

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OPTİK DALGA KILAVUZLARINDA KARŞILIKLI
KUPLAJ ANALİZİ**

-139812-

Elektronik ve Haberleşme Müh. Nuhi BAYIR

FBE Elektronik ve Haberleşme Anabilim Dalı Haberleşme Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

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

İzmir Öğretim Prof. Melik YÜCEL

Prof. Dr. Fahri BURPUR

(Handwritten signatures and initials)

İSTANBUL, 2003

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	14
2. MOD KAVRAMI VE ÇEŞİTLERİ.....	15
2.1 Modların Fiziksel Yorumları.....	16
2.2 Slab (Katmanlı) Dalga Kılavuzu	17
2.3 Dielektrik Slab Dalga Kılavuzlarında Çift TE Modları	22
2.4 Dielektrik Slab Dalga Kılavuzlarında Tek TE Modları	23
2.5 Karakteristik Denklemler, TE Modu	24
2.6 Dielektrik Slab Dalga Kılavuzlarında TM Modları.....	27
2.7 Dielektrik Slab Dalga Kılavuzlarında Çift TM Modları	27
2.8 Dielektrik Slab Dalga Kılavuzlarında Tek TM Modları.....	28
3. OPTİK FİBERLERİN SINIFLANDIRILMASI	30
3.1 Tek Modlu Optik Fiberler	30
3.2 Çok Modlu Optik Fiberler.....	31
3.3 Basamak İndisli Fiberler	31
3.4 Yumuşak Geçişli (Gradyan İndisli) Fiberler	32
4. SİLİNDİRİK FİBERDE MODAL ANALİZ	35
4.1 Basamak İndisli Fiber İçin Sınır Koşulları Ve Karakteristik Denklem	41
4.2 Basamak İndisli Fiberde Mod Karakteristikleri	42
4.3 Mod Kesim Şartları.....	43
4.4 Yumuşak Geçişli Optik Fiberde WKB (Wentzel, Kramers, Brillouin) Analizi....	44
4.5 Yumuşak Geçişli Optik Fiberde Propagasyon Sabitleri.....	46
5. OPTİK DALGA KILAVUZUNDA RADYASYON MODLARI	49
5.1 Çift TE Radyasyon Modları	50
5.2 Tek TE Radyasyon Modları	51
5.3 Çift TM Radyasyon Modları	52
5.4 Tek TM Radyasyon Modları	52

6.	SIZINTILI (LEAKY) MODLAR	54
7.	DİELEKTRİK DALGA KILAVUZLARI ARASINDA KUPLAJLAMA.....	58
7.1	Kuple Mod Teorisi.....	58
7.1.1	Modların Uzay Domeninde Kuplajı.....	58
7.1.2	Modların Zaman Domeninde Kuplajı.....	60
7.1.3	Modların Frekans Domeninde Kuplajı.....	61
7.2	Optik Dalga Kılavuzlarında Kuplaj Analizi.....	62
7.2.1	Propagasyon Sabitindeki Değişim.....	63
7.2.2	Kuplaj Katsayıları.....	64
7.3	Kuple Kılıflı Optik Dalga Kılavuzları	64
7.3.1	Propagasyon Sabitindeki Değişim.....	64
7.3.2	Güç Kaybı.....	69
7.4	Kuple Kılıfsız Optik Dalga Kılavuzları	70
7.4.1	Propagasyon Sabitindeki Değişim.....	70
7.4.2	Güç Kaybı.....	73
8.	SONUÇLAR.....	74
	KAYNAKLAR	75
	EKLER	76
Ek 1	Özdeş ve özdeş olmayan kılıflı ve kılıfsız optik fiberler için kuplaj katsayısının propagasyon sabitine, fiber çekirdek bölgesi yarıçaplarına, kılıf bölgesi yarıçaplarına göre değişimini gösteren grafikler	77
	ÖZGEÇMİŞ	101

SİMGE LİSTESİ

A_e	Düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzunun çift TE modlarının katsayısı
A_0	Düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzunun tek TE modlarının katsayısı
A_i	i.kılavuzlanmış modun genliği
$A_i(Q)$	i.radyasyon modun genliği
a	Kuple optik dalga kılavuzlarından birincisinin toplam alanı
$a_i(z)$	β_i modal propagasyon sabitli modun genlik fonksiyonu
B	Optik dalga kılavuzunun çekirdek bölgesindeki magnetik alanın katsayısı
B_e	Düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzunun tek TM modlarının katsayısı
B_0	Düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzunun tek TM modlarının katsayısı
B	Kuple optik dalga kılavuzlardan ikincisinin toplam alanı
C_1	Optik dalga kılavuzunun kılıf bölgesindeki elektrik alan katsayısı
C_{ik}	i. mod ile k. mod aradsındaki kuplaj katsayısı
D_1	Optik dalga kılavuzunun kılıf bölgesindeki magnetik alanın katsayısı
D	Optik dalga kılavuzunun kılıf bölgesinin yarıçapı
d	Optik dalga kılavuzunun çekirdek bölgesinin yarıçapı
E	Elektrik alan
E_{rad}	Radyasyon modlarının elektrik alanı
E_0	Elektrik alandaki pertürbasyon terimi
F	Düzlemsel yapıdaki katmanlı ve kılıflı optik dalga kılavuzunun dışındaki alanın katsayısı
F_{ik}	i. mod ile k. mod arasındaki transfer faktörü
f	Frekans
f_c	Kesim frekansı
$f(r)$	Kırılma indis profili
H	Magnetik alan
H_{rad}	Radyasyon modların magnetik alanı
H_0	Magnetik alandaki pertürbasyon terimi
$H_v^{(1)}(x)$	v. dereceden birinci cins Hankel fonksiyonu
$H_v^{(2)}(x)$	v. dereceden ikinci cins Hankel fonksiyonu
K_ζ	Düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzunun çekirdek bölgesindeki çift TE ve TM radyasyon modlarının katsayısı
K_t	Düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzunun çekirdek bölgesindeki tek TE ve TM radyasyon modlarının sayısı
k	Dalga sayısı
k_0	Serbest uzaydaki dalga sayısı
L_ζ	Düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzunun dışındaki çift TE ve TM radyasyon modlarının katsayısı
L_t	Düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzunun dışındaki tek TE ve TM radyasyon modlarının katsayısı
M_ζ	Düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzunun dışındaki çift TE ve TM radyasyon modlarının katsayısı
M_t	Düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzunun dışındaki tek TE ve TM radyasyon modlarının katsayısı
$n(r)$	Yumuşak geçişli optik fiberde kırılma indisi
n_1	Optik fiberin çekirdek bölgesinin kırılma indisi
n_2	Optik fiberin kılıf bölgesinin kırılma indisi

Q_i	i.radyasyon modu için kılıf bölgesindeki modal parametre
r_0	İç kostik yarıçapı
r_1	Dış kostik yarıçapı
r_2	Işıma kostiği yarıçapı
$S_i(r)$	WKB Metodunda asimptotik seri katsayısı
t	Zaman
U	Bükülmemiş optik fiberlerin eksenleri arasındaki uzaklık
V	Modal Parametre
W	Enerji
W_i	i. mod için kılıf bölgesindeki modal parametre
α	Optik fiberde bükülme kaybı
β_i	i. modun propagasyon sabiti
Δ	Çekirdek ve kılıf bölgelerinin kırılma indisleri parametresi
$\Delta\beta$	Kuplaj nedeniyle propagasyon sabitinde meydana gelen değişim miktarı
η	Ortaman karakteristik empedansı
γ	Optik fiberin kılıf bölgesinin özdeğeri
κ	Optik fiberin çekirdek bölgesinin özdeğeri
λ	Dalga boyu
μ	Ortaman magnetik geçirgenliği
∇	Del operatörü
ω	Açısal frekans
ρ	Radyasyon modlarında optik fiberin dışındaki bölgenin özdeğeri
v	Azimutal mod sayısı
ε	Ortaman dielektrik sabiti

KISALTMA LİSTESİ

WKB Wentzel,Kramers,Brillouin



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 İdeal optik fiberde ışık iletimi.....	15
Şekil 2.2 Dielektrik dalga kılavuzunda eksenel ışın.....	16
Şekil 2.3 Dielektrik dalga kılavuzunda helisel ışınlar.....	17
Şekil 2.4 Simetrik dielektrik slab dalga kılavuzu geometrisi.....	17
Şekil 2.5 Dielektrik slab dalga kılavuzlarında TE modlarının karakteristik eşitlik diyagramı.....	25
Şekil 2.6 Dielektrik slab dalga kılavuzlarında TE modlarının x e bağlı fonksiyonları.....	26
Şekil 3.1 Tek modlu fiber için kırılma indis profili.....	30
Şekil 3.2 Basamak indisli fiberlerin kırılma indis profili.....	32
Şekil 3.3 Farklı α değerleri için mümkün olan fiber kırılma indis profilleri.....	33
Şekil 3.4 Yumuşak geçişli bir fiberde helezon biçimli çapraz ışın yolu.....	33
Şekil 4.1 Bessel fonksiyonu.....	38
Şekil 4.2 Neumann fonksiyonu.....	38
Şekil 4.3 Bessel fonksiyonu üzerinde modların kesim noktaları.....	44
Şekil 4.4 Gradyan indisli fiber için k nın değişimi.....	46
Şekil 4.5 Gradyan indisli fiberde ışın gösterilimi.....	47
Şekil 4.6 Kılavuzlanmış bir mod için WKB çözümü.....	47
Şekil 4.7 Sızıntılı mod çözümü.....	48
Şekil 6.1 Yumuşak geçişli optik fiberde helisel ışınlarda dalga sayısı diyagramı.....	55
Şekil 6.2 Yumuşak geçişli optik fiberde eksenel ışınlarda dalga sayısı diyagramı.....	55
Şekil 6.3 Basamak indisli optik fiberde eksenel ışınlarda dalga sayısı diyagramı.....	56
Şekil 6.4 WKB metodunun $\beta > n_2 k_0$ çözümünün grafiksel gösterilimi.....	56
Şekil 6.5 WKB metodunun $\beta < n_2 k_0$ çözümünün (sızıntılı dalgalar) grafiksel gösterimi.....	57
Şekil 7.1 Kuple kılıflı ve düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzları.....	65
Şekil Ek.1.1 Özdeş kuple kılıfsız düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin yarıçapına göre değişimi.....	80
Şekil Ek.1.2 Özdeş kuple kılıfsız düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin yarıçapına göre değişimi.....	80
Şekil Ek.1.3 Özdeş kuple kılıfsız düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TM modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin yarıçapına göre değişimi.....	81
Şekil Ek.1.4 Özdeş kuple kılıfsız düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TM modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin yarıçapına göre değişimi.....	81
Şekil Ek.1.5 Özdeş kuple kılıfsız düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin propagasyon sabitine göre değişimi.....	82
Şekil Ek.1.6 Özdeş kuple kılıfsız düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin propagasyon sabitine göre değişimi.....	82
Şekil Ek.1.7 Özdeş kuple kılıfsız düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TM modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin propagasyon sabitine göre değişimi.....	83
Şekil Ek.1.8 Özdeş kuple kılıfsız düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TM modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin propagasyon sabitine göre değişimi.....	83
Şekil Ek.1.9 Özdeş kuple kılıflı düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	84
Şekil Ek.1.10 Özdeş kuple kılıflı düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	84

Şekil Ek.1.11 Özdeş kuple kılıflı düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TM modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	85
Şekil Ek.1.12 Özdeş kuple kılıflı düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TM modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	85
Şekil Ek.1.13 Özdeş kuple kılıflı düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin propagasyon sabitine göre değişimi.....	86
Şekil Ek.1.14 Özdeş kuple kılıflı düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin propagasyon sabitine göre değişimi.....	86
Şekil Ek.1.15 Özdeş kuple kılıflı düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TM modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin propagasyon sabitine göre değişimi.....	87
Şekil Ek.1.16 Özdeş kuple kılıflı düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TM modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin propagasyon sabitine göre değişimi.....	87
Şekil Ek.1.17 Özdeş olmayan kuple kılıfsız ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TE modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	88
Şekil Ek.1.18 Özdeş olmayan kuple kılıfsız ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TE modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	88
Şekil Ek.1.19 Özdeş olmayan kuple kılıfsız ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TM modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	90
Şekil Ek.1.20 Özdeş olmayan kuple kılıfsız ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TM modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	90
Şekil Ek.1.21 Özdeş olmayan kuple kılıfsız ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TE modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	91
Şekil Ek.1.22 Özdeş olmayan kuple kılıfsız ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TE modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	91
Şekil Ek.1.23 Özdeş olmayan kuple kılıfsız ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TM modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	92
Şekil Ek.1.24 Özdeş olmayan kuple kılıfsız ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TM modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	92
Şekil Ek.1.25 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TE modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	93
Şekil Ek.1.26 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TE modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	93
Şekil Ek.1.27 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TM modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	94

Şekil Ek.1.28 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TM modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	94
Şekil Ek.1.29 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TE modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	95
Şekil Ek.1.30 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TE modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	95
Şekil Ek.1.31 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TM modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	96
Şekil Ek.1.32 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TM modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	96
Şekil Ek.1.33 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TE modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin kılıf bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	97
Şekil Ek.1.34 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TE modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin kılıf bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	97
Şekil Ek.1.35 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TM modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin kılıf bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	98
Şekil Ek.1.36 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TM modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin kılıf bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	98
Şekil Ek.1.37 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TE modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin kılıf bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	99
Şekil Ek.1.38 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TE modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin kılıf bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	99
Şekil Ek.1.39 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TM modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin kılıf bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	100
Şekil Ek.1.40 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TM modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin kılıf bölgesi yarıçapına göre değişimi.....	100

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1 Artan fiziksel parametrelerin propagasyon modu sayısına etkisi..... 26



ÖNSÖZ

Telekomünikasyonun her alanında sıkça karşımıza çıkan ve optik haberleşmenin temelini oluşturan optik dalga kılavuzlarının elektromagnetik özelliklerinin incelenmesinde ve yüksek lisans tezimin yapımı sırasında beni yönlendiren ve bilgileriyle bana ışık tutan tez danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr.N.Özlem Ünverdi hocama, sırf buraya yazmak olsun diye değil, içtenlikle teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında değerli yardımlarını esirgemeyen aileme, iş arkadaşlarıma, okul arkadaşlarıma ve can dostum elektronik ve haberleşme mühendisi Taner Koç'a teşekkür ederim.



ÖZET

Bu çalışmada optik fiberlerin mod analizi konusu ve doğrultu kuplörü, sensör gibi birçok alanda kullanım yeri olan kuple optik dalga kılavuzları incelenmiştir. Birinci Bölüm'de optik fiberler hakkında genel bir bilgiye değinilmiş, geçmişte yapılan çalışmaların tarihsel sürecinden kısaca bahsedilmiştir. İkinci Bölüm'de mod kavramı irdelenmiş ve fiziksel yorumları yapılmıştır. Optik fiberlerin yapısını katmanlı yapı kabul ederek modların analizi ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca çift TE, tek TE, çift TM, tek TM modlarının karakteristik denklemleri çıkarılmıştır. Bu karakteristik denklemler yardımıyla çizilen diyagramdan kolayca propagasyon sabitinin elde edilebileceği görülmüştür. Üçüncü Bölüm'de optik fiberlerin sınıflandırılması yapılarak içerikleri verilmiştir. Dördüncü Bölüm'de silindirik fiberin modal analizi gerçekleştirilmiştir. Basamak indisli bir fiber için sınır koşulları ve karakteristik denklemler çıkarılmıştır. Mod kesim şartları incelenmiştir. Yumuşak geçişli optik fiberde WKB analizi yapılmıştır. Beşinci bölümde silindirik optik fiberlerde fiberin kılıf bölgesinde oluşan radyasyon modları incelenmiştir. Çift TE, tek TE, çift TM, tek TM modları için alan bağıntıları ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Altıncı Bölüm'de silindirik optik fiberlerde fiberin kılıf bölgesinde oluşan sızıntı modları incelenmiştir. Burada WKB metodunun $\beta > n_2 k_0$ çözümünün ve $\beta < n_2 k_0$ çözümünün grafiksel gösterilimi yapılmıştır. Kostik kavramının ne olduğu irdelenmiş, kostik noktalarında alanın davranış biçimi açıklanmıştır. Yedinci Bölüm'de ise Kuple Mod Teorisinin tanımı yapılmıştır. Modların uzay domeninde, zaman domeninde, frekans domeninde kuplajının nasıl gerçekleştiği açıklanmış, denklemleri verilmiştir. Kuple Mod teorisine göre paralel kuple dalga kılavuzlarındaki kuplaj analizi yapılmış, propagasyon sabitinde kuplaj nedeniyle meydana gelen değişim incelenmiştir. Özdeş ve özdeş olmayan kılıflı ve kılıfsız optik fiberler için kuplaj katsayısının propagasyon sabitine, fiber çekirdek bölgesi yarıçaplarına, kılıf bölgesi yarıçaplarına göre değişimini gösteren grafikler çizilmiştir. Bu grafikler Ek 1 de verilmiştir. Sekizinci Bölüm'de ise yapılan incelemeler neticesinde elde edilen sonuçlar bir araya toplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Radyasyon mod, sızıntı mod, kuplaj katsayısı, kılıflı optik fiber, kılıfsız optik fiber

ABSTRACT

In this study coupled optical waveguides which are in use in many areas as directional coupler, sensors are analyzed. Also mode analysing studied. Section 1 gives a general information about optical fibers and which works have done till today. In Section 2 the mode concept is examined. Comment of modes are explained. Optical fibers structure accepted as slab structure. And made the investigation like that. Also charecteristic equation off odd TE, even TE, odd TM, even TM modes are studied. By drawing a diagram of charecteristic equation the propagation constant could be found. In Section 3 classification of optical fibers have done. And contents given. In Section 4 cylindrical optical fibers investigation have done. For the step index fibers boundary conditions and charecteristic equations studied. Mode cut off condition explained. The graded index fibers is analyzed with using the WKB approximation technique. In Section 5 the radiation mode in cladding area of cylindrical fiber is explained. For odd TE, even TE, odd TM, even TM modes the wave expressions are given. In Section 6 the leaky modes in cladding area of cylindrical fiber is explained. Furthermore for $\beta > n_2 k_0$ and $\beta < n_2 k_0$ the WKB approximation technique is showed in diagram. The turning points meaning are explained and how the wave behaved in turning points is expressed. In Section 7 Coupled Wave Theory is defined. Coupling analyzes are done in parellel coupled optical waveguides using the Coupled Wave Theory and the change in the propagation constant due to coupling is investigated. For the identical and non-identical, with cladding and non-cladding optic fibers the change of coupling coefficient for the propagation constant, the core radius and the cladding radius are shown in the graphics. The graphics are given at Appendix 1. In Section 8 the result points are given together.

Keywords: Radiation mode, leaky mode, coupling coefficient, cladding optic fiber, non-cladding optic fiber

1. GİRİŞ

Günümüzde kablolu iletişimde kullanılmakta olan ikili ve kaoksiyel kabloların yanında 1970'li yıllardan itibaren fiber optik kablolar geniş boyutlarda haberleşme alanında kullanılmaya başlanmıştır.

Elektriksel işaretlerin bir ışık kaynağı aracılığıyla ışık işaretine dönüştürülüp karşı tarafa iletilmesi ve ışık işaretinin de karşı tarafta tekrar elektriksel işarete dönüştürülmesi prensibine dayanan optik haberleşme tekniğinde söz konusu merkezler arasındaki transmisyon ortamını oluşturan fiber optik kablolar önemli bir iletişim elemanlarıdır.

Işığın dielektrik dalga kılavuzları içinde taşınabileceği düşüncesi çok eskilere dayanır. Yirminci yüzyılın başlarında J.W.S Rayleigh ve A.J.W Sommerfeld in kılavuzlanmış dalgalar konusundaki çalışmaları optik haberleşmenin temeli sayılabilir. H.H.Hopkins ve N.S.Kapany'nin 1954 yılında optik dalga kılavuzları ile kısa mesafelere bilgi iletimi konusundaki çalışmalarından sonra A.Maiman'ın 1960 yılında yarı iletken lazeri ortaya çıkarmasıyla uzun mesafeli haberleşme uygulamalarının da yapılabileceği tartışılmaya başlanmıştır. Bu dönemde yapılan incelemelerde haberleşmede taşıyıcı frekansının artması daha büyük band genişliğine izin verdiği için iletilen bilgi kapasitesinin diğer haberleşme sistemlerine göre çok daha yüksek olacağı ortaya konmuştur. Bu yıllarda üretilen optik fiberlerde kayıp yaklaşık 1000dB/km civarındadır. 1960'lı yıllarda A.Yariv,H.A.Haus,E.Snitz H..Osterberg ve N.S.Kapany dielektrik dalga kılavuzları modlarının karakteristik özelliklerini araştırarak hibrid modların ne anlama geldiğini açıklamışlar ve kuple optik fiberlerin analizini gerçekleştirmişlerdir.

1970'li yıllarda fiber optik kablo üretim teknolojisinde önemli gelişmeler yaşanmıştır. 800-900 nm aralığında dalga boyuna sahip bir ışık için optik fiberdeki iletim kaybı 2.5 dB/km mertebesine düşmüştür. Band genişliği 1GHz.km mertebesine yükselterek optik fiber başına 1 Mbit/sn'lik iletim kapasitesine ulaşılmıştır. 1980'li yıllarda 1300 nm ile 1550 nm dalga boylarında yüksek band genişliği ve 0.1-0.4 dB/km'lik zayıflamaya sahip olan optik fiberler üretilmeye başlanmıştır. 1990'lı yıllarda ise kızıl ötesi ve uzak kızıl ötesi bölgelerinde iletişim sağlayan optik fiberlerde iletim kaybı 0.001 dB/km'nin altına düşürülerek Gbit/sn'ler düzeyinde bilgi iletim hızına ulaşılmış, darbe kod modülasyonunun kullanıldığı optik haberleşme sistemlerinde çoğullama teknikleriyle kanal kapasitesi artırılmıştır.

2. MOD KAVRAMI VE ÇEŞİTLERİ

İletim ortamında herhangi iki noktadaki elektromagnetik özellikler aynı ise ve aradaki tek fark bu noktalar arasındaki mesafeden kaynaklanan faz farkı ise söz konusu olan bu iki nokta aynı modun içinde yer alır. Modun başka bir tanımı da şöyle yapılabilir: Sadece yayılma yönündeki koordinata periyodik olarak bağımlı olan ve yayılma yönüne dik doğrultuda alan dağılımına mod denir.

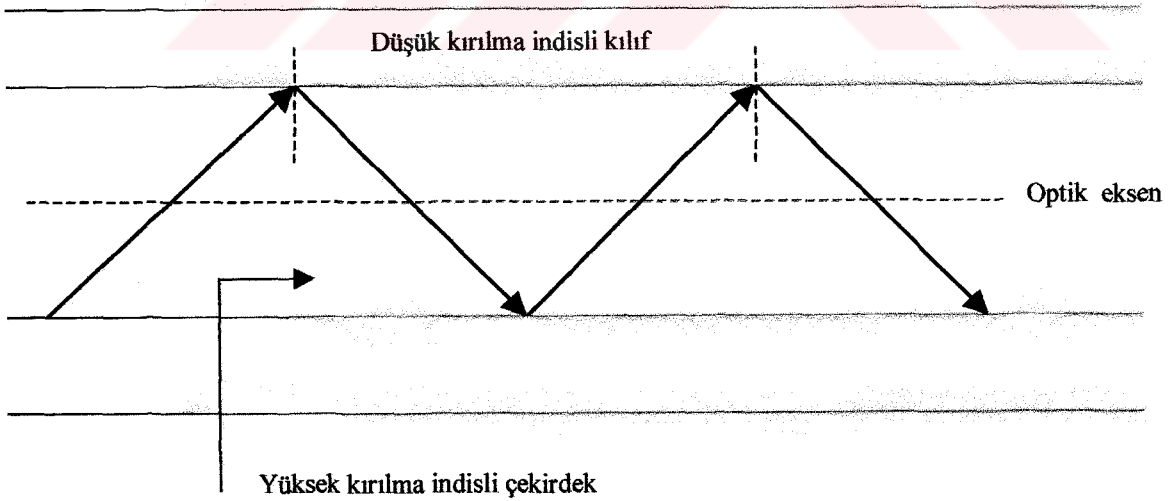
Mod Çeşitleri:

TE (Enine Elektrik) Modu : $E_z = 0$, $H_z \neq 0$. Yani yayılma yönündeki elektrik alan değeri sıfıra eşittir.

TM (Enine Magnetik) Modu : $E_z \neq 0$, $H_z = 0$. Yani yayılma yönündeki magnetik alan değeri sıfıra eşittir.

TEM (Enine Elektromagnetik) Modu : $E_z = H_z = 0$. Yani yayılma yönündeki elektrik ve magnetik alan değeri sıfıra eşittir.

Hybrid (Hibrid) Modlar : $E_z \neq 0$, $H_z \neq 0$. Yani yayılma yönündeki elektrik ve magnetik alan değeri sıfırdan farklıdır.



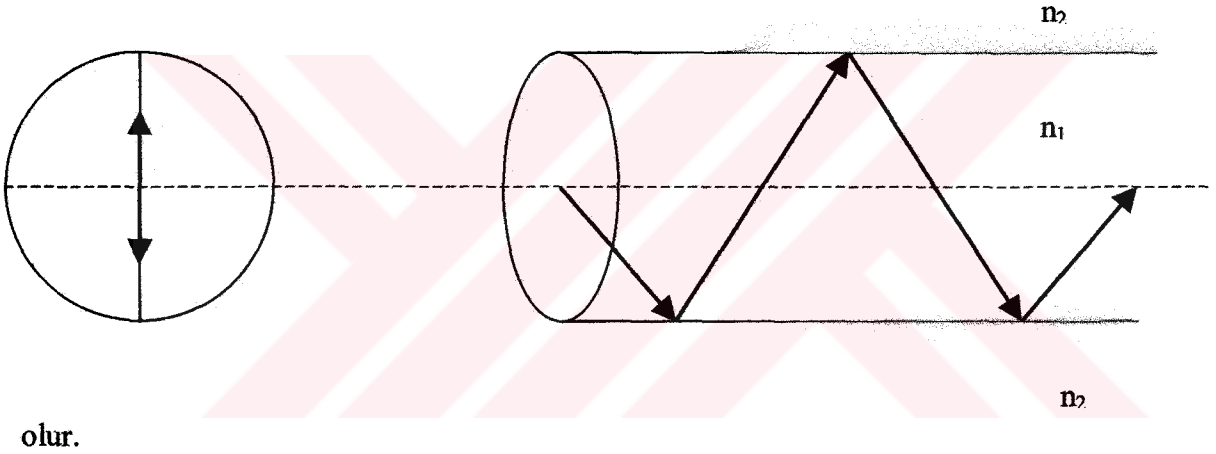
Şekil 2.1 İdeal optik fiberde ışık iletimi

Şekil 2.1 de gösterilen ışın iletimi çekirdeği ve çekirdek- kılıf ara yüzeyi düzgün olan ideal fiber içindir.

Optik eksenini keserek ilerleyen bu tür ışınlara meridyenel ışınlar denir.

2.1 Modların Fiziksel Yorumları

Düzlem 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 dalgaının yansımalarının polarizesine bağlıdır. Bu tür kılavuzlarda TE ve TM modunun davranışı dielektrik dalga kılavuzunda aynıdır. Bu modların oluşumunda aksenal (meridyenel) ışın rol oynar. $TE_{\nu\mu}$ ve $TM_{\nu\mu}$ modlarında Φ ye göre değişim olmadığı için $\nu = 0$

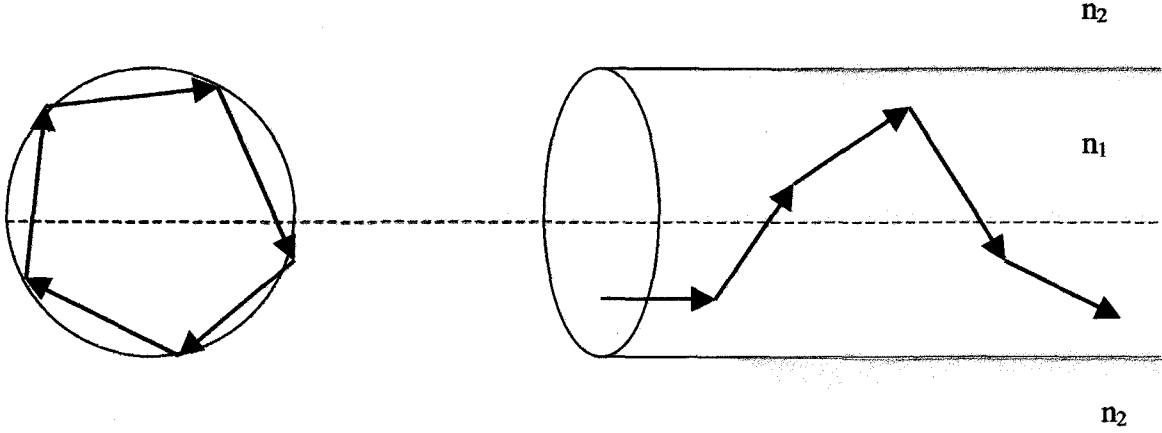


olur.

Şekil 2.2 Dielektrik dalga kılavuzunda aksenal ışın

Düzlem dalga kılavuzunda olmayan fakat silindirik yapıdaki dielektrik dalga kılavuzunda mevcut olan helisel ışınlar vardır. Bu ışınlar E_z ve H_z in sıfırdan farklı olduğu modları, bir başka deyişle daha önce tanımlanmış olan hybrid (karışık) modları meydana getirir. Bu modların oluşumuna sebep olan ışınlar Şekil 2.3 de görülmektedir.

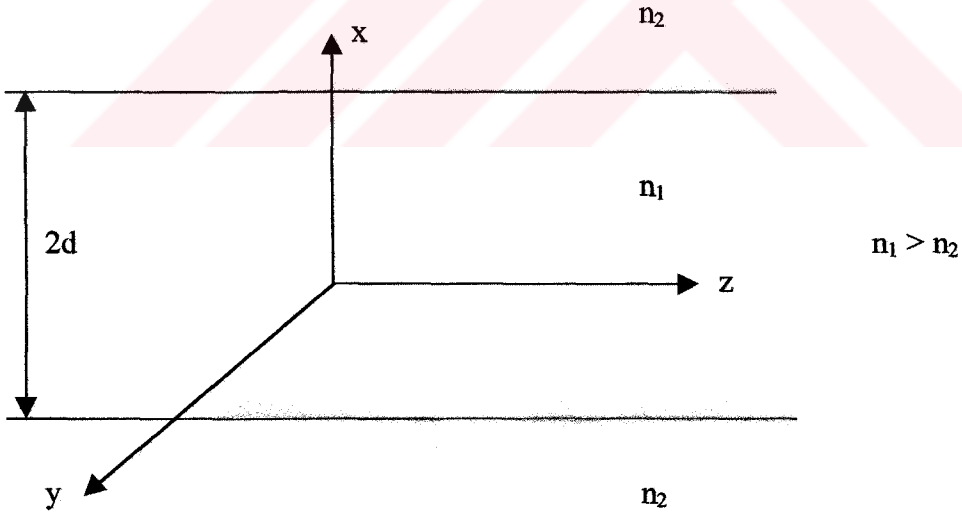
Dielektrik dalga kılavuzunda TEM modu geçersizdir. Bunun nedeni aynı anda E_z ve H_z sıfır olamaz. TEM modu koaksiyel kablo gibi genelde iki iletkenli dalga kılavuzlarında geçerlidir.



Şekil 2.3 Dielektrik dalga kılavuzunda helisel ışınlar

2.2 Slab (Katmanlı) Dalga Kılavuzu

Optik fiberde dielektrik-dielektrik sınır koşullarına göre Maxwell denklemleri çözülür. Optik fiberler dairesel, dikdörtgen, eliptik veya hegzagonal yapıda olabilirler. Bu çalışmada dairesel kesitli optik fiberlerin analizi yapılmıştır. Bunun için de katmanlı dalga kılavuzu yaklaşımından yararlanılmıştır.



Şekil 2.4 Simetrik dielektrik slab dalga kılavuzu geometrisi

$\partial/\partial y = 0$ simetri sınırlaması kılavuzdaki alanın TE ve TM modlarına ayırtmayı sağlar.

