propagasyon Sabitleri

Yumuşak geçişli optik fiberdeki modlar hakkında bilgi elde etmek için (4.84) eşitliği $S_0(r)$ için çözülür.

$$\frac{dS_0}{dr} = \pm \frac{1}{k_0} \left[k^2(r) - \beta^2 - \frac{v^2}{r^2} \right]^{1/2} \quad (4.86)$$

(4.86) eşitliğinin r 'e göre integrali alındığında,

$$S_0(r) = \pm \frac{1}{k_0} \int \left[k^2(r) - \beta^2 - \frac{v^2}{r^2} \right]^{1/2} .dr \quad (4.87)$$

eşitliği elde edilir.

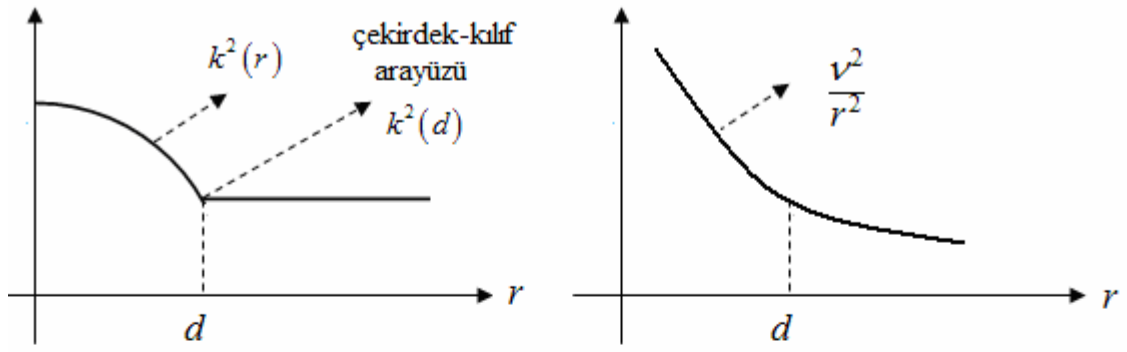
$S_0(r)$ 'de sıfırıncı derece WKBJ yaklaşımı olarak,

$$F(r) = \exp(jk_0 S_0(r)) \quad (4.88)$$

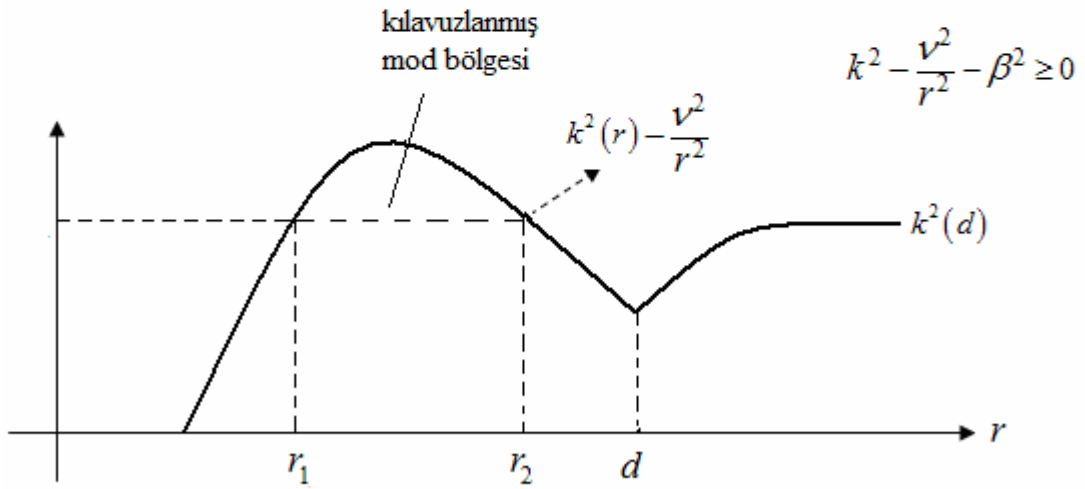
eşitliği bulunur. Bu eşitlik ile yayılan bir modun var olması için $S_0(r)$ 'nin ve (4.87) eşitliğindeki integralin reel olması ve bunun için,

$$k^2(r) - \beta^2 - \frac{v^2}{r^2} > 0 \quad (4.89)$$

eşitliğinin sağlanması gerekir. Kılavuzlanmış modların fiziksel bir yorumunun elde edilmesi için (4.89) eşitliği Şekil 4.3'de verildiği gibi grafik olarak incelenir.



(a)



(b)

Şekil 4.3 Yumuşak geçişli optik fiberler için dalga sayısı diyagramları

Şekil 4.3 (a)'da $k^2(r)$ ve $\frac{v^2}{r^2}$ ifadeleri, r 'nin fonksiyonu olarak gösterilmektedir.

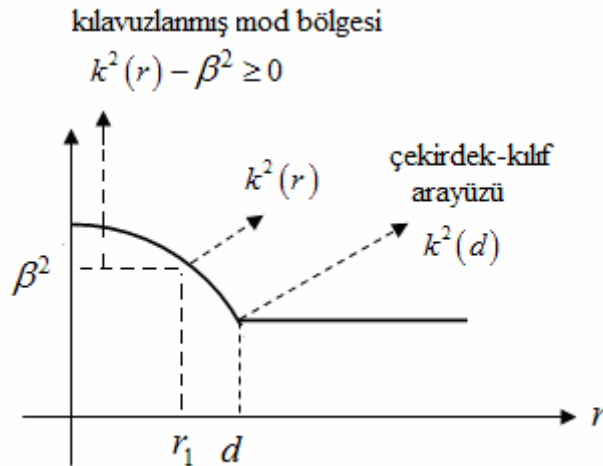
Şekil 4.3 (b)'deki eğri $\left(k^2(r) - \frac{v^2}{r^2}\right)$ ifadesini, r 'nin fonksiyonu olarak gösterir.

$$k^2(r) - \frac{v^2}{r^2} - \beta^2 = 0 \quad (4.90)$$

eşitliğinden β 'nın sabit bir değeri için r 'nin r_1 ve r_2 olmak üzere iki değeri elde edilir. Bu iki değer arasında varsayılan düzlem dalga çözümüyle ilişkilendirilmiş ışın hareket etmek için zorlanmıştır. Dönme noktası olarak adlandırılan bu iki değer dışında $S_0(r)$ imajiner olarak alanın azalmasına yol açar.

β 'nın sabit bir değeri için v arttıkça iki dönme noktası arasındaki alan daralır, v daha da artırılırsa dönme noktalarının birleştiği bir nokta elde edilir. Dalğanın propagasyon koşulları β ve v değerlerine bağlıdır. Sabit v değeri için kesimden uzaktaki modlar büyük β değerine sahiptirler ve buna karşılık daha yakın yerleşmiş dönme noktalarına sahiptirler. Genel olarak yumuşak geçişli optik fiberdeki kılavuzlanmış hibrid mod, şekil olarak iki dönme noktası arasında dönen spiraller olarak ifade edilebilir. $r < r_1$, içinde ve $r > r_2$ dışında dönüm noktalarında hibrid moda ait olan alan azalır.

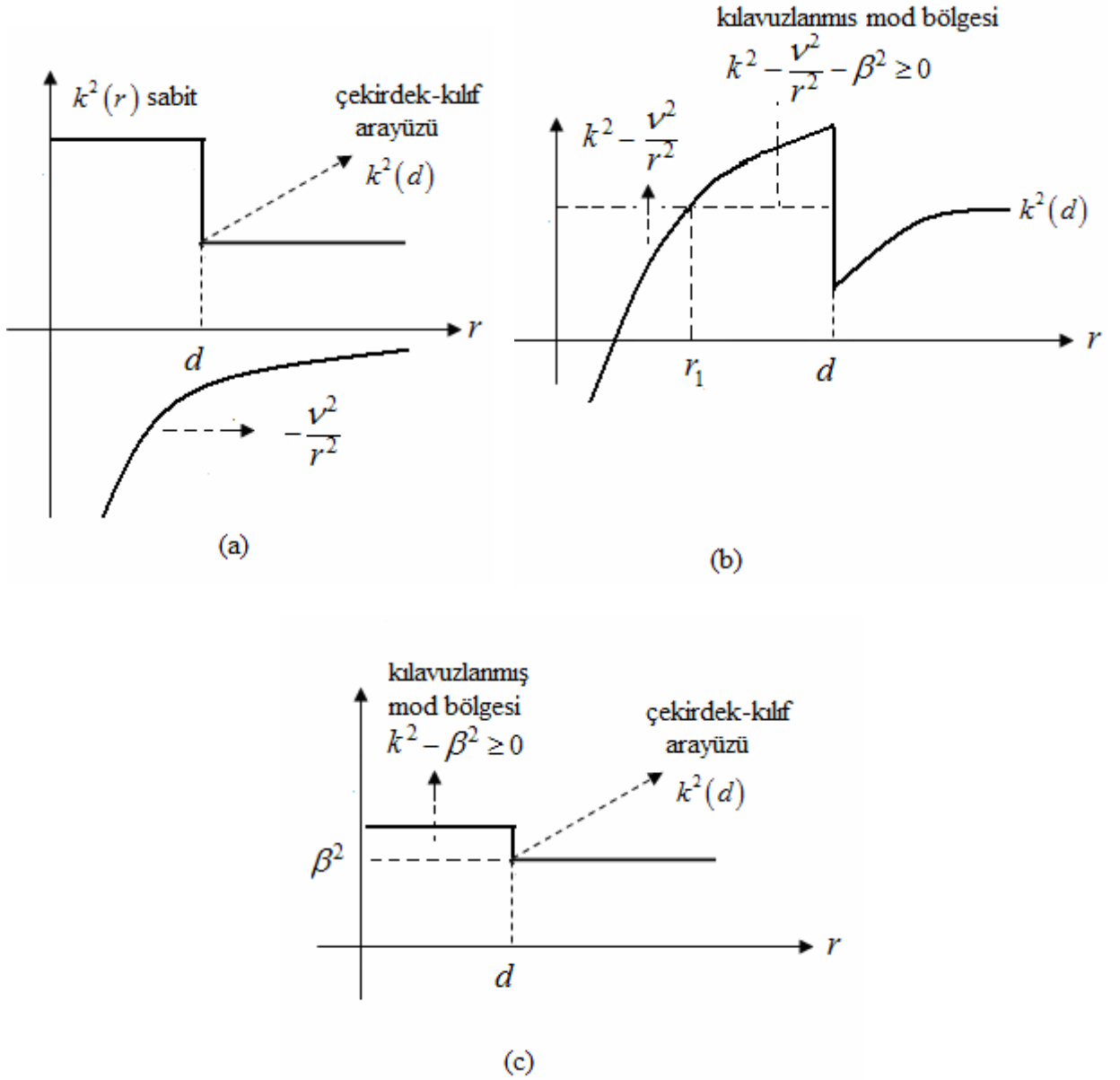
Basamak indisli optik fiberdeki TE ve TM modlarına benzer modların özel bir sınıfı $v=0$ için vardır. Bu modlar, meridyenel ışınlar, bir başka ifadeyle optik fiberin merkezinden gelen ışınlar uyarlar. Şekil 4.4 yumuşak geçişli optik fiberdeki meridyenel ışınlar için dalga sayısı diyagramını göstermektedir. Meridyenel ışınların sadece $r=r_1$ 'de dönme noktaları vardır.



Şekil 4.4 Yumuşak geçişli optik fiber için dalga sayısı diyagramı

Optik fiberdeki propagasyon yapan ışınların dalga sayısı diyagramını tamamlamak için, basamak indisli optik fiber, yumuşak geçişli optik fiberin bir özel durumu olarak düşünülür.

Şekil 4.5 (a) k^2 ve $\frac{v^2}{r^2}$ 'i basamak indisli optik fiber için r 'nin bir fonksiyonu olarak göstermektedir. Şekil 4.5 (b)'de ise basamak indisli optik fiberdeki hibrid modlar ($v \neq 0$) için dalga sayısı diyagramı yer almaktadır. Meridyenel ışınlar için, basamak indisli optik fiberde ışın yolları optik fiberin merkezinden geçer ve çekirdek bölgesi ile kılıf bölgesi arayüzüne $r=d$ 'de uzanır. Şekil 4.5 (c)'de meridyenel modlar görülmektedir.



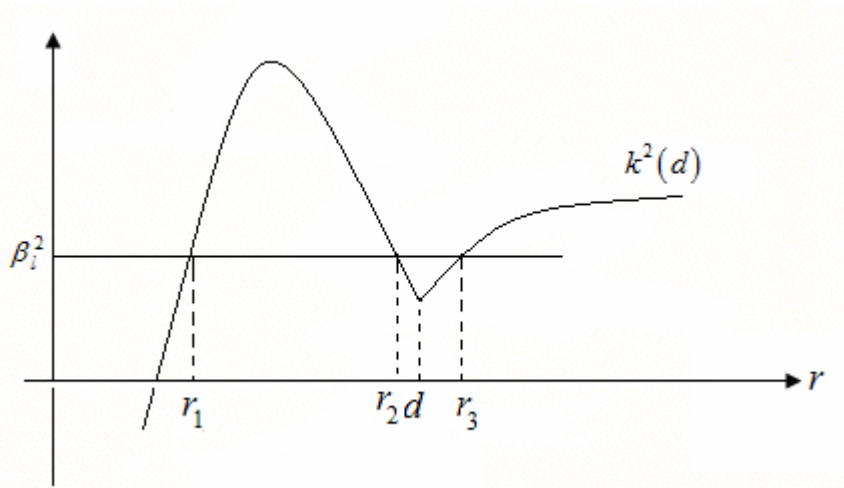
Şekil 4.5 Basamak indisli optik fiberde meridyenel modlar

4.2.4 Yumuşak Geçişli Optik Fiberlerde Sızıntılı Modlar

Yumuşak geçişli optik fiberde kılavuzlanmayan fakat bazen uzak mesafelere yayılabilen diğer bir mod türü de sızıntılı modlardır. Sızıntılı modlar, optik dalga kılavuzlarında radyasyon alanının bir kısmını temsil eder.

Şekil 4.6'daki dalga sayısı diyagramına göre, $\beta_1 < k(d)$ için $r_1 < r < r_2$ bölgesinde propagasyon çözümü vardır. Burada alan osilatör gibi davranır. $r_2 < r < r_3$ bölgesinde $S_0(r)$ reel değildir. Bu bölge, tunnel olarak adlandırılır ve bu bölgedeki alan davranışı ekponansiyel azalandır. $r > r_3$ için bir propagasyon çözümü vardır, bu bölgedeki alan osilatör davranışına yeniden başlar ve optik fiber çekirdek bölgesinden güç taşır. Şekil 4.6 kesim modunun, $\beta = n_2 k_0$ şartını sağlaması gerektiğini gösterir, çünkü $\beta < n_2 k_0$ için çekirdek bölgesinin içinde artık mükemmel bir biçimde tutulmuş kılavuzlanmış mod yoktur. Sızıntı ile kılıfta güç kaybedilir.

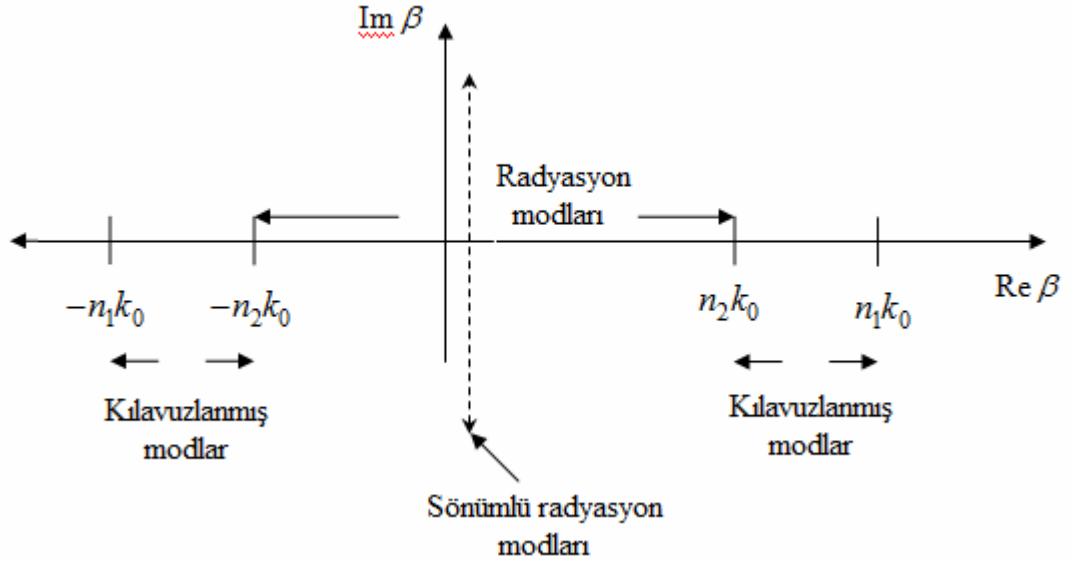
Optik fiberde bazı sızıntılı modlar tamamen zayıflamadan önce uzak mesafelere iletilebilirler. Sızıntılı modlar, bazen optik fiberin kayıp hesabı problemini karmaşıktırabilir ve özellikle transmisyon yolunda ekler varsa yayılan modu sızıntı moda dönüştürebilirler.



Şekil 4.6 Yumuşak geçişli optik fiberdeki sızıntı modları gösteren dalga sayısı diyagramı

5. OPTİK DALGA KILAVUZLARINDA RADYASYON MODLARI

Optik dalga kılavuzlarındaki toplam elektromagnetik alan, kılavuzlanmış alan ve radyasyon alanı olmak üzere iki bileşenden oluşur. Radyasyon modları, genellikle dalga kılavuzu özelliklerine sahiptirler ve silindirik simetri nedeniyle kılavuzlanmış modlarla benzer özellikler gösterirler. Ancak bu modlar, optik fiberlerden uzaklaştıkça kılavuzlanmış modlardaki alanların sönümlü olma özelliği yerine osilasyon yaparlar. Bu nedenle modal propagasyon sabitinin reel değerleri için kılavuzlanmış modlarda elde edilen özdeğer denklemi radyasyon modlarında geçerliliğini kaybeder. Modlar arasındaki farklılığın temel nedeni β faz sabitidir. Kılavuzlanmış modlar için β , $n_1 k_0 > |\beta| > n_2 k_0$ aralığında bulunmalıdır ve süreklidir, oysa propagasyon yapan radyasyon modlarında $n_2 k_0 > |\beta| > 0$ aralığında yer alır ve sürekli değildir.



Şekil 5.1 Kılavuzlanmış modlar ve radyasyon modları (Marcuse, 1972)

Zayıfça kılavuzlama yaklaşımında radyasyon modları, skaler dalga denkleminin çözümünden elde edilen ve $\beta \cong n_1 k_0 \cong n_2 k_0$ olması nedeniyle TEM moduna yaklaşan kılavuzlanmış modlardan farklı olarak, propagasyon sabitinin $n_2 k_0 > |\beta| > 0$ aralığında olması nedeniyle TEM modu özelliği göstermezler (Ünverdi, 1998; Gloge, 1971).

Bu şartlarda, optik fiberlerdeki elektromagnetik alan ifadeleri, sonlu sayıdaki kılavuzlanmış modlar ile sonsuz sayıdaki radyasyon modları göz önüne alınarak,

$$E(x, y, z) = \sum_i A_i E_i(x, y, z) + \sum_i A_{-i} E_i(x, y, z) + E_{rad}(x, y, z) \quad (5.1)$$

$$H(x, y, z) = \sum_i A_i H_i(x, y, z) + \sum_i A_{-i} H_i(x, y, z) + H_{rad}(x, y, z) \quad (5.2)$$

şeklinde yazılır. Burada A_i kılavuzlanmış modların genliğidir ve ters yönde yayılan modlar için kullanılmıştır. $A_i(Q)$ radyasyon modlarının genliği olmak üzere,

$$E_{rad}(x, y, z) = \sum_i \int_0^\infty A_i(Q) E_i(x, y, z) \exp(j\beta(Q)z) dQ \quad (5.3)$$

ve

$$H_{rad}(x, y, z) = \sum_i \int_0^\infty A_i(Q) H_i(x, y, z) \exp(j\beta(Q)z) dQ \quad (5.4)$$

olarak elde edilir.

5.1 Düzlemsel Yapıdaki Katmalı (Slab) Dalga Kılavuzlarında Radyasyon Modları

Bu bölümde, düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzlarında meydana gelen radyasyon modları çift ve tek TE ve çift ve tek TM modları incelenecektir.

5.1.1 Çift TE Radyasyon Modları

Radyasyon modlarında optik dalga kılavuzunun dışındaki alan bağıntılarının eksponansiyel olarak azalmaması, bu modlar ile kılavuzlanmış modlar arasındaki ayrılığı teşkil ettiğine göre fiziksel mekanizmanın açıklanmasında γ 'nın imajiner bir değere sahip olması yeterli değildir. γ 'nın imajiner değerleri kılavuzun dışındaki yürüyen dalgalar için geçerlidir, oysa sınır koşulları analizinde duran dalgalar yer alır. Bu durumu açıklarken β 'nin alabileceği değerlerde bir kısıtlama yapmadan geçerli olan sınır koşulları incelenmeli, bir başka ifadeyle genlik katsayıları için homojen olmayan bir eşitlik elde edilmelidir. Bunun için de kılavuzun dışında fazladan bir dalga gereklidir. Bunun için kılavuzun kılıf bölgesinde,

$$E_{y_2} = C \exp(-\gamma(|x| - d)) \quad (5.5)$$

eşitliği geçerlidir. Bu durumda (5.5) ifadesi γ 'nın imajiner değeri için yürüyen dalga sınıfına girer. Ayrıca karşıt doğrultudaki bir başka yürüyen dalga bir genlik katsayısı sağlayarak, homojen olmayan eşitlikte, sınır değer probleminin çözümünü verir.

Bu durumda $\frac{\partial}{\partial y} = 0$ koşulunda, çift TE radyasyon modları için kılavuzun $|x| < d$ bölgesinde,

$$E_{y_1} = K_{\xi} \cos(\omega x) \quad (5.6)$$

olarak bulunur. Burada, K_{ξ} , sınır koşullarına göre belirlenecek katsayı ve bu bölgenin özdeğeri ω ise,

$$\omega^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (5.7)$$

olarak bulunur. Kılavuzun $|x| > d$ bölgesinde,

$$E_{y_2} = L_{\xi} \exp(-j\xi|x|) + M_{\xi} \exp(j\xi|x|) \quad (5.8)$$

şeklindedir. Burada kullanılan L_{ξ} ve M_{ξ} katsayıları, ξ ise bu bölgenin özdeğidir. Özdeğer ifadesi,

$$\xi^2 = n_2^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (5.9)$$

şeklinde elde edilir.

Diğer alan bileşenleri Maxwell denklemleri yardımıyla belirlenir. Sınır koşullarına göre yazılan iki eşitlikte K_{ξ} , L_{ξ} ve M_{ξ} bilinmeyenleri ile sistemin çözülmesi için, katsayılardan birinin bilinmesi gerekir. Bunun için de sistem determinantı sıfıra eşit olmalıdır. Bu durumda faz sabitinin herhangi bir değeri için özdeğer denklemi elde edilemeyeceği görülmektedir. Sınır koşullarına göre katsayılar arasındaki ilişkiler,

$$L_{\xi} = \frac{K_{\xi}}{2} \exp(j\xi d) \left[\cos(\omega d) - j \frac{\omega}{\xi} \sin(\omega d) \right] \quad (5.10)$$

ve

$$M_{\xi} = L_{\xi}^* \quad (5.11)$$

şeklinde bulunur. K_{ξ} genlik katsayısı radyasyon modunda taşınan güç ile ilişkilidir. Her radyasyon modunun gücünün sonsuz olduğu düşünülerek ve modlar arasındaki diklik koşulu göz önünde bulundurularak bu katsayı,

$$K_{\xi} = \left[\frac{2\xi^2 \omega \mu_0}{\pi \beta [\xi^2 \cos^2(\omega d) + \omega^2 \sin^2(\omega d)]} P \right]^{1/2} \quad (5.12)$$

olarak elde edilir. P moda ilişkin güç ifadesidir.

5.1.2 Tek TE Radyasyon Modları

Düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzunun $|x\rangle\langle d$ ve $|x\rangle d$ bölgelerinde, elektrik alan

$$E_{y_1} = K_t \sin(\omega x) \quad (5.13)$$

ve

$$E_{y_2} = \frac{x}{|x|} \left[L_t \exp(-j\xi|x|) + M_t \exp(j\xi|x|) \right] \quad (5.14)$$

şeklindedir. Sınır koşulları ile güç bağıntısına göre, katsayılar,

$$L_t = \frac{K_t}{2} \exp(j\xi d) \left[\sin(\omega d) - j \frac{\omega}{\xi} \cos(\omega d) \right] \quad (5.15)$$

$$M_t = L_t^* \quad (5.16)$$

ve

$$K_t = \left[\frac{2\xi^2 \omega \mu_0}{\pi \beta [\xi^2 \sin^2(\omega d) + \omega^2 \cos^2(\omega d)]} P \right]^{1/2} \quad (5.17)$$

olarak ifade edilir.

5.1.3 Çift TM Radyasyon Modları

Düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzunun $|x\rangle\langle d$ ve $|x\rangle d$ bölgelerinde, magnetik alan,

$$H_{y_1} = K_{\xi} \cos(\omega x) \quad (5.18)$$

$$H_{y_2} = \left[L_{\xi} \exp(-j\xi|x|) + M_{\xi} \exp(j\xi|x|) \right] \quad (5.19)$$

şeklindedir. Sınır koşulları ile güç bağıntısına göre, katsayılar,

$$L_{\xi} = \frac{K_{\xi}}{2} \exp(j\xi d) \left[\cos(\omega d) - j \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \frac{\omega}{\xi} \sin(\omega d) \right] \quad (5.20)$$

$$M_{\xi} = L_{\xi}^* \quad (5.21)$$

$$K_{\xi} = \left[\frac{2n_1^2 \xi^2 \omega \mu_0}{\pi \beta \left[\left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \xi^2 \cos^2(\omega d) + \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \omega^2 \sin^2(\omega d) \right]} P \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.22)$$

olarak ifade edilir.

5.1.4 Tek TM Radyasyon Modları

Düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzunun $|x\rangle\langle d$ ve $|x\rangle d$ bölgelerinde, magnetik alan,

$$H_{y_1} = K_t \sin(\omega x) \quad (5.23)$$

ve

$$H_{y_2} = \frac{x}{|x|} \left[L_t \exp(-j\xi|x|) + M_t \exp(j\xi|x|) \right] \quad (5.24)$$

şeklindedir. Sınır koşulları ile güç bağıntısına göre, katsayılar,

$$L_t = \frac{K_t}{2} \exp(j\xi d) \left[\sin(\omega d) - j \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \frac{\omega}{\xi} \cos(\omega d) \right] \quad (5.20)$$

$$M_t = L_t^* \quad (5.25)$$

$$K_t = \left[\frac{2n_1^2 \xi^2 \omega \mu_0}{\pi \beta \left[\left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \xi^2 \sin^2(\omega d) + \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \omega^2 \cos^2(\omega d) \right]} P \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.26)$$

olarak ifade edilir.

6. DİELEKTRİK DALGA KILAVUZLARI ARASINDAKİ KUPLAJ

İki dalga, birinden diğerine gücün tamamı iletilecek şekilde verimli olarak ilişkilendirilebilir. Bu ilişkilendirme türü, çekirdek bölgesi ile kılıf bölgesi ara yüzeyinin sinüsoidal kusurluluğu veya kırılma indisinin sinüsoidal değişimi nedeniyle oluşur. Farklı dalga kılavuzları arasındaki kuplaj dalga kılavuzu geometrisindeki kusurlardan veya dalga kılavuzunun dielektrik ortamının homojen olmamasına bağlı olarak meydana gelebilir. Dalga kılavuzlarının birisindeki güç, kusurluluktan dolayı saçılır ve kılavuzun çevresindeki alana yayılır. Bu alana mükemmel dalga kılavuzu yerleştirilirse, dalga, bu kılavuza nüfuz eder ve buradan yansır. Güç, ikinci dalga kılavuzunun kılavuzlanmış modlarının hiçbirisiyle ilişkilenebilir. Ancak, ikinci dalga kılavuzu da kusurlu ise radyasyon gücünün bir kısmı kılavuzlanmış modlarına saçılabilir. Bu olay saçılma ilişkisi olarak adlandırılır. Bu mekanizmada tamamen bir güç değişimi söz konusu olmaz.

İki dielektrik dalga kılavuzu mükemmel ise farklı bir mekanizma ile güçlerini aktarabilirler. Dalga kılavuzunu ekseninin enine doğrultusunda kılavuzlanan modların elektromagnetik alanı eksponansiyel olarak azalır. İki dalga kılavuzunun arasındaki uzaklık çalışma dalga boyundan çok küçük olacak şekilde yan yana yerleştirilirse, bir kılavuzdaki gücün bir kısmı diğer kılavuza ulaşır. İkinci kılavuzun varlığı, ilk kılavuzun kılavuzlanmış modunun alanını bozar. Bu bozuk alan, her kılavuzun alan moduna ek küçük bir alanın süperpozisyonu olarak ifade edilebilir. İkinci kılavuzun mod alanı ilk kılavuzun alanının bozulmasını açıklamakta gerekli olduğundan iki modun birbirini etkilemesi açıktır. Tüm gücün transferi böyle bir kuplaj mekanizması ile mümkündür. Sadece kuplajın olmadığı durumda her iki kılavuzun faz hızlarının aynı olması gerekir. Farklı faz hızlarına sahip modlar verimli olarak birbirlerini etkileyemezler ve sadece çok az bir güç aktarılabilir.

6.1 Kuplaj Mod Teorisi

Kuplaj Mod Teorisi, birbirine kuplaj olan elemanlardan oluşan sistemlerin analizinde kullanılan ve yaklaşık sonuçlar veren bir metottur. (Cheo,1990) Bu teoride, kuplaj sistemin iki elemandan oluştuğu varsayılarak incelemeler yapılır.

Modlar arası kuplaj mekanizması

1. Modların uzay domeninde kuplajı,
2. Modların zaman domeninde kuplajı,
3. Modların frekans domeninde kuplajı,

olmak üzere üç alt başlıkta incelenir.

6.1.1 Modların Uzay Domeninde Kuplajı

Propagasyon sabitleri β_1 ve β_2 olan ve $+z$ yönünde ilerleyen iki modun zamana göre değişimleri $\exp(j\omega t)$ olmak üzere bu modların genlik fonksiyonları, a_0 genliği ifade etmek üzere,

$$a_1(z) = a_0 \exp(-j\beta_1 z) \quad (6.1)$$

ve

$$a_2(z) = a_0 \exp(-j\beta_2 z) \quad (6.2)$$

şeklinde ifade edilir. Bu modlar, aynı özelliklere sahiptir, ancak faz sabitleri farklıdır.

Buradaki ifadelerden faydalanılarak z yönündeki değişim, ifadenin türevi alınarak bulunur,

$$\frac{da_1}{dz} = -j\beta_1 a_1 \quad (6.3)$$

ve

$$\frac{da_2}{dz} = -j\beta_2 a_2 \quad (6.4)$$

olur. Bu iki eşitlik iki optik fiber için tek tek yazılmıştır, bir başka deyişle birbirlerinden etkilenmedikleri durumlar için bu ifadeler geçerlidir. İki dalga kılavuzu birbirlerini etkileyecek kadar yakın yerleştirildiklerinde, (6.3) ve (6.4) eşitlikleri geçerliliklerini yitirirler,

$$\frac{da_1}{dz} = -j\beta_1 a_1 + c_{12} a_2 \quad (6.5)$$

ve

$$\frac{da_2}{dz} = -j\beta_2 a_2 + c_{21} a_1 \quad (6.6)$$

formunda kuple denklemler olarak kullanılırlar. Bu denklemlerde, yeni kavramlar söz konusudur, bunlar kuplaj katsayılarıdır:

c_{11} : Birinci optik fiber için öz kuplaj katsayısıdır ve $c_{11} = -j\beta_1$ şeklinde ifade edilir.

c_{12} : Birim uzunlukta ikinci optik fiberin birinci optik fiber üzerindeki etkisini ifade eden kuplaj katsayısıdır.

c_{21} : Birim uzunlukta birinci optik fiberin ikinci optik fiber üzerindeki etkisini ifade eden kuplaj katsayısıdır.

c_{22} : İkinci optik fiber için öz kuplaj katsayısıdır $c_{22} = -j\beta_2$ şeklinde ifade edilir.

Zayıf kuplaj koşulu ile c_{12} ve c_{21} , β_1 ve β_2 değerlerine oranla çok küçüktür ve yayılım doğrultusu olan z 'den bağımsızdır (Marcuse, 1974). Özdeş fiberlerin karşılıklı etkileşiminde $\beta_1 \cong \beta_2$ kabul edilir.

İkiden fazla modun kuplajı için genel kuple denklemi,

$$\frac{da_i}{dz} = -j\beta_i a_i + \sum_{i \neq k}^n c_{ik} a_k \quad (6.7)$$

şeklinde yazılır.

Kayıpsız optik dalga kılavuzunda,

$$|a_1(z)|^2 = 1 - |a_2(z)|^2 \quad (6.8)$$

ve

$$|a_2(z)|^2 = F_{12} \sin^2 \left(\frac{|c_{12}|}{(F_{12})^{1/2}} z \right) \quad (6.9)$$

olarak ifade edilir. Burada, F_{12} transfer faktörüdür ve,

$$F_{12} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\beta_1 - \beta_2}{2|c_{12}|} \right)^2} \quad (6.10)$$

şeklindedir. Eşitlik yorumlandığında, modlar arasındaki maksimum güç transferinin faz sabitlerinin eşit olduğu durumda gerçekleştiği görülmektedir. $F_{12} = 1$ olduğu durumda, kuplaj etkisinin çok küçük olduğundan söz edilir.

Kuple mod yaklaşımına göre modlar arası güç korunumu,

$$\frac{dP}{dz} = 0 \quad (6.11)$$

şeklindedir. Kuplaj katsayıları arasındaki ilişkiyi bulmak için,

$$\frac{d \left[|a_1(z)|^2 + |a_2(z)|^2 \right]}{dz} = 2 \operatorname{Re} \left[(c_{12} + c_{21}^*) a_1^* a_2 \right] \quad (6.12)$$

ifadesi kullanılır.

Bahsedilen her iki modun grup hızları aynı doğrultuda ise,

$$c_{12} = -c_{21}^* \quad (6.13)$$

grup hızları farklı doğrultuda ise,

$$c_{12} = c_{21}^* \quad (6.14)$$

bağıntıları vardır.

6.1.2 Modların Zaman Domeninde Kuplajı

Optik dalga kılavuzlarında, zamana göre değişimleri $\exp(j\omega_1 t)$ ve $\exp(j\omega_2 t)$ olan a_1 ve a_2 modları için,

$$\frac{da_1}{dt} = j\omega_1 a_1 \quad (6.15)$$

ve

$$\frac{da_2}{dt} = j\omega_2 a_2 \quad (6.16)$$

olarak ifade edilir.

Zaman domeninde a_1 modunun faz kayması $\omega_1 dt$, a_2 modunun faz kayması ise $\omega_2 dt$ olmak üzere kuplaj koşulunda a_2 modunun enerjisinin bir kısmı a_1 moduna kuple olurken, a_1 modunun enerjisinin bir kısmı da a_2 moduna kuple olur.

Kayıpsız ortam ve zayıf kuplaj koşulunda, (6.15) ve (6.16) eşitlikleri,

$$\frac{da_1}{dt} = j\omega_1 a_1 + c_{12} a_2 \quad (6.17)$$

$$\frac{da_2}{dt} = j\omega_2 a_2 + c_{21} a_1 \quad (6.18)$$

şeklindedir. Burada,

c_{11} : Birinci optik fiber için öz kuplaj katsayısıdır ve $c_{11} = j\omega_1$ şeklinde ifade edilir.

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} : İkinci optik fiber için öz kuplaj katsayısıdır ve $c_{22} = j\omega_2$ 'dir.

Maksimum kuplaj $\omega_1 = \omega_2$ koşulunda gerçekleşir. İki den fazla modun kuplajı için genel kuplaj denklemini,

$$\frac{da_i}{dt} = j\omega_i a_i + \sum_{i \neq k} c_{ik} a_k \quad (6.19)$$

şeklinde genelleştirilebilir. Modların fazları arasındaki ilişkide herhangi bir ön koşul yoktur.

Enerji Korunumu Yasası'na göre,

$$\frac{dW}{dt} = \frac{d \left[|a_1(t)|^2 + |a_2(t)|^2 \right]}{dt} = 0 \quad (6.20)$$

olarak hesaplanır, bu duruma göre kuplaj katsayıları arasında,

$$c_{12} = -c_{21}^* \quad (6.21)$$

bağıntısı bulunur.

6.1.3 Modların Frekans Domeninde Kuplajı

Optik dalga kılavuzlarında, zamana göre değişimleri $\exp(j\omega_1 t)$ ve $\exp(j\omega_2 t)$ olan a_1 ve a_2 modları için, $t = t_1$ ve $t = t_2$ anlarındaki değişim,

$$\frac{da_1}{d\omega} = jt_1 a_1 \quad (6.22)$$

ve

$$\frac{da_2}{d\omega} = jt_2 a_2 \quad (6.23)$$

olur. Frekans domeninde, kuplaj koşulunda a_2 modunun enerjisinin bir kısmı a_1 moduna kuplaj olurken, a_1 modunun enerjisinin bir kısmı da a_2 moduna kuplaj olur.

Kayıpsız durumda ve zayıf kuplaj koşulunda, (6.22) ve (6.23) eşitlikleri,

$$\frac{da_1}{d\omega} = jt_1a_1 + c_{12}a_2 \quad (6.24)$$

ve

$$\frac{da_2}{d\omega} = jt_2a_2 + c_{21}a_1 \quad (6.25)$$

şekline dönüşür. Burada,

c_{11} : Birinci optik fiber için öz kuplaj katsayısıdır ve $c_{11} = jt_1$ şeklinde ifade edilir.

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} : İkinci optik fiber için öz kuplaj katsayısıdır ve $c_{22} = jt_2$ 'dir.

Bu ifade ikiden fazla modun kuplajı için genelleştirilirse,

$$\frac{da_i}{d\omega} = jt_ia_i + \sum_{i \neq k} c_{ik}a_k \quad (6.26)$$

ifadesi elde edilir.

Kuplaj katsayıları arasında (6.21) bağıntısı söz konusudur.

6.2 Optik Dalga Kılavuzlarında Kuplaj Analizi

Optik dalga kılavuzları arasındaki kuplaj, iki kuplaj dalga denklemi ve kuplaj katsayısı ile ifade edilir. Kuplaj, bir kılavuzdaki alanın diğer kılavuzun civarına da etkimesinden kaynaklanır. Kuplaj teorisi, kılavuzlanma olayının olmasını sağlayan kırılma indisi dağılımına bakılmaksızın kuplaj teorisi dielektrik dalga kılavuzunun herhangi bir türü için geçerlidir. İki kılavuz ve taşıdıkları modlar, aynı olmak zorunda değildir ve kılavuzun dielektrik ortamı ve çevre ortamın kayıpları da olabilir. Gerçekleştirilmesi gereken tek şey iki modun faz sabitlerinin yaklaşık olarak aynı olmasıdır. Eğer her kılavuzda sadece bir mod varsa bu gereklilik esnektir. Ancak, farklı faz sabitlerine sahip olan modlar, sabit kuplaj katsayıları aracılığıyla verimli olarak kuplajlanmaz. İki modlu dejenere durumun eşit faz hızına sahip olması durumunda kuplaj meydana gelir.

