




T.C.
Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

**FRESNEL YANSIMA TABANLI FİBER
OPTİK SENSÖR SİSTEMİ TASARIMI
VE RÖLE DESTEKLİ SERBEST UZAY
OPTİK HABERLEŞME SİSTEMİ İLE
İLETİM OPTİMİZASYONU**

Arif BAŞGÜMÜŞ

Doktora Tezi



**FRESNEL YANSIMA TABANLI FİBER
OPTİK SENSÖR SİSTEMİ TASARIMI
VE RÖLE DESTEKLİ SERBEST UZAY
OPTİK HABERLEŞME SİSTEMİ İLE
İLETİM OPTİMİZASYONU**

Arif BASGÜMÜS



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FRESNEL YANSIMA TABANLI FİBER OPTİK SENSÖR SİSTEMİ TASARIMI VE
RÖLE DESTEKLİ SERBEST UZAY OPTİK HABERLEŞME SİSTEMİ İLE
İLETİM OPTİMİZASYONU

Arif BAŞGÜMÜŞ

Prof. Dr. Güneş YILMAZ
(Danışman)

Prof. Dr. Ahmet ALTUNCU
(Eş Danışman)

DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2016

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

ARIF BAŞGÜMÜŞ tarafından hazırlanan “FRESNEL YANSIMA TABANLI FİBER OPTİK SENSÖR SİSTEMİ TASARIMI ve RÖLE DESTEKLİ SERBEST UZAY OPTİK HABERLEŞME SİSTEMİ ile İLETİM OPTİMİZASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Güneş YILMAZ
Uludağ Üniversitesi

Eş Danışman

Prof. Dr. Ahmet ALTUNCU
Dumlupınar Üniversitesi

Başkan: Prof. Dr. Güneş YILMAZ
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



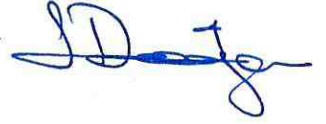
Üye: Prof. Dr. Dr. Naim DEREBAŞI
Uludağ Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi,
Fizik Anabilim Dalı

İmza



Üye: Prof. Dr. Seydi DOĞAN
Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık
Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Anabilim Dalı

İmza



Üye: Doç. Dr. Murat YÜCEL
Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim
Dalı

İmza



Üye: Yrd. Doç. Dr. Sait Eser KARLIK
Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım / ONAY


Prof. Dr. Ali Osman DEMİR

Enstitü Müdürü

01/02/2016

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

25 / 01 / 2016

Arif BAŞGÜMÜŞ

ÖZET

Doktora Tezi

FRESNEL YANSIMA TABANLI FİBER OPTİK SENSÖR SİSTEMİ TASARIMI VE RÖLE DESTEKLİ SERBEST UZAY OPTİK HABERLEŞME SİSTEMİ İLE İLETİM OPTİMİZASYONU

Arif BAŞGÜMÜŞ

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Güneş YILMAZ

Eş Danışman: Prof. Dr. Ahmet ALTUNCU

Bu tez çalışmasında, sıvıların kırılma indisini gerçek zamanlı olarak ölçebilen Fresnel yansımaya tabanlı fiber optik sensör dizisi tasarlanmış ve deneysel karakterizasyonu yapılmıştır. Sensör dizisi tasarımı için, optik fiberlerde darbelerin zamanda çoğullamasını sağlayan iletim süresi optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen ölçümlerde, sudaki tuz yoğunluğunun kırılma indisine bağlı değişiminin, uygunluk derecesi 1'e çok yakın olacak şekilde doğrusal elde edilmesi, ölçüm sisteminin doğrusallığını göstermektedir. Bu çalışmada ayrıca, farklı çözücülerin kırılma indisleri yüksek çözünürlükle ölçülmüş ve literatürde verilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Tasarlanan ölçüm sisteminin kısa ve uzun dönem kararlılık performanslarının yüksek olduğu gösterilmiştir.

Fresnel yansımaya tabanlı fiber optik sensör sisteminden alınan veriler, uzak alıcılara bir röle destekli serbest uzay optik (FSO) haberleşme sistemi üzerinden iletilebilir. Bu amaçla, FSO haberleşme sisteminin iletim mesafesi performans analizi ayrıca çalışılmıştır. Bu çalışmada, farklı konfigürasyonlardaki röle destekli FSO haberleşme sistemlerinin, atmosferik çalkantı ve yol kaybı tesirleri altında kesinti olasılığı incelenmiştir. Buradan yola çıkılarak iletim mesafesi için bir optimizasyon problemi tanımlanmış ve bu problem Matlab™ programı kullanılarak, diferansiyel gelişim (DE) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritmaları ile çözülmüştür. Normal şartlar altında kabul edilebilir düzeydeki kesinti olasılığı için en büyük iletim mesafeleri, yazılan benzetim programları sayesinde en uygun röle konum kestirimi yapılarak elde edilmiştir. Ayrıca, bu iki algoritmanın FSO haberleşme sistemlerindeki karşılaştırmalı performans analizi detaylı olarak gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Atmosferik çalkantı, DE, Fiber optik sensör, Fresnel yansımaya, FSO haberleşme, Kesinti olasılığı, Kırılma indisi, PSO, Röle destekli iletim.

2016, xiv + 108 sayfa.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

FRESNEL REFLECTION BASED FIBER OPTICAL SENSOR SYSTEM DESIGN AND TRANSMISSION OPTIMIZATION USING RELAY ASSISTED FREE SPACE OPTICAL COMMUNICATION

Arif BAŞGÜMÜŞ

Uludag University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronic Engineering

Adviser: Prof. Dr. Güneş YILMAZ

Co-Adviser: Prof. Dr. Ahmet ALTUNCU

In this thesis, the Fresnel reflection based fiber optic sensor array, that is able to measure the refractive index of the liquid in real time, is designed and the experimental characterization is performed. The optimization for the transmission time that provides the multiplexing of the pulses for the sensor array design in the optical fiber is realized. In the measurements which is carried out in the laboratory, the salt concentration changing with the refractive index inside the water, the degree of compliance to linear equation is obtained as 1, proves the accuracy of the measurement system. Besides, in this study the refractive indices of the different solvents are measured in high resolution and the results are compared with the values given in the literature. It is shown that, the short and long term stability performance is high for the designed measurement system.

The data, received from the Fresnel reflection based fiber optic sensor system, is able to be transmitted to the remote receiver via the relay assisted free space optical (FSO) communications systems. For this purpose, the performance analysis for the transmission distance of the FSO communications system is also studied. In this study, the outage probability for the relay assisted FSO communications systems in different configurations is analyzed under atmospheric turbulence and path loss effects. Based upon this point, an optimization problem for the transmission distance is defined, and this problem is solved using Differential Evolution (DE) and Particle Swarm Optimization algorithms with Matlab™ programming language. In the normal conditions, the maximum transmission distances for an outage probability which is in acceptable level, are obtained by utilizing the estimation of the optimal relay locations with the help of the simulations (software programming). Furthermore, the comparative performance analysis is carried out in detail for these two algorithms in FSO communications systems.

Key words: Atmospheric turbulence, DE, Fiber optic sensor, Fresnel reflection, FSO communication, Outage probability, PSO, Refractive index, Relay-assisted transmission.

2016, xiv + 108 pages.

TEŞEKKÜR

Doktora tezimin planlamasında, yürütülmesinde ve başarı ile tamamlanmasında, ilgisini ve desteğini her zaman gösteren, bilgi ve tecrübesini paylaşan, motive eden danışmanım Prof. Dr. Güneş YILMAZ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasının başından bu yana, mesaisinin bir bölümünü düzenli olarak bu çalışmaya ayıran, planlı, titiz çalışmaları ile yaptığı yönlendirmeler ve değerlendirmelerle tezin oluşmasında büyük katkısı olan ortak tez danışmanım Prof. Dr. Ahmet ALTUNCU'ya gönülden teşekkür ederim.

Kendi doktora eğitimleri boyunca yaşadıkları tecrübeleri benimle paylaşan, yayınların ve tezin düzenlenmesinde yardımlarını esirgemeyen ve yol gösteren değerli arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Mustafa NAMDAR'a şükranlarımı sunarım.

Tezin laboratuvar çalışmalarının tamamını birlikte gerçekleştirdiğimiz, birlikte fikir yürütüp, aylarca beraber çalıştığımız, benim için bir mesai arkadaşından daha fazlası olan Fırat Ertaç DURAK'a teşekkür ederim.

Yıllardır beraber vakit geçirdiğimiz, bilgi paylaşımında bulunduğumuz bütün arkadaşlarıma ve yol gösteren değerli büyüklerime teşekkür ederim.

Doktora eğitimim süresince desteklerinden, anlayışlarından, özellikle son dönemde gösterdikleri hoşgörü ve sabırdan dolayı sevgili karıma, oğluma ve kızıma yürekten teşekkür ederim.

Sevgilerini, manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim Anneme, kardeşlerime, kayınvalide ve kayınpederime çok teşekkür ederim.

Ve...

Doktora çalışmam için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan, doktorayı bitirmemi benden daha fazla isteyen, gece-gündüz fark etmeksizin maddi-manevi her türlü desteğini sürekli arkamda hissettiğim Babama çok teşekkür ederim.

Arif BAŞGÜMÜŞ
25 / 01 / 2016

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Fiber Optik Haberleşme	1
1.1.1 Yansıma Tabanlı Fiber Optik Sensörler	8
1.2. Serbest Uzay Optik (Free Space Optical-FSO) Haberleşme.....	10
2. KURAMSAL TEMELLER	14
2.1. Fiber Optik Sensörler	14
2.1.1 Işık Şiddeti Modülasyonlu Fiber Optik Sensörler (IM-FOS)	15
2.2. Düzlem Dalgaların Yansıması ve Kırılması	17
2.2.1 Dik Kutuplanma (Prependicular Polarization).....	19
2.2.2 Paralel Kutuplanma (Parallel Polarization)	23
2.2.3 Tam Yansıma Durumu (Total Reflection)	26
2.2.4 Yansımanın Olmadığı Brewster Açısı.....	27
2.2.5 Fiber Optik Haberleşme Sistemlerinde Fresnel Yansıma Değerlerinin Hesaplanması	28
2.3. Atmosferik Optik Yayınım	31
2.3.1. Merkezi Limit Teoremi	34
2.3.2. Çalkantı Kaynaklı Sönümlenme	35
2.4. Röle Destekli FSO Haberleşmesi	38
2.4.1 Kuvvetlendir ve Aktar (Amplify and Forward-AF) Metodu	39
2.4.2 Çöz ve Aktar (Decode and Forward-DF) Metodu	40
2.5 Optimizasyon Algoritmaları	41
2.5.1 Diferansiyel Gelişim (DE) Algoritması	44
2.5.2 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO).....	46
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	50

3.1	Fiber Optik Sensör Dizisi Tasarımı	50
3.1.1	Fiber Optik Kabloların İletim Mesafesi Analizi	58
3.1.2	Basit Bir Fiber Optik Uzunluk Ölçüm Sistemi	59
3.1.3	Fiber Optik Sensör Dizisi ile Kırılma İndisi Ölçümü.....	61
3.2	FSO Haberleşme Sistem Modeli ve Kesinti Olasılığı (Outage Probability) İfadeleri	63
3.3	Röle Destekli FSO Haberleşme Sisteminin İletim Mesafesi Optimizasyonu	67
4.	ARAŞTIRMA SONUÇLARI	70
4.1	Fiber Optik Uzunluk Ölçüm Sonuçları	70
4.2	Fiber Optik Sensör Dizisi ile Yapılan Ölçümler	72
4.3	Röle Destekli FSO Haberleşme Sistemlerinde Optimum İletim Mesafesi Analizi	78
4.3.1	DE Algoritması Yardımıyla İletim Mesafesi Optimizasyonu	79
4.3.2	FSO Haberleşme Sistemlerinde DE ve PSO Algoritmalarının Karşılaştırılması	84
5.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	90
	KAYNAKLAR	94
	ÖZGEÇMİŞ	106

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
\mathbf{a}_{ki}	Gelen dalganın yayılma yönünü gösteren vektör
\mathbf{a}_{kr}	Yansıyan dalganın yayılma yönünü gösteren vektör
\mathbf{a}_{kt}	Kırılan dalganın yayılma yönünü gösteren vektör
β	Faz sabiti
A	Kırılma indisi yapı sabitinin yerdeki değeri
c	Işığın boşluktaki hızı
c_1 ve c_2	Pozitif ivme sabitleri
c_{1550nm}	1550 nm dalgaboyundaki ışığın fiber optik içerisindeki hızı
$C_n^2(\cdot)$	Kırılma indisi yapı sabiti
ΔL	Fiber optik uzunluk farkı
$\Delta t_{boşluk}$	Işığın boşlukta kilometre başına gecikme süresi
Δt_{fiber}	Metre başına fiber optik gecikme
Δt_{ist}	İstenilen gecikme süresi
d_i	i . SISO hattının uzunluğu
$\partial n / \partial C$	Kırılma indisinin yoğunluğa bağlı değişiminin eğimi
d_{RX}	Alıcı açıklığı
d_{TX}	Verici açıklığı
$d_{R_j,A}$	j . röle ile alıcı arasındaki mesafe
$d_{V,A}$	Verici ve alıcı arasındaki mesafe
d ve L	Uzunluk
$d_{V,j}$	Verici ile j . röle arasındaki mesafe
d_{V,R_j}	Verici ile j . röle arasındaki mesafe
$\bar{d}_{W(i)}$	Röleler ve alıcı arasındaki kod çözülme olasılık setinin mesafeleri
$\mathbf{E}(x, z)$	Elektrik alan şiddeti fazörü
E_{oi}	Gelen elektromanyetik dalganın genliği
E_{or}	Yansıyan elektromanyetik dalganın genliği
E_{ot}	İletilen elektromanyetik dalganın genliği
ϵ	Elektrik geçirgenlik (permittivity)
ϵ_r	Dielektrik sabiti veya bağıl geçirgenlik
e^{y_i}	İki düzlem arasındaki optik alan artışı
F	Ölçekleme faktörü
Φ_E	Optik sinyali gönderen fiberin çıkış yüzeyindeki foton akı yoğunluğu

Φ_{RS}	Optik sinyali algılayan fiberin yüzeyinde toplanan foton akı yoğunluğu
$\Gamma(\cdot)$	Gama fonksiyonu
G_{maks}	Maksimum jenerasyon
h	Plank sabiti
h	Yükseklik
$\mathbf{H}(x, z)$	Manyetik alan şiddeti fazörü
I_j	Sensör problemlerinden yansıyan sinyallerin ışık şiddeti
I_j'	Sensör problemleri sıvı içerisine daldırıldığında problemlerden yansıyan sinyallerin ışık şiddeti
I_r	Referans probundan yansıyan sinyalin ışık şiddeti
k	Dalga sayısı
K_j	Sensör problemleri arasındaki zayıflama düzeltme katsayısı
λ	Optik dalgaboyu
$l(d)$	Vericiye d mesafesindeki yol kaybı
$L(d)$	Normalize yol kaybı
$L(d_i)$	d_i mesafesine bağlı normalize yol kaybı
$l(d_{V,A})$	Verici ile alıcı arasındaki toplam yol kaybı
$L(d_{V,j})$	Verici ile j . röle arasındaki mesafeye bağlı normalize yol kaybı
M_s	Modülasyon fonksiyonu
n	Kırılma indisi
N	Röle sayısı
NA	Fiberin nümerik açıklığı
n_{eff}	Efektif kırılma indisi
n_f	Fiberin kırılma indisi
n_g	Fiber grup indisi
n_h	Havanın kırılma indisi
n_s	Sıvının kırılma indisi
μ	Manyetik geçirgenlik (permeability)
μ_0	Boş uzayın manyetik geçirgenliği
μ_z	Log-genliğin ortalaması
$\mu_z(d_i)$	Log-genlik ortalamasının d_i mesafesine bağlı değeri
$\mu_z(d_{V,j})$	Log-genlik ortalamasının verici ile j . röle arasındaki mesafeye bağlı değeri
η	Öz empedans
$Q(\cdot)$	Q fonksiyonu
P_{gir}	Kaynaktan gelen optik sinyalin gücü

P_j	j . rölenin gücü
$P_{kesinti}$	Kesinti olasılığı
$P_{kesinti_paralel}$	Paralel DF röleli FSO haberleşmesi için kesinti olasılığı
$P_{kesinti_seri}$	Seri DF röleli FSO haberleşmesi için kesinti olasılığı
P_M	Güç marjı
P_{yan}	Hareketli yüzeyden yansıyan sinyalin gücü
P_T	Toplam iletim gücünü
P_{th}	Eşik iletim gücü
P_{verici}	Verici kaynağın gücü
R	Yansıtma değeri
r_{1j} ve r_{2j}	$[0,1]$ aralığında düzgün dağılımdan üretilen rastgele değerler
R_j	Bağıl yansıma katsayısı
R^2	Uygunluk derecesi
R_{ort}	Ortalama bağıl yansıma katsayısı
R_{\perp}	Dik kutuplanmada yansıma değeri
R_{\parallel}	Paralel kutuplanmada yansıma değeri
Γ	Yansıma katsayısı
Γ_{\perp}	Dik kutuplanmada yansıma katsayısı
Γ_{\parallel}	Paralel kutuplanmada yansıma katsayısı
σ_1 ve σ_2	Öz iletkenlik (conductivity)
σ	Atmosferik zayıflama katsayısı
σ_z^2	Log-genliğin varyansı
$\sigma_z(d_i)$	Log-genlik standart sapmasının d_i mesafesine bağlı değeri
$\sigma_z(d_{V,j})$	Log-genlik standart sapmasının verici ile j . röle arasındaki mesafeye bağlı değeri
S_R	Optik sinyali algılayan fiberin toplayıcı yüzey alanı
θ_B	Brewster açısı
θ_c	Kritik açı
θ_i	Geliş açısı
θ_r	Yansıma açısı
θ_t	Kırılma veya iletim açısı
T	İletim değeri
T_{\perp}	Dik kutuplanmada iletim değeri
T_{\parallel}	Paralel kutuplanmada iletim değeri
τ	İletim veya kırılma katsayısı
τ_{\perp}	Dik kutuplanmada iletim katsayısı
τ_{\parallel}	Paralel kutuplanmada iletim katsayısı

U_0	Kaynak çıkışındaki optik alan
u_p	Faz hızı
w	Eylemsizlik ağırlığı
$W(i)$	Kaynağın gönderdiği işaretin kodunun N adet röle içerisinde hangileri tarafından çözüldüğü olasılık setinin i . ihtimali
χ	Log-genlik
$x_i(t)$	i . parçacığın t anındaki pozisyonu
$x_{ij}(t)$	i . parçacığın j . boyuttaki ve t anındaki konumu
v	Rüzgâr hızı
$v_i(t)$	i . parçacığın t anındaki hızı
$v_{ij}(t)$	i . parçacığın j . boyuttaki ve t anındaki hızı
$v_{ij}(t+1)$	i . parçacığın j . boyuttaki ve $t+1$ anındaki hızı
$\hat{y}(t)$	Sürü tarafından bulunan en iyi pozisyon
$y_i(t)$	i . parçacığın en iyi lokal pozisyonu

Kısaltmalar

Açıklama

ABC	Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony)
ACA	Karınca Koloni Algoritması (Ant Colony Algorithm)
AF	Kuvvetlendir ve Aktar (Amplify and Forward)
BAP	Bilimsel Araştırma Projesi
BER	Bit Hata Oranı (Bit Error Rate)
BPPM	İkili Darbe Konum Modülasyonu (Binary Pulse Position Modulation)
CSI	Kanal Durum Bilgisi (Channel State Information)
CVD	Kimyasal Buharla Biriktirme (Chemical Vapour Deposition)
DAQ	Veri Toplama (Data Acquisition)
DE	Diferansiyel Gelişim (Differential Evolution)
DEA	Diferansiyel Gelişim Algoritması (Differential Evolution Algorithm)
DF	Çöz ve Aktar (Decode and Forward)
DSF	Dispersiyonu Kaydırılmış Fiber (Dispersion Shifted Fiber)
EMA	Beklentiyi Maksimumlaştırma Algoritması (Expectation Maximization Algorithm)
FC/PC	Fiziki Bağlantı için Ferrule Konnektör (Ferrule Connector for Physical Contact)
FSO	Serbest Uzay Optik (Free Space Optical)
GA	Genetik Algoritma (Genetic Algorithm)
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (The Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IM-FOS	Işık Şiddeti Modülasyonlu Fiber Optik Sensörler (Intensity-Modulated Fiber-Optic Sensor)
InGaAs	İndiyum Galyum Arsenit (Indium Gallium Arsenide)

InGaAsP	İndiyum Galyum Arsenit Fosfat (Indium Gallium Arsenide Phosphide)
LAN	Yerel Alan Ağları (Local Area Network)
LD	Lazer Diyot (Laser Diode)
LDPC	Düşük Yoğunluklu Parite Kontrolü (Low-Density Parity Check)
LEAF	Geniş Efektif Alanlı Fiber (Large Effective Area Fiber)
LED	Işık Yayan Diyot (Light Emitting Diode)
MAN	Metropol Alan Ağları (Metropolitan Area Network)
MCVD	Uyarlanmış Kimyasal Buhar Takviyesi (Modified Chemical Vapour Deposition)
MIMO	Çok-Girişli Çok-Çıkışlı (Multiple-Input Multiple-Output)
MISO	Çok-Girişli Tek-Çıkışlı (Multiple-Input Single-Output)
MLSD	En büyük Benzerlikli Dizi Algılama (Maximum Likelihood Sequence Detection)
NIA	Tabiattan İlham Alınan Algoritma (Nature Inspired Algorithm)
NZ-DSF	Dispersiyonu Sıfırdan Farklı ve Kaydırılmış Fiber (Non-Zero Dispersion Shifted Fiber)
OTDR	Optik Zaman Domeni Yansıma Ölçme (Optical Time Domain Reflectometry)
OVD	Dışarıdan Buharla Biriktirme (Outside Vapour Deposition)
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)
RF	Radyo Frekansı (Radio Frequency)
SA	Yapay Isıl İşlem Algoritması (Simulated Annealing)
SCI	Fen Bilimleri Alanında Uluslararası Düzeyde Kabul Gören Hakemli Bilimsel Dergileri Kapsayan İndeks (Science Citation Index)
SISO	Tek-Girişli Tek-Çıkışlı (Single-Input Single-Output)
SMF	Tek Modlu Fiber (Single Mode Optical Fiber)
SONET	Senkron Optik Ağ (Synchronous Optical Network)
STM	Senkron Taşıma Modülü (Synchronous Transport Module)
TE	Enine Elektrik (Transverse Electric)
TM	Enine Manyetik (Transverse Magnetic)
UV	Mor Ötesi (Ultraviolet)
VAD	Buhar Fazında Eksenel Depolama (Vapour Axial Deposition)
WDM	Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama (Wavelength Division Multiplexing)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Işık demetinin fiber optik kablo içerisinde ilerlemesi.	4
Şekil 1.2. Fiber optik haberleşmenin optik spektrumdaki yeri (MEB 2013).....	5
Şekil 1.3. Fiber optik kablolarda oluşan soğurum ve saçınım kayıpları (Amundsen ve Landrø 2009).....	6
Şekil 1.4. Fiber optik kablolarda 400 – 1600 nm dalgaboyu aralığında oluşan zayıflama (Mutlu 2005).	7
Şekil 1.5. Optik fiberde ışık iletiminde oluşan çeşitli kayıp bileşenleri (Altuncu 2007). ..	7
Şekil 1.6. Dalgaboyuna bağlı silikanın zayıflaması ve fiber lazer pompa ve emisyon bantları (Hecht 2014).....	8
Şekil 2.1. Bir optik haberleşme sisteminin blok diyagramı (Emtekno 2015).	14
Şekil 2.2. Bir fiber optik sensör sisteminin genel şeması (Rajan 2015).	15
Şekil 2.3. Basit bir ışık şiddeti modülasyonlu fiber optik sensör (Rajan 2015).....	16
Şekil 2.4. (a) İki fiberli yansıma tabanlı sensör (b) Sensörün karakteristik tepkisi (Rajan 2015).....	16
Şekil 2.5. İki farklı dielektrik ortam arasındaki düzlem sınırına eğik gelen düzlem dalgaların yansıması ve kırılması (Cheng 2009).....	18
Şekil 2.6. Düzlem sınırına eğik gelen ve elektrik alanı geliş düzlemine dik olan düzlem dalgaların yansıma ve kırılma katsayılarının elde edilmesi (ehm.kocaeli.edu.tr 2014). 20	
Şekil 2.7. Düzlem sınırına eğik gelen ve elektrik alanı geliş düzlemine paralel olan düzlem dalgaların yansıma ve kırılma katsayılarının elde edilmesi (ehm.kocaeli.edu.tr 2014).	23
Şekil 2.8. Elektrik geçirgenlikleri $\epsilon_1 > \epsilon_2$ olan ve manyetik geçirgenlikleri boş uzayın manyetik geçirgenliğine eşit olan ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$) iki farklı dielektrik ortam arasındaki düzlem sınırına kritik açı ile gelen düzlem dalgasının tam yansıması (Cheng 2009)...	26
Şekil 2.9. Fiber optik içerisinde tam yansımanın kullanılması.....	27
Şekil 2.10. Hava-fiber geçişinde ışığın geliş açısına bağlı yansıma yüzdesi grafiği. ...	30
Şekil 2.11. Fiber-hava geçişinde ışığın geliş açısına bağlı yansıma yüzdesi grafiği....	31
Şekil 2.12. Atmosferin hangi dalgaboylarını geçirdiğini gösteren şekil (NASA 2008)..	32
Şekil 2.13. Serbest uzay optik yayılım geometrisi (Safari 2010).....	33
Şekil 2.14. Merkezi limit teoremi (Yemenici 2014).	34
Şekil 2.15. Merkezi limit teoreminin gösterimine bir örnek (Pit-Claudel 2012).....	35

Şekil 2.16. Seri röleli haberleşme şeması (Safari ve Uysal 2008a).	38
Şekil 2.17. Paralel röleli haberleşme şeması (Basgumus ve ark. 2015).	39
Şekil 2.18. Kuvvetlendir ve aktar modelinin şematik gösterimi (Namdar 2014).	40
Şekil 2.19. Çöz ve aktar modelinin şematik gösterimi (İlhan 2011).	41
Şekil 2.20. DE algoritmasının şematik diyagramı (Kradikt.com 2014).	45
Şekil 2.21. Her bir birey bulunduğu pozisyonların bilgisini saklar (Kachitvichyanukul 2009).	46
Şekil 2.22. Her bir birey sürüdeki diğer üyelerden bilgi alır (Kachitvichyanukul 2009).	47
Şekil 2.23. <i>i.</i> parçacığın hız ve pozisyon değişimlerinin geometrik gösterimi (El-Sawy ve ark. 2013).	48
Şekil 2.24. Parçacık sürü optimizasyonu akış diyagramı (Özsağlam ve Çunkaş 2008).	49
Şekil 3.1. Nanosaniye atımlı lazer kaynak.	51
Şekil 3.2. Nanosaniye atımlı lazer kaynağın 50 ns darbe genişlikli atımı.	52
Şekil 3.3. Nanosaniye atımlı lazer kaynağın 80 kHz frekanslı atım treni.	52
Şekil 3.4. Optik lazer kaynağı, 6 ns bant genişliğine, 250 mA akım değerine ve 80 kHz frekansına ayarlandığında, görülen darbe şekli.	53
Şekil 3.5. Optik lazer kaynağı, 50 ns bant genişliğine, 250 mA akım değerine ve 80 kHz frekansına ayarlandığında, görülen darbe şekli.	53
Şekil 3.6. Agilent DSO-X 2002A dijital osiloskop.	54
Şekil 3.7. DC güç kaynağı.	55
Şekil 3.8. FİTEL S176CF model füzyon fiber ek cihazı.	55
Şekil 3.9. 2x4 fiber dağıtıcı.	56
Şekil 3.10. 5 GHz bant genişlikli InGaAs fotodedektör.	56
Şekil 3.11. Yansıma tabanlı fiber optik sensör dizisinin sistem modeli.	57
Şekil 3.12. Fresnel yansıma tabanlı fiber optik uzunluk ölçüm sisteminin deney düzeneği.	60
Şekil 3.13. Ana programın akış diyagramı.	68
Şekil 3.14. Optimum röle konumlarını bulan alt programın akış diyagramı.	69
Şekil 4.1. Ölçüm sistemine enjekte edilen 50 ns atımlı darbe.	70
Şekil 4.2. (a) 27.6 m standart SMF (b) 719 m LEAF SMF (c) 10005 m NZ-DSF için ölçüm sonuçları.	71
Şekil 4.3. Tüm problemler hava ortamında tutulurken zamanda ayrılmış şekilde yansıyan darbe dizisi.	73

Şekil 4.4. Sudaki tuz yoğunluğu ile kırılma indisi değişimi.	74
Şekil 4.5. Saf suyun kırılma indisi ile fiber optik sensör dizisinin kısa dönem kararlılığının 1550 nm dalgaboyunda test edilmesi.	77
Şekil 4.6. Metanolün kırılma indisi ile fiber optik sensör dizisinin uzun dönem kararlılığının 1550 nm dalgaboyunda test edilmesi.	78
Şekil 4.7. Seri röleli FSO haberleşme sistemlerinin farklı röle sayıları için optimum iletim mesafelerinin güç marjına bağlı değişimi.	79
Şekil 4.8. Paralel röleli FSO haberleşme sistemlerinin röleler tam ortada olduğunda iletim mesafelerinin güç marjına bağlı değişimi.	80
Şekil 4.9. Paralel röleli FSO haberleşme sistemlerinin farklı röle sayıları için optimum iletim mesafelerinin güç marjına bağlı değişimi.	81
Şekil 4.10. 40 iterasyon için maliyet fonksiyonu (Basgumus ve ark. 2015).	85
Şekil 4.11. Optimum iletim mesafesi ($d_{V,A}$) optimizasyonlarının 50 kere tekrar edilmesi (Basgumus ve ark. 2015).	86
Şekil 4.12. DE ve PSO algoritmalarının farklı röle sayılarındaki işlem süreleri (Basgumus ve ark. 2015).	86
Şekil 4.13. İterasyon sayısına bağlı olarak röle konumlarının değişimi (Basgumus ve ark. 2015).	87
Şekil 4.14. Optimum iletim mesafelerinin güç marjına bağlı değişimi (Basgumus ve ark. 2015).	88

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. Fiber optik iletişimin tarihçesi (Altuncu 2007).....	2
Çizelge 1.2. Fiber optik iletişimde günümüzde erişilen hızlar.....	4
Çizelge 4.1. Sudaki tuz yoğunluğu ile kırılma indisi değişiminin karşılaştırılması....	75
Çizelge 4.2. Farklı sıvıların kırılma indisi ölçümleri ve literatürde verilen ölçüm değerleri.....	76
Çizelge 4.3. Seri DF röleli FSO haberleşme sistemlerinde 1, 2, 3, 4 ve 5 röle için optimizasyon sonuçları.....	82
Çizelge 4.4. Paralel DF röleli FSO haberleşme sistemlerinde 2, 3, 4 ve 5 röle için optimizasyon sonuçları.....	83
Çizelge 4.5. Paralel DF röleli FSO haberleşme sistemlerinde 2, 3, 4 ve 5 röle için gerçekleştirilen optimizasyonların karşılaştırılması.....	89

1. GİRİŞ

Bilgi ve haberleşme teknolojilerinde son yıllarda yaşanan hızlı gelişmeler, 21. yüzyıldaki çoklu ortam kullanıcılarının ihtiyaçlarını karşılamada beklentilerin üzerindedir. Günümüz haberleşme teknolojisindeki yüksek veri hızı talebi ağırlıklı olarak optik haberleşme sistemleriyle karşılanmaktadır.

Optik haberleşme sistemlerine ilgi, lazerin 1960'larda bulunmasıyla artmaya başlamıştır. Bu sistemler, mikrodalga ve diğer elektriksel sistemlere göre daha fazla bilgi gönderebilmektedir. Araştırmacılar bu avantajı optik fiberlerde de denemişler ve ışığın iletiminde cam fiberler kullanılmaya başlanmıştır (Durak 2012). Dolayısıyla, optik haberleşme sistemleri fiber optik ve serbest uzay optik (Free-Space Optical-FSO) haberleşme olarak ikiye ayrılmıştır.

1.1 Fiber Optik Haberleşme

Serbest uzay optik haberleşmelerde atmosferik çalkantı ve ışık demetinin önüne geçebilecek engeller sebebiyle uzak mesafelerle güvenilir bir şekilde iletişim kurmak mümkün değildir. Bu iletişimi gerçekleştirebilmek için lazer ışığı bilgiyi taşıyacak şekilde modüle edildikten sonra lazer demetinin bozulmasını en az seviyeye indirerek aktarılmasını sağlayan bir ortam gereklidir. Fiber optik kablolar bu görevi yerine getirmektedirler. Fiberin üretildiği malzeme o kadar saftır ki doğru dalgaboyunda çalışan lazer ışığı, fiber optik kablolar tarafından güçlendirmeye gerek duyulmadan 200 kilometreyi aşan mesafelere iletebilmektedir. Fiber optik kablolar bakır kablolarla göre daha uzak mesafelere ve daha büyük bant genişlikleriyle bilgi taşıyabilmektedirler.

Fiber optik iletişimin kısa bir tarihçesi kronolojik sıraya göre Çizelge 1.1 ve 1.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1. Fiber optik iletişimin tarihçesi (Altuncu 2007)

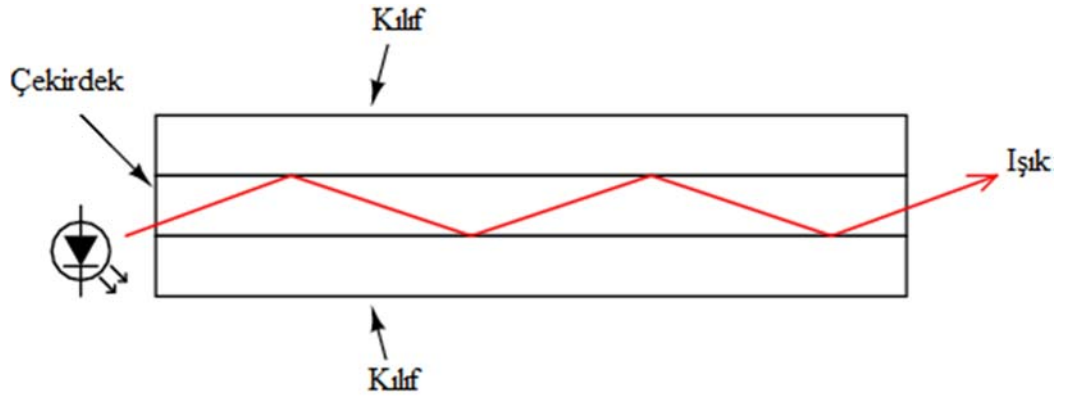
1880	A.Graham BELL tarafından Fotofon ile 200 metrelik haberleşme sağlanması
1887	Charls Vernen Boys ilk ince cam fiberi (kaplamasız) gerçekleştirdi.
1950	Direkt görüntü iletiminde cam fiber kullanılması
1958	Lazerin bulunması
1959	Lazerin başarıyla çalıştırılması
1962	Yarı iletken lazerlerin geliştirilmesi
1962	Yarı iletken fotodiyotların geliştirilmesi
1963	Dereceli indisli fiber düşüncesinin ortaya atılması
1966	Cam fiber kullanma düşüncesinin ortaya atılması
1966	Fiberde örtü tabakası düşüncesinin ortaya atılması
1970	Silikadan fiber üretilmesi (850 nm penceresinde 20 dB/km zayıflama)
1971	Kullanışlı lazer diyot (Laser Diode-LD) ve ışık yayan diyotların (Light Emitting Diode-LED) bulunması
1972	Dereceli indisli fiber üretilmesi (850 nm penceresinde 4 dB/km zayıflama)
1973	Optik kabloların askeri haberleşmede kullanılması
1973	Optik tekrarlayıcıların geliştirilmesi
1973	Kimyasal buharla biriktirme (Chemical Vapour Deposition-CVD) işlemiyle fiber üretimi
1973	Fiber üretiminde dışarıdan buharla biriktirme (Outside Vapour Deposition-OVD) tekniğinin açıklanması
1974	Fiber üretiminde uyarlanmış kimyasal buhar takviyesi (Modified Chemical Vapour Deposition- MCVD) metodunun (cam tüpün içine silikon yerleştirilmesi) açıklanması (2.4 dB/km zayıflama)
1975	1310 nm optik penceresinin bulunması
1976	1310 nm ışık dalgaboyunda InGaAsP lazer diyotun üretimi
1976	Ark (Füzyon) tekniğiyle fiber kaynağının gerçekleştirilmesi
1976	45 Mb/s'lik çoğullama sisteminin denenmesi
1976	Fiber üretiminde buhar fazında aksenal depolama (Vapour Axial Deposition-VAD) tekniğinin açıklanması

1978	İlk çok modlu fiber kablo tesisinin kurulması
1979	1550 nm dalgaboyundaki fiber zayıflamasının 4 dB/km 'den 0.2 dB/km 'ye indirilmesi
1980	1550 nm dalgaboyunda çalışan InGaAsP lazer diyotun üretimi
1980	1310 nm dalgaboyundaki ilk ticari sistemin tesis edilmesi
1981	Dereceli indisli fiber kabloların kullanılması
1981	100 Mb/s hızda tekrarlayıcı aralığının 10 km 'ye çıkması
1983	VAD tekniğiyle tek modlu fiber kablo üretiminin başlaması
1983	400 Mb/s hızda 25 km 'lik tekrarlayıcı aralığının sağlanması
1984	Optik fiber sistemlerinin abone göz devrelerine (Synchronous Optical Network-SONET) uygulanması
1984	Derin sulara gömülecek denizaltı fiber kablolar için morötesi (Ultraviolet-UV) reçinenin geliştirilmesi
1985	100 damarlı dereceli indisli fiber kullanılması
1987	1550 nm dalgaboyunda dispersiyonu kaydırılmış fiber (Dispersion Shifted Fiber-DSF) kullanılması
1987	VAD metoduyla 500 km uzunluğunda tek parça fiber üretilmesi
1988	1.6 Gb/s çoğullama sistemiyle (23040 kanal), tekrarlayıcı aralığının 40 km 'ye çıkması
1989	1550 nm dalgaboyunda 400 Mb/s 'lik hızda çoğullama ve tekrarlayıcı aralığının 120 km 'ye çıkması
1990	400 km 'lik tekrarlayıcısız fiber optik linkinin kurulumu
1991	2.5 Gb/s 'lik çoğullama ile 30720 kanala erişme (STM-16)
1995	2.5 Gb/s 'lik hızla 100 km iletim mesafesi
1996	10 Gb/s 'lik hızla 80 km iletim mesafesi (STM-64)
1997	40 Gb/s 'lik hızla 300 km iletim mesafesi (STM-256)
2000	Tek fiber üzerinden Tb/s iletim hızlarına ulaşılması
2002	2.56 Tb/s kapasiteli 250,000 km 'lik kıtalararası denizaltı fiber optik iletişim hattının tamamlanması

Çizelge 1.2. Fiberoptik iletişimde günümüzde erişilen hızlar

Kuruluş	Etkin Hız	Dalgaboyu bölmeli çoğullama (Wavelength Division Multiplexing-WDM) kanalları	Kanal Başına Hız	Mesafe (km)
Alcatel-Lucent (Alcatel-Lucent 2009)	15 Tb/s	155	100 Gb/s	90
NTT (NTT-2010)	69.1 Tb/s	432	171 Gb/s	240
KIT (Palmer 2011)	26 Tb/s	1	26 Tb/s	50
NEC (Hecht 2011)	101 Tb/s	370	273 Gb/s	165
NEC, Corning (Peach 2013)	1.05 Pb/s	12 çekirdekli		52.4

Fiber optik kabloların çekirdek ve kılıf bölümleri iki farklı malzemeden yapılmıştır. Çekirdeğin kırılma indisi kılıfın kırılma indisinden biraz daha büyüktür. Toplam iç yansımaların gerçekleşmesi için kılıfın kırılma indisi çekirdekten en az %1 oranında az olmalıdır. Bu küçük kırılma indisi farkı Şekil 1.1'de görüldüğü gibi ışığın çekirdeğin içinde kalarak yol almasını sağlar (Billings ve Tabak 2011).

