

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FİBER BRAGG IZGARA TABANLI
OPTİK SENSÖRLERİN ANALİZİ**

Elektronik ve Haberleşme Mühendisi Lale KARAMAN

FBE Elektronik ve Haberleşme Müh. Anabilim Dalında Haberleşme Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

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

İSTANBUL,2009

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Optik Fiber Haberleşme Sisteminin Yapısı.....	1
1.2 Optik Dalga Kılavuzları İçin Temel Kavramlar	2
1.2.1 Elektromagnetik Spektrum.....	2
1.2.2 Işığın Yansıma ve Kırılması.....	3
1.2.3 Mod Kavramı	5
1.3 Dalga Kılavuzlarının Yapısı.....	5
1.4 Normalize Frekans	6
1.5 Optik Fiber Çeşitleri	6
2. OPTİK FİBER DALGA KILAVUZLARININ YAPISI	9
2.1 Maddenin Elektriksel Özellikleri.....	9
2.2 Maxwell Denklemleri	9
2.3 Dielektrik- Dielektrik Sınır Koşulları	10
2.4 Dalga Kılavuzlarında Kullanılan Temel Denklemler	10
2.5 Düzlemsel Yapıdaki Katmanlı (Slab) Dalga Kılavuzunda Mod Analizi.....	12
2.6 TE Modları	13
2.7 TM Modları	14
2.8 Silindirik Yapıdaki Dalga Kılavuzunda Mod Analizi	16
2.8.1 Basamak İndisli Optik Fiberler İçin Temel Denklemler.....	16
2.8.2 Basamak İndisli Optik Fiber İçin Çekirdek Bölgesi ve Kılıf Bölgesindeki Alan İfadeleri	17
2.8.3 Basamak İndisli Optik Fiber İçin Sınır Koşulları.....	19
2.8.4 Basamak İndisli Optik Fiberin Karakteristik Denklemi	20
3. OPTİK FİBER SENSÖRLER.....	22
3.1 Optik Fiber Sensörlerin Çalışma Prensipleri.....	23
3.2 Optik Fiber Sensör Bileşenleri	23
3.2.1 Optik Kaynaklar	23
3.2.1.1 LED (Işık Yayan Diyot).....	24
3.2.1.2 Lazer	24

3.2.2	Dedektörler	25
3.2.2.1	PIN Fotodiyotlar	25
3.2.2.2	APD (Çığ Etkili Fotodiyot)	26
3.2.3	Modülasyon Bölgesi	26
3.3	Optik Fiber Sensör Çeşitleri.....	26
3.3.1	Dış Etkileşimli (Extrinsic) Sensörler	26
3.3.2	İç Etkileşimli (Intrinsic) Sensörler.....	27
3.4	Optik Haberleşme Sistemlerinde Optik Sensörlerin Kullanımı	27
3.4.1	Optik Sensörlerin Askeri Alanda Kullanımı	28
3.4.2	Optik Sensörlerin Tarım Alanında Kullanımı	28
3.4.3	Optik Sensörlerin Parmak İzi Tanımada Kullanımı	28
3.4.4	Optik Sensörlerin Uydu İçinde Kullanımı	28
4.	FİBER BRAGG IZGARA TABANLI SENSÖRLER.....	30
4.1	Fiber Izgaralar	30
4.2	Fiber Bragg Izgaralar	31
4.2.1	Fiber Bragg Izgara Çeşitleri	32
4.2.1.1	Üniform Bragg Izgaralar	33
4.2.1.2	Cıvıtlı Bragg Izgaralar	33
4.2.1.3	Apodize Bragg Izgaralar	33
4.2.2	Fiber Bragg Izgaraların Çalışma Prensibi	34
4.2.3	Kupl Mod Teorisi.....	34
4.2.4	Fiber Bragg Izgaraların Değişik Özelliklerine Göre Spektrum Analizleri	39
4.3	Fiber Bragg Izgara Tabanlı Sensörler	48
4.3.1	Fiber Bragg Izgara Tabanlı Sensörlerin Sıcaklık Duyarlılığı.....	49
4.3.2	Fiber Bragg Izgara Tabanlı Sensörlerin Gerilme Duyarlılığı.....	52
4.3.3	Fiber Bragg Izgara Tabanlı Sensörlerin Duyarlılık Farklılıkları.....	55
5.	SONUÇ	56
KAYNAKLAR		58
ÖZGEÇMİŞ.....		59

SİMGE LİSTESİ

A_b	Silindirik yapıdaki optik fiberin çekirdek bölgesindeki $+z$ doğrultusundaki elektrik alanının katsayısı
A_ζ	Düzlemsel yapıdaki katmanlı dalga kılavuzunun çekirdek bölgesindeki çift TE modları için elektrik alanının katsayısı
A_t	Düzlemsel yapıdaki katmanlı dalga kılavuzunun çekirdek bölgesindeki tek TE modları için elektrik alanının katsayısı
$\vec{a}_r$	Silindirik koordinatlarda r doğrultusundaki birim vektör
$\vec{a}_x$	Kartezyen koordinatlarda x doğrultusundaki birim vektör
$\vec{a}_y$	Kartezyen koordinatlarda y doğrultusundaki birim vektör
$\vec{a}_z$	Kartezyen ve silindirik koordinatlarda z yönündeki birim vektör
$\vec{a}_\varphi$	Silindirik koordinatlarda φ doğrultusundaki birim vektör
B	Magnetik akı yoğunluğu
B_b	Silindirik yapıdaki optik fiberin çekirdek bölgesindeki $+z$ doğrultusundaki magnetik alanının katsayısı
B_ζ	Düzlemsel yapıdaki katmanlı dalga kılavuzunun kılıf bölgesindeki çift TE modları için elektrik alanının katsayısı
B_{n_1}	Optik dalga kılavuzunun çekirdek bölgesindeki magnetik akı yoğunluğunun normal bileşeni
B_{n_2}	Optik dalga kılavuzunun kılıf bölgesindeki magnetik akı yoğunluğunun normal bileşeni
B_t	Düzlemsel yapıdaki katmanlı dalga kılavuzunun kılıf bölgesindeki tek TE modları için elektrik alanının katsayısı
c	Işık hızı
C_b	Silindirik yapıdaki optik fiberin kılıf bölgesindeki $+z$ doğrultusundaki elektrik alanının katsayısı
C_ζ	Düzlemsel yapıdaki katmanlı dalga kılavuzunun çekirdek bölgesindeki çift TM modları için magnetik alanının katsayısı
C_t	Düzlemsel yapıdaki katmanlı dalga kılavuzunun çekirdek bölgesindeki tek TM modları için magnetik alanının katsayısı
D	Elektrik akı yoğunluğu
D_b	Silindirik yapıdaki optik fiberin kılıf bölgesindeki $+z$ doğrultusundaki magnetik alanının katsayısı
D_ζ	Düzlemsel yapıdaki katmanlı dalga kılavuzunun kılıf bölgesindeki çift TM modları için magnetik alanının katsayısı
D_{n_1}	Optik dalga kılavuzunun çekirdek bölgesindeki elektrik akı yoğunluğunun normal bileşeni
D_{n_2}	Dalga kılavuzunun kılıf bölgesindeki elektrik akı yoğunluğunun normal bileşeni
D_t	Düzlemsel yapıdaki katmanlı dalga kılavuzunun kılıf bölgesindeki tek TM modları için magnetik alanının katsayısı
d	Optik dalga kılavuzunun yarıçapı
E	Elektrik alan

E_r	Silindirik koordinatlarda optik dalga kılavuzunun çekirdek bölgesindeki elektrik alanının r doğrultusundaki bileşeni
E_{t_1}	Optik dalga kılavuzunun çekirdek bölgesindeki elektrik alanının teğetsel bileşeni
E_{t_2}	Optik dalga kılavuzunun kılıf bölgesindeki elektrik alanının teğetsel bileşeni
E_x	Kartezyen koordinatlarda elektrik alanının x doğrultusundaki bileşeni
E_{y_1}	Kartezyen koordinatlarda optik dalga kılavuzunun çekirdek bölgesindeki elektrik alanının y doğrultusundaki bileşeni
E_{y_2}	Kartezyen koordinatlarda optik dalga kılavuzunun kılıf bölgesindeki elektrik alanının y doğrultusundaki bileşeni
E_z	Kartezyen ve silindirik koordinatlarda elektrik alanının z doğrultusundaki bileşeni
E_ϕ	Silindirik koordinatlarda optik dalga kılavuzunun çekirdek bölgesindeki elektrik alanının ϕ doğrultusundaki bileşeni
$E_\pm$	İleri ve geri yöndeki elektrik alan
F	Vektörel fonksiyon
f	Frekans
G_z	Izgaraya uygulanan gerilme miktarı
H	Magnetik alan
H_r	Silindirik koordinatlarda optik dalga kılavuzunun çekirdek bölgesindeki magnetik alanının r doğrultusundaki bileşeni
H_{t_1}	Optik dalga kılavuzunun çekirdek bölgesindeki magnetik alanının teğetsel bileşeni
H_{t_2}	Optik dalga kılavuzunun kılıf bölgesindeki magnetik alanının teğetsel bileşeni
H_x	Kartezyen koordinatlarda magnetik alanının x doğrultusundaki bileşeni
H_y	Kartezyen koordinatlarda magnetik alanının y doğrultusundaki bileşeni
H_z	Kartezyen ve silindirik koordinatlarda magnetik alanının z doğrultusundaki bileşeni
$H_v^{(1)}(x)$	v . dereceden birinci cins Hankel fonksiyonu
$H_v^{(1)'}(x)$	v . dereceden birinci cins Hankel fonksiyonunun türevi
H_ϕ	Silindirik koordinatlarda optik dalga kılavuzunun çekirdek bölgesindeki magnetik alanının ϕ doğrultusundaki bileşeni
J	Akım yoğunluğu
$J_v(x)$	v . dereceden Bessel fonksiyonu
$J_v'(x)$	v . dereceden Bessel fonksiyonunun türevi
k	Dalga sayısı
k_0	Serbest uzaydaki dalga sayısı
L	Fiber ızgara uzunluğu
$S.A$	Sayısal açıklık
m	Poisson oranı
n	Kırılma indisi
n_{eff}	Efektif kırılma indisi
n_1	Optik dalga kılavuzunun çekirdeğinin kırılma indisi
n_2	Optik dalga kılavuzunun kılıfının kırılma indisi
P_i	Giriş gücü

P_B	Geri yansıyan güç
P_t	İletilen güç
P_e	Fotoelastik katsayı
P_{ij}	Pockel katsayıları
R	Yansıyan güç
r	Silindirik koordinatlarda r bileşeni
$S_+(z)$	Izgara boyunca ilerleyen alan
$S_-(z)$	Izgara boyunca yansıyan alan
T	İletilen güç
t	Zaman
τ	İletim genliği
V	Normalize frekans
v	Dielektrik ortamda ışığın hızı
x	Kartezyen koordinatlarda x bileşeni
y	Kartezyen koordinatlarda y bileşeni
z	Kartezyen ve silindirik koordinatlarda z bileşeni
α_n	Termo-optik katsayı
α_Λ	Termal uzama katsayısı
β	Propagasyon sabiti
$\Delta\lambda_B$	Bragg dalgaboyunda meydana gelen değişim miktarı
Δn	Kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarı
ΔT	Sıcaklık değişimi
η	Modal örtüşme faktörü
λ	Dalgaboyu
λ_B	Bragg dalgaboyu
μ	Magnetik geçirgenlik sabiti
μ_0	Serbest uzaydaki magnetik geçirgenlik sabiti
μ_r	Bağıl magnetik geçirgenlik sabiti
∇	Nabla (Del) operatörü
ω	Açısal frekans
ω_B	Bragg dalgaboyundaki açısal frekans
ϕ	Silindirik koordinatlarda ϕ bileşeni
ϕ_1	Gelen ışığın çekirdek kılıf ara yüzeyinin normali ile yaptığı açı
ϕ_2	Kırılan ışığın çekirdek kılıf ara yüzeyinin normali ile yaptığı açı
θ_1	Gelen ışığın çekirdek kılıf ara yüzeyi ile yaptığı açı
θ_2	Kırılan ışığın çekirdek kılıf ara yüzeyi ile yaptığı açı
ρ	Hacimsel yük yoğunluğu
ϵ	Dielektrik sabiti
ϵ_0	Serbest uzaydaki dielektrik sabiti
ϵ_r	Bağıl dielektrik sabiti
σ	İletkenlik
δ	Bozulma
κ	Optik dalga kılavuzunun çekirdek bölgesinin özdeğeri
γ	Optik dalga kılavuzunun kılıf bölgesinin özdeğeri
Ω	Bragg ızgaranın kuplaj katsayısı

Λ	Izgara periyodu
Γ	Yansıma genliği

KISALTMA LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
APD	Avalanche Photo Diode
CCD	Charge Coupled Device
GPS	Global Positioning System
LED	Light Emitted Diode
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation Diode
PIN	Positive Intrinsic Negative
TE	Transverse Electric
TM	Transverse Magnetic
WDM	Wavelength Division Multiplexing

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Elektromagnetik spektrum.	3
Şekil 1.2 Ara yüzeyde ışık ışınının yansıma ve kırılması.....	4
Şekil 1.3 Optik fiber yapısı.	5
Şekil 1.4 a. Basamak indisli optik fiber, b. Yumuşak geçişli optik fiber (Dutton, 1998)	7
Şekil 1.5 İletilen mod yapısına göre fiber çeşitleri (Dutton,1998).....	7
Şekil 2.1 Simetrik düzlemsel yapıdaki katmanlı dalga kılavuzu.	12
Şekil 2.2 Basamak indisli optik fiberde kırılma indis profili.....	16
Şekil 3.1 Optik fiberler kullanılarak algılanan özellikler.	22
Şekil 3.2 Optik fiber sensörlerin çalışma prensibi.	23
Şekil 3.3 Kenar emisyonlu LED ve yayılım paterni.	24
Şekil 3.4 Yüzey emisyonlu LED ve yayılım paterni.....	24
Şekil 3.5 Lazerlerin çalışma yapısı.....	25
Şekil 3.6 Dış etkileşimli sensörler.....	27
Şekil 3.7 İç etkileşimli sensörler.	27
Şekil 4.1 Faz maskesi tekniği ile ızgara yazma işlemi (Hill ve Meltz, 1997).....	31
Şekil 4.2 Fiber Bragg ızgaranın genel yapısı.	32
Şekil 4.3 Üniform Bragg ızgara yapısı.	33
Şekil 4.4 Cıvıtlı Bragg ızgara yapısı.	33
Şekil 4.5 Gauss dağılımlı kırılma indis değişimi.	34
Şekil 4.6 Yükseltilmiş-kosinüs dağılımlı kırılma indis değişimi.	34
Şekil 4.7 Fiber Bragg ızgaranın kırılma indis değişimi.....	35
Şekil 4.8 Sonlu uzunluklu Bragg ızgarada yansıyan ve iletilen alanlar.	38
Şekil 4.9 Fiber Bragg ızgaradan yansıyan güç miktarı.....	40
Şekil 4.10 Fiber Bragg ızgaradan iletilen güç miktarı.....	41
Şekil 4.11 Değişik ızgara uzunlukları için fiber Bragg ızgaradan yansıyan güç miktarları. ..	42
Şekil 4.12 Değişik ızgara uzunlukları için fiber Bragg ızgaradan iletilen güç miktarları.	42
Şekil 4.13 Değişik ızgara periyodu değerleri için Bragg ızgaradan yansıyan güç miktarı. ...	43
Şekil 4.14 Değişik ızgara periyodu değerleri için Bragg ızgaradan iletilen güç miktarı.	44
Şekil 4.15 Değişik Δn değerleri için fiber Bragg ızgaradan yansıyan güç miktarları.....	45
Şekil 4.16 Değişik Δn değerleri için fiber Bragg ızgaradan iletilen güç miktarları.....	45
Şekil 4.17 Izgara uzunluğuna bağlı olarak değişen maksimum yansıtıcılık.....	46
Şekil 4.18 Band genişliğinin ızgara uzunluğuna bağlı olarak değişim eğrisi.	47
Şekil 4.19 Değişik ızgara uzunluklarına bağlı olarak band genişliğinin değişimi.....	48
Şekil 4.20 Fiber Bragg ızgara tabanlı sensör yapısı.	48
Şekil 4.21 Değişik dalgaboyu değerleri için sıcaklıkla meydana gelen kayma miktarı.....	50
Şekil 4.22 1 C° sıcaklık değişimi olduğu durumda oluşan kayma miktarı.	51
Şekil 4.23 Yansıyan güç spektrumunun sıcaklık etkisiyle değişimi.	52
Şekil 4.24 Değişik dalgaboyu değerleri için gerilmeyle meydana gelen kayma miktarı.	53
Şekil 4.25 1 birim gerilme kuvveti değişimi olduğu durumda oluşan kayma miktarı.	54
Şekil 4.26 Yansıyan güç spektrumunun gerilme kuvveti etkisiyle değişimi.	55

ÖNSÖZ

Beni her türlü konuda destekleyen, arkamda olduklarını bildiğim ve üzerimdeki emeklerini hiçbir zaman ödeyemeyeceğim aileme ve tezimi hazırlarken tavsiyeleriyle önümde bir ışık olan, bana her konuda yardım ve büyük destek veren Hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. N. Özlem ÜNVERDİ'ye çok teşekkür ederim.

Ağustos 2009
Lale KARAMAN

ÖZET

Günümüzde optik fiber haberleşme sistemleri, teknolojinin ana yapısını oluşturmaktadır. Optik fiber haberleşme teknolojisindeki hızlı ve belirgin gelişme, elektronik alanda kullanılan sensör sistemlerinin yaygınlaşmasına neden olmuştur.

Tezin Birinci Bölümü'nde, optik fiber yapısı anlatılmış ve optik fiberin temel özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir. İkinci Bölüm'de, optik dalga kılavuzlarının düzlemsel yapıdaki elektromagnetik özellikleri ve basamak indisli fiber için silindirik yapıdaki elektromagnetik özellikleri incelenmiştir. Üçüncü Bölüm'de, elektronik sistemlerin büyük bir kısmında kullanılan optik fiber sensörlerin kullanım yerleri, çalışma prensibi ve sensör çeşitleri anlatılmıştır. Dördüncü Bölüm'de, optik fiber sensör çeşitleri arasında yer alan fiber Bragg ızgara tabanlı sensörler analiz edilmiştir. Fiber Bragg ızgaralar, ızgara uzunluğu boyunca kırılma indisi değişimiyle oluşan ve yansıma modunda çalışan yapılardır. Izzaraların karakteristik özelliklerini oluşturan dalgaboyu, band genişliği, yansıma ve iletim spektrumu gibi özellikleri incelenmiştir. Fiber Bragg ızgaralar yansıma modunda tasarlandığı için, Bragg dalgaboyundaki yansıyan güç miktarının büyük değerlerde olması, ızgaranın performansının yüksek olmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, yapılan analizlerde, büyük değerli yansıyan güç miktarının elde edilebilmesi için, seçilecek ızgaranın değişik özellikleri incelenmiştir. Sıcaklık ve gerilmeye bağlı olarak, yansıyan dalgaboyunda meydana gelen değişim miktarları araştırılmış ve duyarlılık analizleri yapılmıştır. Beşinci Bölüm'de elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, ızgara uzunluğu arttığında yansıyan güç miktarının da arttığı görülmekte ve kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarı sabit tutulduğu durumda daha büyük uzunluklu fiber Bragg ızgaralar kullanılarak yüksek yansıtıcılık değerleri elde edilebilmektedir. Kırılma indisi değişiminin artan değerleri için yansıyan güç miktarı artış göstermektedir. Ayrıca, kırılma indisi değişiminin yüksek değerleri için, çok daha kısa ızgaralarla, yansıtıcılığın en yüksek değere ulaştığı noktaya erişilebileceği görülmüştür. Yapılan analizler sonucunda, gerilme kuvvetinin dalgaboyuna etkisinin, sıcaklık değişiminin dalgaboyuna etkisinden daha kuvvetli olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İletişim teknolojileri, optik haberleşme, optik fiber sensör, fiber Bragg ızgara, Bragg dalgaboyu

ABSTRACT

Nowadays, optical fiber communication systems are the main structure of technology. Sensor systems which are usually used in electronic fields, is very widespread because of the fast and clear development of technology.

In Part 1, optical fiber structure is explained and information about basic properties of optical fiber are given. Part 2 describes electromagnetic characteristics of light in slab waveguides and step index fiber waveguides. Part 3 contains information about optical fiber sensors which are used commonly in many electronic systems and also in this part involves information about fields in which optical sensors are widely used, and about kind of optical sensors. In Part 4, an analysis is made about fiber Bragg grating sensors which are a kind of optical sensors. Fiber Bragg gratings are structures whose refractive index varies periodically in a given spatial direction. Fiber Bragg grating characteristics such as wavelength, bandwidth, reflection and transmission spectrum are given. Due to the fact that fiber Bragg gratings are designed at reflection mode, grating performance increases when reflection power at Bragg wavelength is increased. Because of this factors, characteristics of grating are investigated. Variation of power which is reflected and transmitted from grating with grating period, grating length and refraction index, is researched. Temperature and strain changes applied to the gratings cause a shift in the reflecting wavelength therefore shift of wavelength is surveyed and sensitivity analyses are made. In Part 5, the results of survey are given. When grating length is increased, reflection power at Bragg Wavelength is increased too. If variation of refraction index is choosen as a constant, reflection power at Bragg wavelength will increase with longer grating length. When variation of refraction index is increased, reflection power at Bragg Wavelength is increased too. Besides, if big value of refraction index's variation is choosen, reflection power at Bragg wavelength will increase with shorter grating length. As a result of analyses, it is surveyed that effects of strain is bigger than effects of temperature on wavelength.

Keywords: Communication technology, optical communication, optical fiber sensor, fiber Bragg grating, Bragg wavelength

1. GİRİŞ

Optik fiber, ışık formunda olan bilgiyi, kendi uzunluğu boyunca bir noktadan diğer noktaya ulaştıran iletişim ortamıdır. Işığın taşınabildiği plastik veya cam fiber yapıları mevcuttur. Optik fiberler diğer iletişim malzemelerine oranla uzun mesafelerdeki veri iletiminin daha hızlı ve yüksek değerlerde yapılabilmesine olanak verdikleri için optik fiber haberleşme sistemlerinde çok sıklıkla kullanılmaktadırlar. Metal kablolar yerine fiber kabloların kullanılmasının nedeni, daha az kayba neden olmaları ve elektromagnetik etkileşimden daha az etkilenmeleridir. Optik fiberler aynı zamanda birçok sensör ve benzeri uygulamaların yapımında oldukça sık olarak kullanılmaktadırlar. Optik fiberin en yaygın kullanım alanları telekomünikasyon, tıp, askeri, ulaşım ve endüstriyel alanlardır. Bu bölümde optik fiber haberleşmesinin temel kavramları açıklanmıştır.

1.1 Optik Fiber Haberleşme Sisteminin Yapısı

Haberleşme sistemlerinin yapıları uzun yıllar boyunca değişime uğrayarak günümüze kadar gelmiştir. Yeni haberleşme sistemlerinin oluşturulmasına neden olarak, iletişimin güvenilirliğini geliştirmek veya gönderilen bilgi miktarını artırmak gösterilebilir.