6.2.1 Propagasyon Sabitindeki Değişim

(6.5) ve (6.6) eşitliklerindeki faz sabitlerinin aynı olduğu kabul edilirse,

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta \quad (6.27)$$

olur Bu durumda, kuple mod denklemleri,

$$\frac{da_1}{dz} = -j\beta a_1 + c_{12}a_2 \quad (6.28)$$

ve

$$\frac{da_2}{dz} = -j\beta a_2 + c_{21}a_1 \quad (6.29)$$

şeklinde yazılır. Buradan,

$$a_1 = M_1 \exp \left[\left((c_{12}c_{21})^{1/2} - j\beta \right) z \right] + M_2 \exp \left[- \left((c_{12}c_{21})^{1/2} - j\beta \right) z \right] \quad (6.30)$$

ve

$$a_2 = M_1 \left(\frac{c_{21}}{c_{12}} \right)^{1/2} \exp \left[\left((c_{12}c_{21})^{1/2} - j\beta \right) z \right] - M_2 \left(\frac{c_{21}}{c_{12}} \right)^{1/2} \exp \left[- \left((c_{12}c_{21})^{1/2} - j\beta \right) z \right] \quad (6.31)$$

olarak bulunur.

$z=0$ için, M_1 ve M_2 katsayıları,

$$M_1 = \frac{1}{2} \left[a_1(0) + \left(\frac{c_{12}}{c_{21}} \right)^{1/2} a_2(0) \right] \quad (6.32)$$

ve

$$M_2 = \frac{1}{2} \left[a_1(0) - \left(\frac{c_{12}}{c_{21}} \right)^{1/2} a_2(0) \right] \quad (6.33)$$

formunda bulunur. Kuplajın etkisiyle faz sabitinde meydana gelen değişim,

$$\Delta\beta = j(c_{12}c_{21})^{1/2} \quad (6.34)$$

şeklindedir. Bu durumda, (6.30) ve (6.31) eşitlikleri,

$$a_1(z) = \frac{1}{2} \left[\begin{array}{l} a_1(0) \{ \exp(-j\Delta\beta z) + \exp(j\Delta\beta z) \} + \\ \left(\frac{c_{12}}{c_{21}} \right)^{1/2} a_2(0) \{ \exp(-j\Delta\beta z) - \exp(j\Delta\beta z) \} \end{array} \right] \exp(-j\Delta\beta z) \quad (6.35)$$

ve

$$a_2(z) = \frac{1}{2} \left[\begin{array}{l} a_2(0) \{ \exp(-j\Delta\beta z) + \exp(j\Delta\beta z) \} + \\ \left(\frac{c_{12}}{c_{21}} \right)^{1/2} a_1(0) \{ \exp(-j\Delta\beta z) - \exp(j\Delta\beta z) \} \end{array} \right] \exp(-j\Delta\beta z) \quad (6.36)$$

şeklinde yazılır. Kuplre iki modun yeni faz sabitlerindeki değişim $\Delta\beta$, kuplajın durumuna göre farklılık gösterir. Kuplre kılavuzların kayıplı ve kayıpsız olmasına göre $\Delta\beta$ farklı değerler alır:

1. Kılavuzların her ikisi de kayıpsız ise $\Delta\beta$ reeldir. Güç korunumuna göre $a_2(0)=0$ olmalıdır. Bu durumda birinci kılavuzdaki güç z uzaklığında ikinci kılavuza aktarılır. Söz konusu olan z uzaklığı ifadesi,

$$z = \frac{\pi}{2\Delta\beta} \quad (6.37)$$

şeklindedir.

2. Kılavuzlar kayıplı ise, $\Delta\beta$ kompleks değer alır ve bu durum ek kayıplara yol açar (Yuen, 1994).

6.2.2 Kuplaj Katsayıları

Pertürbasyon Teorisi, düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzlarının ve silindirik yapıdaki optik dalga kılavuzlarının karşılıklı etkileşimlerinde kullanılır. Teorinin amacı, matematiksel ifadeleri basit formlara indirgeyerek kullanımda kolaylık sağlamaktır. Teorinin uygulandığı kuplre optik dalga kılavuzlarında alan ifadeleri,

$$E = aE_1 + bE_2 + E_0 \quad (6.38)$$

ve

$$H = aH_1 + bH_2 + H_0 \quad (6.39)$$

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

Kılavuzun kesiti üzerinde yapılan incelemede ikinci dereceden küçük terimler göz ardı edilirse aynı modların iletiildiği kuple özdeş kılavuzlarda modların propagasyon sabitlerinde görülen değişim Maxwell denklemleri yardımıyla,

$$\Delta\beta = \pm \frac{\omega\epsilon_0}{4P} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (n_2^2 - n_3^2) E_2^* E_1 dx dy \quad (6.40)$$

olarak bulunur. (6.34) ve (6.40) eşitlikleri kullanılarak propagasyon doğrultusundan bağımsız olan kuplaj katsayıları elde edilir. Faz sabitinin değişimi ve kuplaj katsayıları basit formlarda,

$$|c_{12}| = \frac{\omega\epsilon_0}{4P} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (n_1^2 - n_3^2) E_1^* E_2 dx dy \quad (6.41)$$

ve

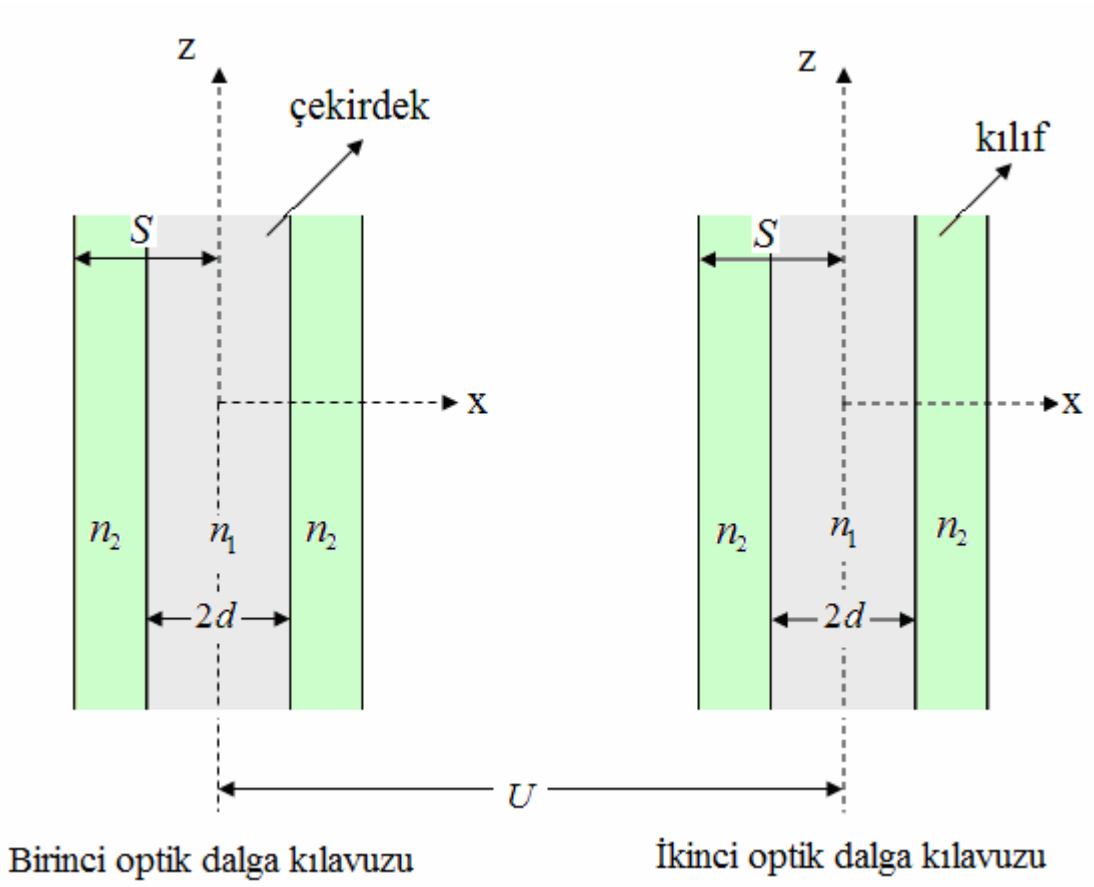
$$|c_{21}| = \frac{\omega\epsilon_0}{4P} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (n_2^2 - n_3^2) E_2^* E_1 dx dy \quad (6.42)$$

olarak ifade edilir.

6.3 Kuple Katmanlı Yapıdaki Optik Dalga Kılavuzlarında Faz Sabiti Değişiminin ve Kuplaj Katsayısının İncelenmesi

Bu bölümde düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzlarının kuplajı, kılıflı ve kılıfsız optik dalga kılavuzları için incelenmiştir.

6.3.1 Kuple Kılıflı Düzlemsel Yapıdaki Optik Dalga Kılavuzlarında Faz Sabiti Değişiminin ve Kuplaj Katsayısının İncelenmesi



Şekil 6.1 Kuple kılıflı düzlemsel yapıdaki özdeş optik dalga kılavuzları

Şekil 6.1’de kuple, kılıflı ve düzlemsel yapıdaki katmanlı paralel iki dalga kılavuzunun kuplaj mekanizmaları görülmektedir. Burada, d yarıçaplı optik dalga kılavuzlarının kılıflarıyla birlikte çekirdek çapı S ve iki çekirdek eksenleri arasındaki mesafe U ’dur. Çekirdek bölgesinin kırılma indisi n_1 ve kılıf bölgesinin kırılma indisi n_2 ’dir, y doğrultusunda uzanan ve sonsuz uzunlukta kabul edilen kılavuzların propagasyon doğrultuları z yönündedir.

6.3.1.1 Çift ve Tek TE Modları

Düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzlarındaki çift TE ve tek TE modları için elektrik alan ifadesi,

$$E_y = \begin{cases} A \begin{Bmatrix} \cos(\kappa x) \\ \sin(\kappa x) \end{Bmatrix} & ; \quad 0 \leq x \leq d \\ B e^{\gamma x} + C e^{-\gamma x} & ; \quad d \leq x < S \\ F e^{-\rho x} & ; \quad S \leq x < \infty \end{cases} \quad (6.43)$$

şeklindedir. Burada, $x < 0$ için $E_y(x)$ ' in tek fonksiyon olarak devam ettiği varsayılmıştır.

(6.43) eşitliğinde yer alan parametreler:

$$k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \quad (6.44)$$

$$\kappa = \sqrt{(n_1)^2 (k_0)^2 - \beta^2} \quad (6.45)$$

$$\gamma = \sqrt{\beta^2 - (n_2)^2 (k_0)^2} \quad (6.46)$$

ve

$$\rho = \sqrt{\beta^2 - (n_3)^2 (k_0)^2} \quad (6.47)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, n optik fiberlerin kılıflarını saran dış ortamın kırılma indisidir ve ρ da söz konusu olan dış ortamın özdeğeridir.

Sınır koşulları gereği katsayılar arasında

$$B = \frac{A}{2} \frac{\kappa}{(\kappa^2 + \gamma^2)^{1/2}} \frac{\gamma - \rho}{\gamma + \rho} \exp(-\gamma d) \exp(-2\gamma(S - d)) \quad (6.48)$$

$$C = A e^{\gamma d} \begin{Bmatrix} \cos(\kappa d) \\ \sin(\kappa d) \end{Bmatrix} \quad (6.49)$$

ve

$$F = \frac{2\kappa\gamma A}{(\gamma + \rho)(\kappa^2 + \gamma^2)^{1/2}} \exp(\rho S) \exp(-\gamma(S - d)) \quad (6.50)$$

ilişkileri vardır. Kılıf bölgesinin kalınlığı arttığında, B katsayısı sıfıra yakınsar. (6.40), (6.43) ve (6.50) eşitliklerinin yardımıyla ve $\beta = \beta_1 = \beta_2$ koşulu altında özdeş iki optik fiberde, kılavuzlanmış modların faz sabitindeki değişim,

$$|\Delta\beta| = \frac{4\kappa^2\gamma^3\rho}{\beta(1+\gamma d)(\gamma+\rho)^2(\kappa^2+\gamma^2)^{1/2}} \exp[-2\gamma(S-d)] \exp[-\rho(U-2S)] \quad (6.51)$$

olarak bulunur.

Özdeş optik fiberlerde çift TE modu için kuplaj katsayısı,

$$c_{21} = \frac{\omega\epsilon_0}{4P}(n_2^2 - n_3^2) \left[\begin{aligned} & \frac{2\omega\mu_0 Pd}{\beta(1+\gamma d)} + \frac{\omega\mu_0 P \sin(2\kappa d)}{\kappa\beta(1+\gamma d)} + \\ & \frac{2\omega\mu_0 P \cos(\kappa d)}{\gamma\beta(1+\gamma d)} (1 - \exp(2\gamma(d-S))) + \\ & \frac{4\kappa^2\gamma^2 2\omega\mu_0 P}{\beta(1+\gamma d)(\gamma+\rho)^2(\kappa^2+\gamma^2)} \frac{\exp(-2\gamma(S-d))}{\rho} \end{aligned} \right] \quad (6.52)$$

olarak bulunurken, tek TE modu için kuplaj katsayısı,

$$c_{21} = \frac{\omega\epsilon_0}{4P}(n_2^2 - n_3^2) \left[\begin{aligned} & \frac{2\omega\mu_0 Pd}{\beta(1+\gamma d)} - \frac{\omega\mu_0 P \sin(2\kappa d)}{\kappa\beta(1+\gamma d)} + \\ & \frac{2\omega\mu_0 P \sin(\kappa d)}{\gamma\beta(1+\gamma d)} (1 - \exp(2\gamma(d-S))) + \\ & \frac{4\kappa^2\gamma^2 2\omega\mu_0 P}{\beta(1+\gamma d)(\gamma+\rho)^2(\kappa^2+\gamma^2)} \frac{\exp(-2\gamma(S-d))}{\rho} \end{aligned} \right] \quad (6.53)$$

şeklinde elde edilir.

Özdeş olmayan ($\beta_1 \neq \beta_2$) iki optik fiberde β_1 ve β_2 faz sabitlerine sahip olan modlar için faz sabitinde meydana gelen değişim,

$$|\Delta\beta| = 2k_0^2 (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{\kappa_1 \kappa_2 (\gamma_1 \gamma_2)^{3/2}}{[\beta_1 \beta_2 (1 + \gamma_1 d_1)(1 + \gamma_2 d_2)]^{1/2} (\gamma_1 + \rho_1)(\gamma_2 + \rho_2)} \right. \\ \left. \frac{1}{[(\kappa_1^2 + \gamma_1^2)(\kappa_2^2 + \gamma_2^2)]^{1/2}} \exp(\rho_1 S_1 + \rho_2 S_2) \right. \\ \left. \exp[-[\gamma_1(S_1 - d_1) + \gamma_2(S_2 - d_2)]] \exp\left(-\frac{(\rho_1 + \rho_2)U}{2}\right) \right] \quad (6.54)$$

ile ifade edilir.

Özdeş olmayan fiberlerde, çift TE modu için kuplaj katsayısı,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{4\omega \mu_0 P \sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\kappa^2 \beta (1 + \gamma d_1)^{1/2} (1 + \gamma d_2)^{1/2}} + \right. \\ \left. \frac{4\omega \mu_0 P [\exp(\gamma d_2) - \exp(\gamma(d_1 + d_2 - S_1))] \cos(\kappa d_1)}{\beta (1 + \gamma d_1)^{1/2} (1 + \gamma d_2)^{1/2}} + \right. \\ \left. \frac{[\exp(\gamma d_1) - \exp(\gamma(d_1 + d_2 - S_2))] \cos(\kappa d_2)}{\gamma^2} + \right. \\ \left. \frac{16\kappa^2 \gamma^2 \omega \mu_0 P \exp(\gamma(d_1 + d_2 - S_1 - S_2))}{\rho(\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2) \beta (1 + \gamma d_1)^{1/2} (1 + \gamma d_2)^{1/2}} \right] \quad (6.55)$$

şeklinde yazılır.

Özdeş olmayan optik fiberlerde tek TE modu için kuplaj katsayısı ise,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\begin{aligned} & \frac{4\omega\mu_0 P \cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\kappa^2 \beta (1 + \gamma d_1)^{1/2} (1 + \gamma d_2)^{1/2}} + \\ & \frac{4\omega\mu_0 P [\exp(\gamma d_2) - \exp(\gamma(d_1 + d_2 - S_1))] \sin(\kappa d_1)}{\beta (1 + \gamma d_1)^{1/2} (1 + \gamma d_2)^{1/2}} + \\ & \frac{[\exp(\gamma d_1) - \exp(\gamma(d_1 + d_2 - S_2))] \cos(\kappa d_2)}{\gamma^2} + \\ & \frac{16\kappa^2 \gamma^2 \omega\mu_0 P \exp(\gamma(d_1 + d_2 - S_1 - S_2))}{\rho(\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2) \beta (1 + \gamma d_1)^{1/2} (1 + \gamma d_2)^{1/2}} \end{aligned} \right] \quad (6.56)$$

yapısındadır.

6.3.1.2 Çift ve Tek TM Modları

Magnetik alan ifadesi, çekirdek bölgesi, kılıf bölgesi ve dış ortam için,

$$H_y = \begin{cases} A_1 \begin{Bmatrix} \cos(\kappa x) \\ \sin(\kappa x) \end{Bmatrix} & ; \quad 0 \leq x \leq d \\ B_1 e^{\gamma x} + C_1 e^{-\gamma x} & ; \quad d \leq x < S \\ F_1 e^{-\rho x} & ; \quad S \leq x < \infty \end{cases} \quad (6.57)$$

şeklindedir. Katsayılar arasında,

$$A_1 = \left[\frac{2\omega\epsilon_0 n_1^2 P}{\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} \right]^{1/2} \quad (6.58)$$

$$B_1 = \frac{A_1}{2} \frac{\kappa}{(\kappa^2 + \gamma^2)^{1/2}} \frac{\gamma - \rho}{\gamma + \rho} \exp(-\gamma d) \exp(-2\gamma(S-d)) \quad (6.59)$$

$$C_1 = A_1 e^{\gamma d} \begin{Bmatrix} \cos(\kappa d) \\ \sin(\kappa d) \end{Bmatrix} \quad (6.60)$$

ve

$$F_1 = \frac{2\kappa\gamma A_1}{(\gamma + \rho)(\kappa^2 + \gamma^2)^{1/2}} \exp(\rho S) \exp(-\gamma(S-d)) \quad (6.62)$$

bağıntıları vardır.

TE modları için izlenen yol kullanılarak çift ve tek TM modlarında kılavuzlanmış, özdeş kuple optik fiberler için faz sabitindeki değişim,

$$|\Delta\beta| = \frac{n_1^2 n_2^2 \kappa^2 \gamma^2 \left[2 \exp[(\gamma - \rho)(S-d) - 1] \exp[-2\gamma(S-d)] \right] \exp(-\rho(U-2S))}{\beta \left[(n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2) \gamma d + n_1^2 n_2^2 (\kappa^2 + \gamma^2) \right]} \quad (6.61)$$

olarak bulunur.

Özdeş kuple optik fiberlerde kuplaj katsayısı çift TM modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\begin{aligned} & \frac{2\omega \epsilon_0 n_1^2 P d}{\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} + \frac{\omega \epsilon_0 n_1^2 P \sin(2\kappa d)}{\kappa \beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} \\ & \frac{2\omega \epsilon_0 n_1^2 P \cos^2(\kappa d) (1 - \exp(2\gamma(d-S)))}{\gamma \beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} + \\ & \frac{4\kappa^2 \gamma^2 \omega \epsilon_0 n_1^2 P \exp(-2\gamma(S-d))}{\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right] \rho(\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2)} \end{aligned} \right] \quad (6.62)$$

bulunur.

yapısında iken tek TM modu için kuplaj katsayısı,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\begin{aligned} & \frac{2\omega \epsilon_0 n_1^2 P d}{\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} + \frac{\omega \epsilon_0 n_1^2 P \sin(2\kappa d)}{\kappa \beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} \\ & \frac{2\omega \epsilon_0 n_1^2 P \sin^2(\kappa d) (1 - \exp(-2\gamma(d-S)))}{\gamma \beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} + \\ & \frac{4\kappa^2 \gamma^2 \omega \epsilon_0 n_1^2 P \exp(-2\gamma(S-d))}{\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right] \rho(\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2)} \end{aligned} \right] \quad (6.63)$$

şeklinde ifade edilir.

Özdeş olmayan kuple optik fiberlerde, çift TM modu için, kuplaj katsayısı,

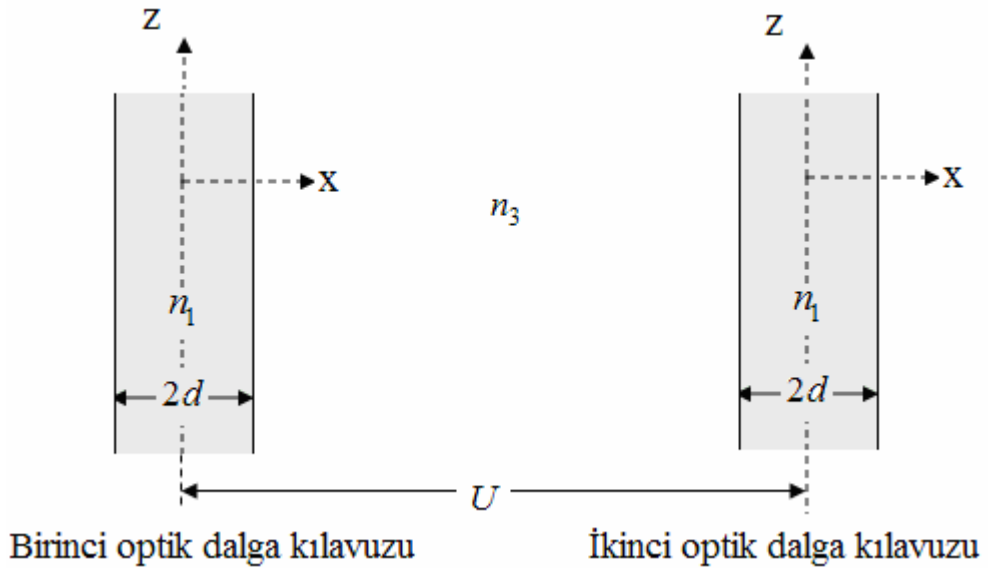
$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\begin{aligned} & \frac{4\omega \epsilon_0 n_1^2 P \sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\kappa^2 \beta \left[d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}} \left[d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}}} + \\ & \frac{4\omega \epsilon_0 n_1^2 P (e^{\gamma d_2} - e^{\gamma(d_1+d_2-S_1)}) (e^{\gamma d_1} - e^{\gamma(d_1+d_2-S_1)}) \cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\gamma^2 \beta \left[d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}} \left[d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}}} + \\ & \frac{16\kappa^2 \gamma^2 \omega \epsilon_0 n_1^2 P}{\rho \beta \left[d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}} \left[d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}}} \\ & \frac{\exp(\gamma(d_1 + d_2 - S_1 - S_2))}{(\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2)} \end{aligned} \right] \quad (6.64)$$

Özdeş olmayan kuple optik fiberlerde tek TM modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\begin{aligned} & \frac{4\omega \epsilon_0 n_1^2 P \cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\kappa^2 \beta \left[d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}} \left[d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}}} + \\ & \frac{4\omega \epsilon_0 n_1^2 P (e^{\gamma d_2} - e^{\gamma(d_1+d_2-S_1)}) (e^{\gamma d_1} - e^{\gamma(d_1+d_2-S_1)}) \sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\gamma^2 \beta \left[d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}} \left[d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}}} + \\ & \frac{16\kappa^2 \gamma^2 \omega \epsilon_0 n_1^2 P}{\rho \beta \left[d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}} \left[d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}}} \\ & \frac{\exp(\gamma(d_1 + d_2 - S_1 - S_2))}{(\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2)} \end{aligned} \right] \quad (6.65)$$

olarak elde edilir.

6.3.2 Kuple Kılıfsız Düzlemsel Yapıdaki Optik Dalga Kılavuzlarında Faz Sabiti Değişiminin ve Kuplaj Katsayısının İncelenmesi



Şekil 6.2 Kuple kılıfsız düzlemsel yapıdaki özdeş optik dalga kılavuzları

6.3.2.1 Çift ve Tek TE Modları

Optik fiberde ve optik fiberi saran dış ortamda, elektrik alan,

$$E_y = \begin{cases} A \begin{Bmatrix} \cos(\kappa x) \\ \sin(\kappa x) \end{Bmatrix} & ; \quad 0 \leq x \leq d \\ B \exp(-\gamma(|x| - d)) & ; \quad d \leq x < \infty \end{cases} \quad (6.66)$$

olarak ifade edilir. Sınır koşullarına göre katsayılar arasında,

$$B = A \begin{Bmatrix} \cos(\kappa x) \\ \sin(\kappa x) \end{Bmatrix} \quad (6.67)$$

bağıntısı bulunur. Özdeş olmayan, kılıfsız ve düzlemsel yapıdaki optik fiberlerde faz sabitinde meydana gelen değişim,

$$|\Delta\beta| = \frac{k_0^2}{2(\gamma_1 + \gamma_2)} (n_1^2 - n_2^2) \left[\frac{\gamma_1 \gamma_2}{\beta_1 \beta_2 (1 + \gamma_1 d_1)(1 + \gamma_2 d_2)} \right]^{1/2} \begin{Bmatrix} \cos(\kappa_1 d_1) \cos(\kappa_2 d_2) \\ \sin(\kappa_1 d_1) \sin(\kappa_2 d_2) \end{Bmatrix} \exp(\gamma_1 d_1) \exp(\gamma_2 d_2) \exp\left(-\left((\gamma_1 + \gamma_2) \frac{U}{2}\right)\right) \quad (6.68)$$

olarak elde edilir.

Özdeş optik fiberlerde, kuplaj katsayısı, çift TE modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{2\omega \mu_0 P d}{\beta(1 + \gamma d)} + \frac{\omega \mu_0 P \sin(2\kappa d)}{\kappa \beta(1 + \gamma d)} + \frac{\omega \mu_0 P \cos^2(\kappa d)}{\gamma \beta(1 + \gamma d)} \right] \quad (6.69)$$

ve tek TE modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{2\omega \mu_0 P d}{\beta(1 + \gamma d)} - \frac{\omega \mu_0 P \sin(2\kappa d)}{\kappa \beta(1 + \gamma d)} + \frac{\omega \mu_0 P \sin^2(\kappa d)}{\gamma \beta(1 + \gamma d)} \right] \quad (6.70)$$

şeklinde ifade edilir.

Özdeş olmayan fiberlerde çift TE modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{4\omega \mu_0 P \sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\kappa^2 \beta (1 + \gamma d_1)^{1/2} (1 + \gamma d_2)^{1/2}} + \frac{4\omega \mu_0 P \cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\gamma^2 \beta (1 + \gamma d_1)^{1/2} (1 + \gamma d_2)^{1/2}} \right] \quad (6.71)$$

ve tek TE modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{4\omega \mu_0 P \cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\kappa^2 \beta (1 + \gamma d_1)^{1/2} (1 + \gamma d_2)^{1/2}} + \frac{4\omega \mu_0 P \sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\gamma^2 \beta (1 + \gamma d_1)^{1/2} (1 + \gamma d_2)^{1/2}} \right] \quad (6.72)$$

ile ifade edilir.

6.3.2.2 Çift ve Tek TM Modları

Optik fiberde ve optik fiberi saran dış ortamda, magnetik alan,

$$H_y = \begin{cases} A_1 \begin{Bmatrix} \cos(\kappa x) \\ \sin(\kappa x) \end{Bmatrix} & ; \quad 0 \leq x \leq d \\ B_1 \exp(-\gamma(|x| - d)) & ; \quad d \leq x < \infty \end{cases} \quad (6.73)$$

Sınır koşullarına göre katsayılar arasında,

$$B_1 = A_1 \begin{Bmatrix} \cos(\kappa x) \\ \sin(\kappa x) \end{Bmatrix} \quad (6.74)$$

bağıntısı bulunmaktadır. Özdeş olmayan, kılıfsız ve düzlemsel yapıdaki optik fiberlerde faz sabitinde meydana gelen değişim,

$$|\Delta\beta| = \frac{\omega^2 \varepsilon_0^2 n_1^2 (n_1^2 - n_2^2)}{2(\gamma_1 + \gamma_2)} \left[\frac{1}{\beta_1 \beta_2 \left[d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma_1} \frac{(\kappa_1^2 + \gamma_1^2)}{n_2^4 \kappa_1^2 + n_1^4 \gamma_1^2} \right] \left[d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma_2} \frac{(\kappa_2^2 + \gamma_2^2)}{n_2^4 \kappa_2^2 + n_1^4 \gamma_2^2} \right]} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.75)$$

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

olarak ifade edilir.

Özdeş olan optik fiberlerde, kuplaj katsayısı, çift TM modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega \varepsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\begin{array}{l} \frac{2\omega \varepsilon_0 n_1^2 P d}{\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} + \frac{\omega \varepsilon_0 n_1^2 P \sin(2\kappa d)}{\kappa \beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} \\ \frac{2\omega \varepsilon_0 n_1^2 P \cos^2(\kappa d)}{\gamma \beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} \end{array} \right] \quad (6.76)$$

ve tek TM modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega \varepsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\begin{array}{l} \frac{2\omega \varepsilon_0 n_1^2 P d}{\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} - \frac{\omega \varepsilon_0 n_1^2 P \sin(2\kappa d)}{\kappa \beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} \\ \frac{2\omega \varepsilon_0 n_1^2 P \sin^2(\kappa d)}{\gamma \beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} \end{array} \right] \quad (6.77)$$

şeklindedir. Özdeş olmayan optik fiberlerde çift TM modu için kuplaj katsayısı,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{4\omega \epsilon_0 n_1^2 P \sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\left[\kappa^2 \beta \left[d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}} \beta \left[d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}}} + \frac{4\omega \epsilon_0 n_1^2 P \cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\left[\gamma^2 \beta \left[d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}} \beta \left[d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (6.78)$$

ve tek TM modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{4\omega \epsilon_0 n_1^2 P \cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\left[\kappa^2 \beta \left[d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}} \beta \left[d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}}} + \frac{4\omega \epsilon_0 n_1^2 P \sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\left[\gamma^2 \beta \left[d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}} \beta \left[d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (6.79)$$

formunda bulunur.

6.3.3 Güç Kaybı

6.3.3.1 Kuple Kılıflı Optik Fiberlerde Güç Kaybı

Kuple kılıflı optik fiberde TE modlarındaki güç kaybı,

$$2\alpha = \frac{8\kappa^2 \gamma^3 \operatorname{Im}(\rho) \exp(-2\gamma(S-d))}{\beta(1+\gamma d)(\kappa^2 + \gamma^2)(\gamma + \rho)^2} \quad (6.80)$$

iken TM modlarındaki güç kaybı,

$$2\alpha_i = 2 \operatorname{Im}(\gamma_i) \frac{1}{\beta_i \left(d_i + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma_i} \frac{\kappa_i^2 + \gamma_i^2}{n_2^4 \kappa_i^2 + n_1^4 \gamma_i^2} \right)} \left\{ \begin{array}{l} \cos^2(\kappa_i d_i) \\ \sin^2(\kappa_i d_i) \end{array} \right\} \exp(-2\gamma_i(|x| - d_i)) \quad (6.81)$$

olarak bulunur.

6.3.3.2 Kuple Kılıfsız Optik Fiberlerde Güç Kaybı

Kuple kılıfsız optik fiberde TE modlarındaki güç kaybı,

$$2\alpha_i = \frac{2\text{Im}(\gamma_i)}{\beta_i(1+\gamma_i d_i)} \left\{ \frac{\cos^2(\kappa_i d_i)}{\sin^2(\kappa_i d_i)} \right\} \exp(-2\gamma_i(|x| - d_i)) \quad (6.82)$$

iken TM modlarında güç kaybı,

$$2\alpha_i = 2\text{Im}(\gamma_i) \frac{1}{\beta_i \left(d_i + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma_i} \frac{\kappa_i^2 + \gamma_i^2}{n_2^4 \kappa_i^2 + n_1^4 \gamma_i^2} \right)} \left\{ \frac{\cos^2(\kappa_i d_i)}{\sin^2(\kappa_i d_i)} \right\} \exp(-2\gamma_i(|x| - d_i)) \quad (6.83)$$

olarak elde edilir. Bu eşitliklerde kullanılan i , kuple optik fiberleri ifade etmektedir.

7. KUPLE DALGA KILAVUZLARININ ANALİZİ

7.1 Kuple, Düzlemsel Yapıdaki, Katmanlı, Özdeş ve Özdeş Olmayan, Kılıflı ve Kılıfsız Optik Dalga Kılavuzlarında, TE ve TM Modlarının Kuplajında, Kuplaj Katsayısının, Çekirdek Bölgesi Yarıçaplarına Göre Değişiminin İncelenmesi

Kuple, düzlemsel yapılı, katmanlı, özdeş ve kılıfsız optik fiberlerin analizinde,

$$f = 200 \text{ THz}, \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ (H/m)}, k_0 = 0,42 \cdot 10^7, \epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ (F/m)},$$

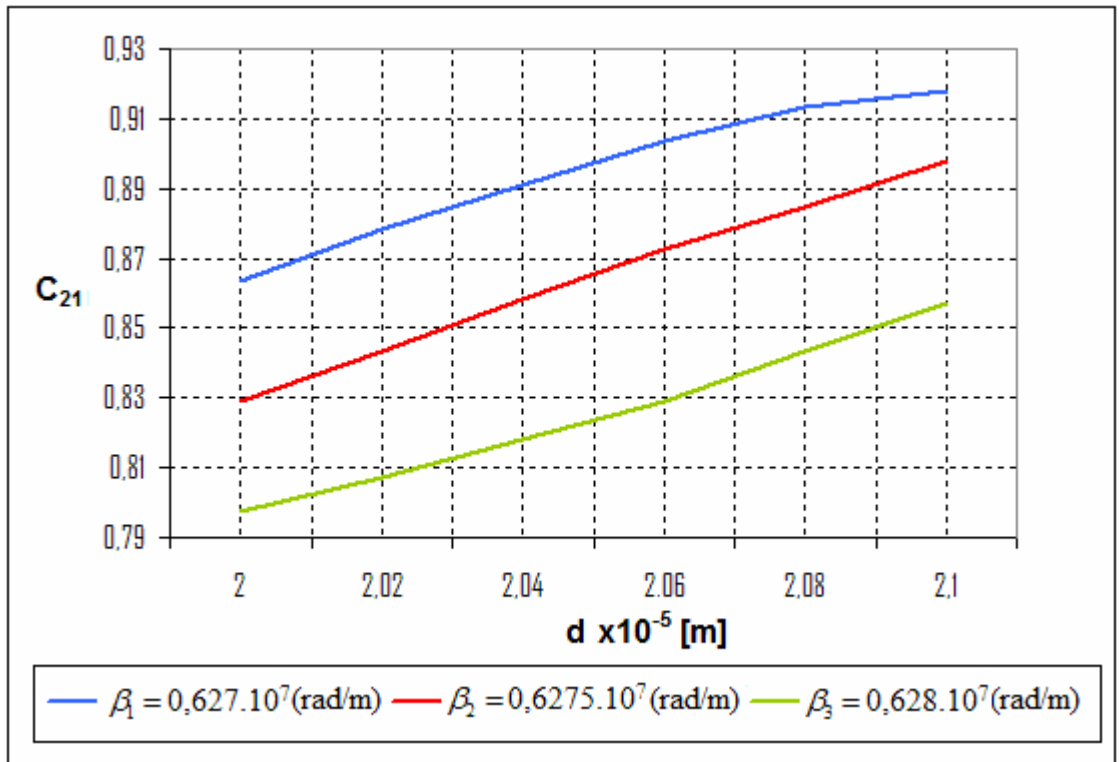
$$P = 1 \text{ mW}, n_1 = 1.5, n_2 = 1;$$

$$\beta_1 = 0,627 \cdot 10^7 \text{ (rad/m)}, \beta_2 = 0,6275 \cdot 10^7 \text{ (rad/m)}, \beta_3 = 0,628 \cdot 10^7 \text{ (rad/m)},$$

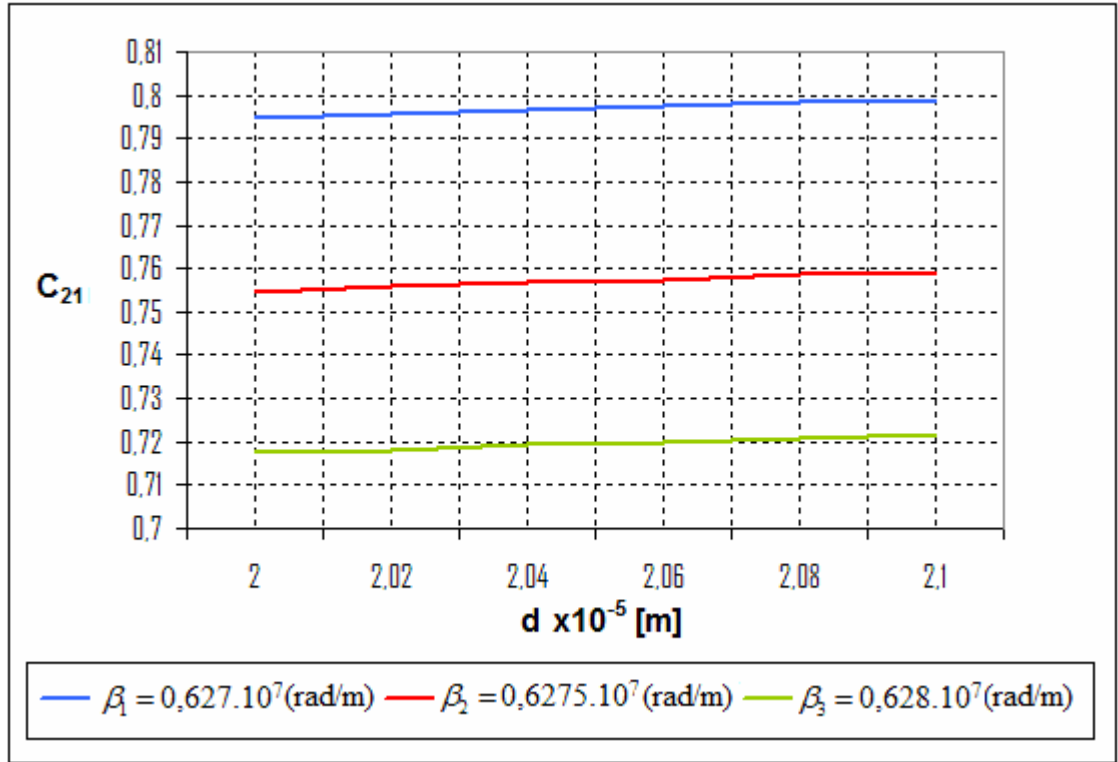
$$\kappa_1 = 0,0614 \cdot 10^7, \quad \kappa_2 = 0,0561 \cdot 10^7, \quad \kappa_3 = 0,0502 \cdot 10^7,$$

$$\gamma_1 = 0,4655 \cdot 10^7, \quad \gamma_2 = 0,4662 \cdot 10^7, \quad \gamma_3 = 0,4669 \cdot 10^7,$$

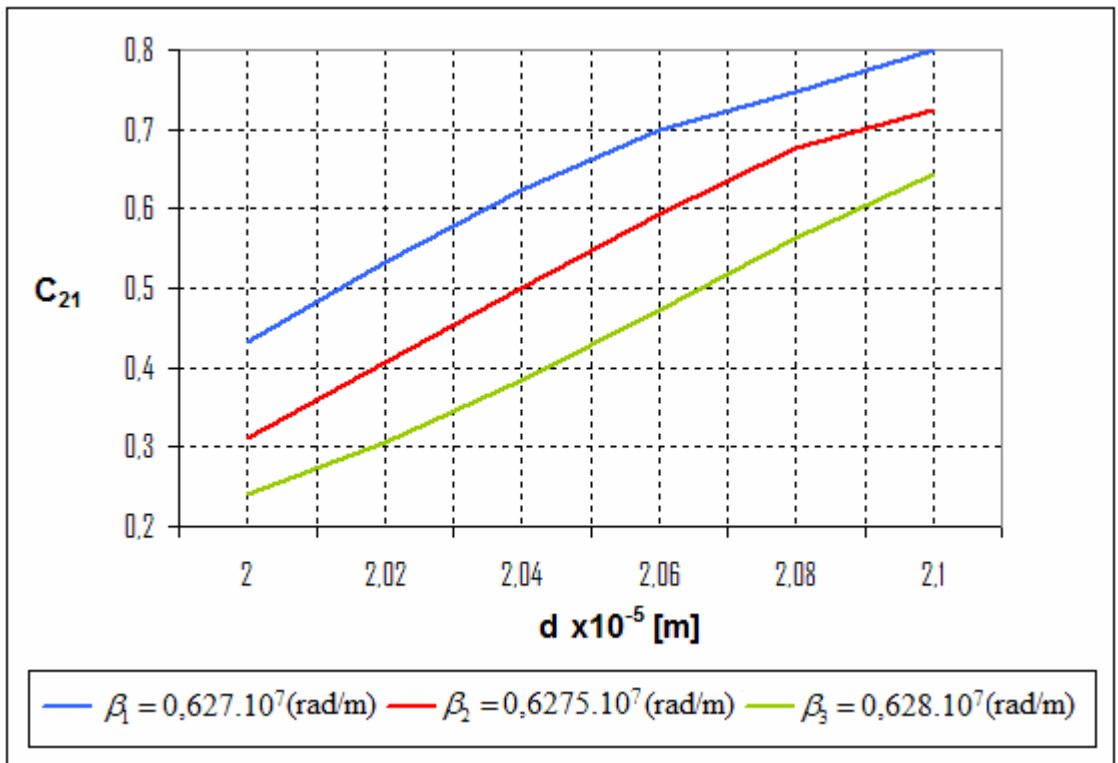
değerleri kullanılmış ve TE ve TM modlarının kuplajında, kuplaj katsayısının çekirdek bölgesinin yarıçaplarına göre değişimi incelenmiştir.