β =modal propagasyon sabiti olmak üzere

$$\vec{E} = \vec{E}_0(x, y).e^{-j\beta z} \quad (2.2.1)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0(x, y).e^{-j\beta z} \quad (2.2.2)$$

dir.Ampère Yasasına göre,

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = j\omega\epsilon\vec{E} \quad (2.2.3)$$

$$\begin{vmatrix} \vec{a}_x & \vec{a}_y & \vec{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_x & H_y & H_z \end{vmatrix} = j\omega\epsilon(\vec{E}_x + \vec{E}_y + \vec{E}_z) \quad (2.2.4)$$

dir.Matrisin açılımı yapıldığında,

$$\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}\right)\vec{a}_x - \left(\frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial z}\right)\vec{a}_y + \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}\right)\vec{a}_z = \epsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} \vec{a}_x + \epsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} \vec{a}_y + \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} \vec{a}_z \quad (2.2.5)$$

olur.Faraday yasasına göre,

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (2.2.6)$$

dır.Vektörel çarpımın açılımı yapıldığında,

$$\left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}\right)\vec{a}_x - \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z}\right)\vec{a}_y + \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}\right)\vec{a}_z = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \vec{a}_x - \mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \vec{a}_y - \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \vec{a}_z \quad (2.2.7)$$

olur.

(2.2.5) denkleminin vektörel denkliği tek tek yazıldığında,

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = j\omega\epsilon E_x \quad (2.2.8)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta H_y = j\omega\epsilon E_x \quad (2.2.9)$$

$$-\frac{\partial H_z}{\partial x} - j\beta H_x = j\omega\epsilon E_y \quad (2.2.10)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon E_z \quad (2.2.11)$$

elde edilir.(2.2.7) denkleminin vektörel denkliği tek tek yazıldığında,

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} + j\beta E_y = -j\omega\mu H_x \quad (2.2.12)$$

$$-\frac{\partial E_z}{\partial x} - j\beta E_x = -j\omega\mu H_y \quad (2.2.13)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu H_z \quad (2.2.14)$$

elde edilir.(2.2.13) denklemi (2.2.9) denkleminde yerine konulduğunda,

$$j\omega\epsilon E_x = \frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta \left[-\frac{1}{j\omega\mu} \left(-j\beta E_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \right] \quad (2.2.15)$$

$$\left(-\frac{j\omega\mu}{j\omega\epsilon - j\beta^2} \right) E_x = \frac{\partial H_z}{\partial y} + \frac{\beta}{\omega\mu} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (2.2.16)$$

Düzenleme yapıldığında (2.2.16) eşitliği şöyle olur.

$$(\omega^2 \mu\epsilon - \beta^2) \cdot E_x = -j(\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y} + \beta \frac{\partial E_z}{\partial x}) \quad (2.2.17)$$

olur. Burada,

$$\kappa = (\omega^2 \mu\epsilon - \beta^2)^{1/2} = (n_1^2 k_0^2 - \beta^2)^{1/2} = (k^2 - \beta^2)^{1/2} \quad (2.2.18)$$

dir. Ve

$$E_x = \frac{-j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial x} + \omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y} \right) \quad (2.2.19)$$

eşitliğine ulaşılır. Benzer mantıkla

$$E_y = \frac{-j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial y} - \omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (2.2.20)$$

$$H_x = \frac{-j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial x} - \omega \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (2.2.21)$$

$$H_y = \frac{-j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial y} + \omega \epsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (2.2.22)$$

eşitlikleri elde edilir. (2.2.21) ve (2.2.22) eşitlikleri (2.2.11) ve (2.2.14) eşitliklerinde kullanılırsa,

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + \kappa^2 E_z = 0 \quad (2.2.23)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + \kappa^2 H_z = 0 \quad (2.2.24)$$

elde edilir. $\partial/\partial y = 0$ kabulü ile (2.2.19), (2.2.20), (2.2.21), (2.2.22) denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\begin{aligned} E_x &= \frac{-j\beta}{\kappa^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \\ E_y &= \frac{j\omega\mu}{\kappa^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \\ H_x &= \frac{-j\beta}{\kappa^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \\ H_y &= \frac{-j\omega\epsilon}{\kappa^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \end{aligned} \quad (2.2.25)$$

(2.2.25) denklem takımı enine bileşenlerin boyuna bileşenler cinsinden ifadeleridir

TE modunda alan ifadeleri

$$E_x=0, E_y \neq 0, E_z=0, H_x \neq 0, H_y=0, H_z \neq 0$$

TM modunda alan ifadeleri

$$E_x \neq 0, E_y=0, E_z \neq 0, H_x=0, H_y \neq 0, H_z=0$$

Helmholtz denklemi,

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (2.2.26)$$

$$k^2 = \omega^2 \mu \epsilon \quad (2.2.27)$$

TE modunda elektrik alan bileşeni sadece E_y dir. (2.2.26) denklemi $\partial/\partial y = 0$ koşulu kullanılarak tekrar yazıldığında;

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + \kappa^2 E_y = 0 \quad (2.2.28)$$

elde edilir.

$$E_y(x, z) = E_y(x) e^{-j\beta z} \quad (2.2.29)$$

olarak alındığında ve (2.2.28) denkleminde yerine konulduğunda ifade

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \kappa^2 E_y = 0 \quad (2.2.30)$$

şeklini alır. Maxwell denklemlerinden (2.2.12) ve (2.2.14) de $\partial/\partial y = 0$ kabulü yapıldığında denklemler,

$$H_x = -\frac{\beta}{\omega\mu_0} E_y \quad (2.2.31)$$

$$H_z = \frac{j}{\omega\mu_0} \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (2.2.32)$$

şeklinde ifade edilir. (2.2.30) eşitliğinin slab içindeki (çekirdek bölgesinde, $|x| \leq d$) çözümü,

$$E_{y_1} = A \cos(\kappa x) + B \sin(\kappa x) \quad (2.2.33)$$

formundadır. Burada, κ çekirdek bölgesindeki özdeğer,

$$\kappa = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2} \quad (2.2.34)$$

şeklinindedir. (2.2.33) eşitliğindeki $A \cos(\kappa x)$ terimi çift TE modlarını ve $B \sin(\kappa x)$ terimi de tek TE modlarını gösterir. (2.2.30) eşitliğinin kılıf bölgesindeki ($|x| > d$) çözümü sönümlü alan (evanescent alan) ifadesini verir. Bu ifade de aşağıdaki gibidir:

$$E_{y_2} = C e^{-\gamma(|x|-d)} \quad (2.2.35)$$

Burada, γ kılıf bölgesindeki özdeğer,

$$\gamma = \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2} \quad (2.2.36)$$

dır.

2.3 Dielektrik Slab Dalga Kılavuzlarında Çift TE Modları

Slab dalga kılavuzlarında $|x| \leq d$ için çift TE mod çözümünde elektrik alan ifadesi,

$$E_{y_1} = A_e \cos(\kappa x) \quad (2.3.1)$$

şeklinde yazılır.

(2.2.31) ve (2.2.32) denklemleri (2.3.1) kullanılarak tekrar yazılırsa,

$$H_{x_1} = \frac{-\beta}{\omega \mu_0} A_e \cos(\kappa x) \quad (2.3.2)$$

$$H_{z_1} = \frac{-j\kappa}{\omega \mu_0} A_e \sin(\kappa x) \quad (2.3.3)$$

olur. Kılıf bölgesindeki ($|x| > d$) sönümlü alan ifadeleri de aşağıdaki gibidir:

$$E_{y_2} = B e^{\gamma(|x|-d)} \quad (2.3.4)$$

$$H_{x_2} = \frac{-\beta}{\omega \mu_0} B e^{-\gamma(|x|-d)} \quad (2.3.5)$$

$$H_{z_2} = \frac{j\gamma}{\omega \mu_0} \left(\frac{-x}{|x|} \right) B e^{-\gamma(|x|-d)} \quad (2.3.6)$$

Çift TE modunda çekirdek-kılıf bölgesi arayüzeyinde sınır değerlerini kullanarak karakteristik eşitlik bulunabilir.

$x=d$ noktasında $E_{y_1}=E_{y_2}$ eşitliğini kullanarak,

$$B = A_e \cos(\kappa d) \quad (2.3.7)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadeden de yararlanarak $x=d$ noktasında $H_{z_1}=H_{z_2}$ eşitliğinden

$$\frac{-j\kappa}{\omega \mu_0} A_e \sin(\kappa d) = A_e \cos(\kappa d) \left(\frac{-d}{|d|} \right) \left(\frac{j\gamma}{\omega \mu_0} \right) \quad (2.3.8)$$

olur. Sonuç olarak (2.3.8) eşitliği sadeleştirildiğinde,

$$\frac{\sin(\kappa d)}{\cos(\kappa d)} = \tan(\kappa d) = \frac{\gamma}{\kappa} \quad (2.3.9)$$

karakteristik denklemi elde edilir.

2.4 Dielektrik Slab Dalga Kılavuzlarında Tek TE Modları

Çekirdek bölgesinde ($|x| \leq d$),

$$E_{y_1} = A_0 \sin(\kappa x) \quad (2.4.1)$$

$$H_{x_1} = \frac{-\beta}{\omega \mu_0} A_0 \sin(\kappa x) \quad (2.4.2)$$

$$H_{z_1} = \frac{j\kappa}{\omega \mu_0} A_0 \sin(\kappa x) \quad (2.4.3)$$

dir. Kılıf bölgesinde ($|x| > d$),

$$E_{y_2} = B_0 e^{-\gamma(|x|-d)} \quad (2.4.4)$$

$$H_{x_2} = \frac{-\beta}{\omega \mu_0} B_0 e^{-\gamma(|x|-d)} \quad (2.4.5)$$

$$H_{z_2} = \frac{j\gamma}{\omega \mu_0} \left(\frac{-x}{|x|} \right) B_0 e^{-\gamma(|x|-d)} \quad (2.4.6)$$

Tek TE modunda çekirdek-kılıf bölgesi arayüzeyinde sınır değerlerini kullanarak karakteristik denlem bulunabilir.

$x=\pm d$ noktasında $E_{y1}=E_{y2}$ eşitliğini kullanarak,

$$B_0 = \frac{x}{|x|} A_0 \sin(\kappa d) \quad (2.4.7)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadeden de yararlanarak $x=\pm d$ noktasında $H_{z1}=H_{z2}$ eşitliğinden

$$\frac{j\kappa}{\omega \mu_0} \cdot A_0 \cdot \cos(\kappa d) = \frac{-j\gamma}{\omega \mu_0} \cdot A_0 \cdot \sin(\kappa d) \quad (2.4.8)$$

ifadesine ulaşılır. Sonuç olarak (2.4.8) eşitliği sadeleştirildiğinde,

$$\frac{\sin(\kappa d)}{\cos(\kappa d)} = \tan(\kappa d) = \frac{-\kappa}{\gamma} \quad (2.4.9)$$

elde edilir.

2.5 Karakteristik Denklemler, TE Modu

Bu bölümde dielektrik slab dalga kılavuzlarının kılavuzlanmış TE modlarının karakteristik denklemleri analiz edilmiştir. Analizi kolaylaştırmak için (2.2.34), (2.2.36), (2.3.9) ve (2.4.9) denklemlerinden yararlanılır. Bu denklemler,

$$\kappa = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2} \quad (2.5.1)$$

$$\gamma = \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2} \quad (2.5.2)$$

$$\frac{\sin(\kappa d)}{\cos(\kappa d)} = \tan(\kappa d) = \frac{\gamma}{\kappa} \quad (2.5.3)$$

$$\frac{\sin(\kappa d)}{\cos(\kappa d)} = \tan(\kappa d) = \frac{-\kappa}{\gamma} \quad (2.5.4)$$

dır. (2.5.1) ve (2.5.2) denklemlerinin kareleri alınıp d^2 ile çarpılır ve birbirleriyle taraf tarafa toplanırsa,

$$\gamma^2 d^2 + \kappa^2 d^2 = (n_1^2 - n_2^2) k_0^2 d^2 \quad (2.5.5)$$

elde edilir. Aşağıdaki tanımlamalar yapılarak (2.5.5) eşitliğini grafiksel gösterim için daire denklemi şeklinde yazılabilir.

$$X = \kappa d \quad (2.5.6)$$

$$Y = \gamma d \quad (2.5.7)$$

$$R = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} k_0 d \quad (2.5.8)$$

yazılırsa, (2.5.5) eşitliği,

$$X^2 + Y^2 = R^2 \quad (2.5.9)$$

formuna gelir. Aynı yaklaşım karakteristik denklemler için yapılırsa, yani (2.5.3) ve (2.5.4)

denklemleri d ile çarpılırsa,

$$\gamma d = \kappa d \tan(\kappa d) \quad (2.5.10)$$

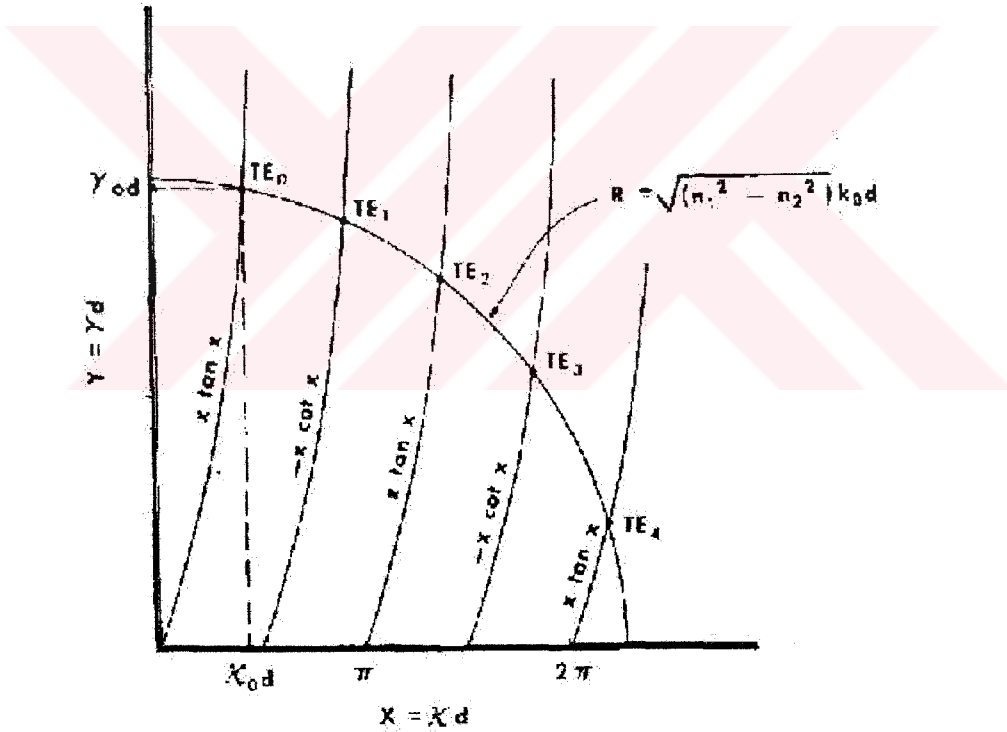
$$\gamma d = -\kappa d \cot(\kappa d) \quad (2.5.11)$$

denklem çifti elde edilir. Yukarıda yaptığımız tanımlamalarla (2.5.10) ve (2.5.11) denklemleri

$$Y = X \tan(X) \quad (2.5.12)$$

$$Y = -X \cot(X) \quad (2.5.13)$$

şekline dönüşür. (2.5.9), (2.5.12) ve (2.5.13) denklemlerini dalga kılavuzunun kılavuzlanmış TE modlarının propagasyon sabitlerini elde etmek için X-Y diyagramı çizilebilir. Şekil 2.5 bu eşitliklerin grafiksel halidir.



Şekil 2.5 Dielektrik slab dalga kılavuzlarında TE modlarının karakteristik eşitlik diyagramı

(2.5.12) ve (2.5.13) denklemlerinin grafiklerinin (2.5.9) denkleminin grafiği yani çemberle kesiştiği noktalar kılavuzdaki modların propagasyon durumlarını tanımlar. Örneğin birinci çift mod TE₀ modu için verilen slab yarı genişliği d için κ_0 ve γ_0 Şekil 2.5 deki ilk kesişim noktasının koordinatlarıyla direkt olarak elde edilebilir. β_0 da (2.5.1) eşitliğiyle hesaplanabilir. Diğer TE_m modları için propagasyon sabitleri aynı yolla başarılı bir şekilde

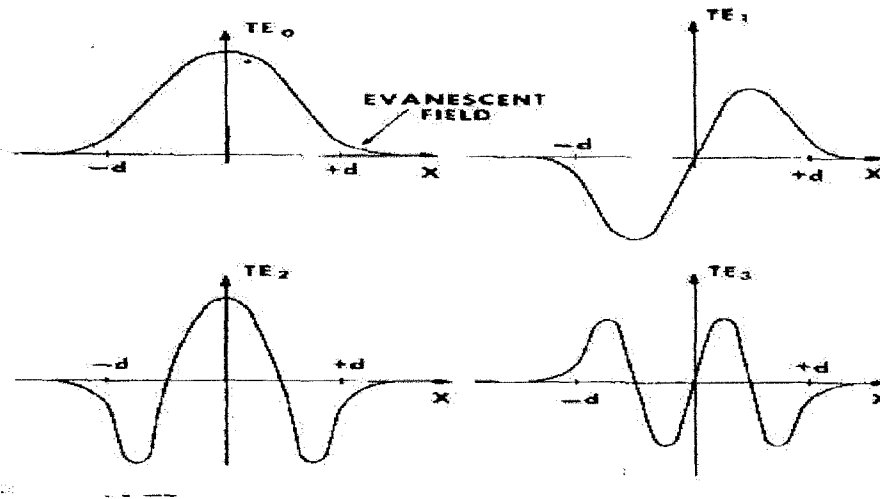
elde edilir. Kılavuzdaki propagasyon sayısının R ile orantılı olduğuna dikkat etmek gerekir.

$$R = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} k_0 d < \frac{\pi}{2} \quad (2.5.14)$$

değeri için Şekil 2.5’de görüldüğü gibi $X \tan(X)$ eğrisinin ilk dalının çemberle kesiştiği noktada tek propagasyon modu olarak TE_0 vardır. Fiziksel parametreler n_1 , n_2 , d ve λ_0 ın kılavuzdaki propagasyon modu sayısını nasıl etkilediğini anlamak için bu parametrelerin R üzerinde yaptığı etki incelenerek bir sonuca varılabilir(Cherin, A.H, (1983). Çizelge 2.1 parametrelerin artışıyla propagasyon modu sayısının nasıl etkilendiğini göstermektedir.

Çizelge 2.1 Artan fiziksel parametrelerin propagasyon modu sayısına etkisi

Artan fiziksel parametreler	Propagasyon modu sayısı
Öz kırılma indisi, n_1	Artar
Kılıf kırılma indisi, n_2	Azalır
Slab yarı genişliği, d	Artar
Kaynak dalga boyu, λ_0	Azalır



Şekil 2.6 Dielektrik slab dalga kılavuzlarında TE modlarının x e bağlı fonksiyonları

Şekil 2.6 dielektrik slab dalga kılavuzundaki TE modlarının x in fonksiyonu olarak çizilmiş grafiklerini göstermektedir. Bu grafiklere göre özün merkezindeki alan dağılımında çift TE modlar belli değerler alırken tek TE modlar 0 değerini alır.

2.6 Dielektrik Slab Dalga Kılavuzlarında TM Modları

TM modları terimleri H_y , E_x ve E_z dir.

$$H_y(x, z) = H_y(x)e^{-j\beta z} \quad (2.6.1)$$

şeklinde tanımlama yapılır ve Helmholtz denkleminde yerine konulursa,

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + (n^2 k_0^2 - \beta^2) H_y = 0 \quad (2.6.2)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadenin çözümünde TE modlarındaki gibidir. Maxwell denklemlerinden (2.2.9) ve (2.2.11) de $\partial/\partial y = 0$ yaklaşımı yapıldığında E_x ve E_z in H_y cinsinden ifadeleri,

$$E_x = \frac{\beta}{\omega \epsilon} H_y \quad (2.6.3)$$

$$E_z = \frac{-j}{\omega \epsilon} \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (2.6.4)$$

olur.

2.7 Dielektrik Slab Dalga Kılavuzlarında Çift TM Modları

Çekirdek bölgesindeki ($|x| \leq d$) alan ifadeleri,

$$H_y = B_e \cos(\kappa x) \quad (2.7.1)$$

$$E_x = \frac{\beta}{\omega \epsilon_1} B_e \cos(\kappa x) \quad (2.7.2)$$

$$E_z = \frac{j\kappa_1}{\omega \epsilon_1} B_e \sin(\kappa x) \quad (2.7.3)$$

dir. Burada, κ çekirdek bölgesine it özdeğerdir:

$$\kappa = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2} \quad (2.7.4)$$

Kılıf bölgesindeki ($|x| > d$) alan ifadeleri,

$$H_y = B_e \cos(\kappa d) e^{-\gamma(|x|-d)} \quad (2.7.5)$$

$$E_x = \frac{\beta}{\omega \epsilon_2} B_e \cos(\kappa d) e^{-\gamma(|x|-d)} \quad (2.7.6)$$

$$E_z = \frac{x}{|x|} \frac{j\gamma}{\omega \epsilon_2} B_e \cos(\kappa d) e^{-\gamma(|x|-d)} \quad (2.7.7)$$

dir. Burada, γ kılıf bölgesine ait özdeğerdir.

$$\gamma = \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2} \quad (2.7.8)$$

Yapılan denklem eşitlikleriyle çift TM modunun karakteristik denklemi

$$\tan(\kappa d) = \frac{n_1^2}{n_2^2} \left(\frac{\gamma}{\kappa} \right) \quad (2.7.9)$$

formundadır.

2.8 Dielektrik Slab Dalga Kılavuzlarında Tek TM Modları

Çekirdek bölgesinde ($|x| \leq d$),

$$H_y = B_0 \sin(\kappa x) \quad (2.8.1)$$

$$E_x = \frac{\beta}{\omega \epsilon_1} B_0 \sin(\kappa x) \quad (2.8.2)$$

$$E_z = -\frac{j\kappa}{\omega \epsilon_1} B_0 \cos(\kappa x) \quad (2.8.3)$$

dir. Kılıf bölgesinde ($|x| > d$),

$$H_y = \frac{x}{|x|} B_0 \sin(\kappa d) e^{-\gamma(|x|-d)} \quad (2.8.4)$$

$$E_x = \frac{\beta}{\omega \epsilon_2} \frac{x}{|x|} B_0 \sin(\kappa d) e^{-\gamma(|x|-d)} \quad (2.8.5)$$

$$E_z = \frac{j\gamma}{\omega\epsilon_2} B_0 \sin(\kappa d) e^{-\gamma(|x|-d)} \quad (2.8.6)$$

dir. Yapılan denklem eşitlikleriyle tek TM modunun karakteristik denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\tan(\kappa d) = -\frac{n_2^2}{n_1^2} \left(\frac{\kappa}{\gamma} \right) \quad (2.8.7)$$

olarak bulunur. Dielektrik slab dalga kılavuzu içindeki tüm modlar sınırlı sayıda kılavuzlanmış mod ve sınırsız sayıda radyasyon modu içerir.

3. OPTİK FİBERLERİN SINIFLANDIRILMASI

1) Mod sayısına göre

- Tek modlu optik fiberler ($2d \approx 1,9 \mu\text{m}$)
- Çok modlu optik fiberler ($2d \approx 10-50 \mu\text{m}$)

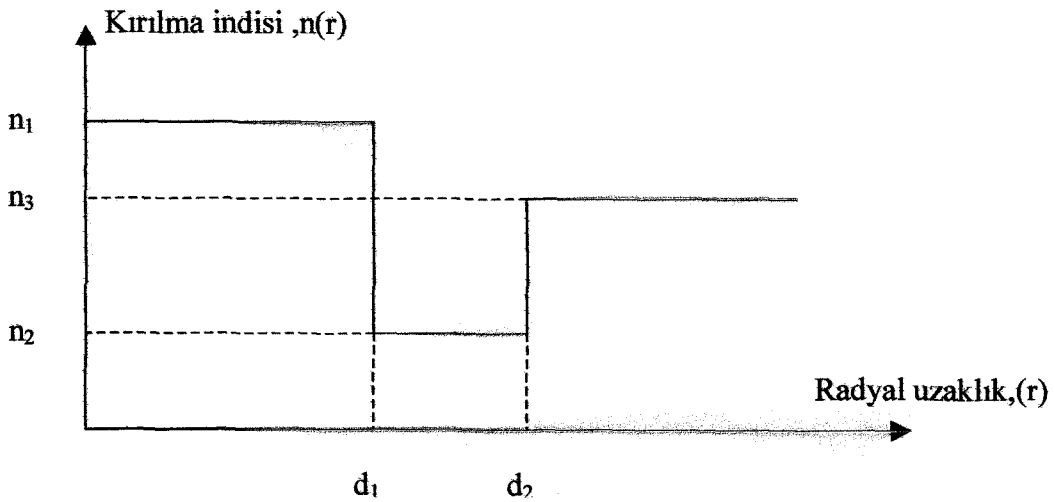
2) Kırılma indisine göre

- Basamak indisli (step-index) optik fiberler
- Yumuşak geçişli (graded-index) optik fiberler

3.1 Tek Modlu Optik Fiberler

Tek modun yayılmasına izin veren optik fiberlerdir. Dalga çekirdeğin merkezinden gider. Bir optik fiberde bir tek modun yayılmasının üstünlüğü, çok modlu fiberde farklı modlar arasındaki gecikme farklılıklarından kaynaklanan işaret dispersiyonundan korunabilmesidir. Tek modun taşınması için fiber sadece bir modun yayılmasına izin verecek şekilde (diğer modlar kaçak veya soğurumla zayıflatılarak) dizayn edilmelidir. Bu durum V (normalize frekans) nin uygun seçimiyle elde edilebilir. $0 \leq V \leq 2.405$ bölgesinde tek modlu yayılım olabilir.

Tek modlu çalışma yarıçap biraz büyük tutulup fiberin bağli kırılma indis farkı azaltılarak da elde edilebilir .Küçük çekirdek bölgesi çapları ışığın fibere sokulmasında ve eklemelerde güçlükler yaratır. Düşük kırılma indis farkı da fiberin fabrikasyon işlemlerinde zorluklar çıkarır. Tek modlu fiberlerde mod zayıflamasını azaltmak için kılıf bölgesi uygun bir kalınlığa, düşük soğurum ve saçılma kayıplarına sahip olmalıdır. (Kapany, N.S, 1972)



Şekil 3.1 Tek modlu fiber için kırılma indis profili

3.2 Çok Modlu Optik Fiberler

Çok modlu fiberler kanal boyunca sonlu sayıda kılavuzlanmış modun yayılmasına izin verirler. Kılavuzlanan mod sayısı fiberin fiziksel parametrelerine (bağıl kırılma indis farkı, çekirdek bölgesi yarıçapı) ve taşınan ışığın dalga boyuna bağlıdır. Optik güç herbiri farklı uzaysal alan dağılımına ve yayılma sabitine sahip çok sayıda kılavuzlanmış moda aktarılır.

Bu kılavuzlanmış modların çoğu kesim frekansından büyük frekansa sahiptirler. Çok modlu fiberlerde gücün çoğu kılıf bölgesinde değil, çekirdek bölgesinde taşınır. Bu yüzden kılıfın özellikleri (örneğin kalınlığı) bu modların yayılmasını önemli ölçüde etkilemez. Yayılan modların farklı grup hızlarından dolayı çok modlu fiberde önemli derecede dispersiyon (=taşınan ışık palslarının genişlemesi) oluşabilir. Dispersiyonun büyüklüğü çok modlu fiberde ulaşılabilen maksimum band genişliğini sınırlar. Düşük band genişlikli uygulamalar için çok modlu fiberler tek modlulara göre şu üstünlüklere sahiptir:

- Tek modlu fibere etkili bir şekilde kuplajlanamayan uzaysal koherent olmayan optik kaynakların kullanılması (LED)
- Büyük çekirdek bölgesi yarıçapları olduğu kadar büyük sayısal açıklıklara sahip olmaları (bu optik kaynaklara kuplajı kolaylaştırır.)
- Fiber bağlama elemanları üzerinde daha düşük tolerans gereklidir.

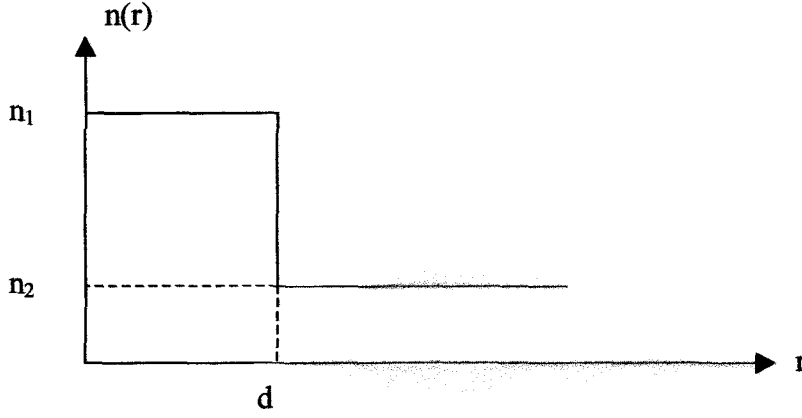
3.3 Basamak İndisli Fiberler

Çekirdek bölgesi kırılma indisi n_1 =sabit ve kılıf kırılma indisi $n_2 < n_1$ olmak üzere kırılma indis profili,

$$n(r) = \begin{cases} n_1 & ; \quad r < d \quad (\text{çekirdek bölgesi}) \\ n_2 & ; \quad r \geq d \quad (\text{kılıf bölgesi}) \end{cases}$$

ile verilen fiberlere basamak indisli fiberler denir. Şekil 3.2 'de kırılma indis profili yer almaktadır. Beslediği mod sayısına göre bu tür fiberler ikiye ayrılır.

- 1) Tek modlu basamak indisli
- 2) Çok modlu basamak indisli



Şekil 3.2 Basamak indisli fiberlerin kırılma indis profili

3.4 Yumuşak Geçişli (Gradyan İndisli) Fiberler

Gradyan indisli fiberler çekirdek bölgesi içinde sabit bir kırılma indisine sahip değildir. ($n_2 \leq n(r) \leq n_1$) Bu indis değişimi aşağıdaki formülle ifade edilebilir.

$$n(r) = \begin{cases} n_1 [1 - 2\Delta(r/d)^\alpha]^{1/2} & ; r < d \\ n_1 [1 - 2\Delta]^{1/2} = n_2 & ; r \geq d \end{cases}$$

Burada α , fiberin özünün karakteristik kırılma indisini veren profil parametresidir.

$\alpha = \infty \Rightarrow$ basamak indisli profil

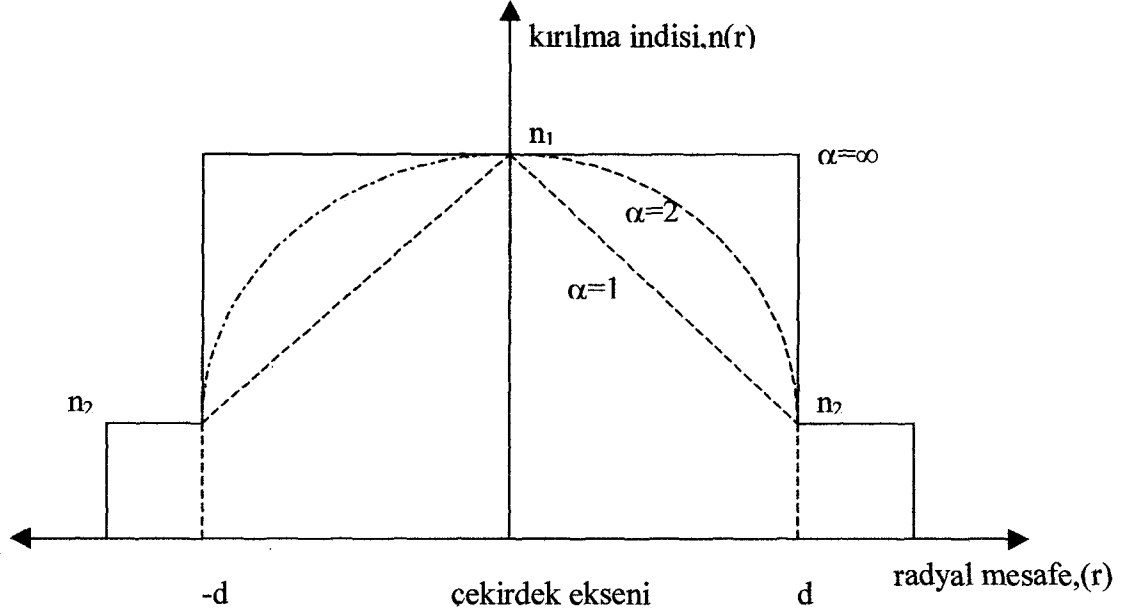
$\alpha = 2 \Rightarrow$ parabolik profil

$\alpha = 1 \Rightarrow$ üçgen profil

$\alpha = 2$ ye karşılık gelen yaklaşık parabolik kırılma indis profiline sahip yumuşak geçişli profiller çok modlu optik yayılma için en iyi sonuçları vermektedir. Yumuşak geçişli optik fiber terimi genellikle parabolik profilli optik fiberi belirtmek için kullanılır.

