

**OPTİK FİBERLİ DAĞINIK AKUSTİK ALGILAMA İLE
HEDEF TESPİTİ VE SİSTEM OPTİMİZASYONU**

Mert BİLGİN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OPTİK FİBERLİ DAĞINIK AKUSTİK ALGILAMA İLE HEDEF TESPİTİ VE
SİSTEM OPTİMİZASYONU**

Mert BİLGİN
501905016

Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman GÜNDAY
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır.

TEZ ONAYI

Mert BİLGİN tarafından hazırlanan “OPTİK FİBERLİ DAĞINIK AKUSTİK ALGILAMA İLE HEDEF TESPİTİ VE SİSTEM OPTİMİZASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy çokluğu/oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi, Abdurrahman GÜNDAY

- Başkan :** Prof. Dr. Güneş YILMAZ
0000-0001-8972-1952
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
İmza
- Üye :** Dr. Öğr. Üyesi, Abdurrahman GÜNDAY
0000-0002-3262-3494
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
İmza
- Üye :** Doç. Dr. Ömer ZOR
0000-0001-6461-9812
Bursa Teknik Üniversitesi,
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi
Elektromanyetik Alanlar ve Mikrodalga Tekniği
Anabilim Dalı
İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

.././.....

B.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.

.../.../.....

Mert BİLGEN

**TEZ YAYINLANMA
FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI**

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge" kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman GÜNDAY
.. / 03/ 2023

Mert BİLGİN
.. / 03/ 2023

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OPTİK FİBERLİ DAĞINIK AKUSTİK ALGILAMA İLE HEDEF TESPİTİ VE SİSTEM OPTİMİZASYONU

Mert BİLGİN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman GÜNDAY

Sınır hatlarında yer alan askeri üsler, karakollar ve haberleşme tesisleri ile kamu tesislerinin izinsiz girişlere karşı korunması ve sınır güvenliğinin sağlanması oldukça önem arz etmektedir. Bu tesislerin güvenliği için optik fiberli dağınık akustik algılama sistemlerinden yaygın biçimde yararlanılmaktadır. Bu alandaki çalışmalar, çoğunlukla Rayleigh saçılma mekanizmasını kullanan Rayleigh faz-OTDR metodunu esas almaktadır. Bu yöntemde, ortamdaki akustik ve titreşimsel oluşumlara bağlı olarak geriye saçılan ışık dalgasının Rayleigh bileşenindeki faz kayması tespit edilmektedir. Bu tez çalışmasında, geriye saçılan ışık dalgasının Rayleigh bileşeninin faz değişimlerinden faydalanan faz-OTDR metodu yerine, Brillouin esaslı BOTDR metodundan yararlanılmıştır. Bu metotta, ortamdaki sıcaklık değişimlerine bağlı olarak algılayıcı fiber boyunca meydana gelen faz değişimlerini kullanan yeni bir faz-BOTDR tabanlı dağınık akustik algılama (DAS) yöntemi önerilmiştir. Bu çalışmada, dağınık akustik algılama modeli oluşturularak model üzerinden faz değişiminin, sıcaklık ve algılayıcı fiberin çekirdek kırılma indisi bağımlılıklarına ilişkin benzetimler elde edilmiştir. Ayrıca, Matlab 2022b ortamında eğri uydurma yönteminden faydalanarak bu parametreler arasındaki ilişkiyi veren birinci dereceden matematiksel eşitlikler türetilmiştir. Buna ek olarak fiber çekirdek kırılma indisi ve fiber uzunluğunun nicemsel değişiminin çarpımına ait diferansiyel analiz gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasında, fiberin çekirdek kırılma indisinin 1,44183 – 1,44188 aralığında değişimi için 0 rad – 227,7 rad aralığında faz değişimi değerlerine ulaşılmıştır. Diğer bir ifadeyle, faz değişimindeki 1 rad'lık bir artış, algılayıcı fiberin çekirdek kırılma indisinde $\sim 2,23 \times 10^{-7}$ değerinde bir değişime neden olmaktadır. Algılayıcı fiber sıcaklığının ~ 5 °K'lik değişimine karşılık fiber boyunca faz değişimi 0 rad – 227,7 rad aralığında elde edilmiştir. Sonuç olarak, faz değişiminin sıcaklık bağımlılığı 45,667 rad/°K olarak hesaplanmıştır. Bu tez çalışmasında önerilen BOTDR ölçüm metodunu kullanan optik fiberli dağınık akustik algılama sistemi, önemli tesislerin sınır güvenliğini sağlamak ve izinsiz girişleri tespit etmek için kullanılan literatürdeki benzer algılama sistemlerinden, esas aldığı ölçüm yöntemiyle ayrılmaktadır. Dolayısıyla, bu açıdan bakıldığında farklı bir bakış açısı ve çözüm önerisi sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dağınık akustik algılama, faz-BOTDR, faz-OTDR, faz değişimi, faz kayması, optik fiber çekirdek kırılma indisi, uzamsal çözünürlük, hedef tespiti, izinsiz giriş, sınır güvenliği ihlali

2023, xi + 84 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

TARGET DETECTION AND SYSTEM OPTIMIZATION WITH OPTICAL FIBER DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSING

Mert BİLGEN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronics Engineering

Supervisor: Dr. Abdurrahman GÜNDAY

It is very important to protect military bases, police stations, communication facilities and public facilities on the border lines against unauthorized entry and to ensure border security. Optical fiber distributed acoustic sensing systems are widely used for security of these facilities. Studies in this field are mostly based on the Rayleigh phase-OTDR method exploiting the Rayleigh scattering mechanism. In this method, the phase shift in the Rayleigh component of the backscattered light wave is detected depending on the acoustic and vibrational formations occurred in the medium. In this thesis, Brillouin-based BOTDR method has been used instead of the phase-OTDR method making use of the phase changes of the Rayleigh component of the backscattered light wave. In this method, a new phase-BOTDR-based distributed acoustic sensing method utilizing phase changes along the sensing fiber due to temperature changes in the environment has been proposed. In this study, a distributed acoustic sensing model has been built up and the simulations related to the temperature and core refractive index dependencies of the phase changes have been performed using the model. Furthermore, first-order mathematical equations representing the relations between these parameters have been derived by using the curve-fitting method in Matlab 2022b environment. Moreover, a differential analysis of the multiplication of the fiber core refractive index and the quantitative variation of the fiber length has been obtained. In this thesis, for changing of core refractive index of the fiber in the range of 1,44183 – 1,44188, phase change values have been obtained in the range of 0 rad – 227,7 rad. In other words, a 1 rad increase in the phase change causes a variation of $2,23 \times 10^{-7}$ in the core refractive index of the sensing fiber. For temperature change of the sensing fiber about 5 °K, phase change occurring along the fiber has been obtained in the range of 0 rad – 227,7 rad. As a result, temperature dependence of the phase change has been computed as 45,667 rad/°K. Optical fiber distributed acoustic sensing system using BOTDR method proposed in this thesis, differs from the similar detection systems in the literature utilizing for ensuring the border security of important facilities and detecting intruders, in terms of the measurement method deployed in the system. Therefore, it offers a different perspective and solution proposal when viewed from this aspect.

Key words: Distributed acoustic sensing, phase-BOTDR, phase-OTDR, phase change, phase shift, optical fiber core refractive index, spatial resolution, target detection, intrusion, boarder security breach

2023, xi + 84 pages.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez sürecim boyunca akademik bilgi birikimiyle ve özgün fikirleriyle çalışmam boyunca her zaman desteğini hissettiren danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman GÜNDAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Sevgisini ve güvenini her zaman hissettiren eşim Makbule BİLGEN'e, büyük emeklerle beni yetiştiren başta annem Bircan BİLGEN ve babam Talat BİLGEN olmak üzere aileme teşekkürlerimi sunarım.

Mert BİLGEN
.../.../.....

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGE VE KISALTMALAR	vi
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Kaynak Araştırması.....	4
2.2. Fiber Optik ve Kuramsal Temeller	9
2.2.1. Fiber Optik Genel Bakış	9
2.2.2. Fiber optik kablo yapısı.....	14
2.2.3. Fiber optik kablo parametreleri.....	16
2.2.3.1. Kırılma indisi	16
2.2.3.2. Kırılma indisleri farkı.....	18
2.2.3.3. Nümerik açıklık (NA)	18
2.2.3.4. Normalize frekans	19
2.2.3.5. Faz modülasyonu	20
2.2.3.6. Frekans kaydırma	21
2.3. Dağınık Algılamada Saçılma Mekanizmaları	22
2.3.1. Elastik saçılmalar	22
2.3.1.1. Rayleigh Saçılması.....	23
2.3.2. Elastik olmayan saçılmalar	25
2.3.2.1. Raman Saçılması.....	27
2.3.2.2. Brillouin saçılması	29
2.4. Optik Fiberli Algılayıcılar.....	33
2.4.1. Dağınık algılayıcılar.....	34
2.4.2. İnterferometrik algılayıcılar	39
2.4.2.1. Mach-Zehnder interferometresi	40
2.4.2.2. Michelson interferometresi	40
2.4.2.3. Fabry-Perot interferometresi	42
2.4.2.4. Sagnac interferometresi.....	43
2.4.3. Izgara temelli algılayıcılar.....	44
2.4.3.1. Fiber Bragg ızgaralar.....	44
2.4.3.2. Uzun süreli fiber optik ızgara algılayıcıları	46
2.5. Geri Saçılma Esaslı Optik Ölçüm Teknikleri	47
2.5.1. Rayleigh saçılması esaslı OTDR ve ϕ -OTDR.....	47
2.5.2. Brillouin saçılması esaslı optik zaman domeni reflektometresi (BOTDR)	54
2.5.3. Raman saçılması esaslı optik zaman domeni reflektometresi (ROTDR).....	59
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	62
3.1. DAS Sistem Modeli (Faz-BOTDR esaslı)	62
3.2. Bileşen Karakterizasyonları	63
3.2.1. Işık kaynakları	63
3.2.2. Erbiyum katkılı fiber optik yükselteç (EDFA)	67
3.2.3 Akusto optik modülatör (AOM).....	68
3.2.4. Optik sirkülatörler	68
3.2.5. Optik bant geçiş filtresi (BPF)	69

3.2.6. Fotodedektör (PD).....	70
4. BULGULAR.....	73
4.1. Benzetim Sonuçları.....	73
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	79
KAYNAKLAR.....	80
ÖZGEÇMİŞ.....	84

SİMGE VE KISALTMALAR

Simge	Açıklamalar
$\Delta L(t)$	Fiber uzunluğu değişimi
$\Delta n(t)$	Kırılma indisi değişimi
$\Delta\phi$	Radyan cinsinden faz değişimi (faz kayması)
Δv_b	Brillouin kazancı
Δz	Uzamsal çözünürlük değişimi
$\Delta\beta$	Yayıma sabiti farkı
c	Işık hızı
d	Optik fiber çekirdek çapı
f_a	Akustik frekansı dalgası
g_b	Brillouin kazanç katsayısı
h	Planck sabitini
$I_B(x)$	Brillouin geri saçılan ışığın yoğunluğu
K	Boltzmann sabiti
L	Fiber uzunluğu
n	Kırılma indisi faktörü
N	Mod sayısı
n_0	Hava olan koruyucu zarfının kırılma indisi
n_1	1. ortamın kırılma indisi
n_2	2. ortamın kırılma indisi
Θ_1	Geliş açısı
Θ_2	Kırılma açısı
p	Fotoelastik katsayı
P_R	Raman gücü
S	Yakalama katsayısı
T	Fibere pompalanan ışık ile geriye saçılan ışığın alınma süresi arasındaki zaman farkı
v	Işığın silika camdaki hızı
V	Gigahertz cinsinden kaynak band genişliği
v_a	Akustik dalga hızı
v_b	Brillouin frekans kayması (Doppler kayması)
$v_B(0)$	Sıfır gerginlikte Brillouin frekans kayması
$v_B(\epsilon)$	Gerginliğe bağlı Brillouin frekans kayması
v_g	Fiberdeki ışık dalgasının grup hızı
w	Optik sinyalin darbe süresi
W_o	Girdi optik darbe genişliği
Z	Uzamsal çözünürlük
α	Rayleigh saçılması zayıflama katsayısı
α_B	Brillouin saçılma katsayısı
α_R	Rayleigh saçılma katsayısı
Γ	Uzamsal örtüşme verimliliği katsayısı
ϵ	Gerginlik
λ	Fibere pompalanan ışığın dalga boyu
λ_a	Akustik dalga boyu

λ_{bs}	Stokes dalga boyu
λ_p	Lazer dalga boyu
ρ	Erimiş silika yoğunluğu
ν	Frekans
Δ	Kırılma indisleri farkı
Δt	Darbe yayılma sabiti
ΔT	Toplam darbe yayılması
ν	Normalize frekans
P_0	Optik çıkış gücü
P_B	Brillouin eşik gücü
P_i	Optik giriş gücü
T_F	Camın termal denge durumuna ulaşabildiği fiktif sıcaklığı
\mathcal{L}	Fiberin iletim kayıp çarpanı
Λ	Normal ızgara periyodu
α_{dB}	Fiber zayıflama katsayısı
β_c	Bir T_F sıcaklığında izotermal sıkıştırılabilme katsayısı

Kısaltmalar Açıklamalar

AOM	Akusto Optik Modülatör
APD	Çığ Fotodiyotu
ASE	Kuvvetlendirilmiş Spontane Emisyon
BOTDA	Brillouin Optik Zaman Domeni Analizi
BOTDR	Brillouin Optik Zaman Domeni Reflektometresi
BPF	Bant Geçiren Filtre
CW	Sürekli Dalga
DAQ	Veri Toplama Sistemi
DAS	Dağınık Akustik Algılama
DVS	Dağınık Titreşim Algılama
EDFA	Erbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendirici
EFPI	Dışta Etkileşimli Fabry-Perot İnterferometresi
EM	Elektromanyetik
EO	Elektro-Optik
Faz-OTDR	Faz Optik Zaman Domeni Reflektometresi
FBG	Fiber Bragg Izgara
FPI	Fabry - Perot İnterferometresi
IFPI	İçte Etkileşimli Fabry-Perot İnterferometresi
ILD	Enjeksiyon Lazerli Diyot
LPFG	Uzun Periyotlu Fiber Izgaralar
MZI	Mach-Zehnder İnterferometreler
NA	Nümerik Açıklık
OFDR	Optik frekans Domeni Reflektometresi
OFDS	Optik Fiberli Dağınık Algılayıcı
OTDR	Optik Zaman Domeni Reflektometresi
P-OTDR	Polarizasyon-OTDR
PZT	Kutuplu kurşun zirkonat titanat
RDTs	Raman Dağınık Sıcaklık Algılama

ROTDR	Raman Optik Zaman Domeni Reflektometresi
SBS	Spontane Brillouin Saçılması
SNR	Sinyal Gürültü Oranı
SOP	Polarizasyon Durumu
SRS	Spontane Raman Saçılması
URS	Uyarılmış Raman Saçılması
ϕ -OTDR	Faz Optik Zaman Domeni Reflektometresi

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2. 1.	Elektromanyetik radyasyon spektrumu..... 10
Şekil 2. 2.	Fiber optik iletişim için kullanılan spektral bantların tanımları..... 11
Şekil 2. 3.	Bir fiber optik iletişim bağlantısının ana bileşenleri..... 12
Şekil 2. 4.	Yaygın olarak üretilen bir fiber optik kablo türünün ayrıntılı içyapısı..... 14
Şekil 2. 5.	Işığın yansıma ve kırılma modeli..... 17
Şekil 2. 6.	Optik fiber kablo faz modülatörü..... 21
Şekil 2. 7.	Rayleigh, Brillouin ve Raman saçılmaları..... 22
Şekil 2. 8.	Fiber içindeki homojensizliklerin ve Rayleigh saçılımının gösterimi..... 24
Şekil 2. 9.	Frekans spektrumu..... 24
Şekil 2. 10.	Brillouin spektrumu..... 25
Şekil 2. 11.	Brillouin frekansı kaymasının sıcaklık ve gerginlik değişimi.. 26
Şekil 2. 12.	Elastik olmayan saçılma süreçlerini gösteren ışığın spektrumu..... 27
Şekil 2. 13.	Rayleigh ve Raman saçılması moleküler titreşim enerji seviyeleri..... 28
Şekil 2. 14.	Silika çekirdekli tek modlu fiber için Raman kazanç spektrumu..... 28
Şekil 2. 15.	Fiber içine ilerleyen ışık ile akustik dalganın etkileşmesi..... 30
Şekil 2. 16.	Brillouin saçılmasında yer alan Stokes bileşenlerinin oluşumu..... 32
Şekil 2. 17.	Fiber optik algılayıcıların sınıflandırılması..... 34
Şekil 2. 18.	OTDR çalışma prensibi..... 36
Şekil 2. 19.	Mach-Zehnder, Michelson, Fabry Perot, Sagnac şematik diyagramları..... 39
Şekil 2. 20.	Mach-Zehnder interferometrik algılayıcı modeli..... 40
Şekil 2. 21.	Michelson interferometrik algılayıcı modeli..... 41
Şekil 2. 22.	İletimde olan Fabry-Perot (FP) algılayıcı..... 42
Şekil 2. 23.	Yansıma yapan Fabry-Perot (FP) algılayıcı..... 43
Şekil 2. 24.	Tipik bir Sagnac interferometrik jiroskop..... 44
Şekil 2. 25.	FBI'nın yapısı..... 45
Şekil 2. 26.	Uzun süreli fiber ızgaranın şeması..... 46
Şekil 2. 27.	Optik sirkülatör kullanan bir OTDR'nin çalışma prensibi..... 48
Şekil 2. 28.	OTDR ekranındaki geri saçılan ve yansıtılan optik gücün temsili izleri..... 49
Şekil 2. 29.	Test edilen bir fiberden olası bir geri saçılma grafiğinin bir gösterimi..... 51
Şekil 2. 30.	DAS'ın tipik uygulama senaryosu..... 53
Şekil 2. 31.	Brillouin frekans kayması değişiminin gerginlik bağımlılığı..... 55
Şekil 2. 32.	Brillouin frekans kayması değişiminin sıcaklığa bağımlılığı..... 56

Şekil 2. 33.	BOTDR ölçüm prensibi.....	56
Şekil 2. 34.	Bir BOTDR kurulumunun genel görünümü.....	57
Şekil 2. 35.	BOTDR uyumlu algılama sistemi.....	58
Şekil 3. 1.	DAS sistemi için deneysel kurulum.....	62
Şekil 3. 2.	Üç portlu sirkülatörün operasyonel konsepti	69
Şekil 4. 1.	Algılayıcı fiber için sıcaklık profili.....	74
Şekil 4. 2.	Algılayıcı fiber boyunca faz değişim profili.....	74
Şekil 4. 3.	Sıcaklık değişimi ve $\Delta(nz)$ değişimi.	75
Şekil 4. 4.	Faz değişiminin sıcaklığa bağımlılığı.....	76
Şekil 4. 5.	Algılayıcı fiber boyunca değişen $\Delta(nz)$ değişimi ile faz değişimi.....	77
Şekil 4. 6.	Faz değişiminin kırılma indisi bağımlılığı.....	77

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1. Fiber optik iletişimde kullanılan spektral bant tanımlamaları.....	11
Çizelge 2. 2. Fiber optik ve koaksiyel kablonun karşılaştırılması.....	13
Çizelge 2. 3. Çeşitli maddeler için kırılma indisleri.	18
Çizelge 3. 1. LED ve LD karşılaştırılması.....	67
Çizelge 3. 2. PIN ve çığ fotodiyot (APD) karşılaştırma.....	72
Çizelge 4. 1. Algılayıcı fiber boyunca konumlandırılan ısıtıcıların yerleri.....	73

1. GİRİŞ

Askeri ve kamu tesislerinin güvenliğini, altyapı ve hat güvenliğini, hudut hatlarında bulunan askeri üs ve karakolların sınır güvenliğini sağlamak ve korumak, saldırıya karşı caydırıcılığı ve tesislerin işlevselliği açısından oldukça önem arz etmektedir. Örnek olarak hudut karakolları, nükleer enerji santralleri, elçilikler, doğalgaz ana hatları, karargâh merkezleri, haberleşme ve elektrik altyapıları verilebilir.

Bir askeri üsse veya hudut karakoluna uzaktan yapılan taciz ateşlerinin, kışla veya tesis etrafında araç, insan veya insansız hava aracı gibi tehlike oluşturabilecek etkenlerin varlığının, önemli mahallere yapılan izinsiz girişlerin, sınırlardan izinsiz geçişlerin anlık tespit edilip hızlı tepki verilmesi de ülkenin güvenliği ve vatandaş hayatı açısından son derece önemlidir. Kritik tesislerin saldırıya, tehlikeye ve izinsiz girişlere anında cevap verebilecek sistemlerle korunması önemlidir. Algılanacak kritik alan için sıcaklık algılayıcıları, elektro-optik/kızılötesi (EO/IR) kamera ve radar gibi farklı algılayıcılar da kullanılabilir.

Son yıllarda bu kritik tesislerin güvenliğinde ve hedef tespitinde optik fiberli dağınk algılama (OFDS) sistemleri, geleneksel yöntemler kullanan sistemlere göre rekabet ve üstünlükleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer bir deyişle OFDS sistemleri, gerçek zamanlı uygulamalarda sıcaklık, gerginlik, titreşim ve basınç oluşumları gibi fiziksel büyüklüklerin eş zamanlı olarak algılanması ve ölçülmesi için çok önemli hale gelmiştir. Bu sistemlerde, genellikle algılayıcı eleman olarak kullanılan optik fiber kabloda, diğer bir ifadeyle optik dalga kılavuzunda meydana gelen Rayleigh, Raman ve Brillouin saçılma mekanizmalarından yararlanılmaktadır. Işığın doğası gereği, ışık fotonları algılayıcı fiberden geçerken, ışık dalgasının frekans, güç ve faz gibi özellikleri sıcaklık, gerginlik, titreşim ve basınç oluşumlarına bağlı olarak değişmektedir. Optik fiberli dağınk algılama, prensip olarak ortamda meydana gelen fiziksel olayların neden olduğu değişimleri esas almaktadır.

Geriye saçılan optik sinyal Rayleigh, Raman ve Brillouin bileşenlerinden oluşmaktadır. Rayleigh bileşeninin sıcaklık ve gerginlik hassasiyetleri, Brillouin bileşenine kıyasla oldukça düşüktür. Bu nedenle sıcaklık ve gerginlik oluşumlarına duyarlılıkları

çalışmalarda ihmal edilebilir. Öte yandan, Brillouin saçılması esaslı yöntemler, bu parametrelere karşı yüksek hassasiyetleri nedeniyle sıcaklık ve gerginlik oluşumlarının eşzamanlı dağınık algılanması için daha uygulanabilir çözümler üretilmesini sağlamaktadır. Raman saçılmasını esas alan optik fiberli algılama sistemleri ise saçılma spektrumunun, Brillouin saçılmasına kıyasla daha ayırık bir saçılma oluşu ve sıcaklık duyarlılığının iki katından yüksek olması nedeniyle sıcaklık algılamalı sistemler de daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Raman saçılmasının gerginlik duyarlılığı olmadığı için gerginlik oluşumlarının da algılanması gerektiği koşullarda Brillouin esaslı sistemler tercih edilmektedir.

Optik fiberli dağınık algılama sistemlerinde, ölçülen büyüklükleri tespit etmek için esas olarak reflektometri sorgulama yöntemleri kullanılır. Reflektometri sorgulamasının kullanıldığı en yaygın yöntemler OTDR (Rayleigh optik zaman domeni reflektometresi), BOTDR (Brillouin optik zaman domeni reflektometresi), BOTDA (Brillouin optik zaman domeni analizi), P-OTDR (Polarizasyona duyarlı OTDR) ve OFDR (optik frekans domeni reflektometresi) olarak değerlendirilebilir.

Dağınık titreşim algılama (DVS) olarak da bilinen dağınık akustik algılama (DAS), Rayleigh saçılmasını kullanan olguya bağlı olarak bir optik fiber algılama yöntemidir. Bu tür dağınık algılama yönteminde, algılayıcı fiber boyunca ışık dalgası saçılımının meydana geldiği zaman ve konum bilgilerini almak için optik zaman domeni reflektometresi (OTDR) kullanılır. Ayrıca OTDR tabanlı yöntemde, fiber boyunca meydana gelen akustik değişiklikler veya titreşim oluşumları, geri saçılan optik sinyalin fazında bir kaymaya neden olmaktadır. Algılayıcı fiber boyunca ulaşılan faz kayması ve faz değişikliği bilgisi, daha önce saklanan bir veri izinden bir faz-OTDR izi çıkarılarak elde edilmektedir.

OTDR yöntemi temel olarak kısa süreli optik darbelerin değerlendirilmesi ile anlaşılabilir. Işık darbeleri algılayıcı fibere doğru ilerlerken, ortamda çoğunlukla Rayleigh saçılmasının neden olduğu saçılma kayıpları meydana gelir. Bu saçılma, donmuş kompozit oluşumları ve fiktif sıcaklıkta erimiş silikanın cam yapısı içindeki yoğunluk dalgalanmaları tarafından indüklenir. Yoğunluk dalgalanmaları temelde fiber

yapısında, algılayıcı fibere gönderilen optik sinyalin dalga boyuna kıyasla daha küçük bir ölçekte üretilir. Işık fotonlarının saçılmaları, fiberde her yönde ortaya çıkmasına rağmen, fiberin nümerik açıklığında yakalanır ve fibere pompalanan ışığa göre geriye doğru kılavuzlanır. Bu tekniğin olumlu tarafı ise, algılama ve ölçüm fiber optiğin bir ucundan yapılmasıdır.

Prensipite optik zaman domeni reflektometresine büyük ölçüde benzeyen BOTDR yöntemi, gelen bir ışık dalgası ile algılayıcı fiberde termal olarak üretilen akustik dalgalar arasındaki etkileşimden kaynaklanan Brillouin saçılma mekanizmasına dayanır. Bu yöntem, Spontane Brillouin saçılmasından yararlanır ve fiberin yalnızca bir ucuna erişim gerektirir. Algılayıcı fiberin tüm uzunluğu boyunca ölçülen büyüklük kaynaklarının konumları, gelen ışık dalgasının pompalanması ile geri saçılan ışık dalgasının saptanması arasındaki zaman aralığı kullanılarak belirlenmektedir.

Bu tez çalışmasında, geriye saçılan ışık dalgasının Rayleigh bileşeninin faz değişimlerinden faydalanan faz-OTDR ölçüm metodu yerine, Brillouin esaslı BOTDR ölçüm metodundan yararlanılmıştır. Bu metotta, ortamdaki sıcaklık değişimlerine bağlı olarak algılayıcı fiber boyunca meydana gelen faz değişimlerini kullanan yeni bir faz-BOTDR tabanlı dağınık akustik algılama yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem, faz-OTDR'den farklıdır, sistemdeki faz oluşumlarının dağınık ölçümü için Brillouin şemasını kullanır. Bu yöntemin gerçekleştirilmesinde bir dağınık akustik algılama modeli oluşturularak model üzerinden faz değişiminin, sıcaklık ve algılayıcı fiberin çekirdek kırılma indisi bağımlılıklarına ilişkin benzetimler elde edilmiştir.

İkinci bölümdeki kaynak araştırmasında, fiber optik kuramsal temeller, dağınık algılamada saçılma mekanizmaları, optik fiberli algılayıcılar, izinsiz giriş ve hedef tespitinde kullanılan ölçüm teknikleri konularına yer verilmektedir. Rayleigh, Brillouin, Raman saçılmaları, interferometrik, ızgara tabanlı ve dağınık algılayıcılar ve OTDR (Rayleigh optik zaman domeni reflektometresi), BOTDR (Brillouin optik zaman domeni reflektometresi), ROTDR (Raman optik zaman domeni reflektometresi) açıklanmaktadır.

Üçüncü bölümde, termal etkilerin farklı fiber bölgelerinde konumlandırılarak algılayıcı fiber boyunca faz değişiminin sıcaklığa ve çekirdek kırılma indisine bağımlılığını analiz etmek için tasarlanan faz-BOTDR tabanlı yeni bir DAS sistem modeli önerilmiştir. Önerilen bu DAS sistem modelini oluşturan bileşenler hakkında genel bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde, model esas alınarak Matlab 2020b ortamında faz değişimi, kırılma indisi ve ortam sıcaklığı parametrelerine ilişkin analizler yapılarak ilgili benzetimler elde edilmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Fiber çekirdeğinin sıcaklığındaki değişimlerin, faz değişiminde ve algılayıcı fiberin çekirdek kırılma indisinde neden olduğu değişimler sayısal veriler ve denklemler ışığında yorumlanmıştır. Bu alanda gelecekte yapılacak olan çalışmaların sahada da saldırı tespit sistemleri için farklı bir DAS modeli ve yöntemi önerilmesi açısından daha etkin ve farklı tasarımların ve pratik uygulamaların önünü açacağı üzerinde durulmuş ve değerlendirmeler yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kaynak Araştırması

Optik fiberli dağılık algılama sistemleri ve bu sistemlerin yararlandığı yöntem ve alt sistemler ile ilgili olarak birçok akademik çalışma ve bilimsel araştırma yapılmıştır. Literatürde bulunan çalışmalardan bazıları şunlardır;

Yücel ve diğerleri, tek modlu fiberde gerçekleşen Brillouin saçılmasını incelemiştir. OptiSystem 12.0 programını kullanarak Spontane Brillouin Saçılması tabanlı optik fiberli dağılık algılama devresi kurmuştur. 50 km uzunluktaki optik fiberde Brillouin saçılmasını benzetimler üzerinden incelemiş ve analizleri gerçekleştirmişlerdir. Darbeler arasındaki mesafe sinyal üreticinin frekansı değiştirilince değiştiği gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, tek modlu fiber optikte algılama çözünürlüğünü tanımlayabilmek için bu darbe süreleri kullanılmıştır.

Işık dalgası sirkülatörler yardımıyla 50 km uzunluktaki tek modlu fibere iletilmiş ve bu tek modlu optik fiberden ters yönde saçılan Rayleigh ve Brillouin saçılmaları ise optik spektrum analizörüne ulaşmaktadır. Çalışmada, Brillouin ve Rayleigh saçılmaları

arasında 11,01745 GHz'lik bir kayma elde edilmiştir. Tek modlu fiber optiğin boş bırakılan ucundan algılanan çıkış sinyali orijinal sinyalin zayıflamış hali olduğunu yani 50 km uzunluktaki tek modlu fiber optikte zayıflama büyüklüğünün 10 dB olduğu grafiklerle açıklamıştır (Yücel ve diğerleri, 2014).

Palmieri ve Schenato, Rayleigh, Raman ve Brillouin saçılmasını esas alan algılama mekanizmalarının, temel prensipler, ana alım teknikleri ve uygulama alanları ile yoğunluk, faz ve polarizasyon parametreleri ışığında karşılaştırmasını yapmıştır (Palmieri ve Schenato, 2013).

