

FİBER OPTİK KABLO ÜRETİM TEKNİKLERİNİN İNCELENMESİ

128228

Pamukkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Tarafından Kabul Edilen

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Adem ÜKTE

Tez Savunma Tarihi: 01.07.2002

**TC YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

128228

DENİZLİ – 2002

TEZ SINAV SONUÇ FORMU

Bu tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.



Doç. Dr. Mustafa TEMİZ
(Yönetici)



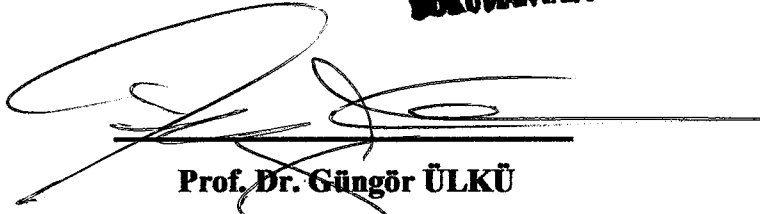
Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÖZEK
(Jüri Üyesi)



Yrd. Doç. Dr. Mehmet BAYLAN
(Jüri Üyesi)

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..09.08.2002..... tarih ve ..18/5..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

**Y.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANİSYON MERKEZİ**



Prof. Dr. Güngör ÜLKÜ
Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Öncelikle, yetişmemde en büyük pay sahibi olan aileme teşekkür etmeyi bir vazife olarak görüyorum.

Bu çalışma süresince yardımlarını benden esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Mustafa TEMİZ'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez çalışmamı hazırlamamda, çeşitli konularda yardımlarına başvurduğum Hüsnü ŞENTÜRK, Remzi ARSLANALP, Nurhan ONAR, Engin ÇETİN, Ünver YÜKSEL, Aydın TUTUMLU ve tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Adem ÜKTE

ÖZET

Bu çalışmada, fiber optik kabloların yapısı, çalışma prensibi, çeşitli özellikleri ve üretimi hakkında bilgi vermek amaçlanmaktadır. Fiber optik teknolojisinin tarihsel gelişiminden bahsedildikten sonra, temel optik kuralları ve ışığın yapısı da anlatılmıştır. Daha sonra optik fiberlerin temel yapısı, türleri, optik ve mekaniksel özellikleri ve çeşitli uygulama alanları incelenmiştir. Fiber üretiminde kullanılan malzemeler ve bu malzemelerden hangi tür fiberler yapıldığı anlatılmış, sonra fiber üretmek için kullanılan yöntemler tek tek ele alınmıştır. Son olarak değişik uygulamalar için kullanılan fiberlerin kablolanması ve kablo yapısı içerisinde hangi malzemelerin, ne amaçlı olarak kullanıldığı anlatılmıştır.

Adem ÜKTE

Anahtar Kelimeler: Fiber optik, fiber üretimi, fiber optik kablo üretim teknikleri.

ABSTRACT

In this study, giving information about structure, working principle, various characteristics and fabrication of the optical fiber cables is aimed. After mentioning the historical development of the fiber optics technology, basic optical laws and structure of light are also explained. Afterwards, basic structure, types, optical and mechanical characteristics and various applications of the optical fibers are examined. The materials that are used in the fabrication of the optical fibers and which types of fibers are made from these materials are explained, and then the methods which are used to produce optical fibers are considered one by one. Finally cabling of the fibers that are being used in various applications and the materials that are used in cable structure and their usage purposes are explained.

Adem ÜKTE

Key Words: Fiber optics, fiber fabrication, fabrication methods of the optical fiber cables.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İçindekiler.....	VII
Şekiller Dizini.....	XI
Çizelgeler Dizini.....	XIII
Simgeler Dizini.....	XIV

Birinci Bölüm

GİRİŞ

1. Giriş.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	1
1.2 Fiber Optiğin Tarihsel Gelişimi.....	2
1.2.1 Işığın İletilmesi.....	2
1.2.2 Tam İç Yansıma	3
1.2.3 Optik İletişim.....	4
1.2.4 Fiber Yeleği.....	5
1.2.5 Görüntüleme Uygulamaları	7
1.2.6 Fiber Kaybının Azaltılması.....	7

İkinci Bölüm

FİBER OPTİĞİN TEMELLERİ

2. Fiber Optiğin Temelleri.	10
2.2 Kırılma İndisi ve Tam İç Yansıma	11
2.3 Işığın Yapısı	15
2.3.1 Doğrusal Polarizasyon.....	16

2.3.2 Eliptik ve Dairesel Polarizasyon	19
2.3.3 Işığın Kuantum Yapısı.....	22
2.3.4 Işın ve Mod Arasındaki İlişki	23

Üçüncü Bölüm

FİBER OPTİĞİN YAPISI VE TÜRLERİ

3. Fiber Optiğin Yapısı ve Türleri	26
3.1 Basamak İndisli Çok Modlu Fiber	29
3.2 Dereceli İndisli Çok Modlu Fiberler	32
3.3 Tek Modlu Fiber.....	34

Dördüncü Bölüm

OPTİK FİBERLERİN ÖZELLİKLERİ

4. Optik Fiberlerin Özellikleri	35
4.1 Zayıflama.....	35
4.1.1 Soğurum Kaybı.....	36
4.1.2 Saçılma Kaybı	37
4.1.3 Toplam Kayıp veya Zayıflama	38
4.1.3.1 Zayıflamanın Desibel Cinsinden Hesaplanması	40
4.2 Işığın Toplanması ve Yayılımı.	42
4.2.1 Çekirdek Boyutu.....	42
4.2.2 Nümerik Açıklık.....	43
4.2.3 Yelek Modları ve Sızıntılı Modlar.	45
4.2.4 Bükülme Kayıpları.	46
4.3 Dispersiyon.....	47
4.3.1 Dispersiyonun Dijital İletişim Kapasitesine Etkisi.	49
4.3.2 Dispersiyon ve Dalga Boyu.	52
4.3.3 Dispersiyon Kompanzasyonu	55
4.4 Optik Fiberlerin Doğrusal Olmayan Özellikleri.....	57
4.4.1 Uyarılmış Brillouin Saçılması.....	57

4.4.2 Uyarılmış Raman Saçılması	58
4.5 Optik Fiberlerin Mekanik Özellikleri	58

Beşinci Bölüm

FİBER OPTİK KABLOLARIN UYGULAMA ALANLARI

5. Fiber Optik Kabloların Uygulama Alanları	60
5.1 Haberleşme Türleri	60
5.1.1 Analog ve Dijital Haberleşme.....	62
5.1.1.1 Analog ve Dijital Sinyallerin Birbirine Dönüştürülmeleri	65
5.1.2 Uzun Mesafeli Haberleşmeler.....	66
5.1.2.1 Telefon Ağ Yapısı.....	67
5.1.2.2 Denizaltı Fiber Kablolar ve Uydular.....	70
5.1.2.3 Kablolu Televizyon ve Video Haberleşmesi	72
5.1.2.4 İnternet ve Veri Haberleşmesi.....	75
5.1.3 Mobil ve Askeri Haberleşme	77

Altıncı Bölüm

FİBER OPTİK ÜRETİMİ

6. Fiber Optik Üretimi	81
6.1 Fiber Malzemeleri.....	81
6.1.1 Cam Fiberler	82
6.1.2 Halojen Cam Fiberler.....	83
6.1.3 Aktif Cam Fiberler.....	84
6.1.4 Plastik Yelekli Cam Fiberler	85
6.1.5 Plastik Fiberler.....	85
6.2 Fiber Üretim Teknikleri	86
6.2.1 Dışarıdan Buhar Fazında Oksitlenme.....	87
6.2.2 Buhar Fazında Eksenel Biriktirme.....	88

6.2.3 Yenilenmiş Kimyasal Buharla Biriktirme.....	89
6.2.4 Plazma İle Harekete Geçirilen Kimyasal Buharla Biriktirme.....	91
6.2.5 Çift Pota Yöntemi.....	92
6.3 Optik Fiberlerin Kablolanması.....	93

Yedinci Bölüm

SONUÇ VE ÖNERİLER

6. Sonuç ve Öneriler.....	97
---------------------------	----

Kaynaklar	98
-----------------	----

Özgeçmiş.....	104
---------------	-----

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1: Wheeler'ın ışık iletimi fikrinin patent çizimi.....	3
Şekil 1.2: Colladon'un tam iç yansıma deneyi.....	4
Şekil 1.3: Fotofonun çalışma prensibi.	5
Şekil 1.4: Yelekli ve yeleksiz fiber.....	6
Şekil 2.1: Elektromanyetik spektrum.	10
Şekil 2.2: Işığın havadan cama geçerken kırılmaya uğraması.	12
Şekil 2.3: Işığın pencere ve lensten geçerek kırılması.	13
Şekil 2.4: Işığın kırılma ve tam iç yansımaya uğrama şartları.....	14
Şekil 2.5: Küresel ve düzlem dalga yüzeyleri.	16
Şekil 2.6: Elektromanyetik dalga serisindeki elektrik ve manyetik alan dağılımları.	17
Şekil 2.7: İki dalganın birleşiminden oluşan doğrusal polarizeli dalga.	19
Şekil 2.8: Aralarında δ kadar faz farkı olan, farklı genlikli ve doğrusal polarizeli iki dalganın birleşiminden oluşan eliptik polarizeli dalga.	20
Şekil 2.9: Aralarında $\delta = \pi/2 + 2m\pi$ kadar faz farkı olan, eşit genlikli ve doğrusal polarizeli iki dalganın birleşiminden oluşan sağ dairesel polarizeli dalga.....	21
Şekil 3.1: Optik fiberin genel yapısı.	26
Şekil 3.2: Fiber türleri, indis profilleri ve tipik fiber ölçüleri.	27
Şekil 3.3: Bir çapraz ışının fiber boyunca izlediği yol.	30
Şekil 3.4: Bir meridyenel ışının fiber boyunca izlediği yol.	30
Şekil 3.5: Dereceli indisli fiberdeki kırılma indisi değişimi.	33
Şekil 3.6: Dereceli indisli fiberdeki ışın yayılımı.....	33
Şekil 4.1: Çeşitli iletim hatları için zayıflama eğrileri.	35
Şekil 4.2: Rayleigh saçılması.....	37
Şekil 4.3: Fiberin kayıp eğrisi.....	39
Şekil 4.4: Işık kaynağının fiber ile eşleştirilmesi.	43
Şekil 4.5: Fiberin kabul açısı.	44

Şekil 4.6: Fiber çıkışındaki parlaklık eğrisi yardımıyla nümerik açıklığın belirlenmesi	45
Şekil 4.7: Düz ve bükülmüş fiberdeki ışın yayılımları.....	47
Şekil 4.8: Fiber içerisinde yol alan farklı ışık ışınları.	50
Şekil 4.9: Işık darbelerinin dispersiyondan dolayı dağılıma uğramaları.....	51
Şekil 4.10: Silisyum-oksitin malzeme dispersiyonunun ve kırılma indisinin dalga boyuna bağlı değişimleri.....	53
Şekil 4.11: Zıt işaretli malzeme ve dalga kılavuzu dispersiyonları sayesinde kromatik dispersiyonun etkisinin engellenmesi.	54
Şekil 4.12: Dispersiyon kompanzasyonu.	56
Şekil 5.1: Küresel haberleşme ağı.....	62
Şekil 5.2: Analog ve dijital sinyaller.....	63
Şekil 5.3: Analog ve dijital sinyallerin bozulmaya karşı duyarlılığı.	64
Şekil 5.4: Analog sinyalin dijitalle dönüştürülmesi.	65
Şekil 5.5: Sabit telefon ağının kısımları.....	68
Şekil 5.6: Faks ve veri sinyallerinin telefon ağında taşınması.	69
Şekil 5.7: Dünyadaki planlanan veya çalışan denizaltı fiber optik hatları.	71
Şekil 5.8: Geleneksel kablolu televizyon sistemi.	73
Şekil 5.9: Değişik veri iletişim sistemleri.	76
Şekil 5.10: FOG-M füze sisteminin çalışması.....	78
Şekil 5.11: FOG-M sisteminin temel donanımı.....	79
Şekil 6.1: Fiber yapımında kullanılan veya üzerinde çalışmalar yürütülmekte olan malzemeler.....	81
Şekil 6.2: Çeşitli katkılar için, kırılma indisinin katkı oranına bağlı değişimi.....	82
Şekil 6.3: Fiber çekme işlemi için gerekli olan donanım.....	87
Şekil 6.4: OVPO yöntemiyle preform hazırlanmasındaki adımlar.	87
Şekil 6.5: VAD yöntemiyle preform hazırlanması.....	89
Şekil 6.6:MCVD yöntemi ile preform hazırlanması.	90
Şekil 6.7: PCVD yöntemi ile preform elde edilmesi.....	92
Şekil 6.8: Çift pota yöntemi ile fiber imalatı.....	92
Şekil 6.9: İki fiberli farazi kablo tasarımı.	94
Şekil 6.10: Altı fiberli kablo yapısı.....	94
Şekil 6.11: Dört değişik uygulama için kullanılan fiber optik kablo kesit görüntüleri... 95	
Şekil 6.12: Zırhlı deniz altı fiber kablonun perspektif görünüşü.	96

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1: Tipik fiber boyutları ve bunlara karşılık gelen nümerik açıklık değerleri... 32	
Çizelge 4.1: Desibel cinsinden belli zayıflama değerlerine karşılık gelen güç oranları.. 41	
Çizelge 6.1: ZBLAN camında yer alan elemanlar ve bunların moleküler yüzdeleri. 84	



SİMGELER DİZİNİ

$\vec{a}_i$	i ile nitelendirilen eksene paralel olan birim vektör
A_0	Dalganın maksimum genliği
c	Işık hızı (m/s)
D_{kromatik}	Kromatik dispersiyon (ps/nm-km)
D_{mod}	Modlar arası dispersiyon (ns/km)
D_{toplam}	Toplam dispersiyon (ps/nm-km)
E	Foton enerjisi (J)
$\vec{E}$	Elektrik alan vektörü (V/m)
f	Frekans (Hz)
$\vec{H}$	Manyetik alan vektörü (A/m)
h	Planck sabiti (J.s)
k	Dalga yayılım sabiti (rad/m)
$\vec{k}$	Yayılım veya dalga vektörü
n	Maddenin kırılma indisi
n_1	Fiber çekirdeğinin kırılma indisi
n_2	Fiber yeleğinin kırılma indisi
NA	Nümerik açıklık
P_{in}	Giriş gücü (W)
P_{out}	Çıkış gücü (W)
t	Zaman (s)
$\vec{x}$	Genel konum vektörü
α	Birim uzunluktaki toplam kayıp
α_A	Birim uzunluk başına soğurum kaybı
α_{dB}	Zayıflama (dB)
α_S	Birim uzunluk başına saçılım kaybı
δ	İki dalga arasındaki faz farkı (rad)
Δ	Çekirdek-yelek kırılma indislerinin % değişimi

ΔP	Giriş bağlaşım kayıp gücü (W)
$\Delta t_{\text{kromatik}}$	Kromatik dispersiyondan kaynaklanan darbe dağılımı (ps)
Δt_{mod}	Modlar arası dispersiyondan kaynaklanan darbe dağılımı (ns)
$\Delta \lambda$	Kaynağın spektral genişliği (nm)
ϕ_{min}	Tam iç yansımanın oluşabilmesi için gerekli olan minimum açı
λ	Dalga boyu (m)
θ_c	Kritik açı
θ_{max}	Maksimum giriş açısı
ν	Işığın madde içerisindeki faz hızı (m/s)
ω	Açısal frekans (rad/s)
ℓ	Fiber boyu (m)



BİRİNCİ BÖLÜM

GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

Bir haberleşme sistemi üç temel bölüme ayrılabilir: Verici, taşıyıcı ortam ve alıcı. Haberleşme sistemlerinde bilginin bir noktadan diğer noktaya taşınması, onun bir elektromanyetik dalga üzerine bindirilmesi ve modülasyonu ile sağlanır. Modüle edilmiş taşıyıcı, alıcı noktada demodüle edilerek orijinal bilgi işareti elde edilir.

Haberleşme sistemlerinde bilgi iletimi için taşıyıcı ortam olarak, 100 yıldan fazla bir süredir, metalik kablolar kullanılmaktadır. Metalik kablolar, metal olduklarından dolayı dış ortamdaki elektromanyetik dalgalardan etkilenirler. Ayrıca metalik kablolar çok ağırdır ve dünya üzerindeki kaynakları hızla tükenmektedir.

Fiber optik kabloların üretim malzemesi yalıtkan bir madde olan cam olduğu için, bu kablolar elektromanyetik alanlardan etkilenmezler. Fiber optik kablolarda taşınan sinyallerin frekans band genişliği yüksek olduğundan, bilgi taşıma kapasitesi yüksektir. Örneğin Bell Laboratuvarlarında yapılan çalışmalar sonucu, günümüzde tek bir fiber kablo üzerinden saniyede 1 terabitlik bilgi iletimi yapılabilmektedir ve aynı araştırmalara göre teorik olarak saniyede 100 terabitlik bilgi göndermek de mümkündür. Ayrıca bu tür kablolar hafiftir ve hammaddeleri kum olduğu için hammadde sıkıntısı yoktur. Metalik olmadıkları için, topraklama problemleri de yoktur. Fiber optik kablo kullanılan haberleşme sistemlerinin diğer bir önemli üstünlüğü ise alıcı ve verici arasında hiçbir elektriksel bağlantı olmamasıdır. Bu üstünlüklerinden dolayı son zamanlarda taşıyıcı ortam olarak fiber optik kabloların kullanımı oldukça artmıştır. Yukarıda bahsedilen avantajlarından dolayı, fiber optik kablolar, haberleşme sistemleri için çok cazip bir taşıyıcı ortam oluşturmaktadırlar. Bu yüzden çalışma konusu olarak fiber optik kabloların üretim teknikleri seçilmiştir.

Yurdumuzda fiber optik kablo üretim sanayii gelişme içerisinde. Hesfibel, NKF, Kavel, Hontel, Telerko gibi fabrikalarda fiber optik kablo üretimi yapılmaktadır. Bundan sonra fiber optik kablo üretimi için, Denizli gibi bir sanayii beldeinde de, yeni fabrikaların kurulması beklenmektedir. Bu çalışmanın, bu konuda yatırım yapacak özellikle Denizli sanayicilerinin başvuracağı, bir kaynak mahiyetinde olması beklenmektedir.

1.2 Fiber Optiğin Tarihsel Gelişimi

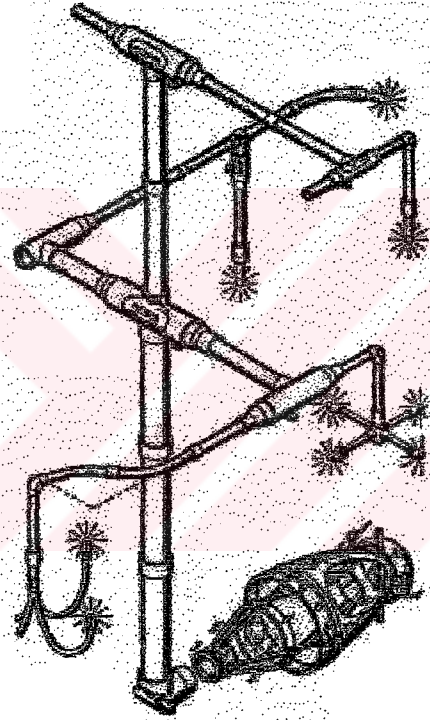
Işık düz hatlar boyunca hareket eder (Uiga, 1995). Her ne kadar lensler ışığı kırsa ve aynalar yansıtısa da, ışık bu ve benzeri optik elemanlar arasında düz hatlar boyunca hareket eder. Bu çoğu uygulama için uygun bir durumdur. Eğer ışık düzgün hatlar boyunca hareket etmeseydi, kameralar, dürbünler, mikroskoplar ve teleskoplar görüntüleri düzgün olarak işleyemezlerdi.

Bunun yanında, bazen insanlar gözleri ile arasındaki mesafenin doğrusal olmadığı yerleri de araştırmak isterler. Ayrıca, iletişim, aydınlatma, görüntüleme veya diğer amaçlarla, ışığın bir yerden başka bir yere götürülmesi gerekebilir. İşte bu gibi durumlarda insanlar optik fiberlere ihtiyaç duyarlar.

1.2.1 Işığın İletilmesi

Bu problem, çözümü bulunmadan çok önceleri ortaya çıkmıştır. 1880’de, William Wheeler adında bir mühendis, ışığın bina içindeki iletimini anlatan bir şemanın patentini almıştır. Thomas Edison’un akkor ampulünün pratikte kullanılamayacağına inanan Wheeler, parlak bir elektrik kıvılcımının uzaktaki odaları aydınlatmasını planlamıştı. Işığı bina boyunca taşımak ve odalara yaymak için, ışığı yansıtan ve yayılmasını sağlayan bir takım borular tasarlamıştı. Bu kavram, şekil 1.1’deki Wheeler’ın patent çiziminde görülmektedir.

Wheeler bu patenti aldığı anda henüz 20'li yaşlardaydı ve bu sayede bir Japon mühendislik okulunda eğitim almaya hak kazandı. Sokak lambaları yapan başarılı bir şirkete girdi ve iyi tanınan bir hidrolik mühendisi oldu. Yine de ışık iletimi onun başarılarından biri değildi. Akkor lambalar pratikte denenmiştir ve günümüzde hala kullanılmaktadır. Zaten muhtemelen Wheeler'ın ışık boruları yeteri kadar ışığı yansıtamayacaklardı. Bununla birlikte, onun ışık iletimi fikri, fiber optikle son buluncaya kadar tekrar tekrar ortaya atıldı.



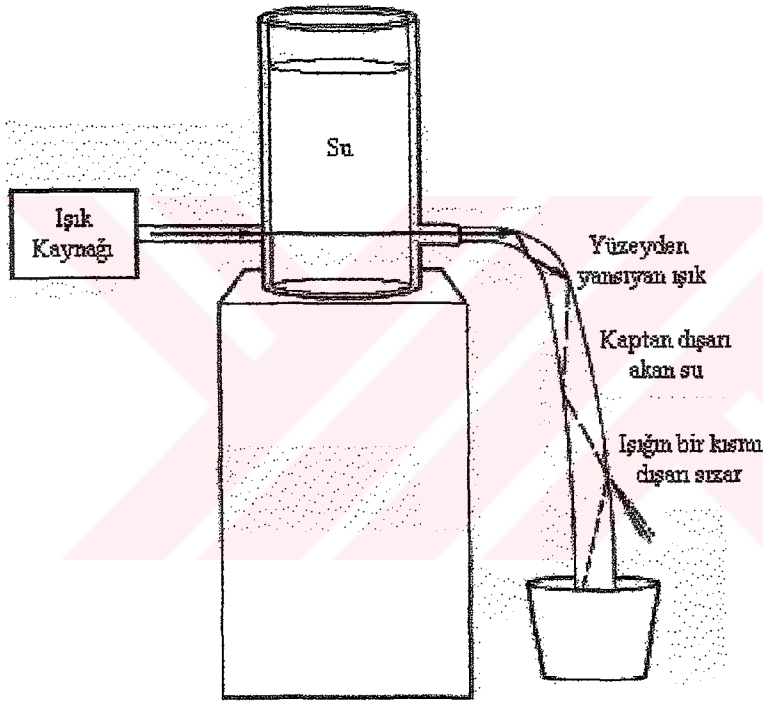
Şekil 1.1: Wheeler'ın ışık iletimi fikrinin patent çizimi (Hecht, 1999).

1.2.2 Tam İç Yansıma

Aslında fiber optiğin altında yatan temel kavram, Wheeler'ın zamanından önce de çok iyi biliniyordu. Tam iç yansıma diye adlandırılan bir olgu, ışığı cam veya havadan daha yoğun olan başka bir saydam malzeme içine hapsedebilir. Eğer cam içindeki ışık, cam sınırına belli bir açıyla çarparsa, malzeme dışına çıkamaz ve tekrar malzeme içine geri yansır. Üfleyerek cam imal edenler, büyük bir ihtimalle, bu etkiyi çok önceleri eğri

cam çubuklarda gözlemlemişlerdir, fakat bu olay, İsveç’li fizikçi Daniel Colladon’un onu 1841’de popüler bilim konferanslarında kullanmasına kadar pek dikkat çekmedi.

Colladon’un şekil 1.2’de gösterilen deneyi şu şekilde gerçekleştirilmiştir: Colladon, ışığı, bir su tankına giren yatay bir boru içinden geçirmiştir. Su, tanktan parabolik bir şekilde dışarıya akmaktadır. Işığın dışarı taşması, tam iç yansıma sayesinde su tarafından engellenmiştir. Işık, önce akan suyun üst yüzeyinden, sonra da alt yüzeyinden yansımıştır. Bu, sudaki türbülans ışık demetini dağıtana kadar devam etmiştir.



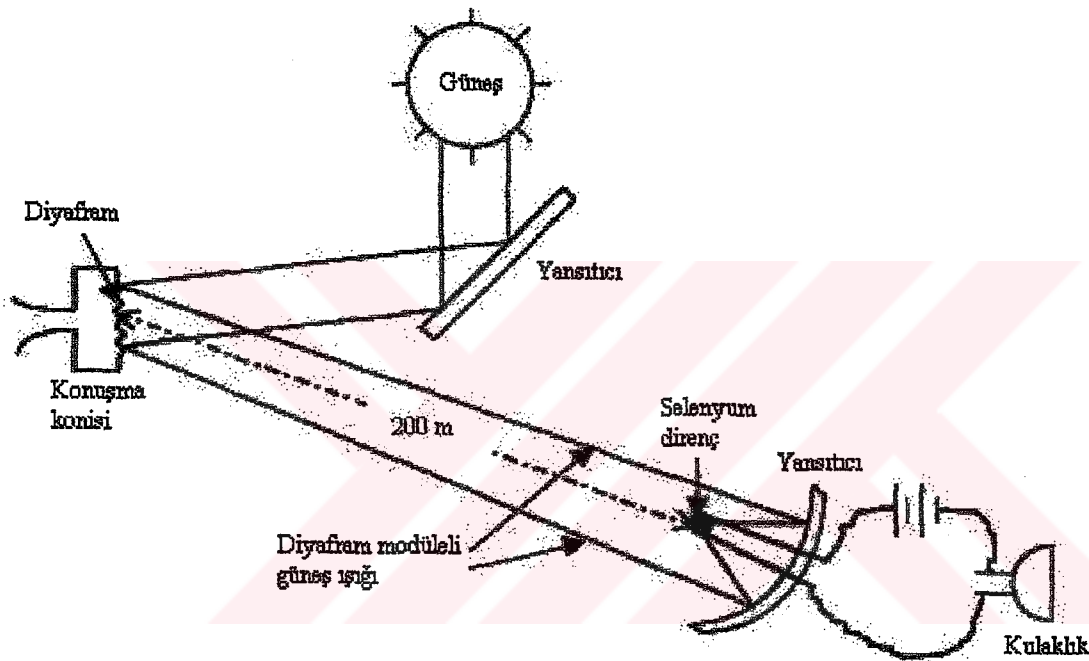
Şekil 1.2: Colladon’un tam iç yansıma deneyi.

1.2.3 Optik İletişim

Serbest uzay ortamında yapılan ilk optik iletişim düzeni, uluslar arası üne sahip genç bir bilim adamı olan ve daha önceleri sesi telefonda taşımak için elektriği kullanan Alexander Graham Bell’in 1880’de yaptığı fotofondur (Temiz ve diğ., 2000). Şekil 1.3’te gösterilen Bell’in fotofonu, bir alıcıya gelen güneş ışığı veya yapay ışık miktarındaki değişimleri göz önüne alarak sesleri yeniden ürettiyordu. Bu düzenek sayesinde sesler ancak 200 m mesafeye ulaştırılabiliyordu. Daha fazla mesafelere

götürülememesinin en büyük sebebi havadaki homojensizliklerdir. Örneğin sis 40-60 dB'lik bilgi kaybına neden olabilir.

Daha sonraları, başkaları da sesi açık havada taşımak için ışığı kullanmıştır. Bu işlem bugün de birkaç lazer sistemiyle yapılabilmektedir, fakat pek sık kullanılmaz. 1930'larda, American Telephone & Telgraph şirketinde mühendis olan Norman R. French, borular içinden gönderilen ışıkla iletişim fikrinin patentini almıştır.

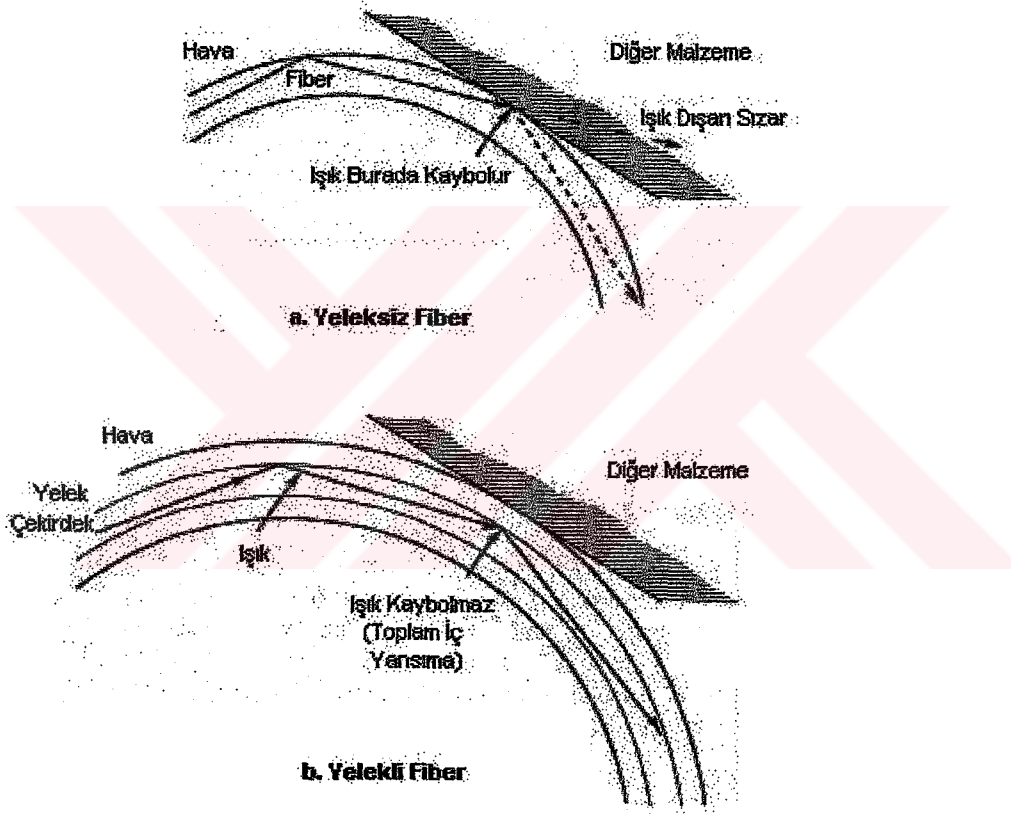


Şekil 1.3: Fotofonun çalışma prensibi (Özsoy, 1998).

1.2.4 Fiber Yeleği

Her ne kadar Colladon ışığı akan suyun içerisinde kılavuzladıysa da, bunu çok da iyi yapamamıştır. Suyun süreksiz olan sınırları, ışığın dağılmasına sebep oluyordu. Ayrıca, diğer etkiler de ışığın eğri cam çubuklarda ilerlemesini engelliyordu. Temel problem, çubuğun havadan başka bir şeyle teması durumunda ışığın dışarı sızmasıydı. Doğal olarak, çubuk havada hiçbir şeye dokunmadan asılı duramaz. Mühendisler, her ucu aynı şekilde biçimlendirilmiş olan fiber yığınlarının görüntüleri bir uçtan diğer uca taşıyabileceklerini fark ettikleri zaman, ışık sızması ciddi bir problem haline gelmiştir. Heinrich Lam adındaki Alman tıp öğrencisi, 1930'da ilk görüntü transferini

gerçekleştirmiştir. Fakat görüntüler donuk ve belirsizdi. Bir çok fiber, yığın halinde birleştirildiklerinde yüzeyleri birbirlerine temas ettikleri için ışık birinden diğerine sızabiliyordu. Ayrıca fiberler birbirlerini aşındırabiliyor ve ışık bu bölgelerden de sızabiliyordu. Işık ayrıca cam üzerinde parmak izi olduğunda da dışarı sızabilir. Aynı problem, 1950'lerin başında birbirlerinden bağımsız olarak fiber yığınlarını kullanarak görüntülemeyi yeniden keşfeden üç bilim adamını da rahatsız etmiştir. Bunlar, Danimarka'lı mühendis ve mucit Holger Moller Hansen ve iki ünlü optik profesörü Hollandalı Abraham van Heel ve İngiltere'li Harold H. Hopkins'tir.



Şekil 1.4: Yelekli ve yeleksiz fiber

Bu problemin çözümü için herkes cam hava arası sınırdaki tam iç yansımaya bakmaya başladı. Oysa tam iç yansıma, ışığın yüksek kırılma indisli maddeden düşük kırılma indisli maddeye geçmeye çalıştığı herhangi bir yüzeyde oluşabilirdi. Hava bu iş için elverişlidir ve 1,00028 olan kırılma indisi 1,5 olan camından oldukça düşüktür, fakat şekil 1.4'te de görüldüğü gibi, tam iç yansıma, camı kaplayan maddenin kırılma indisi camın kırılma indisinden daha küçük olduğu sürece gerçekleşir. Moller, fiber

camının üzerini margarinle kaplayarak tam i  yansımının oluşmasını sağlamıştır, fakat sonuçlar pratikte gerçekleştirilemeyecek kadar kirliydi.

Bir Amerikan optik fizikçisi olan Brian O'Brien, 1951'de, van Heel'den bağımsız olarak yeleklemeyi (cladding)  nerdi. Van Heel ise, margarinden daha pratik olan balmumu ve plastiği kullanmıştı. Aralık 1956'da, Michigan  niversitesi'ndeki lisans  ğrencisi Larry Curtiss, düşük indisli bir cam tüpü yüksek indisli bir cam çubuk üzerinde eriterek ilk iyi cam yelekli fiberleri yapmayı başarmıştır. Daha sonraları, birkaç plastik yelekli fiber kullanılmasına ve plastik kaplamanın fiberi mekanik olarak korumak için kullanılmasına rağmen, cam yelekleme bir standart haline gelmiştir.

1.2.5 Görüntüleme Uygulamaları

Curtiss'in fiberleri, insan vücudunun içini incelemeye yarayan fiber optik endoskoplarda kullanılmıştır. Çoğu modern endoskop, fiberleri yalnızca ışığı vücudun içine taşmak için kullanılır ve görüntüleri minyatür elektronik kameralar kullanarak geri alırlar. Sonraları, fiber optik endoskop önemli bir tıbbi alet olarak kullanılmaya devam etmiştir.

Fiber optik yığınların kullanım alanları daha sonraları ortaya çıkmıştır. Fiberler, daha ince fiberlerle daha kolay yapılan sert yığınlar içinde kullanılabilirler, fakat bunlar esnekliğin önemli olduğu yerlerde kullanılamazlar. Fiber yığınları, ulaşılması güç olan noktaları aydınlatmak için de kullanılabilir. 1960'larda bütün endüstri, fiber optik görüntüleme ve ışık iletimi etrafında gelişmiştir. Bu teknoloji halen kullanılmaktadır, fakat fiber optik haberleşmenin gölgesinde kalmış durumdadır.

1.2.6 Fiber Kaybının Azaltılması

Tıbbi görüntülemede kullanılan optik fiberler haberleşmede kullanıldığında çok fazla ışık soğururlar. G nt m z n yüksek kayıplı fiberleri bile sıradan pencere camlarından daha şeffaftırlar. Sıradan camlar çok ince olduklarından ışığın küçük bir kısmını soğururlar. Kayıp ışığın büyük bir kısmı camdan geriye yansır. Tipik olarak,

görüntülemeye kullanılan bir fiber yığınının giren ışığın yarısı 3 m sonra kaybolur. Bu fiber kayıpları, mideyi görüntülemek için kullanılan bir endoskop için kabul edilebilirdir, fakat haberleşmede kullanıldığında, 10 m sonra geriye ışığın %10'u, 20 m sonra ise %1'i kalır.