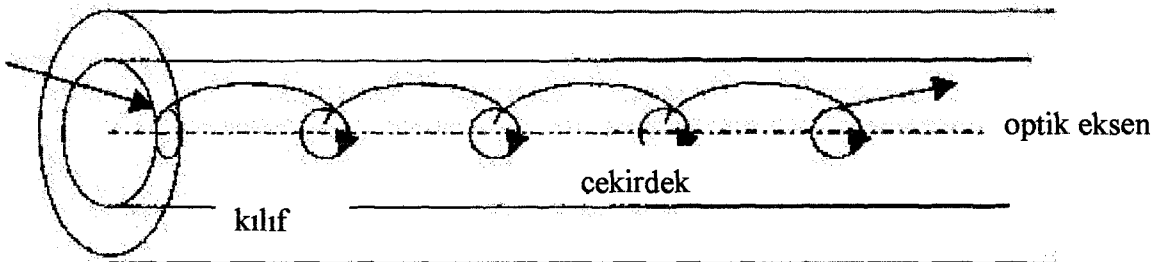
Bu tür fiberlerde meridyenel ışınlar fiber çekirdeği içinde eğrilmiş yollar izlerler. Çekirdeğin kesiti boyunca profilden dolayı yüksek, alçak kırılma indis arayüzeyleri ortaya çıkar. Bu da

ışınların çok sayıda kırılmasına sebep olur.



Şekil 3.3 Farklı α değerleri için mümkün olan fiber kırılma indisi profilleri

Kırılma indisi profili yüzünden çok modlu yumuşak geçişli optik fiberler basamak indisli çok modlu fiberler göre daha az modlar arası dispersiyon sergiler. Benzer bir durum Şekil 3.4 de gösterildiği gibi daha uzun helezon biçimli yollar izleyen çapraz ışınlar içinde mevcuttur. Işınlardan geçiş sürelerinin yaklaşık olarak eşitlenmesi yüzünden parabolik veya yaklaşık olarak parabolik indis profilli çekirdeğe sahip çok modlu değişken indisli fiberler, çok modlu basamak indisli fiberlerin sahip olduğu band genişliklerinden daha büyük band genişliklerine sahiptirler.



Şekil 3.4 Yumuşak geçişli bir fiberde helezon biçimli çapraz ışın yolu

Yumuşak geçişli fiberler için sayısal açıklık fiber ekseninden olan radyal uzaklığın fonksiyonudur. Bu yüzden yumuşak geçişli fiberler aynı bağıl kırılma indisi farkına sahip basamak indisli fiberlerden daha az ışık kabul ederler.

Yumuşak geçişli fiberde yayılan bir ışık ışınımı fiber çekirdek bölgesi içinde her noktaya ulaşması gerekmez. Işın silindirik iki kostik içinde bulundurulur. Çoğu ışınlar için kostik, çekirdek - kılıf arayüzeyi ile çakışmaz. Bu sebeple kostik, yumuşak geçişli fiber özü içinde ışık ışınının klasik dönme noktalarını tanımlar. Bu dönme noktaları $r=r_1$ ve $r=r_2$ ile gösterilebilir. Alan kostikler arasındaki ($r_1 < r < r_2$) bölgede salınım yapar. Bu aralığın dışında alan çözümü sönümlü alan biçimine sahip olmalıdır.



4. SİLİNDİRİK FİBERDE MODAL ANALİZ

Herhangi bir silindirik dielektrik dalga kılavuzu içinde +z doğrultusunda yayılan elektromagnetik alanın ifadesi Maxwell denklemleri ve verilen geometride sınır koşullarının uygulanmasıyla bulunabilir. Kılavuz ortamının parametreleri,

$$\mu = \mu_0 \quad (4.1)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = \varepsilon_0 n^2 \quad (4.2)$$

alanların zamanla değişimi

$$e^{j\omega t} \quad (4.3)$$

olarak kabul edilir. Zamanla harmonik olarak değişim koşullarında Maxwell denklemleri,

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega \vec{E} \quad (4.4)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H} \quad (4.5)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4.6)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (4.7)$$

dir. (4.5) eşitliğinin rotasyoneli alınır ve (4.4) eşitliği kullanılırsa,

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \omega^2 \mu \varepsilon \vec{E} = k^2 \vec{E} \quad (4.8)$$

olur.

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} \quad (4.9)$$

vektörel eşitliği kullanılarak,

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (4.10)$$

ve benzer şekilde

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0 \quad (4.11)$$

elde edilir. Burada k dalga sayısı

$$k = \omega \sqrt{\mu \epsilon} \quad (4.12)$$

dir. Kılavuzlanmış elektromagnetik dalga'nın z yönündeki değişimi,

$$e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (4.13)$$

formundadır.

Dairesel kesitli fiberlerde silindirik koordinatlardaki rotasyonel ifadesine göre;

$$\nabla \times \vec{E} = \begin{vmatrix} \vec{a}_r & r\vec{a}_\phi & \vec{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \phi} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_r & E_\phi & E_z \end{vmatrix} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (4.14)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{1}{r} \begin{vmatrix} \vec{a}_r & r\vec{a}_\phi & \vec{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \phi} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_r & H_\phi & H_z \end{vmatrix} = -j\omega\epsilon\vec{E} \quad (4.15)$$

dir. (4.14) ve (4.15) eşitlikleri açılıp $\partial/\partial z = -j\beta$ yazılarak diğer alan bileşenleri E_z ve H_z 'e bağlı olarak kısaca şöyle ifade edilir:

$$E_r = \frac{-j}{\kappa^2} \left[\beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + \omega\mu \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right] \quad (4.16)$$

$$E_\phi = \frac{-j}{\kappa^2} \left[\beta \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - \omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial r} \right] \quad (4.17)$$

$$H_r = \frac{-j}{\kappa^2} \left[\beta \frac{\partial H_z}{\partial r} - \omega\epsilon \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} \right] \quad (4.18)$$

$$H_\phi = \frac{-j}{\kappa^2} \left[\beta \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} - \omega\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial r} \right] \quad (4.19)$$

Burada, κ özdeğerdir ve

$$\kappa^2 = k^2 - \beta^2 \quad (4.20)$$

olarak ifade edilir. i , çekirdek ve kılıf bölgelerini veren indis olmak üzere ,

$$\kappa_i = k_0^2 n_i - \beta_i^2 \quad i = 1, 2 \quad (4.21)$$

olarak tanımlanır. Basamak indisli fiberlerde,

$$\nabla_t^2 = \nabla^2 - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (4.22)$$

eşitliğini kullanarak dalga denklemi

$$\left(\nabla_t^2 + \kappa_i^2 \right) \begin{Bmatrix} \vec{E}_{zi}(r, \phi) \\ \vec{H}_{zi}(r, \phi) \end{Bmatrix} = 0 \quad i = 1, 2 \quad (4.23)$$

şeklinde yazılır .Bu denklemler aşağıdaki koşullar altında çözülebilir.

- a) $r=0$ için elektromagnetik alan sonlu olmalı
- b) $r \rightarrow 0$ için $E_z=0$, $H_z=0$ olmalı
- c) E_z , H_z ϕ de 2π ile periyodik olmalı
- d) E_z , H_z , H_r , H_ϕ , E_ϕ ve nE_r sınır yüzeyinde sürekli olmalıdır.

(4.14), (4.16), (4.17), (4.18) ve (4.19) denklem takımlarından ve (4.23) dalga denkleminde

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + \kappa^2 E_z = 0 \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \phi^2} + \kappa^2 H_z = 0 \quad (4.25)$$

silindirik koordinat sistemindeki dalga denklemleri elde edilir. E_z in ϕ ve r ye bağlı olarak çözümü,

$$E_z(\phi, r) = A\Phi(\phi)F(r) \quad (4.26)$$

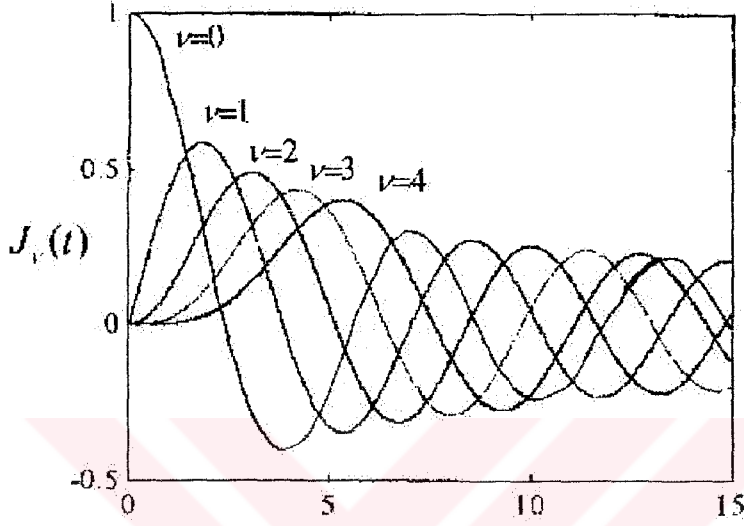
$$\Phi(\phi) = e^{j\nu\phi} \quad (4.27)$$

$$E_z(\phi, r) = Ae^{j\nu\phi}F(r) \quad (4.28)$$

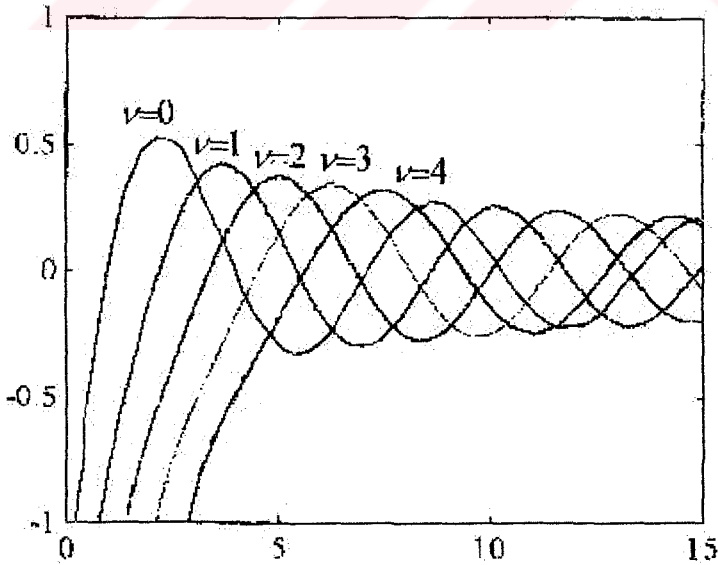
(4.28) denkleminde (4.24) ve (4.25) deki terimler türetilip yerine konulursa

$$\frac{\partial^2 F(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial F(r)}{\partial r} + \left(\kappa^2 - \frac{\nu^2}{r^2} \right) F(r) = 0 \quad (4.29)$$

Bessel diferansiyel denkleminde ulaşılır. Diferansiyel denklem ikinci dereceden olduğundan birbirinden bağımsız iki çözümü vardır. (4.29) denkleminin çözümleri $J_\nu(\kappa r)$ Bessel fonksiyonu ve $Y_\nu(\kappa r)$ Neumann fonksiyonudur. Şekil 4.1 de görüldüğü üzere Bessel fonksiyonları koordinat ekseninde sonlu bir değer alır (Snyder, A.W, 1983, Senior,J., 1992)



Şekil 4.1 Bessel fonksiyonu



Şekil 4.2 Neumann fonksiyonu

Bir başka çözüm seti ise birinci ve ikinci derece Hankel fonksiyonlarıdır. Her iki fonksiyonun $r=0$ da tekilliği söz konusudur. Argümanın büyük değerleri için $H_v^{(1)} -r$ doğrultusunda, $H_v^{(2)}$ ise $+r$ doğrultusunda yayılan dalgayı temsil eder. Hankel fonksiyonlarında κ değeri,

$$\kappa = j\gamma \quad (4.30)$$

olarak tanımlanır. Argümanın büyük değerleri için $H_v^{(1)}(j\gamma r), e^{-\gamma r}$; $H_v^{(2)}(j\gamma r), e^{\gamma r}$ şeklinde davranır. Çekirdek dışındaki kılavuzlanmış modları tanımlamak için sadece exponansiyel olarak azalan $H_v^{(1)}(j\gamma r)$ seçilmesi gerekir. Çekirdek bölgesi içindeki çözümler sonlu olmalı, çekirdek bölgesi dışındaki çözümler ise exponansiyel olarak azalmalıdır.

$r < a$ için Bessel fonksiyonuyla alan ifadeleri,

$$E_z = A J_v(\kappa r) e^{j\nu\phi} \quad (4.31)$$

$$H_z = B J_v(\kappa r) e^{j\nu\phi} \quad (4.32)$$

$r > a$ için birinci çeşit modifiye Hankel fonksiyonuyla alan ifadeleri,

$$E_z = C H_v^{(1)}(j\gamma r) e^{j\nu\phi} \quad (4.33)$$

$$H_z = D H_v^{(1)}(j\gamma r) e^{j\nu\phi} \quad (4.34)$$

Burada A, B, C, D bilinmeyen sabitlerdir. $r < a$ için ,

$$\frac{\partial E_z}{\partial r} = A \kappa J'_v(\kappa r) e^{j\nu\phi} \quad (4.35)$$

$$J'_v = \frac{\partial J_v(\kappa r)}{\partial(\kappa r)} \quad (4.36)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial \phi} = B(j\nu) J_v(\kappa r) e^{j\nu\phi} \quad (4.37)$$

ifadeleri (4.16) ve (4.17) eşitliklerinde yerine konulduğunda,

$$E_r = -\frac{j}{\kappa^2} \left(A \beta \kappa J'_v(\kappa r) + B \omega \mu \frac{1}{r} (j\nu) J_v(\kappa r) \right) e^{j\nu\phi} \quad (4.38)$$

$$E_\phi = -\frac{j}{\kappa^2} \left(j\beta \frac{v}{r} AJ_v(\kappa r) - \kappa\omega\mu BJ_v'(\kappa r) \right) e^{jv\phi} \quad (4.39)$$

olur. Benzer şekilde,

$$H_r = -\frac{j}{\kappa^2} \left(-j\omega\epsilon_1 \frac{v}{r} AJ_v(\kappa r) + \kappa\beta BJ_v'(\kappa r) \right) e^{jv\phi} \quad (4.40)$$

$$H_\phi = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\kappa\omega\epsilon_1 AJ_v'(\kappa r) + j\beta \frac{v}{r} BJ_v(\kappa r) \right) e^{jv\phi} \quad (4.41)$$

ifadelerine ulaşılır. Burada,

$$\kappa^2 = k_1^2 - \beta^2 \quad (4.42)$$

$$k_1^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_1 \quad (4.43)$$

dir. Kılıf bölgesinde ($r > a$) enine alan bileşenleri bulmak için (4.33) ve (4.34) denklemleri kullanılırsa,

$$E_r = -\frac{1}{\gamma^2} \left(C\beta\gamma H_v^{(1)}(j\gamma r) + D\omega\mu_0 \frac{v}{r} H_v^{(1)}(j\gamma r) \right) e^{jv\phi} \quad (4.44)$$

$$E_\phi = -\frac{1}{\gamma^2} \left(C\beta \frac{v}{r} \gamma H_v^{(1)}(j\gamma r) - D\omega\gamma\mu_0 H_v^{(1)}(j\gamma r) \right) e^{jv\phi} \quad (4.45)$$

$$H_r = -\frac{1}{\gamma^2} \left(-C\omega\epsilon_2 \frac{v}{r} \gamma H_v^{(1)}(j\gamma r) + D\gamma\beta H_v^{(1)}(j\gamma r) \right) e^{jv\phi} \quad (4.46)$$

$$H_\phi = -\frac{1}{\gamma^2} \left(C\omega\epsilon_2 \gamma H_v^{(1)}(j\gamma r) + D\beta \frac{v}{r} H_v^{(1)}(j\gamma r) \right) e^{jv\phi} \quad (4.47)$$

olur. Burada,

$$\frac{\partial H_v^1(j\gamma r)}{\partial(j\gamma r)} = H_v^{(1)}(j\gamma r) \quad (4.48)$$

$$\gamma^2 = \beta^2 - k_2^2 \quad (4.49)$$

$$k_2^2 = \omega^2 \mu \epsilon_2 \quad (4.50)$$

dir.

4.1 Basamak İndisli Fiber İçin Sınır Koşulları Ve Karakteristik Denklem

Çekirdek-kılıf ($r=a$) geçiş bölgesinde alan ifadeleri şu şartları sağlamalıdır.

$$\begin{aligned} E_{z1} &= E_{z2} \\ E_{\phi1} &= E_{\phi2} \\ H_{z1} &= H_{z2} \\ H_{\phi1} &= H_{\phi2} \end{aligned} \quad (4.1.1)$$

Sınır koşullarını sağlamalıdır. Bu koşul altında (4.31), (4.32), (4.33), (4.34) eşitlikleri kullanılarak,

$$J_v(\kappa a)A - H_v(j\gamma a)C = 0 \quad (4.1.2)$$

$$\left(\frac{\beta v}{\kappa^2 a}\right)J_v(\kappa a)A + \frac{j\omega\mu_0}{\kappa}J'_v(\kappa a)B + \left(\frac{\beta v}{\gamma^2 a}\right)H'_v(j\gamma a)C - \frac{\omega\mu_0}{\gamma}H_v^{(1)}(j\gamma a)D = 0 \quad (4.1.3)$$

$$J_v(\kappa a)B - H_v^{(1)}(j\gamma a)D = 0 \quad (4.1.4)$$

$$\left(\frac{-j\omega\epsilon_1}{\kappa}\right)J'_v(\kappa a)A + \left(\frac{\beta v}{\kappa^2 a}\right)J_v(\kappa a)B + \left(\frac{\omega\epsilon_2}{\gamma}\right)H_v^{(1)}(j\gamma a)C + \left(\frac{\beta v}{\gamma^2 a}\right)H_v^{(1)}(j\gamma a)D = 0 \quad (4.1.5)$$

eşitlikleri elde edilir. (4.1.2), (4.1.3), (4.1.4) ve (4.1.5) denklemleri matrisel formda yazılırsa A, B, C, D katsayıları sıfır olamayacağından ve denklemin sağ tarafı sıfıra eşit olduğu için matrisin determinantı sıfır olmalıdır.

$$\begin{vmatrix} J_v(\kappa a) & 0 & -H_v^{(1)}(j\gamma a) & 0 \\ \frac{\beta v}{\kappa^2}J'_v(\kappa a) & \frac{j\omega\mu_0}{\kappa}J'_v(\kappa a) & \frac{\beta v}{\gamma^2 a}H_v^{(1)}(j\gamma a) & -\frac{\omega\mu_0}{\gamma}H_v^{(1)}(j\gamma a) \\ 0 & J_v(\kappa a) & 0 & -H_v^{(1)}(j\gamma a) \\ -\frac{j\omega\epsilon_1}{\kappa}J'_v(\kappa a) & \frac{\beta v}{\kappa^2}J_v(\kappa a) & \frac{\omega\epsilon_2}{\gamma}H_v^{(1)}(j\gamma a) & \frac{\beta v}{\gamma^2 a}H_v^{(1)}(j\gamma a) \end{vmatrix} = 0 \quad (4.1.6)$$

Bu sistem determinantı basamak indisli fiber için karakteristik denklemi verir.

$$\left[\frac{\epsilon_1 a \gamma^2}{\epsilon_2 \kappa} \frac{J'_v(\kappa a)}{J_v(\kappa a)} + j\gamma a \frac{H_v^{(1)}(j\gamma a)}{H_v^{(1)}(j\gamma a)}\right] \left[\frac{a \gamma^2 J'_v(\kappa a)}{\kappa J_v(\kappa a)} + j\gamma a \frac{H_v^{(1)}(j\gamma a)}{H_v^{(1)}(j\gamma a)}\right] = \left[v \left[\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} - 1\right] \frac{\beta \kappa_2}{\kappa^2}\right]^2 \quad (4.1.7)$$

(4.1.1) den (4.1.7) ye kadar olan denklemlerle bilinmeyen A, B, C ve D katsayıları arasındaki

ilişki,

$$C = \frac{J_\nu(\kappa a)}{H_\nu^{(1)}(j\gamma a)} A \quad (4.1.8)$$

$$D = \frac{J_\nu(\kappa a)}{H_\nu^{(1)}(j\gamma a)} B \quad (4.1.9)$$

şeklinde. (4.1.8) ve (4.1.9) eşitlikleri (4.1.7) eşitliğinde kullanılırsa A ya bağlı olarak B terimi için çözüm,

$$B = \frac{j a \kappa \gamma [\varepsilon_1 \gamma J'_\nu(\kappa a) H_\nu^{(1)}(j\kappa a) + j \varepsilon_2 \kappa J_\nu(\kappa a) H_\nu^{(1)}(j\kappa a)]}{\omega(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \mu_0 \beta J_\nu(\kappa a) H_\nu^{(1)}(j\kappa a)} A \quad (4.1.10)$$

dir. Eğer (4.1.5) yerine (4.1.3) kullanılırsa A ve B arasındaki ilişki,

$$B = \frac{j \nu \omega(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \beta J_\nu(\kappa a) H_\nu^{(1)}(j\kappa a)}{a \kappa \gamma [\gamma J'_\nu(\kappa a) H_\nu^{(1)}(j\kappa a) + j \kappa J_\nu(\kappa a) H_\nu^{(1)}(j\kappa a)]} A \quad (4.1.11)$$

olur. (4.1.10) ve (4.1.11) eşitlikleri basamak indisli fiberde yayılabilen mod tiplerini belirlemekte kullanılır.

4.2 Basamak İndisli Fiberde Mod Karakteristikleri

Genelde basamak indisli fiberde altı alan bileşeni mevcuttur. Basamak indisli fiberlerde ışın analizi terimleri olarak hibrid modlar propagasyon yapan skew ışınlarına, TE ve TM modları da meridyenel yayılan ışınlara uyarlar. Özel bir durum olan $\nu=0$ için (4.1.7) karakteristik denkleminin sağ tarafı sıfıra eşit olur ve TE ile TM modlarını tanımlayan iki karakteristik eşitlik elde edilir.

TE modları ($E_z=0$) için,

$$\frac{a \gamma^2 J_0(\kappa a)}{\kappa J_0(\kappa a)} + j \gamma a \frac{H_0^{(1)}(j\gamma a)}{H_0^{(1)}(j\gamma a)} = 0 \quad (4.2.1)$$

ve TM modları ($H_z=0$) için,

$$\frac{\varepsilon_1 a \gamma^2 J_0(\kappa a)}{\varepsilon_2 \kappa J_0(\kappa a)} + j \gamma a \frac{H_0^{(1)}(j\gamma a)}{H_0^{(1)}(j\gamma a)} = 0 \quad (4.2.2)$$

dır. Alan bileşenleri,

$$E_z = AJ_\nu(\kappa r)e^{j\nu\phi} \quad (4.2.3)$$

$$H_z = BJ_\nu(\kappa r)e^{j\nu\phi} \quad (4.2.4)$$

formundadır. $A=0$ iken $E_z=0$; $B=0$ iken $H_z=0$ dır. (4.1.10) eşitliğinden görüldüğü gibi $\nu \rightarrow 0$, $B \rightarrow \infty$ ve $A=0$. (4.2.1) eşitliği TE modlarını tanımladığı görülmektedir. (4.1.11) eşitliğini kullanarak $\nu=0$ iken $B=0$ olur. (4.2.2) karakteristik denklemi kılavuzlanmış TM modlarıdır.

4.3 Mod Kesim Şartları

Her propagasyon modu için önemli bir parametre kesim frekansıdır. Kılıftaki alanın yayılma sabiti değeri γ ile gösterilir. Modifiye Hankel fonksiyonunun r nin büyük değerleri için asimptotik yaklaşımı;

$$H_\nu^{(1)}(j\gamma r) = \sqrt{\frac{2}{\pi j r}} \left(e^{-j(\frac{\pi \nu}{2} + \frac{\pi}{4})} \right) e^{-\gamma r} \quad (4.3.1)$$

dir. γ nın büyük değerleri için alan çekirdek içinde sınırlıdır. γ nın azalan değerleri ile kılıfta alan daha uzaklara gider. Sonuç olarak $\gamma=0$ için alan kılavuzdan ayrılır. Bu olaydaki frekans kesim frekansı olarak adlandırılır. Kesim koşulunda,

$$\gamma = 0 = \sqrt{\beta_c^2 - k_{2c}^2} \quad (4.3.2)$$

veya

$$\beta_c^2 = k_{2c}^2 \quad (4.3.3)$$

$$k_{2c}^2 = \omega_c^2 \mu_0 \epsilon_2 \quad (4.3.4)$$

dir. Kesim koşulunda dalga kılavuzunun çekirdek bölgesinde,

$$\kappa_c^2 = k_{1c}^2 - \beta_c^2 \quad (4.3.5)$$

$$k_{1c}^2 = \omega_c^2 \mu_0 \epsilon_1 \quad (4.3.6)$$

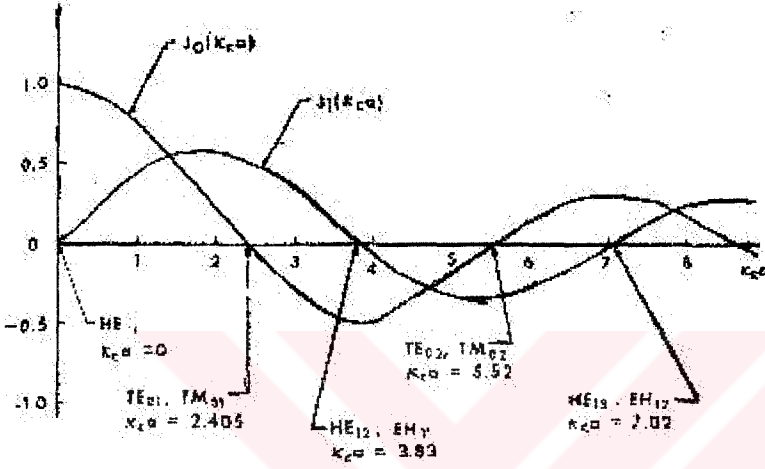
dir.(4.3.3) eşitliği (4.3.5) eşitliğinde yerine yazılırsa bir modun kesim frekansı için,

$$\kappa_c^2 = k_{1c}^2 - k_{2c}^2 = \omega_c^2 \mu_0 (\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (4.3.7)$$

olur. Burada kesim frekansı,

$$\omega_c = 2\pi f_c = \frac{\kappa_c}{\sqrt{\mu_0(\epsilon_1 - \epsilon_2)}} \quad (4.3.8)$$

olarak elde edilir. f_c , kesim frekansı mod oluşumunda en alt sınırı gösterir. Bir modun kesim frekansı ancak $\kappa_c=0$ ise sıfır olabilir. $\omega_c=0$ için bir fiberde sadece bir mod bulunabilir. Bu durum HE_{11} temel modunu oluşturur. Bütün modlar kesimdeyken HE_{11} modu yayılabilir.



Şekil 4.3 Bessel fonksiyonu üzerinde modların kesim noktaları

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

z yönünde yayılan elektrik alan bileşeni ifadesi,

$$E = AF(r) \begin{pmatrix} \cos(v\phi) \\ \sin(v\phi) \end{pmatrix} e^{-j\beta z} \quad (4.4.1)$$

dir. Burada $F(r)$ (4.29) eşitliğinde verilen alanın dairesel değişimidir. (4.29) denklemini tekrar yazılırsa,

$$\frac{d^2 F(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF(r)}{dr} + \left[k^2(r) - \beta^2 - \frac{v^2}{r^2} \right] F(r) = 0 \quad (4.4.2)$$

WKB metodunun genel yaklaşımı eğer kırılma indis dağılımı bir sabit veya r ye bağlı olarak yavaş bir değişim varsa kabul edilir. $F(r)$ nin genel çözümü üniform olmayan düzlem dalgalarındaki formu,

$$F(r) = e^{jk_0 S(r)} \quad (4.4.3)$$

olarak yazılır. (4.4.3) eşitliği (4.4.2) Bessel diferansiyel denkleminde yerine konulur ve düzenlenirse,

$$jk_0 \frac{d^2 S(r)}{dr^2} - k_0 \left[\frac{dS(r)}{dr} \right]^2 + \frac{jk_0}{r} \frac{dS(r)}{dr} + \left[k^2(r) - \beta^2 - \frac{\nu^2}{r^2} \right] \quad (4.4.4)$$

olur. r ye bağlı olarak indis değişimi derece derecedir, bu yüzden $S(r)$ dalga boyuyla orantılı olarak yaklaşık sabittir. $S(r)$ $1/k_0$ ın güç serisine açılımı olarak ifade edilebilir:

$$S(r) = S_0(r) + \frac{1}{k_0} S_1(r) + \frac{1}{k_0^2} S_2(r) + \dots \quad (4.4.5)$$

Bu serinin etkin olan ilk iki terimi alınrsa aşağıdaki eşitlikler yazılır.

$$\frac{dS(r)}{dr} = \frac{dS_0(r)}{dr} + \frac{1}{k_0} \frac{dS_1(r)}{dr} \quad (4.4.6)$$

$$\left[\frac{dS(r)}{dr} \right]^2 = \left(\frac{dS_0(r)}{dr} \right)^2 + \frac{1}{k_0^2} \left(\frac{dS_1(r)}{dr} \right)^2 + \frac{2}{k_0} \frac{dS_0(r)}{dr} \frac{dS_1(r)}{dr} \quad (4.4.7)$$

$$\frac{d^2 S(r)}{dr^2} = \frac{d^2 S_0(r)}{dr^2} + \frac{1}{k_0} \frac{d^2 S_1(r)}{dr^2} \quad (4.4.8)$$

(4.4.6) , (4.4.7), (4.4.8) eşitlikleri (4.4.4) de yerine konulursa,

$$jk_0 \frac{d^2 S_0}{dr^2} + j \frac{d^2 S_1}{dr^2} - k_0^2 \left(\frac{dS_0}{dr} \right)^2 - \left(\frac{dS_1}{dr} \right)^2 - 2k_0 \frac{dS_0}{dr} \frac{dS_1}{dr} + j \frac{k_0}{r} \frac{dS_0}{dr} + j \frac{1}{r} \frac{dS_0}{dr} + \left[k^2(r) - \beta^2 - \frac{\nu^2}{r^2} \right] = 0 \quad (4.4.9)$$

eşitliği elde edilir. (4.4.9) eşitliğinde k_0 ın eşit kuvvetleri birbirine eşitlenirse,

$$-k_0^2 \left(\frac{dS_0}{dr} \right)^2 + \left[k^2(r) - \beta^2 - \frac{\nu^2}{r^2} \right] = 0 \quad (4.4.10)$$

$$jk_0 \frac{d^2 S_0}{dr^2} - 2k_0 \frac{dS_0}{dr} \frac{dS_1}{dr} + j \frac{k_0}{r} \frac{dS_0}{dr} = 0 \quad (4.4.11)$$

olur. (4.4.9) denkleminin çözümü $S_0(r)$ için propagasyon sabiti ile ilgili bilgiler verir.