Özkan ve diğerleri, karakol, sınırlar, altyapı, boru hatları gibi kritik yapıların hem gömülü hem de çit bağlantılı kablolar kullanılarak güvence altına alınması için geliştirilen fiber optik tabanlı bir akustik algılama modeli FOTAS'ı tasarlamıştır. Algılama sistemi ile tespit edilen hareket tipinin, konumunun ve büyüklüğünün bir bilgisayar arayüzü üzerinden kullanıcıya iletiildiği gösterilmiştir. Ayrıca, geliştirilen özgün sinyal işleme ve yapay zekâ tabanlı hareket algılama çalışmaları hakkında detaylı bilgiler verilmektedir (Özkan ve diğerleri, 2020).

Yetik ve diğerleri, sismik olayları gözlemlemek ve analiz etmek için kullanılan sismometrenin yoğun kentsel alanlarda, denizlerde ve okyanuslarda konuşlandırılması daha fazla işçilik, zaman ve sorumluluk maliyeti gerektirdiğinden fiber optik dağıtık akustik algılama (DAS) teknolojisinin, bir dereceye kadar sismometrelerin yerine veya bunlara ek olarak kullanılabilirdiğini göstermiştir. Deprem algılama ve veri analizi amaçları için bir fiber optik DAS şeması önermiştir. Bu DAS şeması daha önceden izinsiz giriş tespiti için kullanılan Fiber Optik Tabanlı Akustik Algılama Sistemine (FOTAS) dayanmaktadır. Bu sistem ile Ağustos 2019 - Ağustos 2021 zaman aralığında, merkez üssü 12 ila 1319 km arasında değişen ve büyüklükleri 1,1 ila 6,9 arasında değişen birçok deprem başarıyla kaydedilmiştir. Kullanılan fiber optik kabloları İstanbul'un yaklaşık 50 km güneydoğusunda olup 4 ve 25 km uzunluğundadır (Yetik ve diğerleri, 2022).

Ölçer ve Öncü, faz-OTDR esaslı akustik algılayıcılarda bozulmaların ve gürültülerin ortadan kaldırılmasında uyarlamalı süzgeçleme yöntemi kullanmışlar ve başarımını

sunmuşlardır. 15 dB'nin üzerinde işaret ve gürültü oranı kazandırmak için optik kuvvetlendirici ve filtreleme kullanmamışlar ve bu önerdikleri yöntem ile de elde edilebildiğini göstermişlerdir. Buna ek olarak, yer altında bulunan fiber optik kablodan 25 m yatay uzaklıkta titreşime ve gerginliğe sebep olabilecek herhangi bir kazma işlemi gibi faaliyetlerin aynı yöntem ile algılanabildiğini gözlemlemişlerdir (Ölçer ve Öncü, 2018).

Ölçer ve Öncü, faza duyarlı optik zaman domeni reflektometri (ϕ -OTDR) sinyallerinin uyarlamalı işlenmesine dayalı dağınık fiber optik algılama için yeni bir yaklaşım sunmuştur. Algılanan sinyal izlerinin çerçeve ortalamasını kullanan geleneksel yöntemler yerine, uyarlanabilir algoritma, gelişmiş algılama performansı için sinyal-gürültü oranını (SNR) geliştirmek üzere bir dizi gürültü parametresini algılamışlardır. Bu uyarlanabilir teknik, çeşitli sivil yapıların sağlık izlemesinin yanı sıra boru hattı ve çevre güvenlik uygulamaları gibi diğer dinamik izleme gereksinimlerinin titreşim tespiti için kullanılabilceğini göstermiştir (Ölçer ve Öncü, 2017).

Bao ve Chen, fotonların yoğunluk, sıcaklık ve gerginlik gibi yerel malzeme karakteristik özellikleriyle etkileşiminden kaynaklanan fiberdeki Rayleigh, Brillouin ve Raman saçılmalarını denklemler ve benzetimlerle açıklamıştır. Bir fiber boyunca iletimi sağlanan ışığın genliği, frekansı ve fazındaki değişiklikleri saptayarak, metrelerce uzunluklarda yerel sıcaklık, gerginlik, titreşim ve çift kırılmayı ölçmek için dağınık algılamalı bir fiber sistem gerçekleştirilebildiğini göstermiştir. Böyle bir ölçümün, konum bilgisini çözmek için zaman veya frekans domeninde yapılabildiğini ve saçılan ışığın tutarlı tespiti ile fiberler ve cihazlar için çift kırılma ve atım uzunluğundaki değişikliklerin gözlemlenebildiğini göstermiştir. Çalışmada kullanılan optik fiberli dağınık algılayıcı sistemler, santimetre değerinde uzamsal çözünürlüğe ve yüksek hassasiyette sıcaklık, gerginlik, titreşim ve çift kırılmaya sahip olup, havacılık akıllı yapılarında, boru hatları, köprüler, barajlar ve demiryollarının sivil yapısal izlemesinde, afet önleme, malzeme işlemede uygulanabileceği ifade edilmiştir (Bao ve Chen, 2012).

Li ve diğerleri, boru hatları, istinat duvarları, tüneller ve heyelanları içeren çeşitli jeoteknik yapıların sağlık izlemesi için Brillouin tabanlı DOFS'leri incelemiştir. Jeoteknik

sağlık izleme için Brillouin Optical Time Domain Reflectometry (BOTDR) ve Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA) tekniklerini kullanarak sonuçlarını karşılaştırmıştır (Li ve diğerleri, 2017).

Wu ve diğerleri, uzun mesafelerde doğru sıcaklık ölçümleri sağlayan Raman saçılması esaslı optik fiberli dağılık algılama (RDTS) sisteminin, algılama mesafesini ve sıcaklık doğruluğunu sınırlayan ana faktör olan sinyal-gürültü oranını (SNR) incelemiştir. Uzun mesafeli uygulamalar için SNR'yi iyileştirmek üzere düşük iletim kaybına sahip bir optik fiber (LWPF) üretmiştir. Buna ek olarak, gürültüyü azaltmak ve sıcaklık doğruluğunu iyileştirmek için optimize edilmiş bir gürültü giderici sinir ağı algoritması geliştirmiştir. Bu çalışmanın sonucunda 1 m uzamsal çözünürlük ve 1 saniye ortalama süre ile 24 km uzunluktaki LWPF'de 1,77 °C'lik bir maksimum sıcaklık çözünürlüğüne ulaşılmıştır (Wu ve diğerleri, 2022).

Lu ve diğerleri, faza duyarlı optik zaman domeni reflektometri sistemi için hareketli ortalama ve hareketli diferansiyelin heterodin tespiti ve sinyal işlemesini kullanarak dağılık bir titreşim sensörü modeli geliştirmiştir. Beton veya çelik köprülerdeki çatlakların akustik emisyonunu taklit eden kalem kırılma tekniğini kullanmıştır. Kalem kırılma ölçümünü kullanma sebebi, erken çatlak tespiti için standart bir tekniktir. Kalem kırılma titreşimi tarafından üretilen akustik frekans bileşenlerini, dağılık titreşim sensörü ile ölçmüştür. Bu yeni algılama sistemi ile çeşitli sivil yapıların sağlık izlemesinin yanı sıra herhangi bir dinamik izleme gereksiniminin titreşim tespiti için kullanılabileceğini göstermiştir (Lu ve diğerleri, 2010).

Juarez ve Taylor, uzun çevre mesafelerinde izinsiz girişleri tespit etmek ve yerlerini belirlemek için dağılık bir sensör olarak bir optik fiberin kullanımını açıklamıştır. Ya gömülü fiberin hemen üzerindeki zemindeki izinsiz girişin basıncından ya da civardaki sismik bozulmalardan kaynaklanan faz değişiklikleri, faza duyarlı bir optik zaman domeni alanlı reflektometre (ϕ -OTDR) tarafından algılanmıştır. Tek bir uzunlamasına moda ve düşük (MHz/dak aralığı) frekans kaymasıyla çalışan bir sürekli dalga (CW) lazerden gelen ışık atımları, tek modlu fiberin bir ucuna enjekte edilmiş ve geri saçılan ışık bir fotodetektörle algılanmıştır. Makaralar üzerinde 12 km fiber ile yapılan

laboratuvar testlerinde, piezoelektrik fiber tarafından indüklenen faz değişimleri ϕ -OTDR izleri üzerindeki etkilerini karakterize etmiştir. Killi toprakta 20 - 46 cm derinliğinde, 10 cm genişliğinde bir hendeğe gömülü 3 mm çapında bir kabloda algılama elemanının tek modlu bir fiber olduğu saha testlerinde, yaya olarak izinsiz giriş yapanların 4,6 m mesafeye kadar tespit etmiştir. Algılayıcı fiberin, gevşek kumla dolu 30 cm derinliğinde, 75 cm genişliğinde bir hendeğe gömülü 4,5 mm çapında bir kabloda olduğu çöl arazisi saha testlerinde ise yüksek hassasiyet ve yaya olarak izinsiz giriş yapanların ve aşığı inen araçların tutarlı bir şekilde algılanmasını gerçekleştirmiştir. Bu sonuçlara dayanarak, bu teknolojinin nükleer enerji santralleri, elektrik enerjisi dağıtım merkezleri, yakıt ve uçucu kimyasallar için depolama tesisleri, iletişim merkezleri, havaalanları, devlet daireleri, askeri üsler, elçilikler ve ulusal sınırlarda etkin olarak kullanılabileceğini öne sürmüştür (Juarez ve Taylor, 2005).

Shi ve diğerleri, 150 km'lik deniz tabanı boyunca uzanan Tayvan Boğazı Tüneli (TST) boyunca gerginlik dağılımını ölçmek ve izlemek için yeni geliştirilmiş bir gerginlik ölçümü ve izleme teknolojisi olan Brillouin optik zaman domeni reflektometri (BOTDR) esaslı bir algılama sistemini tanıtmıştır. Tünel girişindeki sıcaklık farkı, tünelin orta kısmına göre daha fazla olduğundan, girişte dağılan çatlakların deformasyonu da tünelin diğer kısımlarına göre daha fazla olabileceği sonucuna varmıştır. Elde edilen sonuçlar, BOTDR'nin, TST gibi bir tünelde gerginlik izleme uygulaması için benzersiz değere sahip olduğunu göstermiştir (Shi ve diğerleri, 2013).

Wang ve diğerleri, optik fiber içindeki Rayleigh dağınık ışık dalgasının faz bilgisini kullanan faza duyarlı optik zaman domeni reflektometresini (ϕ -OTDR), dağınık akustik algılama (DAS) için büyük bir sensör dizisine dönüştürebileceğini göstermiş ve ϕ -OTDR'ye dayalı tipik bir DAS uygulama senaryosu önermiştir. Doğrusallaştırma kavramı ve heterodin ϕ -OTDR için darbe kodlaması önermiş ve deneysel olarak bu durumu doğrulamıştır. İlk olarak, yoğunluk kodlu bir ϕ -OTDR'nin tamamen doğrusal bir sistem olarak nasıl oluşturulabileceğine dair tam bir teorik yöntem vermiş ve sinyal gürültü oranında önemli bir artış uygulayarak algılama bant genişliğinin dört kez eşit kaldığını göstermiştir. Bu sistem ile otomobiller, davetsiz misafirler, İHA'lar gibi çeşitli kaynaklardan akustik sinyaller alabileceğini öne sürmüştür (Wang ve diğerleri, 2018).

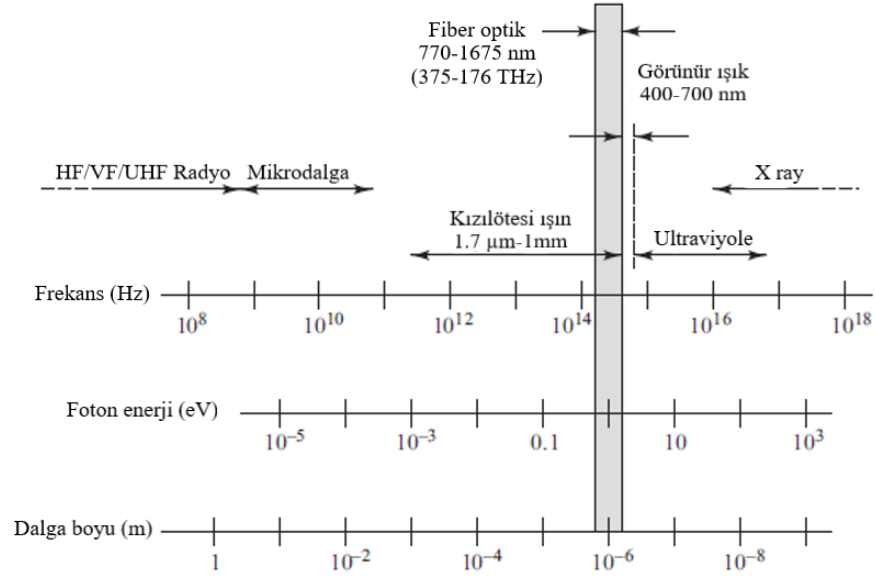
Literatürde geçen çalışmalardan da görüldüğü üzere genellikle dağınık akustik algılama sistemlerinde faz-OTDR esaslı algılama sistem ve modelleri kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında ise farklı bir bakış açısıyla faz-BOTDR esaslı dağınık akustik algılama sistem modeli önerilmiştir. Bu modelde, algılayıcı fiber boyunca faz değişimleri Spontane Brillouin saçılması sonucunda elde edilen geriye saçılan optik bileşendeki faz değişimleri, fiber çekirdek kırılma indisi ve ortam sıcaklığının fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Bu açıdan bakıldığında çalışma, benzerlerinden ayrılarak farklı bir algılama teorisi önermektedir. Bu bağlamda tez içinde bu konulara odaklanılarak alternatif bir yaklaşım öngörüsü verilmiştir.

2.2. Fiber Optik ve Kuramsal Temeller

2.2.1. Fiber Optik Genel Bakış

Tüm telekomünikasyon sistemleri, sinyalleri iletmek için bir çeşit elektromanyetik enerji kullanır. Elektromanyetik (EM) radyasyonun spektrumu Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Elektromanyetik enerji, elektrik ve manyetik alanların birleşimidir. Optik gücün içerdiği ışınlar morötesi ışık, kızılötesi (IR), mikrodalgalar, görünür ışık, X ışınları, radyo dalgaları ve gama ışınlarıdır. Her disiplin elektromanyetik spektrumun bir kısmını (veya bandını) kapsar.

Bu spektrumdaki tüm radyasyonun temel doğası, boşlukta yaklaşık $c = 3 \times 10^8$ m/s olan ışık hızında hareket eden elektromanyetik dalgalar olarak görülebilmesidir. Işığın veya ışık dalgalarının bir malzemedeki v hızı, malzemenin kırılma indisi faktörü n ve ışığın boşluktaki c hızına bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, silika cam için $n = 1,45$ olduğundan, bu malzemedeki ışığın hızı yaklaşık $v = 2 \times 10^8$ m/s olarak elde edilmektedir.



Şekil 2. 1. Elektromanyetik radyasyon spektrumu (Keiser 2011)

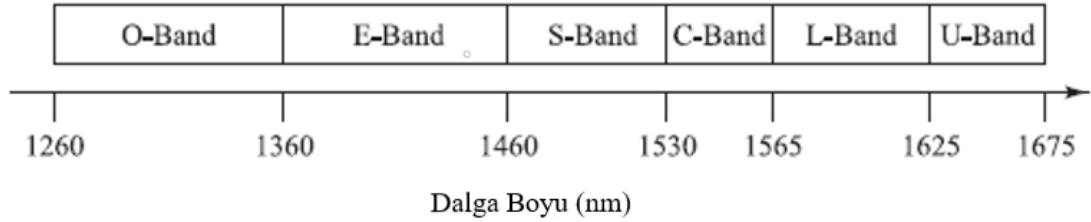
Spektrumun farklı bölümlerindeki dalgaların fiziksel özellikleri, birbiriyle ilişkili birkaç yolla ölçülebilir. Bunlar, dalganın bir periyodunun uzunluğu, dalganın içerdiği enerji veya dalganın salınım frekansıdır. Elektrik sinyali iletimi, sinyal çalışma bantlarını belirlemek için frekans kullanma eğilimindedir. Optik iletişim ise sinyal gücü veya elektro-optik bileşen performansı gibi konuları tartışırken spektral çalışma bölgesini ve foton enerjisini veya optik gücü belirlemek için genellikle dalga boyunu kullanır. Optik spektrumda fiber optik haberleşme aralığı yaklaşık 600 - 1600 nm dalga boyları arasındadır. Optik haberleşme veya optik fiberli algılayıcı sistemlerinde en yaygın olarak kullanılan fiber optik dalga boyu aralığı 1300 nm – 1600 nm aralığı bölgesidir. Görünür ışık dalga boyu aralığı yaklaşık olarak 400 nm - 700 nm dalgaboyları arasında yer almaktadır.

EM spektrumunda çeşitli bölgelerde bir EM formun dalga boyu (λ) ve frekansı (ν) arasında ışığın boşluktaki hızı (c) üzerinden bir ilişki bulunmaktadır. Bu durum, (2.1)'de verilmektedir. Burada dalga boyunun birimi metre, frekansın ise Hz veya (sn^{-1}) olarak verilmektedir.

$$c = \lambda \nu \quad (2.1)$$

Bu eşitlikten periyodik bir işaretin dalga boyu (2.2)'de verildiği gibi yazılabilir.

$$\lambda = c / \nu \quad (2.2)$$



Şekil 2. 2. Fiber optik iletişim için kullanılan spektral bantların tanımları (Keiser 2011)

Şekil 2.2'de, ultraviyole bölgesinde yaklaşık 5 nm'den uzak kızılötesi radyasyon için 1 mm'ye kadar olan optik spektrum aralıkları gösterilmektedir. Optik fiberli iletişim 770 nm ile 1675 nm arasında değişen yakın kızılötesi spektral bandı kullanmaktadır.

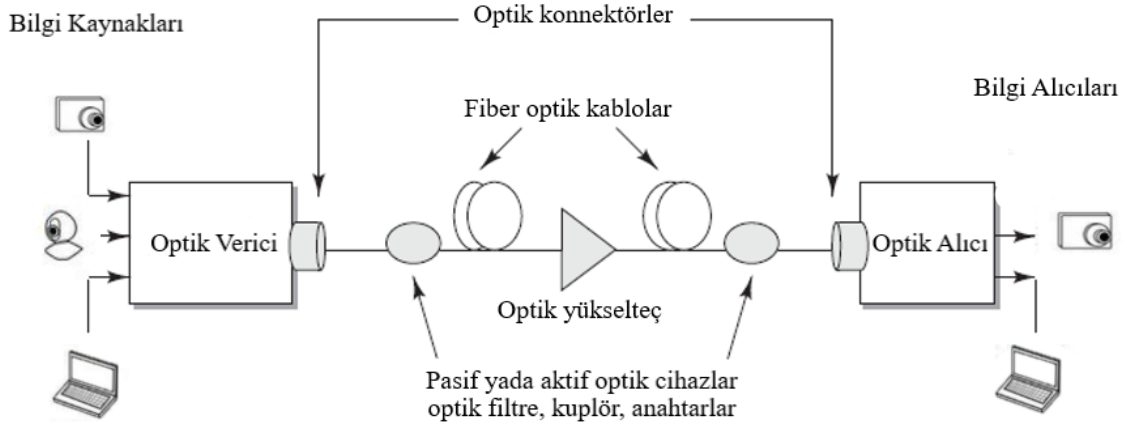
Çizelge 2. 1. Fiber optik iletişimde kullanılan spektral bant tanımlamaları

Band çeşitleri	Gösterimi	Spektrumu(nm)	Açıklaması
Orijinal bant	O-band	1260 - 1360	Tek modlu fiber bağlantılar için kullanılan orijinal bölge
Genişletilmiş bant	E-band	1360 - 1460	Düşük su içeriğine sahip fiberler için band kullanım aralığı
Kısa bant	S-band	1460 - 1530	Dalga boyları C bandından daha kısadır, ancak E bandından daha yüksektir
Geleneksel bant	C-band	1530 - 1565	Geleneksel bir erbiyum katkılı fiber yükselteç (EDFA) tarafından kullanılan dalga boyu bölgesi
Uzun bant	L-band	1565 - 1625	EDFA (erbiyum katkılı fiber yükselteç) kazancı, daha uzun dalga boyu bandında (1625 nm'de) sürekli olarak 1'e düşmektedir
Ultra uzun bant	U-band	1625 - 1675	EDFA'nın yanıt verme kapasitesinin dışındaki spektrum bölgesi

Optik fiberler, sahip oldukları düşük sinyal zayıflama özellikleri ve optik frekanslar aracılığıyla sağlanan daha büyük bant genişlikleri sebebiyle algılanan verinin iletimi ve bilginin aktarılması amacıyla haberleşme alanında yaygın hale gelmiştir.

Günümüz haberleşme sisteminde fiber optik ile haberleşme en revaçta bulunan haberleşme yapısıdır. Bilgi, optik fiber aracılığıyla ışık ile bir cam öz (çekirdek) içinden uzak mesafelere verimli, hızlı, kayıpsız ve güvenli iletilir. Fiber optik kablo, cam veya plastik fiberden imal edilmiş çekirdek kısmı, cam kaplama (koruyucu kılıf) ve koruyucu bir zarftan (kılıf) oluşmaktadır.

Fiber optik iletim sistemleri ses, veri ve görüntü işaretlerini eşzamanlı iletebilir. Bunların yanı sıra yüksek haberleşme hızı, uygun maliyet, elektromanyetik bağışıklık, düşük iletim ve veri kaybı, güvenlik ve dış etkenlere karşı dayanıklılık diğer olumlu yönleri olarak verilebilir.



Şekil 2. 3. Bir fiber optik iletişim bağlantısının ana bileşenleri (Keiser 2011)

Fiber optik kablolar, sürekli güncellenen ve gelişen haberleşme teknolojisinin gereksinimlerini karşılayabilmektedir. Fiberler iletişimi frekansı daha düşük olan metalik veya koaksiyel kablolarla göre daha verimli hale getirir. Bu nedenle, metalik veya koaksiyel kabloların yerini fiber optik kablolar almakta ve yaygınlaşmaktadır. Fiber optik ve koaksiyel kablo karşılaştırması Çizelge 2.2'de verilmektedir.

Çizelge 2. 2. Fiber optik ve koaksiyel kablonun karşılaştırılması

Karşılaştırma parametresi	Optik fiber	Koaksiyel kablo
Çalışma prensibi	Sinyal optik formdadır	Sinyal elektriksel formdadır
Kablo malzemesi	Cam veya plastik	Tel bakır ve örgülü bakır
Veri aktarım hızı	2 Gb / sn	Yaklaşık 44,8 Mbps
Verim	Daha yüksek	Daha düşük
Maliyet	Yüksek	Düşük
Gürültüye karşı bağışıklık	Yüksek	Orta düzey
Bant genişliği	Çok yüksek	Orta seviyede
Dıştan gelen manyetik alan	İletimi etkilemez	İletimi etkiler
İletim kayıpları	Normal zayıflama, dağılma ve bükülme	Zayıflama ve yalıtkan kaybı
Bükme etkisi	Sinyal iletim verimini etkiler	Telin bükülmesi zor ve sinyal iletim verimini etkilemez
Montaj	Mikro yapıdan dolayı zor	Kolay
Kablonun çapı	Çok küçük	Büyük
Kablonun ağırlığı	Hafif	Daha ağır

Fiber optik kablonun diğer iletim kablolarına göre bazı üstünlükleri aşağıda sıralanmıştır:

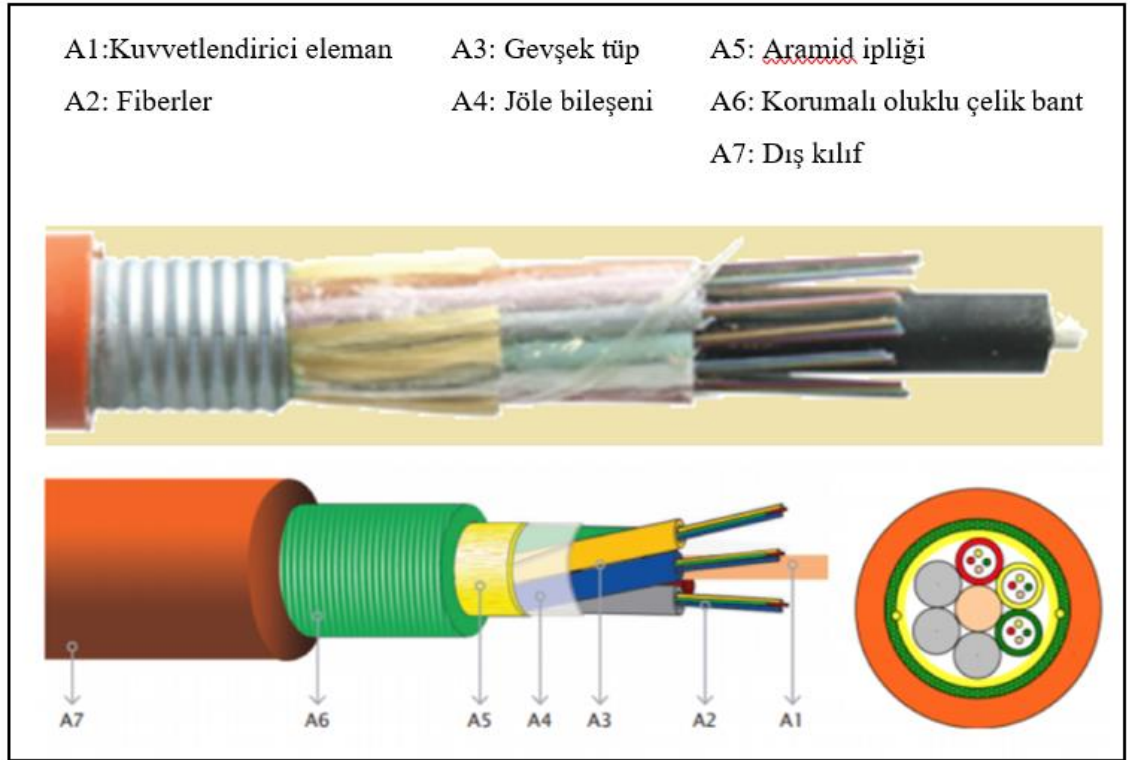
- Fiber kablolar, enerji yaymadıkları için elektromanyetik dalgalar sebebiyle kablolar arası manyetik karışıklıklardan etkilenmezler. Bu yüzden elektromanyetik darbe girişimine yol açmaz. Bu özellik, optik fiberli haberleşme sistemlerini güvenlik ve disiplinli işleyiş açısından askeri uygulamalarda eşsiz hale getirir.
- Fiber kablolar, güvenlik açısından metalik kablolarla göre daha güvenlidir çünkü kullanıcının haberi olmadan fiberin içine haberleşmeyi ihlal edecek bir bağlantı yapmak imkânsızdır. Yine bir önceki özellik gibi bu özellikte optik fiberli sistemlerin güvenlik açısından askeri uygulamalarda kullanılmasını kaçınılmaz kılmaktadır.
- Çevresel etkilere karşı daha dayanıklıdır. Sıcaklık aralığı metalik kablolarla göre daha geniştir. Patlama ya da yangın tehlikesi oluşturmaz. Bu yüzden zor koşullarda veri aktarımı gerçekleştirilmesi daha çok tercih edilir.
- Çapı daha küçük ve hafif olduğu için montajı zor olsa da bakımı daha kolaydır.

Fiber optik kablolar, hava ve kara taşıtları, savunma sanayisi, biyomedikal cihazlar, akustik algılama ve izleme, uzaktan kontrol, internet, yüksek hızlı araçlar arası, uçak iç donanımları, sinyalizasyon uygulamaları, güvenlik temelli algılama teknolojileri ve enerji santrallerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.2.2. Fiber optik kablo yapısı

Fiber optik kablolar kullanılacakları çevreye ve iletim çeşitliliğine göre günümüzde farklı türlerde üretilmektedir. Üretime bağlı olarak, genellikle bir fiber optik kablo aşağıda verildiği gibi beş ana bileşenden oluşabilir.

- Çekirdek
- Koruyucu zarf (kılıf)
- Koruyucu
- Tampon amaçlı güçlendirici lifler
- Dış kılıf



Şekil 2. 4. Yaygın olarak üretilen bir fiber optik kablo türünün ayrıntılı içyapısı

Çekirdek (Core): Geleneksel bir optik fiberin çekirdeği, fiberin ışığı yönlendiren kısmıdır. Yani optik sinyalleri bağlı bir ışık kaynağından bir alıcı cihaza taşıyan fiziksel ortamdır. Çekirdek, çapı mikron cinsinden ölçülen (insan saçı çapından daha küçük) tek bir sürekli yüksek saflıkta fiber uzunluğu boyunca uzanan bir cam veya plastik teldir. Çekirdek, daha düşük bir kırılma indisine sahip bir ortamla, tipik olarak farklı bir cam veya plastikten bir kılıfla çevrilidir. Işık ile sınır arasındaki açı kritik açıdan büyük olduğu

sürece, çekirdekte hareket eden ışık, toplam iç yansıma nedeniyle çekirdek kaplama sınırından yansır. Sonuç olarak, fiber, fiberin eksenine yeterince küçük bir açı ile fibere giren tüm ışınları iletir. Sınırlayıcı açıya kabul açısı denir ve çekirdek/kılıf sınırı tarafından sınırlanan ışınlara kılavuzlu ışınlar denir.

Çekirdek boyutu için yaygın olarak alıntılanan başka bir istatistik, mod alan çapıdır. Bu, fiberdeki ışık yoğunluğunun belirli bir maksimum sürtünmeye düştüğü çaptır. Tek modlu fiber için, mod alan çapı, çekirdeğin fiziksel çapından daha büyüktür, çünkü ışık, kaplamanın içine kaybolan bir dalga olarak hafifçe nüfuz eder. Çekirdek ne kadar büyük olursa, kablo o kadar fazla ışık taşıyabilir, bu da daha yüksek bir veri aktarım hızıyla ilişkilidir. En yaygın üç çekirdek boyutu 9 µm çap tek modlu, 50 µm çap çoklu mod, 62,5 µm çap çoklu moddur.

Koruyucu Zarf (Cladding): Optik fiberlerde koruyucu zarf, çekirdek üzerine geçirilen, daha yüksek kırılma indisine sahip bir çekirdek malzeme ile yakın temas halinde olan, daha düşük kırılma indisine sahip bir veya daha fazla ince bir katmandır. Işık dalgalarını içeren bir sınır görevi görür yani ışının çekirdekten dışarıya çıkmasını engeller. Dolayısıyla verilerin fiber boyunca hareket etmesini sağlar.

Çekirdek gibi koruyucu zarfta camdan yapılmıştır. Koruyucu zarf içindeki ışık yayılımı, çoğu fiber için tipik olarak bastırılır. Bununla birlikte, bazı fiberler, ışığın çekirdekte olduğu gibi koruyucu zarfta da yayıldığı kaplama modlarını destekleyebilir. Desteklenen modların miktarına fiberler tek modlu fiberler ve çok modlu fiberler olarak ikiye ayrılır.

Koruyucu (Buffer Coating): Fiber çekirdeği güçlendirmek, darbeleri emmeye yardımcı olmak ve aşırı kablo bükülmelerine karşı ekstra koruma sağlamak için kaplamanın üzerinde optik bir özelliği olmayan plastik bir kaplamadır. Bununla birlikte, optik dalga kılavuzu özellikleri üzerinde herhangi bir etkisi yoktur.