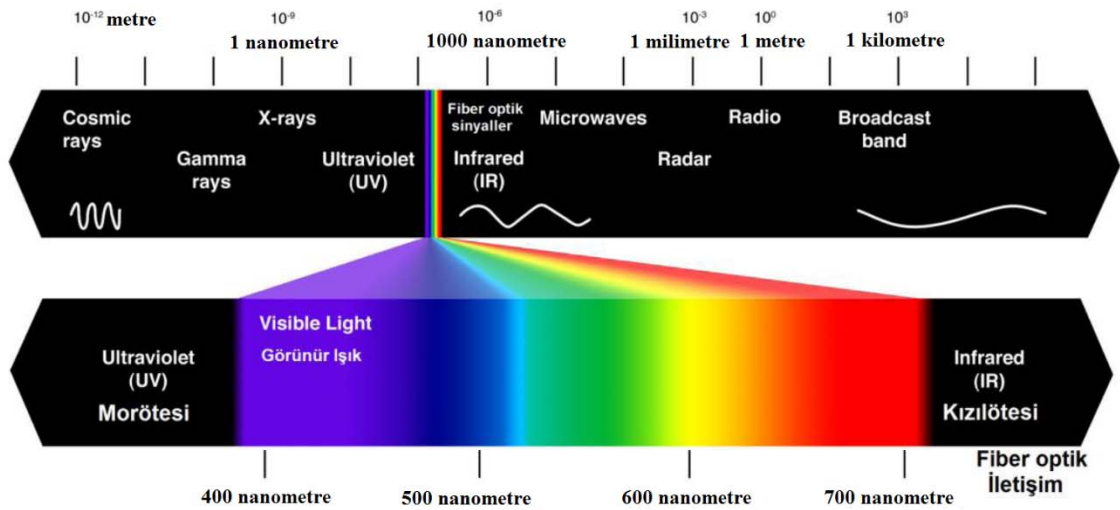


Şekil 1.1. Işık demetinin fiber optik kablo içerisinde ilerlemesi.

Fiberler tek modlu (SMF) ve çok modlu (MMF) olmak üzere ikiye ayrılırlar. Tek modlu fiberlerin çekirdekleri 8 – 9 *mikron* çapındadır ve sadece bir mod iletebilirler. Tek modlu fiberler, 1310–1550 *nm* dalgaboyu aralığında çalışan lazer kaynak kullanırlar ve çok uzak mesafelere çok yüksek hızda bilgi taşıyabilirler. Çok modlu fiberler ise 50 veya 62.5 *mikron* çapında çekirdeğe sahiptirler. 850–1300 *nm* dalgaboyu aralığında çalışan lazer kaynak veya ışık yayan diyot (Light Emitting Diode-LED) kullanırlar. Kısa mesafelerde ve düşük hızlarda iletim sağlayabilirler.

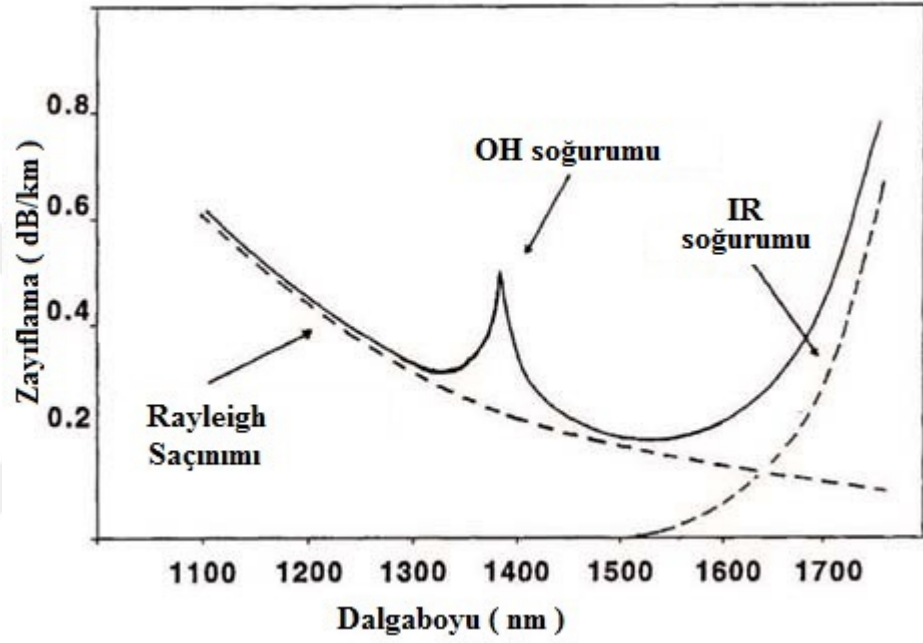
Yüksek performanslı bir fiber optik kablonun çekirdeği, ultra saf silisyum dioksit (silika) yapıda cam bir çekirdekten oluşur. Hem çekirdek hem de kılıfı plastik olan düşük performanslı plastik fiber optik kabloların çekirdeği genellikle 1 *mm* olup sadece kısa mesafe iletişimi için uygundur (FOA 2014).

Fiber optik haberleşme sistemlerinin çalıştığı optik dalgaboyu aralığı, Şekil 1.2'de gösterilmektedir. Görünür ışık dalgaboyu 400–700 *nm* aralığındayken fiber optik haberleşme sistemlerinin aralığı 600–1600 *nm* arasındadır. Yani, fiber optik haberleşmede yakın kızılötesi (near-IR) dalgaboylu bölgedeki ışınlar kullanılmaktadır.

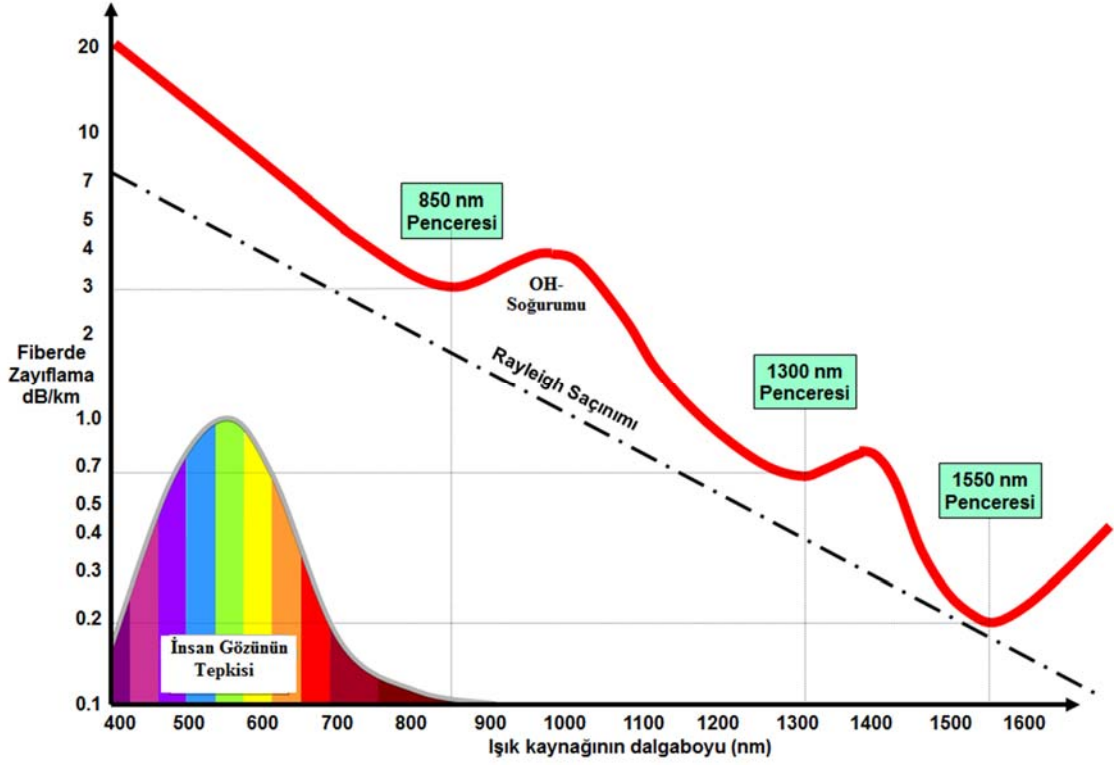


Şekil 1.2. Fiber optik haberleşmenin optik spektrumdaki yeri (MEB 2013).

Fiber optik iletişim performansını sınırlayan temel faktörlerden birisi zayıflama dır. Zayıflama, fiberde iletilen optik güçte meydana gelen kayıp demektir. Bir fiber optik kablonun zayıflama katsayısı dB/km cinsinden verilmektedir. Optik fiberlerde zayıflamanın iki temel sebebi soğurum ve saçınım kayıplarıdır. Şekil 1.3 ve 1.4'te optik fiberlerde zayıflamanın dalgaboyuna bağlı değişimini gösterilmektedir.

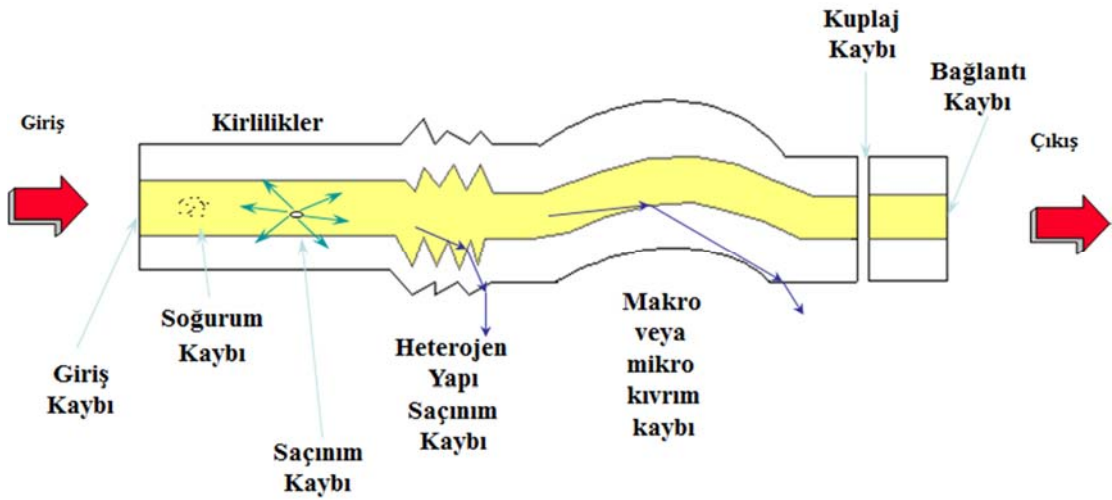


Şekil 1.3. Fiber optik kablolarda oluşan soğurum ve saçınım kayıpları (Amundsen ve Landrø 2009).



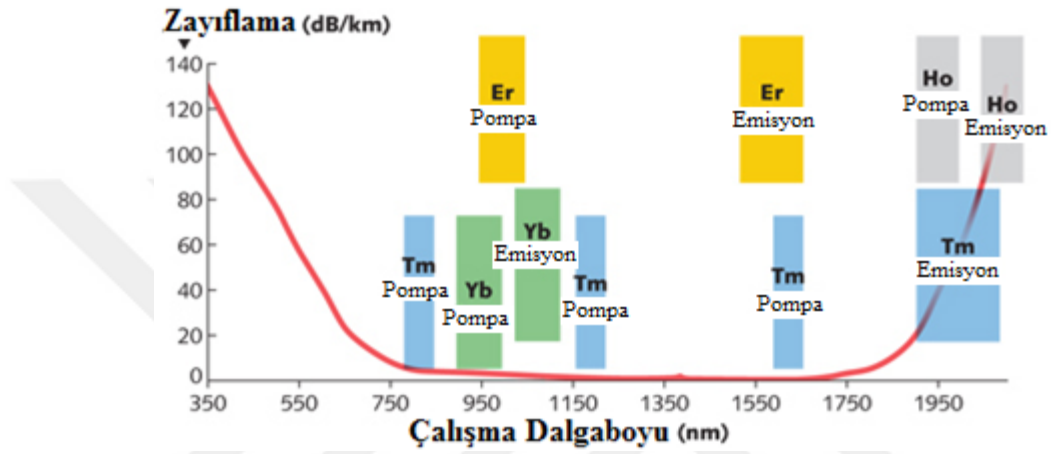
Şekil 1.4. Fiber optik kablolarda 400–1600 nm dalgaboyu aralığında oluşan zayıflama (Mutlu 2005).

Fiber optik iletimde soğurum ve saçınımın dışında etkilerden oluşan kayıplar da vardır. Fiber optik haberleşme iletiminde oluşabilecek muhtemel kayıplar Şekil 1.5'te şematize edilmiştir.



Şekil 1.5. Optik fiberde ışık iletiminde oluşan çeşitli kayıp bileşenleri (Altuncu 2007).

Silika yapıdaki fiberlerin farklı nadir toprak elementler ile (iterbiyum, erbiyum, tulyum ve holmiyum) katkılanmasıyla oluşan ve günümüz teknolojisi ile üretilen fiber lazerlerinin pompa ve emisyon dalgaboyları Şekil 1.6'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere pompalama dalgaboyu çalışma dalgaboyundan daha kısadır (Bufetov ve ark. 2013, Carter ve ark. 2009, Jiang 2013, Hemming ve ark. 2013).



Şekil 1.6. Dalgaboyuna bağlı silikanın zayıflaması ve fiber lazer pompa ve emisyon bantları (Hecht 2014).

Fiber optik haberleşme sistemleri elektriksel izolasyon, elektromanyetik bağımsızlık, düşük kayıp, yüksek bant genişliği gibi üstün özelliklere sahiptirler. Ayrıca, fiber optik kabloların gizlilik ve güvenlik seviyesi çok yüksektir.

1.1.1 Yansıma Tabanlı Fiber Optik Sensörler

Fiber optik sistemler günümüzde, haberleşme amaçlı kullanıldığı kadar sensör teknolojilerinde de önemli bir uygulama alanına sahiptir. Fiber optik sensörler hızlı tepki verme, yüksek duyarlılık, elektriksel izolasyon, uzaktan algılamada düşük sinyal kaybı, küçük ebatlı olma gibi avantajları nedeniyle klasik sensörlere göre ön plana çıkmaktadırlar.

Geniş alanlara sahip depo, boru hattı gibi endüstriyel ve patlayıcı yapılarda gaz ölçümleri yapmak için günümüzde kullanılan birçok klasik sensör tipi yeterli olmamaktadır. Geniş bir alan içerisinde meydana gelen gaz kaçaqlarını tespit etmek, hızlı ve doğru gaz ölçümleri yapabilmek için fiber optik sensör kullanılması, sağladığı elektriksel izolasyon, elektromanyetik bağışıklık ve düşük iletim kaybı sayesinde uzaktan kumanda edebilme vb. gibi avantajlar ile gerekli hale gelmektedir.

Malzemelerin karakteristik özelliklerinden biri olan kırılma indisinin doğru olarak ölçülmesi, araştırmacıların yoğun ilgi gösterdiği konulardandır. Kırılma indisini ölçebilen sensör sistemleri; gıda kontrol analizlerinde, çevre kirlilik ölçümlerinde, biyokimyasal deneylerde ve biyomedikal uygulamalarda tercih edilmektedir (Singh 2002). Bu sensörler arasında, düşük tepkime süresine sahip olan, elektromanyetik dalgalardan etkilenmeyen ve yüksek hassasiyet sağlayan fiber optik tabanlı sistemler yoğun olarak kullanılmaktadır (Yasin ve ark. 2012).

Abbe refraktometresi, sıvıların kırılma indisi ölçümlerinde sıklıkla tercih edilen bir metottur (Rheims ve ark. 1997). Bir diğer usül ise Fresnel yansıma tabanlı fiber optik sistemlerle ölçüm yapmaktır (Chang ve ark. 2002, Kim ve Su 2004, Zhao ve ark. 2010, Durak ve ark. 2011). Kim ve Su (2004) araştırmalarında, fiberin uç kısmından geri dönen Fresnel yansımasının güç oranını ölçerek sıvıların kırılma indisini hesaplayan ve 1310 nm ile 1551 nm dalgaboylarında çalışan bir ölçüm düzeneği kullanmışlardır. Xu ve ark. (2013) çalışmalarında, optik anahtarlama bir fiber optik kırılma indis sensörü tasarlamışlar ve optik anahtarı kontrol ederek sırasıyla hava ve sıvıdan yansıyan sinyalin güç değerlerini ölçmüşlerdir. Diğer bir araştırmada, kırılma indisini uzaktan ölçmek için optik zaman eksenli yansıma ölçme (OTDR) tekniği kullanılmıştır (Yuan ve ark. 2014). Diğer bir ölçüm yönteminde ise dizi dalga kılavuzu ızgarası tabanlı optik refraktometre kullanılmıştır (Wu ve ark. 2007, Zhao ve ark. 2013). Her bir kanalında farklı bir sensör başlığı içeren bu sistem, çoklu nokta ölçümlerinde kullanılabilir. Monzon-Hernandez ve Villatoro (2006) ise optik sinyalin dalgaboyundaki kayma yardımıyla ölçüm yapan yüzey plazma rezonans kırılma indisi sensörü gerçekleştirmişlerdir.

1.2. Serbest Uzay Optik (Free Space Optical-FSO) Haberleşme

Serbest uzay optik haberleşme sistemlerinde lazer vericilerle üretilen optik sinyaller, verici ve alıcı arasındaki görüş hattında ve 850–1550 nm dalga boylarında kablosuz olarak iletilmektedirler. Serbest uzay optik haberleşme teknolojisi, yüksek bant genişliği kapasiteli hava/uzay haberleşmelerinde önemli bir uygulama alanına sahiptir. FSO haberleşme sistemleri sayesinde, saniyede çoklu gigabit katı (*multi Gb/s*) hızlara kablosuz olarak ulaşılmaktadır.

FSO haberleşme, radyo frekanslı (Radio Frequency-RF) kablosuz haberleşme teknolojisine göre önemli avantajlara sahiptir. Yüksek veri hızı, düşük güç ihtiyacı, düşük yakalama olasılığı (probability of intercept) ve küçük boyutları bunların başlıcalarıdır. Ayrıca, radyo frekanslarını kullanmadığı için lisans gerektirmez.

İnternet ve çoklu ortam servislerinin hızla büyüyen kullanımı telekomünikasyon ağlarında yoğunluk, hatta tıkanıklık meydana getirmekte ve taşıyıcılar üzerine birçok yeni ihtiyaçları da yerleştirmektedir. Lazer vericiler, istenilen ağ fonksiyonlarını son derece yüksek bant genişliği ile yerine getirmesi dolayısıyla bu açıdan orta, düşük risk grubundadır. Özellikle fiber optik kabloların tesis maliyetinin yüksek olduğu yoğun nüfuslu şehirlerde kablosuz gerçekleştirilen FSO iletimi, yerel alan ağlarına (Local Area Network-LAN) ve metropol alan ağlarına (Metropolitan Area Network-MAN) göre önemli bir avantaja sahiptir.

Günümüz teknolojileri % 99.999 oranında hizmet ihtiyacına cevap vermektedir, yani bir yılda sadece 5 dakika servis dışı kalmaktadır. Birçok şirketin bu servisten faydalanabilmesi için kendi veri ağlarını kurması gerekmektedir. Fakat yüksek veri hızının uç kullanıcılara kadar ulaşabilmesi özellikle büyük iş merkezlerinde fiber hattı çekebilmenin zorluğu ve maliyeti yüzünden kolay değildir. Bu dezavantajlarından dolayı, fiber optik tabanlı sistemler yerine FSO haberleşme sistemlerinin kullanımı metropollerde hızla artmaktadır.

Özetle son çeyrek yüzyılda, FSO haberleşme sistemleri hem radyo frekanslı iletme hem de fiber optik haberleşmeye bir yardımcı ya da alternatif olarak cazip hale gelmiştir. FSO haberleşme yüksek bant genişliği kapasitesi, lisanssız spektrum, elektromanyetik girişim bağışıklığı ve montaj kolaylığı gibi birçok avantajlara sahiptir. Ayrıca iletimde bilginin dar bir saçılma açısına sahip ışık demeti halinde gönderilmesi nedeni ile dış kaynaklar tarafından engellenmesi ya da bilgi sızdırılması güçleşmektedir. Bundan dolayı gizlilik isteyen bilgilerin aktarımında da kullanılmaktadır.

Bütün bu avantajlara rağmen, haberleşme kanalı olan atmosferin yapı karakteristiklerinin ve iklim olaylarının sistem üzerindeki bozucu etkisini tarif eden atmosferik çalkantı (atmospheric turbulence), 1 km'den daha uzun iletimlerde önemli bir performans sınırlayıcı faktör haline gelir (Majumdar ve Ricklin 2008).

Sıcaklık, basınç ve nem farklılıklarındaki değişim atmosferin kırınım indeksini etkiler. Zaman ve uzay boyutunda gerçekleşen bu tesadüfi süreç atmosferik çalkantıyı meydana getirir.

Atmosferik çalkantı sebebiyle FSO haberleşme sisteminin sınırlanması, önemli bir araştırma alanı meydana getirmiştir. Djordjevic ve ark. (2008), kodlu çok-girişli çok-çıkışlı (Multiple-input Multiple-output-MIMO) sistemler için farklı teknikler önermişlerdir. Çalışmalarında düşük yoğunluklu parite kontrol (Low-density Parity Check-LDPC) kodlu ve dört fotodedektörlü MIMO konfigürasyonu kullanarak tek-girişli tek-çıkışlı (Single-input Single-output-SISO) sisteme göre 10^{-6} bit hata oranında (Bit Error Rate-BER) yaklaşık 20 dB iyileştirme elde etmişlerdir.

Tsiftsis ve ark. (2009) tarafından FSO haberleşme sistemlerinde BER performansı açısından anten çeşitliliğinin avantajları göz önüne alınmıştır. Çalışmalarının sonucunda üç vericiye sahip olan çok-girişli tek-çıkışlı (Multiple-input Single-output-MISO) sistemin SISO'ya oranla 10^{-9} BER için 110 dB iyileştirme sağladığı tespit edilmiştir.

Bir diğerk çalışmada ise MIMO FSO sistemlerinde dizi tespiti (sequence detection) teknikleri araştırılmış, beklentiyi maksimumlaştırma algoritması (Expectation Maximization Algorithm-EMA) tabanlı dizi tespitinin en büyük benzerlikli dizi algılaması (Maximum Likelihood Sequence Detection-MLSD) yöntemine oranla 10^{-4} BER için 0.3 dB daha iyi performans gösterdiği hesaplanmıştır (Chatzidiamantis ve ark. 2010).

Son zamanlarda yapılan çalışmalar, atmosferik çalkantı sönümlemesini azaltmak için güçlü bir teknik olan röle destekli (Relay-assisted) FSO haberleşme sistemleri üzerine yoğunlaşmıştır (Safari ve Uysal 2008a, Karimi ve Nasiri-Kenari 2009, 2010, 2011, Kashani ve ark. 2013, Kashani ve Uysal 2013).

Röle destekli FSO kavramı ilk kez Acampora ve Krishnamurty (1999) tarafından ortaya konulmuştur. Daha sonra röle destekli FSO kavramının kapsamı genişletilmiştir. Kashani ve ark. (2013) farklı sayıda röleler içeren seri ve paralel çöz-ve-aktar (Decode and Forward-DF) röleleme için kesinti olasılığı (outage probability) performansı ve çeşitleme analizi üzerine çalıştılar. Kashani ve Uysal (2013) bu çalışmayı çok atlamalı (multi-hop) paralel röleleme şemalarıyla geliştirdiler.

Yu ve ark. (2014) optik kuvvetlendiriciler kullanarak simülasyonlar yardımıyla orta-kısa mesafe FSO haberleşmesi üzerine teorik araştırma yaptılar.

Tez çalışmasının amacı; *sıvılarda kırılma indisi ölçümü için Fresnel yansıma tabanlı özgün bir fiber optik sensör dizisi tasarlamaktır*. Sensör sistemi tümüyle fiber optik tabanlı olduğu için fiber optik sistemlerin sahip olduğu elektriksel izolasyon, elektromanyetik bağışıklık ve düşük iletim kaybı gibi önemli özelliklerini avantaj olarak kullanarak uzaktan algılama yapma yeteneğine sahiptir. Geliştirilen fiber optik Fresnel yansıma tabanlı sensör dizisi 4 farklı sensör başlığından meydana gelmektedir. Bir sonraki çalışmada, fiber optik sensör başlıkları farklı gazları algılayıcı kaplama malzemeleriyle kaplanılırsa, bu sayede kompozit gazların algılanması ve ayrıştırılması da mümkün olabilecektir. Uygulama çalışmalarında Dumlupınar Üniversitesi Fotonik Araştırma Laboratuvarında bulunan aktif ve pasif fiber optik malzemeler ile Dumlupınar Üniversitesi destekli 2014-04 numaralı Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında temin edilen fiber optik elemanlar kullanılmıştır.

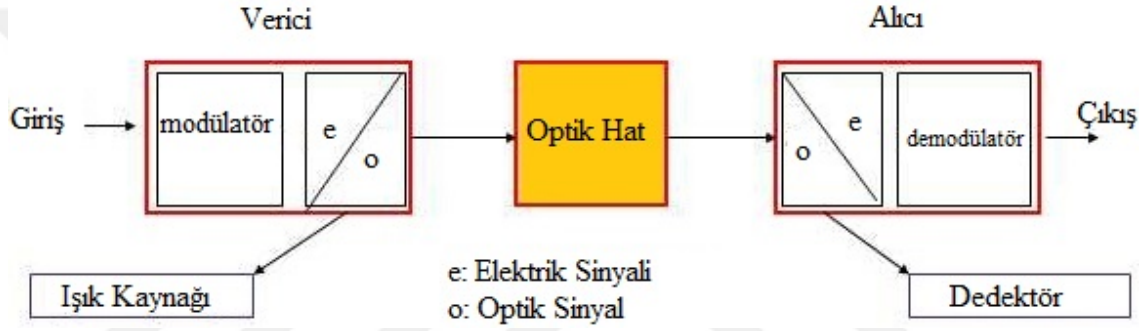
Fiber optik sensör dizisini gerçekleyebilmek için, optik fiberlerde iletim mesafesi performans analizi uygulamalı olarak çalışılmıştır. Fresnel yansıma tabanlı fiber optik sensör sisteminden alınan veriler, uzak alıcılara bir röle destekli serbest uzay optik (FSO) haberleşme sistemi üzerinden iletilebilir. Bu amaçla, *FSO haberleşme sisteminin iletim mesafesi performans analizi ayrıca çalışılmış ve bilindiği kadarıyla literatürde yeteri kadar analiz edilmeyen röle destekli FSO haberleşme sistemlerinde seri ve paralel röleleme için optimum iletim uzaklıkları hesaplanmıştır*. Bu amaçla Matlab™ tabanlı yazılım ile optimum iletim problemine adapte edilen diferansiyel gelişim algoritması (Differential Evolution Algorithm-DEA) yardımıyla seri ve paralel çöz ve aktar rölelemelerde kabul edilebilir bir kesinti olasılığı olan 10^{-6} için toplam iletim mesafeleri ve her bir röle konumu optimize edilmiştir.

Bu çalışmaların sonucunda tez kapsamında yayınlanan iki uluslararası SCI makale (*IEEE Photonics Technology Letters* ve *Advances in Electrical and Computer Engineering*), bir ulusal makale (*Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*), bir ulusal bildiri (*IEEE 22. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU)*) ve bir ulusal özetli bildiri (*17. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı*) olmak üzere toplam 5 adet akademik yayın çalışması gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca, *Dumlupınar Üniversitesi destekli 2014-04 numaralı bilimsel araştırma projesi (BAP)*, başarıyla tamamlanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

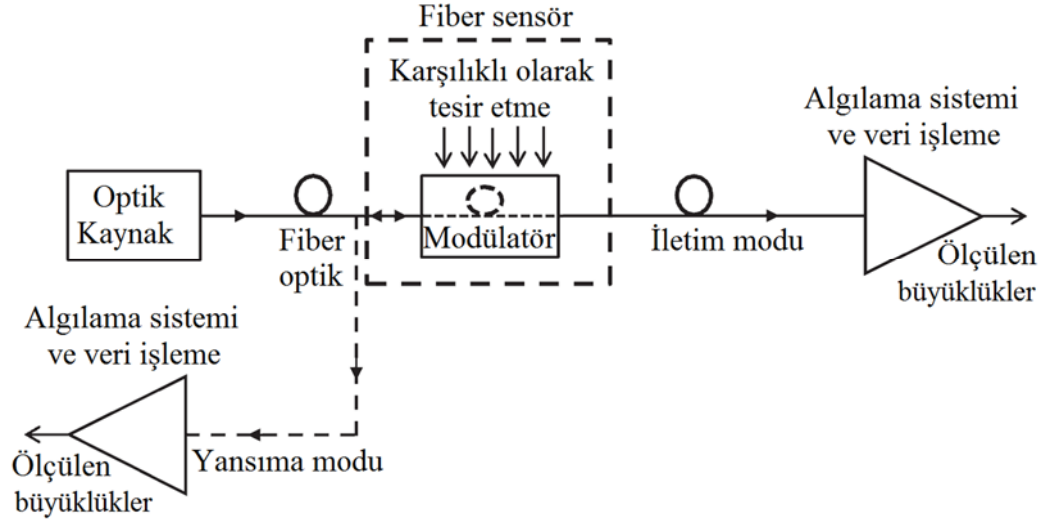
Bir optik haberleşme sisteminin blok diyagramı Şekil 2.1’de gösterilmektedir. Kaynakta üretilen ve bilgi içeren dalga şekilleri vericinin modülatöründe kodlandıktan sonra optik taşıyıcıların üzerine bindirilir. Üretilen optik sinyal uzak bir alıcıya doğru kablolu veya kablosuz bir optik hat (atmosfer veya fiber optik) üzerinden yayılır. Bu optik sinyaller alıcıda alınır ve bir fotodedektör vasıtasıyla elektriksel sinyale dönüştürülür. Alıcı içerisindeki demodülatör, elektriksel sinyalden iletilen veriyi kestirerek çıkışa aktarır. (Gagliardi ve Karp 1995)



Şekil 2.1. Bir optik haberleşme sisteminin blok diyagramı (Emtekno 2015).

2.1. Fiber Optik Sensörler

Serbest uzay optik haberleşme sistemlerinde, iletilen sinyalin bozulmadan ve en az güç kaybıyla alıcıya ulaşması üzerine çalışılmaktadır. Fiber optik sensör sistemlerinde ise ölçülmek istenen fiziksel büyüklüğün optik sinyal üzerinde değişiklik yaparak, yüksek duyarlılık ve doğrulukla ölçülmesi ve ölçüm bilgisinin uzak mesafelere aktarılması istenmektedir. Ölçülen fiziksel, kimyasal veya biyolojik büyüklükler (basınç, sıcaklık, kuvvet ve *pH* gibi) fiber optik içerisindeki ışık ile karşılıklı olarak birbirlerine tesir ederek ölçüm parametrelerine âit bilgileri taşıyan modüleli optik sinyal üretmektedirler. Bir fiber optik algılama sisteminin temel modeli Şekil 2.2’de gösterilmektedir. Fiber optik sensörler çalışma prensibine bağlı olarak, iletilen veya yansıyan sinyali kullanmaktadırlar.

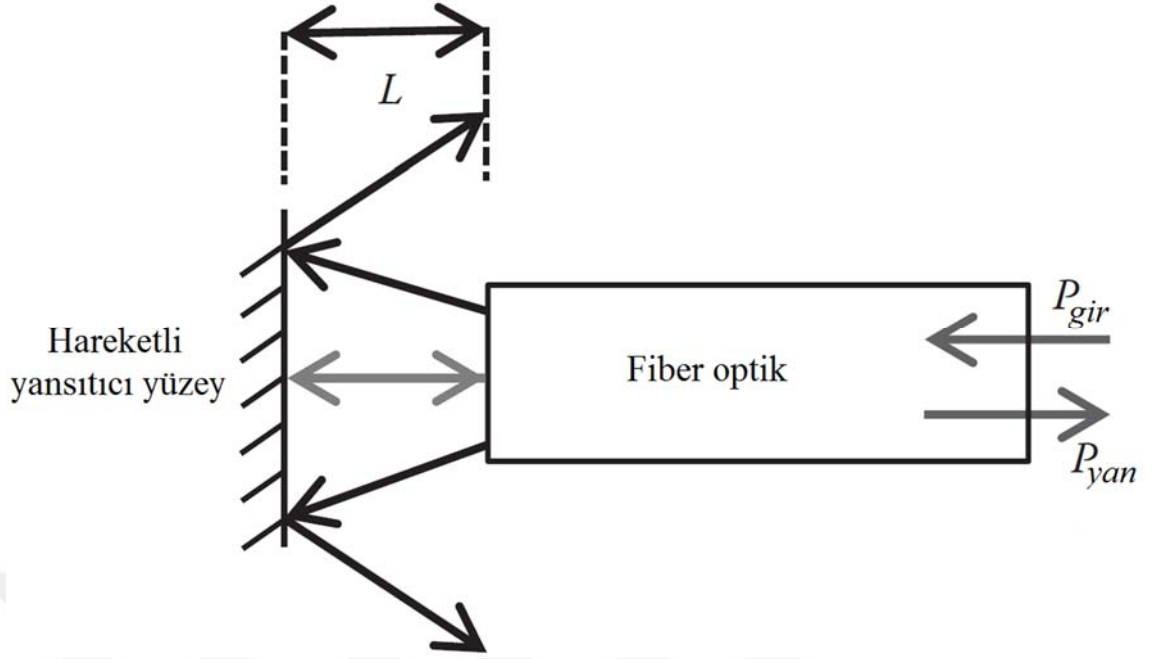


Şekil 2.2. Bir fiber optik sensör sisteminin genel şeması (Rajan 2015).

Fiber optik sensörler çalışma prensibine göre dört gruba ayrılmaktadırlar: ışık şiddeti (yoğunluk) modülasyonlu (intensity modulated), faz modülasyonlu - interferometrik (phase modulated - interferometric), polarizasyon modülasyonlu - polarimetrik (polarization modulated - polarimetric) ve dalgaboyu modülasyonlu – spektrometrik (wavelength modulated - spectrometric) fiber optik sensörler. Faz, polarizasyon ve dalgaboyu modülasyonlu sensörler daha hassastır fakat daha yüksek maliyetlidirler; karmaşık donanım ve sinyal işleme teknikleri gerektirirler. Işık şiddeti modülasyonlu fiber optik sensörlerin yapımı ise basittir ve daha ekonomiktirler (Efendioğlu 2014).

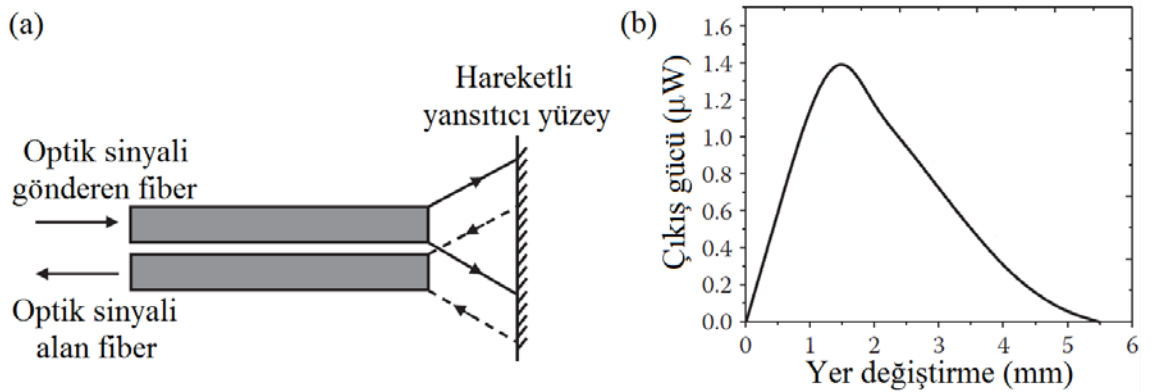
2.1.1 Işık Şiddeti Modülasyonlu Fiber Optik Sensörler (IM-FOS)

Işık şiddeti modülasyonlu fiber optik sensörler, ilk kullanılan ve en basit fiber optik sensör çeşitlerindedir. Fiber optik içerisinde yol alan optik sinyalin ışık yoğunluğu; bükülme, ezilme, yansımaya veya optik sinyalin iletim ortamını değiştirme gibi çeşitli yollarla modüle edilebilmektedir. Bu tip sensörlerin kolay uygulanabilir olması, basit algılayıcı sistemlere ve basit veri işleme tekniklerine ihtiyaç duyması ve düşük maliyet performansı ve sensör dizisi haline getirilebilir olması gibi önemli avantajları vardır. Sadece bir optik fiber kullanarak mesafe, basınç gibi faktörleri ölçebilen bir yansımaya tabanlı IM-FOS Şekil 2.3'te gösterilmektedir. Şekilde L hareketli yansıtıcı yüzeyin optik fiberden uzaklığını, P_{gir} kaynaktan gelen optik sinyal gücünü ve P_{yan} hareketli yüzeyden yansıyan sinyal gücünü tanımlamaktadır.



Şekil 2.3. Basit bir ışık şiddeti modülasyonlu fiber optik sensör (Rajan 2015).

Çeşitli uygulamalarda yakınlık sensörü olarak iki fiberli yansıma sensörleri daha sık kullanılmaktadır. Bu durumda optik sinyali yansıtıcı yüzeye gönderen fiber verici, yansıyan optik sinyalleri toplayan diğer fiber ise alıcı konumundadır. İki fiberli sensörün yapısı ve hareketli yüzeyin mesafesine bağlı çıkış gücü karakteristiği Şekil 2.4'te verilmektedir.



Şekil 2.4. (a) İki fiberli yansıma tabanlı sensör (b) Sensörün karakteristik tepkisi (Rajan 2015).

İki fiberli yansıma tabanlı IM-FOS'un modülasyon fonksiyonu (Zhao ve ark. 1994):

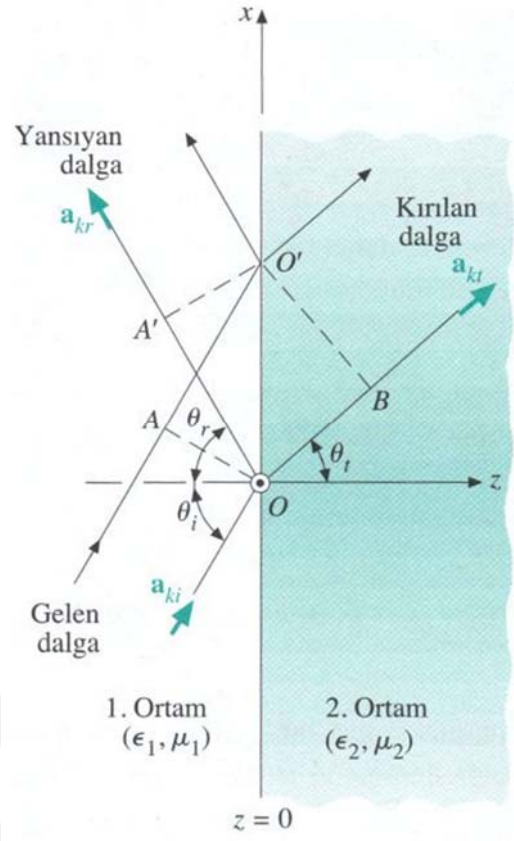
$$M_s = \frac{\Phi_{RS}}{\Phi_E} = \frac{S_R \cos^4 \theta}{\pi (2hNA)^2} \quad (2.1)$$

ile bulunmaktadır. Burada Φ_{RS} optik sinyali algılayan fiberin yüzeyinde toplanan foton akı yoğunluğu, Φ_E optik sinyali gönderen fiberin çıkış yüzeyindeki foton akı yoğunluğu, S_R optik sinyali algılayan fiberin toplayıcı yüzey alanı, θ sinyali gönderen fiberin sanal görüntüsünün merkezi ile algılayıcı fiberin merkezini birleştiren hat ile algılayıcı fiberin kablo eksenini arasındaki açı, h Planck sabiti ($6.62 \times 10^{-34} \text{ Ws}^2$) ve NA ise fiberin nümerik açıklığıdır.