Başlangıçta hiç kimse ışığın birkaç metreden daha ilerisine taşınacağını düşünmediği için, fiber kayıplarını azaltmak için de uğraşmadı. Theodore Maiman'ın 1960'ta ilk lazeri tanıtmasıyla, dikkatler tekrar optik iletişimin üzerine toplanmıştır (Temiz ve Ükte, 1999). Bunun yanında, bilim adamları, şeffaf katıların, optik sinyalleri uzun mesafelere iletmek için kullandıklarında çok fazla ışık soğurduklarını düşündükleri için, optik fiberleri ciddi olarak dikkate alma konusunda çok yavaş davranmışlardır. Onlar daha çok, lazer ışınlarının hava veya yeni tip kılavuzlar yoluyla gönderilmesi üzerinde durmuşlardır.

1966'da, İngiltere'deki Standard Telecommunication Laboratuvarları'ndaki iki mühendis Charles K. Kao ve George Hockham, meşhur makalelerinde, optik fiberlerde kullanılan camlardaki zayıflamanın malzemenin temel özelliği olmadığını, safsızlıklar yüzünden ortaya çıktığını gösterdiler. Ayrıca iyi temizlenmiş bir camda, fibere giren ışığın, 500 m sonra %10'unun kalması gerektiğini söylemişlerdir. O zamanlar, bu öneri çoğu insana fantastik gibi gelmişti, fakat doğru olduğu daha sonra kanıtlandı.

Kao ve Hockham'ın makalelerinin yayınlanması, bütün dünyada daha iyi fiberler yapmak için bir yarış oluşmasına sebep olmuştur. 20 dB/km'lik bir zayıflamanın cam fiberler için bir sınır olduğu ve bunun ilerisinde uzun mesafeli iletme ait pratik uygulamanın mümkün olacağı kabul edildi. 1970'de Corning Glass Works şirketi 20 dB/km'den daha az kayıplı, tek modlu fiberler üretmiştir. Bu başarı kendinden sonraki birçok başarıyı tetiklemiştir.

Düşük kayıplara ulaşılmasındaki diğer bir adım da, 1972'de J. Stone tarafından sıvı özlü fiberlerin geliştirilmesidir. Sıvı özlü fiberler, bir kuvars kılcal tüpün, görünür veya yakın kızılaltı ışık bölgesinde düşük kayba sahip uygun seçilmiş sıvılarla doldurulmasıyla elde edilir. 1972'de G. J. Ogilvie ve R. J. Esdaile tarafından, yakın

kızılaltı bölgesinde 8 dB/km'nin altında kayıplara ulaşılmıştır. İlk uzun mesafeli haberleşme sistemi olan bir televizyon işaretinin birkaç km boyunca analog iletiminde bu tip fiberler kullanılmıştır. 1972'de, Corning Glass tarafından, yüksek silisyum özlü çok modlu optik fiberlerde yaklaşık 0,84 μm 'lık bir dalga boyunda 4 dB/km'lik kaybın elde edilmesiyle sıvı özlü fiberler kullanılmaz hale gelmiştir.

1976'da, Fikura Cables'daki Japon araştırmacılar, çok düşük OH muhtevalı ve 1,3 μm dalga boyunda 0,47 dB/km'lik kayıplı bir fiber imal etmeyi başardılar. 1979'da ise, T. Miyashita ve arkadaşı tarafından, tek modlu bir fiber için 1,55 μm 'de 0,2 dB/km kadar düşük bir kayıba ulaşılmıştır. Silisyum fiberler çok düşük kayıplara sahip olmalarının yanında uzun dalga boyu bölgesinde çok cazip bir başka özelliğe de sahiptirler: D. N. Payne ve W. A. Gambling tarafından 1975'te teorik olarak öngörüldüğü ve daha sonra deneysel olarak da doğrulandığı gibi, katkılı silisyumun malzeme dispersiyonu 1,3 μm dalga boyu civarında sıfıra düşer. Kromatik dispersiyon optik fiberlerin bilgi taşıma kapasitelerini sınırlayan temel bir faktör olduğundan, dispersiyondaki bu azalma, çok büyük band genişlikleri elde edilebilmesi anlamına gelir.

10^{-3} - 10^{-2} dB/km'lik kayıpların beklendiği, 2-10 μm gibi daha uzun dalga boylarında iletme uygun malzemelerin ve fiberlerin geliştirilmesi için araştırmalar sürdürülmektedir. Bu tür fiberlerin elde edilmesi halinde, bin kilometrelik tekrarlayıcı aralıkları mümkün olacaktır ki, bu da deniz altı fiber optik hatları için çok caziptir.

İKİNCİ BÖLÜM

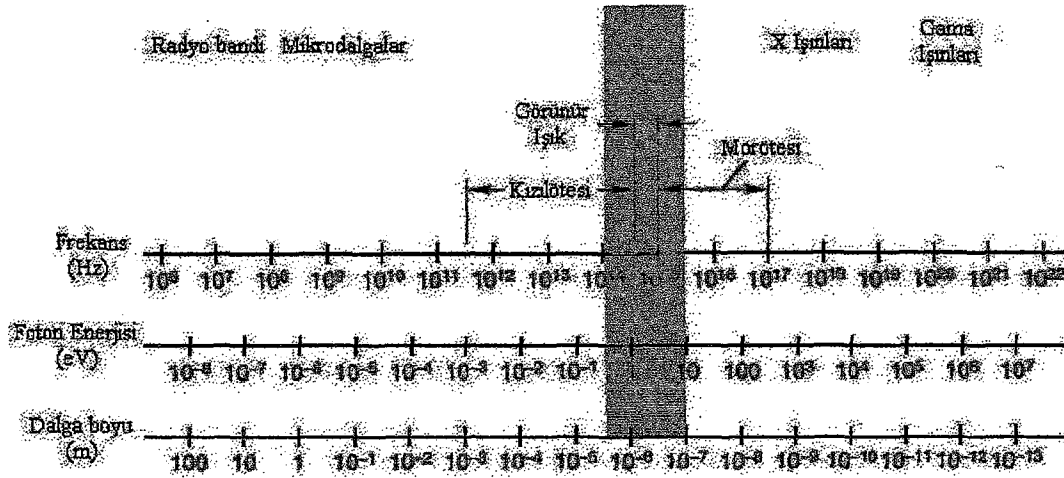
FİBER OPTİĞİN TEMELLERİ

Optik fiberlerin çalışması, optiğin temel prensiplerine ve ışığın madde ile etkileşimine dayanır (Hecht ve Zajac, 1987). Fiber optiği anlamının ilk adımı optik biliminin ilk kısımlarının incelenmesidir.

Işığı fiziksel açıdan, elektromanyetik dalga ve foton olarak iki şekilde incelemek mümkündür. Her iki bakış açısı da geçerlidir, fakat en basiti ışığı düz hatlar boyunca ilerleyen ışınlar olarak tasvir etmektir.

2.1 Elektromanyetik Spektrum

Işık, elektromanyetik radyasyon spektrumunun yalnızca küçük bir kısmını kapsar. Bütün elektromanyetik dalgaların temel özellikleri aynıdır: Foton veya dalga şeklinde tasvir edilebilirler ve boşlukta ışık hızında ilerlerler (Hayt, 1989). Spektrumun çeşitli bölgelerindeki elektromanyetik dalgalar, dalga boyu, foton enerjisi veya frekans gibi değişik büyüklüklerle belirtilebilirler. Bu üç büyüklük de şekil 2.1'deki spektrumda gösterilmiştir.



Spektrumun değişik bölgelerindeki elektromanyetik dalgaları belirtmek için değişik büyüklükler kullanılır. Optik dalgalar genelde dalga boyu ile belirtilirler. Spektrumdaki bütün ölçü birimleri, aynı şeyi ölçen değişik cetveller olarak düşünölebilir. Bu büyüklükler kolayca birbirine çevrilebilirler. Dalga boyu aşığıdaki eşitlikte gösterildiği gibi frekans ile ters orantılıdır.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

λ : Dalga boyu (m),

$c = 3 \times 10^8$: Işıık hızı (m/s),

f : Frekans (Hz).

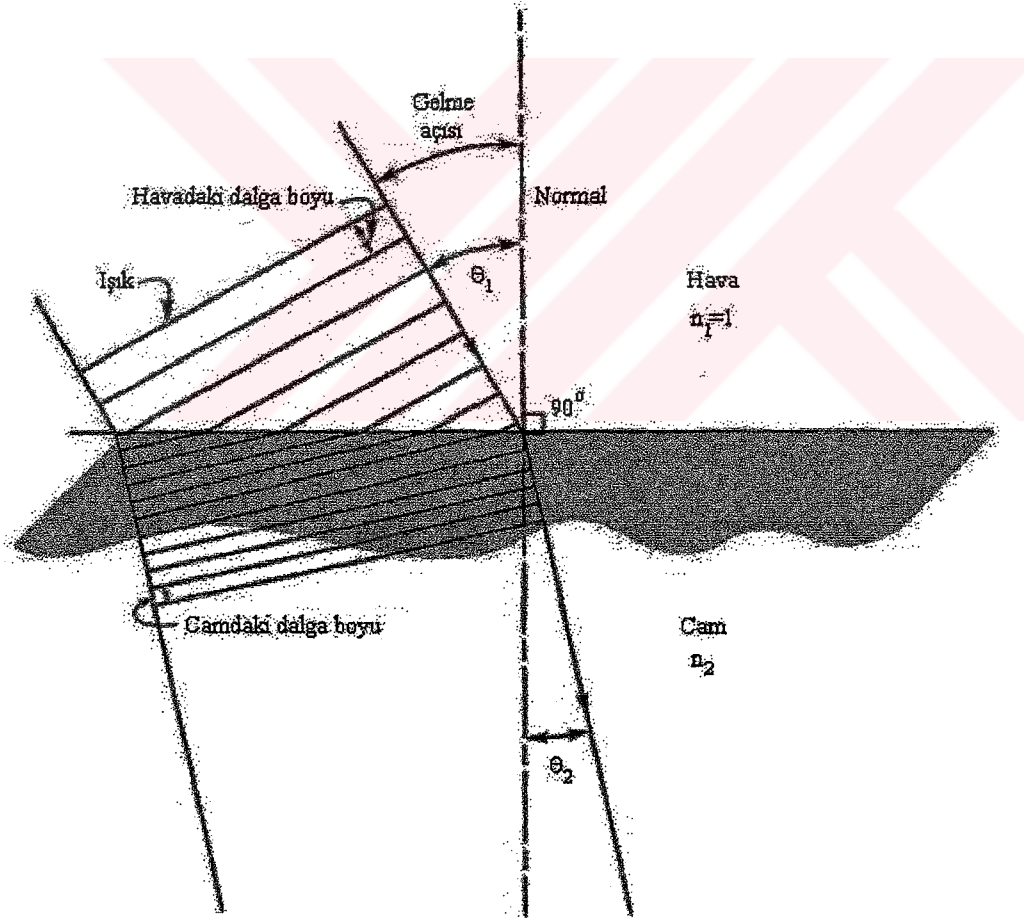
Optik fiberlerin ve diğer optik elemanların çalıştığı optik bölge, elektromanyetik spektrumun 400-700 nm arasındaki görünür bölgesini ve ayrıca kızılötesi ve morötesi bölgelerinin yakın kısımlarını kapsar. Başka bir deyişle, optik ışıınlar 0,2-20 μ m arasındaki dalga boylarına sahiptirler. Örneğin, silisyum cam optik fiberlerdeki iletişim için kullanılan dalga boyu aralığı, silisyumun en şeffaf olduğu yakın kızılötesi bölgesine denk gelen 700-1600 nm'dir. Cam ve silisyum fiberler, görünür ışıık kısa mesafeler boyunca taşıyabilirler. Ayrıca, eritilmiş kuvars gibi bazı özel silisyum çeşitleri yakın morötesi bölgesindeki ışııkları kısa mesafelere iletebilirler. Plastik fiberler, görünür dalga boyu bölgesindeki ışııkları, yakın kızılötesine göre daha iyi iletirler. Yani, plastik fiberlerle yapılan haberleşmede görünür ışıık kullanılır. Yine de plastik fiberler silisyum cam kadar saf değildir. Ayrıca başka malzemelerden yapılan fiberler de, silisyum cam fiberlerdekenden daha uzun dalga boylarındaki ışııkları iletebilirler.

2.2 Kırılma İndisi ve Tam İç Yansıma

Kırılma indisi (n), şeffaf malzemeler için kritik bir optik karakteristiktir (Ghatak ve Thyagarajan, 1989). Bir malzemenin kırılma indisi, ışıık boşluktaki hızının o malzeme içerisindeki hızına oranı olarak tanımlanır. Işıık herhangi bir malzeme içerisinde, her

zaman boşluktaki hızına göre daha yavaş ilerler. Yani, spektrumun optik bölgesinde kırılma indisi her zaman 1'den büyüktür. Kırılma indisi, pratikte ışığın malzemedeki hızının, boşluktaki hızıyla değil de, havadaki hızıyla karşılaştırılması sonucu ölçülür. Havanın, atmosferik basınç ve oda sıcaklığındaki kırılma indisi 1,00028'dir ve bu 1'e oldukça yakın bir değerdir.

Işığın optik malzemeler arasında düz hatlar boyunca hareket etmesine rağmen, malzeme sınırlarında daha değişik şeyler olur. Işık, kırılma indisinin değiştiği bir yüzeyden geçtiği zaman kırılmaya uğrar (Goca, 1996). Şekil 2.2'de ışığın havadan cama geçtiği durum gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Işığın havadan cama geçerken kırılmaya uğraması.

Kırılmanın miktarı, iki ortamın kırılma indislerine ve ışığın bu iki ortam arasındaki yüzeyle yaptığı açıya bağlıdır. Gelme ve kırılma açıları, ışınların yüzeyin normali ile

yaptıkları açılardır. Bu açılar ve kırılma indisleri, aşağıda gösterilen Snell kanunu ile birbirlerine bağlıdır.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.2)$$

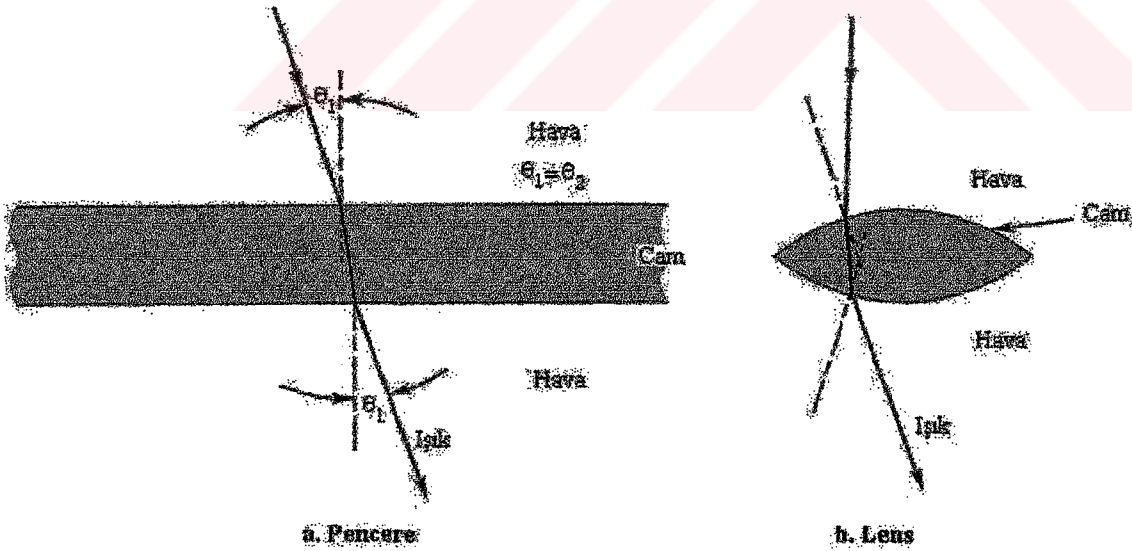
n_1 : Işığın geldiği ortamın kırılma indisi,

n_2 : Işığın kırıldığı ortamın kırılma indisi,

θ_1 : Işığın gelme açısı,

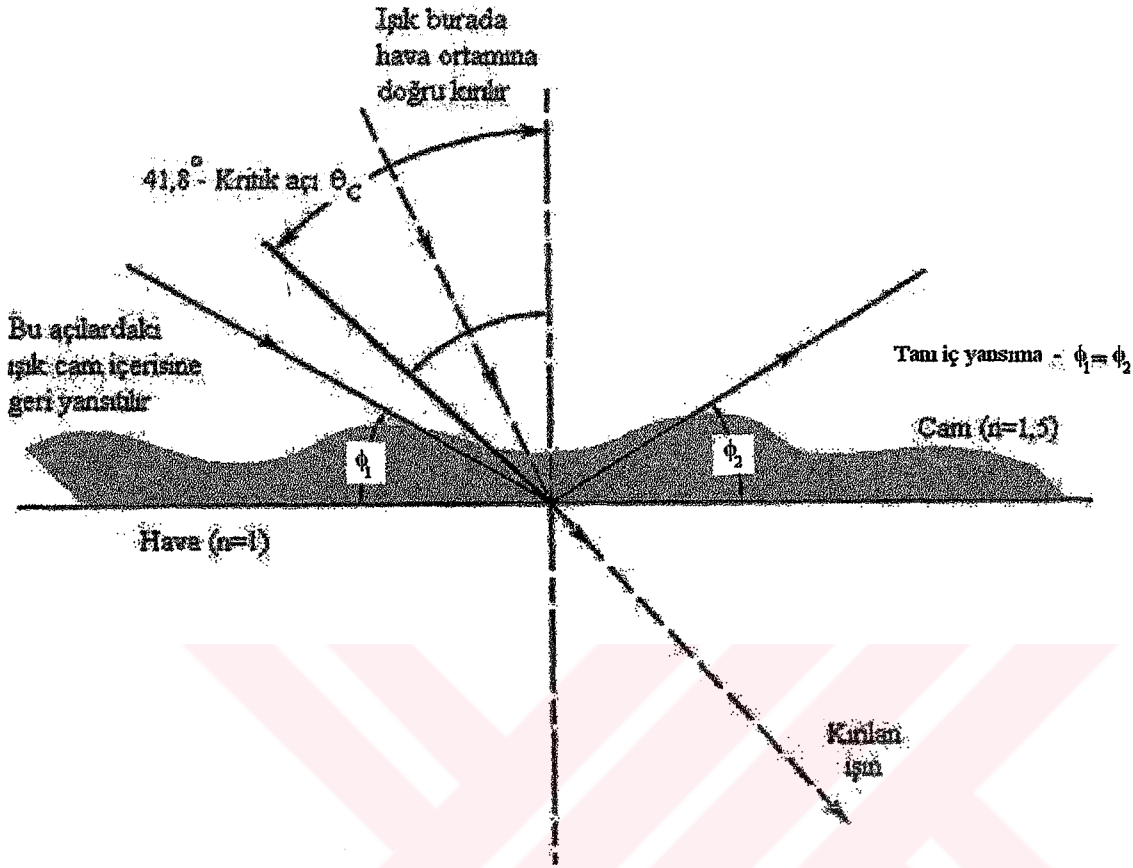
θ_2 : Işığın kırılma açısı.

Şekil 2.2’de, ışığın havadan cama geçtiği durum gösterilmiştir. Burada dalgaının frekansı değişmez, fakat dalga camda yavaşlayacağından dolayı dalga boyu kısalır. Eğer ışığın girdiği malzemenin her iki yüzeyi de düzse, ışığın malzemeye giriş ve çıkış açıları eşittir. Bu durumda net kırılma sıfırdır. Bu, camdan dışarıya bakmaya benzer. Eğer malzemenin bir veya daha fazla yüzeyi eğri ise, net kırılma sıfır olmaz. Bu da bir lensten dışarıya bakmaya benzer. Her iki durum şekil 2.3’te gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Işığın pencere ve lensten geçerek kırılması.

Işık, yüksek kırılma indisli bir malzemedan düşük kırılma indisli bir malzemeye geçtiği zaman, normalden uzaklaşacak şekilde kırılır. Bu durum şekil 2.4’te gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Işığın kırılma ve tam iç yansıma uğrama şartları.

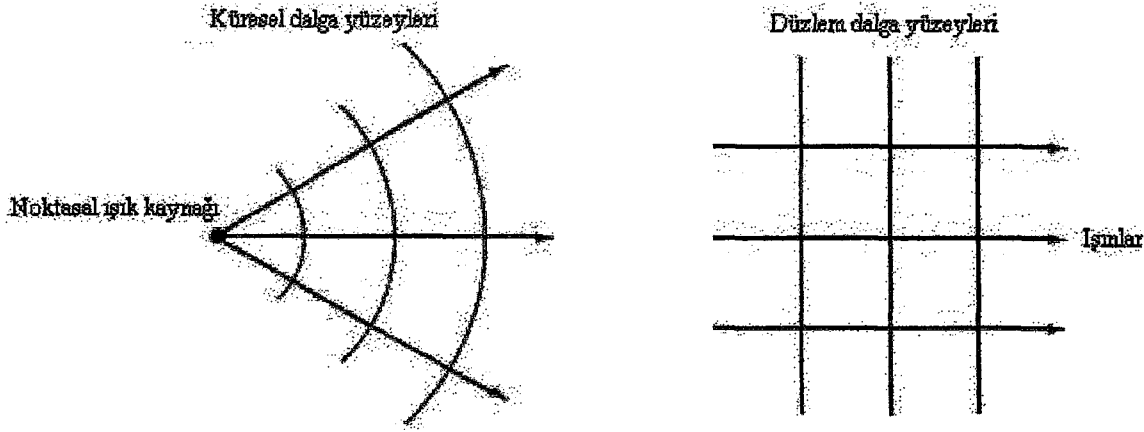
Gelme açısı büyüdükçe, kırılan ışık normalden gittikçe uzaklaşır. Kırılma açısının 90° olduğu, yani ışığın ara yüzeye paralel olarak gittiği durumdaki gelme açısına kritik açı (θ_c) denir. Kritik açıdan daha büyük gelme açıları için kırılma olmaz ve ışık gelme açısına eşit bir açıyla malzeme içerisine geri yansır. İşte bu olaya tam iç yansıma denir. Fiber optik kablo içerisindeki ışık da tam iç yansıma sayesinde kılavuzlanır. Çekirdek bölgesinin kırılma indisi, yelek bölgesinin kırılma indisinden daha büyük olduğu için, çekirdek içerisinden çekirdek-yelek ara yüzeyine kritik açıdan daha büyük bir açıyla gelen ışık, yelek bölgesine geçemeyip tekrar çekirdek bölgesine geri yansır ve bu şekilde çekirdek içerisinde kılavuzlanmış olur.

2.3 Işığın Yapısı

Işığın yapısını açıklayan kavramlar, fiziğin tarihi boyunca pek çok değişikliğe maruz kalmışlardır. Onyedinci yüzyılın başlarına kadar ışığın, ışık kaynaklarından yayılan çok küçük parçacık akımından oluştuğuna inanılıyordu. Bu parçacıklar, düz hatlar boyunca hareket edecek şekilde tanımlanıyordu ve bunların şeffaf maddelerin içerisine girdikleri, şeffaf olmayanlar tarafından ise yansıtıldıkları varsayılıyordu. Bu teori, yansıma ve kırılma gibi birçok optik olayın tanımlanması için yeterli olmasına rağmen, etkileşim ve kırınım gibi olguların açıklanmasında yetersiz kalmaktadır.

Kırınım, ışığın dar bir yarıktan ya da çizikli bir yüzeyden geçince, doğru yolundan ayrılarak girişim saçakları oluşturmasıdır (Genceli, 1989). Kırınımın doğru açıklaması, 1815'te Fresnel tarafından yapılmıştır. Fresnel, yaklaşık olarak doğrusal yayılım karakteristiğine sahip olan ışığın bir dalga hareketi olarak yorumlanabileceğini ve bu yüzden de kırınım saçaklarının daha detaylı izah edilebileceğini göstermiştir. Daha sonraları, 1873'te Maxwell tarafından ışığın elektromanyetik dalga olduğu fikri ortaya konmuştur (Temiz ve Acer, 1998). Sonraki yıllarda, polarizasyon etkilerinin gözlemlenmesiyle birlikte, ışığın bir enine dalga (transverse wave) olduğu gösterilmiştir. Enine dalga, dalga hareketinin dalgaın yayılım yönüne dik olduğu dalgadır. Başka bir deyişle enine dalgada, elektrik ve manyetik alanın yayılım yönünde bileşenleri bulunmaz. Fiziksel optik veya dalga bakış açısına göre, noktasal bir optik kaynaktan yayılan elektromanyetik dalgalar, kaynağın etrafındaki küresel dalga yüzeyi serisi olarak gösterilebilirler. Dalga yüzeyi, dalgadaki aynı faza sahip olan bütün noktaların konumu olarak tanımlanabilir. Dalga yüzeyine faz yüzeyi de denmektedir. Genelde dalga yüzeyleri, dalgaın maksimum veya minimum noktalarından geçecek şekilde çizilir. Böylece dalga yüzeyleri bir dalga boyu aralıklarla yerleştirilmiş olur.

Işığın dalga boyu, rastladığı cisim veya aralıktan çok küçük olduğu zaman, dalga yüzeyleri, bu cisim veya aralığa düz çizgiler şeklindeymiş gibi görünürler. Bu durumda ışık dalgası düzlem dalga olarak ifade edilir ve yayılım yönü de, dalga yüzeyine dik olarak çizilen ışık ışını (light ray) ile gösterilir. Küresel ve düzlem dalga yüzeyleri şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Küresel ve düzlem dalga yüzeyleri.

Işık ışınları sayesinde, yansıma ve kırılma gibi birçok optik etki, basit geometrik ışın izleme yöntemiyle analiz edilebilir. Optiğin bu bakış açısı, ışın veya geometrik optik olarak adlandırılır. Işık ışını kavramı çok kullanışlıdır, çünkü ışınlar ışık huzmesindeki enerji akışının yönünü gösterirler.

2.3.1 Doğrusal Polarizasyon

$\vec{k}$ yönünde ilerleyen bir düzlem veya doğrusal polarizeli dalga serisinin genel ifadesi şu şekildedir (Keiser, 1991):

$$\vec{A}(\vec{x}, t) = \vec{a}_i A_0 e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x})} \quad (2.3)$$

$\vec{x} = x\vec{a}_x + y\vec{a}_y + z\vec{a}_z$: Genel konum vektörü,

$\vec{k} = k_x\vec{a}_x + k_y\vec{a}_y + k_z\vec{a}_z$: Yayılım veya dalga vektörü,

A_0 : Dalga'nın maksimum genliği,

t : zaman (s),

ω : Açısal frekans (rad/s),

$\vec{a}_i$: i ile nitelendirilen eksene paralel olan birim vektör.

Dalga vektörünün genliği, $k = 2\pi / \lambda$ rad/m'dir ve ışığın dalga yayılım sabiti olarak bilinir. λ , dalga boyunu gösterir.

Eşitlik (2.3)'teki elektromanyetik alanın ölçülebilen bileşenleri, eşitliğin reel kısmını almakla elde edilir. Örneğin eğer $\vec{k} = k\vec{a}_z$ ise, $\vec{A}$ elektrik alanı $\vec{E}$ 'yi belirtirse ve koordinat eksenini $\vec{a}_z = \vec{a}_x$ olacak şekilde seçilirse, o zaman x yönünde harmonik olarak değişen ölçülebilen reel elektrik alanı şu şekilde verilir:

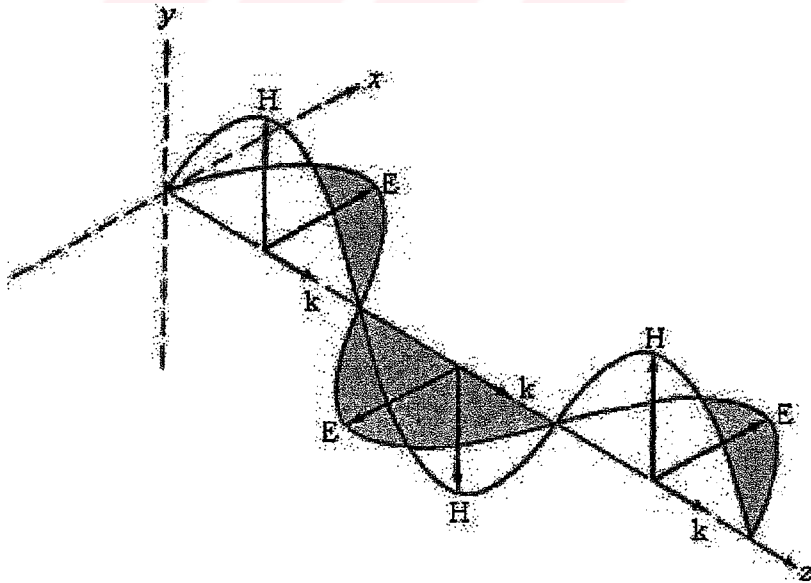
$$\vec{E}_x(z, t) = \text{Re}(\vec{E}) = \vec{a}_x E_{0x} \cos(\omega t - kz) \quad (2.4)$$

$\vec{a}_x$: x eksenine paralel olan birim vektör,

E_{0x} : Elektrik alanın maksimum genliği (V/m),

z : Elektrik alanı vektörünün ilerleme yönü (m).

Yukarıdaki eşitlik, z yönünde ilerleyen bir düzlem dalgayı ifade eder. Bir düzlem elektromanyetik dalga serisindeki, zamanın belli bir anındaki elektrik ve manyetik alan dağılımları şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Elektromanyetik dalga serisindeki elektrik ve manyetik alan dağılımları.

Şekil 2.6'da da görüldüğü gibi, dalga $\vec{k}$ vektörünün belirttiği yönde ilerler. Ayrıca, $\vec{E}$ ve $\vec{H}$ vektörlerinin her ikisi de $\vec{k}$ vektörüne diktir (Edminister, 2000). Yani $\vec{E}$, $\vec{H}$ ve $\vec{k}$ bir ortogonal vektör seti oluştururlar. Daha önce de belirtildiği gibi, bu tip dalgalara enine dalga denmektedir.

Eşitlik (2.4)'te verilen düzlem dalga, her zaman $\vec{a}_x$ yönünü gösteren bir elektrik alan vektörüne sahiptir. Bu dalga, $\vec{a}_x$ polarizasyon vektörü ile doğrusal polarize edilmiştir. Polarizasyonun genel durumu, ilk dalgadan bağımsız ve ona dik olan başka bir doğrusal polarizeli dalgayı ele almakla tanımlanabilir. Bu dalga aşağıdaki şekilde verilmiş olsun:

$$\vec{E}_y(z, t) = \vec{a}_y E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta) \quad (2.5)$$

$\vec{a}_y$: y eksenine paralel olan birim vektör,

E_{0y} : Elektrik alanın maksimum genliği (V/m),

δ : İki dalga arasındaki faz farkı (rad).

Bu iki dalganın sonucu olan dalga şu şekilde ifade edilir:

$$\vec{E}(z, t) = \vec{E}_x(z, t) + \vec{E}_y(z, t) \quad (2.6)$$

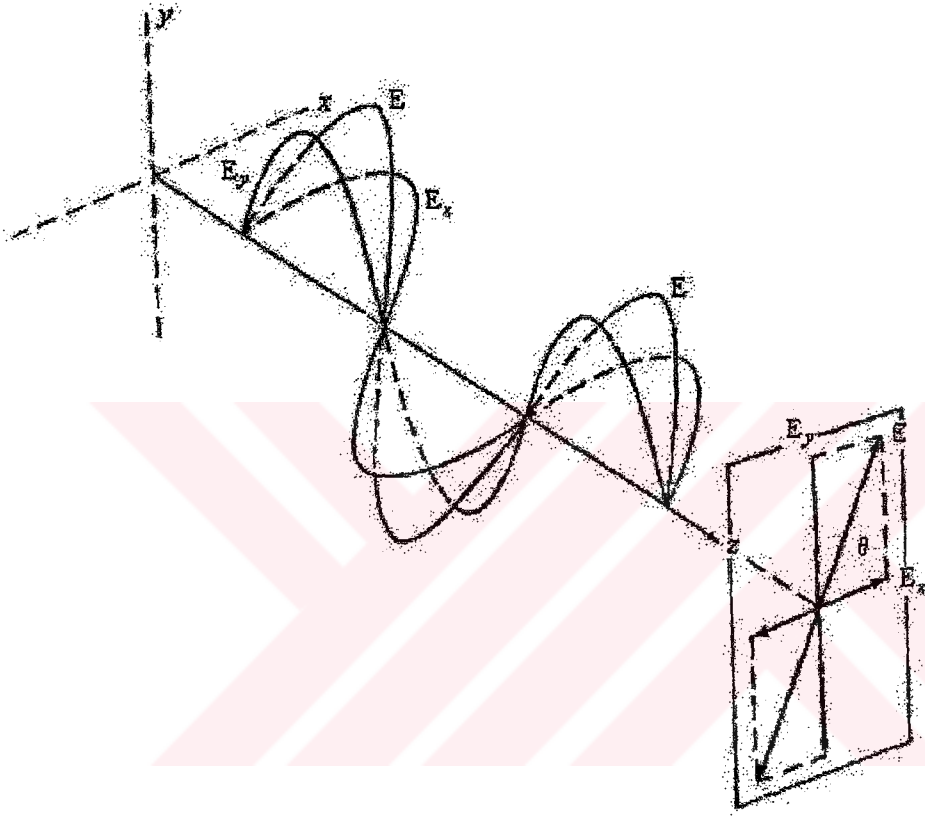
Eğer δ sıfır veya 2π 'nin tam katı ise dalgalar aynı fazdadır. O zaman eşitlik (2.6)'daki dalga da polarizasyon vektörü $\vec{a}_x$ ile doğrusal polarizeli bir dalgadır ve $\vec{a}_x$ vektörü ile arasında, ifadesi aşağıda verilen θ kadar bir açı farkı vardır.

$$\theta = \arctan \frac{E_{0y}}{E_{0x}} \quad (2.7)$$

Bu dalganın genliği ise şu şekildedir:

$$E = \sqrt{E_{0x}^2 + E_{0y}^2} \quad (2.8)$$

İki dalga'nın birleşiminden oluşan doğrusal polarizeli dalga şekil 2.7'de gösterilmiştir. İki dik düzlem dalga birleşip bir doğrusal polarizeli dalga oluşturabildikleri gibi, bir keyfi doğrusal polarizeli dalga da, aynı fazda olan bağımsız iki düzlem dalgaya ayrılabilir.



Şekil 2.7: İki dalga'nın birleşiminden oluşan doğrusal polarizeli dalga.

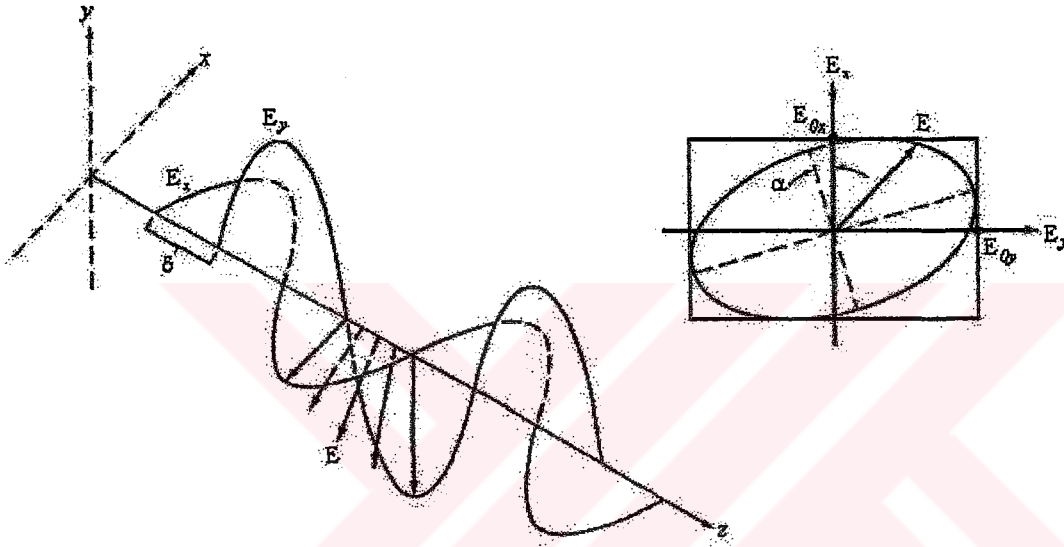
2.3.2 Eliptik ve Dairesel Polarizasyon

Eşitlik (2.6)'daki dalga, δ 'nın sıfırdan ve 2π 'nin katlarından farklı değerleri için eliptik polarizelidir (Keiser, 1991). Sonuç alan $\vec{E}$, açısal frekans ω 'nın bir fonksiyonu olarak, genliğini döndürür ve değiştirir. Eşitlik (2.4) ve (2.5)'ten faydalanarak, δ 'nın değişik değerleri için, aşağıdaki ifadeyi çıkartabiliriz:

$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 - 2\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)\cos\delta = \sin^2\delta \quad (2.9)$$

Görüldüğü gibi bu bir elips denklemdir. Yani, $\vec{E}$ vektörünün bitiş noktası, uzayda bir elips oluşturmaktadır. Bu durum şekil 2.8'de gösterilmiştir. Bu elipsin ekseni x ekseni ile, ifadesi aşağıda verilen α açısını yapar.

$$\tan 2\alpha = \frac{2E_{0x}E_{0y} \cos \delta}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \quad (2.10)$$



Şekil 2.8: Aralarında δ kadar faz farkı olan, farklı genlikli ve doğrusal polarizeli iki dalganın birleşiminden oluşan eliptik polarizeli dalga.