Dış ceket ve mukavemet malzemesi: PVC yapısına sahip dış kılıftır. Kabloyu fiziksel etkilerden koruduğu gibi kabloyu sıcaklık ve zararlı ışıklardan da korumaktadır.

Genellikle fiber optik kablonun çelik bant ile tüp içindeki fiberler arasında kabloyu dış etkenlerden koruyan yalıtkan malzemelerden (aramid, elyaf vb.) faydalanılır. Yalıtkan olan aramid iplik malzemesi, yüksek basınç ve sıcaklıklara karşı dirençlidir (Polat 2019).

2.2.3. Fiber optik kablo parametreleri

Fiber optik kablo yüksek kırılma indisli çekirdeğin olduğu iç bölüm ve daha düşük kırılma indisine sahip olan, bu iç bölümü çevreleyen kılıftan oluşur. Fiber optik kablonun özellikleri, bazı yapı parametreleriyle tanımlanır. Bir fiber optiğin parametreleri aşağıda verilmektedir.

- Kırılma indisi
- Kırılma indisleri farkı (Δ)
- Nümerik açıklık (NA)
- Normalize frekans (v)
- Faz modülasyonu
- Frekans kaydırma

Nümerik açıklık (NA), dalga kılavuzunun ışık alma kapasitesidir. Dalga kılavuzunda yer alan ışının Snell yasasının gerektirdiği gibi tam yansıma kuralına göre ilerleyebilmesi için çekirdek ve cam kaplamanın kırılma indisi toplam iç yansımayı sağlar. Normalize frekans, mod sayılarını ifade eder. Kırılma indisleri farkı (Δ), çekirdek ve cam kaplama arasındaki kırılma indis farkını gösterir.

2.2.3.1. Kırılma indisi

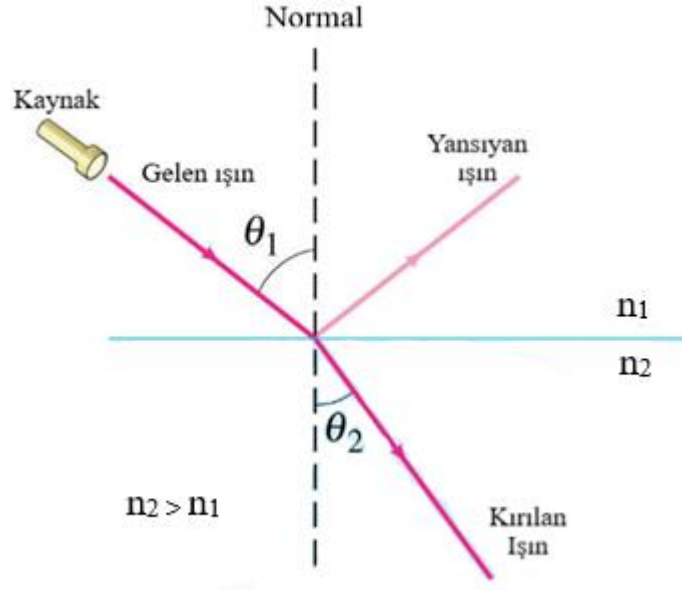
Kırılma indisi, bir ışık ışınının boşluktaki yayılım hızının, herhangi bir ortamdaki yayılım hızına bölünmesi ile elde edilir. Kırılma indisi (2.3)'te verildiği gibi ifade edilir. Burada c boşluktaki ışık hızı, v ise bir ortamdaki ışık hızıdır.

$$n = c / v \quad (2.3)$$

Bir ışık ışınının, kırılma indisleri farklı olan iki ortamdaki davranışı Snell yasası ile açıklanabilir. Snell yasası (2.4)'te verilmektedir.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.4)$$

Burada, θ_1 geliş açısı, θ_2 kırılma açısı, n_1 1.ortamın kırılma indisi, n_2 2.ortamın kırılma indisini ifade eder.



Şekil 2. 5. Işığın yansıma ve kırılma modeli

Fiber optik, enine kırılma indisi profili, üretim süreci sırasında uygun katkı maddeleri eklenerek kontrol edilebilir. Örnek olarak, en yaygın kırılma indis profilleri Çizelge 2.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 2. 3. Çeşitli maddeler için kırılma indisleri

Malzeme	Kırılma İndisi
Aseton	1,356
Hava	1
Elmas	2,419
Etil alkol	1,361
Erimiş kuartz (SiO ₂)	1,46
Galyum arsenit (GaAs)	3,299 (kızılötesi bölge)
Cam	1,52–1,62
Silikon (dalga boyuna göre değişir)	3,650 (850 nm)
Su	1,333
Elmas	2,41 (590nm)
Si	3,45 (2,15 µm)

2.2.3.2. Kırılma indisleri farkı

Çekirdeğin ve cam kaplama (koruyucu zarf) kırılma indisleri arasındaki fark, (2.5)'te verilmektedir.

$$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1 \quad (2.5)$$

2.2.3.3. Nümerik açıklık (NA)

Bir fiberin nümerik açıklığı (NA), bir gelen ışının çekirdekteki toplam iç yansıma için sahip olabileceği en büyük açının sinüsü olarak tanımlanır. Bir fiberin NA'sı tarafından belirlenen açının dışında fırlatılan ışınlar, fiberin radyasyon modlarını harekete geçirecektir. Kaplamaya göre daha yüksek bir çekirdek indisi, daha büyük NA anlamına gelir. Bir fiberin NA'sı, tüm modları uyarıldığında yaydığı ışık konisinin sapma açısı ölçülerek belirlenebilir. Kademe indisli bir fiberde, nümerik açıklık matematiksel olarak (2.6) ve (2.6a)'da verildiği gibi tanımlanır.

$$NA \approx \sqrt{2\Delta} \quad (2.6)$$

$$NA = \text{Sin } \theta_{\text{giriş}} \quad (2.6a)$$

Dereceli indisli fiberde ise (2.6b)'de verildiği gibi NA kritik açının sinüsü olarak ifade edilmektedir.

$$NA = \sin \theta_c \quad (2.6b)$$

2.2.3.4. Normalize frekans

EM alan teorisinde de tanımlanan bu kavram, farklı modlarda iletim adedinin bir gösterimidir ve (2.7)'de verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$v = (\pi d / \lambda) \cdot NA \quad (2.7)$$

Eşitlikte, d optik fiber çekirdeğinin çapıdır.

Araştırmalar normalize frekansın 2,4'ten küçük olduğunda tek mod, 2,4 ile 3,8 arasında yer alınca 3 mod iletebildiğini göstermiştir. Bu değerlerin dışında v'nin alacağı farklı değerlerde mod sayısı N, (2.8) ve (2.9)'da verildiği gibi ifade edilmektedir.

Kademe indisli fiber için;

$$N = v^2 / 2 \quad (2.8)$$

Derece indisli fiber için;

$$N = v^2 / 4 \quad (2.9)$$

Mod sayısının fazla olması, ayrılmaya ve bant genişliğinin azalmasına neden olur. Bu nedenle, fiber içerisinde yayılan modların sayısını azaltmak istenmektedir. Mod sayısını azaltmanın, çekirdeğin çapını (d) azaltarak, dalga boyunu (λ) arttırarak, çekirdek indisi ile cam kaplama (koruyucu zarf) indisi arasındaki farkı (Δ) azaltarak gerçekleştirilebileceği görülmektedir.

2.2.3.5. Faz modülasyonu

Optik fiberli sistemlerde, faz modülasyonu, optik fiberin gerilmesi veya sıkıştırılması ile elde edilmektedir. Bu durum, (2.10) ile ifade edilmektedir (Kasap 2013).

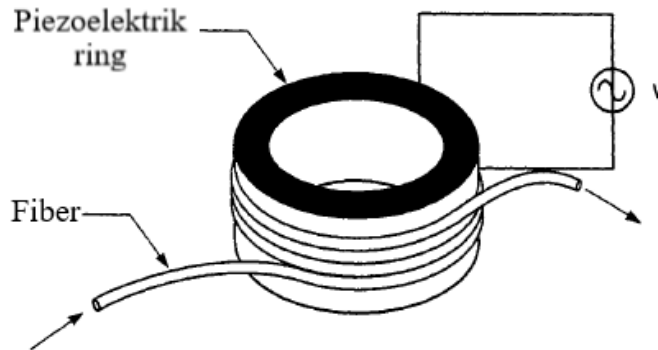
$$\Phi (t) = \frac{2\pi}{\lambda} [L\Delta n (t) + n\Delta L (t)] \quad (2.10)$$

Eşitlikte, $\Delta n(t)$ ve $\Delta L(t)$ sırasıyla, fiber çekirdek kırılma indisi ve fiber uzunluğundaki değişime karşılık gelmektedir. Uzunluk değişimi etkisinin ihmal edilebilir olduğu toplu ve entegre optik cihazlarla karşılaştırıldığında, tüm fiber modülatörlerde fiberlerin uzunluğundaki küçük bir kısmi değişiklik bile önemli faz modülasyonuna yol açabilir.

Elektro – optik etki, uygulanan alan ve optik alanlar arasındaki uzamsal örtüşme bölgesi üzerinde gerçekleşir. Bu uzamsal örtüşme verimliliği bir Γ katsayısı ile temsil edilir ve faz kayması $\Delta\phi$, (2.11)'de verildiği gibi ifade edilmektedir (Kasap 2013).

$$\Delta\phi = \Gamma \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{22} \frac{L}{d} V \quad (2.11)$$

Eşitlikte, bu tip entegre polarizasyon modülatörleri için tipik olarak $\Gamma \approx 0,5 - 0,7$ 'dir. Faz kayması V ve L 'nin çarpımına bağlı olduğundan, karşılaştırmalı bir cihaz parametresi, π (yarım dalga boyu), yani $(V\lambda/2L)$ 'lik bir faz kayması için $V \times L$ olacaktır.



Şekil 2. 6. Optik fiber kablo faz modülatörü

En yaygın olarak kullanılan fiber faz modülatörünün yapısı Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Genellikle kutuplu kurşun zirkonat titanattan (PZT) yapılan bir piezoelektrik halkanın etrafına sarılmış optik fiberden oluşur. Halka boyunca uygulanan voltaj, halka çevresini ve fiber uzunluğunu değiştirir. Modülatör hassasiyeti elektrot konfigürasyonuna, modülasyon frekansına ve halka çapına bağlıdır. Yaklaşık 50 mrad/V-dönüşü hassasiyetleri tipik olarak 2 cm halka çapında 0.63 µm'de modülasyon için elde edilir.

Modülatör frekans yanıtının önemli bir özelliği, halka geometrisi ve çalışma modu tarafından belirlenen akustik rezonanstır. Halka çevresini değiştirerek çalışan çember modunda, rezonans frekansı halka çapı ile ters orantılı olarak değişir. Tipik bir frekans sabiti 100 kHz-cm'dir, bu nedenle 2 cm'lik bir halkanın rezonans frekansı ≈ 50 kHz'dir. Rezonansta modülatör hassasiyeti önemli ölçüde artar. Öte yandan, serrodin frekans kayması gibi düz bir frekans yanıtı gerektiren uygulamalarda, rezonans modülasyon bant genişliğini onlarca kilohertz ile sınırladığı için bu etki istenmeyen olabilir. Ayrıca, halka çapını azaltarak rezonans frekansının artırılması, kabul edilemez fiber bükülme kayıplarına yol açabilir.

2.2.3.6. Frekans kaydırma

Fiber frekans kaydırıcıları, $\Delta\beta$ 'lik bir yayılma sabiti farkıyla iki kılavuzlu modu destekleyen, fiber kullanan hareket eden dalga kuplajına dayanmaktadır. Fibere başlatılan akustik bir f_a frekansı dalgası, $\pm f_a$ 'lık bir frekans kaymasına neden olan mod eşleşmesiyle sonuçlanan indis profilini bozar. Etkin güç aktarımı için gereken faz uyumlu etkileşim, ayar yapılarak elde edilir.

$$\Delta\beta = \frac{2\pi}{\lambda_a} \quad (2.12)$$

burada λ_a , akustik dalga boyudur. Bu teknik, iki uzamsal modu destekleyen fiber ve ayrıca iki polarizasyon modunu destekleyen yüksek çift kırılmalı fiber ile gösterilmiştir.

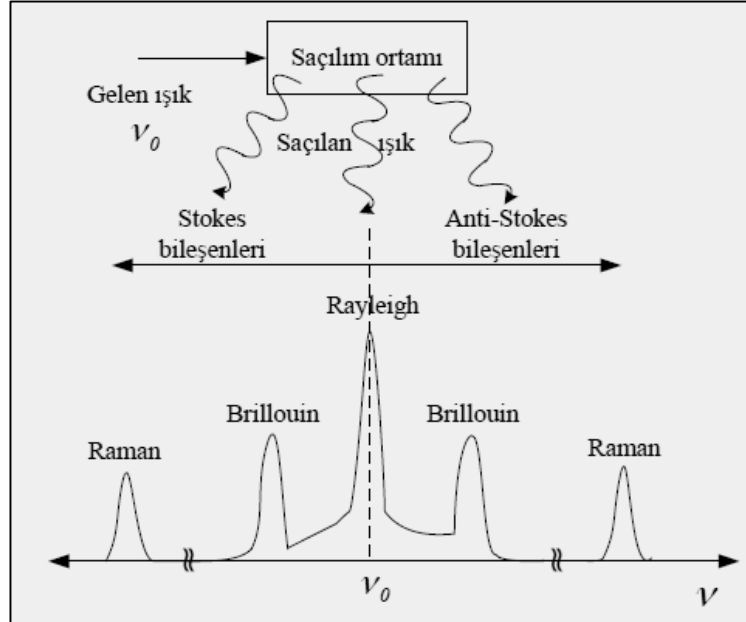
2.3. Dağınık Algılamada Saçılma Mekanizmaları

Fiber optik kabloda oluşan saçılmalar elastik ve elastik olmayan saçılmalar olarak ikiye ayrılır.

2.3.1. Elastik saçılmalar

İzotropik olmayan saçılma, ışığın camdaki atomlarla çarpışması sonucu oluşur. Elastik saçılmalar, bir yayılma modunda gerçekleşen optik gücün tamamının veya bir bölümünün başka bir moda aktarılmasına neden olur. Bu aktarılan güç ışığın zayıflamasına sebep olur. Frekans değişimi meydana gelmez.

Elastik saçılma Rayleigh ve Mie saçılması olarak ikiye ayrılır. Bu elastik saçılma türleri imal edilen fiberin uygun olmayan fiziksel özelliklerinden kaynaklanır. Günümüz teknolojisinde elastik saçılmalar kaçınılmazdır. Rayleigh geri saçılımının yoğunluğunu zamanın fonksiyonu olarak ölçerek, fiber boyunca optik zayıflama ölçülebilir. Uzamsal çözünürlük, darbe zamansal genişliği ile doğrudan ilişkilidir. Daha dar darbeler, daha yüksek uzamsal çözünürlüğe ve daha zayıf geri saçılım sinyallerine yol açmaktadır.



Şekil 2. 7. Rayleigh, Brillouin ve Raman saçılmaları (Yücel ve diğerleri 2017)

2.3.1.1. Rayleigh Saçılması

Optik fiberlerdeki kaybın büyük çoğunluğunu oluşturan elastik olan Rayleigh saçılması içten etkileşimli ve fiber boyunca varlığını sürdüren saçılmadır. Düşük oranlarda oluşan rastgele homojensizliklerden ve düzensizliklerden kaynaklanır. Bu düzensizlikler ve homojensizliklere, soğurma esnasında cam yapıya nüfuz eden yoğunluk ve kompozisyon değişimleri neden olur. Bu homojensizlikler kırılma indisinde dalgalanmalara ve fiberin nümerik açıklığından (NA) saçılan ışının bir bölümünün optik fiberde yol alan ışığa zıt yönde kılavuzlanmasına sebep olur. Yoğunluk dalgalanmalarının neden olduğu bu saçılma, $1/\lambda^4$ ile orantılı bir zayıflama oluşturur.

Rayleigh saçılması, α zayıflama katsayısı ile ifade edilmektedir.

Optik fiber için, Rayleigh saçılma katsayısı α_R , (2.13)'te verildiği gibi ifade edilmektedir (Günday 2012).

$$\alpha_R = (8\pi^3 / 3\lambda^4) n^8 p^2 \beta_c K T_F \quad (2.13)$$

Burada, λ (optik dalga boyu), K (Boltzman sabiti), p (ortalama fotoelastik katsayı), n (optik fiberin çekirdek kırılma indisi), β_c (bir T_F sıcaklığında izotermal sıkıştırılabilirlik katsayısı), T_F (fiktif sıcaklık) olarak ifade edilmektedir.

Ayrıca, optik fiberin iletim kayıp çarpanı \mathcal{L} , Rayleigh saçılma katsayısının fonksiyonu olarak (2.14)'te verildiği gibi yazılabilir.

$$\mathcal{L} = \exp(-\alpha_R L) \quad (2.14)$$

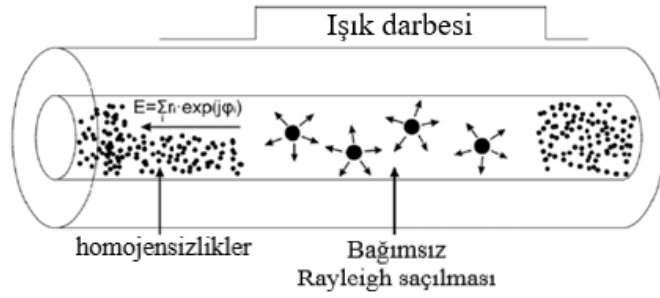
Burada, L, fiberin uzunluğunu ifade etmektedir. Eşitlikte L = 1 km alınırsa, kilometre başına Rayleigh saçılma kaybı, (2.15)'te verildiği gibi ifade edilir (Boydak 2017).

$$\alpha_{RS} (dB/km) = 10 \log_{10}(1/\mathcal{L}_{km}) \quad (2.15)$$

Buradan, Rayleigh saçılma katsayısının, fibere pompalanan ışığın dalga boyu büyüdükçe azalacağı görülmektedir. Işığın optik giriş gücü P_i ile fiberden çıkış gücü P_0 arasındaki ilişki (2.16)'da verilmektedir.

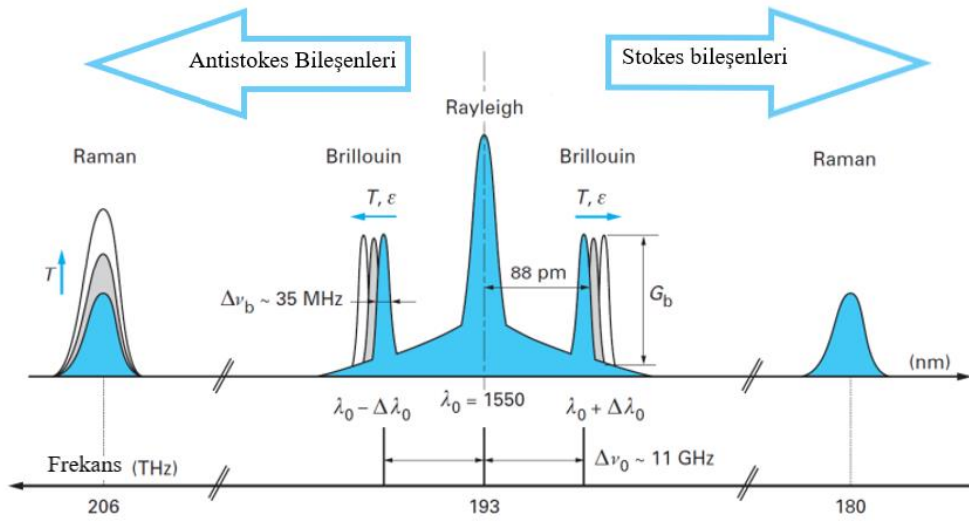
$$P_0 = \mathcal{L}P_i \quad (2.16)$$

Burada, P_i optik giriş gücüne, P_0 ise optik çıkış gücüne karşılık gelmektedir.



Şekil 2. 8. Fiber içindeki homojensizliklerin ve Rayleigh saçılımının gösterimi

Şekil 2.9'daki frekans spektrumunda gösterilen Rayleigh saçılması ile Raman saçılması arasında 13 THz'lik, Rayleigh saçılması ile Brillouin saçılması arasında 11 GHz'lik bir frekans farkı gerçekleşir. Rayleigh ve Brillouin saçılmaları sayesinde gerginlik ve sıcaklık tespiti yapılırken, Raman saçılmasıyla sadece sıcaklık tespit edilebilmektedir.



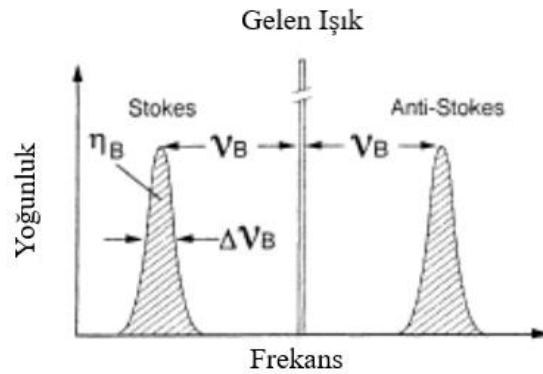
Şekil 2. 9. Frekans spektrumu (Motil ve diğerleri 2015)

2.3.2. Elastik olmayan saçılmalar

Optik fiberlerdeki elastik olmayan saçılma etkileri, bir fotonun daha düşük enerjili bir fotona elastik olmayan saçılmasından kaynaklanır. Enerji farkı, ortamdaki moleküler titreşimler veya fononlar tarafından emilir. Diğer bir ifadeyle, bir ışık dalgasının enerjisinin, daha yüksek bir dalga boyundaki (daha düşük enerjili) başka bir dalgaya aktarıldığı ve böylece enerji farkının fononlar şeklinde görüldüğü söylenebilir. Elastik olmayan etkiler yüksek optik güç seviyelerinde ortaya çıkar. Optik fiberlerdeki yüksek verimliliği olan elastik olmayan saçılmalar Brillouin ve Raman saçılmasıdır. Gelen ışığa göre dalga boyu kaymış, fiber içinde bir miktar geri saçılmış ışıkla sonuçlanırlar.

Bu saçılmaların elastik saçılmalara göre en önemli özelliği frekans kayması oluşturmalarıdır. Frekans kayması, ışık aktarımının yapıldığı bir fiber optikte zayıflamaya yol açmaktadır. Raman saçılması ile Brillouin saçılması arasındaki en önemli fark, Brillouin saçılması için gerçek uyarılmış durumların, tek tek moleküllerin dönme ve titreşimlerinden ziyade moleküllerin toplu hareketinden kaynaklanmasıdır.

Brillouin saçılmasının ışık darbesinden daha kısa dalga boylu olan bileşenleri Şekil 2.10'da görülmektedir. Brillouin etkisi, optik bir darbenin moleküllerinin uyarılmasına neden olması ve bu durumların bozulmasının Stokes (darbeninkinden daha uzun bir dalga boyu) veya anti-Stokes'a yol açması bakımından Raman etkisine benzemektedir.



Şekil 2. 10. Brillouin spektrumu

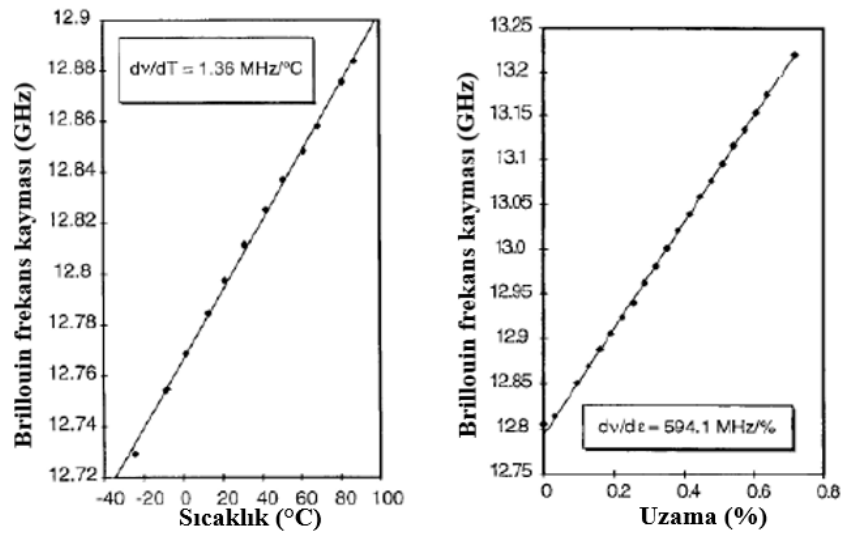
Brillouin etkisi, optik fiberde Stokes ve anti-Stokes frekans kaymasına yol açmaktadır. Brillouin frekans kayması (2.17)'de ifade edilmektedir.

$$\nu_B = \pm \frac{2nVa}{\lambda} \quad (2.17)$$

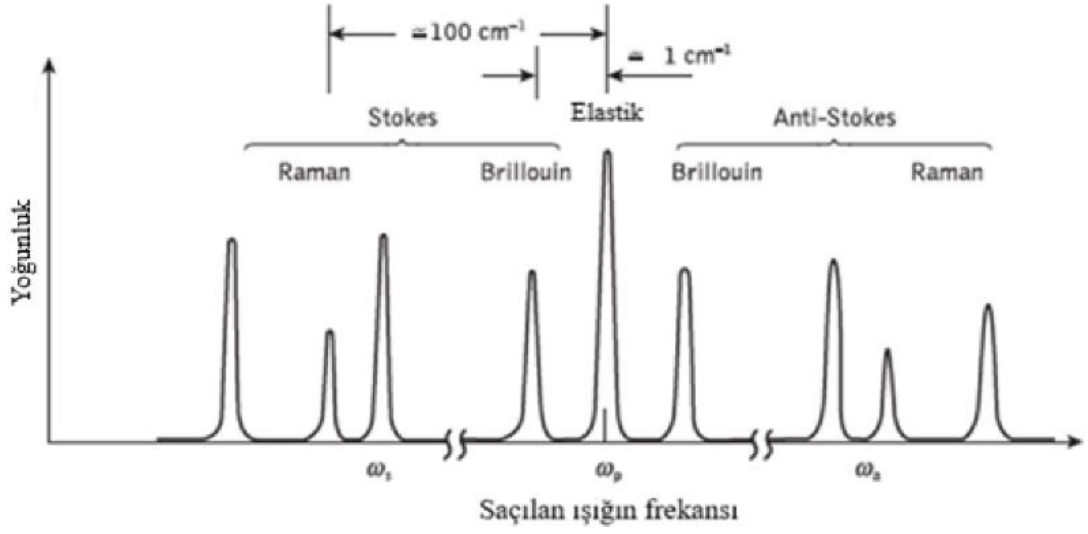
Verilen eşitlikte Brillouin frekans kayması ν_B , optik fiberin çekirdek kırılma indisine, v_a akustik hızı ve λ , dalga boyuna bağlıdır (Motil ve diğerleri 2015).

1,55 μm 'lik bir lazer dalga boyunda silika fiber için $\nu_B \approx 10.8$ GHz'dir. Brillouin frekans kayması, hem optik kırılma indisine hem de akustik dalga hızına bağlı olduğundan, bu değerler çevresel fiziksel etkiler değiştiğinde değişir ve fiber boyunca sıcaklık ve gerginlik tespiti için kullanılabilir. Literatürde yer alan çalışmalar, Brillouin frekans kayması değerlerinin, optik fiber üzerinde meydana gelen gerginlik ve sıcaklık oluşumlarından doğrusal olarak etkilendiğini, diğer bir deyişle Brillouin frekans kayması ile gerginlik ve sıcaklık oluşumları arasında lineer bir ilişki olduğunu göstermektedir.

Şekil 2.11'de, Brillouin frekans kaymasının, 1,32 μm 'lik bir pompa dalga boyu için ölçülen sıcaklığa ve gerginliğe bağımlılıklarını göstermektedir. Şekil 2.11'de görüldüğü gibi, sıcaklık katsayısı 1,36 MHz/°C ve gerginlik katsayısı ise 594.1 MHz/% olarak elde edilmiştir (Righini ve diğerleri 2009).



Şekil 2. 11. Brillouin frekansı kaymasının sıcaklık ve gerginlik değişimi



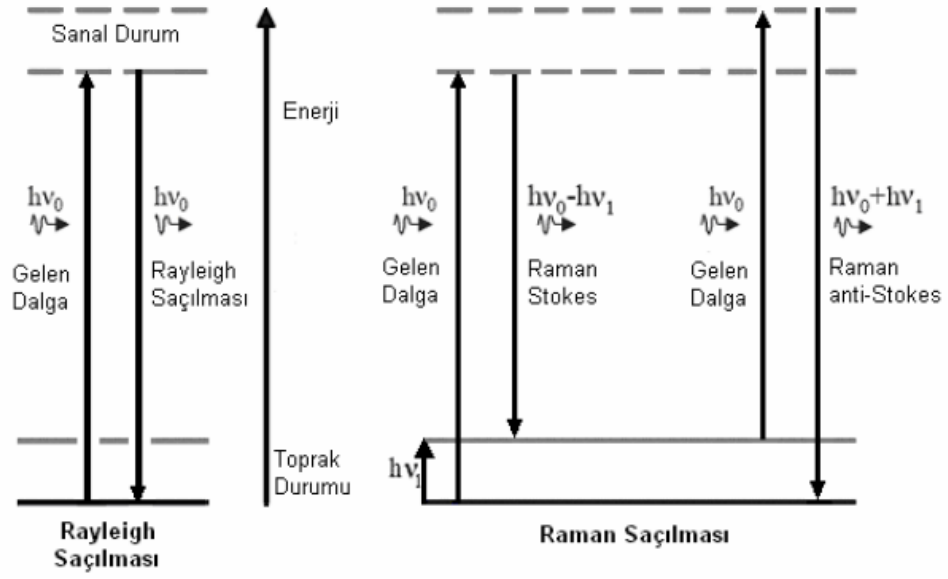
Şekil 2. 12. Elastik olmayan saçılma süreçlerini gösteren ışığın spektrumu

2.3.2.1. Raman Saçılması

Elastik olmayan saçılma süreçlerinden Raman saçılması, fibere iletilen ışık ile bir ortam içindeki moleküler titreşimlerden ve dönmelerden kaynaklanır. Silika için Raman spektrumu, amorf bir katıdaki bağ enerjilerinin yayılmasının bir sonucudur. Saçılmada mevcut olan enerji fotonlar sayesinde ifade edilebilir.

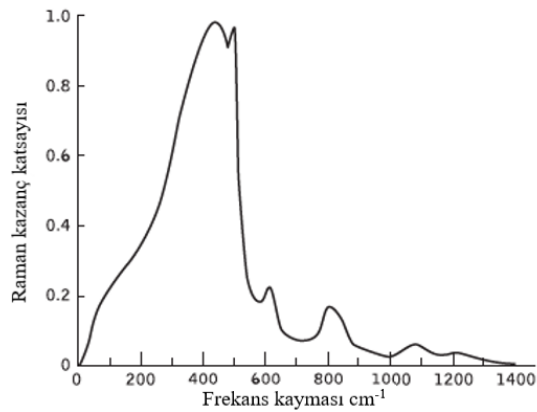
Gönderilen ışık fotonundaki enerji değişimi enerji kaybı ve enerji artışı şeklindedir. Daha yüksek enerjili (daha kısa dalga boylu) radyasyon, Stokes karşıtı ışık olarak bilinirken, düşük enerji bileşeni Stokes ışığı olarak bilinir.