1838’de telgrafın Samuel F. B. Morse tarafından keşfi, elektriksel haberleşme çağının başlangıcı olmuştur. Morse, 1820’de Hans Cristian Orstedt tarafından keşfedilen elektromagnetizma prensibini kullanmıştır. 1873’de James Clark Maxwell, elektromagnetik alan teorisini ortaya atmış ve elektromagnetik dalgaların ışık gibi, yansıma, kırılma ve soğrulmaya tabi olacağını düşünmüştür. Telefon, 1876’da Alexander Graham Bell tarafından icat edilmiştir. Bilgi iletimi için tel kablo kullanımı, 1878’de New Haven’da ilk telefon santrali kurulumu ile birlikte yaygınlaşmıştır. 1880’de ünlü bilim adamı Alexander Graham Bell’in konuşmayı ışık huzmesi aracılığıyla iletmesi ise optik haberleşme için bir dönüm noktası olmuştur. 1887’de Heinrich Hertz tarafından uzun dalgaboylu elektromagnetik radyasyonun keşfine kadar tel kablo elektriksel haberleşme için tek ortam olmuştur.

Elektromagnetik radyasyonun ilk uygulaması, 1895’de Guglielmo Marconi tarafından gerçekleştirilmiş radyo gösterisidir. Optik frekansları kullanan haberleşme sistemlerine karşı olan eğilim, 1960’da bir yakut kristalden uyumlu ışık emisyonu gerçekleştirildiğinde ortaya çıkmıştır. 1962’de bir grup bilim adamı yarı iletkenlerle lazer uygulaması gerçekleştirmiştir.

1966'da İngiltere'de çalışan bilim adamları George Hockam ve Charles Kao ışığın iletimi için ortam olarak camın kullanılmasını kavramsal olarak düşünmüşlerdir. Bu bilim adamları, cam fiberlerin haberleşme amacı için kullanılmasını önermişlerdir. İlerleyen yıllarda A.B.D., İngiltere ve Japonya gibi ülkelerden birçok grup optik fiberlerle daha düşük kaybın elde edilebileceğini görmüşlerdir. Optik fiberin kalitesi ilerleyen yıllarda artmaya devam etmiştir. Günümüzde 0.2 dB/km'nin altında kayba sahip fiberler mevcuttur.

İletim ortamı olarak optik fiber kullanımının avantajları vardır:

1. Kayıp, diğer iletişim ortamlarına göre azdır.
2. Optik taşıyıcı frekansını kullanmak (10^{14} Hz civarı) yüksek seviyede band genişliğinin elde edilmesini sağlar.
3. Fiber üretiminin temel maddesi olan silisyum, bol miktardadır ve ucuzdur.
4. Fiberin yalıtkan ortamı elektromagnetik girişimden az etkilenir.
5. Fiber, ince bir yapıya sahip olduğu için uygulama alanı verimli olarak kullanılır.
6. Esnek ve hafif bir yapıya sahiptir.

Optik fiber kullanımının birçok avantajı olmasına rağmen dezavantajları da vardır:

1. Optik fiberler kırılğan yapıdadır, bu nedenle zırlamanın iyi bir şekilde yapılması gerekir.
2. Kurulum diğer teknolojilere göre zordur ve daha fazla zaman alır.
3. Zırlamanın iyi yapılmaması durumunda nem gibi olumsuz çevresel koşullarından etkilenebilir.

Bunlara bağılı olarak, optik fiberler iletim hattının düşük gürültü ve düşük kayıplı şekilde çalışmasını sağlarken, bilgi kapasitesinin de artmasını sağlar. Bu nedenlerinden dolayı, optik fiberler birçok uygulama alanı için tercih edilen ortamlardır.

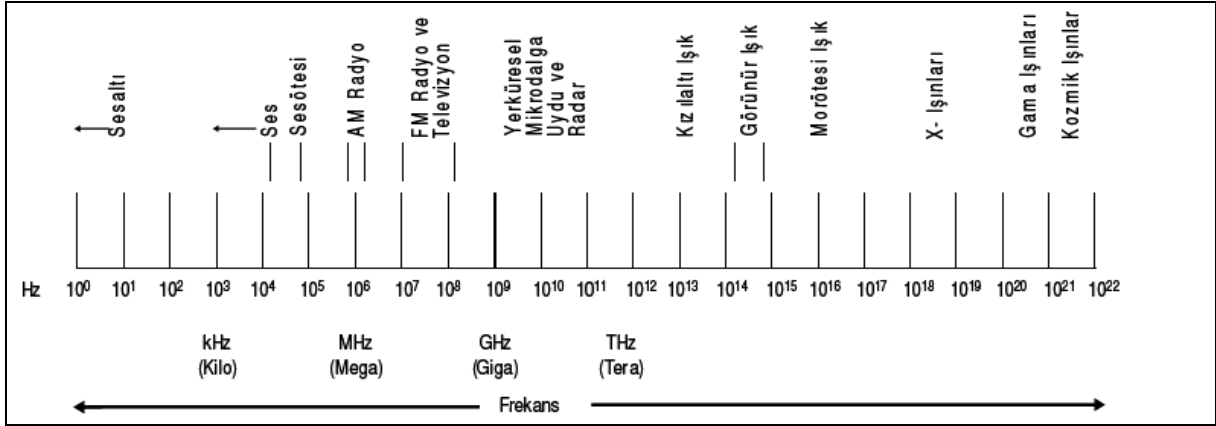
1.2 Optik Dalga Kılavuzları İçin Temel Kavramlar

Optik fiber teknolojisi ışığın yayılımını, iletimini ve algılanmasını içerdığı için öncelikle ışığın yapısı ve temel optik kanunları üzerinde durulması gerekir.

1.2.1 Elektromagnetik Spektrum

Elektromagnetik frekans spektrumu genel olarak üç bölüme ayrılabilir. Kızılötesi (Infrared) ışınlar, gözle görülemeyecek kadar uzun dalgaboyuna sahiptir; görülebilir (visible) ışınlar, gözle görülebilir yapıdadır; morötesi (ultraviolet) ışınlar ise gözle görülemeyecek kadar kısa

dalgaboyuna sahiptir. Optik spektrum frekans aralığı ise 10^{14} Hz ile 10^{15} Hz arasındadır. Elektromagnetik spektrum, Şekil 1.1’de görülmektedir.



Şekil 1.1 Elektromagnetik spektrum.

1.2.2 Işığın Yansıma ve Kırılması

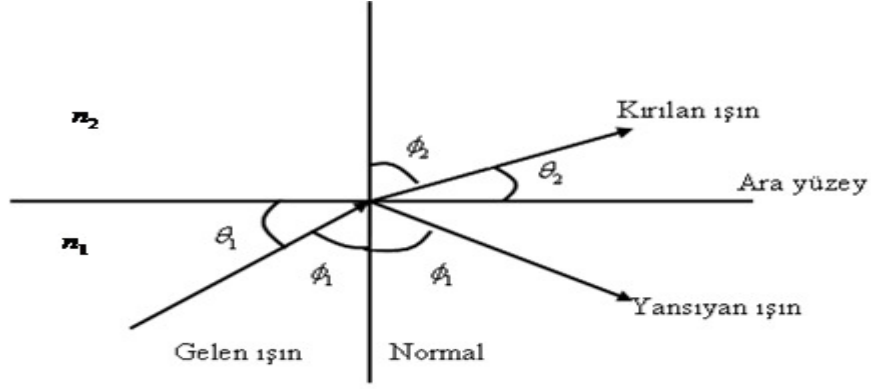
Işığın bir optik fiber içindeki yayılımını incelemek için, dielektrik ortamın kırılma indis parametresini incelemek gerekir. Bir ortamın kırılma indisi, ışığın havadaki hızının o ortamdaki hızına oranı olarak tanımlanır. Bir ışık ışını, optik olarak yoğun bir ortamda, daha az yoğun ortamındakinden daha yavaş ilerler ve kırılma indisi bu etkinin bir ölçüsünü verir. Serbest uzayda ışık dalgası $c = 3.10^8$ m/sn hızla hareket eder. Dielektrik ortama giren dalga v hızında hareket eder. Bu hız ışığın boş uzaydaki hızından farklıdır. λ dalgaboyu, f frekans, n kırılma indisi olmak üzere,

$$c = \lambda f \quad (1.1)$$

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.2)$$

şeklinde ifade edilir. Kırılma indisi hava için $n = 1$, su için $n = 1.33$, cam için $n = 1.5$, elmas için $n = 2.42$ ’dir.

Bir ışık ışını, iki farklı ortamı ayıran sınırla karşılaştığı zaman ışığın bir kısmı ilk ortamdan geri yansır, diğer kısmı ise ikinci ortama geçer. Işığın kırılması veya yansıması, ışığın hızının bulunduğu ortama göre farklılık göstermesidir. Işık ışınının ara yüzeyden yansıması Şekil 1.2’de görülmektedir. Burada, kırılma indisleri arasında $n_1 > n_2$ ilişkisi mevcuttur.



Şekil 1.2 Ara yüzeyde ışık ışınının yansıma ve kırılması.

Ara yüzeydeki ilişki Snell Kanunu ile tanımlanır. Buna göre,

$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2 \quad (1.3)$$

$$n_1 \cos \theta_1 = n_2 \cos \theta_2 \quad (1.4)$$

şeklinde ifade edilir.

Yansıma kanununa göre bir yüzeye çarpan ışın, yüzeye çarptığı açıyla eşit açı yaparak geri yansır. Işığın, fiber içerisinde ilerleyebilmesi için tam yansıma prensibinin meydana gelmesi gerekir. Gelen ışının, kırılma açısının 90° olduğu ve kırılan ışının ara yüzeye paralel bir şekilde ilerlediği durumda, ara yüzeyin normaliyle yaptığı açıya kritik açı denir. Gelen ışının ara yüzeyin normali ile yaptığı açı, kritik açıdan daha büyük ise, tam yansıma prensibi gerçekleşmiş olur (Dutton, 1998). Işığın, fiber içinde ilerleyebilmesi için optik fiberin girişinde optik eksen ile yapacağı en büyük açıya kabul açısı denir.

Fiberde çekirdek bölgesi, kılıf bölgesi ve fiberin dışındaki bölgenin kırılma indisleri ile kabul açısı arasındaki ilişki sayısal açıklık (SA) ile ifade edilir. Sayısal açıklık, fiberin ışık toplama kabiliyetinin bir ölçüsüdür ve sayısal açıklık çekirdek bölgesi ve kılıf bölgesinin indis farklılığına bağlıdır ve doğru orantılıdır. İndis farkı arttıkça sayısal açıklık büyüyeceğinden fiberin kabul ettiği ışın miktarı artar. Kısacası, sayısal açıklık fiber içinde ilerleyebilecek ışınların ışık kaynağından en çok kaç derecelik açı ile geldiğini belirleyen bir değerdir ve

$$SA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.5)$$

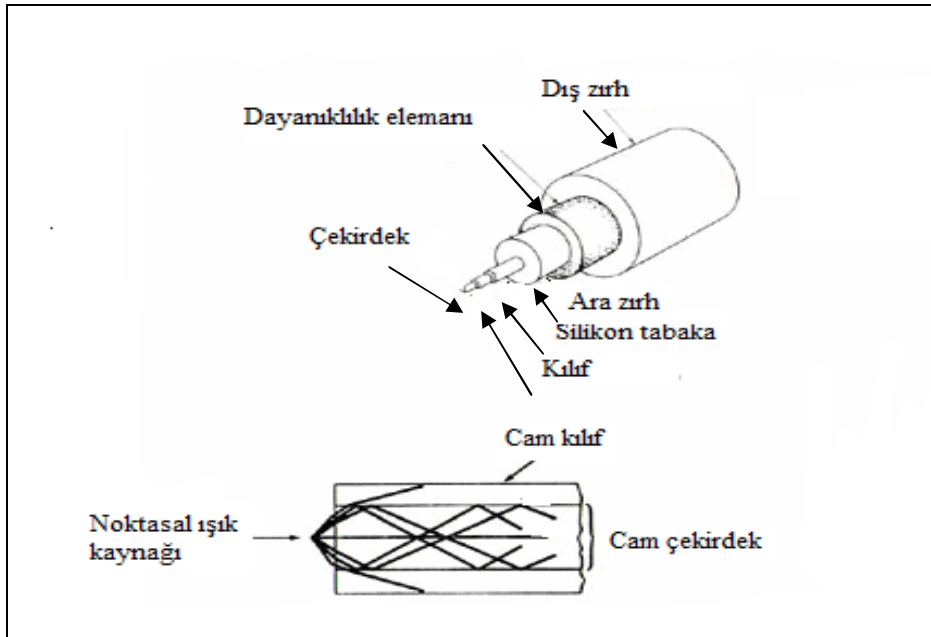
formunda ifade edilir (Dutton, 1998).

1.2.3 Mod Kavramı

Tek bir ışının fiber içinde izlediği yola mod adı verilir. Fibere değişik açılarla giren ışınlar farklı açılarla yansiyarak gideceğinden farklı yollar izler ve diğer uca farklı sürelerde ulaşırlar. Çekirdek eksenine 0° açıyla gelen ışın, yansımaya uğramadan, asal eksene paralel olarak, en kısa zamanda diğer uca ulaşır. Bu moda ana mod denir. Eksene açıyla gelen ışınlar ise çekirdek bölgesi içinde yansiyarak ilerler. Işının geliş açısı büyüdükçe yani yansıma açısı küçüldükçe alınan yol artar. Fibere farklı açılarda gelen ışınlar, diğer uca farklı zamanlarda ulaşır.

1.3 Dalga Kılavuzlarının Yapısı

Optik fiber, optik frekanslarda çalışan dielektrik dalga kılavuzudur ve genellikle silindirik yapıdadır.



Şekil 1.3 Optik fiber yapısı.

Optik haberleşme teknolojisinin kalbi, optik fiberin kendisidir. Optik fiber, saç kılı inceliğinde silindirik camdan yapılmış ve ışığı farklı optik kırılma indislerine sahip bölgelerde hapsederek kendi içerisinde yönlendirebilen bir iletim ortamıdır. Merkezdeki bölge, en çok ışığın geçtiği yerdir ve çekirdek bölgesi (core region) olarak adlandırılır. Çekirdek bölgesini çevreleyen, daha düşük bir kırılma indisine sahip kılıf bölgesi (cladding region) vardır. Işık çekirdek bölgesinde kısırlılır ve kılıf bölgesi ile sınırlandırılarak fiber boyunca taşınır.

Optik fiber yapısı Şekil 1.3’de görülmektedir. En iç kısımdaki çekirdek bölgesinin kırılma indisi n_1 , kılıf bölgesi kırılma indisi n_2 ’den daha büyüktür.

1.4 Normalize Frekans

Fiber içinde kılavuzlanan mod sayısını ve modların çekirdek ve kılıf bölgesindeki güç oranlarını belirleyen normalize frekans (V),

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} d \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.6)$$

dir. Burada, λ dalga boyu ve d fiber çekirdeğinin yarıçapıdır. Tek modlu iletim yapan fiberlerde, $0 \leq V \leq 2.405$ olmalıdır (Dutton, 1998).

1.5 Optik Fiber Çeşitleri

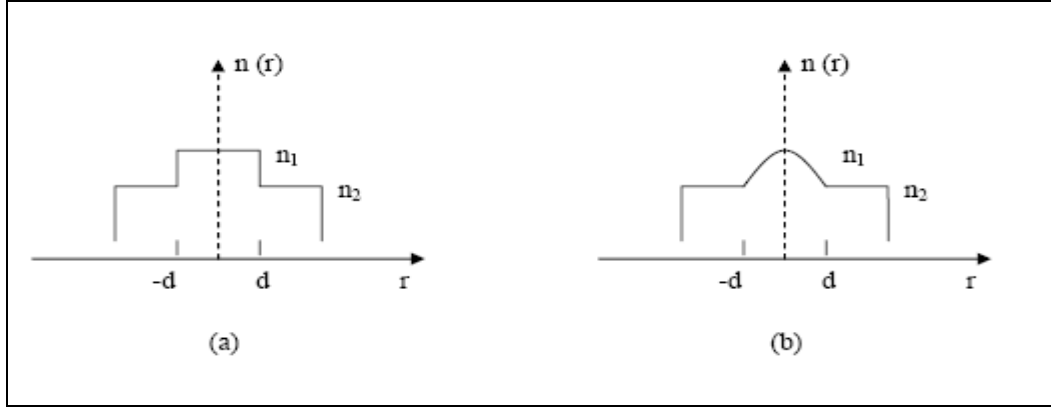
Optik fiberin iletim özellikleri, fiberin yapısal özellikleri tarafından belirlenir. Optik fiberin yapısı, fiberin bilgi taşıma kapasitesini ve çevresel etkilere olan duyarlılığını belirler.

Bir optik fiber, ışık geçiren herhangi bir maddeden üretilebilir ancak optik fiber denince akla cam çekirdekli fiberler gelir. Kullanımı az olmakla birlikte özel plastik malzemeden yapılan optik fiberlerde bulunmaktadır. Plastik çekirdekli fiberlerde meydana gelen zayıflama miktarı, cam çekirdekli fiberlerde meydana gelen zayıflamadan oldukça yüksektir. Plastik fiberler kullanım kolaylığı nedeniyle, bina içi haberleşmede, bilgisayarlar arası bağlantıda, tele konferans, reklam panosu vb. sistemlerde kullanılır.

Optik fiberler kırılma indislerine göre ise iki gruba ayrılır:

1. Basamak indisli optik fiberler (Step index optical fibers).
2. Yumuşak geçişli optik fiberler (Graded index optical fibers).

Basamak indisli optik fiberde çekirdek bölgesi ve kılıf bölgesi homojen maddeden yapılmıştır. Çekirdek bölgesinin kırılma indisi (n_1) üniform dağılımlı olup çekirdek kılıf ara yüzeyinde ani bir değişikliğe uğrar. Yumuşak geçişli optik fiberin çekirdek bölgesi ise homojen olmayan maddeden yapılmıştır. Bu tür fiberlerde, kırılma indisi çekirdeğin merkezinde en yüksek değerdedir ve merkezden uzaklaştıkça azalma gösterir. Şekil 1.4’de optik fiber kırılma indisi profilleri görülmektedir.

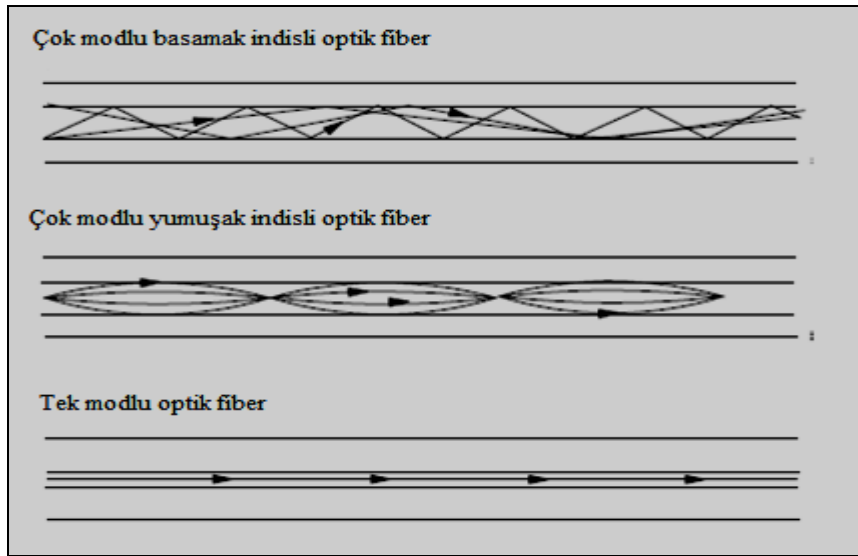


Şekil 1.4 a. Basamak indisli optik fiber, b. Yumuşak geçişli optik fiber (Dutton, 1998).

Fiberler ilettikleri mod sayısına göre iki gruba ayrılır:

1. Tek modlu optik fiberler (Single mode optical fibers)
2. Çok modlu optik fiberler (Multiple mode optical fibers)

Şekil 1.5’de iletilen mod yapısına göre fiber çeşitleri görülmektedir. Tek modlu optik fiberler, tek bir modun iletildiği fiberlerdir. Çok modlu optik fiberlerde ise çok sayıda iletilen mod vardır. Tek modlu optik fiberlerin üstünlüğü, çok modlu optik fiberde farklı modlar arasındaki gecikme farklılıklarının sebep olduğu işaret dispersiyonunun bu tip fiberlerde oluşmamasıdır. Modlar arası dispersiyon yumuşak geçişli optik fiberler kullanılarak azaltılabilir.



Şekil 1.5 İletilen mod yapısına göre fiber çeşitleri (Dutton,1998).

Çok modlu fiberler genellikle geniş çaplı bir merkeze sahiptir ve daha çok gücün iletilmesinin gerekli olduğu kısa mesafeli iletişim hatlarında kullanılırlar. Tek modlu fiberler ise 200 metrenin üzerindeki iletişim hatlarında kullanılmaktadırlar.

2. OPTİK FİBER DALGA KILAVUZLARININ YAPISI

Optik haberleşmede kullanılan fiberler, dielektrikten yapılmış dalga kılavuzlarıdır. Dalga kılavuzlarının yapısını anlamak için Maxwell denklemleri, maddenin elektriksel özellikleri ve ışığın yansıma ve kırılma kanunları göz önüne alınır.

2.1 Maddenin Elektriksel Özellikleri

Dalga kılavuzlarının yapısı incelenirken, ortamın homojen, izotropik, lineer ve zamanla değişmez olarak kabul edilmiştir. Bir maddenin elektriksel özellikleri ϵ (elektriksel geçirgenlik, permittivity), μ (magnetik geçirgenlik, permeability), σ (iletkenlik, conductivity) ile tanımlanır. Maddenin elektrik ve magnetik alanları, süreklilik denklemlerine uyum sağlar.

Bünye denklemleri,

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

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

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

şeklindedir.

Buna göre, kayıpsız dielektrik ortamlar için maddenin elektriksel özellikleri, (2.4), (2.5) ve (2.6) ifadeleriyle gösterilir. ϵ_r , bağıl elektriksel geçirgenlik sabiti ve μ_r , bağıl magnetik geçirgenlik olmak üzere;

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r (F / m) \quad (2.4)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r (H / m) \quad (2.5)$$

$$\sigma = 0 \quad (2.6)$$

dir. Serbest uzaydaki değerler $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} (F / m)$ ve $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} (H / m)$ olarak alınır.

2.2 Maxwell Denklemleri

Zamana göre değişimin olmadığı (statik koşul) ve kaynağın bulunmadığı durum için Maxwell denklemleri,

$$\vec{\nabla}_x \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (2.7)$$

$$\vec{\nabla}_x \vec{H} = j\omega\epsilon\vec{E} \quad (2.8)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad (2.9)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.10)$$

şeklindedir (Cherin,1983).