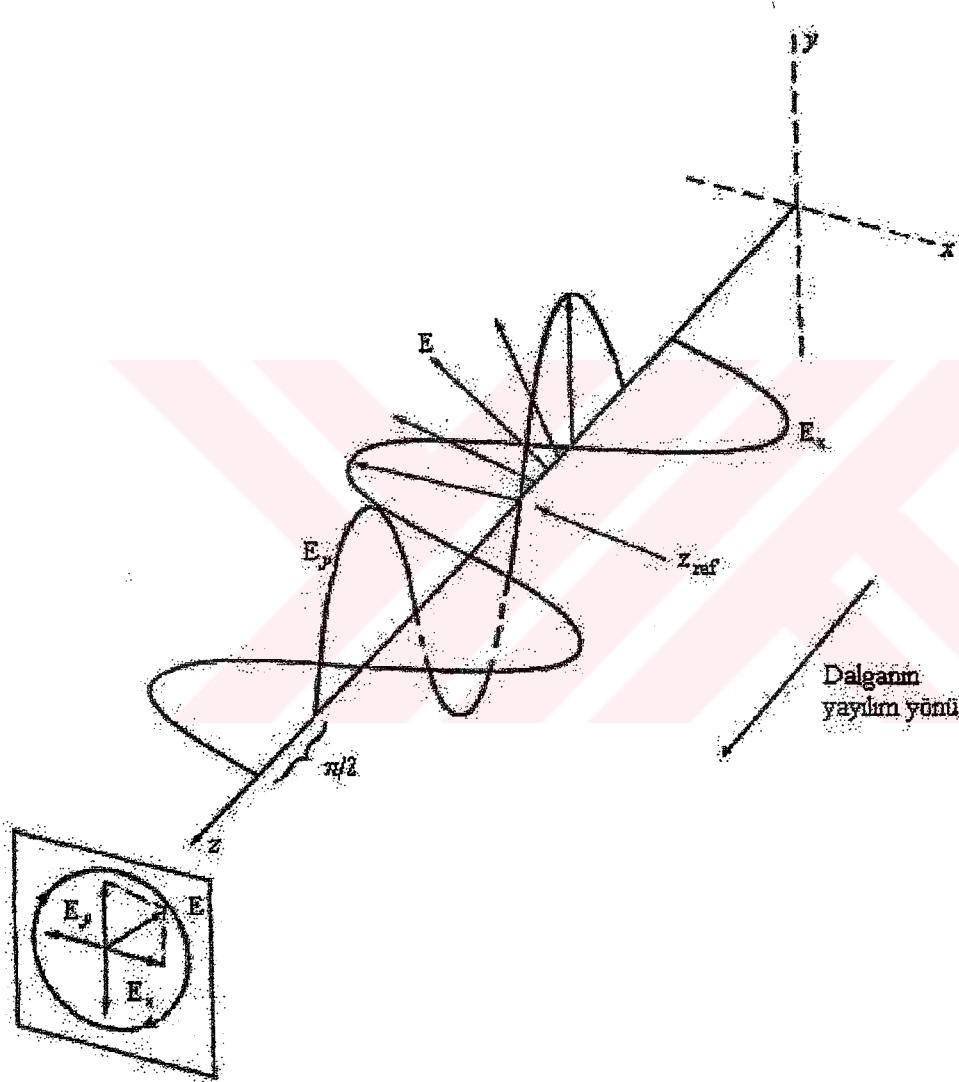
Eşitlik (2.9)'un daha iyi bir şeklini elde etmek için, elips ekseni ile x eksenini aynı hizaya getirelim. Bu durumda $\alpha=0$ ve buna bağlı olarak $\delta = \pm\pi/2, \pm3\pi/2, \pm5\pi/2, \dots$ 'dir. Sonuç olarak, eşitlik (2.9) aşağıdaki şekle gelir:

$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 = 1 \quad (2.11)$$

Bu da, eksenleri koordinat eksenleriyle çıkan bir elipsin denklemdir. Yani, E_{0x} ve E_{0y} koordinat eksenleri üzerindedir.

$E_{0x} = E_{0y} = E_0$ ve izafi faz farkı $\delta = \pm\pi/2 + 2m\pi$ ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) olduğunda, ışık dalgası, şekil 2.9'da görüldüğü gibi, dairesel polarizeli olur. Bu durumda eşitlik (2.11) aşağıdaki şekle indirgenir:

$$E_x^2 + E_y^2 = E_0^2 \quad (2.12)$$



Şekil 2.9: Aralarında $\delta = \pi/2 + 2m\pi$ kadar faz farkı olan, eşit genlikli ve doğrusal polarizeli iki dalganın birleşiminden oluşan sağ dairesel polarizeli dalga.

Görüldüğü gibi bu bir daire denklemdir. Eğer δ pozitif olacak şekilde seçilirse, (2.4) ve (2.5) eşitlikleri şu şekle döner:

$$\vec{E}_x(z, t) = \vec{a}_x E_0 \cos(\omega t - kz) \quad (2.13)$$

$$\vec{E}_y(z, t) = -\vec{a}_y E_0 \sin(\omega t - kz) \quad (2.14)$$

Bu durumda, $\vec{E}$ vektörünün bitiş noktası, uzayda bir daire oluşturmaktadır. Dairesel polarizasyonu daha iyi anlayabilmek için, keyfi bir z_{ref} noktasına bir gözlemci yerleştirildiğini düşünelim. Matematiksel uygunluk açısından, $t = 0$ anı için bu referans noktasını $z = \pi/k$ olarak seçelim. O halde, (2.13) ve (2.14) eşitliklerindeki alan bileşenleri, $\vec{E}_x(z, t) = -\vec{a}_x E_0$ ve $\vec{E}_y(z, t) = 0$ olur. Yani, şekil 2.9'da görüldüğü gibi, $\vec{E}$ vektörü bu anda negatif x eksenini boyunca uzanmaktadır. $t = \pi/2\omega$ gibi bir zaman sonra, elektrik alan vektörü 90° döner ve pozitif y eksenini boyunca uzanır. Sonuç olarak, toplam elektrik alan vektörü, artan zamanla birlikte, gözlemciye göre saat yönünde ve ω açısal frekansında döner. $\vec{E}$ vektörü bir tam dönüşünü, ışık dalgası bir dalga boyu ilerlediğinde tamamlar. Bu tip ışık dalgasına sağ dairesel polarizeli dalga denir. Eğer δ negatif olarak seçilirse, elektrik alan vektörü aşağıdaki şekilde olur:

$$\vec{E} = E_0 [\vec{a}_x \cos(\omega t - kz) + \vec{a}_y \sin(\omega t - kz)] \quad (2.15)$$

Bu durumda $\vec{E}$ vektörü ters saat yönünde döner ve ışık dalgası da sol polarizelidir.

2.3.3 Işığın Quantum Yapısı

Dalga teorisi, ışığın iletilmesine dair bütün olguları yeterli derecede açıklamaktadır. Buna rağmen, ışığın emisyonu, absorpsiyonu ve dispersiyonu gibi olaylarda karşımıza çıkan ışık madde etkileşimi konusuna, ne parçacık teorisi, ne de dalga teorisi uygun değildir. Bunların yerine, optik radyasyonun dalga özelliklerinin yanında parçacık özelliklerinin de bulunduğu işaret eden quantum teorisi kullanılmalıdır (Temiz, 2000). Işık enerjisi, foton adı verilen ayrık birimlerde yayılır veya absorbe edilir. Fotonların varlığını göstermek için yapılan bütün deneylerde, foton enerjisinin yalnızca frekansa bağlı olduğu görülmüştür. Fotonun enerjisi ve frekansı arasındaki bağıntı aşağıdaki gibidir:

$$E = hf \quad (2.16)$$

E : Foton enerjisi (J),

$h = 6.625 \times 10^{-34}$: Planck sabiti (J.s),

f : Frekans (Hz).

Işık bir atom üzerine geldiği zaman, bir foton enerjisini bu atomun elektronu üzerine aktarır ve elektronun daha yüksek bir enerji seviyesine çıkmasına sebep olur. Bu süreçte, ya foton enerjisinin tamamı elektrona aktarılır, ya da bir enerji aktarımı olamaz. Elektron tarafından absorbe edilen enerji, elektronu daha yüksek bir enerji seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerjiye tamamen eşit olmalıdır. Başka bir deyişle, bir önceki seviyeden hf kadar fazla olan uyarılmış bir seviyede bulunan bir elektron, tam bu enerjiye eşit enerjideki bir foton yayarak düşük enerji seviyesine iner.

2.3.4 Işın ve Mod Arasındaki İlişki

Işığın bir dalga kılavuzu boyunca yayılımı, mod ismi verilen kılavuzlanmış elektromanyetik dalga kümesi cinsinden ifade edilebilir (Felsen, 1974). Bu kılavuzlanmış modlar, dalga kılavuzunun bağlı veya tutulmuş modları (bound or trapped modes) olarak adlandırılırlar. Her kılavuzlanmış mod, fiber boyunca dalga boyuna eşit aralıklarla tekrar edilen elektrik ve manyetik alan çizgilerinin bir desenidir. Sadece belli sayıda modlar kılavuzda yayılabilirler. Bu modlar, fiber içerisinde homojen dalga denklemlerini ve ayrıca kılavuz yüzeyinde sınır şartlarını sağlayan elektromanyetik dalgalarıdır.

Fiber boyunca kılavuzlanan elektromanyetik ışık alanı, bağlı veya tutulmuş modların süperpozisyonu olarak tanımlanabilir. Her kılavuzlanmış mod, dalga kılavuzunun eksenine dik yönde bir duran dalga deseni oluşturan elektromanyetik alan kümesinden oluşur. ω açısal frekansındaki tek renkli bir ışık dalgasının pozitif z yönünde ilerleyen bir modunun zamana ve mesafeye bağlı ifadesi $e^{j(\omega t - \beta z)}$ şeklindedir. Buradaki β faktörü, $k = 2\pi / \lambda$ şeklindeki dalga yayılım sabitinin z bileşenidir. Kılavuzlanmış modlar için β ,

mod alanının Maxwell denklemlerini ve sınır şartlarını sağlama gerekliliğine göre belirlenen ayrı değerler alır.

Işığın optik fiberdeki yayılım karakteristiklerinin teorik olarak incelenmesi için geliştirilen başka bir yöntem ise geometrik optik veya ışın izleme yaklaşımı olarak adlandırılır. Fiber çapının dalga boyuna oranı büyük olduğu zaman, bu yöntem ışığın fibere alınmasına ve burada kılavuzlanmasına ilişkin özellikler incelenirken iyi bir yaklaşım sağlar. Bu şart, küçük dalga boyu sınırı olarak bilinir. Işın yaklaşımı, sıfır dalga boyu sınırında tam olarak geçerli olmasına rağmen, çok modlu fiberlerdeki kılavuzlanmış mod sayısı fazla olduğunda da sıfır olmayan dalga boylarında yeterince doğru ve güvenilirdir. Işın yaklaşımının avantajı, elektromanyetik dalga analizleriyle karşılaştırıldığında, ışığın fiber içerisindeki yayılım karakteristiklerine ilişkin daha iyi fiziksel açıklamalar getirmesidir.

Işık ışını ile mod çok farklı kavramlar olmasına rağmen, aralarında bir ilişki de yok değildir. Fiber ekseni boyunca, yani z yönünde ilerleyen bir mod, hepsi ortaklaşa fiber eksenine dik yöndeki bir duran dalga deseni oluşturan bir düzlem dalga grubuna ayrıştırılabilir. Daha önce de belirtildiği gibi, ışık ışını düzlem dalganın dalga yüzeyine diktir. Yani belirli bir moda ait düzlem dalga grubu bir ışın kümesi oluşturur. Bu özel grubun her ışını, fiber içinde, fiber ekseni ile aynı açıyı yaparak ilerler. Fiber içinde, yalnız M sayıda kılavuzlanan mod olacağını düşünürsek, ışın gruplarının bu modlara tekabül eden olası açıları da aynı M sayısı ile sınırlandırılmıştır. Yani ışınların fiber içerisinde kritik açıdan daha büyük açılarla ilerleyebilmesinin modlarla da ilgisi vardır.

Geometrik optik metodunun kullanılabilirliğine rağmen, bu metod ile mod analiz metodunun arasında uyumsuzluklar ve sınırlamalar da mevcuttur. Örneğin, tek modlu veya birkaç modlu fiberlerin analizi mod teorisi kullanılarak yapılmalıdır. Yine eşfazlılık ve girişim olgularını içeren problemler de, mod teorisi kullanılarak çözülmelidir. Işın optiği yaklaşımı ve mod analizi arasındaki başka bir uyumsuzluk da, fiber kablo belli bir eğrilik yarıçapıyla büküldüğü zaman ortaya çıkar. Mod analizi, bükülmüş fiberdeki her modun belli radyasyon kaybına uğradığını kanıtlar. Bunun yanında, ışın yaklaşımı ise hatalı bir şekilde, bazı ışın gruplarının eğri kısımda tam iç

yansımaya maruz kaldıklarını ve sonuç olarak kayıpsız olarak kılavuzlanabildiklerini söylemektedir.

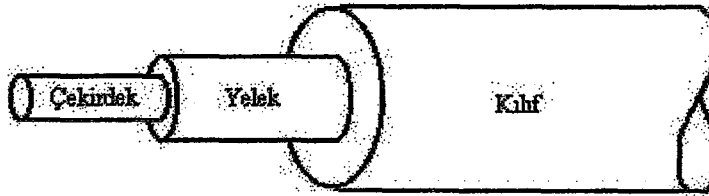


ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

FİBER OPTİĞİN YAPISI VE TÜRLERİ

Optik fiber, silindirik yapıda olan ve optik frekanslarda çalışan dielektrik bir dalga kılavuzudur. Elektromanyetik enerjiyi ışık şeklinde yüzeyleri arasında sınırlar ve kendi eksenine paralel yönde kılavuzlar. Bir optik dalga kılavuzunun iletim özellikleri onun yapısal karakteristiğine bağlıdır. Fiberin yapısı, bilgi taşıma kapasitesinde belirleyici bir rol oynar ve ayrıca dalga kılavuzunun çevresel bozulmalara karşı tepkisinde de etkili olur.

Daha önce de belirtildiği gibi ışığın bir dalga kılavuzu boyunca yayılımı, mod olarak bilinen kılavuzlanmış elektromanyetik dalga kümesi cinsinden tanımlanabilir. Bu kılavuzlanmış modlara tutulmuş veya bağlı modlar da denmektedir. Her kılavuzlanmış mod, fiber boyunca dalga boyuna eşit aralıklarla tekrarlanan elektrik ve manyetik alan çizgilerinin oluşturduğu bir desendir. Yalnızca belli sayıdaki modlar kılavuz boyunca yayılabilirler. Bu yayılan modlar, fiber içerisinde homojen dalga denklemlerini, dalga kılavuzu yüzeylerinde de sınır şartlarını sağlayan elektromanyetik dalgalar.

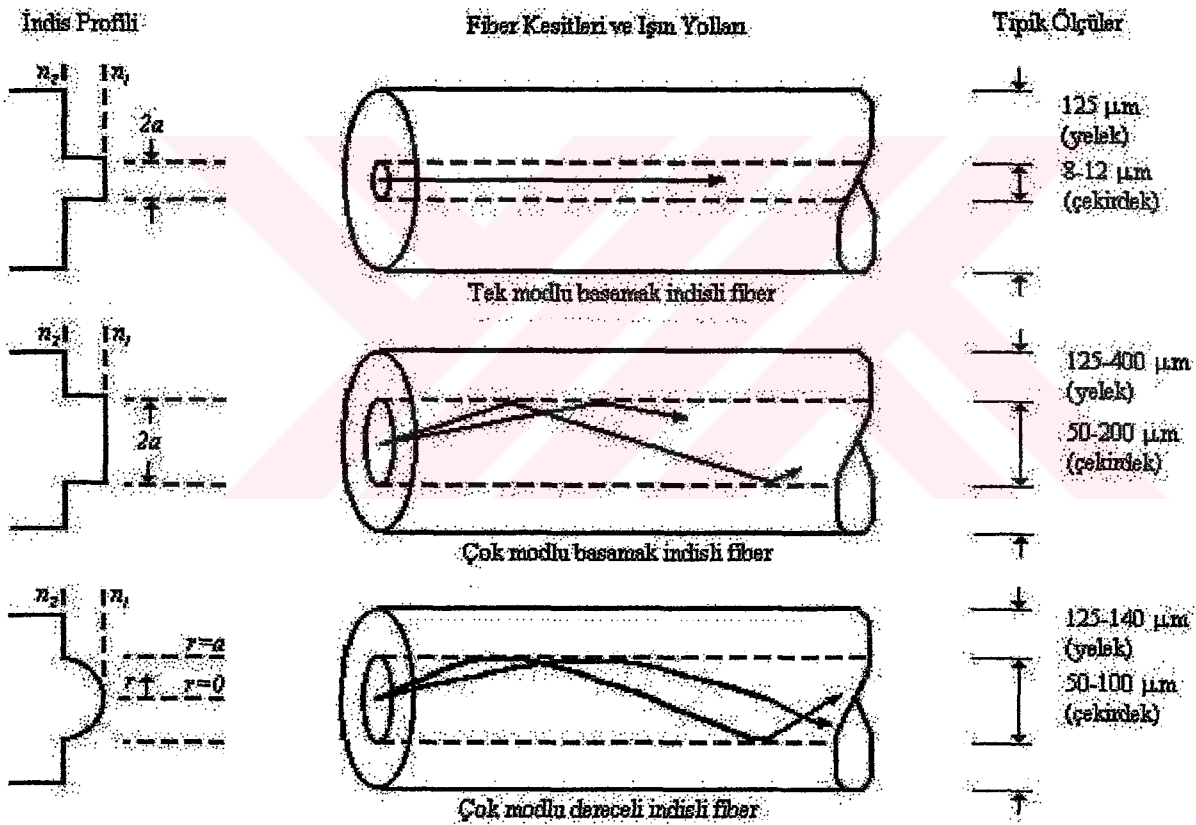


Şekil 3.1: Optik fiberin genel yapısı.

Literatürde pek çok optik dalga kılavuzu yapısı tanımlanmış olmasına rağmen, en çok şekil 3.1'de gösterilen a yarıçaplı ve n_1 kırılma indisli tek, katı ve dielektrik bir silindirden oluşan yapı kullanılmaktadır (Snyder ve Love, 1984). Bu silindir, fiberin çekirdeği olarak bilinir. Çekirdek, n_1 'den daha küçük olan n_2 gibi bir kırılma indisine sahip, katı ve dielektrik bir yelek ile çevrilmiştir. Fiber yeleğinin, çekirdek yüzeyindeki dielektrik süreksizliklerden dolayı oluşan saçılma kayıplarını azaltmak, fiberin

dayanıklılığını arttırmak ve çekirdek yüzeyini kirlenmelere karşı korumak gibi faydaları mevcuttur.

Düşük ve orta kayıplı fiberlerde genellikle çekirdek malzemesi olarak cam, yelek malzemesi olarak da cam veya plastik kullanılır. Daha yüksek kayıplı olan, plastik yeleklerle çevrilmiş plastik bir çekirdeğe sahip fiberler de geniş kullanım alanlarına sahiptirler. Ayrıca birçok fiber, elastik ve aşınmaya karşı dirençli olan plastik bir kılıfla kuşatılmıştır. Kılıf fiberin dayanıklılığını arttırdığı gibi, bitişik yüzeylerde oluşabilecek geometrik hatalara ve pürüzlere karşı da fiberi izole etmiş olur.



Şekil 3.2: Fiber türleri, indis profilleri ve tipik fiber ölçüleri.

Çekirdek malzemesinin bileşimindeki değişiklikler sonucu, şekil 3.2'de gösterildiği gibi iki farklı fiber türü ortaya çıkmıştır (Buck, 1995). Birinci durumda, kırılma indisi çekirdek boyunca sabittir ve yelek sınırında keskin bir değişime uğrar. Bu tür fiberler basamak indisli veya keskin geçişli fiber (step-index fiber) olarak adlandırılırlar. İkinci durumda ise çekirdek kırılma indisi, fiberin merkezine olan yarıçap mesafesinin bir

fonksiyonu olarak değişir. Bu tür fiberlere ise dereceli indisli veya yumuşak geçişli fiber (graded-index fiber) denmektedir.

Optik fiberler ayrıca tek modlu (single mode) ve çok modlu (multimode) olarak iki sınıfa ayrılabilir. Tek modlu fiber yalnızca bir modun yayılımını desteklerken, çok modlu fiberlerde yüzlerce mod yayılabilmektedir. Tek modlu ve çok modlu fiberlerin tipik ölçülerdeki şekilleri şekil 3.2’te gösterilmiştir. Çok modlu fiberler, tek modlu fiberlerle karşılaştırıldıklarında, bir çok avantaja sahiptirler. Çok modlu fiberlerde çekirdek yarıçapı daha büyük olduğu için, optik gücün fiber içine girmesi ve benzer fiberlerin birbirine eklenmesi daha kolaydır. Ayrıca çok modlu fiberlerde ışık kaynağı olarak LED’ler (light emitting diode – ışık yayan diyot) kullanılırken, tek modlu fiberlerde lazer diyotlar kullanılmalıdır. Yapımlarının kolay olması, ucuz olmaları ve çalışma ömürlerinin daha uzun olması sebebiyle LED’ler lazer diyotlara göre daha çok tercih sebebidirler.

Çok modlu fiberlerin dezavantajı ise modlar arası dispersiyondan etkilenmeleridir. Dispersiyon konusu ileriki bölümlerde daha detaylı olarak ele alınacağından, burada kısaca değinilecektir. Fiberin girişine bir ışık darbesi verildiğinde, darbedeki optik gücü fiberdeki bütün modlara dağıtılır. Çok modlu fiber içindeki bütün modlar, birbirlerine yakın olmakla beraber değişik hızlarda yol alırlar. Bu yüzden her bir mod fiber çıkışına değişik zamanlarda ulaşacaktır. Başka bir deyişle, ışık darbesi fiber içinde yol aldıktan sonra zaman spektrumunda genişleyecektir. İşte bu zaman genişlemesine modlar arası dispersiyon denmektedir. Modlar arası dispersiyonun etkisi dereceli indisli fiber kullanmakla azaltılabilir. Yani dereceli indisli fiberler, basamak indisli fiberlere göre daha fazla bant genişliğine sahiptirler. Bunun yanında, modlar arası dispersiyonun etkisi söz konusu olmadığından dolayı, tek modlu fiberlerde daha da fazla bant genişliği elde etmek mümkündür.

3.1 Basamak İndisli Çok Modlu Fiber

Daha önce de belirtildiği gibi, basamak indisli fiberler a yarıçaplı, n_1 kırılma indisli bir çekirdeğe ve onu çevreleyen n_2 kırılma indisli bir yeleğe sahiptirler. n_1 ve n_2 arasında aşağıdaki bağıntı mevcuttur:

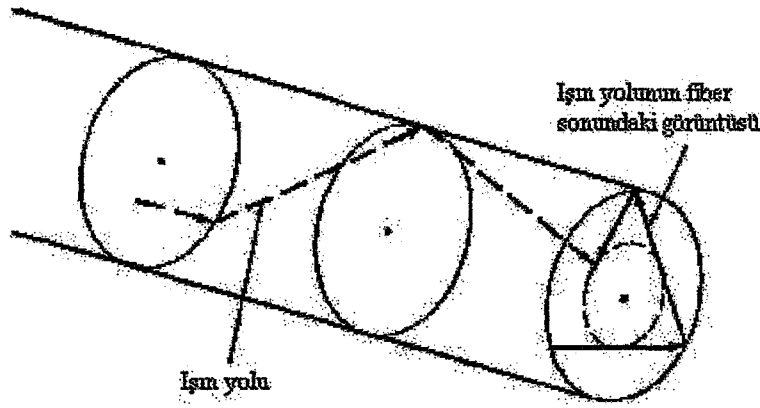
$$n_2 = n_1(1 - \Delta) \quad (3.1)$$

Δ : Çekirdek-yelek kırılma indislerinin % değişimi.

n_2 değeri genellikle Δ 0,01'e eşit olacak şekilde seçilir. Tipik Δ değeri 0,01 ile 0,03 arasında değişmektedir. Çekirdek kırılma indisi, yelek kırılma indisinden daha büyük olduğu için, optik frekanslardaki elektromanyetik enerji, tam iç yansıma sayesinde fiber dalga kılavuzu boyunca yayılır.

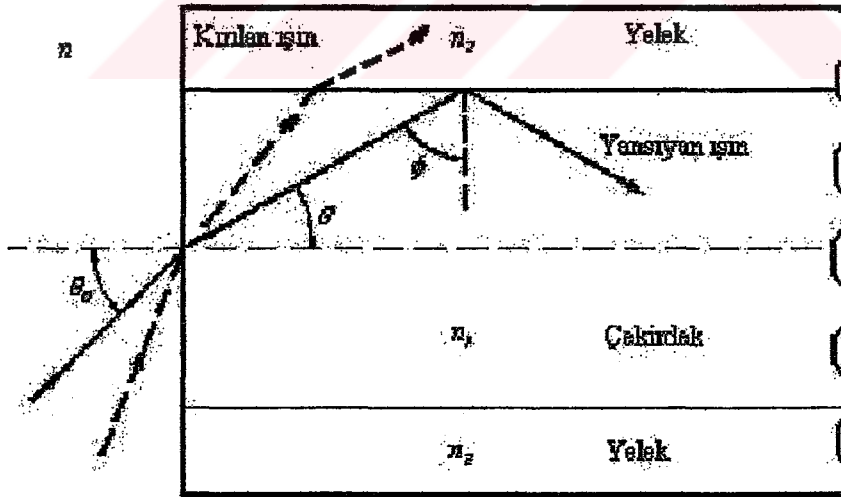
Çok modlu fiberlerin çekirdek çapı ışığın dalga boyundan çok büyük olduğu için, ışığın fiber içindeki yayılımı geometrik optik yaklaşımıyla kolaylıkla incelenebilir (Keck, 1982). Analizi basitleştirmek amacıyla, ışın kümesinin içerisinde yer alan tek bir ışın düşünülecektir. Meridyenel ve çapraz ışınlar olmak üzere, fiber içinde yayılan iki tip ışın vardır. Meridyenel ışınlar, fiberin çekirdek ekseninden geçen dikey bir yüzey boyunca yayılırlar. Meridyenel ışınlar tek bir yüzey boyunca yayıldıkları için, bunların yayılım yollarının incelenmesi daha kolaydır. Meridyenel ışınlar, bağlı ve bağlı olmayan ışınlar olarak iki alt sınıfa ayrılırlar. Bağlı ışınlar çekirdek içerisinde sınırlandırılmışlardır ve fiber eksenini boyunca geometrik optik kurallarına uygun bir şekilde yayılırlar. Bağlı olmayan ışınlar ise fiber çekirdeğinden dışarıya doğru kırılırlar.

Çapraz ışınlar tek bir yüzeye sınırlandırılmamışlardır, fakat şekil 3.3'te görüldüğü gibi fiber boyunca sarmal bir yol izlerler. Bu tip ışınların yayılım yollarının izlenmesi daha zordur. Çapraz ışınlar, fiber içerisindeki genel ışın yayılımını çok fazla etkilemedikleri için sızıntılı ışınlar olarak adlandırılırlar. Bu yüzden de analizleri çok gerekli değildir.



Şekil 3.3: Bir çapraz ışının fiber boyunca izlediği yol.

Şekil 3.4'te, basamak indisli fiber içerisinde yayılmakta olan bir meridyenel ışın gösterilmiştir. Işın n kırılma indisli dış ortamdan fiber çekirdeğine, fiber eksenini ile θ_0 açısını yapacak şekilde girer ve çekirdek-yelek ara yüzüne normalle ϕ açısını yapacak şekilde çarpar. Eğer ışın bu ara yüzeye tam iç yansıma uğrayacak şekilde bir açıyla çarparsa, fiber çekirdeği boyunca zikzaklı bir yol çizer ve her yansımadan sonra fiber ekseninden geçer.



Şekil 3.4: Bir meridyenel ışının fiber boyunca izlediği yol.

Snell kanunu yardımıyla, tam iç yansımanın oluşabilmesi için gerekli olan ϕ_{min} açısı hesaplanabilir:

$$\phi_{\min} = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (3.2)$$

$\phi_{\min}$ açısından daha küçük bir açıyla çekirdek-yelek ara yüzeyine çarpan bir ışın, çekirdek dışarısına doğru kırılacak ve yelek bölgesinde kaybolacaktır. Başka bir deyişle $\phi_{\min}$, bir önceki bölümde tanımlanmış olan kritik açıya eşittir. Eşitlik (3.2)'den faydalanılarak maksimum giriş açısı $\theta_{0\max}$ bulunabilir:

$$n \sin \theta_{0\max} = n_1 \sin \theta_{\max} = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (3.3)$$

Burada $\theta_{\max}$, çekirdek-yelek ara yüzeyinin normaliyle $\phi_{\min}$ açısını yapan ışının fiber eksenine yaptığı açıdır. Bu durumda, $\theta_{0\max}$ 'dan daha küçük gelme açısıyla fiber içerisine giren ışınlar tam iç yansımaya uğrayacak ve çekirdek-yelek ara yüzeyinden çekirdek içerisine geri yansıtacaktır.

Eşitlik (3.3) yardımıyla, ışının fiber içerisine kabul edilebilirliğinin bir ölçüsü olan nümerik açıklık (NA) tanımlanabilir:

$$NA = n \sin \theta_{0\max} = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \cong n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (3.4)$$

Eşitliğin sağ tarafında yapılan yaklaşım, Δ 'nın 1'den çok küçük olduğu durumlarda söz konusudur. Nümerik açıklık maksimum giriş açısı ile ilişkili olduğundan, genellikle kaynaktan fibere güç geçiş verimliliğini hesaplamak için ve ışık kabul etme veya toplama kabiliyetini belirtmek için kullanılır. Nümerik açıklık daima 1'den küçük olan birimsiz bir niceliktir ve genellikle 0,14 ile 0,5 arasında değişen değerler alır. Çizelge 3.1'de optik fiberlere ait tipik çekirdek ve yelek ölçüleri ve bunlara karşılık gelen nümerik açıklık değerleri gösterilmiştir (Keiser, 1991).

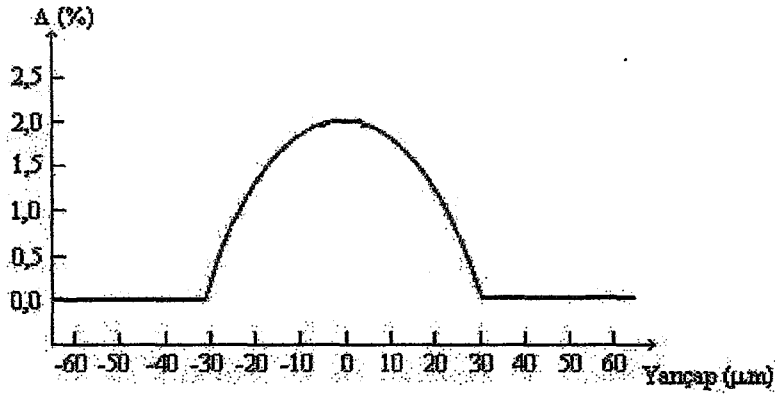
Çizelge 3.1: Tipik fiber boyutları ve bunlara karşılık gelen nümerik açıklık değerleri.

Çekirdek çapı	Yelek çapı (μm)	Nümerik açıklık
50	125	0,19-0,25
62,5	125	0,27-0,31
85	125	0,25-0,30
100	140	0,25-0,30

3.2 Dereceli İndisli Çok Modlu Fiberler

1970'lerde optik fiberlerin haberleşmede kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte, modlar arası dispersiyonun, geniş çekirdekli basamak indisli fiberlerde bilgi taşıma kapasitesini ciddi şekilde etkilediğinin farkına varılmıştır (Hecht, 1999). Tek modlu fiberler daha iyi bilgi taşıma kapasitesine sahip olmalarına rağmen, çekirdek bölgeleri ince olduğu için yeterli miktarda ışık toplamaları zordur. Bunlara alternatif olarak, kırılma indisinin çekirdekten yeleğe doğru dereceli olarak değiştiği dereceli indisli fiberler üretilmiştir. Eğer kırılma indisinin değişimi dikkatli bir şekilde kontrol edilirse, modlar arası dispersiyonun etkisi önemli ölçüde engellenebilir. Ayrıca çekirdek ölçüleri tek modlu fiberlere göre daha geniş olduğundan, daha fazla ışık toplayabilirler.

Dereceli indisli fiberler, ışığı tam iç yansıma yerine kırılma sayesinde kılavuzlarlar. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi kırılma indisi, fiberin merkezinden uzaklaştıkça dereceli olarak azalır ve tam çekirdek-yelek sınırında yelek kırılma indisile aynı değere düşer. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi, kırılma indisindeki bu değişim sayesinde, ışınlar her seferinde daha düşük kırılma indisli katmanlara rastladıkları için, fiber merkezine doğru kırılarak yol alırlar. Kırılma indisi çekirdek-yelek sınırında ani olarak değişmediği için, tam iç yansıma söz konusu değildir.



Şekil 3.5: Dereceli indisli fiberdeki kırılma indisi değişimi.

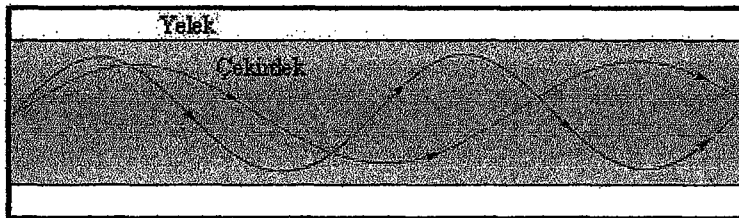
Basamak indisli fiberlerde olduğu gibi, dereceli indisli fiberlerde de ışık ışınları farklı yollar izlerler. Kırılma indisi çekirdek içerisindeki her noktada aynı olmayacağı için, her bir ışının hızı da farklı olacaktır. Bilindiği gibi 3×10^8 m/s'lik ışık hızı, ışığın boşlukta yayıldığı durumlarda söz konusudur. Eğer ışık farklı bir madde içerisinde yayılmaktaysa, hızı o maddenin kırılma indisi oranında azalır. Bu durumu aşağıdaki eşitlikle ifade edebiliriz:

$$v = \frac{c}{n} \quad (3.5)$$

v : Işığın madde içerisindeki faz hızı,

c : Işığın boşluktaki hızı,

n : Maddenin kırılma indisi.



Şekil 3.6: Dereceli indisli fiberdeki ışın yayılımı.

Bu durumda, ışın fiberin merkez ekseninden uzaklaştıkça hızı da artacaktır. Eğer kırılma indisi değişimi dikkatli bir şekilde ayarlanırsa, farklı modların geçiş zamanlarını eşitleyerek modlar arası dispersiyonu engellemek mümkün olabilir.