4.5 Yumuşak Geçişli Optik Fiberde Propagasyon Sabitleri

Yumuşak geçişli bir fiberde modlar hakkında bilgi elde etmek için (4.4.10) eşitliğinden $S_0(r)$ çözülür ve

$$S_0(r) = \pm \frac{1}{k_0} \int \left[k^2(r) - \beta^2 - \frac{v^2}{r^2} \right] dr \quad (4.5.1)$$

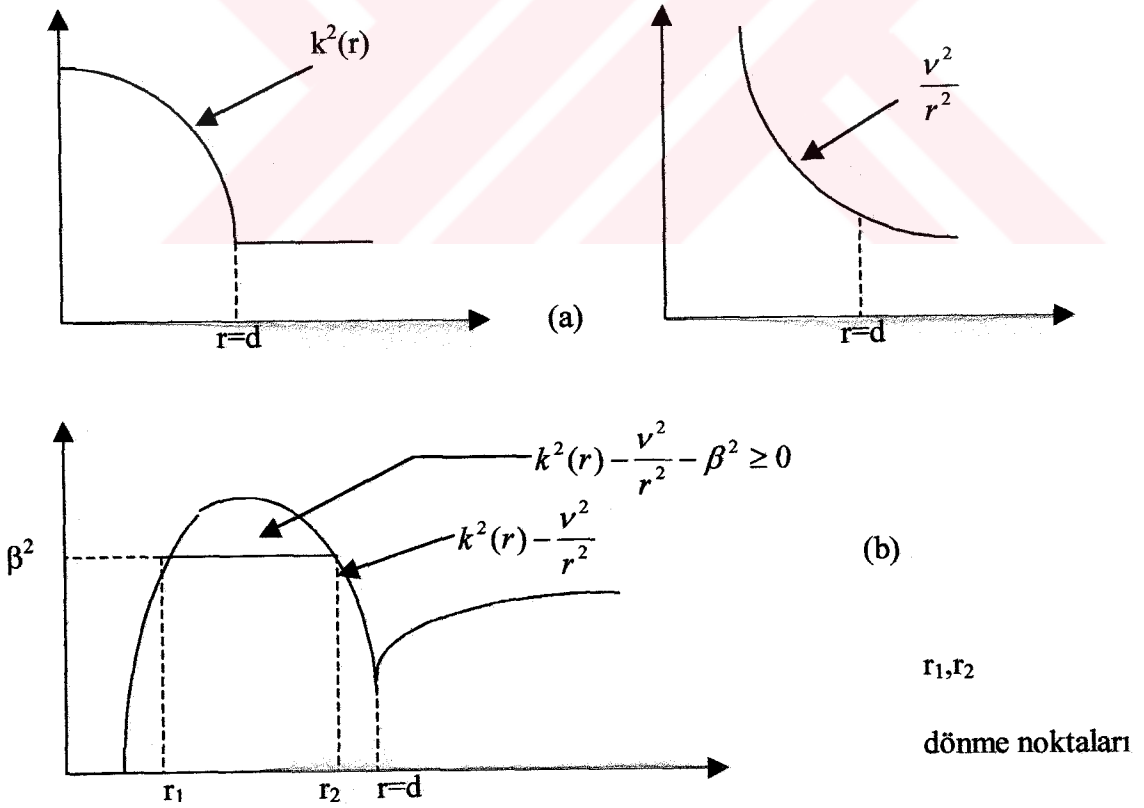
elde edilir. $S_0(r)$ sıfırıncı dereceden WKB yaklaşımıdır. (4.4.3) eşitliğindeki $F(r)$ yazılırsa,

$$F(r) = e^{jk_0 S_0(r)} \quad (4.5.2)$$

olur. Bu ifadeye göre bir propagasyon modunun mevcut olması için $S_0(r)$ gerçel olmalıdır. Bu aynı zamanda (4.6.1) integral eşitliğinin de gerçel olmasını gerektirir. Bunun için de,

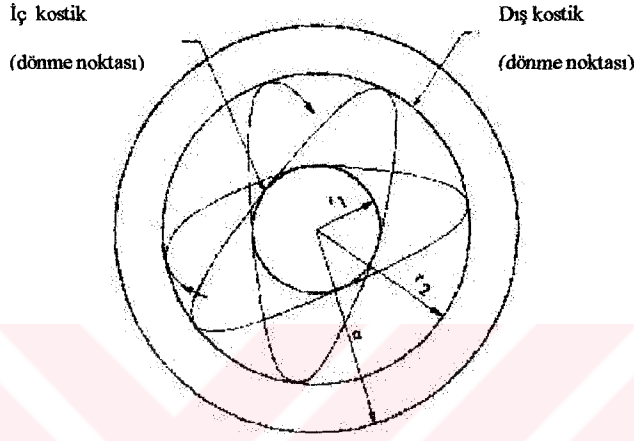
$$k^2(r) - \beta^2 - \frac{v^2}{r^2} > 0 \quad (4.6.3)$$

olmalıdır. Sınırlı modların fiziksel yorumu için (4.6.3) ifadesinin grafik analizi yapılmalıdır.

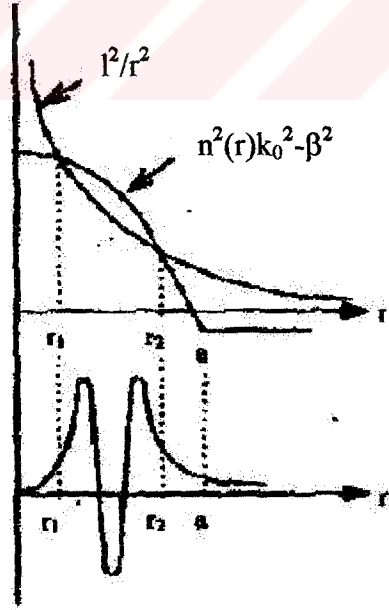


Şekil 4.4 Gradyan indisli fiber için k nın değişimi

Şekil 4.4.a $k^2(r)$ ve $\frac{v^2}{r^2}$ nin r yarıçapına göre, Şekil 4.4.b'de $k^2(r) - \frac{v^2}{r^2}$ nin r ye göre çizimleridir. Şekil 4.4.b 'de görüldüğü gibi β nın sabit bir değeri için r iki değer (r_1, r_2) alır. Bu iki yarıçap gerçekte olmayıp düzlem dalga çözümlerinin sonucu olarak ışınların hareket ettiği elektrik alan ifadelerinin değişim gösterdiği ışığın dönüm noktalarıdır. Bu dönüm noktalarına kostik adı verilir.



Şekil 4.5 Gradyan indisli fiberde ışın gösterilimi

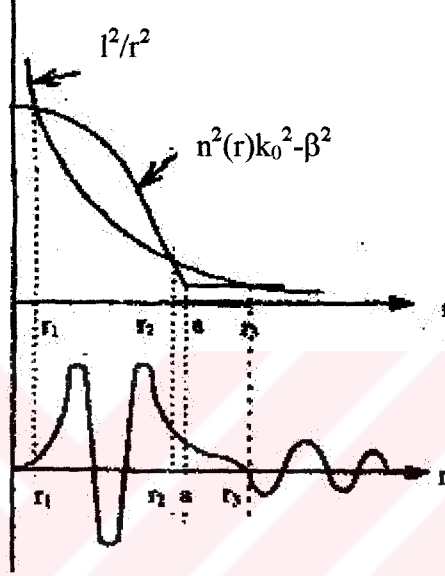


Şekil 4.6 Kılavuzlanmış bir mod için WKB çözümü

Basamak indisli fiberde $v=0$ koşulunda TE, TM modları elde edilir. Bu modlar meridyenel ışınların yerini tutar.

1) $n_1 k_0 \geq \beta \geq n_2 k_0$

- Kılavuzlanmış moda karşılık gelen WKB çözümüdür.
- Çözüm dönme noktaları arasında salıncı yapıdadır.
- Dalga çekirdek bölgesindeki r_1, r_2 dönme noktaları arasında osilasyon yaparken $r > r_2$ bölgesinde evanescent (sönümlü) davranış gösterir.



Şekil 4.7 Sızıntılı mod çözümü

2) $\beta < n_2 k_0$

- Sızıntılı mod çözümü.
- Büyük r değerleri için $n^2(r)k_0^2 - \beta^2$ artık negatif olamaz ve 3.dönme noktası oluşur.
- $r_2 < r < r_3$ bölgesinde alan evanescent davranış gösterir.
- $r > r_3$ için alan salıncı yapıdadır. Dalga artık kılavuzlanamaz, radyasyonla güç kaybı olur.

3) $\beta = n_2 k_0$

- Kesim koşulunda mod kılavuzlanamaz. Bu dalgalar tünel sızıntılı dalgalar olarak nitelendirilir. Dalga evanescent davranış gösterir. Kılıf bölgesine tünellemeyle güç aktarılır.

5. OPTİK DALGA KILAVUZUNDA RADYASYON MODLARI

Optik dalga kılavuzlarındaki toplam elektromagnetik alan, kılavuzlanmış alan ve radyasyon alanı olmak üzere iki bileşenden oluşur. Radyasyon modları genelde dalga kılavuzu özelliklerine sahiptirler ve silindirik simetri nedeniyle kılavuzlanmış modlarla benzer özellikler gösterirler. Ancak bu modlar optik fiberden uzaklaştıkça kılavuzlanmış modlardaki alanların sönümlü (evanescent) olma özelliği yerine osilasyon yaparlar. Bu nedenle modal propagasyon sabitinin reel değerleri için kılavuzlanmış modlarda elde edilen özdeğer denklemi radyasyon modlarında geçerliliğini kaybeder. Optik fiberlerdeki modlar arasındaki farklılığın temel nedeni β propagasyon sabitidir. Kılavuzlanmış modlar için β propagasyon sabiti, $n_2 k_0 < |\beta| < n_1 k_0$ aralığında yer alır ve ayırık değerlidir. Oysa propagasyon yapan radyasyon modlarında β , $0 < |\beta| < n_2 k_0$ aralığında yer alır ve sürekli değerlidir.

Zayıfça kılavuzlama yaklaşımında radyasyon modları skaler dalga denkleminin çözümünde elde edilen ve $\beta \approx n_1 k_0 \approx n_2 k_0$ olması nedeniyle TEM moduna yaklaşan kılavuzlanmış modlardan farklı olarak propagasyon sabitinin $0 < |\beta| < n_2 k_0$ aralığında olması nedeniyle TEM modu özelliği göstermezler (Ünverdi, N.Ö, 1998)

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 modların genliği olmak üzere,

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

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

dır. Bu bölümde düzlemsel yapıdaki optik dalga kılavuzlarındaki radyasyon modları TE ve TM nin tek ve çift modları için değerlendirme yapılmıştır.

5.1 Çift TE Radyasyon Modları

Radyasyon modlarında optik dalga kılavuzunun dışındaki alan bağlantılarının exponansiyel 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 nın 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 ($|x| > d$) fazladan bir dalga gereklidir. Bu durumda (5.1.1) eşitliği γ nın imajiner değeri için yürüyen dalga kapsamına girer. Ayrıca karşıt doğrultudaki bir başka yürüyen dalga bir genlik katsayısını sağlayarak homojen olmayan eşitlikte sınır değer probleminin çözümünü verir.

$$E_{y2} = Ce^{-\gamma(|x|-d)} \quad (5.1.1)$$

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

$$E_{y1} = K_{\phi} \cos(\omega x) \quad (5.1.2)$$

dir. Burada K_{ϕ} sınır koşullarına göre belirlenecek katsayı ve bu bölgenin özdeğeri ω ise

$$\omega^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (5.1.3)$$

dir. Kılavuzun $|x| > d$ bölgesinde,

$$E_{y2} = L_{\phi} e^{-j\xi|x|} + M_{\phi} e^{j\xi|x|} \quad (5.1.4)$$

dir. Burada L_{ϕ} ve M_{ϕ} katsayılar, ξ ise bu bölgenin özdeğeridir. ξ nin ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\xi^2 = n_2^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (5.1.5)$$

Diğer alan bileşenleri Maxwell denklemleri yardımıyla belirlenir.

Sınır koşullarına göre yazılan iki eşitlikte $K_{\phi}, L_{\phi}, M_{\phi}$ olmak üzere üç tane bilinmeyen olduğuna göre sistemin çözülebilmesi için katsayılardan birinin verilmesi gerekir. Bunun için de sistem determinantı sıfıra eşit olmalıdır. Bu durumda da β propagasyon sabitinin herhangi bir değeri

için özdeğer denklemi elde edilemeyeceği görülmektedir. Sınır koşulları uyarınca katsayılar arasındaki ilişkiler,

$$L_{\xi} = \frac{K_{\xi}}{2} \exp(j\xi d) \left[\cos(\omega d) - j \frac{\omega}{\xi} \sin(\omega d) \right] \quad (5.1.6)$$

$$M_{\xi} = L_{\xi}^* \quad (5.1.7)$$

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

$$K_{\xi} = \left[\frac{2\xi^2 \omega \mu_0}{\pi \beta [\xi^2 \cos^2(\omega d) + \omega^2 \sin^2(\omega d)]} P \right]^{1/2} \quad (5.1.8)$$

olarak elde edilir. Burada P moda ilişkin gücü ifade eder.

5.2 Tek TE Radyasyon Modları

Katmanlı dalga kılavuzunun $|x| < d$ ve $|x| > d$ bölgelerinde,

$$E_{y_1} = K_t \sin(\omega x) \quad (5.2.1)$$

$$E_{y_2} = \frac{x}{|x|} \left[L_t e^{-j\xi|x|} + M_t e^{j\xi|x|} \right] \quad (5.2.2)$$

dir. Burada K_t , L_t , M_t katsayılarıdır ve sınır koşullarıyla güç bağıntısına göre,

$$L_t = \frac{K_t}{2} \exp(j\xi d) \left[\sin(\omega d) - j \frac{\omega}{\xi} \cos(\omega d) \right] \quad (5.2.3)$$

$$M_t = L_t^* \quad (5.2.4)$$

$$K_t = \left[\frac{2\xi^2 \omega \mu_0}{\pi \beta [\xi^2 \sin^2(\omega d) + \omega^2 \cos^2(\omega d)]} P \right]^{1/2} \quad (5.2.5)$$

olarak ifade edilir.

5.3 Çift TM Radyasyon Modları

Katmanlı dalga kılavuzunun $|x| < d$ ve $|x| > d$ bölgelerinde,

$$H_{y_1} = K_{\varphi} \cos(\omega x) \quad (5.3.1)$$

$$H_{y_2} = L_{\varphi} e^{-j\xi|x|} + M_{\varphi} e^{j\xi|x|} \quad (5.3.2)$$

dir. Burada K_{φ} , L_{φ} , M_{φ} katsayılarıdır ve sınır koşullarıyla güç bağıntısına göre,

$$L_{\varphi} = \frac{K_{\varphi}}{2} \exp(j\xi d) \left[\cos(\omega d) - j \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \frac{\omega}{\xi} \sin(\omega d) \right] \quad (5.3.3)$$

$$M_{\varphi} = L_{\varphi}^* \quad (5.3.4)$$

$$K_{\varphi} = \left[\frac{2n_1^2 \xi^2 \omega \mu_0}{\pi \beta \left[\left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \xi^2 \cos^2(\omega d) + \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \omega^2 \sin^2(\omega d) \right] P} \right]^{1/2} \quad (5.3.5)$$

olarak bulunur.

5.4 Tek TM Radyasyon Modları

Katmanlı dalga kılavuzunun $|x| < d$ ve $|x| > d$ bölgelerinde,

$$H_{y_1} = K_t \sin(\omega x) \quad (5.4.1)$$

$$H_{y_2} = \frac{x}{|x|} \left[L_t e^{-j\xi|x|} + M_t e^{j\xi|x|} \right] \quad (5.4.2)$$

dir. Burada K_t , L_t , M_t katsayılarıdır ve sınır koşullarıyla güç bağıntısına göre,

$$L_t = \frac{K_t}{2} \exp(j\xi d) \left[\sin(\omega d) - j \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \frac{\omega}{\xi} \cos(\omega d) \right] \quad (5.4.3)$$

$$M_t = L_t^* \quad (5.4.4)$$

$$K_t = \left[\frac{2n_1^2 \xi^2 \omega \mu_0}{\pi \beta \left[\left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \xi^2 \sin^2(\omega d) + \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \omega^2 \cos^2(\omega d) \right]} P \right]^{1/2} \quad (5.4.5)$$

olarak elde edilir.

6. SIZINTILI (LEAKY) MODLAR

Sızıntılı modlar optik dalga kılavuzlarında radyasyon alanının bir kısmını temsil eder. Bu modların fiziksel mekanizmasının anlaşılabilmesi için dalga denklemi göz önüne alınarak ışın teorisiyle uyumlu WKB Metodu ile dalga propagasyonu incelenir ve kostik kavramı yorumlanır.

Elektrik alan ifadesi,

$$E = AF(r) \begin{pmatrix} \cos(v\phi) \\ \sin(v\phi) \end{pmatrix} e^{-j\beta z} \quad (6.1)$$

olmak üzere Bessel diferansiyel denklemi,

$$\frac{d^2 F(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF(r)}{dr} + \left[k^2(r) - \beta^2 - \frac{v^2}{r^2} \right] F(r) = 0 \quad (6.2)$$

olarak yazılır. Burada,

$$F(r) = e^{jk_0 S(r)} \quad (6.3)$$

$$k(r) = k_0 n(r) \quad (6.4)$$

dir. Ve

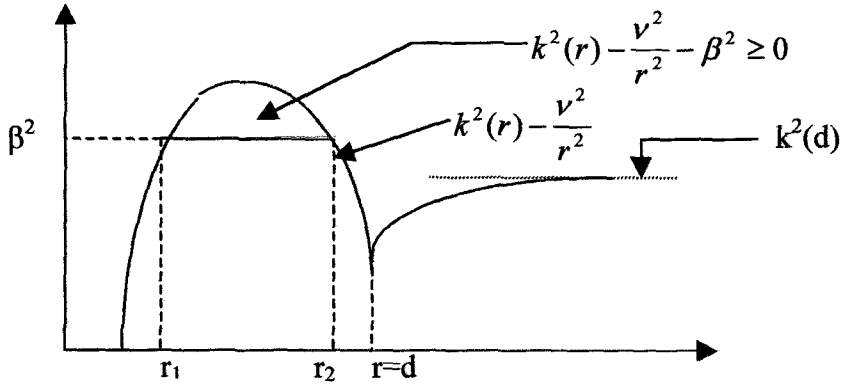
$$S(r) = S_0(r) + \frac{1}{k_0} S_1(r) + \frac{1}{k_0^2} S_2(r) + \dots \quad (6.5)$$

asimptotik seridir. Bu seride ilk iki terim alınır ve diferansiyel denklemde yerine konulursa çözüm olarak

$$S_0(r) = \pm \frac{1}{k_0} \int \left[k^2(r) - \beta^2 - \frac{v^2}{r^2} \right] dr \quad (6.6)$$

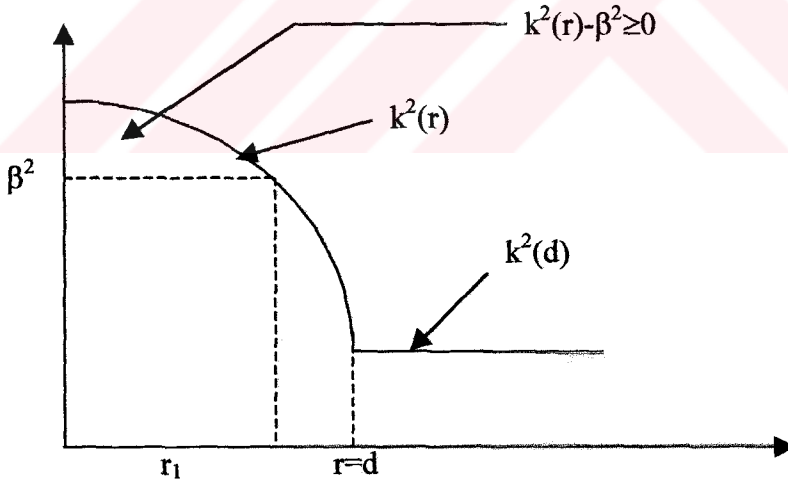
elde edilir. Bu noktada önemli olan β propagasyon sabitinin değerlendirilmesidir. (6.3) eşitliği gereğince propagasyon yapan bir mod için $S_0(r)$ nin reel olması gerekmektedir. Bu durumda (6.6) eşitliğine göre integralin içi pozitif olmalıdır:

$$k^2(r) - \beta^2 - \frac{v^2}{r^2} > 0 \quad (6.7)$$



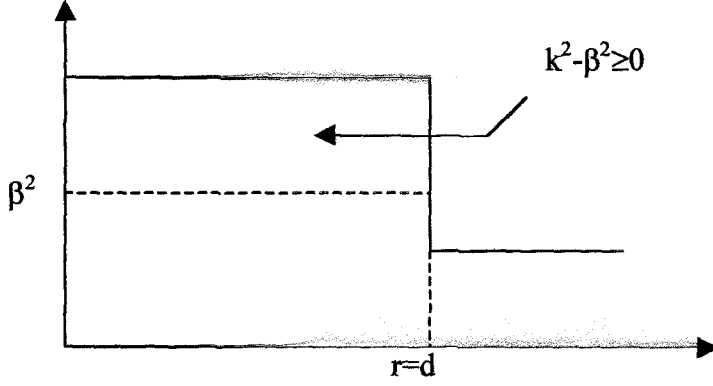
Şekil 6.1 Yumuşak geçişli optik fiberde helisel ışınlarda dalga sayısı diyagramı

β nın sabit bir değeri için Şekil 6.1'e göre yumuşak geçişli bir optik fiberin çekirdek bölgesinde iki kostik söz konusudur. Kılavuzlanan helisel ışınlar bu iki kostik arasında helisel yörüngelerde yer alırlar. Dış kostiği çekirdek bölgesi dışında olan ışınlar artık homojen olmayan kılıf bölgesinden geri dönemeyecekleri için radyasyon modlarına karşı gelirler. Helisel ışınlar hiçbir zaman optik fiber ekseninden geçmezler.



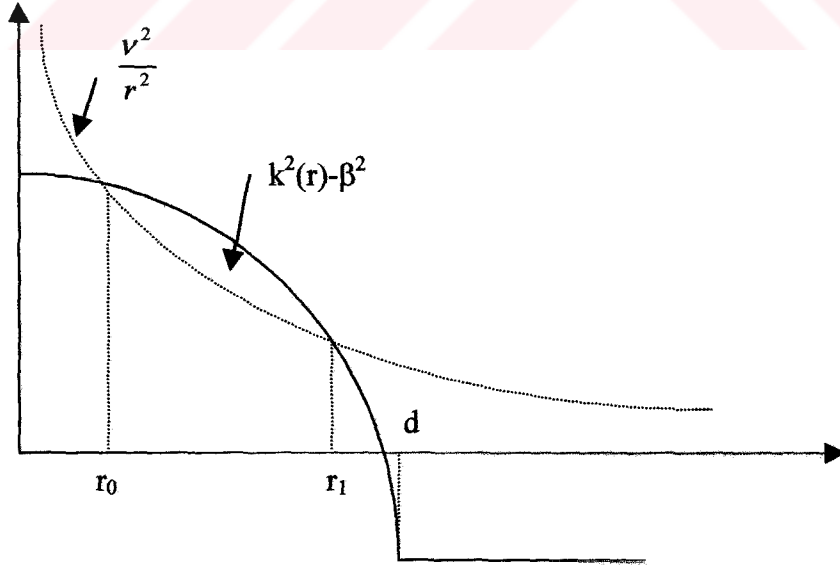
Şekil 6.2 Yumuşak geçişli optik fiberde eksenel ışınlarda dalga sayısı diyagramı

Eksenel ışınlar $v=0$ özel durumu ifade eder. Bu durum TE ve TM modlarına karşı gelir. Şekil 6.2 ve Şekil 6.3 'e göre eksenel ışınlarda bir tane kostik mevcuttur. Bu kostik, çekirdek bölgesi içinde yer alıyorsa kılavuz modları, kılıf bölgesinde bulunuyorsa da radyasyon modları söz konusudur.(Ünverdi, N.Ö, 1998,Cherin, A.H, 1983, Marcuse, D., 1974)



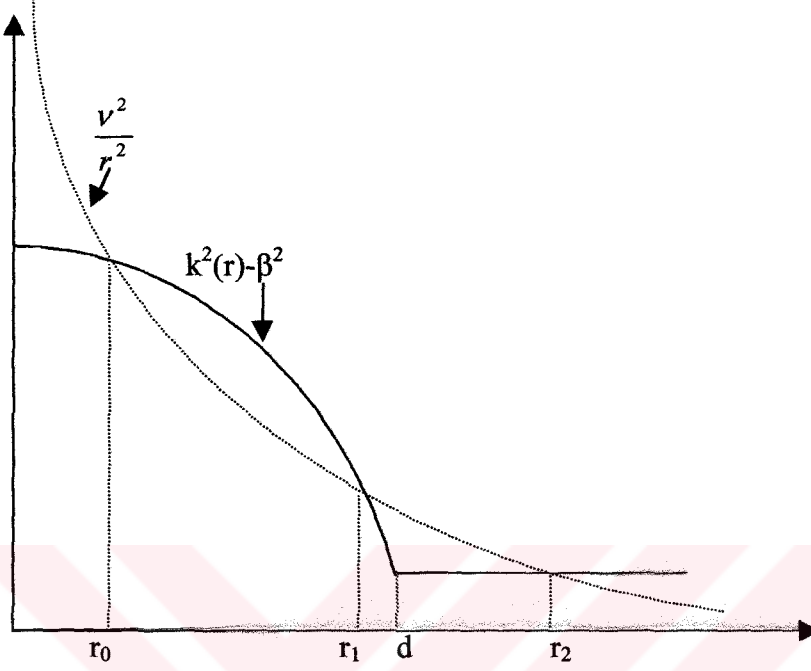
Şekil 6.3 Basamak indisli optik fiberde eksenel ışınlarda dalga sayısı diyagramı

Yukarıdaki açıklamalardan anlaşılacağı gibi β propagasyon sabiti ile v azimutal mod sayısı arasındaki ilişkilerin ve buna bağlı olarak kostik kavramının açıklanması dalga karakterinin osilasyondan evanescent davranışa geçişindeki fiziksel mekanizmanın ortaya konulmasında başlangıç noktasını temsil eder. WKB metodunun $\beta > n_2 k_0$ 'a ilişkin çözümünde dış kostik çekirdek bölgesinde kaldığı müddetçe alanın kılavuzlandığı görülür. (6.6) eşitliği ve Şekil 6.4' e göre dalga çekirdek bölgesindeki r_0 ve r_1 dönme noktaları arasında osilasyon yaparken $r > r_1$ bölgesinde evanescent davranış gösterir, ışınma kostiği sonsuzdadır.



Şekil 6.4 WKB metodunun $\beta > n_2 k_0$ çözümünün grafiksel gösterilimi

(6.6) eşitliği ve WKB metodunun $\beta < n_2 k_0$ 'a ilişkin çözümünü veren Şekil 6.5 e göre r_2 dönme noktası dışında alan tekrar osilasyona başlar ve sonsuza doğru enerji taşır. Dalga artık gerçekten kılavuzlanamaz, ancak radyasyon ile güç kaybı olur.



Şekil 6.5 WKB metodunun $\beta < n_2 k_0$ çözümünün (sızıntılı dalgalar) grafiksel gösterimi

Yukarıda açıklanan bilgiler ışığında kesim koşulunun $\beta = n_2 k_0$ olduğu açıkça görülmektedir. Bu dalgalar tünel sızıntı dalgaları olarak isimlendirilir. Şekil 6.5 'e göre dış dönme noktaları r_1 ile r_2 arasındaki bölge tünel gibi düşünülebilir. Bu bölgede dalga evanescent davranış gösterir ve kılıf bölgesine tünellemeyle güç aktarılır. Açıkça görüldüğü gibi $\beta < n_2 k_0$ koşulunda r_1 ile r_2 arasındaki tünel bölgesinde güç kaybı olur. Yani sızıntı kaybı söz konusudur. Bu sızıntı kaybı tünel bölgesinin uzunluğuna bağlı olarak değişir. β nın sabit olması koşulunda v nün büyük değerleri için tünel bölgesinin uzunluğu artacağı için sızıntı kaybı azalacaktır. Bu koşullarda sızıntı kaybının fazla olması durumunda dalganın kılavuzlanamayacağı ve TE ve TM modlarındaki sızıntı kaybının hibrid modlardaki sızıntı kaybından daha fazla olacağı anlaşılmaktadır.

- Kılavuzlanmış modlarda; $n_2 k_0 \leq \beta \leq n_1 k_0$, $r_2 = \infty$
- Sızıntılı modlarda; $0 \leq \beta \leq n_2 k_0$
- Tünel sızıntılı modlarda; $\beta = n_2 k_0$, $d < r_2 < \infty$ dur.

7. DİELEKTRİK DALGA KILAVUZLARI ARASINDA KUPLAJLAMA

Propagasyon yapan sistemlerdeki karşılıklı kuplajın incelenmesi birçok karmaşık problemin çözümünde ve bu tür problemlerin yer aldığı sistemlerin analizinde önemli kolaylıklar sağlar. Farklı dalga kılavuzları arasında kuplajlamaya dalga kılavuzundaki geometrik bozukluklar ya da dielektrik ortamın homojensizliği neden olabilir. Kuple Mod Teorisine göre sistemdeki elemanlar veya bölümler birbirinden ayrılır ve önce her bir bölüm ardından da orjinal kompleks kuple sistem zayıf kuplaj altında analiz edilir.

Gücün tamamının iletilebilmesi için kılavuzlardan birinin modlarının faz hızlarının kuplajlama olmadığı durumlarda bile aynı olmalıdır. Bu bölümde zayıfça kılavuzlanan dielektrik dalga kılavuzlarının birbirine zayıfça kuple oldukları kabul edilmiş, polarizasyondan bağımsız kabul edilen kılavuzların yaklaşık alan ifadelerinden yararlanılmıştır.(Ünverdi, N.Ö,1998, Cheo, P.K, 1990, Miller, E.,1979, Zahn,M., 1979)

7.1 Kuple Mod Teorisi

Bu teori, birbirine kuple olan elemanlardan oluşan sistemlerin analizinde kullanılan ve yaklaşık sonuçlar veren bir metottur. Kuple sistemin iki elemandan olduğu varsayılarak karmaşık ifadeler yerine basit ve anlaşılabilir ifadeler incelenmiştir.

Modlar arasındaki kuplaj mekanizması,

- 1) Uzayda domeninde kuplaj
- 2) Zaman domeninde kuplaj
- 3) Frekans domeninde kuplaj

olmak üzere üç alt başlık altında toplanabilir.

7.1.1 Modların Uzay Domeninde Kuplajı

+z yönünde ilerleyen ve zaman değişkeni $e^{j\omega t}$ olan bir modun genlik fonksiyonu

$$a_1(z) = a_0 e^{-j\beta_1 z} \quad (7.1.1.1)$$

dir.Aynı özelliklere sahip fakat propagasyon sabiti farklı olan bir modun genlik fonksiyonu da

$$a_2(z) = a_0 e^{-j\beta_2 z} \quad (7.1.1.2)$$

şeklinde yazılır.Bu ifadelere göre,

$$\frac{da_1}{dz} = -j\beta_1 a_1 \quad (7.1.1.3)$$

$$\frac{da_2}{dz} = -j\beta_2 a_2 \quad (7.1.1.4)$$

olarak ifade edilir. Bu iki ifade, optik fiberler tek başlarına düşünerek elde edilmiştir. Oysa bu iki optik fiber birbirlerini etkileyecek kadar yakın olduklarında bu ifadeler geçerliliğini yitirir. Bu eşitlikler yerine,

$$\frac{da_1}{dz} = -j\beta_1 a_1 + c_{12} a_2 \quad (7.1.1.5)$$

$$\frac{da_2}{dz} = -j\beta_2 a_2 + c_{21} a_1 \quad (7.1.1.6)$$

kuplasyon denklemleri kullanılır. Öz kuplasyon katsayıları

$$c_{11} = -j\beta_1 \quad (7.1.1.7)$$

$$c_{22} = -j\beta_2 \quad (7.1.1.8)$$

şeklinde dir. Zayıf kuplasyon koşulunda c_{12} ve c_{21} , β_1 ve β_2 nin yanında çok küçüktür ve z den bağımsızdır (Marcuse, 1974). Özdeş optik fiberlerin karşılıklı etkileşimlerinde $\beta_1 \cong \beta_2$ kabul edilir. İki den fazla modun kuplasyonu için genel kuplasyon denklemi,

$$\frac{da_i}{dz} = -j\beta_i a_i + \sum_{i \neq k} c_{ik} a_k \quad (7.1.1.9)$$

şeklinde genişletilebilir. Kayıpsız ortamda,

$$|a_1(z)|^2 = 1 - |a_2(z)|^2 \quad (7.1.1.10)$$

ve

$$|a_2(z)|^2 = F_{12} \sin^2 \left(\frac{|c_{12}|}{(F_{12})^{1/2}} z \right) \quad (7.1.1.11)$$

dir. Burada F_{12} transfer faktörü,

$$F_{12} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\beta_1 - \beta_2}{2|c_{12}|} \right)^2} \quad (7.1.1.12)$$

dir. (7.1.1.12) eşitliğine göre modlar arasındaki maksimum güç transferi aynı propagasyon sabitine sahip olan modlar arasında gerçekleşir. Kupl mod yaklaşımı altında modlar arasındaki güç korunumuna göre,

$$\frac{dP}{dz} = 0 \quad (7.1.1.13)$$

şeklindedir. Buradan,

$$\frac{d}{dz} \left[|a_1(z)|^2 + |a_2(z)|^2 \right] = 2 \cdot \text{Re} \left[(c_{12} + c_{21}^*) a_1^* a_2 \right] \quad (7.1.1.14)$$

olduğu görülür. Her iki modun grup hızları aynı doğrultuda ise,

$$c_{12} = -c_{21}^* \quad (7.1.1.15)$$

dir. Farklı doğrultularda ise,

$$c_{12} = c_{21}^* \quad (7.1.1.16)$$

dır.