2.3 Dielektrik- Dielektrik Sınır Koşulları

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

$$E_{t_1} = E_{t_2} \quad (2.11)$$

$$H_{t_1} = H_{t_2} \quad (2.12)$$

$$D_{n_1} = D_{n_2} \quad (2.13)$$

$$B_{n_1} = B_{n_2} \quad (2.14)$$

2.4 Dalga Kılavuzlarında Kullanılan Temel Denklemler

Maxwell denklemleri, sınır koşulları ve bünye denklemleri kullanılarak elde edilir. Dalga kılavuzunun +z yönünde propagasyon yaptığı kabul edilmiştir. Propagasyon doğrultusundaki bileşenler eksenal bileşenlerdir. Kılavuzlanmış elektromagnetik dalganın z değişimi $\exp(\pm j\beta z)$ şeklindedir (Ünverdi, 1991). Zamana göre değişim ise $\exp(j\omega t)$ şeklinde ifade edilebilir.

Böyle bir dalga için alan bağıntıları,

$$\vec{E} = \vec{E}_0(x, y)e^{-j\beta z} (V / m) \quad (2.15)$$

$$\vec{H} = \vec{H}_0(x, y)e^{-j\beta z} (A / m) \quad (2.16)$$

şeklinde ifade edilir.

$\vec{F}$ herhangi bir vektörel fonksiyon olmak üzere, kartezyen koordinatlarda rotasyonel ifadesi,

$$\nabla \times \vec{F} = \begin{vmatrix} \vec{a}_x & \vec{a}_y & \vec{a}_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} \quad (2.17)$$

şeklindedir. (2.7), (2.8) ve (2.17) eşitlikleri yardımıyla,

$$E_x = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y} + \beta \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (2.18)$$

$$E_y = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial y} - \omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (2.19)$$

$$H_x = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial x} - \omega\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (2.20)$$

$$H_y = -\frac{j}{\kappa^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial y} + \omega\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (2.21)$$

olarak enine alan bileşenleri, boyuna alan bileşenleri cinsinden elde edilir. Burada κ , çekirdek bölgesinin özdeğeridir ve,

$$\kappa^2 = k^2 - \beta^2 \quad (2.22)$$

dir. Burada,

$$k^2 = \omega^2 \mu \epsilon \quad (2.23)$$

dur. Ayrıca,

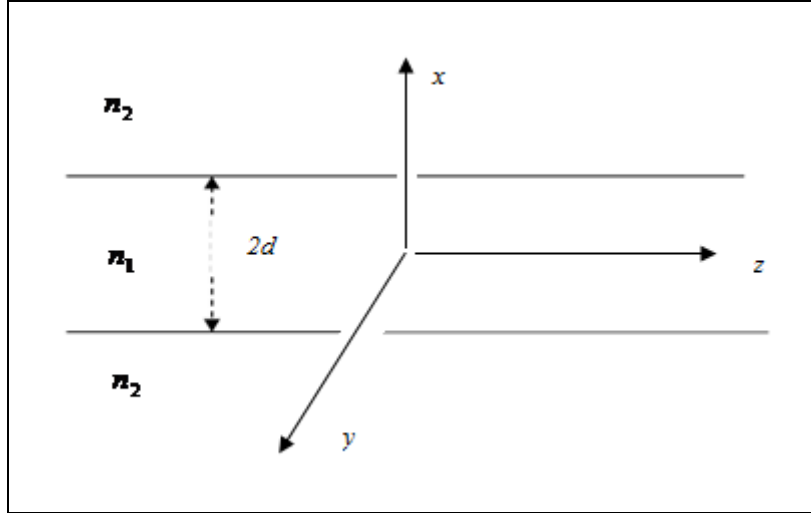
$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + \kappa^2 E_z = 0 \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + \kappa^2 H_z = 0 \quad (2.25)$$

eşitlikleri yazılır (Cherin, 1983).

2.5 Düzlemsel Yapıdaki Katmanlı (Slab) Dalga Kılavuzunda Mod Analizi

Düzlemsel yapıdaki katmanlı dalga kılavuzunun propagasyon davranışları, optik fiberlerin propagasyon özellikleriyle benzerlik gösterir. Bunun yanı sıra düzlemsel yapıdaki katmanlı dalga kılavuzu analizi, silindirik dalga kılavuzu analizine göre daha basit ve kolaydır (Cherin,1983). Şekil 2.1’de bir düzlemsel yapıdaki katmanlı dalga kılavuzunun yapısı görülmektedir.



Şekil 2.1 Simetrik düzlemsel yapıdaki katmanlı dalga kılavuzu.

Kılavuzun y yönünde sonsuz olduğu varsayılarak işlemler yapılmıştır. y'nin sonsuz olma durumunda, elektromagnetik özellikler y yönünde değişim göstermez. Bu durum,

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

olarak ifade edilir.

Kılavuz içindeki elektrik alan ifadesi,

$$\vec{E} = \vec{E}_0(x)e^{-j\beta z}e^{j\omega t} \quad (2.27)$$

şeklinde yazılır. Ortamın magnetik geçirgenliğinin, serbest uzayın magnetik geçirgenliğine (μ_0) eşit olduğu varsayılmıştır. (2.26) eşitliği göz önüne alınırsa, düzlemsel yapıdaki katmanlı dalga kılavuzu için temel dalga denklemleri,

$$E_x = -\frac{j\beta}{\kappa^2} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (2.28)$$

$$E_y = \frac{j\omega\mu}{\kappa^2} \left(\frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (2.29)$$

$$H_x = -\frac{j\beta}{\kappa^2} \left(\frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (2.30)$$

$$H_y = -\frac{j\omega\epsilon}{\kappa^2} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (2.31)$$

olarak elde edilir.

2.6 TE Modları

TE modları için $E_z = 0$ ve $H_z \neq 0$ olduğu için slab yapıda TE modları için E_y, H_x, H_z bileşenleri mevcuttur (Cherin,1983). Helmholtz eşitliği,

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (2.32)$$

şeklindedir. Burada,

$$k^2 = \omega^2 \mu \epsilon \quad (2.33)$$

dır.

TE modu için elektrik alanın yalnızca y bileşeni olduğu için (2.26) eşitliği kullanılarak,

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2} + \kappa^2 E_y = 0 \quad (2.34)$$

elde edilir.

Elektrik alanın y bileşeni,

$$E_y = E_y(x) e^{-j\beta z} \quad (2.35)$$

olarak yazılır ve (2.34) eşitliğinde yerine yazılırsa,

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \kappa^2 E_y = 0 \quad (2.36)$$

bulunur. (2.36) eşitliğinin kılavuzun çekirdek ve kılıf bölgeleri için çözümü farklıdır.

Maxwell eşitlikleri yardımıyla,

$$H_x = -\frac{\beta}{\omega \mu_0} E_y \quad (2.37)$$

$$H_z = \frac{j}{\omega \mu_0} \frac{\partial E_y}{\partial x} \quad (2.38)$$

olarak yazılır.

Kılavuzun çekirdek bölgesinde ($x \leq d$) için (2.36) eşitliğinin genel çözümü,

$$E_{y1} = A_\kappa \cos(\kappa x) + A_t \sin(\kappa x) \quad (2.39)$$

şeklindedir. Burada,

$$\kappa^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (2.40)$$

olarak tanımlanır ve κ , çekirdek bölgesinin özdeğeridir. (2.39) eşitliğinde yer alan $A_\kappa \cos(\kappa x)$ parçası çift TE modlarını, $A_t \sin(\kappa x)$ parçası ise tek TE modlarını ifade eder.

Kılıf bölgesinde x 'in artan değerleri ile alan sönümlü olacaktır. Bu yüzden (2.36) eşitliğinin kılıf bölgesinde ($x \geq d$) için çözümü,

$$E_{y2} = B_{\gamma,t} e^{-\gamma(|x|-d)} \quad (2.41)$$

şeklindedir. Burada, γ kılıf bölgesinin özdeğeridir ve

$$\gamma^2 = \beta^2 - n_2^2 k_0^2 \quad (2.42)$$

dir.

2.7 TM Modları

TM modları için $E_z \neq 0$ ve $H_z = 0$ olduğu için slab yapıda TM modları için E_x, E_z, H_y bileşenleri mevcuttur. TM modu için magnetik alanın yalnızca y bileşeni vardır

(Cherin,1983). Buna göre,

$$H_y = H_y(x)e^{-j\beta z} \quad (2.43)$$

şeklinde yazılır. Magnetik alan için Helmholtz eşitliği,

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0 \quad (2.44)$$

şeklindedir. (2.44) eşitliği kullanılarak,

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \kappa^2 H_y = 0 \quad (2.45)$$

elde edilir. Burada,

$$\kappa^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (2.46)$$

değerindedir. (2.45) eşitliğinin kılavuzun çekirdek ve kılıf bölgeleri için çözümü farklıdır.

Maxwell eşitliklerini kullanarak,

$$E_x = \frac{\beta}{\omega \epsilon} H_y \quad (2.47)$$

$$E_z = \frac{j}{\omega \epsilon} \frac{\partial H_y}{\partial x} \quad (2.48)$$

olarak bulunur.

Kılavuzun çekirdek bölgesinde ($x \leq d$) için (2.45) eşitliğinin genel çözümü,

$$H_{y1} = C_\phi \cos(\kappa x) + C_t \sin(\kappa x) \quad (2.49)$$

şeklindedir. (2.49) eşitliğinde yer alan $C_\phi \cos(\kappa x)$ parçası çift TM modlarını, $C_t \sin(\kappa x)$ parçası ise tek TM modlarını ifade eder.

Kılıf bölgesinde x 'in artan değerleri ile alan sönümlü olacaktır. Bu yüzden (2.45) eşitliğinin kılıf bölgesinde ($x \geq d$) için çözümü,

$$H_{y2} = D_{\phi,t} e^{-\gamma(|x|-d)} \quad (2.50)$$

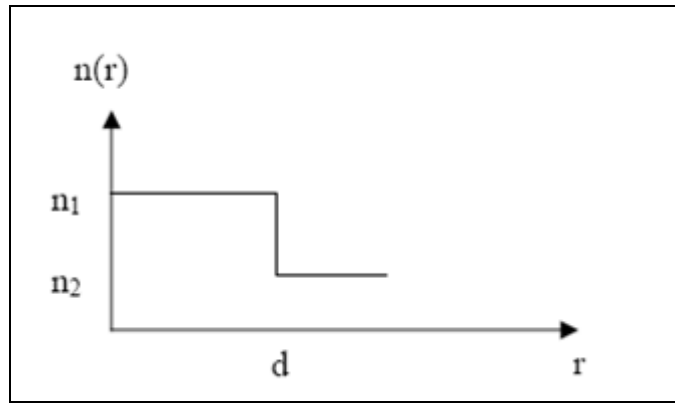
şeklindedir. Burada, γ sönümlü kılıf bölgesinin özdeğeridir ve

$$\gamma^2 = \beta^2 - n_2^2 k_0^2 \quad (2.51)$$

dir.

2.8 Silindirik Yapıdaki Dalga Kılavuzunda Mod Analizi

Bu bölümde, basamak indisli optik fiberdeki modlar için alan ifadeleri elde edilmiştir. Şekil 2.2’de basamak indisli optik fiberin kırılma indis profili görülmektedir.



Şekil 2.2 Basamak indisli optik fiberde kırılma indis profili.

2.8.1 Basamak İndisli Optik Fiberler İçin Temel Denklemler

+z yönünde propagasyon yapan bir alan için, silindirik koordinatlarda z yönündeki alan ifadeleri,

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + \kappa^2 E_z = 0 \quad (2.52)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \phi^2} + \kappa^2 H_z = 0 \quad (2.53)$$

dir.

+z yönünde propagasyon yapan dalgaının z yönündeki alan ifadelerinin zamana bağımlılığı $e^{j(\alpha x - \beta z)}$ şeklindedir. Değişkenlere Ayırma Metodu kullanıldığında, elektrik alan,

$$E_z(\phi, r) = A \Phi(\phi) F(r) \quad (2.54)$$

şeklinde ifade edilir. Optik fiber dairesel simetriye sahip olduğundan,

$$\Phi(\phi) = e^{j\nu\phi} \quad (2.55)$$

yazılabilir. ν , pozitif ve negatif değerler alabilir. Buna göre (2.54) eşitliği,

$$E_z(\phi, r) = A F(r) e^{j\nu\phi} \quad (2.56)$$

şeklinde yazılır. (2.56) eşitliğinin, (2.52) eşitliğine göre türevi alınır,

$$\frac{\partial E_z}{\partial r} = A e^{j\nu\phi} \frac{dF(r)}{dr} \quad (2.57)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} = A e^{j\nu\phi} \frac{d^2 F(r)}{dr^2} \quad (2.58)$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} = -A \nu^2 e^{j\nu\phi} F(r) \quad (2.59)$$

eşitlikleri yazılır. (2.52), (2.57), (2.58) ve (2.59) eşitlikleri kullanılarak,

$$\frac{d^2 F(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF(r)}{dr} + \left(\kappa^2 - \frac{\nu^2}{r^2} \right) F(r) = 0 \quad (2.60)$$

Bessel diferansiyel denklemi elde edilir (Cherin,1983).

2.8.2 Basamak İndisli Optik Fiber İçin Çekirdek Bölgesi ve Kılıf Bölgesindeki Alan İfadeleri

Silindirik optik fiber için uygun alan denklemlerini bulabilmek için iki gereklilik vardır:

1. Optik fiber çekirdeğinde alan sonlu olmalıdır. Spesifik olarak $r = 0$ 'da seçilen silindirik fonksiyon sınırlı olmalıdır.
2. Kılıftaki alan ise fiberin merkezinden uzaklaştıkça eksponansiyel olarak azalmalıdır.

Bu gereklilikler göz önüne alındığında, çekirdek bölgesi ($r < d$) için,

$$E_z = A_b J_\nu(\kappa r) e^{j\nu\phi} \quad (2.61)$$

$$H_z = B_b J_\nu(\kappa r) e^{j\nu\phi} \quad (2.62)$$

alan ifadeleri elde edilir. Burada, $J_\nu(\kappa r)$ Bessel fonksiyonunu ifade eder. $\kappa = j\gamma$ şeklinde tanımlanırsa, kılıf bölgesi ($r > d$) için,

$$E_z = C_b H_\nu^{(1)}(j\gamma r) e^{j\nu\phi} \quad (2.63)$$

$$H_z = D_b H_\nu^{(1)}(j\gamma r) e^{j\nu\phi} \quad (2.64)$$

alan ifadeleri elde edilir. Burada, $H_\nu^{(1)}(j\gamma r)$ birinci dereceden modifiye Hankel fonksiyonunu ifade eder. Bu eşitliklerde kullanılan A_b , B_b , C_b ve D_b değerleri bilinmeyen sabitlerdir. Maxwell eşitlikleri yardımıyla,

$$E_r = -\frac{j}{\kappa^2} \left[\beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + \omega \mu \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right] \quad (2.65)$$

eşitliği elde edilir. Çekirdek bölgesi ($r < d$) için,

$$\frac{\partial E_z}{\partial r} = A_b \kappa J'_\nu(\kappa r) e^{j\nu\phi} \quad (2.66)$$

dir. Burada,

$$J'_\nu(\kappa r) = \frac{\partial J_\nu(\kappa r)}{\partial(\kappa r)} \quad (2.67)$$

dir. Aynı bölge için,

$$\frac{\partial H_z}{\partial \phi} = B_b (j\nu) J_\nu(\kappa r) e^{j\nu\phi} \quad (2.68)$$

ifadesi yazılır. (2.66) ve (2.67) eşitlikleri, (2.68) eşitliğinde yerine yazılırsa,

$$E_r = -\frac{j}{\kappa^2} \left[A_b \beta \kappa J'_\nu(\kappa r) e^{j\nu\phi} + B_b (j\nu) (\omega \mu) \frac{1}{r} J_\nu(\kappa r) e^{j\nu\phi} \right] \quad (2.69)$$

eşitliği elde edilir. Aynı yöntemle,

$$E_\phi = -\frac{j}{\kappa^2} \left[j\beta \frac{\nu}{r} A_b J_\nu(\kappa r) - \kappa \omega \mu B_b J'_\nu(\kappa r) \right] e^{j\nu\phi} \quad (2.70)$$

$$H_r = -\frac{j}{\kappa^2} \left[-j\omega \epsilon_1 \frac{\nu}{r} A_b J_\nu(\kappa r) + \kappa \beta B_b J'_\nu(\kappa r) \right] e^{j\nu\phi} \quad (2.71)$$

$$H_\phi = -\frac{j}{\kappa^2} \left[\kappa \omega \epsilon_1 A_b J'_\nu(\kappa r) + j\beta \frac{\nu}{r} B_b J_\nu(\kappa r) \right] e^{j\nu\phi} \quad (2.72)$$

formundaki alan ifadeleri elde edilir. Burada,

$$k_1^2 = \omega^2 \mu_0 \varepsilon_1 \quad (2.73)$$

olmak üzere;

$$\kappa^2 = k_1^2 - \beta^2 \quad (2.74)$$

dir. Kılıf bölgesi ($r > d$) için,

$$E_r = -\frac{1}{\gamma^2} \left[\beta \gamma C_b H_v^{(1)'}(j\gamma r) + \omega \mu_0 \frac{\nu}{r} D_b H_v^{(1)}(j\gamma r) \right] e^{j\nu\phi} \quad (2.75)$$

$$E_\phi = -\frac{1}{\gamma^2} \left[\beta \frac{\nu}{r} C_b H_v^{(1)}(j\gamma r) - \omega \gamma \mu_0 \frac{\nu}{r} D_b H_v^{(1)'}(j\gamma r) \right] e^{j\nu\phi} \quad (2.76)$$

$$H_r = -\frac{1}{\gamma^2} \left[-\omega \varepsilon_2 \frac{\nu}{r} C_b H_v^{(1)}(j\gamma r) + \gamma \beta D_b H_v^{(1)'}(j\gamma r) \right] e^{j\nu\phi} \quad (2.77)$$

$$H_\phi = -\frac{1}{\gamma^2} \left[\gamma \omega \varepsilon_2 C_b H_v^{(1)'}(j\gamma r) + \beta \frac{\nu}{r} D_b H_v^{(1)}(j\gamma r) \right] e^{j\nu\phi} \quad (2.78)$$

eşitlikleri bulunur. Burada,

$$k_2^2 = \omega^2 \mu_0 \varepsilon_2 \quad (2.79)$$

olmak üzere;

$$\gamma^2 = \beta^2 - k_2^2 \quad (2.80)$$

dir. Burada A_b , B_b , C_b , D_b ve β sabitleri sınır koşullarına bakılarak elde edilir (Cherin, 1983).

2.8.3 Basamak İndisli Optik Fiber İçin Sınır Koşulları

Çekirdek ile kılıf ara yüzeyinde dielektrik - dielektrik sınır koşulları uygulandığında sınır yüzeyindeki elektrik alan ve magnetik alan bileşenleri elde edilir:

$$E_{z_1} = E_{z_2} \quad (2.81)$$

$$E_{\phi_1} = E_{\phi_2} \quad (2.82)$$

$$H_{z_1} = H_{z_2} \quad (2.83)$$

$$H_{\phi_1} = H_{\phi_2} \quad (2.84)$$

2.8.4 Basamak İndisli Optik Fiberin Karakteristik Denklemi

Çekirdek bölgesi ve kılıf bölgesi için elde edilen (2.61) ve (2.63) eşitlikleri kullanılarak, $r = d$ 'de, E_z için sınır değer denklemi,

$$A_b J_v(\kappa d) - C_b H_v^{(1)}(j\gamma d) = 0 \quad (2.85)$$

olarak elde edilir. Bu değer, E_ϕ için yazılan (2.70) ve (2.76) eşitliklerinde yerine yazılırsa,

$$\left(\frac{\beta}{\kappa^2} \frac{v}{d}\right) J_v(\kappa d) A_b + j \frac{\omega \mu_0}{\kappa} J_v'(\kappa d) B_b + \left(\frac{\beta}{\gamma^2} \frac{v}{d}\right) H_v^{(1)}(j\gamma d) C_b - \frac{\omega \mu_0}{\gamma} H_v^{(1)'}(j\gamma d) D_b = 0 \quad (2.86)$$

eşitliği elde edilir.

Çekirdek bölgesi ve kılıf bölgesi için elde edilen (2.62) ve (2.64) eşitlikleri kullanılarak, $r = d$ 'de, H_z için sınır değer denklemi,

$$B_b J_v(\kappa d) - D_b H_v^{(1)}(j\gamma d) = 0 \quad (2.87)$$

olarak elde edilir. Bu değer, H_ϕ için yazılan (2.72) ve (2.78) eşitliklerinde yerine yazılırsa,

$$\left(\frac{j\omega \epsilon_1}{\kappa}\right) J_v'(\kappa d) A_b + \left(\frac{\beta}{\kappa^2} \frac{v}{d}\right) J_v(\kappa d) B_b + \left(\frac{\omega \epsilon_2}{\gamma}\right) H_v^{(1)'}(j\gamma d) C_b + \left(\frac{\beta}{\gamma^2} \frac{v}{d}\right) H_v^{(1)}(j\gamma d) D_b = 0 \quad (2.88)$$

olur. Burada A_b , B_b , C_b ve D_b katsayılarının bulunması için (2.85), (2.86), (2.87) ve (2.88) eşitliklerinin determinant yardımıyla çözülmesi gerekir.

Buna göre,

$$\begin{vmatrix} J_v(\kappa d) & 0 & -H_v^{(1)}(j\gamma d) & 0 \\ \left(\frac{\beta}{\kappa^2} \frac{v}{d}\right) J_v(\kappa d) & \left(\frac{j\omega\mu_0}{\kappa}\right) J_v'(\kappa d) & \left(\frac{\beta}{\gamma^2} \frac{v}{d}\right) H_v^{(1)}(j\gamma d) & \left(\frac{\omega\mu_0}{\gamma}\right) H_v^{(1)'}(j\gamma d) \\ 0 & J_v(\kappa d) & 0 & -H_v^{(1)}(j\gamma d) \\ \left(\frac{j\omega\epsilon_1}{\kappa}\right) J_v'(\kappa d) & \left(\frac{\beta}{\kappa^2} \frac{v}{d}\right) J_v(\kappa d) & \left(\frac{\omega\epsilon_2}{\gamma}\right) H_v^{(1)'}(j\gamma d) & \left(\frac{\beta}{\gamma^2} \frac{v}{d}\right) H_v^{(1)}(j\gamma d) \end{vmatrix} = 0 \quad (2.89)$$

elde edilir.