3.3 Tek Modlu Fiber

Tek modlu fiberlerde çekirdek bölgesi, yayılımı tek bir modla sınırlayacak kadar dar olmalıdır (Snyder, 1981). Işık fiziksel olarak fibere girebildiği takdirde, çekirdek ne kadar dar olursa olsun en düşük değerlikli mod yayılabilmektedir. Tek modlu haberleşme sayesinde modlar arası dispersiyon, mod gürültüsü ve çok modlu haberleşmeden dolayı oluşan diğer etkiler engellenmiş olur. Tek modlu fiberler çok modlu fibere göre sinyalleri daha hızlı taşırlar. Tek modlu fiberler, yüksek veri hızı gerektiren ve uzun mesafeli haberleşme sistemleri için bir standart haline gelmiş durumdadır. Bunun yanında, düşük hızlı ve kısa mesafeli sistemlerde de sıklıkla kullanılırlar.

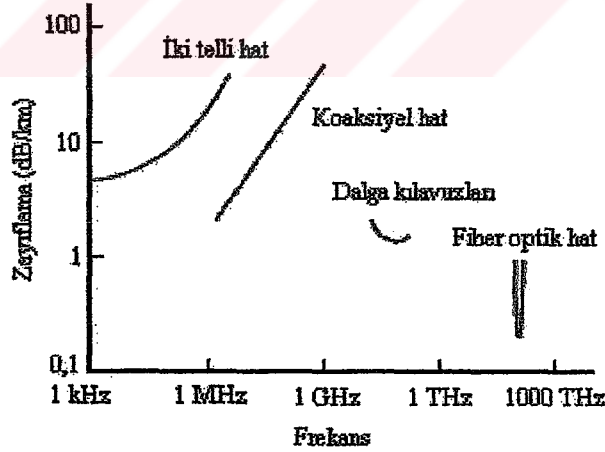
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

OPTİK FİBERLERİN ÖZELLİKLERİ

Optik fiberlerin haberleşme alanındaki en önemli özellikleri zayıflama, ışığın toplanması ve yayılımı, dispersiyon ve mekaniksel kuvvettir. Özellikle yüksek performanslı sistemlerde, doğrusal olmayan etkiler de önem kazanabilir.

4.1 Zayıflama

Fiber optik haberleşme sistemlerindeki zayıflama, giriş ile çıkış arasındaki ışık miktarındaki azalmanın ölçüsüdür (Einarsson, 1996). Başka bir deyişle zayıflama, çıkış gücünün giriş gücüne oranı olarak tanımlanabilir. Şekil 4.1’de de görüldüğü gibi, fiber optik kablolar, diğer bilgi taşıma ortamları ile karşılaştırıldıklarında, daha düşük zayıflama değerlerine sahiptirler.



Şekil 4.1: Çeşitli iletim hatları için zayıflama eğrileri.

Toplam zayıflama, bütün kayıpların toplamından oluşmaktadır (Friebele ve diğ., 1988). Bu kayıplar da çoğunlukla fiber içerisine giren ışık miktarındaki eksikliği belirten bağlaşım kaybı ve ışığın fiber boyunca ilerlerken azalmasına neden olan soğurum ve saçılma kayıplarından kaynaklanmaktadır. Bazı durumlarda, fiberin şiddetli

bükülmeye uğramasından dolayı ışık sızması oluşması gibi diğer etkiler de önemli kayıplar doğurabilir. Zayıflama, bir sinyalin fiber boyunca, algılanamayacak kadar güçsüz oluncaya dek ne kadar yol alabileceğini belirler. Başka bir deyişle zayıflama, fiber optik haberleşme sistemlerinde, iki tekrarlayıcı arasındaki mesafenin belirlenmesindeki en önemli faktördür.

Soğurum ve saçılmanın her ikisi de, fiber uzunluğu arttıkça artan bir etkiye sahiptir. Bağlaşım kaybı ise yalnızca fiber uçlarında oluşur. fiber boyunca taşınan güç, kayıplar cinsinden şu şekilde ifade edilebilir:

$$P(\ell) = (P_m - \Delta P)(1 - \alpha_A)^\ell (1 - \alpha_S)^\ell \quad (4.1)$$

$P(\ell)$: Çıkış gücü (W),

P_m : Giriş gücü (W),

ΔP : Giriş bağlaşım kayıp gücü (W),

α_A : Birim uzunluk başına soğurum kaybı,

α_S : Birim uzunluk başına saçılma kaybı,

ℓ : Fiber boyu (m).

4.1.1 Soğurum Kaybı

Her malzeme ışık enerjisinin bir kısmını soğurur (Goca, 1996). Soğurum miktarı, ışığın dalga boyuna ve malzemeye bağlıdır. Sıradan cam, görünür ışığı diğer malzemelere göre daha az soğurduğu için daha şeffaftır. Kağıt ise daha fazla görünür ışık soğurduğu için daha mattır. Ayrıca kağıt üzerindeki mürekkep, kağıda göre daha fazla ışık soğurduğu için yazılar okunabilmektedir. Soğurulan ışık miktarı dalga boyuna bağlıdır. En saf cam dahi $10 \mu\text{m}$ 'lik kızılötesi dalga boyunda mattır. $0,2 \mu\text{m}$ 'den daha düşük dalga boyuna sahip mor ötesi ışınların büyük bir kısmı hava tarafından soğurulduğu için, bu ışınlar hava yoluyla iletilemezler.

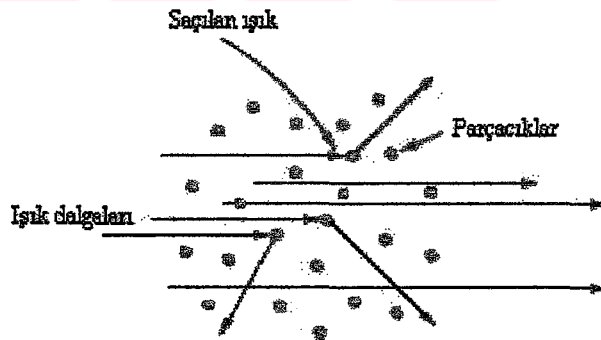
Soğurum miktarı, maddenin bileşimiyle de oldukça ilgilidir. Bazı malzemeler, aynı dalga boyundaki ışığı diğerine göre daha fazla soğurabilirler. Cam içerisindeki küçük

safsızlıklar, soğurulan ışık miktarını arttırabilir. Haberleşmede kullanılan fiberler üretilirken, bu safsızlıkları ortadan kaldırmak en önemli adımlardan birini teşkil etmektedir. Soğurum kaybı eğrileri, genellikle dalga boyuna bağlı olarak çizilirler. Dar dalga boyu aralıklarında keskin soğurum tepelerine rastlanabileceği gibi, bazı soğurum tepeleri geniş dalga boyu aralığına da yayılabilirler.

Soğurum birikimsel olduğu için, ışığın geçtiği malzemenin yoğunluğuna bağlıdır. Eğer her cm uzunlukta üzerinden geçen ışığın %1'ini soğuran bir cam çubuk ele alınacak olursa, 1 m sonra soğurulmadan kalan ışığın giren ışık miktarına oranı, eşitlik (4.1) yardımıyla, $(1 - 0,01)^{100} = 0,366$ veya %36,6 olarak bulunur. Tabii burada soğurum kayıpları dışındaki kayıplar göz ardı edilmiştir.

4.1.2 Saçılma Kaybı

Atom veya başka bir parçacığın üzerine gelen ışığın bir kısmı kaçınılmaz olarak saçılmaya uğrar (Goca, 1996). Şekil 4.2'de görüldüğü gibi ışık soğurulmayıp, geliş doğrultusundan başka bir doğrultuda saçılmaya uğrar. Bu olaya, İngiliz fizikçi Lord Rayleigh'in keşfinden dolayı, Rayleigh saçılması denmektedir.



Şekil 4.2: Rayleigh saçılması.

Saçılma ve soğurum birbirinden farklı şeyler olsa da, sonuç olarak her ikisi de fiberde yol alan ışık miktarının zayıflamasına yol açarlar. Saçılma da soğurum gibi birikimsel olduğundan, ışık fiber boyunca ne kadar çok yol alırsa, o kadar fazla saçılmaya uğrar. Saçılma, malzeme içerisindeki parçacıkların boyutlarının, dalga

boyuna göre oranlarına bağlıdır. Parçacık boyutları dalga boyuna ne kadar yakınsa, o kadar fazla saçılma gerçekleşir.

4.1.3 Toplam Kayıp veya Zayıflama

Bağlaşım kayıpları göz ardı edildiğinde, saçılma ve soğurum kayıpları birleşip toplam kaybı oluştururlar (Osana ve diğ., 1976). Şekil 4.3'te, haberleşmede kullanılan dalga boyu aralığı için, saçılma ve soğurumun katkılarıyla oluşan fiber zayıflama eğrisi gösterilmiştir. Eğri üzerinde, cam içerisinde kalan metallerden dolayı oluşan safsızlıklar ve artık hidrojen atomlarının oksijen ile yaptığı bağlar sonucu oluşan hidroksil iyonları yüzünden oluşan küçük soğurum tepeleri mevcuttur. 1,6 μm 'den daha yüksek dalga boylarındaki ani soğurum yükselmesi, cam içerisindeki silisyum-oksijen bağlarından kaynaklanmaktadır. Bu yüzden silisyum bazlı fiberler, 1,6 μm 'den daha yüksek dalga boylarında nadiren kullanılırlar.

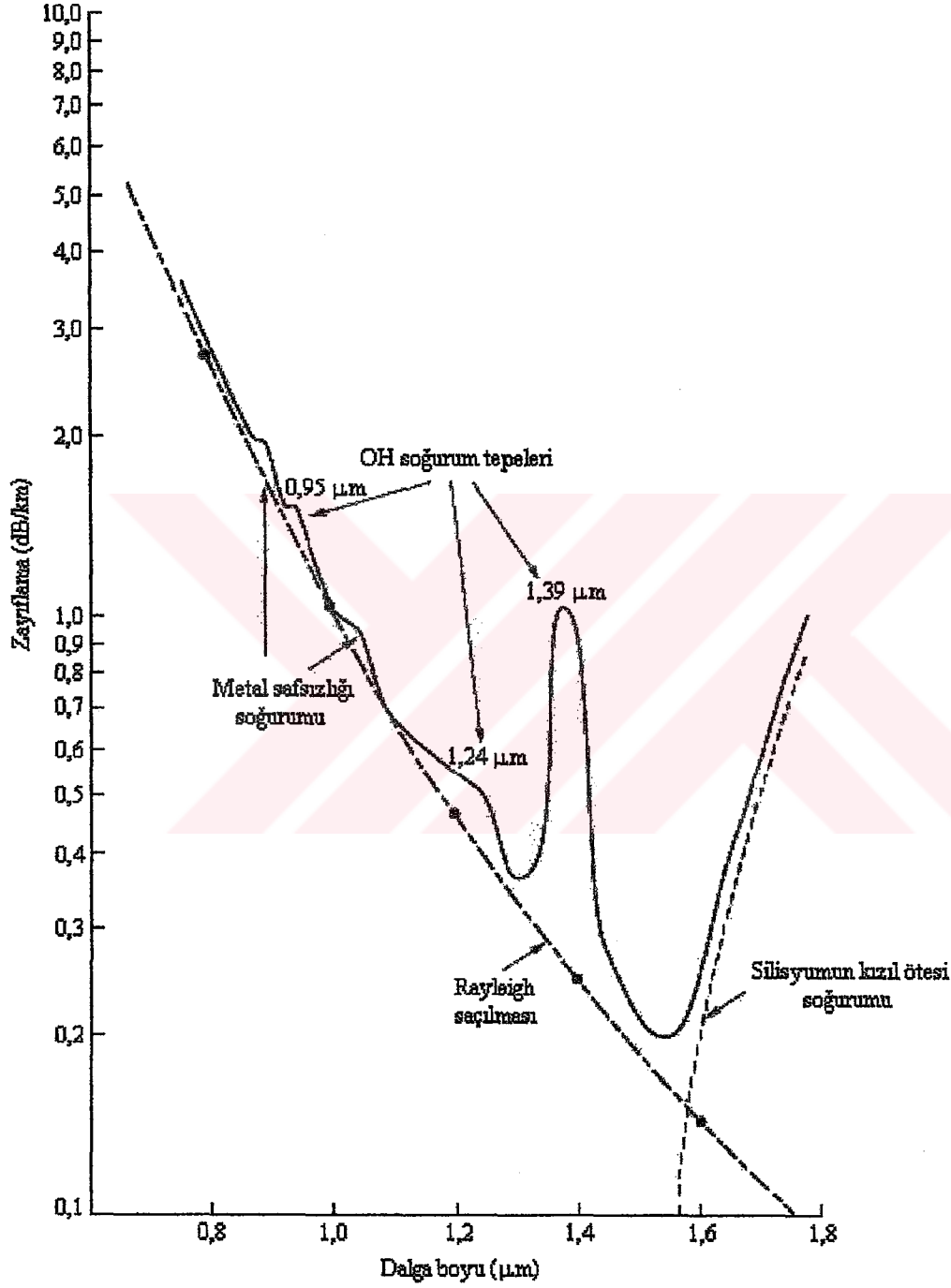
Şekil 4.3'te de görüldüğü gibi, Rayleigh saçılması düşük dalga boylarında daha fazladır. Saçılma eğrisi, ölçümler sonucu değil, teorik yaklaşımlarla çizilmiştir. Ölçülen toplam zayıflama ile teorik saçılma eğrisinin arasında kalan alan soğurum kaybını verir. Yüksek dalga boylarında Rayleigh saçılmasının hızlı bir şekilde azalması sayesinde, 1,55 μm civarında en düşük zayıflama noktası elde edilmiştir. Bu dalga boyu civarında, Rayleigh saçılması ve kızıl ötesi soğurumun her ikisi de düşüktür.

Pratik ölçmelerde saçılmayı soğurumdan ayırmak oldukça zordur. Daha önce de belirtildiği gibi, şekil 4.3'teki saçılma eğrisi teorik yaklaşımlar sonucu çizilmiştir. Pratik açıdan bakıldığında, sistem performansını etkileyen, tek başına saçılma veya soğurum değil, toplam zayıflamadır. Bu sebeple eşitlik (4.1) şu şekilde düzenlenebilir:

$$P(\ell) = (P_m - \Delta P)(1 - \alpha)^\ell \quad (4.2)$$

α : Birim uzunluktaki toplam kayıp.

Eğer bağlaşım kayıpları toplam kayıptan ayrılıp, giriş gücü olarak kaynaktan çıkan güç değil de fibere giren güç kabul edilirse, hesaplamalar daha basitleştirilmiş olur.



Şekil 4.3: Fiberin kayıp eğrisi.

4.1.3.1 Zayıflamanın Desibel Cinsinden Hesaplanması

Daha önce de belirtildiği gibi, zayıflama çıkış gücünün giriş gücüne oranı olarak tanımlanabilir. Zayıflama çoğu durumda, aşağıdaki eşitlikte gösterildiği gibi desibel cinsinden ifade edilir.

$$\alpha_{dB} = -10 \log \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (4.3)$$

α_{dB} : Zayıflama (dB),

P_{out} : Çıkış gücü (W),

P_{in} : Giriş gücü (W).

Çıkış gücü her zaman için giriş gücünden daha az olacağı için, eğer önüne eksi işareti konulmasaydı eşitlik (4.3)'ün sonucu negatif olurdu. Bazı kaynaklarda zayıflama negatif olarak da belirtilmektedir.

Desibel, yüksek zayıflamayı olduğundan daha azmış gibi gösteren bir ölçüdür. Örneğin 3 dB orijinal ışığın yarısının, 10 dB %10'unun, 20 dB ise %1'inin geriye kaldığını belirtir. 1000 dB orijinal ışığın 10^{-100} 'ünün geriye kaldığını belirtir ki bu, bilinen tüm evren içerisindeki bir atomdan daha küçük bir orandır. Desibel cinsinden bazı zayıflama değerlerinin karşılık geldiği güç oranları çizelge 4.1'de belirtilmiştir (Hecht, 1999).

Desibel, sinyal gücü ve zayıflaması hesaplamalarında oldukça kullanışlı bir birimdir. Farklı zayıflamalara sahip iki veya daha fazla sistem art arda eklendiği zaman, toplam zayıflamanın veya çıkış gücünün oransal yolla hesaplanması oldukça uzun sürmektedir. Bunun yanında, eğer zayıflamalar desibel cinsinden verilmişse, tüm zayıflama değerleri toplanarak toplam zayıflama bulunabilir.

$$\alpha_{dB} = \alpha_{dB1} + \alpha_{dB2} + \alpha_{dB3} + \dots \quad (4.4)$$

Desibel sayesinde, belli uzunluktaki fiberdeki toplam zayıflamayı bulmak da, eşitlik (4.2)'deki üstel formülden daha kolaydır. Örneğin dB/km cinsinden birim uzunluktaki zayıflama biliniyorsa, bu değer fiberin km cinsinden olan boyu ile çarpılıp toplam zayıflama bulunabilir.

Çizelge 4.1: Desibel cinsinden belli zayıflama değerlerine karşılık gelen güç oranları.

Zayıflama (dB)	Güç Oranı (P_{out}/P_{in})
0,1	0,9772
0,2	0,9550
0,3	0,9333
0,4	0,9120
0,5	0,8913
0,6	0,8710
0,7	0,8511
0,8	0,8318
0,9	0,8128
1	0,7943
2	0,6310
3	0,5012
4	0,3981
5	0,3162
6	0,2512
7	0,1995
8	0,1585
9	0,1259
10	10^{-1}
20	10^{-2}
30	10^{-3}
40	10^{-4}
50	10^{-5}
60	10^{-6}
70	10^{-7}
80	10^{-8}
90	10^{-9}
100	10^{-10}
200	10^{-20}
300	10^{-30}
400	10^{-40}
500	10^{-50}
600	10^{-60}
700	10^{-70}
800	10^{-80}
900	10^{-90}
1000	10^{-100}

Güç değerleri de belli bir güç seviyesine göre desibel cinsinden belirtilebilir. Fiber optikte sıkça kullanılan iki güç desibel ölçeği, 1mW'a göre (dBm) ve 1μW'a göre (dBμ) desibeldir. Bu seviyenin üstündeki güçler pozitif, altındakiler ise negatif değerler alır. Verilen bir gücü dBm veya dBμ'ya çevirmek için, çıkış gücü 1 mW veya 1 μW alınarak, eşitlik (4.3) yardımıyla o giriş gücü için kayıp değeri bulunur. Örneğin 10 mW 10 dBm, 0,1 mW ise -10dBm veya 100 dBμ olarak belirtilebilir. Güç değerleri de desibel cinsinden belirtildiği sürece, aşağıdaki bağıntı yardımıyla giriş veya çıkış gücü kolaylıkla bulunabilir.

$$P_{out} = P_{in} - \alpha_{dB} \quad (4.5)$$

Örneğin 0 dBm'lik (1 mW) bir güç, fiber girişinde 3 dB'lik bağlaşım kaybına uğradıktan sonra, 0,6 dB/km'lik fiberde 5 km boyunca ilerlerse, çıkış gücü şu şekilde hesaplanır:

$$P_{out} = 0 \text{ dBm} - 3 \text{ dB} - (5 \text{ km} \times 0,6 \text{ dB/km}) = -6 \text{ dBm} \cong 0,25 \text{ mW}$$

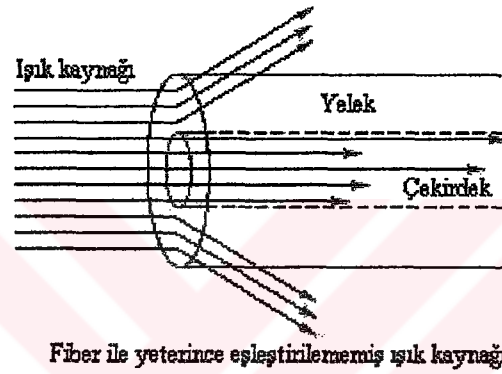
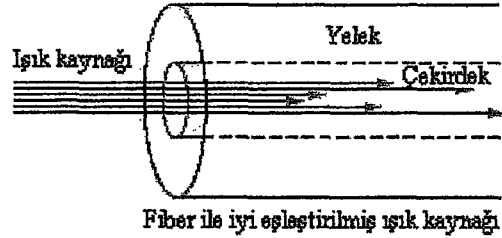
4.2 Işığın Toplanması ve Yayılımı

Fiberlerin ışığı toplaması ve yaymasında birçok faktör etkilidir. Bunların çoğu fiberin yapısıyla ilgilidir. Bu kısımda bu yapıların etkileri üzerinde durulacaktır.

4.2.1 Çekirdek Boyutu

Çekirdek boyutu ışığın fiber içerisine girmesinde çok önemlidir. Fiber çekirdeği, ışık yayan bölge ile aynı hizaya getirilmelidir. Işık yayan bölge, LED veya lazer gibi bir ışık kaynağı olabileceği gibi, başka bir fiberin çıkış ucu da olabilir. Işığın fiber tarafından verimli bir şekilde toplanabilmesi için, çekirdek en azından ışık kaynağı kadar geniş olmalıdır. Şekil 4.4'te görüldüğü gibi, ışık kaynağı fiber çekirdeğinden geniş olduğu zaman, ışığın bir kısmı yelek bölgesine girer ve buradan da kolaylıkla fiber dışına çıkar.

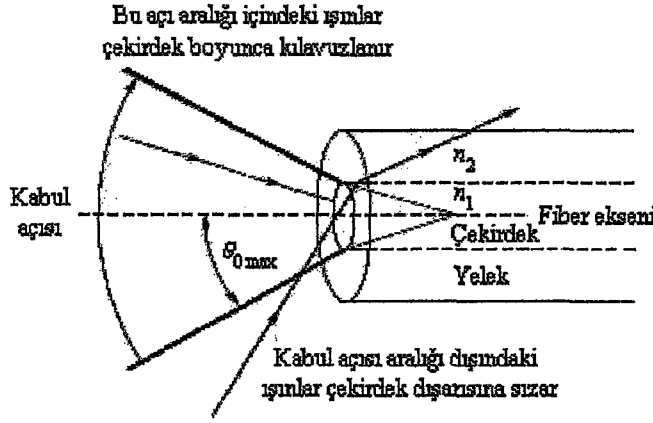
Işık kaynağının ışığın toplandığı açıklık ile eşleştirilmesi geometrik bir sorundur. Fiber çekirdeği ne kadar geniş olursa, fiber ile ışık kaynağının aynı hizaya getirilmesi de o kadar kolay olur.



Şekil 4.4: Işık kaynağının fiber ile eşleştirilmesi.

4.2.2 Nümerik Açıklık

Fiberin toplayacağı ışık miktarının belirlenmesindeki ikinci faktör, ışık ışınının fiber içerisine girip çekirdekte hapsedilebileceği açı aralığı olan kabul açısıdır. Tam kabul açısı daha önce eşitlik (3.3)'te belirtilen maksimum giriş açısının iki katına eşittir ve şekil 4.5'te görüldüğü gibi fiber ekseninin hem alt hem de üst kısmı boyunca uzanır. Yarım kabul açısı ise eşitlik (3.3)'teki maksimum giriş açısına eşittir ve fiber eksenini ile ışık ışınlarının çekirdek içerisine hapsedildikleri koninin sınırı arasındaki açıdır.



Şekil 4.5: Fiberin kabul açısı.

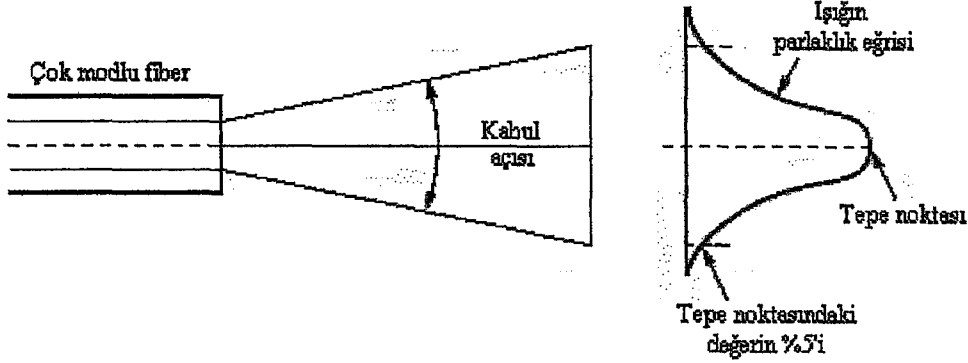
Kabul açısı genellikle tek başına kullanılmaz. Daha önce eşitlik (3.4)'te de belirtildiği gibi, yarımlar kabul açısının sinüsü nümerik açıklık olarak tanımlanır.

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sin \theta_{0 \max} \quad (4.6)$$

Burada ışığın fiber içerisine girmeden önce bulunduğu ortam hava olarak kabul edilmiştir. Görüldüğü gibi çekirdek boyutu doğrudan eşitlik içerisinde yer almamıştır, fakat çekirdek boyunca kılavuzlanabilmeleri için, ışık ışınlarının hepsi çekirdek içerisine girmeli ve kabul açısı aralığı içerisinde yer almalıdırlar. Çekirdek içerisine girip de kabul açısı aralığı içerisinde yer almayan veya kabul açısı aralığı içerisinde olup, fiberin çekirdek dışındaki herhangi bir bölgesine girmiş olan ışınlar çekirdek boyunca kılavuzlanamazlar. Geniş çekirdekli olan basamak indisli çok modlu fiberlerde nümerik açıklık genellikle 0,3 veya daha yüksek değerler alır. Işığı daha geniş bir açıdan toplamının önemli olduğu görüntüleme veya ışık kılavuzlamada kullanılan fiberlerde nümerik açıklık en yüksek değerdedir. Tipik nümerik açıklık değerleri, dereceli indisli çok modlu fiberler için 0,2-0,3, tek modlu fiberler için ise 0,1-0,15'tir.

Pratikte nümerik açıklık çekirdek ve yelek kırılma indislerinin ölçülmesi yoluyla ölçülmez. Bunun yerine çok modlu bir fiberin çıkış ucunun gözlemlenmesi yoluyla nümerik açıklık doğrudan ölçülebilir. Fiberin ışık kılavuzlama özellikleri simetrik olduğundan, çok modlu fiberden çıkan ışık fiberin kabul açısına eşit bir açıyla genişler. Bu ölçmelerde, yelek içerisinde kılavuzlanmış olan modların yok edilmiş olmasına

dikkat edilmelidir. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi, çıkıştaki ışık demetinin sınırı, parlaklığın merkezdeki değerinin %5'ine düştüğü nokta olarak tanımlanır.



Şekil 4.6: Fiber çıkışındaki parlaklık eğrisi yardımıyla nümerik açıklığın belirlenmesi.

4.2.3 Yelek Modları ve Sızıntılı Modlar

Fiber içerisine giren bütün ışık çekirdek boyunca kılavuzlanmaz. Bazı ışınlar fiber girişinde çekirdek yerine yelek bölgesine girerler. Bazıları ise, çekirdek yelek sınırına eşitlik (3.2)'de belirtilen tam iç yansımanın oluşabilmesi için gerekli olan minimum açıdan daha büyük bir açıyla çarptıkları için çekirdekten yelek bölgesine geçerler. İşte bu ışınlar, yelek içerisinde yayılan yelek modlarının oluşmasına sebep olurlar.

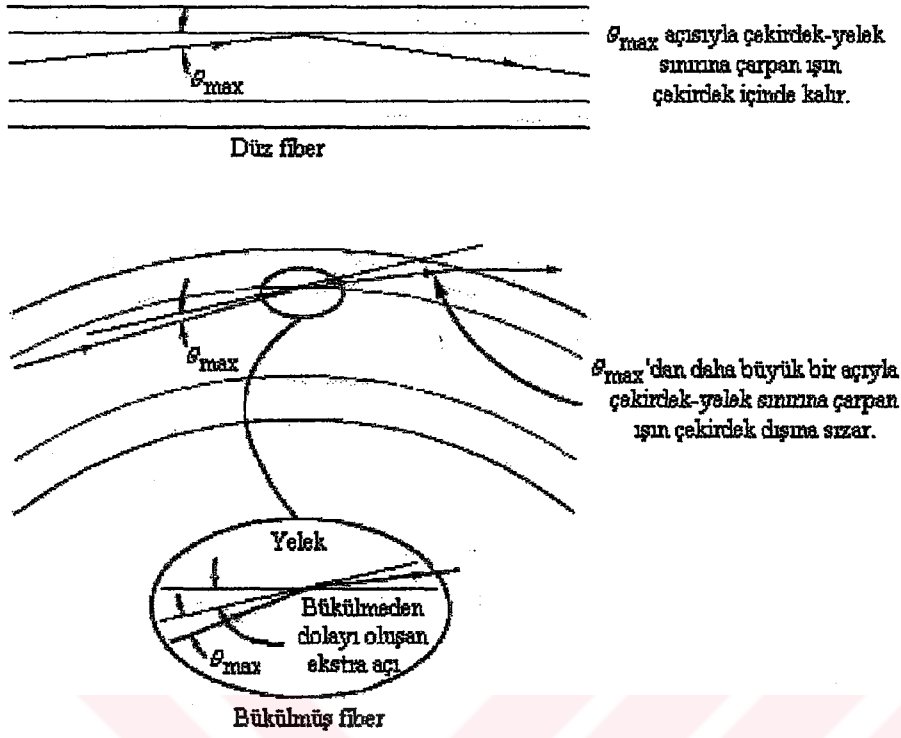
Yelek ve fiberi çevreleyen malzeme sınırında oluşan tam iç yansıma sayesinde, ışınlar yelek boyunca kılavuzlanabilirler. Bu olay, fiberi çevreleyen hava veya plastik örtünün kırılma indisinin, yelek kırılma indisinden daha düşük değerde olduğu durumlarda geçerlidir. Bu ışınlar, haberleşmede kullanılan fiberlerde gürültüye, görüntülemelerde kullanılan fiber yığınlarında ise komşu fiberlerdeki sinyallerin birbirlerine karışmasına neden olurlar. Fiberi yeleğinkinden daha yüksek kırılma indisine sahip bir plastik örtü ile çevreleyerek, bu ışınların dışarıya sızmalarını sağlanabilir. Sert yığınlardaki fiberler, ışığı soğuran karanlık cam ile birbirlerinden ayrılarak, ışınların yelekler arası geçişi engellenebilir.

Çok modlu fiberlerde, çekirdek boyunca kılavuzlanan modlar ile yelek bölgesinde hapsedilmiş modlar arasındaki sınır yeterince net değildir. Işığın bir kısmı, ikisinin arasında yer alan sızıntılı modlar tarafından taşınır (Tomita ve Cohen, 1985). Yani bu ışınlar hem çekirdekte hem de yelekte yayılırlar. Bu modlar yelek modlarına göre daha uzak mesafelere giderler, fakat sızıntı ve kayba uğrarlar.

Yelek modları ve sızıntılı modların her ikisi de fiber ölçmelerinde gerçek olmayan sonuçlara neden oldukları için, bunlardan kurtulmak için mod çıkarıcılar geliştirilmiştir. Mod çıkarıcıların kırılma indisleri yelek kırılma indisinden daha büyük olduğu için, mod çıkarıcılar yeleğin dışarısına kaplanarak yelek içerisindeki tam iç yansımayı engellerler. Bu malzemeye sızan ışık soğurulur ve kaybolur. Eğer yelekteki zayıflama çekirdektekinden daha fazlaysa, çok uzun fiberler de bir mod çıkarıcı olarak düşünülebilir.

4.2.4 Bükülme Kayıpları

Optik fiberler tamamıyla dış dünyadan yalıtılmış değildirler. Dış etkenlerin değişmesi sonucu fiberin fiziksel karakteristikleri değişebilir ve ışığın kılavuzlanması etkilenebilir. Fiber boyunca oluşabilecek olan küçük veya büyük bükülmeler kayba neden olabilir (Badar ve diğ., 1989). Bükülme kaybının nedeni, çok modlu bir fiberde ışın modeli kullanılarak daha iyi anlaşılabilir. Şekil 4.7’de görüldüğü gibi, eğer fiber düzse, ışın fiber içerisinde tam iç yansımaya uğrayarak kılavuzlanır. Bükülmüş bir fiberde ise, ışığın çekirdek-yelek sınırına gelme açısı, bükülme nedeniyle değişecektir. Eğer bükülme yeterince keskinse, ışın, sınıra eşitlik (3.2)’de belirtilen tam iç yansımanın oluşabilmesi için gerekli olan minimum açıdan daha büyük bir açıyla çarpacağından, yeleğe doğru kırılır ve orada kaybolur. Küçük bükülmelerden sensör yapımında faydalanılmaktadır, fakat bükülmeler genellikle kayıp olarak algılanır.



Şekil 4.7: Düz ve bükülmüş fiberdeki ışın yayılımları.

4.3 Dispersiyon

Dispersiyon, fiber boyunca ilerleyen ışık darbelerinin dağılmaya uğramasıdır (Gloge ve diğ., 1979). Dispersiyon, fiberde yayılan ışık hızının dalga boyuna ve yayılım moduna bağlı olmasından kaynaklanır. Hızdaki değişme çok azdır, fakat aynen zayıflamada olduğu gibi, dağılma da mesafeyle birlikte artış gösterir. Dispersiyonun dört ana türü, çok modlu iletişim, kırılma indisinin dalga boyuna bağlı olması, dalga kılavuzunun özelliklerinin dalga boyuna bağlı olarak değişmesi ve ışığın iki farklı polarizasyonunun tek modlu fiberde iletilmesi sonucu ortaya çıkan modlar arası dispersiyon, malzeme dispersiyonu, dalga kılavuzu dispersiyonu ve polarizasyon dispersiyonudur.

Dispersiyon da zayıflama gibi sinyalin fiber boyunca yol alacağı mesafeyi sınırlar. Dispersiyon sinyali zayıflatmak yerine belirsizleştirir. Dispersiyon, en basit ifadesiyle, birim mesafedeki darbe dağılımı olarak tarif edilebilir. Bu durumda toplam darbe dağılımını şu şekilde ifade edilir:

$$\Delta t_{\text{mod}} = D_{\text{mod}} \cdot \ell \quad (4.7)$$

Δt_{mod} : Modlar arası dispersiyondan kaynaklanan darbe dağılımı (ns),

D_{mod} : Modlar arası dispersiyon (ns/km),

ℓ : Fiber boyu (km).

Eşitlik (4.7), çok modlu basamak indisli fiberler için çok önemli olan modlar arası dispersiyon için yazılmıştır. Bilindiği gibi modlar arası dispersiyon, fiber içerisindeki farklı modların farklı hızlarda yol almaları sonucu gerçekleşir. Dereceli indisli fiberlerin, fiber içerisinde iletilmekte olan bütün modların hızlarını eşitlediği belirtilmişti, fakat gerçek dünyada her şey teorisine uygun olarak işlemeyebilir. Bütün modların aynı hızda iletilebilmeleri için gerekli olan ideal kırılma indisi profilini gerçekleştirmek mümkün değildir. Çünkü bu indis profili dalga boyuna bağlıdır ve fiberler farklı dalga boylarındaki sinyalleri de taşıyabilirler.

Işık kaynaklarının yaydığı ışık tek dalga boyuna sahip olmayabilir. Bu durumdaki kaynağın yaydığı ışığın sahip olduğu dalga boyu aralığına kaynağın spektral genişliği denir (Temiz ve Samedov, 1999). Malzeme ve dalga kılavuzu dispersiyonunun her ikisi de sinyaldeki dalga boyu aralığına bağlıdır. Bu yüzden, birim fiber uzunluğunda (km) ve ışık kaynağının birim spektral genişliğindeki (nm) darbe dağılımını (ps) belirten ps/nm-km birimiyle gösterilirler. Malzeme ve dalga kılavuzu dispersiyonları toplanarak kromatik dispersiyonu oluştururlar. Kromatik dispersiyondan dolayı oluşan darbe dağılımı şu şekilde ifade edilir:

$$\Delta t_{\text{kromatik}} = D_{\text{kromatik}} \cdot \ell \cdot \Delta \lambda \quad (4.8)$$

$\Delta t_{\text{kromatik}}$: Kromatik dispersiyondan kaynaklanan darbe dağılımı (ps),

D_{kromatik} : Kromatik dispersiyon (ps/nm-km),

$\Delta \lambda$: Kaynağın spektral genişliği (nm).