7.1.2 Modların Zaman Domeninde Kuplajı

Zamana göre değişimleri $e^{j\omega_1 t}$ ve $e^{j\omega_2 t}$ olan optik fiberlerde a_1 ve a_2 için,

$$\frac{da_1}{dt} = j\omega_1 a_1 \quad (7.1.2.1)$$

$$\frac{da_2}{dt} = j\omega_2 a_2 \quad (7.1.2.2)$$

dir. 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 ortamda zayıf kuplaj koşulunda (7.1.2.1) ve (7.1.2.2) eşitlikleri,

$$\frac{da_1}{dt} = j\omega_1 a_1 + c_{12} a_2 \quad (7.1.2.3)$$

$$\frac{da_2}{dt} = j\omega_2 a_2 + c_{21} a_1 \quad (7.1.2.4)$$

şeklini alır. Öz kuplaj katsayıları aşağıdaki gibidir:

$$c_{11} = j\omega_1 \quad (7.1.2.5)$$

$$c_{22} = j\omega_2 \quad (7.1.2.6)$$

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

$$\frac{da_i}{dt} = j\omega_i a_i + \sum_{i \neq k} c_{ik} a_k \quad (7.1.2.7)$$

şeklinde yazılabilir. Modların fazları arasındaki ilişkide herhangi bir ön koşul yoktur. Optik fiberlerin özelliklerine bakılmaksızın enerjinin korunumuna göre,

$$\frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt} \left[|a_1(t)|^2 + |a_2(t)|^2 \right] = 0 \quad (7.1.2.8)$$

dır. Bu durumda kuplaj katsayıları arasında

$$c_{12} = -c_{21}^* \quad (7.1.2.9)$$

bağıntısı mevcuttur.

7.1.3 Modların Frekans Domeninde Kuplajı

Zaman göre değişimin $e^{j\omega t}$ olduğu optik fiberlerde a_1 ve a_2 modlarının $t=t_1$ ve $t=t_2$ anlarındaki değişim,

$$\frac{da_1}{d\omega} = jt_1 a_1 \quad (7.1.3.1)$$

$$\frac{da_2}{d\omega} = jt_2 a_2 \quad (7.1.3.2)$$

Frekans domeninde a_2 modunun enerjisinin bir kısmı a_1 moduna, a_1 modunun enerjisinin bir kısmı da a_2 moduna transfer olur. Kayıpsız durumda zayıf kuplaj koşulunda (7.1.3.1) ve

(7.1.3.2) eşitlikleri,

$$\frac{da_1}{d\omega} = jt_1 a_1 + c_{12} a_2 \quad (7.1.3.3)$$

$$\frac{da_2}{d\omega} = jt_2 a_2 + c_{21} a_1 \quad (7.1.3.4)$$

şeklini alır. Bu ifade ikiden fazla modun kuplajı için genelleştirilirse,

$$\frac{da_i}{d\omega} = jt_i a_i + \sum_{i \neq k} c_{ik} a_k \quad (7.1.3.5)$$

şeklinde ifade edilir. Öz kuplaj katsayıları,

$$c_{11} = jt_1 \quad (7.1.3.6)$$

$$c_{22} = jt_2 \quad (7.1.3.7)$$

dir. Kuplaj katsayıları arasındaki ilişki,

$$c_{12} = -c_{21}^* \quad (7.1.3.8)$$

şeklindedir.

7.2 Optik Dalga Kılavuzlarında Kuplaj Analizi

Dalga kılavuzları arasındaki güç transferi,

- Kırılma indisi dağılımlarındaki değişimle, çekirdek bölgesi ile kılıf bölgesi arayüzeyindeki düzgün olmayan sınır özellikleri ve bükülme gibi kılavuzların geometrilerindeki bozukluklar
- Dalga kılavuzlarının yapılarında düzensizlik olmasa da evanescent alanların karşılıklı etkileşimleri nedeniyle gerçekleşir.

Kuplaj Mod Teorisi, kılavuzlardan birisindeki modun propagasyon sabitinin diğer kılavuzdaki modun etkisiyle nasıl değişeceğini ortaya koyar. 7.1 Bölümü'nde incelenen kuplaj mod denklemleri pertürbasyonlu optik fiberlerin alanlarının modal açılımlarının Maxwell denklemlerinde yerlerine yazılmasıyla elde edilmiştir. Bu bölümde Kuplaj Mod Teorisi yardımıyla kuplaj analizi yapılacaktır. Sınır koşulları Maxwell denklemlerinden yararlanılarak yazıldığına göre incelenen denklemlerin çözümleri dielektrik süreksizliklerde sınır koşullarını sağlayacaktır. İncelemede sadece (+) yönde ilerleyen iki modun kuplajı değerlendirilmiş, diğer kuplaj etkileri göz ardı edilmiştir.

7.2.1 Propagasyon Sabitindeki Değişim

Aynı propagasyon sabitine sahip modlar için kuple mod denklemleri,

$$\frac{da_1}{dz} = -j\beta_1 a_1 + c_{12} a_2 \quad (7.2.1.1)$$

$$\frac{da_2}{dz} = -j\beta_2 a_2 + c_{21} a_1 \quad (7.2.1.2)$$

olarak yazılır. Buradan,

$$a_1 = M_1 e^{[(c_{12}c_{21})^{1/2} - j\beta]z} + M_2 e^{[-(c_{12}c_{21})^{1/2} - j\beta]z} \quad (7.2.1.3)$$

$$a_2 = M_1 \left(\frac{c_{21}}{c_{12}} \right)^{1/2} e^{[(c_{12}c_{21})^{1/2} - j\beta]z} - M_2 \left(\frac{c_{21}}{c_{12}} \right)^{1/2} e^{[-(c_{12}c_{21})^{1/2} - j\beta]z} \quad (7.2.1.4)$$

olarak bulunur. $z=0$ için M_1 ve M_2 katsayıları,

$$M_1 = \frac{1}{2} \left[a_1(0) + \left(\frac{c_{12}}{c_{21}} \right)^{1/2} a_2(0) \right] \quad (7.2.1.5)$$

$$M_2 = \frac{1}{2} \left[a_2(0) - \left(\frac{c_{12}}{c_{21}} \right)^{1/2} a_1(0) \right] \quad (7.2.1.6)$$

dir. Kuplaj nedeniyle propagasyon sabitinde meydana gelen değişim,

$$\Delta\beta = j(c_{12}c_{21})^{1/2} \quad (7.2.1.7)$$

olmak üzere (7.2.1.3) ve (7.2.1.4) eşitlikleri,

$$a_1(z) = \frac{1}{2} \left\{ a_1(0) [e^{-j\Delta\beta z} + e^{j\Delta\beta z}] + \left(\frac{c_{12}}{c_{21}} \right)^{1/2} a_2(0) [e^{-j\Delta\beta z} - e^{j\Delta\beta z}] \right\} e^{-j\beta z} \quad (7.2.1.8)$$

$$a_2(z) = \frac{1}{2} \left\{ a_2(0) [e^{-j\Delta\beta z} + e^{j\Delta\beta z}] + \left(\frac{c_{21}}{c_{12}} \right)^{1/2} a_1(0) [e^{-j\Delta\beta z} - e^{j\Delta\beta z}] \right\} e^{-j\beta z} \quad (7.2.1.9)$$

şeklinde yazılır. Kuple iki modun yeni propagasyon sabitlerindeki değişim $\Delta\beta$ ile belirlenir.

Bu koşullarda iki özel durum düşünülebilir.

- 1) Kılavuzların her ikisi de kayıpsız ise $\Delta\beta$ reeldir. (7.2.1.8) ve (7.2.1.9) eşitliklerinden yazılan güç korunumuna göre $a_2(0)=0$ durumu için birinci kılavuzdaki güç

$$z = \frac{\pi}{2\Delta\beta} \quad (7.2.1.10)$$

uzaklığında ikinci kılavuza aktarılır.

- 2) Kılavuzlar kayıplı ise $\Delta\beta$ kompleks değer alır, bu da ek bir kayıp getirir.

7.2.2 Kuplaj Katsayıları

Pertürbasyonlu kuple kılavuzlarda alan ifadeleri,

$$\vec{E} = a\vec{E}_1 + b\vec{E}_2 + \vec{E}_0 \quad (7.2.2.1)$$

$$\vec{H} = a\vec{H}_1 + b\vec{H}_2 + \vec{H}_0 \quad (7.2.2.2)$$

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 uyarınca,

$$\Delta\beta = \pm \frac{\omega\epsilon_0}{4P} \int \int_{-\infty-\infty}^{\infty} (n_2^2 - n_3^2) \vec{E}_2^* \cdot \vec{E}_1 dx dy \quad (7.2.2.3)$$

olarak bulunur. (7.2.1.7) ve (7.2.2.3) eşitliklerine göre z den bağımsız olan kuplaj katsayıları,

$$|c_{12}| = \frac{\omega\epsilon_0}{4P} \int \int_{-\infty-\infty}^{\infty} (n_1^2 - n_3^2) \vec{E}_1^* \cdot \vec{E}_2 dx dy \quad (7.2.2.4)$$

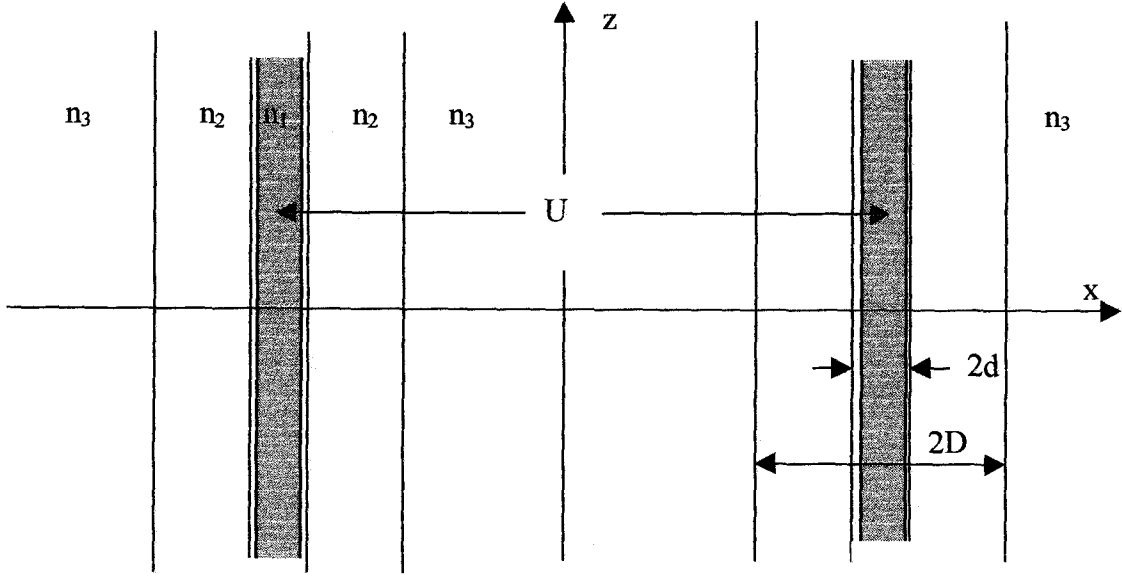
$$|c_{21}| = \frac{\omega\epsilon_0}{4P} \int \int_{-\infty-\infty}^{\infty} (n_2^2 - n_3^2) \vec{E}_2^* \cdot \vec{E}_1 dx dy \quad (7.2.2.5)$$

şeklinde ifade edilir. Propagasyon sabitinin değişimi ve kuplaj katsayıları basit formlarda ifade edilmiştir.

7.3 Kuple Kılıflı Optik Dalga Kılavuzları

7.3.1 Propagasyon Sabitindeki Değişim

Şekil 7.1 'de görülen kılıflı optik dalga kılavuzlarında kuplaj analizi TE ve TM modları için yapılmıştır.



Şekil 7.1 Kuple kılıflı ve düzlemsel yapıdaki katmanlı optik dalga kılavuzları

Şekil 7.1 'deki kılavuzlardan biri için çift TE ve tek TE modlarındaki alan ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$E_y = \begin{cases} A \begin{cases} \cos(\kappa x) \\ \sin(\kappa x) \end{cases} & 0 \leq x \leq d \\ B e^{\gamma x} + C e^{-\gamma x} & d \leq x \leq D \\ F e^{-\rho x} & D \leq x < \infty \end{cases} \quad (7.3.1.1)$$

formundadır. Burada,

$$k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \quad (7.3.1.2)$$

$$\kappa = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2} \quad (7.3.1.3)$$

$$\gamma = \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2} \quad (7.3.1.4)$$

$$\rho = \sqrt{\beta^2 - n_3^2 k_0^2} \quad (7.3.1.5)$$

dır. Katsayılar arasında,

$$B = \frac{A}{2} \frac{\kappa}{(\kappa^2 + \gamma^2)^{1/2}} \frac{\gamma - \rho}{\gamma + \rho} e^{-\gamma d} e^{-2\gamma(D-d)} \quad (7.3.1.6)$$

$$C = Ae^{\gamma d} \begin{Bmatrix} \cos(\kappa d) \\ \sin(\kappa d) \end{Bmatrix} \quad (7.3.1.7)$$

$$F = \frac{2\kappa\gamma A}{(\gamma + \nu)(\kappa^2 + \gamma^2)^{1/2}} e^{\rho D} e^{-\gamma(D-d)} \quad (7.3.1.8)$$

ilişkileri vardır. Kılıf bölgesinin kalınlığı arttıkça B katsayısı sıfıra yakınsar. Kılavuzlanmış modların propagasyon sabitindeki değişim (7.2.2.3), (7.3.1.1) ve (7.3.1.8) eşitlikleri yardımıyla $\beta_1 = \beta_2$ koşulunda,

$$|\Delta\beta| = \frac{4\kappa^2\gamma^3\rho}{\beta(1+\gamma d)(\gamma+\rho)^2(\kappa^2+\gamma^2)^{1/2}} e^{-2\gamma(D-d)} e^{-\rho(U-2D)} \quad (7.3.1.9)$$

dir. Özdeş olmayan yani $\beta_1 \neq \beta_2$ iken,

$$|\Delta\beta| = 2k_0^2(n_2^2 - n_3^2) \frac{\kappa_1\kappa_2\gamma_1^{3/2}\gamma_2^{3/2}}{[\beta_1\beta_2(1+\gamma_1d_1)(1+\gamma_2d_2)]^{1/2}(\gamma_1+\rho_1)(\gamma_2+\rho_2)} \frac{1}{[(\kappa_1^2+\gamma_1^2)(\kappa_2^2+\gamma_2^2)]^{1/2}} e^{\rho_1D_1+\rho_2D_2} e^{-[\gamma_1(D_1-d_1)+\gamma_2(D_2-d_2)]} e^{\frac{-(\rho_1+\rho_2)U}{2}} \quad (7.3.1.10)$$

Özdeş olan fiberlerde kuplaj katsayısı çift TE modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega\epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{2\omega\mu_0Pd}{\beta(1+\gamma d)} + \frac{\omega\mu_0P \sin(2\kappa d)}{\kappa\beta(1+\gamma d)} + \frac{2\omega\mu_0P \cos(\kappa d)}{\gamma\beta(1+\gamma d)} (1 - e^{2\gamma(d-D)}) + \frac{4\kappa^2\gamma^2 2\omega\mu_0P}{\beta(1+\gamma d)(\gamma+\rho)^2(\kappa^2+\gamma^2)} \frac{e^{-2\gamma(D-d)}}{\rho} \right] \quad (7.3.1.11)$$

iken tek TE modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega\epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{2\omega\mu_0Pd}{\beta(1+\gamma d)} - \frac{\omega\mu_0P \sin(2\kappa d)}{\kappa\beta(1+\gamma d)} + \frac{2\omega\mu_0P \sin(\kappa d)}{\gamma\beta(1+\gamma d)} (1 - e^{2\gamma(d-D)}) + \frac{4\kappa^2\gamma^2 2\omega\mu_0P}{\beta(1+\gamma d)(\gamma+\rho)^2(\kappa^2+\gamma^2)} \frac{e^{-2\gamma(D-d)}}{\rho} \right] \quad (7.3.1.12)$$

olur. Özdeş olmayan fiberlerdeki kuplaj katsayısı ise çift TE modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0 (n_2^2 - n_3^2)}{4P} \left[\frac{4\omega \mu_0 P \sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\kappa^2 \beta \sqrt{1 + \gamma d_1} \sqrt{1 + \gamma d_2}} + \frac{4\omega \mu_0 P (e^{\gamma d_2} - e^{\gamma(d_1+d_2-D_1)}) \cos(\kappa d_1)}{\beta \sqrt{1 + \gamma d_1} \sqrt{1 + \gamma d_2}} \right. \\ \left. \frac{(e^{\gamma d_1} - e^{\gamma(d_1+d_2-D_2)}) \cos(\kappa d_2)}{\gamma^2} + \frac{16\kappa^2 \gamma^2 \omega \mu_0 P e^{\gamma(d_1+d_2-D_1-D_2)}}{\rho(\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2) \beta \sqrt{1 + \gamma d_1} \sqrt{1 + \gamma d_2}} \right] \quad (7.3.1.13)$$

iken tek TE modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0 (n_2^2 - n_3^2)}{4P} \left[\frac{4\omega \mu_0 P \cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\kappa^2 \beta \sqrt{1 + \gamma d_1} \sqrt{1 + \gamma d_2}} + \frac{4\omega \mu_0 P (e^{\gamma d_2} - e^{\gamma(d_1+d_2-D_1)}) \sin(\kappa d_1)}{\beta \sqrt{1 + \gamma d_1} \sqrt{1 + \gamma d_2}} \right. \\ \left. \frac{(e^{\gamma d_1} - e^{\gamma(d_1+d_2-D_2)}) \sin(\kappa d_2)}{\gamma^2} + \frac{16\kappa^2 \gamma^2 \omega \mu_0 P e^{\gamma(d_1+d_2-D_1-D_2)}}{\rho(\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2) \beta \sqrt{1 + \gamma d_1} \sqrt{1 + \gamma d_2}} \right] \quad (7.3.1.14)$$

biçiminde ifade edilir. $f=200$ THz değeri için (7.3.1.11), (7.3.1.12), (7.3.1.13) ve (7.3.1.14) denklemlerinin grafikleri çizilmiştir. Grafikler Şekil Ek.1.9, Şekil Ek.1.10, Şekil Ek.1.13, Şekil Ek.1.14, Şekil Ek.1.25, Şekil Ek.1.26, Şekil Ek.1.29, Şekil Ek.1.30, Şekil Ek.1.33, Şekil Ek.1.34, Şekil Ek.1.37, Şekil Ek.1.38 de verilmiştir.

Optik dalga kılavuzu için çift TM ve tek TM moduna ilişkin alan denklemini yazalım.

$$H_y = \begin{cases} A_1 \begin{Bmatrix} \cos(\kappa x) \\ \sin(\kappa x) \end{Bmatrix} & 0 \leq x \leq d \\ B_1 e^{\gamma x} + C_1 e^{-\gamma x} & d \leq x \leq D \\ F_1 e^{-\rho x} & D \leq x < \infty \end{cases} \quad (7.3.1.15)$$

şeklindedir. Katsayılar arasında,

$$A_1 = \left[\frac{2\omega \epsilon_0 n_1^2 P}{\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} \right]^{1/2} \quad (7.3.1.16)$$

$$B_1 = \frac{A_1}{2} \frac{\kappa}{(\kappa^2 + \gamma^2)^{1/2}} \frac{\gamma - \rho}{\gamma + \rho} e^{-\gamma d} e^{-2\gamma(D-d)} \quad (7.3.1.17)$$

$$C_1 = A_1 e^{\gamma d} \begin{Bmatrix} \cos(\kappa d) \\ \sin(\kappa d) \end{Bmatrix} \quad (7.3.1.18)$$

$$F_1 = \frac{2\kappa\gamma A_1}{(\gamma + \nu)(\kappa^2 + \gamma^2)^{1/2}} e^{\rho D} e^{-\gamma(D-d)} \quad (7.3.1.19)$$

bağıntıları vardır. TE modları için yukarıda açıklanan metotla TM modlarındaki kılavuzlanmış modların propagasyon sabitindeki değişim, aynı propagasyon sabitine sahip modlar için,

$$|\Delta\beta| = \frac{n_1^2 n_2^2 \kappa^2 \gamma^2 [2e^{(\gamma-\rho)(D-d)} - 1] \cdot e^{-2\gamma(D-d)} e^{-\rho(U-2D)}}{\beta[(n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2)\gamma d + n_1^2 n_2^2 (\kappa^2 + \gamma^2)]} \quad (7.3.1.20)$$

olarak bulunur. Özdeş olan fiberlerde kuplaj katsayısı çift TM modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega\epsilon_0(n_2^2 - n_3^2)}{4P} \left[\frac{\frac{2\omega\epsilon_0 n_1^2 P d}{\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} + \frac{\omega\epsilon_0 n_1^2 P \sin(2\kappa d)}{\kappa\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]}}{\frac{\gamma\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]}{1}} + \frac{\frac{2\omega\epsilon_0 n_1^2 P \cos^2(\kappa d)(1 - e^{2\gamma(d-D)})}{\gamma\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} + \frac{4\kappa^2 \gamma^2 \omega\epsilon_0 n_1^2 P e^{-2\gamma(D-d)}}{\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]}}{\frac{1}{\rho(\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2)}} \right] \quad (7.3.1.21)$$

şeklinde elde edilir. Tek TM modu için ise ifade,

$$c_{21} = \frac{\omega\epsilon_0(n_2^2 - n_3^2)}{4P} \left[\frac{\frac{2\omega\epsilon_0 n_1^2 P d}{\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} - \frac{\omega\epsilon_0 n_1^2 P \sin(2\kappa d)}{\kappa\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]}}{\frac{\gamma\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]}{1}} + \frac{\frac{2\omega\epsilon_0 n_1^2 P \sin^2(\kappa d)(1 - e^{2\gamma(d-D)})}{\gamma\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} + \frac{4\kappa^2 \gamma^2 \omega\epsilon_0 n_1^2 P e^{-2\gamma(D-d)}}{\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]}}{\frac{1}{\rho(\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2)}} \right] \quad (7.3.1.22)$$

formundadır. Özdeş olmayan fiberlerdeki kuplaj katsayısı çift TM modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0 (n_2^2 - n_3^2)}{4P} \left[\begin{aligned} & \frac{4\omega \epsilon_0 n_1^2 P \sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\kappa^2 \beta \sqrt{d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}} \sqrt{d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}}} + \\ & \frac{4\omega \epsilon_0 n_1^2 P (e^{\gamma d_2} - e^{\gamma(d_1+d_2-D_1)})(e^{\gamma d_1} - e^{\gamma(d_1+d_2-D_2)}) \cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\gamma^2 \beta \sqrt{d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}} \sqrt{d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}}} + \\ & \frac{16\kappa^2 \gamma^2 \omega \epsilon_0 n_1^2 P}{\rho \beta \sqrt{d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}} \sqrt{d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}}} \frac{e^{\gamma(d_1+d_2-D_1-D_2)}}{(\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2)} \end{aligned} \right] \quad (7.3.1.23)$$

şeklinde iken tek TM modu için ise;

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0 (n_2^2 - n_3^2)}{4P} \left[\begin{aligned} & \frac{4\omega \epsilon_0 n_1^2 P \cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\kappa^2 \beta \sqrt{d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}} \sqrt{d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}}} + \\ & \frac{4\omega \epsilon_0 n_1^2 P (e^{\gamma d_2} - e^{\gamma(d_1+d_2-D_1)})(e^{\gamma d_1} - e^{\gamma(d_1+d_2-D_2)}) \sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\gamma^2 \beta \sqrt{d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}} \sqrt{d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}}} + \\ & \frac{16\kappa^2 \gamma^2 \omega \epsilon_0 n_1^2 P}{\rho \beta \sqrt{d_1 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}} \sqrt{d_2 + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}}} \frac{e^{\gamma(d_1+d_2-D_1-D_2)}}{(\gamma + \rho)^2 (\kappa^2 + \gamma^2)} \end{aligned} \right] \quad (7.3.1.24)$$

biçiminde bulunur. $f=200$ THz değeri için (7.3.1.21), (7.3.1.22), (7.3.1.23) ve (7.3.1.24) denklemlerinin grafikleri çizilmiştir. Grafikler Şekil Ek.1.11, Şekil Ek.1.12, Şekil Ek.1.15, Şekil Ek.1.16, Şekil Ek.1.27, Şekil Ek.1.28, Şekil Ek.1.31, Şekil Ek.1.32, Şekil Ek.1.35, Şekil Ek.1.36, Şekil Ek.1.39, Şekil Ek.1.40 da verilmiştir.

7.3.2 Güç Kaybı

Kuple kılıflı optik fiberlerde TE modlarındaki güç kaybı,

$$2\alpha = \frac{8\kappa^2 \gamma^3 \text{Im}(\rho) e^{-2\gamma(D-d)}}{\beta(1+\gamma d)(\kappa^2 + \gamma^2)(\gamma + \rho)^2} \quad (7.3.2.1)$$

dir. Görüldüğü gibi kılıf bölgesinin kalınlığı arttıkça kayıp eksponansiyel olarak azalır ve

kayıpsız ortamda güç kaybı olmaz. Ancak $n_3 k_0 > \beta$ koşulunda ρ saf imajiner olur ve alan eksponansiyel olarak azalmaz, ışıma yapmaya başlar. Optik fiberler ve dış ortam kayıpsız oldukları halde kılavuzlanmış modda güç kaybı olur. TM modlarındaki güç kaybı ise,

$$2\alpha = \frac{8n_1^2 n_2^4 n_3^4 \kappa^2 \gamma^3 \operatorname{Im}\left(\frac{\rho}{n_3^2}\right) e^{-2\gamma(D-d)}}{\beta \left[\gamma d (n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2) + n_1^2 n_2^2 (\kappa^2 + \gamma^2) \right] \left| n_1^2 \rho + n_3^2 \gamma \right|^2} \quad (7.3.2.2)$$

7.4 Kuple Kılıfsız Optik Dalga Kılavuzları

7.4.1 Propagasyon Sabitindeki Değişim

Kuple kılıfsız optik fiberlerde çift TE ve tek TE modları için alan ifadesi,

$$E_y = \begin{cases} A \begin{cases} \cos(\kappa x) \\ \sin(\kappa x) \end{cases} & 0 \leq x \leq d \\ B e^{-\gamma(|x|-d)} & d \leq x < \infty \end{cases} \quad (7.4.1.1)$$

dır. Burada,

$$A = \sqrt{\frac{2\omega\mu_0 P}{\beta(1+\gamma d)}} \quad (7.4.1.2)$$

$$B = A \begin{cases} \cos(\kappa d) \\ \sin(\kappa d) \end{cases} \quad (7.4.1.3)$$

şeklindeir. Özdeş olmayan optik fiberlerde propagasyon sabitinde meydana gelen değişim,

$$|\Delta\beta| = \frac{k_0^2}{2(\gamma_1 + \gamma_2)} (n_1^2 - n_2^2) \left[\frac{\gamma_1 \gamma_2}{\beta_1 \beta_2 (1 + \gamma_1 d_1)(1 + \gamma_2 d_2)} \right]^{1/2} \begin{cases} \cos(\kappa_1 d_1) \cos(\kappa_2 d_2) \\ \sin(\kappa_1 d_1) \sin(\kappa_2 d_2) \end{cases} e^{\gamma_1 d_1} e^{\gamma_2 d_2} e^{-\frac{(\gamma_1 + \gamma_2)U}{2}} \quad (7.4.1.4)$$

yapısındadır. Özdeş olan fiberlerde kuplaj katsayısı çift TE modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega\epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{2\omega\mu_0 P d}{\beta(1+\gamma d)} + \frac{\omega\mu_0 P \sin(2\kappa d)}{\beta\kappa(1+\gamma d)} + \frac{\omega\mu_0 P \cos^2(\kappa d)}{\beta\gamma(1+\gamma d)} \right] \quad (7.4.1.5)$$

iken tek TE modu için ise,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{2\omega \mu_0 P d}{\beta(1 + \gamma d)} - \frac{\omega \mu_0 P \sin(2\kappa d)}{\beta \kappa (1 + \gamma d)} + \frac{\omega \mu_0 P \sin^2(\kappa d)}{\beta \gamma (1 + \gamma d)} \right] \quad (7.4.1.6)$$

biçiminde elde edilir. Özdeş olmayan fiberlerde kuplaj katsayısı çift TE modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{4\omega \mu_0 P \sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\kappa^2 \beta \sqrt{1 + \gamma d_1} \sqrt{1 + \gamma d_2}} + \frac{4\omega \mu_0 P \cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\gamma^2 \beta \sqrt{1 + \gamma d_1} \sqrt{1 + \gamma d_2}} \right] \quad (7.4.1.7)$$

iken tek TE modu için ise,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{4\omega \mu_0 P \cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\kappa^2 \beta \sqrt{1 + \gamma d_1} \sqrt{1 + \gamma d_2}} + \frac{4\omega \mu_0 P \sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\gamma^2 \beta \sqrt{1 + \gamma d_1} \sqrt{1 + \gamma d_2}} \right] \quad (7.4.1.8)$$

formunda bulunur. $f=200$ THz değeri için (7.4.1.5), (7.4.1.6), (7.4.1.7) ve (7.4.1.8) denklemlerinin grafikleri çizilmiştir. Grafikler Şekil Ek.1.1, Şekil Ek.1.2, Şekil Ek.1.5, Şekil Ek.1.6, Şekil Ek.1.17, Şekil Ek.1.18, Şekil Ek.1.21, Şekil Ek.1.22 de verilmiştir.

Kuple kılıfsız optik fiberlerde çift TM ve tek TM modları için alan ifadesi,

$$H_y = \begin{cases} A_1 \begin{cases} \cos(\kappa x) \\ \sin(\kappa x) \end{cases} & 0 \leq x \leq d \\ B_1 e^{-\gamma(|x| - d)} & d \leq x < \infty \end{cases} \quad (7.4.1.9)$$

dur. Burada,

$$A_1 = \left[\frac{2\omega \epsilon_0 n_1^2 P}{\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} \right]^{1/2} \quad (7.4.1.10)$$

$$B_1 = A_1 \begin{cases} \cos(\kappa d) \\ \sin(\kappa d) \end{cases} \quad (7.4.1.11)$$

dır.

Özdeş olmayan optik fiberlerde propagasyon sabitinde meydana gelen değişim,

$$|\Delta\beta| = \frac{\omega^2 \varepsilon_0 n_1^2 (n_1^2 - n_2^2)}{2(\gamma_1 + \gamma_2) \left[\beta_1 \beta_2 \left[d_1 + \frac{n_1^2 n_2^2}{\gamma_1} \frac{\kappa_1^2 + \gamma_1^2}{n_2^4 \kappa_1^2 + n_1^4 \gamma_1^2} \right] \left[d_1 + \frac{n_1^2 n_2^2}{\gamma_1} \frac{\kappa_1^2 + \gamma_1^2}{n_2^4 \kappa_1^2 + n_1^4 \gamma_1^2} \right] \right]^{1/2}} \left\{ \begin{array}{l} \cos(\kappa_1 d_1) \cos(\kappa_2 d_2) \\ \sin(\kappa_1 d_1) \sin(\kappa_2 d_2) \end{array} \right\} e^{\gamma_1 d_1} e^{\gamma_2 d_2} e^{-(\gamma_1 + \gamma_2) \frac{U}{2}} \quad (7.4.1.12)$$

şeklinde dir. Özdeş olan fiberlerde kuplaj katsayısı çift TM modu için,

$$c_{21} = \frac{\omega \varepsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\begin{array}{l} \frac{2\omega \varepsilon_0 n_1^2 P d}{\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} + \frac{\omega \varepsilon_0 n_1^2 P \sin(2\kappa d)}{\kappa \beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} \\ + \frac{2\omega \varepsilon_0 n_1^2 P \cos^2(\kappa d)}{\gamma \beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} \end{array} \right] \quad (7.4.1.13)$$

elde edilir, tek TM modu için ise,

$$c_{21} = \frac{\omega \varepsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\begin{array}{l} \frac{2\omega \varepsilon_0 n_1^2 P d}{\beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} - \frac{\omega \varepsilon_0 n_1^2 P \sin(2\kappa d)}{\kappa \beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} \\ + \frac{2\omega \varepsilon_0 n_1^2 P \sin^2(\kappa d)}{\gamma \beta \left[d + \frac{(n_1 n_2)^2}{\gamma} \frac{(\kappa^2 + \gamma^2)}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2} \right]} \end{array} \right] \quad (7.4.1.14)$$

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

$$c_{21} = \frac{\omega \varepsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\begin{array}{l} \frac{4\omega \varepsilon_0 n_1^2 P \sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\kappa^2 \beta \sqrt{d_1 + \frac{(n_1 n_2)}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}} \beta \sqrt{d_2 + \frac{(n_1 n_2)}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}}} + \\ \frac{4\omega \varepsilon_0 n_1^2 P \cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\gamma^2 \beta \sqrt{d_1 + \frac{(n_1 n_2)}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}} \beta \sqrt{d_2 + \frac{(n_1 n_2)}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}}} \end{array} \right] \quad (7.4.1.15)$$

şeklinde ifade edilir, tek TM modu için ise,

$$c_{21} = \frac{\omega \epsilon_0}{4P} (n_2^2 - n_3^2) \left[\frac{4\omega \epsilon_0 n_1^2 P \cos(\kappa d_1) \cos(\kappa d_2)}{\kappa^2 \beta \sqrt{d_1 + \frac{(n_1 n_2)}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}} \beta \sqrt{d_2 + \frac{(n_1 n_2)}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}}} - \frac{4\omega \epsilon_0 n_1^2 P \sin(\kappa d_1) \sin(\kappa d_2)}{\gamma^2 \beta \sqrt{d_1 + \frac{(n_1 n_2)}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}} \beta \sqrt{d_2 + \frac{(n_1 n_2)}{\gamma} \frac{\kappa^2 + \gamma^2}{n_2^4 \kappa^2 + n_1^4 \gamma^2}}} \right] \quad (7.4.1.16)$$

elde edilir. $f=200$ THz değeri için (7.4.1.13), (7.4.1.14), (7.4.1.15) ve (7.4.1.16) denklemlerinin grafikleri çizilmiştir. Grafikler Şekil Ek.1.3, Şekil Ek.1.4, Şekil Ek.1.7, Şekil Ek.1.8, Şekil Ek.1.19, Şekil Ek.1.20, Şekil Ek.1.23, Şekil Ek.1.24 de verilmiştir.