2.2. Düzlem Dalgaların Yansıması ve Kırılması

İki farklı dielektrik (iletken olmayan) ortam ($\sigma_1, \sigma_2 = 0$) arasındaki düzlem sınırının normal vektörüne θ_i açısı ile eğik gelen bir düzlem dalga, θ_r açısı ile yansır ve θ_t açısı ile kırılır. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi $z=0$ düzlemi, (ϵ_1, μ_1) elektrik ve manyetik geçirgenliğine sahip birinci ortam ile (ϵ_2, μ_2) elektrik ve manyetik geçirgenliğine sahip ikinci ortam arasında bir arayüz oluşturmaktadır. \mathbf{a}_{ki} , \mathbf{a}_{kr} ve \mathbf{a}_{kt} , gelen, yansıyan ve kırılan dalgaların yayılma yönünü gösteren vektörlerdir. Gelen ve yansıyan dalga birinci ortamda aynı faz hızıyla yayıldığı için geliş açısı yansıma açısına eşittir. (2.2) denklemi Snell yansıma yasasını göstermektedir.

$$\theta_r = \theta_i \quad (2.2)$$



Şekil 2.5. İki farklı dielektrik ortam arasındaki düzlem sınırına eğik gelen düzlem dalgaların yansıması ve kırılması (Cheng 2009).

Kırılan dalganın OB arasındaki yolu katetmesi için geçen zaman, gelen dalganın AO' arasındaki yolda geçirdiği zamana eşittir. Eğer birinci ve ikinci ortamdaki faz hızlarına u_{p1} ve u_{p2} dersek (Cheng 2009):

$$\frac{\overline{OB}}{u_{p2}} = \frac{\overline{AO'}}{u_{p1}} \quad (2.3)$$

$$\frac{\overline{OB}}{\overline{AO'}} = \frac{\overline{OO'} \sin \theta_t}{\overline{OO'} \sin \theta_i} = \frac{u_{p2}}{u_{p1}} \quad (2.4)$$

$$\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{u_{p2}}{u_{p1}} = \frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.5)$$

olmaktadır. Burada β_1 ve β_2 ortamlardaki faz sabitini, n_1 ve n_2 ise ortamların kırılma indisini göstermektedir.

Eşit manyetik geçirgenliğe sahip ortamlarda ($\mu_1 = \mu_2$) kullanılan Snell kırılma yasası (2.6)'da verilmektedir.

$$\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\eta_2}{\eta_1} = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} = \sqrt{\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}}} \quad (2.6)$$

Burada η_1 ve η_2 ortamların öz empedansı, ϵ_{r1} ve ϵ_{r2} ise ortamların dielektrik sabiti veya ortamların bağıl geçirgenliği olarak adlandırılır. Buradan kırılma açısını çekersek (Rao 2009):

$$\theta_t = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right) = \sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}} \sin \theta_i \right) \quad (2.7)$$

olarak bulunmaktadır. Snell yasaları gelen dalgaların kutuplanmasından bağımsızdır. Ancak Fresnel denklemlerini de içeren yansıma ve iletim katsayısı formülleri gelen elektrik alanın kutuplanmasına bağlıdır.

2.2.1 Dik Kutuplanma (Prependicular Polarization)

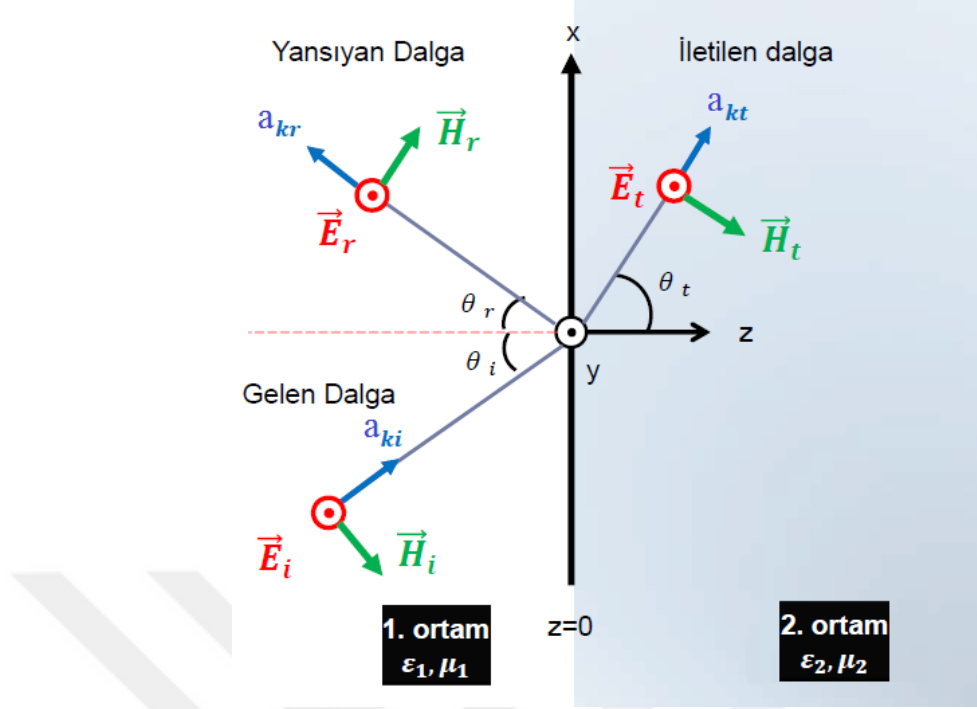
Düzlem dalgaların düzlem sınırlara dik kutuplanma ile eğik geldiği durumda, düzlem dalgaının elektrik alanı \mathbf{E}_i geliş düzlemine diktir. Gelen, yansıyan ve kırılan dalgaların yayılma yönlerinin:

$$\mathbf{a}_{ki} = \mathbf{a}_x \sin \theta_i + \mathbf{a}_z \cos \theta_i \quad (2.8)$$

$$\mathbf{a}_{kr} = \mathbf{a}_x \sin \theta_r - \mathbf{a}_z \cos \theta_r \quad (2.9)$$

$$\mathbf{a}_{kt} = \mathbf{a}_x \sin \theta_t + \mathbf{a}_z \cos \theta_t \quad (2.10)$$

olduğu Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6. Düzlem sınırına eğik gelen ve elektrik alanı geliş düzlemine dik olan düzlem dalgaların yansıma ve kırılma katsayılarının elde edilmesi (ehm.kocaeli.edu.tr 2014).

Gelen, yansıyan ve kırılan dalganın elektrik alan şiddeti fazörleri:

$$\mathbf{E}_i(x, z) = \mathbf{a}_y E_{i0} e^{-j\beta_1(x\sin\theta_i + z\cos\theta_i)} \quad (2.11)$$

$$\mathbf{E}_r(x, z) = \mathbf{a}_y E_{r0} e^{-j\beta_1(x\sin\theta_r - z\cos\theta_r)} \quad (2.12)$$

$$\mathbf{E}_t(x, z) = \mathbf{a}_y E_{t0} e^{-j\beta_2(x\sin\theta_t + z\cos\theta_t)} \quad (2.13)$$

ile elde edilir. Kayıpsız ortamlarda $\beta = k = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$ olduğu için denklemlerde k yerine β kullanılmıştır.

Gelen, yansıyan ve kırılan dalganın manyetik alan şiddeti fazörleri ise:

$$\mathbf{H}_i(x, z) = \frac{E_{i0}}{\eta_1} (-\mathbf{a}_x \cos\theta_i + \mathbf{a}_z \sin\theta_i) e^{-j\beta_1(x\sin\theta_i + z\cos\theta_i)} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{H}_r(x, z) = \frac{E_{r0}}{\eta_1} (\mathbf{a}_x \cos\theta_r + \mathbf{a}_z \sin\theta_r) e^{-j\beta_1(x\sin\theta_r - z\cos\theta_r)} \quad (2.15)$$

$$\mathbf{H}_t(x, z) = \frac{E_{t_o}}{\eta_2} \left(-\mathbf{a}_x \cos \theta_t + \mathbf{a}_z \sin \theta_t \right) e^{-j \beta_2 (x \sin \theta_t + z \cos \theta_t)} \quad (2.16)$$

denklemleri ile gösterilmektedir. Elektrik ve manyetik alan şiddeti fazörlerini teğet bileşenlerinin $z = 0$ sınırındaki süreklilik koşullarının sağlanması ile (Cheng 2009):

$$\mathbf{E}_{i_y}(x, 0) + \mathbf{E}_{r_y}(x, 0) = \mathbf{E}_{t_y}(x, 0) \quad (2.17)$$

$$E_{i_o} e^{-j \beta_1 (x \sin \theta_i)} + E_{r_o} e^{-j \beta_1 (x \sin \theta_r)} = E_{t_o} e^{-j \beta_2 (x \sin \theta_t)} \quad (2.18)$$

$$\mathbf{H}_{i_x}(x, 0) + \mathbf{H}_{r_x}(x, 0) = \mathbf{H}_{t_x}(x, 0) \quad (2.19)$$

$$\frac{1}{\eta_1} \left(-E_{i_o} \cos \theta_i e^{-j \beta_1 (x \sin \theta_i)} + E_{r_o} \cos \theta_r e^{-j \beta_1 (x \sin \theta_r)} \right) = -\frac{E_{t_o}}{\eta_2} \cos \theta_t e^{-j \beta_2 (x \sin \theta_t)} \quad (2.20)$$

bulunur. (2.18) ve (2.20) denklemlerindeki fazların uyumlu olabilmesi için:

$$\beta_1 \sin \theta_i = \beta_1 \sin \theta_r = \beta_2 \sin \theta_t \quad (2.21)$$

olmalıdır. (2.21) denkleminin ilk eşitliği Snell yansıma yasasını ($\theta_i = \theta_r$), son eşitliği ise

Snell kırılma yasasını $\left(\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{n_1}{n_2} \right)$ göstermektedir. Fazörleri eşitledikten sonra

(2.18) ve (2.20) denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$E_{i_o} + E_{r_o} = E_{t_o} \quad (2.22)$$

$$\frac{\cos \theta_i}{\eta_1} (-E_{i_o} + E_{r_o}) = -\frac{E_{t_o}}{\eta_2} \cos \theta_t \quad (2.23)$$

(2.23)'teki E_{t_o} yerine $E_{i_o} + E_{r_o}$ yazarak dik kutuplanma için yansıma katsayısı (Γ_{\perp}):

$$\frac{\cos \theta_i}{\eta_1} (-E_{i_o} + E_{r_o}) = -\frac{E_{i_o} + E_{r_o}}{\eta_2} \cos \theta_t \quad (2.24)$$

$$\left(\frac{\cos \theta_i}{\eta_1} + \frac{\cos \theta_t}{\eta_2} \right) E_{r_o} = \left(\frac{\cos \theta_i}{\eta_1} - \frac{\cos \theta_t}{\eta_2} \right) E_{i_o} \quad (2.24)$$

$$\Gamma_{\perp} = \frac{E_{r_o}}{E_{i_o}} = \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t} \quad (2.25)$$

elde edilir. Snell kırılma yasasını $\left(\frac{n_1}{n_2} = \frac{\eta_2}{\eta_1} \right)$ kullanarak dik kutuplanma için yansımaya katsayısını kırılma indislerine bağımlı olarak bulabiliriz.

$$\Gamma_{\perp} = \frac{E_{r_o}}{E_{i_o}} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \quad (2.26)$$

(2.23)'deki E_{r_o} yerine $E_{t_o} - E_{i_o}$ yazarak dik kutuplanma için iletim katsayısı (τ_{\perp}) bulunur.

$$\frac{\cos \theta_i}{\eta_1} (-E_{i_o} + E_{t_o} - E_{i_o}) = -\frac{E_{t_o}}{\eta_2} \cos \theta_t \quad (2.27)$$

$$\left(\frac{\cos \theta_i}{\eta_1} + \frac{\cos \theta_t}{\eta_2} \right) E_{t_o} = \left(\frac{2 \cos \theta_i}{\eta_1} \right) E_{i_o} \quad (2.28)$$

$$\tau_{\perp} = \frac{E_{t_o}}{E_{i_o}} = \frac{2 \eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t} \quad (2.29)$$

$$\tau_{\perp} = \frac{E_{t_o}}{E_{i_o}} = \frac{2 n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \quad (2.30)$$

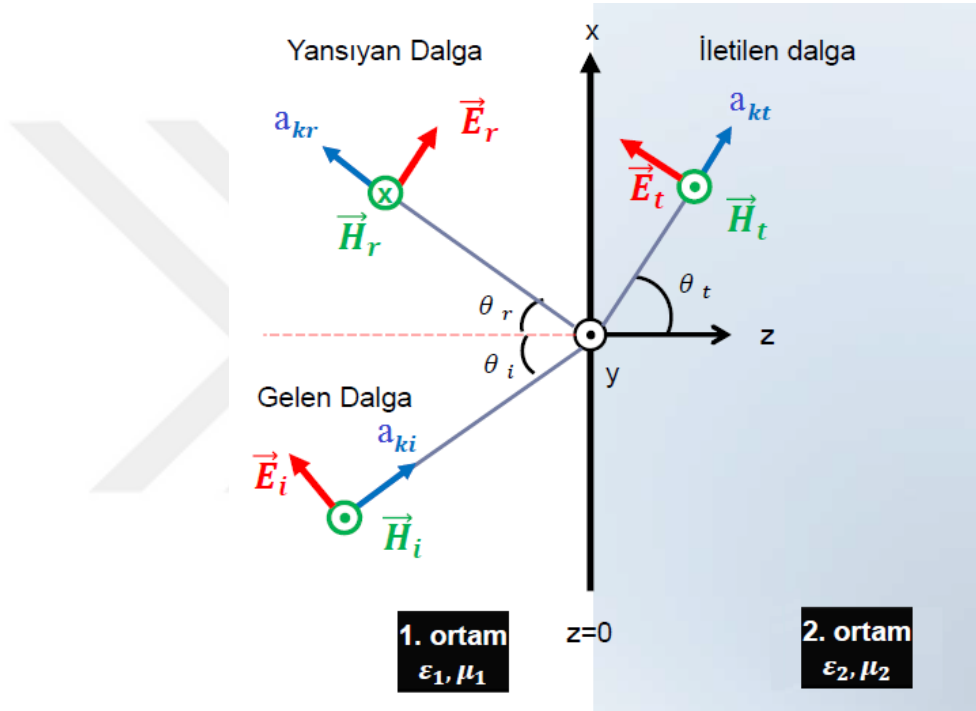
Dik kutuplanma için yansımaya ve iletim katsayılarının arasında:

$$1 + \Gamma_{\perp} = \tau_{\perp} \quad (2.31)$$

bağıntısının bulunduğu (2.26) ve (2.30)'dan anlaşılmaktadır.

2.2.2 Paralel Kutuplanma (Parallel Polarization)

Düzlem dalgaların düzlem sınırlara paralel kutuplanma ile eğik geldiği durumda, düzlem dalganın elektrik alanı \vec{E}_i geliş düzlemine paralel, manyetik alanı \vec{H}_i diktir. Şekil 2.7’de görüldüğü üzere gelen, yansıyan ve kırılan dalgaların yayılma yönleri dik kutuplanma yönleri ile aynıdır.



Şekil 2.7. Düzlem sınırına eğik gelen ve elektrik alanı geliş düzlemine paralel olan düzlem dalgaların yansıma ve kırılma katsayılarının elde edilmesi (ehm.kocaeli.edu.tr 2014).

Düzlem dalganın elektrik alanının yayılma yönü, dik kutuplanmada olduğu gibi \mathbf{a}_y değildir. Burada düzlem dalganın manyetik alanının yayılma yönü y doğrultusundadır. Gelen, yansıyan ve iletilen dalganın elektrik alanlarının şiddeti fazörleri:

$$\mathbf{E}_i(x, z) = E_{i_o} (\mathbf{a}_x \cos \theta_i - \mathbf{a}_z \sin \theta_i) e^{-j \beta_1 (x \sin \theta_i + z \cos \theta_i)} \quad (2.32)$$

$$\mathbf{E}_r(x, z) = E_{r_o} (\mathbf{a}_x \cos \theta_r + \mathbf{a}_z \sin \theta_r) e^{-j \beta_1 (x \sin \theta_r - z \cos \theta_r)} \quad (2.33)$$

$$\mathbf{E}_t(x, z) = E_{t_o} (\mathbf{a}_x \cos \theta_t - \mathbf{a}_z \sin \theta_t) e^{-j \beta_2 (x \sin \theta_t + z \cos \theta_t)} \quad (2.34)$$

ile bulunmaktadır.

Paralel kutuplanmada gelen, yansıyan ve kırılan dalganın manyetik alan şiddeti fazörleri aşağıdaki denklemlerle bulunabilir.

$$\mathbf{H}_i(x, z) = \mathbf{a}_y \frac{E_{i_o}}{\eta_1} e^{-j \beta_1 (x \sin \theta_t + z \cos \theta_t)} \quad (2.35)$$

$$\mathbf{H}_r(x, z) = -\mathbf{a}_y \frac{E_{r_o}}{\eta_1} e^{-j \beta_1 (x \sin \theta_r - z \cos \theta_r)} \quad (2.36)$$

$$\mathbf{H}_t(x, z) = \mathbf{a}_y \frac{E_{t_o}}{\eta_2} e^{-j \beta_2 (x \sin \theta_t + z \cos \theta_t)} \quad (2.37)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir. Dik kutuplanmada olduğu gibi elektrik ve manyetik alan şiddeti fazörlerini teğet bileşenlerinin $z = 0$ sınırındaki süreklilik koşullarının sağlanması ve sayesinde Snell yansıma ve kırılma yasaları elde edilir.

$$\mathbf{E}_{i_x}(x, 0) + \mathbf{E}_{r_x}(x, 0) = \mathbf{E}_{t_x}(x, 0) \quad (2.38)$$

$$E_{i_o} \cos \theta_t e^{-j \beta_1 (x \sin \theta_t)} + E_{r_o} \cos \theta_r e^{-j \beta_1 (x \sin \theta_r)} = E_{t_o} \cos \theta_t e^{-j \beta_2 (x \sin \theta_t)} \quad (2.39)$$

$$\mathbf{H}_{i_y}(x, 0) + \mathbf{H}_{r_y}(x, 0) = \mathbf{H}_{t_y}(x, 0) \quad (2.40)$$

$$\frac{E_{i_o}}{\eta_1} e^{-j \beta_1 (x \sin \theta_t)} - \frac{E_{r_o}}{\eta_1} e^{-j \beta_1 (x \sin \theta_r)} = \frac{E_{t_o}}{\eta_2} e^{-j \beta_2 (x \sin \theta_t)} \quad (2.41)$$

Fazörleri eşitledikten sonra (2.39) ve (2.41) denklemleri aşağıdaki hale gelir.

$$\cos \theta_t (E_{i_o} + E_{r_o}) = E_{t_o} \cos \theta_t \quad (2.42)$$

$$\frac{1}{\eta_1} (E_{i_o} - E_{r_o}) = \frac{E_{t_o}}{\eta_2} \quad (2.43)$$

(2.42)'deki E_{t_o} yerine $\frac{\eta_2}{\eta_1} (E_{i_o} - E_{r_o})$ yazılarak paralel kutuplanma için yansıma

katsayısı (Γ_{\parallel}):

$$\cos \theta_i (E_{i_o} + E_{r_o}) = \frac{\eta_2}{\eta_1} (E_{i_o} - E_{r_o}) \cos \theta_t \quad (2.44)$$

$$\left(\cos \theta_i + \frac{\eta_2 \cos \theta_t}{\eta_1} \right) E_{r_o} = \left(\frac{\eta_2 \cos \theta_t}{\eta_1} - \cos \theta_i \right) E_{i_o} \quad (2.45)$$

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{E_{r_o}}{E_{i_o}} = \frac{\eta_2 \cos \theta_t - \eta_1 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i} \quad (2.46)$$

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{E_{r_o}}{E_{i_o}} = \frac{n_1 \cos \theta_t - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} \quad (2.47)$$

ile elde edilir.

(2.42)'deki E_{r_o} yerine $\left(E_{i_o} - \frac{\eta_1}{\eta_2} E_{t_o} \right)$ değerini koyarak paralel kutuplanma için iletim katsayısı (τ_{\parallel}) bulunur.

$$\cos \theta_i \left(E_{i_o} + E_{i_o} - \frac{\eta_1}{\eta_2} E_{t_o} \right) = E_{t_o} \cos \theta_t \quad (2.48)$$

$$(2 \cos \theta_i) E_{i_o} = \left(\cos \theta_t + \frac{\eta_1}{\eta_2} \cos \theta_i \right) E_{t_o} \quad (2.49)$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{E_{t_o}}{E_{i_o}} = \left(\frac{2 \eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i} \right) \quad (2.50)$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{E_{t_o}}{E_{i_o}} = \left(\frac{2 n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} \right) \quad (2.51)$$

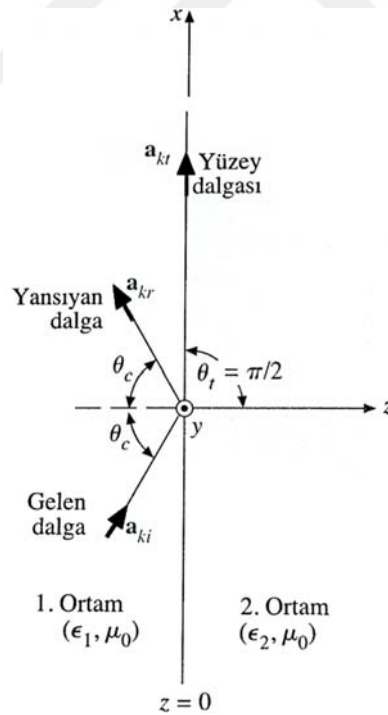
Paralel kutuplanma için yansımaya ve iletim katsayılarının arasındaki bağıntı (2.47) ve (2.51)'den çıkarılabilir.

$$1 + \Gamma_{\parallel} = \tau_{\parallel} \left(\frac{\cos \theta_t}{\cos \theta_i} \right) \quad (2.52)$$

2.2.3 Tam Yansıma Durumu (Total Reflection)

(2.6)'da verilen Snell kırılma yasasını göz önünde bulundurduğumuzda, ikinci ortam birinci ortamdaki daha az yoğun olursa ($n_1 > n_2, \epsilon_1 > \epsilon_2$) kırılma açısı geliş açısından daha büyük olur ($\theta_t > \theta_i$). Kırılma açısı $\frac{\pi}{2}$ değerine geldiğinde iletilen düzlem dalga düzlem sınırı yüzeyinde gitmeye başlar. Bu durum Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Kırılma açısını $\frac{\pi}{2}$ değerine getiren geliş açısına kritik açı denir ve θ_c ile gösterilir. θ_c ve daha büyük değerlerdeki geliş açıları artık düzlem dalganın tamamı geri yansır. Buna tam yansıma durumu denir. (2.6)'daki θ_i yerine $\frac{\pi}{2}$ koyarsak kritik açı değeri elde edilir.

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.53)$$



Şekil 2.8. Elektrik geçirgenlikleri $\epsilon_1 > \epsilon_2$ olan ve manyetik geçirgenlikleri boş uzayın manyetik geçirgenliğine eşit olan ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$) iki farklı dielektrik ortam arasındaki düzlem sınırına kritik açı ile gelen düzlem dalgasının tam yansıması (Cheng 2009).

Fiber optik haberleşme sistemlerinde de tam yansıma prensibinden faydalanılmaktadır. Fiber optik içerisinde gönderilen dalgalar, yansıma açısı kritik açıyı geçecek şekilde kılavuzlanırlar.



Şekil 2.9. Fiber optik içerisinde tam yansımanın kullanılması.

2.2.4 Yansımanın Olmadığı Brewster Açısı

Paralel kutuplanma için yansıma katsayısını gösteren (2.46) ve (2.47) denklemlerinin payını ve dolayısıyla katsayının tamamını sıfır yapan geliş açısı Brewster açısı olarak adlandırılır. Bu durumda elektrik alanı geliş düzlemine paralel gelen düzlem dalgalar düzlem sınırlarından yansımaz. Brewster açısını (2.46) ve (2.47) yardımıyla hesaplırsak:

$$\eta_2 \cos \theta_t - \eta_1 \cos \theta_{B\parallel} = n_1 \cos \theta_t - n_2 \cos \theta_{B\parallel} = 0 \quad (2.54)$$

$$(\cos \theta_{B\parallel})^2 = \left(\frac{\eta_2 \cos \theta_t}{\eta_1} \right)^2 = \left(\frac{n_1 \cos \theta_t}{n_2} \right)^2 \quad (2.55)$$

$$(\sin \theta_{B\parallel})^2 = \left(\frac{\eta_1^2 - \eta_2^2 (1 - \sin^2 \theta_t)}{\eta_1^2} \right) = \left(\frac{n_2^2 - n_1^2 (1 - \sin^2 \theta_t)}{n_2^2} \right) \quad (2.56)$$

(2.5)'deki eşitliği kullanarak $\sin \theta_t$ yerine $\frac{\beta_1}{\beta_2} \sin \theta_{B\parallel}$ kullanırsak:

$$(\sin \theta_{B\parallel})^2 = \left(\frac{\eta_1^2 - \eta_2^2 \left(1 - \frac{\beta_1^2}{\beta_2^2} \sin^2 \theta_{B\parallel}\right)}{\eta_1^2} \right) = \left(\frac{n_2^2 - n_1^2 \left(1 - \frac{\beta_1^2}{\beta_2^2} \sin^2 \theta_{B\parallel}\right)}{n_2^2} \right) \quad (2.56)$$

$$(\sin \theta_{B\parallel})^2 = \left(\frac{\eta_1^2 - \eta_2^2}{\eta_1^2 - \eta_2^2 \frac{\beta_1^2}{\beta_2^2}} \right) = \left(\frac{n_2^2 - n_1^2}{n_2^2 - n_1^2 \frac{\beta_1^2}{\beta_2^2}} \right) \quad (2.57)$$

$$(\sin \theta_{B\parallel})^2 = \left(\frac{1 - (\eta_2/\eta_1)^2}{1 - (\eta_2 \beta_1/\eta_1 \beta_2)^2} \right) = \left(\frac{1 - (n_1/n_2)^2}{1 - (n_1 \beta_1/n_2 \beta_2)^2} \right) \quad (2.58)$$

Elde edilir. (2.58)'deki denklemleri (2.5) ve (2.6)'daki eşitlikleri kullanarak çözebiliriz.

$$(\sin \theta_{B\parallel})^2 = \left(\frac{1 - \epsilon_1/\epsilon_2}{1 - (\epsilon_1/\epsilon_2)^2} \right) = \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \right) \quad (2.59)$$

$$\sin \theta_{B\parallel} = \left(\frac{1}{\sqrt{1 + (\epsilon_1/\epsilon_2)}} \right) \quad (2.59)$$

$$\theta_{B\parallel} = \sin^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + (\epsilon_1/\epsilon_2)}} \right) = \tan^{-1} \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}} = \tan^{-1} \sqrt{\frac{n_2}{n_1}} \quad (2.59)$$

2.2.5 Fiber Optik Haberleşme Sistemlerinde Fresnel Yansıma Değerlerinin Hesaplanması

Önceki konularda dik ve paralel kutuplanma için yansıma ve geçiş genlik katsayıları hesaplandı. Işığın yansıma ve iletim değerleri ise enerjilerle veya güçlerle ilişkilidir. Bu değerler yansıyan veya kırılan ışık gücünün geliş gücüne oranı ile bulunabilir. hesaplanabilir. Güç değeri, Poynting vektörünün büyüklüğü ve ışın alanının çarpımı ile orantılıdır. Işın alanı yansımadan önce ve sonra aynı olduğu için, yansıma değeri sadece Poynting vektörlerinin oranına eşittir (Easton 2008).

$$R = (\Gamma)^2 \quad (2.60)$$

Dik ve paralel kutuplanma durumları için (2.60)'ı düzenlersek:

$$R_{\perp} = |\Gamma_{\perp}|^2 = \left(\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2 = \left(\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2}}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2}} \right)^2 \quad (2.61)$$

$$R_{\parallel} = |\Gamma_{\parallel}|^2 = \left(\frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2 = \left(\frac{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2} - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \right)^2} + n_2 \cos \theta_t} \right)^2 \quad (2.62)$$

haline gelir.

Enerjinin korunumu kanunundan iletim güçlerini bulursak:

$$T_{\perp} = 1 - R_{\perp} \quad (2.63)$$

$$T_{\parallel} = 1 - R_{\parallel} \quad (2.64)$$

olmaktadır. (2.63) veya (2.64) denklemlerinden herhangi birinde (2.61) ve (2.62)'deki yansımaya güçleri yerine konularak, iletim gücünün iletim genlik katsayısına bağlı değeri hesaplanabilir.

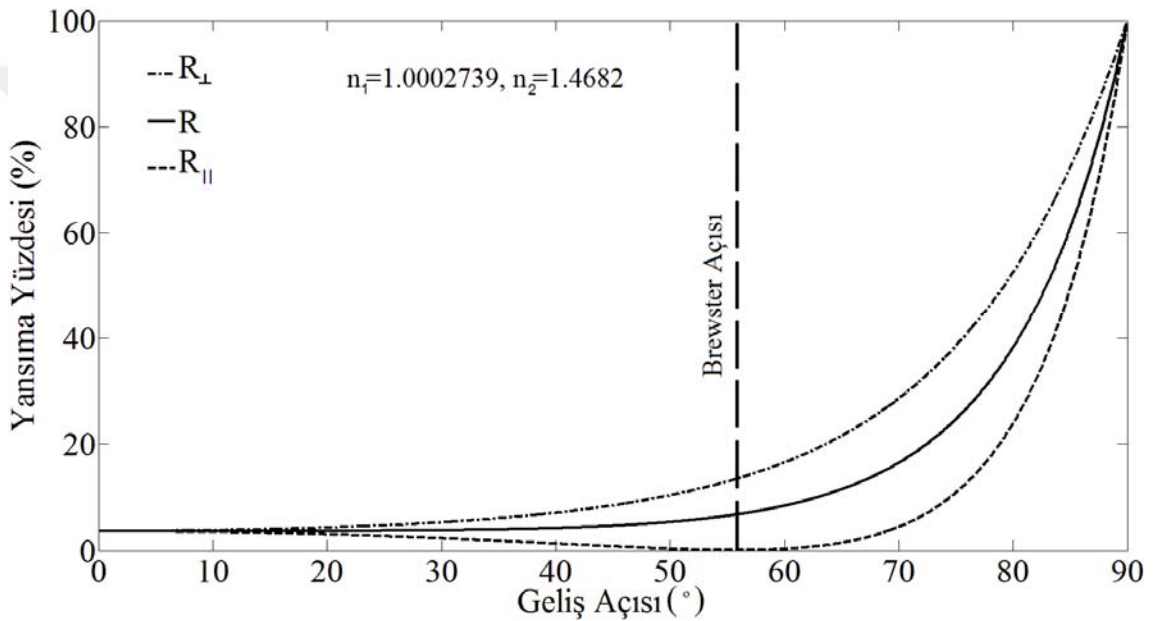
$$T = \left(\frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} \right)^2 \tau^2 \quad (2.65)$$

Eğer gelen ışık kutuplanmamışsa, yani dik ve paralel kutuplanma miktarları eşitse yansımaya gücü:

$$R = \frac{R_{\perp} + R_{\parallel}}{2} \quad (2.66)$$

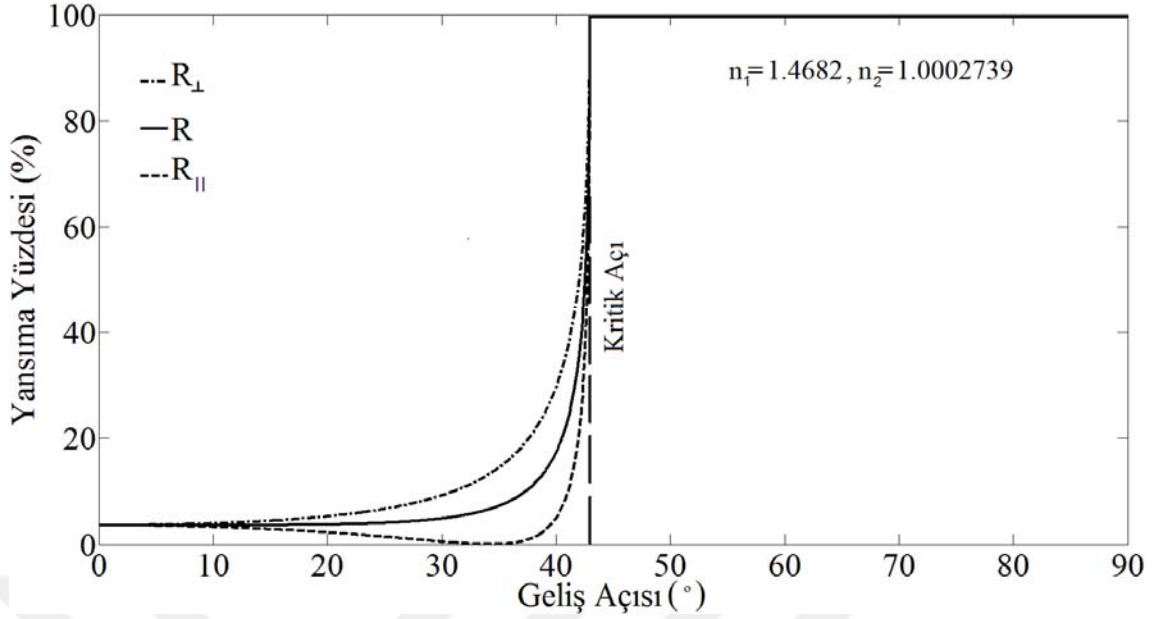
ile gösterilmektedir. (2.61), (2.62) ve (2.63) yardımıyla çizdirilen ışığın geliş açısına bağlı olarak yansıma gücünün yüzdesini ifade eden grafikler Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de gösterilmiştir.

Her iki grafikte de havanın kırılma indis değeri $n_h = 1.0002739$ (Weast ve Selby 1968) ve tek modlu silika standart fiberin 1550 nm dalgaboyundaki efektif kırılma indisi $n_{eff} = 1.4682$ (Corning 2002) kullanılmıştır.



Şekil 2.10. Hava-fiber geçişinde ışığın geliş açısına bağlı yansıma yüzdesi grafiği.

Geliş açısı sıfır olduğunda ($\theta_i = 0^\circ$) Fresnel yansıma yüzdesi % 3.59 olmaktadır. Genel olarak camlar için Fresnel yansıması yaklaşık % 4 kabul edilmektedir. Şekil 2.10’da görülen Brewster açısı, R_{\parallel} yansımasının % 0’a düştüğü açıdır ve 55.737° olarak bulunmaktadır.

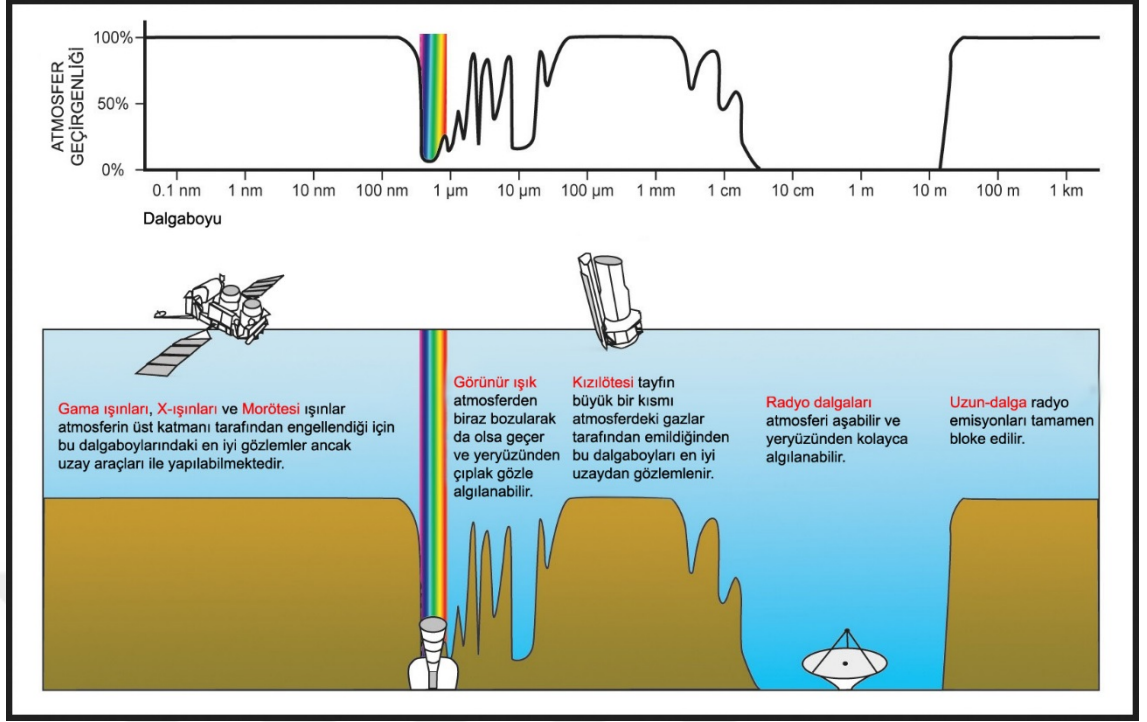


Şekil 2.11. Fiber-hava geçişinde ışığın geliş açısına bağlı yansımaya yüzdesi grafiği.

Şekil 2.11’de ışığın fiber ortamdan hava ortamına geçtiği durumdaki geliş açısına bağlı Fresnel yansımaya grafiğinde, kritik açıdan büyük açılarda, ışığın tamamının yansdığı görülmektedir. Geliş açısı sıfır olduğunda ($\theta_i = 0^\circ$) Fresnel yansımaya yüzdesi, hava-fiber geçişinde tespit edildiği gibi % 3.59 ve kritik açı 42.97° olarak bulunmaktadır.

2.3. Atmosferik Optik Yayınım

Atmosferde optik iletim oldukça esnektir. Fakat sinyalin kalitesi, iletim mesafesi ve ortam şartlarına bağlıdır. Toz parçacıkları ve yoğunluk homojensizlikleri saçılmalara sebep olabilmektedir. Yoğunluk atmosferde yükseklikle değişir; daha da önemlisi, solar (güneşin sebep olduğu) ısınma, küçük ölçekte, hızlı değişen yoğunluk dalgalanmalarına yol açabilir. Hava durumu ciddi soğuruma yol açabilir; örneğin sis kolayca 40 – 60 dB’lik kayba sebep olabilir. Ayrıca atmosferik gazlar tarafından da soğurum vardır. Mesela, oksijen onlarca GHz (Gigahertz) frekanslarındaki mikrodalgaları soğurur. Sonuç olarak, bazı özel uygulamalar dışında serbest uzayda iletim pratik değildir (Işık ve Kahvecioğlu 2003, Loehr ve ark. 1998, Özsoy 2001). Atmosferin hangi dalgaboylarında iletim yapılabileceği Şekil 2.12’de şematize edilmiştir.



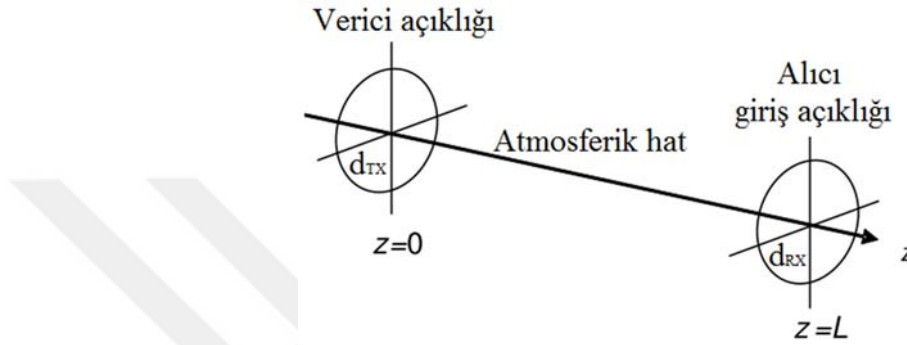
Şekil 2.12. Atmosferin hangi dalgalarda geçirdiğini gösteren şekil (NASA 2008).

Röle destekli FSO haberleşme sistemleri atmosferik çalkantı bozulmalarını engelleme hususunda oldukça umut verici bir tekniktir (Safari ve Uysal 2008a, 2009, Karimi ve Nasiri-Kenari 2009, 2010, 2011, Safari ve ark. 2012, Kashani ve ark. 2013, Kashani ve Uysal 2013). Röle destekli FSO haberleşme sistemlerinin etkileyici performansının sebebi çalkantı kaynaklı sönmülmenin (turbulence-induced fading) iletim mesafesine bağlı olmasıdır. Kablosuz optik haberleşme ile RF arasındaki en büyük fark, sönmülmenin azaltıcı etkisine rağmen röle destekli FSO haberleşme sistemlerinin iletim performansını geliştirebilmesidir.