Anti-Stokes radyasyonu ile Stokes seviyesi arasındaki oran sıcaklığa bağlı olduğundan, fiber sıcaklığını tahmin etmek için Raman saçılması ölçümleri kullanılabilir.



Şekil 2. 13. Rayleigh ve Raman saçılması moleküler titreşim enerji seviyeleri (Günday 2007)

Şekil 2.13'te, h Planck sabitini, ν_0 gelen ışık frekansını, ν_1 kaydırılmış ışık frekansını ifade eder. Raman saçılması, camın orijinal yapısının kristalize olmamasından dolayı geniş frekans aralığında meydana gelir ve cam yapı içerisinde farklı titreşimsel enerjileri kılavuzlamaktadır. Stokes ve anti-Stokes'un geniş frekanslı olması Raman saçılmasının bu özelliğinden kaynaklanır. Raman saçılması saçılma esaslı dağılık algılama uygulamalarında sıcaklık algılamak için kullanılmaktadır. Sıcaklık hassasiyeti daha fazla olduğundan anti-Stokes işareti temel alınmaktadır.



Şekil 2. 14. Silika çekirdekli tek modlu fiber için Raman kazanç spektrumu

Uyarılmış Raman saçılması (SRS), spontane Brillouin saçılmasına (SBS) benzemektedir. Ancak SRS saçılma işleminde akustik bir fonon yerine yüksek frekanslı bir optik fonon üretilir. Ayrıca, SRS bir optik fiberde hem ileri hem de geri yönlerde meydana gelebilir ve Brillouin saçılmasına göre yaklaşık üç kat daha yüksek bir optik güç eşiği mevcuttur. Tek modlu algılayıcı fiberde Uyarılmış Raman Saçılması (SRS) için optik güç P_R , (2.18)'de ifade edilmektedir (Agrawal 1992).

$$P_R = 5,9 \times 10^{-2} d^2 \lambda \alpha_{dB} \quad (2.18)$$

Eşitlikte, λ optik dalga boyu, d fiber optik çapı, α_{dB} Raman saçılması zayıflama katsayısı ve P_R 'nin birimi watt olarak ifade edilmektedir.

2.3.2.2. Brillouin saçılması

Brillouin saçılması, fiber içerisinde ilerleyen ışığın, ortam içerisinde aksel ve termal olarak yayılan spontane akustik dalgalar ile etkileşime girmesi sonucu ters yönde saçılma yaptığı bir durum olarak değerlendirilebilir. Ancak, akustik dalga kılavuzunun etkilerinden dolayı oldukça zayıf ileri Brillouin saçılması da mümkündür. Brillouin saçılmasında, saçılma fiberde her yönde gerçekleşir ama aksel geri saçılma optik fiberin girişine doğru kılavuzlanır.

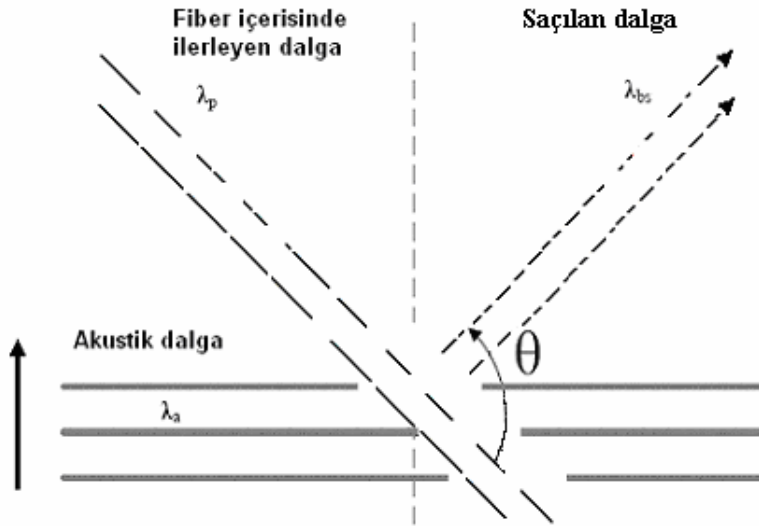
Gelen foton ile saçılan foton birlikte akustik bir fonon üretir. Fonon, kristal örgüsünde yer alan atomların titreşimlerini ifade eder. Farklı bir deyişle bir kristal kafesteki doğrusal dalganın bir kuantumudur. Tam olarak bir parçacık olmadığından parçacığımsı olarak bilinen bu yapı, optik ve akustik fonon olarak ikiye ayrılır. Optik fononlar ile akustik fononlar arasındaki en önemli farklar, enerji büyüklüğü ve herhangi bir fotonla birleşmesinin zorluğudur.

Brillouin saçılması, düşük optik güçlerde bile kendiliğinden oluşabilir ve ardından termal olarak üretilen fonon alanını yansıtır. Tipik olarak, gelen ışığın yalnızca çok küçük bir miktarı bu şekilde dağılır. Daha yüksek optik güçler için, optik alanların fonon yoğunluğuna büyük ölçüde katkıda bulunduğu bir uyarılmış etki olabilir. Bir ortamdaki bir ışık demetinin belirli bir eşik gücünün üzerinde, uyarılmış Brillouin saçılması, gelen

bir ışının gücünün çoğunu yansıtabilir. Bu süreç, geri yansıyan dalga için doğrusal olmayan güçlü bir optik kazanç içerir. Uygun optik frekansta orijinal olarak zayıf olan karşı yayılan bir dalga güçlü bir şekilde yükseltilebilir. Burada, karşıt yayılan iki dalga, hareketli bir kırılma indisi ızgarası oluşturur. Yansıtılan güç ne kadar yüksek olursa, indis ızgarası o kadar güçlü, etkili yansıtma o kadar yüksek olur.

Geri saçılan ışık fiberde ileri doğru kılavuzlanan akustik dalgadan dolayı farklı bir frekansa kaymaya sahiptir. Brillouin frekans kayması, pompalanan ışığın frekansı ile geri yönde saçılan ışığın frekansları arasındaki frekans farkını ifade eder. Frekans kayması geri yönde azami miktarda olurken, ileri yönde gerçekleşmez. Bu durum ilk başta belirttiğimiz gibi Brillouin saçılmasının ters yönde bir durum olduğunu kanıtlamaktadır. Fiberin sıcaklığına ve gerginliğine bağlı olan akustik dalga hızına, geri saçılan ışığın frekans kaymasından ulaşılmaktadır. Bu yüzden ölçülen frekans kayma bilgisi, fiberin sıcaklık ve maruz kaldığı gerginlik hakkında bilgi verir. Brillouin frekans kaymasının büyüklüğü akustik frekansa eşdeğerdir.

Şekil 2.15'te, Brillouin saçılmasının gerçekleştiği bir durum gösterilmektedir. Şekilde, λ_p lazer dalga boyu, λ_a akustik dalga boyu ve λ_{bs} Stokes dalga boyu, θ ise açığı ifade eder.



Şekil 2. 15. Fiber içine ilerleyen ışık ile akustik dalganın etkileşmesi
(Gül ve diğerleri 2020)

(2.19)'da verilen λ_p lazer darbesi dalga boyu; n kırılma indisi ve λ_a akustik dalga boyuna bağlıdır. θ ise saçılma açısıdır.

$$\lambda_p = 2n\lambda_a \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.19)$$

(2.20)'de akustik dalga λ_a , v_a akustik dalga hızının, f_a akustik frekansa oranı olarak ifade edilmektedir.

$$\lambda_a = \frac{v_a}{f_a} \quad (2.20)$$

Akustik dalgalardan saçılan ışık kaynaklı frekans kayması, saçılma açısına, akustik dalganın hızına ve kırılma indisine bağlıdır (Masoudi ve Newson 2016).

$$f_a = \frac{2n}{\lambda_p} v_a \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.21)$$

Brillouin frekans kayması v_b , akustik frekans f_a 'ya eşdeğerdir ve (2.22)'de verilmektedir.

$$v_b = \frac{2n}{\lambda_p} v_a \quad (2.22)$$

Brillouin kazanç katsayısı (2.23)'te gösterilmektedir.

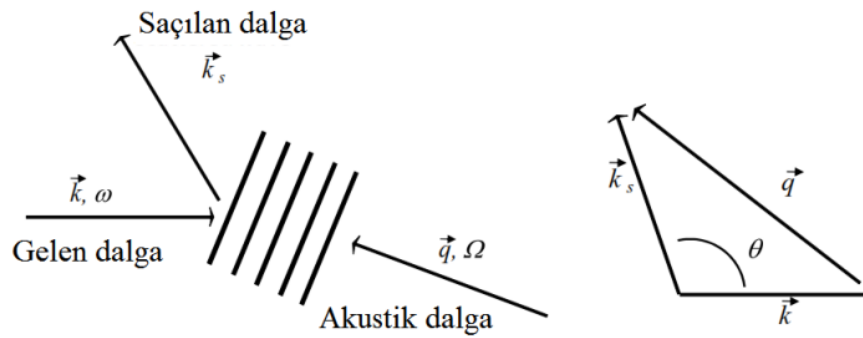
$$g_b = \frac{2\pi n^7 p^2}{c\lambda^2 \rho v_a \Delta v_b} \quad (2.23)$$

Silikada bu etkileşim, 1550 nm'de Δ_{vb} Brillouin kazancı hat genişliği 20 MHz'lik çok dar bir Brillouin çizgi genişliği üzerinde gerçekleşir. Kaynaşmış silikada $V_s = 5760$ m/s için, 1550 nm'de geriye doğru yayılan ışığın frekansı, orijinal sinyalden 11 GHz (0,09 nm) kadar aşağı kaydırılır (Keiser 2011). p ortalama fotoelastik katsayısı ve ρ erimiş silika yoğunluğudur. Fiberin malzeme yapısına ve mekanik etkilere bağlı olarak Brillouin kazanç katsayısı ve Brillouin hat genişliği değişiklik gösterebilir. Brillouin frekans kayması ve Brillouin güç değişimi bir fiber optik boyunca dağınmık gerginlik ve sıcaklık ölçümü için önem arz etmektedir.

Brillouin saçılması, net bir şekilde önem arz etmesi için eşik optik gücünün üzerinde olmalıdır. Eşik gücü P_B , (2.24)'te verilmektedir (Boydak 2017).

$$P_B = 4,4 \times 10^{-3} d^2 \lambda^2 \alpha_{dB} V \quad (2.24)$$

Verilen eşitlikte, d (çap), λ (dalga boyu), α_{dB} (dB cinsinden zayıflama), V (bant genişliği) ifade etmektedir. Brillouin saçılmasında yer alan Stokes bileşenlerinin oluşumu Şekil 2.16'da verilmiştir.



Şekil 2. 16. Brillouin saçılmasında yer alan Stokes bileşenlerinin oluşumu (Yücel ve diğerleri 2017)

Brillouin saçılması, genel olarak fiber içerisinde ilerleyen ışığın, kendiliğinden oluşan akustik dalga ile etkileşmesinin bir sonucu olarak ters yönde yansıdığı kuramsal bir etki olarak değerlendirilebilir. Akustik dalga, fiber içerisinde ilerlediği için, yansıyan ışık farklı bir frekansa kayma gösterir. Dolayısıyla, ilerleyen ışığın frekansı ile saçılan ışığın frekansları, Brillouin frekans kayması kadar birbirinden ayrılır. Akustik dalganın hızı, yansıyan ışığın frekans kayma miktarından elde edilebilmektedir (Yücel ve diğerleri 2014).

Akustik dalgalar, termal uyarım ile kendiliğinden oluşturulabilir ve bu durumda, optik dalgalar üzerinde ortaya çıkan saçılma etkisi Spontane Brillouin saçılması olarak bilinir. Spontane Brillouin saçılması tabanlı sistemlerde, saçılma kesiti ölçülen parametrelere bağlı olduğundan saçılan güç seviyesi de sıcaklığa ve boyuna gerginliğe bağlıdır. Bu nedenle, her iki ölçülen büyüklüğü ölçmek için Brillouin frekans kaymasının ve gücün eşzamanlı sıcaklık ve gerginlik bağımlılığından yararlanmak mümkündür.

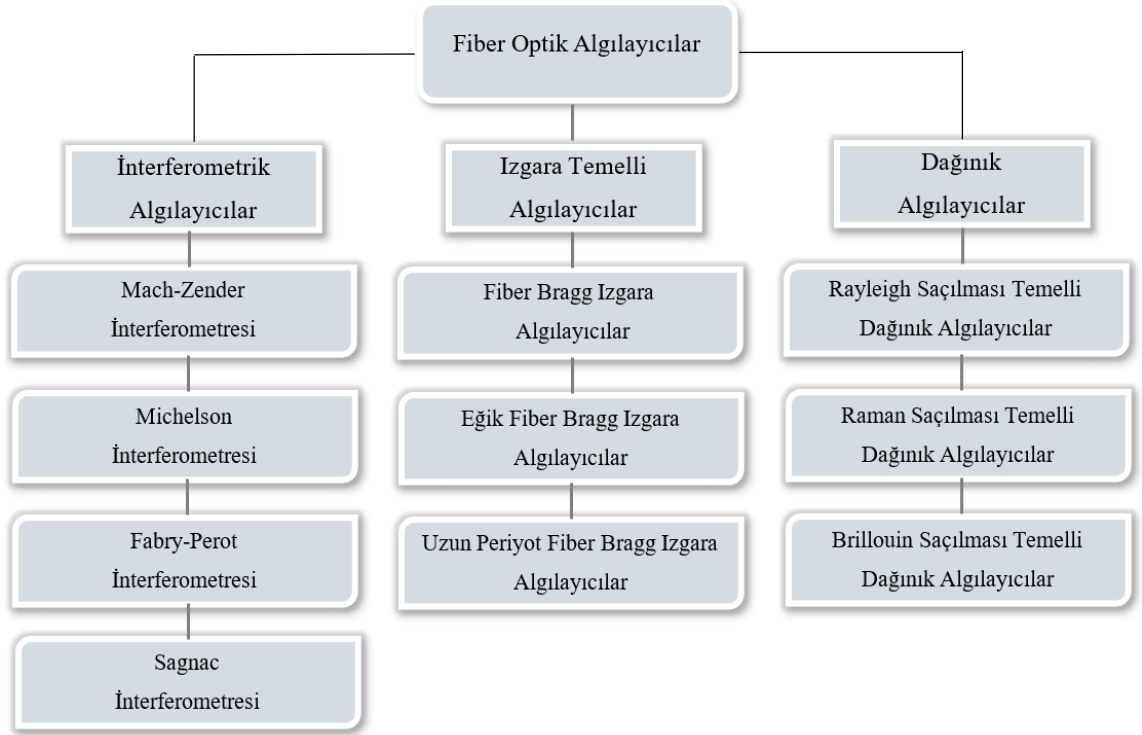
2.4. Optik Fiberli Algılayıcılar

Işık, basınç, titreşim, hareket, sıcaklık, gerginlik, nem gibi fiziksel büyüklüklerin ölçümü ve tespiti yapılarak, bu bilgilerin işlem yapacak yere bildirilmesini sağlayan teknolojiye algılama teknolojisi denir. Fiber optik algılayıcılar, bilgiyi daha hızlı ve daha güvenli bir şekilde aktarmasından dolayı günümüzde tercih edilirken diğer algılayıcıların önüne geçmektedir. Bu yüzden kullanım alanları gün geçtikçe artmaktadır. Bir fiber optik ortamdaki sıcaklık, basınç ve titreşim gibi dış etkilere maruz kalmasından dolayı kendi yapısındaki değişiklikleri kullanılarak ve içinden geçen ışığın saçılmasını kullanarak algılayıcı olarak kullanılabilir.

Fiber optik algılama farklı algılayıcı türlerine göre daha verimli olmasının belli sebepleri bulunmaktadır. Aşağıda verilen özellikler bu verimi kanıtlayan başlıca sebeplerdir.

- Korozyona karşı yüksek dirençli olmaları
- Ufak boyutlar
- Uzak mesafelere rağmen yüksek duyarlılık
- Etkin izleme ve eksiksiz bilgi aktarımı
- Düşük kayıp
- Elektromanyetik girişime maruz kalmama
- Fiziksel dış etkileri algılama

Fiber optik ile algılama yapılırken, aktarılabilecek bilgiye, kullanılacak ortama ve algılanacak büyüklüğe göre çeşitli uygulamalarda farklı türleri kullanılmaktadır. Fiber optik algılayıcıların sınıflandırması Şekil 2.17’de verilmektedir.



Şekil 2. 17. Fiber optik algılayıcıların sınıflandırılması (Barrias ve diğerleri 2016)

2.4.1. Dağılık algılayıcılar

Dağılık algılama sıcaklık ve gerginliğin eşzamanlı ölçümü sağlamasıyla önemli bir algılama türüdür. Fiber içerisinde meydana gelen elastik ve elastik olmayan saçılmalar kullanılarak toprak altında bulunan fiber üzerinde oluşan gerginlik, sıcaklık gibi fiziksel büyüklüklerin algılanmasını sağlar.

Dağılık algılama, algılamayı fiber optik boyunca yapmaktadır. Hedef tespit, izleme, izinsiz girişlerin takibi gibi işlemleri yapmak için tasarlanan algılama sistemlerinde çok sayıda algılayıcıya ihtiyaç duyuluyordu. Fiber optik algılayıcıların geliştirilmesi düşük maliyetli, eş zamanlı takip ve daha verimli algılama iletiminin öne çıkmasını sağladı.

Dağılık algılama, elastik ve elastik olmayan saçılma türleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Saçılmalar kısmında bahsettiğimiz gibi elastik ve elastik olmayan saçılmalar arasındaki en önemli fark frekans değişimidir. Elastik saçılmada pompalanan ışık ile saçılan ışık arasında frekans farkı mevcut iken elastik olmayan saçılmada frekans farkı yoktur. Dağılık algılayıcıların düşük uzamsal çözünürlüklerine sahip olması kısa optik darbe

genişliğine sahip olmanın zorluğundandır. Daha küçük yapılarda olan algılayıcılar belli bir noktayı algıladığı için daha yüksek uzamsal çözünürlüğe sahiptir.

Dağınık algılama temelinde olan saçılma türleri Raman saçılması, Rayleigh saçılması ve Brillouin saçılmasıdır. Bu saçılmalara dayalı dağınık algılayıcı türleri; Rayleigh saçılımı temelli optik zaman domeni reflektometresi (OTDR), Raman saçılımı temelli optik zaman domeni reflektometresi (ROTDR) ve Brillouin saçılımı temelli optik zaman domeni reflektometresi (BOTDR) olarak sıralanabilir.

Kullanım ve uygulama alanları olarak şu örnekler verilebilir;

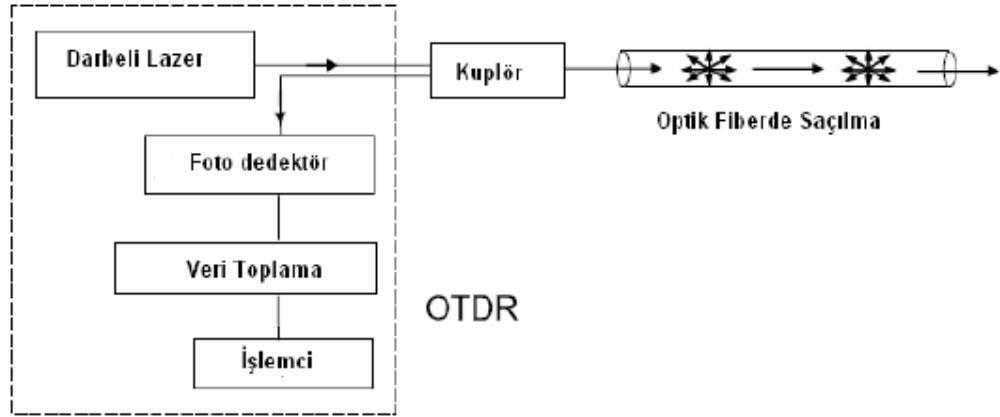
- Sınır güvenliğinde izinsiz girişlerin tespitinde,
- Hava araçları ve otomotiv sektöründe,
- Barajlar, binalar, tüneller, köprüler, depolama tankları, boru hatları, gemiler gibi büyük yapıların stres izlemesinde,
- Elektrik güç transformatörlerinde, jeneratörlerde, reaktör sistemlerinde, proses kontrol sistemlerinde ve yangın algılama sistemlerinde sıcaklık profili çıkarmada,
- Boru hatlarında kaçak tespiti, arıza teşhisi ve güç dağıtım sistemlerinde ve izinsiz giriş alarm sistemlerinde manyetik ve elektrik alan anormalliklerinin tespitinde,
- Yapılarda stres, titreşim ve sıcaklığın gerçek zamanlı değerlendirilmesinde kullanım için kompozit malzemelere gömülü algılayıcılarda.

Dağınık akustik algılama (DAS), optik zaman domeni reflektometresi (OTDR) kullanılarak optik fiberlerde Rayleigh geri saçılan ışığın algılanmasına dayanan bir fiber optik algılama tekniğidir. DAS/DVS için kullanılan OTDR tekniği, faz-OTDR (faz-OTDR) olarak adlandırılır ve on yıldan fazla bir süredir yoğun bir araştırma alanı olmuştur (Masoudi ve diğerleri, 2016)

2.4.1.1. Rayleigh saçılmasına dayalı fiber optik algılayıcılar

Rayleigh saçılması esaslı fiber optik algılayıcılar sıcaklık ve gerginlik algılamalarında kullanılmaktadır. Rayleigh saçılmasının güç değişimleri bu fiziksel büyüklüklere göre değişmektedir. Işığın gücünü ölçmek ve Rayleigh saçılımının uzamsal bilgisi için basit

bir OTDR sistemi tasarlanır. Bu OTDR sistemi, optik zaman domeninde, fiber optik kabloları karakterize ederek, fiber giriş kaybını doğrularak, uzunluğunu ölçerek ve varsa kablo kırılmasını tespit ederek fiber optik kablolarda bir analiz raporu sağlar. Sıcaklık veya gerginlik gibi büyüklükler değiştirilerek istenilen değerlere ulaşılabilir.



Şekil 2. 18. OTDR çalışma prensibi (Pehlivan 2007)

Bir OTDR, bir lazer diyot kaynağı, bir fotodiyot detektörü ve oldukça hassas bir zamanlama devresi içerir. Lazer belirli bir dalga boyunda bir ışık darbesi yayar, bu ışık darbesi test edilen fiber boyunca hareket eder, darbe iletilen ışığın fiber kısımlarında aşağı doğru hareket ederken yansıtılır veya fiberden aşağı fotodetektöre geri saçılır. Bu geri dönen ışığın yoğunluğu ve detektöre geri gelmesi için geçen süre, bize fiber bağlantıdaki bir olayın kayıp değerini, türünü ve yerini söyler.

OTDR, geri saçılmaları kullanarak kablo kaybını hesaplayan, fiberdeki hasarı veya zayıflamayı tespit eden ilk fiber optik dağınık algılayıcılardır. Ayrıca Rayleigh saçılımı kaynaklı geri bildirimler gelişmiş verilerle ele alınarak fiber optik hattın izlemesini sağlar. Bu fiber optik hat, bir tesisin güvenliğinde veya sınır güvenliği amacıyla tespit ve teşhis uygulamalarında kullanılmaktadır.

Rayleigh saçılması tabanlı algılayıcılar ile Brillouin saçılması tabanlı algılayıcıları, algılama mesafesi ve algılama çözünürlüğü açısından karşılaştıracak olursak, Rayleigh saçılması kısa mesafeli optik fiberlerde daha verimli ölçüm yaparken Brillouin saçılması

daha uzun mesafelerde yerleştirilmiş optik fiber boyunca ölçüm yapabilmektedir. Kısa mesafeli optik fiberlerde Rayleigh saçılması Brillouin saçılmasına göre daha verimlidir. Ancak Rayleigh saçılmasının Brillouin saçılmasına göre sıcaklık duyarlılığı yok sayılacak kadar azdır.

2.4.1.2. Raman saçılmasına dayalı fiber optik algılayıcılar

Rayleigh saçılması gibi, Raman saçılması da moleküllerin kutuplanabilirliğine bağlıdır. Polarize olabilen moleküller için, gelen foton enerjisi moleküllerin titreşim modlarını harekete geçirerek, titreşim geçiş enerjilerinin miktarı kadar enerjileri azalan saçılmış fotonlar verebilir. Bu koşullar altında saçılan ışığın spektral analizi, saçılan ışın frekansında Rayleigh saçılma tepe noktasının altındaki spektral uydu hatlarını ortaya çıkaracaktır. Bu tür çizgilere "Stokes çizgileri" denir. Saçılma moleküllerinin titreşimsel uyarılmış durumlarında önemli bir uyarım varsa, titreşim enerjisi gelen foton enerjisine eklendiğinden, olay frekansının üzerindeki frekanslarda saçılmayı gözlemlemek de mümkündür. Genellikle daha zayıf olan bu çizgilere anti-Stokes çizgileri denir.

ROTDR, anti-Stokes ve Stokes bileşenlerinin üretildiği Raman saçılımına dayanmaktadır. Bu iki bileşen arasındaki yoğunluk oranı, fiberin kendisi algılama ortamı olduğundan, fiber boyunca herhangi bir noktada sıcaklık bilgisi sağlayabilir. Stokes bileşenlerinin genliği sıcaklığa bağlı olmadığından, ROTDR yalnızca 0,2°C çözünürlüğünde sıcaklık ölçülebilir. Işık fotonlarının anti-Stokes bileşeninin gücü, optik fononların miktarına bağlıdır. Bu neden sıcaklık değişimleriyle orantılıdır. Dolayısıyla ışık fotonlarının anti-Stokes bileşeni gücünün, Stokes bileşeni gücüne oranı ölçülerek fiber uzunluğu boyunca sıcaklık oluşumları elde edilebilmektedir (Yu 2006). ROTDR'nin algılama mesafesi normal olarak 1 m uzamsal çözünürlükle yaklaşık 20 km ile sınırlıdır.

Raman saçılması gerginlik hassasiyeti yoktur ama sıcaklık hassasiyeti vardır. Bu yüzden bu fiziksel parametrelerin birini sabit tutmaya gerek kalmaz. Sıcaklık hassasiyeti dolayısıyla optik fiberli dağınık sıcaklık algılamada yaygın olarak kullanılır. Brillouin saçılması ise bu her iki parametrenin de ölçümünü eş zamanlı yapabilmektedir. Bu durumda Brillouin saçılmasına dayalı fiber optik algılayıcıların Raman algılayıcılarına göre daha geniş alanda uygulanmasını sağlamaktadır (Dakin ve diğerleri 1985).

Raman saçılma katsayısı düşük olduğu için, Raman gücünün Rayleigh ve Brillouin gücüne göre daha düşüktür. Bu fark algılayıcı verimi açısından daha yüksek güçlü lazer kaynağına ve fotodedektör kısmında daha uzun yakalama süresine mecbur bırakır (Yu 2006).

2.4.1.3. Brillouin saçılmasına dayalı fiber optik algılayıcılar

Raman saçılmasının eş zamanlı olarak gerginlik ve sıcaklık algılanamadığı için, son zamanlardaki çalışmalarda Brillouin esaslı dağınık algılayıcılar, Raman esaslı dağınık algılayıcılara göre daha çok uygulama ve kullanım alanı bulmuştur. Brillouin saçılmasına dayalı optik fiberli algılama, sıcaklık etkileri ile ortamda oluşan akustik dalgalarla lazer aracılığıyla fiber içine gönderilen ışınların etkileşmesi ve fotonların pompalandığı yöne göre ters yönde saçılması prensibine dayanmaktadır. Brillouin saçılma, düşük frekansa sahip akustik dalgaları içerir.

Saçılma uzun dalga boylu stokes dalgası veya kısa dalga boylu anti-stokes dalgasına sahip olabilir. BOTDR'de, Brillouin saçılımına dayanarak geri saçılan ışığın frekansı, BOTDR'nin eşzamanlı ölçüm sağlayan, fibere uygulanan sıcaklığa ve gerginliğe bağlıdır.

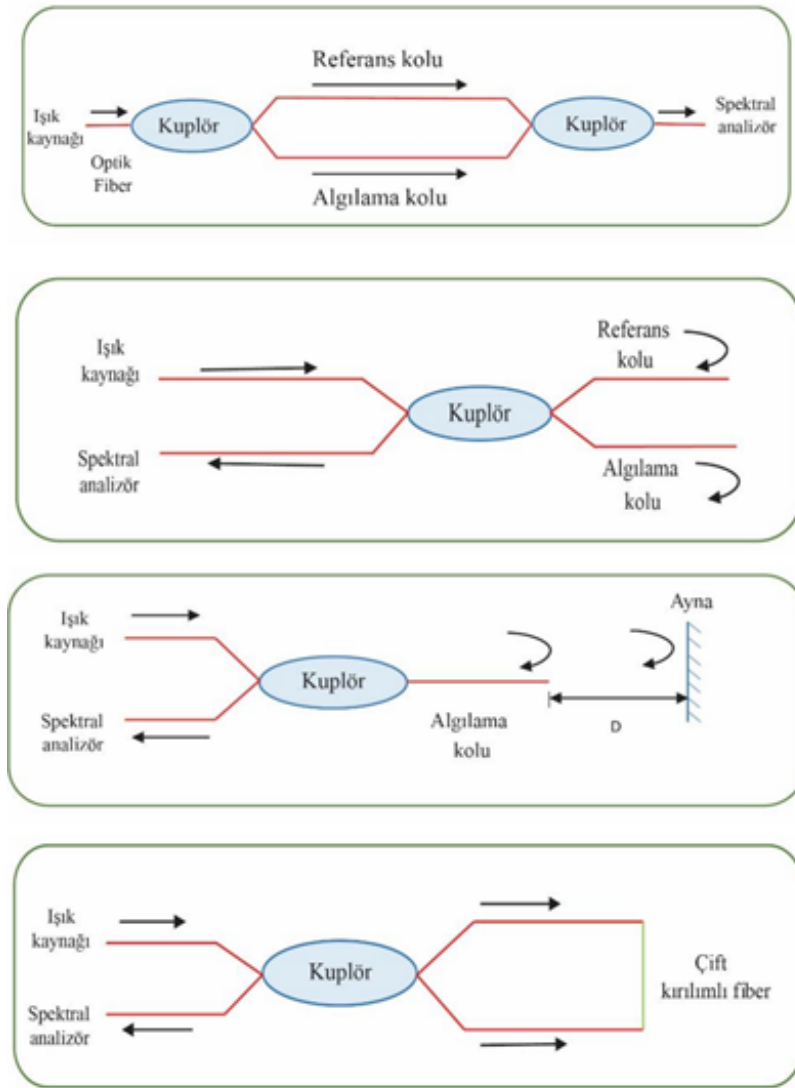
Brillouin frekans kayması ortamdaki sıcaklık ve gerginlik oluşumlarına doğrusal olarak bağlı olduğu için, hem sıcaklık hem de gerginlik verileri optik fibere ait Brillouin kayıp ya da kazanç spektrumunun analiz edilmesiyle ölçülebilmektedir (Yu 2006).