Kromatik dispersiyon fiberin bir karakteristiği olmasına rağmen, miktarı ışık kaynağına bağlıdır. Dar spektrumlu ışık yayan lazer kaynakları kullanılarak, kromatik dispersiyondan dolayı oluşan darbe dağılımı önemli ölçüde engellenebilir.

Daha önce de belirtildiği gibi, modlar arası dispersiyon, farklı modların farklı yollar izlemesi sonucu ortaya çıkar. Çok modlu fiberlerde modlar arası dispersiyon kromatik dispersiyona göre daha etkilidir, fakat yine de ikisi birlikte ele alınmalıdır. Polarizasyon dispersiyonu, teknik olarak modlar arası dispersiyonun alt kategorisidir, fakat yalnızca tek modlu fiberlerde gözlemlenir. Modlar arası ve kromatik dispersiyon birikimsel değildirler. Yani ikisinin oluşturduğu toplam dispersiyon bulunurken, bu iki dispersiyon değeri toplanmaz. Bunun yerine aşağıdaki eşitlik kullanılır:

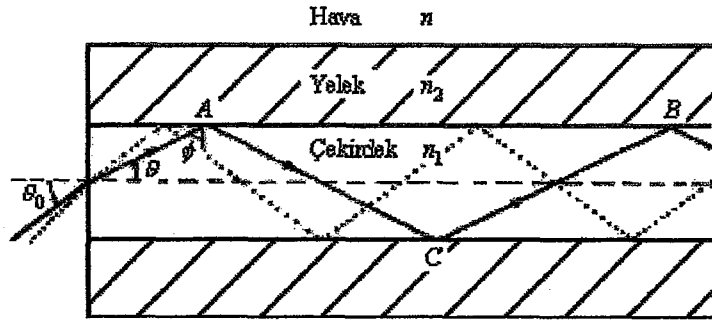
$$D_{toplam} = \sqrt{(D_{mod})^2 + (\Delta\lambda D_{kromatik})^2} \quad (4.9)$$

Toplam dispersiyonun ps/km biriminde olması için kromatik dispersiyon değeri kaynağın spektral genişliğiyle çarpılmıştır. Tek modlu fiberlerde modlar arası dispersiyon yerine polarizasyon dispersiyonu kullanıldığı için toplam dispersiyon şu şekilde ifade edilir:

$$D_{toplam(TM)} = \sqrt{(D_{polarizasyon})^2 + (\Delta\lambda D_{kromatik})^2} \quad (4.10)$$

4.3.1 Dispersiyonun Dijital İletişim Kapasitesine Etkisi

Dijital haberleşme sistemlerinde, öncelikle gönderilecek bilgi darbeler halinde kodlanır ve daha sonra bu ışık darbeleri vericiden bilginin kodunun çözüldüğü alıcıya aktarılır. Birim zamanda alıcıya ulaşan ayırt edilebilir darbe sayısı ne kadar fazla ise, sistemin iletişim kapasitesi o kadar fazladır.



Şekil 4.8: Fiber içerisinde yol alan farklı ışık ışınları.

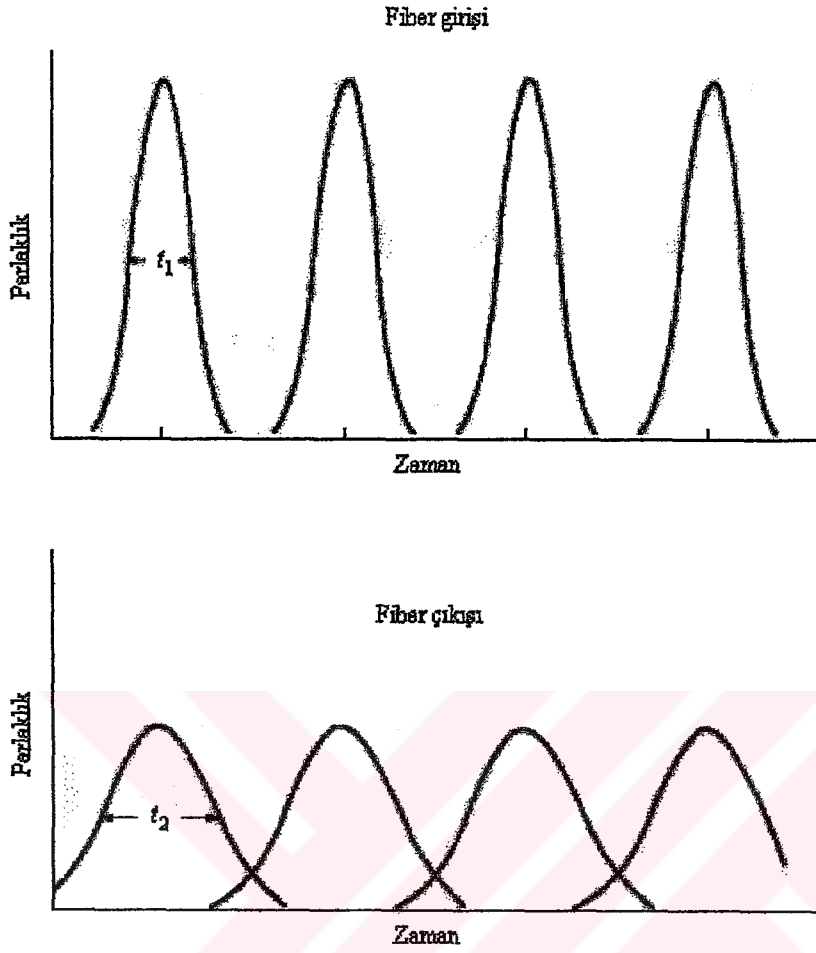
Bilindiği gibi, fiber içerisinde yol alan ışık demeti, dispersiyon nedeniyle dağılıma uğrar. Şekil 4.8’de gösterilen fiber içerisinde yol alan farklı ışık ışınlarının fiber eksenine ile yaptıkları açılar da farklı olduğundan dolayı, bu ışınların alacağı toplam mesafeler ve çıkışa varmaları için geçen süreler de farklıdır. Sonuç olarak, şekil 4.9’da da görüldüğü üzere, ışık darbeleri dağılacaktır. Fiber girişinde birbirinden ayrı olan iki ışık darbesinin, fiber çıkışında da ayırt edilebilir olması gerekmektedir. Eğer çıkış darbeleri ayırt edilebilir değilse, bilgi bozulmuş demektir. Yani dispersiyon ne kadar azsa, sistemin bilgi taşıma kapasitesi o kadar fazladır.

Şekil 4.8’deki, fiber eksenine ile θ açısını yapan ışının A ve B noktaları arasındaki mesafeyi kat etmesi için geçen süre şu şekilde verilir:

$$t = \frac{|AC| + |CB|}{c/n_1} = \frac{n_1 |AB|}{c \cos \theta} \quad (4.11)$$

Burada c/n_1 , ışığın n_1 kırılma indisli ortamdaki hızıdır. Işın yolu sürekli tekrarlanacağı için, ışının ℓ uzunluğundaki fiberde yol alması için geçen süre şu şekildedir:

$$t = \frac{n_1 \ell}{c \cos \theta} \quad (4.12)$$



Şekil 4.9: Işık darbelerinin dispersiyondan dolayı dağılıma uğramaları.

Dispersiyonun sebebi, ışın fiber boyunca yol aldığında geçen sürenin, ışının fiber eksenine yaptığı θ açısına bağlı olmasıdır. Eğer 0° ve daha önce eşitlik (3.3)'te tanımlanan $\theta_{\max}$ arasındaki bütün açılar kapsayan ışınların var olduğu varsayılırsa, fiber eksenine $\theta = 0$ ve $\theta = \theta_{\max} = \arccos(n_2/n_1)$ açılarını yapan ışınların ℓ mesafesini almaları için geçen maksimum ve minimum süreler aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$t_{\min} = \frac{n_1 \ell}{c} \quad (4.13)$$

$$t_{\max} = \frac{n_1^2 \ell}{c n_2} \quad (4.14)$$

Bu durumda, fiber çıkışındaki darbe dağılımı şu şekilde ifade edilebilir:

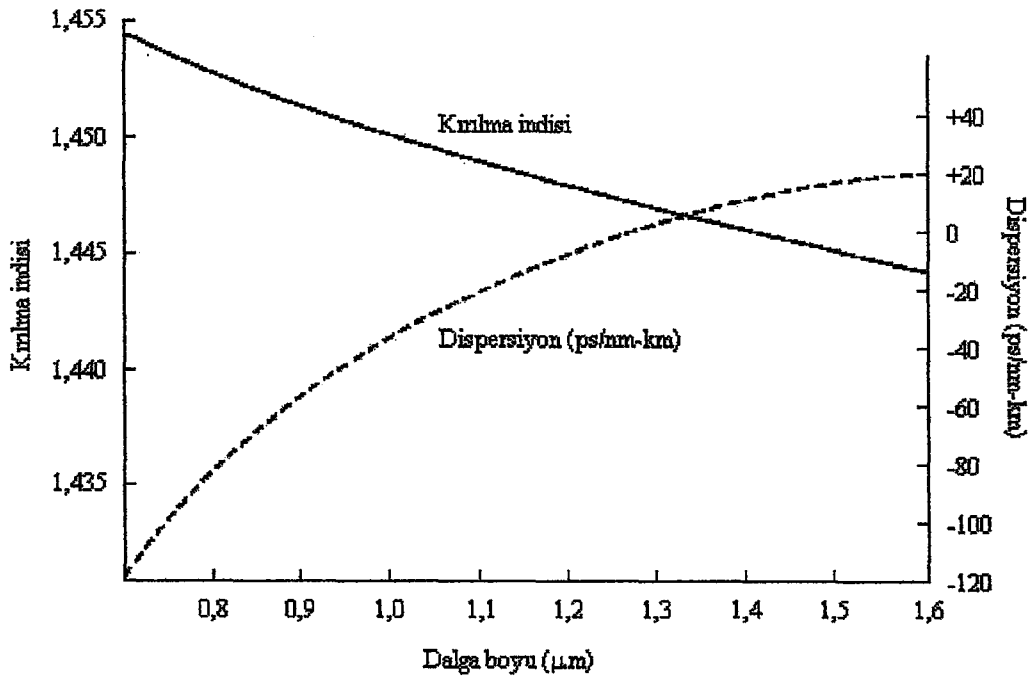
$$\Delta t = t_{\max} - t_{\min} = \frac{n_1 \ell}{c} \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) \quad (4.15)$$

Çekirdek kırılma indisi $n_1 = 1,46$ olan ve $\Delta = \%1$ 'lik bir indis değişimine sahip olan bir fiberde, giriş darbesi 1 km yol aldıktan sonra yaklaşık olarak 50 ns genişlemeye maruz kalır. Bu durumda, eğer iki darbe arasında 500 ns süre varsa, 1 km sonra darbeler ayırt edilebilir durumda olabilir, fakat eğer iki darbe arasındaki süre 10 ns ise, çıkıştaki darbeler ayırt edilemez durumda olacaktır. 1 Mbps'lik bir haberleşme sistemende, iki darbe arasındaki süre 1 μ s'dir. Bu sistem 50 ns/km'lik dispersiyona sahipse, her 3-4 km aralıkta bir tekrarlayıcı içermelidir. Bunun yanında, 1 Gbps'lik bir haberleşme sistemi 50 ns/km'lik dispersiyona sahipse, tekrarlayıcı aralığı 50 m'den daha az olur ki, bu da sistem verimliliğini ve maliyetini önemli ölçüde etkiler.

4.3.2 Dispersiyon ve Dalga Boyu

Malzeme dispersiyonu, kırılma indisinin dalga boyuyla değişmesi sonucu oluşur (Fleming, 1978). Dispersiyon da aynen soğurum gibi malzemenin kendi özelliğidir ve dalga boyuna bağlıdır. Haberleşmede kullanılan fiberler, yaklaşık olarak saf silisyum-oksit (SiO_2) oldukları için, malzeme dispersiyonları da silisyum-oksidinkine oldukça yakındır. Şekil 4.10'da, silisyum-oksidin malzeme dispersiyonunun ve kırılma indisinin dalga boyuna bağlı değişimleri gösterilmiştir.

Dikkat edilirse malzeme dispersiyonu, modlar arası dispersiyondan farklı olarak, hem pozitif hem de negatif değerler almaktadır. İşaret darbenin nasıl dağıldığını, başka bir deyişle uzun dalga boylu veya kısa dalga boylu ışınların fiber içerisinde daha hızlı yol alacağını belirler. Kromatik dispersiyonu hesaplamak için, malzeme ve dalga kılavuzu dispersiyonlarını birbirine eklerken işaret önem kazanmaktadır. Bunun yanında, toplam dispersiyon hesaplanırken kromatik dispersiyonun karesi alındığı için işaretin önemi yoktur.



Şekil 4.10: Silisyum-oksidin malzeme dispersiyonunun ve kırılma indisinin dalga boyuna bağlı değişimleri.

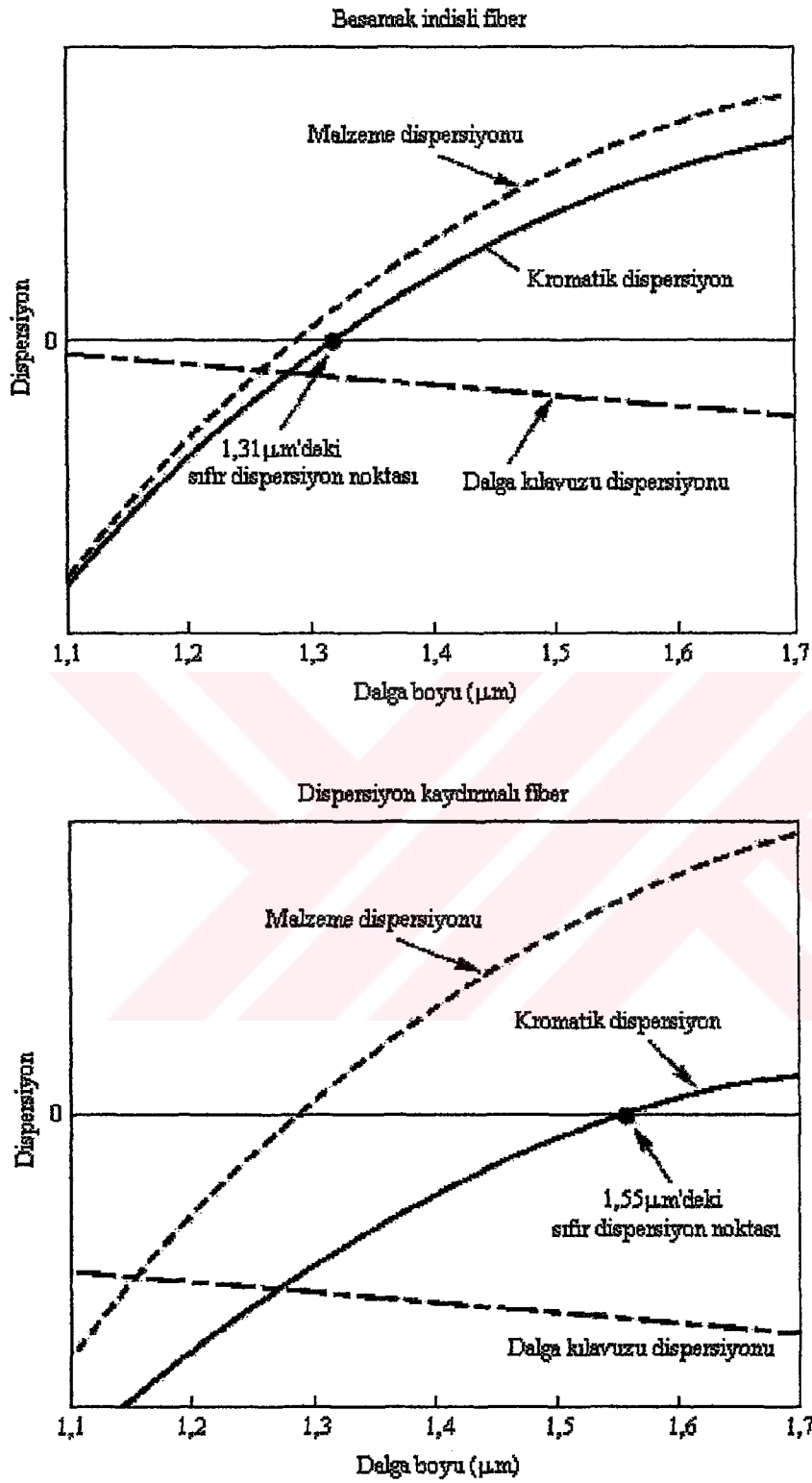
Şekil 4.10'da görüldüğü gibi, 1,1 μm'den kısa dalga boylarında malzeme dispersiyonunun genliği artmaktadır. 0,85 μm'deki yüksek malzeme dispersiyonundan dolayı, bu dalga boyundaki iletişim hızları sınırlıdır.

Dalga kılavuzu dispersiyonu ayrı bir etkidir. Bilindiği gibi dalga kılavuzu özellikleri, ışığın dalga boyunun bir fonksiyonudurlar. Sonuç olarak, dalga boyunu değiştirmek ışığın nasıl kılavuzlanacağını etkiler. Temel bir basamak indisli tek modlu fiberde dalga kılavuzu dispersiyonu küçüktür, fakat yine de önemli olabilir. Karmaşık kırılma indisi profilleri de dalga kılavuzu dispersiyonunu arttırabilir. Malzeme dispersiyonunda olduğu gibi, dalga kılavuzu dispersiyonu da, darbenin nasıl dağıldığını belirleyen pozitif veya negatif işarete sahiptir.

Daha önce de belirtildiği gibi kromatik dispersiyon, malzeme ve dalga kılavuzu dispersiyonlarının toplamından oluşmaktadır.

$$D_{kromatik} = D_{malzeme} + D_{dalga\ kılavuzu}$$

(4.16)



Şekil 4.11: Zıt işaretli malzeme ve dalga kılavuzu dispersiyonları sayesinde kromatik dispersiyonun etkisinin engellenmesi.

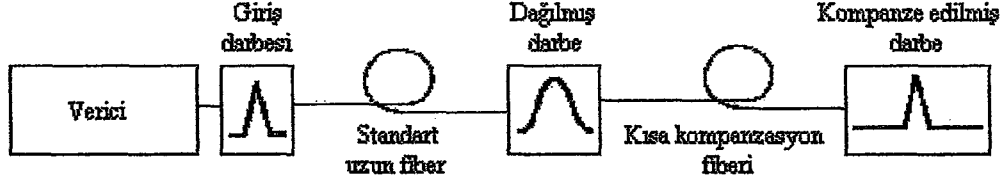
Kromatik dispersiyonun verildiği eşitlik (4.16)'daki iki terimin işaretleri önemlidir. Örneğin, kısa dalga boylu ışınların uzun dalga boylulardan daha yavaş yol almasını sağlayan malzeme dispersiyonunun etkisi, uzun dalga boylu ışınların kısa dalga boylulardan daha yavaş yol almasını sağlayan dalga kılavuzu dispersiyonu sayesinde engellenebilir. Böylece belli dalga boylarında küçük kromatik dispersiyon değerleri ortaya çıkar. Şekil 4.11'de, bu olayın basamak indisli tek modlu fiberde ve dispersiyon kaydırmalı fiberde nasıl gerçekleştiği gösterilmiştir.

Dalga kılavuzu dispersiyonu, malzeme dispersiyonuna göre dalga boyuna daha az bağlıdır. Dalga kılavuzu dispersiyonunun miktarı fiber tasarımını değiştirmekle değiştirilebilir, fakat malzeme dispersiyonu temelde bütün silisyum-oksit fiberlerde aynıdır. Katkı maddeleri eklenerek malzeme dispersiyonunda küçük değişimler elde edilebilir. Silisyum-oksit, 1,27 ile 1,29 μm arasında sıfır malzeme dispersiyonuna sahiptir. Yapılan katkılara bağlı olarak tipik değer 1,28 μm alınabilir. Şekil 4.11'de de görüldüğü gibi, dalga kılavuzu dispersiyonunu eklemek suretiyle, basamak indisli tek modlu fiberin kromatik dispersiyonu 1,31 μm 'de sıfıra indirilmiştir. Ayrıca dispersiyon kaydırmalı fiberlerdeki yüksek dalga kılavuzu dispersiyonu sayesinde, tasarıma bağlı olarak 1,55 μm veya daha yüksek dalga boylarında sıfır kromatik dispersiyon elde edilebilir.

4.3.3 Dispersiyon Kompanzasyonu

Daha önce de belirtildiği gibi, darbe dağılımı birikimseldir, yani fiber uzunluğuyla birlikte artış gösterir. Bu durumda, fiberin uzun olması haberleşme sistemini kötü yönde etkiler. Bununla birlikte, ters işaretli kromatik dispersiyona sahip fiberler sayesinde kromatik dispersiyonu engellemek mümkündür. Eğer kısa dalga boylu ışınların uzun dalga boyluların gerisinde kaldığı bir fibere, uzun dalga boylu ışınları yavaşlatan ve kısa dalga boyluların bunlara yetişmesini sağlayan ters işaretli dispersiyona sahip başka bir fiber eklenirse, kromatik dispersiyon engellenebilir. Temel fikir, bir önceki kısımda bahsedilen, belli dalga boyunda sıfır kromatik dispersiyon elde etmek amacıyla, dalga kılavuzu dispersiyonunun malzeme dispersiyonuna eklenmesininkiyle aynıdır. Şekil

4.12’de görüldüğü gibi, bu sefer iki ayrı fiber, birbirlerinin dispersiyonlarını dengelemek amacıyla, birbirlerine bağlanmıştır.



Şekil 4.12: Dispersiyon kompanzasyonu.

Dispersiyon kompanzasyon fiberi, belli dalga boyunda standart fiberin dispersiyonunu dengelemek amacıyla tasarlanmıştır. Dispersiyon kompanzasyon fiberi, zayıflamanın yanı sıra dispersiyon için optimize edildiğinden dolayı, standart fibere göre daha yüksek kayıp değerine sahiptir ve bu yüzden daha kısa boylarda imal edilir. Dispersiyon kompanzasyon fiberi sayesinde daha yüksek iletişim hızlarına çıkılabilmektedir. Kompanzasyon fiberleri, tek dalga boyunda veya 1,55 μm civarındaki dalga boyu aralıklarında çalışabilmektedir.

Art arda eklenmiş ve farklı dispersiyon değerlerine sahip iki fiber optik sistemin toplam darbe dağılımı şu şekilde verilir:

$$\Delta t_{\text{toplam}} = \Delta \lambda D_{\text{kromatik1}} \ell_1 + \Delta \lambda D_{\text{kromatik2}} \ell_2 \quad (4.17)$$

Δt_{toplam} : Toplam darbe dağılımı (ps),

$D_{\text{kromatik1}}$: Birinci fibere ait kromatik dispersiyon (ps/nm-km),

ℓ_1 : Birinci fiberin boyu (km),

$D_{\text{kromatik2}}$: İkinci fibere ait kromatik dispersiyon (ps/nm-km),

ℓ_2 : İkinci fiberin boyu (km).

Eşitlik (4.17)’den faydalananarak, 1,55 μm ’de çalışan ve kaynak spektral genişliğinin ihmal edildiği bir sistemde, +10 ps/nm-km dispersiyona sahip ve 10 km uzunluğundaki fiberin kromatik dispersiyonunun, -100 ps/nm-km dispersiyona sahip ve 1 km uzunluğunda bir kompanzasyon fiberi kullanarak dengelenebileceği söylenebilir.

4.4 Optik Fiberlerin Doğrusal Olmayan Özellikleri

Doğrusal olmayan etkiler, parlaklığın karesine veya daha yüksek dereceli kuvvetlerine bağlıdır (Agrawal, 1989). Bu yüzden düşük güçlerde zayıftırlar, fakat ışık küçük bir alana yoğunlaştırıldığında veya yüksek güçlerde bulunduğu daha güçlü olabilirler.

Bu kısımda fiber optik haberleşme sistemlerinin performansını sınırlayabilen uyarılmış Brillouin ve Raman saçılmalarından bahsedilecektir. Doğrusal olmayan bu etkiler güç yoğunluğuna, yani fiber çekirdeğindeki birim alandan geçen güç miktarına bağlıdır. Bunun anlamı, 8 μm çekirdekli tek modlu bir fiberin kendisinden 40 veya 60 kat daha fazla kesit alanına sahip olan 50 veya 62,5 μm çekirdekli çok modlu bir fibere göre, bu etkilerden etkilenme olasılığının daha fazla olmasıdır.

4.4.1 Uyarılmış Brillouin Saçılması

En düşük güçlerde ortaya çıkan doğrusal olmayan etki, uyarılmış Brillouin saçılmasıdır (Damzen ve diğ., 2002). Bu etki, sinyal gücü belli bir seviyeye ulaştığı zaman, cam içerisinde akustik titreşimler oluşması sonucu ortaya çıkar. Bu güç seviyesi, küçük çekirdekli tek modlu fiber için birkaç mW civarındadır. Akustik dalgalar, malzemenin yoğunluğunu, dolayısıyla kırılma indisini değiştirirler. Kırılma indisindeki dalgalanmalar da ışığın saçılmasına neden olur. Saçılmış olan ışık dalgasının kendisi de akustik dalgalar ürettiği için, fiberlerdeki bu sürece, uyarılmış Brillouin saçılması denmektedir.

Saçılmış olan ışık dalgasının dalga boyu, orijinal ışık dalgasınıninkine göre küçük bir değişime uğrar. Bu değişim, 1,5 μm dalga boyu için 0,0001 μm 'den daha azdır. Saçılmış olan dalga vericiye geri döner. Işık ve akustik dalga arasındaki etkileşimin uzun sürmesinden dolayı, ışık darbesi uzun olduğu zaman bu etki en güçlü halini alır.

Darbe uzunluğu azaldıkça uyarılmış Brillouin saçılmasını tetiklemek için gerekli olan güç seviyesi artacağından dolayı, yüksek veri hızlarında bu etkinin şiddeti azalır.

Uyarılmış Brillouin saçılması, ışığın bir kısmını vericiye göndererek sinyal gücünü azalttığı için, zayıflamayı artırmaktadır. Bu etkinin şiddeti, sistemde kullanılan yükseltici sayısı ile doğru orantılı olarak artar, fakat vericiye gelen ışığı engellemek amacıyla optik yalıtıcılar eklenerek bu artış engellenebilir.

4.4.2 Uyarılmış Raman Saçılması

Uyarılmış Raman saçılması, ışık dalgaları kristal kafes içindeki atomların titreşimiyle etkileştiğı zaman ortaya çıkar (Basov ve Adashko, 1982). Aslında atom ışığı soğurur ve hemen orijinal foton artı veya eksi atomun titreşim enerjisi kadar enerjiye sahip olan bir foton yayımlar. Bu sayede ışık saçılmış ve dalga boyu kaydırılmış olur.

Raman saçılmasını uyarmak için Brillouin saçılmasındakinden daha fazla güç gerektirir. Raman saçılmasına uğramış olan ışık, fiber boyunca her iki yönde ilerleyebilir. Dalga boyunun Brillouin saçılmasındaki miktardan daha fazla kaydırılması sonucu, aynı fiberde ilerleyen iki ayrı dalga boyuna sahip sinyaller birbirine karışabilir.

4.5 Optik Fiberlerin Mekanik Özellikleri

Saf cam fiberler, imal edildikleri zaman plastik bir örtü ile kaplanırlar. Bu plastik örtü, kullanımı kolaylaştırır ve fiberin dış yüzeyini fiziksel etkilere karşı korur. Birçok haberleşme fiberinde standart çekirdek çapı $125\ \mu\text{m}$ 'dir ve bu da kullanımı zorlaştıracak bir inceliktir. Plastik örtü sayesinde çap ikiye katlanarak $250\ \mu\text{m}$ 'ye çıkar.

Optik fiberler esnektirler. Standart haberleşme fiberleri, hasar görmeden, 5 cm çaplı bir daire oluşturacak şekilde bükülebilirler. Haberleşme sisteminin kurulumu sırasında, bu bükülme açısı dikkate alınmalıdır. Aslında çoğu durumda fiberler daha fazla

bükülebilmektedir, fakat yine de buna güvenilmemelidir. Geniş çaplı olan daha kalın fiberler çok fazla bükülemezler.

Mekaniksel olarak mükemmel bir fiber, uzunluğu boyunca çekildiği zaman, teorik olarak inç kare başına (1 inç=25,4 mm) 2 milyon libre (1 lb=453 gr) kuvvete dayanabilir (Kalish ve diğ., 1979). Kaçınılmaz yüzey kusurları, bu değeri pratikte 600000 lb/inç²'ye indirmiştir. İmalatçılar, fiberleri 100000 lb/inç² yük altında güvenlik testine tabi tutarlar. Bu değerin altındaki yüklere dayanamayan fiberler testi geçemezler.



BEŞİNCİ BÖLÜM

FİBER OPTİK KABLOLARIN UYGULAMA ALANLARI

Fiber optiğin en fazla kullanıldığı alan haberleşmedir (Kaminow ve Li, 2002). Optik fiberler küçük bir ofisten okyanus dibine kadar değişen ortamlardaki ışık sinyallerini taşımak için esnek ve düşük kayıplı bir taşıma ortamı sunarlar. Küçük bir ofis içinden büyük bir okyanusa kadar değişen mesafeleri, sinyalleri saniyede 10 Gbit'ler mertebesinde hızlarla taşıyarak katederler. Ayrıca optik fiberlerin görüntüleri iletmek, lazer ışınını taşımak, mesajları ve görüntüleri yaymak ve rotasyon ve basınç gibi bazı etkileri algılamak gibi çeşitli uygulamaları da mevcuttur.

5.1 Haberleşme Türleri

Haberleşme sistemleri değişik büyüklükte ve şekildedirler (Dodd, 2001). İki yerleşim birimi arasında sinyal taşıyabilir, birçok noktayı birleştirebilir veya aynı sinyalleri birçok bireysel kullanıcıya dağıtabilirler. Değişik türde sinyalleri düşük veya yüksek hızlarla taşıyabilirler. Çoğu haberleşme sistemi sabit noktaları birbirine bağlar, fakat hücresel telefonlar gibi hareketli kullanıcılara hizmet veren türleri de vardır. Optik fiberler bu gibi birçok sistemde sinyalleri iletmek için kullanılır.

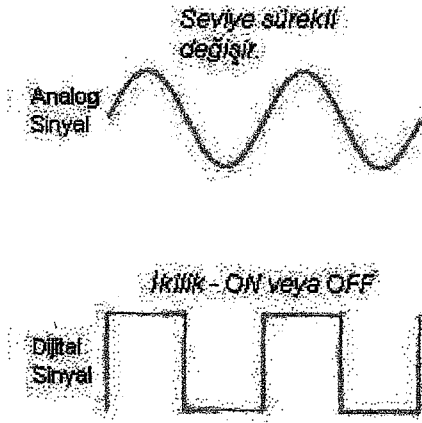
İlk bakışta haberleşme sistemleri arasındaki birçok farkı gözden kaçırmak olasıdır. Örneğin geleneksel telefon ağları ve kablolu televizyon sistemlerinin her ikisi de sinyalleri evlere dağıtırlar, fakat bu sistemlerin yapıları önemli noktalarda değişiklik gösterir. Telefon ağı, değişik yerlerdeki telefonlar arasında geçici bağlantılar kurmak amacıyla anahtarları kullanır, fakat kablolu televizyon ağı aynı sinyali bütün evlere dağıtır. İnsanlar aynı görüntü sinyallerini almak isteyebilirler, fakat asla aynı telefon görüşmelerini paylaşmak istemezler.

Sistemler arasındaki diğer farklar daha aşıkardır. Telefon ağı bütün dünyayı kapsar. Yani kendi evinizden Papua Yeni Gine'ye telefon edebilirsiniz. Tam tersine bir yerel alan ağı (Local Area Network - LAN), bir ofis veya binadaki bilgisayarları birbirlerine bağlar ve telefon görüşmeleri yerine verileri taşır. Bazı uzun mesafeli sistemler saniyede 10 Gbit'ler mertebesinde kapasiteye sahiptir.

Bankadaki kapalı devre kamera ve güvenlik monitörü arasındaki kablo gibi bazı haberleşme sistemleri özel bir işe tahsis edilmiştir. Diğerleri, özellikle de telefon sistemleri, çeşitli sinyalleri çeşitli kullanıcılar için taşıyan genel taşıyıcılardır. İnternet bütün sistemlerin bir karışımıdır. Halihazırdaki telefon ve kablolu televizyon hatları, sinyalleri evimizden bir servis sağlayıcıya taşır. Servis sağlayıcı da sinyalleri, dijital verileri çok yüksek hızlarla taşıyabilen temel ağı tahsis edilmiş olan yüksek kapasiteli hatlara yönlendirir. Temel internet sisteminin donanımı aslında telefon sistemininkiyle aynıdır, fakat bu sistemler sinyalleri değişik dijital formatlarda taşırlar.

Fiber optik kablolar tüm uzun mesafeli haberleşme ağlarında çeşitli yerlerde kullanılmaktadır. Aslında tüm haberleşme sistemlerini küresel haberleşme ağında birleştirmek mümkündür. Küresel haberleşme ağının temel yapısı şekil 5.1'de görölmektedir.

Haberleşme sistemlerinde iletişim kapasitesi sürekli artış eğilimindedir. Bu artış, bilgisayar veri iletişim hızında daha iyi gözlemlenebilmektedir. 1985'te en hızlı modemler 1200 bps hızındaydılar. Bugün ise piyasadaki en yavaş modemler 14400 bps hızındalar ve 56000 bps'lik modemler bir standart haline gelmiş durumda. Bu hız, halihazırdaki teknolojiyi kullanan çoğu mevcut telefon hattı için üst sınıra yakındır. Faks, cep telefonu ve benzeri cihazların yayılmasıyla birlikte iletişim kapasitesine olan talep daha da artmıştır. Bu talep, çok geniş kapasitesinden dolayı, fiber optik haberleşmenin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Fiber optik sistemlerin en yüksek hızı 1985'te 565 Mbps iken günümüzde 40 Gbps civarındadır.

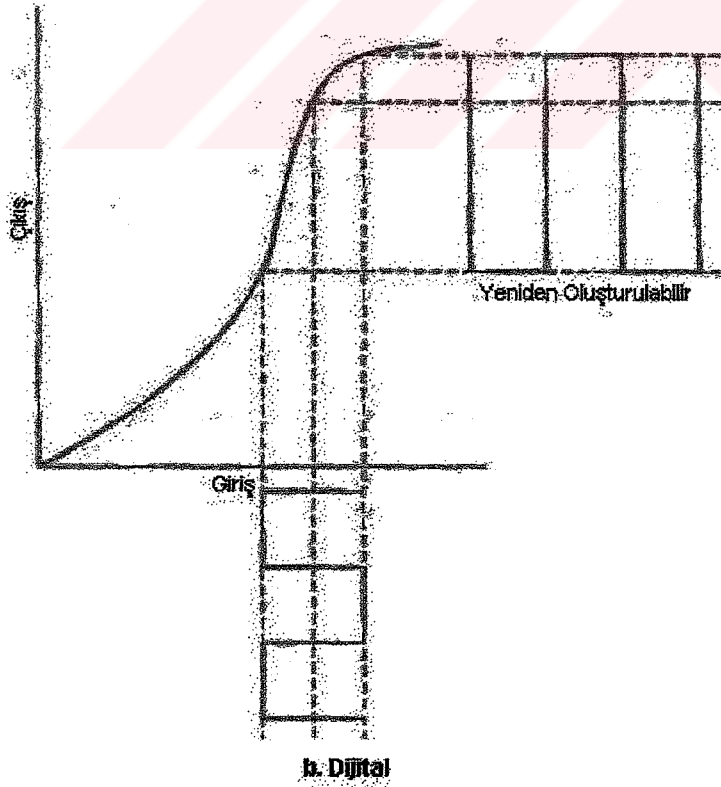
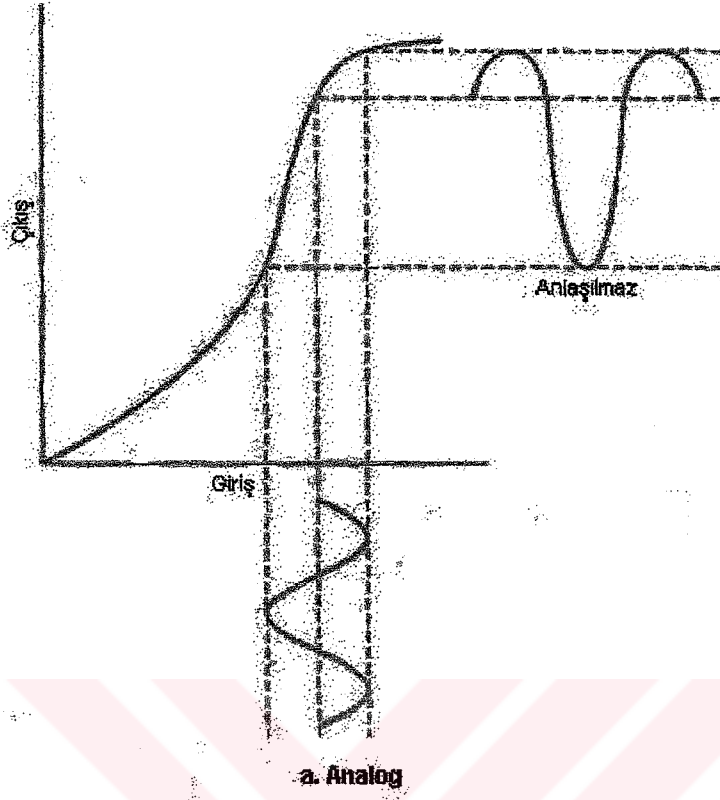


Şekil 5.2: Analog ve dijital sinyaller.