Atmosferik aerosoller ve moleküller kötü hava koşulları ile birlikte soğurum ve saçılmaya neden olarak atmosferde yayılan ışığın gücünü zayıflatırlar. Dahası hava termalinin konumsal ve zamansal heterojen değişimleri kırılma indisinde rastgele dalgalanmalara yol açar. Bu durum ise serbest uzay optik haberleşmenin performansını düşürür.

Çalkantılı atmosferin polarizasyona bağlı etkileri optik sinyalde dispersiyon bozulmalarına yol açar. Shapiro (1978), atmosferin düşük kayıplı iletim pencerelerinde bu durumun göz ardı edilebilir olduğunu göstermiştir. Buna göre, iletilen optik sinyalin lineer polarize edilmiş olduğunu kabul edebiliriz.

Şekil 2.13'te serbest uzay optik yayılım geometrisinin temel hali gösterilmektedir.



Şekil 2.13. Serbest uzay optik yayılım geometrisi (Safari 2010).

d uzunluğundaki bir FSO linki için yol kaybı formülü Haas (2003) tarafından:

$$l(d) = e^{-\sigma d} \frac{(\pi d_{TX}^2)(\pi d_{RX}^2)}{(\lambda d)^2} \quad (2.67)$$

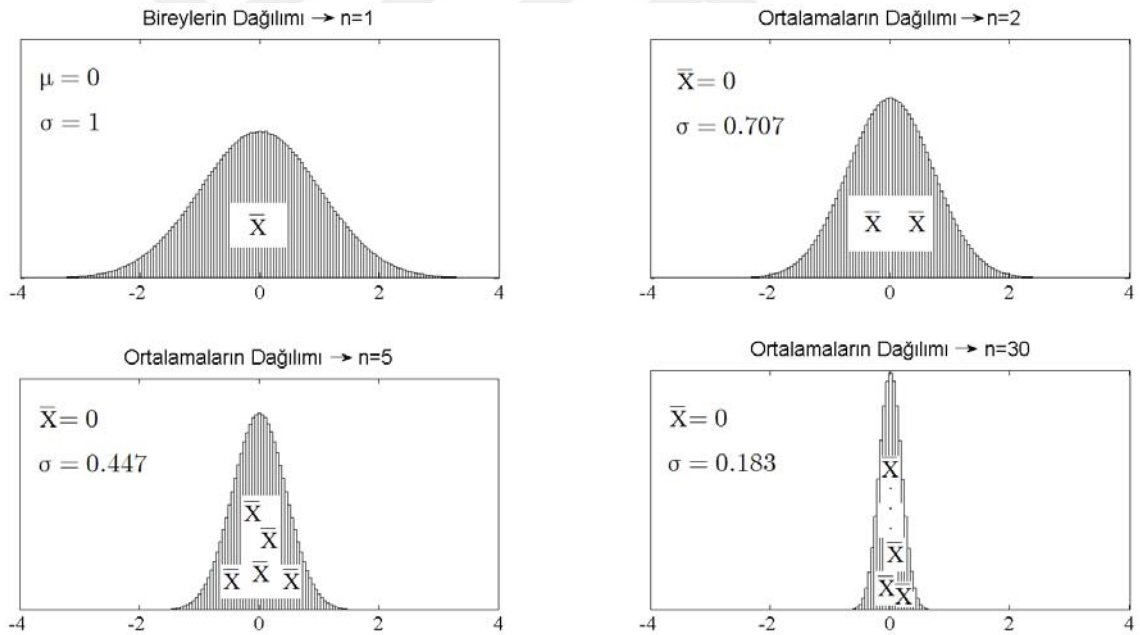
ile çıkarılmıştır. Bu denklemde d_{TX} verici açıklığının, d_{RX} ise alıcı giriş açıklığının yarıçapını vermektedir. λ optik dalga boyunu, σ ise atmosferik zayıflama katsayısını göstermektedir. Kim ve ark. (1998) bu katsayının görüş mesafesine bağlı olduğunu ispatlamışlardır. (2.67) formülünden, vericiye herhangi bir d mesafesindeki normalize yol kaybı denklemi (Karp ve ark. 1988):

$$L(d) = \frac{l(d)}{l(d_{V,A})} = \left(\frac{d_{V,A}}{d} \right)^2 e^{\sigma(d_{V,A}-d)} \quad (2.68)$$

ile elde edilir. Bu denklemde $l(d)$, $l(d_{v,A})$ ve σ , sırasıyla vericiye d mesafesindeki yol kaybı, verici ile alıcı arasındaki toplam yol kaybı ve zayıflama katsayısı değerini göstermektedir.

2.3.1. Merkezi Limit Teoremi

Merkezi limit teoremine göre, ortalaması μ ve standart sapması σ olan bir ana kütleden n büyüklüğünde rastgele tekrarlamalı örnekler alınır, n 'nin yeterince büyük olması halinde, örnek ortalamaları da normal dağılımlı olacaktır. Ortalaması yaklaşık olarak μ 'ye, standart sapması da yaklaşık olarak σ/\sqrt{n} 'ye eşittir. n sayısı arttıkça yaklaşım daha doğru sonuç verir. Bu durum Şekil 2.14'te örneklendirilmiştir.



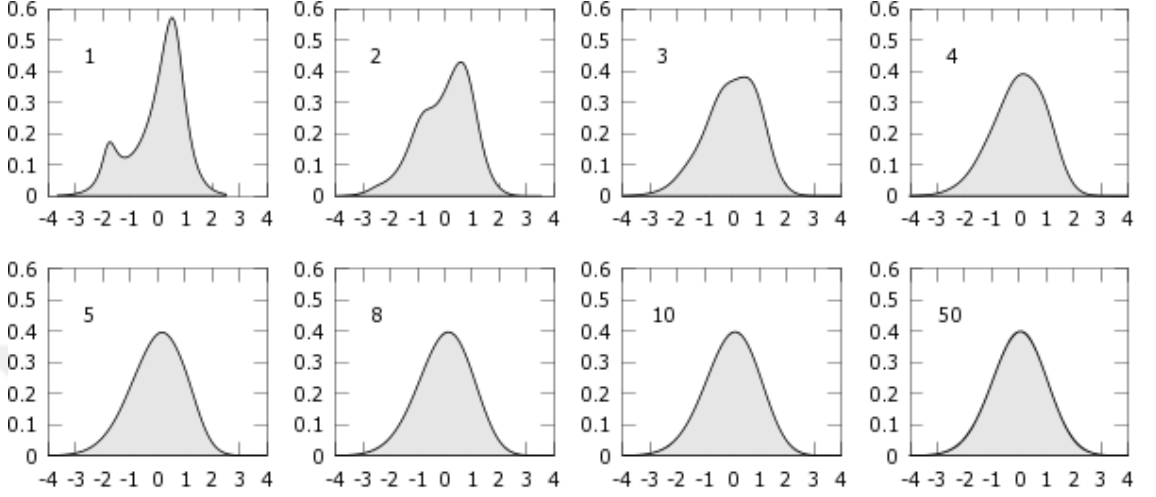
Şekil 2.14. Merkezi limit teoremi (Yemenici 2014).

X_n 'in bağımsız ve aynı dağılımlı (independent identically distributed-iid) rassal değişkenlerden oluşan sonlu bir dizi olduğu varsayalım. Eğer

$$Y_n = f(X_1, \dots, X_n) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{i=1}^n \frac{X_i - \mu}{\sigma}$$

de standart normal dağılımlıdır. Sırasıyla 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10 ve 50 bağımsız ve standart

normal dağılımlı rassal değişkenin toplamının yine standart normal dağılıma yakınsadığını gösteren bu teorem Şekil 2.15'te gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Merkezi limit teoreminin gösterimine bir örnek (Pit-Claudell 2012).

2.3.2. Çalkantı Kaynaklı Sönümlenme

Atmosferde dalga yayılımı probleminin çözümünde bir düzensizlik metodu olan Rytov teorisi ilk defa Obukhov (1953) tarafından kullanılmıştır (Arpali 2009, Klyatskin 2011). Bu metoda göre bir lazer ışını atmosferde ilerlerken atmosferik çalkantıdan dolayı faz ve genliği değişebilir. Rytov atmosferik ortamın bir dizi ince düzlemlerden oluştuğunu farz etmiştir. Buna göre her bir düzlem optik alan değerini bir önceki düzleme göre e^{ψ_i} kadar artırır (Tatarski 1961, Osche 2002, Safari 2010). Kaynak çıkışındaki optik alana U_0 denildiğinde ve verici ile alıcı arasındaki atmosferik ortam i parçaya bölüldüğünde alıcı girişindeki optik alan:

$$U = U_0 e^{\psi} = U_0 \prod_i e^{\psi_i} = U_0 e^{\sum_i \psi_i} \quad (2.69)$$

olarak tanımlanır. Merkezi limit teoremine göre ψ , $\left(\psi = \sum_i \psi_i = \chi + j\varphi\right)$ normal dağılımlı kompleks bir değişkendir. Sönümleme ifadesindeki $(e^\psi = e^{\chi+j\varphi})$, log-genlik (χ) ve faz (φ) değişkenleri de normal dağılımlıdır (Osche 2002).

Zayıf çalkantılı ortamda, çalkantı kaynaklı sönümlenmenin log-normal dağılımlı olduğu bilinmektedir (Zhu ve Kahn 2002, 2003, Haas 2003, Lee ve Chan 2004, Wilson ve ark. 2005, Navidpour ve ark. 2007). Eğer $\alpha = e^z$ şeklinde bir kanal sönümleme genliği tanımlarsak, bu genliğin log-normal olasılık yoğunluk fonksiyonu (Safari ve Uysal 2008a):

$$f(\alpha) = \frac{1}{\alpha \sqrt{2\pi\sigma_\chi^2}} e^{-\left(\frac{\ln(\alpha) - \mu_\chi}{2\sigma_\chi^2}\right)^2} \quad (2.70)$$

olacaktır. Buradaki log-genlik χ , ortalaması μ_χ ve varyansı σ_χ^2 olan normal dağılımlı bir rassal değişkendir.

Fried (1967) makalesinde $\mu_\chi = -\sigma_\chi^2$ kabul ederek, sönümleme katsayısını normalize etmenin $(E[h_a^2] = E[h] = 1)$, sönümlenmenin ortalama gücü azaltmasını veya artırmasını önlediğini ispatlamıştır.

Osche (2002), düzlem ve küresel dalgalar için log-genlik varyansının iletim mesafesine bağlı değerini ifade etmiştir. Sırasıyla (2.71) ve (2.72)'de bu denklemler verilmektedir.

$$\begin{aligned} \sigma_\chi^2(L) &= 0.033 (2\pi)^2 \frac{(\sqrt{3}-1)\Gamma(-5/6)}{8\sqrt{2}} k^2 \int_0^L C_n^2(\eta) \left(\frac{L-\eta}{k}\right)^{5/6} d\eta \\ &= 0.563 k^{7/6} \int_0^L C_n^2(\eta) (L-\eta)^{5/6} d\eta \end{aligned} \quad (2.71)$$

$$\sigma_\chi^2(L) = 0.563 k^{7/6} \int_0^L C_n^2(\eta) \left[\frac{\eta(L-\eta)}{L}\right]^{5/6} d\eta \quad (2.72)$$

Bu denklemlerde $\Gamma(\cdot)$ operatörü gama fonksiyonu $\left(\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt\right)$, $k = 2\pi/\lambda$ dalga sayısı, L verici ve alıcı arasındaki mesafe ve $C_n^2(\cdot)$ ortamın kırılma indisi dalgalanmasını karakterize eden kırılma indisi yapı sabitidir. Bu terim ilk defa Kolmogorov (1961) tarafından sunulmuştur ve yüksekliğe bağlı olarak değişmektedir (Çelik 2011). Hufnagel-Valley modellemesine göre $C_n^2(\cdot)$ ifadesinin yüksekliğe bağlı değişimi (Beland 1993):

$$C_n^2(h) = 0.00594 \left(\frac{\nu}{27}\right)^2 (10^{-5}h)^{10} e^{(-h/1000)} + 2.7 \times 10^{-16} e^{(-h/1500)} + A e^{(-h/100)} \quad (2.73)$$

ile verilir. Burada $h(m)$ yüksekliği, $\nu(m/s)$ rüzgâr hızının karekök ortalama değeri (rms windspeed), $A(m^{-2/3})$ ise kırılma indisi yapı sabitinin yerdeki değerini $C_n^2(0)$ göstermektedir. Andrews ve ark. (2001) yaptıkları analizlerde $\nu = 21 m/s$, $A = 1.7 \times 10^{-14} m^{-2/3}$ veya $A = 3 \times 10^{-13} m^{-2/3}$ olarak bulmuşlardır.

$C_n^2(\cdot)$ ifadesinin değeri yüksekliğe bağlı olarak değişmektedir, fakat yeryüzüne yatay olarak gerçekleştirilen optik yayınımlarda yaklaşık olarak sabit kabul edilir ($C_n^2(h) = C_n^2 \cong \text{sabit}$). C_n^2 değeri güçlü çalkantılı ortamda $10^{-12} m^{-2/3}$ değerine kadar çıkarken, zayıf çalkantılı atmosferde $10^{-17} m^{-2/3}$ değerine kadar düşebilir. Ortalama değeri $10^{-15} m^{-2/3}$ olarak kabul edilmektedir (Goodman 1985, Popoola 2009).

Düzlem ve küresel dalgalar için sırasıyla (2.71) ve (2.72)'de verilen log-genlik varyansı, $C_n^2(\cdot)$ ifadesi sabit kabul edilerek yeniden düzenlendiğinde (2.74) ve (2.75) denklemleri elde edilir (Osche 2002).

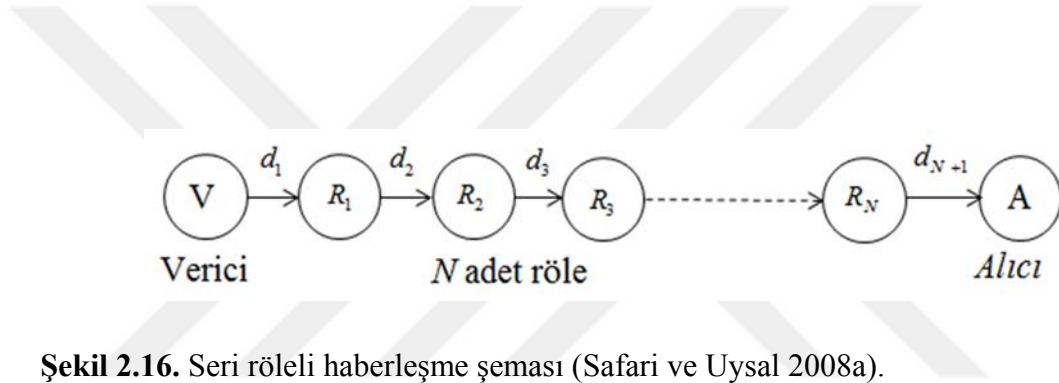
$$\sigma_x^2(L) = 0.307 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (2.74)$$

$$\begin{aligned} \sigma_x^2(L) &= 0.563 C_n^2 k^{7/6} \left[\frac{3 \Gamma(5/6) \Gamma(11/6)}{16 \Gamma(5/3)} L^{11/6} \right] \\ &= 0.124 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}. \end{aligned} \quad (2.75)$$

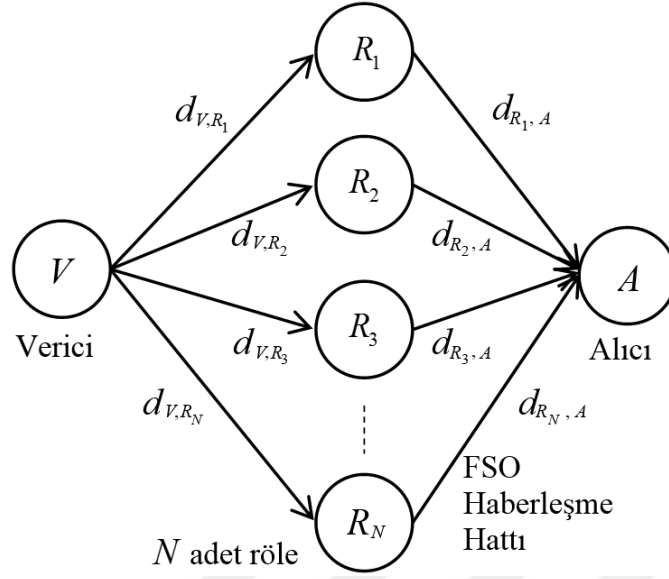
2.4. Röle Destekli FSO Haberleşmesi

Serbest uzay optik haberleşmede, seri (örneğin çok atlamalı haberleşme (multi-hop transmission)) ve paralel (örneğin işbirlikli çeşitleme (cooperative diversity)) röleli kanal modelleri kullanılmaktadır (Akella ve ark. 2005, Tsiftsis ve ark. 2006, Karagiannidis ve ark. 2006, Safari ve Uysal 2008a, 2008b, Safari ve ark. 2012).

Seri röleli kanal modelinde optik kaynağın gönderdiği bilgi N adet röleden sırasıyla aktarıldıktan sonra hedefteki alıcıya ulaşmaktadır. Toplamda $N+1$ adet kısa mesafeli kanal oluşmaktadır. Seri röleli serbest uzay optik haberleşmenin şematik gösterimi Şekil 2.16'da verilmektedir.



Paralel işbirlikli haberleşme modelinde ise bilgi paralel yerleştirilmiş N adet röleye geldikten sonra hedefteki optik alıcıya ulaşmaktadır. Toplamda $2N$ adet kanal oluşmaktadır. Paralel röleli serbest uzay optik haberleşmenin şematik gösterimi de Şekil 2.17'de verilmektedir.



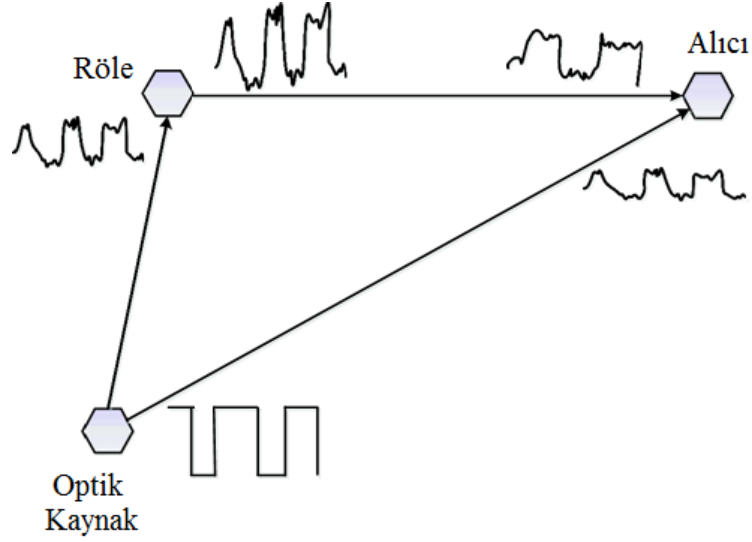
Şekil 2.17. Paralel röleli haberleşme şeması (Basgumus ve ark. 2015).

Şekilde görülen d_{V,R_j} verici ile j . röle arasındaki doğrudan bağlantılı optik hattın mesafesini, $d_{R_j,A}$ ise j . röle ile alıcı arasındaki FSO haberleşme hattının mesafesini göstermektedir.

Röle destekli FSO haberleşme sistemlerinde bilgi aktarma işlemi genelde iki temel şekilde yapılır.

2.4.1 Kuvvetlendir ve Aktar (Amplify and Forward-AF) Metodu

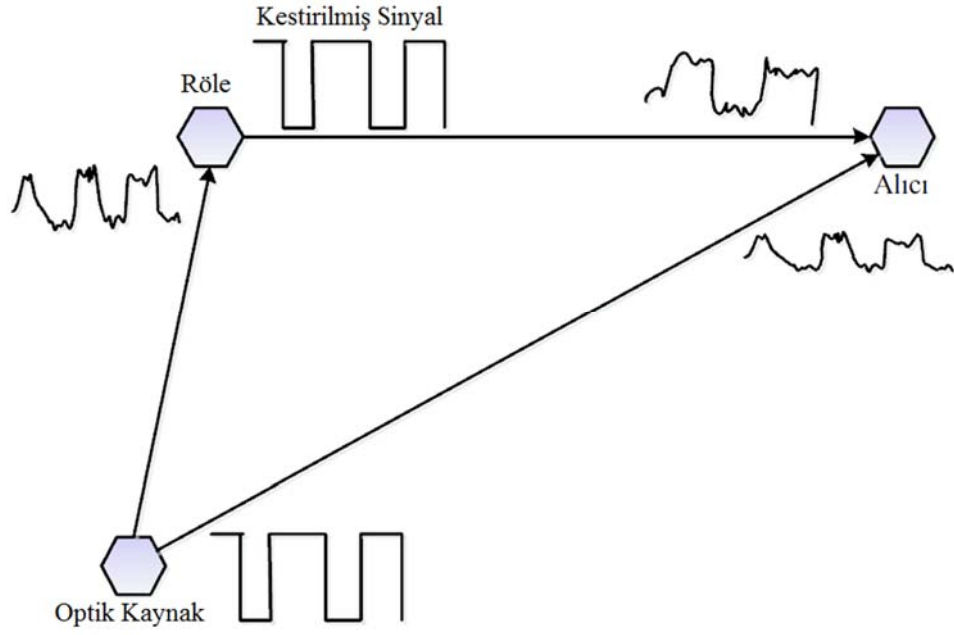
Kuvvetlendir ve aktar metodu ilk olarak Laneman ve ark. (2001) tarafından önerilmiştir. Röle destekli FSO haberleşme sistemlerinde röle, optik kaynağın gönderdiği işareti üzerine gürültü eklenmiş şekilde alır ve herhangi bir kestirim yapmadan sadece kuvvetlendirerek bu işareti bir sonraki haberleşme birimine (başka bir röleye veya alıcıya) gönderir. Alıcı aynı zamanda başka rölelerden veya optik kaynaktan da bilgi alarak işareti kestirmeye çalışır. Alıcının sağlıklı bir kestirim yapabilmesi için optik kaynak ile röle arasındaki kanal durum bilgisine (channel state information-CSI) de sahip olması gerekmektedir (Laneman ve ark. 2001, Kulaç 2012). Kuvvetlendir ve aktar metodundaki bilgi iletimi Şekil 2.18’de gösterilmektedir.



Şekil 2.18. Kuvvetlendir ve aktar modelinin şematik gösterimi (Namdar 2014).

2.4.2 Çöz ve Aktar (Decode and Forward-DF) Metodu

Bu teknikte röle kuvvetlendir ve aktar metodundan farklı olarak optik kaynaktan gelen işaret üzerinde kestirim yapar, tekrar kodlar ve iletir. Bu usûlün dezavantajı şudur ki eğer röle kestirimi yanlış yaparsa, optik kaynak ile alıcı arasındaki FSO haberleşmesine bozucu yönde etki eder. Bu durumda hata yayılımı problemi ortaya çıkar. Diğer teknikte olduğu gibi alıcının yine optik kaynak ile röle arasındaki kanal durum bilgisine sahip olması gerekmektedir. Şekil 2.19'da çöz ve aktar modelindeki bilgi iletimi tasvir edilmektedir.



Şekil 2.19. Çöz ve aktar modelinin şematik gösterimi (İlhan 2011).

Literatüre baktığımızda çöz ve aktar modelinin daha iyi olduğu durumlar yanında (Sendonaris ve ark. 2003, Høst-Madsen ve Zhang 2005, Kramer ve ark. 2005), kuvvetlendir ve aktar metodunun daha başarılı olduğu senaryolar da mevcuttur (Laneman ve Wornell 2000, Nosratinia ve ark. 2004, Li ve Zhao 2006).

2.5 Optimizasyon Algoritmaları

Optimizasyon algoritmaları, bir amaç fonksiyonunun maksimum veya minimum değerinin, verilen kısıtlar sağlanacak şekilde ve değişkenlerin en ideal değerleri bulunarak hesaplanmasında kullanılmaktadır (Yıldız 2006, Arora 2012). Optimizasyon algoritmaları, deterministik tabanlı kurallar kullanan klasik algoritmalar ve olasılık tabanlı kurallar kullanan yapay zekâ (sezgisel) algoritmaları olarak ikiye ayrılmaktadırlar.

Klasik optimizasyon algoritmaları; genellikle küçük boyutlu problemlerin çözümünde kullanılması, fazla hafıza kullanımının programın erken sonlandırılmasına neden olması, formülasyondaki değişime uyarlanmasının oldukça güç olması, bir problem için çok iyi sonuç veren klasik usûllerin başka bir probleme uygulanmasının zor olması ve ulaştığı çözümün genel olarak lokal optimumda kalması gibi dezavantajlara sahiptir (Doğan ve Alçı 2011).

Klasik algoritmalar, problemle ilgili tasarım parametrelerine bağı bir amaç fonksiyonunun ve sınırlama fonksiyonlarının matematiksel formda tanımlanmasına ihtiyaç duyarlar. Yapay zekâ algoritmalarının böyle bir zorunluluğu yoktur. Yapay zekâ algoritmaları genellikle, tek bir çözümü alıp onu iteratif olarak geliştirmek yerine, bir grup çözüm olarak bu çözümlerden, daha iyi yeni çözümler üretmeye çalışırlar. Bu algoritmaların tasarlanmasında tabiattan ilham alınmıştır (Nature Inspired Algorithm-NIA). Amaç fonksiyonunun, sürekli veya türevlenebilir olmasına ihtiyaç duymazlar. Amaç fonksiyonu için global bir minimum noktasına yakınsama eğilimindedirler, ama global bir optimal sonucu garanti etmezler.

NIA'lar hakkında *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, *Applied Intelligence*, *Neural Network World*, *Artificial Intelligence (AI) Review*, *Applied Soft Computing*, *Physics of Life Reviews*, *AI Communications*, *Evolutionary Computing*, *Journal of Artificial Intelligence Research*, *Journal of Heuristics* ve *Artificial Life* gibi uluslararası hakemli dergiler yayınlanmaktadır. Ayrıca *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, *Soft Computing*, *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO)*, *International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN)*, *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence (ANTS)* ve *The Evolutionary Programming Conference* gibi uluslararası konferanslar düzenlenmektedir (Arora 2012).

Günümüzde kullanılan başlıca NIA çeşitleri şunlardır (Yang 2014):

1. Yapay Isıl İşlem Algoritması (Simulated Annealing-SA)

Kirkpatrick ve ark. (1983) metallerin ısı işleminden ilham alarak ortaya koymuşlardır.

2. Genetik Algoritma (Genetic Algorithm-GA)

Modern evrimsel hesaplamaların temelini oluşturan bu algoritma fikri Holland (1975)'e aittir.

3. Diferansiyel Gelişim (Differential Evolution-DE) Algoritması

Vektör farkını kullanan doğrudan arama (direct search) metodlarından (Nelder-Mead 1965) ilham alan Storn ve Price (1996, 1997) tarafından geliştirilmiştir (Arora 2012).

4. Karınca Koloni Algoritması (Ant Colony Algorithm-ACA)

Karınca koloni davranışlarının matematiksel modelleri üzerine dayalı bir algoritmadır. Dorigo ve ark. (1991, 1999) tarafından tanımlanmıştır.

5. Yapay Arı Koloni (Artificial Bee Colony-ABC) Algoritması

Karaboğa (2005), arıların yiyecek arama davranışını modelleyerek Yapay Arı Koloni algoritmasını geliştirmiştir.

6. Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization-PSO)

Kennedy ve Eberhart (1995), kuş ve balık sürülerinin yiyecek arama davranışlarını baz alarak bu algoritmayı geliştirmişlerdir.

7. Ateş Böceği Algoritması (The Firefly Algorithm)

Yang (2008, 2009, 2010) tarafından tropikal ateş böceklerinin ışıltama davranışı temel alınarak geliştirilmiştir.

8. Guguk Kuşu Algoritması (Cuckoo Search)

Yang ve Deb (2009) tarafından guguk kuşu türünün yerleşimi ve üremesi modelinin temeli üzerine oluşturulan en yeni algoritmalarından biridir.

9. Yarasa Algoritması (The Bat Algorithm)

Yang (2010) tarafından önerilmiş, yarasaların avlanma davranışlarına ve karanlık ortamlarda bile hareket edebilmelerine rehberlik eden ve ekolokasyon olarak bilinen (biyolojik sonar) bir özellikten ilham alınmış bir yapay zekâ algoritmasıdır (Yılmaz 2014).

10. Çiçek Tozlaşma Algoritması (The Flower Pollination Algorithm)

Çiçekli bitkilerin çiçek tozlaşma işleminden ilham alan Yang (2012) tarafından geliştirilmiştir.

Algoritmalar, karmaşıklık veya hesaplama maliyeti açısından değerlendirilecek olursa en basit olanları diferansiyel gelişim, yapay arı kolonisi ve parçacık sürüsü algoritmalarıdır (Karaboğa 2011).

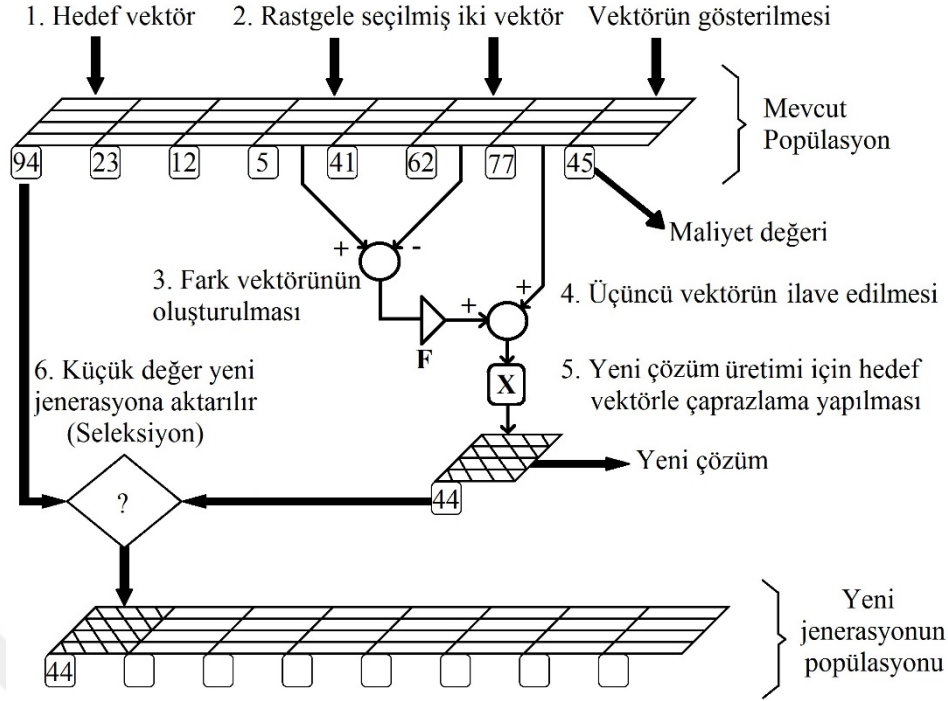
2.5.1 Diferansiyel Gelişim (DE) Algoritması

Gerçek parametrelili optimizasyon problemlerinin çözümünde etkin sonuçlar verebilen popülasyon tabanlı basit bir algoritmadır (Çakır 2012). Gerçek parametrelili optimizasyon, bilimde, mühendislikte ve iş ortamlarında karşılaşılan pratik problemlerin önemli ve geniş bir sınıfını oluşturmaktadır (Karaboğa 2011).

DE algoritmasının işlem basamakları kısaca şunlardır (Kesler ve ark. 2011):

- a. Maksimum jenerasyon (G_{maks}), çaprazlama oranı (crossover constant- CR), ölçekleme faktörü (weighting factor- F) ve popülasyon büyüklüğü (number of parents- NP) gibi algoritma parametrelerinin belirlenmesi.
- b. Başlangıç popülasyonunun rastgele oluşturulması.
- c. Her bir bireyin maliyet değerinin (cost value) hesaplanması ve en iyi bireyin tespit edilerek saklanması.
- d. Popülasyon içinden üç farklı bireyin seçilmesinin ardından, mutasyon ve çaprazlama işlemleri ile yeni popülasyonun oluşturulması.
- e. Eski ve yeni popülasyondaki bireylerin maliyet değerlerine göre kıyaslanması ve yeni popülasyon bireylerinin seçilmesi.
- f. Popülasyon içindeki en iyi bireyin güncellenmesi.
- g. Maksimum jenerasyona ulaşılan kadar “d” basamağına geri dönülmesi.
- h. Maksimum jenerasyona ulaşıldığı durumdaki en iyi bireylerin çözüm olarak kullanılması.

Diferansiyel gelişim algoritmasının şematik diyagramı Şekil 2.20’de verilmektedir.



Şekil 2.20. DE algoritmasının şematik diyagramı (Karakadikt.com 2014).

Maliyet değeri 94 olan birey ilk seçilen birey olsun. Şekil 2.20’de görüldüğü üzere 5, 62 ve 77 maliyet değerine sahip bireyler de rastgele seçilen diğer 3 birey olmaktadır. 5 ve 62 maliyet değerli bireylerin farkının F ile çarpılması ve daha sonra 77 maliyet değerli bireyle toplanması işleminin tümüne mutasyon denilmektedir.

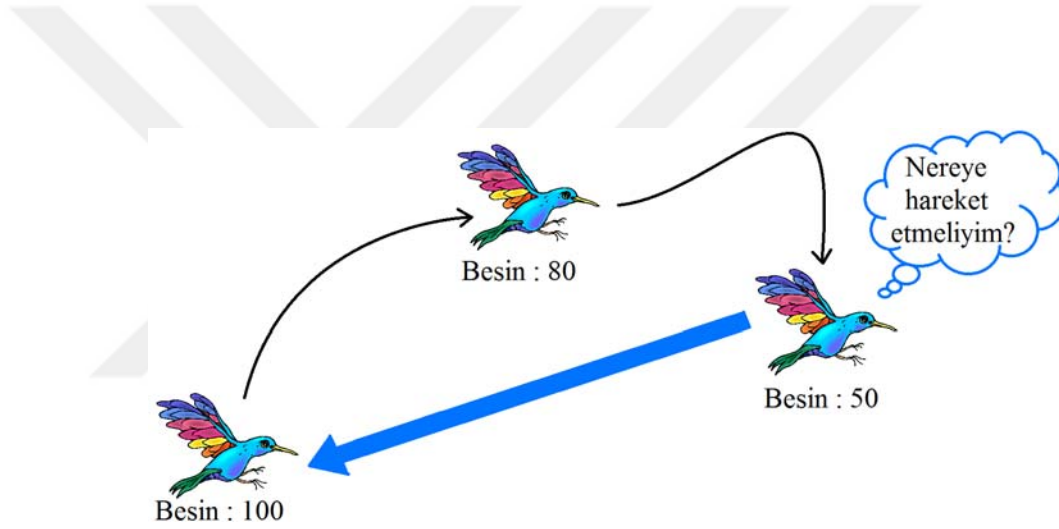
Çaprazlama işleminde, 0 ile 1 arasında rastgele üretilen bir sayının çaprazlama oranından küçük olması (veya büyük olması) durumunda yeni jenerasyonu oluşturacak elemanlar mutasyona uğramış bireyden, değilse ebeveynden (mevcut bireyden) alınmaktadır.

Diferansiyel gelişim algoritması özellikle nümerik optimizasyon problemleri için geliştirildiğinden bu tür problemlere oldukça hızlı çözümler üretmektedir. Ancak, algoritmanın performansının başlangıçta oluşturulan çözümlerin farklılığına oldukça bağlı olmasından dolayı, araştırma uzayında çok sayıda lokal minimum bulunması halinde küresel minimumu bulma performansı düşüktür (Karaboğa 2011).

2.5.2 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

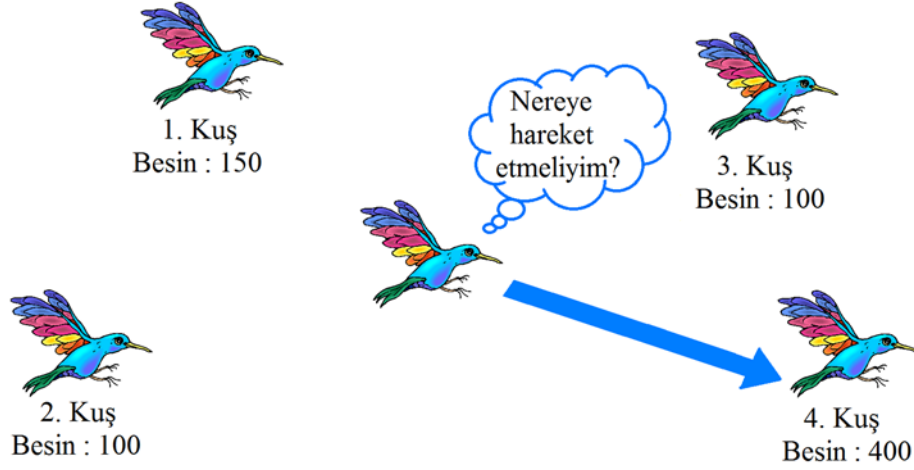
Parçacık sürü optimizasyonu sürü halinde hareket eden kuş, balık ve böcek gibi hayvanların yiyecek arama esnasında, çoğu zaman rastgele sergilemiş oldukları davranışların amaçlarına daha kolay ulaşmalarını sağladığı fikrinden yola çıkılarak geliştirilmiştir. Çok parametrelili ve çok değişkenli optimizasyon problemlerine çözümler üretmek için kullanılmaktadır.

Şekil 2.21’de görüldüğü gibi, PSO algoritmasında her bir birey (parçacık) bulunduğu pozisyonların bilgisini muhafaza etmektedir. Şekil 2.21 ve Şekil 2.22’de bulunan besin sayıları çözüm değerlerini ifade etmektedir.



Şekil 2.21. Her bir birey bulunduğu pozisyonların bilgisini saklar (Kachitvichyanukul 2009).

Her birey, tecrübelerinden yararlanarak sürüdeki en iyi pozisyona sahip bireye doğru yaklaşır (Şekil 2.20). Sürüdeki en iyi değere sahip bireye küresel en iyi (global best-gbest), bireyin mevcut duruma kadar olan en iyi değerine ise lokal en iyi (local best-lbest) adı verilir (Bastı 2012).



Şekil 2.22. Her bir birey sürüdeki diğer üyelerden bilgi alır (Kachitvichyanukul 2009).

Bir sürünün hareket eden n_s tane parçacıktan oluştuğunu varsayalım. i . parçacığın t anındaki pozisyonunu gösteren $x_i(t)$, $v_i(t)$ hızı ilave edilmek suretiyle değiştirilir.

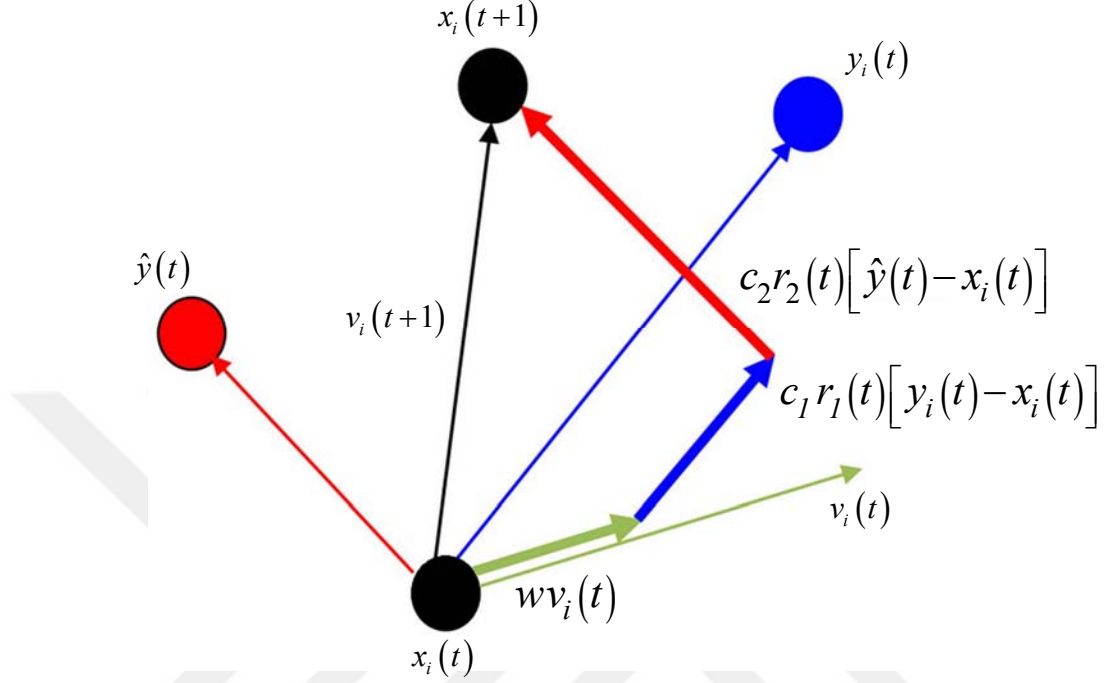
$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (2.76)$$

Buradaki hız vektörü hem parçacığın tecrübesini hem de sürüdeki komşularından elde ettiği bilgiyi yansıtır. i . parçacığın en iyi lokal pozisyonuna (lbest) $y_i(t)$ ve sürü tarafından bulunan en iyi pozisyona (gbest) $\hat{y}(t)$ dersek, i . parçacığın j . boyuttaki hızı aşağıdaki gibi olur (Engelbrecht 2007).