Brillouin saçılmasına dayalı optik fiberli algılayıcılar, düşük giriş gücüne (\approx mW) ve yüksek sıcaklık ve gerginlik duyarlılıklarına sahip olmalarının yanı sıra -270 °C ile 800 °C aralığında sıcaklık ölçüm yeteneğine (Li ve diğerleri, 2003) ve birkaç μ e ile 20000 μ e aralığında gerginlik ölçüm kabiliyetine (DeMerchant 2000) sahiptirler.

Kee ve ark. (2000b) 1 km uzunlukta test edilen bir algılayıcı fiber hattı için 1500 nm dalga boyunda kısa darbe süresine sahip bir lazer kullanarak 35 cm uzamsal çözünürlüklü ve $4,3$ °C sıcaklık çözünürlüklü olarak sıcaklık değerlerine ulaşmışlardır (Kee ve diğerleri 2000b).

2.4.2. İnterferometrik algılayıcılar

Hayati belirtilerin izlenmesi için kullanılan interferometrenin çalışmasına, farklı optik yollarla bir veya daha fazla optik fiberden yayılan iki ışık huzmesinin girişimi neden olur. Işın ayırma ve ışın birleştirme genellikle kuplörler tarafından gerçekleştirilir. Fabry–Perot, Mach–Zehnder, Michelson ve Sagnac interferometreler olmak üzere dört tip interferometre vardır. İnterferometrik algılayıcılar dört çeşittir. Şematik diyagramları Şekil 2.19’da verilmektedir.

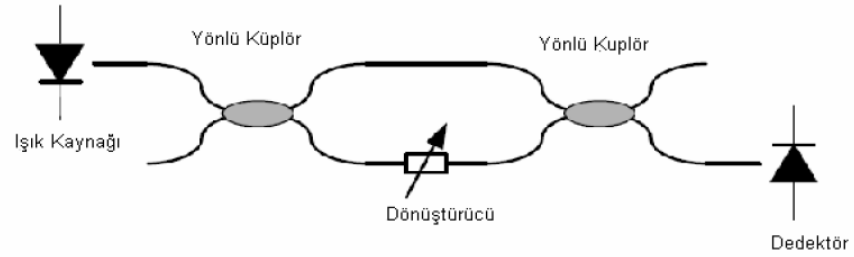


Şekil 2. 19. Mach–Zehnder, Michelson, Fabry Perot, Sagnac şematik diyagramları (Mashhadani 2019)

2.4.2.1. Mach-Zehnder interferometresi

Mach-Zehnder İnterferometresi iletim modunda çalışır. Mach-Zehnder İnterferometreler (MZI), standart fotolitografik işlemler vasıtasıyla entegre optiklerde kolayca üretilir ve bir ölçülenin neden olduğu faz kaymasının tespiti için kullanılan en yaygın yapılardan biridir. Optik modülatör, optik algılayıcı ve optik filtre gibi optik bileşenler olarak kullanılmaktadır (Wang ve diğerleri, 2019). Temel bir Mach-Zehnder interferometrik algılayıcı modeli Şekil 2.20’de gösterilmiştir.

Işık kaynağından ışık fibere fırlatılır ve yönlü kuple vasıtasıyla ikiye bölünür. Bir kolun fazı ölçülecek çevresel parametre tarafından modüle edilir. Daha sonra iki koldaki ışık başka bir yönlü kuple ile birleştirilir ve birbiriyle giriştirilir. İki kol arasındaki faz, Mach-Zehnder İnterferometresinden elde edilen girişim sinyalinin ölçümüyle tespit edilir.



Şekil 2. 20. Mach-Zehnder interferometrik algılayıcı modeli (Pehlivan 2007)

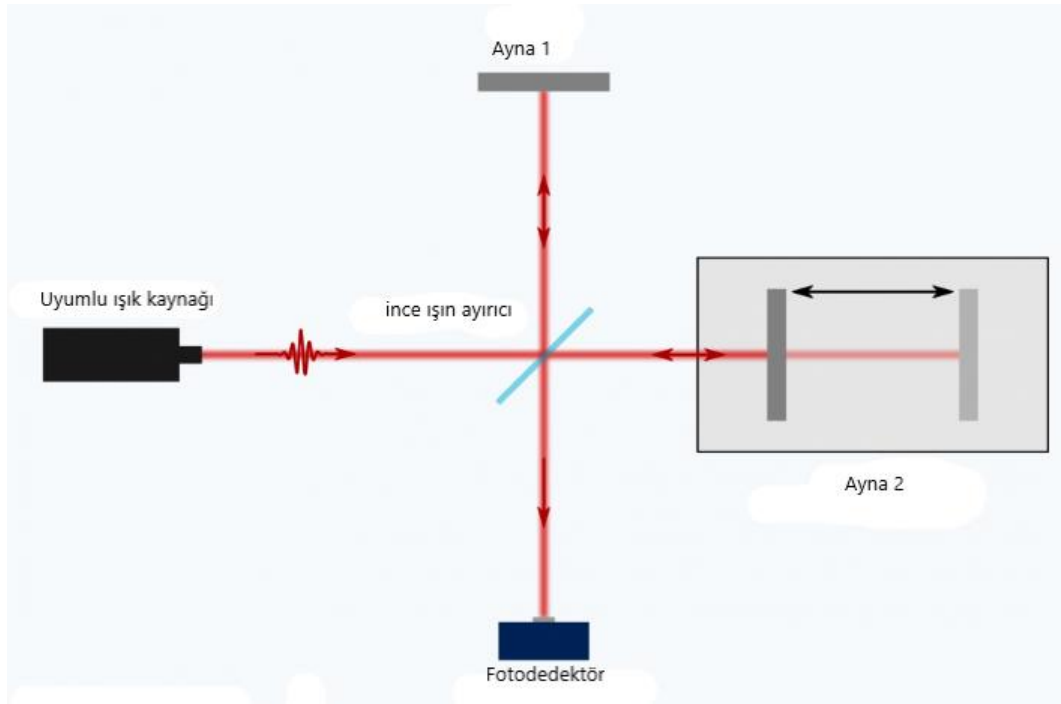
2.4.2.2. Michelson interferometresi

Michelson interferometre, tutarlı ışık kullanan ve girişim adı verilen iki ışık huzmesinin üst üste binmesini oluşturan bir ölçüm cihazıdır. Michelson interferometre, yalnızca birkaç optik bileşene ihtiyaç duyan, hizalanması kolay ve bu nedenle birçok uygulama için yaygın olarak kullanılan basit bir interferometre türüdür.

Parazit etkisinden yararlanmak için uyumlu bir ışık kaynağı gereklidir. Genellikle tek renkli bir lazer kullanılır. Hem sürekli dalga hem de darbeli lazerler kullanılabilir. Gelen ışın ince bir ışın ayırıcıya çarpar ve yoğunluk genliği iki zayıf ışına bölünür. Bu ışınların

her biri ayarlanabilir bir ayna tarafından ince ışın ayırıcıya geri yansıtılır ve burada ışınlar tekrar birleştirilir. İki ışık huzmesinin faz farkı sıfır ise, iki huzme yapıcı bir şekilde karışacak ve fotodetektörde yüksek yoğunluklu bir sinyal ölçülecektir. Tersine, eğer faz farkı ışığın dalga boyunun yarısı ise, iki ışın birbirini götürür ve dedektör sinyali sıfıra düşer. İki ışık demetinin faz farkı, optik ışın yolunun farkına bağlı olduğundan, aynalardan biri ile ışın ayırıcı arasındaki mesafedeki küçük değişiklikler, fotodetektör üzerinde güçlü yoğunluk modülasyonlarına neden olur.

Bu yoğunluk modülasyonlarının optik gecikme üzerindeki duyarlılığı doğal olarak spektrometrede kullanılan dalga boyuna bağlıdır. Örneğin, 633 nm dalga boyuna sahip standart bir Helyum-neon hizalama lazeri kullanırken, optik yol farkında yalnızca 317,5 nm'lik bir değişiklik, dedektör üzerindeki girişim sinyalini maksimumdan minimuma veya tam tersi yönde değiştirecektir. Bu durum ölçüm tekniğinin aşırı hassasiyetini göstermektedir. Temel bir Michelson interferometrik algılayıcı modeli Şekil 2.21'de gösterilmiştir.

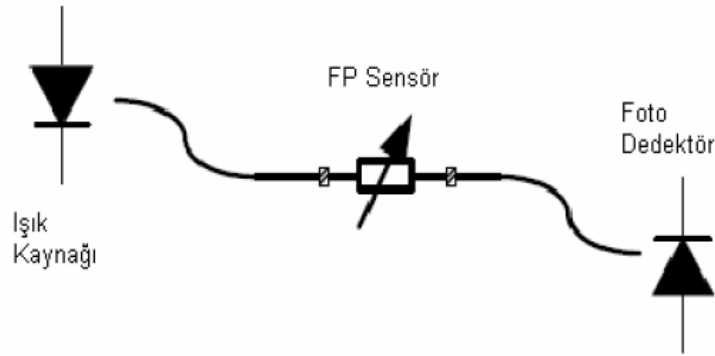


Şekil 2. 21. Michelson interferometrik algılayıcı modeli

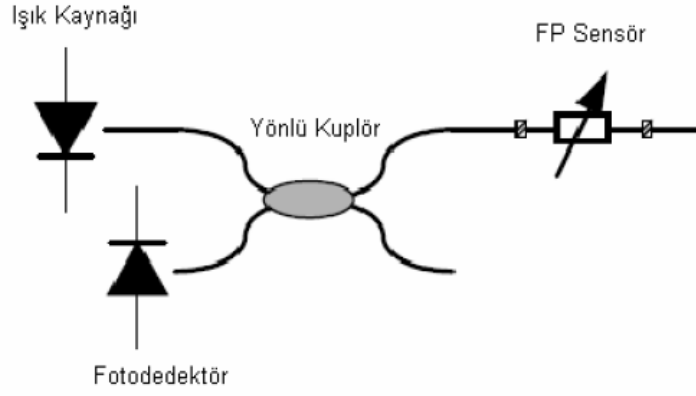
2.4.2.3. Fabry-Perot interferometresi

Fabry-Perot interferometresi, ışığın iki paralel yansıtıcı yüzeyle sınırlanan bir boşluktan parıldaması sonucu ortaya çıkan çoklu ışın girişimi olgusunu kullanır. Işık yüzeylerden biriyle her karşılaştığında, bir kısmı dışarı iletilir ve kalan kısmı geri yansır. Asıl etkisi tek bir ışını birbirleriyle girişim yapan birden fazla ışına ayırmaktır. Yansıtılan ışının ek optik yol uzunluğu (çoklu yansımalarından dolayı) ışığın dalga boyunun tam bir katıysa, yansıyan ışınlar yapıcı bir şekilde girişim yapacaktır. Boşluk içindeki yansıma sayısı ne kadar fazlaysa, girişim maksimumu da o kadar keskindir. Fabry-Perot (FP) interferometre kullanılarak incelik ve serbest spektral aralık kavramları anlaşılabilir.

FP algılayıcılar Şekil 2.22 ve Şekil 2.23'te de görüldüğü gibi hem iletim hem de yansıma modunda çalışabilir. Aynalardaki yansımalar yüksek olduğu zaman, Fabry-Perot (FP) interferometre genellikle Şekil 2.22'de gösterildiği gibi FP'nin optik bir filtre gibi çalıştığı iletim modunda olur. Aynalardaki yansımalar düşük olduğu zaman, Fabry-Perot (FP) interferometre genellikle Şekil 2.23'te gösterildiği gibi bütün çok yollu yansımaların ihmal edildiği iki ışınlı bir interferometre olarak dikkate alınacağı yansıma modunda çalışır (Agrawal, 2013).



Şekil 2. 22. İletimde olan Fabry-Perot (FP) algılayıcı (Pehlivan 2007)



Şekil 2. 23. Yansıma yapan Fabry-Perot (FP) algılayıcı (Pehlivan 2007)

Fabry-Perot (FP) interferometrik algılayıcı içte etkileşimli Fabry-Perot interferometresi (IFPI) ve dışta etkileşimli Fabry-Perot interferometresi (EFPI) olmak üzere ikiye ayrılır. Birçok optik bölücü ve birleştiriciye ihtiyaç duyan Mach-Zehnder ve Michelson interferometrelerinin çoğullamasının tersine FP algılayıcıların çoğullaması görece daha kolaydır.

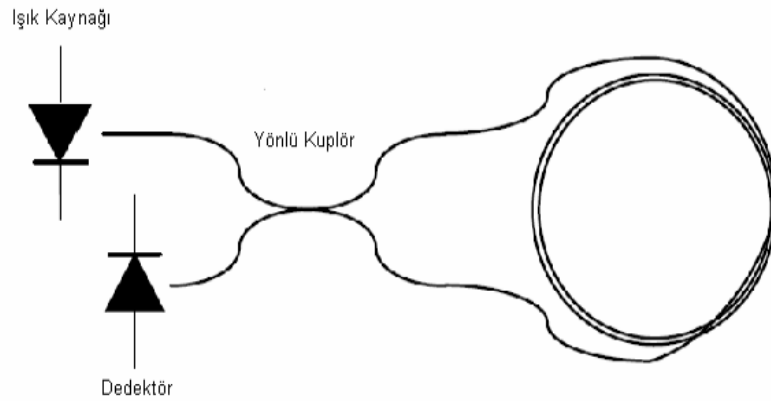
Bir nokta algılayıcı bir ortamda tek bir noktada ölçüm yapmaktadır. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan nokta algılayıcılardan en önemlileri, interferometrik özellikli Fabry-Perot algılayıcıları ve Bragg Grating algılayıcıları olarak verilmektedir. Saçılma esaslı dağınık algılamalar ise algılayıcı fiber boyunca herhangi bir noktadaki sıcaklık, gerginlik ve titreşim gibi fiziksel büyüklükleri algılamak için kullanılmaktadır.

2.4.2.4. Sagnac interferometresi

Sagnac interferometreleri ve pasif halka rezonatörleri, çok çeşitli çevresel olayları algılamak için kullanılabilir. Bu yaklaşımlara dayanan fiber optik jiroskoplar, birkaç yıl önce ulaşılması zor görülen navigasyon uygulamaları yapabilen tüm katı hal kompakt atalet ölçüm birimlerinin beklentisini sunar. Bu algılayıcıların faydası, dönüş algılamanın çok ötesine uzanır ve benzersiz avantajları, akustik, manyetik alan, sıcaklık, hızlanma ve gerginlik algılamada yaygın kullanımları olasılığını sunar. Bu cihazlar, ışık kaynaklarının ve optik fiberlerin karakterizasyonunda da uygulamalar bulabilir.

Fiber optik gyro geliştirmenin ana itici gücü, bu algılayıcılardan dönme dışındaki tüm çevresel etkileri izole etmek olmuştur. Bununla birlikte, düzgün yapılandırılmış Sagnac interferometre ve pasif halka rezonatörünün akustik, elektrik ve manyetik alanlara, sıcaklığa, basınca, ivmeye ve zorlanmaya duyarlılığı, bu cihazları birçok uygulamada tercih edilir hale getirir. Bu algılayıcılar ve uygulamaları ile bu algılayıcıların ışık kaynaklarını ve optik fiberi karakterize etmek için nasıl kullanılabileceği gözden geçirilir.

Temel bir optik fiber Sagnac interferometrik modeli Şekil 2.24'te gösterilmiştir. Işık kaynağından fibere pompalanan ışın iki ışına ayrılır ve fiber jiroskopuna gönderilir. Saat yönünde ve saat yönünün tersinde yol alan ışınlar kuplörde birleştirilir ve iki ışınlı bir interferometre oluşturulur. İki ışın arasında faz farkından faydalanan jiroskoplar olarak kullanılırlar.



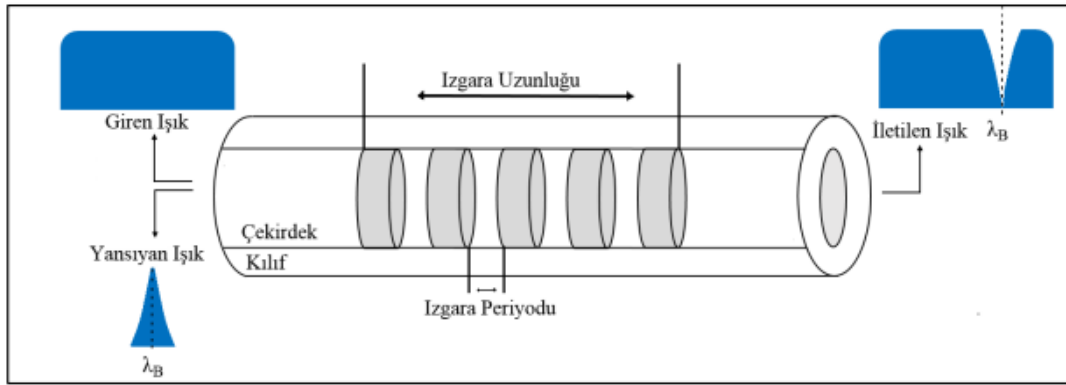
Şekil 2. 24. Tipik bir Sagnac interferometrik jiroskop (Pehlivan 2007)

2.4.3. Izgara temelli algılayıcılar

2.4.3.1. Fiber Bragg ızgaralar

Fiber Bragg ızgaraları, tek modlu bir fiberin çekirdeğini, periyodik bir yoğun lazer ışığı modeline yanal olarak maruz bırakarak yapılır. Maruz kalma, fiber çekirdeğinin kırılma indisinde kalıcı bir artış oluşturarak, maruz kalma modeline göre sabit bir indis modülasyonu yaratır. Bu sabit indis modülasyonuna ızgara denir. Her periyodik kırılma değişiminde az miktarda ışık yansıtılır. Izgara periyodu giriş ışığının dalga boyunun

yaklaşık yarısı olduğunda, yansıtılan tüm ışık sinyalleri belirli bir dalga boyunda tek bir büyük yansımada tutarlı bir şekilde birleşir. Buna Bragg koşulu denir ve bu yansımanın meydana geldiği dalga boyuna Bragg dalga boyu denir. Faz uyumlu olmayan Bragg dalga boyu dışındaki dalga boylarındaki ışık sinyalleri esasen şeffaftır. Bu nedenle ışık, ihmal edilebilir bir zayıflama veya sinyal değişimi ile ızgara boyunca yayılır. Yalnızca Bragg koşulunu karşılayan dalga boyları etkilenir ve güçlü bir şekilde geri yansıtılır. Iızgara dalga boyunu doğru bir şekilde önceden ayarlama ve koruma yeteneği, fiber Bragg ızgaralarının temel bir özelliği ve avantajıdır. Şekil 2.25'te FBI'nın yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2. 25. FBI'nın yapısı

FBI'lardaki optik algılama, ölçülen parametrenin, Bragg yansımasının dalga boyu kodlu olması ilkesine dayanmaktadır. Dalga boyundaki kayma bilgisi ölçülen fiziksel değişimle ilişkilidir. Bu nedenle, FBI algılayıcısı için birinci aşama Bragg yansımasının dalga boyu sorgulamasında yatmaktadır.

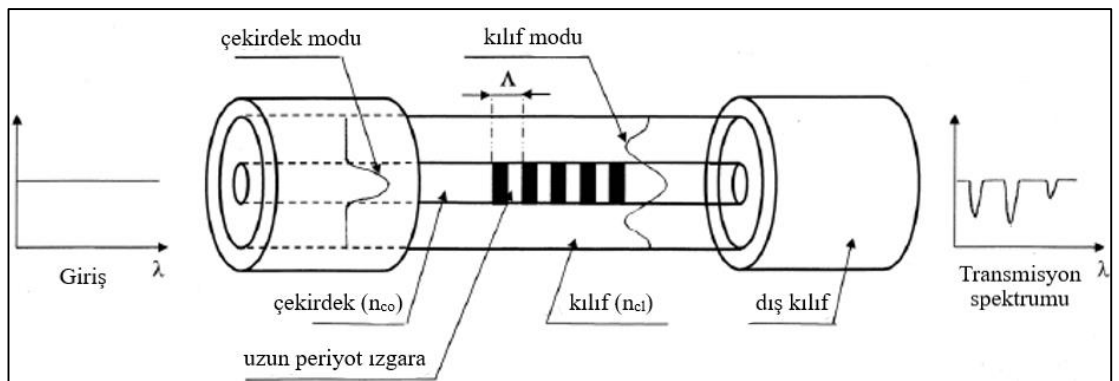
Işık kaynağından çıkıp fiber boyunca kılavuzlanan ışık, her bir ızgara saçağından belli bir miktar yansır ve geriye yansıyan yönde bir tepe oluşturmak için her yansıyan ışık birbirine eklenir. Yansımayan ışık fiberde iletilerek fiberde devam eder. Bragg şartında bu yansıtıcılık en yüksek seviyededir. Yansıma modunda çalışan ızgaralarda, dalga boyundaki yansıtıcılık ızgara performansı ile ilişkilendirilir. Bragg dalga boyundaki yansıtıcılık ne kadar yüksekse ızgara performansı da o derece iyi olmaktadır. Iızgara yansıtıcılığını, fiber uzunluğu ve kırılma indisi değişimi gibi parametreler etkilemektedir.

2.4.3.2. Uzun süreli fiber optik ızgara algılayıcıları

Bir optik fiber ızgara, bir optik fiberin özelliklerinin (genellikle çekirdeğin kırılma indisi) periyodik bir modülasyonundan oluşur. Bu yapılar birkaç yıldan beri aktif olarak incelenmiştir, ancak şimdi fiber optik iletişim sistemlerinin, lazer kaynaklarının, çeşitli fiziksel, kimyasal, biyolojik ve çevresel miktarların tespiti ve ölçümü için enstrümantasyonun geliştirilmesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Pehlivan, 2007).

Izgara periyoduna bağlı olarak, fiber ızgaralar iki tipe ayrılır: Mikron altı periyodu olan Kısa Periyotlu Fiber ızgaralar (veya Fiber Bragg Iızgaralar- FBG) ve tipik olarak periyodu olan Uzun Periyotlu Fiber Iızgaralar (LPFG) 100-1000 mikron aralığında. FBG'ler dar bant yansıma filtreleri (veya iletimde kullanılıyorsa dar bant reddetme filtreleri) olarak işlev görür.

Bir LPFG, enerjinin tipik olarak temel çekirdek yayılım modundan ileri yayılan kaplama modlarına bağlandığı bir optik fiber yapısıdır. Kaplama modları, saçılma, fiberin bükülmeleri ve fiber kılıflama tarafından soğurma nedeniyle hızlı bir zayıflamaya uğradığından, LPFG'nin iletim spektrumu, ayrı dalga boylarında ortalanmış bir dizi zayıflama bandı ile karakterize edilir. Bu zayıflama bantlarının her biri, çekirdek modun enerjisinin farklı bir kaplama moduna bağlanmasına karşılık gelir.



Şekil 2. 26. Uzun süreli fiber ızgaranın şeması (Righini ve diğerleri 2009)

Birleştirilmiş modlar teorisinin yardımıyla, bu eşleşmenin gerçekleştiği merkezi dalga boyu λ_m şu şekilde ifade edilebilir: $\lambda_m = (n_{co} - n_{cl})\Lambda$, burada $\lambda_m = m$ 'inci rezonans dalga

boyu, n_{co} = çekirdek modunun etkin kırılma indisi, n_{cl}^m = m'inci kaplama modunun etkin kırılma indisi, Λ ızgara periyodudur.

Izgara periyodundaki Λ veya çekirdek (n_{co}) ve kaplama (n_{cl}) modlarının etkin kırılma indisindeki herhangi bir modülasyon, ışığın çekirdek ve kaplama modları arasındaki dağılımında değişikliklere neden olur ve sonuç olarak değişikliklere yol açar. Çevreleyen ortamın bükülmesi, gerginliği, sıcaklığı, kırılma indisi, bir LPFG'nin ölçebileceği tipik parametrelerden bazılarıdır.

2.5. Geri Saçılma Esaslı Optik Ölçüm Teknikleri

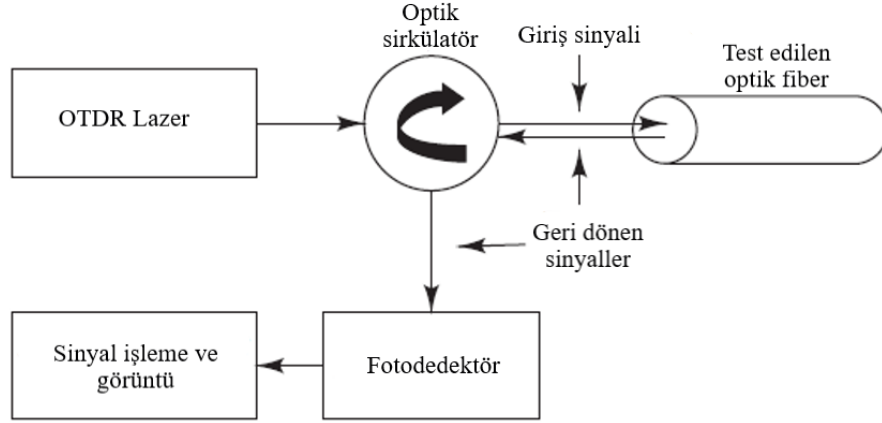
Optik fiber algılayıcılar, saçılan ışının ölçümü yapılacak fiziksel büyüklük ile değiştirilmesine dayanmaktadır. Ölçülecek fiziksel büyüklük sıcaklık, basınç ve gerginlik olabilir. Algılanan optik sinyalin özellikleri; faz, frekans ve güç durumuna göre değişiklik gösterir. Silika esaslı optik fiber algılayıcıların diğer algılama teknolojilerine göre birçok olumlu yönleri mevcuttur. Geri saçılma esaslı optik ölçüm teknikleri; Rayleigh saçılımı temelli optik zaman domeni reflektometresi (OTDR), Raman saçılımı temelli optik zaman domeni reflektometresi (ROTDR) ve Brillouin saçılımı temelli optik zaman domeni reflektometresi (BOTDR) olmak üzere farklı çeşitleri mevcuttur.

2.5.1. Rayleigh saçılması esaslı OTDR ve ϕ -OTDR

Bu teknik ilk olarak Barnoski ve Jensen tarafından 360 m uzunluğunda bir optik fiber boyunca zayıflama özelliklerini araştırmak için kullanılmıştır. Fiber kabloların zayıflama kaybını, ek yapılan noktalardaki zayıflamalarını ve bağlantı zayıflamalarını, uzunluğunu, bükülme ve zarar görme, ışık yansıtma seviyelerini ölçmek için kullanılan çok yönlü taşınabilir bir ölçüm cihazdır.

OTDR cihazı, fiberin içerisine dalga boyu gibi özellikleri ayarlanabilen bir lazer ışığı gönderip, fiber hattı boyunca oluşan fiber çekirdeğin kırılma indisindeki rastgele mikroskopik değişimlerin bir sonucu olarak ortaya çıkan Rayleigh saçılması ve fresnel yansımalarından faydalanır. Işığın yayılma eksenine 180° yönde geri saçılan ışık, fiber açıklığı tarafından yeniden yakalanır ve kaynağa geri döndürülür. OTDR tekniğiyle giriş

optik sinyalini bir fiber uzunluğuna göndererek ve geriye saçılan optik sinyalin yoğunluktaki değişimini izleyerek, fiber saçılma katsayısı veya enine kesitindeki uzamsal değişimler veya fiber zayıflama bilgileri belirlenebilir.



Şekil 2. 27. Optik sirkulatör kullanan bir OTDR'nin çalışma prensibi

Şekil 2.27'de gösterildiği gibi dalga boyu, darbe genişliği ve test süresini ayarlayabildiğimiz OTDR tekniğinde, bir yönlü kuplör veya bir sirkulatör kullanarak test edilen fiberin bir ucuna periyodik olarak dar lazer tarafından fiber içerisine pompalanan ışık darbeleri göndererek çalışır. Prob darbesi, fiber içinde yayılırken Rayleigh saçılması da dâhil olmak üzere saçılma mekanizmaları nedeniyle gücünü kaybeder. Saçılma işlemi, gelen dalgayı tüm yönlerde aynı frekansta yeniden iletir. Fiber optik bağlantının özelliklerinde bir süreksizlik, kopma veya beklenmedik bir kayıp varsa, yansıyan ve geri saçılan ışığın dalga biçiminin genliği ve zamansal özellikleri analiz edilerek belirlenir. Tipik bir OTDR, bir ışık kaynağı ve alıcı, veri toplama ve işleme modülleri, verileri dahili bellekte veya harici diskte tutmak için bir bilgi depolama birimi ve bir ekrandan oluşur.

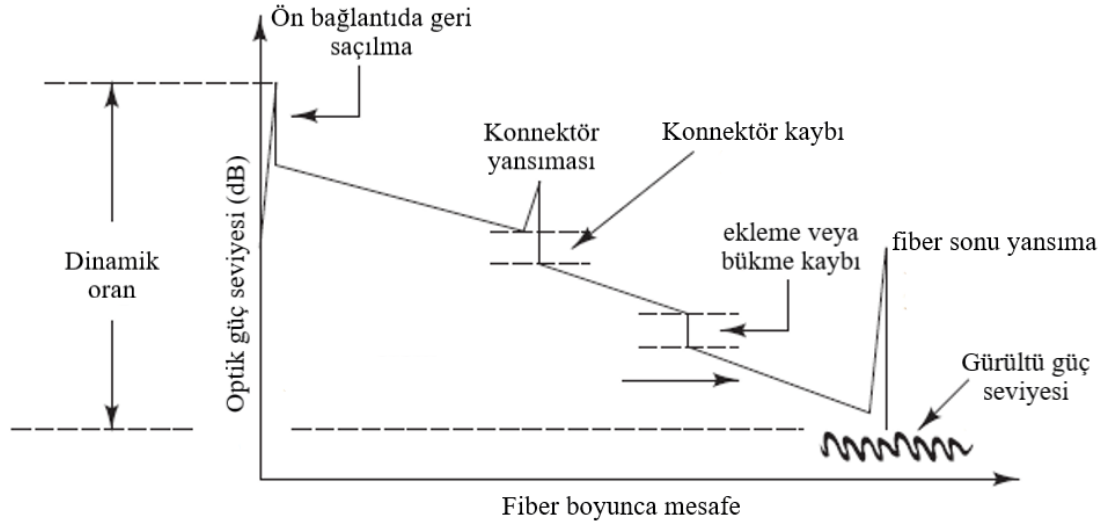
Fiber içerisinde pompalanan fotonların fiber içerisindeki hızına bağlı olarak değişiklik gösterdiğinden, saçılma esaslı algılama sistemlerinde uzamsal çözünürlük, optik darbe süresi değişimlerinden doğrudan etkilenmektedir. Başka bir ifadeyle, uzamsal çözünürlük, optik darbe süresine, çekirdek kırılma indisine ve ışığın hızına bağlıdır.

Bir OTDR cihazının uzamsal çözünürlüğü, algılanabilen en küçük mesafe aralığını ifade eder ve pompalanan darbe genişliğine göre belirlenir. (2.25)'te Δz (uzamsal çözünürlük), c (ışık hızı), T (darbe süresi), n (kırılma indisi) olarak verilmektedir.

$$\Delta z_{min} = \frac{cT}{2n} \quad (2.25)$$

10 ns'lik bir darbe genişliği için ≈ 1 m'lik bir uzamsal çözünürlük elde edilir. Genel olarak OTDR analizi tarafından üretilen sinyaller zayıftır ve iyi bir SNR (sinyal-gürültü oranı) elde etmek için tespit edilen sinyallerin önemli bir ortalamasının alınması gerekir.