7.4.2 Güç Kaybı

Kuple kılıfsız ve özdeş optik fiberlerde TE modlarındaki güç kaybı,

$$2\alpha_i = \frac{2\text{Im}(\gamma_i)}{\beta_i(1+\gamma_i d_i)} \left\{ \frac{\cos^2(\kappa_i d_i)}{\sin^2(\kappa_i d_i)} \right\} e^{-2\gamma_i(|x|-d_i)} \quad (7.4.2.1)$$

iken TM modlarında güç kaybı,

$$2\alpha_i = 2\text{Im}(\gamma_i) \frac{1}{\beta_i(d_i + \frac{n_1^2 n_2^2}{\gamma_i} \frac{\kappa_i^2 + \gamma_i^2}{n_2^4 \kappa_i^2 + n_1^4 \gamma_i^2})} \left\{ \frac{\cos^2(\kappa_i d_i)}{\sin^2(\kappa_i d_i)} \right\} e^{-2\gamma_i(|x|-d_i)} \quad (7.4.2.2)$$

biçiminde elde edilir. Burada i kuple optik fiberleri ifade eder.

8. SONUÇLAR

Bu tezde günümüzde kullanımı önemli derecede artan fiber optik teknolojisi incelenmiştir. Dielektrik slab yapıda karakteristik eşitliklerin yazılıp grafik haline getirilmesiyle modların propagasyon durumlarının rahatlıkla tanımlanabileceği ortaya konmuştur. Artan fiziksel parametrelerle propagasyon modu sayısının değişimi çizelge halinde verilmiştir. Radyasyon ve sızıntılı mod için gerekli bağıntılar çıkarılmış, kostik kavramının fiziksel yorumu yapılmıştır.

Zayıfça kılavuzlayan, kayıpsız, özdeş ve özdeş olmayan optik fiberlerin birbirine paralel olmaları durumunda karşılıklı etkileşim mekanizması birer modal analiz problemi olarak düşünülerek Kuplaj Mod Teorisi ışığında incelenmesi yapılmıştır. Yapılan analizin sonucunda TE modları arasındaki kuplajın TM modları arasındaki kuplajdan daha etkin olduğu görülmüştür. Fiziksel mekanizmanın doğal sonucu olarak kılıfsız optik fiberlerdeki kuplajın kılıflı optik fiberlerdeki kuplaja göre daha etkin olduğu ortaya konmuştur.

Propagasyon sabiti sürekli ve kompleks değerli olan ve radyasyon alanının bir kısmını temsil ederek kılavuzlanmış alanın optik fiber dışına yaptığı sızıntı olarak da açıklanan sızıntılı modlar arasındaki kuplajın kılavuzlanmış modlar arasındaki kuplajdan daha etkin olduğu görülmüştür. Radyasyon modların kuplajı ise kesim koşulunda incelenmiş bu modlardaki kuplajında kılavuzlanmış modlardaki kuplajdan daha fazla olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Cardama, A., KornHauser, E.T.,(1975), "Modal Analysis of Coupling Problems in Optical Fibers", IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, Vol.MTT-23,No.1,pp. 162-169.
- Cherin, A.H.(1983), "An Introduction Optical Fibers", First Printing, McGrawHill Book Company, Japan.
- Cheo, P.K., (1990), "Fiber Optics and Optoelectronics" , Prentice-Hall, New Jersey.
- Gloge, D., Marcatili, A.J., (1973), "Multimode Theory of Graded-Core Fibers", The Bell System Technical Journal, Vol.52, No.9, pp. 1563-1578.
- Gloge, D., (1972), "Optical Power Flow in Multimode Fibers" , The Bell System Technical Journal, Vol.51, No.8, pp. 1767-1783.
- Kapany, N.S., Burke, J.J., (1972), "Optical Waveguides", Academic Press, New York.
- Karbowiak, A.E., (1986), "The Birth of Optical Communications", IEE Proceedings, Vol. 133, Pt.J., No.3, pp.202-204.
- Marcuse, D.(1974), "The Theory of Dielectric Optical Waveguides", Academic Press, New York.
- Marcuse, D., (1989), "Investigation of Coupling Between a Fiber and An Infinite Slab", Journal of Lightwave Technology, Vol.7, No.1, pp.122-130.
- Miller, E. (1954), "Coupled Wave Theory and Waveguide Applications", B.S.T.J, Vol 33, No.3, pp. 661-720.
- Miller, E., Chynoweth A.G., (1979), "Optical Fiber Telecommunications", Academic Press.
- Miller, E.,Kaminow I.P., (1988), "Optical Fiber Telecommunications II", Academic Press.
- Senior, J.M., (1992), "Optical Fiber Communications", Prentice Hall, New Jersey.
- Snitzer, E., (1961), "Cylindrical Dielectric Waveguide Modes", Journal of The Optical Society of America, Vol. 51, No.5, pp. 491-498.
- Snyder, A.W., Young,W.R., (1978), "Modes of Optical Waveguides", Journal of The Optical Society of America, Vol. 68, No.3, pp. 297-309.
- Snyder, A.W., Love, J.D., (1983), "Optical Waveguide Theory" , J.W.Arrowsmith, Bristol.
- Taylor, H.F., Yariv,A., (1974), "Guided Wave Optics", Proceedings of the IEEE, Vol.62, No.8, pp. 1044-1060.
- Ünverdi, N.Ö., (1998), "Düz ve Bükülmüş Optik Dalga Kılavuzlarının Karşılıklı Kuplajına Kılavuzlanmış Modların Evanescent Alanlarının ve Sızıntılı Modların Etkisi", Doktora Tezi, Y.T.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Zahn, M., (1979), "Electromagnetic Field Theory", John Wiley&Sons, New York.

EKLER

Ek 1 Özdeş ve özdeş olmayan kılıflı ve kılıfsız optik fiberler için kuplaj katsayısının propagasyon sabitine, fiber çekirdek bölgesi yarıçaplarına, kılıf bölgesi yarıçaplarına göre değişimini gösteren grafikler



Ek 1 Özdeş ve özdeş olmayan kılıflı ve kılıfsız optik fiberler için kuplaj katsayısının propagasyon sabitine, fiber çekirdek bölgesi yarıçaplarına, kılıf bölgesi yarıçaplarına göre değişimini gösteren grafikler

Özdeş kuple kılıfsız optik fiberler için c_{21} 'in d 'ye göre değişiminde aşağıdaki tanımlamalar kullanılmıştır:

$$f = 200 \text{ THz}, \mu_0 = 4\pi 10^{-7}, k_0 = 0.42 \cdot 10^7, \varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}, P = 1 \text{ mW}, n_1 = 1.5, n_2 = 1$$

$$\beta_1 = 0.627 \cdot 10^7 \quad \beta_2 = 0.6275 \cdot 10^7 \quad \beta_3 = 0.6278 \cdot 10^7$$

$$\kappa_1 = 0.0614 \cdot 10^7 \quad \kappa_2 = 0.0561 \cdot 10^7 \quad \kappa_3 = 0.0502 \cdot 10^7$$

$$\gamma_1 = 0.4655 \cdot 10^7 \quad \gamma_2 = 0.4662 \cdot 10^7 \quad \gamma_{31} = 0.4669 \cdot 10^7$$

Özdeş kuple kılıfsız optik fiberler için c_{21} 'in β 'ya göre değişiminde aşağıdaki tanımlamalar kullanılmıştır:

$$f = 200 \text{ THz}, \mu_0 = 4\pi 10^{-7}, k_0 = 0.42 \cdot 10^7, \varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}, P = 1 \text{ mW}, n_1 = 1.5, n_2 = 1$$

$$d_1 = 20 \mu\text{m}, d_2 = 20.5 \mu\text{m}, d_3 = 21 \mu\text{m}$$

Özdeş kuple kılıflı optik fiberler için c_{21} 'in d 'ye göre değişiminde aşağıdaki tanımlamalar kullanılmıştır:

$$f = 200 \text{ THz}, \mu_0 = 4\pi 10^{-7}, k_0 = 0.42 \cdot 10^7, \varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}, P = 1 \text{ mW}, n_1 = 1.5, n_2 = 1.49, n_3 = 1$$

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

$$\beta_1 = 0.627 \cdot 10^7 \quad \beta_2 = 0.6275 \cdot 10^7 \quad \beta_3 = 0.6278 \cdot 10^7$$

$$\kappa_1 = 0.0614 \cdot 10^7 \quad \kappa_2 = 0.0561 \cdot 10^7 \quad \kappa_3 = 0.0502 \cdot 10^7$$

$$\gamma_1 = 0.0388 \cdot 10^7 \quad \gamma_2 = 0.0462 \cdot 10^7 \quad \gamma_{31} = 0.0525 \cdot 10^7$$

$$\rho_1 = 0.4655 \cdot 10^7 \quad \rho_2 = 0.4662 \cdot 10^7 \quad \rho_3 = 0.4669 \cdot 10^7$$

Özdeş kuple kılıflı optik fiberler için c_{21} 'in β 'ye göre değişiminde aşağıdaki tanımlamalar kullanılmıştır:

$$f = 200 \text{ THz}, \mu_0 = 4\pi 10^{-7}, k_0 = 0.42 \cdot 10^7, \varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}, P = 1 \text{ mW}, n_1 = 1.5, n_2 = 1.49, n_3 = 1$$

$$D = 25 \mu\text{m}, d_1 = 20 \mu\text{m}, d_2 = 20.5 \mu\text{m}, d_3 = 21 \mu\text{m}$$

Özdeş olmayan kuple kılıfsız optik fiberler için c_{21} 'in d_2 'ye göre değişiminde aşağıdaki tanımlamalar kullanılmıştır:

$$f = 200 \text{ THz}, \mu_0 = 4\pi 10^{-7}, k_0 = 0.42 \cdot 10^7, \varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}, P = 1 \text{ mW}, n_1 = 1.5, n_2 = 1$$

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

$$\beta_1 = 0.627 \cdot 10^7 \quad \beta_2 = 0.6275 \cdot 10^7 \quad \beta_3 = 0.6278 \cdot 10^7$$

$$\kappa_1 = 0.0614 \cdot 10^7 \quad \kappa_2 = 0.0561 \cdot 10^7 \quad \kappa_3 = 0.0502 \cdot 10^7$$

$$\gamma_1 = 0.4655 \cdot 10^7 \quad \gamma_2 = 0.4662 \cdot 10^7 \quad \gamma_{31} = 0.4669 \cdot 10^7$$

Özdeş olmayan kuple kılıfsız optik fiberler için c_{21} 'in d_1 'ye göre değişiminde aşağıdaki tanımlamalar kullanılmıştır:

$$f = 200 \text{ THz}, \mu_0 = 4\pi 10^{-7}, k_0 = 0.42 \cdot 10^7, \varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}, P = 1 \text{ mW}, n_1 = 1.5, n_2 = 1$$

$$d_2 = 25 \mu\text{m}$$

$$\beta_1 = 0.627 \cdot 10^7 \quad \beta_2 = 0.6275 \cdot 10^7 \quad \beta_3 = 0.6278 \cdot 10^7$$

$$\kappa_1 = 0.0614 \cdot 10^7 \quad \kappa_2 = 0.0561 \cdot 10^7 \quad \kappa_3 = 0.0502 \cdot 10^7$$

$$\gamma_1 = 0.4655 \cdot 10^7 \quad \gamma_2 = 0.4662 \cdot 10^7 \quad \gamma_{31} = 0.4669 \cdot 10^7$$

Özdeş olmayan kuple kılıflı optik fiberler için c_{21} 'in d_2 'ye göre değişiminde aşağıdaki tanımlamalar kullanılmıştır:

$$f = 200 \text{ THz}, \mu_0 = 4\pi 10^{-7}, k_0 = 0.42 \cdot 10^7, \varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}, P = 1 \text{ mW}, n_1 = 1.5, n_2 = 1.49, n_3 = 1$$

$$D_1 = 50 \mu\text{m}, D_2 = 60 \mu\text{m}, d_1 = 20 \mu\text{m}$$

$$\beta_1 = 0.627 \cdot 10^7 \quad \beta_2 = 0.6275 \cdot 10^7 \quad \beta_3 = 0.6278 \cdot 10^7$$

$$\kappa_1 = 0.0614 \cdot 10^7 \quad \kappa_2 = 0.0561 \cdot 10^7 \quad \kappa_3 = 0.0502 \cdot 10^7$$

$$\gamma_1 = 0.0388 \cdot 10^7 \quad \gamma_2 = 0.0462 \cdot 10^7 \quad \gamma_{31} = 0.0525 \cdot 10^7$$

$$\rho_1 = 0.4655 \cdot 10^7 \quad \rho_2 = 0.4662 \cdot 10^7 \quad \rho_3 = 0.4669 \cdot 10^7$$

Özdeş olmayan kuple kılıflı optik fiberler için c_{21} 'in d_1 'ye göre değişiminde aşağıdaki tanımlamalar kullanılmıştır:

$$f = 200 \text{ THz}, \mu_0 = 4\pi 10^{-7}, k_0 = 0.42 \cdot 10^7, \varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}, P = 1 \text{ mW}, n_1 = 1.5, n_2 = 1.49, n_3 = 1$$

$$D_1 = 50 \mu\text{m}, D_2 = 60 \mu\text{m}, d_2 = 21 \mu\text{m}$$

$$\begin{aligned}
\beta_1 &= 0.627 \cdot 10^7 & \beta_2 &= 0.6275 \cdot 10^7 & \beta_3 &= 0.6278 \cdot 10^7 \\
\kappa_1 &= 0.0614 \cdot 10^7 & \kappa_2 &= 0.0561 \cdot 10^7 & \kappa_3 &= 0.0502 \cdot 10^7 \\
\gamma_1 &= 0.0388 \cdot 10^7 & \gamma_2 &= 0.0462 \cdot 10^7 & \gamma_{31} &= 0.0525 \cdot 10^7 \\
\rho_1 &= 0.4655 \cdot 10^7 & \rho_2 &= 0.4662 \cdot 10^7 & \rho_3 &= 0.4669 \cdot 10^7
\end{aligned}$$

Özdeş olmayan kuple kılıflı optik fiberler için c_{21} 'in D_2 'ye göre değişiminde aşağıdaki tanımlamalar kullanılmıştır:

$$f = 200 \text{ THz}, \mu_0 = 4\pi 10^{-7}, k_0 = 0.42 \cdot 10^7, \varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}, P = 1 \text{ mW}, n_1 = 1,5, n_2 = 1,49, n_3 = 1$$

$$D_1 = 50 \mu\text{m}, d_2 = 21 \mu\text{m}, d_1 = 20 \mu\text{m}$$

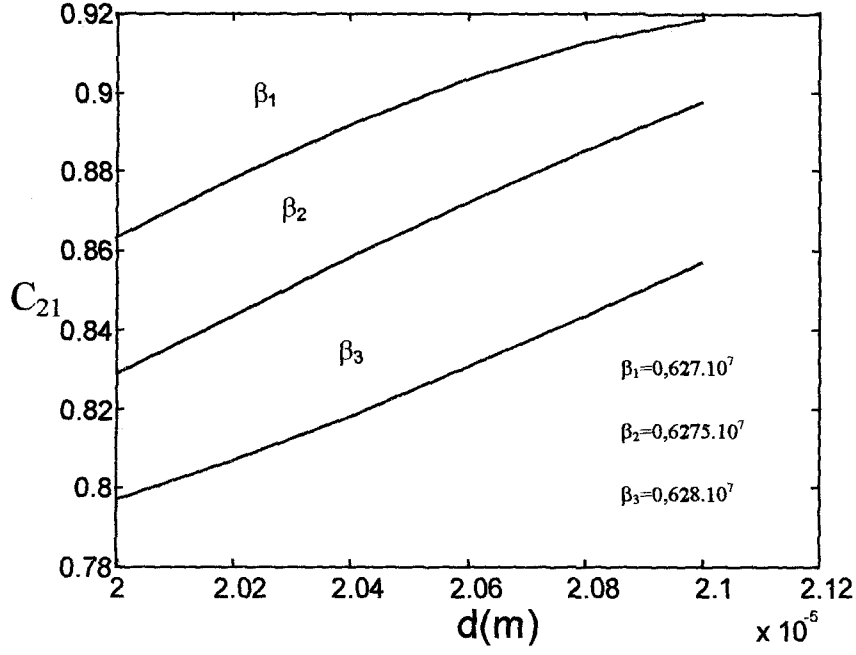
$$\begin{aligned}
\beta_1 &= 0.627 \cdot 10^7 & \beta_2 &= 0.6275 \cdot 10^7 & \beta_3 &= 0.6278 \cdot 10^7 \\
\kappa_1 &= 0.0614 \cdot 10^7 & \kappa_2 &= 0.0561 \cdot 10^7 & \kappa_3 &= 0.0502 \cdot 10^7 \\
\gamma_1 &= 0.0388 \cdot 10^7 & \gamma_2 &= 0.0462 \cdot 10^7 & \gamma_{31} &= 0.0525 \cdot 10^7 \\
\rho_1 &= 0.4655 \cdot 10^7 & \rho_2 &= 0.4662 \cdot 10^7 & \rho_3 &= 0.4669 \cdot 10^7
\end{aligned}$$

Özdeş olmayan kuple kılıflı optik fiberler için c_{21} 'in D_1 'ye göre değişiminde aşağıdaki tanımlamalar kullanılmıştır:

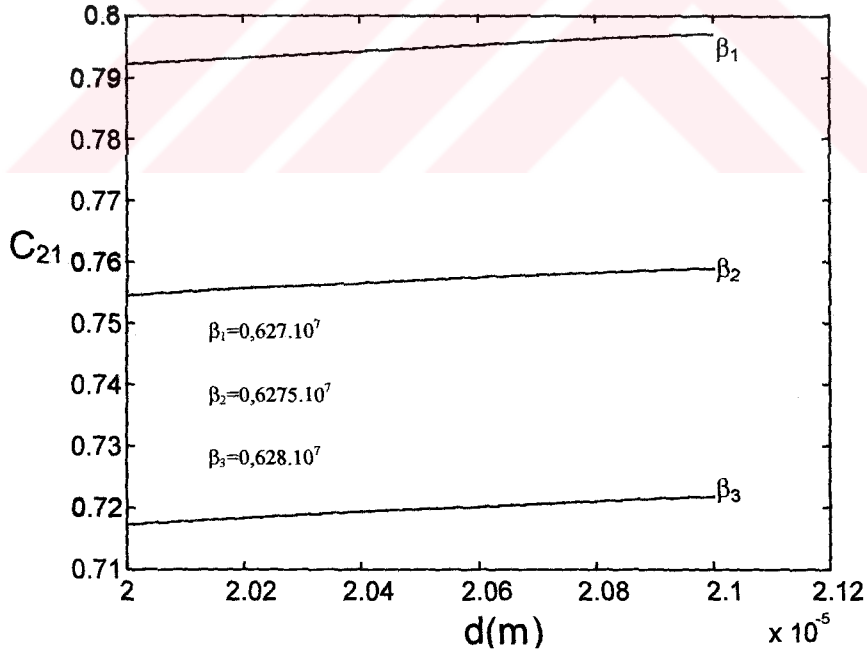
$$f = 200 \text{ THz}, \mu_0 = 4\pi 10^{-7}, k_0 = 0.42 \cdot 10^7, \varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}, P = 1 \text{ mW}, n_1 = 1,5, n_2 = 1,49, n_3 = 1$$

$$d_1 = 20 \mu\text{m}, d_2 = 21 \mu\text{m}, D_2 = 60 \mu\text{m}$$

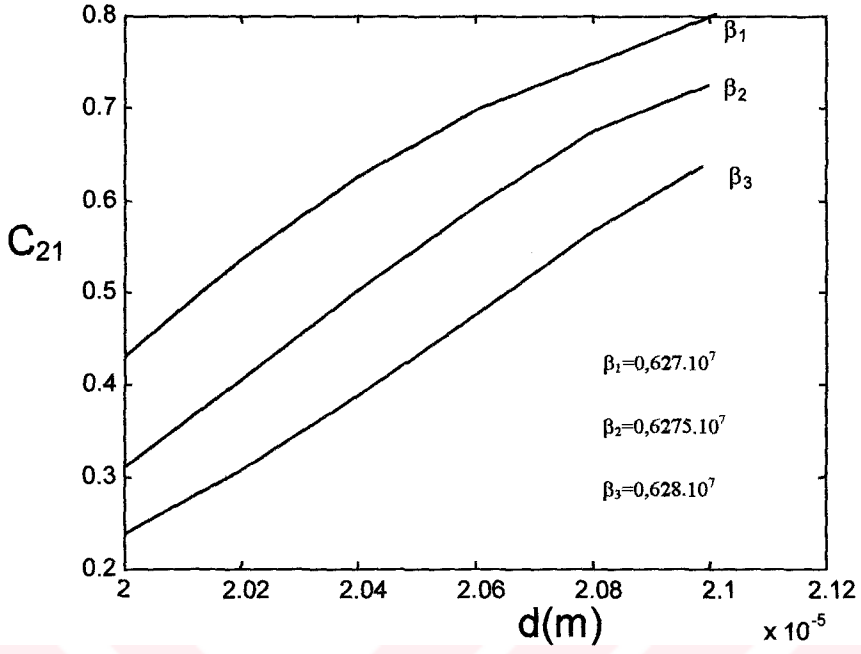
$$\begin{aligned}
\beta_1 &= 0.627 \cdot 10^7 & \beta_2 &= 0.6275 \cdot 10^7 & \beta_3 &= 0.6278 \cdot 10^7 \\
\kappa_1 &= 0.0614 \cdot 10^7 & \kappa_2 &= 0.0561 \cdot 10^7 & \kappa_3 &= 0.0502 \cdot 10^7 \\
\gamma_1 &= 0.0388 \cdot 10^7 & \gamma_2 &= 0.0462 \cdot 10^7 & \gamma_{31} &= 0.0525 \cdot 10^7 \\
\rho_1 &= 0.4655 \cdot 10^7 & \rho_2 &= 0.4662 \cdot 10^7 & \rho_3 &= 0.4669 \cdot 10^7
\end{aligned}$$



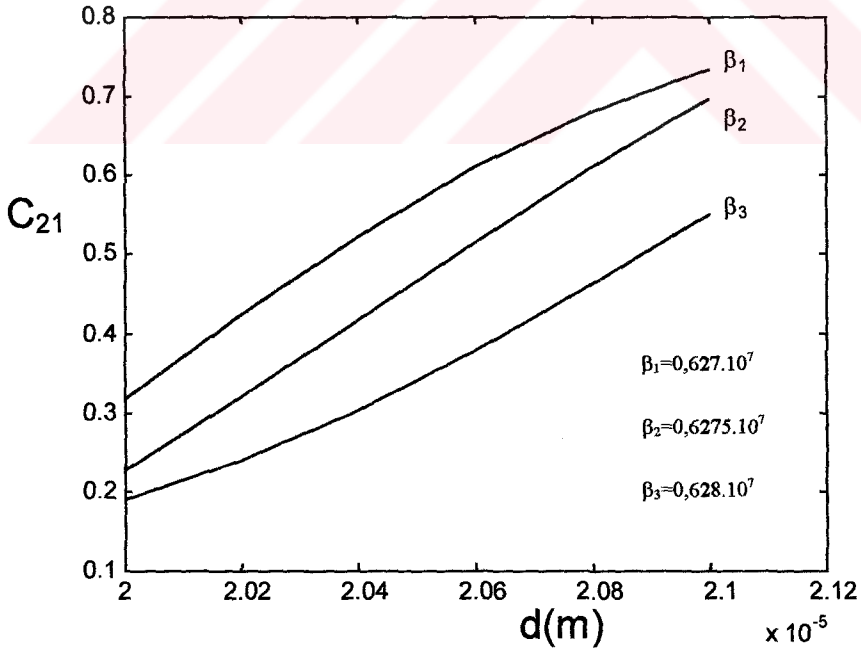
Şekil Ek.1.1 Özdeş kuple kılıfsız düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin yarıçapına göre değişimi



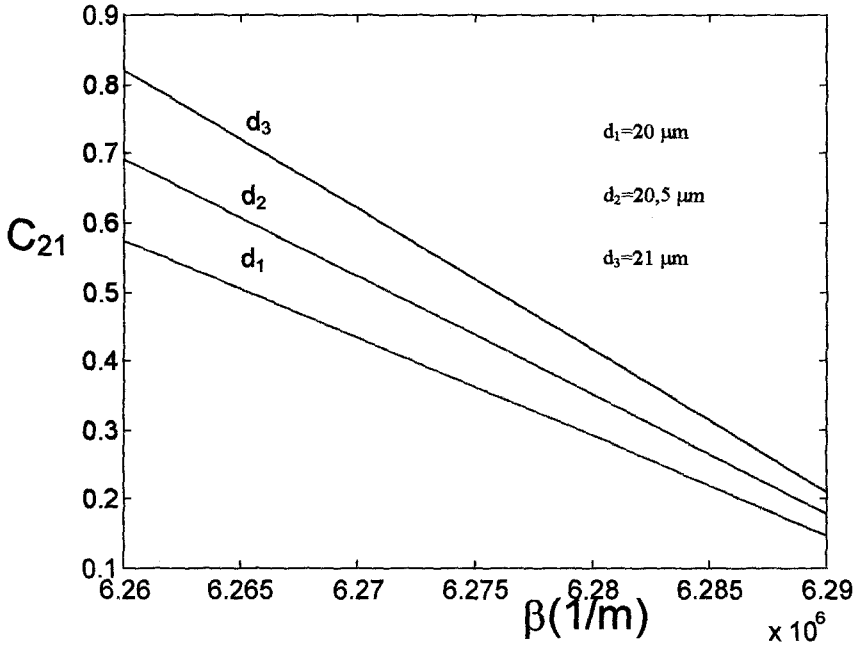
Şekil Ek.1.2 Özdeş kuple kılıfsız düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin yarıçapına göre değişimi



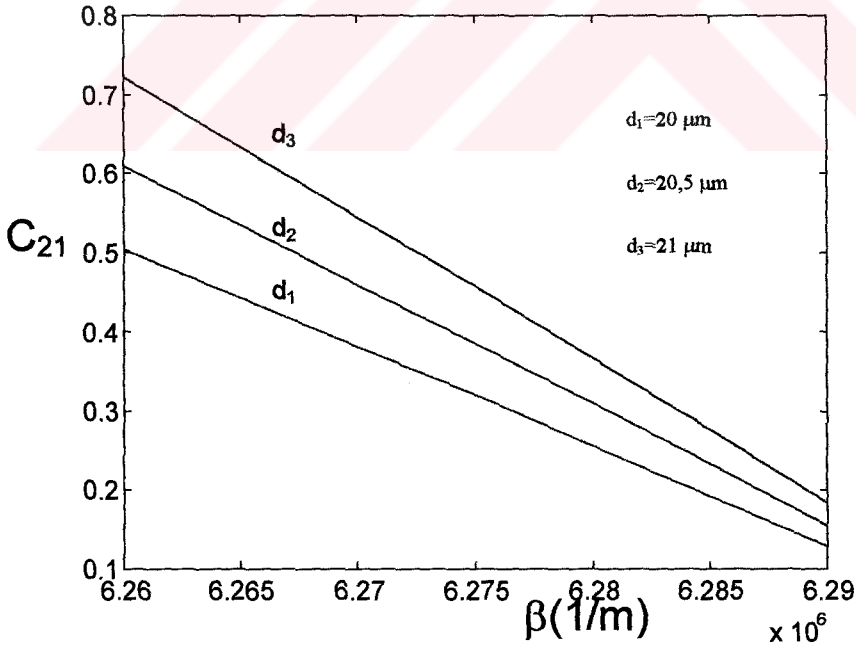
Şekil Ek.1.3 Özdeş kuple kılıfsız düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TM modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin yarıçapına göre değişimi



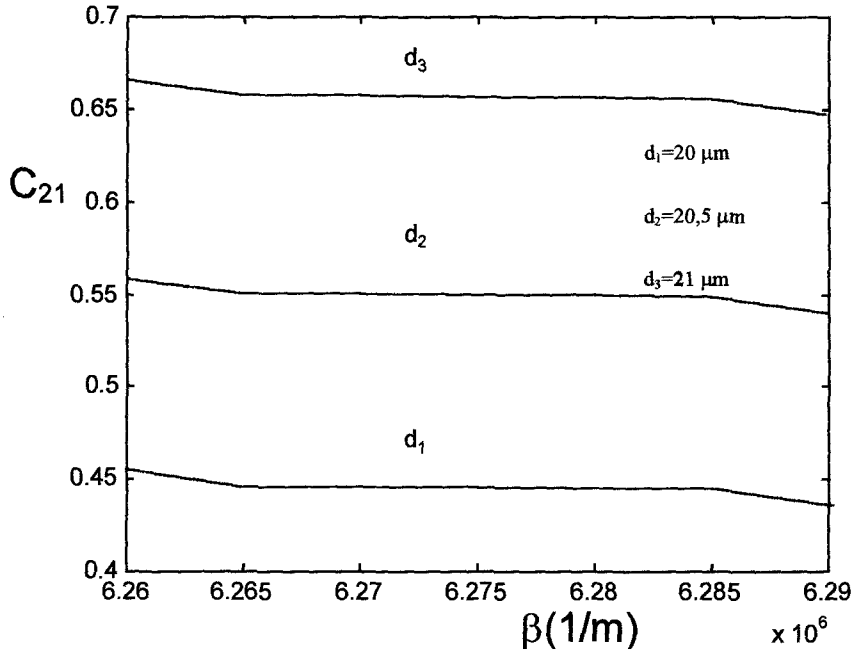
Şekil Ek.1.4 Özdeş kuple kılıfsız düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TM modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin yarıçapına göre değişimi



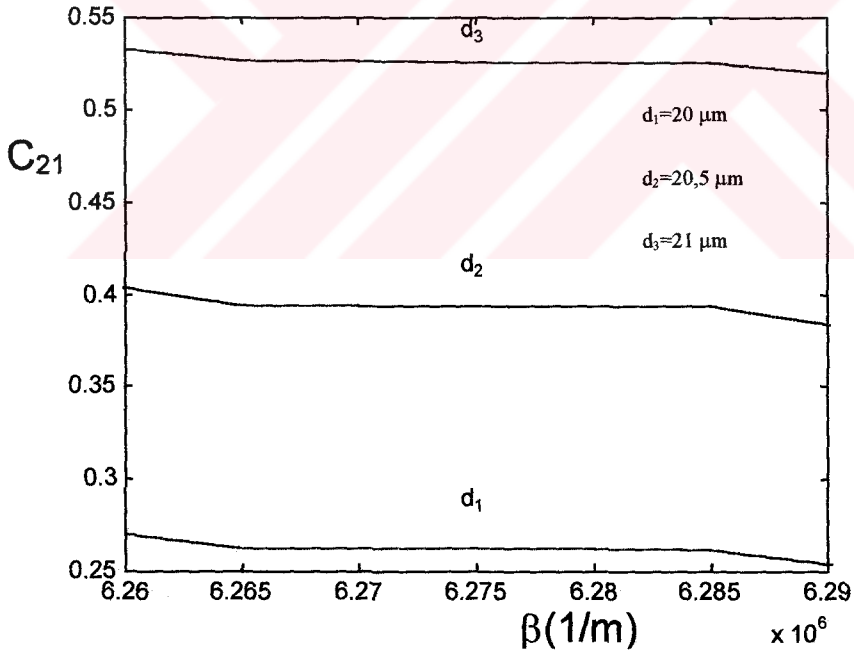
Şekil Ek.1.5 Özdeş kuple kılıfsız düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin propagasyon sabitine göre değişimi