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1r_{1j}(t)[y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2r_{2j}(t)[\hat{y}_j(t) - x_{ij}(t)] \quad (2.77)$$

Burada w , i . parçacığın önceki hızının yeni hıza katkısını ayarlayan eylemsizlik ağırlığını (orijinal PSO için $w=1$); $v_{ij}(t)$ ve $x_{ij}(t)$, j . boyuttaki ($j=1, \dots, n$) i . parçacığın t anındaki hızını ve pozisyonunu; c_1 ve c_2 sürüdeki komşulardan elde edilen bilginin hız vektörüne katkısını ölçeklendiren pozitif ivme sabitlerini; r_{1j} ve r_{2j} ise $[0,1]$ aralığında düzgün dağılımdan üretilen rastgele değerleri göstermektedir. Bu değerler, algoritmaya stokastik (rastgele değışkene sahip olma) bir özellik sağlamaktadır (Karaboğa 2011).

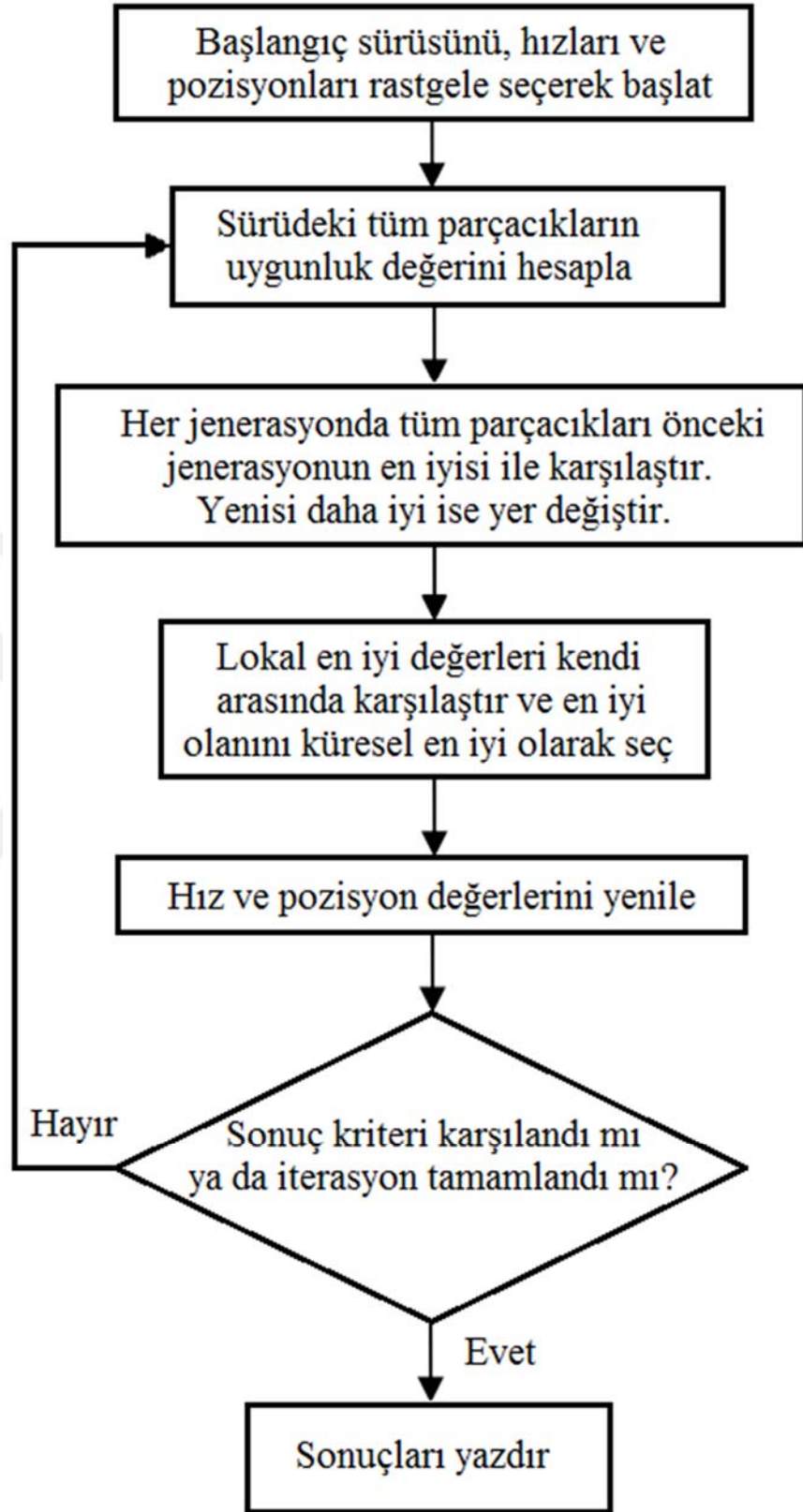
Şekil 2.23'te (2.19) denkleminin geometrik anlatımı bulunmaktadır.



Şekil 2.23. i . parçacığın hız ve pozisyon değişimlerinin geometrik gösterimi (El-Sawy ve ark. 2013).

PSO algoritma performansı kontrol parametrelerinin değerlerinden oldukça fazla etkilenmektedir. Ancak, PSO algoritmasının çok basit yapıda olması ve performansının DE algoritması kadar başlangıç popülasyonuna bağlı olmaması nedeniyle çok modlu problemlerin çözümünde oldukça fazla kullanılmaktadır (Karaboğa 2011). Ayrıca PSO algoritması kombinatoriyal (çözüm kümesi ayrık olan) optimizasyon problemlerinin çözümü için oldukça etkili bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Huang ve Dun 2008).

Şekil 2.24'te PSO algoritmasının akış diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.24. Parçacık sürü optimizasyonu akış diyagramı (Özsağlam ve Çunkaş 2008).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Fiber Optik Sensör Dizisi Tasarımı

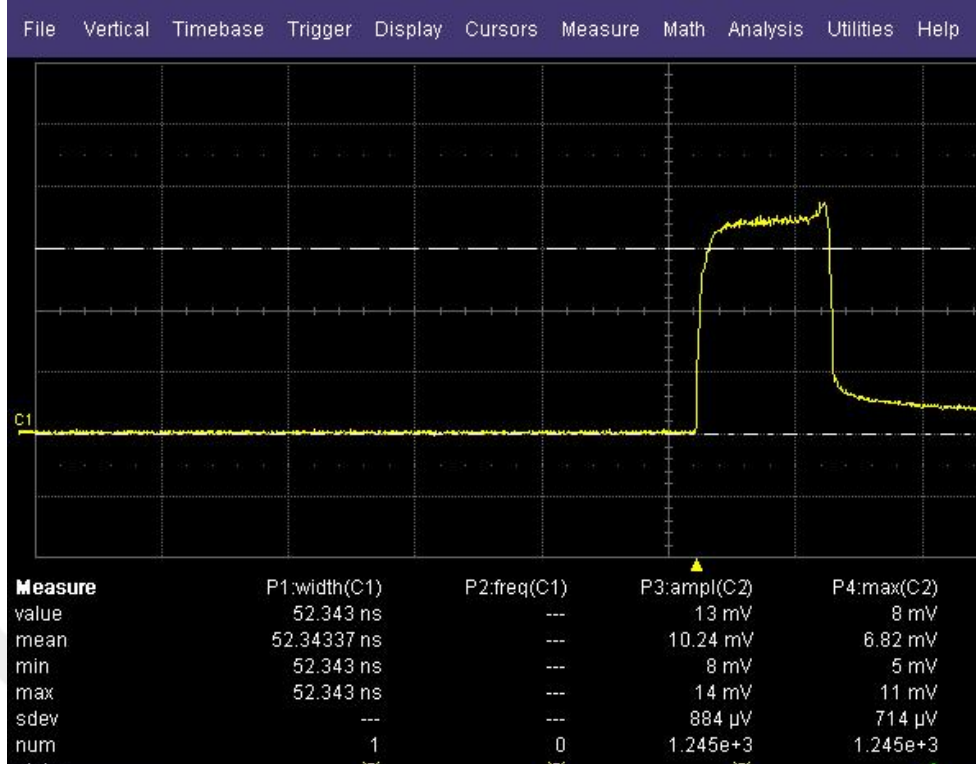
Yansıma tabanlı fiber optik sensörler üzerine literatür araştırması yapılarak, deney düzeneği ile ilgili kavramsal tasarım tamamlandıktan sonra, kullanılacak fiber optik pasif elemanlar ve fiber bağlantılar belirlenmiştir. Dumlupınar Üniversitesi destekli 2014-04 numaralı bilimsel araştırma projesi (BAP) kapsamında, ilgili firmalardan alımlar gerçekleştirilmiş, bu malzemelerin alımları süresince fiziksel ön tasarım çalışmaları yapılarak fonksiyonel testleri gerçekleştirilmiştir. Tasarım çalışmaları sonucunda, fiber optik sensör dizisinde, Şekil 3.1’de görülen Shenzen Golight Technology marka, nanosaniye atımlı ($5 - 50 \text{ ns}$ darbe genişliği, ayarlanabilir), 10 kHz tekrarlama frekanslı, 1550 nm ’de çalışan yüksek tepe güçlü (10 W maksimum tepe gücü, ayarlanabilir) fiber optik darbeleri lazer kaynağı kullanılmasının daha uygun olduğu görülmüş ve tedarik edilmiştir. Böylece proje kapsamında kullanılması gereken sensör fiber uzunlukları, yaklaşık 20 km mesafesinden yüzlerce kat küçültülerek $50 - 100 \text{ metre}$ civarına düşürülmüştür. Bu durum birçok bakımdan avantaj sağlamaktadır:

- Fiber uzunluğunun düşürülmesi fiber kablo maliyetini önemli oranda azaltmaktadır.
- Portatif bir sensör sistem prototipi için küçük hacimli oluş oldukça önemlidir. Fiber mesafesinin düşürülmesiyle birlikte istenilen küçüklükte prototip yapılması mümkün kılınmaktadır.
- Daha küçük darbe genişlikli (ns atımlı) fiber lazer kullanılması sayesinde, daha hızlı ölçüm yapabilen, daha uzaktan algılama yeteneğine sahip ve daha fazla sensör başlığı içeren bir sensör dizi sisteminin gerçekleştirilmesi mümkün olmaktadır.
- Fiber uzunluklarının yüzlerce kat düşürülmesiyle, fiberlerde meydana gelen güç kayıpları azaltılmakta, sistem güç bütçesi daha verimli bir şekilde kullanılmaktadır.

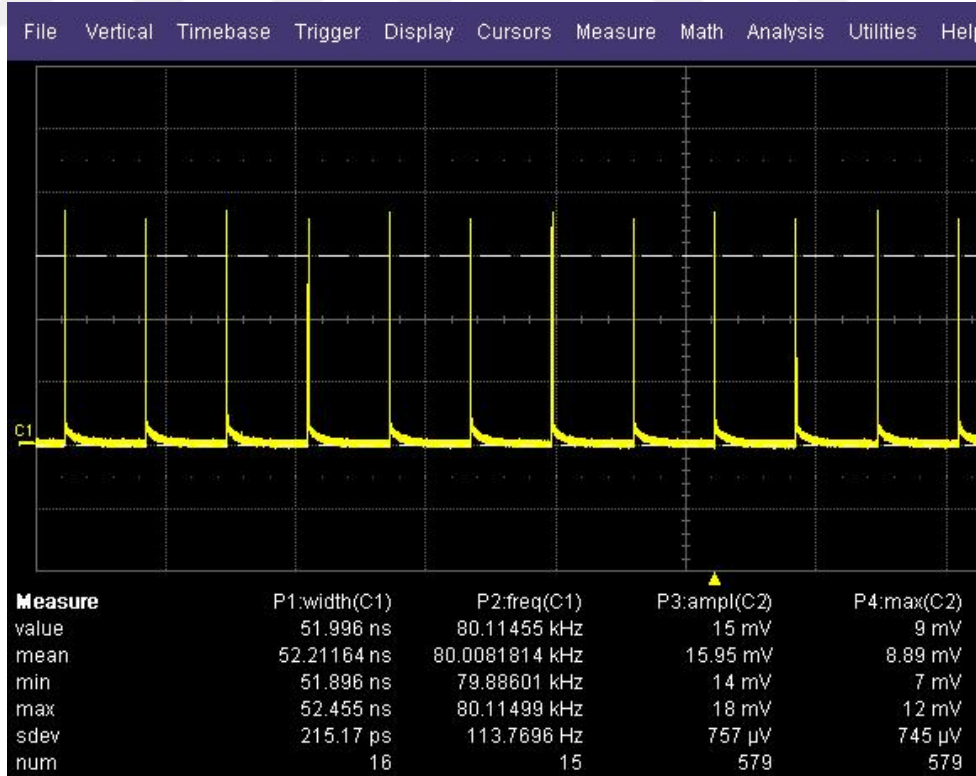


Şekil 3.1. Nanosaniye atımlı lazer kaynak.

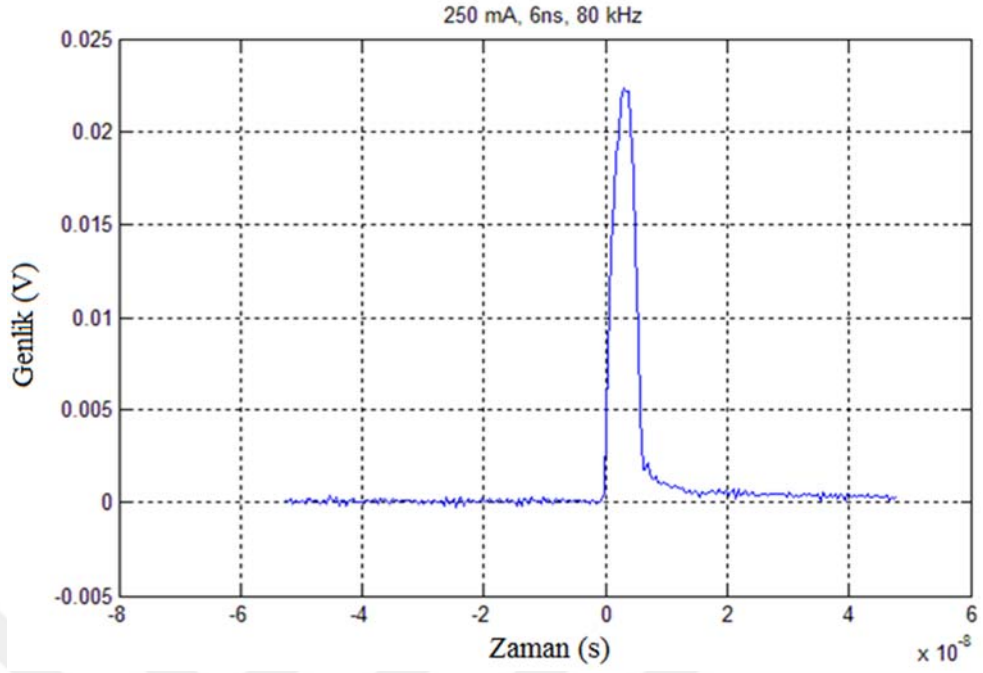
Bu avantajların yanında yeni sistemde, daha yüksek hızlarda çalışan, yüksek bant genişliği ve örnekleme frekansına sahip bir dijital osiloskop (2 GS/s örnekleme oranı) ve fotodedektör (minimum 1 GHz bant genişliği) kullanılması gerekmektedir. Bu özelliklere sahip bir dijital osiloskop (veya bir DAQ kartı) ve fotodedektör alımı için araştırmalar yapılmıştır. Aynı zamanda, ihtiyaç duyulan dijital osiloskop ve fotodedektör hızlarını tespit etmek amacıyla, nanosaniye atımlı fiber lazerin testleri, FiberLAST (Orta Doğu Teknik Üniversitesi-Teknokent) firmasının bünyesindeki cihazlarla yapılmıştır. Testlerin sonuçları Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de gösterilmektedir.



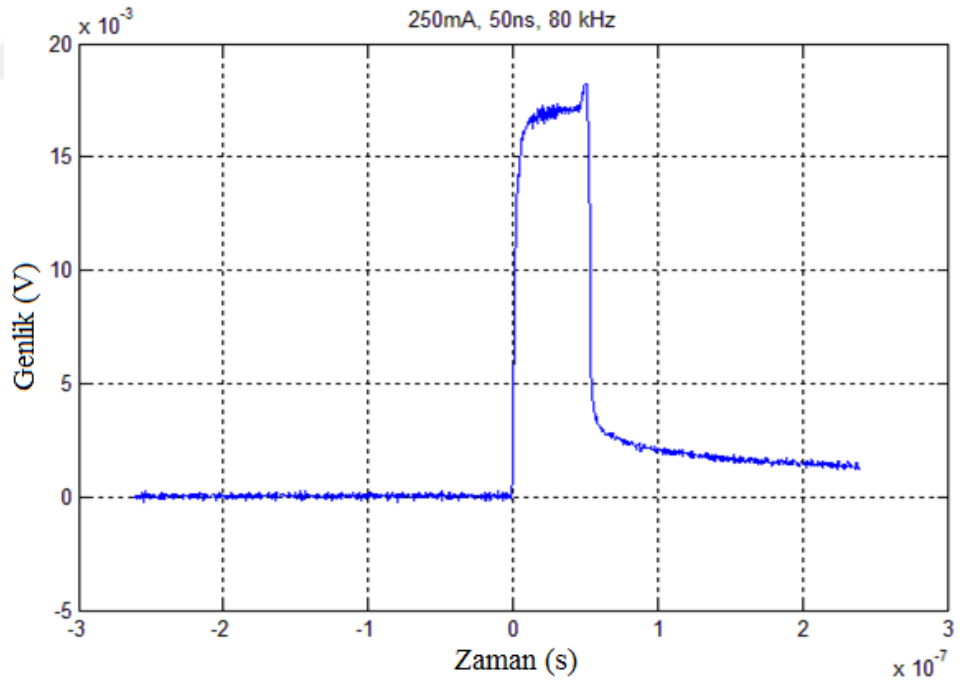
Şekil 3.2. Nanosaniye atımlı lazer kaynağın 50 ns darbe genişlikli atımı.



Şekil 3.3. Nanosaniye atımlı lazer kaynağın 80 kHz frekanslı atım treni.



Şekil 3.4. Optik lazer kaynağı, 6 ns bant genişliğine, 250 mA akım değerine ve 80 kHz frekansına ayarlandığında, görülen darbe şekli.



Şekil 3.5. Optik lazer kaynağı, 50 ns bant genişliğine, 250 mA akım değerine ve 80 kHz frekansına ayarlandığında, görülen darbe şekli.

Bu testler sonucunda en az 2 GS/s örnekleme hızında bir dijital osiloskop (veya benzer performansta veri sayısallaştırma yeteneğine sahip bir DAQ kartı) ve minimum 1 GHz bant genişliğine sahip bir InGaAs fotodetektörün yeterli olacağına karar kılınmıştır. Ayrıca fotodetektör ile osiloskop arasında kullanılan $50\ \text{ohm}$ sonlandırılmalı koaksiyel kablunun sonuçların doğru olarak gözlemlenmesinde çok önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

İhtiyaç duyulan 2 GS/s örnekleme hızlı osiloskop, nanosaniye atımlı lazer kaynağın beslemesinde kullanılan düşük salınımlı 5 V DC güç kaynağı ve düzeneğin oluşturulmasında en önemli cihazlardan birisi olan FİTEL S176CF fiber optik kablo füzyon ek cihazı ve aparatları Dumlupınar Üniversitesi, Fotonik Araştırma Laboratuvarından temin edilmiştir. Fiber optik kablo ek cihazı, piyasada mevcut olan fiber çeşitlerinin çoğunu füzyon yöntemi ile ekleyebilecek yetenektedir. Bu cihazların resimleri Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3.6. Agilent DSO-X 2002A dijital osiloskop.



Şekil 3.7. DC güç kaynağı.



Şekil 3.8. FITEL S176CF model füzyon fiber ek cihazı.

Optik sinyallerin algılanması için ihtiyaç duyulan 5 GHz bant genişliğine sahip InGaAs fotodedektör ve 2×4 fiber optik dağıtıcı yine 2014-04 numaralı BAP kapsamında satın alınmıştır. Bu cihazların resimleri Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da görülmektedir.

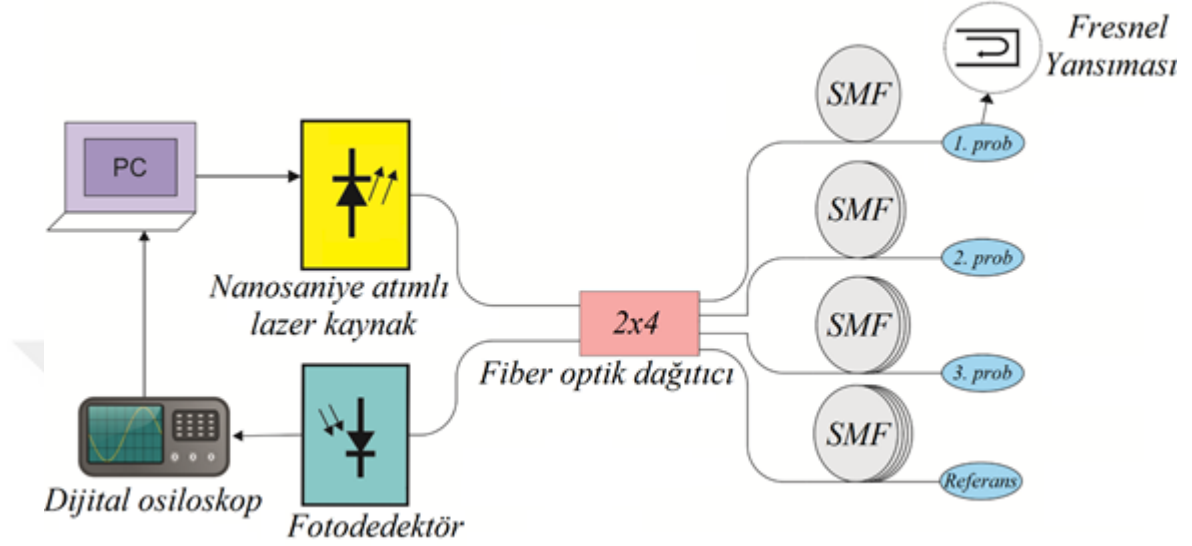


Şekil 3.9. 2×4 fiber dağıtıcı.



Şekil 3.10. 5 GHz bant genişlikli InGaAs fotodedektör.

Dumlupınar Üniversitesi, Fotonik Araştırma Laboratuvarında geliştirilen yansıma tabanlı fiber optik sensör dizisinin sistem modeli Şekil 3.11’de verilmektedir.



Şekil 3.11. Yansıma tabanlı fiber optik sensör dizisinin sistem modeli.

Şekil 3.11’de görülen yansıma tabanlı fiber optik sensör dizisinde, fotodetektörden elde edilen elektriksel sinyaller yüksek örnekleme hızına sahip osiloskop yardımıyla gözlemlenerek bilgisayara aktarılmakta ve bu veriler MATLAB programında geliştirilen yazılımla işlenerek sonuçlar elde edilmektedir.

Gerçekleştirilen fiber optik ölçüm sisteminin çalışma prensibi, zamanda ayrışmasına yetecek kadar farklı uzunluklara sahip 4 adet SMF ve FC/PC konnektörden (prob) yansıyan sinyal atımlarının genlik değerlerinin ölçümüne dayanmaktadır (Chang ve ark. 2002). 4 adet optik sinyalin tam olarak birbirinden ayrışması için optik fiberlerin iletim mesafesi performans analizi uygulamalı olarak çalışılmalıdır.

3.1.1 Fiber Optik Kabloların İletim Mesafesi Analizi

Fiber optik kabloların iletim mesafesi analizinin yapılabilmesi için, öncelikle ışığın fiber optik kablo içindeki hızının bilinmesi gerekmektedir. Işığın boşluktaki hızının $c = 299792.458 \text{ km/s}$ olduğu bilinmektedir (CGPM 1983). Böylece ışığın boşlukta kilometre başına gecikme değeri ($\Delta t_{\text{boşluk}}$):

$$\Delta t_{\text{boşluk}} = \frac{1 \text{ km}}{c} = \frac{1 \text{ km}}{299792.458 \text{ km/s}} = 3.33564095 \mu\text{s} \quad (3.1)$$

ile hesaplanmaktadır. Ancak, optik fiberin kırılma indisi değeri $n_f > 1$ olduğu için ışık optik fiberin içerisinde boşluktan daha yavaş hareket eder.

Fiberin kırılma indisi değeri sadece fiber çekirdeğinin (core) veya kılıfının (cladding) kırılma indisini tanımlamaktadır. Efektif grup kırılma indisi değeri n_{eff} ise ışığın fiber içerisinde yol alırken karşılaştığı bütün kırınım indislerinin ağırlıklı ortalamasını ifade etmektedir. Bundan dolayı, bu değer ışığın fiber içerisindeki gerçek davranışını temsil etmektedir. Böylece, gecikme süresi uygulamalarında n_{eff} parametresini kullanmak daha yararlı olmaktadır. Standart tek modlu fiberin 1550 nm dalgaboyundaki efektif grup kırılma indisi 1.4682 değerindedir (Corning 2012).

Buna göre, 1550 nm dalgaboyundaki ışığın tek modlu fiber içerisindeki hızı ($c_{1550 \text{ nm}}$):

$$c_{1550 \text{ nm}} = \frac{c}{n_{\text{eff}}} = \frac{299792.458 \text{ km/s}}{1.4682} = 204190.477 \text{ km/s} \quad (3.2)$$

olarak bulunmaktadır. Işığın fiber optik kablo içerisindeki hızı kullanılarak, metre başına optik gecikme hesaplanılabilir:

$$\Delta t_{\text{fiber}} = \frac{1}{c_{1550 \text{ nm}}} = \frac{1}{204190477 \text{ m/s}} = 4.89738804 \text{ ns/m}. \quad (3.3)$$

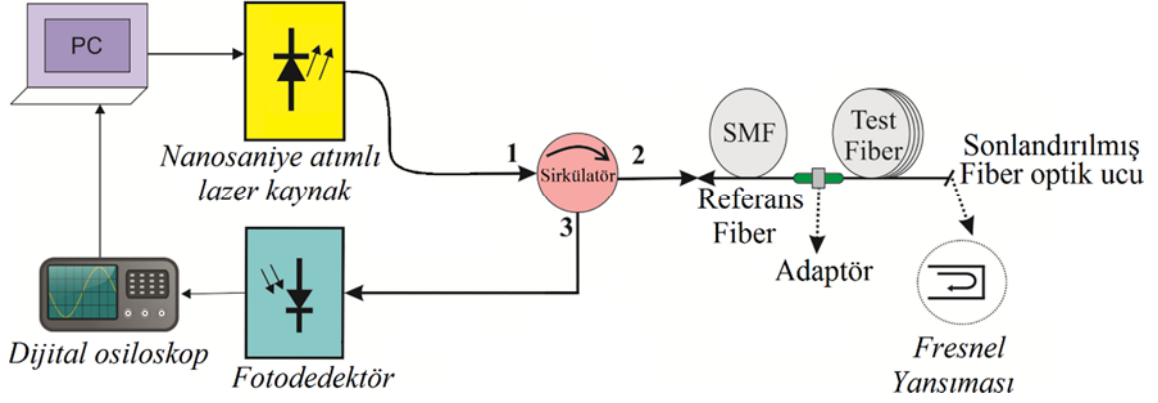
Şekil 3.11’de görüldüğü üzere, gerçekleştirilen fiber optik sensör dizisinde FC/PC konnektörlerden yansıyan sinyal atımlarının birbirinden ayrışmasına yetecek uzunlukta fiber optik sensörler kullanmamız gerekmektedir. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi nanosaniye atımlı lazer kaynak, maksimum 52.455 ns darbe genişliğinde sinyal üretmektedir. Yansıyan sinyallerin dispersiyon kaynaklı darbe bozulmaları nedeniyle üst üste gelmelerini engelleyerek, birbirlerinden tam olarak ayrışmaları için her darbeden sonra 4 katı boşluk seçildiğinde, istenilen gecikme $\Delta t_{ist} = 262.275\text{ ns}$ olmaktadır. Böylece, fiber optik sensörlerin her birinin arasındaki fiber optik uzunluk farkı (ΔL):

$$\Delta L = \frac{1}{2} \times \frac{\Delta t_{ist}}{\Delta t_{fiber}} = \frac{262.275\text{ ns}}{2 \times 4.89738804\text{ ns/m}} = 26.777\text{ m} \quad (3.4)$$

ile bulunmaktadır. Burada $1/2$ katsayısı, optik sinyalin giderken ve yansırken aldığı toplam mesafenin fiber uzunluğunun iki katı olması nedeniyle denkleme dâhil edilmektedir. Böylece, $\Delta L \approx 30\text{ m}$ alınarak, üç sensörde ve referansta kullanılan tek modlu fiberin uzunlukları sırasıyla 40, 70, 100 ve 130 metre olmaktadır. İlk sensörde 40 metre uzunluğunda fiber kullanılmasının sebebi, 2×4 fiber dağıtıcının girişinden yansıyan istenmeyen sinyalden, birinci sensörden yansıyan sinyalin tam olarak ayrıştırılması içindir.

3.1.2 Basit Bir Fiber Optik Uzunluk Ölçüm Sistemi

Gerçekleştirilen fiber optik ölçüm sisteminin çalışma prensibi, referanstan ve ölçülecek fiber optik kablodan yansıyan sinyal darbelerinin arasındaki zaman farkı değerinin ölçümüne dayanmaktadır. Referans ve test fiber uzunlukları yansıyan sinyallerin zamanda ayrışmasına yetecek kadar farklı olmalıdır.



Şekil 3.12. Fresnel yansıma tabanlı fiber optik uzunluk ölçüm sisteminin deney düzeneği.

Ölçüm sisteminin deney düzeneği Şekil 3.12’de gösterilmektedir. Optik sirkülatörün 1. portuna (giriş portu) bağlanan, nanosaniye atımlı bir lazer kaynağı tarafından, 50 ns bant genişliğine, 1550 nm dalgaboyuna ve 10 kHz tekrarlama frekansına sahip bir optik darbe üretilmektedir. Sirkülatörü geçen optik sinyal 2. port fiberine ark füzyon ekiyle eklenmiş olan FC/PC konnektörlü referans fiberine ulaşmaktadır. Referans fiberin çıkışına ise bir FC/PC adaptör sayesinde ölçülecek test fiberi bağlanmaktadır. Ölçümlerde referans fiberi ile test fiberi arasındaki gecikme süresine bakıldığı için referans fiberin boyu önemli değildir. Fresnel yansımasından dolayı referans ve test fiber uçlarındaki FC/PC konnektörlerden yansıyan optik sinyaller sirkülatörün 3. Portuna bağlı 5 GHz bant genişliğine sahip bir fotodedektör tarafından algılanmaktadır. Algılanan bu sinyaller 2 GS/s örnekleme hızında bir dijital osiloskop yardımıyla gerçek zamanlı olarak ölçülmekte ve bilgisayara aktarılmaktadır. Bu veriler MATLAB programı yardımıyla geliştirilen yazılımla işlenerek sonuçlar elde edilmektedir.

Bu basit ölçüm tekniği sayesinde farklı fiber optiklerin uzunlukları yüksek çözünürlüklü ve çok hızlı olarak ölçülebilmektedir.

3.1.3 Fiber Optik Sensör Dizisi ile Kırılma İndisi Ölçümü

Fresnel yansıma tabanlı fiber optik sensör sisteminin doğruluğunu tespit etmek için, öncelikli olarak, kırılma indisi değeri bilinen farklı çözücü ve solüsyonlar ile ölçüm çalışmaları yapılmıştır. Yapılan tekrarlı çalışmalarla, geliştirilen nanosaniye atımlı 1550 nm dalgaboyunda çalışan fiber optik sensör sisteminin kısa ve uzun zamanlı kararlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Kırılma indisi değeri bilinen farklı çözücü ve solüsyonlar ile ölçüm çalışmaları iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada fiber-hava ara yüzeyinden Fresnel yansıması ile yansıyan optik sinyalin genlik değerleri alınmaktadır. İkinci aşamada fiber optik konnektör kırılma indisi ölçülecek sıvı içerisine daldırılarak fiber-sıvı ara yüzeyinden yansıyan optik sinyalin genlik değerleri alınmaktadır. Her iki durum için yansıyan optik sinyalin genlik değerindeki oransal değişim ile sıvının kırılma indisi değeri hesaplanabilmektedir (Kim ve Su 2004).

Optik kaynaktan gönderilen giriş sinyalinin her bir sensör ve referans probuna eşit seviyede ulaştığı varsayılırsa, bütün sensör problemleri ve referans probu hava ortamında tutulurken, fiber-hava arayüzeyinden yansıyan optik sinyallerin ışık şiddeti (genlik) değerleri arasındaki fark kullanılarak problemler arasındaki zayıflama düzeltme katsayısı (K_j) elde edilmektedir (Su ve Huang 2007):

$$K_j = \frac{I_j}{I_r}, \quad j = 1, 2, 3. \quad (3.5)$$

Burada I_j sensör problemlerinden yansıyan sinyallerin ışık şiddeti, I_r referans probundan yansıyan sinyalin ışık şiddeti, j ise sensör prob numarasıdır. Zayıflama düzeltme katsayısının (K_j) değeri, fiber optik dağıtıcının optik sinyali 4 çıkışa bölme oranına ve her bir sensör kolundaki fiber optik uzunluğuna göre değişmektedir.

Bütün sensör problemleri aynı sıvının içerisine daldırıldığı zaman, sensör problemlerinden yansıyan sinyaller ölçülmekte ve referans probundan yansıyan sinyal ile normalize edilmektedir. Böylece bağıl yansıma katsayısı (Xu ve ark. 2013):

$$R_j = \frac{I'_j}{I_r} \left(\frac{1}{K_j} \right), \quad j = 1, 2, 3 \quad (3.6)$$

ile gösterilmektedir. Burada I'_j sensör problemleri sıvı içerisinde daldırıldığında problemlerden yansıyan sinyallerin ışık şiddetidir.

3 sensör probu için ortalama bağıl yansımaya katsayısı, ölçülmek istenen sıvının kırılma indisi n_s 'ye bağlı olarak hesaplanmaktadır (Kim ve Su 2004):

$$R_{ort} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 R_j = \left(\frac{n_f + n_h}{n_f - n_h} \right)^2 \left(\frac{n_f - n_s}{n_f + n_s} \right)^2. \quad (3.7)$$

Burada n_f tek modlu fiberin efektif kırılma indisi, n_s ve n_h ise sırasıyla sıvının ve havanın kırılma indisi değerleridir. Havanın kırılma indisi değeri Weast ve Selby (1968) tarafından 1.0002739 olarak hesaplanmıştır.

(3.7)'nin karekökünü alınarak, n_f değeri için $n_s < n_f$ ve $n_s > n_f$ olmak üzere iki farklı kök elde edilmektedir.

$n_s < n_f$ durumunda,

$$n_s = n_f \left\{ \frac{\left(\frac{n_f + n_h}{n_f - n_h} \right) - \sqrt{R_{ort}}}{\left(\frac{n_f + n_h}{n_f - n_h} \right) + \sqrt{R_{ort}}} \right\} \quad (3.8)$$

$n_s > n_f$ durumunda,

$$n_s = n_f \left\{ \frac{\left(\frac{n_f + n_h}{n_f - n_h} \right) + \sqrt{R_{ort}}}{\left(\frac{n_f + n_h}{n_f - n_h} \right) - \sqrt{R_{ort}}} \right\}.$$

Fiberin efektif kırılma indisi olan n_f , katalog yardımıyla bulunabilen fiber grup indisi n_g ile dispersiyon bağıntısı yardımıyla hesaplanmaktadır (Liu 2005):

$$n_f = n_g + \frac{dn_f}{d\lambda} \lambda. \quad (3.9)$$

Kullanılan fiberin grup indisi değeri n_g , tipik bir ticari tek modlu fiber (SMF-28) için 1550 nm dalgaboyunda 1.4681'dir (Corning 1999).

Silika malzemesi için dispersiyon bağıntısı, n_f 'nin sinyal dalgaboyunun (λ) bir fonksiyonu olarak bulunabildiği Sellmeier denklemi ile verilmektedir (Liu 2005):

$$n_f = \left(1 + 0.6961663 \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684043^2} + 0.4079426 \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1162414^2} + 0.8974794 \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 9.896161^2} \right)^{1/2}. \quad (3.10)$$

(3.10) denklemi (3.9)'da yerine konduğunda ve $\lambda = 1.55 \mu m$ alındığında (dalgaboyu μm cinsinden yazılmalıdır), n_f değeri 1.44953 olarak elde edilmektedir.

Bu veriler kullanılarak yapılan ölçümlerle herhangi bir sıvının kırılma indisi değeri hesaplanabilmektedir.

3.2 FSO Haberleşme Sistem Modeli ve Kesinti Olasılığı (Outage Probability) İfadeleri

FSO haberleşme sistem modelinde, kaynak ve hedef arasına N adet rölenin, Şekil 2.16'da gösterildiği gibi seri veya Şekil 2.17'de gösterildiği gibi paralel yerleştirildiği röle destekli iletim hedeflenmektedir.

Sinyal modülasyonu için, ışık şiddeti modülasyonlarından biri olan ve IEEE 802.15.4a standardında yer alan (Sabucu ve Erköçük 2013) ikili darbe konum modülasyonu (binary pulse position modulation-BPPM) tanımlanmaktadır. Bu modülasyonda optik verici, bit süresinin yarısında sinyal göndermekte, diğer yarısında ise göndermemektedir. Alıcı çeşidi olarak BPPM gibi evre uyumsuz olan doğrudan algılamalı alıcılar (direct detection receiver) kullanılmaktadır (Safari ve Uysal 2008a). Rölelerin bilgi aktarımı çöz ve aktar (DF) metodu ile gerçekleştirilmektedir. Atmosferik kanalın yol kaybı ve log-normal dağılımlı çalkantı kaynaklı sönümlenmeye sebep olduğu hesaplanmaktadır.

Seri DF röleli FSO haberleşme sisteminde, kaynak BPPM ile modüle edilen optik sinyali en yakın röleye göndermektedir. Röle doğrudan algılama ile sinyalin kodunu çözmekte ve BBPM ile tekrar kodlayarak bir sonraki röleye göndermektedir. Sinyal alıcıya ulaşana kadar bu işlemler devam etmektedir. Paralel DF röleli FSO haberleşme sisteminde, kaynak çoklu lazer gönderimine sahiptir ve BPPM ile modüle edilen optik sinyali N adet röleye aynı anda göndermektedir. Her bir röle gelen sinyalin kodunu çözmekte ve tekrar kodlayarak alıcıya göndermektedir.

FSO sistemlerinin performansını sınırlayan en önemli faktör olan atmosferik çalkantı, çok yavaş değişen bir sönümlenme hızına sahiptir. Kanal uyum zamanının $1-100$ ms arasında olduğu göz önüne alınırsa, tipik iletim hızlarında milyonlara varan ardışık bitlerin gönderilmesi süresince kanal bayılması sabit kalmaktadır (Lee ve Chan 2004). Yavaş sönümlenmeli kanallarda, kanal kapasitesi bazen hesaplanamamaktadır (Engin 2015). Bu nedenle kanal kapasitesi yerine, FSO haberleşme sistemlerinde önemli bir performans kriteri olan kesinti olasılığı kavramı kullanılmaktadır.