OTDR fiber hattı boyunca oluşan fiziksel dış etkilere kaynaklı oluşan kaybı ve hattın toplam kaybını dB cinsinden hesaplar. OTDR grafiklerini okurken bu etkileri ve kayıpları görebiliriz.



Şekil 2. 28. OTDR ekranındaki geri saçılan ve yansıtılan optik gücün temsili izleri

Şekil 2.28'de, bir OTDR'nin ekranında görülen tipik bir izi göstermektedir. Dikey eksenin ölçeği logaritmiktir ve geri dönen (geri yansıtılan) sinyali desibel cinsinden ölçer. Yatay eksen, cihaz ile fiberdeki ölçüm noktası arasındaki mesafeyi ifade eder.

Geri saçılan dalga biçiminin dört farklı özelliği vardır;

- Fiberin giriş ucundaki fresnel yansımasından kaynaklanan büyük bir ilk darbe
- Giriş darbesi fiber boyunca ilerlerken Rayleigh işaretinin ters yönde saçılmasından kaynaklanan zayıflayan uzun bir kuyruk
- Fiber hattındaki bağlantılarda veya konektörlerde optik kaybın neden olduğu eğride ani kaymalar
- Fiberin uzak ucundaki fresnel yansımasından, fiber bağlantı noktalarında ve fiber kusurlarından kaynaklanan pozitif sivri uçlar

Bir olayın tespiti ve ölçüm doğruluğu, bir OTDR'nin o noktada elde edebileceği sinyal-gürültü oranına (SNR) bağlıdır. Bu, geri yansıyan sinyal ile gürültü seviyesi arasındaki oran olarak tanımlanır. SNR, OTDR darbe genişliği, OTDR'nin sinyali ne sıklıkla örneklediği ve ölçüm noktasına olan mesafe gibi faktörlere bağlıdır.

OTDR'nin diğer önemli performans parametreleri dinamik aralık ve ölçüm aralığıdır. Dinamik aralık, ön konektördeki ilk geri saçılma güç seviyesi ile fiberin uzak ucundaki gürültü seviyesi zirvesi arasındaki fark olarak tanımlanır. Tek yönlü fiber kaybı desibel cinsinden ifade edilir. Dinamik aralık, ölçülebilen maksimum fiber kaybı hakkında bilgi sağlar ve belirli bir fiber kaybını ölçmek için gereken süreyi belirtir. Bir OTDR'nin temel sınırlaması, dinamik aralık ve olay yeri çözünürlüğü arasındaki değişimdir. Yüksek uzamsal çözünürlük için darbe genişliği mümkün olduğunca küçük olmalıdır. Ancak bu, sinyal-gürültü oranını azaltır ve dolayısıyla dinamik aralığı düşürür. Tipik mesafe çözünürlüğü değerleri, 10 ns'lik bir darbe için 8 cm'den 50 ms'lik bir darbe için 5 m'ye kadar değişir.

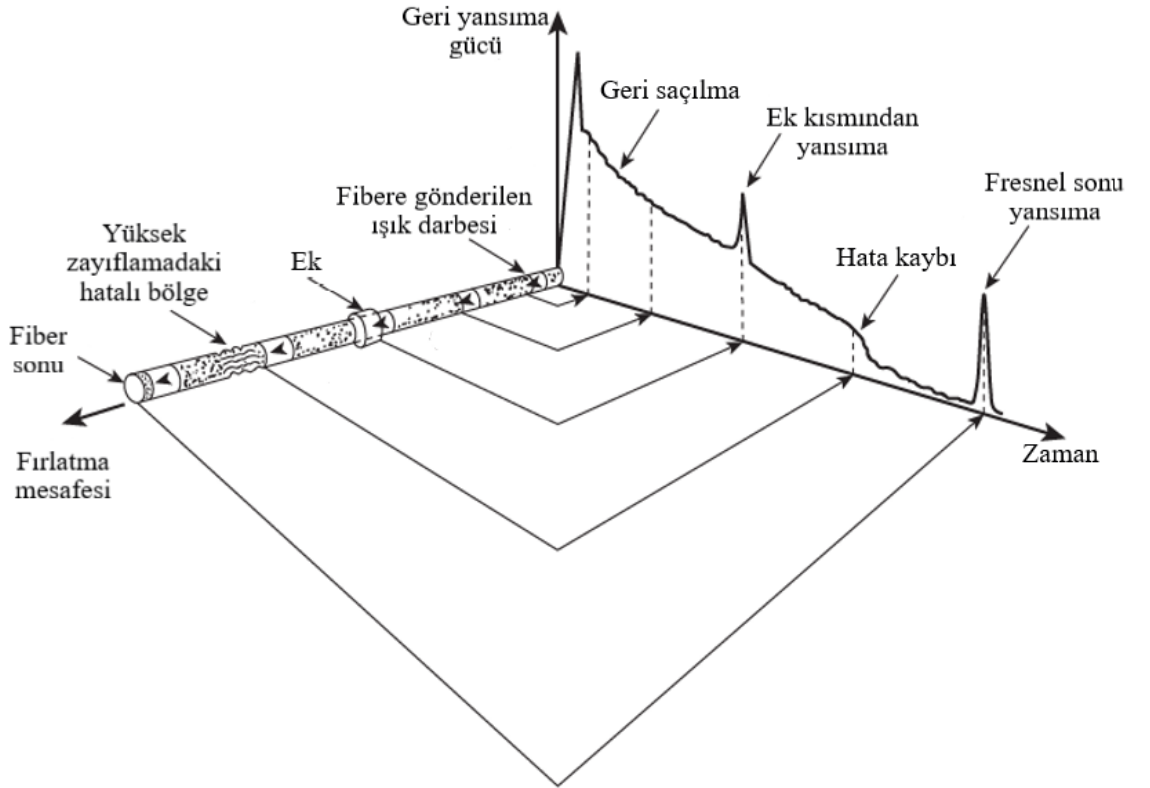
Zamanın bir fonksiyonu olarak geri saçılan optik güç $P_{Ra}(t)$ (2.26)'da verilmektedir.

$$P_{Ra}(t) = 0.5P_i S \alpha_R W_{0v_g} \exp(-\alpha v_g t) \quad (2.26)$$

Bu eşitlikte P_i , fibere gönderilen optik güç, S , algılayıcı fiberin nümerik açıklığından yakalanan ve saçılan ışığın miktarını tanımlayan yakalama katsayısıdır, α_R , Rayleigh saçılma katsayısıdır (birim uzunluk başına geri saçılım kaybı), W_o , giriş optik darbe genişliğidir, v_g , fiberdeki grup hızıdır ve α , fiber için birim uzunluk başına zayıflama katsayısıdır. Yakalanan optik gücün S oranı, fiber için katı kabul açısının toplam katı açısına oranıyla (2.27)'de verilmektedir.

$$S = \frac{\pi(NA)^2}{4\pi n_1^2} = \frac{(NA)^2}{4n_1^2} \quad (2.27)$$

(2.27)'de verilen eşitliğin adım indisli fiberler için geçerli olduğu ve dereceli indis fiber için S parametresinin genellikle aynı nümerik açıklığa sahip adım indisli fiberden 2/3 oranında daha düşük bir faktör olduğuna dikkat edilmelidir. Dolayısıyla eşitlik (2.26) ve (2.27) kullanılarak, o noktadaki ileri optik güce göre bağlantı uzunluğu boyunca bir noktadan geriye saçılan optik gücü belirlemek mümkündür.



Şekil 2. 29. Test edilen bir fiberden olası bir geri saçılma grafiğinin bir gösterimi

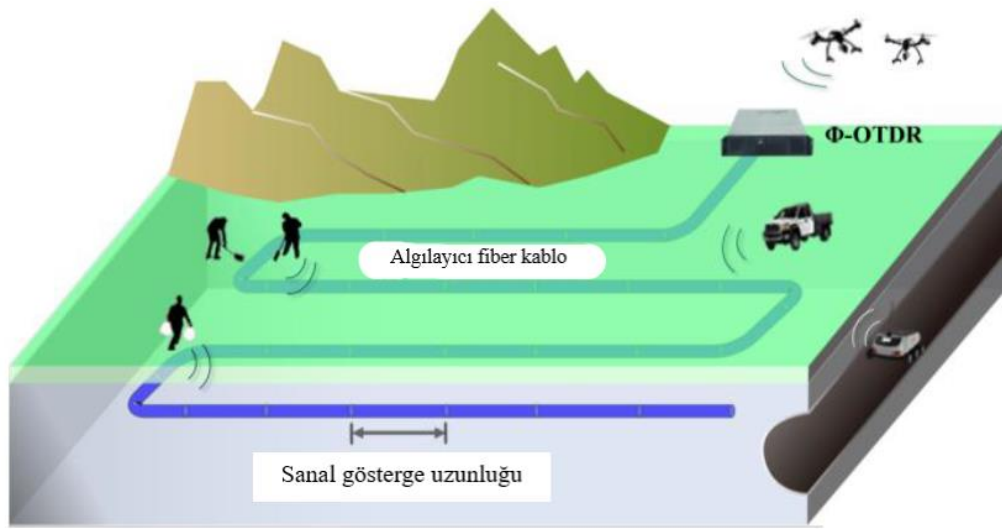
Giriş kuplöründen yansıma ve geri saçılımın neden olduğu ilk darbeyi ve ardından bağlantıda ilerlerken giriş darbesinden dağınık Rayleigh saçılmasının neden olduğu uzun bir kuyruğu gösteren geri saçılma grafiği Şekil 2.29'da gösterilmektedir. Grafikte ayrıca, bir fiber ekleminden ayrı yansımaya karşılık gelen bir darbe ve ayrıca bir fiber kusuru veya hatasındaki aşırı kayıptan kaynaklanan bir süreksizlik de gösterilmektedir. Fiber bağlantının sonu, fiberin çıkış uç yüzünde oluşan fresnel yansımasına karşılık gelen bir darbe ile gösterilir. Böyle bir çizim, gerekli uzunluk üzerinden eğrinin eğimini basitçe hesaplayarak fiber için birim uzunluk başına zayıflamayı verir. Ayrıca bağlantıların veya arızaların konum ve ekleme kayıpları, bağlantıdaki ilgili konumlarındaki güç düşüşünden elde edilebilir. Son olarak, toplam bağlantı uzunluğu, fiber giriş ve çıkış uç yüzlerinden gelen yansımalar arasındaki zaman farkından belirlenebilir.

Polarizasyon-optik zaman domeni reflektometresi (P-OTDR), algılama uygulamalarında kullanım için ilk önerilen OTDR'nin bir çeşididir. Burada, tek modlu bir fiberde Rayleigh geri saçılan ışığın polarizasyon durumu zamanın bir fonksiyonu olarak saptanır. Tek modlu fiberin çift kırılma parametreleri, gerilim, basınç ve elektrik - manyetik alanlar gibi bir dizi ölçülen büyüklüklere duyarlıdır. Sonuç olarak, geri saçılan ışığın polarizasyon durumu (SOP), fiber boyunca z mesafesi ile değişir. OTDR tekniğinin bu çeşidi, elektrik (elektro-optik Kerr etkisi yoluyla) ve manyetik alanların (manyeto-optik Faraday etkisi aracılığıyla) dağınık izlenmesi için önerilmiştir.

1993 yılında, OTDR'ye benzer bir sistemin, yani faza duyarlı OTDR'nin (ϕ -OTDR) fiberin yakınındaki izinsiz girişleri tespit edebildiği gösterildi. Düşük uyumlu bir optik kaynak kullanan normal OTDR ile karşılaştırıldığında, ϕ -OTDR tamamen uyumlu ışık sinyallerine dayanır. ϕ -OTDR'nin en basit uygulaması, fiber boyunca farklı saçılma noktalarında geri saçılan ışığın girişiminden kaynaklanan yoğunluğu ölçer. ϕ -OTDR, lazer ışığını fiber kabloya gönderir ve fazı fiber kablo tarafından elde edilen akustik sinyallerle ilgili olan Rayleigh geri saçılan ışığı toplar. Ortaya çıkan zaman domeni izi, saçılma merkezlerinin uzunluk boyunca rastgele dağılımının bir sonucu olarak tipik olarak pürüzlü bir şekil gösterir, ancak fibere herhangi bir uyaran uygulanmadığında sabit kalır ve tekrar üretilebilir. Fiberdeki sıcaklık veya gerginlik değişiklikleri, darbe uzunluğu içindeki farklı saçılma merkezleri arasındaki optik yol farklılıklarının etkin bir şekilde

değişmesine neden olarak, kaydedilen izin bir modifikasyonuna yol açar. Alternatif olarak, statik ölçümler için, uyumlu Rayleigh saçılmasının faz değişiklikleri, ϕ -OTDR'de kullanılan sorgulayan darbenin optik frekansı ayarlanarak ve farklı ölçümler arasında konum çözümlü spektrumların frekans kayması ölçülerek alınabilir.

ϕ -OTDR'ye dayalı tipik bir DAS uygulama senaryosu Şekil 2.30'da gösterilmiştir. Sistem, otomobiller, davetsiz misafirler, İHA'lar gibi çeşitli kaynaklardan akustik sinyaller alabilir.



Şekil 2. 30. DAS'ın tipik uygulama senaryosu (Wang ve diğerleri 2018)

DAS'ta hassasiyet, algılama bant genişliği ve uzamsal çözünürlük en önemli parametrelerdir. Hassasiyet, algılama biriminin ayırt edebileceği en küçük akustik sinyaldir ve büyük ölçüde algılama biriminin sinyal-gürültü oranına (SNR) bağlıdır. Algılama bant genişliği, algılama ünitesinin ölçebileceği maksimum akustik sinyal frekansıdır ve giriş darbesinin tekrarlama oranı ile sınırlıdır. Uzamsal çözünürlük, çözülebilen iki saçıcı arasındaki en küçük mesafedir ve diferansiyel fazı elde etmek için hem darbe genişliği hem de sanal gösterge uzunluğu ile sınırlandırılır.

Faz-OTDR tekniğinde, geleneksel OTDR'den birincil fark, tutarlılık etkilerine ve çok noktalı girişime yol açan dar bant genişliği ve yüksek düzeyde uyumlu ışık kaynağının kullanılmasıdır. Cihazın fiber uzunluğundaki, fiber çekirdeğin kırılma indisindeki ve

çekirdek çapındaki değişikliklerden kaynaklanan fiber boyunca faz değişikliklerine duyarlı olmasını sağlar. Bu sayede OTDR sistemleri, dağılık saldırı izleme ve titreşim algılama yeteneğine sahip olur (Yüksel 2018).

ϕ -OTDR, ölçüm gürültüsünü en aza indirmek için düşük tutarlılığın istendiği optik fiber iletişim kablolarında bakım ve sorun giderme aracı olarak kullanılan geleneksel OTDR sistemlerinin aksine, yüksek düzeyde tutarlı olması gereken darbeleri bir lazer kaynağına dayanmaktadır. Tüm titreşim algılama teknikleri arasında, uzun mesafeli bir optik fiber boyunca mevcut bir titreşim veya akustik etkiyi hem karakterize edebilen hem de sınırlandırabilen uzamsal olarak çözümlenmiş ölçümlerin gerçekleştirilmesindeki kabiliyeti nedeniyle ϕ -OTDR'ye artan bir ilgi gösterilmiştir.

ϕ -OTDR tabanlı DAS sistemleri, popülerliklerini uzaktan algılama yeteneklerine borçludur, yani algılama fiberi, sorgulayıcı ünite güvenli bir mesafede tutulurken uzun ve erişilemeyen alanlara yerleştirilebilir. Bu teknik için önerilen en yaygın uygulama izinsiz giriş izlemedir.

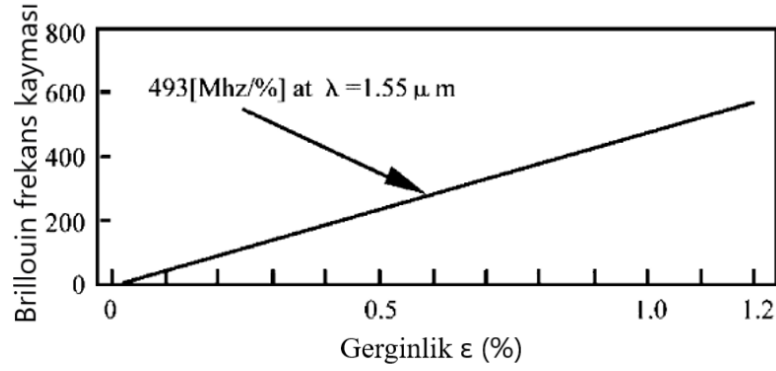
ϕ -OTDR'nin etkinliği, davetsiz misafirleri tespit etmek ve bulmak için çeşitli gelişmiş sistemler tarafından kanıtlanmıştır. Diğer uygulamalar arasında petrol kuyusu izleme tren ve demiryolu izleme bulunmaktadır.

2.5.2. Brillouin saçılması esaslı optik zaman domeni reflektometresi (BOTDR)

OTDR benzer tarzda, Brillouin optik zaman domeni reflektometresi (BOTDR), fiber içerisinde ısıl etkilerden kaynaklı akustik dalgalar ile fiber içerisine gönderilen ışığın etkileşmesi sonucu saçılma esasına dayanmaktadır. Brillouin saçılması, Rayleigh saçılması gibi yoğunluk dalgalanmalarının sebep olduğu bir saçılma değildir. Geriye saçılan Rayleigh ışınlarının sinyalleri gibi, Brillouin saçılma sinyalleri de ışık dalga boyuna bağlı olarak aynı zayıflamayı göstermektedir. Spontane Brillouin geri-saçılan ışığı sıcaklığa karşı hassastır.

Brillouin saçılma esaslı ölçüm tekniği Brillouin zaman domeni reflektometresi (BOTDR) sayesinde gerginlik ve sıcaklık hassasiyeti olan bu dağınık algılayıcının Brillouin frekans kaymasının bu iki parametreden hangisinin sonucu olduğunu ölçmek için geliştirilmiştir. Bu teknikte, fiber bölümlere ayrılarak, bu bölümlerden saçılan ışık fotodedektörde algılanmaktadır. Saçılan ışık fotodedektöre varış süresine göre farklılık gösterir. Böylece, frekans kaymasının sıcaklık veya gerginlik gibi iki fiziksel büyüklükten hangisinden kaynaklandığını anlamak mümkündür (Günday, 2007).

Gerginlik optik fiberin uzunlamasına yönünde meydana geldiğinde, Brillouin'in geri saçılan ışığı gerginlikle orantılı bir frekans kaymasına uğrar. Brillouin frekans kayması, ε gerginliğin fonksiyonudur ve (2.28)'de ifade edilmektedir.



Şekil 2. 31. Brillouin frekans kayması değişiminin gerginlik bağımlılığı

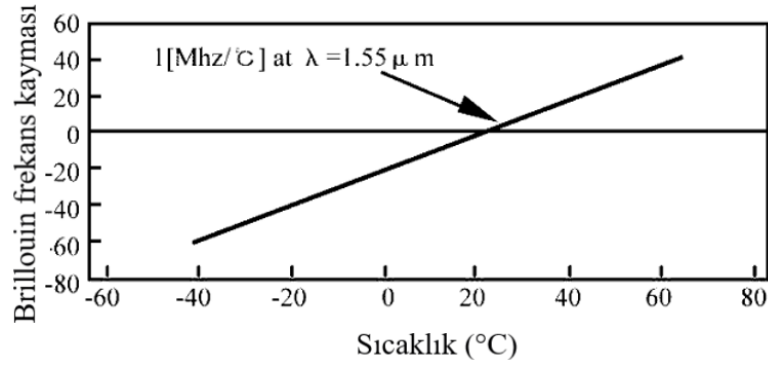
$$v_B(\varepsilon) = v_B(0) + \frac{dv_B(\varepsilon)}{d\varepsilon} \cdot \varepsilon \quad (2.28)$$

$v_B(\varepsilon)$, gerginlik ile Brillouin frekans kaymasıdır; $v_B(0)$, zorlamasız Brillouin frekans kaymasıdır; $dv_B(\varepsilon) / d\varepsilon$, $\lambda=1,55$ um dalga boyunda yaklaşık 0.5GHz (% gerginlik) olan orantılı gerginlik katsayısıdır ve ε gerginliktir.

Bir optik fiberin bir ucuna darbeli ışık gönderilir ve Brillouin geri saçılan ışık aynı uçta meydana gelir ve algılanır. Optik fiberin fırlatılan ucundan Z mesafesi, eşitlik (2.29) ile verilmektedir.

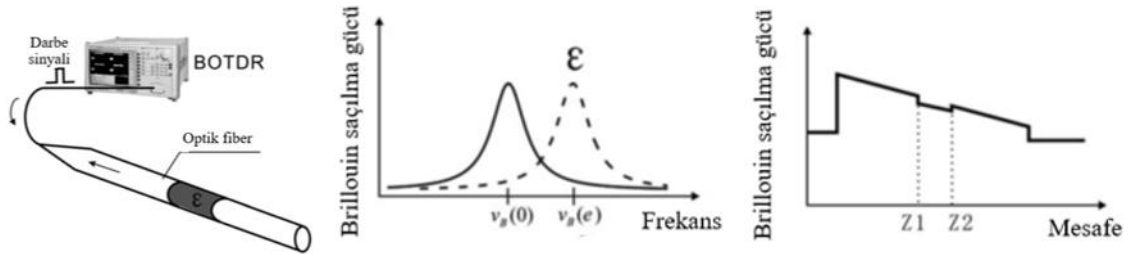
$$Z = \frac{c \cdot t}{2n} \quad (2.29)$$

Bu eşitlikte c boşluktaki ışığın hızıdır; n , bir optik fiberin kırılma indisidir; ve t , darbe ışığının başlatılması ile saçılan ışığın alınması arasındaki zaman aralığıdır.



Şekil 2. 32. Brillouin frekans kayması değişiminin sıcaklık bağımlılığı

Şekil 2.32’de Brillouin frekans kayması ve sıcaklık arasındaki ilişki gösterilmektedir. Şekil 2.33, BOTDR ölçüm prensibinin üç boyutlu diyagramını göstermektedir. Bu şekilden, BOTDR'nin hem gerginliği ölçebildiği hem de optik fiber boyunca gerginliğin meydana geldiği mesafeyi belirleyebildiği görülmektedir.



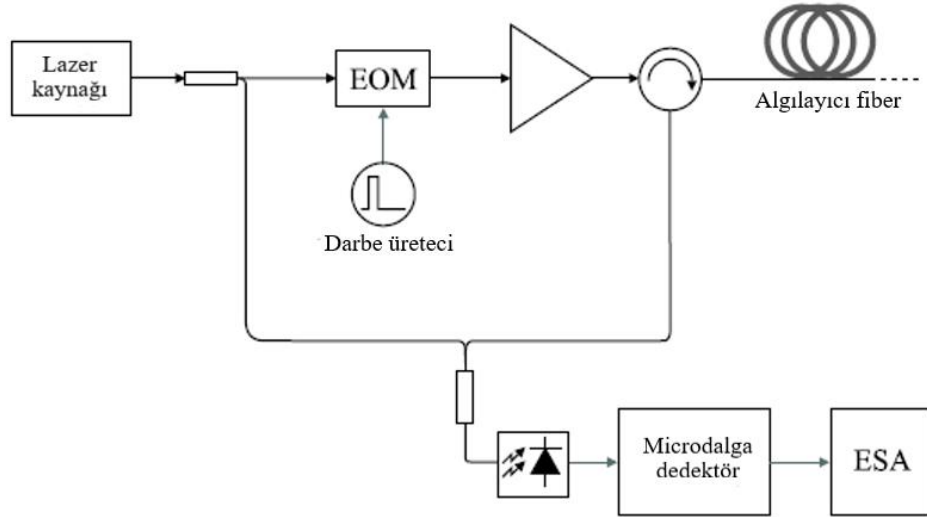
Şekil 2. 33. BOTDR ölçüm prensibi

BOTDR kullanarak sıcaklık ölçümünün avantajları, geri saçılma seviyesinin Raman etkisinden daha büyük olması ve algılamanın bir frekans kaymasının ölçülmesini

gerektirmesidir. 100 km kadar uzunluklarda dağınık ölçümlere izin verir ve algılama sürecinde çeşitli karmaşık optoelektronik tekniklerin kullanılmasına izin verir. Dezavantajları ise akustik dalganın kalıcılığının (kuantum tanımındaki fonon ömrü) prensipte uzamsal çözünürlüğü en iyi ihtimalle 1 m ile sınırlandırmasıdır, bu da birçok uygulama için çok büyüktür.

Frekans kaymasının aynı anda hem sıcaklığa hem de boyuna gerginliğine bağlı olması, aralarında ayırım yapmayı zorlaştırır. Fiberin ön ucundaki Brillouin geri saçılan ışığın yoğunluğu (2.30)'da verilmektedir.

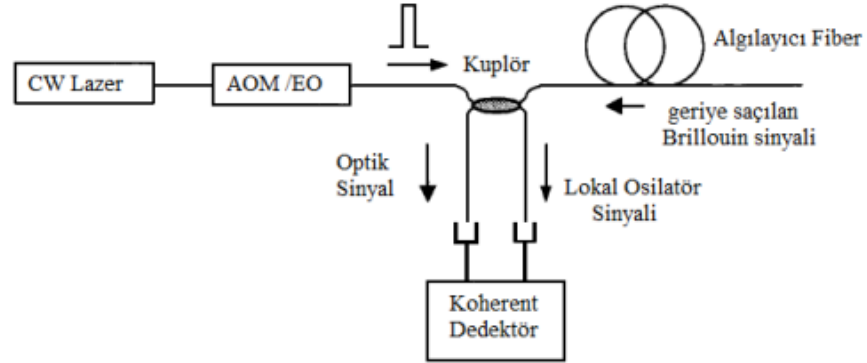
$$I_B(x) = 0.5v_g I_0 t_p S \alpha_B \exp(-2\alpha x) \quad (2.30)$$



Şekil 2. 34. Bir BOTDR kurulumunun genel görünümü (Masoudi ve Newson 2016)

Brillouin saçılmasının Rayleigh ve Raman saçılmasına göre en belirgin farkı eş zamanlı sıcaklık ve gerginlik ölçümü olduğu için çalışmalar Brillouin saçılması esaslı dağınık algılama üzerinde artış göstermiştir. Oluşturulan algılama modelinde, fiberin içine gönderilen ışığın bir kısmı uyumlu fotodedektördeki bir osilatör aracılığıyla sağlanmaktadır. Geriye saçılan Brillouin işareti osilatör çıkışındaki optik sinyal ile girişim sağlar ve iki sinyalin birleşmiş hali elektriksel bir spektrum analizör aracılığıyla gözlemlenmektedir.

BOTDR modeli Şekil 2.35'te gösterilmektedir.



Şekil 2. 35. BOTDR uyumlu algılama sistemi

BOTDR'nin algılama ilkesi kısaca, DFB-LD (dağıtılmış geri besleme lazer diyot) lazer ışık kaynağından yayılan sürekli bir ışık, ölçülecek optik fibere giden bir prob ışığı çıkışına ve heterodin algılaması için bir referans ışığına ayrılabilir. Prob ışığı, bir yoğunluk modülatörü tarafından bir darbe ışığına modüle edilebilir. Brillouin geri saçılan ışık, optik fibere gönderilen darbe ışığı akustik fononlarla etkileşime girdiğinde gerçekleşir ve başlatılan darbe ışığının frekansına kıyasla Brillouin geri saçılan ışığın bir frekans kayması meydana gelir. Frekans kayma miktarı, optik fiberin uzunluğuna gerginliğine ve sıcaklığına bağlıdır.

BOTDR'nin Avantajları

Dağınık: BOTDR, bir optik fiberin yalnızca bir ucundan optik fiber boyunca dağılan herhangi bir noktada yapının gerginliğini sürekli ve eşzamanlı olarak ölçebilir. Optik fiberlerden oluşan bir ağ ile BOTDR, yapı için tam ölçekli izleme gerçekleştirebilir ki, geleneksel nokta izleme tekniklerinin bunu yapması çok zor veya imkânsızdır.

Uzun mesafe: Tüneller, hendekler, petrol boruları, metrolar ve büyük köprüler gibi büyük altyapılar genellikle onlarca veya yüzlerce kilometreyi kapsıyor. Bu, geleneksel noktasal algılama tekniklerinin yapının çeşitli bölümlerinde dağılan deformasyonu izlemesi ve ölçmesi için çok uzundur.

Ancak BOTDR, 80 kilometreyi aşan uzun izleme mesafesi sayesinde bunu yapabilir. Öte yandan, BOTDR'deki fiber optik, hem algılayıcı hem de sinyal iletim ortamı olarak hizmet eder, bu nedenle BOTDR, yapıyı uzaktan izleme merkezinden izleyebilir ve bunu yapmak için sahada birine ihtiyaç duymaz.

Gerçek zamanlı: BOTDR, optik fiber boyunca gerginlik anormalliklerini gerçek zamanlı olarak izleme ve gerginliğin nerede, ne kadar ve ne zaman meydana geldiğini gösterme yeteneğine sahiptir. Böylece BOTDR, altyapı sisteminin gerginlik dağılımını dinamik olarak izlemek için kullanılabilir.

Dirençlilik: Optik fiber ametal kuvars camdan yapılmıştır, bu nedenle paslanmaya ve çevresel erozyona karşı dayanıklıdır. Nemli veya kurak, yüksek veya düşük sıcaklık gibi en zorlu koşullarda kullanılabilir. Ek olarak, kendisini elektrik ve elektromanyetik parazitlerden koruyabilir ve iletim sürecinde sinyal hatasını önleyebilir.

Uyumluluk: Optik fiber ince, esnek ve hafiftir, bu nedenle yapının sağlamlığını bozmadan yapının içine veya üzerine kurulumu kolaydır.

Doğruluk: BOTDR, optik fiber boyunca 30 mm kadar küçük bir gerginliği algılayabilir ve uzamsal çözünürlüğü 1 m'den daha azına ulaşabilir. Bu avantaj ile tünel mühendisliğinin gerginlik ölçümü ve yapı sağlık izlemesi yapılabilir.

2.5.3. Raman saçılması esaslı optik zaman domeni reflektometresi (ROTDR)

1970'lerden bu yana, düşük kayıplı optik fiberlerin doğuşu ve lazerlerin geniş uygulaması ile optik fiberler üzerine araştırmalar büyük ölçüde genişlemiştir. Farklı avantajları nedeniyle, optik fiber dağınık sıcaklık algılama kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve uygulanmıştır. Birincisi, fiberin düşük kayıplı iletimi, uzun bir mesafe boyunca sıcaklık ölçümlerine izin verir. İkinci olarak, optik fiberin ana malzemesi, mükemmel anti-elektromanyetik girişime sahip ve yüksek sıcaklıklara, aşındırıcı ortamlara karşı dirençli silikadır. Ayrıca, fiberin şekli ve esnekliği, alanın kısıtlı olduğu veya taşınabilirliğin gerekli olduğu uygulamalarda faydalı olmasını sağlar. Sonuç olarak, dağınık fiber optik sıcaklık algılama, güç şebekelerinde, petrol boru hatlarında, nükleer enerji tesislerinde ve

diğer uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Dağınik fiber optik sıcaklık algılama, optik fibere enjekte edilen pompa ışığının saçılan ışığını ölçerek fiber optik ile birlikte sıcaklık değişimini elde eder.