Bu yüzden ses ve görüntü iletişimi geleneksel olarak analog formda süregelmiştir. Telefon telleri telefon makinesine sürekli değişen sinyalleri taşırlar ve bu makine de elektronik sinyalleri sürekli değişen ses dalgalarına çevirir. Bunun gibi standart televizyonlar da analog sinyalleri alırlar ve bu sinyalleri resimleri ekranda göstermek amacıyla çözerler.

Günümüzde dijital sinyaller de evlerimize kadar gelmeye başlamışlardır. Dijital televizyonlar buna bir örnektir. Tabii dijital sinyallerin de gözümüz ve kulağımızın algılayabileceği görüntü ve sese dönüştürülmesi gerekir.

Diğer taraftan dijital sinyallerin elektronik ve fiber optik haberleşme sistemlerinde işlenmesi daha kolaydır. Bir sinyalin yüksek (ON) veya düşük (OFF) seviyede olduğunu anlayabilecek bir devre tasarlamak, sürekli değişen bir sinyali tam olarak kopyalayacak bir devre tasarlamaktan daha basit ve ucuzdur. Ayrıca şekil 5.3'te gösterildiği gibi dijital sinyaller bozulmaya eğilimli değildirler. Analog sinyal kendisini tam olarak yeniden oluşturamayacak bir sisteme girdiğinde, sistemin çıkışında yanlış şekilde nakledilmiş anlaşılamayan bir sinyal elde edilir. Bu, telefonda bozulmuş bir ses duymakla aynı şeydir. Bununla birlikte, dijital sinyal tam olarak oluşturulmasa bile, yine de sinyalin ON veya OFF durumunda olduğunu anlamak mümkündür. CD'lerdeki ses kalitesinin analog teyp kasetlerdekenden daha iyi olmasının sebebi de budur.

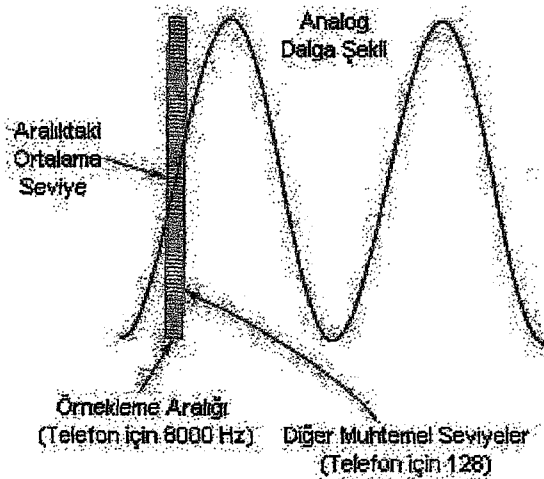


Şekil 5.3: Analog ve dijital sinyallerin bozulmaya karşı duyarlılığı.

5.1.1.1 Analog ve Dijital Sinyallerin Birbirine Dönüştürülmeleri

Şimdiye kadar insanların analog sinyallere ihtiyaç duyduğundan, fakat dijital haberleşmenin analog haberleşmeye göre birçok üstünlüğü olduğundan bahsedildi. O halde bu iki tür sinyalin birbirine dönüştürülmesi gerekir (Daughtery, 1993). Bu, ses sistemlerinde sıkça kullanılır. CD çalıcılar, hızlı dönen disk üzerindeki noktalar halindeki dijital sesi okumak için lazer ışınını kullanırlar. Daha sonra da bu dijital sesi yeniden analog hale dönüştürmek için dahili elektronik devreleri kullanırlar. Telefon ağları uzun mesafeli iletişim için, telefon makinesinden gelen analog sinyalleri dijital koda dönüştürür ve hattın diğer ucunda bu dijital kodu tekrar analog hale dönüştürür.

Şekil 5.4'te gösterildiği gibi dijital hale dönüştürme (sayısallaştırma) işlemi basittir. Analog-dijital dönüştürücü denen bir devre, analog dalga şeklini genliğini ölçerek örnekler. Örnekler aynı aralıklarla alınır. Örneğin, bir telefon ses sinyali için örnekleme aralığı saniyede 8000 kezdir. Dönüştürücü, sinyal genliğini olası seviyelerin önceden belirlenmiş numaralarından birine atar. Bir telefon devresinde, her biri 7 bit'le kodlanabilen 128 tane seviye vardır. Bu işlem, 4 kHz'lik analog telefon sinyalini, saniyede 8000 kez gönderilen 7 bit'lik grupların oluşturduğu 56000 bps'lik dijital veri akımına dönüştürür.



Şekil 5.4: Analog sinyalin dijitalleştirilmesi.

Yukarıda bahsedilenler aslında dijital haberleşmenin bir dezavantajını göstermektedir. Bir analog sinyalin yeniden oluşturulabilmesi için frekans spektrumundaki en yüksek frekanslı bileşeninden daha yüksek bir frekansla örneklenmesi gerekir. Telefon örneği için bu örnekleme frekansı, 4 kHz olan analog sinyal frekansının 2 katıdır. Yani 7 bit'in örnekleme aralığı kadar gönderilmesi gerekir. Bu çok yüksek bir bant genişliğini gerektirir. Analog ve dijital iletişim kapasiteleri arasında kesin bir eşdeğerlilik yoktur, fakat yine de karşılaştırılabilirler. 10 Mbps hızındaki dijital verileri taşıyabilen bir iletişim kanalının 10 MHz civarında bir bant genişliğine sahip olması gerekir. Ayrıca yukarıdaki telefon sinyali örneğinde de görüldüğü gibi bir analog sinyal, kendisinin dijital halindeki iletişim kapasitesinin yaklaşık onda biri kadar yer kaplar. Bu durum telefon için problem değildir, fakat kablolu televizyonun bunca yıl boyunca analog haberleşmeyi kullanmasının da sebebidir. Bu durum, dijital video sinyallerinin aynı bilgiyi taşımak için daha az bit kullanmasını sağlayacak şekilde sıkıştırılmasına imkan veren yeni teknoloji sayesinde değişmektedir.

Fiber optik kablolar dijital sinyallerin taşınması için elverişlidir ve dijital sistemlerde çok sık kullanılırlar. Fiber kablolar ayrıca dijital haberleşme için gereken yüksek iletişim kapasitesine de sahiptirler. Bunun yanında, birçok ışık kaynağı analog sinyallerin yüksek frekanslarda bozulmalarına neden olan lineersizliklere sahiptir. Dijital sistemlerin bunca avantajlarına rağmen kablolu televizyon sinyallerini dağıtmada sıkça kullanılan lineer analog fiber optik sistemler de geliştirilmiştir.

5.1.2 Uzun Mesafeli Haberleşmeler

Bilindiği gibi iletişim hızı ve mesafe arttıkça fiber optik kabloların avantajları da artar. Bu yüzden fiber optik kablolar uzun mesafeli sistemlerde daha çok kullanılırlar. Uzun mesafeli telefon taşıyıcı şirketleri fiber optik kabloları, on binlerce ses sinyalini bir ülkenin bölgeleri arasında 10'larca Gbps'ye varan hızlarda taşıyan yüksek hızlı omurga sistemleri için kullanırlar. Yeryüzünde veya uydular arasındaki iletişimi sağlayan mikrodalga sistemleri bundan daha az ses sinyalini taşıyabilirler.

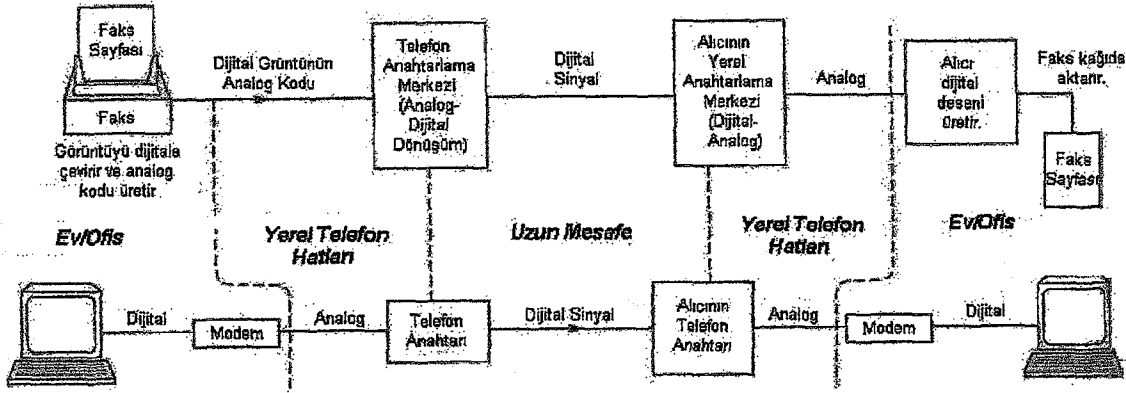
Fiber optik teknolojisi, 1970'lerin sonlarında ilk fiber kablonun canlı telefon sinyallerini taşımasından bu yana çok büyük ilerleme kaydetmiştir. İlk jenerasyon fiber sistemleri sinyalleri, tekrarlayıcılar arasındaki birkaç kilometre boyunca 45 Mbps hızında taşıyabiliyorlardı. 1980'lerin ortasındaki, ışığı daha yüksek dalga boylarında onlarca kilometre taşıyan değişik türlerdeki fiberleri kullanan üçüncü jenerasyon teknoloji 565 Mbps hızında çalışıyordu. Günümüzde kullanılan beşinci jenerasyon teknoloji, değişik dalga boylarındaki sinyalleri onlarca kilometre boyunca 40 Gbps hızında taşıyabilmektedir. Daha yüksek hızlara çıkabilmek için olan çalışmalar sürdürülmektedir. Bu yüksek hızlı sistemler kıtaları birleştiren omurga ağlarda kullanılırlar. Ayrıca bu sistemleri kullanarak denizaltı kablolar yardımıyla yüksek kapasiteli uluslar arası bağlantılar da yapılabilir.

5.1.2.1 Telefon Ağ Yapısı

Şekil 5.5'te basitçe gösterildiği gibi, bir telefon ağı birkaç hiyerarşik sisteme ayrılabilir (Bellamy, 2000). Bir ev ya da iş telefonu, bireysel aboneler ve telefon şirketi anahtarlama ofisleri (sıkça kullanılan tabiriyle santral) arasında yer alan abone döngüsü veya yerel döngünün bir parçasıdır. Trank (gövdeyol) hatları, telefon görüşmelerini bir taşra yerleşim biriminden diğerine veya merkezi şehirlere taşıyan santraller arasında çalışırlar. Uzun mesafeli telefon taşıyıcıları bölgeler arasındaki omurga sistemlerde kullanılırlar ve bu omurga sistemler okyanus aşırı kablolar ve uydular gibi uluslar arası haberleşme sistemleriyle birleşirler.

Abone döngüsü pratikte iki alt basamağa ayrılır. Bunlar; santralle dağıtım veya düşme noktası arasında olan besleyici kablo ve buralardan evlere giden bireysel kablolardır. Tipik bir santral binlerce eve hizmet verebilir, fakat her dağıtım noktası yalnızca birkaç düzine eve hizmet verir.

Hücresel telefon gibi mobil veya kablosuz haberleşme sistemlerinin sabit telefon ağıyla olan arabirimleri vardır. Radyo sinyallerini mobil telefonlara gönderen ve bu sinyalleri alan kuleler, sabit telefon ağındaki düğümler veya santral ofisleri gibi düşünülebilir. Bu kuleler sinyalleri kablolarla dağıtmak yerine radyo dalgaları olarak



Şekil 5.6: Faks ve veri sinyallerinin telefon ağına taşınması.

Telefon sistemleri analogdan dijital teknolojiye doğru hızla değişmektedir, fakat bu değişimin sonuçlarını yalnızca birkaç telefon kullanıcısı görmektedir. Bilgisayar modemlerini bu değişimin içinde sayamayız çünkü bu cihazlar bilgisayardan aldıkları dijital verileri, analog telefon hatlarında kullanılabilmeleri için analog forma dönüştürürler. Modem telefon hattına bağlandığında duyduğumuz sesler bu analog sinyallerden gelir. Çoğu ev ile telefon sistemi arasında hala analog bağlantılar mevcuttur.

Kabloların birçok telefon sinyalini eşzamanlı olarak taşımalarını sağlayan çoğullama (multiplexing) tekniği telefon ağlarında sıkça kullanılır. Yalnızca evlerle santraller veya dağıtım noktaları arasındaki yerel döngüde, bir görüşme bütün kablo çiftlerine yönlendirilir. Birçok telefon hattından gelen sinyaller, tek bir kabloyla yapılacak olan eşzamanlı iletişim için santralde veya dağıtım noktasında birleştirilirler. Bu birleştirme işlemine çoğullama da diyebiliriz. Çoğullama işlemi sayesinde iletişim hızı ve bir kabloda taşınabilecek olan ses sinyali sayısı artar. Daha önceleri sinyaller, farklı frekanslara atanma yoluyla analog hatlarda çoğullanıyordu. Şimdilerde ise çoğullayıcılar, düşük hızdaki birçok dijital sinyali (örneğin 56 kbps) daha hızlı tek bir dijital sinyal oluşturmak için birleştirirler.

Telefon ağındaki fiber haberleşmede kullanılan en düşük hız 1,5 Mbps'dır. Bu hız T1 hatları diye adlandırılan, evlere veya işyerlerine hizmet veren dağıtım noktalarındaki bağlantılar için geçerlidir. Tabii değişik ülkeler için değişik hızlar söz konusudur. Telefon şirketleri fiber optik kabloların, yüksek iletişim kapasitesi ve düşük sinyal

zayıflaması değerlerinden dolayı çok avantajlı olduklarını fark etmişlerdir. Fiber kablolar eski metal kablolardan daha az yer kaplarlar. 4 adet fiber kablo yalnızca 1 adet metal kablo taşıyan yer altı kanalına sığabilir. Fiber kablolar için yeni kanallar kullanılmayacağı için maliyetten de tasarruf sağlanacaktır. Fiberlerin değişik uygulamalar için önemli olabilecek başka avantajları da vardır. Fiber optik kablolar elektriksel iletkenlerden yapılmadıkları için tehlikeli akım darbeleri de taşımazlar. Ayrıca fiberlerde taşınan sinyaller elektromanyetik girişimden etkilenmezler. Fiberlerin yüksek kapasitesi, gelecekteki muhtemel uygulamalar için de yeterince yer bırakmaktadır. Bu, sürekli araştırma halinde olan haberleşme planlayıcıları için çok önemlidir.

5.1.2.2 Denizaltı Fiber Kablolar ve Uydular

Fiber optik teknolojisinin en dramatik başarısı, muhtemelen birçok uydu haberleşme sisteminin yeryüzüne dönmesine sebep olan okyanus aşırı kablo sistemlerinin geliştirilmiş olmasıdır. Tarih teknolojinin nasıl ve ne kadar hızlı biçimde değiştiğini göstermektedir.

1920'lerde, görüşmeleri taşımak için kısa dalga radyo bandını kullanan radyo-telefonların geliştirilmesiyle sesler ilk defa Atlantik'i aşmıştır. Yalnızca birkaç kanal kullanılabilirdi, ses kalitesi oldukça düşüktü ve görüşme ücretleri de çok pahalıydı. 1956'da ilk elektronik telefon kablosu olan özel amaçlı koaksiyel kablo TAT-1, 36 ses sinyalini taşıyarak Atlantik'i geçmiştir. 1976'ya kadar geçen süre boyunca kablo mühendisleri çeşitli sistemler geliştirmişlerdir. 1976'da geliştirilen TAT-6 isimli kablo 4000 ses sinyalini taşımıştır. 1980'de ilk okyanus aşırı fiber optik kablo TAT-8'in geliştirilmesi için planlara başlanmıştır. Kablo, planlanandan birkaç ay sonra 1988'in sonlarında çalışmaya başlamıştır. TAT-8 550 Mbps'lik bir kapasiteye sahipti. 1998'in başlarında denizaltı fiber kablo kapasitesi 10 Gbps'ye varmıştır. Uydular hala veri, faks, mobil telefon ve video sinyallerinin iletilmesinde kullanılmaktadır, fakat fiber optik kablolar, uzay çağı teknolojisini ses ve telefon trafiği için kullanılmaz hale getirmişlerdir.



Şekil 5.7: Dünyadaki planlanan veya çalışan denizaltı fiber optik hatları.

Deniz altı fiber optik kablolar küresel haberleşme ağında kritik bir rol oynamaktadırlar (Consulting, 2001). Uzun tekrarlayıcı mesafesi ve yüksek kapasiteye olan ihtiyaç, değişik uygulamalarda kullanılan yeni jenerasyon fiber teknolojilerinin geliştirilmesine neden olmuştur. TAT-8 üzerindeki çalışmalar, bugünlerde yeryüzü haberleşme ağının omurgasını oluşturan fiber optik sistemler için bir ön hazırlık niteliğindedir. 1998 yılı itibarıyla dünya üzerindeki denizaltı fiber optik hatları şekil 5.7’de görülmektedir.

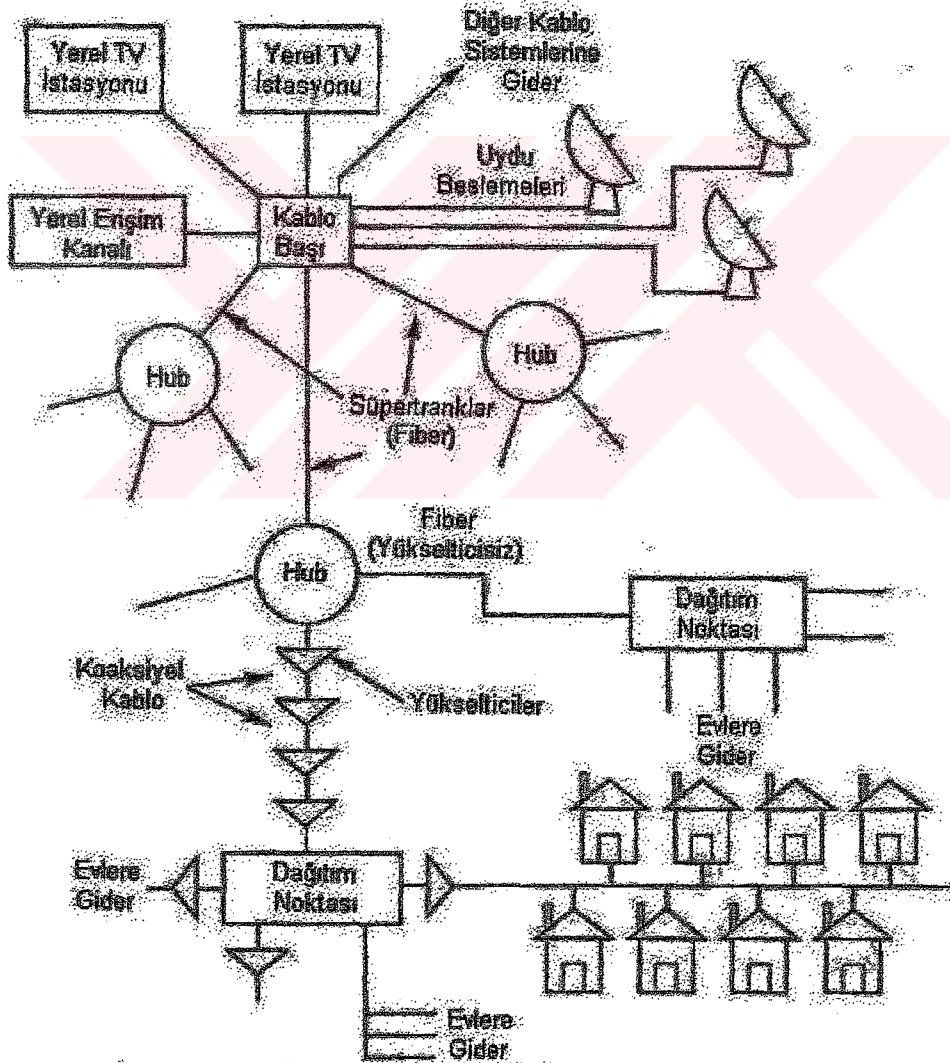
5.1.2.3 Kablolu Televizyon ve Video Haberleşmesi

Kablolu televizyon veya CATV (Community Antenna TeleVision) sistemleri aynı video kanallarından oluşan kümeyi bütün abonelere sunmak amacıyla yapılmışlardır (Yates ve diğ., 1990). Bu yüzden, telefon ağlarında olan ve görüşmeleri bireysel telefonlara yönlendirmeye yarayan anahtarlara sahip değildirler. Bu sistemde iletişim tek yönlüdür ve evlerden gönderilen sinyaller taşınmaz. Bu durum değişmektedir, fakat tasarımlar, mevcut ağı yeniden inşa etmektense, eldeki ekipmanları terfi etmeye dayanmaktadır.

Kablolu televizyon ağının geleneksek mimarisi şekil 5.8’de görülmektedir. Uydulardan ve televizyon istasyonlarından gelen sinyaller. Kontrol merkezi veya kablo başı (head-end) diye adlandırılan yerde toplanır. Burayı sistemin kalbi olarak adlandırabiliriz. Kablo başı çeşitli kaynaklardan gelen video sinyallerini birleştirir ve bunları bölgesel hub’lara gönderir. Hub’lar da sinyalleri dağıtım noktalarına gönderir ve sinyaller buradan evlere dağıtılır. Bu seviyelerin sayısı hizmet verilecek olan abonelerin fazlalığına bağlıdır.

Kablo başları ve hub’lar arasındaki hatlar süpertrank diye adlandırılır. Süpertrankların 30 ile 100 arasındaki video kanalını kablo başından kilometrelerce uzakta bulunan hub’lara taşınması gerekmektedir. Abonelere vardığında sinyal kalitesinin yeterli olabilmesi için çıkıştaki sinyal gürültü oranının (signal-to-noise ratio – SNR) en azından 53 dB olması gerekmektedir. Daha önceleri sinyalleri bu mesafelere göndermek için koaksiyel kablo veya mikrodalga verici kuleleri kullanılıyordu. Bu

sistemler çok gürültülüydüler ve bu, o zamanlar yayın istasyonlarına göre daha iyi bir iletişim kalitesini hedefleyen kablolu televizyon şirketleri için büyük bir problemdi. Koaksiyel kablolu sistemler, her biri 0,5 ile 0,6 km arasında yerleştirilen birçok kuvvetlendirici veya tekrarlayıcıya ihtiyaç duyarlar. Bu tekrarlayıcıların her birinden kaynaklanan hatalar tüm sistemin çökmesine dahi sebep olabilir. Tüm bu problemlerin üstesinden gelmek amacıyla, 1980'lerin sonlarından itibaren süpertranklarda fiber kablolar kullanılmaya başlamıştır. Tipik olarak sinyaller bir kablo kılıfı içindeki birçok fiber arasında paylaşırlar.



Şekil 5.8: Geleneksel kablolu televizyon sistemi.

Artık hub'lar ve dağıtım noktaları arasındaki koaksiyel kabloların yerine de fiber optik kablolar kullanılmaya başlamıştır. Hub'lar ve dağıtım noktaları arasındaki uzun yükseltici zincirlerinden kurtulmak kablo şirketleri için büyük bir ilerlemedir. Bu yükselticiler sistemde gürültü ve hatalara sebep olurlar. 500 ile 2000 arasındaki eve hizmet veren yeni kablo sistemleri her nokta arasında fiber kabloları kullanırlar.

Video sinyalleri ses sinyallerinden daha fazla bant genişliğine ihtiyaç duyarlar. Bu yüzden kablolu televizyon sinyallerini dağıtmaya yarayan ağın kapasitesi telefon sinyallerini dağıtmaya yarayan abone döngüsünün kapasitesinden daha fazladır. Başlangıçta, her biri yayın frekansı civarındaki değişik frekanslara tahsis edilen birkaç düzine analog video kanalını taşıyabilen koaksiyel kablolar kullanılmıştır. Kablo başı (head-end) olarak da adlandırılan santral tesisi, aynı video sinyallerini ağaç mimarisinde dağıtılmış olan kablolar vasıtasıyla bütün evlere gönderir. Bazı şirketler video sinyallerini evlere kodlanmış formda gönderirler. Bu kodlanmış sinyaller evlerdeki kablo kutuları veya şifre çözücü cihazlar tarafından çözülürler.

Fiber kablo birçok dağıtım ağında koaksiyel kablonun yerini almıştır çünkü daha az sinyal zayıflamasına sahip olduğundan kuvvetlendirici veya tekrarlayıcılara çok fazla ihtiyaç duymaz. Bununla birlikte standart televizyon sinyalleri analog olarak iletmeye devam edilmektedir. Dijital televizyonların yaygınlaşmaya başlamasıyla birlikte televizyon sinyalleri de dijital formda iletilecektir.

Mevcut kablo sistemleri bazı yönleriyle telefon abone döngüsünü andırır. Fiberler veya koaksiyel kablolar sinyalleri santral tesisinden uzak noktalara taşırlar. Sinyaller buradan da koaksiyel kablo vasıtasıyla bireysel evlere dağıtılır. Modern sistemlerde bant genişliğinin küçük bir kısmı evlere gönderilen ve evlerden gelecek olan ses ve veri sinyalleri için ayrılır ve biraz anahtarlama kapasitesi de sisteme eklenmiş olur.

Fiber optik kablolar ayrıca birçok video sinyalini kablolu televizyon ağının dışına taşımak amacıyla da kullanılırlar. Daha küçük, daha hafif, fazla kapasiteli olmaları ve koaksiyel kablolarla göre gürültüden daha az etkilenmeleri sebebiyle stüdyolar ve prodüksiyon tesisleri de fiber kabloları kullanır. Fiber kablolar ayrıca olimpiyat

oyunlarında olduğu gibi geçici haberleşme sistemlerinin kurulmasında da sıkça kullanılırlar. Fiber optik olimpiyat haberleşme sistemi ilk kez 1980’de, New York’taki Kış Oyunları sırasında yedek sistem olarak kullanılmıştı, fakat klasik koaksiyel kablo sisteminden daha iyi çalıştığı görüldünce bu oyunlarda da birçok video sinyalinin taşınmasında kullanılmıştı.

5.1.2.4 İnternet ve Veri Haberleşmesi

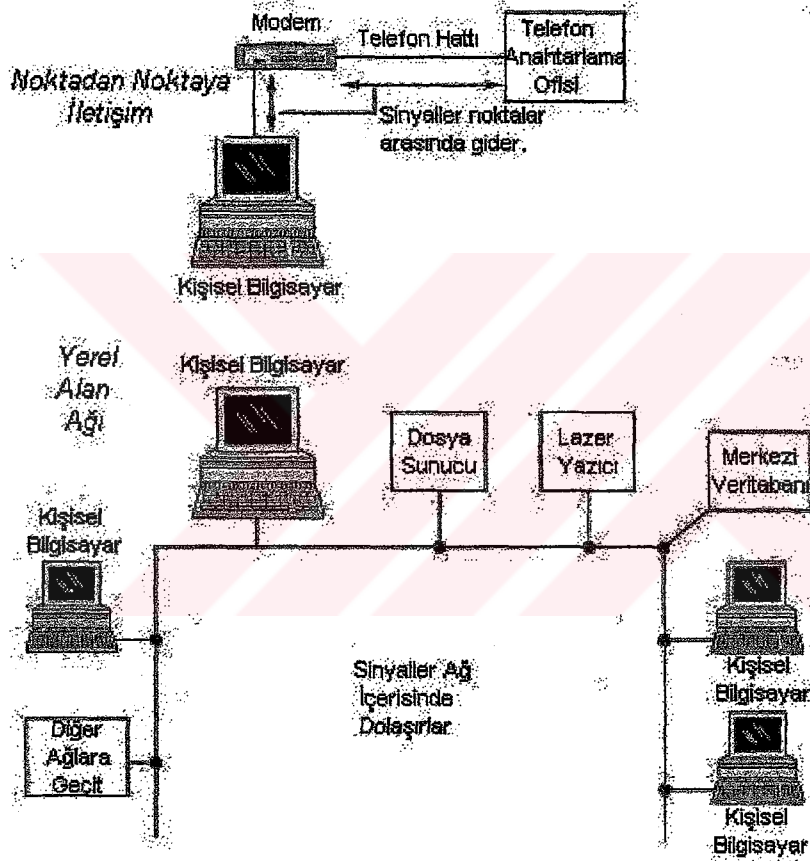
Fiber optik kablolar bilgisayar veri haberleşmesinde iki farklı rol oynarlar. Fiberler, internet omurga haberleşmesinde ve servis sağlayıcıların omurgayla olan yüksek hızlı bağlantılarında sıkça kullanılır (Laubach ve diğ., 2001). Fiberler ayrıca bilgisayar ağıının bir parçası olarak, bilgisayar verilerinin yerel iletişimi için de kullanılır.

İnternet omurga sistemi de diğ er haberleşme sistemlerine benzer ve diğ erleri gibi yüksek kapasiteye ihtiyaç duyması sebebiyle fiberleri kullanır. Optik donanım temelde aynıdır, fakat farklar veri transfer protokollerinden kaynaklanır. İnternet servis sağlayıcılarının telefon şirketleriyle ve internet omurga sistemiyle olan bağlantılarında da fiber optik kablolar kullanılır.

Yerel veri haberleşmesi diğ erlerinden farklıdır, çünkü değışik bir teknoloji içerir. Tipik olarak veriler aynı bina veya binalardan oluşan kampüsteki bilgisayarlar arasında taşınırlar. Veriler noktadan noktaya, bir çift bilgisayar arasında veya bir bilgisayar ve ayrı bir cihaz arasında taşınabilir. Alternatif olarak, şek il 5.9’da görüldüğü gibi, veriler birçok bilgisayarı birbirine bağlayan ağlar üzerinde de taşınabilir. Değışik seviyelerde ağlar mevcuttur: Bir yerel alan ağı (Local Area Network – LAN) bir işyerinin bir katındaki veya bir birimine ait olan bütün cihazları birbirine bağlayabilir. Daha geniş olan geniş alan ağları (Wide Area Network – WAN) ayrı LAN’lar arasındaki yüksek hızlı bağlantıları gerçekleştirir. WAN’lar bir bakıma ağların ağdırlar.

Kişisel bilgisayarlar için olan veri haberleşmesi genelde düşük hızlı ve kısa mesafeli olduğundan fiberin uzun mesafe ve yüksek hızına pek ihtiyaç duymaz. Bununla birlikte diğ er faktörler bazı durumlarda ibreyi fiber yönüne çevirebilir. Fiberler elektrik akımı

taşımadıklarından dolayı güç istasyonları gibi gerilim izolasyonunun önemli olduğu yerlerde veya rafineriler gibi patlayıcı bir ortamdaki sinyallerin taşınması için kullanılabilirler. Fiberler elektromanyetik girişim ve ani güç darbelerinden etkilenmedikleri için yüksek binalardaki asansör boşluklarında güç kablolarının yanında gürültüden etkilenmeden çalışabilirler. Fiberler elektromanyetik sinyaller yaymazlar ve bir fiber hattına girip veri sızdırmak çok zordur. Bu yüzden fiberler askeri birimlerdeki güvenlik haberleşmesinde ve finanssal uygulamalarda sıkça kullanılır.



Şekil 5.9: Değişik veri iletişim sistemleri.

Veri iletişim hızındaki sürekli artış, birçok bilgisayarı birbirine bağlayan veya LAN'ları birbirine bağlayan ağlarda fiberlerin kullanılmasına sebep olmuştur. 10 yıl kadar önce 10 Mbps'lik ağlar iyi kapasiteli olarak görülüyordu, fakat günümüzde grafik veri iletişiminin artan hacmiyle başa çıkabilmek için 100 Mbps ve 1 Gbps'lik ağlar geliştirilmiştir. Ağı daha güçlü sunucu bilgisayarlarda depolanmış olan dosya ve uygulama programlarına erişmek amacıyla kullanan ağ bilgisayarları, kendi dosya ve

uygulama programlarını depolayabilen kişisel bilgisayarlara nazaran daha yüksek hızlı ağ bağlantılarına ihtiyaç duyarlar.

Kısacası fiber optik ağlar, metal kablo kullanan ağlara göre daha yüksek iletişim hızına sahiptir. Bununla birlikte bazı işyerleri fiber optik ağları gelecekteki muhtemel gelişmelere bir nebze ayak uydurabilmek amacıyla kullanmışlardır. Çünkü ağ kurulumu pahalı bir iştir ve şimdi ihtiyaç olmadığı gözükse bile önümüzdeki 5 yıl içinde fiber optik ağların metal kablo kullanan ağların yerini alacağı düşünüldüğünde bunun akıllı bir yatırım olduğu görülür.

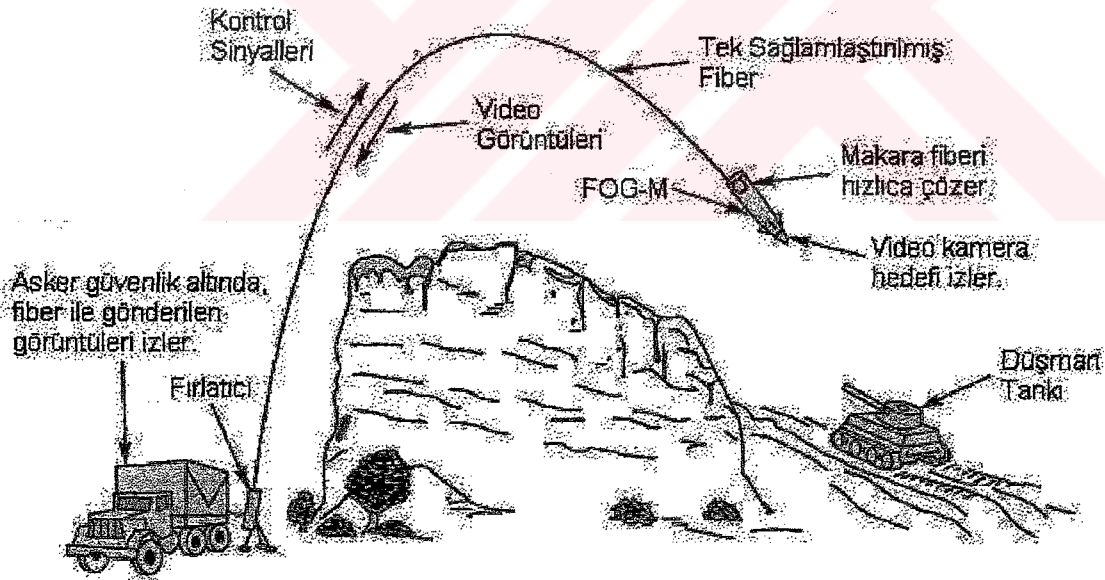
Noktadan noktaya iletişim ve ağlar arasındaki farklılıklar bilgisayar haberleşmesi için önemlidir. Metal kablolar, iki noktayı bağladıkları kadar kolay bir şekilde birçok noktayı bağlayabilirler. Fiber optik kablolarda ise sinyalleri birleştirmek ve dağıtmak daha zordur. Sonuç olarak fiber optik ağlar metal kablo kullanan ağlara göre daha farklı bir topolojiye sahiptirler.