(2.89) determinantının sonuçlarının genişletilmesiyle elde edilen eşitlikler, dalga kılavuzunun özdeğer veya karakteristik denklemleri olarak adlandırılır. Basamak indisli optik fiberin karakteristik denklemi,

$$\left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \frac{d}{\kappa} \frac{\gamma^2}{J_v(\kappa d)} \frac{J_v'(\kappa d)}{J_v(\kappa d)} + j\gamma d \frac{H_v^{(1)'}(j\gamma d)}{H_v^{(1)}(j\gamma d)} \right) \left(\frac{d}{\kappa} \frac{\gamma^2}{J_v(\kappa d)} \frac{J_v'(\kappa d)}{J_v(\kappa d)} + j\gamma d \frac{H_v^{(1)'}(j\gamma d)}{H_v^{(1)}(j\gamma d)} \right)$$

şeklinde elde edilir. (2.85) ve (2.87) eşitliklerinden,

$$C_b = \frac{J_v(\kappa d)}{H_v^{(1)}(j\gamma d)} A_b \quad (2.91)$$

$$D_b = \frac{J_v(\kappa d)}{H_v^{(1)}(j\gamma d)} B_b \quad (2.92)$$

(2.86) ve (2.88) denklemleriyle (2.91) ve (2.92) denklemleri kullanılarak

$$B_b = \frac{j}{v} \frac{d\kappa \gamma \left(\epsilon_1 \gamma J_v'(\kappa d) H_v^{(1)}(j\gamma d) + j\epsilon_2 \kappa J_v(\kappa d) H_v^{(1)'}(j\gamma d) \right)}{\omega(\epsilon_1 - \epsilon_2) \mu_0 \beta J_v(\kappa d) H_v^{(1)}(j\gamma d)} A_b \quad (2.93)$$

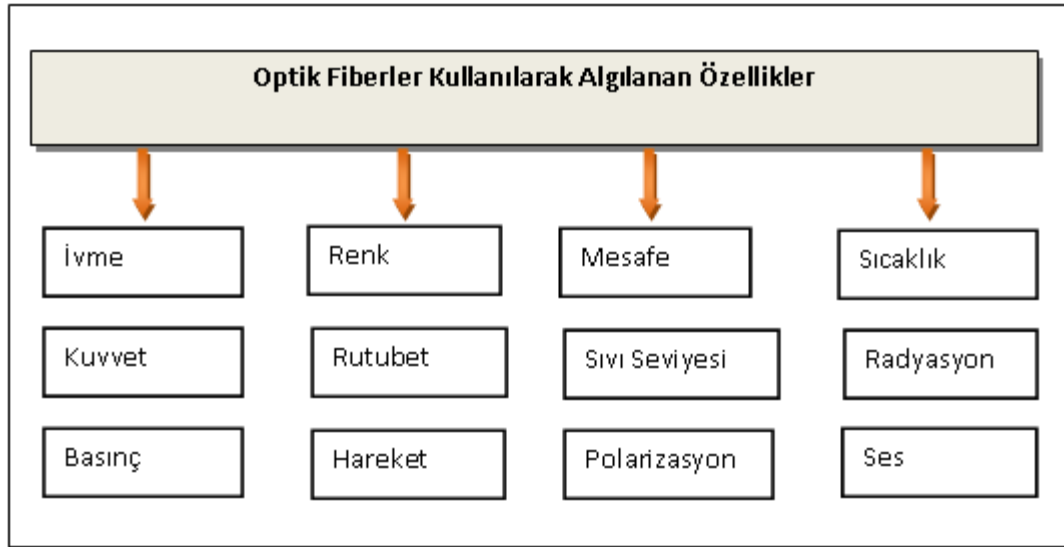
$$B_b = jv \frac{\omega(\epsilon_1 - \epsilon_2) \beta J_v(\kappa d) H_v^{(1)}(j\gamma d)}{d\kappa \gamma \left(\gamma J_v'(\kappa d) H_v^{(1)}(j\gamma d) + j\kappa J_v(\kappa d) H_v^{(1)'}(j\gamma d) \right)} A_b \quad (2.94)$$

eşitlikleri elde edilir (Cherin,1983).

3. OPTİK FİBER SENSÖRLER

Elektronik sistemlerin çoğunda sensörler önemli bir yere sahiptir. Optik fiber haberleşme teknolojisindeki hızlı ve belirgin gelişme, optik fiber sensörlere olan ilgiyi artırmıştır. Sensörler, fiziksel ortam ile endüstriyel amaçlı elektrik/elektronik cihazları birbirine bağlayarak bir köprü görevi görürler. Çeşitli fiziksel ve kimyasal olayların optik fiber sensör içinden geçen ışığın şiddetine, iç yansımalarına ve polarizasyon durumuna etki etmesi, bu olaylara etkili olan büyüklüklerin ölçülmesine imkân sağlar. Bu cihazlar endüstriyel işletim sürecinde kontrol, koruma ve görüntüleme gibi çok geniş bir kullanım alanına sahiptirler (Gholamzadeh ve Nabovati, 2008).

Optik fiber sensörlerin endüstride birçok uygulama alanı vardır. Otomotiv, makina araçları, havacılık, jeofizik, petro-kimya ve askeri uygulamaları bilinen en önemli uygulama alanlarıdır. Şekil 3.1’de optik fiberlerle algılanan özellikler gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Optik fiberler kullanılarak algılanan özellikler.

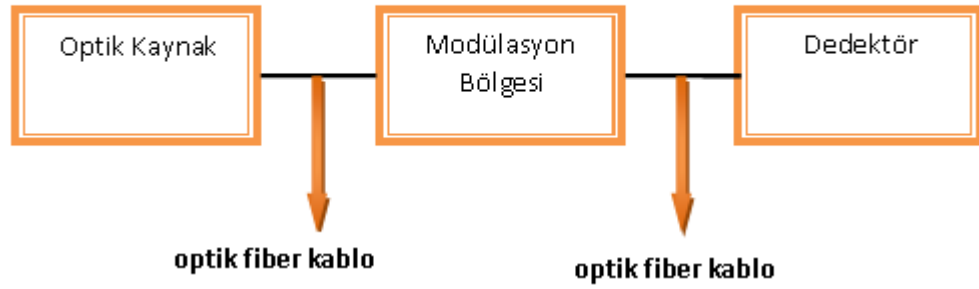
Optik fiber sensörlerin kullanılmasını gerektiren ve bazı durumlarda tek uygun algılama çözümü olan karakteristikleri vardır. Optik fiber sensörlerin önemli özellikleri aşağıda özetlenmiştir (Udd, 1996; Gholamzadeh ve Nabovati, 2008):

1. Elektromagnetik etkileşimden az etkilenme.
2. Yüksek duyarlılık.
3. Yüksek band genişliği.
4. Sağlam, küçük ebatlı ve hafif olması.

5. Su ve korozyona karşı dayanıklılık.
6. Güvenli bilgi akışı sağlama.

3.1 Optik Fiber Sensörlerin Çalışma Prensibi

Optik fiberler, algılama uygulamalarında önemli bir kullanım alanı bulmuştur. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi, bir optik fiber sensör sistemi temel olarak ışık kaynağı, optik fiber, algılama elemanı ya da dönüştürücü ve dedektörden oluşur. Optik fiber sensörün çalışma prensibi, dedektörden alınan optik sinyalin karakteristiğinde meydana gelen değişimlere sebep olan yoğunluk, dalgaboyu, polarizasyon ve faz gibi optik sistemin bazı parametrelerini kontrol ederek algılama yapmaktır.



Şekil 3.2 Optik fiber sensörlerin çalışma prensibi.

3.2 Optik Fiber Sensör Bileşenleri

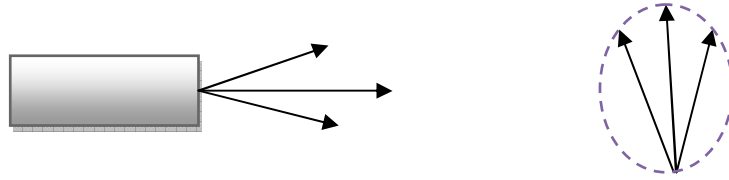
Bir optik fiber sensör sistemi temel olarak ışık kaynağı, optik fiber, algılama elemanı ya da dönüştürücü ve dedektörden oluşur.

3.2.1 Optik Kaynaklar

Işık kaynağının temel görevi, elektriksel enerjiyi ışık enerjisine dönüştürmektir. Yaygın olarak kullanılan ışık kaynakları olarak LED (Light Emitted Diode) ve lazer (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation Diode) gösterilebilir. Yarı iletken temelli optik kaynaklar boyut ve fiyat açısından daha avantajlıdır. Lazerlerin, yüksek yoğunluklu ışık yayma ve ışığı iyi bir şekilde odaklayabilme gibi LED'lere göre üstünlükleri vardır. Fakat LED'ler lazerlere göre daha ucuz, daha uzun ömürlü ve ısıya daha az duyarlıdır.

3.2.1.1 LED (Işık Yayan Diyot)

Işık yayan diyotlar, kendiliğinden ışıma mekanizmasına sahip olan PN eklemli diyotlardır. Yarı iletken diyot uçlarına uygulanan küçük bir gerilim p ve n eklemlerinin birleşme bölgesinde akım akmasına neden olur. Diyodu oluşturan, p tipi madde yapısı içinde daha çok pozitif yük, n tipi madde ise negatif yük barındırır. Bu durumda P bölgesine pozitif gerilim, N bölgesine negatif gerilim uygulandığında iki bölgedeki elektron ve proton yükleri birbirine doğru itilmeye başlarlar ve akım oluşmasına neden olurlar. Bu birleşmenin sonucunda enerji açığa çıkar ve enerji kendini ışıma yaparak gösterir (Dutton, 1998). Optik fiber sistemlerinde kullanılan diyotlar genellikle galyum arsenik katkılı yarı iletken malzemeden yapılır. LED'ler kenar emisyonlu ve yüzey emisyonlu olmak üzere iki çeşittir. Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de bu LED'lere ilişkin yayılım paternleri görülmektedir.



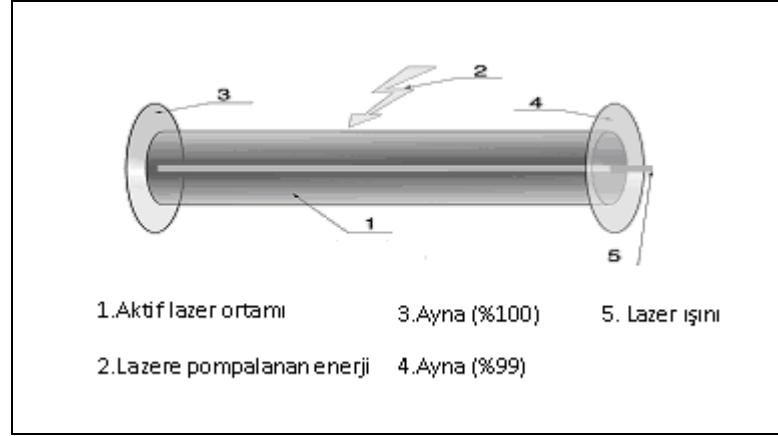
Şekil 3.3 Kenar emisyonlu LED ve yayılım paterni.



Şekil 3.4 Yüzey emisyonlu LED ve yayılım paterni.

3.2.1.2 Lazer

Yarı iletken lazerlerin yapısı LED'lerin yapısına çok benzerdir. Yarı iletken içindeki bir elektron yüksek enerji seviyesinden düşük enerji seviyesine indiği zaman, üzerindeki fazla enerjiden kurtulmak için ışıma yapar. Yayılan bu enerji, lazer yapısını oluşturan aynalar yardımıyla kendi ortamında kalır ve elektronların devamlı olarak uyarılmasına neden olarak ışık yayılımının devamı sağlanır (Dutton, 1998).



Şekil 3.5 Lazerlerin çalışma yapısı.

Şekil 3.5’de, lazer yapısı görülmektedir. Burada bulunan aynaların ilki tam yansımali iken, ikinci ayna daha az yansımali yapıya sahiptir. Bunun nedeni, ilk aynaya gelen ışık tam yansıma yaparak diğer aynaya ulaşır, buradan bir miktar ışık dışarı çıkarak, ışık kaynağını oluşturur ve ikinci aynadan geri yansıyan ışık ise bu döngünün devam etmesini sağlar.

3.2.2 Dedektörler

Optik dedektörler, alınan optik sinyali elektriksel sinyale dönüştürmek için kullanılırlar. En yaygın dedektörler yarı iletken olup, gelen ışığa karşı akım oluşturan fotodiyotlardır. Optik fiber haberleşmesinde kullanılan fotodiyotlar, silisyum, galyum arsenik, germanyum, indiyum-fosfat gibi yarı iletken malzemeden yapılırlar. PIN (Positive Intrinsic Negative, Pozitif Katkılanmamış Bölge Negatif) diyotlar ve APD (Avalanche Photo Diode, Çığ Etkili Fotodiyot) olmak üzere yaygın olarak kullanılan iki tip yarı iletken fotodiyot vardır (Dutton, 1998).

3.2.2.1 PIN Fotodiyotlar

PN ekleminden oluşan yarı iletken malzemenin üzerine ışık düşürüldüğü zaman, ışık çok az katkılanmış n tipi yarı iletken malzemenin üzerinde soğurulur. Bu sayede akım taşıyıcıları oluşturularak, akım üretilmiş ve alınan optik sinyal, elektriksel sinyale dönüştürülmüş olur.

3.2.2.2 APD (Çığ Etkili Fotodiyot)

Bir APD, temelde yüksek ters gerilim ile çalışan pn eklemli diyottur. Yüksek gerilim verildiği için üzerine foton düştüğünde çok sayıda elektronun serbest kalması sağlanır ve yüksek akımlar elde edilir.

3.2.3 Modülasyon Bölgesi

Modülasyon bölgesi, optik fiber sistemlerde faz, genlik, frekans, polarizasyon ve dalgaboyu modülasyonu gibi değişik fonksiyonları yerine getiren elemanlardan oluşur. Optik sinyal analog veya sayısal bilgi sinyali kullanılarak modüle edilebilir. Analog modülasyonda, optik kaynaktan yayılan ışık değişimi süreklidir. Sayısal modülasyonlu sistemler, analog modülasyonlu sistemlerle karşılaştırılınca daha düşük işaret gürültü oranına sahiptir. Işık hüzmesi, optik yoğunluk, faz, polarizasyon, dalgaboyu ve spektral dağılım olmak üzere ışığın beş temel özelliği kullanılarak modüle edilir.

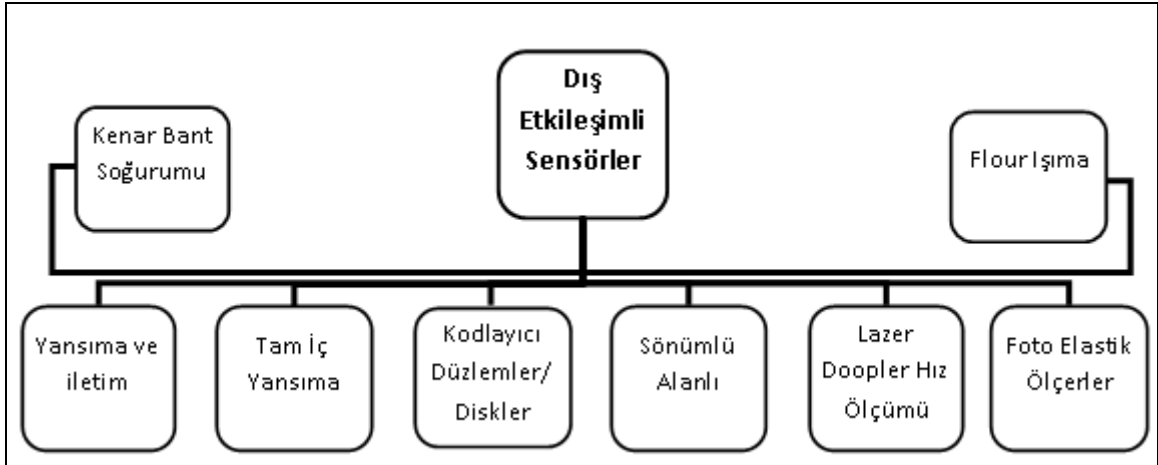
3.3 Optik Fiber Sensör Çeşitleri

Optik fiber sensörleri çeşitli şekillerde sınıflandırmak mümkündür. Işığın, fiberdeki durumu göz önüne alındığında optik fiber sensörler iki gruba ayrılır (Udd, 1996; Gholamzadeh ve Nabovati, 2008):

1. Işığın algılama bölgesinde fiberden ayrıldığı ve sonra tekrar fibere döndüğü dış etkileşimli (extrinsic) sensörler.
2. Fiber içindeki ışığın durumunun (faz, kutuplanma ve dalgaboyu) çevresel etki tarafından değiştirildiği iç etkileşimli (intrinsic) sensörler.

3.3.1 Dış Etkileşimli (Extrinsic) Sensörler

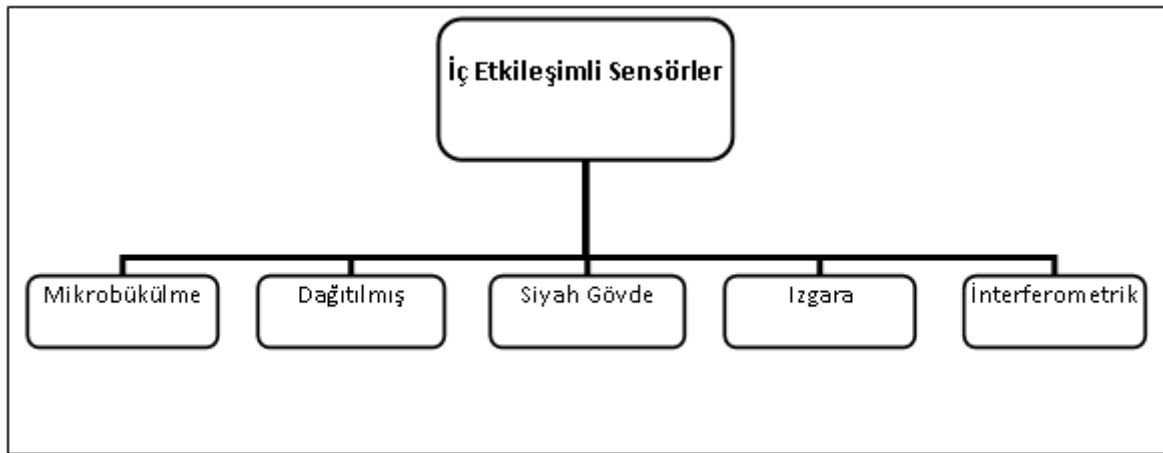
Işığın algılama bölgesinde fiberden ayrıldığı ve sonra tekrar fibere döndüğü sensörler, dış etkileşimli (extrinsic) sensörlerdir. Bu tip sensörlerde, optik fiberler ışığı bir noktadan algılama yapılacak noktaya taşımak için kullanılırlar. Şekil 3.6'da dış etkileşimli sensör çeşitleri görülmektedir.



Şekil 3.6 Dış etkileşimli sensörler.

3.3.2 İç Etkileşimli (Intrinsic) Sensörler

Fiber içindeki ışığın durumunun (faz, kutuplanma ve dalga boyu) çevresel etki tarafından değiştirildiği sensörler, iç etkileşimli (intrinsic) sensörlerdir. Şekil 3.7’de iç etkileşimli sensör çeşitleri görülmektedir.



Şekil 3.7 İç etkileşimli sensörler.

3.4 Optik Haberleşme Sistemlerinde Optik Sensörlerin Kullanımı

Optik fiber iletimi, endüstriyel ortamlarda kontrol ve telemetri (uzaktan algılama, ölçme ve nakletme) için faydalı şekilde kullanılmaktadır. Sensör sistemlerine optik haberleşmesinin uygulanması, geleneksel izleme ve kontrolün zor ve pahalı olduğu, elektriksel bakımdan tehlikeli ortamlarda kullanım için büyük bir ilgi uyandırmıştır. Sıvı seviyesi, akış hızı, konum,

sıcaklık ve basınç gibi parametrelerin hassas ölçümüne gerek vardır ve bu işlem optik fiber sistemlerle kolaylaştırılabilir (Udd, 1996).

3.4.1 Optik Sensörlerin Askeri Alanda Kullanımı

Optik sensörler, daha çok kısa mesafe gündüz görüşlerinde kullanılırlar. Görüş hattı, ışık ve engellerle sınırlı olduğundan bina civarlarının, küçük bölgelerin gözetlenmesinde uygundur. Lazerler ise, mesafe bulucu, mayın arama, lazer uyarı ve karşı tedbir sistemleri gibi kullanım alanları yanında özellikle son yıllarda güdümlü mermi tedbirlerinde de sıkça kullanılmaktadır.

3.4.2 Optik Sensörlerin Tarım Alanında Kullanımı

Optik sensörler, güneşten gelen enerjiyi kayıt ederler. Bu sayede güneş ışınlarının miktarına göre tarım yapılan bölgelerdeki ürün miktarı, sulama olanakları ve toprak verimliliği gibi alanlarda değişik uygulamalara gidilmesi sağlanır.

3.4.3 Optik Sensörlerin Parmak İzi Tanımada Kullanımı

Optik sensörler, temelde dijital fotoğraf makinelerinde kullanılmakta olan CCD (Charge Coupled Device, Yük Bağlaşımlı Görüntü Elemanı) ışık sensörlerinden oluşmaktadır. Bir CCD, basitçe fotosit (photosite) olarak isimlendirilen ışığa duyarlı bir dizi diyottan elde edilir. Fotositler ışığa elektrik sinyali üreterek karşılık verirler. Bu tip sensörlerin avantajı ucuz olmalarıdır. Dezavantajı ise aldatılmalarının kolay olmasıdır, tarama yüzeyine yerleştirilen bir parmak fotoğrafı bile gerçek parmak gibi taranabilir. Ayrıca, önceki taramalar sırasında tarama yüzeyinde kalan parmak izleri de taramayı olumsuz etkilemektedir.

3.4.4 Optik Sensörlerin Uydu İçinde Kullanımı

Günümüzdeki teknolojiler, özellikle uydu haberleşmesi, yer gözlem (optik ve radar uydu algılayıcılarla uzaktan algılama), uydu meteorolojisi ve yer-konumlama sistemleri (küresel konumlama teknikleri, GPS) ihtiyaç duyulan temel bilginin bir sistem içinde toplanması, değerlendirilmesi, kullanılması ve akışına olanak sağlamaktadır.

Örneğin, İzmit depremi sonrası yapılan çalışmalarda, optik radar ve interferometrik radar uydu algılayıcılarından elde edilen veriler kullanılmıştır. Dikkati çekebilecek önemli sonuç, radar görüntülerinde aktif fay yapısının ve arazinin fiziksel yapısının net biçimde

görülmesidir. Optik sensörlerden alınan görüntülerde özellikle yerleşim yerlerinin dokusu ve jeolojik kaya birimlerinin neler olabileceği (örneğin, alüvyon, sert kaya türleri ve yumuşak zeminler) belirlenebilmektedir. Uzay temelli uzaktan algılama sistemleri (radar, optik ve lazer algılayıcıları) sayesinde afetler öncesi ve sonrası planlar hazırlanabilir.

4. FİBER BRAGG IZGARA TABANLI SENSÖRLER

Bu tezde, optik sensör çeşitleri arasında yer alan fiber Bragg ızgara tabanlı sensörler analiz edilmiştir. Fiber Bragg ızgaraların temelini, optik fiber dalga kılavuzunun çekirdek bölgesinin kırılma indisinin, fiber uzunluğu boyunca belirli periyotlarla değişimi oluşturur. Kırılma indisinde meydana gelen değişimden dolayı, dalga kılavuzuna gönderilen ışığın belirli bir kısmı her bir ızgara aralığında geri yansıtılır ve yansıtıcılık Bragg dalgaboyunda maksimum değere ulaşır. Fiber Bragg ızgaralar yansıma modunda tasarlandığı için, Bragg dalgaboyundaki yansıyan güç miktarının yüksek değerlerde olması, ızgaranın performansının yüksek olmasını sağlamaktadır. Tezin bu bölümünde, yansıyan, iletilen güç miktarlarının ve band genişliğinin, ızgara periyoduna, ızgara uzunluğuna ve kırılma indisi değerlerine bağlı olarak değişimi irdelenmiştir.