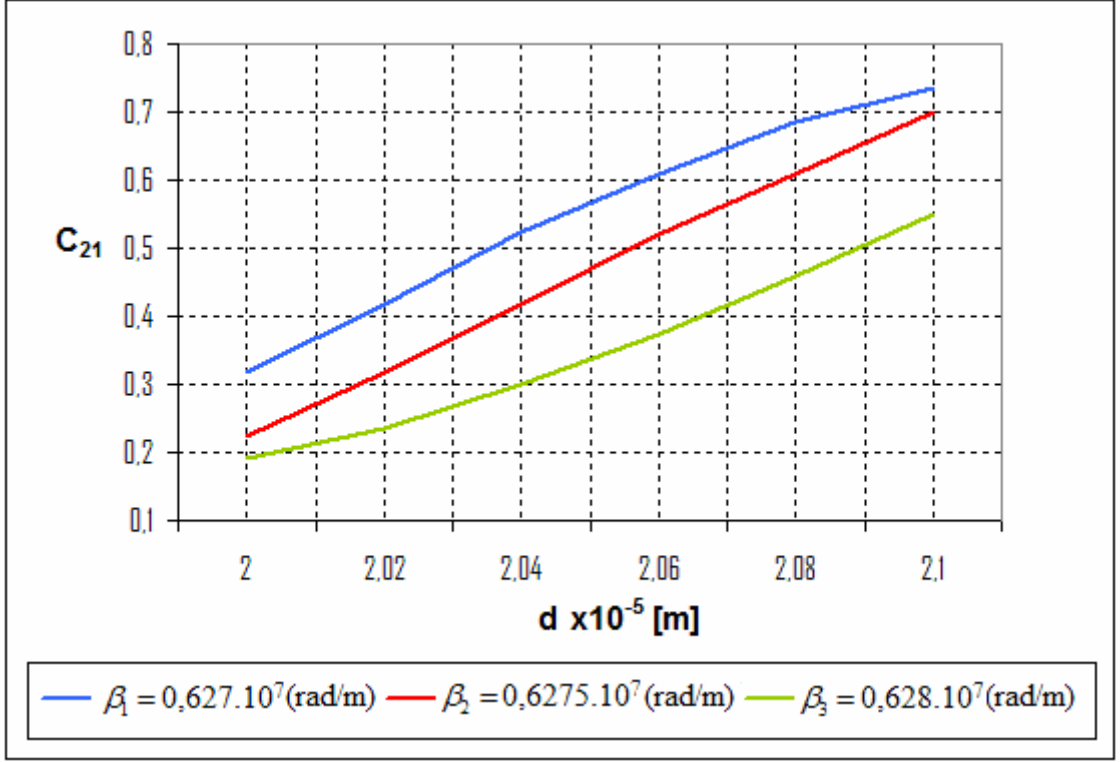
Şekil 7.1 Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıfsız optik fiberlerde, çift TE modları için, kuplaj katsayısının optik fiber yarıçapına göre değişimi



Şekil 7.2 Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıfsız optik fiberlerde, tek TE modları için, kuplaj katsayısının optik fiber yarıçapına göre değişimi



Şekil 7.3 Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıfsız optik fiberlerde, çift TM modları için, kuplaj katsayısının optik fiber yarıçapına göre değişimi



Şekil 7.4 Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıfsız optik fiberlerde, tek TM modları için, kuplaj katsayısının optik fiber yarıçapına göre değişimi

Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş olmayan ve kılıfsız optik fiberlerin analizinde,

$$f = 200 \text{ THz}, \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ (H/m)}, k_0 = 0,42 \cdot 10^7, \epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ (F/m)},$$

$$P = 1 \text{ mW}, n_1 = 1.5, n_2 = 1,$$

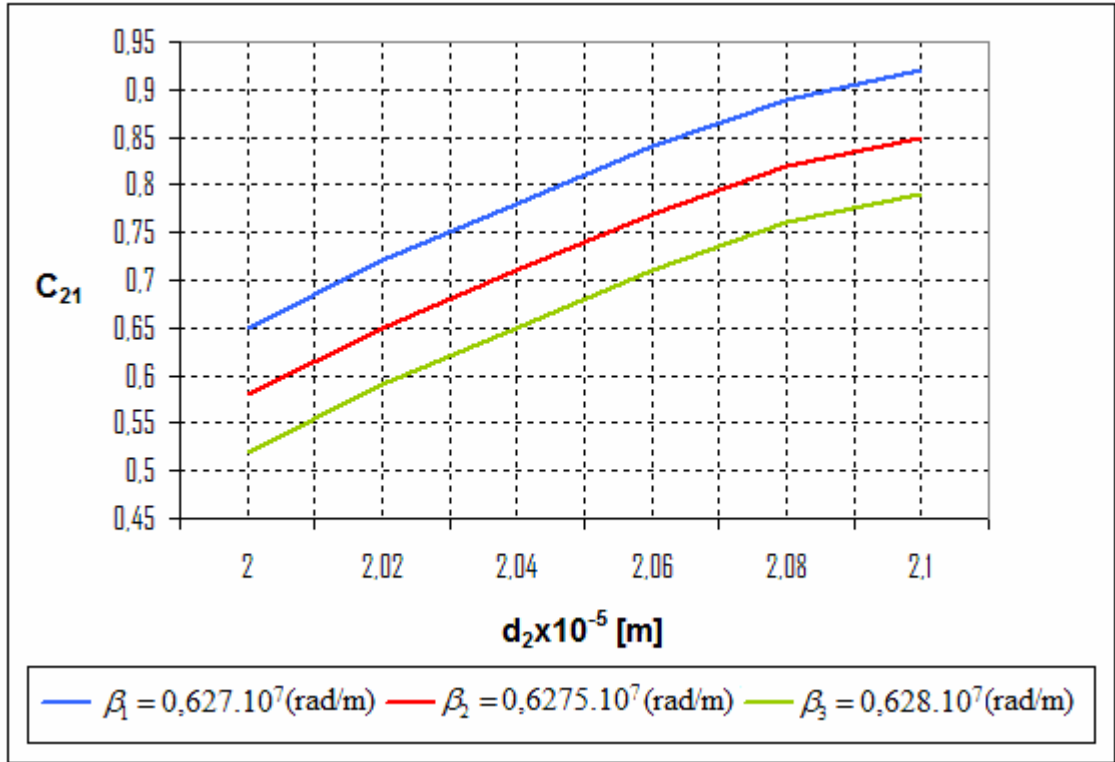
$$d_1 = 20 \mu\text{m},$$

$$\beta_1 = 0,627 \cdot 10^7 \text{ (rad/m)}, \beta_2 = 0,6275 \cdot 10^7 \text{ (rad/m)}, \beta_3 = 0,628 \cdot 10^7 \text{ (rad/m)},$$

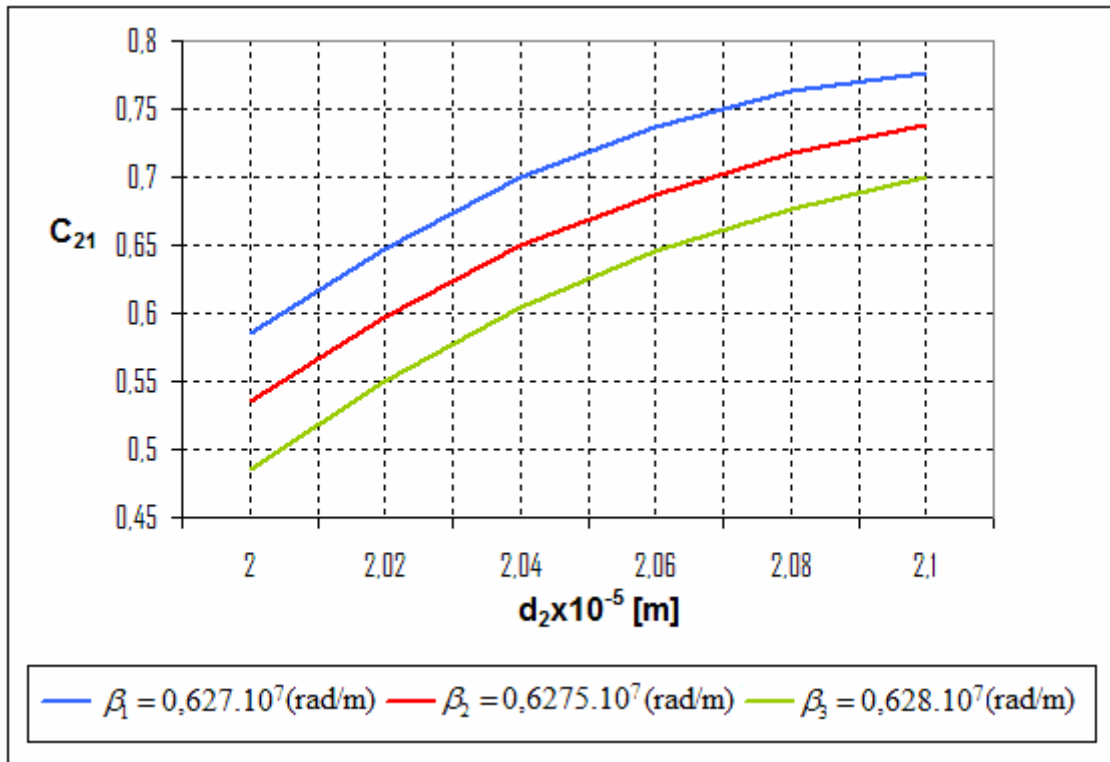
$$\kappa_1 = 0,0614 \cdot 10^7, \kappa_2 = 0,0561 \cdot 10^7, \kappa_3 = 0,0502 \cdot 10^7,$$

$$\gamma_1 = 0,4655 \cdot 10^7, \gamma_2 = 0,4662 \cdot 10^7, \gamma_3 = 0,4669 \cdot 10^7,$$

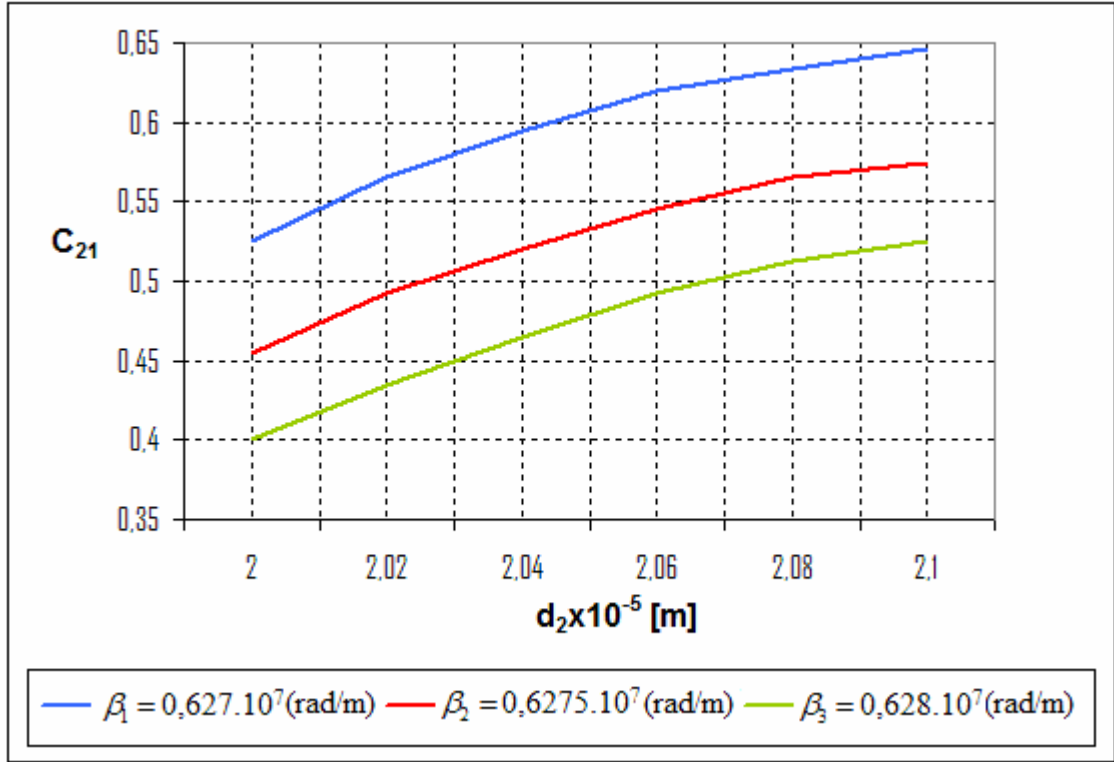
değerleri kullanılmış ve TE ve TM modlarının kuplajında, kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesinin yarıçapına göre değişimi incelenmiştir.



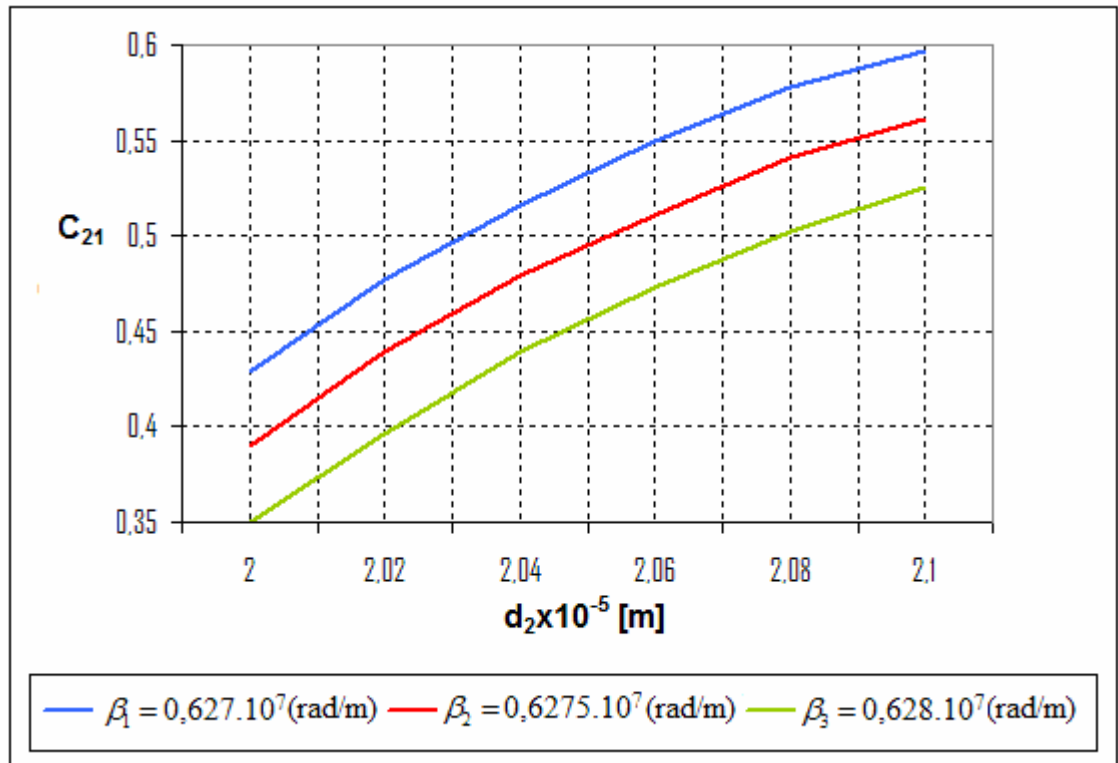
Şekil 7.5 Kupla, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş olmayan ve kılıfsız optik fiberlerde, çift TE modları için, kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek yarıçapına göre değişimi



Şekil 7.6 Kupla, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş olmayan ve kılıfsız optik fiberlerde, tek TE modları için, kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek yarıçapına göre değişimi



Şekil 7.7 Kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek yarıçapına göre değişimi



Şekil 7.8 Kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek yarıçapına göre değişimi

Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerin analizinde,

$$f = 200 \text{ THz}, \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ (H/m)}, k_0 = 0,42 \cdot 10^7, \varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ (F/m)},$$

$$P = 1 \text{ mW}, n_1 = 1.5, n_2 = 1.49, n_3 = 1,$$

$$S = 25 \mu\text{m}$$

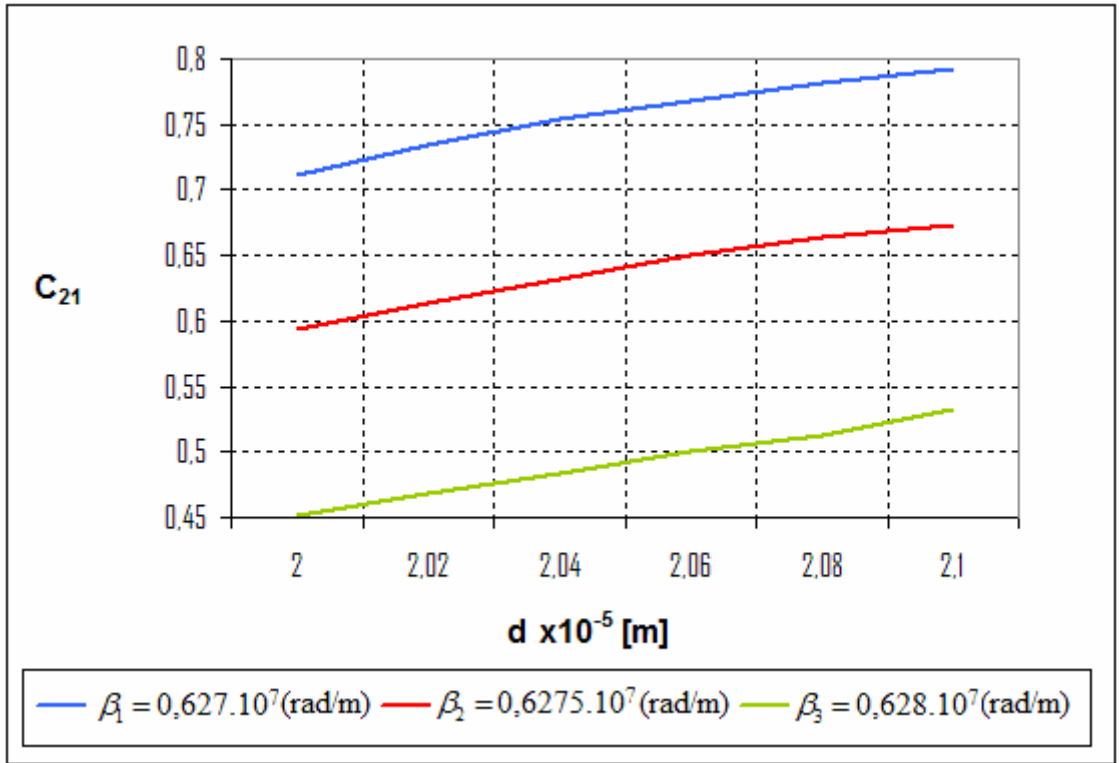
$$\beta_1 = 0,627 \cdot 10^7 \text{ (rad/m)}, \beta_2 = 0,6275 \cdot 10^7 \text{ (rad/m)}, \beta_3 = 0,628 \cdot 10^7 \text{ (rad/m)},$$

$$\kappa_1 = 0,0614 \cdot 10^7, \kappa_2 = 0,0561 \cdot 10^7, \kappa_3 = 0,0502 \cdot 10^7,$$

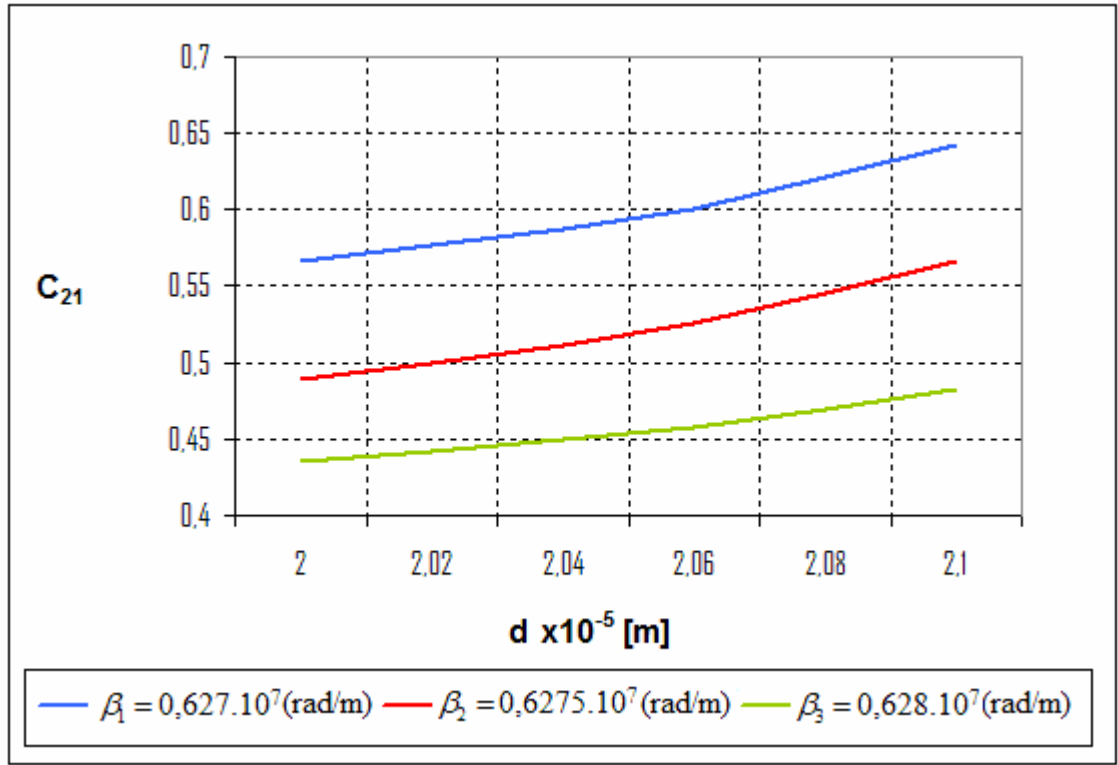
$$\gamma_1 = 0,0388 \cdot 10^7, \gamma_2 = 0,0462 \cdot 10^7, \gamma_3 = 0,0525 \cdot 10^7,$$

$$\rho_1 = 0,4655 \cdot 10^7, \rho_2 = 0,4662 \cdot 10^7, \rho_3 = 0,4669 \cdot 10^7,$$

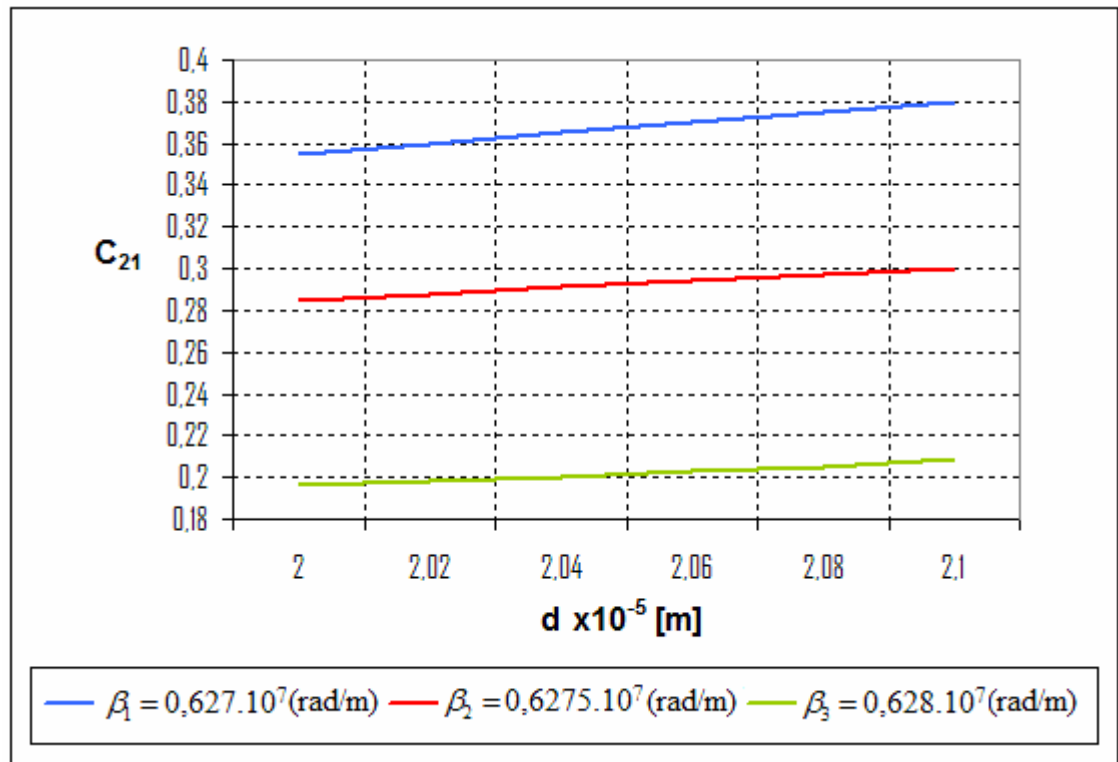
değerleri kullanılmış ve TE ve TM modlarının kuplajında, kuplaj katsayısının, çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi incelenmiştir.



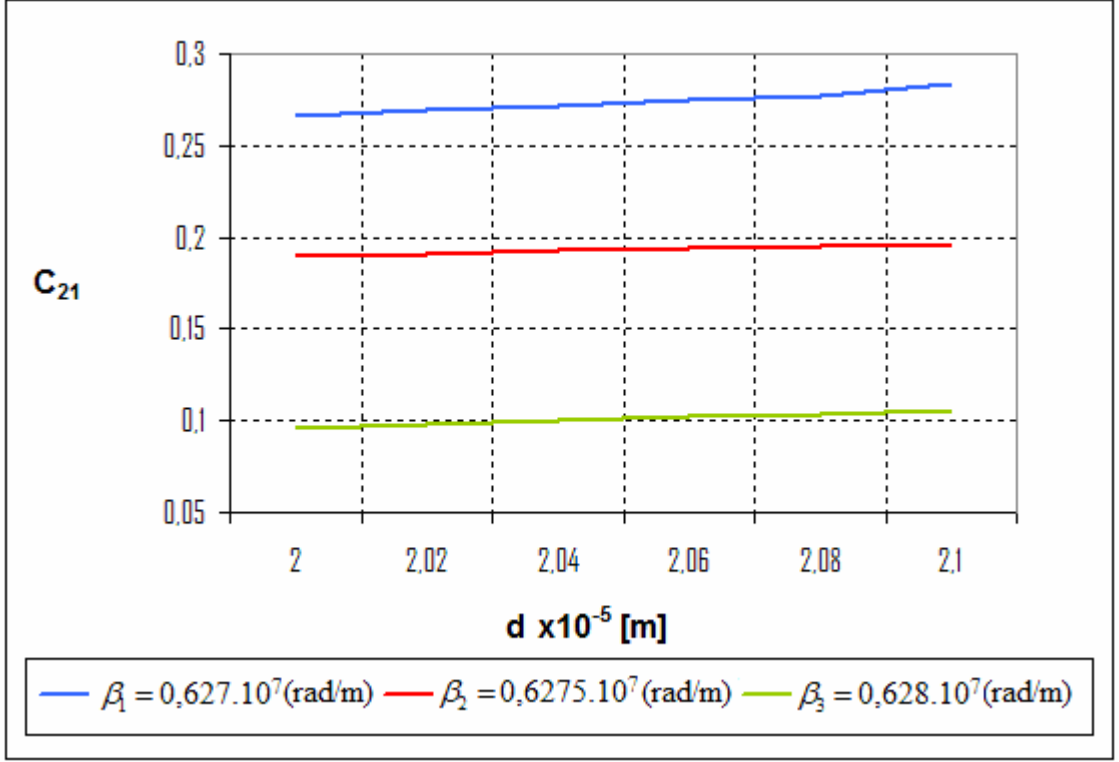
Şekil 7.9 Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde, çift TE modları için, kuplaj katsayısının optik fiber yarıçapına göre değişimi



Şekil 7.10 Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde, tek TE modları için, kuplaj katsayısının optik fiber yarıçapına göre değişimi



Şekil 7.11 Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde, çift TM modları için, kuplaj katsayısının optik fiber yarıçapına göre değişimi



Şekil 7.12 Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde, tek TM modları için, kuplaj katsayısının optik fiber yarıçapına göre değişimi

Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş olmayan ve kılıflı optik fiberlerin analizinde,

$$f = 200 \text{ THz}, \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ (H/m)}, k_0 = 0,42.10^7, \epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ (F/m)},$$

$$P = 1 \text{ mW}, n_1 = 1.5, n_2 = 1.49, n_3 = 1,$$

$$d_1 = 20 \mu m, S_1 = 50 \mu m, S_2 = 60 \mu m,$$

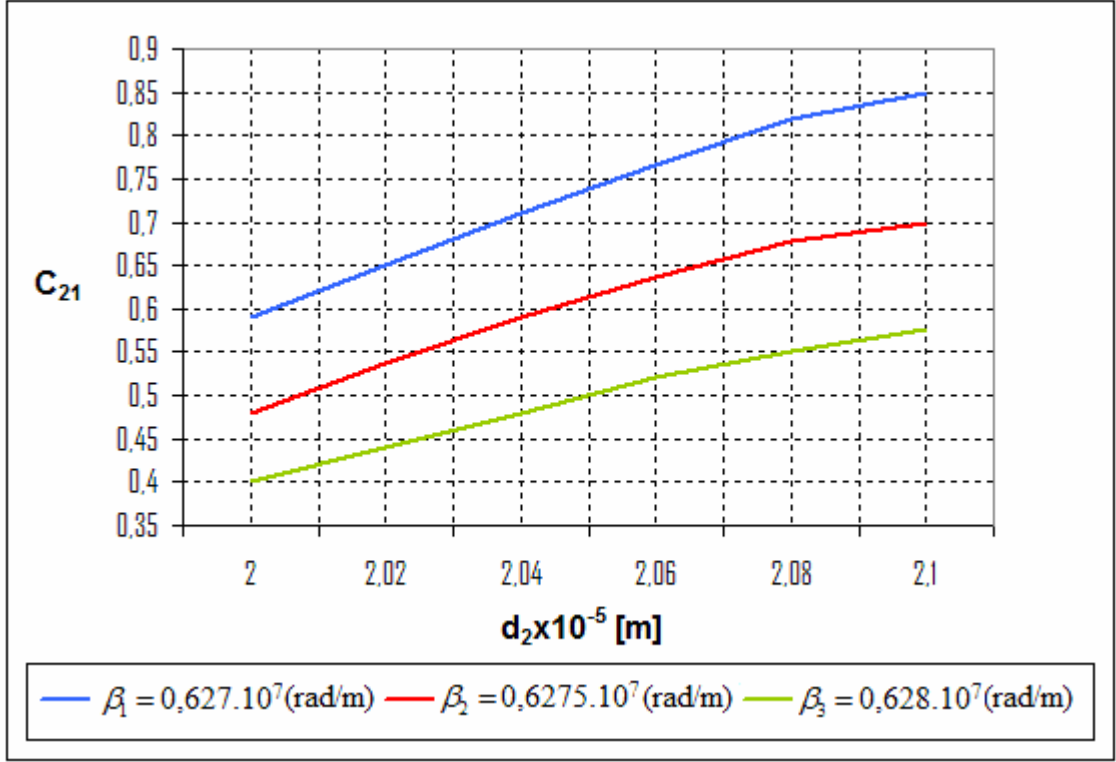
$$\beta_1 = 0,627.10^7, \quad \beta_2 = 0,6275.10^7, \quad \beta_3 = 0,628.10^7,$$

$$\kappa_1 = 0,0614.10^7, \quad \kappa_2 = 0,0561.10^7, \quad \kappa_3 = 0,0502.10^7,$$

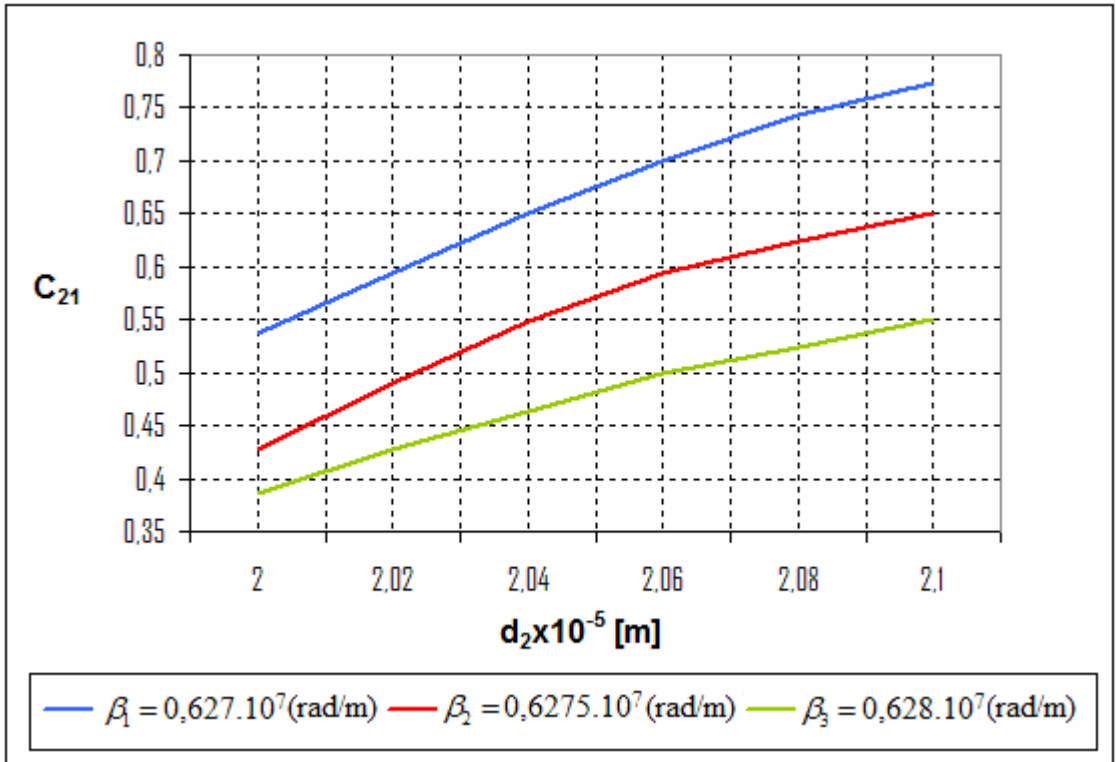
$$\gamma_1 = 0,0388.10^7, \quad \gamma_2 = 0,0462.10^7, \quad \gamma_3 = 0,0525.10^7,$$

$$\rho_1 = 0,4655.10^7, \quad \rho_2 = 0,4662.10^7, \quad \rho_3 = 0,4669.10^7,$$

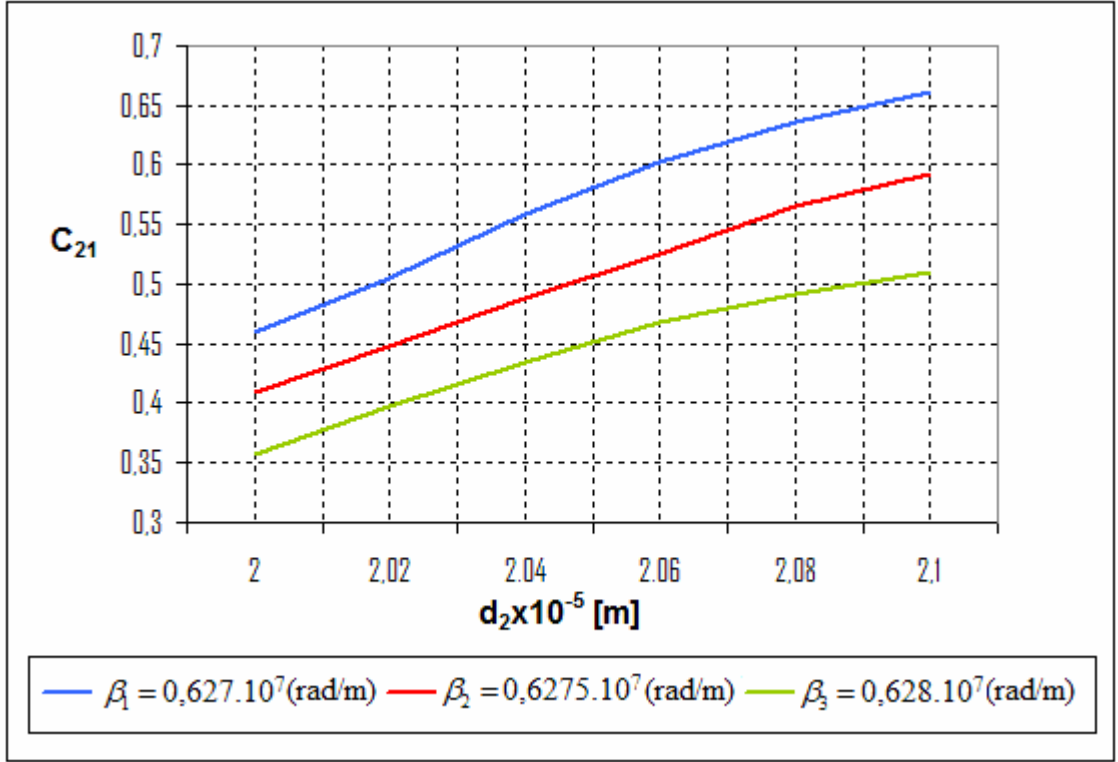
değerleri kullanılmış ve TE ve TM modlarının kuplajında, kuplaj katsayısının, ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi incelenmiştir.