Raman dağınik sıcaklık algılama (RDTS), bu özelliğinin bir sonucu olarak çekici bir çözüm haline gelir. Raman optik zaman domeni reflektometresi (ROTDR), demiryolları tünellerinde, otoyollarda ve yeraltı elektrik hatlarında yangın algılama ve sıcaklık alarmı gibi sayısız alanda başarılı bir şekilde uygulanarak, onlarca yıldır yoğun bir şekilde araştırılmaktadır.

ROTDR'de, ışık darbelerinin fibere bağlandığı ve Spontane Raman saçılması ışıklarının tespit edildiğı optik zaman domeni reflektometri tekniğı ile dağınik sıcaklık algılaması elde edilir.

Raman saçılan ışığın anti-Stokes bileşeninin yoğunluğunu ölçerek, dış sıcaklığın fiber üzerindeki etkisi elde edilebilir. Algılama mesafesi, ortalama süre, sıcaklık doğruluğı ve uzamsal çözünürlük, RDTS sisteminin performansını değerlendirmek için kullanılan göstergelerdir. Bu göstergeler birbiriyle ilişkilidir ve sistemin genel performansı sinyal-gürültü oranı (SNR) tarafından belirlenir. Artık RDTS'nin SNR'sini geliştirmek için üç kategoriye ayrılabilen birkaç strateji var. Darbe kodu modülasyonu, gürültü giderme algoritmaları ve özel fiberlerin kullanımı. Darbe kod modülasyonu, sistemin donanım maliyetini artıracığından, son yıllarda gürültü giderme algoritmaları ve özel fiberler üzerine yapılan araştırmalar ilgi görmektedir (Wu ve diğeri, 2022).

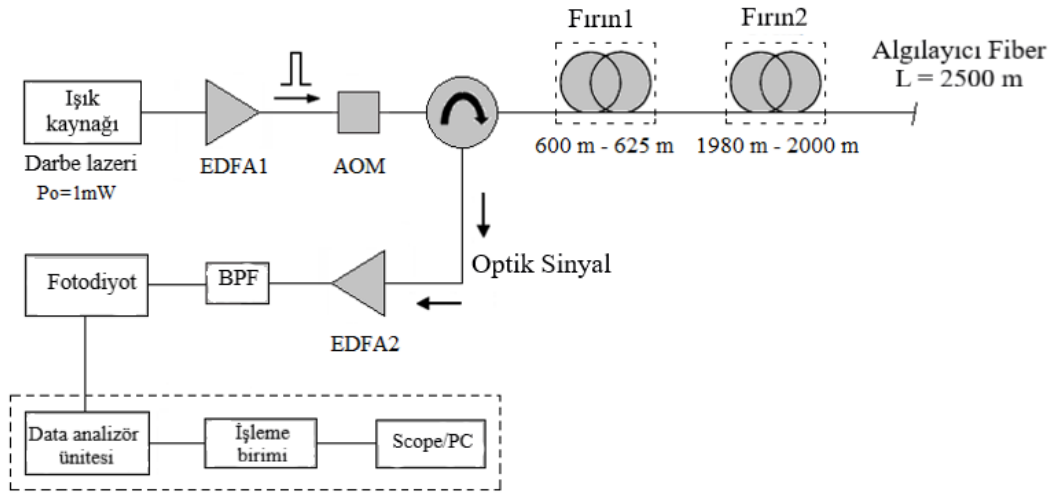
Fiber sıcaklığı, Raman anti-Stokes ışığının Stokes ışık yoğunluklarına oranı aracılığıyla tahmin edilir. Bu nedenle, ölçülen sıcaklık doğruluğı büyük ölçüde SRS ışıklarının sinyal-gürültü oranına (SNR) bağlıdır. Ancak, SRS ışıklarının yoğunluğı, pompa darbesinin tepe gücünden yaklaşık 60~70 dB daha zayıftır. Ayrıca, iletim kaybı nedeniyle algılama fiberi boyunca SNR azalır. Yüksek performanslı ROTDR uygulamak için, sistem yanıt hızını yavaşlatan, kabul edilebilir bir SNR elde etmek için her zaman milyonlarca ortalama kullanılır.

Sistem için bir problem olan bu gürültüyü ortadan kaldırmak için dalgacık dönüşümü kullanılmıştır. Ancak, ROTDR için kullanımı yalnızca tek boyutlu veri dizileriyle sınırlandırılmıştır. Son zamanlarda, ROTDR sistemi için iki boyutlu görüntü işleme de geliştirildi ve daha verimli olduğu ortaya çıktı. Bu gürültü giderme teknikleri gürültüyü azaltabilse de, faydalı bilgiler de kaldırılabilir. SNR iyileştirmesi yüksek olduğunda ölçüm doğruluğu ve uzamsal çözünürlük düşer. Veri örnekleme noktası sayısı küçük olduğunda bozulma yoğunlaşır (Wu ve diğerleri, 2018).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. DAS Sistem Modeli (Faz-BOTDR esaslı)

Faz-BOTDR tabanlı DAS sistemimiz için deneysel kurulum Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Dar bant genişliğine sahip darbe lazerinden gelen yükseltilmiş ışık, 10 ns genişliğinde sorgulama darbeleri üreten ve bir sirkülatör aracılığıyla fibere enjekte edilen bir akustik-optik modülatörden (AOM) geçirilir. Fiberden geri saçılan sinyal, sinyalin bir erbiyum katkılı fiber yükselticiden (EDFA) ve optik bant geçiş filtrelerinden (BPF) ve ardından bir fotodetektörden (PD) aktığı algılama rejimine yönlendirilir. Geri saçılan sinyal yani tespit edilen sinyal, bir veri toplama (DAQ) sistemi tarafından elde edilir ve daha sonra özelliklerini analiz etmek için bir PC'de sonradan işlenir.



Şekil 3. 1. DAS sistemi için deneysel kurulum

Bu araştırmada kullanılan konfigürasyonda, darbeli bir lazer kaynağı, 1550 nm'de çalışan 1 mW çıkış gücü ile optik sinyal üretir. Algılayıcı fiberden geçen optik darbeler, erbium katkılı fiber amplifikatörler EDFA1 ve EDFA2 kullanılarak güçlendirilir. Algılayıcı fiber boyunca faz bilgisi elde etmek için termal etkiler, farklı fiber bölgelerinde konumlandırılmış fırın1 ve fırın2 kullanılarak modellenmiştir. Amplifikatörün sonunda meydana gelen ASE gürültüsünü (Kuvvetlendirilmiş spontane emisyon) bastırmak için EDFA1'in yanına akustik-optik modülatör AOM eklenir.

Sirkülatör, hem optik sinyalin fırınlara yönlendirilmesi hem de geri saçılan sinyalin veri analiz ünitesine yönlendirilmesi için kullanılır. Bu modelde kullanılan veri analizör birimi, veri toplama sistemi, işlem birimi ve kapsam-PC olmak üzere üç alt sistemden oluşmaktadır. Bant geçiren filtre (BPF), belirli bir aralıktaki frekansları geçerken tüm frekansların filtrelenmesini sağlar. Daha sonra optik sinyal fotodiyot tarafından algılanır ve elektriksel forma dönüştürülerek data analizör ünitesine yönlendirilir. Veri analizör birimi genellikle elektrik sinyalini işlemek ve buna bağlı olarak sistemdeki faz değişiminin sıcaklığa bağımlılığı hakkında bilgi almak için kullanılır.

3.2. Bileşen Karakterizasyonları

3.2.1. Işık kaynakları

Yarı iletken optik kaynaklar, son yıllarda imalat teknolojilerinin etkileyici ilerlemesi nedeniyle uygulama alanlarını sürekli olarak genişletmektedir. Bu, sürekli artan optik güçlere ve dalga boyları aralığına sahip, nispeten düşük bir maliyetle yüksek kaliteli cihazların geliştirilmesine ve seri ölçekte üretilmesine yol açmıştır. Yarı iletken kaynaklar, fiber optik algılayıcılar durumunda standart çözüm olup, kullanıcının çok sayıda farklı ürün arasından seçim yapmasına olanak tanır. Optik fiberli haberleşme sistemlerinde ışık kaynağı olarak kullanılan ışık yayan diyotlar (LED'ler) ve enjeksiyon lazerli diyotların (ILD'ler) temel özellikleri aşağıda açıklanmıştır.

Bir optik bağlantıda bir ışık kaynağının faydalı olması için aşağıdaki özelliklere ihtiyacı vardır;

- Cihazın çeşitli sıcaklıklarda sürekli olarak uzun yıllar çalıştırılması mümkün olmalıdır.
- Işık çıkışını geniş bir modülasyon frekansı aralığında modüle etmek mümkün olmalıdır.
- Bir optik fibere büyük miktarda güç bağlamak için, yayan alan küçük olmalıdır.
- Bir fiber optik bağlantıda malzeme dağılımını azaltmak için çıkış spektrumu dar olmalıdır.
- Çalışması için güç gereksinimi düşük olmalıdır.
- Işık kaynağı, modern katı hal cihazlarıyla uyumlu olmalıdır.
- Optik çıkış gücü, cihaza gelen giriş akımı değiştirilerek doğrudan modüle edilmelidir.

- Harmonikleri ve intermodülasyon bozulmasını önlemek için daha iyi doğrusallık.
- Yüksek bağlantı verimliliği.
- Yüksek optik çıkış gücü.
- Yüksek güvenilirlik.
- Düşük ağırlık ve düşük maliyet.

Işık yayan diyotlar (LED)

Işık yayan diyot (LED) bir P-N eklem diyotu olarak bilinmektedir. Doğrudan bant aralıklı bir yarı iletken ile üretilmiştir ve kendiliğinden emisyonun maksimum harici etkileşimine izin verecek şekilde tasarlanmıştır. Genellikle yarıiletken bir malzemeden yapılır. Diyot ileri ön gerilimli olduğunda, p-n eklemi üzerinde azınlık taşıyıcıları meydana gelir. Azınlık taşıyıcıları eklemde, çoğunluk taşıyıcıları ile yeniden birleşip, enerjiyi ışık şeklinde verirler.

Fotonlar cihaz boyunca hareket eder, bazıları yeniden emilir, bazıları yarı iletken-hava arayüzünde geri yansıtılır ve bir kısmı harici olarak toplanmak üzere cihazı uygun yönde terk eder. Üretilen ve çıkarılan fotonların sayısı, enjekte edilen akımla orantılıdır. En basit LED yapıları, sade eklemli ve tek dağılmış aygıtlardır. Bu LED'lerin en belirgin sorunu, ışık yayınımlarının yönlü olmamasıdır. Bu problemde LED'leri optik fiberli algılama sistemleri için tercih edilmez kılmaktadır.

LED'in Avantajları ve Dezavantajları

LED'in Avantajları

- Basit tasarım
- Üretim kolaylığı
- Basit sistem entegrasyonu
- Düşük maliyet
- Yüksek güvenilirlik

LED'in dezavantajları

- Yarı iletken/hava arayüzünde ışığın kırılması
- Işınımsal rekombinasyonun ortalama ömrü sadece birkaç nanosaniyedir, bu nedenle modülasyon bant genişliği sadece birkaç yüz megahertz ile sınırlıdır
- Düşük bağlantı verimliliği
- Büyük kromatik dağılım

Enjeksiyon lazer diyot (ILD)

Lazer diyodu (LD), enjeksiyon lazer diyodu (ILD) veya diyot lazer, doğrudan elektrik akımıyla pompalanan bir diyotun, bağlantı noktasında kalıcı koşullar yaratabildiği, ışık yayan diyota benzer bir yarı iletken cihazdır. Lazer diyotları elektrik enerjisini doğrudan ışığa çevirebilir. Voltaj tarafından yönlendirilen katkılı p-n-geçışı, bir elektronun bir delikle yeniden birleşmesine izin verir. Elektronun daha yüksek bir enerji seviyesinden daha düşük bir enerji seviyesine düşmesi nedeniyle, yayılan bir foton şeklinde radyasyon üretilir. Bu kendiliğinden emisyonudur. Süreç devam ettiğinde uyarılmış emisyon üretilebilir ve aynı faz, tutarlılık ve dalga boyuna sahip ışığı daha da üretir.

Yarı iletken malzemenin seçimi, günümüzün lazer diyotlarında kızılötesinden UV spektrumuna kadar değişen yayılan ışının dalga boyunu belirler. Lazer diyotlar, fiber optik iletişim, barkod okuyucular, lazer işaretçiler, CD/DVD/disk okuma/kayıt, lazer baskı, lazer tarama ve ışık huzmesi aydınlatması gibi geniş bir kullanım yelpazesıyla üretilen en yaygın lazer türüdür. Beyaz LED'lerde bulunan benzer bir fosforun kullanılmasıyla, genel aydınlatma için lazer diyotlar da kullanılabilir.

ILD'lerin ışığını optik fibere bağlamak daha kolaydır. Kayıpları azaltır ve daha küçük çapta fiberlerde kullanılmasını sağlar. Uzun bir fiber hattı boyunca ILD'ler hem güç açısından hem aktarılan bilgi kapasitesi açısından verimlidir. ILD'nin emisyon çıkış gücü, LED'in emisyon çıkış gücünden daha büyüktür.

ILD'ler monokrom ışık ürettikleri için kromatik ayrılmayı ya da dalga boyu ayrılmasını azaltır. Ancak tüm bu olumlu yönlerine rağmen ILD'ler LED'lere göre ömrü daha kısa ve daha pahalıdır.

Lazer

Lazer, sorgulama sistemindeki ışık darbelerinin kaynağıdır. ITU standartlarına göre fiber optik iletişim için en yaygın kullanılan dalga boyu olan 1550,12 nm dalga boyunda çalışır ve sorgulama darbelerinin algılama fiberinin çift uzunluğu boyunca tutarlı olması için yeterince dar bir hat genişliğine sahiptir. Bir lazerin önemli parametreleri, özellikle DAS sistemlerinde kilit rol oynayan, bant genişliği, frekans kararlılığı ve frekans kaymasıdır. Lazer bant genişliğinin optik fiberli dağınık algılama sistemi üzerindeki etkisi incelenmiş ve daha dar bant genişliği olan lazerin aynı uzamsal mesafede daha iyi girişimle sonuçlandığı gösterilmiştir. Bu nedenle, sistemin daha yüksek tekrarlanabilir ve kararlı saçılma spektrumu için ultra dar bant genişliğinde bir lazere sahip olması gerekir.

Lazer diyotun avantajları;

- Basit ekonomik tasarım
- Yüksek optik güç
- Işık üretimi hassas bir şekilde kontrol edilebilir
- Yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir
- Daha iyi modülasyon yeteneği
- Yüksek bağlantı verimliliği
- Düşük spektral genişlik (3,5 nm)

Lazer diyotun dezavantajları;

- Fiberin sonunda, iki uyumlu ışık huzmesinin ilgili fazlarına bağlı olarak elektrik alanlarını toplaması veya çıkarmasıyla bir benek deseni belirir.
- Lazer diyot, aşırı yük akımlarına karşı son derece hassastır ve yüksek iletim hızlarında, lazerin sürekli çalışması gerektiğinde, büyük sürücü akımının kullanılması olumsuz termal özellikler üretir. Bunun sonucunda soğutma ve güç istikrarının kullanılmasını gerektirir.

Çizelge 3. 1. LED ve LD karşılaştırılması

Parametre	LED	LD (Lazer diyot)
Çalışma prensibi	Spontan emisyon	Uyarılmış emisyon
Çıkış ışını	Tutarlı olmayan	Koherent (tutarlı)
Spektral genişlik	Kart spektrumu (20 nm – 100 nm)	Çok daha dar (1-5 nm)
Veri hızı	Düşük	Çok yüksek
İletim mesafesi	Daha az	Daha fazla
Sıcaklık hassasiyeti	Daha az duyarlı	Daha fazla duyarlı
Bağlantı verimliliği	Çok düşük	Yüksek
Bağlantı fiberleri	Çok modlu adım indisi Çok modlu GRIN	Tek modlu SI Çok modlu GRIN
Devre karmaşıklığı	Basit	Karmaşık
Maliyet	Düşük	Yüksek
Çıkış gücü	Sürücü akımıyla doğrusal orantılı	Eşiğin üzerindeki akımla orantılı
Uygulamalar	Orta mesafe düşük veri hızı	Uzun mesafe yüksek veri hızları

3.2.2. Erbiyum katkılı fiber optik yükselteç (EDFA)

Bir optik fiber yükseltecindeki aktif ortam, erbiyum (Er), İterbiyum (Yb), Tulyum (Tm) veya Praseodimyum (Pr) gibi bir nadir toprak elementi ile hafifçe katkılanmış, nominal olarak 10 m ile 30 m uzunluğunda optik fiberden oluşur. Fiber malzeme standart silika, florür bazlı cam veya tellürit cam olabilir.

Bu cihazların çalışma bölgeleri, ana malzemeye ve katkı elemanlarına bağlıdır. Uzun mesafeli telekomünikasyon uygulamaları için popüler bir malzeme, erbiyum katkılı fiber amplifikatör veya EDFA olarak bilinen erbiyum katkılı silika fiberdir. Bazı durumlarda pompalama verimini ve amplifikatör kazancını artırmak için Yb eklenir. Standart bir EDFA'nın çalışması normalde 1530 ila 1565 nm bölgesi ile sınırlıdır. Aslında bir EDFA'nın bu spektral bantta çalışması gerçeği, C-bandı (geleneksel bant) teriminin kökenidir. Bununla birlikte, işlemi S-bandı ve L-bandına genişletmek için çeşitli teknikler önerilmiş ve kullanılmıştır.

Erbiyum katkılı fiber yükselteçler, diğer fiber yükselteçler arasında en iyi özelliklere sahip olanlardır. İlk olarak, zayıf sinyal işletiminde (pompalama için birkaç 10 mW kullanarak) 40 dB'nin üzerinde kazançlar ve doyma rejiminde birkaç watt'lık çıkış güçleri

elde ederler. Ayrıca, amplifikasyon spektrumları tipik olarak, silika fiberlerin bu dalga boylarında sergilediği düşük kayıp nedeniyle optik iletişim için özel bir ilgiye sahip olan 1,53 ila 1,55 μm dalga boyu aralığında bulunur.

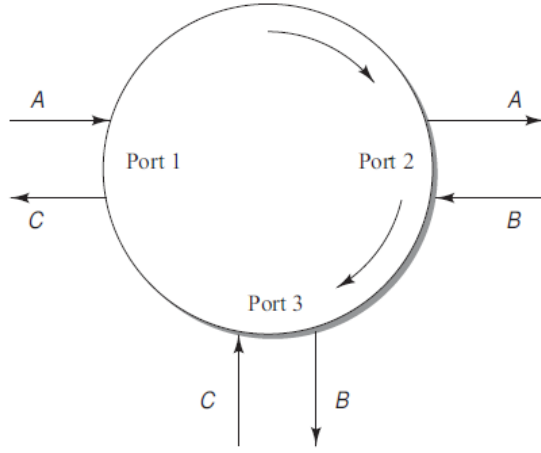
ϕ -OTDR tabanlı DAS sistemimizde kullanılan iki tür optik amplifikatör vardır. Yüksek güçlü güçlendirici amplifikatör ve yüksek kazançlı ön amplifikatördür. Güçlendirici amplifikatör, enjekte edilen darbelerin tepe gücünü maksimize etmek için kullanılır ve ön amplifikatör, düşük seviyede geri saçılan yoğunluğu yükseltmek için kullanılır.

3.2.3 Akusto optik modülatör (AOM)

Akusto optik modülatörler, ışık deflektörleri, tarayıcılar, modülatörler, dijital optik anahtarlar, frekans kaydırıcılar, Q-anahtarları, fiber zayıflatıcılar ve diğer çeşitli uygulamalar gibi çok çeşitli uygulamalarda kullanılır. Modülatörler, filtreler, frekans kaydırıcılar, deflektörleri, Q-anahtarları vb. gibi farklı türde AO cihazları vardır. AO cihazlarının çalışma prensibi foto-elastik etkiye, diğer bir deyişle kristal bir malzemede ışığın ses ile etkileşimine dayanmaktadır. Amplifikatörün sonunda meydana gelen ASE gürültüsünü bastırmak için amplifikatörün devamında kullanılır.

3.2.4. Optik sirkülatörler

Optik sirkülatör, ışığı sırayla porttan porta sadece bir yönde yönlendiren karşılıklı olmayan çok portlu pasif bir cihazdır. Bu cihaz optik yükselticilerde, ekleme ve bırakma çoklayıcılarında ve dağılım kompanzasyon modüllerinde kullanılır. Bir sirkülatörün çalışması, yapısının daha karmaşık olması dışında bir izolatörün çalışmasına benzer. Tipik olarak, birkaç bağımsız polarizör, yarım dalga plakası ve Faraday döndürücüden oluşur ve Şekil 3.2'de gösterildiği gibi üç veya dört bağlantı noktasına sahiptir. Nasıl çalıştığını görmek için üç portlu sirkülatörü düşünün. Burada, port 1'deki bir giriş, port 2'de, port 2'deki bir giriş, port 3'te ve port 3'teki bir giriş, port 1'de gönderilir.



Şekil 3. 2. Üç portlu sirkülatörün operasyonel konsepti

Benzer şekilde, dört portlu bir cihazda ideal olarak, sirkülatör mükemmel simetrik ise, dört giriş ve dört çıkış olabilir. Ancak, gerçek uygulamalarda genellikle dört giriş ve dört çıkışa sahip olmak gerekli değildir. Ayrıca, böyle mükemmel simetrik bir sirkülatörün üretilmesi oldukça zahmetlidir. Bu nedenle, dört portlu bir sirkülatörde üç giriş portu ve üç çıkış portu olması yaygındır, bu da port 1'i sadece giriş portu, 2 ve 3'ü giriş ve çıkış portları ve port 4'ü sadece çıkış portu yapar. Ticari olarak çeşitli sirkülatörler mevcuttur. Bu cihazlar düşük ekleme kaybına, geniş bir dalga boyu aralığında yüksek izolasyona, minimum polarizasyona bağlı, kayıp ve düşük polarizasyon modu dağılımına sahiptir.

3.2.5. Optik bant geçiş filtresi (BPF)

Optik bant geçiren filtreler genellikle, yüksek ve düşük kırılma indisli katmanların değiştiği çok katmanlı yalıtkan yapıları temsil eder. Ayna katmanlarının çeyrek dalga boyunun katları kadar bir kalınlığa sahip olması durumunda, yansımaları en büyüktür. Bu durumda, durdurma bantları geçiş bandının her iki tarafında aynı derinliğe sahipken, rezonatörlerin rezonans frekanslarını bozmazlar. Yalnızca çeyrek dalga boyu katmanlarını içeren ve iki malzemedan imal edilen çok katmanlı aynalar olan optik filtreler, yüksek optik geçiş bandı dalgalanmasından oluşan önemli bir dezavantaja sahiptir. Bu, bu tür aynaların hem rezonatörler arasında hem de filtrenin giriş ve çıkışındaki yansımasının düzgün bir şekilde ince ayarlanmasının imkânsızlığı ile ilgilidir.

3.2.6. Fotodedektör (PD)

Fotodetektör, gelen optik sinyali elektrik sinyaline dönüştüren bir optik alıcıda önemli bir bileşendir. Yarı iletken fotodetektörlere genellikle fotodiyotlar denir çünkü bunlar, hızlı algılama hızları, yüksek algılama verimliliği ve küçük boyutları nedeniyle optik iletişim sistemlerinde kullanılan ana fotodetektör türleridir. Şu anda, fotodedektörler endüstriyel elektronik, elektronik iletişim, tıp ve sağlık hizmetleri, analitik ekipman, otomotiv ve ulaşım ve daha pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar ayrıca fotosensörler ve ışık sensörleri olarak da bilinir.

Işık dedektörleri genellikle yarı iletken malzemeden yapılıdır. Bir optik dedektörün veya fotodedektörün fonksiyonu bir giriş ışık sinyalini eşdeğer bir elektriksel çıkış sinyaline çevirmektir. Dedektör çalışmasında doğrusal olmalı ve gelen ışığın dalga boyunda maksimum algılama yeterliliğine sahip olmalıdır. P-N fotodiyotu, fototransistör, PIN fotodiyotu ve çığ fotodiyotu fotodedektörlerin içerisine dâhildir. Bir PIN veya çığ fotodiyotu tarafından üretilen akım küçüktür ve düşük gürültülü bir yükseltici tarafından yükseltilmelidir, ikisinin birleşimi optik alıcı olarak isimlendirilir. Bir optik alıcı, fotoakımını yükselten bir düşük gürültülü yükselticiden ve giren ışığı fotoakımına çeviren PIN veya çığ fotodiyottan meydana gelir. Alıcının performansı (bant genişliği, dinamik aralık ve gürültü değeri) düşük gürültülü yükseltici tarafından belirlenir.

Fiber optik iletişim alıcılarında ışık enerjisini algılamada yaygın olarak kullanılan PIN ve APD (çığ) fotodiyotları olarak iki aygıt vardır. Optik sinyal genellikle fiberin ucundan çıktığında zayıflar ve bozulur, fotodedektör aşağıdaki önemli performans gereksinimlerini karşılamalıdır.

- Alınan ışık sinyalinin emisyon dalga boyu aralığına yüksek hassasiyet
- Sinyale minimum gürültü eklenmesi
- İstenen veri hızını işlemek için hızlı yanıt hızı
- Sıcaklık değişimlerine karşı duyarsızlığı
- Fiberin fiziksel boyutları ile uyumlu olması
- Diğer sistem bileşenlerine göre makul bir maliyet
- Uzun çalışma ömrü

Fotodedektörlerin en önemli özellikleri şunlardır;

- Spektral Tepki: Fotodedektörün foton frekans fonksiyonu olarak verdiği cevaptır.
- Kuantum Verimliliği: Her foton için üretilen yük taşıyıcı sayısıdır.
- Duyarlılık: Dedektör üzerine düşen ışığın toplam gücü ile ayrılan çıkış akımıdır.
- Gürültüye eşdeğer güç: Cihazın gürültüsüne eşdeğer boyutta bir sinyal üretmek için gereken ışık gücü miktarıdır.
- Duyarlılık faktörü: Dedektör alanının gürültü eşdeğer gücü ile ayrılmış karekökü.
- Kazanç: Fotodedektörün çıkış akımının, dedektörlere gelen fotonlar tarafından doğrudan üretilen akıma bölümüdür.

PIN diyotlar

Cihaz yapısı, çok hafif n katkılı bir iç (i) bölge ile ayrılan p ve n yarı iletken bölgelerinden oluşur. Normal çalışmada, içsel bölgede hiçbir serbest elektron veya delik olmaması için cihaza bir ters yönlü voltaj uygulanır. Tükenme bölgesi genişliğini arttırmanın basit bir yolu, p-n bağlantısı arasına katkısız veya hafif katkılı bir yarı iletken malzeme tabakası yerleştirmektir. Orta katman neredeyse içsel malzemeden oluştuğu için, böyle bir yapıya p-i-n fotodiyot denir. Foton fotodedektöre girdiğinde, düşük bant boşluklu sönmleme tabakası fotonu emer ve bir elektron-boşluk çifti üretilir. Bu elektron deliği çiftine foto taşıyıcı denir. Bu foto taşıyıcılar, cihaz boyunca bir ters öngerilim potansiyel farkı tarafından üretilen güçlü bir elektrik alanının etkisi altında, gelen fotonların sayısı ile orantılı fotoakım üretirler.

Çığ fotodiyotlar (APD)

Tüm dedektörlerin güvenilir şekilde çalışması için belirli bir minimum akım gerekir. Duyarlılığı büyük olan dedektörler, daha az optik güç gerektirdiğinden tercih edilir.

Çığ fotodiyotları (APD), p-i-n fotodiyotlarına göre daha duyarlıdır. APD, PIN diyotuna benzer ama istisnai bir durum olarak yüksek yoğunluklu elektrik alan bölgesinin eklenmesi olabilir. Bu bölgede birincil elektron deliği çiftleri, bu bölgede bulunan atomlarla çarpışmak için güçlü elektrik alanından yeterli kinetik enerjiyi emebilen, böylece daha fazla elektron deliği çifti oluşturan gelen fotonlar tarafından üretilir. Dahili

akım kazancının arkasındaki fiziksel olay, darbe iyonizasyonu olarak bilinir. Bu etki iyonizasyonu, normal ters saptmada çığ kırılmasına yol açar. Darbeli iyonizasyon tarafından oluşturulan yeni taşıyıcıların aynı mekanizma ile ek taşıyıcılar üretebilmeleri için çok yüksek ters ön gerilim voltajı gerektirir. İyonizasyon işlemi yoluyla gelen fotondan birden fazla elektron deliği çifti üretme işlemine çığ etkisi denir. Böylece ığ çarpması, fotodiyot akımının amplifikasyonu ile sonuçlanır. Çarpma faktörü M, APD tarafından sağlanan dahili kazancın bir ölçüsüdür. Toplam çarpılmış çıkış akımının birincil arpılmamış akıma oranı olarak tanımlanır.

Çizelge 3. 2. PIN ve çığ fotodiyot (APD) karşılaştırma

PIN fotodiyot	APD fotodiyot
PIN, yüksek yoğunluklu elektrik alan bölgesine sahip değildir.	APD, yüksek yoğunluklu elektrik alan bölgesine sahiptir.
Oluşturulan fotoğraf akımı (I_p), APD'ye kıyasla daha az $i_p = qN_0$, q = elektron yükü, N_0 = taşıyıcı numarası	Oluşturulan fotoğraf akımı (I_p), PIN'e kıyasla daha fazla, $i_p = qN_0.M$ q = elektron yükü, N_0 = taşıyıcı numarası M = arpma faktörü
Duyarlı olarak PIN sınırlıdır.	APD'nin duyarlı olarak çok daha büyük değerleri olabilir.
Daha düşük gürültü seviyeleri sergilerler.	Darbe iyonizasyonu ve fotoakım çarpması nedeniyle PIN'e kıyasla daha yüksek gürültü seviyeleri sergilerler.
PIN'in yanıt süresi APD'nin yarısı kadardır.	APD'nin yanıt süresi, PIN'in neredeyse iki katıdır.

Dolayısıyla APD'ler, PIN diyotlardan daha duyarlıdır ve daha az ek yükseltme gerektirir. APD'lerin dezavantajları, nispeten uzun geçiş süreleri ve çığ katlama (oğalma) faktöründen kaynaklanan dhili olarak üretilen ek gürültüdür.

ığ fotodiyotun daha geniş bir bant genişliği ve daha hızlı bir cevap verme yeteneğinin yanında bir PIN diyottan daha yüksek bir cevaplama yeteneğine sahiptir. Fakat diğer yandan daha pahalı, daha gürültülü ve ısıdaki değişmelere daha duyarlıdır. Ayrıca büyük bir ters kutuplaşma gerilimine ihtiyaç duyar.