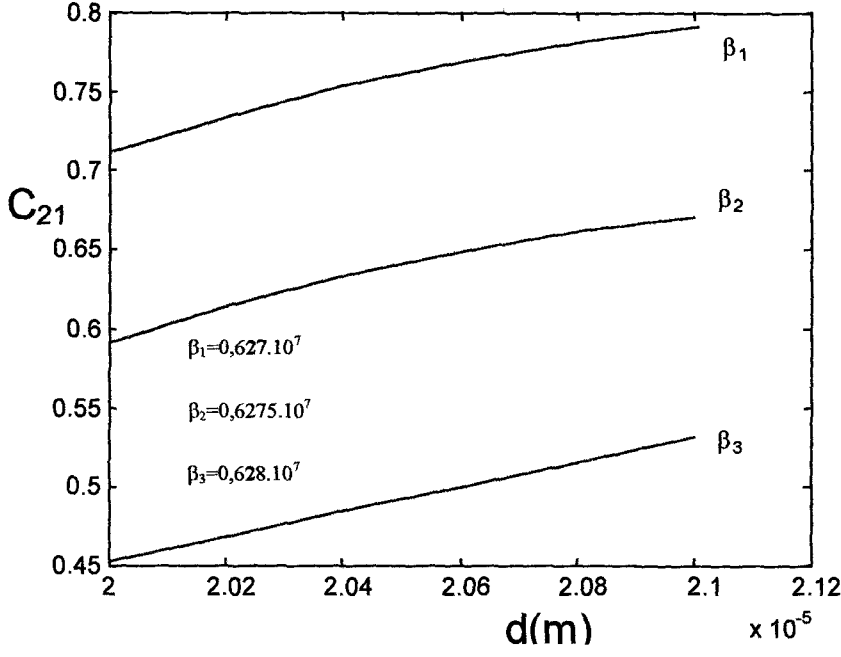
Şekil Ek.1.6 Özdeş kuple kılıfsız düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin propagasyon sabitine göre değişimi



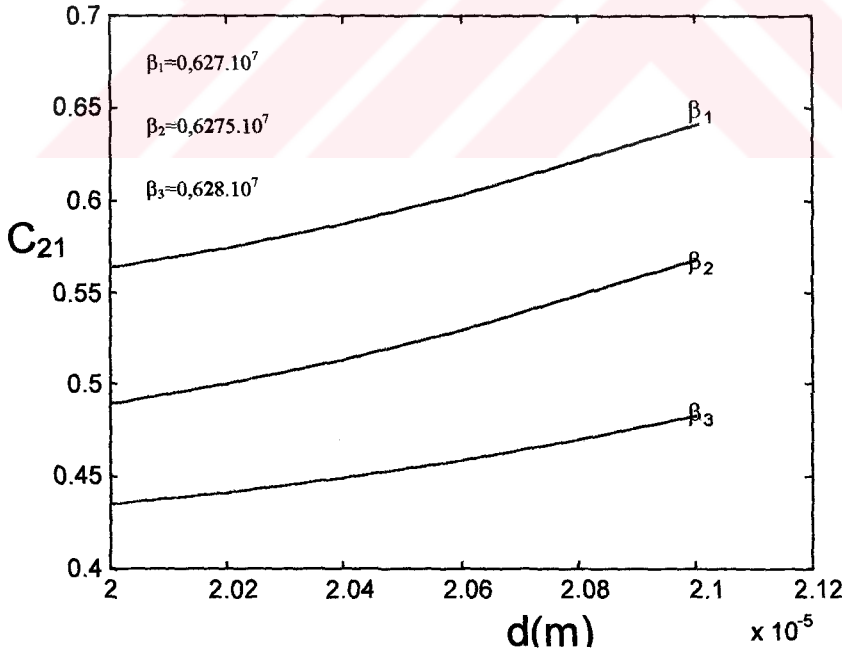
Şekil Ek.1.7 Özdeş kuple kılıfsız düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TM modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin propagasyon sabitine göre değişimi



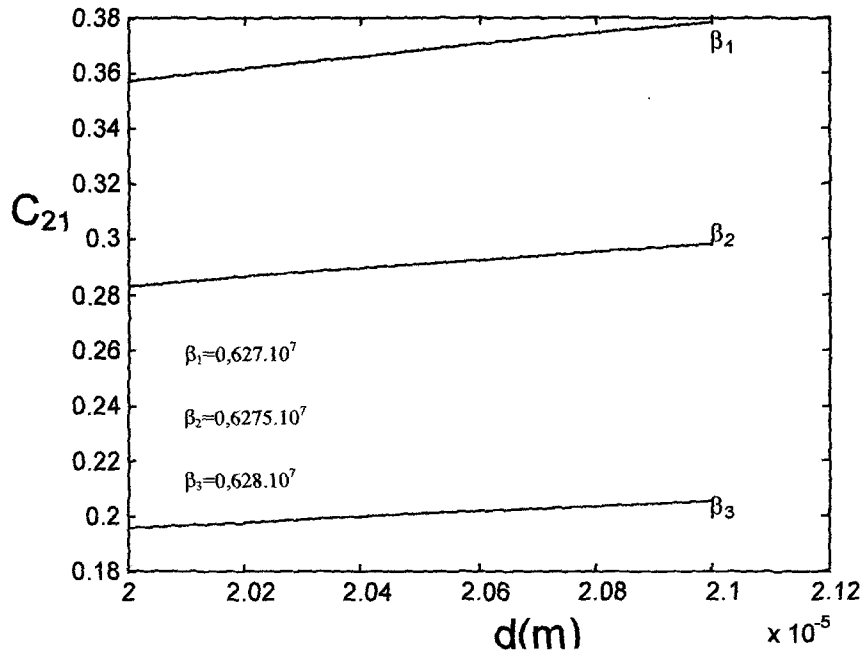
Şekil Ek.1.8 Özdeş kuple kılıfsız düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TM modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin propagasyon sabitine göre değişimi



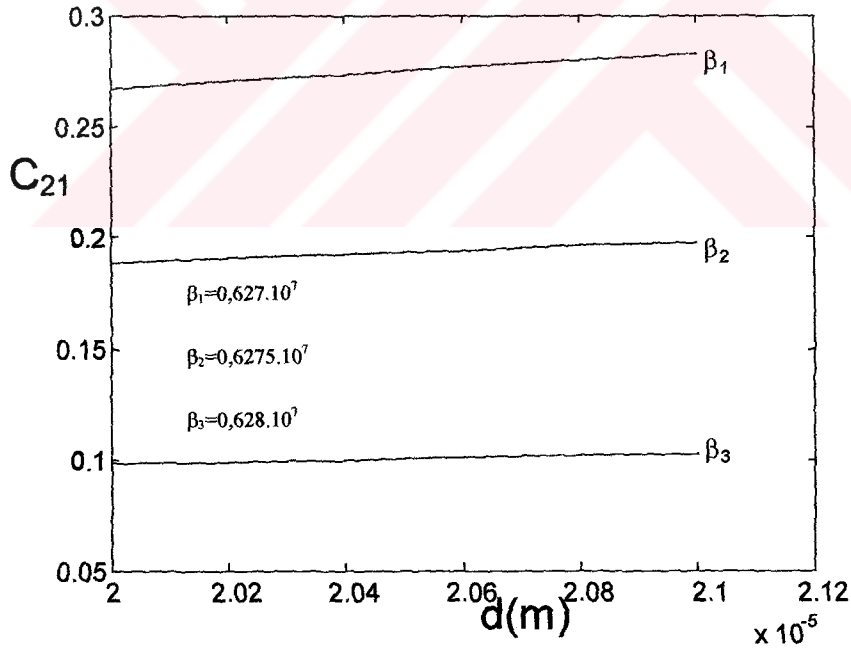
Şekil Ek.1.9 Özdeş kuple kılıflı düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



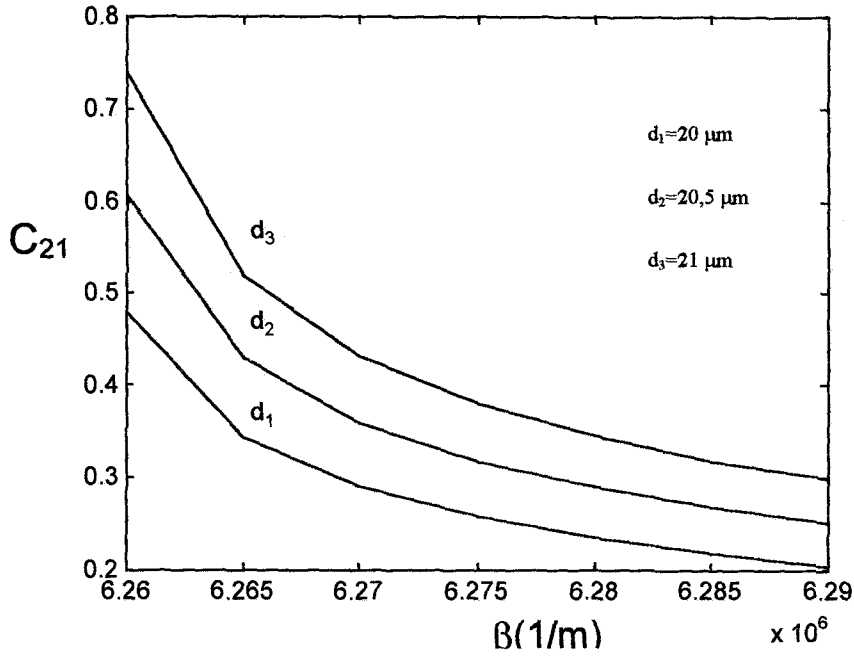
Şekil Ek.1.10 Özdeş kuple kılıflı düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



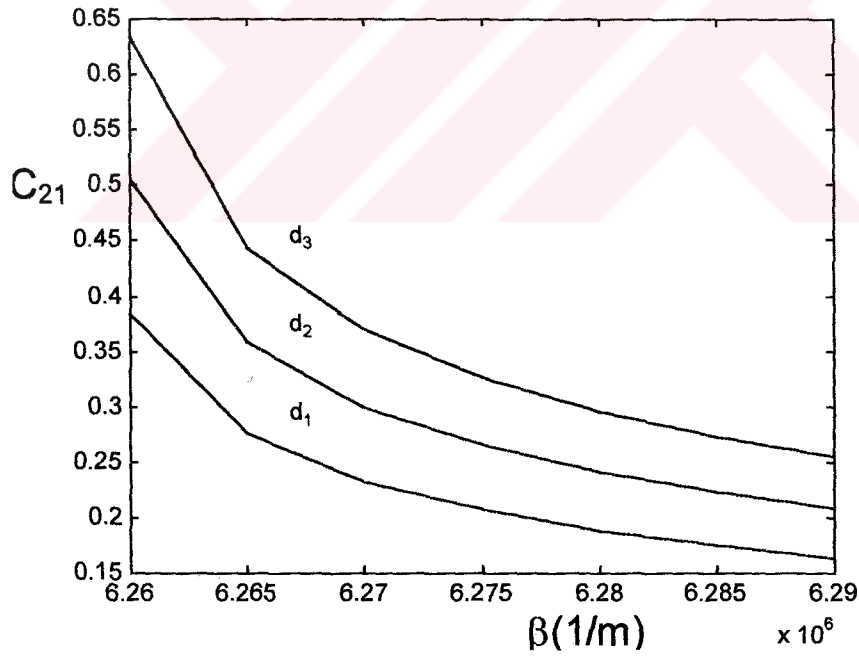
Şekil Ek.1.11 Özdeş kuple kılıflı düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TM modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



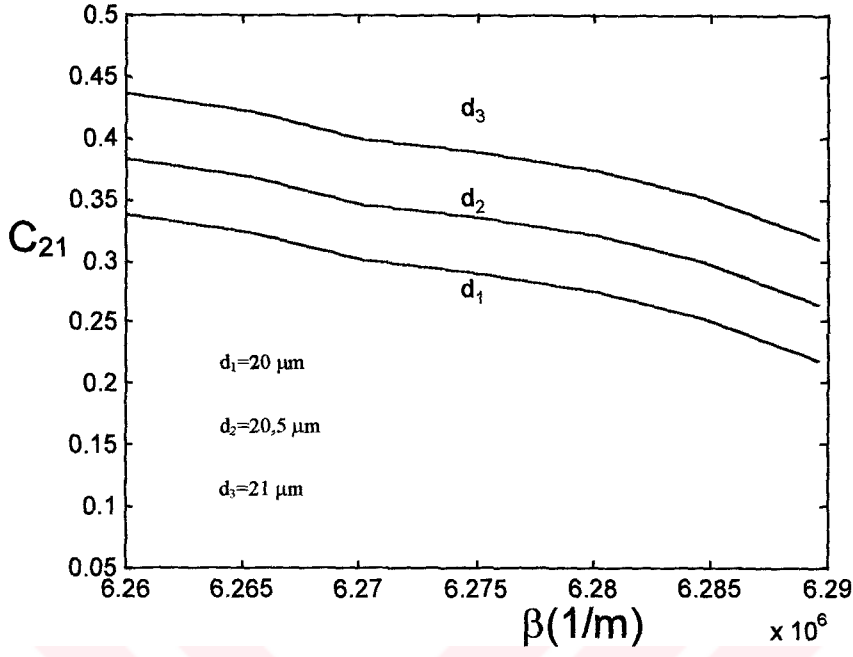
Şekil Ek.1.12 Özdeş kuple kılıflı düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TM modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



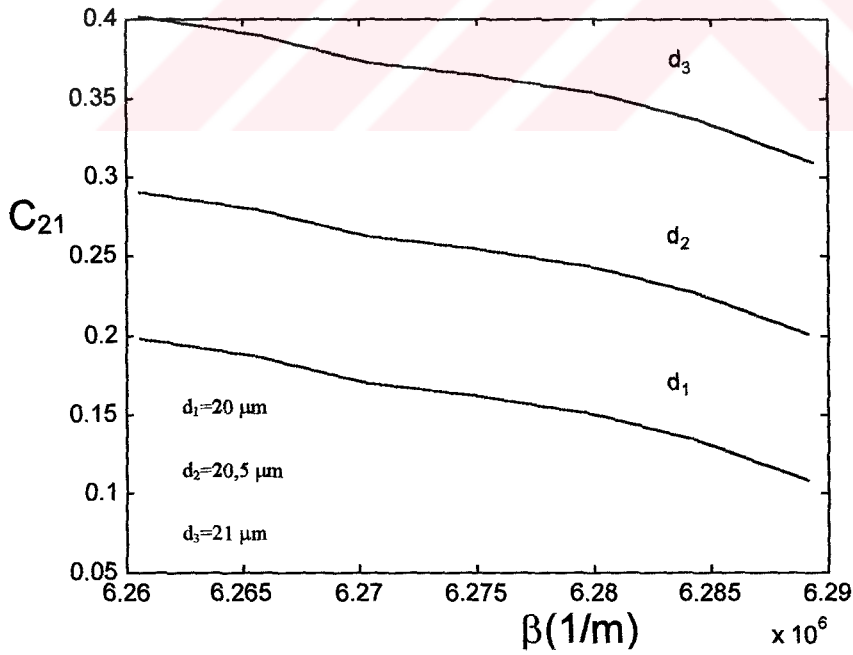
Şekil Ek.1.13 Özdeş kuple kılıflı düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin propagasyon sabitine göre değişimi



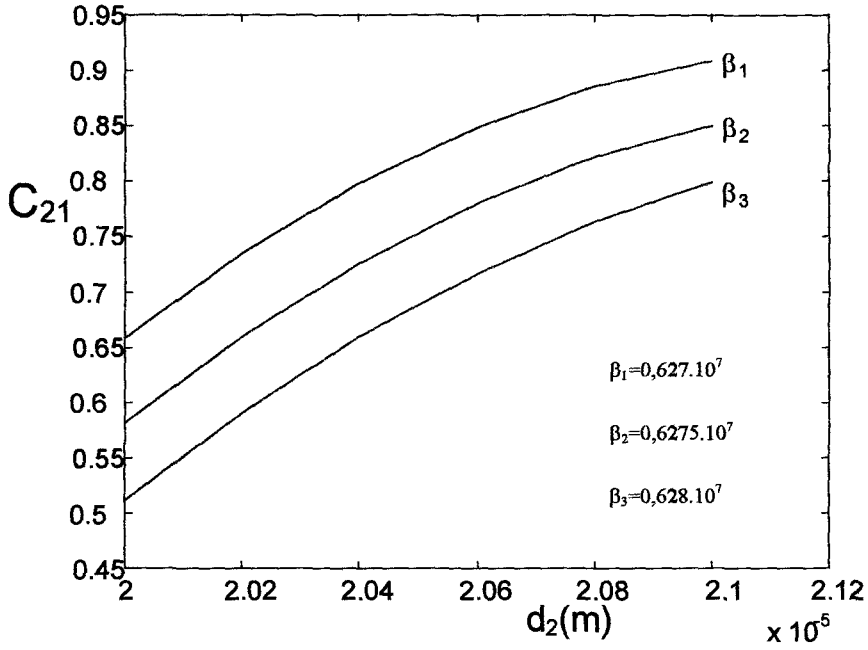
Şekil Ek.1.14 Özdeş kuple kılıflı düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TE modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin propagasyon sabitine göre değişimi



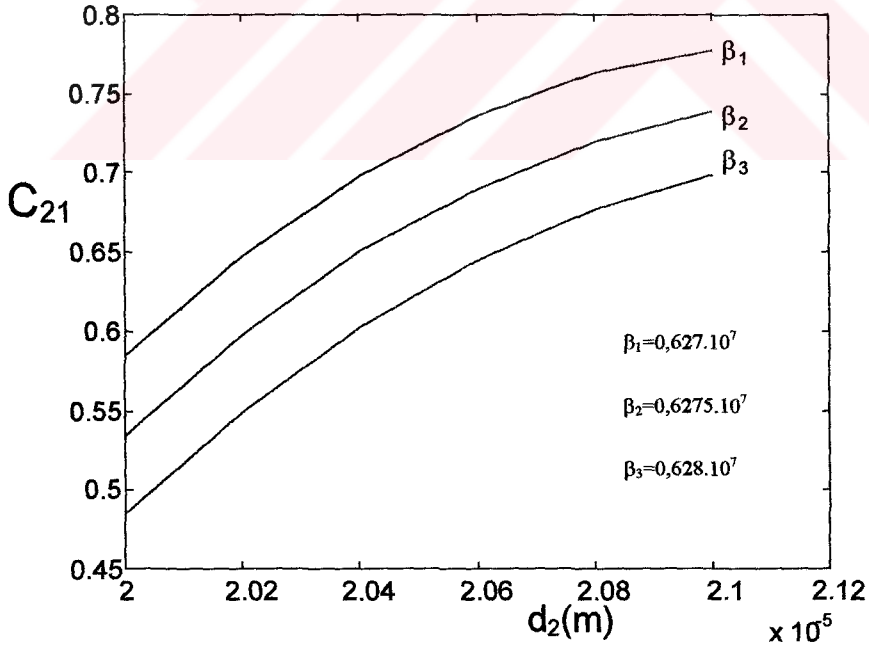
Şekil Ek.1.15 Özdeş kuple kılıflı düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TM modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin propagasyon sabitine göre değişimi



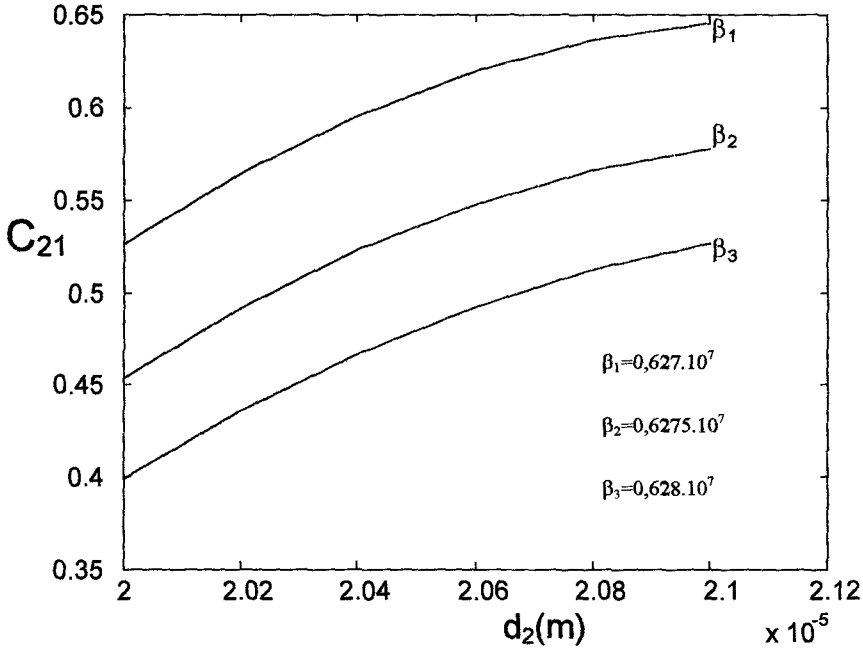
Şekil Ek.1.16 Özdeş kuple kılıflı düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TM modlarının kuplajında kuplaj katsayısının optik fiberin propagasyon sabitine göre değişimi



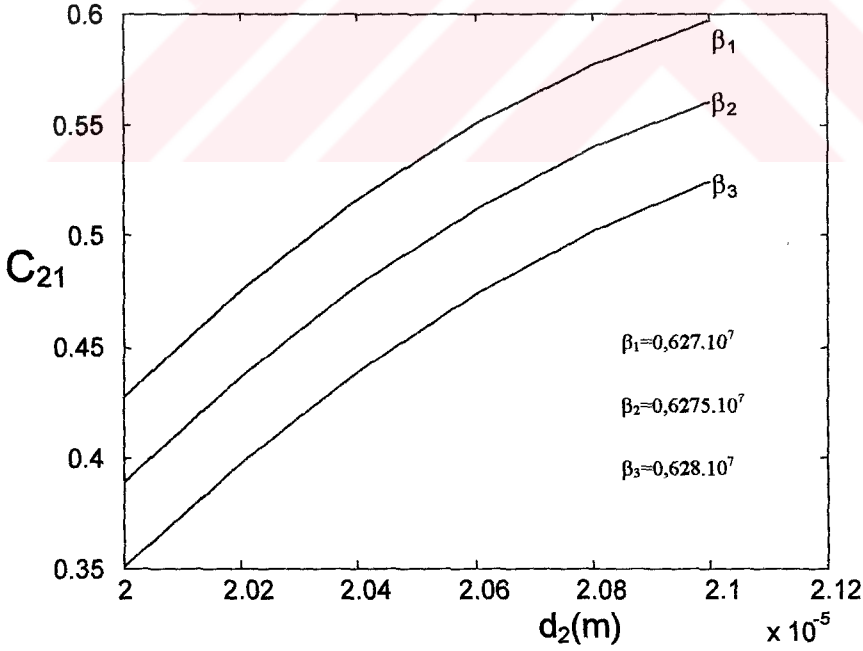
Şekil Ek.1.17 Özdeş olmayan kuple kılıfsız ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TE modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



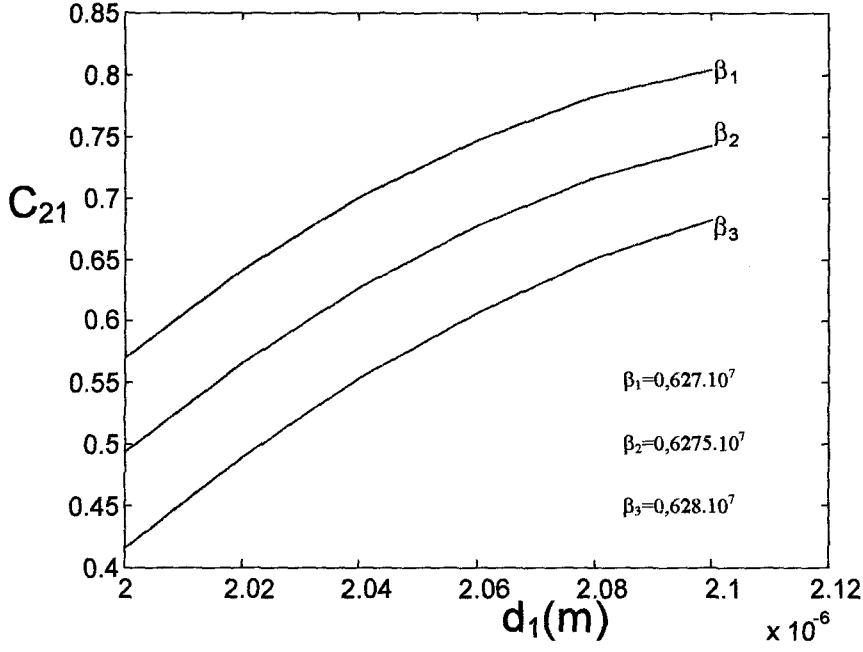
Şekil Ek.1.18 Özdeş olmayan kuple kılıfsız ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TE modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



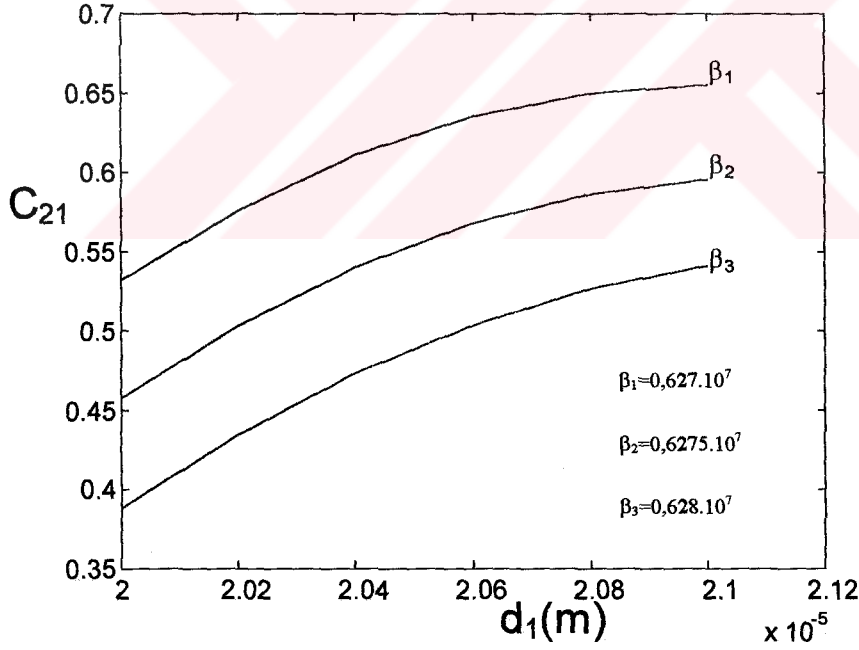
Şekil Ek.1.19 Özdeş olmayan kuple kılıfsız ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TM modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



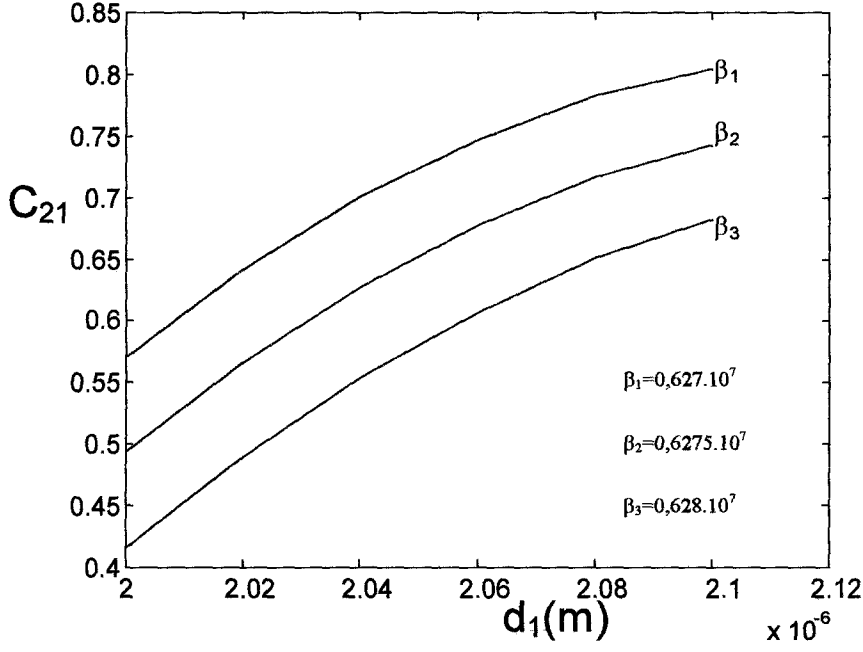
Şekil Ek.1.20 Özdeş olmayan kuple kılıfsız ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TM modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



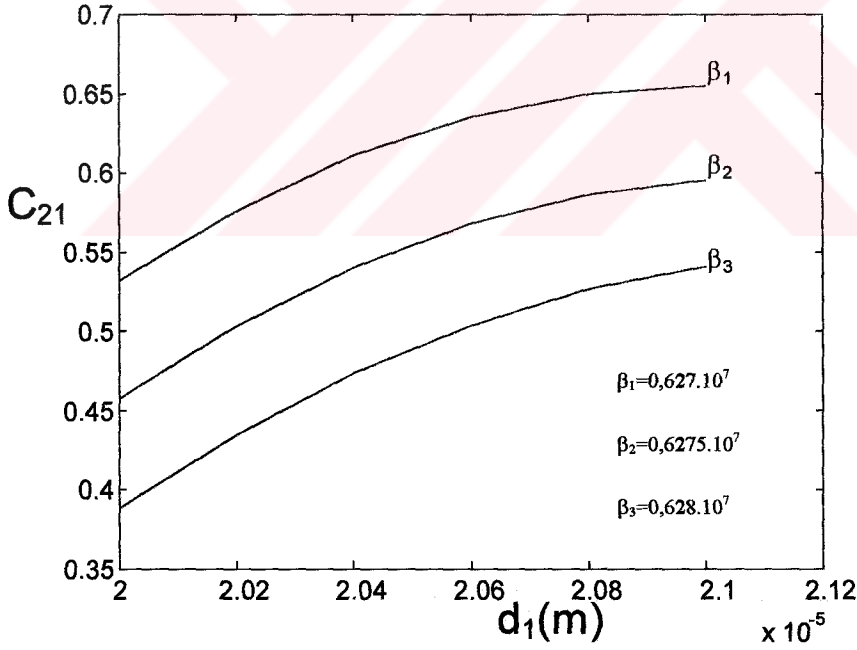
Şekil Ek.1.21 Özdeş olmayan kuple kılıfsız ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TE modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



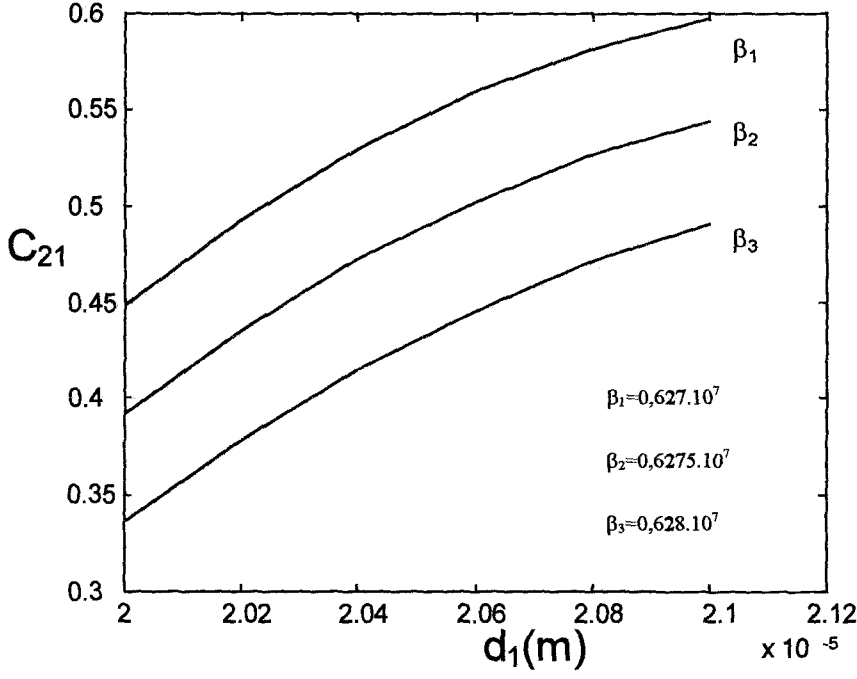
Şekil Ek.1.22 Özdeş olmayan kuple kılıfsız ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TE modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