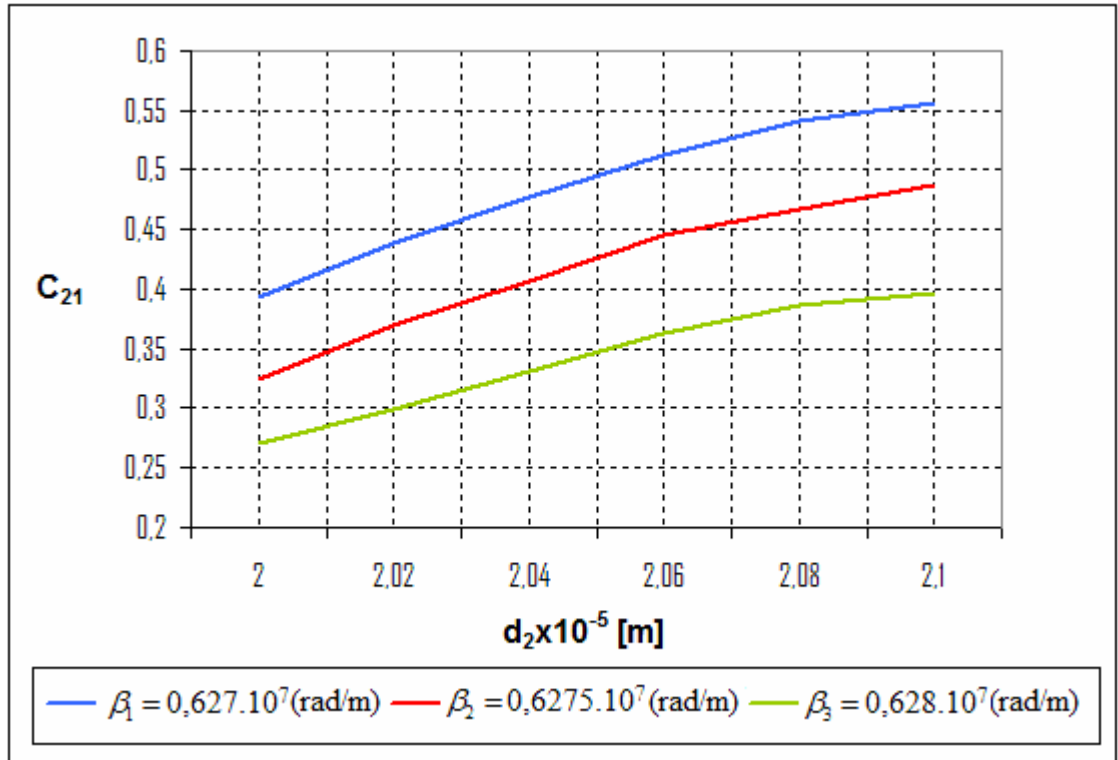
Şekil 7.13 Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş olmayan ve kılıflı optik fiberlerde, çift TE modları için, kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek yarıçapına göre değişimi



Şekil 7.14 Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş olmayan ve kılıflı optik fiberlerde, tek TE modları için, kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek yarıçapına göre değişimi



Şekil 7.15 Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş olmayan ve kılıflı optik fiberlerde, çift TM modları için, kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek yarıçapına göre değişimi



Şekil 7.16 Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş olmayan ve kılıflı optik fiberlerde, tek TM modları için, kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek yarıçapına göre değişimi

Şekil 7.1 ile Şekil 7.16 arasında yer alan grafiklere göre, TE modları arasındaki kuplajın, TM modları arasındaki kuplajdan daha etkin olduğu görülmüş ve çift TE modları arasındaki etkileşimin diğer modlar arasındaki etkileşimden daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Grafiklerden çıkarılabilecek bir diğer yorum ise, fiziksel mekanizmanın doğal bir sonucu olarak, kılıfsız optik fiberlerdeki kuplajın, kılıflı optik fiberlerdeki kuplajdan daha etkin olmasıdır.

Optik dalga kılavuzlarının çekirdek eksenleri arasındaki uzaklık sabit kalmak koşuluyla, sabit çekirdek bölgesi ve kılıf bölgesi yarıçap değerleri için, faz sabitinin değerinin artması durumunda kuplaj katsayısının değeri azalmaktadır.

7.2 Kuple, Düzlemsel Yapıdaki, Katmanlı, Özdeş ve Kılıflı Optik Dalga Kılavuzlarında, TE ve TM Modlarının Kuplajında, Faz Sabitinin, Çekirdek Bölgesi Yarıçapına Göre Değişiminin İncelenmesi

Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerin analizinde,

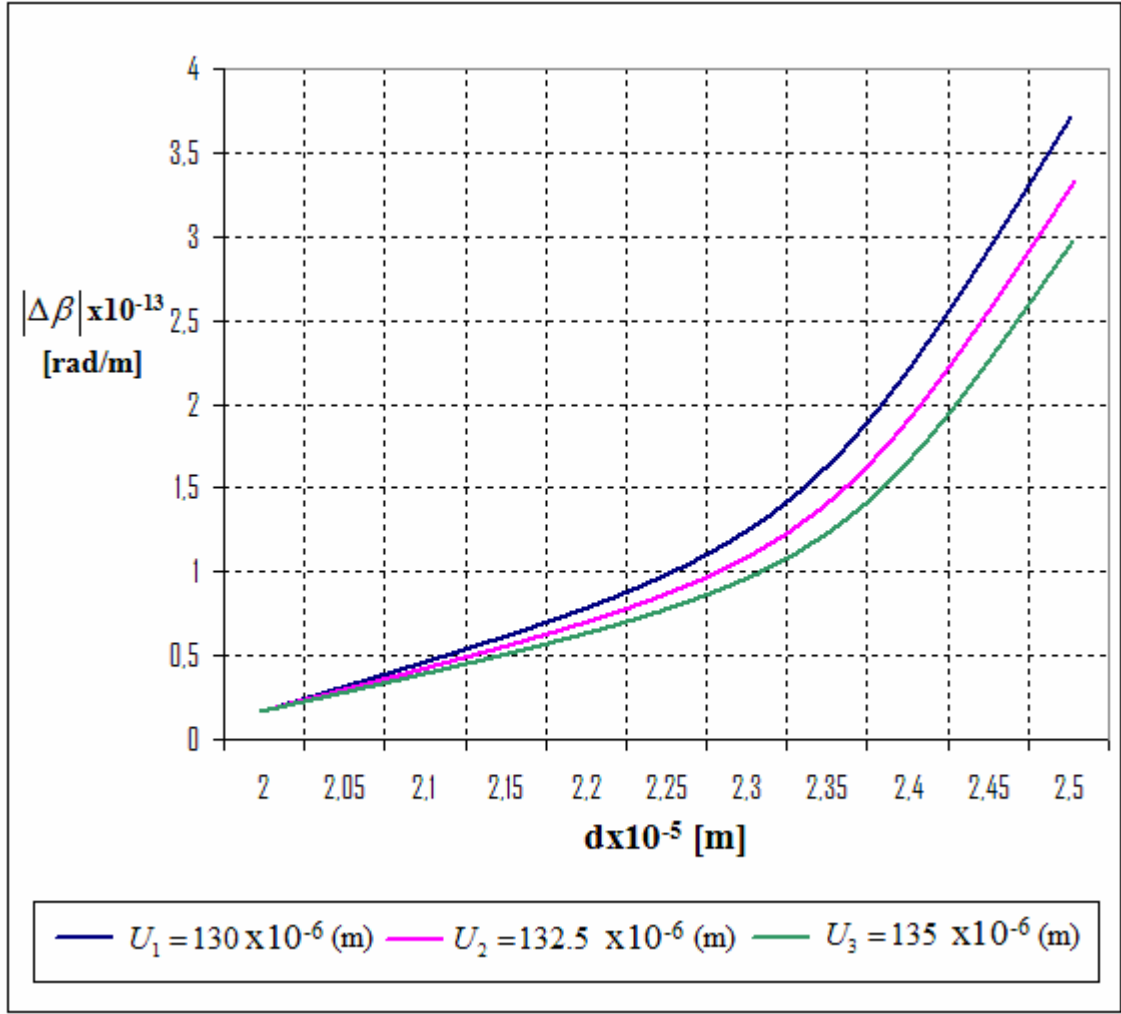
$$f = 200 \text{ THz}, \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ (H/m)}, k_0 = 0,42.10^7, \epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ (F/m)},$$

$$P = 1 \text{ mW}, n_1 = 1.5, n_2 = 1.49, n_3 = 1,$$

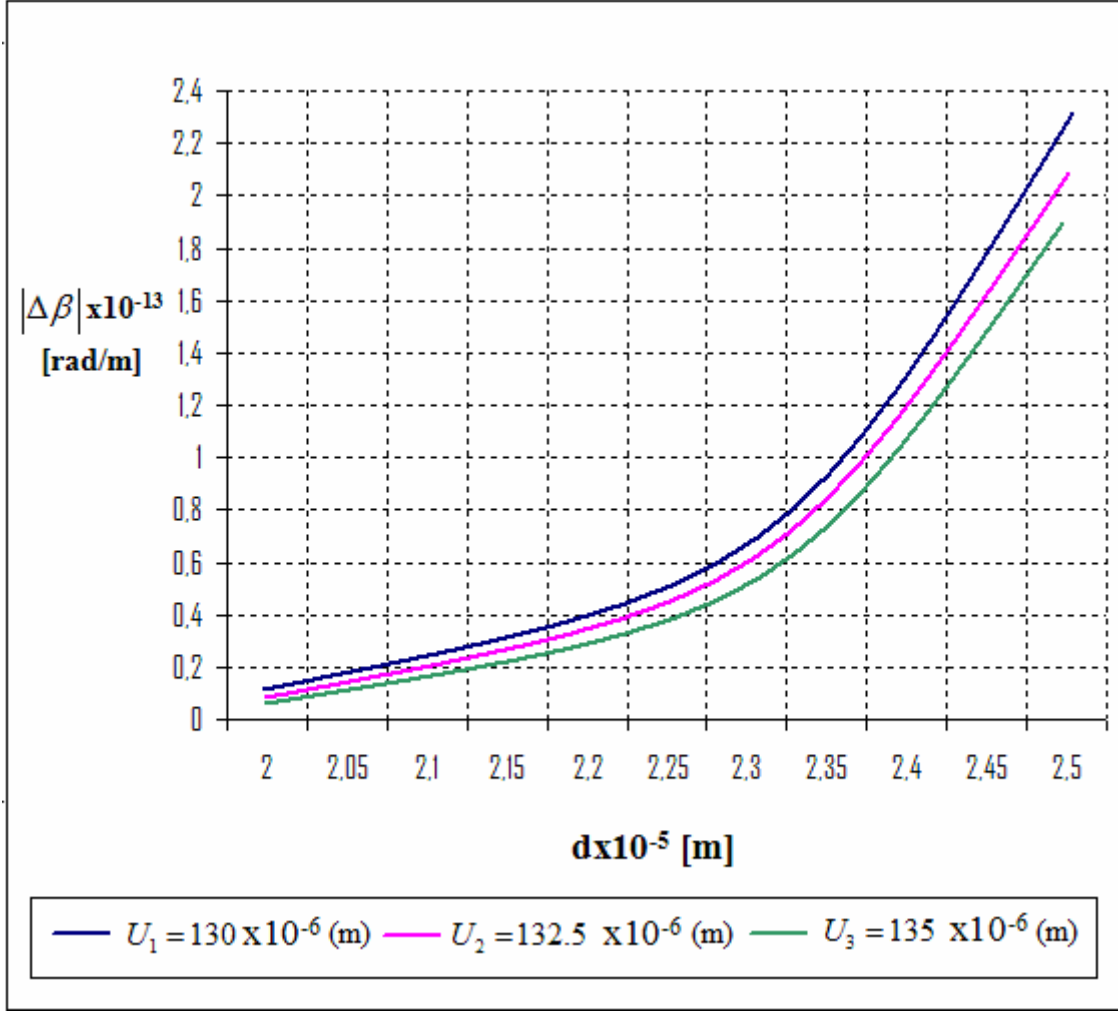
$$S = 62.5 \mu\text{m}, \beta = 0.625 \times 10^7, d = 25 \mu\text{m},$$

$$U_1 = 130 \times 10^{-6} \text{ m}, U_2 = 132.5 \times 10^{-6} \text{ m} \text{ ve } U_3 = 135 \times 10^{-6} \text{ m},$$

değerleri kullanılmış ve TE ve TM modlarının kuplajında, çekirdek bölgesinin yarıçapına göre, faz sabitinin değişimi, iki çekirdek bölgesinin eksenleri arasındaki uzaklığın farklı üç değeri için incelenmiştir.



Şekil 7.17 Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde TE modlarının kuplajında, faz sabitindeki değişimin optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



Şekil 7.18 Kupla, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde TM modlarının kuplajında, faz sabitindeki değişimin optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi

Şekil 7.17 ve Şekil 7.18’de elde edilen grafikler yorumlandığında, sabit çekirdek bölgesi yarıçapı ve sabit kılıf bölgesi yarıçapı için, kupla düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı iki dalga kılavuzunun arasındaki uzaklık arttıkça faz sabitindeki değişimin azaldığı görülmektedir.

Grafiklerin incelenmesinden çıkarılabilecek bir diğer yorum ise, TE ve TM modlarının kuplajında, çekirdek bölgelerinin eksenleri arasındaki uzaklık sabit olduğunda, çekirdek bölgesinin yarıçapının artışının propagasyon sabitinin artmasına neden olmasıdır. Bu durum, çekirdek bölgesinin merkezinden uzaklaşıldıkça kuplajın etki alanına yaklaşılması gerçeğini desteklemektedir.

Analizde, faz sabitinin değişiminin, TE modlarının kuplajında, TM modlarının kuplajında oluşan değişime oranla daha etkin olduğu görülmüştür.

7.3 Kuple, Düzlemsel Yapıdaki, Katmanlı, Özdeş ve Kılıflı Optik Dalga Kılavuzlarında TE ve TM Modlarının Kuplajında Propagasyon Sabitinin Kılıf Bölgesinin Yarıçapına Göre Değişiminin İncelenmesi

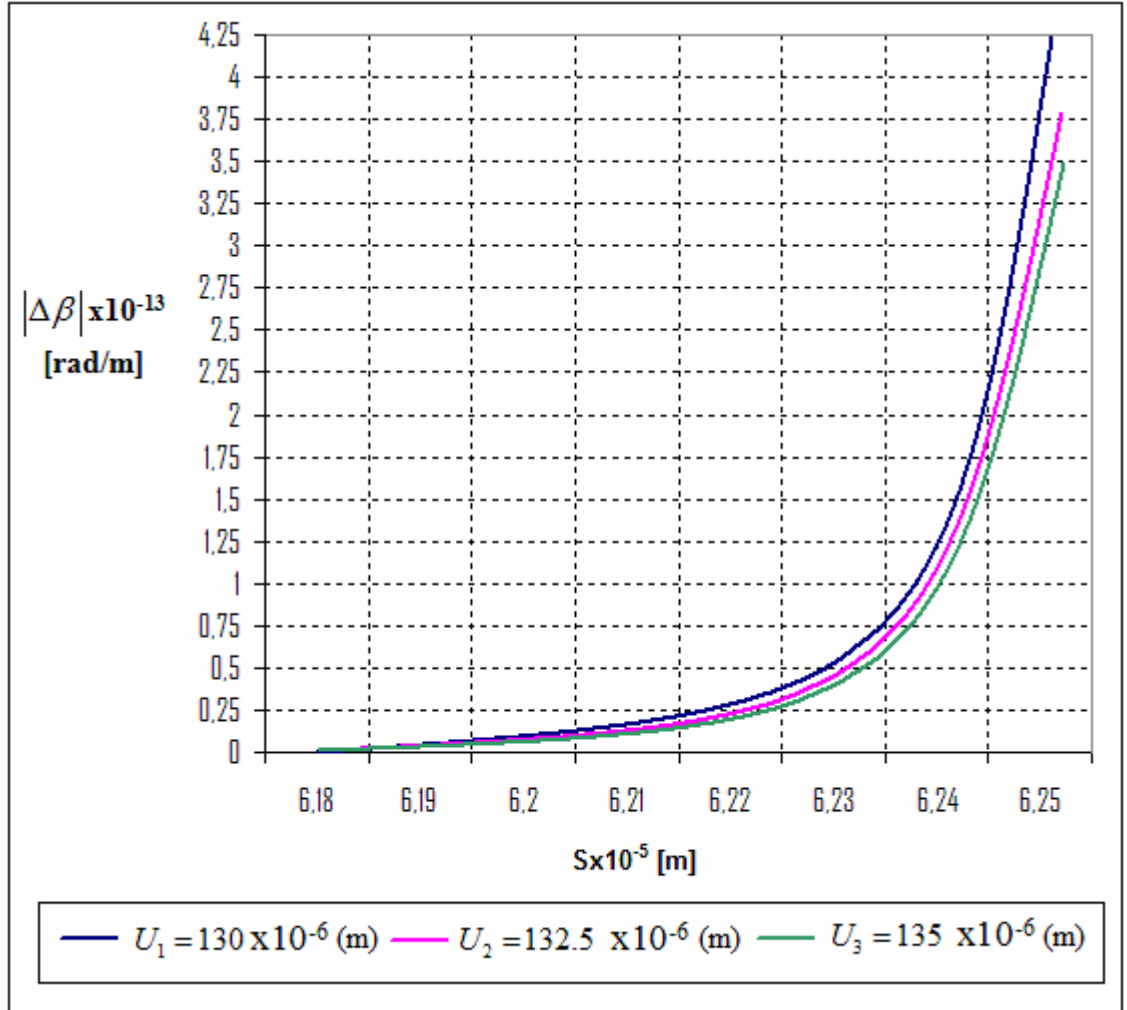
Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerin analizinde,

$$f = 200 \text{ THz}, \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ (H/m)}, k_0 = 0,42 \cdot 10^7, \epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ (F/m)},$$

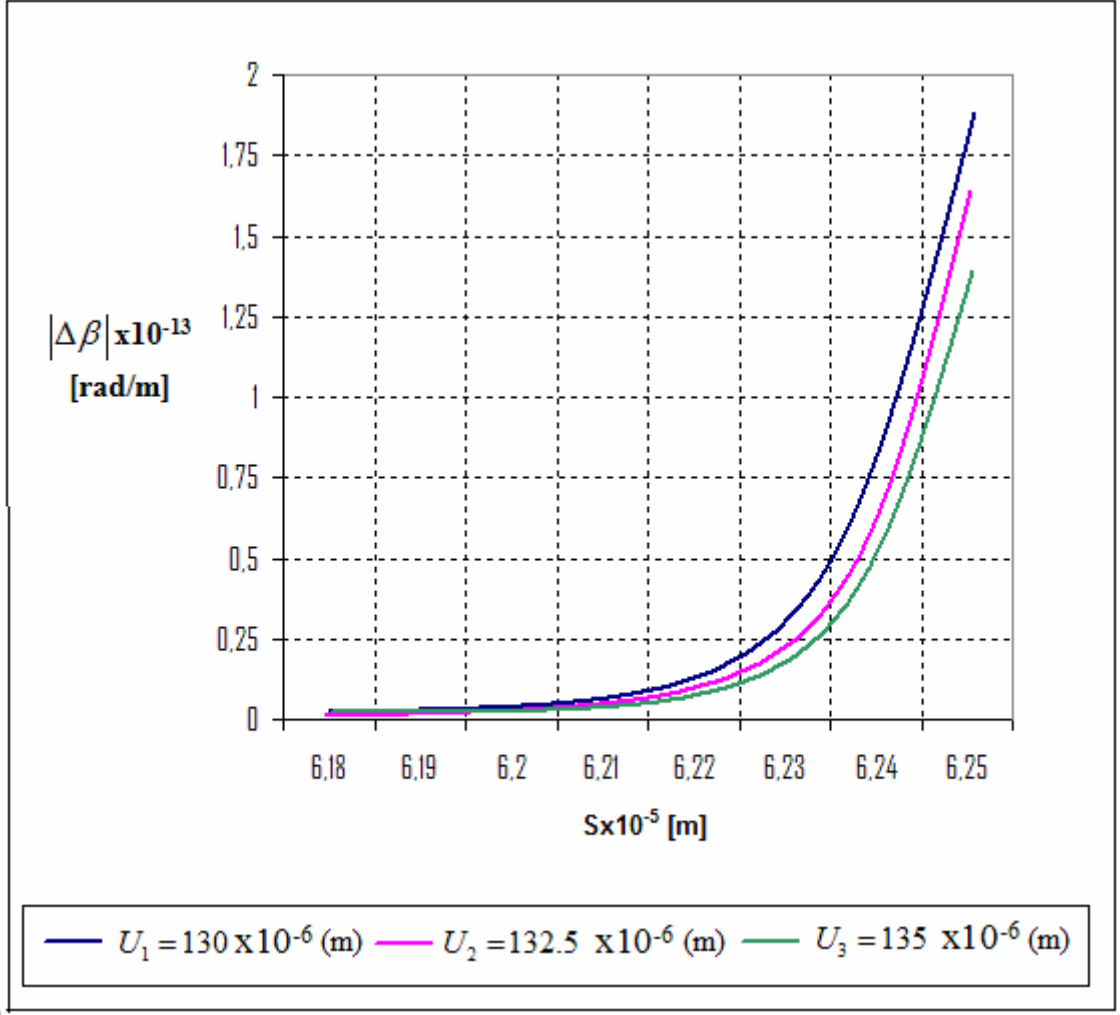
$$P = 1 \text{ mW}, n_1 = 1.5, n_2 = 1.49, n_3 = 1, S = 62.5 \mu\text{m}, \beta = 0.625 \times 10^7, d = 25 \mu\text{m},$$

$$U_1 = 130 \times 10^{-6} \text{ m}, U_2 = 132.5 \times 10^{-6} \text{ m} \text{ ve } U_3 = 135 \times 10^{-6} \text{ m};$$

değerleri kullanılmış ve TE ve TM modlarının kuplajında, kılıf bölgesinin yarıçapına göre, faz sabitinin değişimi, çekirdek bölgesinin eksenleri arasındaki uzaklığın farklı üç değeri için incelenmiştir.



Şekil 7.19 Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde, TE modlarının kuplajında, faz sabitinin, optik fiberin kılıf bölgesi yarıçapına göre değişimi



Şekil 7.20 Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde, TM modlarının kuplajında, faz sabitinin, optik fiberin kılıf bölgesi yarıçapına göre değişimi

Şekil 7.19 ve Şekil 7.20’de elde edilen grafikler yorumlandığında, kuple düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı, iki dalga kılavuzunun arasındaki uzaklığın artması durumunda, kuplaj etkisinin azalmasına bağlı olarak, faz sabitindeki değişimin azaldığı görülmektedir.

Grafiklerin incelenmesinden çıkarılabilecek bir diğer yorum ise, TE ve TM modlarının kuplajında, çekirdek bölgelerinin eksenleri arasındaki uzaklık ve çekirdek bölgesinin yarıçapı sabitken, kılıf bölgesinin yarıçapının artışının faz sabitinin artmasına neden olmasıdır. Daha önce ifade edildiği gibi, çekirdek bölgesinin merkezinden uzaklaştığında kuplajın etki alanına yaklaşmaktadır. Ayrıca d ve U sabit tutulduğunda, kılıf bölgesinin yarıçapının artışına bağlı olarak, faz sabitinin değişimi, S ve U sabitken, çekirdek bölgesinin yarıçapının artışına bağlı olarak meydana gelen faz sabiti değişiminden çok daha dik ve keskindir.

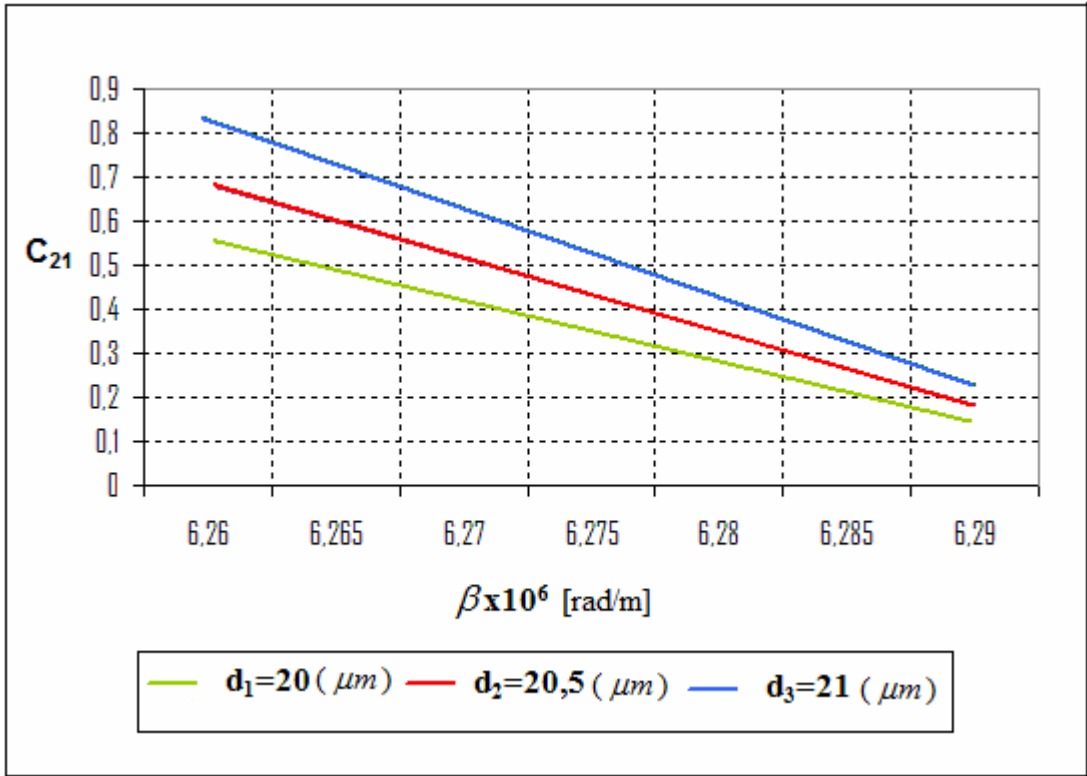
7.4 Kuple, Düzlemsel Yapıdaki, Katmanlı, Özdeş, Kılıflı ve Kılıfsız, Optik Dalga Kılavuzlarında, TE ve TM Modlarının Kuplajında, Kuplaj Katsayısının, Faz Sabitine Göre Değişiminin İncelenmesi

Kuple, düzlemsel yapılı, katmanlı, özdeş ve kılıfsız optik fiberlerin analizinde,

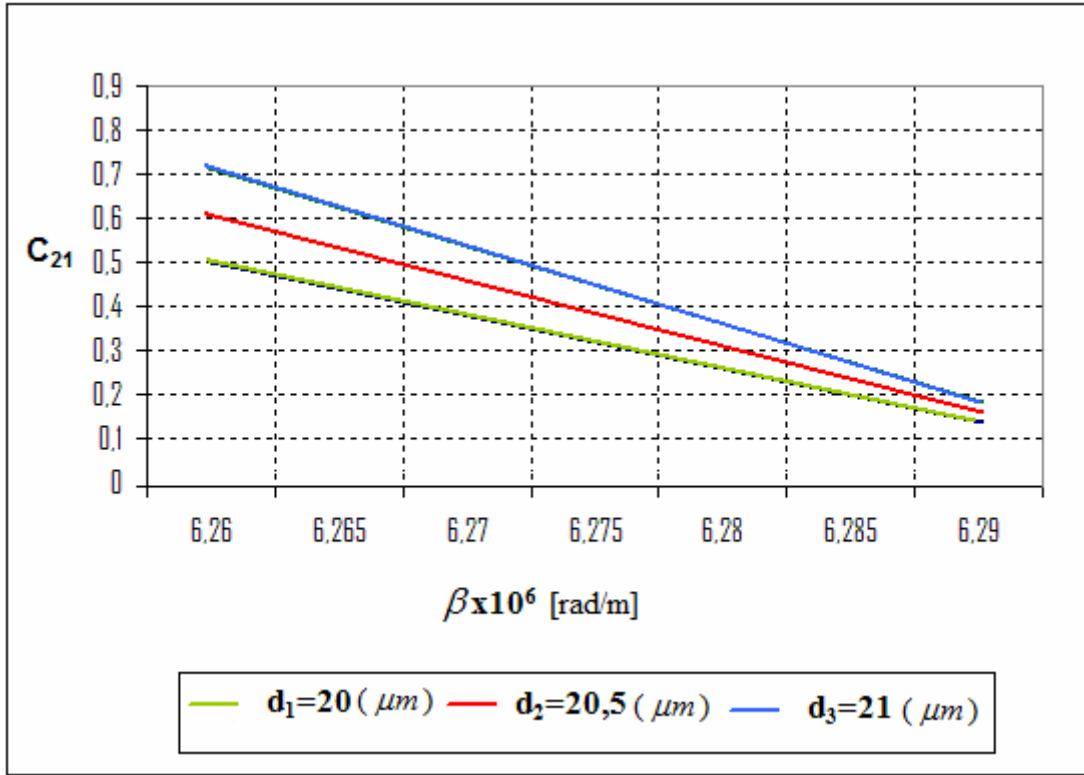
$$f = 200 \text{ THz}, \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ (H/m)}, k_0 = 0,42 \cdot 10^7, \epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ (F/m)},$$

$$P = 1 \text{ mW}, n_1 = 1.5, n_2 = 1,$$

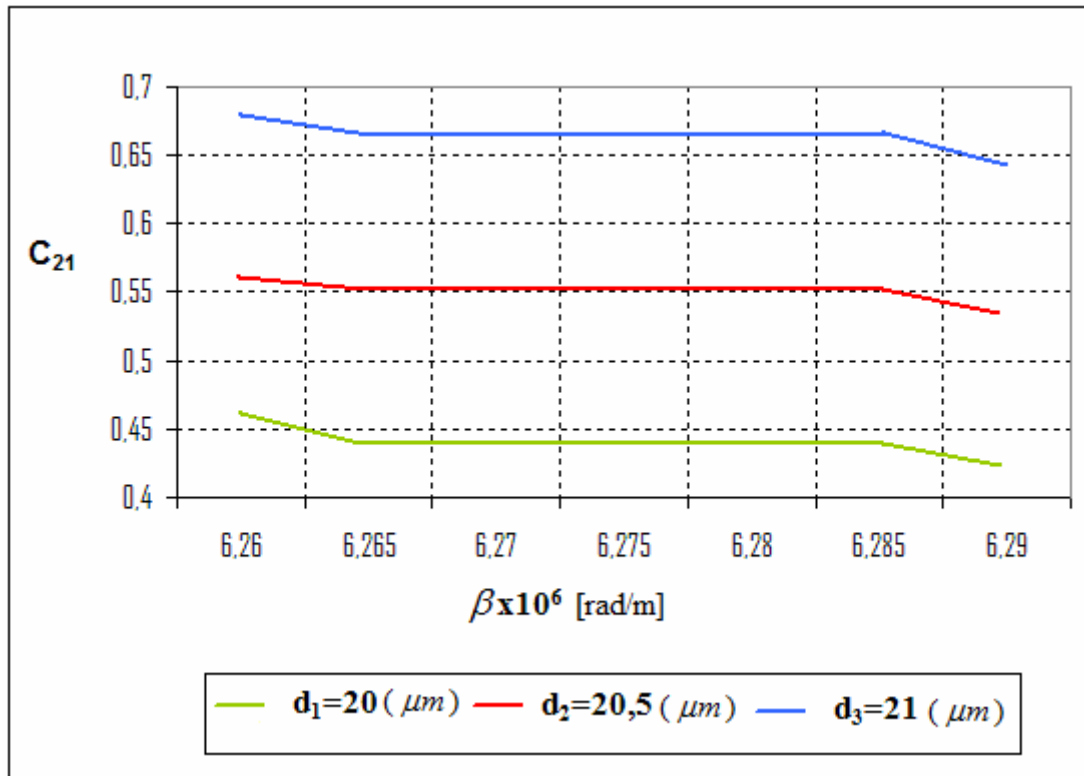
değerleri kullanılmış ve TE ve TM modlarının kuplajında, üç farklı çekirdek bölgesi yarıçapı değeri için, kuplaj katsayısının, faz sabitine göre değişimi incelenmiştir.