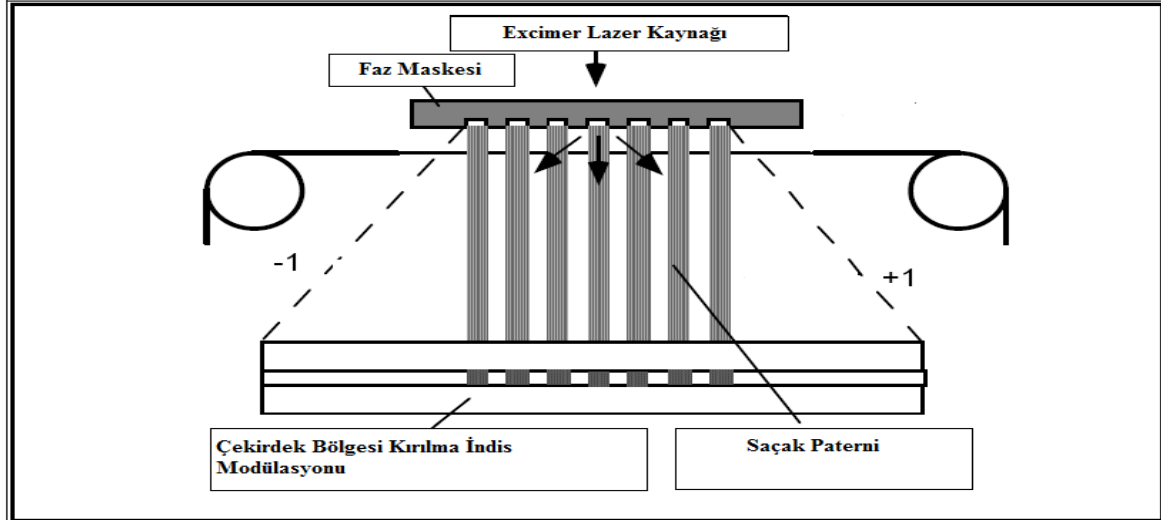
Fiber Bragg ızgara tabanlı sensörlerin en büyük avantajı, algılanan parametrenin etkilerinin, dalgaboyuna etkisinin hemen görülmesidir. Dalgaboyunda meydana gelen kayma miktarları incelenerek sıcaklık ve gerilme algılamaları yapılmaktadır. Tezde, sıcaklık ve gerilmeye bağlı olarak, yansıyan dalgaboyunda meydana gelen değişimlere duyarlı fiber Bragg ızgara tabanlı sensörler incelenmiştir.

4.1 Fiber Izzaralar

Fiber ızgara, optik fiberin çekirdek bölgesindeki kırılma indisinin periyodik olarak değişimini içerir. Optik fibere uygulanan, kalıcı ızgaralarla ilgili ilk bilgiler 1978 yılında K. O. Hill tarafından ortaya konmuştur. Optik fiber yoğun ultraviyole ışığa maruz kaldığı zaman kırılma indisi değişime uğramaktadır. Kırılma indisinde meydana gelen bu değişim, dalgaboyu, yoğunluk ve uygulanan ışığın miktarına bağlıdır. Genellikle bu değişimi sağlamak için, 248 nm ve 193 nm dalgaboyunda ultraviyole ışık veren ve içinde çok gelişmiş bir bilgisayar bulunan lazerler (excimer) kullanılmaktadır (Hill ve Meltz, 1997; Kashyap, 1999). Germanyum katkılı, tek modlu fiberdeki kırılma indisi değişimi 10^{-5} ile 10^{-2} aralığında yer alır.

Fiber üzerinde ızgara oluşumunu meydana getirmek için dâhili yazma (internal writing), holografi tekniği (holographic technique) ve faz maskesi (phase mask) gibi birçok teknik kullanılmaktadır. Bu teknikler arasında en çok kullanılanı ise faz maskesi tekniğidir. Bu yöntemde, ultraviyole ışık, faz maskesine dik olacak şekilde maske üzerinden geçer ve faz maskesinin periyodik yapısına bağlı olarak, -1, 0 ve +1 kırınımını oluşturur. Bu kırınımlara

bağlı olarak fiber üzerinde belirlenen ızgara yapısı meydana gelir (Hill ve Meltz, 1997; Kashyap, 1999). Şekil 4.1’de faz maskesi yöntemiyle ızgara yazma işlemi görülmektedir. Faz maskesi yöntemi, Bragg ızgaraların üretim sürecini kolaylaştırdığı için diğer tekniklere göre avantajlıdır.



Şekil 4.1 Faz maskesi tekniği ile ızgara yazma işlemi (Hill ve Meltz, 1997).

Bir fiber ızgarada kırılma indisinin değişiminden dolayı yayılan modların birbirine etkisi iki şekilde sınıflandırılır:

1. Yansıma ızgaraları (veya Bragg ızgaralar) olarak adlandırılan ızgaralarda kuplaj, zıt yönde ilerleyen modlar arasında meydana gelir. Bragg ızgaralarda, ızgara periyodu $1\ \mu\text{m}$ 'den küçüktür.
2. İletim ızgaraları (veya uzun periyotlu ızgaralar) olarak adlandırılan ızgaralarda, kuplaj aynı yönde ilerleyen modlar arasında meydana gelir. İletim ızgaralarında, ızgara periyodu $10\ \mu\text{m}$ 'den büyüktür.

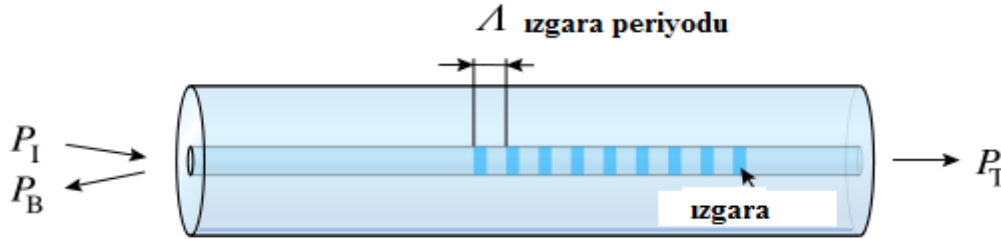
Bu bölümde, fiber Bragg ızgara tabanlı sensörlerin temelini oluşturan, fiber Bragg ızgaralar ele alınmıştır.

4.2 Fiber Bragg Izzaralar

Bragg ızgaralar, optik fiberin genel yapısını bozmadan oluşturulmuş yapılardır. Çekirdek bölgesi kırılma indisinin n_1 ve kılıf bölgesi kırılma indisinin n_2 olduğu durumda, kırılma indisleri arasında $n_1 > n_2$ ilişkisi mevcuttur. Kırılma indisinde meydana gelen değişimden

dolayı, optik fiberin çekirdek bölgesinde ızgara oluşumu meydana gelir. Bragg şartı olarak bilinen belirli şartlar altında, ızgarayı oluşturan saçaklardan yansıyan ışık birbirine eklenir, şartın sağlanmadığı durumda ise her bir saçak yansıması giderek faz dışı olur ve ışığın sönmülerek yok olmasına neden olur. Bragg şartının sağlandığı durumda birbirine eş bir yansıma meydana gelir.

Izgara saçak aralığı (Λ) ızgara periyodu olarak isimlendirilir. Bu periyot, üniform ızgaralar için ızgara boyunca sabit kalırken, cıvıtlı ızgaralarda değişmektedir. Kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarı, üniform ızgaralarda ızgara uzunluğu boyunca sabit kalırken, apodize ızgaralarda farklılık göstermektedir. Bir fiber ızgaranın genel yapısı Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.2 Fiber Bragg ızgaranın genel yapısı.

Bragg ızgaralar tıp uygulamaları için, sıcaklık sensörleri olarak ve uzay uygulamalarında dinamik gerilme ölçen sensörler olarak kullanılmaktadır. Buna ek olarak Bragg ızgaralar, dar bir spektruma sahip olan dalgaboyu bileşenlerine ihtiyaç duyan, dalgaboyu bölmeli çoğullamanın (Wavelength Division Multiplexing, WDM) gereklerini yerine getirdiği için bu alanda da kullanılır. Ayrıca fiber ızgaralar, filtreleme, dispersiyon dengeleme ve lazerler gibi çeşitli uygulamalar için kullanılan önemli optik bileşenlerdir (Hill ve Meltz, 1997; Mohammad vd., 2004).

4.2.1 Fiber Bragg Izgara Çeşitleri

Fiber Bragg ızgara yapısı, ızgara periyoduna ve kırılma indis değişiminde meydana gelen farklılıklara göre çeşitlilik göstermektedir (Dutton, 1998).

4.2.1.1 Üñiform Bragg Izgaralar

Izgara periyodu ve kırılma indis değışimi ızgara boyunca sabit olan ızgara yapılarıdır. Şekil 4.3’de üñiform Bragg ızgara yapısı görölmektedir.



Şekil 4.3 Üñiform Bragg ızgara yapısı.

4.2.1.2 Cıvıtlı Bragg Izgaralar

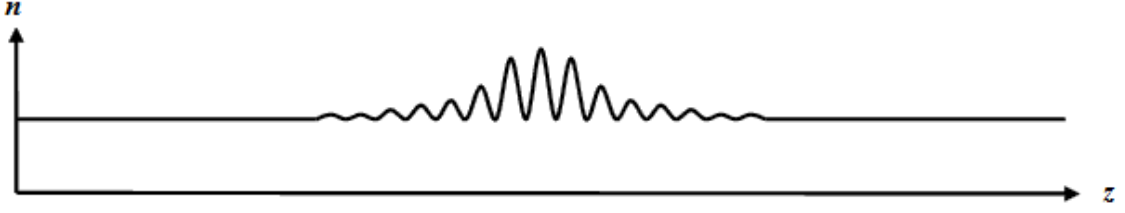
Cıvıtlı Bragg ızgaralar, fiber uzunluğu boyunca, ızgara periyodunun azalarak ya da artarak değışiklik gösterdiği bir ızgara yapısına sahiptir.



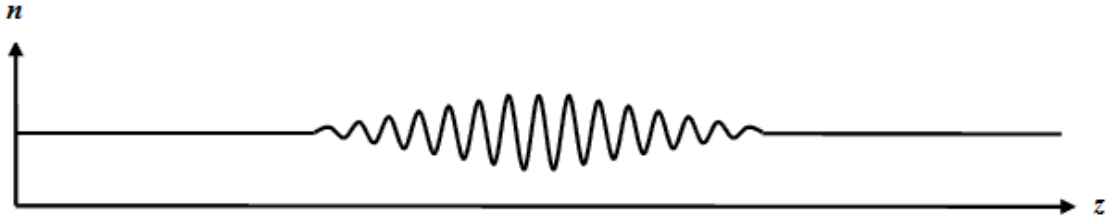
Şekil 4.4 Cıvıtlı Bragg ızgara yapısı.

4.2.1.3 Apodize Bragg Izgaralar

Apodize Bragg ızgaralar, kırılma indisinde meydana gelen değışim miktarının ızgara uzunluğu boyunca farklılık gösterdiği bir ızgara yapısına sahiplerdir. Kırılma indisinin değışim profilleri için genellikle, Gauss ya da Yükseltilmiş-kosinüs dağılımları kullanılmaktadır. Şekil 4.5’de Gauss dağılımlı kırılma indis değışimi eğrisi, Şekil 4.6’da ise Yükseltilmiş-kosinüs dağılımlı kırılma indis değışimi eğrisi görölmektedir (Erdogan, 1997).



Şekil 4.5 Gauss dağılımlı kırılma indis değişimi.



Şekil 4.6 Yükseltilmiş-kosinüs dağılımlı kırılma indis değişimi.

4.2.2 Fiber Bragg İzgaraların Çalışma Prensibi

Yansıma modunda çalışan fiber Bragg ızgaralar, fiber girişine uygulanan ışığın bir kısmını ızgara saçaklarından geri yansıtarak çalışırlar. Bu yansıtıcılık Bragg dalgaboyunda (λ_B) en yüksek değerine ulaşır. Yansıyan ışık spektrumu çok dar ve Bragg dalgaboyunda merkezlenmiş durumdadır.

Bragg şartı;

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda \quad (4.1)$$

şeklinde ifade edilir (Hill ve Meltz, 1997, Kashyap, 1999). Burada, λ_B , Bragg dalgaboyu (ızgaradan geri yansıyacak ışığın merkez dalgaboyu), n_{eff} , merkez dalgaboyunda çekirdek bölgesinin etkin kırılma indisi ve Λ , ızgara periyodunu temsil eder.

4.2.3 Kupl Mod Teorisi

Fiber ızgara karakteristikleri, birçok yöntemle modellenerek anlaşılabilir. Kupl Mod Teorisi, bu yöntemler arasında en çok kullanılan yöntemidir. Karmaşık olmaması ve ilgilenilen pek çok fiber ızgaranın optik özelliklerini hassas olarak modellemesi nedeniyle bu çalışmada Kupl

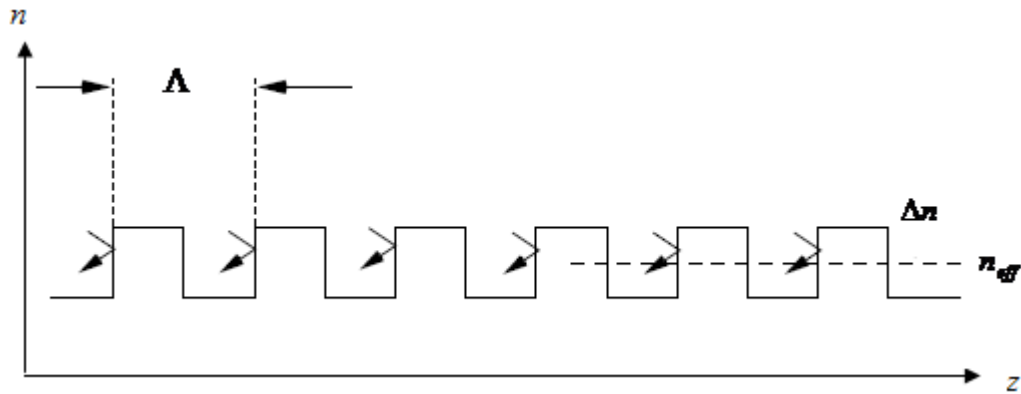
Mod Teorisi göz önüne alınacaktır.

Kuple Mod Teorisi kullanılan analitik yöntemlerde, fiber Bragg ızgaranın ileri ve geri yönde hareket eden ve genlikleri optik eksene bağlı olarak değişen modlar arasında, karşılıklı etkileşimin olduğu varsayılır. Izgara periyodu ve kırılma indis değişimi periyodik olarak değiştiği zaman dalgaboyunun bir fonksiyonu olan yansıtıcılık için analitik bir çözüm elde edilir.

Periyodik olarak tasarlanmış üniform ızgaralar, dışındaki ızgaralar için analitik çözüm elde etmek her zaman mümkün değildir. Bu nedenle birçok nümerik çözüm ön plana çıkmıştır. Bu çözüm yöntemleri arasında en çok kullanılanlardan biri de transfer matris yöntemidir. Bu yöntemde, dalga kılavuzu küçük parçalara ayrılır ve her parçadaki ızgaranın periyodik olarak değiştiği kabul edilir. Bu varsayımlar altında, ızgaranın karakteristiği, her parçaya ait transfer matrisinin birbiriyle çarpımı sonucunda ortaya çıkar.

Üniform periyodik ızgara yapıları için Kuple Mod Teorisinin uygulanmaya başlaması, H. Kogelnik, C. V. Shank ve A. Yariv tarafından gerçekleştirilmiştir. H. G. Winful, üniform olmayan ızgaralar için bu teoriyi uygulamıştır.

Bu bölümde, fiberin kayıpsız olduğu varsayılacak ve ilgili dalgaboyu aralığında tek modlu olduğu kabul edilecektir. Ayrıca, üniform ızgaralar için kuple mod eşitlikleri üzerinde durulacaktır. Şekil 4.7’de fiber Bragg ızgaranın kırılma indisi değişimi görülmektedir.



Şekil 4.7 Fiber Bragg ızgaranın kırılma indisi değişimi.

Fiber Bragg ızgaraların, karakteristik özelliklerinde değişime neden olan en önemli parametre, fiber çekirdeğinin kırılma indisindeki değişimdir. Kırılma indisinde meydana gelen değişim,

$$\Delta n(z) = \Delta n_0(z) \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \right) \quad (4.2)$$

şeklinde ifade edilir (Hill ve Meltz, 1997).

Fiber ızgaranın yapısında, kırılma indisinin değişimi kuralı olduğu için modlar arasında etkileşim meydana gelir. Bu ızgaralarda, ileri yönde bir mod ve geri yönde bir mod olmak üzere toplam olarak iki mod düşünülerek işlemler yapılır. Lineer polarizasyona sahip elektrik alan ifadesi,

$$E(x, y, z, t) = A(x, y) \left[E_+(z, t) e^{+ik_B z} + E_-(z, t) e^{-ik_B z} \right] e^{-i\omega_B t} + c.c.. \quad (4.3)$$

şeklinde tanımlanabilir (Phing vd., 2007). Burada $A(x, y)$, alanın eksenel mod bileşenini ifade eder. (4.2) ve (4.3) denklemleri Maxwell denkleminde yerine yazılırsa,

$$\left(\nabla^2 - \frac{n^2(x, y, z)}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) E(x, y, z, t) = 0 \quad (4.4)$$

eşitliği elde edilir.

Kuple Mod Teorisindeki amaç, elektrik alanın zarfını temsil eden $E_{\pm}(z, t)$ 'ye ait olan eşitlikleri elde etmektir. Bu nedenle, zamana bağlı olarak değişen kuple mod eşitliklerini tanımlamadan önce iki önemli varsayımda bulunmak gerekir:

1. $\Delta n \ll n_{eff}$ olduğu kabul edilir. Bu şart, $E_{\pm}(z, t)$ zarfının dalgaboyuna bağlı olarak uzayda ve optik periyoda bağlı olarak zamanda yavaş şekilde değişime uğramasına neden olur.
2. $\omega \approx \omega_B$ olduğu, bir başka ifadeyle giriş ışınının frekansının, Bragg rezonans frekansına eşit olduğu kabul edilir.

$E_{\pm}$, yavaş şekilde değişen bir fonksiyon olduğu için, hızlı şekilde osilasyon yapan bütün terimleri ve ikinci dereceden türevleri ihmal edilebilir.

Zamana bağılı kuple mod denklemleri,

$$i \frac{\partial E_+}{\partial z} + i \frac{n_{eff}}{c} \frac{\partial E_+}{\partial t} + \Omega E_- = 0 \quad (4.5)$$

$$-i \frac{\partial E_-}{\partial z} + i \frac{n_{eff}}{c} \frac{\partial E_-}{\partial t} + \Omega E_+ = 0 \quad (4.6)$$

şeklinde tanımlanır. Burada, Ω ileri ve geri yöndeki propagasyon modları arasındaki kuple katsayısıdır. Kuple katsayısı,

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n \eta}{2 n_{eff} \Lambda} \quad (4.7)$$

olarak tanımlanır (Hill ve Meltz, 1997). Burada, η modal örtüşme faktörünü ifade eder ve bu değer yaklaşık olarak 1'e eşittir.

Sonlu uzunluklu üniform ızgaraların, yansıma özelliklerini tanımlamak için zamandan bağımsız ancak harmonik zaman bağımlılıkları içeren kuple mod eşitlikleri kullanılır.

$$E_{\pm}(z, t) = S_{\pm}(z) e^{-i \delta \left(\frac{c}{n_{eff}} \right) t} \quad (4.8)$$

(4.8) eşitliği, (4.5) ve (4.6) için uygulanırsa üniform ızgaralar için zamandan bağımsız kuple mod eşitlikleri,

$$\frac{dS_+}{dz} = i [\delta S_+(z) + \Omega S_-(z)] \quad (4.9)$$

$$\frac{dS_-}{dz} = -i [\delta S_-(z) + \Omega S_+(z)] \quad (4.10)$$

olarak elde edilir (Keshk vd., 2007). Burada δ , bozulmayı ifade eder ve

$$\delta = \frac{n_{eff}}{c} (\omega - \omega_B) = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} - \frac{\pi}{\Lambda} = 2\pi n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) \quad (4.11)$$

şeklinde gösterilir (Phing vd., 2007). Burada ω_B , Bragg dalgaboyundaki açısal frekans,

$$\omega_B = \frac{\pi c}{n_{eff} \Lambda} \quad (4.12)$$

olarak tanımlanır.



Şekil 4.8 Sonlu uzunluklu Bragg ızgarada yansıyan ve iletilen alanlar.

Bragg ızgara geometrisinin, Şekil 4.8'deki gibi olduğu düşünülürse, $S_-(L) = 0$ sınır koşulu altında, (4.9) ve (4.10) eşitliklerinin çözümüne göre, gelen alan ve yansıyan alan ifadeleri,

$$S_+(z) = \alpha \cosh(\alpha(L-z)) - i\delta \sinh(\alpha(L-z)) \quad (4.13)$$

$$S_-(z) = i\Omega \sinh(\alpha(L-z)) \quad (4.14)$$

şeklinde elde edilir. Burada,

$$\alpha = \sqrt{\Omega^2 - \delta^2} \quad (4.15)$$

olarak tanımlanır.

Yansıtıcılık genliği,

$$\Gamma = \frac{S_-(0)}{S_+(0)} = \frac{i\Omega \sinh(\alpha L)}{\alpha \cosh(\alpha L) - i\delta \sinh(\alpha L)} \quad (4.16)$$

formunda elde edilir. İletim genliği ise,

$$\tau = \frac{S_+(L)}{S_+(0)} = \frac{\alpha}{\alpha \cosh(\alpha L) - i\delta \sinh(\alpha L)} \quad (4.17)$$

şeklinde bulunur (Keshk vd., 2007).

Izgaradan yansıyan güç miktarı,

$$R = |\Gamma|^2 = \frac{\Omega^2 \sinh^2(\alpha L)}{\alpha^2 \cosh^2(\alpha L) + \delta^2 \sinh^2(\alpha L)} \quad (4.18)$$

ve iletilen güç miktarı ise,

$$T = |\tau|^2 = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 \cosh^2(\alpha L) + \delta^2 \sinh^2(\alpha L)} \quad (4.19)$$

olarak bulunur (Keshk vd., 2007).

Izgaradan yansıyabilecek maksimum güç, $\delta = 0$ şartı sağlandığı zaman elde edilir. Bu durumda,

$$R_{\max} = \tanh^2(\Omega L) \quad (4.20)$$

olarak tanımlanır (Zhang ve Kahrizi, 2005).