Şekil 2.16'da gösterilen seri DF röleli FSO haberleşmesi için kesinti olasılığı (Safari 2010):

$$P_{\text{kesinti_seri}} = 1 - \prod_{i=1}^{N+1} \left(1 - Q \left(\frac{\ln \left(\frac{L(d_i) P_M}{(N+1)} \right) + 2\mu_z(d_i)}{2\sigma_z(d_i)} \right) \right) \quad (3.11)$$

ile verilmektedir. Burada N röle sayısı, $Q(\cdot)$ fonksiyonu $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{(-u^2/2)} du$ denkleminde, d_i Şekil 2.16'da gösterilen i . SISO hattının uzunluğu, $L(d_i)$ denklem (2.10)'da ifade edilen d_i mesafesine bağlı normalize yol kaybı, $\sigma_\chi(d_i)$ log-geçerlik standart sapmasının d_i mesafesine bağlı değeri ((2.75)'te verilen düzlem dalgalar için log-geçerlik varyansının iletim mesafesine bağlı değerinin karekökü), $\mu_\chi(d_i)$ log-geçerlik ortalamasının d_i mesafesine bağlı değeri ($\mu_\chi = -\sigma_\chi^2$), P_M ise güç marjıdır (Safari ve Uysal 2008a) ve

$$P_M = P_T / P_{th} \quad (3.12)$$

ile tanımlanmaktadır. P_{th} seri röle destekli iletimde hiçbir kesinti olmamasını sağlayan eşik iletim gücünü, P_T ise toplam iletim gücünü temsil etmektedir.

$$P_T = P_{verici} + \sum_{j=1}^N P_j \quad (3.13)$$

denkleminde açıklanmaktadır. Burada P_{verici} kaynağın gücünü, P_j ise j . rölenin gücünü ifade etmektedir.

Şekil 2.17'de gösterilen paralel DF röleli FSO haberleşmesi için kesinti olasılığı (Safari 2010):

$$\begin{aligned}
P_{\text{kesinti_paralel}} = & \sum_{i=1}^{2^N} \left[\prod_{j \in W(i)} \left(1 - Q \left(\frac{\ln \left(\frac{L(d_{V,j}) P_M}{2N} \right) + 2\mu_\chi(d_{V,j})}{2\sigma_\chi(d_{V,j})} \right) \right) \right] \times \prod_{j \notin W(i)} \left[Q \left(\frac{\ln \left(\frac{L(d_{V,j}) P_M}{2N} \right) + 2\mu_\chi(d_{V,j})}{2\sigma_\chi(d_{V,j})} \right) \right] \\
& \times Q \left(\frac{\ln \left(\frac{P_M e^{\mu_\xi}}{2N} \right)}{\sigma_\xi(\bar{d}_{W(i)})} \right)
\end{aligned} \tag{3.14}$$

ile verilmektedir. Burada $d_{V,j}$ Şekil 2.17’de gösterilen verici ile j . röle arasındaki mesafe, $L(d_{V,j})$ denklem (2.68)’de ifade edilen verici ile j . röle arasındaki mesafeye bağlı normalize yol kaybı, $\sigma_\chi(d_{V,j})$ log-genlik standart sapmasının verici ile j . röle arasındaki mesafeye bağlı değeri, $\mu_\chi(d_{V,j})$ log-genlik ortalamasının verici ile j . röle arasındaki mesafeye bağlı değeridir.

Paralel DF röleli modelde, optik kaynağın gönderdiği işaretin kodunun N adet röle içerisinde hangileri tarafından çözüldüğü olasılık seti 2^N ihtimalden oluşmaktadır. (3.14)’teki $W(i)$ bu olasılık seti içerisinde i . ihtimali göstermektedir. Röleler ve alıcı arasındaki kod çözülme olasılık setinin mesafelerinin tamamı ise $\bar{d}_{W(i)}$ ile tanımlanmıştır.

Log-genlik faktörünün ortalama değeri (μ_ξ) ve varyansı (σ_ξ^2):

$$\mu_\xi(\bar{d}_{W(i)}) = \ln \sum_{i \in W(i)} L(d_{i,A}) - \frac{\sigma_\xi^2(\bar{d}_{W(i)})}{2} \tag{3.15}$$

$$\sigma_{\xi}^2(\bar{d}_{W(i)}) = \ln \left(1 + \frac{\sum_{i \in W(i)} L^2(d_{i,A}) (e^{4\sigma_x^2} - 1)}{\left(\sum_{i \in W(i)} L(d_{i,A}) \right)^2} \right) \quad (3.16)$$

ile tanımlanmaktadır (Safari 2010).

3.3 Röle Destekli FSO Haberleşme Sisteminin İletim Mesafesi Optimizasyonu

Seri ve paralel DF röleli FSO haberleşme sistemlerinde, rölelerin konumlarını değiştirerek sistem kesinti olasılığını minimize etmek optimizasyon probleminin temelini oluşturmaktadır. Seri ve paralel DF röleli sistemler için tanımlanan f fonksiyonu:

$$\min \{P_{kesinti_seri}\} = \min \{f(d_1, d_2, \dots, d_N)\} \quad (3.17)$$

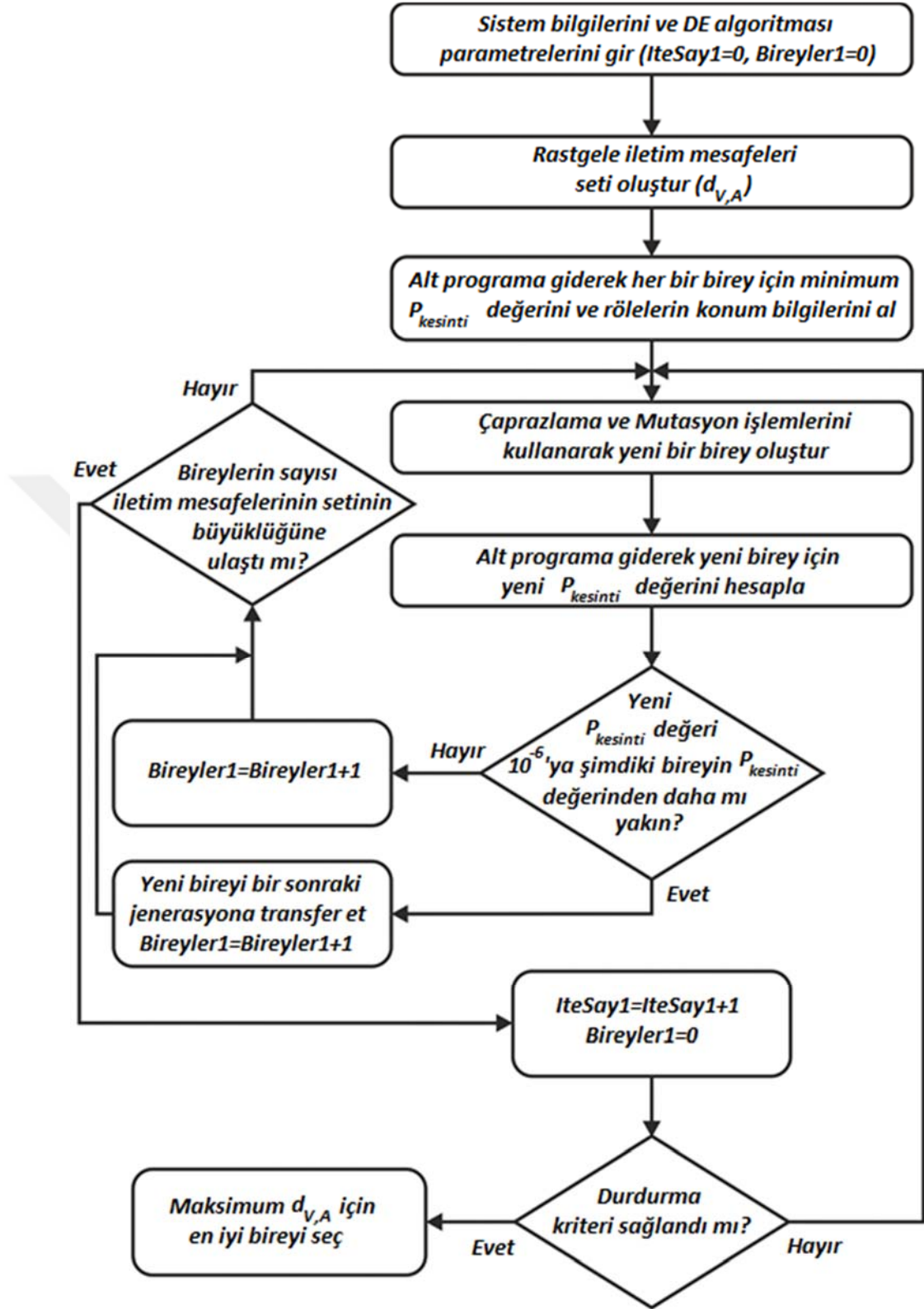
$$\min \{P_{kesinti_paralel}\} = \min \{f(d_{V,1}, d_{V,2}, \dots, d_{V,N})\} \quad (3.18)$$

denklemleri ile verilmektedir. Kesinti olasılığını minimum değere çekmek yerine, hedef bir değerde tutarak verici ve alıcı arasındaki mesafeyi maksimize etmek, röle destekli FSO haberleşme sisteminin iletim mesafesi optimizasyon problemini tanımlamaktadır.

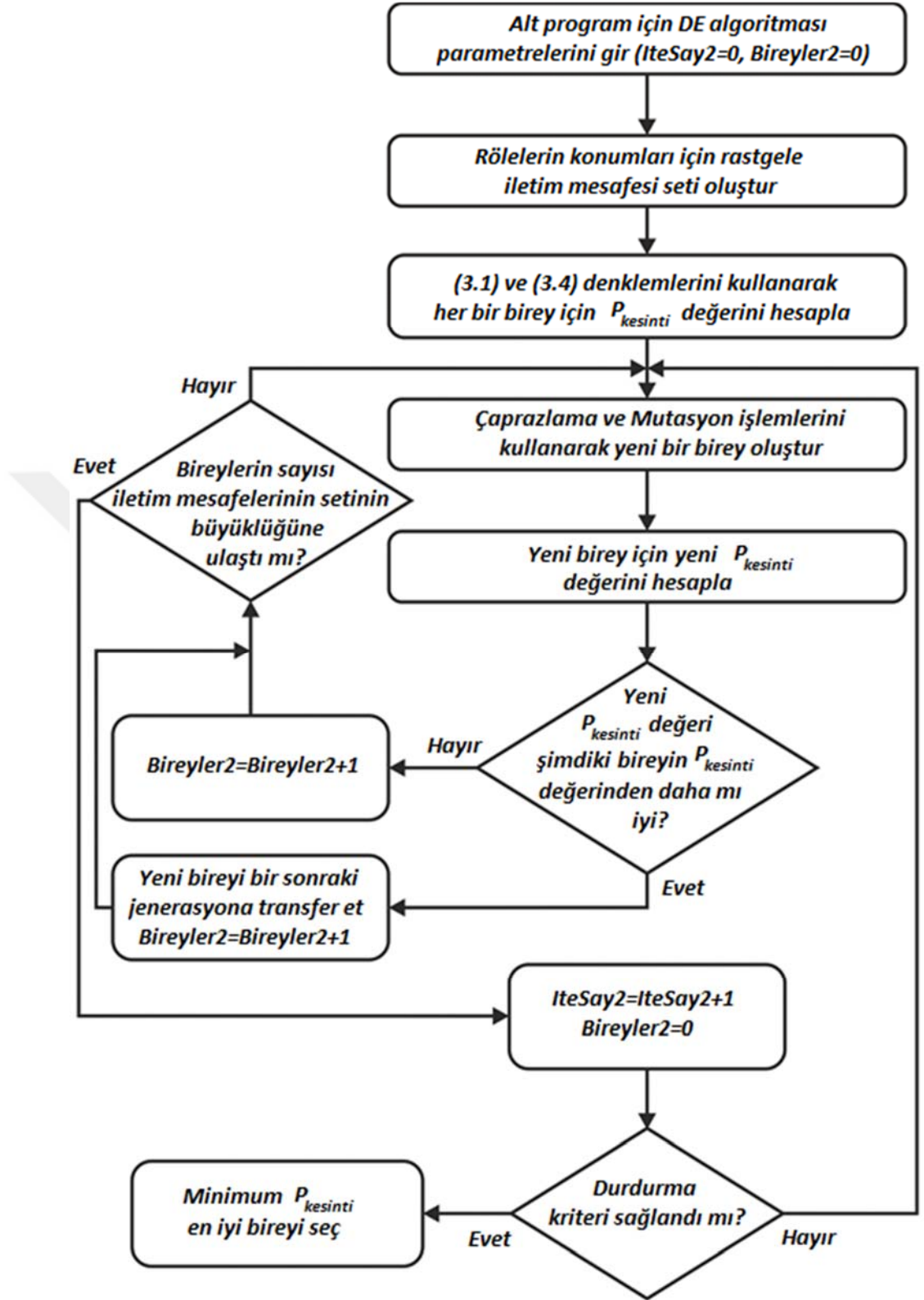
Hedef olarak, bütün haberleşme sistemlerinde kabul edilebilir bir değer olan milyonda bir kesinti olasılığını ($P_{kesinti} = 10^{-6}$) alırsak, hem seri hem de paralel DF röleli sistemler için f fonksiyonu:

$$\max \{d_{V,A}\} = f \left(\min \left\{ \min \{P_{kesinti}\} - 10^{-6} \right\} \right) \quad (3.19)$$

haline gelmektedir. Bu durumda iç içe geçmiş iki optimizasyon probleminin çözülmesi gerekmektedir. Şekil 3.13'te optimum iletim mesafesi probleminin çözümünde kullanılan DE algoritmasının ana programının akış diyagramı, Şekil 3.14'te ise kesinti olasılığı değerini minimize eden röle konumlarını bulan alt programın akış diyagramı verilmektedir.



Şekil 3.13. Ana programın akış diyagramı.

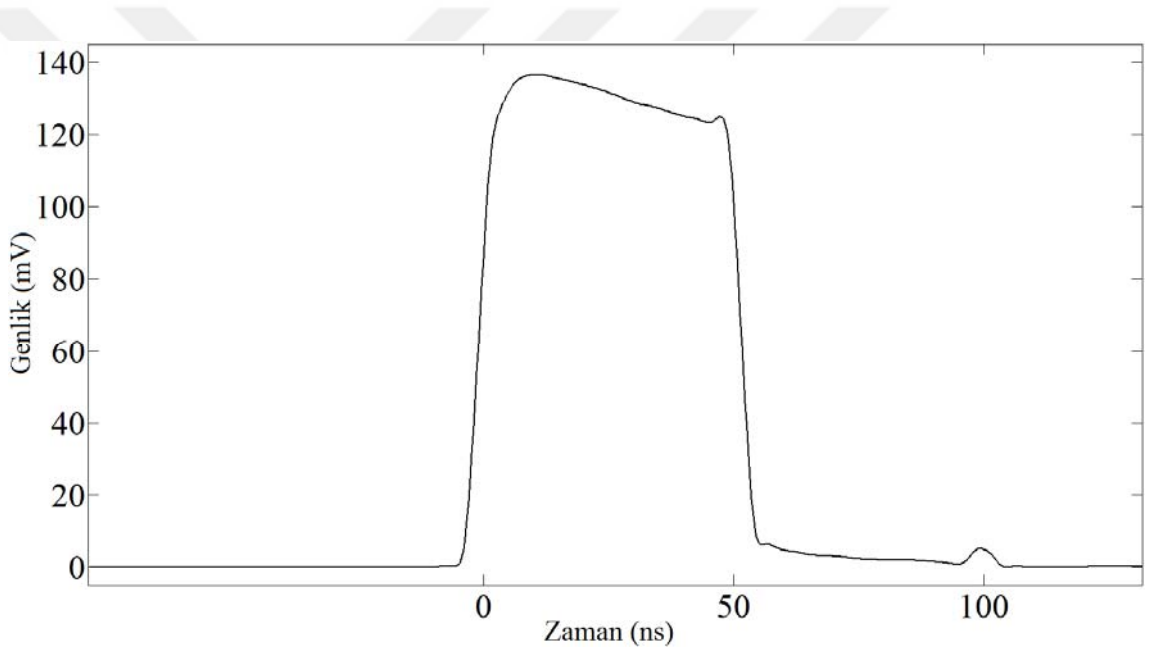


Şekil 3.14. Optimum röle konumlarını bulan alt programın akış diyagramı.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

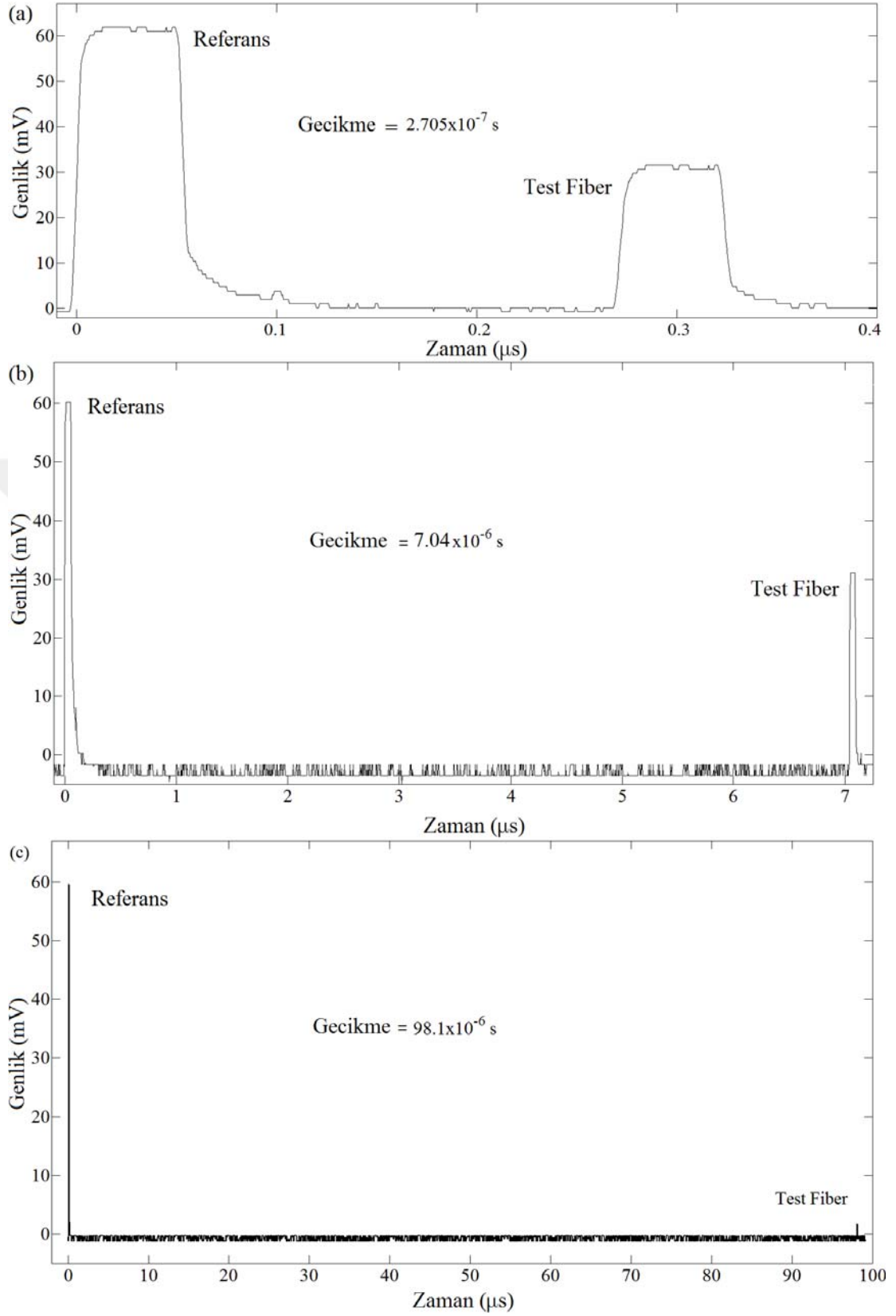
4.1 Fiber Optik Uzunluk Ölçüm Sonuçları

Şekil 3.12’de gösterilen ölçüm sistemi kullanılarak birbirinden farklı türde ve farklı uzunluklardaki fiberlerin ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Doğruluğu arttırmak için, her bir ölçüm 25 periyot boyunca tekrarlanmış ve ortalamaları alınmıştır. Nanosaniye atımlı lazer kaynağın ürettiği ve ölçümlerde kullanılan 50 ns bant genişliğine sahip bir optik sinyalin osiloskop yardımıyla elde edilen görüntüsü Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Ölçüm sistemine enjekte edilen 50 ns atımlı darbe.

Referans ve test fiberlerin zamanda ayrılmış yansıyan sinyalleri Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. (a) 27.6 m standart SMF (b) 719 m LEAF SMF (c) 10005 m NZ-DSF için ölçüm sonuçları.

Standart tek modlu fiberin, geniş efektif alanlı fiberin (large effective area fiber-LEAF) ve dispersiyonu sıfırdan farklı ve kaydırılmış fiberin (non-zero dispersion shifted fiber-NZ-DSF) 1550 nm dalgaboyundaki efektif kırılma indisleri sırasıyla 1.4682, 1.4681 ve 1.4691 değerindedir (Corning 2002, Fujikura 2013).

Deney düzeneğindeki referans fiberin uzunluğu sadece 3 metredir. Böylece yansıma süresi 0'a çok yakındır. Şekil 4.2'de görüldüğü üzere, 3 farklı fiberin gecikme süreleri sırasıyla $\Delta t_1 = 270.5 \text{ ns}$, $\Delta t_2 = 7040 \text{ ns}$ ve $\Delta t_3 = 98.1 \mu\text{s}$ olarak ölçülmüştür. Fiberlerin efektif kırılma indisi değerlerini ve ölçüm sonucunda bulunan gecikme sürelerini (3.2), (3.3) ve (3.4) denklemlerinde kullanırsak, bu üç fiberin uzunlukları:

$$\begin{aligned} L_1 &= \frac{1}{2} \times \frac{\Delta t_1}{\Delta t_{\text{fiber1}}} = 27.617 \text{ m} \\ L_2 &= \frac{1}{2} \times \frac{\Delta t_2}{\Delta t_{\text{fiber2}}} = 718.800 \text{ m} \\ L_3 &= \frac{1}{2} \times \frac{\Delta t_3}{\Delta t_{\text{fiber3}}} = 10009.407 \text{ m} \end{aligned} \quad (4.1)$$

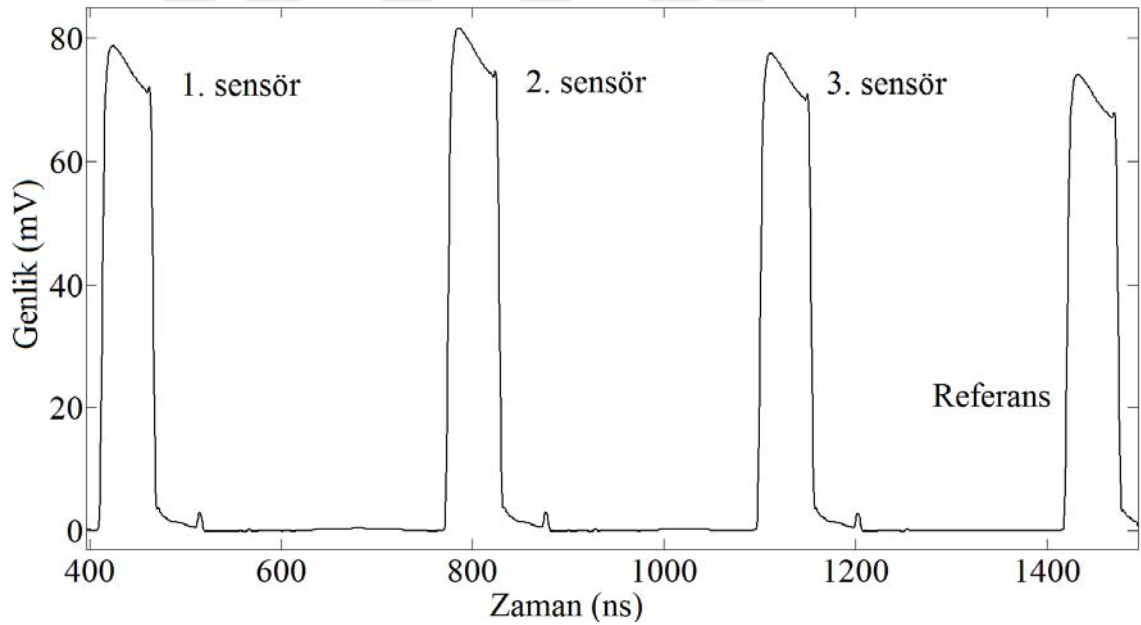
olarak hesaplanmaktadır. (4.1)'de bulunan değerler, ölçüm sisteminin farklı tipteki ve farklı uzunluktaki fiberleri gerçek değerlerine çok yakın olarak ölçebildiğini göstermektedir.

4.2 Fiber Optik Sensör Dizisi ile Yapılan Ölçümler

Şekil 3.11'de görülen yansıma tabanlı fiber optik sensör dizisi kullanılarak gerçekleştirilen fiber optik ölçüm sisteminin çalışma prensibi, zamanda ayrışmasına yetecek kadar farklı uzunluklara sahip dört fiber optik konnektörden yansıyan sinyal darbelerinin genlik değerlerinin ölçümüne dayanmaktadır (Chang ve ark. 2002). Ölçüm iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada fiber-hava ara yüzeyinden Fresnel yansıması ile yansıyan optik sinyalin genlik değerleri alınmaktadır. İkinci aşamada ise fiber optik konnektör kırılma indisi ölçülecek sıvı içerisine daldırılarak fiber-sıvı ara yüzeyinden yansıyan optik sinyalin genlik değerleri alınmaktadır. Her iki durum için yansıyan optik

sinyalin genlik değerindeki oransal değişim ile sıvının kırılma indisi değeri hesaplanabilmektedir (Kim ve Su 2004).

Nanosaniye atımlı lazer kaynağın ürettiği ve ölçümlerde kullanılan 1550 nm dalgaboyuna ve 50 ns darbe genişliğine sahip bir optik sinyal (Şekil 4.1), 2×4 fiber dağıtıcının bir girişine uygulanmaktadır. Fiber dağıtıcı bu sinyali % 25 bölme oranı ile 4 parçaya ayırmaktadır. Dört adet fiber optik prob (referans ve 3 sensör probu), ucu düzgün kesilmiş ve 2.5 mm çapında standart seramik ferrule ile sonlandırılmıştır. Referans ve sensör problarından yansıyan ve aralarında $2L/c_{\text{fiber}}$ kadar gecikme bulunan zamanda ayrılmış optik sinyaller Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Burada $2L$ ışığın aldığı mesafeler arası fark (yaklaşık 60 metre), c_{fiber} ise ışığın fiber optik içindeki hızıdır.

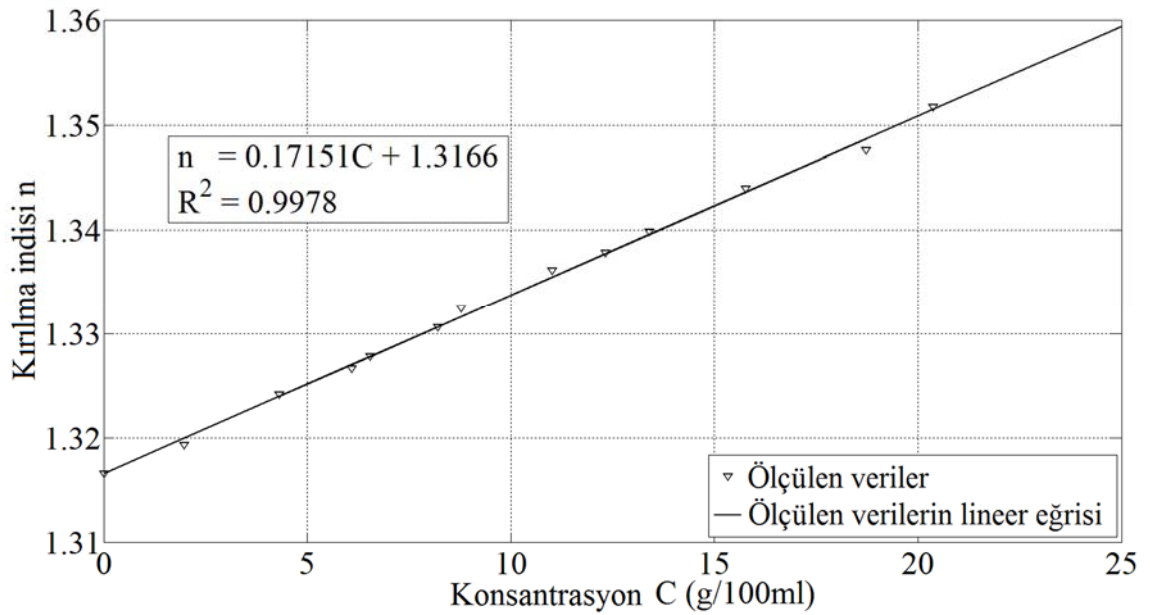


Şekil 4.3. Tüm problar hava ortamında tutulurken zamanda ayrılmış şekilde yansıyan darbe dizisi.

Gerçekleştirilen yansıma tabanlı fiber optik sensör dizisi ile çeşitli sıvıların kırılma indisleri ölçülmüş ve literatürde verilen kırılma indisi değerleriyle karşılaştırılmıştır. Bütün ölçümler 2^{16} periyot boyunca tekrarlanmış ve ortalamaları alınmıştır. Deneyler $22 \pm 0.5^\circ\text{C}$ sıcaklık ve $25 \pm 2\% \text{RH}$ nem ortam şartlarında gerçekleştirilmiştir. İlk önce,

referans ve sensör problemleri hava ortamındayken (3.5)'te gösterilen zayıflama düzeltme katsayıları sırasıyla 0.962, 0.966, 0.969 olarak elde edilmiştir. Daha sonra üç sensör probu aynı sıvının içerisine daldırılmıştır.

İlk olarak, önerilen ölçüm sisteminin doğruluğunu test etmek için bilinen farklı konsantrasyonlardaki tuzlu su çözeltisinin kırılma indisi değerleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre yoğunluk miktarı ile kırılma indisi değişimi arasındaki bağıntının lineer fonksiyona uyumu ve uyum derecesi bulunmuştur. Ölçümlerden önce hedeflenen yoğunluklar için, istenilen kütlede tuz (*gr*) ve istenilen hacimde saf su (*ml*) hazırlanmıştır. Ölçülen kırılma indisi değerlerinin bilinen tuzlu su yoğunluklarına göre değişimi Şekil 4.4'te verilmektedir.



Şekil 4.4. Sudaki tuz yoğunluğu ile kırılma indisi değişimi.

Kullanılan tuz % 98 *NaCl* (soyum klorür) ve kilogram başına 30 mg *KIO₃* (potasyum iyodat) içeren sofrata tuzu, kullanılan su ise % 99.99 saflıkta saf sudur.

Tuzlu su çözeltisinin kırılma indisi değişimlerinin lineer eğriye çok yakın olduğu elde edilen sonuçlardan açıkça gözükmektedir. Eğrinin eğimi $\partial n/\partial C = 0.17151$, Su ve Huang (2007) makalesinde bulunan değer aynıdır. Krishna ve ark. (2000)'de verilen 0.171

değerine ve Wu ve ark. (2007)'de verilen 0.1739 değerine de çok yakındır. Lineer fonksiyona uygunluk derecesinin (fitting degree) 0.9978 çıkması, ölçüm sisteminin lineerliğini doğrulamaktadır.

Şekil 4.4'teki veriler Çizelge 4.1'de tablo haline getirilmiştir.

Çizelge 4.1. Sudaki tuz yoğunluğu ile kırılma indisi değişiminin karşılaştırılması

Sudaki Tuz Yoğunluğu (g/100 ml)	Çözeltinin Kırılma İndisi
0	1.31662
1.9803	1.31938
4.3116	1.32423
6.0982	1.32670
6.5370	1.32787
8.2072	1.33063
8.7771	1.33246
11.0180	1.33613
12.3161	1.33783
13.4028	1.33988
15.7728	1.34396
18.7173	1.34761
20.3664	1.35173

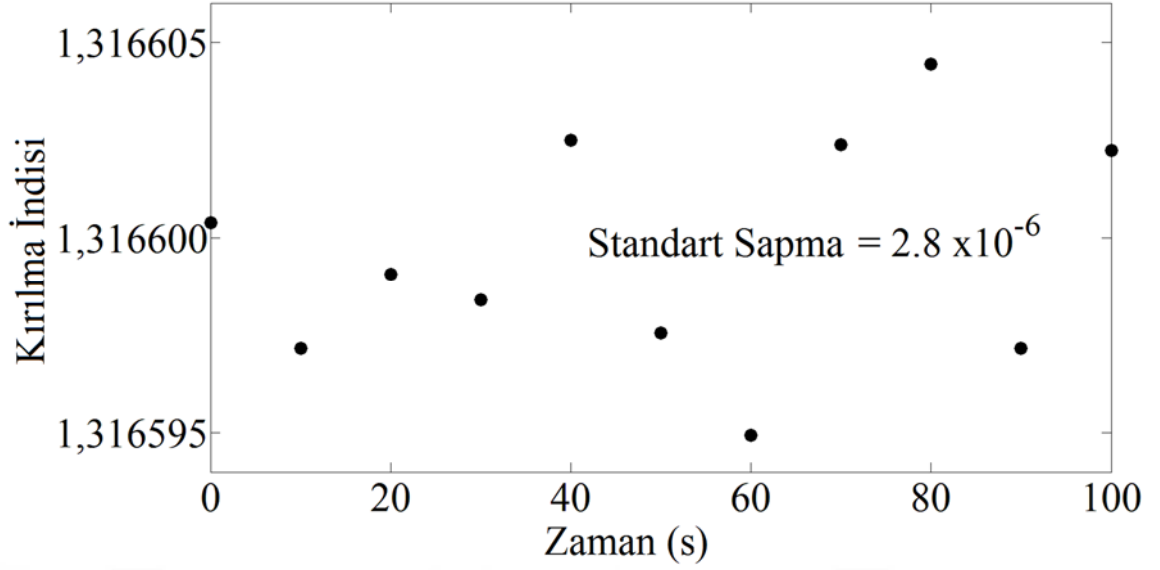
Sekiz farklı organik çözücünün, 1550 nm dalgaboyundaki kırılma indisi ölçüm sonuçları ve bu sonuçların literatürde bulunan değerleri (Xu ve ark. 2013, Moutzouris ve ark. 2014, Kedenburg ve ark. 2012) Çizelge 4.2'de verilmektedir. Moutzouris ve ark. (2014) 27°C, Kedenburg ve ark. (2012) 20°C sıcaklıkta çalışmışlardır. Xu ve ark. (2013) ortam sıcaklığını belirtmemişlerdir. Ayrıca bu referansların hiçbirisi ölçüm ortamının nem miktarı hakkında bilgi vermemiştir.

Çizelge 4.2. Farklı sıvıların kırılma indisi ölçümleri ve literatürde verilen ölçüm değerleri

Çözücüler	1550 nm Dalgaboyunda Kırılma İndisi Ölçümleri	1550 nm Dalgaboyunda Kırılma İndisi Ölçümleri Xu ve ark. 2013	1551 nm Dalgaboyunda Kırılma İndisi Ölçümleri Moutzouris ve ark. 2014	1550 nm Dalgaboyunda Kırılma İndisi Ölçümleri Kedenburg ve ark. 2012
1-bütanol	1.39311	-	1.3858	-
1-propanol	1.37496	-	1.3738	-
Aseton	1.35042	1.3515	-	-
Asetonitril	1.33699	-	1.3345	-
Benzen	1.47329	1.4157	1.4769	-
Etanol	1.35534	1.3417	-	1.3520
Metanol	1.31725	1.3194	1.3172	-
Toluen	1.46932	-	1.4737	1.4778

Ölçülen çözeltilerin tamamının kırılma indisi sonuçlarının literatürdeki sonuçlara (Xu ve ark. 2013, Moutzouris ve ark. 2014, Kedenburg ve ark. 2012) çok yakın olduğu, sadece Xu ve ark. (2013) bulduğu etanol ve benzen değerlerinden uzak olduğu görülmektedir. Ayrıca bizim sonuçlarımızın uzak olduğu bu değerlerin, literatürdeki etanol ve benzen değerlerinden de uzak olduğu görülmektedir. Yansıma tabanlı fiber optik sensör dizisi kullanılarak gerçekleştirilen fiber optik ölçüm sisteminin, geniş bir kırılma indisi aralığını gerçek zamanlı ve doğru olarak ölçtüğü, elde edilen sonuçlardan anlaşılmaktadır.

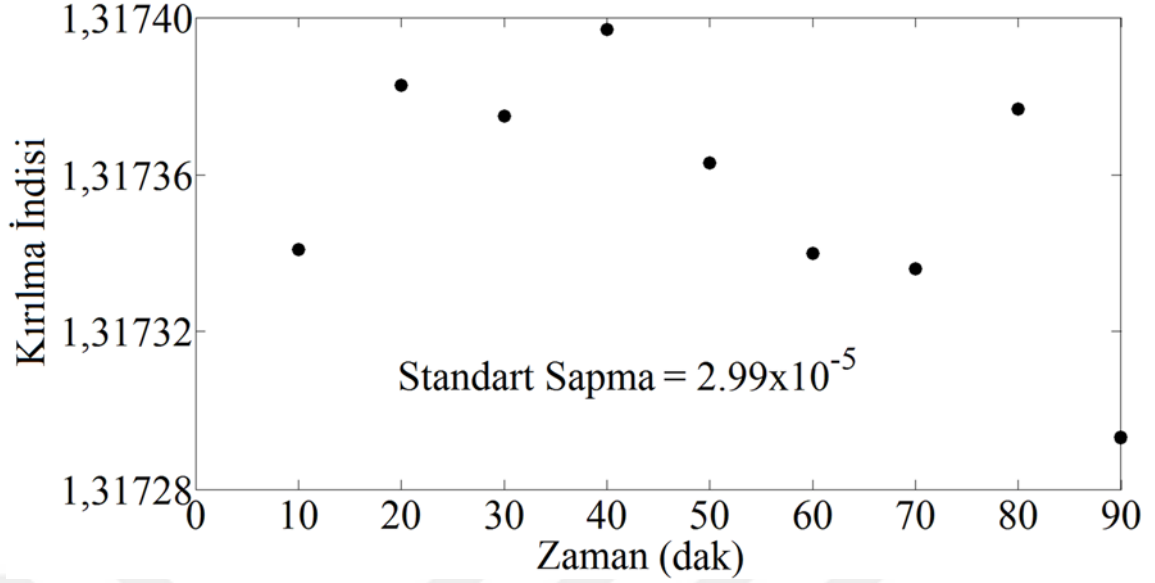
Saf suyun kırılma indisi 100 *saniye* boyunca ölçülerek, sensör sisteminin kısa dönem kararlılığı test edilmiştir. Ölçüm sisteminin kısa dönem kararlılığı Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Saf suyun kırılma indisi ile fiber optik sensör dizisinin kısa dönem kararlılığının 1550 nm dalgaboyunda test edilmesi.

Bulunan 2.8×10^{-6} standart sapma değeri Xu ve ark. (2013) değerinden daha iyidir. Bundan dolayı, zaman gecikmeli fiber optik sensör dizisi sisteminin sıvıların kırılma indisini ölçmede çok iyi bir kısa dönem kararlılığına sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Metanolün kırılma indisi değişimi 90 dakika boyunca ölçülerek, sensör sisteminin uzun dönem kararlılığı test edilmiştir. Ölçüm sisteminin uzun dönem kararlılığı Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Metanolün kırılma indisi ile fiber optik sensör dizisinin uzun dönem kararlılığının 1550 nm dalgaboyunda test edilmesi.

Bulunan 2.99×10^{-5} standart sapma değeri literatürde daha önce verilen değerlerden daha iyidir. Nanosaniye atımlı kaynaktaki, fotodedektördeki ve çevresel etkilerdeki dalgalanmalardan meydana gelen istenmeyen hataları yansıma tabanlı dört-dalga tekniği kullanan fiber optik sensör dizisinin düzelttiği anlaşılmaktadır.