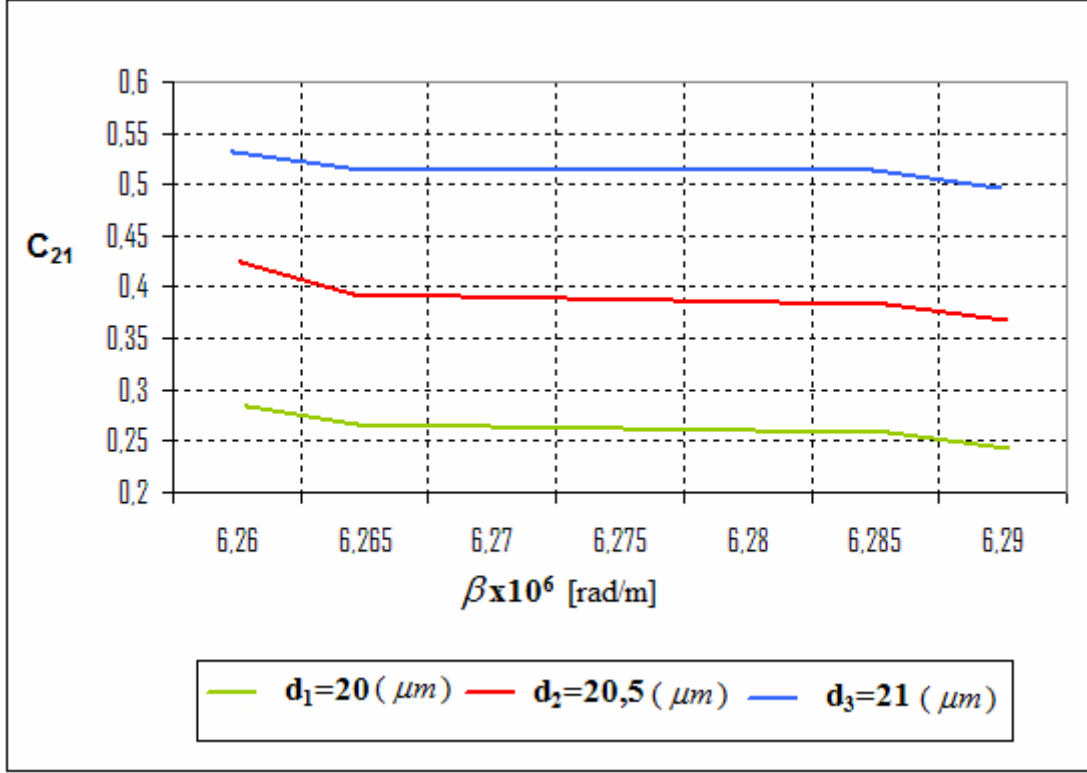
Şekil 7.21 Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıfsız optik fiberlerde, çift TE modları için, kuplaj katsayısının faz sabitine göre değişimi



Şekil 7.22 Kupla, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıfsız optik fiberlerde, tek TE modları için, kuplaj katsayısının faz sabitine göre değişimi



Şekil 7.23 Kupla, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıfsız optik fiberlerde, çift TM modları için, kuplaj katsayısının faz sabitine göre değişimi



Şekil 7.24 Kupla, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıfsız optik fiberlerde, tek TM modları için, kuplaj katsayısının faz sabitine göre değişimi

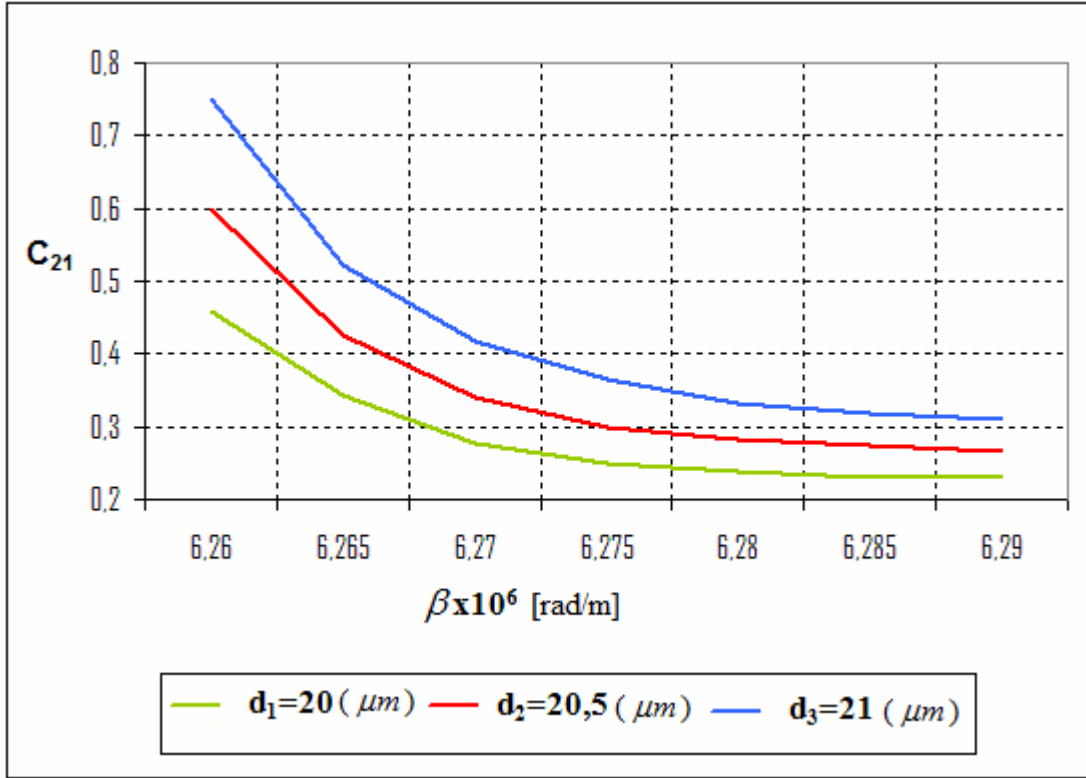
Kupla, düzlemsel yapılı, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerin analizinde,

$$f = 200 \text{ THz}, \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ (H/m)}, k_0 = 0,42 \cdot 10^7, \epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ (F/m)},$$

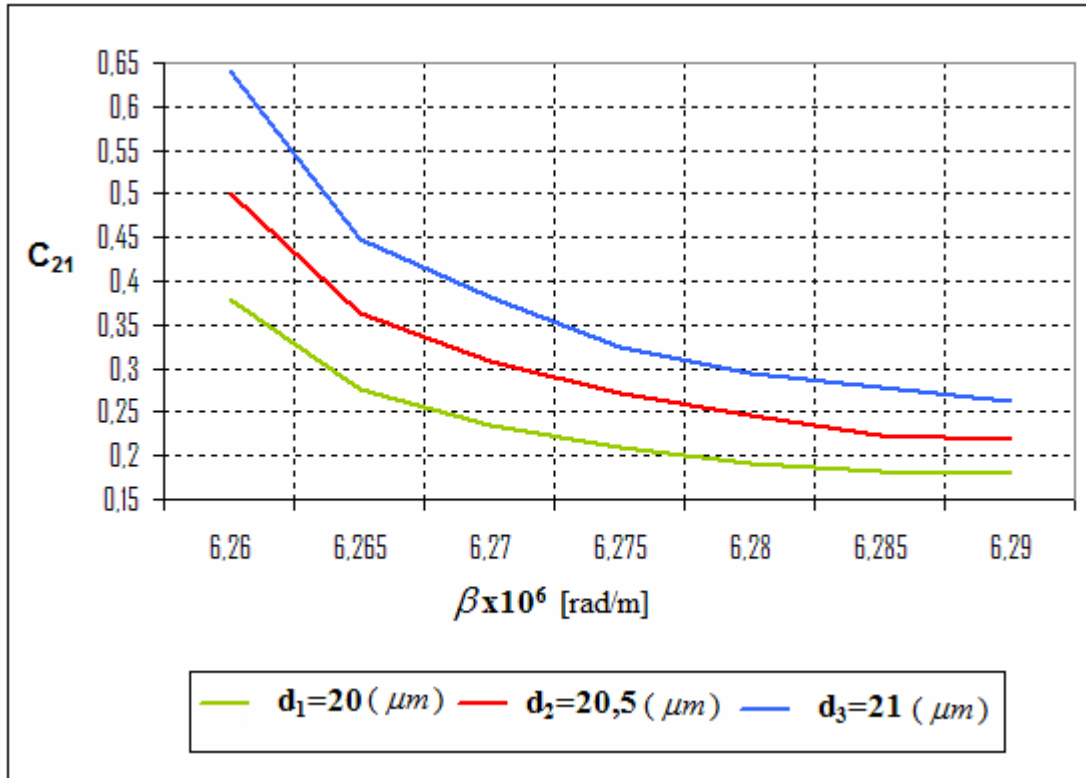
$$P = 1 \text{ mW}, n_1 = 1.5, n_2 = 1.49, n_3 = 1,$$

$$S = 25 \mu m,$$

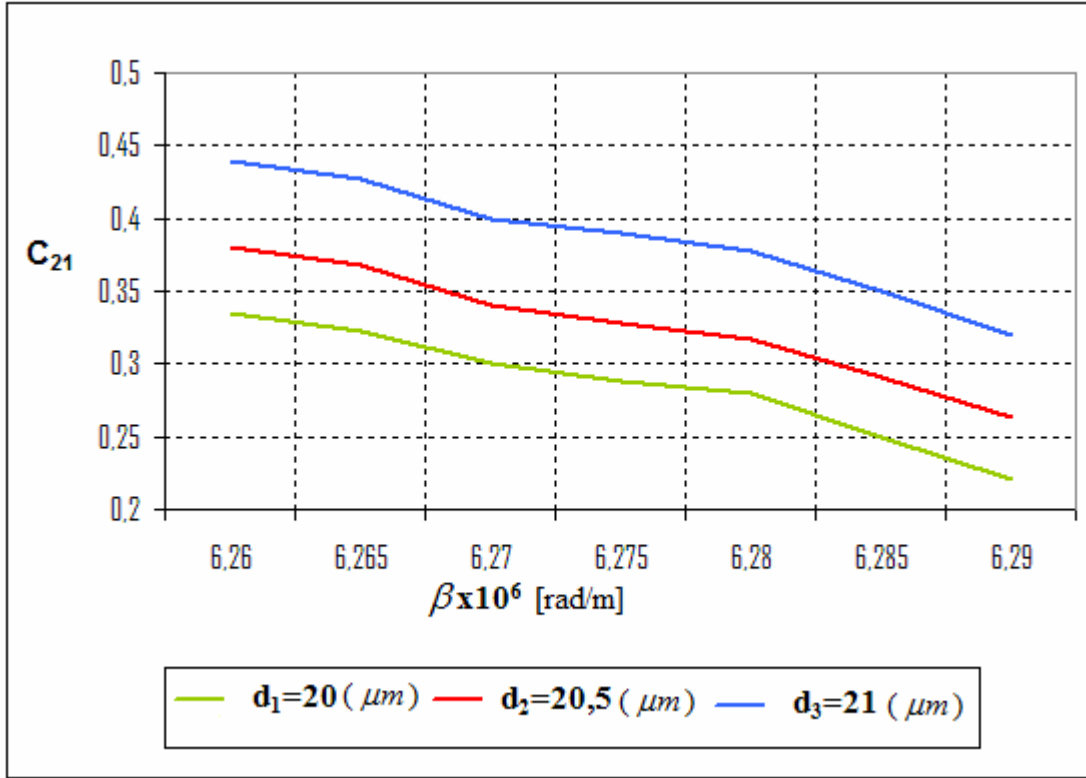
değerleri kullanılmış ve TE ve TM modlarının kuplajında, üç farklı çekirdek yarıçapı değeri için, kuplaj katsayısının, propagasyon sabitine göre değişimi incelenmiştir.



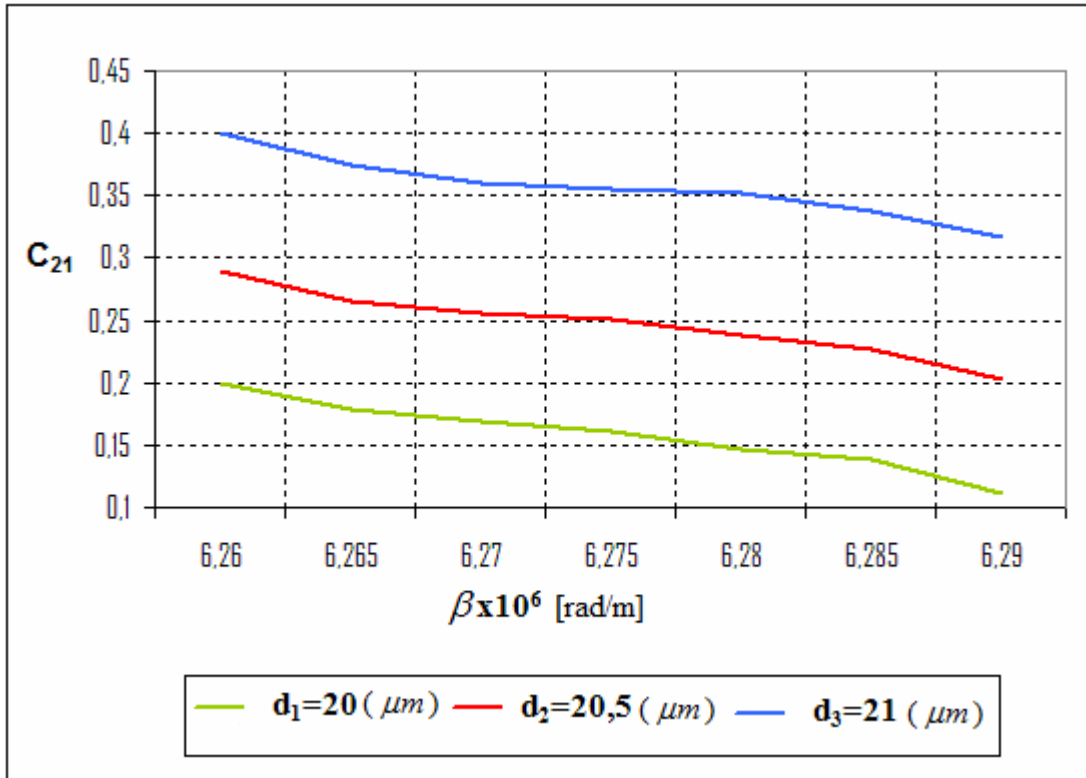
Şekil 7.25 Kupla, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde, çift TE modları için, kuplaj katsayısının faz sabitine göre değişimi



Şekil 7.26 Kupla, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde, tek TE modları için, kuplaj katsayısının faz sabitine göre değişimi



Şekil 7.27 Kupla, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde, çift TM modları için, kuplaj katsayısının faz sabitine göre değişimi



Şekil 7.28 Kupla, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde, tek TM modları için, kuplaj katsayısının faz sabitine göre değişimi

Şekil 7.21 ile Şekil 7.28 arasında çizilen grafikler yorumlandığında, TE modları arasındaki kuplajın, TM modları arasındaki kuplajdan daha etkin olduğu görülmüştür ve çift TE modları arasındaki etkileşimin diğer modlar arasındaki etkileşimden daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Grafiklerden çıkarılabilecek bir diğer yorum ise, fiziksel mekanizmanın doğal bir sonucu olarak, kılıfsız optik fiberlerdeki kuplajın, kılıflı optik fiberlerdeki kuplajdan daha etkin olmasıdır.

Optik dalga kılavuzlarının çekirdek bölgesi eksenleri arasındaki uzaklık sabit kalmak koşuluyla, sabit çekirdek bölgesi ve kılıf bölgesi yarıçap değerleri için, faz sabitinin değeri arttıkça kuplaj katsayısının değeri azalmaktadır.

Bu bölümde elde edilen sonuçların, 7.1 Bölümü'nde elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.

7.5 Kuple, Düzlemsel Yapıdaki, Katmanlı, Özdeş ve Kılıflı Optik Dalga Kılavuzlarında TE Modlarının Kuplajında, Kuplaj Katsayısının Kırılma İndislerine Göre Değişiminin İncelenmesi

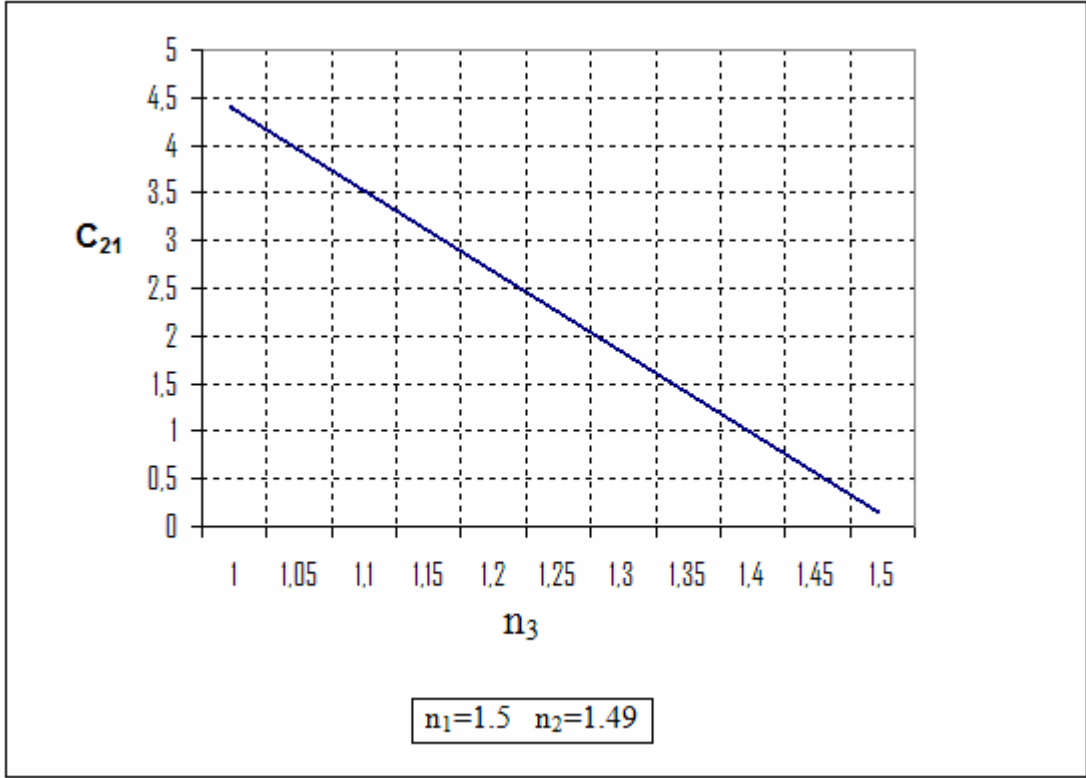
Kuple, düzlemsel yapılı, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerin analizinde,

$$f = 200 \text{ THz}, \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ (H/m)}, k_0 = 0,42.10^7, \varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ (F/m)},$$

$$P = 1 \text{ mW}, n_1 = 1.5, n_2 = 1.49, n_3 = 1,$$

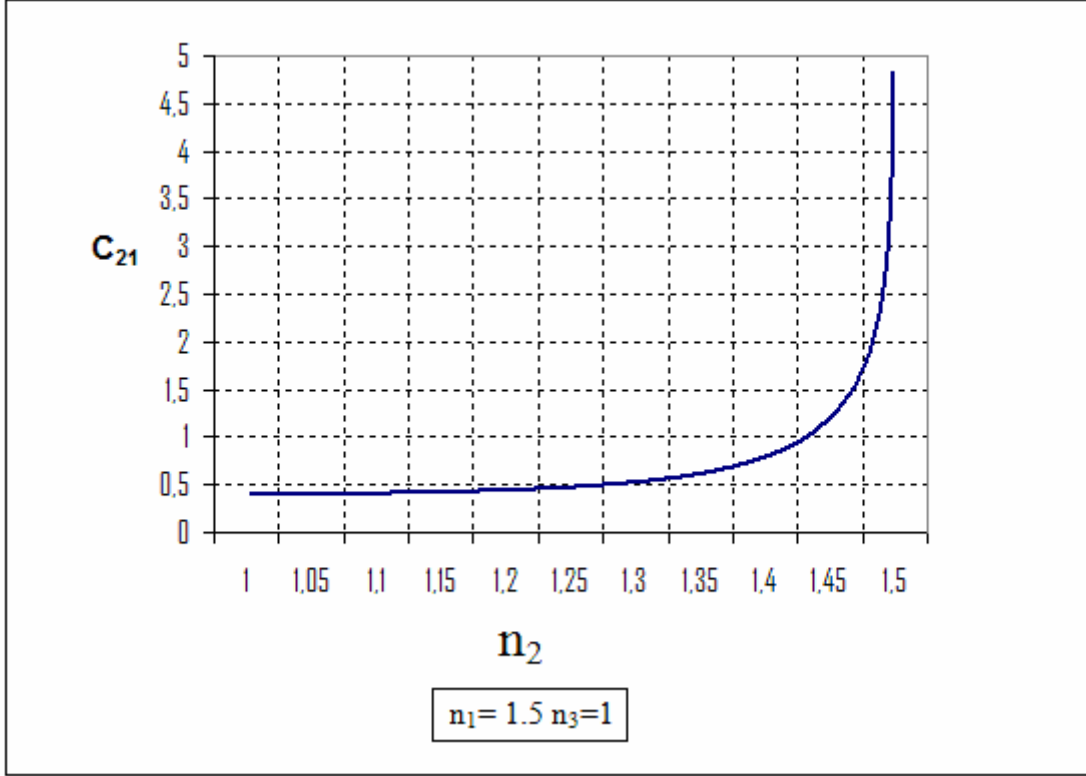
$$S = 60 \mu\text{m}, d = 22.5 \mu\text{m}, U = 130 \times 10^{-6} \text{ m},$$

değerleri kullanılmış ve TE modlarının kuplajında, kuplaj katsayısının kırılma indislerine göre değişimi incelenmiştir.



Şekil 7.29 Kupla, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde TE modlarının kuplajında, kuplaj katsayısının kılıfı saran dış ortamın kırılma indisine göre değişimi

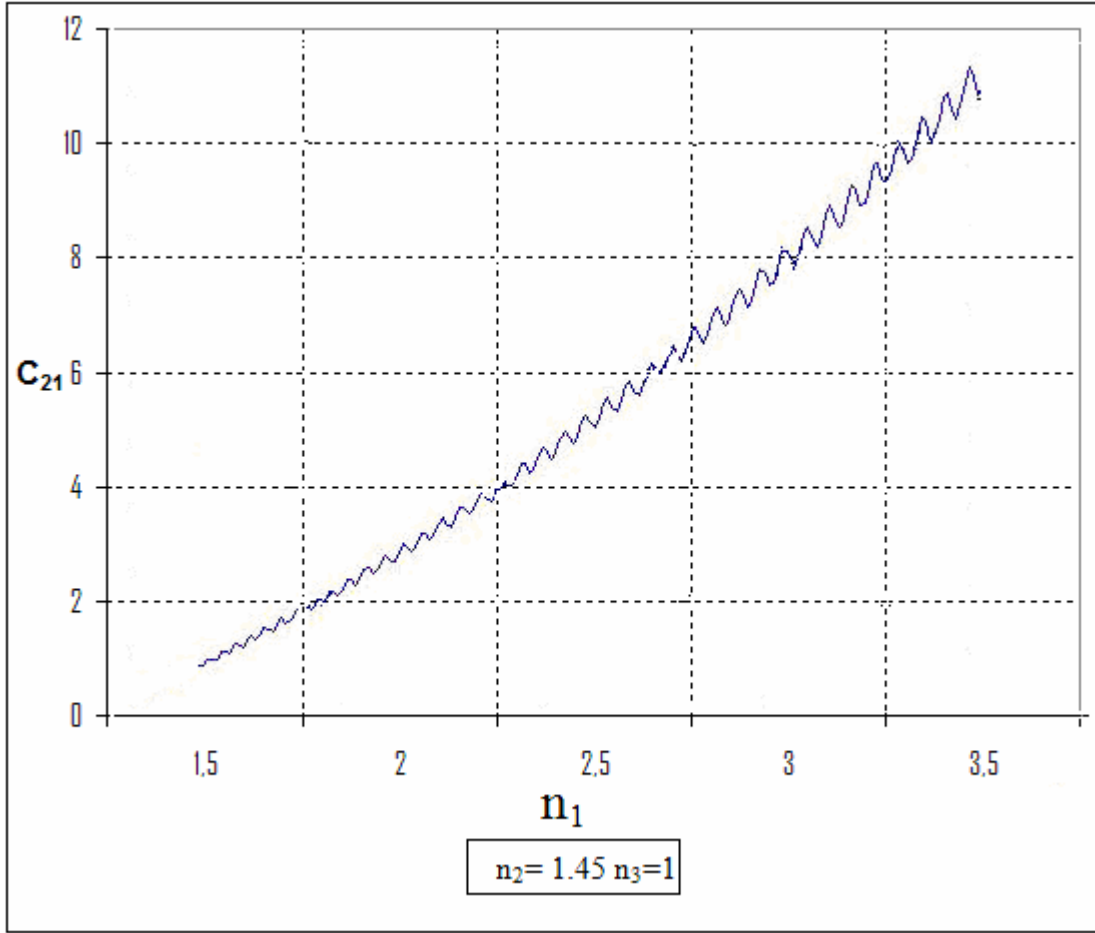
Şekil 7.29’da görüldüğü gibi, optik dalga kılavuzunun kılıfını saran dış ortamın kırılma indisi arttığında, kuplaj katsayısının değeri azalmaktadır. Bu durumda, kılavuzların fiziksel parametreleri olan çekirdek bölgesinin yarıçapı, kılıf bölgesinin yarıçapı, çekirdek eksenleri arasındaki uzaklık değiştirilmeksizin, sadece kılavuzların içinde bulundukları ortamın kırılma indisi değiştirilerek de kuplaj katsayısı değiştirilebilmektedir.



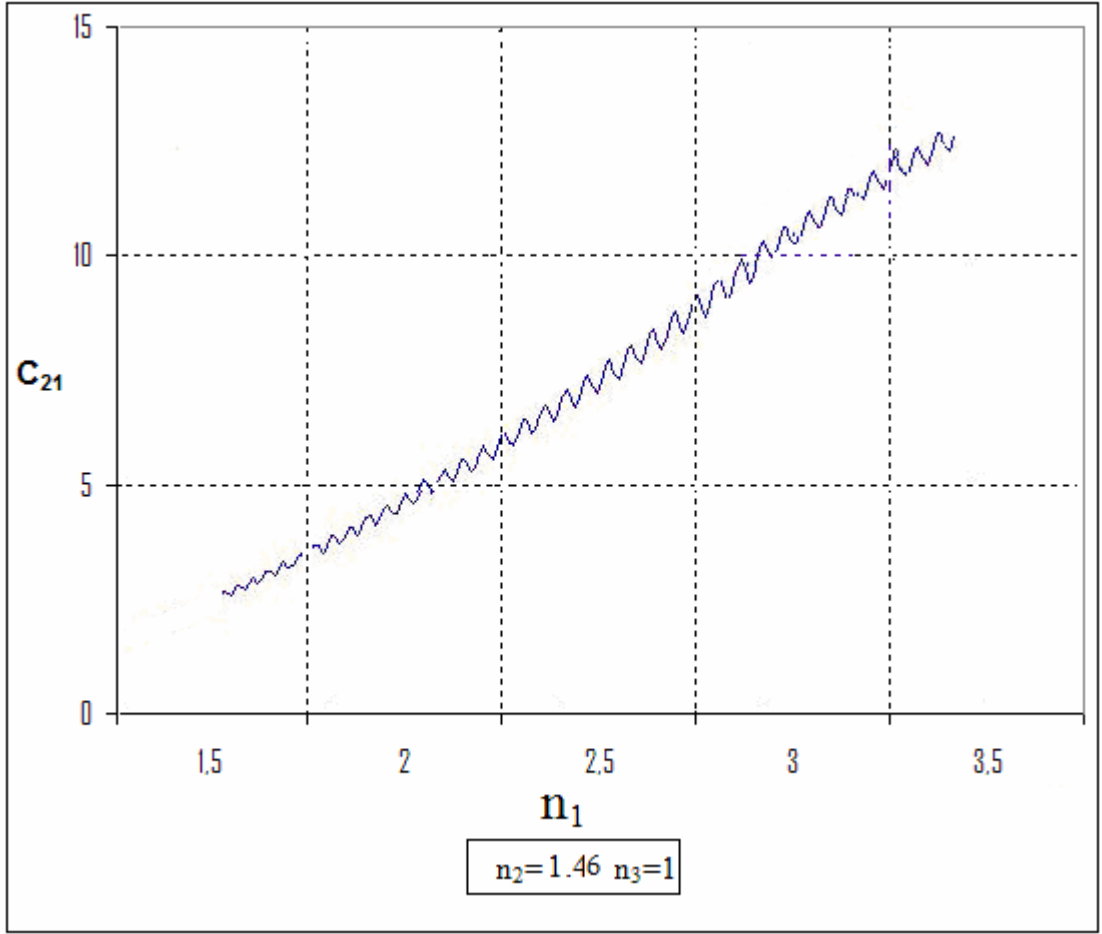
Şekil 7.30 Kupla, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde TE modlarının kuplajında, kuplaj katsayısının kılıf bölgesi kırılma indisine göre değişimi

Şekil 7.30’da görüldüğü gibi, kılıf bölgesinin kırılma indisi 1.5 değerine yaklaştıkça kuplaj katsayısı hızla artmaktadır. Bu yorumu önceden elde edilen sonuçlarla örtüştürmek mümkündür. Kılıf bölgesinin yarıçapı, çekirdek bölgesinin yarıçapı olan 1.5 değerine yaklaştığında, optik fiberin çekirdeğinin de kırılma indisi 1.5 olduğundan, dalga kılavuzunu kılıfsız gibi düşünmek mümkün olur. Kılıfsız dalga kılavuzlarının, kılıflı dalga kılavuzlarına oranla daha etkin kuplaj mekanizmasına sahip olduğu açıktır. Diğer bir deyişle, kılıf bölgesinin kırılma indisi, çekirdek bölgesinin kırılma indisine yaklaştıkça, dalga kılavuzu, kılıfsız dalga kılavuzu davranışına yaklaşır ve kuplaj katsayısı artar.

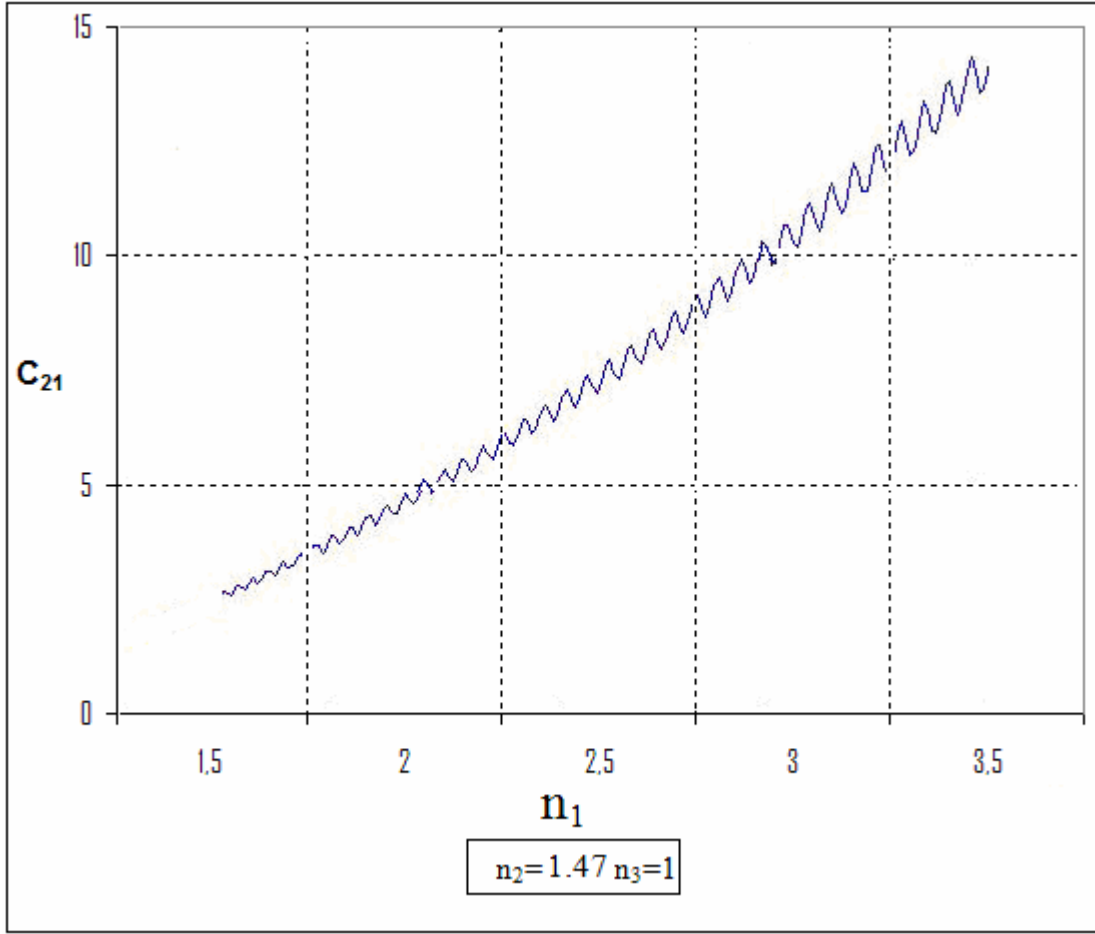
Bu bölüme kadar dış ortamın ve kılıfın kırılma indisleri incelenmiştir. Bundan sonraki bölümde ise, üç farklı kılıf bölgesi kırılma indisi için, faz sabitinin değeri $\beta = 0.0625 \times 10^7$ olarak alınmış ve çekirdek bölgesinin kırılma indisine göre, kuplaj katsayısının değişimi incelenmiştir.



Şekil 7.31 Kupla, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde TE modlarının kuplajında, kılıf bölgesinin kırılma indisi değeri 1.45 olduğunda kuplaj katsayısının, çekirdek bölgesi kırılma indisine göre değişimi



Şekil 7.32 Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde TE modlarının kuplajında, kılıf bölgesinin kırılma indisi değeri 1.46 olduğunda, kuplaj katsayısının çekirdek bölgesi kırılma indisine göre değişimi



Şekil 7.33 Kupla, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde TE modlarının kuplajında, kılıf bölgesinin kırılma indisi değeri 1.47 olduğunda, kuplaj katsayısının çekirdek bölgesi kırılma indisine göre değişimi

Şekil 7.31, Şekil 7.32 ve Şekil 7.33’de görüldüğü gibi, optik dalga kılavuzunun çekirdek bölgesinin kırılma indisi ve kılıf bölgesinin kırılma indisi kuplaj mekanizması açısından çok önemlidir.

Analizde, çekirdek bölgesinin kırılma indisi arttığında, kuplaj katsayısının da arttığı görülmüştür. öte yandan kılıf bölgesinin kırılma indisinin artışı da kuplaj katsayısını oldukça arttırmaktadır.

7.6 Kuple, Düzlemsel Yapıdaki, Katmanlı, Özdeş ve Kılıflı Optik Dalga Kılavuzlarında, TE ve TM Modlarının Kuplajında, Faz Sabitinin, İki Çekirdek Eksenleri Arasındaki Uzaklığa Göre Değişiminin İncelenmesi

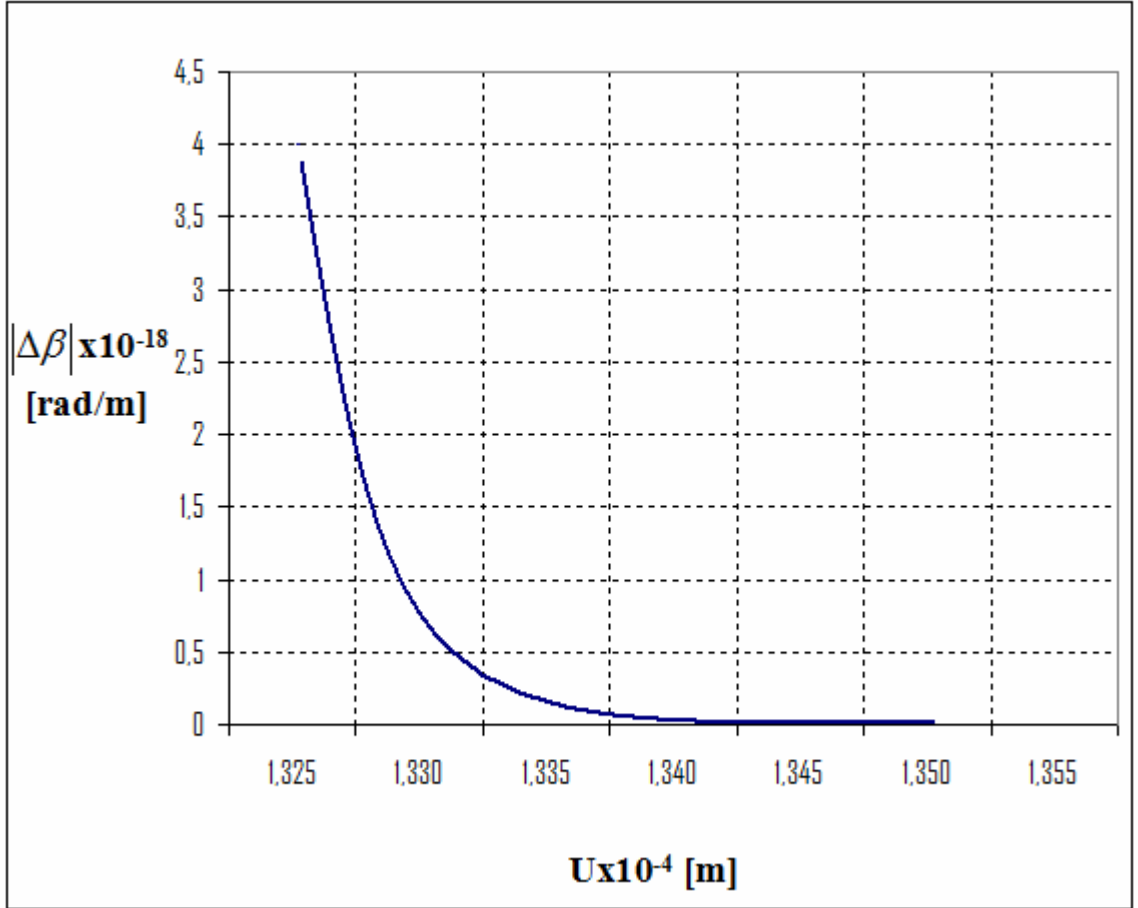
Kuple, düzlemsel yapılı, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerin analizinde,

$$f = 200 \text{ THz}, \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ (H/m)}, k_0 = 0,42 \cdot 10^7, \varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ (F/m)},$$

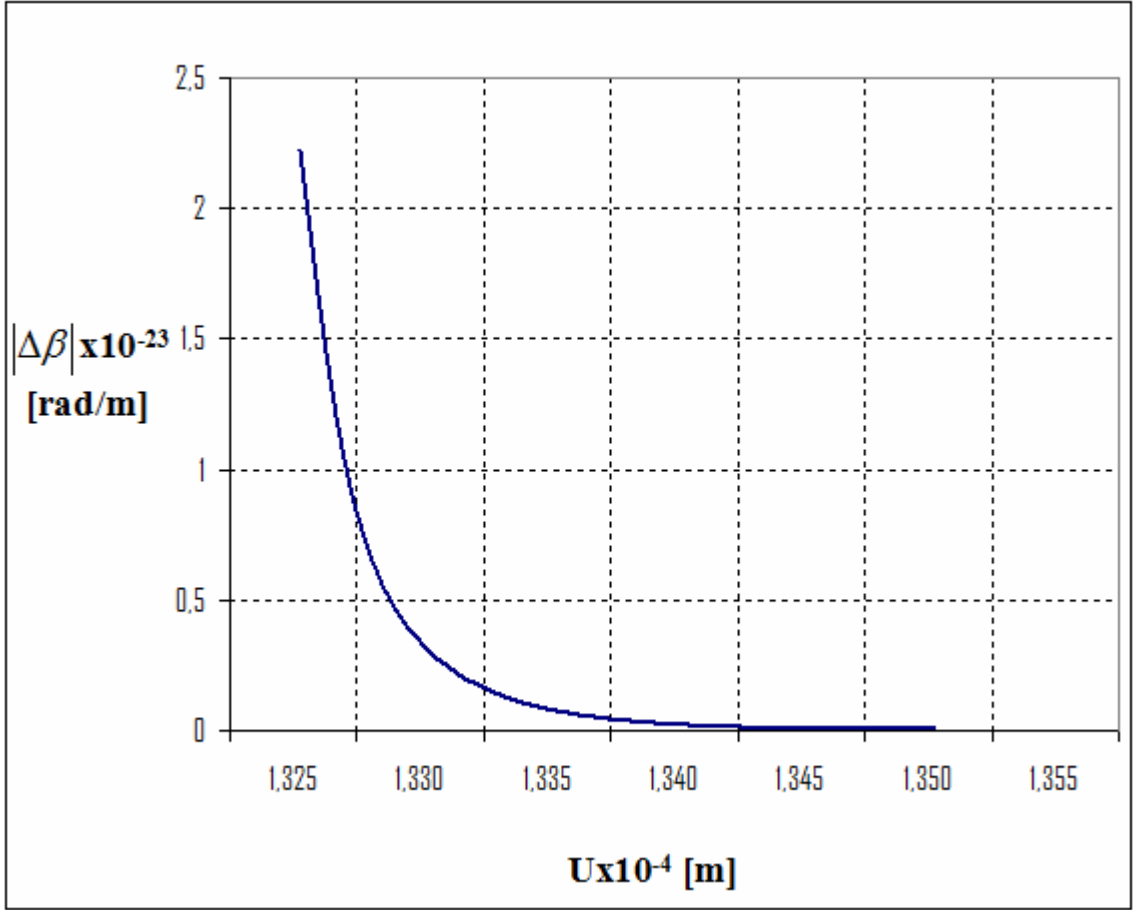
$$P = 1 \text{ mW}, n_1 = 1.5, n_2 = 1.49, n_3 = 1,$$

$$\beta = 0.625 \times 10^7, d = 25 \times 10^{-6} \text{ m}, S = 62.5 \times 10^{-6} \text{ m},$$

değerleri kullanılmış ve TE ve TM modlarının kuplajında, faz sabitindeki değişim, çekirdek eksenleri arasındaki uzaklığa göre, incelenmiştir.