Eğer yansıma spektrumunun band genişliği, maksimum yansıtıcılığın her iki tarafındaki ilk sıfırlar arasındaki genişlik olarak tanımlanırsa band genişliği,

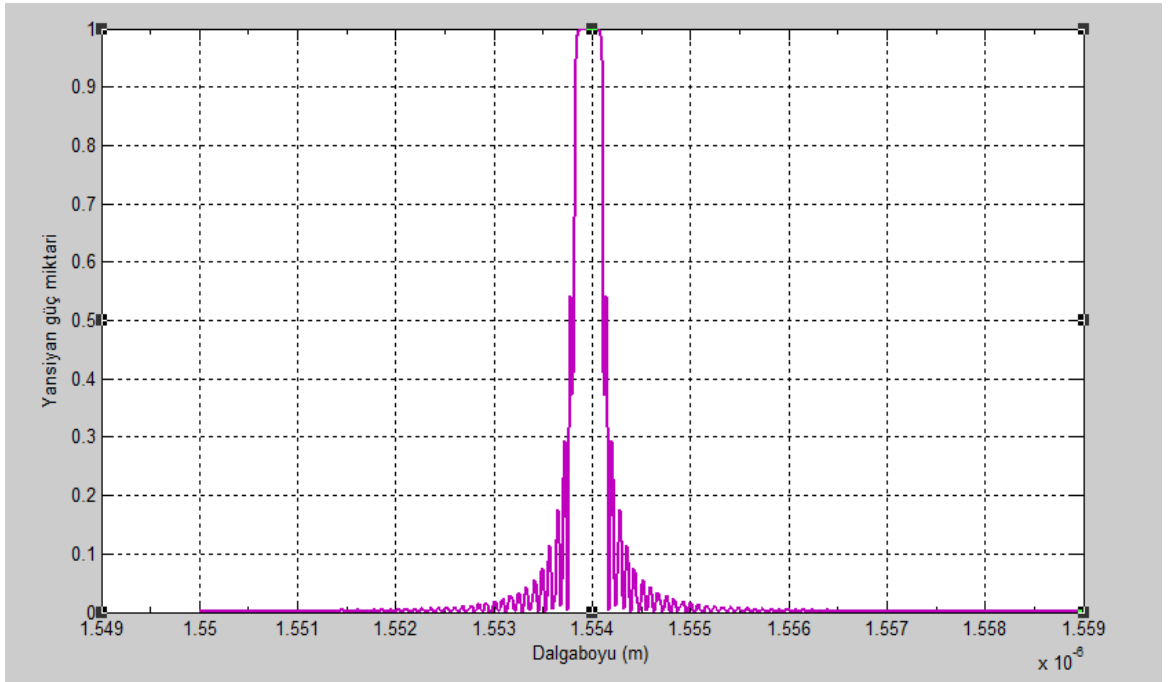
$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_B^2}{\pi n_{\text{eff}} L} \sqrt{\pi^2 + \Omega^2 L^2} \quad (4.21)$$

olarak elde edilir.

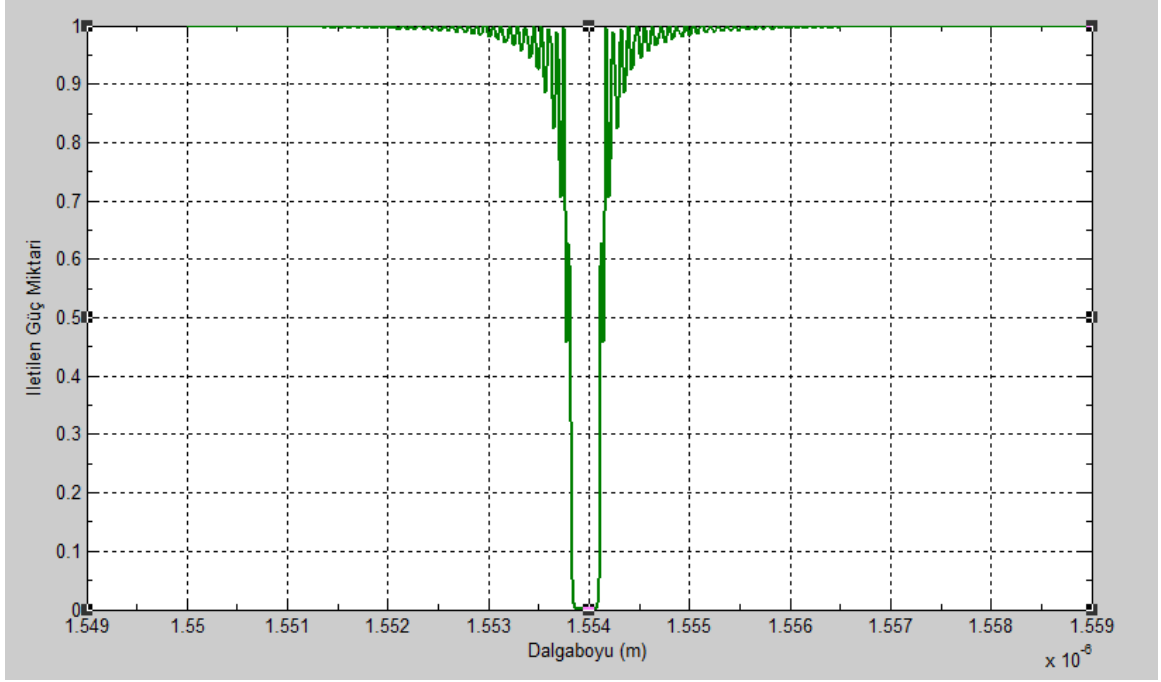
4.2.4 Fiber Bragg Izgaraların Değişik Özelliklerine Göre Spektrum Analizleri

Bu bölümde, fiber Bragg ızgaraların, yansıttıkları ve ilettikleri güç miktarlarının, değişik ızgara uzunlukları, ızgara periyotları ve kırılma indislerinde meydana gelen değişimlere göre farklılık gösterdiğini ifade eden grafikler MATLAB programında yazılım yapılarak çizilmiştir. Fiber Bragg ızgaralar yansıma modunda tasarlandığı için, Bragg dalgaboyundaki yansıyan güç miktarının yüksek değerlerde olması, ızgaranın performansının yüksek olmasını sağlamaktadır. Bu nedenle yapılan analizlerde yansıyan güç miktarının yüksek değerlerinin elde edilebilmesi için, seçilecek ızgaranın değişik özellikleri incelenmiştir.

Dalgaboyu 1550 nm ile 1559 nm aralığında, ızgara uzunluğu $L = 10$ mm, ızgara periyodu $\Lambda = 0.53 \mu\text{m}$, ızgaranın efektif kırılma indisi $n_{\text{eff}} = 1.466$, kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarı $\Delta n = 0.00025$ olarak alındığı durumda, ızgaradan yansıyan güç miktarı Şekil 4.9’da, ızgaranın ilettiği güç miktarı ise Şekil 4.10’da görülmektedir. Yansıyan güç miktarının Bragg dalgaboyunda en yüksek seviyeye ulaştığı, iletilen güç miktarının ise Bragg dalgaboyunda en düşük seviyede kaldığı görülmektedir. Izgara karakteristiğini belirleyen özellikler için belirtilen değerler kullanıldığında, ızgaradan Bragg dalgaboyunda %100 yansıtıcılık elde edilmiştir. Bu özelliklerin değişik değerleri için Bragg dalgaboyunda maksimum yansıtıcılık elde edilecektir ancak ızgaradan yansıyan güç miktarı her zaman %100’e ulaşmaz.

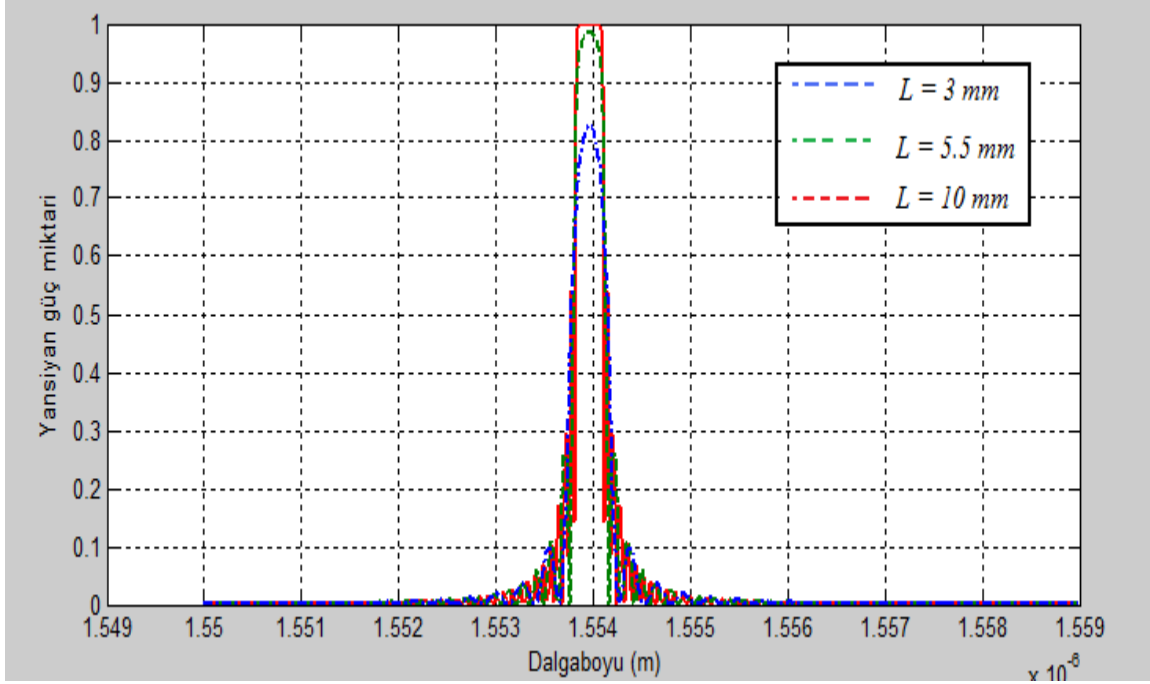


Şekil 4.9 Fiber Bragg ızgaradan yansıyan güç miktarı.

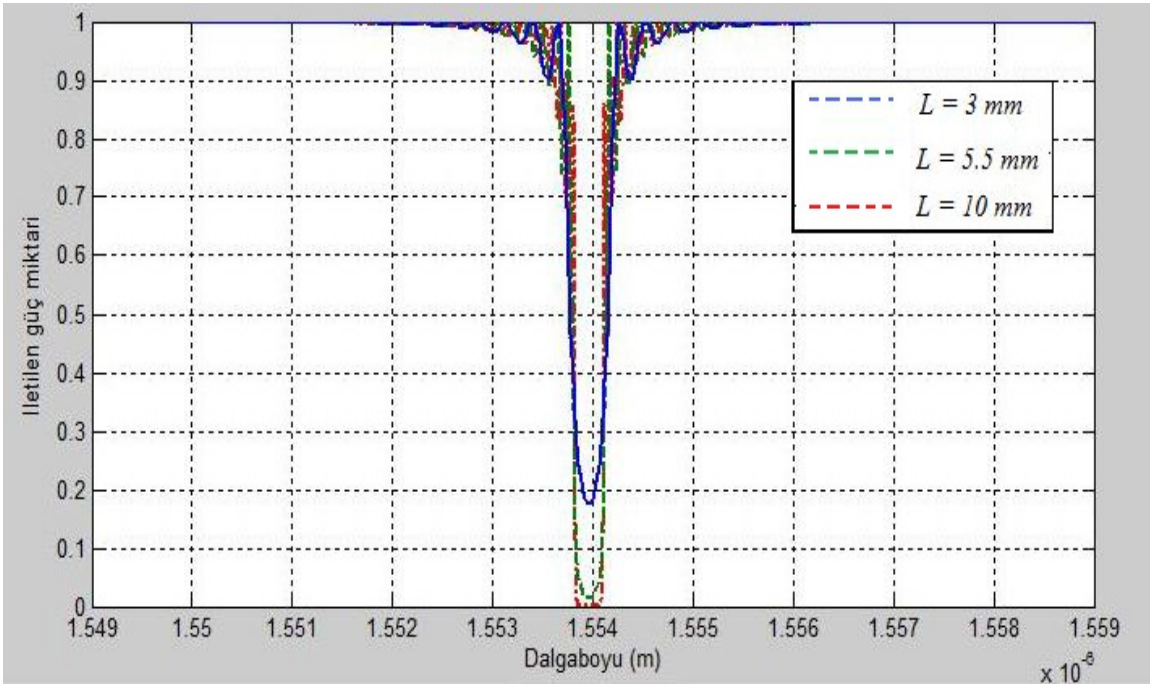


Şekil 4.10 Fiber Bragg ızgaradan iletilen güç miktarı.

Daha önce belirtilen ızgara koşulları geçerli durumdayken, ızgara uzunluğunun değişik değerleri için ızgaradan yansıyan güç miktarı değişimi Şekil 4.11’de ve ızgaradan iletilen güç miktarı değişimi ise Şekil 4.12’de görülmektedir. Şekil 4.11’de ve Şekil 4.12’de, kırmızı ile gösterilen bölüm $L = 10$ mm, yeşil ile gösterilen bölüm $L = 5.5$ mm ve mavi ile gösterilen bölüm ise $L = 3$ mm olduğu durumu göstermektedir. Buna göre, ızgara uzunluğu arttıkça yansıyan güç miktarının arttığı, iletilen güç miktarının ise azaldığı görülmektedir. Izgara uzunluğu $L = 10$ mm olduğu durumda %100 yansıtıcılık elde edilmiştir. Bu durumda, kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarı sabit tutulduğu durumda daha büyük uzunluklu fiber Bragg ızgaralar kullanılarak yüksek yansıtıcılık değerleri elde edilebilmektedir. Ancak ızgara uzunluğunun artması daha yüksek maliyetli sensör yapımını gerektirir.

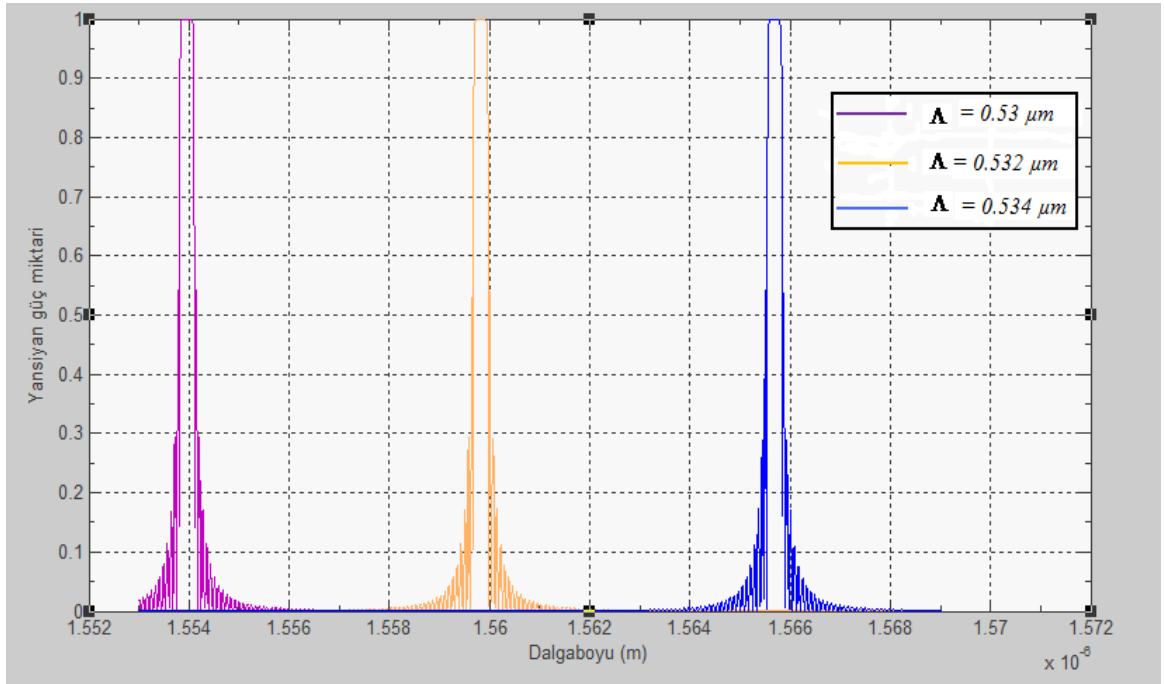


Şekil 4.11 Değişik ızgara uzunlukları için fiber Bragg ızgaradan yansıyan güç miktarları.

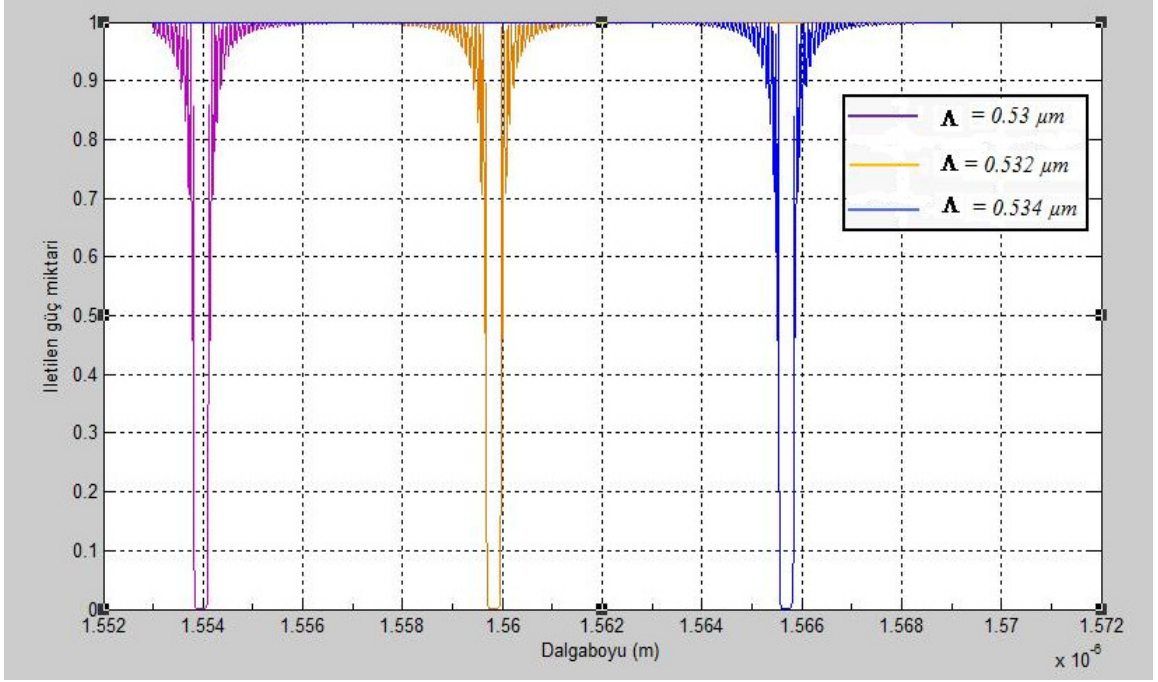


Şekil 4.12 Değişik ızgara uzunlukları için fiber Bragg ızgaradan iletilen güç miktarları.

Dalgaboyu 1553 nm ile 1569 nm aralığında, ızgara uzunluğu $L = 10$ mm, ızgaranın efektif kırılma indisi $n_{eff} = 1.466$, kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarı $\Delta n = 0.00025$ olarak alındığı durumda, değişik ızgara periyodu değerleri için ızgaradan yansıyan güç miktarı Şekil 4.13’de, ızgaranın ilettiği güç miktarı ise Şekil 4.14’de görülmektedir. Şekil 4.13’de ve Şekil 4.14’de, mor ile gösterilen bölüm $\Lambda = 0.53 \mu\text{m}$, turuncu ile gösterilen bölüm $\Lambda = 0.532 \mu\text{m}$ ve mavi ile gösterilen bölüm ise $\Lambda = 0.534 \mu\text{m}$ olduğu durumu göstermektedir. Buna göre, ızgara periyodu arttıkça, Bragg dalgaboyu daha yüksek değere sahip olacağından yansıyan ve iletilen güç miktarlarının en yüksek değerinin farklı dalgaboylarında ortaya çıktığı görülmektedir. Dalgaboyunun, yüksek değerlerinde yüksek yansıtıcılık elde edebilmek için geniş dalgaboyunda ışık yayılımı yapan kaynak kullanılması gerekmektedir.

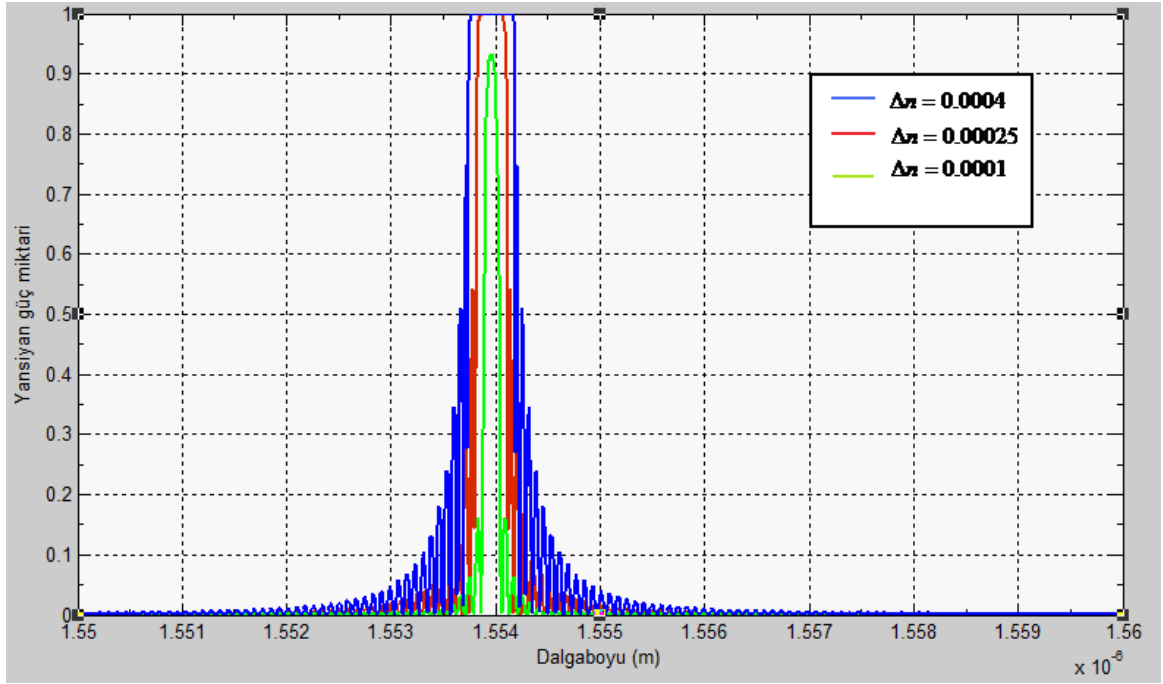


Şekil 4.13 Değişik ızgara periyodu değerleri için Bragg ızgaradan yansıyan güç miktarı.