5.1.3 Mobil ve Askeri Haberleşme

Fiberler hafif ve ince olmaları ve elektromanyetik girişimden etkilenmemeleri sebebiyle uçak, gemi ve otomobil tasarımcılarının ilgisini çekmiştir. Bu araçlar git gide daha karmaşık elektronik devreler içermekte ve daha fazla dahili haberleşme kapasitesine ihtiyaç duymaktadır. Bu sistemler uzun mesafeli haberleşmede kullanılan sistemlerden daha farklıdır. Birçok yeni uçak ve gelişmiş gemiler fiber optik kabloları, kontrol ve haberleşmede kullanılan sinyallerin taşınması için kullanmaktadır. Elektromanyetik girişim elektronik donanımla donatılmış olan kontrol odaları için çok önemli bir kavramdır. Örneğin uçaklarda ve otobüslerde, cep telefonları ve diz üstü bilgisayarlar aracın kontrolünü kötü yönde etkileyebilirler. Fiberler bu tip gürültülerden etkilenmedikleri için ve ayrıca ince ve hafif olduklarından dolayı uçaklar için çok uygundur. Askeri uçak ve gemi tasarımcılarının elektromanyetik girişime daha fazla dikkat etmeleri gerekmektedir, çünkü düşmanlar elektronik sistemi çökmek amacıyla kasten sinyal yayabilir. Sinyallerin iletilmesi için fiber kabloları kullanmak sistemin saldırıya uğrama olasılığını azaltır.

Fiber optik kabloların askeri alandaki uygulamalarına örnek olarak şekil 5.10'da görülen FOG-M güdümlü füze sistemini verebiliriz. Güdümlü füzeler, bombaları hedeflerine taşımaya yarayan ve ölümcül görevlerde kullanılan basit robotlar olarak düşünülebilir. Pentagon, savaş alanlarında kullanılan kısa menzilli bir füzeye gelen ve giden kontrol sinyallerini taşımak için sağlamlaştırılmış bir optik fiberi kullanan bir sistem geliştirmiştir. Böylece füzeyi hedefe yönlendiren asker güvenli bir yere saklanabilir.

FOG-M sisteminde, füze üzerindeki video kameradan gelen görüntüler füzeyi hedefe yönlendiren askere gönderilir. Füze, bir ucu fırlatıcıda olan çıplak ve sağlamlaştırılmış bir optik fiber ile birlikte fırlatılır. Video görüntüsüne bakan asker füzeyi hedefe yönlendirmek için gereken kontrolleri gerçekleştirir. Asker füzeyi çarpışmaya kadar izleyebilir.

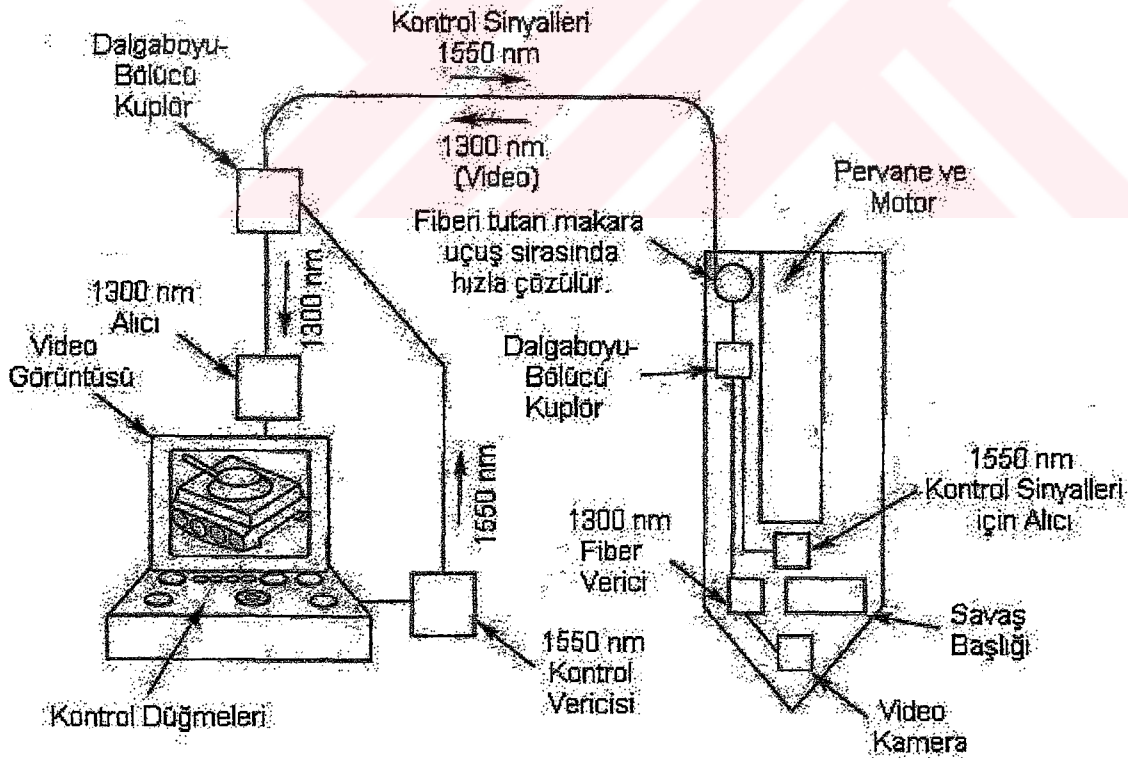


Şekil 5.10: FOG-M füze sisteminin çalışması.

FOG-M sisteminde füzeyi yönlendiren asker güvendedir. Bu lazer güdümlü bombalara göre bir avantajdır çünkü bu sistemlerde operatör, lazer ışınıni hedefe yönlendirmek için hedefle aynı hizada bulunmalıdır. Füzeler metal kablolar yardımıyla da yönlendirilebilir, fakat bu kablolar daha iyi bir yönlendirmeye imkan veren video

görüntülerini taşıyamazlar. Ayrıca elektromanyetik girişimden etkilenmediği için de bu sistem kontrol sinyallerini hava yoluyla gönderen ve alan kablosuz haberleşme sistemlerine göre daha avantajlıdır. Yalnızca bir fiber optik kablo küçük ölçüler, hafiflik, sağlamlık, düşük zayıflama ve video sinyallerini 10 veya 20 km iletebilecek kadar bant genişliği gibi özellikleri kendi üzerinde barındırır.

FOG-M sisteminin temel donanımı şekil 5.11'de gösterilmiştir. Füze bir video kamera, bir fiber optik video vericisi, düşük bant genişliğinde bir alıcı ve özel bir fiber makarasını içerir. Fiberin bir ucu, füze ateşlendikten sonra geride kalması amacıyla fırlatıcıya bağlanmıştır. Füze hedefine doğru giderken, fiber kablo savaş alanı üzerinden uzun bir kavis yaparak hızlıca makaradan çözülür. Makara çok önemli bir elemandır çünkü eğer doğru oranda çözülmezse fiber dolanabilir veya kırılabilir. Kamera video görüntülerini fırlatıcıdaki askere gönderir ve asker de hedefi görüş alanındaki uygun bir yerde tutmak için kontrol sinyallerini fiber vasıtasıyla füzeye geri gönderir.



Şekil 5.11: FOG-M sisteminin temel donanımı.

FOG-M, sinyalleri zıt yönlerde göndermek için WDM (Wavelength Division Multiplexing) metodunu kullanır. Bu çizimde füzeden gelen video sinyalleri 1300 nm'de düşük dispersiyonla gönderilir. Düşük bant genişliğine sahip kontrol sinyalleri ise zıt yönde 1550 nm'de gönderilirler.

Otomobil tasarımcıları da fiber optikteki potansiyelin farkına varmışlardır. Modern arabalardaki, yapımı, kurulumu ve tamiri pahalı olan karmaşık kablo donanımının basitleştirilmesi önemli bir problemdir. Radyo vericileri gibi harici veya elektrik arkı gibi dahili kaynaklardan gelebilecek elektromanyetik girişim bazı arabaların elektronik donanımını etkileyebilir.

Haberleşme modern savaş alanları için de önemlidir çünkü askerler, karargahlarda kurmak üzere sistemlerini yanlarında taşırlar. Ordular ağır bakır kabloları kullandıktan sonra hafif ve daha sağlam olan fiber optik kabloya geçmişlerdir, fakat şimdilerde savaş alanlarında kullanılmak üzere kablosuz haberleşmeye doğru bir geçiş vardır. Bazı diğer askeri haberleşme sistemleri hala fiber optik kablo kullanmaktadır.

Görüldüğü gibi fiber optik kablolar, yüksek iletişim kapasitesi, hafifliği, elektromanyetik girişimden etkilenmemesi gibi avantajlarından dolayı birçok haberleşme sisteminde, özellikle de uzun mesafeli haberleşme sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu arada fiber optik teknolojisi haberleşme dışındaki birçok alanda da gelişme göstermektedir. Bunlara örnek olarak aydınlatma ve görüntülemeye kullanılan fiber optik yığınlarını, insan vücudunun içini görüntülemek ve hastalıkları ışıkla tedavi etmek için kullanılan endoskopları ve rotasyon, basınç, ses dalgaları, manyetik alanlar ve diğer birçok niceliği ölçmeye yarayan optik sensörleri verebiliriz.

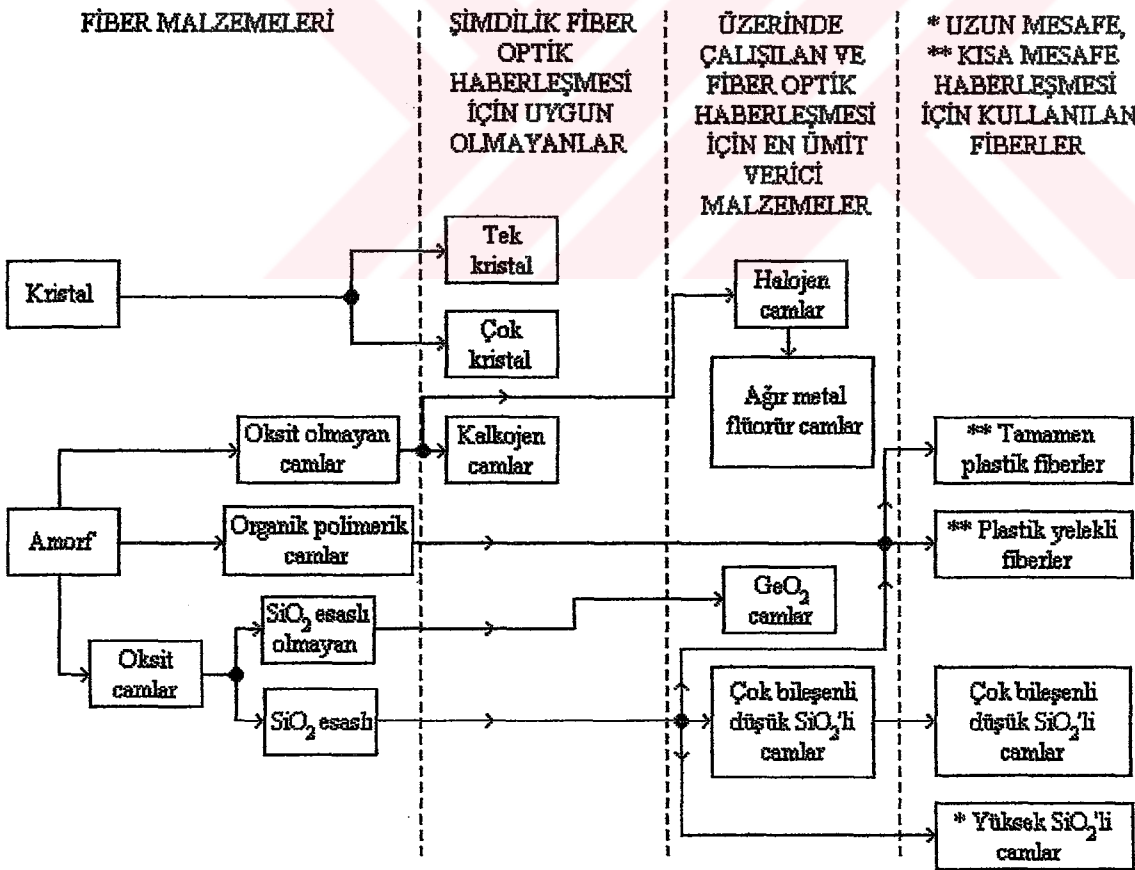
Bunlar günümüzün fiber optik uygulamalarıdır. Fiber optikle ilgili yeni teknolojiler de geliştirilmektedir. Örneğin fiber optik sistemler, yeni ve mevcut iletişim hizmetlerini evlere ve işyerlerine taşımak için gelişim içerisinde. Telefon ve kablolu televizyon şirketleri bu konudaki gelişmeleri yakından takip etmektedirler.

ALTINCI BÖLÜM

FİBER OPTİK ÜRETİMİ

6.1 Fiber Malzemeleri

Fiber üretiminde kullanılacak olan malzeme, çeşitli gereksinimleri sağlamalıdır. Örneğin, bu malzemeden uzun, ince ve esnek fiberlerin yapılması mümkün olmalıdır. Bunun yanında, fiberin ışığı yeterince kılavuzlayabilmesi için, malzeme belirli bir optik dalga boyu aralığında şeffaf olmalıdır. Ayrıca çekirdek ve yelek bölgelerini oluşturmak için, birbirine yakın kırılma indisi değerlerine sahip malzemeler kullanılmalıdır. Bütün bu gereksinimleri sağlayan malzemeler, camlar ve plastiklerdir. Şekil 6.1'de fiber yapımında kullanılan veya halen üzerinde çalışmalar yürütülen ana malzemeler gösterilmiştir.

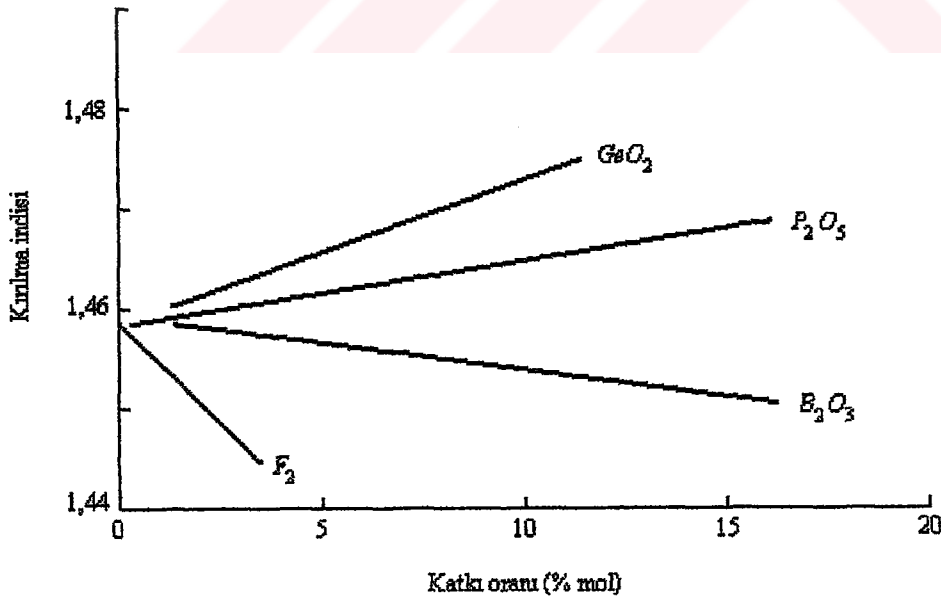


Şekil 6.1: Fiber yapımında kullanılan veya üzerinde çalışmalar yürütülmekte olan malzemeler.

Günümüzde kullanılmakta olan fiberlerin bir çoğu SiO_2 'ten (silisyum-oksit) yapılmıştır. Kısa mesafeli haberleşme için kullanılan geniş çekirdekli ve yüksek kayıplı fiberlerden, uzun mesafeli haberleşme için kullanılan düşük kayıplı ve çok şeffaf fiberlere kadar bir çok cam fiber çeşidi mevcuttur. Plastik fiberler, daha yüksek zayıflama değerlerine sahip oldukları için cam fiberler kadar sık kullanılmazlar. Plastik fiberler kısa mesafeli uygulamalarda ve cam fiberlere göre daha yüksek olan mekaniksel güçlerinin bir avantaj teşkil ettiği durumlarda kullanılırlar.

6.1.1 Cam Fiberler

Cam oksit, sülfür veya selenür'lerin eritilmiş karışımlarından imal edilmektedir (Nagel, 1988). Camlar kristal yapıda olmadıkları için, karışımın sonucunda oluşan molekül ağ yapısına rastgele bağlanırlar. Bu rasgele işlemin bir sonucu olarak, camlar kesin erime sıcaklığı değerine sahip değildirler. Cam, oda sıcaklığından başlayarak ısıtıldığı zaman, birkaç yüz dereceye kadar katı halde kalır. Sıcaklık arttıkça, cam dereceli olarak yumuşamaya başlar ve çok yüksek sıcaklık değerine ulaşıldığında yüksek yoğunluktaki sıvı halini alır. Cam imalatında, erime sıcaklığı terimi sıklıkla kullanılır. Bu terim, camın akışkan olmaya başladığı sıcaklık aralığını belirtmektedir.



Şekil 6.2: Çeşitli katkılar için, kırılma indisinin katkı oranına bağlı değişimi.

Fiber yapımında kullanılan şeffaf camların çoğunu oksit camlar oluşturur (Bansal ve Doremus, 1986). Bunların içerisinde de en yaygını, 850 nm dalga boyunda 1,458'lik kırılma indisine sahip olan, SiO_2 'tir. Çekirdek ve yelek için yakın kırılma indisli iki malzeme üretmek amacıyla flüor veya B_2O_3 (bortrioksit), GeO_2 (germanyum-oksit) ve P_2O_5 (fosforpentaoksit) gibi diğer oksitler katkı maddesi olarak SiO_2 'e eklenirler. Şekil 6.2'de de görüldüğü gibi SiO_2 'e, katkı maddesi olarak GeO_2 veya P_2O_5 eklendiğinde kırılma indisi artarken flüor veya B_2O_3 eklendiği zaman aksine kırılma indisi azalır. Yelek bölgesinin çekirdeğe göre daha düşük değerli kırılma indisine sahip olacağı düşünülürse, fiber bileşimleri için aşağıdaki örnekler verilebilir:

- GeO_2 - SiO_2 çekirdek ve SiO_2 yelek,
- P_2O_5 - SiO_2 çekirdek ve SiO_2 yelek,
- SiO_2 çekirdek B_2O_3 - SiO_2 yelek,
- GeO_2 - B_2O_3 - SiO_2 çekirdek ve B_2O_3 - SiO_2 yelek.

SiO_2 'in temel hammaddesi kumdur (Phillips, 1982). Saf SiO_2 'ten yapılmış cam SiO_2 cam, eritilmiş cam veya camısı (vitreous) SiO_2 olarak adlandırılır. SiO_2 cam hem görünür, hem de kızıl ötesi ışık bölgelerinde iyi derecede şeffaftır. Bu özelliğinden dolayı, fiber optik haberleşme sistemlerinde sıklıkla kullanılır.

6.1.2 Halojen Cam Fiberler

1975'te, Rennes Üniversitesindeki araştırmacılar, 0,2 μm 'den 8 μm 'ye kadar olan orta kızıl ötesi dalga boyu bölgesinde aşırı derecede düşük iletim kaybına sahip olan flüorür camları keşfetmişlerdir (Poulain ve diğ., 1975). Flüorür camlar, flüor, klor, brom ve iyot gibi periyodik tablonun VII numaralı sütunundaki elementlerden oluşan anyonların içerildiği halojen cam grubuna aittir.

Araştırmacılar, asıl bileşen olarak ZrF_4 'ü (zirkonyumtetraflüorür) kullanan bir ağır metal flüorür cam malzemesi üzerine konsantre olmuşlardır. Kristalleşmeye karşı orta derecede dirence sahip olan bir cam yapmak için, flüorür cama birkaç eleman daha eklenmelidir (Folweiler, 1989). Çizelge 6.1'de, ZBLAN olarak adlandırılan tipik bir flüorür camda yer alan elemanlar ve bunların moleküler yüzdeleri verilmiştir. Bu malzeme, cam fiberin çekirdeğini

oluşturmaktadır. Daha düşük kırılma indisli bir cam yapmak amacıyla, ZrF_4 'ün bir kısmının yerine HfF_4 (hafniyumtetraflüorür) katılarak ZHBLAN yelek elde edilir.

Çizelge 6.1: ZBLAN camında yer alan elemanlar ve bunların moleküler yüzdeleri.

Malzeme	Moleküler Yüzdesi
ZrF_4 (zirkonyumflüorür)	54
BaF_2 (baryumflüorür)	20
LaF_3 (lantanflüorür)	4,5
AlF_3 (alüminyumflüorür)	3,5
NaF (Sodyumflüorür)	18

Bu camlar 0,01 dB/km'den 0,001 dB/km'ye kadar olan minimum dahili kayıpları sağlamalarına rağmen, bunlardan yapılan uzun boylu fiberler üretmek zordur. Öncelikle, bu kadar düşük kayıp seviyelerine ulaşmak için aşırı derecede saf malzemeler kullanılmalıdır. İkinci olarak, flüorür cam devitrifikasyona (malzemenin camsı yapıdan uzaklaşarak kristalleşmesi durumu) karşı eğilimlidir. Fiber üretiminde, saçılma kayıpları üzerinde büyük etkisi olan mikrokristallerin oluşmasını engellemek için, devitrifikasyon da göz önüne alınmalıdır.

6.1.3 Aktif Cam Fiberler

Normal bir pasif cama, 57 ile 71 arasındaki atom numaralarına sahip olan nadir toprak (rare-earth) elementleri katılarak, yeni optik ve manyetik özelliklere sahip olan bir malzeme elde edilebilir. Bu yeni özellikler, malzemenin içerisinden geçen ışık üzerinde, yükseltme, zayıflatma ve faz geciktirmesi gibi işlemlerin gerçekleştirilmesini sağlar (Ainslie ve diğ., 1988). Katılama işlemi, SiO_2 ve halojen camların her ikisi için de yapılabilir.

Fiber lazerlerinde en çok kullanılan iki malzeme erbiyum ve neodiniyumdur (Nagi ve diğ., 1990). Nadir toprak elementlerinin iyonik konsantrasyonu %0,005 - %0,05 mertebesindedir. Bu malzemelerin soğurumunu ve flüoresan spektrumunu incelemek için, nadir toprak katkılarındaki elektronları daha yüksek enerji seviyelerine çıkarmaları için uyarmak amacıyla, soğurum dalga boyunda yayım yapan bir optik kaynak kullanılmalıdır. Bu uyarılmış elektronlar daha düşük enerji seviyelerine düştüklerinde, flüoresan dalga boyunda dar optik spektrumlu bir ışık yayarlar.

6.1.4 Plastik Yelekli Cam Fiberler

Cam çekirdek ve cam yelekli fiberler, çok düşük kayıpların gerektiği uzun mesafeli uygulamalar için oldukça önemlidir. Daha yüksek kayıp değerlerinin kabul edilebileceği, birkaç yüz metreye kadar olan kısa mesafeli uygulamalar için, daha ucuz olan plastik yelekli SiO_2 fiberler kullanılabilir. Bu fiberlerde çekirdek olarak SiO_2 , yelek olarak da daha küçük kırılma indisli plastik bir malzeme kullanılır. Bu fiberler PCS (plastic clad silica – plastik yelekli SiO_2) fiber olarak adlandırılır.

SiO_2 çekirdek için en yaygın malzeme kaynağı yüksek saflıktaki doğal kuvarstır. Yelek için en yaygın malzeme ise, 850 nm’de 1,405 değerindeki kırılma indisine sahip olan silikon reçinedir. Silikon reçine, ayrıca diğer fiberlerde kaplama malzemesi olarak da sıklıkla kullanılır. Plastik yelek için sıklıkla kullanılan bir diğer malzeme ise perflüor etilen propilendir (Teflon FEP) (Kaiser ve diğ., 1975). Bu malzeme 1,338 gibi düşük bir kırılma indisi değerine sahip olduğu için, bu malzemeden yapılan fiberlerde nümerik açıklık değeri yüksektir.

Plastik yelekler yalnızca basamak indisli fiberler için kullanılır. Çekirdek çapları 150 μm ile 600 μm arasındadır ve çekirdek ile yelek arasındaki kırılma indisi farkı yüksek olduğu için nümerik açıklık değerleri de yüksektir. Bu sayede, düşük maliyetli ve geniş alana ışık yayan ışık kaynakları, optik gücü bu fiberlere aktarmak için kullanılabilir. Böylece ucuz, düşük kaliteli, fakat çoğu uygulama için yeterli olan sistemler kurulabilir.

6.1.5 Plastik Fiberler

Bütün çok modlu basamak indisli plastik fiberler, 100 m’ye kadar olan kısa mesafeli ve düşük maliyetli hatlar için iyi birer adaydır. Plastik fiberler, cam fiberlere göre daha fazla sinyal zayıflamasına sahip olmalarına rağmen, plastiğin sahip olduğu dayanıklılık sayesinde özel itina göstermeye gerek kalmadan kolaylıkla kullanılabilirler. Çekirdek ve yelek kırılma indisleri arasındaki fark yüksek olduğundan dolayı, 0,6 gibi nümerik açıklık değerlerine ve 70° ye kadar olan kabul açısı değerlerine ulaşılabilir. İlave olarak, plastiğin sahip olduğu mekaniksel esneklik sayesinde, bu fiberler 110 μm ’den 1400 μm ’ye kadar değişen geniş çaplı çekirdeklere sahiptirler. Bu faktörler sayesinde, düşük maliyetli ve geniş alana ışık yayabilen

LED'ler ve diğerlerine göre daha ucuz olan plastik fiberler kullanılarak ekonomik bir sistem oluşturulabilir.

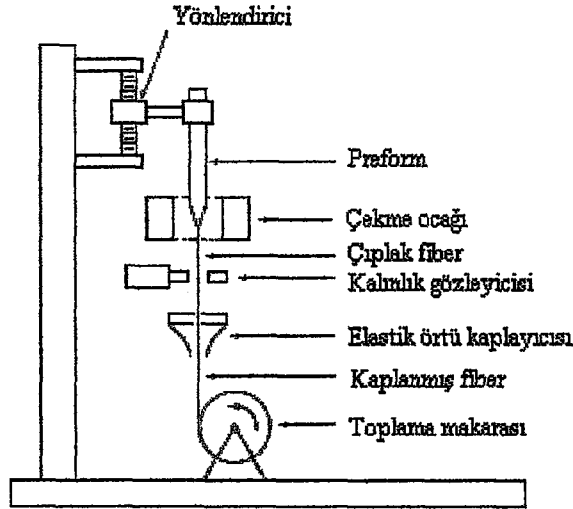
Plastik fiber yapılarına aşağıdaki örnekler verilebilir:

- Polistren çekirdek ve metil metakrilat yelek ($n_1=1,60$, $n_2=1,49$ ve $NA=0,60$).
- Polimetil metakrilat çekirdek ve bununla kopolimer oluşturan bir malzemedan yapılmış yelek ($n_1=1,49$, $n_2=1,40$ ve $NA=0,50$).

6.2 Fiber Üretim Teknikleri

Bütün cam optik dalga kılavuzlarının üretiminde iki temel teknik kullanılmaktadır (Dorn ve diğ., 1989). Bunlar, buhar fazında oksitlenme (vapor phase oxidation – VPO) ve doğrudan eritme (direct-melt) yöntemleridir. Geleneksel cam yapım işlemlerini takip eden doğrudan eritme yöntemi, optik fiberlerin saflaştırılmış SiO_3 (silikat) camlarının eritilmiş hallerinden doğrudan imal edildiği bir yöntemdir. Buhar fazında oksitlenme sürecinde ise, $SiCl_4$ (silisyumtetraklorür) ve $GeCl_4$ (germanyumtetraklorür) gibi metal halojenlerin yüksek saflıktaki buharları, beyaz toz halindeki SiO_2 parçacıklarını oluşturmak amacıyla, oksijen ile reaksiyona girerler. Daha sonra bu parçacıklar bir cam yüzeyi üzerine toplanırlar ve erimelerine izin vermeyecek kadar ısıtılıp, homojen bir cam kütesine dönüştürülerek temiz bir cam çubuk veya tüp şekline getirilirler. Bu çubuk veya tüp preform olarak adlandırılmaktadır ve 10 mm ile 25 mm arasındaki bir çapa ve 60 cm ile 120 cm arasındaki bir uzunluğa sahiptir. Preform, fiber ile aynı kırılma indisi profiline sahiptir. Şekil 6.3'te gösterilen donanım yardımıyla, preformdan fiber elde edilebilir. Preformdan fiber elde etme işlemine fiber çekme denmektedir (Paek, 1986).

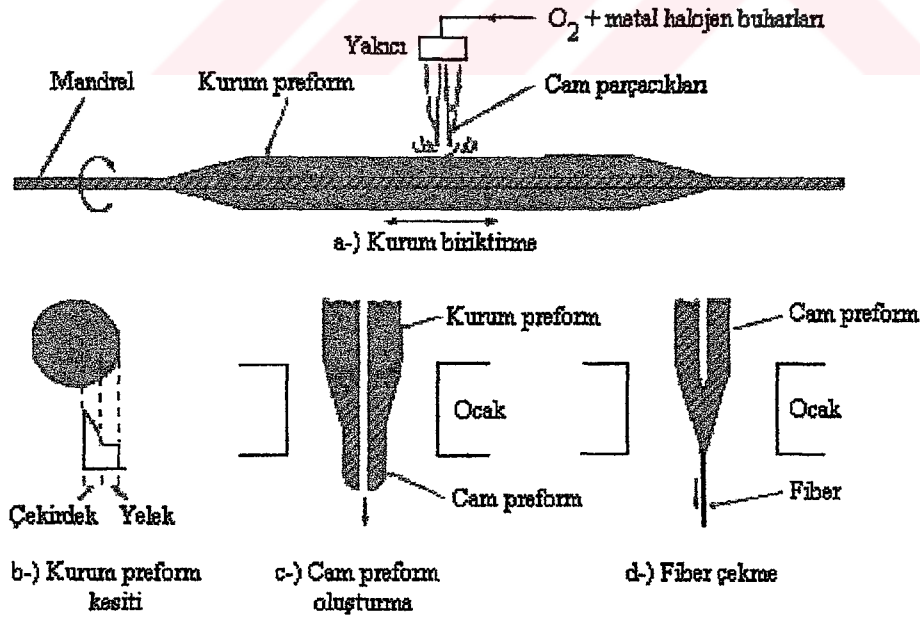
Öncelikle preform, çekme ocağı diye adlandırılan dairesel ısıtıcı içerisine doğru yönlendirilir. Burada preformun ucu, çekilip çok ince bir lif haline getirilebilecek duruma ulaşmaya kadar yumuşatılır. Çekme kasasının en altında bulunan toplama makarasının dönme hızı, fiberin ne kadar hızlı çekileceğini belirleyeceği için, makara hep aynı hızda döndürülmelidir. Dönme hızı kontrolündeki geri beslemeyi sağlamak için kalınlık gözleyicisi kullanılmıştır. Çıplak cam fiberi toz ve su buharı gibi harici etkilere korumak amacıyla, çekme işleminin hemen ardından, fiber elastik bir örtü ile kaplanmaktadır.



Şekil 6.3: Fiber çekme işlemi için gerekli olan donanım.

6.2.1 Dışarıdan Buhar Fazında Oksitlenme

Corning Glass Works tarafından yapılan, 20 dB/km'nin altındaki kayıp değerine sahip ilk fiberin üretiminde, dışarıdan buhar fazında oksitlenme (outside vapor phase oxidation – OVPO) işlemi kullanılmıştır (VanDewoestine ve Morrow, 1986). Bu yöntemin işleyişi şekil 6.4'te gösterilmiştir.



Şekil 6.4: OVPO yöntemiyle preform hazırlanmasındaki adımlar.

Öncelikle, kurum olarak adlandırılan SiO_2 parçacıkları, bir yakıcıdan mandrel diye adlandırılan dönen bir seramik veya grafit çubuk üzerine biriktirilerek, mandrel üzerinde bir

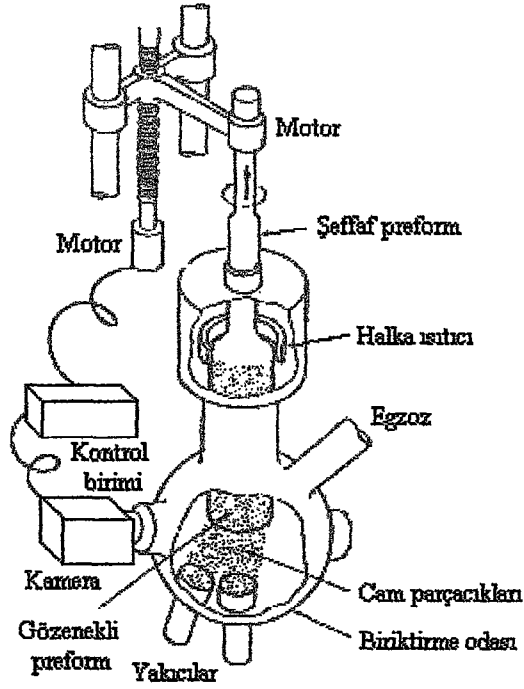
SiO_2 tabaka oluşması sağlanır. Cam kurumlar mandrele yapışır ve tabaka tabaka silindirik ve gözenekli cam preform oluşturulmuş olur. Biriktirme işlemi sırasında, metal halojen buhar akımı uygun bir şekilde kontrol edilerek, çekirdek ve yelek için gerekli olan boyutlar ve cam bileşimleri preformda sağlanabilir. Bu şekilde, basamak veya dereceli indisli preformlar gerçekleştirilebilir.

Biriktirme işlemi tamamlandıktan sonra, mandrel kaldırılır ve gözenekli tüp kuru havada 1400 derece civarında camsı duruma getirilerek temiz bir cam preform elde edilir. Daha sonra bu temiz preform, şekil 6.3'te gösterilen fiber kasasına monte edilerek fiber şekline dönüştürülür. Preformun merkezindeki delik, bu çekme sürecinde çöktürülür.

6.2.2 Buhar Fazında Eksenel Biriktirme

Bir önceki kısımda bahsedilen OVPO işlemi yanal bir biriktirme yöntemidir. Şekil 6.5'te, diğer bir OVPO tipi işlem olan buhar fazında eksenel biriktirme (vapor phase axial deposition – VAD) yöntemi gösterilmiştir (Murata, 1986). Bu yöntemde SiO_2 parçacıklar, OVPO işleminde tarif edilen aynı yolla oluşturulurlar. Bu parçacıklar yakıcılardan çıktıklarında, bir cam çubuğun dış yüzeyi üzerinde biriktirilirler. Cam çubuk yukarı doğru hareket ettirilerek, gözenekli preformun eksenel yönde artması sağlanır. Çubuk ayrıca, parçacık birikimindeki simetriyi sağlamak amacıyla, sürekli olarak döndürülür. Gözenekli preform yukarıya doğru hareket ettikçe, karbon halka ısıtıcı tarafından dar bir bölgesinin ısıtılması suretiyle, katı ve şeffaf bir preform çubuğuna dönüştürülür. Daha sonra sonuç preform, şekil 6.3'te gösterildiği gibi, başka bir ocakta ısıtılarak çekme işlemine tabi tutulabilir.

Basamak indisli veya dereceli indisli fiberlerin her ikisi de, tek modlu veya çok modlu olacak şekilde, VAD yöntemi kullanılarak yapılabilir. VAD yönteminin avantajları şu şekilde sıralanabilir: Öncelikle, OVPO yönteminde olduğu gibi, preformda bir merkez deliği oluşmaz. İkinci olarak, preformun aralıksız uzunluklarda üretilmesinden dolayı, işlemin maliyeti ve ürün verimi iyi yönde etkilenir. Son olarak, biriktirme işleminin yapıldığı oda ve karbon halka ısıtıcılarının bulunduğu oda birbirlerine aynı yapı içerisinde sıkıca bağlı olduklarından dolayı, üretim için temiz bir çevre sağlanmış olur.