Şekil 7.34 Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde TE modlarının kuplajında, faz sabitinin iki çekirdek eksenleri arasındaki uzaklığa göre değişimi



Şekil 7.35 Kuple, düzlemsel yapıdaki, katmanlı, özdeş ve kılıflı optik fiberlerde TM modlarının kuplajında, faz sabitinin iki çekirdek eksenleri arasındaki uzaklığa göre değişimi

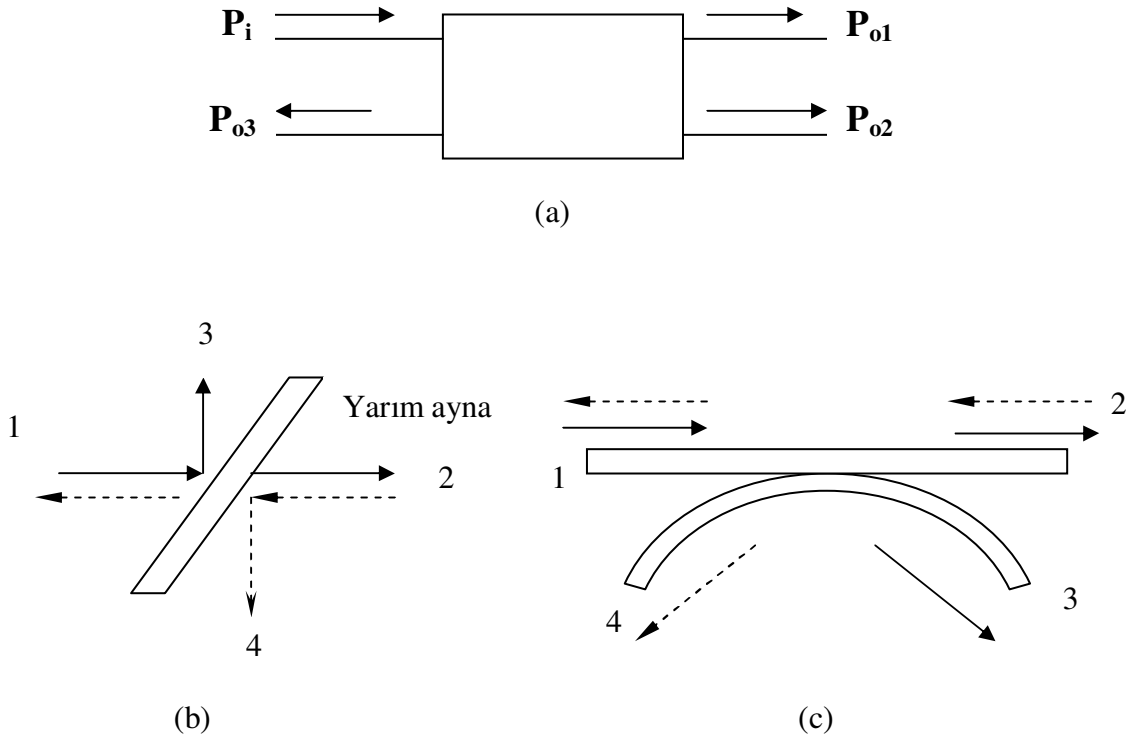
Şekil 7.34 ve 7.35’de görüldüğü gibi, iki optik dalga kılavuzunda çekirdek ve kılıf bölgelerinin yarıçapları sabit olmak üzere, optik eksenler arasındaki uzaklık arttıkça zaman faz sabitinin değişimi azalmaktadır. Bu sonuç fiziksel mekanizmanın bir doğal çıkarımıdır. Optik eksenler arasındaki uzaklık arttıkça kuplajın etki alanından uzaklaşmaktadır.

8. OPTİK KUPLÖRLERİN ANALİZİ

Optik kuplörler, birçok uygulama için önemli olan ışık dalgalarının toplanması ve dağıtılması gibi fonksiyonları yerine getirir. İdeal doğrultu kuplörleri ve yıldız kuplörleri, dalgaboyuna duyarlı elemanlardır. Dalgaboyu bölmeli çoğullamalı kuplörler ise dalgaboyu seçici elemanlardır. Doğrultu kuplörleri çoğu zaman çift yönlü iletim sistemlerinde ve ölçüm sistemlerinde kullanılırlar (Türkmen, 2005).

8.1 Optik Doğrultu Kuplörü

Optik doğrultu kuplörleri, basit olarak iki paralel optik fiberden oluşmaktadır. Bahsedilen paralel optik fiberler her ikisi de düz, biri bükülmüş diğeri düz ya da her ikisi de bükülmüş olarak uygulanabilir. Şekil 8.1’de doğrultu kuplörlerinin yapıları görülmektedir. Optik fiberler arasındaki karşılıklı kuplaj mekanizması, Kuple Mod Teorisi ve Petürbasyon Teorisi yardımıyla incelenir.



Şekil 8.1 (a) Doğrultu kuplörleri için genel model (b) bulk tipi doğrultu kuplörü

(c) fused-fiber tipi doğrultu kuplörü

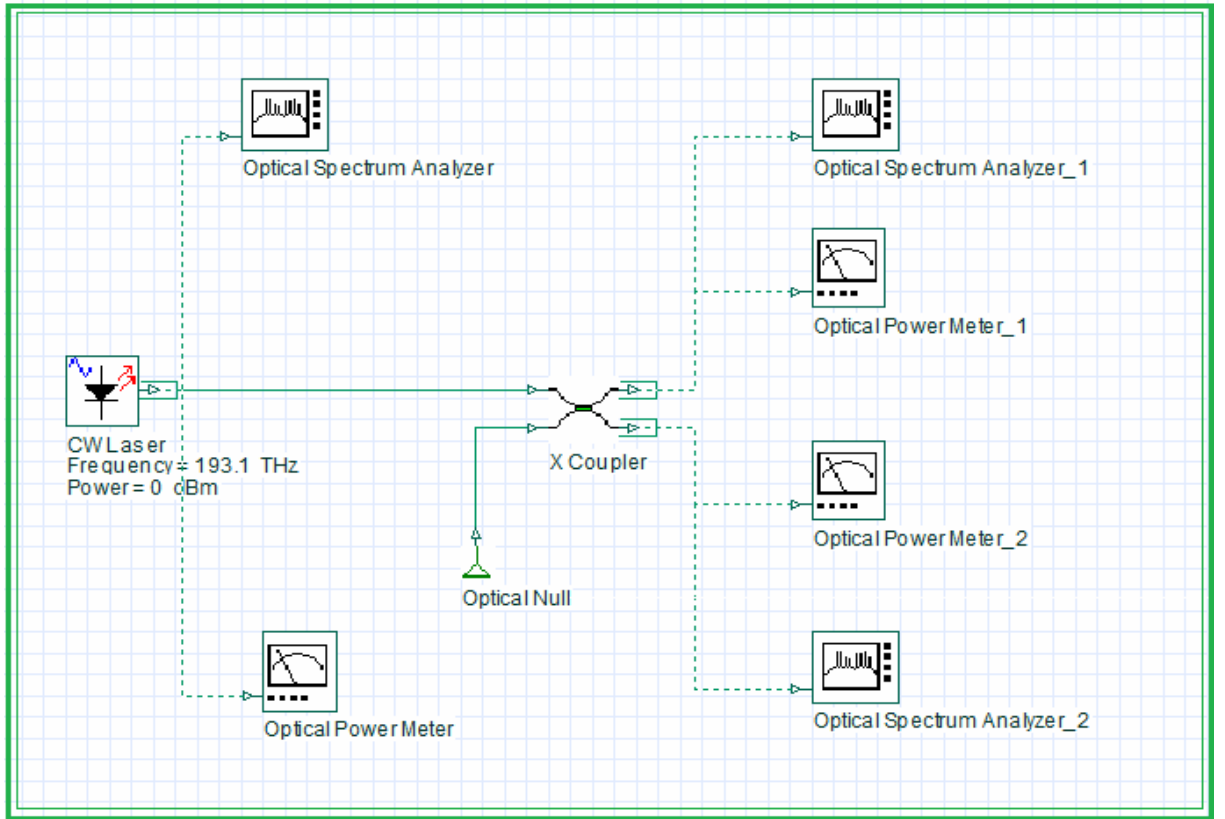
Kuple Mod Teorisi esas alınarak, optik fiberlerin eksenleri arasında yer alan uzaklığın, çalışma dalgaboyundan çok daha küçük olması durumunda, evanescent (sönümlü) alanların karşılıklı olarak etkileşimi gerçekleşir. Optik fiberlerden birinde yer alan modun propagasyon

sabitinin, kuple durumundaki diğer optik fiberde yer alan modun etkisiyle değişimi söz konusudur. Kuple durumundaki fiberin faz sabiti, diğer modun faz sabiti ile aynı ya da farklı olabilir.

Optik doğrultu kuplörü, bir giriş kapısından herhangi bir optik kaynak ile beslendiğinde, çıkış kapılarından veri iletimi sağlanan dört kapılı bir devre elemanıdır. Çıkış kapılarından alınan işaretler, sistemdeki elemanların giriş kapılarına uygulanır. Sistemin kullanım amacına göre, uygun sonlandırma elemanı kullanılarak kapıya gelen elektromagnetik dalganın absorbe edilmesi veya kullanılan sonlandırma elemanının empedansına bağlı olarak verinin tamamının ya da bir kısmının yansıtması sağlanır. (ÜNVERDİ, 1991)

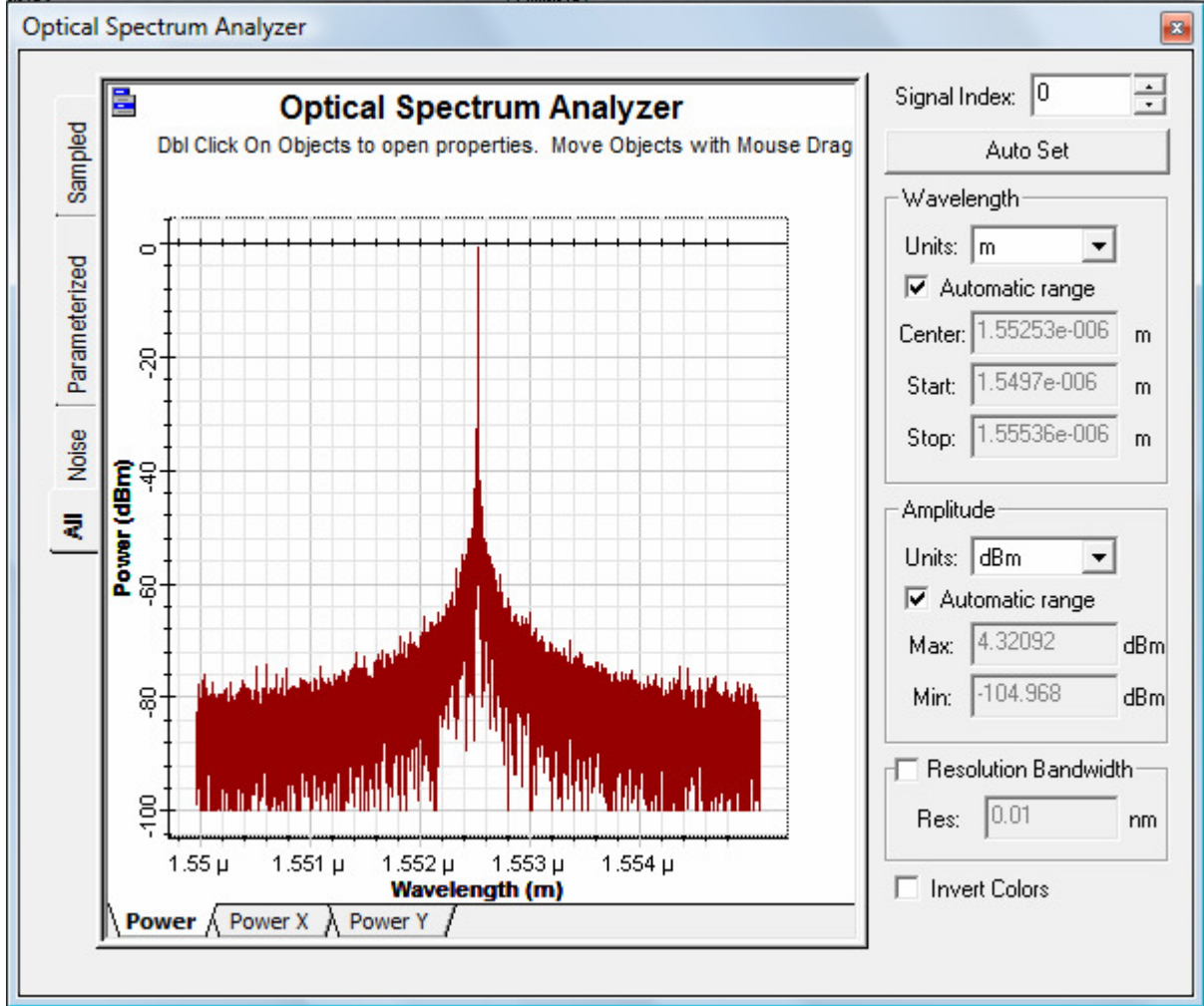
8.2 Birinci Tasarım

Bu bölümde, optik sistemlerin modellenmesi için, OptiSystem 7.0 yazılımı kullanılmıştır. Şekil 8.2’de basit bir düzenele doğrultu kuplörünün çalışma mekanizması simüle edilmiştir. Sistem, 193.1 THz frekansında çalışan ve gücü 0 dBm olan standart sürekli işaretli bir (CW, Continuous Wave) lazer ile beslenmiştir. Kuplaj katsayısı 0.5 olan, doğrultu kuplörünün çıkışlarından biri sonlandırılmış, diğer ikisi ise optik güç ölçer ve optik spektrum analizörü ile değerlendirilmiştir. (OptiSystem Library, 2007)



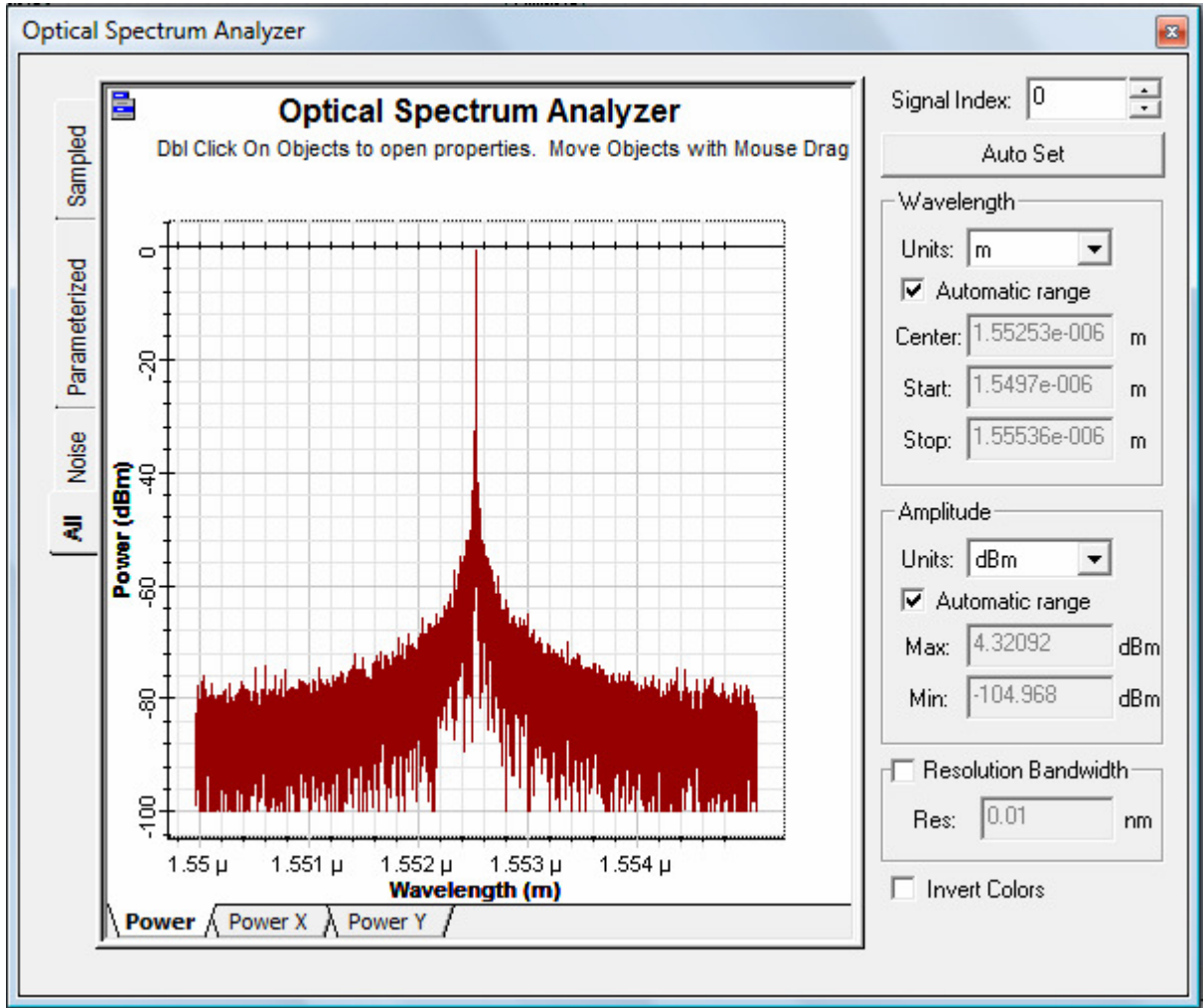
Şekil 8.2 Optik doğrultu kuplörü düzeneği

Şekil 8.3’de 193.1 THz’de çalışan sürekli işaretli lazerin gücünün dalgaboyuna göre değişimi verilmiştir. Lazerin tek bir dalgaboyunda gücü ilettiği ve diğer dalgaboylarında besleme yapmadığı görülebilmektedir.

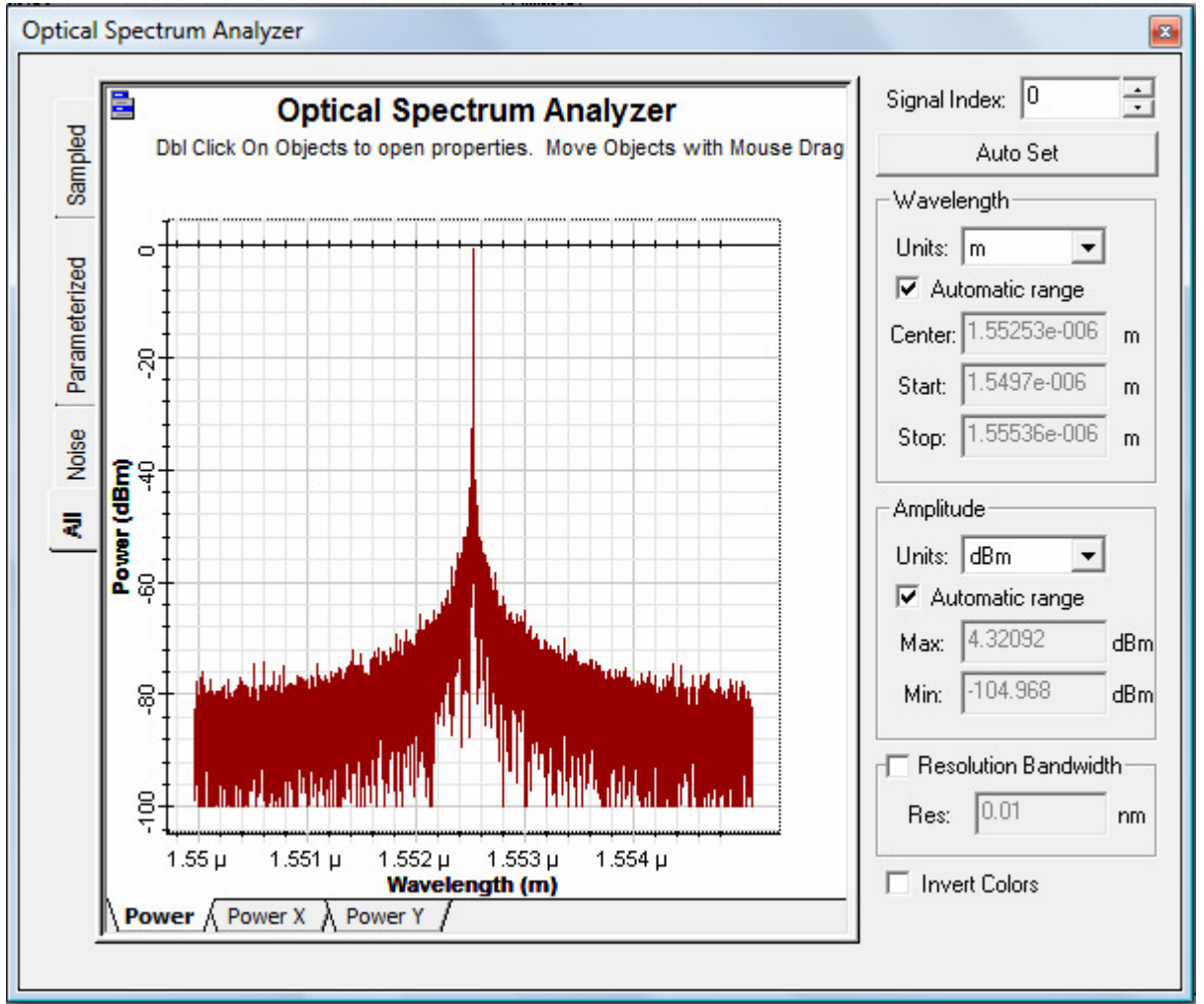


Şekil 8.3 193.1 THz’de çalışan sürekli işaretli lazerin çıkış gücünün dalgaboyuna göre değişimi

Optik doğrultu kuplörünün, çıkış kapılarına bağlanan optik spektrum analizörleri ile çıkış kapılarındaki gücün dalgaboyuna bağlı olarak değişimi gözlenmiştir. Şekil 8.4 ve Şekil 8.5’te, çıkış karakteristiklerinin benzer özellikte olduğu ve çıkış güçlerinin azaldığı görülmektedir.

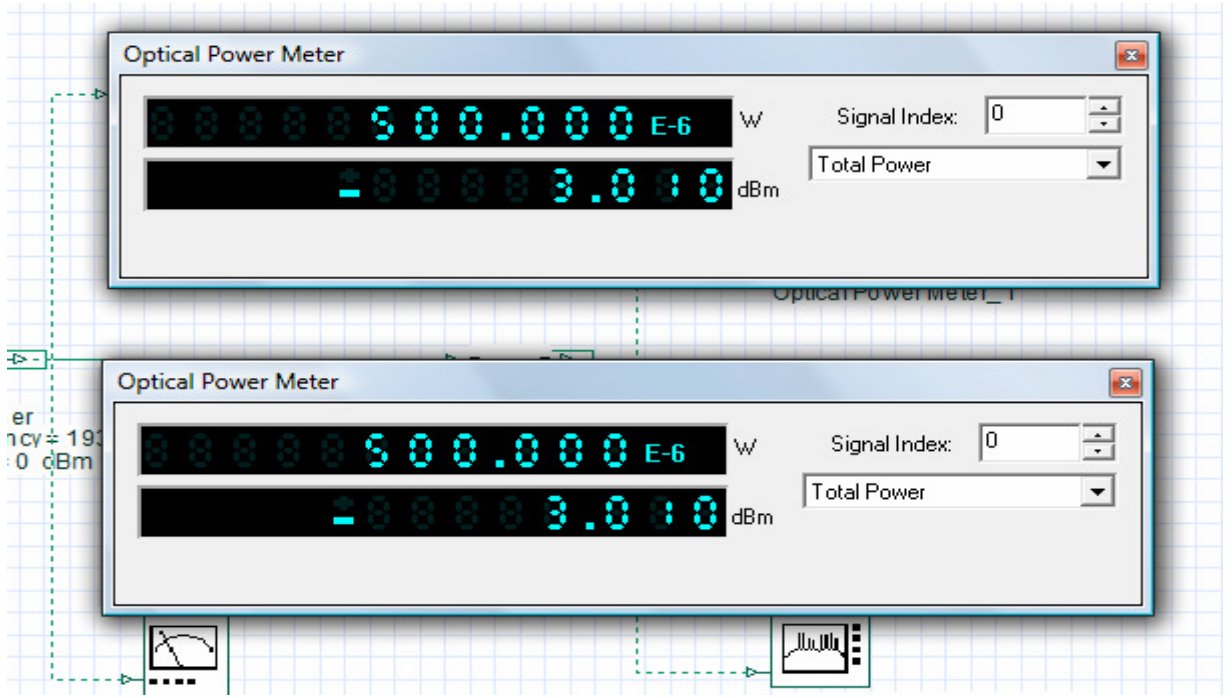


Şekil 8.4 Optik doğrultu kuplörünün birinci çıkış kapısındaki gücün dalgaboyuna göre değişimi



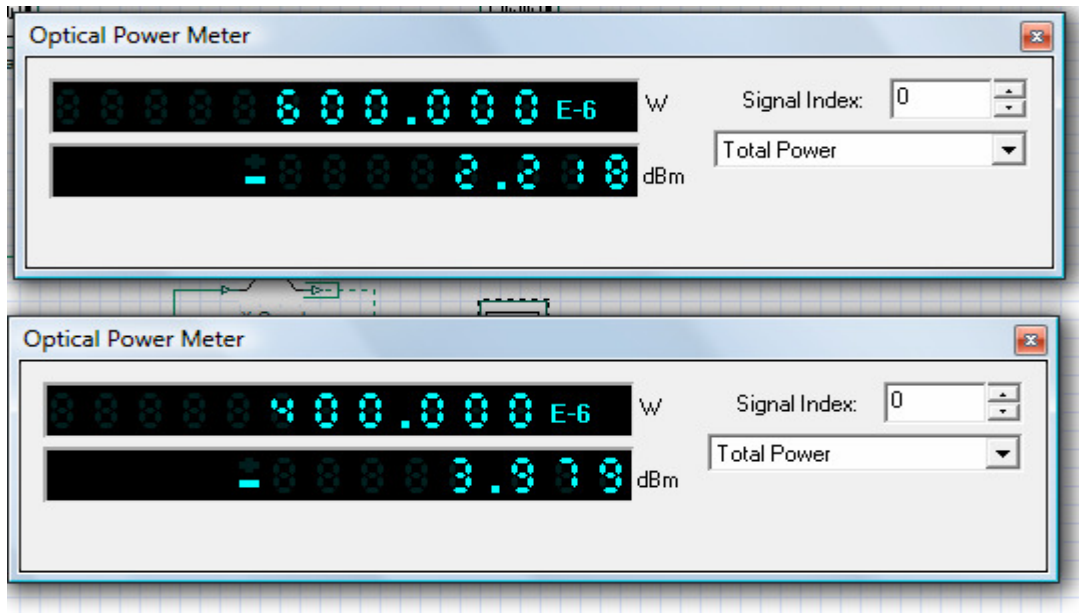
Şekil 8.5 Optik doğrultu kuplörünün ikinci çıkış kapısındaki gücün dalgaboyuna göre değişimi

Optik doğrultu kuplörünün çıkış kapıları, optik güç ölçer ile incelenmiş ve Şekil 8.6'da görüldüğü gibi, her iki çıkış kapısı için toplam gücün -3.010 dBm olduğu görülmüştür.



Şekil 8.6 Kuplaj katsayısı 0,5 olan optik doğrultu kuplörünün birinci ve ikinci çıkış kapılarındaki toplam güç bilgisi

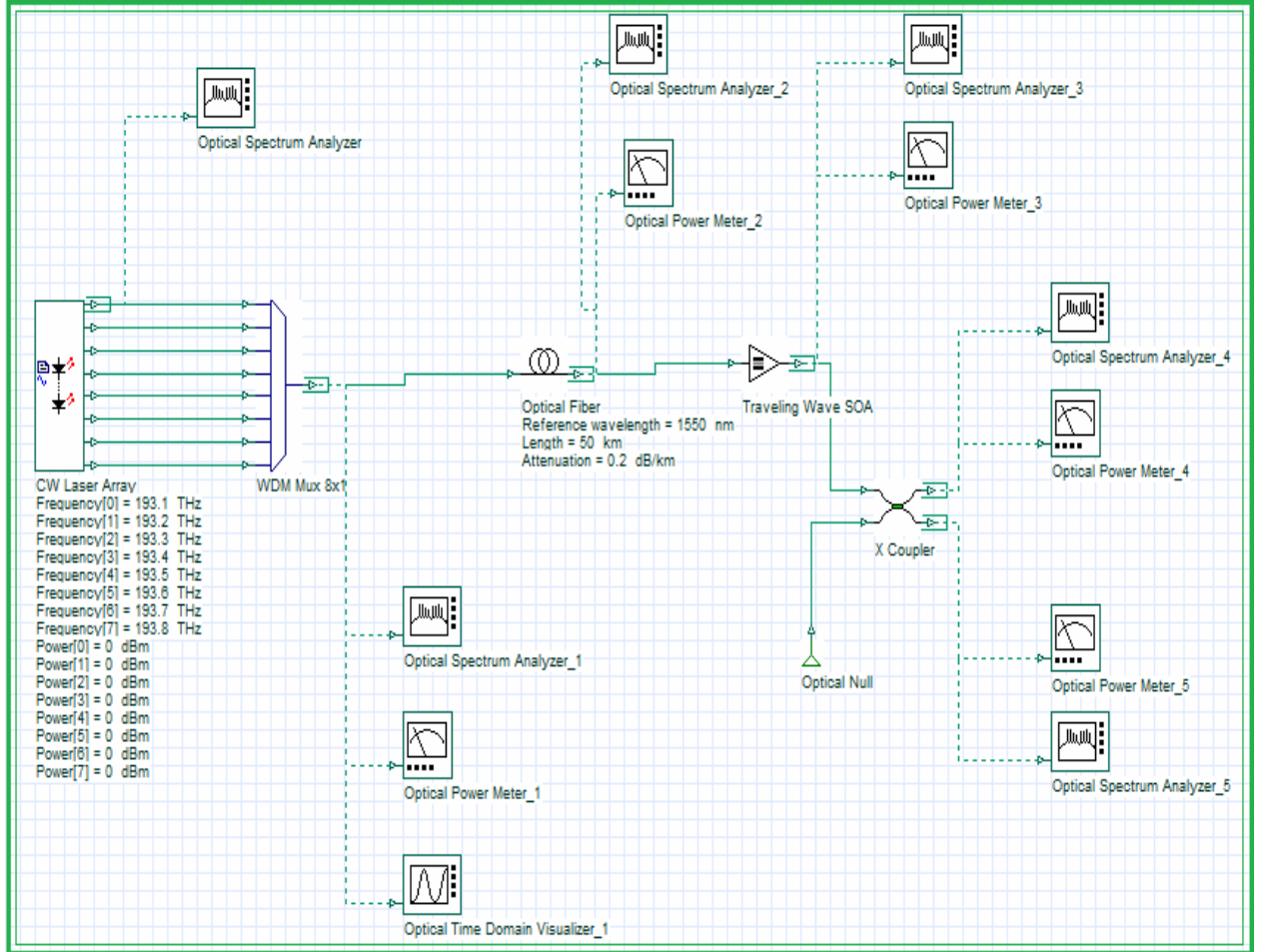
Şekil 8.7’de ise kuplaj katsayısı 0.4 olduğu durumda çıkış kapılarındaki güç değişimi yer almaktadır. Kuplaj katsayısı azaldığında, birinci kapının çıkış gücünün azaldığı, ikinci kapının çıkış gücünün ise arttığı gözlenmiştir.



Şekil 8.7 Kuplaj katsayısı 0,4 olan optik doğrultu kuplörünün birinci ve ikinci çıkış kapılarındaki toplam güç bilgisi

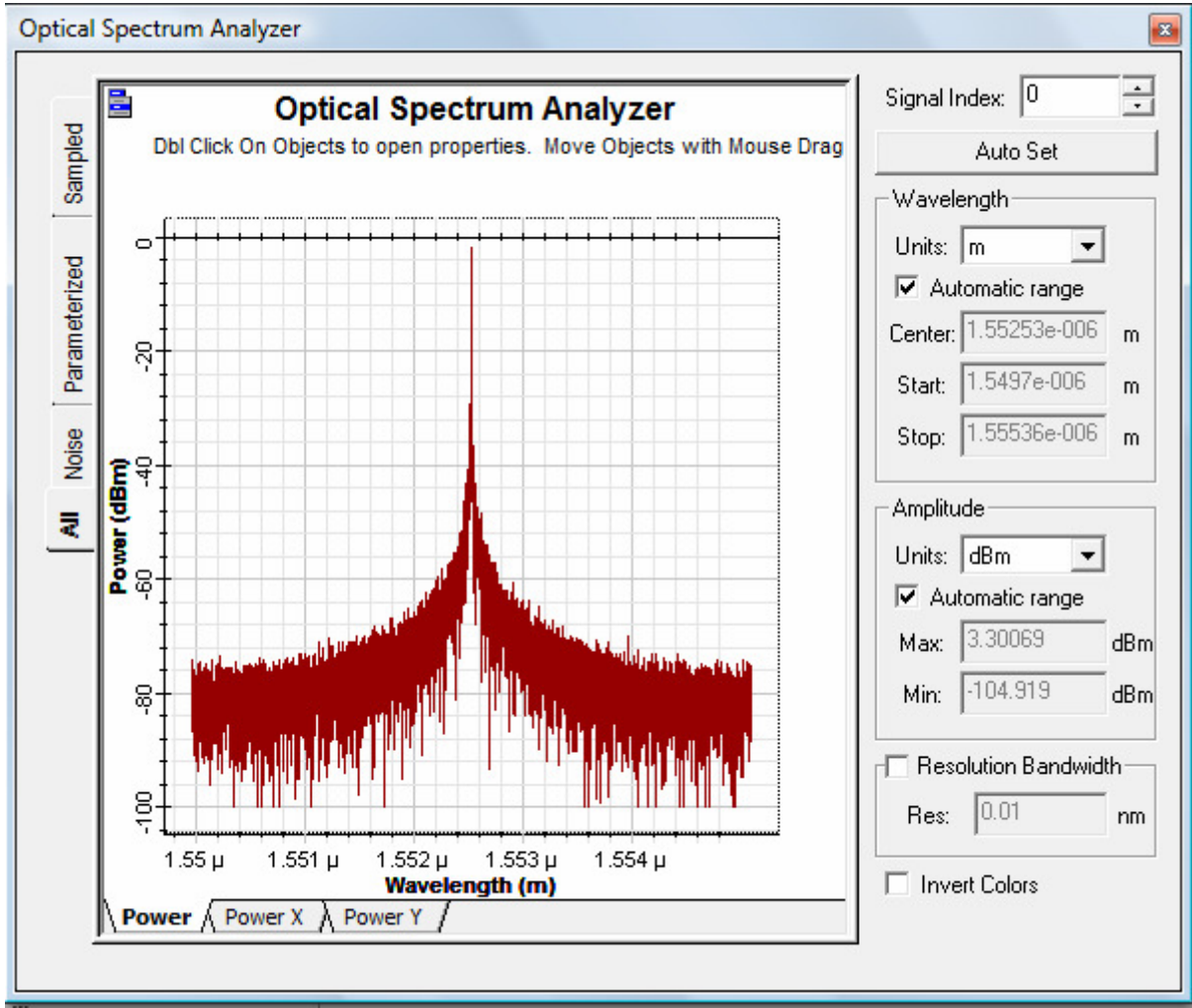
8.3 İkinci Tasarım

Bu bölümünde, doğrultu koplörü bir haberleşme sistemi içinde analiz edilmiştir. Şekil 8.8’de yer alan sistem, 0.1 THz’lik frekans değişimi ile 193.1-193.8 THz aralığında çalışan ve her kanalı 0 dBm gücünde olan ve sürekli işaretli bir lazer dizisi ile beslenmiştir. 8 kanallı lazer dizisinin çıkışı ideal çoğullayıcıya verilerek çoğullanmış işaret elde edilmiştir. İşaret, 50 km boyunda ve 1550 nm dalgaboyunda çalışan ve 0,2 dB/km kayıplı olan optik fiber girişine verilmiştir. Optik fiber çıkışında zayıflama etkisi nedeniyle işaret ideal bir kuvvetlendirici ile kuvvetlendirilmiştir. Kuvvetlendiricinin çıkışına eklenen optik güç ölçer ile doğrultu koplörünün giriş gücü ölçülerek çıkış güçleri ile ilişkilendirilmiştir.



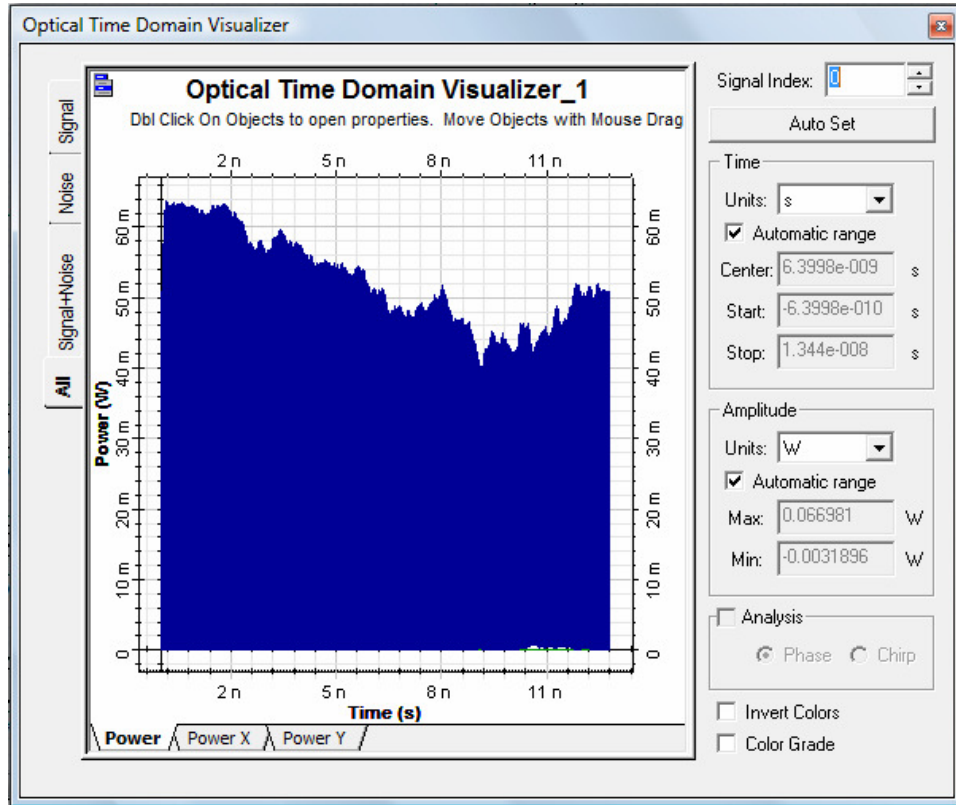
Şekil 8.8 Optik haberleşme sistemi modeli

Şekil 8.9’da sürekli işaretli lazer dizisinin, 193.1 THz’de çalışan birinci kanalı için çıkış gücünün dalgaboyuna göre değişimi verilmiştir.

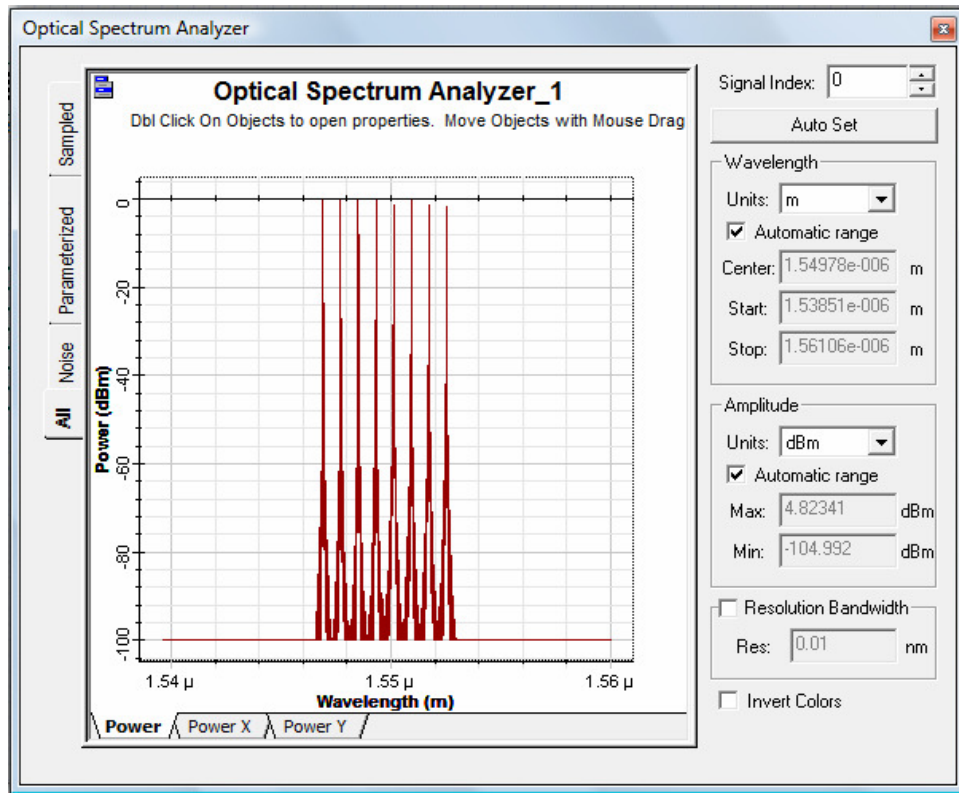


Şekil 8.9 Sürekli işaretli lazer dizisinin, 193.1 THz’de çalışan birinci kanalı için çıkış gücünün dalgaboyuna göre değişimi

Şekil 8.10 (a)’da ideal dalga bölmeli çoğullayıcının gücünün zaman domenindeki değişimi ve (b)’de dalga bölmeli çoğullayıcının gücünün dalgaboyuna göre değişimi verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 8.10 (a) Dalga bölmeli çoğulayıcının gücünün zaman domenindeki değişimi

(b) Dalgaboyu bölmeli çoğulayıcı gücünün dalgaboyuna göre değişimi

Şekil 8.11’de, dalga bölmeli çoğullayıcının çıkış gücü ile 50 km uzunluğunda olan optik fiberin çıkış gücü verilmiştir. 0.2 dB/km kayba sahip optik fiber boyunca toplam güç, 10 dB’lik kayba uğradığı gözlenmektedir.