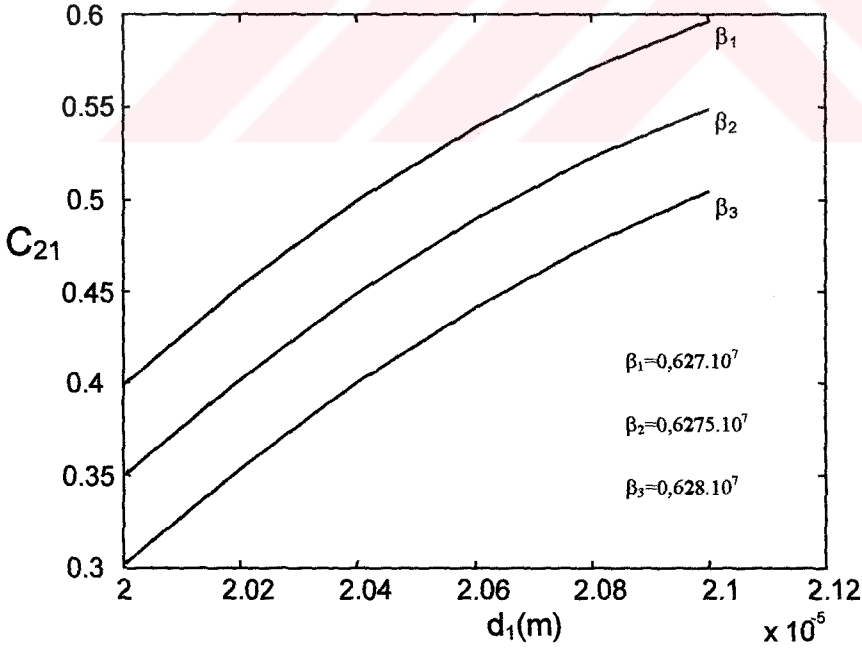
Şekil Ek.1.21 Özdeş olmayan kuple kılıfsız ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TE modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



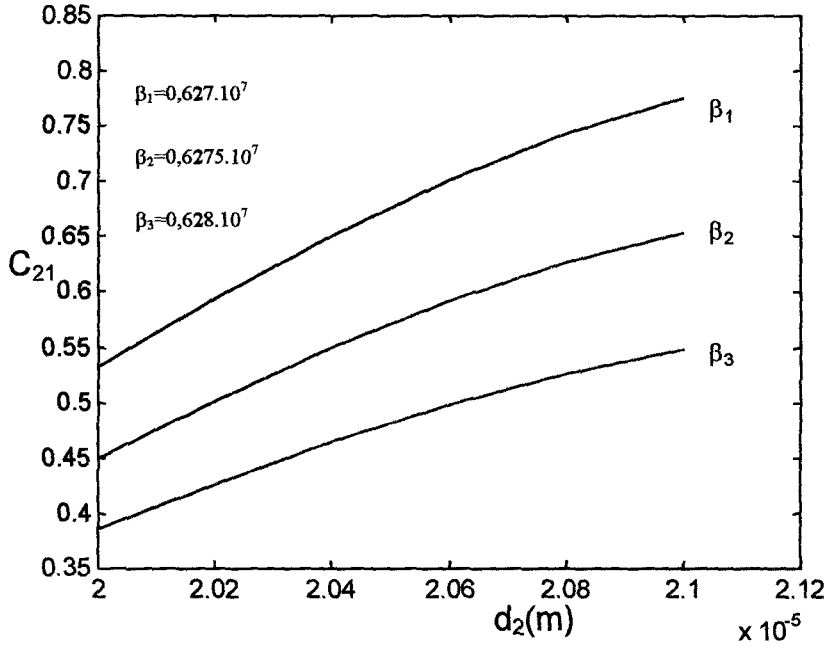
Şekil Ek.1.22 Özdeş olmayan kuple kılıfsız ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TE modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



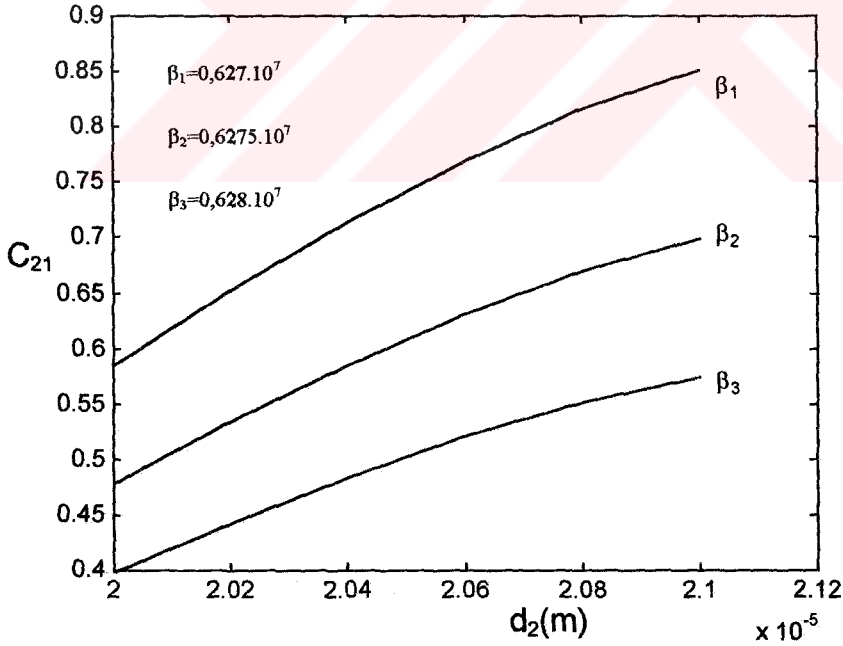
Şekil Ek.1.23 Özdeş olmayan kuple kılıfsız ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TM modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



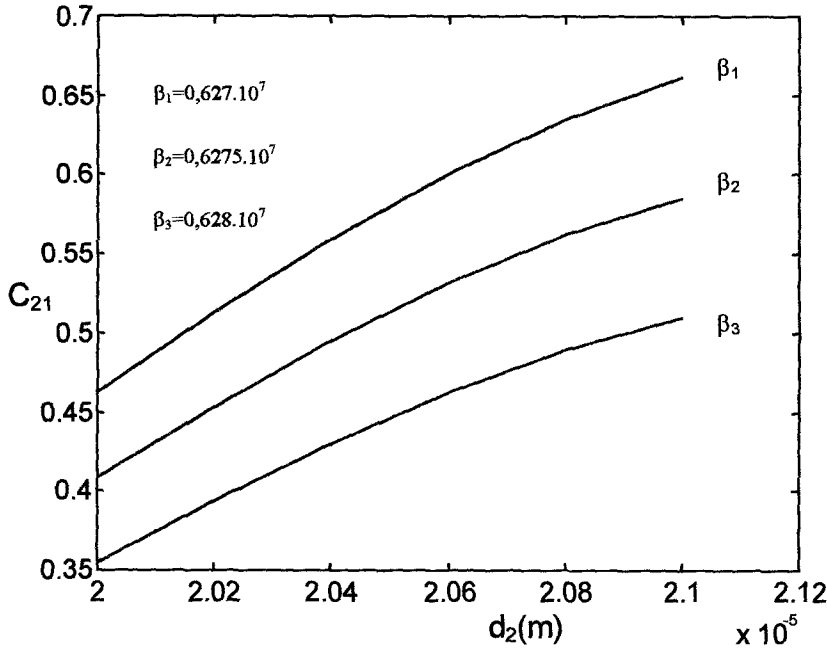
Şekil Ek.1.24 Özdeş olmayan kuple kılıfsız ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TM modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



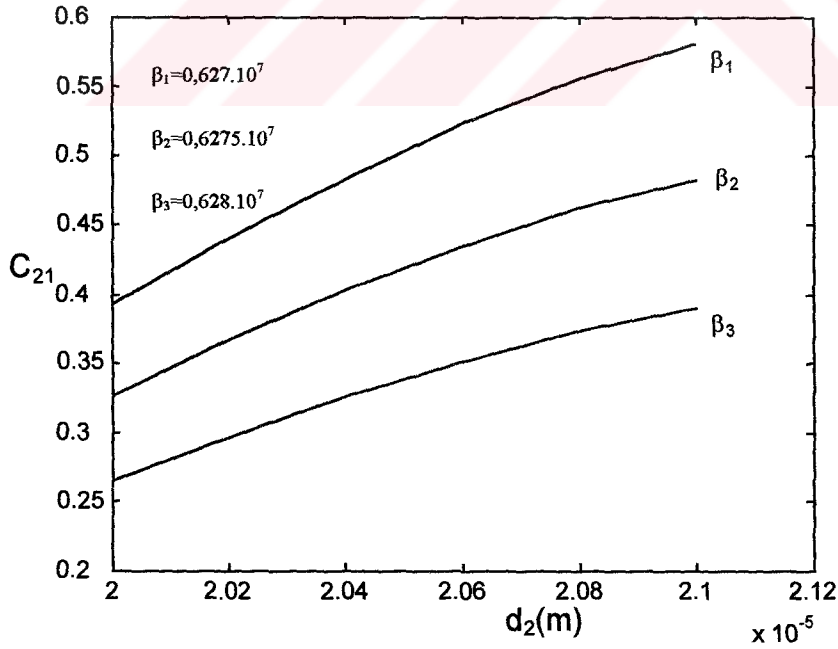
Şekil Ek.1.25 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TE modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



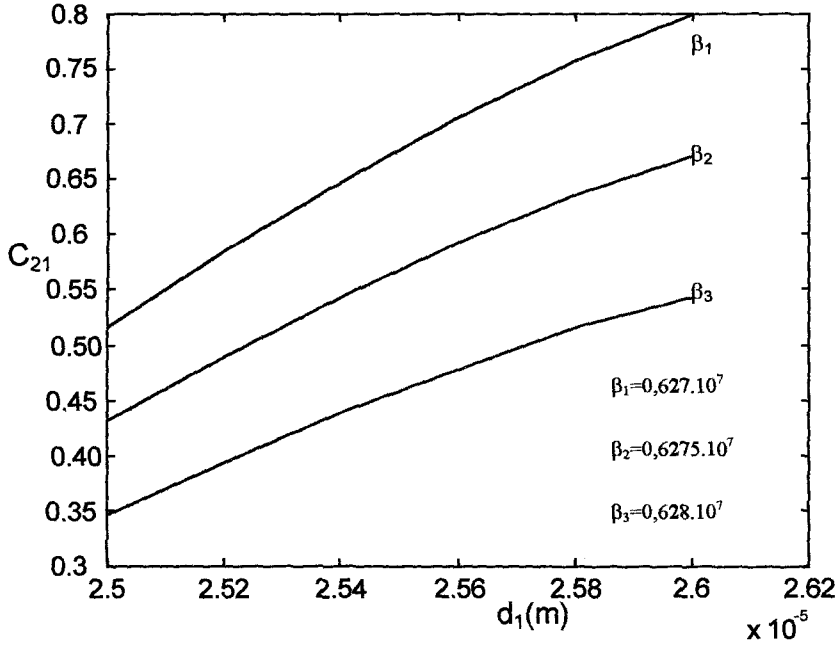
Şekil Ek.1.26 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TE modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



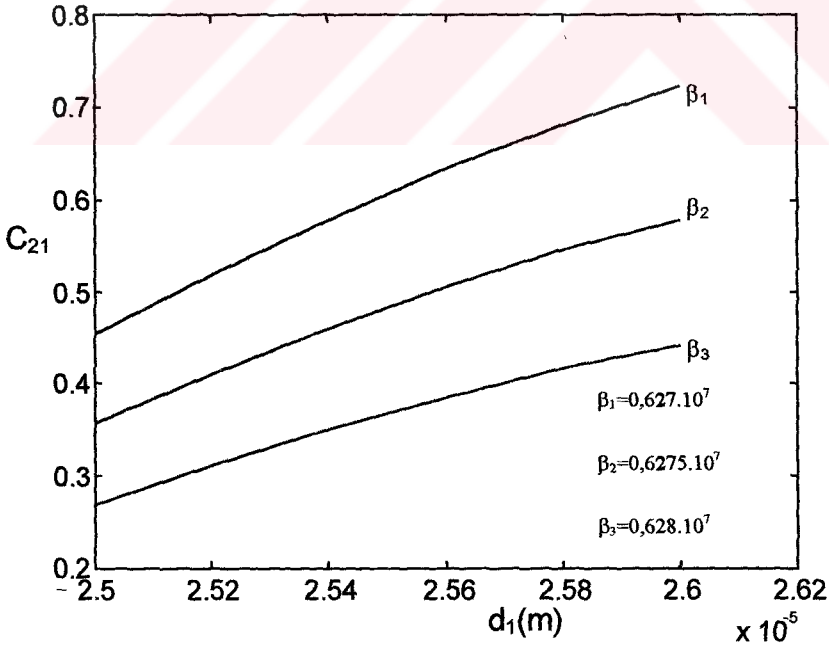
Şekil Ek.1.27 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TM modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



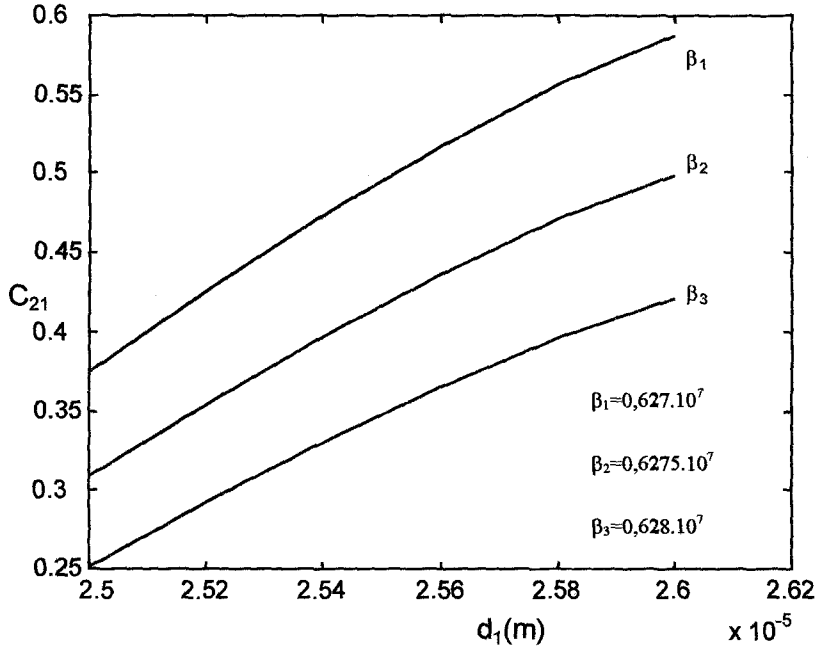
Şekil Ek.1.28 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TM modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



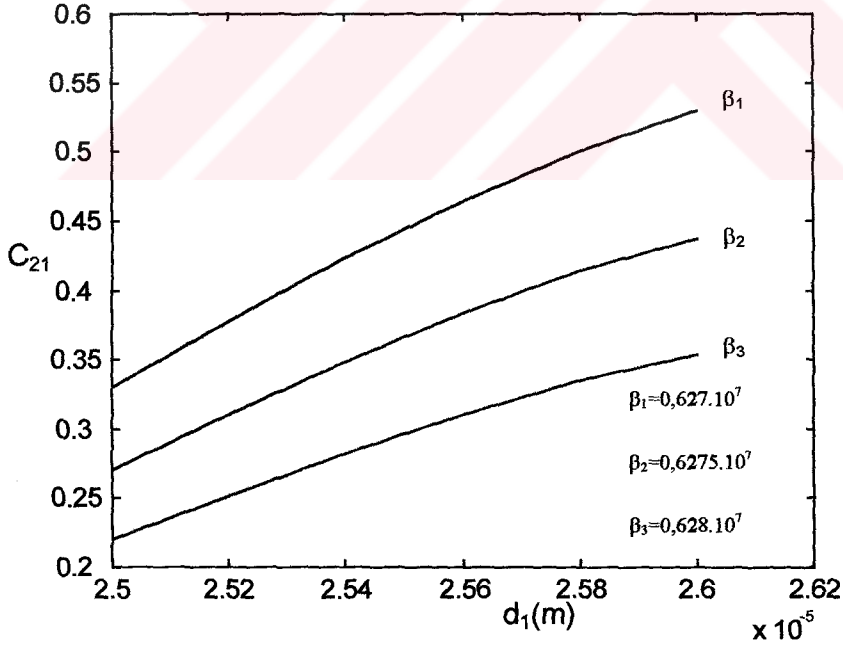
Şekil Ek.1.29 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TE modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



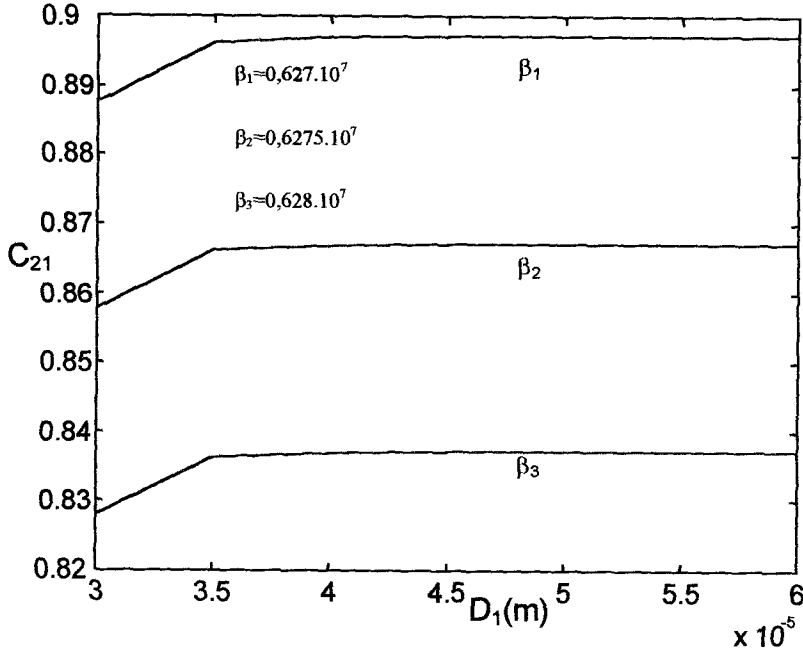
Şekil Ek.1.30 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TE modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



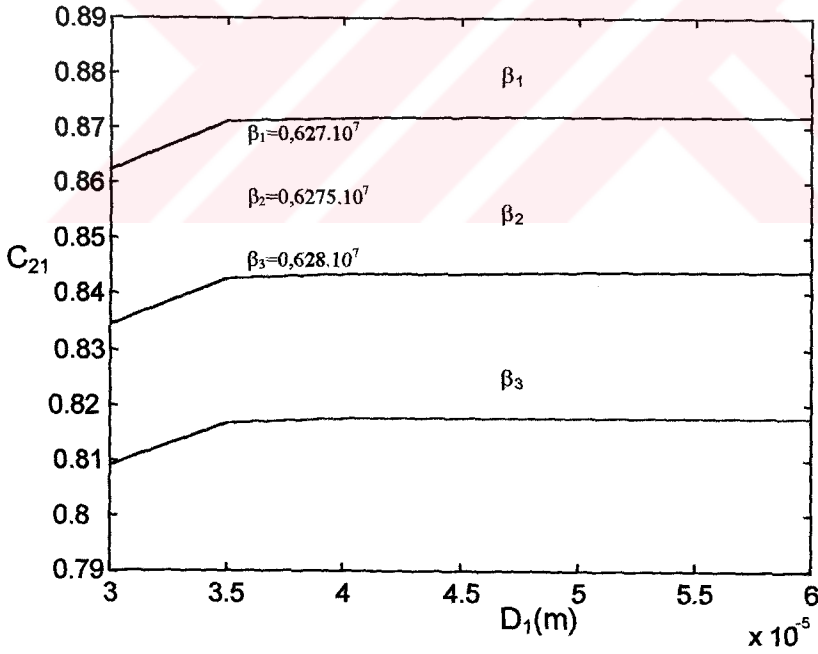
Şekil Ek.1.31 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TM modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



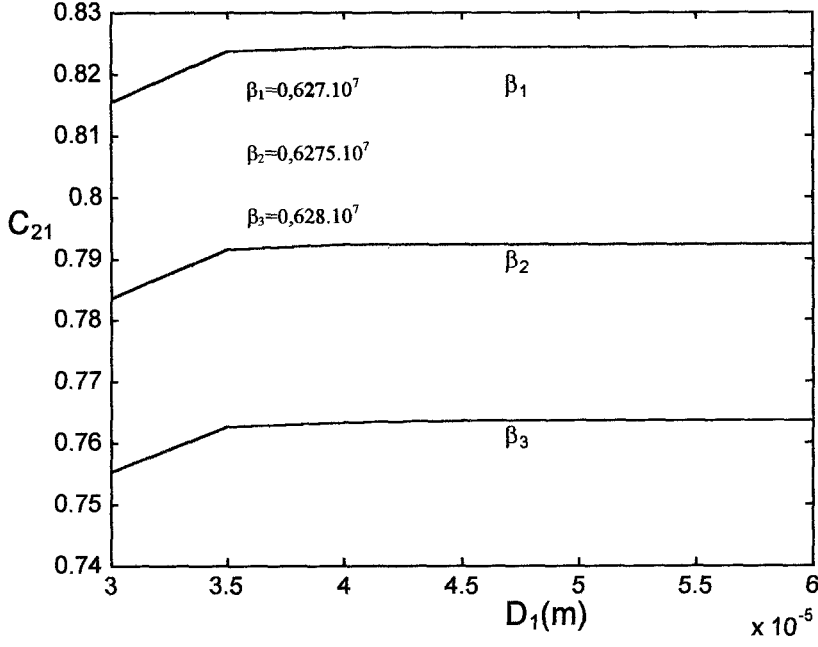
Şekil Ek.1.32 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TM modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin çekirdek bölgesi yarıçapına göre değişimi



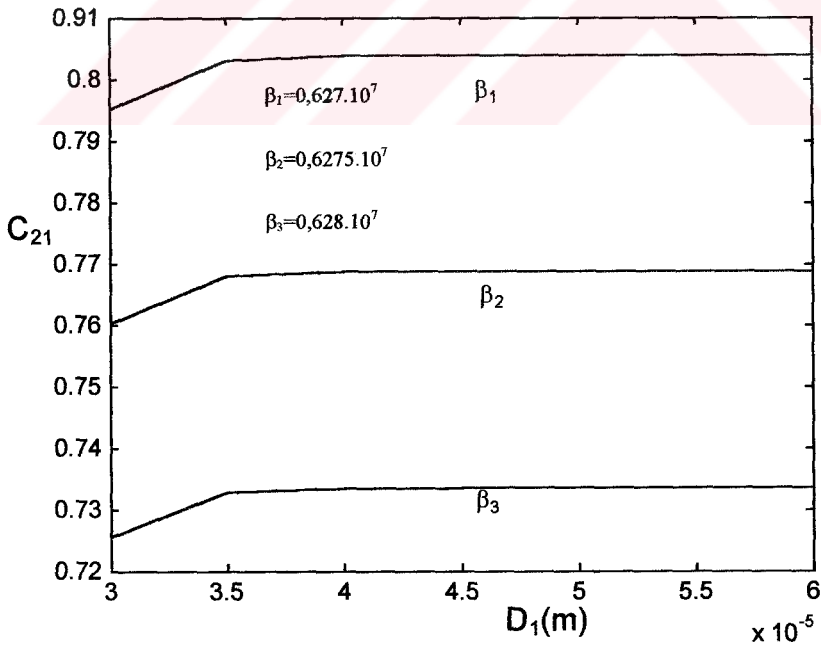
Şekil Ek.1.33 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TE modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin kılıf bölgesi yarıçapına göre değişimi



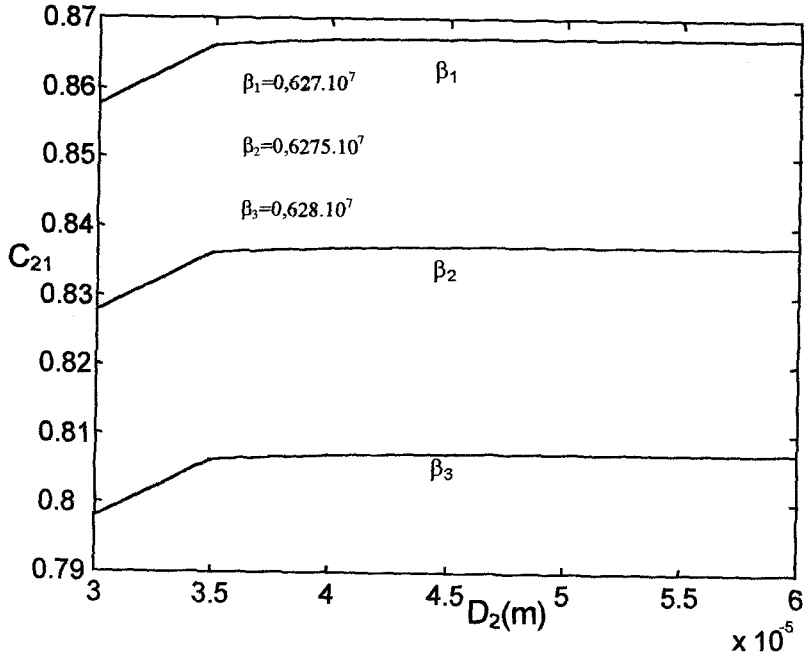
Şekil Ek.1.34 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TE modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin kılıf bölgesi yarıçapına göre değişimi



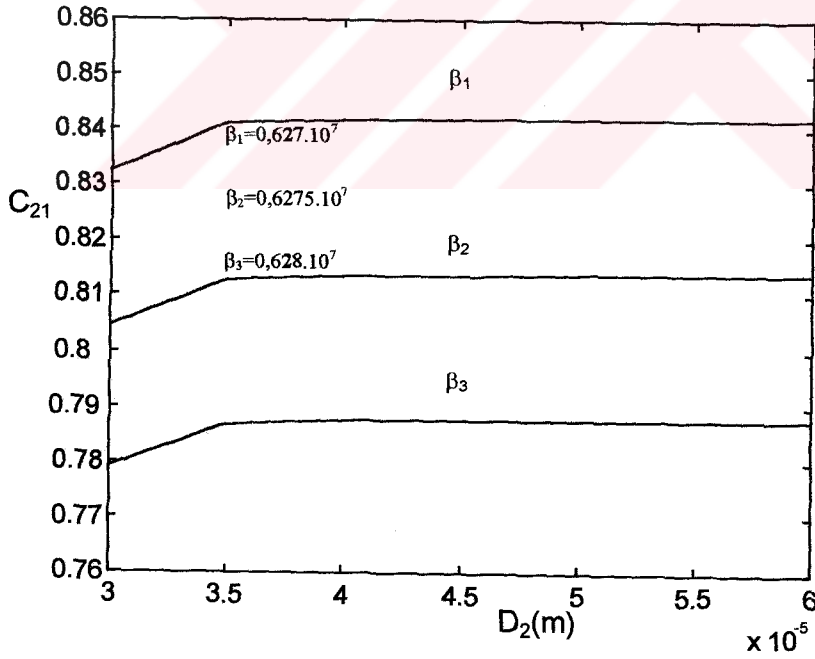
Şekil Ek.1.35 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TM modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin kılıf bölgesi yarıçapına göre değişimi



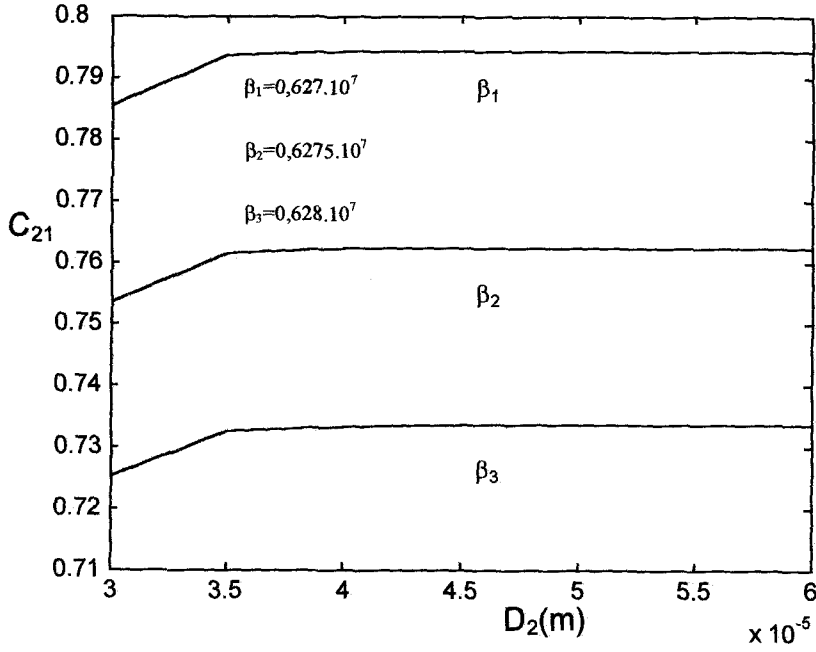
Şekil Ek.1.36 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TM modların kuplajında kuplaj katsayısının birinci optik fiberin kılıf bölgesi yarıçapına göre değişimi



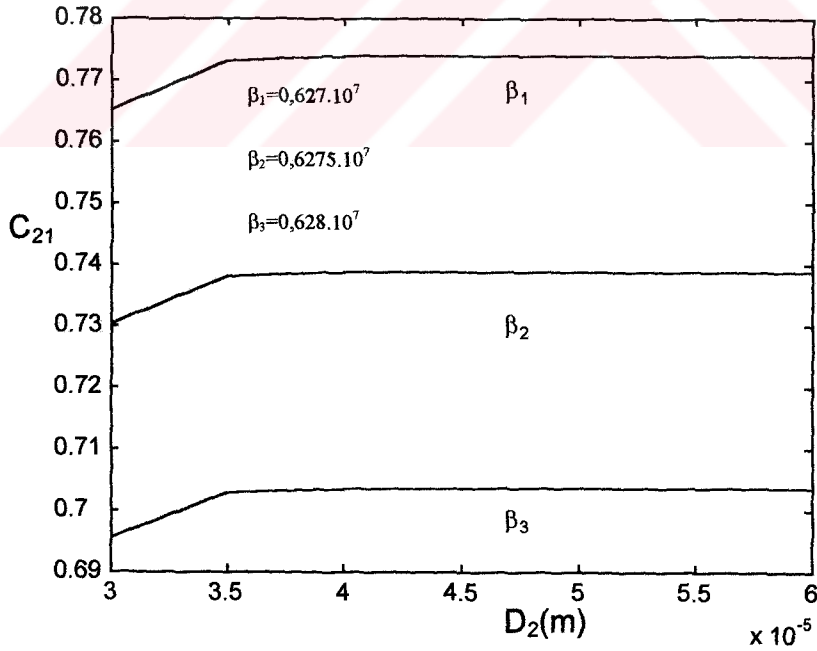
Şekil Ek.1.37 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TE modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin kılıf bölgesi yarıçapına göre değişimi



Şekil Ek.1.38 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TE modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin kılıf bölgesi yarıçapına göre değişimi



Şekil Ek.1.39 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde çift TM modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin kılıf bölgesi yarıçapına göre değişimi



Şekil Ek.1.40 Özdeş olmayan kuple kılıflı ve düzlemsel katmanlı optik fiberlerde tek TM modların kuplajında kuplaj katsayısının ikinci optik fiberin kılıf bölgesi yarıçapına göre değişimi

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 06.07.1979

Doğum yeri İstanbul

Lise 1992-1996 Pertevniyal Süper Lisesi

Lisans 1996-2000 Yıldız Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Fakültesi
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2000-2003 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
Anabilim Dalı, Haberleşme Programı

Çalıştığı kurumlar