4.3 Röle Destekli FSO Haberleşme Sistemlerinde Optimum İletim Mesafesi Analizi

Seri ve paralel DF röle destekli FSO haberleşme sistemlerinde farklı röle sayıları için optimum iletim mesafesi sonuçları DE ve PSO algoritmaları kullanılarak elde edilmektedir. İletim mesafeleri, $P_{kesinti} = 10^{-6}$ kesinti olasılığı hedef alınarak her bir röle konumunun optimize edilmesi ile hesaplanmaktadır.

Optimizasyonlarda sinyal dalgaboyu $\lambda = 1550 \text{ nm}$, kırılma indisi yapı sabiti $C_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{2/3}$ ve atmosferik zayıflama 0.43 dB/km (yani zayıflama katsayısı $\sigma \approx 0.1$) alınmaktadır. (2.17) denkleminde verilen log-genlik varyansı değeri:

$$\sigma_x^2(L) = \min \left\{ 0.124 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}, 0.5 \right\} \quad (4.2)$$

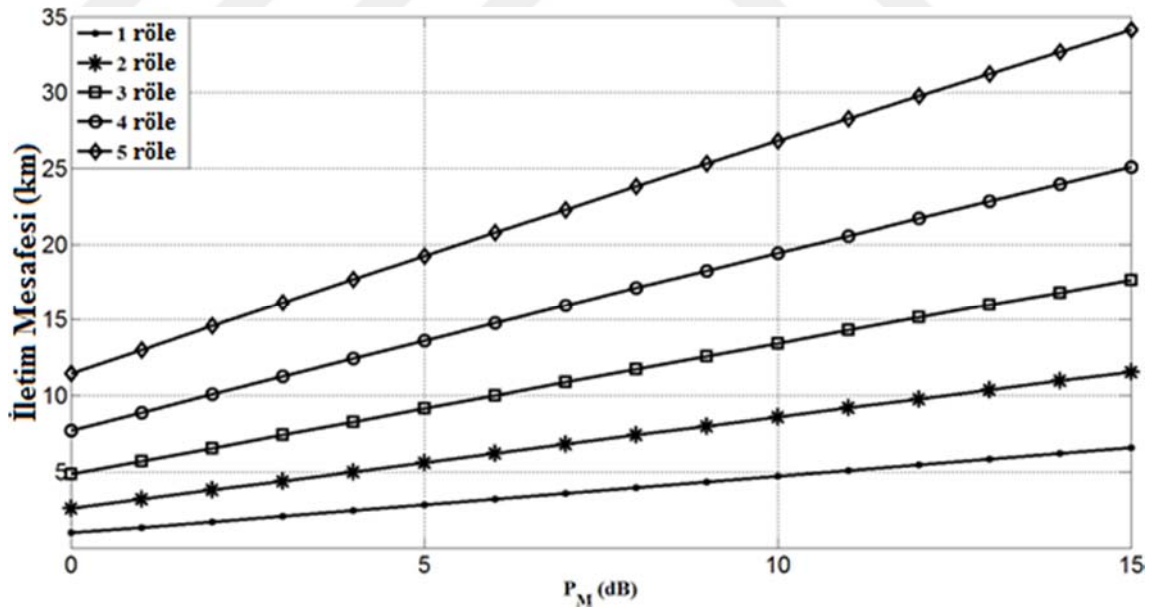
şeklinde 0.5 ile sınırlanmaktadır (Haas 2003). Log-genlik varyansının 0.5 değerinden daha yüksek olması atmosferin güçlü çalkantıya sahip olduğunu göstermektedir (Shapiro 1978).

Hem seri hem de paralel DF röleli sistemler için, bütün haberleşme sistemlerinde kabul edilebilir bir değer olan, milyonda bir kesinti olasılığı hedef alınmaktadır. $P_M = 0 - 15$ dB aralığındaki güç marjı ve 1-5 arasındaki röle sayıları için optimizasyon sonuçları elde edilmiştir.

Yukarıda verilen değerler kullanılarak seri ve paralel DF röleli FSO haberleşme sistemlerinde iletim mesafesi analizi, DE ve PSO algoritmalarıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu iki algoritmanın detaylı karşılaştırılması yapılmıştır.

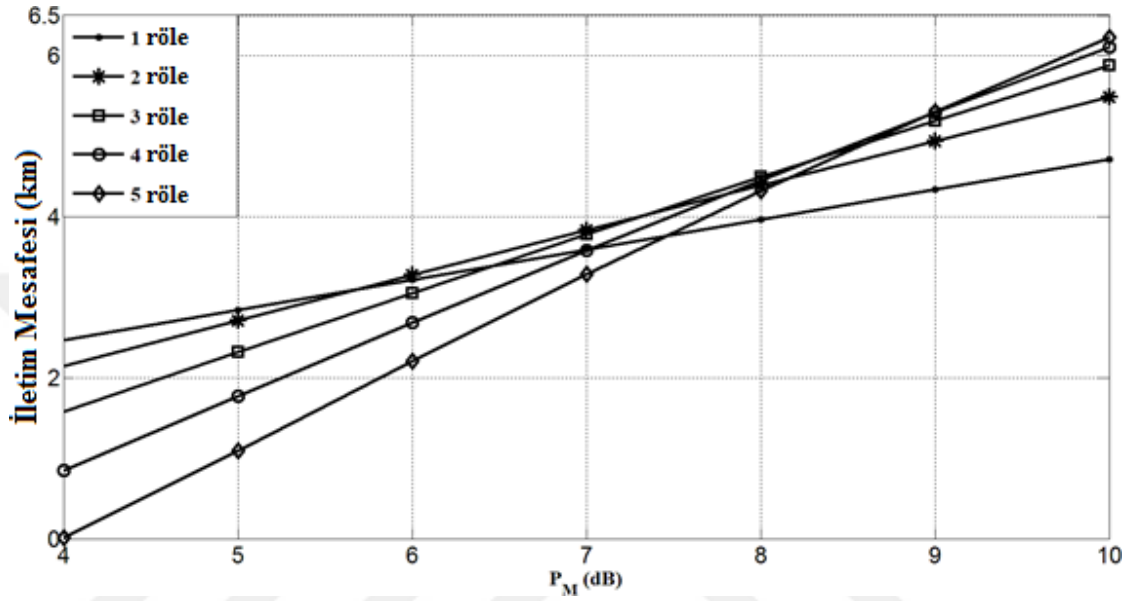
4.3.1 DE Algoritması Yardımıyla İletim Mesafesi Optimizasyonu

Rölelerin konumları optimize edilerek, farklı röle sayıları için seri DF röleli sistemlerin optimum iletim mesafeleri Şekil 4.7’de gösterilmektedir.



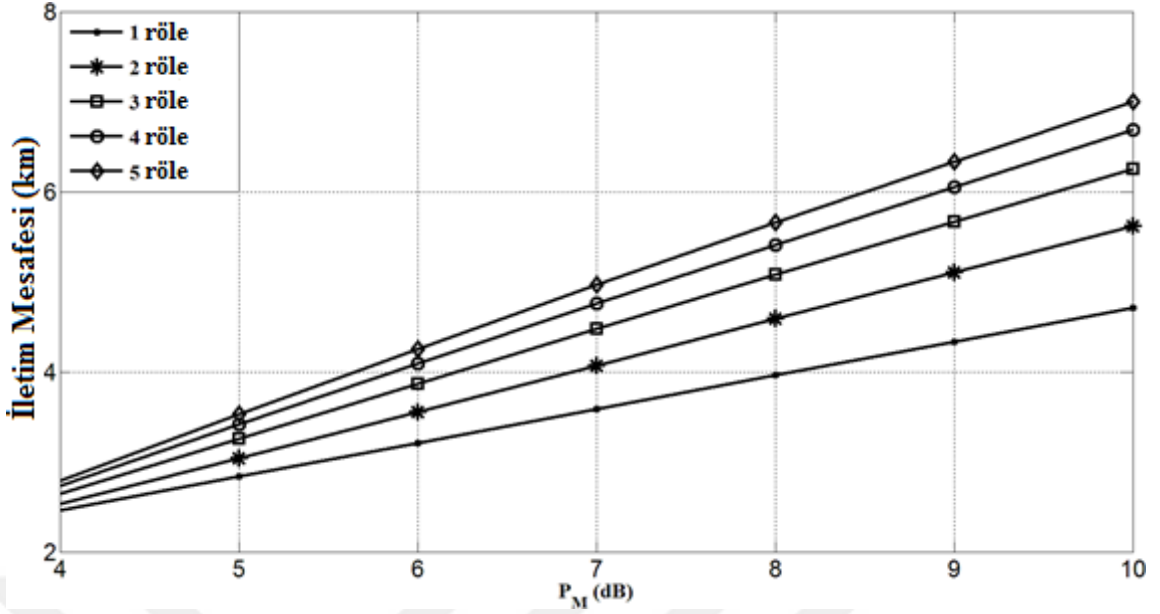
Şekil 4.7. Seri röleli FSO haberleşme sistemlerinin farklı röle sayıları için optimum iletim mesafelerinin güç marjına bağlı değişimi.

Paralel DF röleli sistemlerde bütün rölelerin konumları optimize edilmeden, iletim hattının tam ortasına konulduğu durumda ($d_{V,j} = (d_{V,A}/2)$, $j = 1, 2, \dots, N$) elde edilen iletim mesafeleri Şekil 4.8’de görülmektedir.



Şekil 4.8. Paralel röleli FSO haberleşme sistemlerinin röleler tam ortada olduğunda iletim mesafelerinin güç marjına bağlı değişimi.

Rölelerin konumları optimize edilerek, farklı röle sayıları için paralel DF röleli sistemlerin optimum iletim mesafeleri Şekil 4.9’da gösterilmektedir.



Şekil 4.9. Paralel röleli FSO haberleşme sistemlerinin farklı röle sayıları için optimum iletim mesafelerinin güç marjına bağlı değişimi.

Seri röleli FSO haberleşme sistemlerinde en büyük iletim mesafesi, rölelerin birbirlerine eşit uzaklıkta yerleştirilmesi durumunda elde edilmektedir. Kashani ve ark. (2013) yaptıkları çalışma elde edilen bu sonucu doğrulamaktadır.

Paralel röleli sistemlerde ise, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da görüldüğü gibi, rölelerin verici ve alıcıya eşit mesafede olması optimum sonucu sağlamamaktadır. Optimizasyon yapılarak 4-6 dB güç marjı aralığında; 2 röleli sistemlerde ortalama 0.335 km (% 12.3), 3 röleli sistemlerde ortalama 0.944 km (% 40.8), 4 röleli sistemlerde ortalama 1.646 km (% 93) ve 5 röleli sistemlerde ortalama 2.424 km (% 220) iletim mesafesi artışı gerçekleştirilmiştir. 5-10 dB güç marjı aralığında ise; 2 röleli sistemlerde ortalama 0.225 km (% 5.5), 3 röleli sistemlerde ortalama 0.649 km (% 15.8), 4 röleli sistemlerde ortalama 1.088 km (% 27.3) ve 5 röleli sistemlerde ortalama 1.553 km (% 41.5) iletim mesafesi artışı gerçekleştirilmiştir.

Seri ve paralel röleli FSO haberleşme sistemleri için detaylı iletim mesafesi sonuçları Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’te verilmektedir.

Çizelge 4.3. Seri DF röleli FSO haberleşme sistemlerinde 1, 2, 3, 4 ve 5 röle için optimizasyon sonuçları

P_M (dB)	$N = 1$		$N = 2$		$N = 3$	
	Optimum $d_{V,A}$ (km)	Optimum röle konumu	Optimum $d_{V,A}$ (km)	Optimum röle konumu	Optimum $d_{V,A}$ (km)	Optimum röle konumu
0	0.9964	0.5	2.6147	0.333	4.8260	0.25
1	1.3574	0.5	3.2070	0.333	5.6879	0.25
2	1.7234	0.5	3.8033	0.333	6.5527	0.25
3	2.0929	0.5	4.4022	0.333	7.4187	0.25
4	2.4646	0.5	5.0025	0.333	8.2849	0.25
5	2.8377	0.5	5.6034	0.333	9.1503	0.25
6	3.2117	0.5	6.2042	0.333	10.0141	0.25
7	3.5861	0.5	6.8045	0.333	10.8757	0.25
8	3.9605	0.5	7.4038	0.333	11.7348	0.25
9	4.3346	0.5	8.0019	0.333	12.5908	0.25
10	4.7083	0.5	8.5984	0.333	13.4436	0.25
11	5.0814	0.5	9.1932	0.333	14.2929	0.25
12	5.4537	0.5	9.7860	0.333	15.1385	0.25
13	5.8251	0.5	10.3769	0.333	15.9805	0.25
14	6.1955	0.5	10.9656	0.333	16.8183	0.25
15	6.5648	0.5	11.5520	0.333	17.6522	0.25
P_M (dB)	$N = 4$		$N = 5$			
	Optimum $d_{V,A}$ (km)	Optimum röle konumu	Optimum $d_{V,A}$ (km)	Optimum röle konumu		
0	7.7162	0.2	11.4482	0.167		
1	8.8976	0.2	13.0138	0.167		
2	10.0800	0.2	14.5765	0.167		
3	11.2614	0.2	16.1344	0.167		
4	12.4407	0.2	17.6858	0.167		
5	13.6165	0.2	19.2298	0.167		
6	14.7882	0.2	20.7652	0.167		
7	15.9552	0.2	22.2916	0.167		
8	17.1168	0.2	23.8084	0.167		
9	18.2727	0.2	25.3152	0.167		
10	19.4227	0.2	26.8117	0.167		
11	20.5665	0.2	28.2979	0.167		
12	21.7039	0.2	29.7738	0.167		
13	22.8349	0.2	31.2390	0.167		
14	23.9590	0.2	32.6935	0.167		
15	25.0768	0.2	34.1376	0.167		

Çizelge 4.4. Paralel DF röleli FSO haberleşme sistemlerinde 2, 3, 4 ve 5 röle için optimizasyon sonuçları

P_M (dB)	$N = 2$			$N = 3$		
	Rölelerin ortada olduğu $d_{V,A}$ (km)	Optimum $d_{V,A}$ (km)	Optimum röle konumu	Rölelerin ortada olduğu $d_{V,A}$ (km)	Optimum $d_{V,A}$ (km)	Optimum röle konumu
0	0	0.63	0.4125	0	0.40	0.3644
1	0.49	1.07	0.4131	0	0.90	0.3659
2	1.03	1.54	0.4166	0.14	1.46	0.3728
3	1.58	2.03	0.4217	0.84	2.05	0.3820
4	2.15	2.53	0.4275	1.58	2.65	0.3924
5	2.71	3.04	0.4337	2.32	3.26	0.4034
6	3.27	3.56	0.4401	3.05	3.87	0.4145
7	3.83	4.07	0.4467	3.78	4.48	0.4252
8	4.38	4.58	0.4535	4.49	5.08	0.4352
9	4.94	5.10	0.4604	5.19	5.67	0.4447
10	5.48	5.62	0.4674	5.88	6.25	0.4536
11	6.02	6.13	0.4740	6.55	6.83	0.4621
12	6.56	6.64	0.4800	7.20	7.40	0.4702
13	7.09	7.14	0.4850	7.84	7.96	0.4776
14	7.60	7.64	0.4892	8.45	8.52	0.4845
15	8.11	8.13	0.4928	9.04	9.07	0.4906
P_M (dB)	$N = 4$			$N = 5$		
	Rölelerin ortada olduğu $d_{V,A}$ (km)	Optimum $d_{V,A}$ (km)	Optimum röle konumu	Rölelerin ortada olduğu $d_{V,A}$ (km)	Optimum $d_{V,A}$ (km)	Optimum röle konumu
0	0	0.23	0.3323	0	0.09	0.3085
1	0	0.76	0.3335	0	0.65	0.3091
2	0	1.39	0.3424	0	1.33	0.3191
3	0	2.05	0.3544	0	2.05	0.3325
4	0.85	2.74	0.3674	0.02	2.80	0.3469
5	1.77	3.42	0.3807	1.09	3.53	0.3615
6	2.69	4.09	0.3937	2.21	4.26	0.3761
7	3.58	4.76	0.4063	3.29	4.96	0.3906
8	4.45	5.41	0.4186	4.32	5.66	0.4049
9	5.29	6.05	0.4306	5.30	6.34	0.4189
10	6.10	6.69	0.4420	6.23	7.00	0.4324
11	6.88	7.31	0.4529	7.11	7.65	0.4453
12	7.63	7.92	0.4631	7.94	8.29	0.4575
13	8.35	8.52	0.4727	8.71	8.92	0.4689
14	9.02	9.11	0.4816	9.44	9.54	0.4794
15	9.66	9.70	0.4897	10.12	10.15	0.4891

Çizelge 4.3 ve 4.4'te bulunan optimum röle konumu ifadesi, rölelerin optik kaynak ve alıcı arasındaki iletim mesafesine göre normalize edilmiş konumu ifade eder. Mesela, optimum röle konumu 0.5 değerinde ise röleler iletim hattının tam ortasına konulmalıdır.

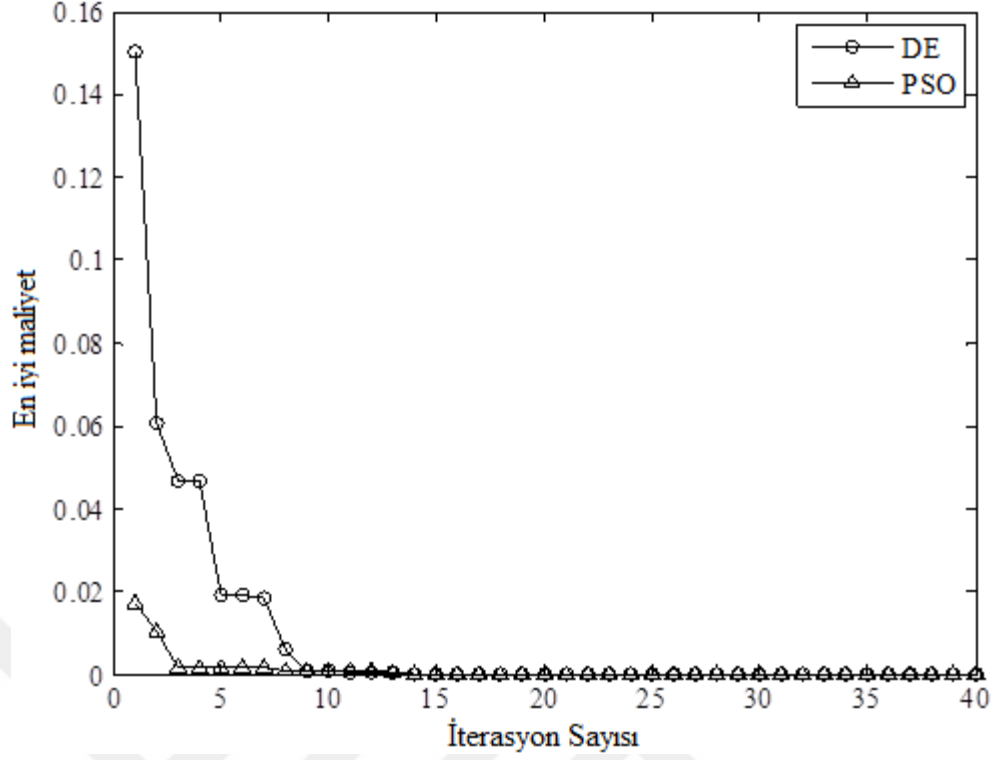
Paralel röleli FSO haberleşme sistemlerinde en yüksek iletim mesafesine ulaşabilmek için bütün rölelerin yaklaşık aynı noktaya konulması gerekliliği, optimizasyon sonucunda elde edilmiştir. DE algoritması optimizasyonu ile güç marjının $0-15\text{ dB}$ aralığının tamamı için iletim mesafelerinin arttığı gözlemlenmektedir. Dahası, hem seri hem de paralel röleli FSO haberleşme sistemlerinde röle konumlarının optimize edilmesinin çalkantı kaynaklı sönümleme ve yol kaybının etkilerini önemli ölçüde azalttığı gösterilmektedir.

4.3.2 FSO Haberleşme Sistemlerinde DE ve PSO Algoritmalarının Karşılaştırılması

Bu bölümde, diferansiyel gelişim ve parçacık sürü optimizasyonu algoritmalarının, FSO haberleşme sistemlerinde kullanımlarının performans karşılaştırılması yapılmaktadır. Paralel DF röleli sistemlerde optimum iletim mesafeleri, farklı röle sayıları için her bir röle konumu optimize edilerek hesaplanmaktadır. Ayrıca, maliyet fonksiyonunun (cost function) uygun bir şekilde minimum değerine indirildiği analiz edilmektedir. Dahası, röle destekli FSO haberleşmesinde DE ve PSO algoritmalarının işlem süresi ve kararlılığı araştırılmaktadır.

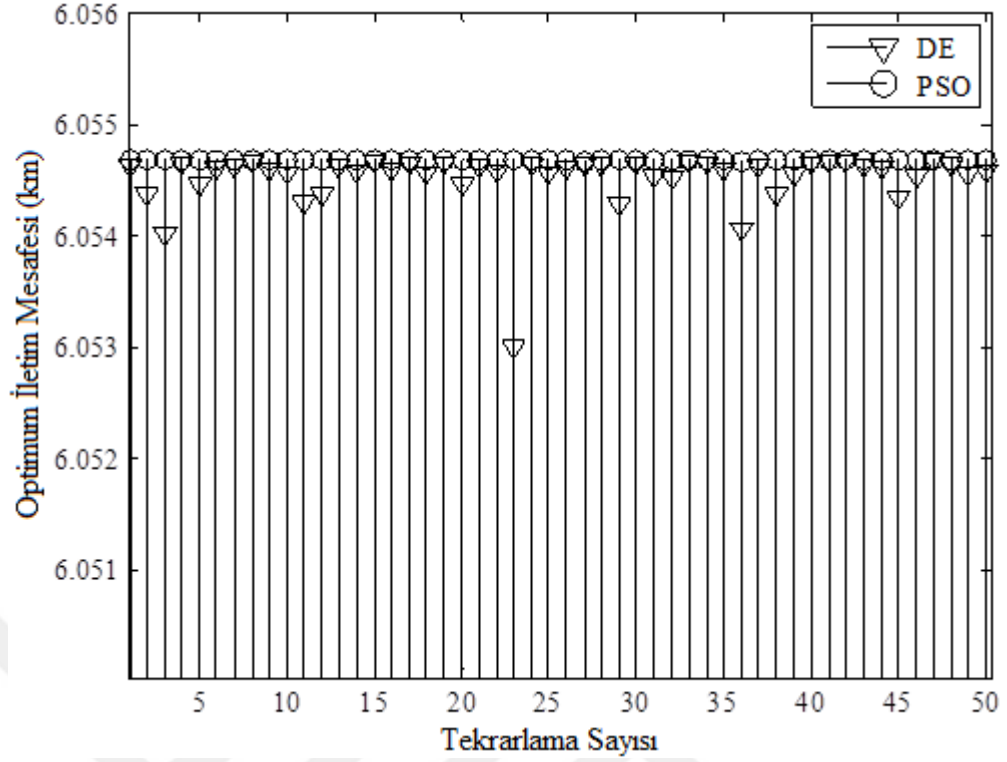
Performans karşılaştırması için yapılan optimizasyonlarda, röle sayısı 4 ve güç marjı $P_M = 9\text{ dB}$ alınmaktadır.

DE ve PSO algoritmalarının iterasyon sayısına bağlı maliyet fonksiyonu analizi Şekil 4.10'da gösterilmektedir. PSO algoritmasının DE'ye göre daha küçük iterasyon sayılarında minimum maliyet değerine düştüğü benzetim sonuçlarından görülmektedir. Bu sonuç maliyet fonksiyonu açısından PSO algoritmasının DE'den daha üstün olduğunu göstermektedir. Burada iterasyon sayısı 40, tekrarlama sayısı 50 alınmaktadır.

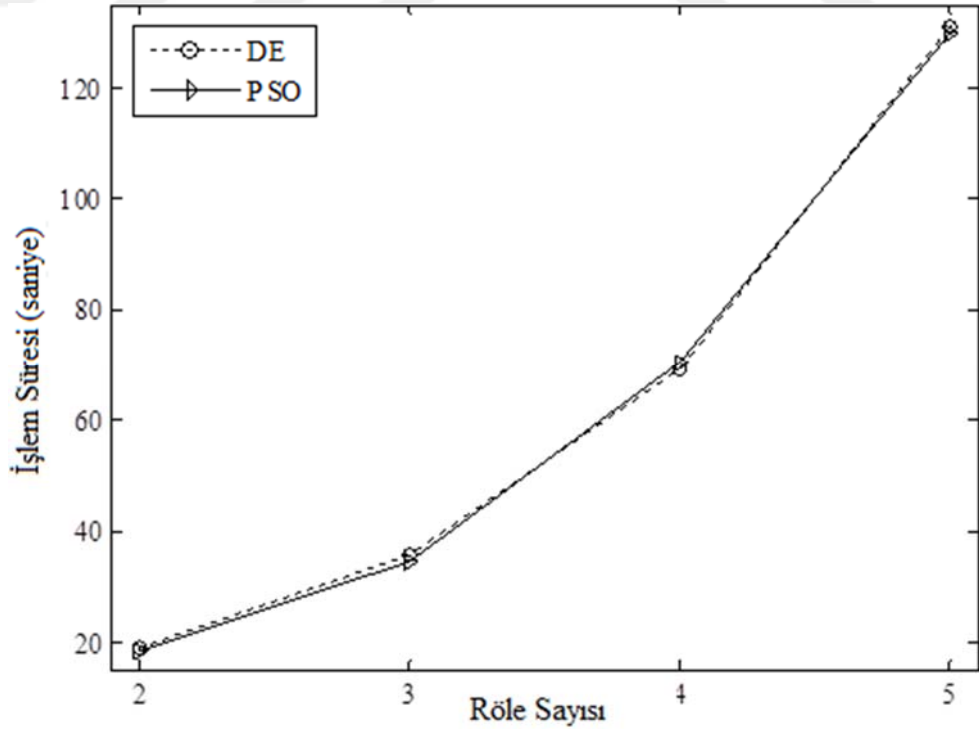


Şekil 4.10. 40 iterasyon için maliyet fonksiyonu (Basgumus ve ark. 2015).

Tekrarlanan optimum iletim mesafeleri $d_{V,A}$ hesaplamalarında, bu iki algoritmanın kararlılıklarının karşılaştırılması Şekil 4.11’de gösterilmektedir. 4 röle için iletim mesafesi $d_{V,A} = 6.0547 \text{ km}$ olarak hesaplanmaktadır. Her bir tekrarlama PSO algoritması neredeyse aynı sonucu vermektedir. Bundan dolayı, aynı haberleşme şartları altında PSO algoritmasının DE’den daha kararlı olduğu görülmektedir.



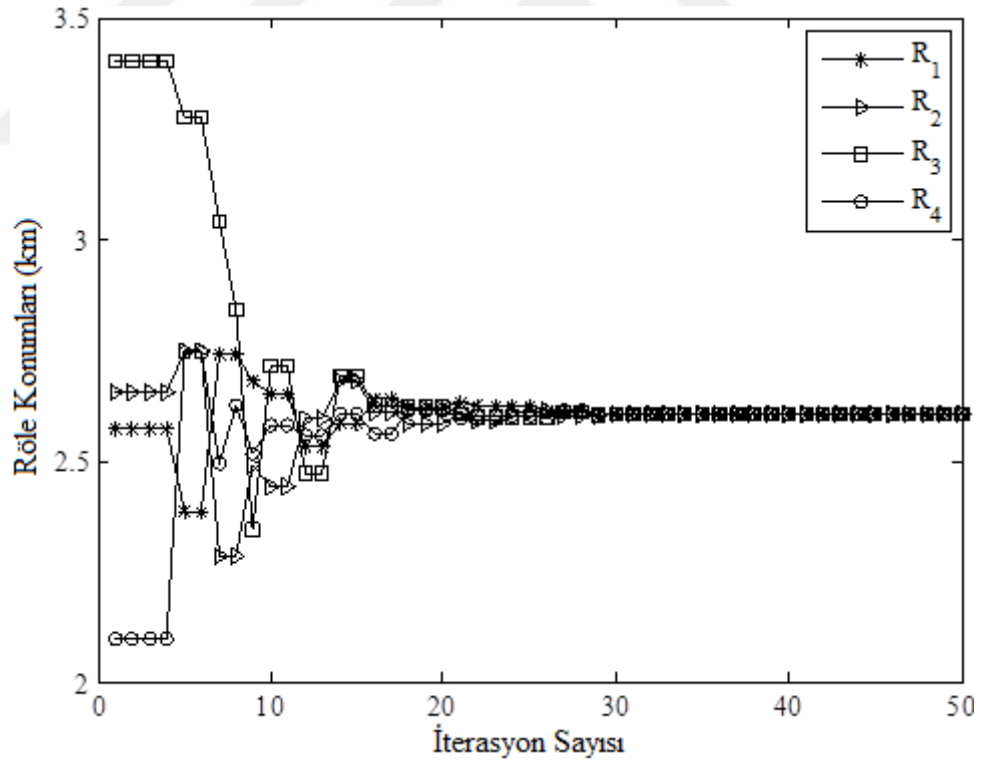
Şekil 4.11. Optimum iletim mesafesi ($d_{V,A}$) optimizasyonlarının 50 kere tekrar edilmesi (Basgumus ve ark. 2015).



Şekil 4.12. DE ve PSO algoritmalarının farklı röle sayılarındaki işlem süreleri (Basgumus ve ark. 2015).

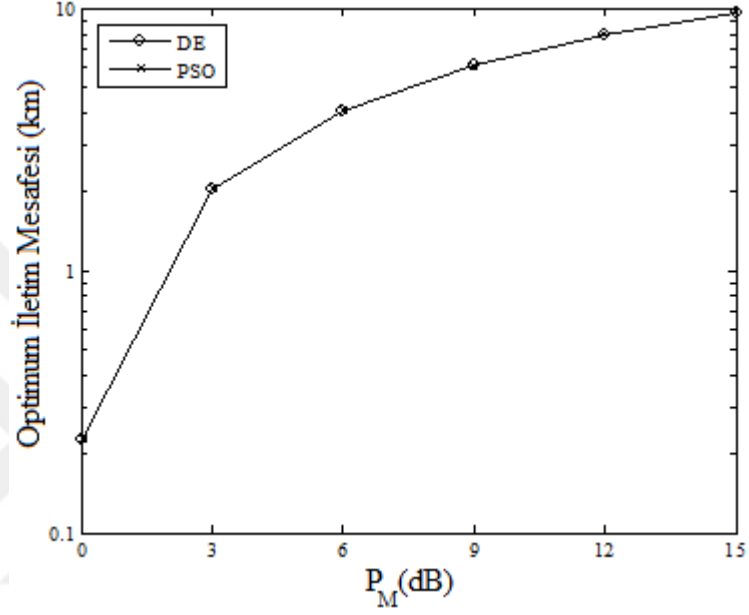
Farklı röle sayıları için DE ve PSO algoritmalarının işlem sürelerinin karşılaştırılması Şekil 4.12’de gösterilmektedir. Bütün röle sayılarında DE ve PSO algoritmalarının işlem sürelerinin birbirlerine çok yakın olduğu fark edilmektedir.

Röle sayısının 4 ($R_j, j = 1, 2, 3, 4$) ve güç marjının $P_M = 9 \text{ dB}$ alındığı optimizasyonlarda, her bir rölenin konumunun optimizasyon içerisinde iteratif olarak nasıl hesaplandığı Şekil 4.13’te gösterilmektedir. Güç marjı değeri ve röle sayısından bağımsız olarak her bir rölenin aynı noktaya konulmasının performansı daha da iyileştireceği optimizasyon sonuçlarından anlaşılmaktadır. Her iki optimizasyon algoritmasının iterasyonları sonucunda da rölelerin hepsinin yaklaşık aynı konuma ($d_{V,R_j} \approx 2,607 \text{ km}$) konulması gerektiği görülmektedir. Buna ilaveten, bu neticeler her iki algoritmanın da güvenilir ve hızlı sonuçlar sağladığını göstermektedir.



Şekil 4.13. İterasyon sayısına bağlı olarak röle konumlarının değişimi (Basgumus ve ark. 2015).

Son olarak güç marjının (P_M), DE ve PSO algoritmaları sayesinde bulunan optimum iletim mesafesine etkisi incelenmektedir. Optimum iletim mesafelerinin güç marjına bağlı olarak arttığı ve her iki optimizasyon algoritmasının da bütün güç marjı değerlerinde birbirine çok yakın iletim mesafesi sonuçları elde ettiği Şekil 4.14'te gösterilmektedir.



Şekil 4.14. Optimum iletim mesafelerinin güç marjına bağlı değişimi (Basgumus ve ark. 2015).

Paralel DF röleli sistemlerde, DE ve PSO algoritmaları ile yapılan detaylı optimizasyon sonuçları Çizelge 4.3'de verilmektedir. Burada farklı P_M değerleri için optimum iletim mesafeleri ve optimum röle konumları sonuçları listelenmiştir. $d_{V,A}$ verici ile alıcı arasındaki mesafeyi ($V \rightarrow A$) ve d_{V,R_j} verici ile j . röle arasındaki mesafeyi ($V \rightarrow R_j, j=1,2,\dots,N$) göstermektedir. Çizelge 4.5'teki nümerik sonuçlara dayanarak, röle sayısı arttıkça rölelerin kaynağa daha çok yaklaşması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Düşük güç marjı bölgelerinde, röle sayısı arttıkça iletim mesafesinin azalması beklenen bir durumdur (Avestimehr ve Tse 2005).

Çizelge 4.5. Paralel DF röleli FSO haberleşme sistemlerinde 2, 3, 4 ve 5 röle için gerçekleştirilen optimizasyonların karşılaştırılması

P_M (dB)	$N = 2$				$N = 3$			
	DE		PSO		DE		PSO	
	Optimum $d_{V,A}$ (km)	Optimum d_{V,R_j} (km)	Optimum $d_{V,A}$ (km)	Optimum d_{V,R_j} (km)	Optimum $d_{V,A}$ (km)	Optimum d_{V,R_j} (km)	Optimum $d_{V,A}$ (km)	Optimum d_{V,R_j} (km)
0	0.6323	0.2608	0.6323	0.2608	0.4017	0.1464	0.4016	0.1463
3	2.0304	0.8562	2.0304	0.8562	2.0453	0.7813	2.0453	0.7813
6	3.5568	1.5653	3.5568	1.5653	3.8708	1.6044	3.8708	1.6044
9	5.1021	2.3490	5.1021	2.3490	5.6697	2.5207	5.6697	2.5207
12	6.6391	3.1868	6.6392	3.1868	7.4014	3.4801	7.4014	3.4801
15	8.1326	4.0077	8.1326	4.0077	9.0656	4.4476	9.0656	4.4476
P_M (dB)	$N = 4$				$N = 5$			
	DE		PSO		DE		PSO	
	Optimum $d_{V,A}$ (km)	Optimum d_{V,R_j} (km)	Optimum $d_{V,A}$ (km)	Optimum d_{V,R_j} (km)	Optimum $d_{V,A}$ (km)	Optimum d_{V,R_j} (km)	Optimum $d_{V,A}$ (km)	Optimum d_{V,R_j} (km)
0	0.2276	0.0756	0.2276	0.0756	0.0888	0.0274	0.0888	0.0274
3	2.0541	0.7280	2.0541	0.7280	2.0547	0.6832	2.0547	0.6832
6	4.0930	1.6114	4.0930	1.6114	4.2558	1.6006	4.2558	1.6006
9	6.0547	2.6065	6.0547	2.6072	6.3361	2.6542	6.3361	2.6542
12	7.9173	3.6665	7.9173	3.6665	8.2927	3.7939	8.2927	3.7939
15	9.6952	4.7477	9.6952	4.7477	10.1544	4.9665	10.1544	4.9665

Sonuç olarak her iki algoritmanın da güvenilir ve FSO haberleşme sistemlerinde kullanılabilir olduğu görülmektedir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının amacı iletim mesafesi performans analizini fiber optik kablolarda uygulamalı çalışarak özgün bir fiber optik sensör dizisi tasarlamaktır.

Tezin üçüncü bölümünde farklı fiber optik kabloların uzunluklarını gerçek zamanlı olarak, yüksek çözünürlüklü ve çok hızlı ölçülebilen basit bir ölçüm tekniğine yer verilmiştir. Dahası bu tekniğin temel prensiplerine dayanan, zamanda ayrışmasına yetecek kadar farklı uzunluklara sahip 4 adet fiber optik kablo ve FC/PC konnektörden yansıyan sinyal atımlarının genlik değerlerini ölçerek farklı sıvıların kırılma indislerini ölçebilen özgün bir fiber optik sensör dizisi önerilmiştir. 4 adet optik sinyalin tam olarak birbirinden ayrışması için fiber optik kabloların iletim mesafesi performans analizleri kullanılmıştır. Önerilen sensör sistemi tümüyle fiber optik tabanlı yapılarak, fiber optik sistemlerin sahip olduğu elektriksel izolasyon, elektromanyetik bağışıklık, düşük iletim kaybı ve uzaktan algılama yapma gibi önemli özellikleri kullanabilmek amaçlanmıştır.

Tezin dördüncü bölümünde ise iletim mesafesi performans analizi yapılarak fiber optik uzunlukları ayarlanan özgün fiber optik sensör dizisi, saf su, tuzlu su çözeltileri ve organik çözücülerle kapsamlı bir şekilde test edilmiş, kısa ve uzun dönem kararlılıklarının standart sapmaları hesaplanmış ve bu sonuçlar literatürde bulunan değerlerle karşılaştırılmıştır.

Tuzlu su çözeltisinin kırılma indisi değişimleri lineer eğriye çok yakın ve eğrinin eğimi, literatürdeki sonuçların (Su ve Huang 2007, Krishna ve ark. 2000) aynısı olan $\partial n/\partial C = 0.17151$ olarak elde edilmiştir. Lineer fonksiyona uygunluk derecesinin (fitting degree) 0.9978 çıkması, ölçüm sisteminin lineerliğini doğrulamaktadır. Ölçülen çözeltilerin tamamının kırılma indisi sonuçlarının da literatürdeki sonuçlara çok yakın olduğu görülmektedir. Yansıma tabanlı fiber optik sensör dizisi kullanılarak gerçekleştirilen özgün fiber optik ölçüm sisteminin, geniş bir kırılma indisi aralığını gerçek zamanlı, hızlı ve doğru olarak ölçtüğü, elde edilen sonuçlardan anlaşılmaktadır.

Saf suyun kırılma indisi 100 *saniye* boyunca ölçülerek, sensör sisteminin kısa dönem kararlılığı test edilmiştir. Bulunan 2.8×10^{-6} standart sapma değeri çok küçük bir değerdir. Bundan dolayı, zaman gecikmeli fiber optik sensör dizisi sisteminin sıvıların kırılma indisini ölçmede çok iyi bir kısa dönem kararlılığına sahip olduğu anlaşılmaktadır. Metanolün kırılma indisi değişimi 90 *dakika* boyunca ölçülerek, sensör sisteminin uzun dönem kararlılığı test edilmiştir. Bulunan 2.99×10^{-5} standart sapma değeri literatürde daha önce verilen değerlerden daha iyidir. Önerilen sensör dizisinin sıvıların kırılma indisini ölçmede çok iyi bir kısa ve uzun dönem kararlılığına sahip olduğu ve nanosaniye atımlı kaynaktaki, fotodedektördeki ve çevresel etkilerdeki dalgalanmalardan meydana gelen istenmeyen hataları düzelttiği anlaşılmaktadır.

Bu kapsamda hazırlanan çalışma 2016 yılında *IEEE Photonics Technology Letters* dergisinde yayınlanmıştır (Basgumus ve ark. 2016). Çalışmanın ilk hali 2013 yılında *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisinde* yayınlanmıştır (Durak ve ark. 2013). Elde edilen sonuçların bir bölümü 22. *IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayında* bildiri olarak yer almıştır (Basgumus ve ark. 2014). Ayrıca 17. *Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayında* bir özetli bildiri poster olarak sunulmuştur (Başgümüş ve ark. 2015). Ayrıca yine bu çalışma kapsamında bulunan, *Dumlupınar Üniversitesi destekli 2014-04 numaralı bilimsel araştırma projesi (BAP)*, 15 Temmuz 2015 tarihinde başarıyla tamamlanmıştır.

Bu tez çalışmasında ayrıca, röle destekli FSO haberleşme sistemlerinde iletim mesafesinin optimizasyonu üzerinde durulmuştur. Bilindiği kadarıyla röle destekli FSO haberleşme sistemlerinde iletim mesafesi performansının analizi ve optimizasyonu ile ilgili literatürde yeteri kadar analiz yapılmamıştır.