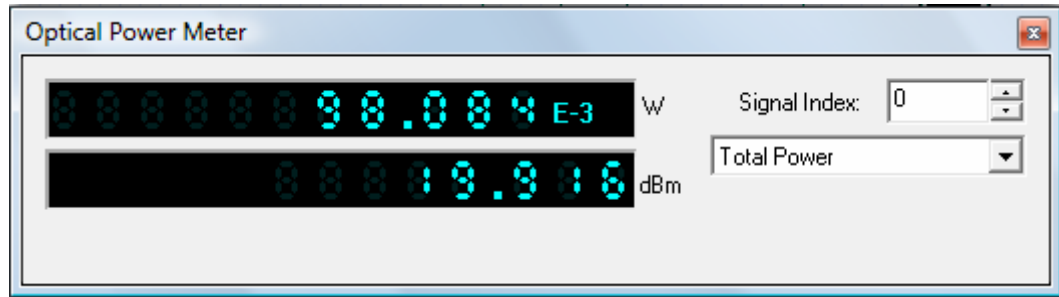
(a)



(b)

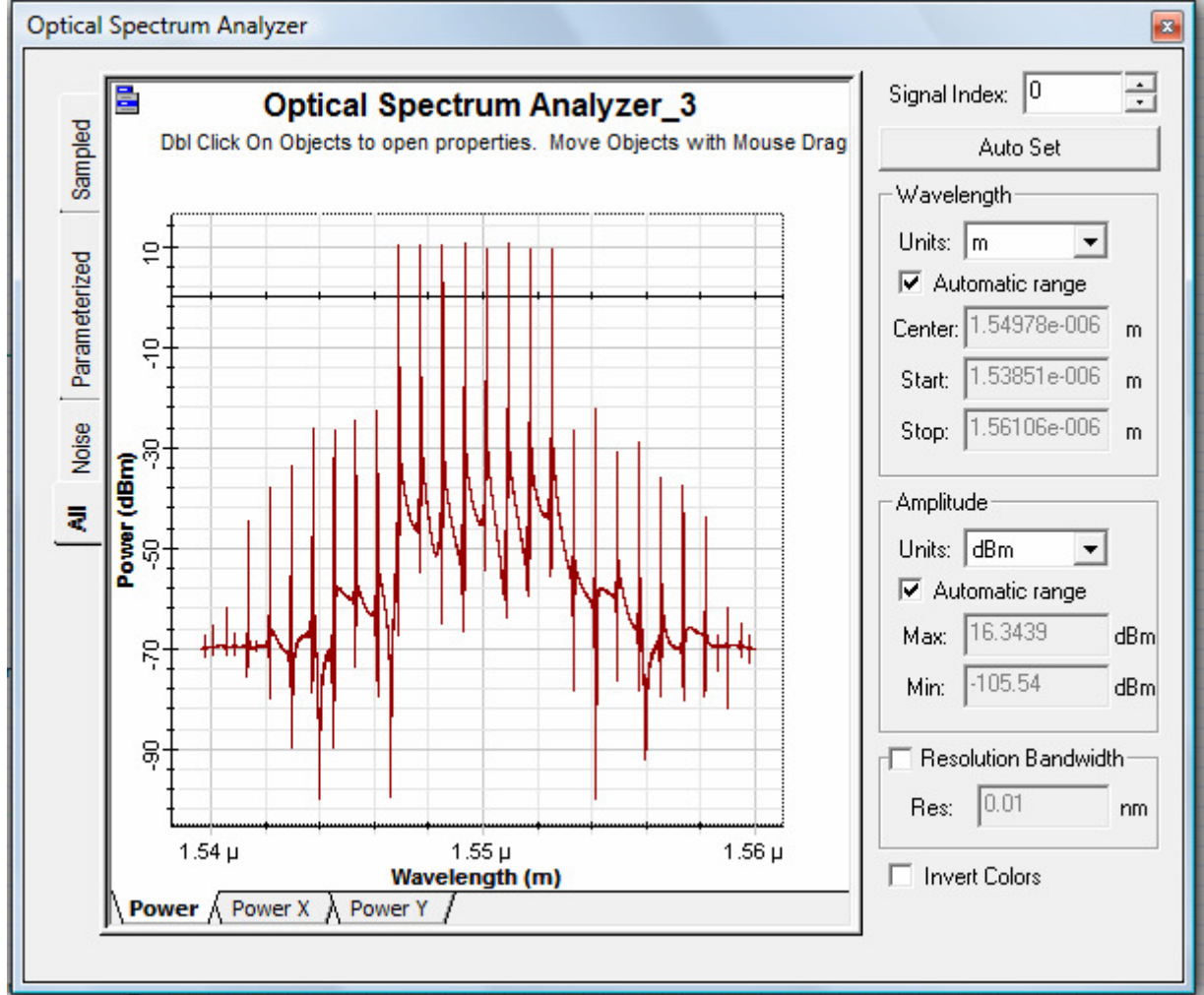
Şekil 8.11 (a) Dalga bölmeli çoğullayıcının çıkış gücü
(b) Optik fiberin çıkış gücü

Optik fiber çıkışında zayıflamış olan işaret, bir yarıiletken optik kuvvetlendirici ile güçlendirilerek optik kuplöre aktarılmıştır. Şekil 8.12’de yarıiletken optik kuvvetlendiricinin çıkışındaki işaretin gücü görülmektedir.



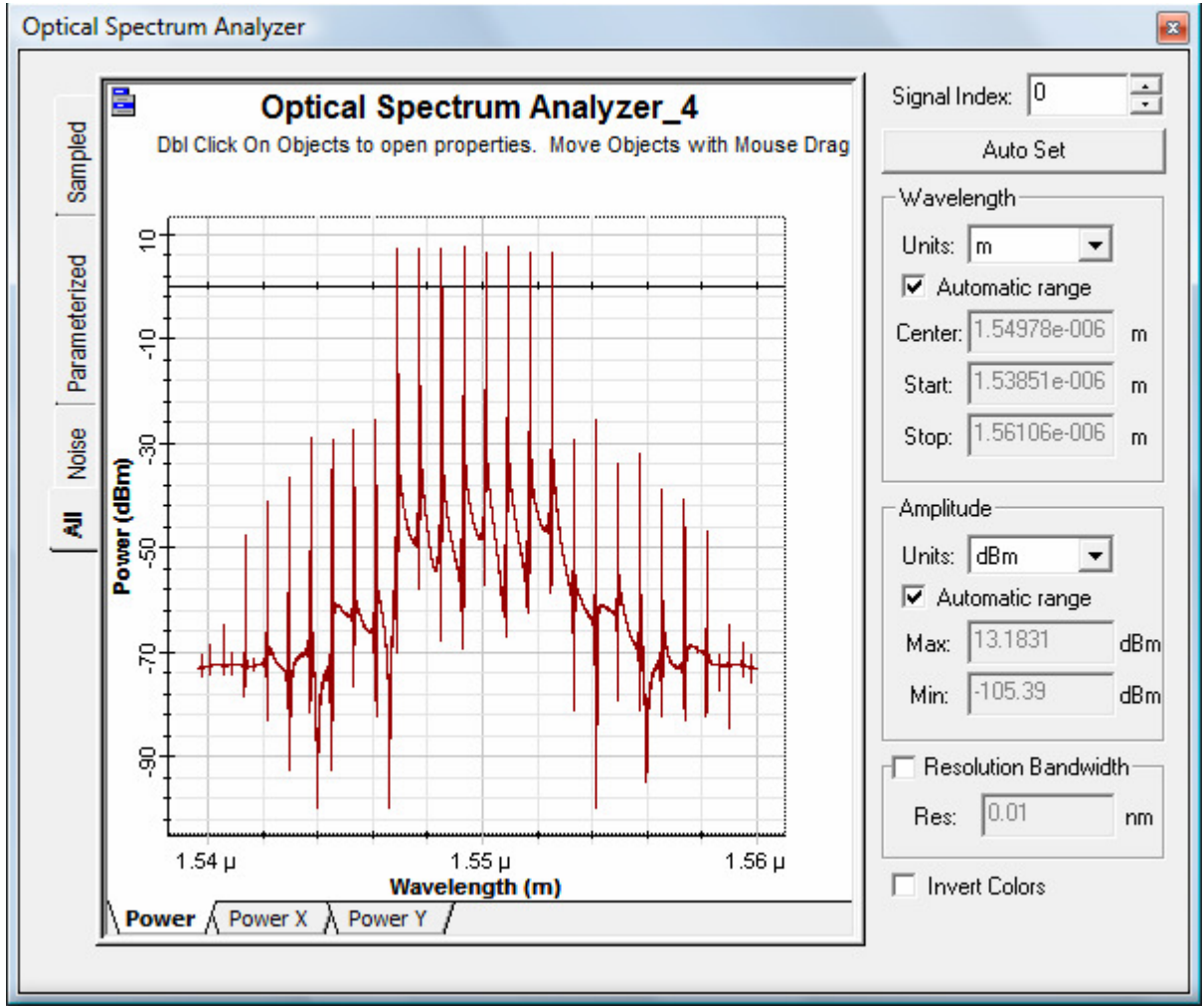
Şekil 8.12 Yarıiletken optik kuvvetlendiricinin çıkışındaki işaretin gücü

Şekil 8.13’de yarıiletken optik kuvvetlendirici çıkışındaki işaretin gücünün dalgaboyuna göre değişimi görülmektedir.

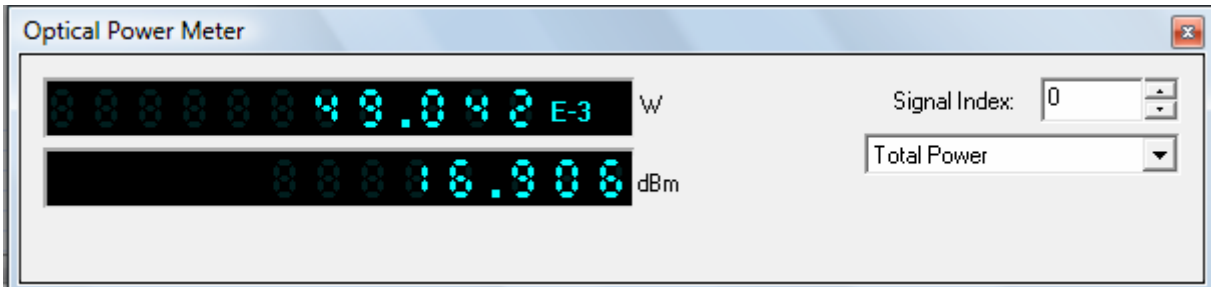


Şekil 8.13 Yarıiletken optik kuvvetlendirici çıkışındaki işaretin gücünün dalgaboyuna göre değişimi

Şekil 8.14’de kuplaj katsayısının 0,5 olduğu durumda, optik doğrultu kuplörünün, birinci çıkış kapısının gücünün, dalgaboyuna göre değişimi ve optik güç ölçerin çıkışı, Şekil 8.15’de ise kuplörün ikinci çıkış kapısının gücünün, dalgaboyuna göre değişimi ve optik güç ölçerin çıkışı görülmektedir.



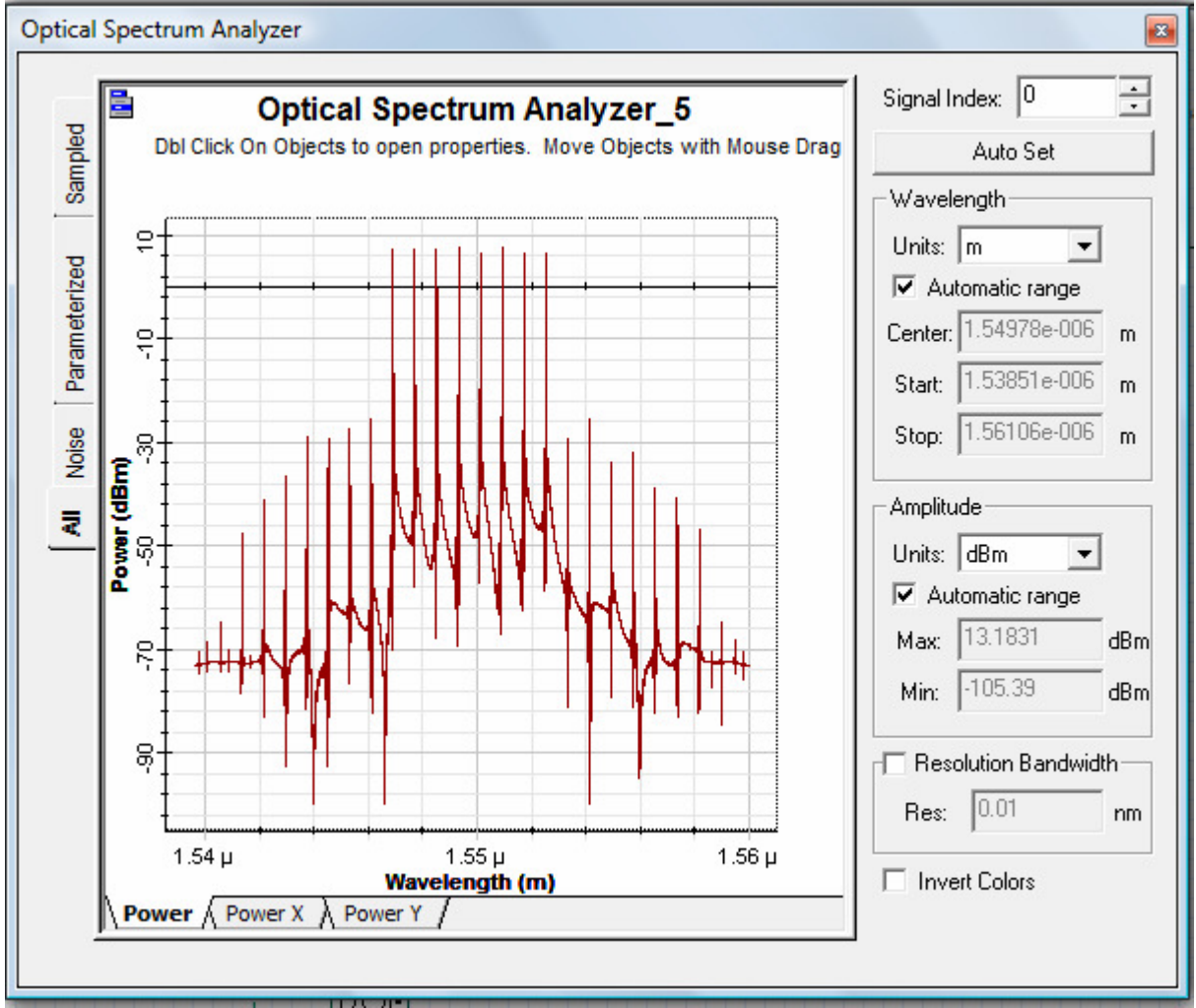
(a)



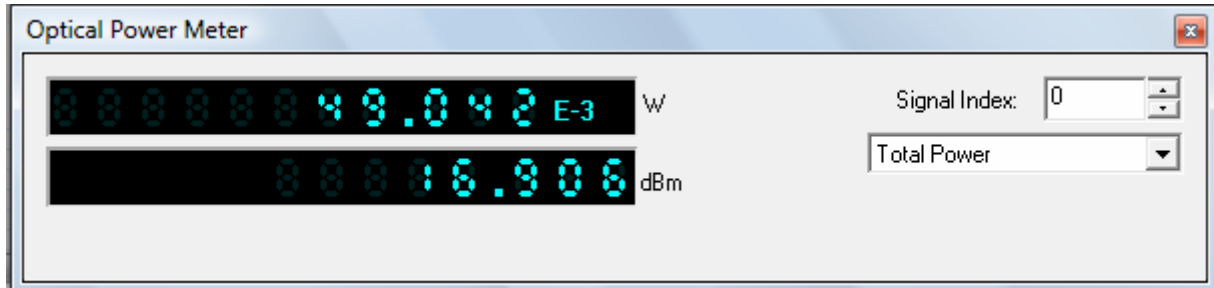
(b)

Şekil 8.14 (a) Kuplaj katsayısının 0,5 olduğu durumda, optik doğrultu kuplörünün birinci çıkış kapısının gücünün, dalgaboyuna göre değişimi

(b) Optik doğrultu kuplörünün birinci çıkış kapısının gücü



(a)



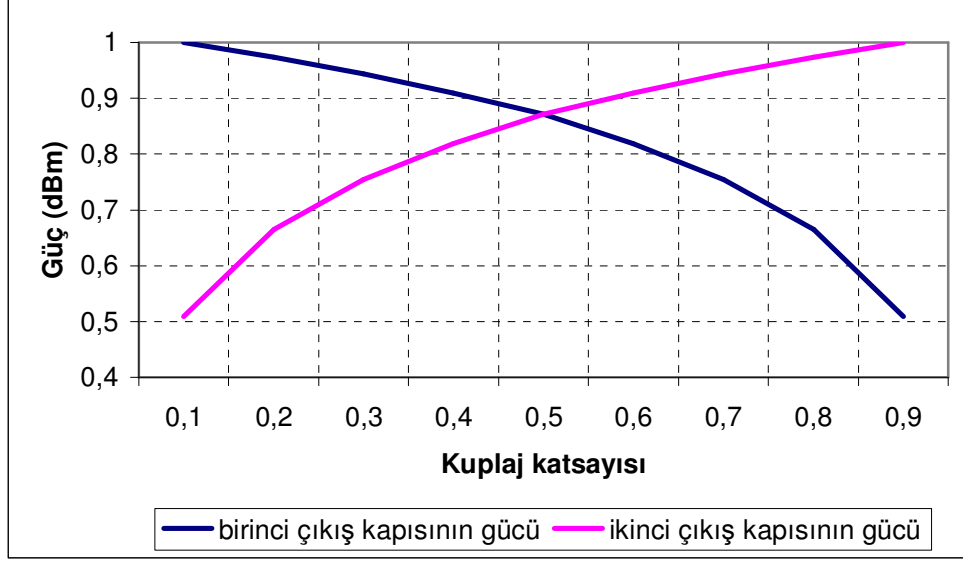
(b)

Şekil 8.15 (a) Kuplaj katsayısının 0,5 olduğu durumda, optik doğrultu kuplörünün ikinci çıkış kapısının gücünün, dalgaboyuna göre değişimi

(b) Optik doğrultu kuplörünün ikinci çıkış kapısının gücü

Şekil 8.14 ve Şekil 8.15’de verilen grafiklerde, kuplaj katsayısının 0,5 olduğu durumda, optik doğrultu kuplörünün, giriş gücünü, birbirlerine eşit olacak biçimde çıkış kapılarına aktardığı görülmektedir.

Kullanılan optik doğrultu kuplörünün kuplaj katsayısı 0,1 ile 0,9 değerleri arasında değiştirilerek ve çıkış kapılarındaki güç değişimleri normalize edilerek Şekil 8.16’da verilen grafik elde edilmiştir.



Şekil 8.16 Optik doğrultu kuplörünün gücünün kuplaj katsayısına göre değişimi

Şekil 8.16 optik doğrultu kuplörlerinin çalışma mekanizmasını ifade etmektedir. Analizde kuplaj katsayısının değişimi ile ilişkili olarak, birinci çıkış kapısının gücü azalırken, ikinci çıkış kapısının gücünün arttığı gözlenmektedir. Bu durum optik doğrultu kuplörünün çalışma prensiplerini desteklemektedir.

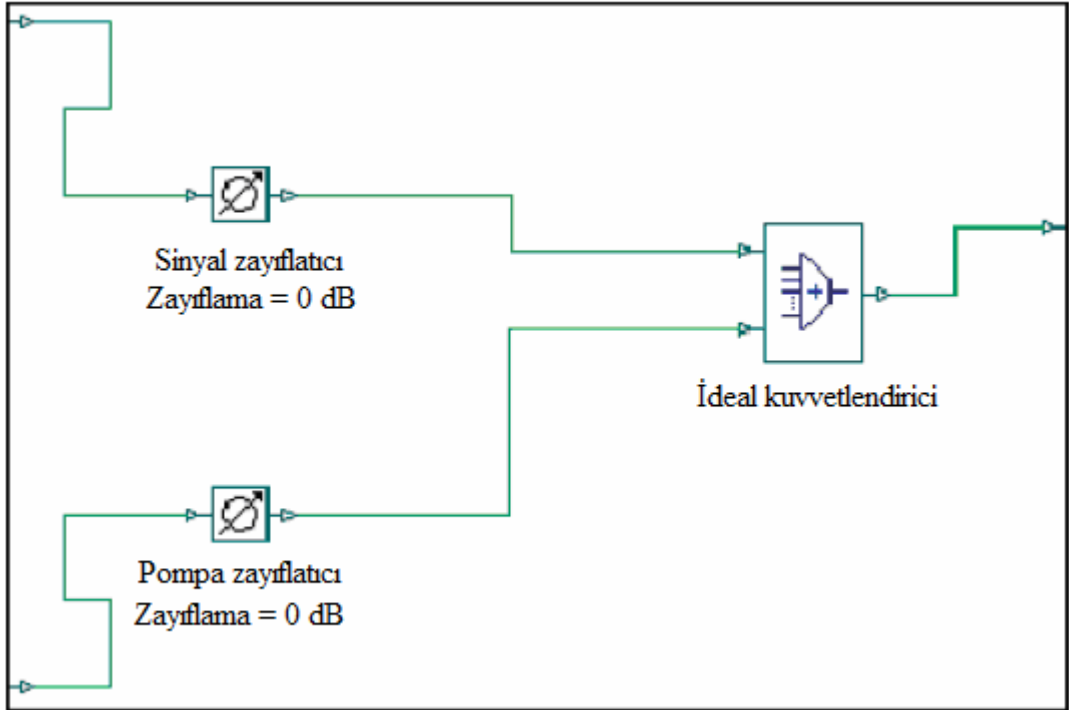
8.4 Üçüncü Tasarım

Bu bölümünde, pompa kuplör mekanizmaları incelenmiştir. Çalışma mekanizması Şekil 8.17’de verilen pompa kuplörü, sinyal zayıflamasının ve pompa zayıflamasının birbirinden bağımsız olarak kontrol edilmesinin istendiği noktalarda bağımsız pompa alt sistemleri oluşturmak için kullanılır.



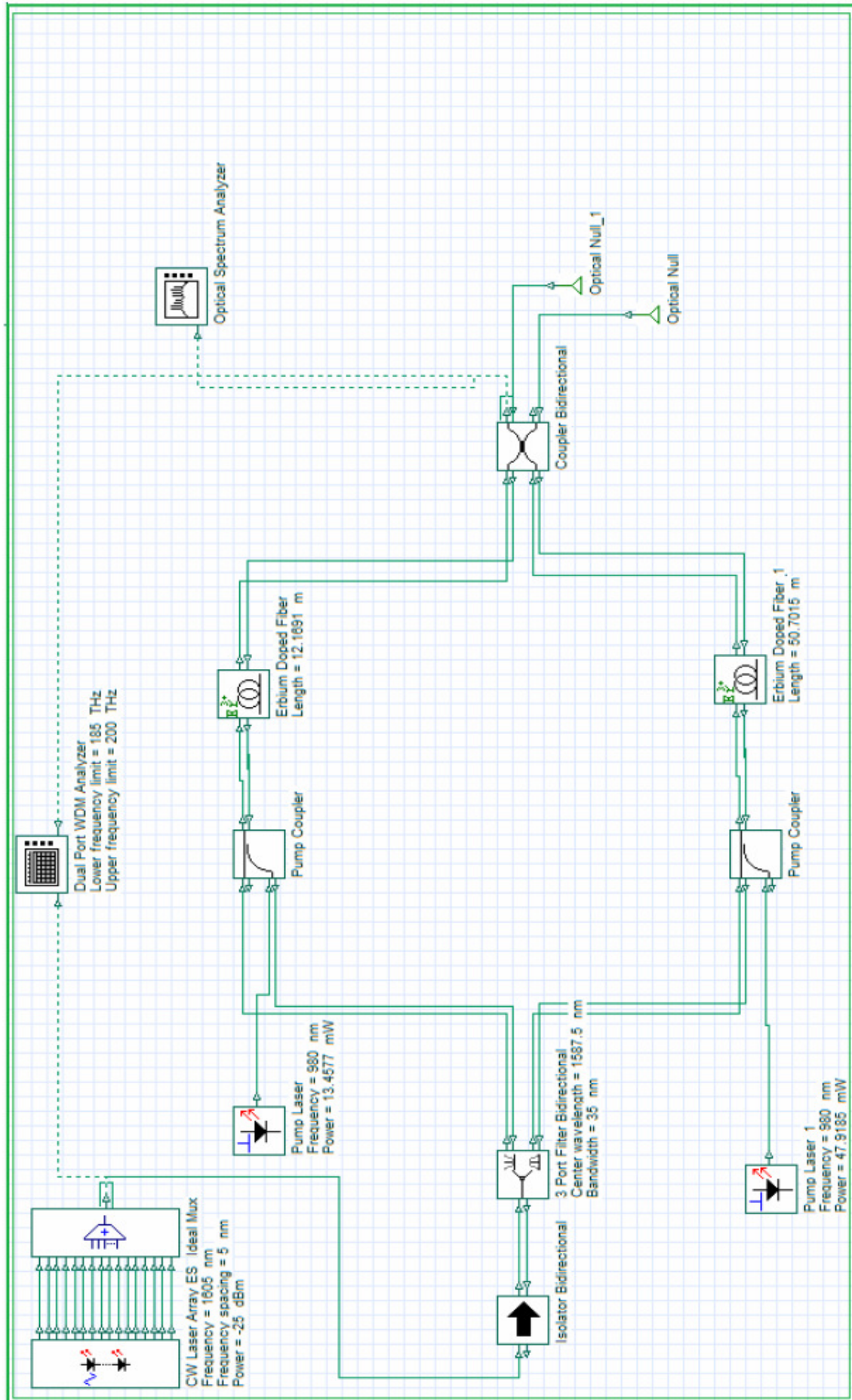
Şekil 8.17 Pompa kuplörü genel çalışma mekanizması

OptiSystem 7.0 simülasyon yazılımında kullanılan pompanın kuplörü (pump coupler co-propagating) teknik alt yapısı, Şekil 8.18’de verilmiştir (OptiSystem 7.0 Component Library, Optiwave, 2008).



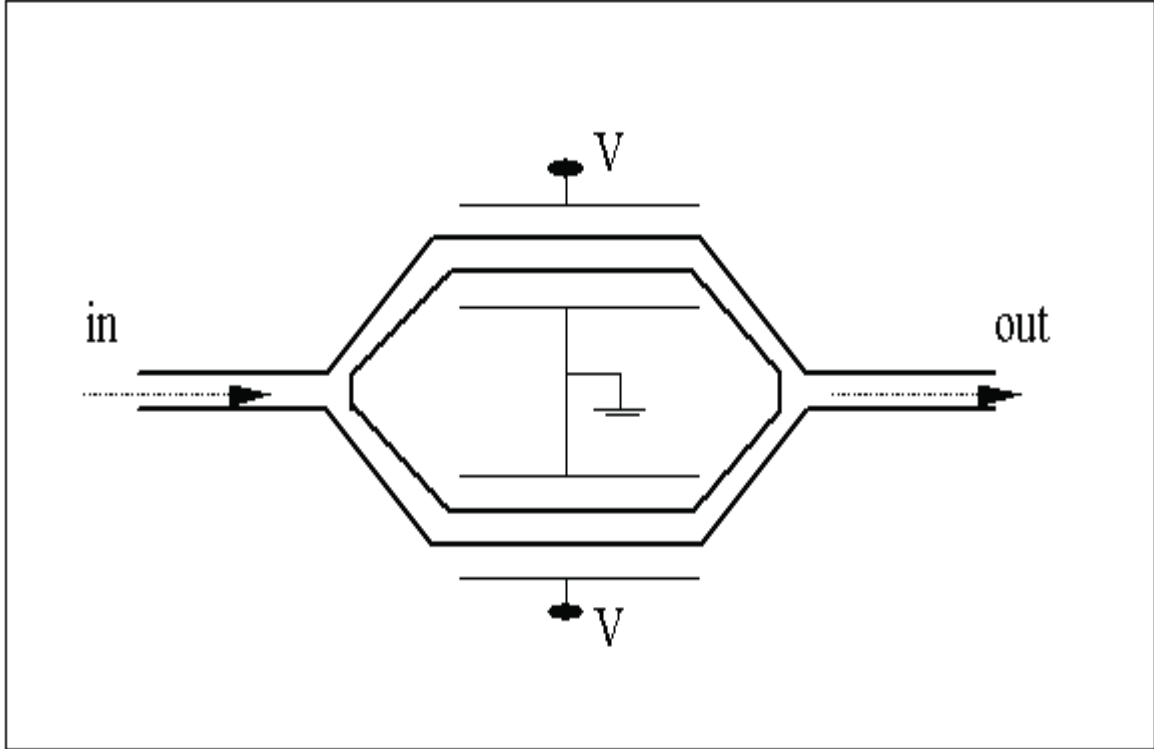
Şekil 8.18 Pompa kuplörü teknik altyapısı

Pompa kuplöründe, giriş sinyalleri birbirlerinden bağımsız olarak zayıflatılarak ideal bir çoğullayıcı yardımıyla çıkışa verilmektedir. Bu bölümde yer alan simülasyonlarda, optik pompa kuplörünün çalışma mekanizması değerlendirilmiştir.



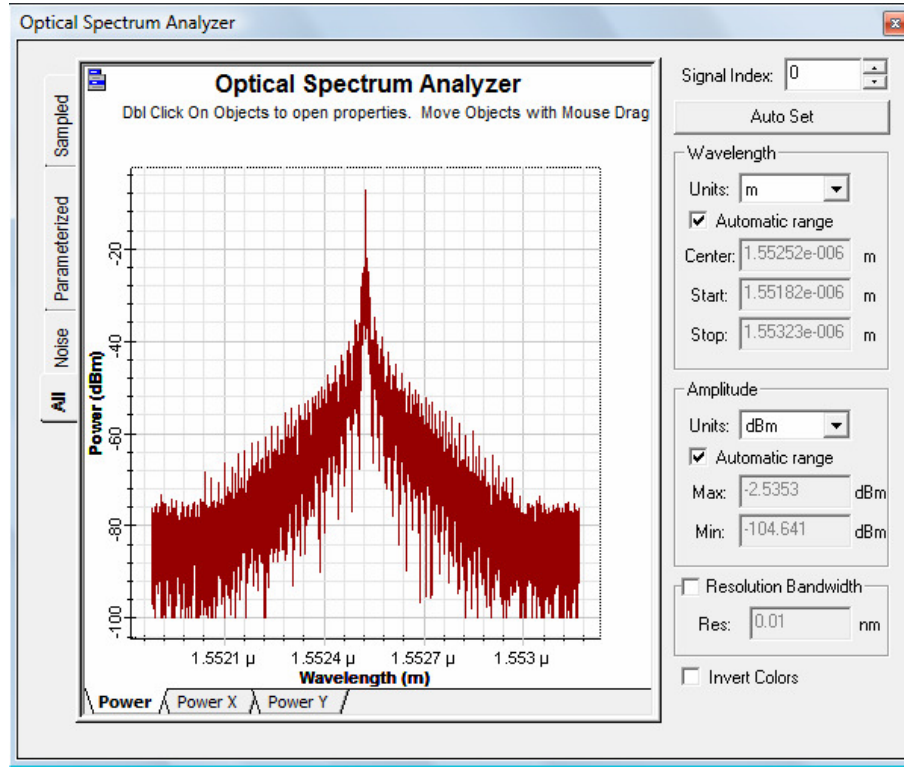
Şekil 8.30 Ayrık bantlı kuvvetlendirici tasarımı

Şekil 8.19’de verilen sistem birer optik verici alt sistemi ile beslenmiştir. Bu alt sistemlerden her birinde bir bit dizisi üretici ile sayısal bir dizi elde edilerek bu işaretlerle bir darbe üretici beslenmektedir. Darbe üreticinin çıkışı ve bir sürekli işaretli lazer ise bir Mach-Zehnder modülatörü beslemektedir. Mach-Zehnder modülatörde eşit boylarda iki adet dalga kılavuzunun birleştirilmesinden oluşan iki adet kuplör yer alır, taşıyıcı sinyali optik, modülasyon işareti ise elektriksel olan bir modülatördür ve çıkışı optik bir işarettir. Modülatörün karakteristiği, Şekil 8.20’de verilmiştir.

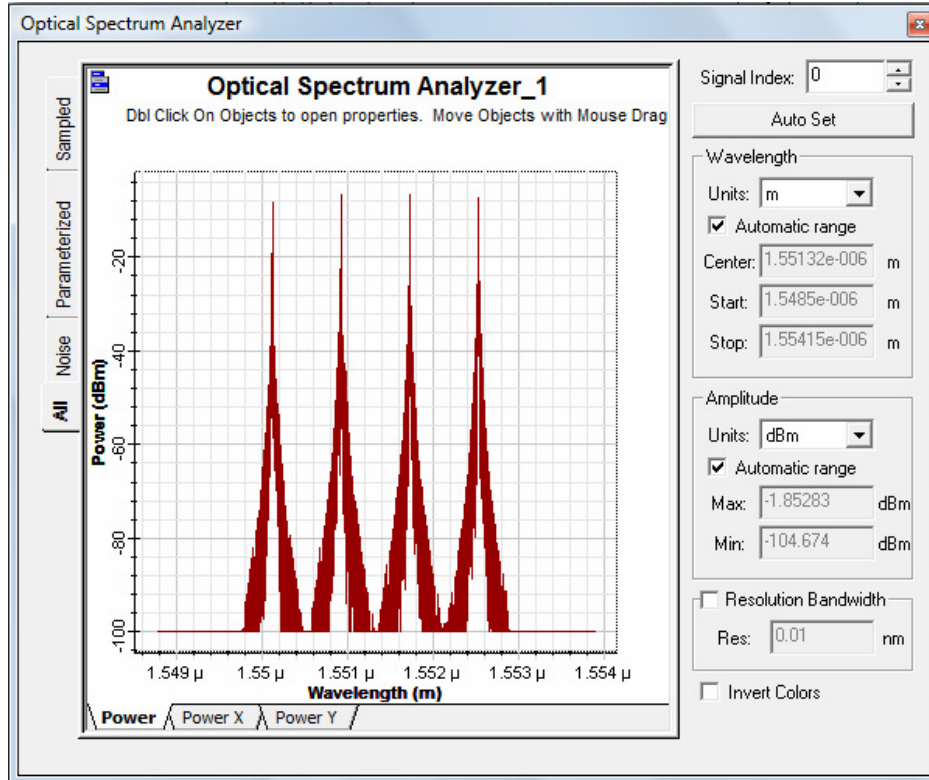


Şekil 8.20 Mach-Zehnder modülatör

Şekil 8.21’de Mach-Zehnder modülatör gücünün dalga boyuna göre değişimi görülmektedir (OptiSystem 7.0 Component Library, Optiwave, 2008). Dört adet optik verici alt sistemi çıkışı bir ideal çoğullayıcı ile çoğullanmış ve ideal bir izolatör üzerinden erbium katkılı fiber kuvvetlendiriciye uygulanmıştır. Çoğullayıcının çıkışında elde edilen işaret, Şekil 8.22’de verilmiştir. EDFA’nın diğer girişi ise bir pompa lazeri ile beslenmiştir ve bir ideal izolatör üzerinden çoğullayıcı yardımı ile bir optik alıcıya iletilmiştir.