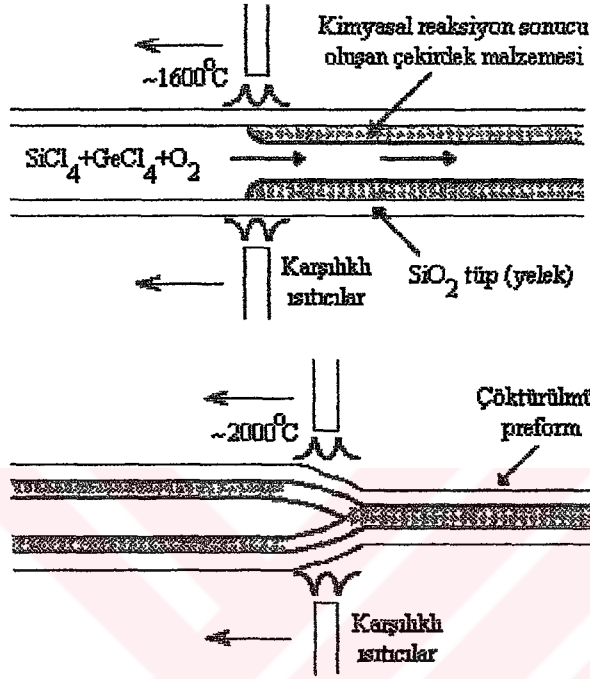
Şekil 6.5: VAD yöntemiyle preform hazırlanması (Izawa ve Inagaki, 1980).

Üretim sürecinde oluşabilecek hatalara karşı, sistem bir kontrol birimi tarafından sürekli kontrol altında tutulmaktadır. Bu sayede yanıcı gaz akışı, egzozdaki gaz akışı, yüzey sıcaklığı, dönme hızı ve preform konumu gibi parametreler kontrol edilebilmektedir. Örneğin preform konumunda oluşabilecek olan bir değişim, preform çapının değişmesine ve kırılma indisi profiline düzensizliğine yol açabilir. Bunu önlemek amacıyla, birikimin gerçekleştiği bölge, bir kamera yardımıyla sürekli gözlem altında tutulmaktadır (Özsoy, 1998).

6.2.3 Yenilenmiş Kimyasal Buharla Biriktirme

Şekil 6.6'da gösterilen yenilenmiş kimyasal buharla biriktirme (modified chemical vapor deposition – MCVD) işlemi, adından da anlaşılacağı gibi, kimyasal buharla biriktirme (CVD) işleminin geliştirilmiş halidir (Nagel ve diğ., 1985). Bell laboratuvarlarında geliştirilen CVD yönteminde, oksitleyici bir gaz karışımı içerisine bir miktar SiH_4 (silisyumhidrür) katılarak, bu karışım SiO_2 camdan yapılmış bir reaksiyon tüpü içerisinden geçirilir. Tüpün iç basıncı, SiH_4 konsantrasyonu, tüp sıcaklığı ve akış hızı gibi parametreler kontrol edilerek, tüpün iç yüzeyinde camsı bir SiO_2 tabakası oluşturulabilir. SiO_2 tabakaları oluşturulduktan sonra, gaz karışımının içerisine GeH_4 (germanyumhidrür) katılarak, merkezde daha yüksek kırılma indisli tabakalar oluşturulabilir. Daha sonra tüp yüksek sıcaklıkta çöktürülerek bir preform elde edilir. CVD yöntemi, düşük verimli ve yavaş bir işlemdir. Ayrıca preformda yüksek

hidroksil bulunduğundan dolayı, elde edilen fiberler yüksek kayıp değerlerine sahiptir. Yine de CVD işlemi, çok düşük kayıplı ve dereceli indisli fiberlerin üretildiği hemen hemen her yerde kullanılan MCVD yöntemine öncülük etmesi açısından, fiber üretim teknolojisinde çok önemli bir yer işgal etmektedir.



Şekil 6.6:MCVD yöntemi ile preform hazırlanması.

MCVD yönteminde, orijinal CVD işleminde aşağıdaki değişiklikler yapılmıştır:

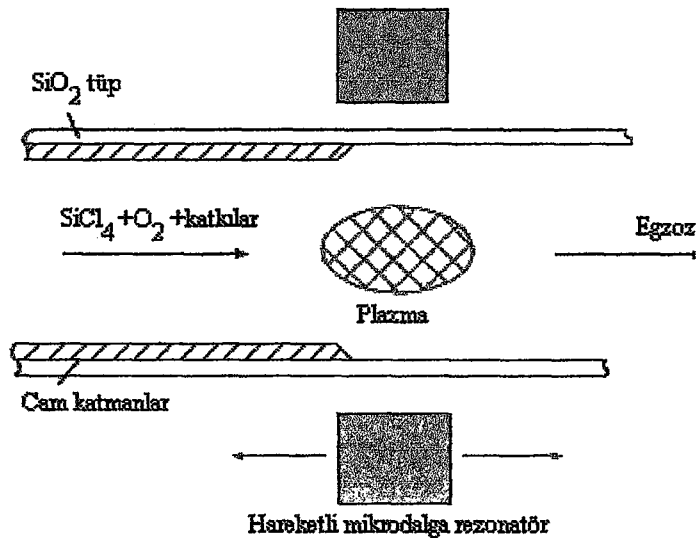
- Yüksek kayba neden olan hidroksil iyonu oluşumunu engellemek amacıyla, hidrürler yerine klorürler kullanılmıştır.
- İşlem verimini artırmak için, yüksek sıcaklıkta bir yakıcı eklenmiştir.
- Düzgün tabakalar oluşturmak ve uzun preformlar elde etmek amacıyla, reaksiyon tüpü döndürölmüş ve ısıtıcı tüp boyunca hareket ettirilmiştir.

MCVD yönteminde, metal halojen gazların oksijenle reaksiyonu sonucunda oluşan SiO_2 parçacıkları, dönen bir SiO_2 tüp içerisinde yol alırlar. Tüp boyunca hareket eden ısıtıcıların, tüpü 1600 derece civarına kadar ısıtması sonucu, SiO_2 parçacıkları tüpün iç duvarında birikerek bir kurum oluşturur ve bu kurum yüksek sıcaklıktan dolayı şeffaf camı hale dönüşür. Reaksiyona girmeyen gazlar ve biriktirilmeyen SiO_2 parçacıkları tüpten dışarıya atılır. ısıtıcılar bir devrini tamamladıktan sonra hızlıca başa dönerler ve yeni bir camı

tabakanın biriktirilmesi işlemine başlanır. Her tabaka oluşturulmadan önce, reaksiyona giren gaz akışı değiştirilerek fiber bileşimi değiştirilebilir. Biriktirme işleminde istenilen kalınlığa ulaşıldıktan sonra, gaz akışı durdurulur ve yine ısıtıcılar yardımıyla tüp 2000 derece civarında ısıtılarak, katı bir preform çubuğu oluşturulana kadar, tüp içindeki delik derece derece küçültülür. Sonuç preformda, birikim sonucu oluşan malzeme çekirdeği, orijinal SiO_2 tüp ise yelegei oluşturmaktadır.

6.2.4 Plazma İle Harekete Geçirilen Kimyasal Buharla Biriktirme

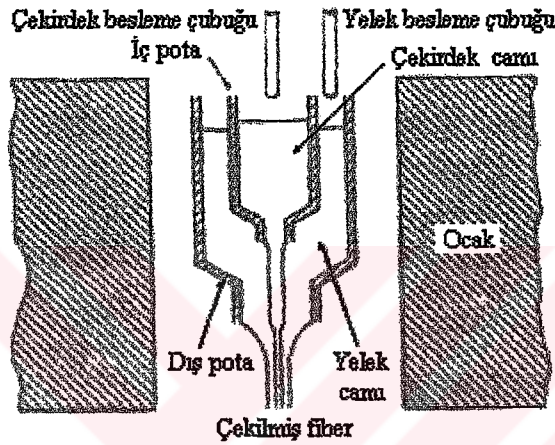
Plazma ile harekete geçirilen kimyasal buharla biriktirme (plasma-activated chemical vapor deposition – PCVD) işlemi Philips Research’ te çalışan bilim adamları tarafından bulunmuştur (Geittner ve Lydtin, 1989). Şekil 6.7’ de de gösterildiği gibi, PCVD yöntemi, bir SiO_2 tüp içerisinde biriktirme işleminin gerçekleştiği MCVD yöntemi ile benzerdir. Bunun yanında, bu yöntemde kimyasal reaksiyonu başlatan, izotermal olmayan ve düşük basınçtaki bir mikrodalga plazmadır. Bu arada plazma, elektron ve iyon derişimi eşit, yani yüksüz olan iyonlaştırılmış gaz ortamıdır. 2,45 GHz’ de çalışan mikrodalga rezonatör, cam filmlerin mekaniksel gerilimini azaltmak amacıyla 1000 derece ile 1200 derece arasında tutulan SiO_2 tüpün dışarısında gezdirilerek, tüpün içerisindeki kimyasal reaksiyonu başlatacak olan plazmanın oluşmasını sağlar. Bu süreç sonunda, şeffaf camsı malzeme doğrudan tüpün iç yüzeyinde birikir. Yani kurum oluşumu ve camsı hale dönüştürme işlemleri gerçekleşmez. İstenilen kalınlıktaki cam, tüp yüzeylerinde biriktirildikten sonra, aynen MCVD yönteminde olduğu gibi, ortasında delik bulunmayan katı bir preform çubuğu elde edilir.



Şekil 6.7: PCVD yöntemi ile preform elde edilmesi.

6.2.5 Çift Pota Yöntemi

SiO_2 veya halojen cam fiberlerin her ikisi de, doğrudan eritmeli çift pota (double-crucible) yöntemi kullanılarak imal edilebilir (Midwinter, 1979). Öncelikle, toz halindeki element karışımları, uygun cam bileşimi elde etmek amacıyla eritilerek, çekirdek ve yelek malzemeleri için ayrı ayrı cam çubuklar elde edilir. Şekil 6.8'de de görüldüğü gibi, iki eşmerkezli pota, bu cam çubuklarla beslenir. İçteki pota erimiş çekirdek camını, dıştaki ise yelek camını içerir. Fiber, potaların altında yer alan bölmeden, erimiş haldeyken çekilir.



Şekil 6.8: Çift pota yöntemi ile fiber imalatı.

Bu yöntemin aralıksız bir üretim sürecinden dolayı sahip olduğu avantaja rağmen, erime işleminin sırasında oluşacak olan kirlilikten kaçınmak için, çok fazla önem gösterilmelidir. Bu kirlilik, ısıtıcı çevresi ve pota malzemesinden kaynaklanmaktadır. Cam besleme çubuklarının yapımında genellikle SiO_2 potalar kullanılırken, çekme ocağında kullanılan eşmerkezli potalar platinden yapılmaktadır.

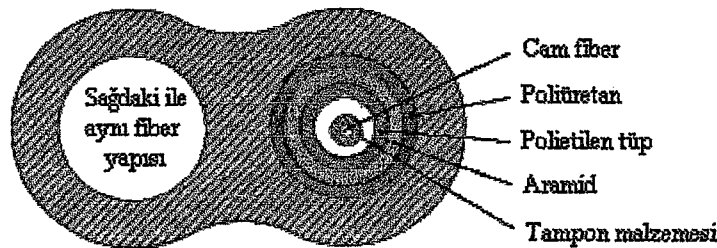
6.3 Optik Fiberlerin Kablolanması

Optik dalga kılavuzu teknolojisinin birçok uygulamasında, fiberlerin bir kablo yapısı içerisine dahil edilmesi gerekmektedir (Wiltshire ve Reeve, 1988). Kablo yapısı, kabloların yer altı veya binalar arası kanallara döşenmesi, doğrudan yer altına gömülmesi, dışarıdaki direklere gerilmesi veya su altından geçirilmesine bağlı olarak oldukça değişiklik göstermektedir. Her uygulama için değişik kablo tasarımları gerekmektedir, fakat belli temel

tasarım parametreleri her durumda uygulanmaktadır. Kablo imalatçıları, geleneksel metal kablolarda kullanılan kurulum teknikleri ve gereçlerin fiber optik kablo kurulumunda da kullanılabilmesini hedeflemektedir. Bu amaca ulaşmak için, cam fiberlerin mekanik özellikleri de göz önünde bulundurularak, özel kablo tasarımları yapılmalıdır.

Önemli bir mekaniksel özellik, kablo üzerindeki izin verilen maksimum eksenel yüküdür. Bu özellik, güvenli bir şekilde dönebilecek olan kablo uzunluğunu belirlemektedir. Bakır kablolarda, tellerin kendisi başlıca yük taşıyıcısıdır ve bu kablolar kopmadan %20'den fazla uzatılabilirler. Bunun yanında, oldukça güçlü olan optik fiberler, %4'lük bir uzamaya maruz kaldıklarında kırılmaya uğrarlar. Eğer fiber uzunluğu fazlaysa, bu değer %0,5'e kadar inebilir. Statik yorgunluk, izin verilen uzamanın %40'ının üzerindeki gerilim değerlerinde oldukça hızlı, %20'sinin altındaki gerilim değerlerinde de oldukça yavaş ortaya çıktığı için, kablo imalatı ve kurulumu sırasında, fiber uzamaları %0,1 ile %0,2 seviyelerinde sınırlandırılmalıdır.

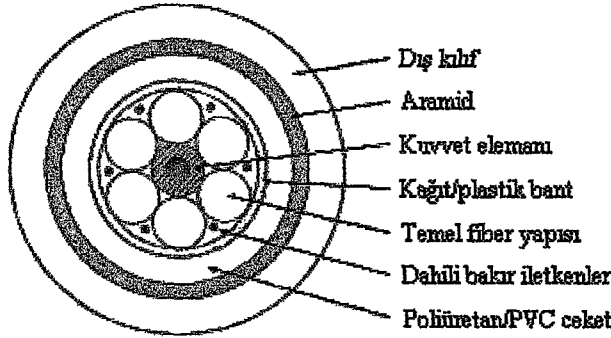
2×10^4 MPa'lık uzama elastikliğine (Young modülü) sahip olan çelik, geleneksel elektrik kablolarını sağlamlaştırmak amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır ve fiber optik kablolar için de kullanılabilir. Elektromanyetik indüksiyonun etkilerini önlemek veya kablo ağırlığını azaltmak amacıyla, bazı uygulamalarda metalik olmayan yapılar kullanılmalıdır. Bu durumda güçlü plastik malzemeler ve Kevlar® (DuPont Kimyasal A.Ş.'nin bir ürünü) gibi yüksek mekaniksel gerilime dayanıklı organik iplikler kullanılır. İyi bir üretim sürecinden geçmiş fiber kabloda, fiberler diğer kablo elemanlarından izole edilmeli, kablonun doğal eksenine yakın olmalı ve kablo büküldüğünde veya gerildiğinde fiberlerin hareket edecek yerleri olmalıdır.



Şekil 6.9: İki fiberli farazi kablo tasarımı.

Göz önünde bulundurulması gereken başka bir faktör fiber kırılganlığıdır. Cam fiberler plastik gibi şekil değiştiremediği için, darbe aldığı yükten enerji soğurma konusunda düşük

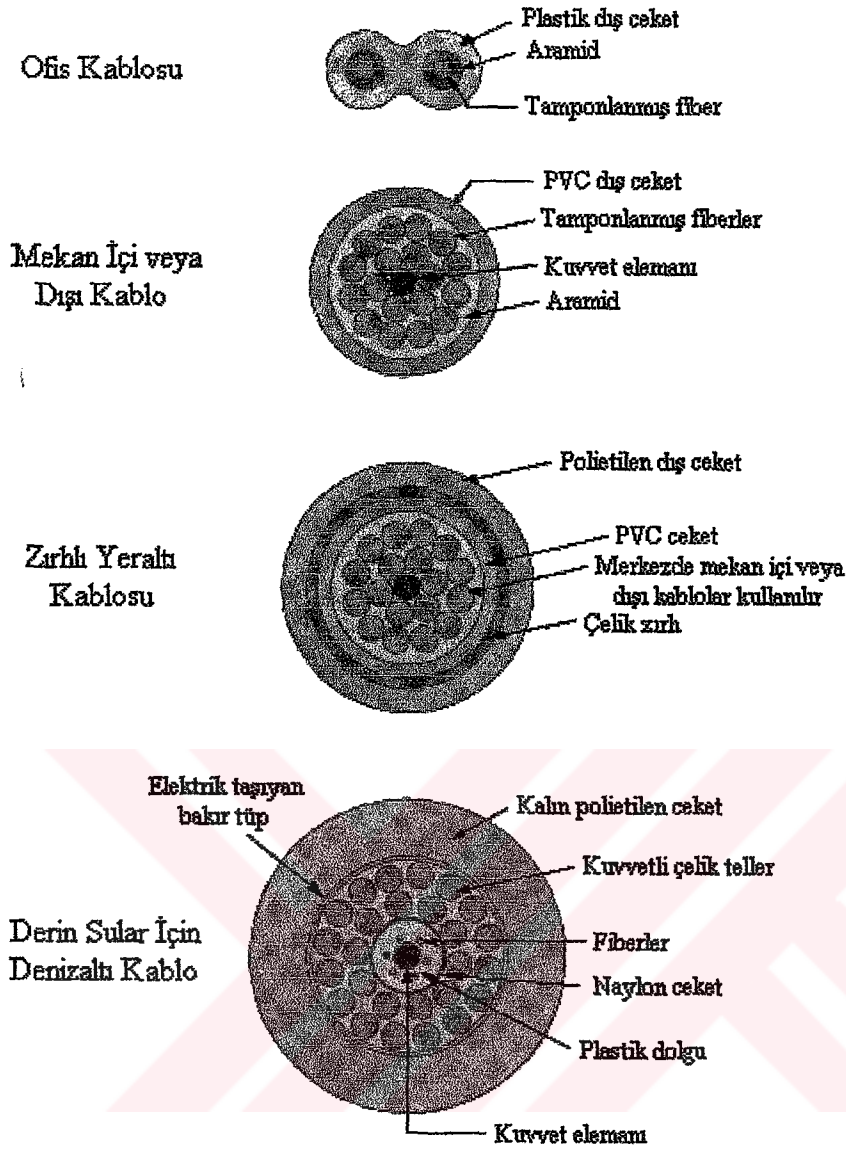
bir toleransa sahiptirler. Bu nedenle, bir optik kablunun dış kılıfı, cam fiberleri darbeden koruyacak şekilde tasarlanmalıdır. Ayrıca dış kılıf, yanal bir kuvvete maruz kaldığında ezilmemelidir ve kabloyu aşındırıcı çevresel etkilere karşı korumalıdır. Yer altı kurulumlarında, yer sincabı gibi kemirgenlerin açacağı tünellerden dolayı oluşacak olan potansiyel hasarlardan kabloyu korumak amacıyla, kablo kalın metal bir bilezikle kaplanmalıdır.



Şekil 6.10: Altı fiberli kablo yapısı.

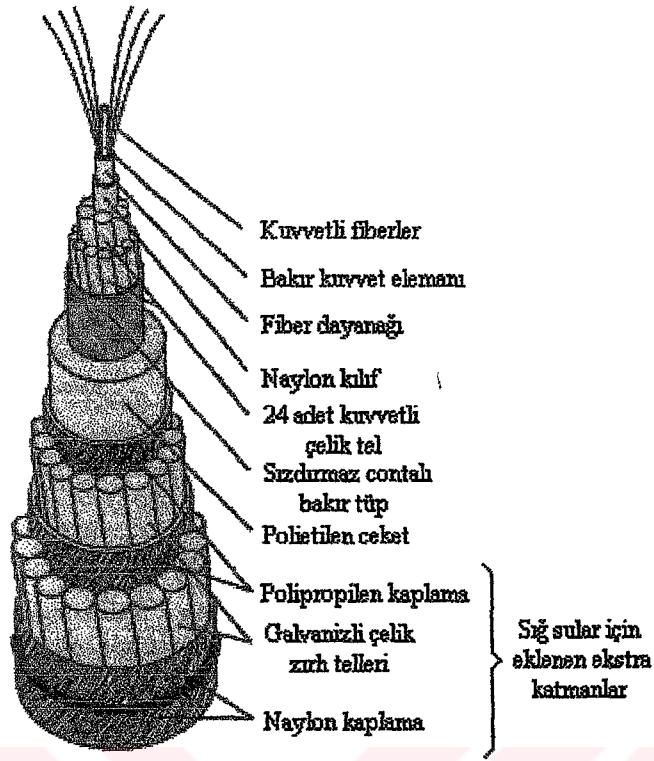
Fiber optik kablo tasarlanırken, birçok değişik tipte düzenleme kullanılabilir ve oldukça değişik elemanlar yapı içerisine dahil edilebilir. En basit tasarımlar, iç mekanlara uygun olan bir veya iki fiber kablolu yapılarıdır. Şekil 6.9'daki iki fiberleri farazi tasarımda, öncelikle fiber bir tampon malzemesi ile kaplanmış ve polietilen gibi dayanıklı bir tüp içerisine gevşek bir şekilde yerleştirilmiştir. Sağlamlığı arttırmak amacıyla, bu tüp aramid isimli organik iplik ile çevrilmiş ve daha sonra bunlar poliüretan ceket ile kaplanmıştır. Son olarak poliüretan, polietilen veya naylon dış ceket, iki fiberi bir arada tutmak amacıyla kullanılmıştır.

Şekil 6.9'da gösterilen temel fiber yapılarından birkaç tanesi, merkezi kuvvet elemanının etrafında bir araya getirilerek, daha geniş kablolar oluşturulabilir. Şekil 6.10'daki altı fiberli kablo yapısı, buna bir örnek teşkil edebilir. Fiber birimleri, bir kağıt veya plastik bant ile kuvvet elemanı etrafında birleştirilmiş ve sonra da dış ceket ile sarılmıştır. Eğer kablunun döşendiği yol boyunca tekrarlayıcılara ihtiyaç duyulacaksa bu tekrarlayıcılara elektrik taşımak amacıyla, iletken telleri kablo yapısı içersine dahil etmek avantajlı olabilir. Bu iletkenler ayrıca kurulum sırasındaki ses iletişimini sağlamak amacıyla da kullanılabilir.



Şekil 6.11: Dört değişik uygulama için kullanılan fiber optik kablo kesit görünüşleri.

Şekil 6.11’de, çeşitli uygulamalar için kullanılan fiber optik kabloların kesit görünüşleri verilmiştir. İki fiberli ofis kablosu, görünüş olarak basit bir lambanın elektrik kablosuna benzemektedir. Mekan içi veya dışında kullanılan fiber ise koaksiyel kabloyu andırmaktadır. Zırhlı fiber kablo, zırhlı elektrik kablosuna göre daha ince yapıdadır. Derin sular için yapılmış olan deniz altı fiber kablo ise yaklaşık olarak 2,5 cm kalınlığındadır ve oldukça kuvvetli bir yapıya sahiptir. Deniz altı fiber kablo, eğer sığ sularda kullanılacaksa, gemilerden ve balıkçı teknelerinden korunmak amacıyla, kabloya ağır çelik zırhtan oluşan ekstra katmanlar eklenmelidir. Bu şekildeki bir deniz altı fiber kablonun perspektif görünüşü şekil 6.12’de gösterilmiştir.



Şekil 6.12: Zırhlı deniz altı fiber kablonun perspektif görünüşü.

YEDİNCİ BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

Fiber optik teknolojisi, ilk fiberin bulunmasından bu yana oldukça gelişme kaydetmiştir. İlk yıllarda, yüksek kayıp değerlerinden dolayı, fiberler pek ilgi çekmiyordu. Yıllar ilerledikçe, malzemeler ve üretim yöntemlerindeki gelişmeler sayesinde, çok düşük kayıp seviyelerine ulaşılmış ve başta haberleşme olmak üzere, fiberler birçok alanda kullanılmaya başlamıştır.

Optik fiberlerde bilginin elektrik yerine ışık ile taşınması, beraberinde birçok avantajı getirmektedir. Bunlardan en önemlileri, sinyalin elektromanyetik girişimden etkilenmemesi ve birim zamanda taşınabilen bilgi miktarının oldukça fazla olmasıdır. Bu avantajları sayesinde fiber optik kablolar, özellikle bilgisayar ağlarında oldukça fazla kullanılmaktadır. Günümüzde bilgisayar ağlarının tamamen optik hale getirilmesi ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Bilgisayar ağları dışında, kablolu televizyon ağındaki birçok yerde de fiber optik kablolar kullanılmaktadır. Dijital televizyon sistemlerinin yaygınlaşması ve verilecek olan hizmetlerin çeşitliliğinin artmasıyla birlikte, taşınacak olan bilginin miktarı da kaçınılmaz olarak artacaktır. Bu durumda, bilgi taşıma kapasitesiyle diğer bilgi taşıma ortamlarının ilerisinde bulunan fiber optik kabloların, bu ve benzeri sistemler sayesinde evlere kadar gireceği söylenebilir. Elektrik yerine ışıkla çalışan mantık kapıları üzerindeki çalışmalar da sürdürülmektedir. Bu sayede, ileride optik olarak çalışan bilgisayarlar yapmak mümkün olacaktır. Tabii ki, bu bilgisayar içindeki verilerin taşınması için de optik fiber temelli yapılar kullanılacaktır.

Görüldüğü gibi birçok alanda optik iletişime doğru kayma söz konusudur. Optik iletişimin bu kadar cazip hale gelmesinin sebebi, sunduğu avantajlar sebebiyle, kuşkusuz fiber optik kablodur. Fiber optik kablonun, günümüzde birçok kullanım alanı olmasının yanında, gelecekte de yeni kullanım alanları bulacağı açıktır. Bu yüzden fiber optik kablo üretmek ve pazarlamak, hem akıllıca bir yatırım, hem de ülke ekonomisine büyük bir katkı olacaktır.

KAYNAKLAR

Agrawal, G. P., Nonlinear Fiber Optics, Academic Press, ISBN 0120451433, 466 p., Orlando, 1989.

Ainslie, B. J., Craig, S. P. and Davey, S. T., The absorbtion and fluorescence spectra of rare-earth ions in silica-based monomode fibers, J. Lightwave Tech., vol. 6, 287-293, 1988.

Badar, A. H., Maclean, T. S. M., Gazey, B. K., Miller, J. F. and Ghafoori-Shiraz, H., Radiation from circular bends in multimode and single-mode optical fibers, IEE Proc., vol. 136,pt. J, 147-151, 1989.

Bansal, N. P. and Doremus, N. H., Handbook of Glass Properties, Academic Press, ISBN 0120781409, 554 p., New York, 1997.

Barnoski, M., Fundamentals of Optical Fiber Communications, Academic Press, ISBN 012079151X, 621 p., New York, 1981.

Basov, N. G. and Adashko, J. G. (editors), Stimulated Raman Scattering, Consultants Bureau, ISBN 0306109689, 336 p., New York, 1982.

Bellamy, J. C., Digital Telephony (Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing), Wiley-Interscience, ISBN 0471345717, 643 p., New York, 2000.

Buck, J. A., Fundamentals of Optical Fibers, Wiley Interscience Publications, ISBN 0471308188, 280 p., New York, 1995.

Consulting, P., Worldwide Submarine Fibre Optics 2001 - Executive Summary, MindBranch Inc., ISBN B00005V86Z, 10 p., New York, 2001.

Damzen, M., Vlad, V. I. And Mocofanescu, A., Stimulated Brillouin Scattering : Theory and Applications, Inst of Physics Pub, ISBN 0750308702, 200 p., New York, 2002.

- Daughtery, K. M., Analog to Digital Conversion: A Practical Approach, McGraw-Hill, ISBN 0070156751, 213 p., New York, 1993.
- Dodd, A. Z., The Essential Guide to Telecommunications (3rd Edition), Prentice Hall PTR, ISBN 0130649074, 526 p., New Jersey, 2001.
- Dorn, R., Braumgartner, A., Gutu-Nelle, A. Koppenborg, J., Rehm, W. Schneider, R. and Schneider, S., Mechanical shaping of preforms for low loss at low cost, J. Opt. Commun., vol. 10, 2-5, 1989.
- Edminister, J. A., Schaum's Outlines: Elektromanyetik (Çev.: M. Timur Aydemir, Erkan Afacan ve K. Cem Nakiboğlu), Nobel Yayın Dağıtım, ISBN 9755910735, 329 s., Ankara, 2000.
- Einarsson, G., Principles of Lightwave Communications, John Wiley & Son Ltd, ISBN 0471952974, 368 p., New York, 1996.
- Felsen, L. B., Rays And Modes In Optical Fibers, Electron. Lett., vol. 10, 95-96, 1974.
- Fleming, J. W., Material dispersion in lightguide glasses, Electron. Lett., vol. 14, 326-328, 1978.
- Folweiler, R. C., Floride Glasses, GTE J. Science and Tech., vol. 3(1), 25-37, 1989.
- Friebele, E. J., Taylor, E. W., Turguet de Beauregard, G., Wall, J. A. and Barnes, C. E., Interlaboratory comparision of radiation-induced attenuation in optical fibers, J. Lightwave Tech., vol. LT-4, 1048-1060, 1986.
- Geittner, P. and Lydtin, H., Manufacturing optical fibers by the PCVD process, Philips Tech. Rev. (Nedherlands), vol. 44, 241-249, 1989.
- Genceli, O. F., Optik Ölçme Metodları, İstanbul Teknik Üniversite Matbaası, 251 s., İstanbul, 1989.

Ghatak, A. K. and Thyagarajan, K., Optical Electronics, Cambridge University Press, ISBN 0521314089, 640 p., New York, 1989.

Gloge, D., Marcatili, E. A. J., Marcuse, D. and Personik, S. D., Dispersion properties of fibers, in Miller, S. E. and Chynoweth, A. G. (editors), Optical Fiber Telecommunications, Academic Press, 623 p., New York, 1979.

Goca, N., Optik (Çev.: Celal Çakır), Kültür Eğitim Vakfı Yayınları, 468 s., Erzurum, 1993.

Hayt, W. H. and Buck, J. A., Engineering Electromagnetics, McGraw-Hill Higher Education, ISBN 0072304243, 576 p., New York, 2000.

Hecht, E., Optics, Addison-Wesley Publishing 4th edition, ISBN 0805385665, 680 p., Mass., 2001.

Hecht, J., Understanding Fiber Optics, Prentice Hall, ISBN 0-13-956145-5, 617 p., New Jersey, 1999.

Izawa, T. and Inagaki, N., Materials and process for fiber preform fabrication: Vapor-phase axial deposition, Proc. IEEE, vol. 68, 1184-1187, 1980.

Kaiser, P., Hart, A. C. Jr. and Blyler, L. L. Jr., Low-loss FEP-clad silica fibers, Appl. Opt., vol. 14, 156-162, 1975.

Kalish, D., Key, D. L., Kurkjian, C. R., Tariyal, B. K. and Wang, T. T., Fiber characterization - mechanical, in Miller, S. E. and Chynoweth, A. G. (editors), Optical Fiber Telecommunications, Academic Press, 623 p., New York, 1979.

Kaminow, I. P. and Li, T., Optical Fiber Telecommunications I: Systems and Impairments (Optics and Photonics Series), Academic Press, ISBN 0123951739, 1000 p., San Diego, 2002.

Keiser, G., Optical Fiber Communications, McGraw Hill, ISBN 0070336172, 461 p., New York, 1991.

- Laubach, M., Dukes, S. And Farber, D., Breaking The Access Barrier: Delivering Internet Connections over Cable, John Wiley & Sons, ISBN 0471389501, 336 p., New York, 2001.
- Midwinter, J., Optical Fibers for Transmission, John Wiley & Sons, ISBN 047160240X, 578 p., New York, 1979.
- Murata, H., Recent developments in vapor phase axial deposition, J. Lightwave Tech., vol. LT-4, 1026-1033, 1986.
- Nagel, S. R., Fiber Materials and Fabrication Methods, in Miller, S. E. and Kaminow, I. P. (editors), Optical Fiber Telecommunications II, Academic Press, ISBN 0124973515, 632 p., New York, 1997.
- Nagel, S. R., MaChesney, J. B. and Walker, K. L., Modified chemical vapor deposition, in Li, T. (editor), Optical Fiber Communications, Vol. 1, Fiber Fabrication, Academic Press, 451 p., New York, 1985.
- Nagi, K., Oyobe, A., Morikawa, T., Sasaki, Y. and Nakamura, K., Gain Characteristics of Er^{3+} doped fiber with quasiconfined structure, J. Lightwave Tech., vol. 8, 1319-1322, 1990.
- Osanai, H., Shioda, T., Moriyama, T., Araki, S., Horiguchi, M., Izawa, T. and Takata, H., Effects of dopants on transmission loss of low OH content optical fibers, Electron. Lett., vol. 12, 549-550, 1976.
- Özsoy, S., Fiber Optik, Birsen Yayınevi, ISBN 975-511-188-3, 211 s., Kayseri, 1998.
- Paek, U. C., High-speed high-strength fiber drawing, J. Lightwave Tech., vol. LT-4, 1048-1060, 1986.
- Poulain, M., Poulain, U., Lucas, J. and Bran, P., Verres fluores au tetrafluorure de zirconium: Proprietes optiques d'un verre dope au Nd^{3+} , Materials Research Bulletin, vol. 10, 243-246, 1975.

Snyder, A. W. and Love, J. D., Optical Waveguide Theory (Science Paperbacks, 190), Kluwer Academic Publishers, ISBN 0412099500, New York, 1983.

Snyder, A. W., Understanding monomode optical fibers, Proc. IEEE, vol. 69, 6-13, 1981.

Temiz, M. ve Acer, H., GaAs-Tabanlı Lazerlerde Elektromanyetik Propagasyon Sabitinin İncelenmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 4, 541-550, 1998.

Temiz, M., Kuantum-Çukurlu Yarıiletken Lazerlerde Bazı Özel Çözümler ve Yük Taşıyıcılarının Tuzaklanmaları, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 6, 177-184, 2000.

Temiz, M. ve Samedov, R., Fiber Glass Yarıiletken Lazerler ve Kazanç Sabiti, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 5, 1083-1092, 1999.

Temiz, M. ve Ükte, A., Lazerler ve Uygulama Alanları, Fatih Haber, Yıl 1, Sayı 4, 26-29, 1999.

Temiz, M., Ükte, A., Çetin, E. ve Şentürk, H., Fiber Optik ve Uygulamaları, Elektrik Mühendisleri Odası Denizli Şube Bülteni, Yıl 3, Sayı 9, 18-20, 2000.

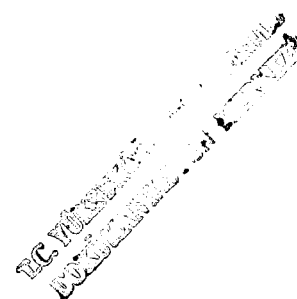
Tomita, A. and Cohen, L. G., Leaky-mode loss of second propagation mode in single mode fibers with index well profiles, Appl. Opt., vol. 24, 1704-1707, 1985.

Uiga, E., Optoelectronics, Prentice Hall, ISBN 0024221708 ,352 p., New Jersey, 1995.

VanDewoestine, R. V. and Morrow, A. J., Developments in optical waveguide fabrication by the outside vapor deposition process, J. Lightwave Tech., vol. LT-4, 1020-1025, 1986.

Wiltshire, B. and Reeve, M. H., A review of environmental factors affecting optical cable design, J. Lightwave Tech., vol. 6, 179-185, 1988.

Yates, R. K., Masson, J. and Mahe, N., Fiber Optics and Catv Business Strategy (Artech House Telecommunications Management Library), Artech House, ISBN 089006413X, 176 p., London, 1990.



ÖZGEÇMİŞ

Adı, soyadı: Adem ÜKTE

Ana adı: Nilgün

Baba adı: Mesut

Doğum yeri ve tarihi: İstanbul, 05.06.1977

Lisans eğitimi ve mezuniyet tarihi: Pamukkale Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Bölümü, 1999

Çalıştığı yer: Pamukkale Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Bildiği yabancı dil, aldığı belgeler: İngilizce, ÜDS: 71,250

Mesleki etkinlikleri: EMO (Elektrik Mühendisleri Odası) üyeliği
IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) öğrenci
üyeliği