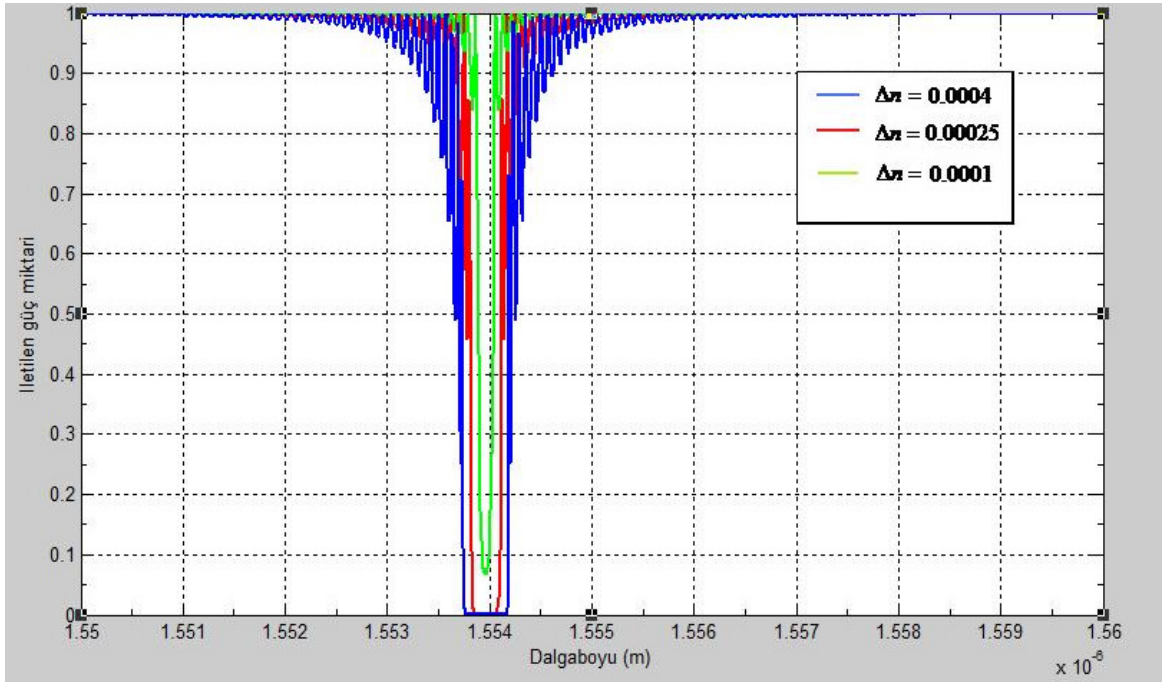


Şekil 4.14 Değişik ızgara periyodu değerleri için Bragg ızgaradan iletilen güç miktarı.

Dalgaboyu 1550 nm ile 1560 nm aralığında, ızgara uzunluğu $L = 10$ mm, ızgara periyodu $\Lambda = 0.53 \mu\text{m}$, ızgaranın efektif kırılma indisi $n_{\text{eff}} = 1.466$ olarak alındığı durumda, kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarının farklı değerleri için, ızgaradan yansıyan güç miktarı Şekil 4.15’de, ızgaranın ilettiği güç miktarı ise Şekil 4.16’da görülmektedir. Şekil 4.15’de ve Şekil 4.16’da, yeşil ile gösterilen bölüm $\Delta n = 0.0001$, kırmızı ile gösterilen bölüm $\Delta n = 0.00025$, mavi ile gösterilen bölüm ise $\Delta n = 0.0004$ olduğu durumu göstermektedir. Buna göre, kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarı arttıkça, yansıyan güç miktarının arttığı ve iletilen güç miktarlarının ise azaldığı görülmektedir. Kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarı $\Delta n = 0.0004$ olduğu durumda ve $\Delta n = 0.00025$ olduğu %100 yansıtıcılık elde edilmiştir. Ancak şekilden görülebileceği gibi kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarı arttıkça band genişliğinde artış gözlenmektedir. Bunun yanı sıra, yansıma spektrumunun yan loblarında taşınan güç miktarının da kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarının artmasıyla arttığı görülmektedir. Kuple katsayısı olan Ω değeri Δn ile doğru orantılı olarak değişime uğrar buna göre kuple katsayısı arttıkça yansıyan güç miktarı artmaktadır.

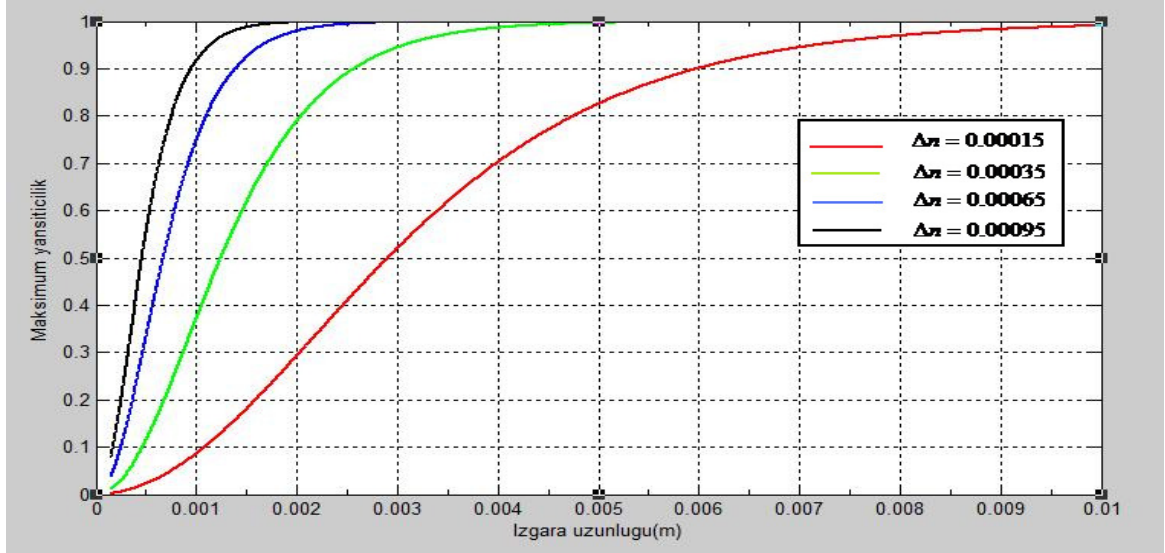


Şekil 4.15 Değişik Δn değerleri için fiber Bragg ızgaradan yansıyan güç miktarları.



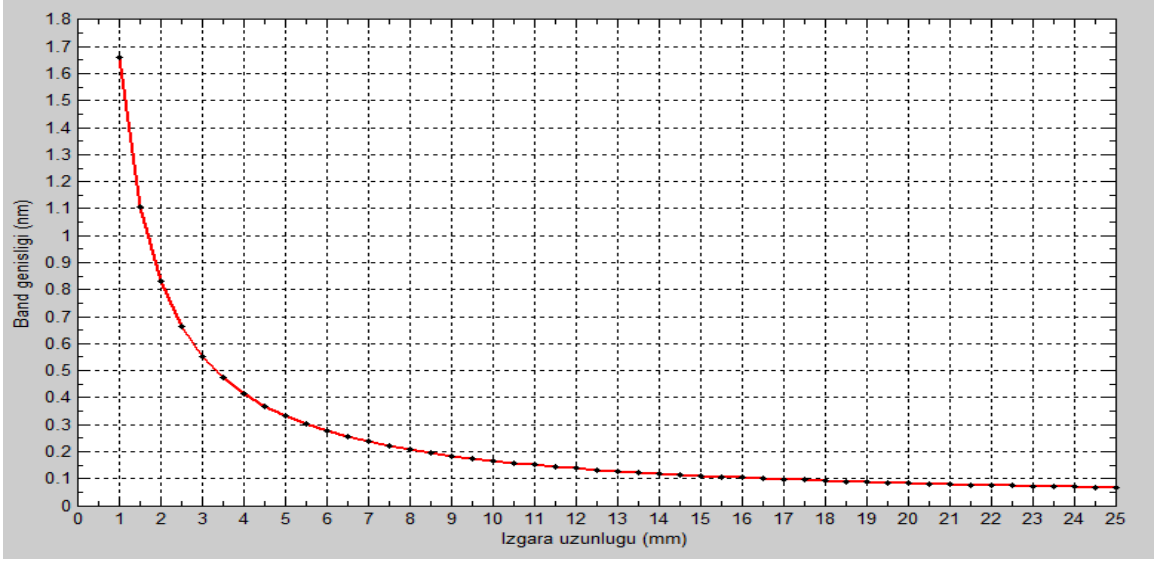
Şekil 4.16 Değişik Δn değerleri için fiber Bragg ızgaradan iletilen güç miktarları.

Dalgaboyunun 1550 nm, ızgara uzunluğunun 1.5 mm ile 10 mm aralığında olduğu ve kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarının değişik değerler aldığı durumda ızgara uzunluğuna bağlı olarak değişen maksimum yansıtıcılık eğrisi Şekil 4.17’de görülmektedir. Şekil 4.17’de kırmızı ile gösterilen bölüm $\Delta n = 0.00015$, yeşil ile gösterilen bölüm $\Delta n = 0.00035$, mavi ile gösterilen bölüm $\Delta n = 0.00065$ ve siyah ile gösterilen bölüm ise $\Delta n = 0.00095$ olduğu durumu göstermektedir. Buradan, yansıtıcılığın en yüksek değere ulaştığı noktaya, kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarının yüksek değerleri için, çok daha kısa ızgaralarla erişilebileceği görülmüştür. Sensör yapımında kullanılacak, en uygun ızgara uzunluğunun belirlenmesi için maksimum yansıtıcılık eğrisinin gösterdiği bu değişim kullanılarak tasarım yapılabilir.



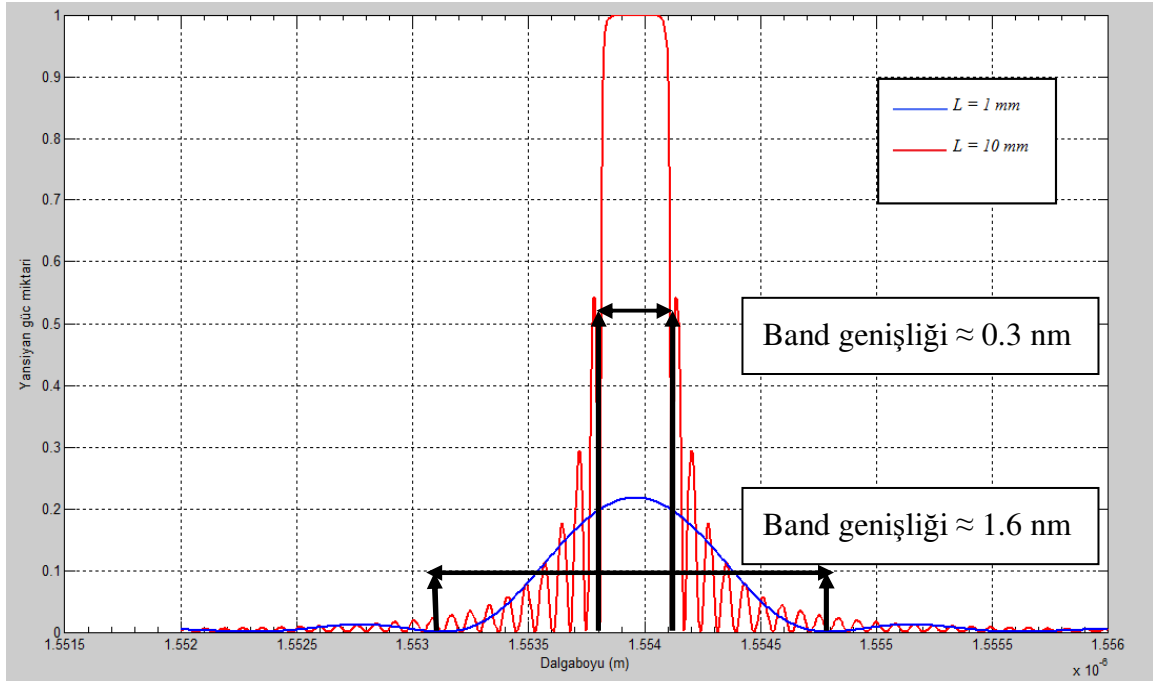
Şekil 4.17 ızgara uzunluğuna bağlı olarak değişen maksimum yansıtıcılık.

Dalgaboyu 1560 nm, kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarının $\Delta n = 0.00025$, ızgaranın efektif kırılma indisi $n_{eff} = 1.466$ ve ızgara uzunluğunun 1 mm ile 25 mm aralığında değişik değerler aldığı durumda ızgara uzunluğuna bağlı olarak band genişliğine ait değişim eğrisi Şekil 4.18’de görülmektedir. ızgara uzunluğu arttıkça band genişliğinde meydana gelen değişim miktarının azaldığı gözlenmektedir. Band genişliği en büyük değerini ızgara uzunluğu 1 mm olarak seçildiği durumda almıştır. Band genişliğinin en çok değişime uğradığı bölge ızgara uzunluğunun 1 mm ile 5 mm aralığında değiştiği bölümdür.



Şekil 4.18 Band genişliğinin ızgara uzunluğuna bağlı olarak değişim eğrisi.

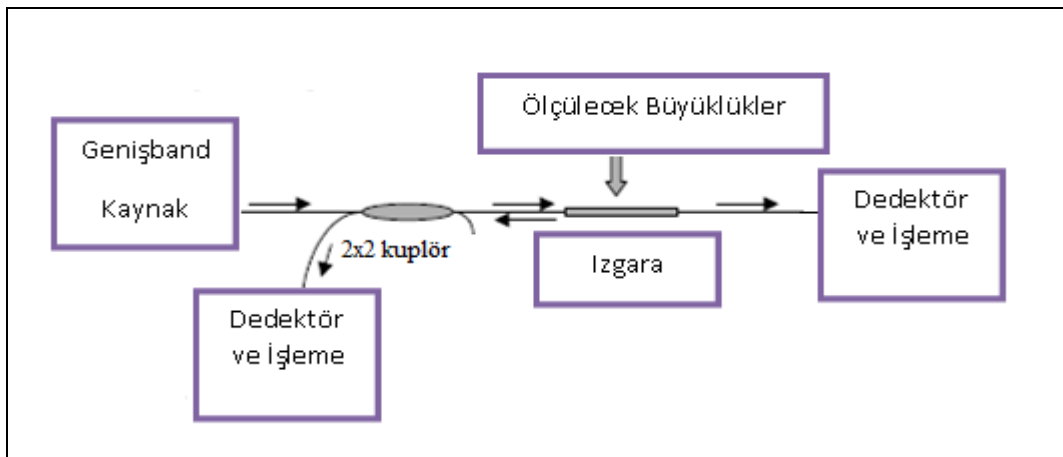
Dalgaboyu 1552 nm ile 1556 nm aralığında, ızgara periyodu $\Lambda = 0.53 \mu\text{m}$, ızgaranın efektif kırılma indisi $n_{eff} = 1.466$, kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarı $\Delta n = 0.00025$ olarak alındığı durumda, ızgara uzunluğu $L = 1 \text{ mm}$ ve ızgara uzunluğu $L = 10 \text{ mm}$ seçildiği durumda ızgaradan yansıyan güç miktarına bağlı olarak band genişliğinde meydana gelen değişim Şekil 4.19’da görülmektedir. Burada, mavi ile görülen eğri ızgara uzunluğunun 1 mm olarak seçildiği, kırmızı ile gösterilen eğri ise ızgara uzunluğunun 10 mm olarak seçildiği durumu göstermektedir. Izgara uzunluğu arttıkça, band genişliğinin daraldığı, yan lobların taşıdığı güç miktarının arttığı görülmektedir.



Şekil 4.19 Değişik ızgara uzunluklarına bağlı olarak band genişliğinin değişimi.

4.3 Fiber Bragg ızgara Tabanlı Sensörler

Fiber Bragg ızgara tabanlı sensörler, dalgaboyunda meydana gelen değişimleri inceleyerek algılama yapan elemanlardır. Fiber Bragg ızgara tabanlı sensörlerin en büyük avantajı, algılanan parametrenin etkilerinin, dalgaboyuna etkisinin hemen görülmesidir. Dalgaboyunda meydana gelen kayma miktarları incelenerek sıcaklık ve gerilme algılamaları yapılmaktadır. Tezde, sıcaklık ve gerilmeye bağlı olarak, yansıyan dalgaboyunda meydana gelen değişimlere karşı duyarlılık gösteren fiber Bragg ızgara tabanlı sensörler incelenmiştir.



Şekil 4.20 Fiber Bragg ızgara tabanlı sensör yapısı.

Şekil 4.20’de, fiber Bragg ızgara tabanlı sensör yapısı görülmektedir. Geniş bantlı optik kaynaktan çıkan ışık, kuplör yardımıyla ikiye bölünür. Işığın yarısı, ızgaraya doğru diğer kısmı ise dedektöre doğru gönderilir. Sıcaklık veya gerilmeye bağlı olarak ızgaradan yansıyan ve iletilen ışık spektrumunda, yani Bragg dalgaboyunda değişim meydana gelir ve yeniden dedektörlerden algılama yapılarak Bragg dalgaboyunda meydana gelen kayma miktarına göre izleme yapılır.

Fiber Bragg ızgaralara, sıcaklık uygulandığında veya gerilme gibi bir kuvvet uygulandığında ızgaranın periyodunda ve kırılma indisinde değişiklik meydana gelir ve bu durum Bragg dalgaboyunda kayma olmasına neden olur (Kersey vd., 1997).

Fiber Bragg ızgara tabanlı sensörler inşaat sektöründe, demiryollarında, köprülerde, tünellerde, güç jeneratörlerinde, rüzgâr türbinlerinde, uçak sistemlerinde ve medikal uygulamalarda kullanılırlar. Ticari olarak kullanılan fiber Bragg ızgara tabanlı sensörlerin kullanım ömrü yaklaşık olarak 25 yıldır, bu süre boyunca yansıtıcılık değerinde %1 ya da %2’lik azalma olması öngörülmektedir.

4.3.1 Fiber Bragg Iızgara Tabanlı Sensörlerin Sıcaklık Duyarlılığı

Fiber Bragg ızgaralar sıcaklığa karşı duyarlılık gösteren elemanlardır. Sıcaklıkta meydana gelen değişim, Bragg dalgaboyunda değişim olmasına yol açar. Dalgaboyunda meydana gelen kayma, termal genleşme ve büzülmeden dolayı ızgara periyodunun sıcaklığa bağlı olarak değişime uğramasından ve fiberin kırılma indisinin sıcaklıkla değişime uğramasından kaynaklanır.

Sıcaklık değişimiyle dalgaboyunda meydana gelen kayma miktarı,

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T \quad (4.22)$$

olarak tanımlanır. Burada,

$$\alpha_\Lambda = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \quad (4.23)$$

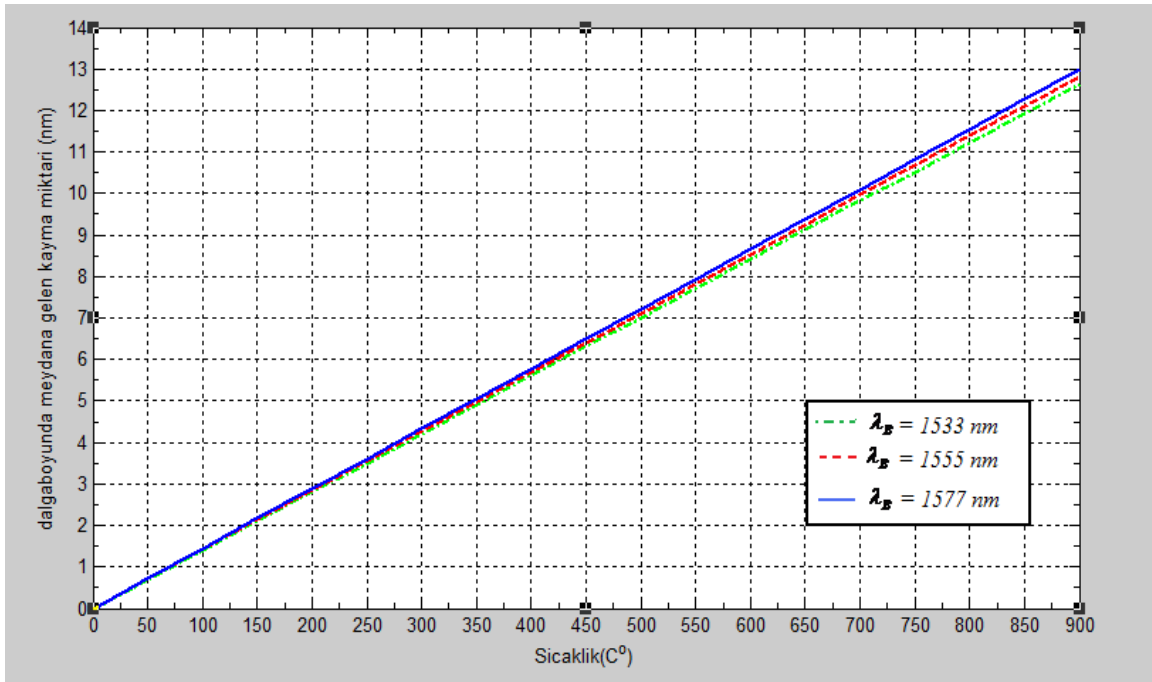
şeklinde tanımlanan terim, boyuna termal uzama katsayısını ifade eder. Cam fiberler için, termal uzama katsayısı, $\alpha_\Lambda = 0,55.10^{-6} C^{-1}$ değerini alır.

Aynı eşitlikte,

$$\alpha_n = \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} \quad (4.24)$$

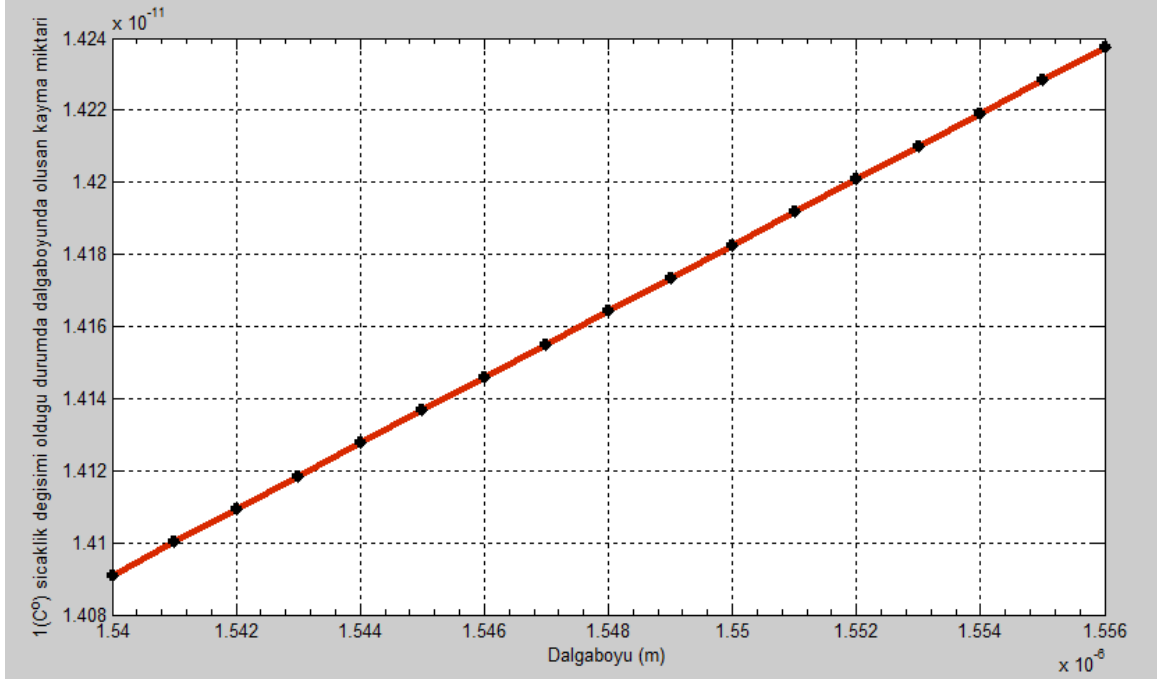
şeklinde tanımlanan terim ise, kırılma indisinin sıcaklıkla değişim miktarının dalga boyuna etkisini ifade eder ve termo-optik katsayı olarak kullanılır. Cam fiberler için, termo-optik katsayısı $\alpha_n = 8,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ değerini alır ((Hill ve Meltz, 1997; Mohammad vd., 2004).