Tezin üçüncü bölümünde FSO haberleşme sistemlerinin iletim mesafesini arttırmak amacıyla önerilen algoritmalara yer verilmiştir. DE ve PSO algoritmalarının kullanılması önerilmiştir. Bu algoritmaların belirlenen sistemlerde kullanılması ile kesinti olasılığının, röle sayısının ve kullanılan gücün düşürülmesi veya iletim mesafesinin artırılması, yani iletim hattının optimum kullanılması amaçlanmıştır.

Tezin dördüncü bölümünde ise bu algoritmaları kullanan, seri ve paralel DF röle destekli FSO haberleşme sistemlerinin, röle konumlarının ve kesinti olasılıklarının optimizasyon analizleri ve bu iki algoritmanın bu sistemlerdeki performans karşılaştırması kapsamlı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak DE ve PSO algoritmaları ile yapılan optimizasyonların, güç marjının bütün değerlerinde iletim mesafelerini arttırdığı gözlemlenmiştir. Paralel röleli FSO haberleşme sistemlerinde en yüksek iletim mesafesine ulaşabilmek için bütün rölelerin yaklaşık aynı noktaya konulması gerektiği bulunmuştur.

Optimizasyon yapılarak $4 - 6 \text{ dB}$ güç marjı aralığında; 2 röleli sistemlerde ortalama 0.335 km (% 12.3), 3 röleli sistemlerde ortalama 0.944 km (% 40.8), 4 röleli sistemlerde ortalama 1.646 km (% 93) ve 5 röleli sistemlerde ortalama 2.424 km (% 220) iletim mesafesi artışı gerçekleştirilmiştir. $5 - 10 \text{ dB}$ güç marjı aralığında ise; 2 röleli sistemlerde ortalama 0.225 km (% 5.5), 3 röleli sistemlerde ortalama 0.649 km (% 15.8), 4 röleli sistemlerde ortalama 1.088 km (% 27.3) ve 5 röleli sistemlerde ortalama 1.553 km (% 41.5) iletim mesafesi artışı gerçekleştirilmiştir. Dahası, hem seri hem de paralel röleli FSO haberleşme sistemlerinde röle konumlarının optimize edilmesinin çalkantı kaynaklı sönmüleme ve yol kaybının etkilerini önemli ölçüde azalttığı görülmüştür.

DE ve PSO algoritmalarının FSO haberleşme sistemleri için yapılan detaylı analizleri sonucunda, her iki algoritmanın da işlem sürelerinin birbirlerine çok yakın olduğu ve bütün güç marjı değerlerinde birbirine çok yakın iletim mesafesi sonuçları elde ettiği, lakin PSO algoritmasının DE'den daha kararlı olduğu açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

Bu kapsamda hazırlanan çalışma 2015 yılında *Advances in Electrical and Computer Engineering (AECE)* dergisinde yayınlanmıştır (Basgumus ve ark. 2015).

Bu tez çalışması ile birlikte, iletim mesafesi performans analizi fiber optik kablolarda uygulamalı çalışılarak özgün bir Fresnel yansıma tabanlı fiber optik sensör dizisi gerçekleştirilmiş ve analizi yapılmıştır. Ayrıca, röle destekli FSO haberleşme sistemleri için iletim mesafesi, optimizasyon teknikleri kullanılarak geliştirilmiş ve kullanılan optimizasyon tekniklerinin bu sistemlerdeki performans analizleri detaylı olarak çalışılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalar ile elde edilen sonuçlar literatüre kazandırılan özgün katkılar olarak yerini almıştır.

Gelecek çalışmalarda, bu projede gerçekleştirilen yansıma tipli fiber optik sensör dizisi üzerinde bulunan sensör problemleri, ftalosiyanın tabanlı çeşitli malzemeler ile kaplanabilir. Böylece sensör dizisi aseton, asetonitril, o-ksilen, 1-bütanol, metanol, propanol, karbon tetraklorür, etilen glikol, benzen, etanol ve toluen gibi uçucu organik bileşenlere karşı duyarlı hale getirilebilir. Öncelikle kaplamaların kalınlığı deneysel çalışmalarla optimize edilerek sensörün duyarlılığı ve tekrarlanabilirliği artırılmalıdır. Ayrıca bir iklimlendirme test kabini kullanılarak tasarlanan sensör dizisinin sıcaklık ve neme bağlı karakteristik testleri yapılabilir. Sonuç olarak tekrarlanabilir, güvenilir ve yüksek hassasiyetli bir Fresnel yansıma tabanlı fiber optik uçucu organik bileşen sensör dizisi elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- Acampora, A., Krishnamurty, S. 1999.** A broadband wireless access network based on mesh-connected free-space optical links. *IEEE Personal Communications*. vol. 6, no.5: 62-65. <http://dx.doi.org/10.1109/98.799621>
- Alcatel-Lucent 2009.** Alcatel-Lucent Bell Labs announces new optical transmission record and breaks 100 petabit per second kilometer barrier. *Alcatel-Lucent*. North America.
- Akella, J., Yuksel, M., Kalyanaraman, S. 2005.** Error analysis of multi-hop free-space optical communication. *IEEE International Conference on Communications (ICC 2005)*. vol. 3: 1777-1781. <http://dx.doi.org/10.1109/ICC.2005.1494647>
- Altuncu, A. 2007.** Fiber optik haberleşme sistemlerinde yeni teknolojiler. *Dumlupınar Üniversitesi I. Teknoloji Günleri, Kütahya*.
- Amundsen, L., Landrø, M. 2009.** Measuring seismic with light. *Geoscience & Technology Explained (GEOExPRO)*. vol. 6, no.2. <http://www.geoexpro.com/articles/2009/02/measuring-seismic-with-light>
- Andrews L.C., Phillips R.L., Hopen C.Y. 2001.** Laser beam scintillation with applications. Spie Press, Washington, USA. <http://dx.doi.org/10.1117/3.412858>
- Arora, J.S. 2012.** Introduction to optimum design. Third edition. McGraw-Hill, New York, USA.
- Arpali, Ç. 2009.** Dilemsel ışık hüzmeleri ve atmosferdeki yayılım özellikleri. *Doktora tezi, Gazi Üniversitesi*. Ankara.
- Avestimehr, A.S., Tse, D.N.C. 2005.** Outage-optimal relaying in the low SNR regime. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Information Theory*. 941-945. Adelaide, Australia. <http://dx.doi.org/10.1109/ISIT.2005.1523476>
- Basgumus, A., Durak, F.E., Altuncu, A., Yilmaz, G. 2016.** A universal and stable all-fiber refractive index sensor system. *IEEE Photonics Technology Letters*. vol. 28, no.2: 171-174. <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2015.2488040>
- Basgumus, A., Durak, F.E., Sadik, S.A., Altuncu, A., Yilmaz, G., Ebeoglu, M.A. 2014.** Fresnel reflection based fiber optic refractive index sensor for liquid concentration dedection. *IEEE 22. Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU'2014)*. 594-597. Trabzon. <http://dx.doi.org/10.1109/SIU.2014.6830299>
- Başgümüş, A., Durak, F.E., Sadık, S.A., Altuncu, A. 2015.** Optical fiber length measurement system based on Fresnel reflection. *17. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı*. Ankara Üniversitesi, Ankara.

Basgumus, A., Namdar, M., Yilmaz, G., Altuncu, A. 2015. Performance comparison of the Differential Evolution and Particle Swarm Optimization algorithms in free-space optical communications systems. *Advances in Electrical and Computer Engineering (AECE)*. vol. 15, no.2: 17-22. <http://dx.doi.org/10.4316/AECE.2015.02003>

Bastı, M. 2012. Kuruluş yeri seçimi probleminin çözümünde metasezgisel algoritmalar. *Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi*. İstanbul.

Beland, R.R., 1993. Propagation through atmospheric optical turbulence. *The Infrared and Electro Optical Systems Handbook, chapter 2*. SPIE Opt. Eng. Press. Washington, USA.

Billings, C.W., Tabak, J. 2011. Lazerler: İşlenmiş ışığın teknolojisi ve kullanımı. Tübitak Popüler Bilim Kitapları, Ankara.

Bufetov, I.A., Melkumov, M.A., Firstov, S.V., Riumkin, K.E., Shubin, A.V., Khopin, V.F., Guryanov, A.N., Dianov, E.M. 2014. Bi-doped optical fibers and fiber lasers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. vol. 20, no.5. <http://dx.doi.org/10.1109/JSTQE.2014.2312926>

Carter, A., Samson, B., Tankala, K., 2009. Thulium-doped fiber forms kilowatt-class laser. *Laser Focus World*. <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-45/issue-4/features/fiber-lasers-thulium-doped-fiber-forms-kilowatt-class-laser.html>.

CGPM 1983. *The 17th Conférence Générale des Poids et Mesures (17th CGPM), Resolution 1*. <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/17/1/>

Chatzidiamantis, N., Uysal, M., Tsiftsis, T., Karagiannidis, G. 2010. Iterative near maximum-likelihood sequence detection for MIMO optical wireless systems. *Journal of Lightwave Technology*. vol. 28, no.7: 1064-1070. <http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2009.2038724>

Chang, K.A., Lim, H.J., Su, C.B. 2002. A fibre optic Fresnel ratio meter for measurements of solute concentration and refractive index change in fluids. *Measurement Science and Technology*. vol. 13, no.12: 1962-1965. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/13/12/321>

Cheng, D.K. 2009. Mühendislik elektromanyetiğinin temelleri. İkinci baskı. Palme Yayıncılık, Ankara.

Corning Inc. 1999. Corning SMF-28 CPC6 single-mode optical fiber. New York, USA. http://www.iet.unipi.it/m.luise/HTML/AdT/Corning_SMF28.pdf

Corning Inc. 2002. Corning SMF-28 optical fiber product information. New York, USA. <http://course.ee.ust.hk/elec342/readings/corning%20smf-28.pdf>

Corning Inc. 2012. Explanation of the Sources of Variation in Optical Fiber Effective Group Index of Refraction Values. *White Paper*. New York, USA.
http://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/RC-Application%20Notes/AN4091_04-12.pdf

Çelik, Y. 2011. Kablosuz optik haberleşme için sinyal işleme teknikleri. *Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi*. İstanbul.

Çakır, S. 2012. Yerçekimsel arama algoritması ile PID denetleç parametrelerinin tespiti. *Yüksek lisans tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi*. Bilecik.

Djordjevic, I., Denic, S., Anguita, J., Vasic, B., Neifeld, M. 2008. LDPC-coded MIMO optical communication over the atmospheric turbulence channel. *Journal of Lightwave Technology*. vol. 26, no.5: 478-487. <http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2007.916514>

Doğan, A., Alçı, M. 2011. Verimi artırmak için güç sistemlerinde kullanılan optimizasyon metotları ve uygulama alanları. *TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası IV. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu (EVK'2011)*. Kocaeli. 92-96.
http://www.emo.org.tr/ekler/b92faa6f74fbc4e_ek.pdf

Dorigo, M., Maniezzo, V., Colorni, A. 1991. Positive feedback as a search strategy. *Technical Report*. no.91-016. Politecnico di Milano, Italy.

Dorigo, M., Di Caro, G., Gambardella, L.M. 1999. Ant algorithms for discrete optimization. *Artificial Life*. vol. 5, no.2: 137-172.
<http://dx.doi.org/10.1162/106454699568728>

Durak, F.E. 2012. Yansıma tipli fiber optik uçucu organik bileşen sensörü ve sistem tasarımı. *Yüksek lisans tezi, Dumlupınar Üniversitesi*. Kütahya.

Durak, F.E., Altuncu, A., Ebeoğlu, M.A. 2011. Design of reflection type optical fiber volatile organic compounds (VOC) sensor. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*. Elazığ, Türkiye.

Durak, F.E., Başgümüş, A., Altuncu, A., Yılmaz, G., Ebeoğlu, M.A. 2013. Fresnel yansıma tabanlı fiber optik refraktometre. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. no.32: 13-20.
<http://birimler.dpu.edu.tr/app/views/panel/ckfinder/userfiles/16/files/Dergiler/32/2.pdf>

Easton, R. 2008. Optical Physics Lecture Notes, Rochester Institute of Technology, New York, USA. https://www.cis.rit.edu/class/simg455/SIMG-455_notes_20073a.pdf

Efendioğlu, H.S. 2014. Yoğunluk modülasyonlu fiber optik sensörlerin farklı fiber yapılar kullanarak akıllı tasarımı. *Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi*. İstanbul.

ehm.kocaeli.edu.tr 2014. Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Ders Notları, Kocaeli. http://ehm.kocaeli.edu.tr/web/files/48_EMDT-Ders-4.pdf

El-Sawy, A.A., Hendawy, Z.M., El-Shorbagy, M.A. 2013. Reference point based TR-PSO for multi-objective. *Applied Mathematics*. vol. 4, no.5: 803-813.
<http://dx.doi.org/10.4236/am.2013.45110>

Emtekno 2015. Fiber optik kablolar ışığı nasıl iletir. *Emtekno*. Çorlu, Türkiye.
<http://www.emtekno.com.tr/en/node/132>

Engelbrecht, A.P. 2007. Computational intelligence - An introduction. Second Edition. John Wiley & Sons, England.

Engin, B. 2015. Klasik ve ağ kodlamalı OFDMA sistemlerde alt-taşıyıcı atama. *Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi*. İstanbul.

Fried, D.L. 1967. Optical heterodyne detection of an atmospherically distorted signal wave front. *Proceedings of the IEEE*. vol. 55, no.1: 57-77.
<http://dx.doi.org/10.1109/PROC.1967.5377>

FOA (The Fiber Optic Association) 2005. The Fiber Optic Association - Tech topics. California, USA. <http://www.thefoa.org/tech/fo-or-cu.htm>

FOA (The Fiber Optic Association) 2014. Topic: Fiber optic jargon. California, USA. <http://www.thefoa.org/tech/ref/basic/jargon.html>

Fujikura Ltd. 2013. Specification for single-mode optical fiber.

Gagliardi, R.M., Karp, S. 1995. Optical communications. Second edition. John Wiley & Sons, New York, USA.

Goodman, J.W. 1985. Statistical Optics. John Wiley. New York, USA.

Haas, S.M. 2003. Capacity of and coding for multiple-aperture, wireless, optical communications. *PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology (MIT)*. Cambridge, England.

Hecht, J. 2011. Ultrafast fibre optics set new speed. *New Scientist*. no.2809.
<https://www.newscientist.com/article/mg21028095.500-ultrafast-fibre-optics-set-new-speed-record/>

Hecht, J. 2014. Photonic frontiers: Fiber lasers: Novel fiber lasers offer new capabilities. *Laser Focus World*. vol. 50, no.5.
<http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-50/issue-05/features/photronics-frontiers-fiber-lasers-novel-fiber-lasers-offer-new-capabilities.html>

Hemming, A., Simakov, N., Haub, J., Carter, A. 2013. Power scaling of resonantly pumped holmium-doped fiber lasers. *Solid-state and Diode Laser Technology Review Technical Digest*. paper 8. <http://www.nufern.com/library/item/id/439/>

Holland, J.H. 1975. Adaptation in natural and artificial systems. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA.

Høst-Madsen, A., Zhang, J. 2005. Capacity bounds and power allocation for wireless relay channels. *IEEE Transactions on Information Theory*. vol. 51, no.6: 2020-2040.
<http://dx.doi.org/10.1109/TIT.2005.847703>

Huang, C.L., Dun, J.F. 2008. A distributed PSO-SVM hybrid system with feature selection and parameter optimization. *Applied Soft Computing*. vol. 8, no.4: 1381-1391.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2007.10.007>

Işık, Y., Kahvecioğlu, A. 2003. Veri iletim yöntemleri ve optik veri iletiminin aviyonik sistemlerdeki kullanımı. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*. vol. 1, no.2: 91-97.
<http://www.hho.edu.tr/HutenDergi/2003TEMMUZ/13.pdf>

İlhan, H. 2011. Kaskat sönmülemeli kanallar için işbirlikli sistem tasarımı ve hata başarımlarının analizi. *Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi*. İstanbul.

Jiang, S. 2013. Two-micron thulium-doped fiber lasers achieve 10-kW peak power. *Laser Focus World*. vol. 49, no.2.
<http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-49/issue-02/features/fiber-lasers-two-micron-thulium-doped-fiber-lasers-achieve-10-k.html>

Kachitvichyanukul, V. 2009. Particle swarm optimization for large-scale industrial applications. *The 10th Asia Pasific Industrial Engineering and Management Systems Conference (APIEMS)*. Kitakyushu, Japan.

Karaboğa, D. 2005. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. *Technical Report*. no.TR06. Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
http://mf.erciyes.edu.tr/abc/pub/tr06_2005.pdf

Karaboğa, D. 2011. Yapay zeka optimizasyon algoritmaları. Genişletilmiş 2. basım. Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.

Karagiannidis, G.K., Tsiftsis, T.A., Sandalidis, H.G. 2006. Outage probability of relayed free space optical communication systems. *Electronic Letters*. vol. 42, no.17: 994-995. <http://dx.doi.org/10.1049/el:20061443>

Karimi, M., Nasiri-Kenari, M. 2009. BER analysis of cooperative systems in free-space optical networks. *Journal of Lightwave Technology*. vol. 27, no.24: 5639-5647.
<http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2009.2032789>

Karimi, M., Nasiri-Kenari, M. 2010. Outage analysis of relay-assisted free space optical communications. *IET Communications*. vol. 4, no.12: 1423-1432.
<http://dx.doi.org/10.1049/iet-com.2009.0335>

Karimi, M., Nasiri-Kenari, M. 2011. Free space optical communications via optical amplify-and-forward relaying. *Journal of Lightwave Technology*. vol. 29, no.2: 242-248. <http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2010.2102003>

Karp, S., Gagliardi, R.M., Moran, S.E., Stotts, L.B. 1988. Optical channels: Fibers, clouds, water, and the atmosphere. Springer Science+Business Media, New York, USA.

Kashani, M.A., Safari, M., Uysal, M. 2013. Optimal relay placement and diversity analysis of relay-assisted free-space optical communications systems. *Journal of Optical Communications and Networking*. vol. 5, no.1: 37-47. <http://dx.doi.org/10.1364/JOCN.5.000037>

Kashani, M.A., Uysal, M. 2013. Outage performance and diversity gain analysis of free-space optical multi-hop parallel relaying. *Journal of Optical Communications and Networking*. vol. 5, no.8: 901-909. <http://dx.doi.org/10.1364/JOCN.5.000901>

Kedenburg, S., Vieweg, M., Gissibl, T., Giessen, H. 2012. Linear refractive index and absorption measurements of nonlinear optical liquids in the visible and near-infrared spectral region. *Optical Materials Express*. vol. 2, no.11: 1588-1611. <http://dx.doi.org/10.1364/OME.2.001588>

Kennedy, J., Eberhart, R. 1995. Particle swarm optimization. *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*. vol. 4: 1942-1948. <http://dx.doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>

Kesler, M., Karakuzu, C., Yüzgeç, U. 2011. Güncel sezgisel arama algoritmalarının denetleyici parametrelerinin optimizasyonunda başarımların kıyaslaması. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*. 281-286. Elazığ.

Kim, C.B., Su, C.B. 2004. Measurement of the refractive index of liquids at 1.3 and 1.5 micron using a fibre optic Fresnel ratio meter. *Measurement Science and Technology*. vol. 15, no.9: 1683-1686. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/15/9/002>

Kim, I.I., Koontz, J., Hakakha, H., Adhikari, P., Stieger, R., Moursund, C., Barclay, M., Stanford, A., Ruigrok, R., Schuster, J.J., Korevaar, E.J. 1998. Measurement of scintillation and link margin for the TerraLink laser communication system. *Spie Proceedings, Wireless Technologies and Systems: Millimeter-Wave and Optical*. vol. 3232. <http://dx.doi.org/10.1117/12.301021>

Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P. 1983. Optimization by simulated annealing. *Science*. vol. 220, no.4598: 671-680. <http://www.jstor.org/stable/1690046>

Klyatskin V.I. 2011. Lectures on dynamics of stochastic systems. Elsevier, India.

Kolmogorov, A. 1961. Turbulence: Classic papers on statistical theory. *Friedlander, S.K., Topper, L. eds.*, Wiley (Interscience), New York, USA.

Krakadikt.com 2014. Differential Evolution (DE) for continuous function optimization. *www.krakadikt.com Just another tech blog*. <http://mirror.krakadikt.com/2004-11-13-genetic-algorithms/www.icsi.berkeley.edu/%257Estorn/code.html>

Kramer, G., Gastpar, M., Gupta, P. 2005. Cooperative strategies and capacity theorems for relay networks. *IEEE Transactions on Information Theory*. vol. 51, no.9: 3037-3063. <http://dx.doi.org/10.1109/TIT.2005.853304>

Krishna, V., Fan, C.H., Longtin, J.P. 2000. Real-time precision concentration measurement for flowing liquid solutions. *Review of Scientific Instruments*. vol. 71, no.10: 3864-3868. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1288236>

Kulaç, S. 2012. Kablosuz iletişimde işbirlikçi çeşitleme yöntemlerinin araştırılması. *Doktora tezi, Ankara Üniversitesi*. Ankara.

Laneman, J.N., Wornell, G.W. 2000. Energy-efficient antenna sharing and relaying for wireless networks. *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2000)*. vol. 1: 7-12. <http://dx.doi.org/10.1109/WCNC.2000.904590>

Laneman, J.N., Wornell, G.W., Tse, D.N.C. 2001. An efficient protocol for realizing cooperative diversity in wireless networks. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Information Theory*. Washington, USA. <http://dx.doi.org/10.1109/ISIT.2001.936157>

Lee, E., Chan, V. 2004. Part 1: Optical communication over the clear turbulent atmospheric channel using diversity. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. vol. 22, no.9: 1896-1906. <http://dx.doi.org/10.1109/JSAC.2004.835751>

Li, H., Zhao, Q. 2006. Distributed modulation for cooperative wireless communications. *IEEE Signal Processing Magazine*. vol. 23, no.5: 30-36. <http://dx.doi.org/10.1109/MSP.2006.1708410>

Liu, J.M. 2005. Photonic devices. First edition. Cambridge University Press, Cambridge, England.

Loehr, J., Siskoninetz, W., Wiemer, J., Field, S. 1998. Optical communication systems for avionics. *IEEE Systems Magazine*. vol. 13, no.4: 9-12. <http://dx.doi.org/10.1109/62.666830>

Majumdar, A.K., Ricklin, J.C. 2008. Free-space laser communications: Principles and advances. Springer, New York, USA.

Monzon-Hernandez, D., Villatoro, J. 2006. High-resolution refractive index sensing by means of a multiple-peak surface plasmon resonance optical fiber sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*. vol. 115, no.1: 227-231. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2005.09.006>

Moutzouris, K., Papamichael, M., Betsis, S.C., Stavrakas, I., Hloupis, G., Triantis, D. 2014. Refractive, dispersive and thermo-optic properties of twelve organic solvents in the visible and near-infrared. *Applied Physics B*. vol. 116, no.3: 617-622. <http://dx.doi.org/10.1007/s00340-013-5744-3>

Mutlu, K.I. 2005. Canovate fiber optik eğitim sunumu. İstanbul, Türkiye.

NASA 2008. Çeviri Karaahmet.

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/83/Atmospheric_electromagnetic_transmittance_or_opacity.jpg

Navidpour, S.M., Uysal, M., Kavehrad, M. 2007. BER performance of free-space optical transmission with spatial diversity. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. vol. 6, no.8: 2813-2819. <http://dx.doi.org/10.1109/TWC.2007.06109>

Namdar, M. 2014. Bilişsel iletim ağlarında parçalı spektrum algılama ve alıcı çeşitleme yöntemleri. *Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi*. İstanbul.

Nelder, J.A., Mead, R. 1965. A Simplex method for function minimization. *The Computer Journal*. vol. 7, no.4: 308-313. <http://dx.doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>

Nosratinia, A., Hunter, T.E., Hedayat, A. 2004. Cooperative communication in wireless networks. *IEEE Communications Magazine*. vol. 42, no.10: 74-80. <http://dx.doi.org/10.1109/MCOM.2004.1341264>

NTT 2010. World record 69-terabit capacity for optical transmission over a single optical fiber. *Nippon Telegraph and Telephone Corporation (NTT)*. Chiyoda Ward, Tokyo. <http://www.ntt.co.jp/news2010/1003e/100325a.html>

Obukhov, A.M. 1953. Effect of weak inhomogeneities in the atmosphere on sound and light problem. *Izvestiya Sibir. Otdel. Akad. Nauk SSSR, Geofizika*. no.2: 155-165.

Osche, G.R. 2002. Optical detection theory for laser applications. John Wiley&Sons, New York, USA.

Özsağlam, M.Y., Çunkaş, M. 2008. Optimizasyon problemlerinin çözümü için parçacık sürü optimizasyonu algoritması. *Politeknik Dergisi*. vol. 11, no.4: 299-305. <http://www.politeknik.gazi.edu.tr/index.php/PLT/article/viewFile/153/151>

Özsoy, S. 2001. Fiber optik. Second edition. Birsen Yayınevi, İstanbul.

Palmer, J. 2011. Laser puts record data rate through fibre. *Science and technology reporter, BBC News*. <http://www.bbc.com/news/science-environment-13469924>

Peach, M. 2013. NEC and Corning achieve petabit optical transmission. *The business of photonics, optics.org*. <http://optics.org/news/4/1/29>

Pit-Claudel, C. 2012. How random is pseudo-random? Testing pseudo-random number generators and measuring randomness. Kişisel blog sitesi.
<http://pit-claudel.fr/clement/blog/how-random-is-pseudo-random-testing-pseudo-random-number-generators-and-measuring-randomness/#testing-a-prng>

Poletti, F., Wheeler, N.V., Petrovich, M.N., Baddela, N., Fokoua, E.N., Hayes, J.R., Gray, D.R., Li, Z., Slavik, R., Richardson, D.J. 2013. Towards high-capacity fibre-optic communications at the speed of light in vacuum. *Nature Photonics*. vol. 7, no.4: 279-284. <http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2013.45>

Popoola, W.O. 2009. Subcarrier intensity modulated free-space optical communication systems. *PhD thesis, Notrumbria University*. Newcastle, England.

Rajan, G. 2015. Optical fiber sensors – Advanced techniques and applications. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, USA.

Rheims, J., Köser, J., Wriedt, T. 1997. Refractive-index measurements in the near-IR using an Abbe refractometer. *Measurement Science and Technology*. vol. 8, no.6: 601-605. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/8/6/003>

Sabucu, Y., Erköçük, S. 2013. IEEE 802.15.4a tabanlı kablosuz sensör ağlarında birincil kullanıcı algılaması. *21st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*. 1-4. <http://dx.doi.org/10.1109/SIU.2013.6531193>

Safari, M. 2010. Relay-assisted free-space optical communications. *PhD thesis, University of Waterloo*. Ontario, Canada.

Safari, M., Rad, M.M., Uysal, M. 2012. Multi-hop relaying over the atmospheric poisson channel: Outage analysis and optimization. *IEEE Transactions on Communications*. vol. 60, no.3: 817-829.
<http://dx.doi.org/10.1109/TCOMM.2012.010512.100630>

Safari, M., Uysal, M. 2008a. Relay-assisted free-space optical communication. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. vol. 7, no.12: 5441-5449.
<http://dx.doi.org/10.1109/T-WC.2008.071352>

Safari, M., Uysal, M. 2008b. Diversity gain analysis of free-space optical communication systems. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE'08)*. 1239-1244. <http://dx.doi.org/10.1109/CCECE.2008.4564737>

Safari, M., Uysal, M. 2009. Relay-assisted free-space quantum-key distribution over long atmospheric channels. *Journal of Lightwave Technology*. vol. 27, no.20: 4508-4515. <http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2009.2024554>

Sendonaris, A., Erkip, E., Aazhang, B. 2003. User cooperation diversity. Part I. System description. *IEEE Transactions on Communications*. vol. 51, no.11: 1927-1938.
<http://dx.doi.org/10.1109/TCOMM.2003.818096>

Shapiro, J.H. 1978. Imaging and optical communication through atmospheric turbulence. *Topics in Applied Physics, Laser Beam Propagation in the Atmosphere, chapter 6*. Springer Berlin Heidelberg, New York, USA.
<http://dx.doi.org/10.1007/3-540-08812-1>

Singh, S. 2002. Refractive index measurement and its applications. *Physica Scripta*. vol. 65, no.2: 167-180. <http://dx.doi.org/10.1238/Physica.Regular.065a00167>

Storn, R. 1996. On the usage of differential evolution for function optimization. *Biennial Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS)*. 519-523. Berkeley, California, USA. <http://dx.doi.org/10.1109/NAFIPS.1996.534789>

Storn, R., Price, K. 1997. Differential evolution - A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*. vol. 11, no.4: 341-359. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1008202821328>

Su, H., Huang, X.G. 2007. Fresnel-reflection-based fiber sensor for on-line measurement of solute concentration in solutions. *Sensors and Actuators B: Chemical*. vol. 126, no.2: 579-582. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2007.04.008>

T.C. Milli Eğitim Bakanlığı 2013. Elektrik-Elektronik teknolojisi - İletişim teknolojileri. Ankara.

Tatarski, V.I. 1961. Wave propagation in a turbulent medium. McGraw-Hill, New York, USA.

Tsiftsis, T.A., Sandalidis, H.G., Karagiannidis, G.K., Sagias, N.C. 2006. Multihop free-space optical communications over strong turbulence channels. *IEEE International Conference on Communications (ICC 2006)*. vol. 6: 2755-2759.
<http://dx.doi.org/10.1109/ICC.2006.255196>

Tsiftsis, T.A., Sandalidis, H.G., Karagiannidis, G.K., Uysal, M. 2009. Optical wireless links with spatial diversity over strong atmospheric turbulence channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. vol. 8, no.2: 951-957.
<http://dx.doi.org/10.1109/TWC.2009.071318>

Weast, R.C., Selby, S.M. 1968. Handbook of chemistry and physics. 48. edition. The Chemical Rubber Company, Cleveland, Ohio, USA.

Wilson, S.G., Brandt-Pearce, M., Qianling, C., Baedke, M. 2005. Optical repetition MIMO transmission with multipulse PPM. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. vol. 23, no.9: 1901-1910.
<http://dx.doi.org/10.1109/JSAC.2005.853804>

Wu, Y.T., Huang, X.G., Su, H. 2007. A quasidistributed fiber optic sensor for solute concentration measurement based on Fresnel reflection. *Applied Physics Letters*, vol. 91, no.13: 1131101-1-1131101-3. <http://dx.doi.org/10.1063/1.2790375>

- Xu, W., Huang, X.G., Pan, J.S. 2013.** Simple fiber-optic refractive index sensor based on Fresnel reflection and optical switch. *IEEE Sensors Journal*. vol. 13, no.5: 1571-1574. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2012.2236751>
- Yang, X.S. 2008.** Nature-inspired metaheuristic algorithms. Luniver Press, Bristol, UK.
- Yang, X.S. 2009.** Firefly algorithms for multimodal optimization. *Stochastic algorithms: Foundations and Applications (SAGA). Lecture notes in computer science*. vol. 5792: 169-178. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-04944-6_14
- Yang, X.S. 2010.** A new metaheuristic bat-inspired algorithm. *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010). Studies in computational intelligence*. vol. 284: 65-74. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12538-6_6
- Yang, X.S. 2010.** Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimisation. *International Journal of Bio-Inspired Computation (IJBIC)*. vol. 2, no.2: 78-84. <http://dx.doi.org/10.1504/IJBIC.2010.032124>
- Yang, X.S. 2012.** Flower pollination algorithm for global optimization. *Unconventional Computation and Natural Computation (UCNC). Lecture notes in computer science*. vol. 7445: 240-249. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-32894-7_27
- Yang, X.S. 2014.** Nature-inspired optimization algorithms. Elsevier Insights. Waltham, Massachusetts, USA.
- Yang, X.S., Deb, S. 2009.** Cuckoo search via Lévy flights. *World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC)*. 210-214. Coimbatore, India. <http://dx.doi.org/10.1109/NABIC.2009.5393690>
- Yasin, M., Harun, S.W., Arof, H. 2012.** Fiber optic sensors book. InTech, Rijeka, Croatia. <http://dx.doi.org/10.5772/1379>
- Yemenici, N.K. 2014.** İstatistik II ders notları. Düzce Üniversitesi İşletme Fakültesi. http://www.buders.com/UNIVERSITE/Universite_Dersleri/olasilik/orneklem_dagilimlari_ve_merkezi_limit_teoremi.pdf
- Yıldız, A.R. 2006.** Tasarım optimizasyon problemlerinin çözümü için çok amaçlı arama tabanlı bir sistemin geliştirilmesi. *Doktora tezi, Uludağ Üniversitesi*. Bursa.
- Yılmaz, S. 2014.** Yarasa algoritmasının unimodal, multimodal ve kaydırılmış sayısal optimizasyon problemleri (CEC05) üzerinde geliştirilmesi. *Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi*. Isparta.
- Yu, B., Yao, Y., Zhao, Y., Liu, C., Yu, X. 2014.** Simulation research of medium-short distance free-space optical communication with optical amplification based on polarization shift keying modulation. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*. vol. 125, no.13: 3319-3323. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.12.056>

Yuan, J., Zhao, C., Ye, M., Kang, J., Zhang, Z., Jin, S. 2014. A Fresnel reflection-based optical fiber sensor system for remote refractive index measurement using an OTDR. *Photonics Sensors*. vol. 4, no.1: 48-52.
<http://dx.doi.org/10.1007/s13320-013-0131-6>

Zhao, Z., Lau, W.S., Choi, A.C.K., Shan, Y.Y. 1994. Modulation functions of the reflective optical fiber sensor for specular and diffuse reflection. *Optical Engineering*. vol. 33, no.9: 2986-2991. <http://dx.doi.org/10.1117/12.178259>

Zhao, J.R., Huang, X.G., He, W.X., Chean, J.H. 2010. High-resolution and temperature-insensitive fiber optic refractive index sensor based on Fresnel reflection modulated by Fabry–Perot interference. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no.19: 2799-2803. <http://dx.doi.org/10.1109/JLT.2010.2065215>

Zhao, C.L., Li, J., Zhang, S., Zhang, Z., Jin, S. 2013. Simple Fresnel reflection-based optical fiber sensor for multipoint refractive index measurement using an AWG. *IEEE Photonics Technology Letters*. vol. 25, no.6: 606-608.
<http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2013.2243833>

Zhu, X., Kahn, J.M. 2002. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels. *IEEE Transactions on Communications*. vol. 50, no.8: 1293-1300.
<http://dx.doi.org/10.1109/TCOMM.2002.800829>

Zhu, X., Kahn, J.M. 2003. Markov chain model in maximum-likelihood sequence detection for free-space optical communication through atmospheric turbulence channels. *IEEE Transactions on Communications*. vol. 51, no.3: 509-516.
<http://dx.doi.org/10.1109/TCOMM.2003.809787>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Arif Başgümüş
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya, 22.09.1980
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lisans : Uludağ Üniversitesi, 2002
Yüksek Lisans : Dumlupınar Üniversitesi, 2005
Çalıştığı Kurumlar ve Yılları : Dumlupınar Üniversitesi 2002-2006, 2013-...
Uludağ Üniversitesi, 2006-2013
İletişim (e-posta) : arif.basgumus@dpu.edu.tr
Yayımları :

A. Uluslararası SCI ve SCI-E Makaleler:

Basgumus, A., Durak, F.E., Altuncu, A., Yilmaz, G. 2016. A universal and stable all-fiber refractive index sensor system. *IEEE Photonics Technology Letters*. vol. 28, no.2: 171-174. <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2015.2488040>

Basgumus, A., Namdar, M., Yilmaz, G., Altuncu, A. 2015. Performance comparison of the Differential Evolution and Particle Swarm Optimization algorithms in free-space optical communications systems. *Advances in Electrical and Computer Engineering (AECE)*. vol. 15, no.2: 17-22. <http://dx.doi.org/10.4316/AECE.2015.02003>

Altuncu, A., Basgumus, A. 2005. Gain enhancement in L band loop EDFA through C band signal injection. *IEEE Photonics Technology Letters*. vol. 17, no.7: 1402-1404. <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2005.848565>

B. Uluslararası Konferans Bildirileri:

Sadık, Ş.A., Başgümüş, A., Durak, F.E., Karlık, S.E., Altuncu, A. 2015. Comparative analysis of the effect of optical fiber spin profiles on polarization mode dispersion. *9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO'2015)*. Bursa.

Altuncu, A., Başgümüş, A., Uzunca, B., Haznedaroğlu, E. 2005. Design and characterization of high performance C and L band Erbium Doped Fiber Amplifiers (C, L-EDFAs). *4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO'2005)*. 279-283. Bursa. http://www.emo.org.tr/ekler/d44e06a7038f2dd_ek.pdf

C. Ulusal Makaleler:

Durak, F.E., Başgümüş, A., Altuncu, A., Yılmaz, G., Ebeoglu, M.A. 2013. Fresnel yansıma tabanlı fiberoptik refractometre. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. no.32: 13-20.
<http://birimler.dpu.edu.tr/app/views/panel/ckfinder/userfiles/16/files/Dergiler/32/2.pdf>

Altuncu, A., Başgümüş, A. 2004. L bandında çalışan erbiyum katkılı fiber optik amplifikatörlerde pompa lazeri dalgaboyunun kazanç ve gürültü spektrumlarına etkisi. *Karaelmas Üniversitesi Teknoloji Dergisi*. vol. 7, no.2: 321-327.
[http://jstech.karabuk.edu.tr/arsiv/1302-0056/2004/Cilt\(7\)/Sayi\(2\)/321-327.pdf](http://jstech.karabuk.edu.tr/arsiv/1302-0056/2004/Cilt(7)/Sayi(2)/321-327.pdf)

D. Ulusal Konferans Bildirileri:

Basgumus, A., Durak, F.E., Sadik, S.A., Altuncu, A., Yılmaz, G., Ebeoglu, M.A. 2014. Fresnel reflection based fiber optic refractive index sensor for liquid concentration dedection. *IEEE 22. Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU'2014)*. 594-597. Trabzon.
<http://dx.doi.org/10.1109/SIU.2014.6830299>

Başgümüş, A., Altuncu, A. 2005. L bandı Erbium Katkılı Fiber Amplifikatörlerde pompa dalgaboyunun bandgenişliğine etkisi. *IEEE 13. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU'2005)*. Kayseri.
<http://dx.doi.org/10.1109/SIU.2005.1567659>

Başgümüş, A., Altuncu, A. 2005. L bandında çalışan Erbium Katkılı Fiber Optik Amplifikatör (L-EDFA) tasarımı. *IEEE 13. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU'2005)*. Kayseri. <http://dx.doi.org/10.1109/SIU.2005.1567660>

E. Ulusal Özetli Konferans Bildirileri:

Başgümüş, A., Durak, F.E., Sadık, S.A., Altuncu, A. 2015. Optical fiber length measurement system based on Fresnel reflection. *17. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı*. Ankara Üniversitesi, Ankara.

Sadık, S.A., Başgümüş, A., Durak, F.E., Karlık S.E., Altuncu, A. 2015. Spin profillerinin polarizasyon mod dispersiyonu azaltma performanslarının karşılaştırmalı analizi. *17. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı*. Ankara Üniversitesi, Ankara.

Altuncu, A., Başgümüş, A. 2005. L bandı döngü tipi Erbiyum Katkılı Fiber Amplifikatör ve ASE Kaynağı. *7. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalışma Toplantısı*. Bilkent Üniversitesi, Ankara.

Altuncu, A., Başgümüş, A. 2004. L bandında çalışan yüksek performanslı Erbiyum Katkılı Fiber Optik Amplifikatör (L-EDFA) tasarımı. *6. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalışma Toplantısı*. Sabancı Üniversitesi, İstanbul.

Altuncu, A., Başgümüş, A. 2004. L bandı Erbiyum Katkılı Fiber Amplifikatörde pompa dalgaboyu ve fiber uzunluğunun optimizasyonu. *6. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalışma Toplantısı*. Sabancı Üniversitesi, İstanbul.

F. Tamamlanan Projeler:

Altuncu, A., Ebeoglu, M.A., Başgümüş, A., Durak, F.E. 2015. Yansıma tipli fiber optik uçucu organik bileşen sensör dizisi tasarımı. *Dumlupınar Üniversitesi 2014/4 nolu Bilimsel Araştırma Projesi, Kütahya*.