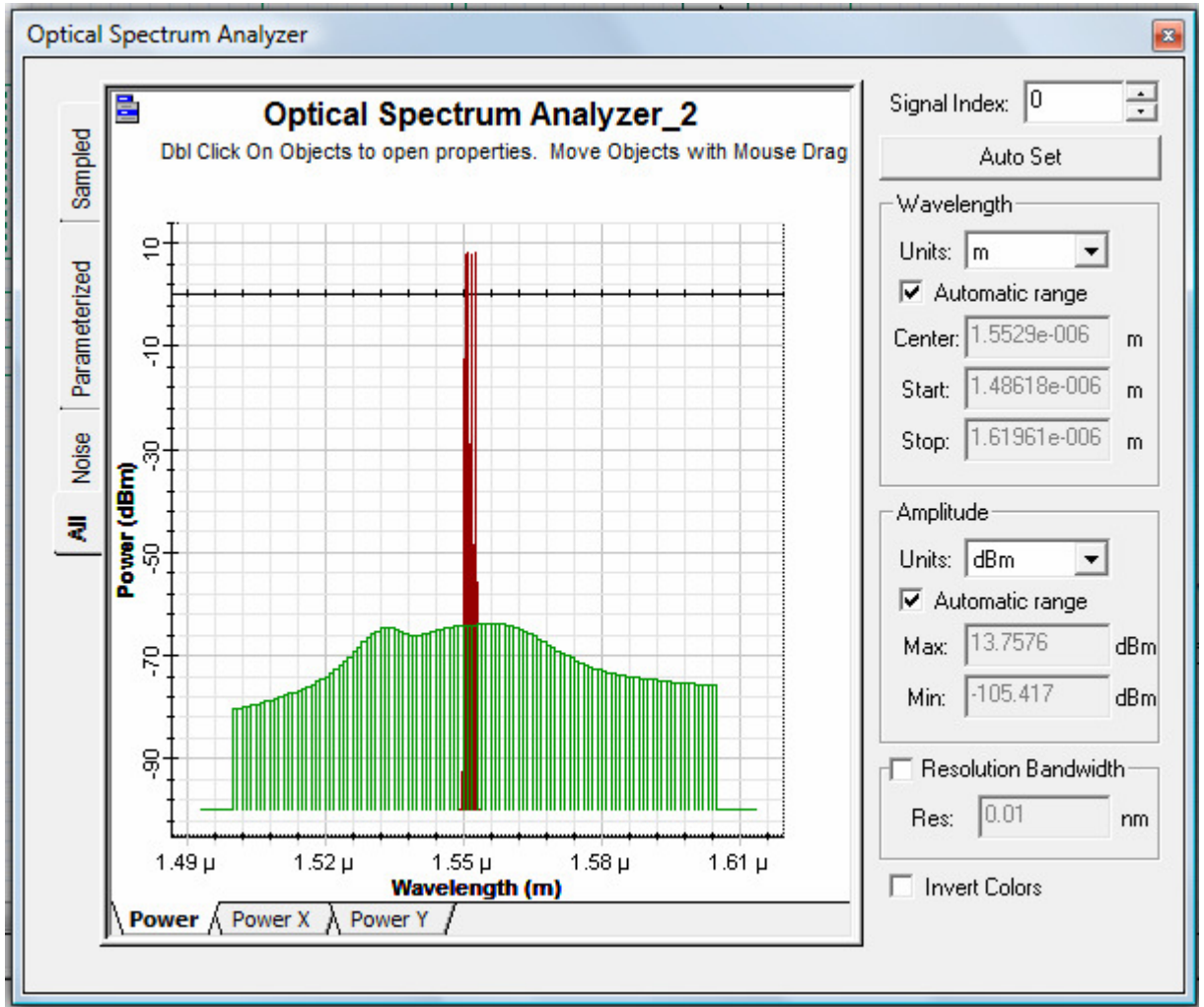


Şekil 8.21 Mach-Zehnder modülörün gücünün dalga boyuna göre değişimi

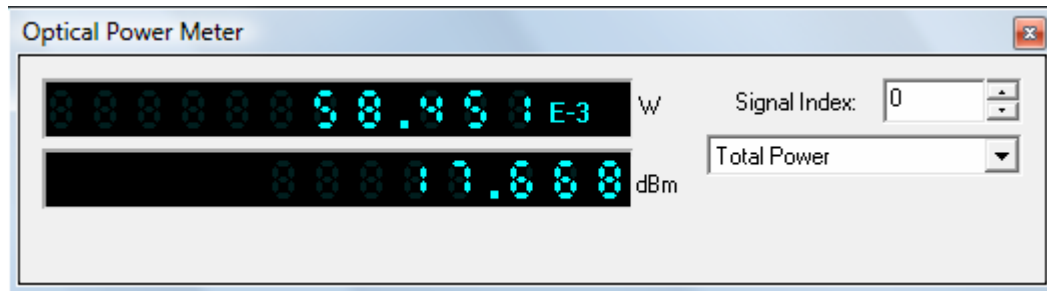


Şekil 8.22 İdeal çoğullayıcının gücünün dalgaboyuna göre değişimi

EDFA çıkışında elde edilen işaret bir optik spektrum analizörü ve optik güç ölçer ile analiz edilmiştir.

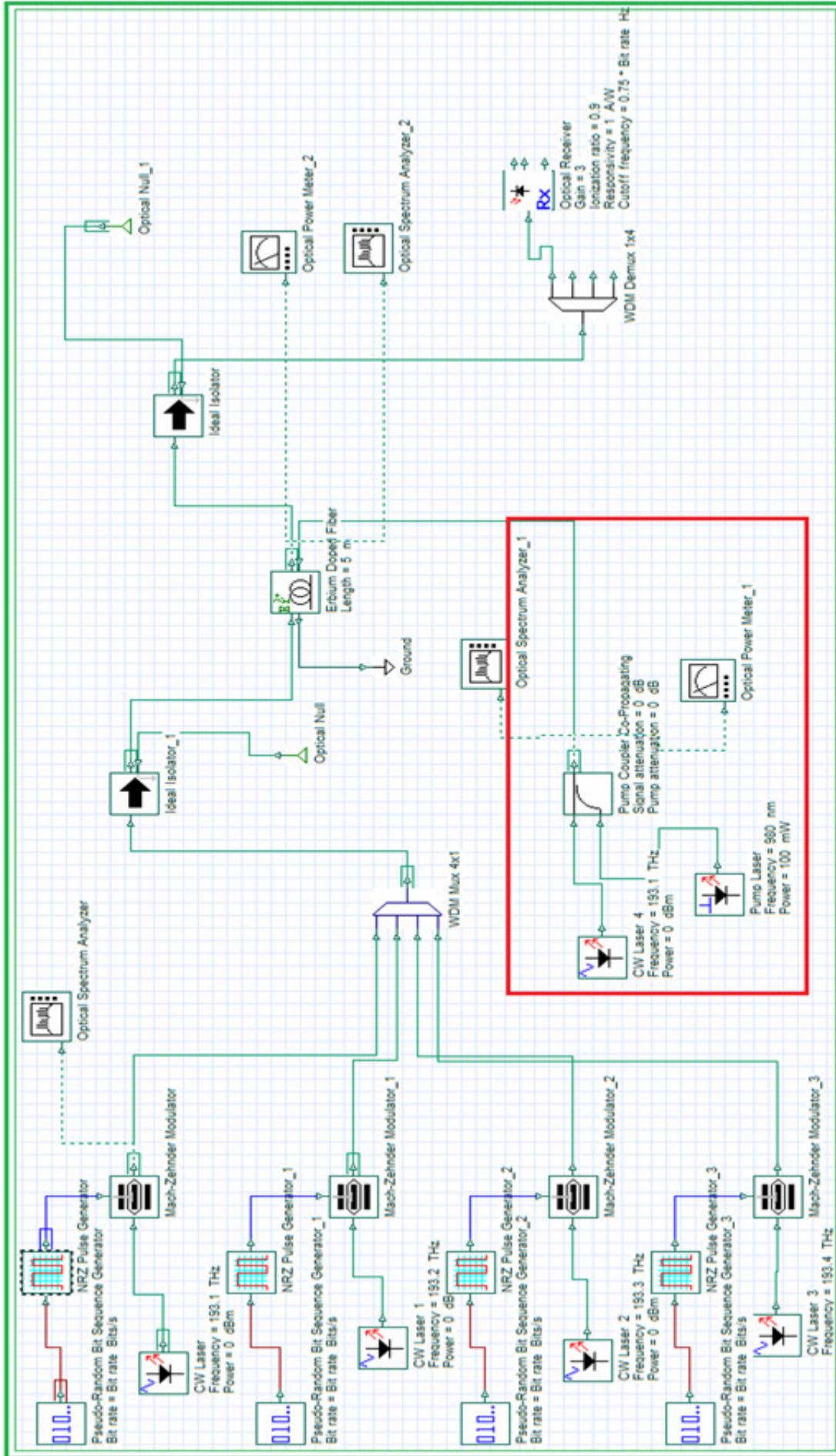


Şekil 8.23 EDFA çıkış işaretinin gücünün dalgaboyuna göre değişimi



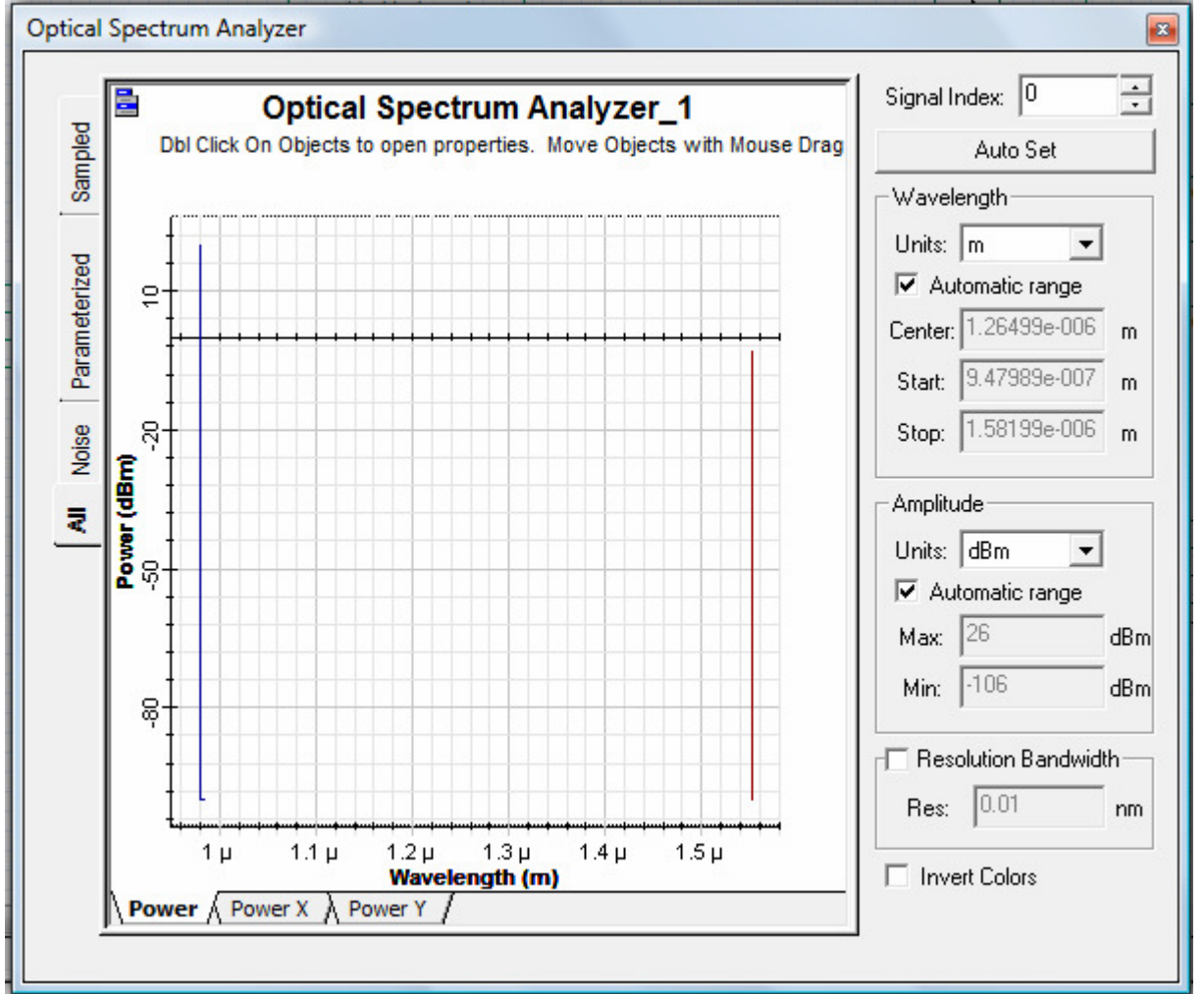
Şekil 8.24 EDFA çıkış işaretinin gücü

Şekil 8.19’de verilen tasarımda EDFA bir pompa kuplörü ile beslenmiştir. Şekil 8.25’de ise aynı tasarım pompa kuplörü alt sistemi ile beslenmiş ve kuplörün çalışma mekanizması irdelenmiştir. Daha önce bahsedildiği gibi, pompa kuplörü giriş sinyalinin ve pompa gücünün birleştirilerek zayıflatılmasını sağlar, bu tasarımda pompa kuplörünün zayıflatma etkisi özelliği analiz edilecektir.



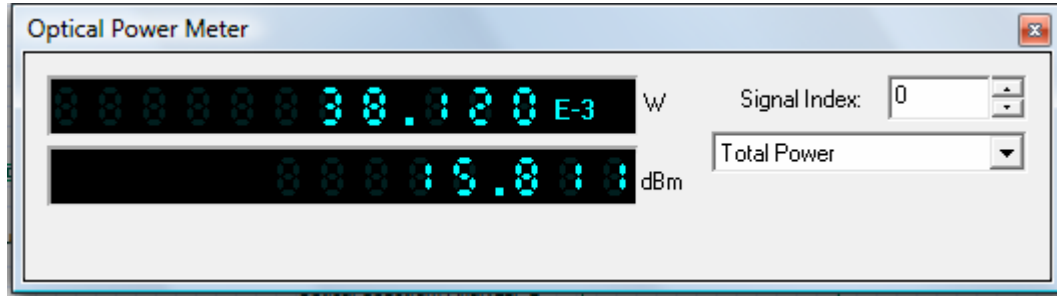
Şekil 8.25 Optik haberleşme sistemi içinde yer alan, pompa kuplörü alt sistemi ile beslenmiş erbiyum katkılı fiber kuvvetlendirici

Şekil 8.25’de verilen sistemde, EDFA’yı besleyen pompa kuplörü alt sistemi kırmızı dikdörtgen belirteç ile işaretlenmiştir. Pompa kuplörünün çıkışı bir optik spektrum analizörüne iletilerek analiz edilmiş ve çıkış işareti Şekil 8.26’da verilmiştir.

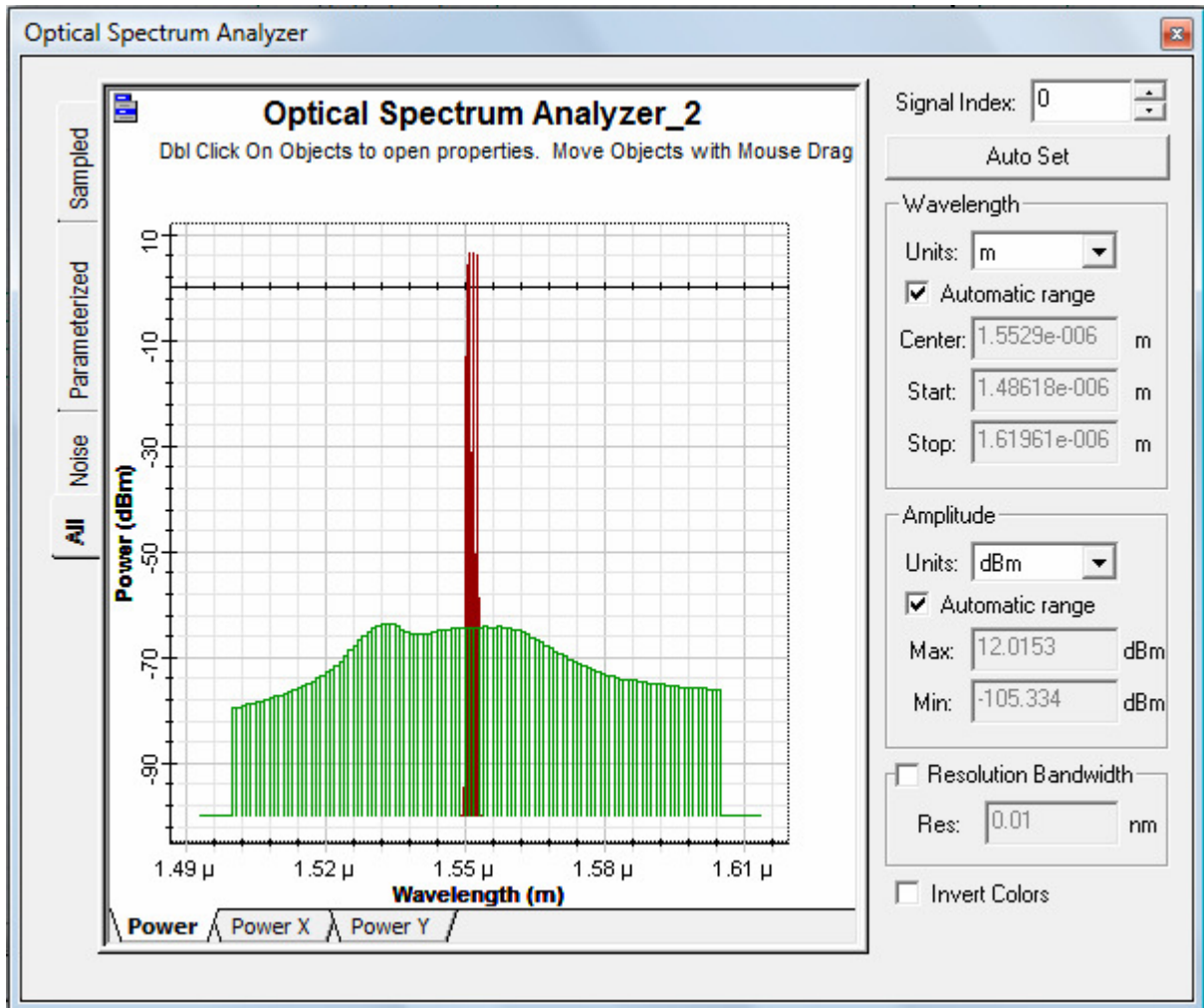


Şekil 8.26 Pompa kuplörü çıkış gücünün dalgaboyuna göre değişimi

Şekil 8.26’da solda yer alan işaret pompa işaretine, sağda yer alan ise işaret ise giriş sinyaline aittir.



Şekil 8.27 EDFA'nın çıkış işaretinin gücü

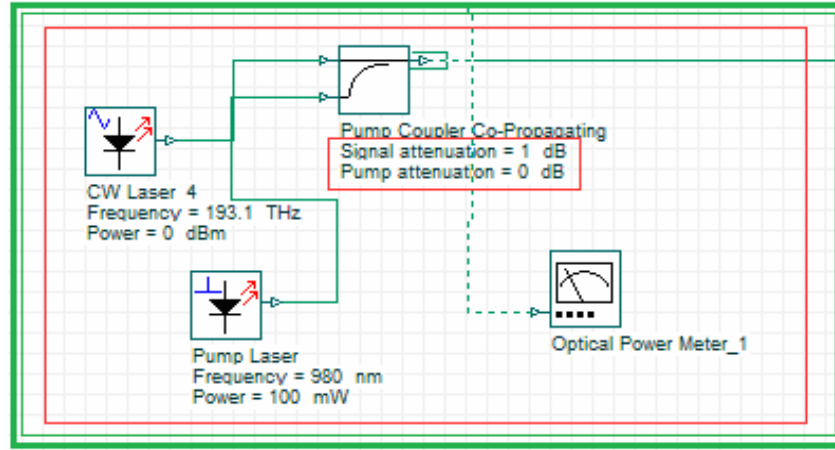


Şekil 8.28 EDFA çıkış işaretinin gücünün dalgaboyuna göre değişimi

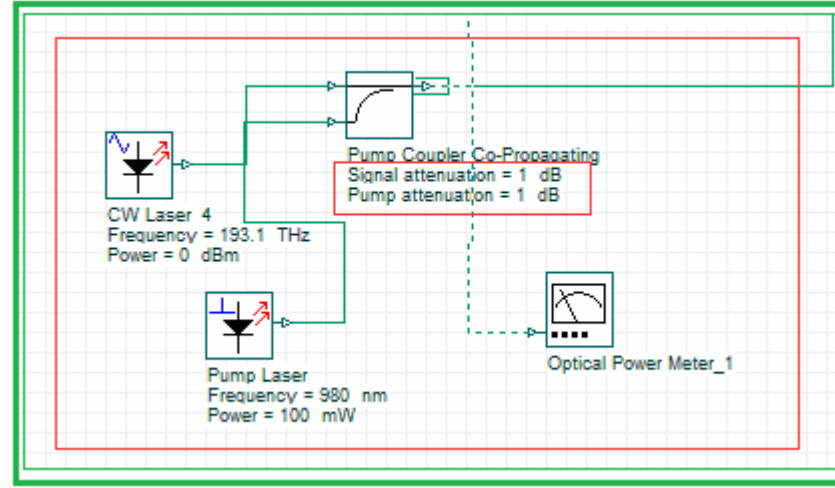
Şekil 8.27'de EDFA'nın çıkış gücü görülmektedir. Şekil 8.24'de verilen çıkış gücü EDFA'nın yalnızca pompa lazeri ile beslenmiş olduğu durumda elde edilen güçtür ve 58,451 mW'tır, oysa optik pompa kuplörü alt sistemi ile beslenmiş olan EDFA'nın çıkış gücü Şekil 8.27'de verildiği gibi 38,120 mW'tır.

Şekil 8.28’de verilen grafiğin sağ tarafında yer alan göstergede maksimum genliğin 12.0153 dBm olduğu görülmektedir, oysa sadece pompa lazer ile beslenmiş olan sistemde EDFA çıkışının maksimum genliği 13,7576 dBm’dir. Burada da kuplörün işaret üzerindeki zayıflatma etkisi görülmektedir.

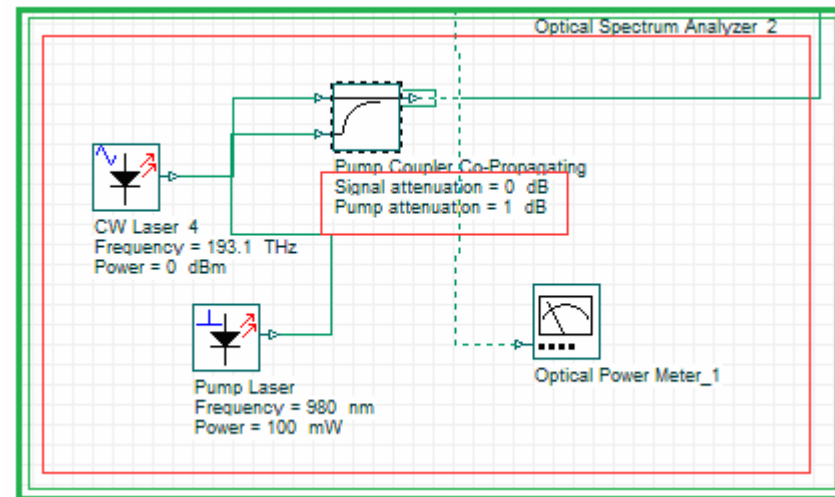
Optik pompa kuplörü tanımında verildiği gibi girişine uygulanan pompanın ve giriş sinyalinin güçlerini zayıflatmıştır. İncelemenin bundan sonraki bölümünde, pompa kuplörünün, giriş sinyali ve pompa sinyali için birbirlerinden bağımsız olan, zayıflatma etkileri irdelenecektir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 8.29 Optik pompa kuplörünün giriş sinyali ve pompa işareti için zayıflatma parametrelerinin farklı değerleri için pompa kuplörü alt sistemi

Şekil 8.25’de verilen optik haberleşme sisteminin pompa kuplörü alt sisteminde giriş işareti ve pompa işareti için kuplörün zayıflatma etkileri Şekil 8.29’da verildiği gibi değiştirilmiştir. Şekil 8.29 (a)’da verilen alt sistemde optik giriş işareti için zayıflatma 1 dB pompa sinyali için zayıflatma 0 dB’dir, bu durumda EDFA’nın çıkış gücü 16.131 mW’tır.

Şekil 8.29 (b)’de verilen alt sistemde optik giriş işareti için zayıflatma 1 dB pompa sinyali için zayıflatma 1 dB’dir, bu durumda EDFA’nın çıkış gücü 15.089 mW’tır.

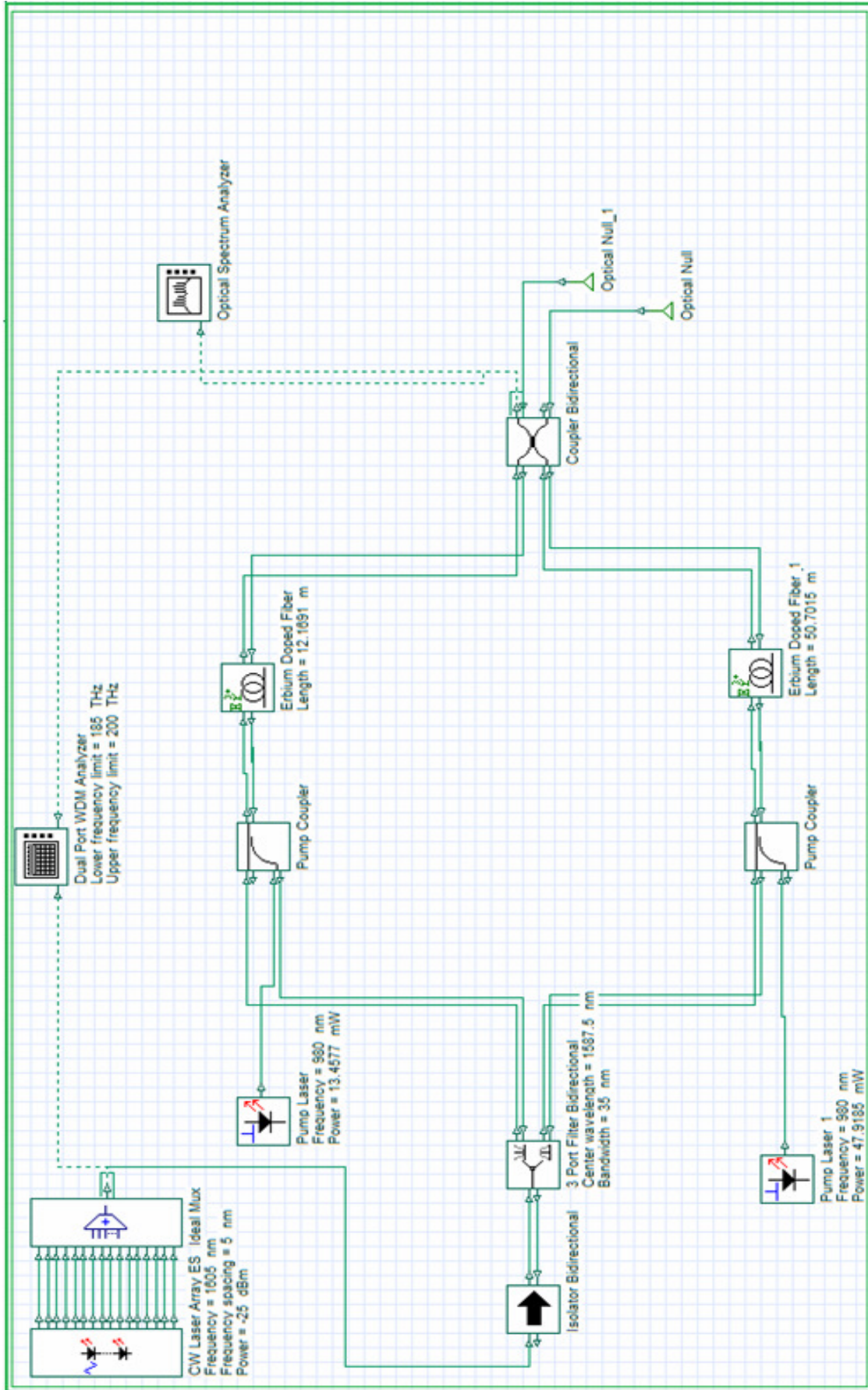
Şekil 8.29 (c)’de verilen alt sistemde optik giriş işareti için zayıflatma 0 dB pompa sinyali için zayıflatma 1 dB’dir, bu durumda EDFA’nın çıkış gücü 14.773 mW’tır.

Kuplör zayıflatma etkilerinin kontrol edilmesi istenilen noktalarda kullanılmaktadır. Yapılan inceleme optik pompa kuplörünün giriş işaretinin ve pompa işaretinin güçlerini birbirlerinden bağımsız olarak zayıflatabildiğini göstermektedir.

8.5 Dördüncü Tasarım

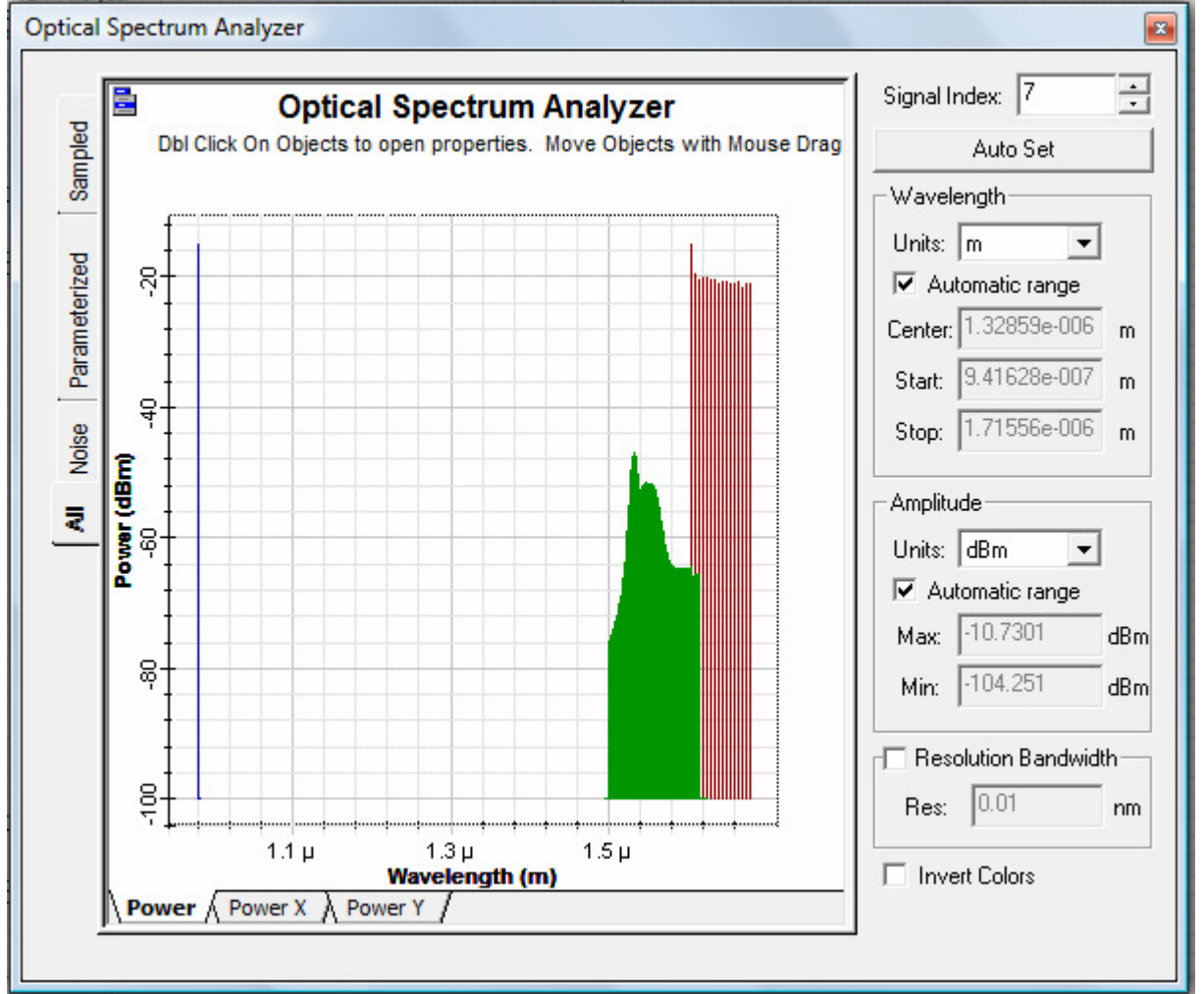
İlk üç tasarımda, optik haberleşme sistemleri içinde, X kuplörü ve pompa kuplörünün çalışma mekanizmaları incelenmiştir. Bu bölümde ise, bu kuplörlerin çift yönlü olarak kullanıldıkları sistemler ele alınmıştır.

Şekil 8.30’da verilen sistemde, kullanılan erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricinin band genişliğinin artırılması için, kazanç spektrumu, bir band ayıran filtre kullanılarak 1530-1560 nm ve 1570-1610 nm olan iki kanala ayrılmıştır. Kazanç, her iki kanalda birbirinden ayrı olarak optimize edilmiştir. Sistem, 16 kanallı sürekli işaretli bir lazer dizisi ile beslenmiş ve işaret, 16 kanallı bir ideal çoğullayıcı yardımıyla üç kapılı band ayıran filtreye iletilmiştir. Birinci kanal, 1530-1565 nm ve ikinci kanal 1570-1605 nm olarak tasarlanmıştır. Her kanalda işaret, çift yönlü bir pompa kuplörü ile kuvvetlendirilmiş ve erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiriciye iletilmiştir. Her iki kanaldan gelen işaret çift yönlü bir X kuplörü ile birleştirilmiştir.



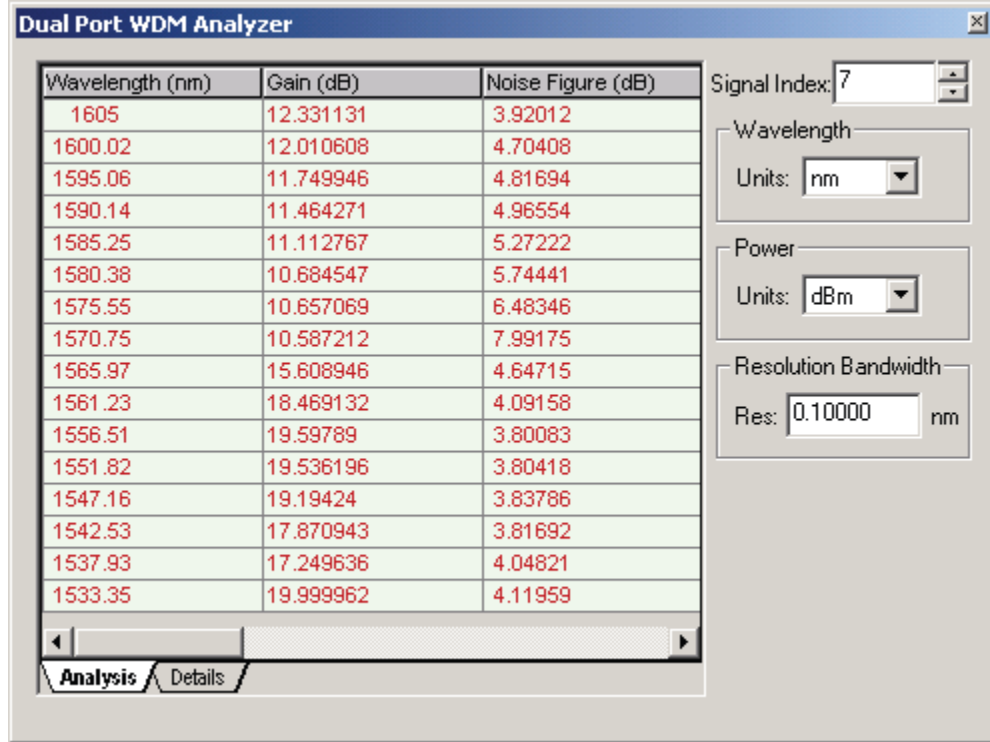
Şekil 8.30 Ayrık bandlı kuvvetlendirici tasarımı

Çift yönlü X kuplörünün, birinci çıkış kapısının gücünün dalga boyuna göre değişimi Şekil 8.31’de verilmiştir, solda yer alan işaret pompa işaretine, sağda yer alan ise işaret ise giriş sinyaline aittir.



Şekil 8.31 Çift yönlü X kuplörünün birinci çıkış kapısındaki gücün dalga boyuna göre değişimi

Sistem, bir WDM analizör ile incelenmiş ve analizör çıkışı Şekil 8.32’de verilmiştir.



Şekil 8.32 WDM analizörün çıkışı

Şekil 8.32’de kazancın, birinci kanalın çalışma aralığı olan 1530-1565 nm bölgesinde 20 dB iken, ikinci kanal aralığı olan 1570-1605 nm bölgesinde 11 dB civarında olduğu görülmektedir.

9. SONUÇLAR

Bu tezde, günümüzde kullanımı önemli derecede artan optik fiber teknolojisi incelenmiştir. Dielektrik dalga kılavuzları olan optik fiberlerde, ayrık spekturuma sahip kılavuzlanmış modlar, sürekli spektruma sahip radyasyon modları ve radyasyon alanının bir kısmını temsil eden sızıntılı modlar bulunur. Çalışmada, düzlemsel yapıdaki katmanlı dalga kılavuzları için, karakteristik eşitlikler elde edilerek grafik olarak incelenmiş ve modların propagasyon durumları tanımlanmıştır.

Optik dalga kılavuzları arasındaki uzaklık, çalışma dalgaboyuna göre çok küçükse, optik fiberler birbirlerini 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 meydana gelebilir.

Tezde, zayıfça kılavuzlayan, kayıpsız, özdeş ve özdeş olmayan optik dalga kılavuzlarının karşılıklı kuplaj mekanizması, Kuplaj Mod Teorisi ışığında incelenmiştir. Yapılan analizin sonucunda, TE modları arasındaki kuplajın, TM modları arasındaki kuplajdan daha etkin olduğu ve çift TE modları arasındaki kuplajın, diğer modlar arasındaki kuplajdan daha fazla olduğu görülmüştür. Fiziksel mekanizmanın doğal bir sonucu olarak, kılıfsız optik fiberlerdeki kuplajın, kılıflı optik fiberlerdeki kuplajdan daha etkin olduğu ortaya konmuştur.

Kuplaj optik dalga kılavuzlarında, faz sabitindeki değişimin, optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapının ve kılıf bölgesinin yarıçapının artması ile eksponansiyel olarak arttığı, kuplaj iki optik fiberin arasındaki mesafenin artması ile azaldığı ve aynı şekilde kuplaj katsayısının, optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapının ve kılıf bölgesi yarıçapının artması ile eksponansiyel olarak arttığı, kuplaj iki optik fiberin arasındaki mesafenin artması ile azaldığı gözlenmiştir. Modlar arasındaki maksimum güç transferinin, optik fiberlerin faz sabitlerinin eşit olduğu durumda gerçekleştiği görülmüştür.

Çekirdek bölgesinin ve kılıf bölgesinin kırılma indislerinin, kuplaj mekanizması üzerinde etkin rol oynadığı izlenmiştir.

Optiwave 7.0 simülatör yazılımı kullanılarak optik kuplörlerin yer aldığı düzenekler tasarlanmış ve kuplörlerin çalışma mekanizmaları analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda X kuplörünün, girişine uygulanan işaretin gücünü, kuplaj katsayısıyla doğru orantılı olarak çıkışlara aktardığı görülmüştür. Pompa kuplörünün ise girişine uygulanan işareti ve pompa gücünü zayıflatarak birleştirdiği ve çıkışa aktardığı gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Agrawal, G. P., (2002), "Fiber Optic Communication Systems", Wiley-Interscience, New York.
- 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.
- 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.
- Keiser, G., (1983), "Optical Fiber Communications", Mcgraw Hill, New York.
- Marcuse, D., (1974), "Theory of Dielectric Optical Waveguides", Academic Press, New York.
- OptiSystem 7.0 "Component Library", Optiwave, 2008.
- OptiSystem 7.0 "User's Reference", Optiwave, 2008.
- Özsoy, S., (1998), "Fiber Optik", Birsen Yayınevi, Kayseri.
- Sharma, N., (1987), "Fiber Optics in Communication", Mcgraw Hill, New York.
- 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.
- Ünverdi, N. Ö., 1991, "Optik Fiberlerde Propagasyon Özelliklerinin İncelenmesi ve Bükülme Kaybının Analizi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- 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.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 09.02.1979

Doğum yeri Ankara

Lise 1993-1996 Mersin Fen Lisesi

Lisans 1997-2002 Yıldız Teknik Üniversitesi

Elektrik Elektronik Fakültesi

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

Yüksek Lisans 2006-2010 Yıldız Teknik Üniversitesi

Elektrik Elektronik Fakültesi

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

Anabilim Dalı Haberleşme Programı

Çalıştığı kurum(lar)

Hamitabat Elektrik Üretim ve Ticaret A.Ş.

Ölçü Kontrol Mühendisi