Termal uzama katsayısı ve termo-optik katsayı belirtilen değerleri aldığı durumda, Bragg dalga boyunun değişik değerleri için, dalga boyunda meydana gelen kayma miktarının sıcaklıkla değişimi Şekil 4.21’de görülmektedir. Şekil 4.21’de mavi ile gösterilen bölüm $\lambda_B = 1577 \text{ nm}$, kırmızı ile gösterilen bölüm $\lambda_B = 1555 \text{ nm}$, yeşil ile gösterilen bölüm ise $\lambda_B = 1533 \text{ nm}$ olduğu durumu göstermektedir. Bragg dalga boyu ve sıcaklık arttıkça dalga boyunda meydana gelen kayma miktarının arttığı görülmektedir. Ancak çok yüksek sıcaklıklar fiber yapısına zarar verir ve fiber Bragg ızgaraların yansıtıcılık özelliğini tamamen yok edebilir. Bu nedenle, sıcaklık algılaması yapan, fiber Bragg ızgara tabanlı optik sensörler genellikle $200 \text{ } ^\circ\text{C}$ ’nin altında kullanılırlar.



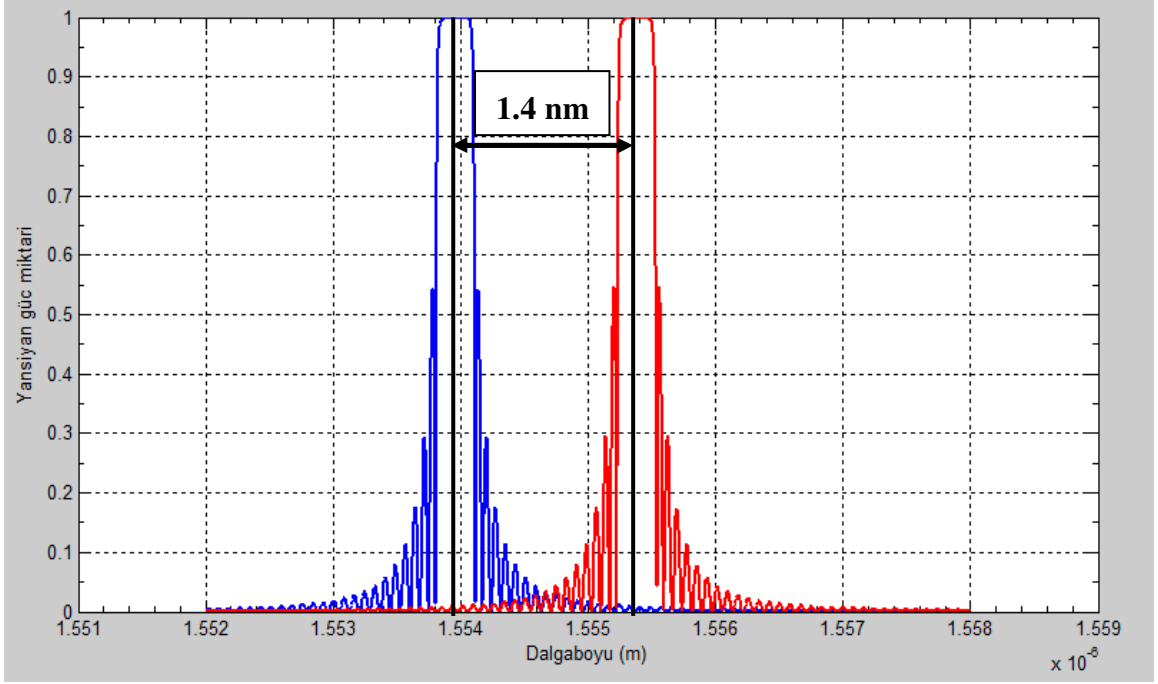
Şekil 4.21 Değişik dalga boyu değerleri için sıcaklıkla meydana gelen kayma miktarı.

Şekil 4.22’de, sıcaklıkta meydana gelen $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’lik değişime bağlı olarak değişik dalgalıboylarında meydana gelen kayma miktarı görölmektedir. Şekilden görölebileceğı gibi 1550 nm dalgalıboyunda, 14.18 pm’lik kayma meydana gelmektedir.



Şekil 4.22 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık değişimi olduğu durumda oluşan kayma miktarı.

Termal uzama katsayısı ve termo-optik katsayı belirtilen değerleri aldığı durumda, sıcaklıkta meydana gelen $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’lik değişim miktarı için, yansıyan güç spektrumunda meydana gelen değişim miktarı Şekil 4.23’de görölmektedir. Şekil 4.23’de mavi ile gösterilen eğri, Bragg dalgalıboyunun $\lambda_B = 1554\text{ nm}$ olarak alındığı referans yansıma spektrumunu, kırmızı ile gösterilen eğri ise sıcaklık değişimi sonrasında dalgalıboyunda meydana gelen kayma miktarına bağlı olarak değişen yansıma spektrumunu göstermektedir. Sıcaklıkta meydana gelen $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’lik değişim sonucunda, yansıyan güç spektrumunun en yüksek değere ulaştığı dalgalıboyu, referans dalgalıboyundan 1.4 nm uzakta yer almaktadır.



Şekil 4.23 Yansıyan güç spektrumunun sıcaklık etkisiyle değişimi.

4.3.2 Fiber Bragg Izgara Tabanlı Sensörlerin Gerilme Duyarlılığı

Fiber Bragg ızgaralar, sıcaklığa olduğu gibi gerilmeye karşı da duyarlılık gösteren elemanlardır. Gerilme ile meydana gelen değişim, Bragg dalgaboyunda değişim olmasına yol açar. Her madde belirli bir elastisite özelliğine sahiptir. Izgaraya bir gerilme kuvveti uygulandığında, maddenin sahip olduğu fotoelastik katsayı değişime uğrar ve dalgaboyunda kayma meydana gelir.

Gerilme değişimiyle dalgaboyunda meydana gelen kayma miktarı,

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) G_z \quad (4.25)$$

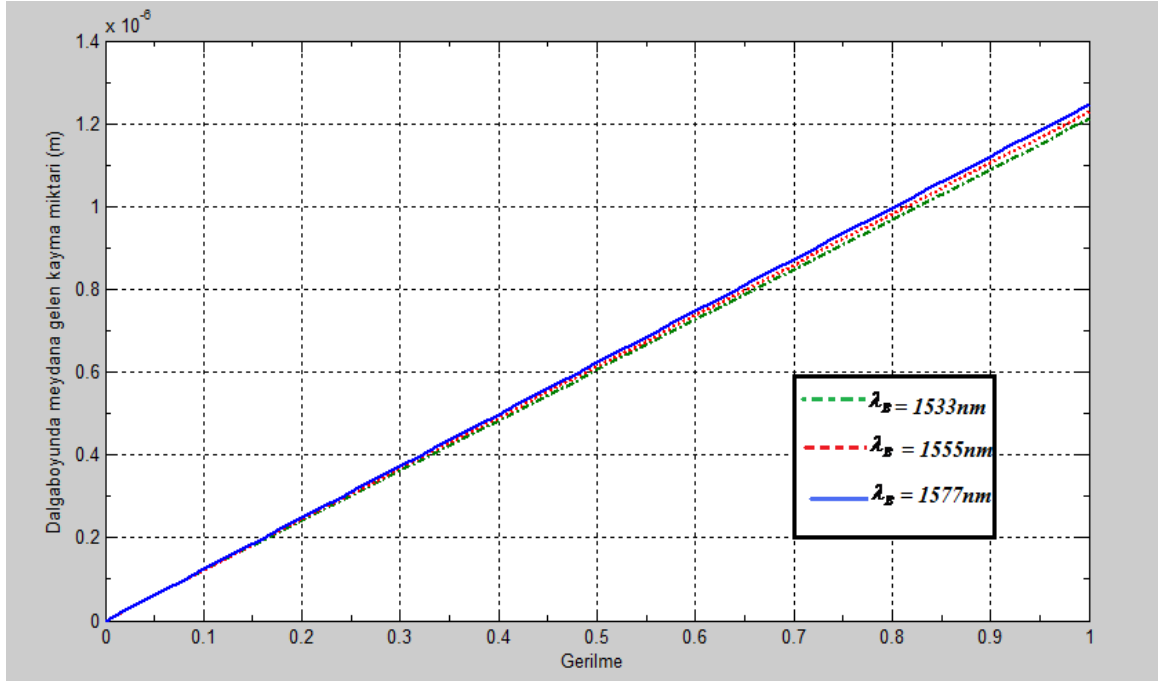
olarak tanımlanır. Burada, G_z , ızgaraya uygulanan gerilme miktarını göstermektedir. P_e ise fotoelastik katsayısını ifade eder,

$$P_e = \frac{n_{eff}^2}{2} (p_{12} - m(p_{11} + p_{12})) \quad (4.26)$$

dir. Burada p_{ij} , olarak gösterilen terimler stres-optik tensörün Pockel katsayılarını, m olarak gösterilen terim ise Poisson oranını ifade eder. Germanyum katkılı cam fiber için,

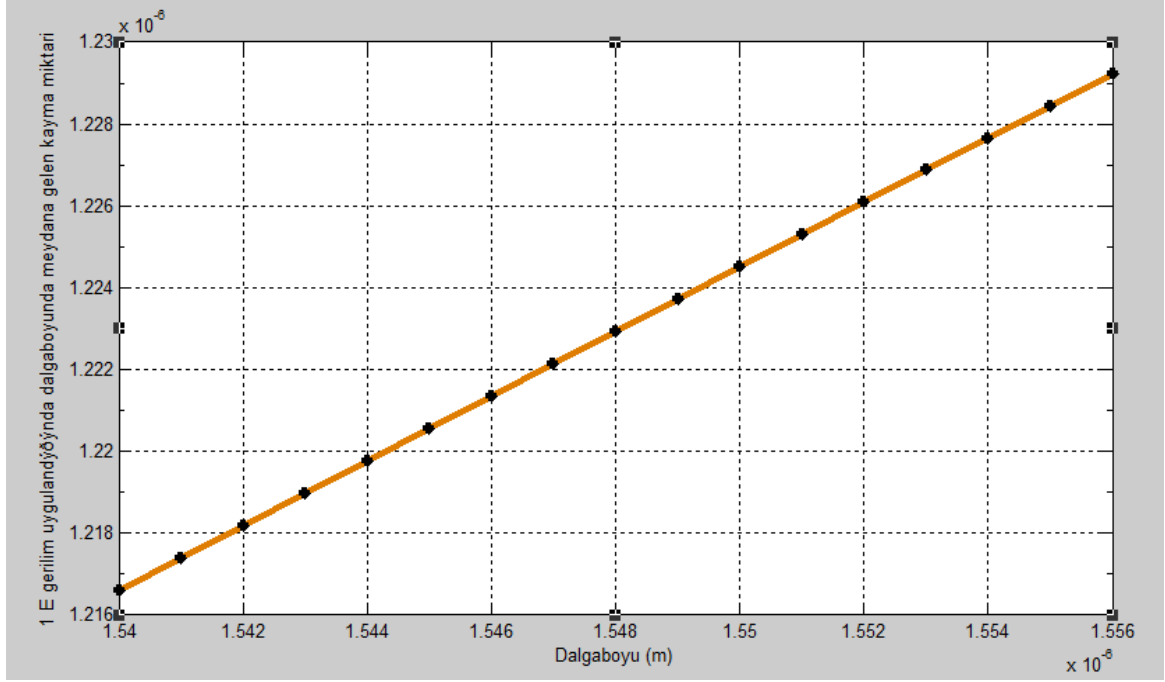
$p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, $m = 0,16$ ve $n_{eff} = 1,482$ değerlerini alır. Bu durumda fotoelastik katsayı değeri $P_e = 0,21$ olarak bulunur (Hill ve Meltz, 1997; Mohammad vd., 2004).

Fotoelastik katsayı belirtilen değeri aldığı durumda, Bragg dalgaboyunun değişik değerleri için, dalgaboyunda meydana gelen kayma miktarının gerilme kuvveti ile değişimi Şekil 4.24’de görülmektedir. Şekil 4.24’de mavi ile gösterilen bölüm $\lambda_B = 1577$ nm, kırmızı ile gösterilen bölüm $\lambda_B = 1555$ nm ve yeşil ile gösterilen bölüm ise $\lambda_B = 1533$ nm olduğu durumu göstermektedir. Bragg dalgaboyu ve uygulanan gerilme kuvveti arttıkça, dalgaboyunda meydana gelen kayma miktarının arttığı görülmektedir.



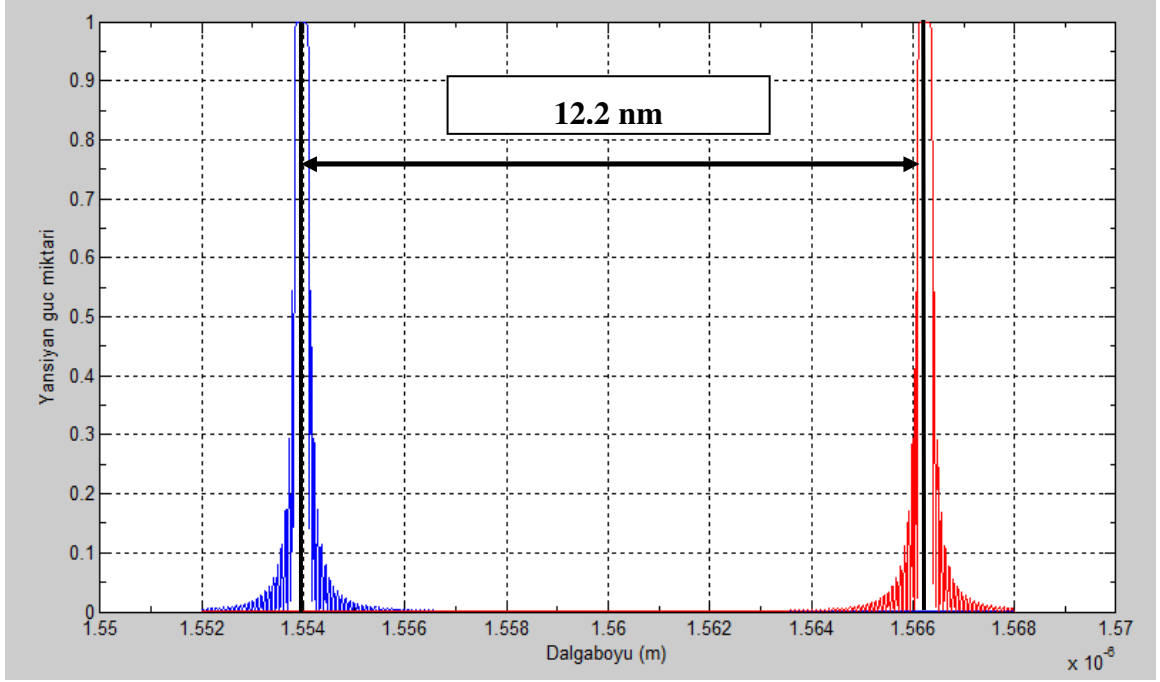
Şekil 4.24 Değişik dalgaboyu değerleri için gerilmeyle meydana gelen kayma miktarı.

Şekil 4.25’de gerilme kuvvetinde meydana gelen 1 birimlik gerilme değişime bağlı olarak değişik dalgaboylarında meydana gelen kayma miktarı görülmektedir. Şekilden görülebileceği gibi 1550 nm dalgaboyunda, yaklaşık olarak 1.225 μm ’lik kayma meydana gelmektedir.



Şekil 4.25 1 birim gerilme kuvveti değişimi olduğu durumda oluşan kayma miktarı.

Fotoelastik katsayı belirtilen değeri aldığı durumda, gerilme kuvvetinde meydana gelen 0.01 birimlik değişim miktarı için, yansıyan güç spektrumunda meydana gelen değişim miktarı Şekil 4.26’da görülmektedir. Şekil 4.26’da mavi ile gösterilen eğri, Bragg dalgaboyunun $\lambda_b = 1554$ nm olarak alındığı referans yansıma spektrumunu, kırmızı ile gösterilen eğri ise gerilme değişimi sonrasında dalgaboyunda meydana gelen kayma miktarına bağlı olarak değişen yansıma spektrumunu göstermektedir. Gerilmede meydana gelen 0.01 birimlik değişim sonucunda, yansıyan güç spektrumunun en yüksek değere ulaştığı dalgaboyu, referans dalgaboyundan 12.2 nm uzakta yer almaktadır.



Şekil 4.26 Yansıyan güç spektrumunun gerilme kuvveti etkisiyle değişimi.

4.3.3 Fiber Bragg ızgara Tabanlı Sensörlerin Duyarlılık Farklılıkları

Fiber Bragg ızgara tabanlı sensörler, yansıyan dalgaboyunda sıcaklık ve gerilmeye bağlı olarak meydana gelen değişimlere karşı, duyarlılık gösteren elemanlardır.

Yapılan duyarlılık analizleri sonucunda, fiber Bragg ızgara tabanlı optik sensörlerin gerilme kuvvetine karşı daha çok duyarlılık gösterdiği görülmüştür.

5. SONUÇ

Optik haberleşmenin temel taşları arasında yer alan fiber Bragg ızgara tabanlı sensörlerin en büyük avantajı, algılanan parametrenin etkilerinin, dalgaboyuna olan etkisinin hemen görülmesidir. Bragg dalgaboyu, ızgara periyodu ve kırılma indis profiline bağlı olarak değişim gösterir. Sıcaklık ve ızgaraya uygulanan gerilme kuvvetinin değişimi, ızgara periyodunda ve kırılma indisinde farklılaşmaya yol açar. Bu nedenle, dalgaboyunda meydana gelen kayma miktarlarına bağlı olarak sensör uygulamaları yapılmaktadır.

Tıp uygulamalarında sıcaklık sensörü ve uzay uygulamalarında dinamik gerilme ölçen sensör olarak yararlanılan fiber Bragg ızgaralar, dar bir spektruma sahip olan dalgaboyu bileşenlerine ihtiyaç duyan dalgaboyu bölmeli çoğullamalı (Wavelength Division Multiplexing, WDM) sistemlerde kullanılır. Fiber ızgaralar, filtreleme, dispersiyon dengeleme ve lazerler gibi çeşitli uygulamalarda yer alan önemli optik bileşenlerdir.

Fiber Bragg ızgaraların temelini, optik fiber dalga kılavuzunun çekirdek bölgesindeki kırılma indisinin, fiber uzunluğu boyunca belirli periyotlarla değişimi oluşturur. Kırılma indisinde meydana gelen değişim nedeniyle dalga kılavuzuna gönderilen ışığın belirli bir kısmı her bir ızgara aralığında geri yansıtılır ve yansıtıcılık Bragg dalgaboyunda en yüksek değere ulaşır.

Fiber Bragg ızgaralar yansıma modunda tasarlandığı için, Bragg dalgaboyundaki yansıyan güç miktarının büyük değerlerde olması, ızgaranın performansının yüksek olmasını sağlar. Bu tezde, fiber Bragg ızgaraların, yansıtıkları ve ilettikleri güç miktarlarının, değişik ızgara uzunlukları, ızgara periyotları ve kırılma indislerinde meydana gelen değişimlere göre farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Yapılan analizlerde, yansıyan güç miktarının yüksek değerlerinin elde edilebilmesi için, seçilecek ızgaranın değişik özellikleri incelenmiştir. Buna göre, ızgara uzunluğu arttığında yansıyan güç miktarının da arttığı görülmekte ve kırılma indisinde meydana gelen değişim miktarı sabit tutulduğu durumda daha büyük uzunluklu fiber Bragg ızgaralar kullanılarak yüksek yansıtıcılık değerleri elde edilebilmektedir. ızgara periyodunun artan değerleri için Bragg dalgaboyunun artması nedeniyle, yansıyan güç miktarının en yüksek değeri aldığı dalgaboyunun da arttığı görülmüştür. Kırılma indis değişiminin artan değerleri için yansıyan güç miktarı artış göstermektedir. Ayrıca kırılma indis değişiminin yüksek değerleri için, çok daha kısa ızgaralarla yansıtırlılığın en yüksek değere ulaştığı noktaya erişilebileceği görülmüştür. Sensör yapımında kullanılacak olan en uygun ızgara uzunluğunun belirlenmesi için maksimum yansıtıcılık eğrisinin gösterdiği bu değişim dikkate alınmalıdır. Yapılan çalışmada, gerilme kuvvetinin dalgaboyuna etkisinin,

sıcaklık değişiminin dalgaboyuna etkisinden daha kuvvetli olduğu sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- Cherin, A. H., (1983), An Introduction to Optical Fibers, Mcgraw Hill, New York.
- Dutton, H. J. R., (1998), “Understanding Optical Communications”, International Technical Support Organization (IBM).
- Erdogan, T., (1997), “Fiber Grating Spectra”, J. Lightwave Technology, 15(8) : 1277-1294.
- Gholamzadeh, B. ve Nabovati, H., (2008), “Fiber Optic Sensors”, Proceeding of World Academy of Science, Engineering and Technology, 32:303-313.
- Hill, K. O. ve Meltz, G., (1997), “Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview”, J. Lightwave Technology, 15(8):1263-1276.
- Kashyap, R., (1999), Fiber Bragg Gratings, Academic Press, San Diego.
- Kersey, A., Davis, M., Patrick, H., LeBlanc, M. ve Koo, K., (1997), “Fiber Grating Sensors”, J. Lightwave Technology, 15(8): 1442-1463.
- Keshk M., Ashry, A. ve Aly, H., (2007), “ Analysis of Different Fiber Bragg Gratings for Use in a Multi-wavelength Erbium Doped Fiber Laser”, National Radio Science Conference (NRSC), 13-15March 2007, Egypt.
- Mohammad, N., Szyszkowski, W., Zhang, W., Haddad, E., Zou, J., Jamroz, W. ve Kruzelecky, R., (2004), “Analysis and Development of a Tunable Fiber Bragg Grating Filter Based on Axial Tension/Compression”, J. Lightwave Technology, 22(3):2001-2013.
- Udd, E., (1996), “Fiber Optic Smart Structures”, Proceedings of the IEEE, 84(1):60-67.
- Ünverdi, N. Ö., (1991), Optik Fiberlerde Propagasyon Özelliklerinin İncelenmesi ve Bükülme Kaybının Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Phing, H., Ali, J., Rahman, R. ve Tahir, B. (2007), “Fiber Bragg Grating Modeling, Simulation and Characteristics with Different Grating Lengths”, Journal of Fundamental Sciences, 167-175.
- Zhang, B. ve Kahrizi, M., (2005), “Characteristics of Fiber Bragg Grating Temperature Sensor at Elevated Temperatures”, International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi 09.01.1984

Doğum Yeri Erzincan

Lise 1997-2001 Sakıp Sabancı Lisesi

Lisans 2001-2006 Yıldız Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Fakültesi
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2006-2009 Yıldız Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik ve Haberleşme Müh. Anabilim Dalı
Haberleşme Programı

Çalıştığı Kurum(lar)

2006-2009 Nortel Netaş