4. BULGULAR

4.1. Benzetim Sonuçları

Bu araştırmada, faz değişiminin sıcaklığa bağımlılığını analiz etmek için faz-BOTDR ölçüm metodunu esas alan bir model üzerinden Matlab 2020b kullanılarak benzetimler gerçekleştirilmiştir. Modelde, fiber kablo boyunca farklı ısıtma kapasitelerine sahip iki fırın yerleştirilerek algılayıcı fiber üzerindeki termal etkiler modellenmiştir. Algılayıcı fiber boyunca konumlandırılan fırınların konumları Tablo 1'de belirtilmektedir.

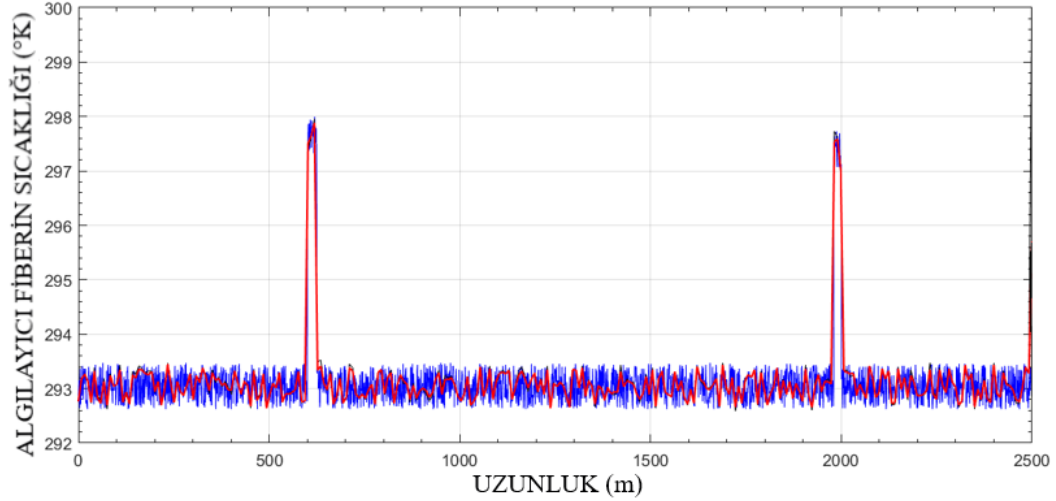
Çizelge 4. 1. Algılayıcı fiber boyunca konumlandırılan ısıtıcıların yerleri

Isıtıcılar	Isıtıcıların yerleri
Fırın1	600 m – 625 m
Fırın2	1980 m – 2000 m

Modelde benzetimler için kullanılan lazerin fiber parametreleri ve özellikleri şu şekilde belirtilmiştir; optik sinyalin (w) darbe süresi 10 ns, lazer kaynağı tarafından üretilen optik sinyalin (P_0) maksimum darbe gücü 1 mW, dalga boyu fibere (λ) gönderilen optik sinyal 1550 nm'dir, çekirdek ve kılıf kırılma indisleri (n_1 ve n_2) sırasıyla 1,44 ve 1,43'tür. 1550 nm'de Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayıları (α_R ve α_B) sırasıyla $3,5668 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ ve $7,6353 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$ 'dir.

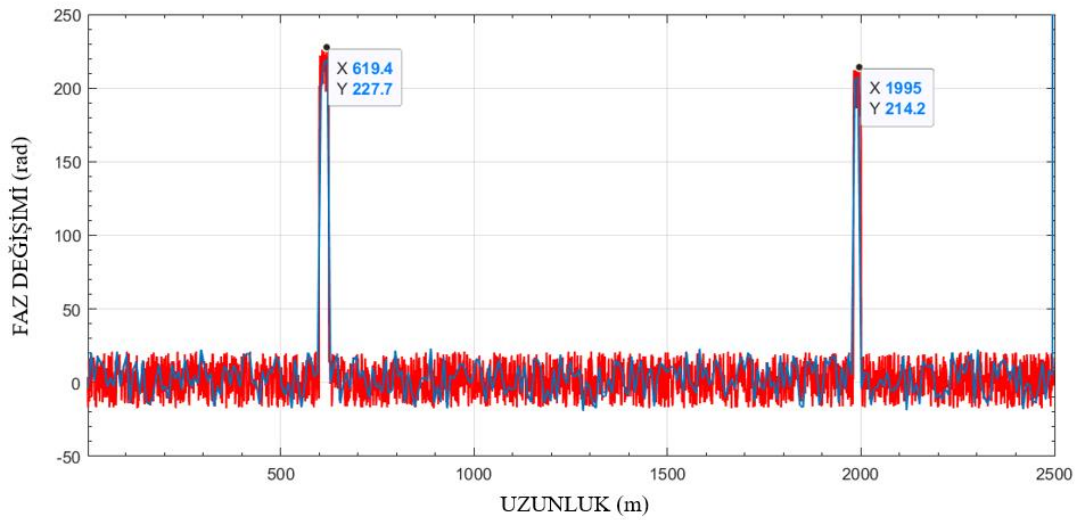
Işığın vakumdaki hızı (c) $3 \times 10^8 \text{ m/s}$, fibere yönlendirilen ışık dalgasının grup hızı (v_g) $2 \times 10^8 \text{ m/s}$, uzamsal çözünürlük (Δz) 1,04167 m, algılama fiber uzunluğu (L) 2500 m, faz-BOTDR esaslı DAS ($R = L/\Delta z$) için ölçüm noktası sayısı 2400, erimiş silika yoğunluğu (ρ) 2330 kg/m^3 ve yakalama katsayısı ($S = (n_1^2 - n_2^2)/4n_1^2$), 0,0035 olarak hesaplanmıştır.

2500 m uzunluğundaki algılayıcı fiberin sıcaklık profili Şekil 4.1.'de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi fırınların algılama fiberi boyunca konumlandığı iki sıcak nokta vardır. Bu fiber bölgelerinde en yüksek sıcaklık değerleri sırasıyla 619. metrede 298 °K ve 1993. metrede 297,5 °K olarak gözlenmiştir.



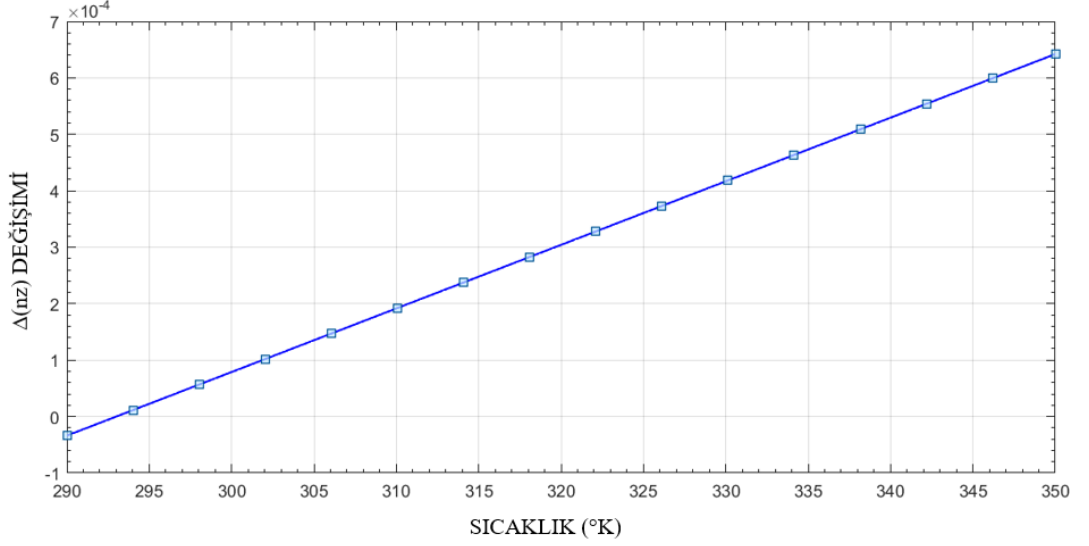
Şekil 4. 1. Algılayıcı fiber için sıcaklık profili

Algılayıcı fiber boyunca sıcaklık değişimine bağlı faz değişimi Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Algılayıcı fiberin fırınlardan geçtiği bölgelerde yani 600 m – 625 m ve 1980 m – 2000 m aralığında faz değişimi sırasıyla 227,7 rad ve 214,2 rad ile maksimum değerlere ulaşır.



Şekil 4. 2. Algılayıcı fiber boyunca faz değişim profili

290 °K – 350 °K sıcaklık aralığında sıcaklık değişimi ile $\Delta(nz)$ değişimi arasındaki ilişki ile ilgili benzetim Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 3. Sıcaklık değişimi ve $\Delta(nz)$ değişimi

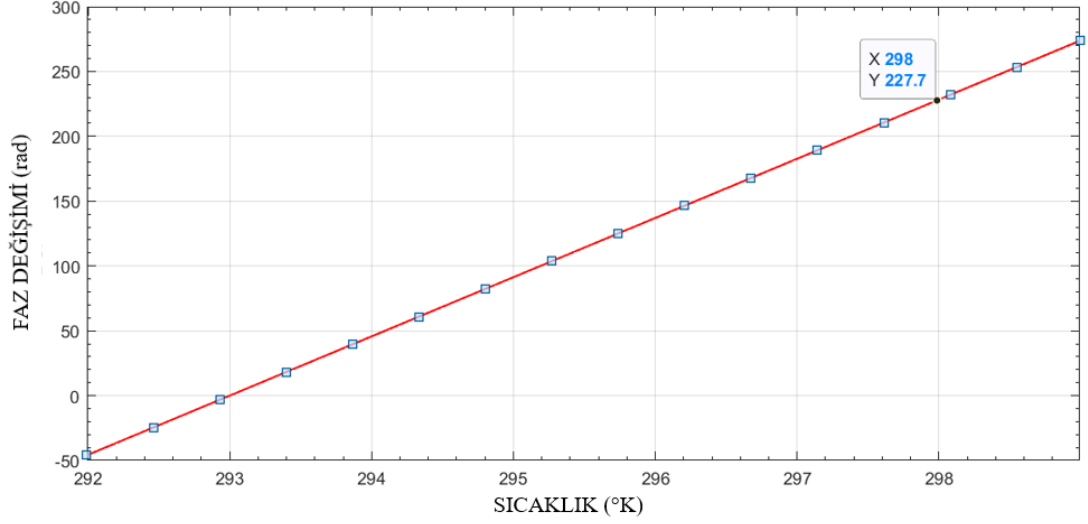
Şekil 4.3'te gösterilen benzetimi elde etmek ve algılayıcı fiber boyunca sıcaklık bilgisine sahip olmak için interpolasyon yöntemi kullanılır. Böylece verilen sıcaklık aralığı için $\Delta(nz)$ değişiminin sıcaklık bağımlılığı eşitlik (4.1)'deki gibi elde edilmektedir.

$$\Delta(nz) = 1,1266 \times 10^{-5}T - 3,30 \times 10^{-3} \quad (4.1)$$

Şekil 4.3'te açıkça görülmektedir ki, sıcaklık arttıkça $\Delta(nz)$ doğrusal olarak yükselme eğilimi göstermektedir. Başka bir deyişle, sıcaklık ne kadar yüksekse, $\Delta(nz)$ o kadar büyüktür. 293 °K oda sıcaklığı için $\Delta(nz)$ sıfır değerini alır.

Şekil 4.3'te faz değişiminin maksimum değerine ulaştığı noktada yani 298 °K sıcaklık için $\Delta(nz)$, $5,7268 \times 10^{-5}$ değerini almaktadır.

Faz değişiminin sıcaklığa bağımlılığı ile ilgili benzetim Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi, algılayıcı fiber boyunca meydana gelen sıcaklık oluşumları, faz değişiminin doğrusal olarak artmasına neden olur.



Şekil 4. 4. Faz değişiminin sıcaklığa bağımlılığı

Eğri uydurma ve interpolasyon yöntemleri kullanılarak, faz değişiminin sıcaklığa bağımlılığı ile ilgili doğrusal denklem (4.2)'deki gibi ifade edilmektedir.

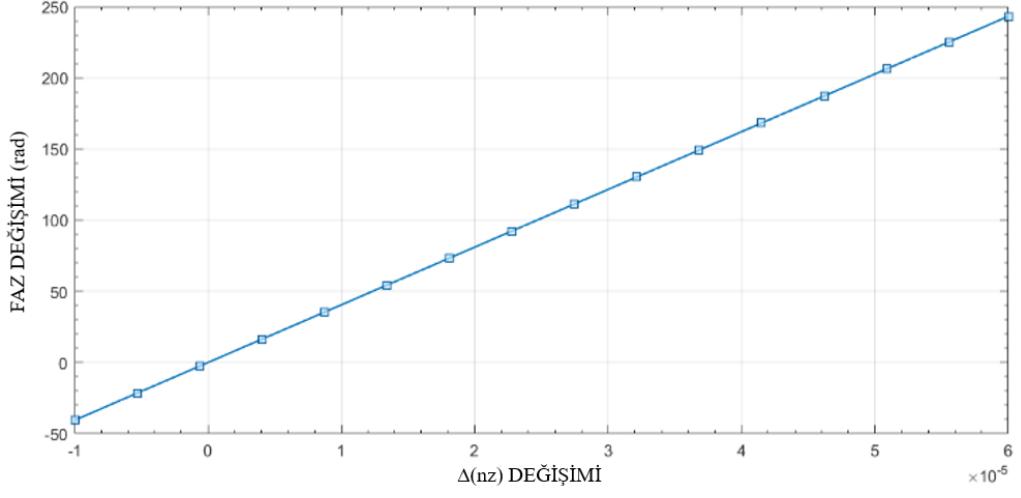
$$\Delta\phi = 45,667 \times T - 1,3380 \times 10^4 \quad (4.2)$$

Burada, $\Delta\phi$ radyan cinsinden faz değişimini gösterir.

293 °K – 298 °K aralığında değişen sıcaklık değerleri için, algılayıcı fiber boyunca meydana gelen faz değişimi 0 rad – 227,7 rad aralığında değişmektedir.

Eşitlik (4.2)'nin sıcaklığa (T) bağlı birinci türevi alındığında, faz değişimi ile sıcaklık arasındaki değişim oranı elde edilmektedir. Başka bir deyişe, fiber çekirdeğin sıcaklığındaki 1 °K'lik bir değişim, faz değişiminde 45,667 rad'lık bir değişime neden olur.

Faz değişimi ile $\Delta(nz)$ arasındaki ilişki Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Algılayıcı fiber boyunca meydana gelen faz değişimi ile $\Delta(nz)$ parametresi arasındaki ilişki doğrusaldır.

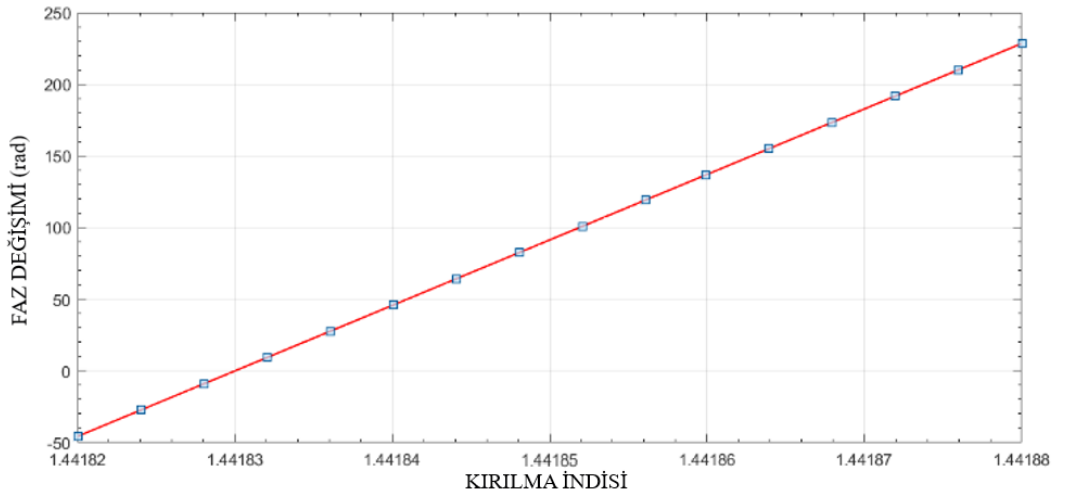


Şekil 4. 5. Algılayıcı fiber boyunca değişen $\Delta(nz)$ değişimi ile faz değişimi

Eşitlik (4.1) ve (4.2)'den yararlanılarak, faz değişimi ile $\Delta(nz)$ parametresi arasındaki ilişkiyi veren bağıntı (4.3)'te verildiği gibi yazılabilir.

$$\Delta\phi = 4,0537 \times 10^6 \times \Delta(nz) + 2,5796 \times 10^{-16} \quad (4.3)$$

Fiber ekirdek faz değişiminin kırılma indisi bağımlılığı Şekil 4.6'da gösterilmiştir. 1,44183 – 1,44188 aralığındaki kırılma indisi değerleri için faz değişimi 0 rad – 227,7 rad aralığındaki değerleri alır.



Şekil 4. 6. Faz değişiminin kırılma indisi bağımlılığı

Eşitlik (4.2) ve çekirdek kırılma indisinin sıcaklık bağımlılığı ilişkisinden yararlanılarak faz değişimi (4.4)'te verildiği gibi fiber çekirdek kırılma indisinin bir fonksiyonu olarak elde edilmektedir.

$$\Delta\phi = 4,5667 \times 10^6 \times n - 6,5844 \times 10^6 \quad (4.4)$$

Fiber çekirdeğinin kırılma indisinin değiştirilmesi durumunda, üretim sırasında az miktarda diğer kimyasallar eklenerek katkılama (doping) işlemi yapılır. Bu nedenle, algılayıcı fiberin çekirdek kırılma indisinin değerinde mevcut herhangi bir dalgalanma, fiberin içerisinden kılavuzlanan ve geriye saçılan Brillouin sinyalinin faz değişimini etkileyecektir. Eşitlik (4.4)'ten yola çıkarak, faz değişimindeki 1 rad artış, algılayıcı fiberin çekirdek kırılma indisi üzerinde $\sim 2,23 \times 10^{-7}$ değerinde bir varyasyona yol açar. Bununla birlikte, doping işlemi sırasında algılayıcı fiberin çekirdek kırılma indisinde herhangi bir değişikliğin yapılması veya kaynaşmış silika ön formunun üretilmesi, algılayıcı fiber boyunca faz değişimini analiz etmek için önemlidir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu tez çalışmasında, algılayıcı fiber boyunca meydana gelen faz değişiminin dağınık akustik algılanması için yeni bir faz-BOTDR tabanlı yöntem önerilmiştir. Bu kapsamda, faz değişiminin sıcaklık ve çekirdek kırılma indisi bağımlılıkları ile ilgili analizlerin yapılabilmesi için bir algılama modeli oluşturulmuş ve ilgili benzetimler yine Matlab 2020b kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca sıcaklık ve çekirdek kırılma indisinin faz değişimine bağımlılığı ile ilgili doğrusal denklemler türetilmiştir. Bu denklem takımlarına ve Matlab ortamında gerçekleştirilen benzetim sonuçlarına göre 293 °K – 298 °K aralığındaki sıcaklık değişimleri için faz değişimi değerleri 0 rad ile 227,7 rad aralığında elde edilmiştir. Bu sıcaklık aralığı için algılayıcı fiberin çekirdek kırılma indisi 1,44183 – 1,44188 aralığında değişmektedir. Bu veriler ve bulgular doğrultusunda, fiber çekirdeğinin sıcaklığındaki 1 °K'lik bir değişimin, faz değişiminde ~ 46 rad'lık bir değişime ve algılayıcı fiberin çekirdek kırılma indisinde ise $\sim 1,03 \times 10^{-5}$ değerinde bir değişime neden olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bu çalışma, faz-OTDR metodundan yararlanan literatürdeki benzerlerinden, faz-BOTDR ölçüm metodu kullanması açısından farklılık göstermektedir. Bu bakımdan literatüre ve genel olarak fiber optik dağınık akustik algılama sistemleri ile ilgili gelecekteki araştırmalara ve projelere bir öngörü sunarak katkı sağlayacaktır. Ayrıca, bu tez çalışması, algılama ortamındaki sıcaklık değişimi, optik fiber çekirdek kırılma indisi ve faz değişimi arasındaki ilişkilere ait matematiksel yaklaşımlar ve formüller üzerinden araştırmacılar ve alandaki uygulamacılar için değerli bilgiler vermektedir. Diğer bir deyişle, dağınık algılama sistemlerinde meydana gelen sıcaklık değişimlerinin etkileri dikkate alınarak, faz değişimi ve kırılma indis değişimlerinin etkin olduğu DAS sistemlerinde, bu etkilerin sistemin algılama performansı üzerindeki etkileri değerlendirilebilir olacaktır. Böylelikle, sahadaki saldırı tespit sistemleri ve güvenlik önlemlerinin sağlanması ve temin edilmesi sürecinde daha etkin ve uygun tasarımlar gerçekleştirilebilecektir.

KAYNAKLAR

Agrawal, G.P. 1995. Nonlinear Fiber Optics. 2nd Edition, Academic Press, Boston, USA, 592 pp.

Alahbabi, M.N. (2005). *Distributed optical fiber sensors based on the coherent detection of spontaneous Brillouin scattering* (Doktora Tezi). Erişim adresi: <https://eprints.soton.ac.uk/65508/>

Bao, X., Chen, L. (2012). Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors. *Sensors*, 12, 8601-8639. doi:10.3390/s120708601

Barrias, A., Casas, J. R., Villalba, S. (2016). A Review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications. *Sensors*, 16, 748. doi:10.3390/s16050748

Bilgen, M., Günday A. (2021, November), Phase BOTDR based Distributed Acoustic Sensing. 13th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO_2021), Bursa, Turkey.

Boydak, S., Yücel, M. (2017). Fiber optik kabloda meydana gelen Raman saçılmasının analizi. *Politeknik Dergisi*, 20(2), 257–265. doi:10.2339/2017.20.2

Chen, D. Liu, Q., Fan, X., He, Z. (2017). Distributed fiber-optic acoustic sensor with enhanced response bandwidth and high signal-to-noise ratio. *Journal of Lightwave Technology*, 14(8). doi:10.1109/JLT.2017.2657640

Dakin, J.P., Pratt, J., Bibby, G.W., Ross, J.N. 1985. Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector. *Electronics Letters*, 21(13): 569 - 570.

De Souza, K. R. C. P. (1999). *Fiber optic distributed sensing based on spontaneous Brillouin scattering* (Doktora Tezi). Erişim adresi: <https://eprints.soton.ac.uk/351507>

DeMerchant, M. 2000. Distributed strain sensing for civil engineering applications. Ph.D. Thesis, University of New Brunswick, Canada.

Gözgöz, U., Gül, E., Karaman, İ., Özkan, H., Kılıç, N. (2020). Dağınık fiber optik sensörler ile efektif alanın Rayleigh saçılmasına etkisinin Optisystem programı kullanılarak incelenmesi. *3rd International Conference on Data Science and Applications (ICONDATA'20)*.

Gül, E., Gözgöz, U., Karaman, İ., Özkan, H.İ. (2020, Haziran), Dağınık Fiber Optik Sensörler ile Sıcaklık Algılamasının OptiSystem Programı Kullanılarak Gerçekleştirilmesi. *3rd International Conference on Data Science and Applications (ICONDATA'20)*. İstanbul, Türkiye.

Günday, A. (2007). *Enerji kablosunda oluşan sıcaklık ve gerilmeleri optik fiberli algılayıcılarla algılama benzetimleri* (Yüksek Lisans Tezi). Erişim adresi: <https://acikerisim.uludag.edu.tr/handle/11452/3648>

Günday, A. (2016). *Optik fiberli dağıtık algılamalı sistemlerde ısı etkilerinin analizi ve modellenmesi* (Doktora Tezi). Erişim adresi: <https://acikerisim.uludag.edu.tr/handle/11452/10589>

Günday, A., Karlık, S.E., Yılmaz, G. (2012, Kasım), Landau-Placzek oranını temel alan optik fiberli dağıtık algılamada Brillouin ve Rayleigh saçılma katsayılarının sıcaklıkla değişiminin analizi. ELECO 2012 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, Turkey.

Higuera, J.M.L. (2005). *Handbook of optical fibre sensing technology*. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.

Juarez, J. C., Taylor, H. F. (2005). Distributed fiber optic intrusion sensor system for monitoring long perimeters. *Sensors, Command. Control. Commun. Intell. Technol. Homel. Secur. Homel. Def. IV*, 5778, 692. doi:10.1117/12.602638

Kasap, S.O., (2013). *Optoelectronics and photonics: principles and practices second edition*. London, UK: Pearson Education.

Kee, H.H., Lees, G.P., Newson, T.P. 2000a. All-fiber system for simultaneous interrogation of distributed strain and temperature sensing by spontaneous Brillouin scattering. *Optics Letters*, 25: 695 - 697.

Keiser, G., (2011). *Optical fiber communications fourth edition*. New York, USA: The McGraw-Hill Companies, Inc.

Li, B., Luo, L., Yu, Y., Soga, K., Yan, J. (2017). Dynamic strain measurement using small gain stimulated Brillouin scattering in STFT-BOTDR. *IEEE Sensors Journal* PP(99):1-1. doi:10.1109/JSEN.2017.2657119

Li, Y., Zhang, F., Yoshino, T. 2003a. Wide temperature-range Brillouin and Rayleigh optical time-domain reflectometry in a dispersion-shifted fiber. *Applied Optics*, 42: 3772 - 3775.

Lu, Y., Zhu, T., Chen, L., Bao, X. (2010). Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR. *J. Light. Technol.*, 28(22), 3243 - 3249. doi:10.1109/JLT.2010.2078798

Maral, H. (2018). *Uzun hat gözetleme uygulamaları için dağıtık akustik algılama sistem çözümü: sinyal modelleme, hedef tespiti ve sınıflandırma teknikleri* (Yüksek Lisans Tezi). Erişim adresi: <https://gcris.etu.edu.tr/handle/20.500.11851/2360>

Mashhadani, Z.A. 2019. Çok damarlı fiber tabanlı optik algılayıcının tasarımı ve geliştirilmesi. (Doktora Tezi). Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Masoudi, A., Newson, T. P. (2016). Distributed optical fibre dynamic strain sensing. *Review of Scientific Instruments*, 87(1). <https://doi.org/10.1063/1.4939482>
- Motil, A., Bergman, A., Tur., M. (2015). State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing. *Optics and Laser Technology*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.09.013>
- Ölçer, İ., Öncü, A. (2017). A novel data adaptive detection scheme for distributed fiber optic acoustic sensing. *Proc. of SPIE*, 9852, 98520V. doi: 10.1117/12.2224151
- Ölçer, İ., Öncü, A. (2017). Adaptive Temporal Matched Filtering for Noise Suppression in Fiber Optic Distributed Acoustic Sensing. *Sensors*, 17, 1288. doi:10.3390/s17061288
- Ölçer, İ., Öncü, A. (2018). Field tests of a distributed acoustic sensing system based on temporal adaptive matched filtering of phase-sensitive OTDR signals. *Proc. SPIE, 10654, Fiber Optic Sensors and Applications XV*, 106540C. doi: 10.1117/12.2304614
- Ölçer, İ., Öncü, A. (2018). On the Use and the Performance of Adaptive Filters for Fiber Optic Distributed Acoustic Sensors. *26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*. doi:10.1109/SIU.2018.8404578
- Özkan, E., Erkorkmaz, T., Cesur, B., Yetik, H., Uludağ, U., Ölcer, İ. (2020). FOTAS (Fiber Optic Based Acoustic Sensing System): requirements, design, implementation, tests and results. *Proc. SPIE 11525, SPIE Future Sensing Technologies*, 115250B. doi: 10.1117/12.2581713
- Palmieri, L., Schenato, L. (2013). Distributed optical fiber sensing based on Rayleigh scattering. *The Open Optics Journal*, 7(7), 104–127. doi:10.2174/1874328501307010104
- Pehlivan, C. (2007). *Optik fiber bragg ızgara algılayıcıların analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Erişim adresi: <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Polat, M.E. (2019). *Fiber optik kabloların kalite parametrelerinin belirlenmesi ve bu parametreler üzerine etki eden faktörlerin etki mekanizmalarının analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Erişim adresi: <http://acikerisim.nku.edu.tr:8080/xmlui/handle/20.500.11776/3551>
- Righini, G.C., Tajani, A., Cutolo A. (2009). *An introduction to optoelectronic sensors*. Danvers, USA: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Sante, R.D. (2015). Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications. *Sensors*, 15, 18666-18713. doi:10.3390/s150818666
- Senior, J.M., (2008). *Optical fiber communications principles and practice third edition*. London, UK: Ashford Colour Press Ltd.

- Shi, B., Xu, H., Chen, B., Zhang, D., Ding, Y., Cui, H., Gao, J. (2003). A feasibility study on the application of fiber-optic distributed sensors for strain measurement in the Taiwan strait tunnel project. *Marine Georesources and Geotechnology.*, 21(3–4), 333–343. doi:10.1080/713773406
- Udd, E. (2013). *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Uyar, F. (2018). *Development an characterization of a direct detection fiber optic distributed acoustic sensor* (Yüksek Lisans Tezi). Erişim adresi: <http://repository.bilkent.edu.tr/handle/11693/48031>
- Wang, Z., Zhang, B., Xiong, J., Fu, Y., Lin, S., Jiang, J. ... Rao, Y. (2018). Distributed acoustic sensing based on pulse-coding phase-sensitive OTDR. *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 4, pp. 6117–6124. doi:10.1109/JIOT.2018.2869474
- Wu, H., Du, H., Zhao, C., Tang, M. (2022). 24 km High-Performance Raman Distributed Temperature Sensing Using Low Water Peak Fiber and Optimized Denoising Neural Network. *Sensors*, 22, 2139. doi:10.3390/s22062139
- Wu, H., Zhao, C., Liao, R., Chang, Y., Tang, M. (2018). Performance enhancement of ROTDR using deep convolutional neural networks. *26th International Conference on Optical Fiber Sensors*. doi:10.1364/OFS.2018.TuE16
- Y. Wang et al. (2019). A Comprehensive Study of Optical Fiber Acoustic Sensing. *IEEE Access*. vol. 7, pp. 85821–85837, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2924736.
- Yetik, H., Kavaklı, M., Uludağ, U., Ekşim, A., Paker, S. (2022). Earthquake Detection Using Fiber Optic Distributed Acoustic Sensing. *3rd URSI AT-AP-RASC*. doi:10.23919/AT-AP-RASC54737.2022.9814220
- Yu, Q. 2006. Distributed Brillouin sensing using polarization-maintaining fibers with high measurement accuracy. Ph.D. Dissertation, Ottawa - Carleton Institute for Physics, University of Ottawa, Canada
- Yücel, M., Gökteş, H. H., Öztürk, N. F. (2014). Brillouin saçılması tabanlı fiber optik algılama. *22nd Signal Process. Commun. Appl. Conf.*, 838–841. doi:10.1109/SIU.2014.6830360
- Yüksel K., Jason, J., Wuilpart, M. (2018). Development of a phase-OTDR interrogator based on coherent detection scheme. *Uludağ Univ. J. Fac. Eng.*, 23(3), 355–370. doi:10.17482/uumfd.455326
- Zhang, L., Costa, L. D., Yang, Z., Soto, M. A., Gonzalez-Herráez, M., Thévenaz, L. (2019). Analysis and reduction of large errors in Rayleigh-based distributed sensor. *Journal of Lightwave Technology.*, 37(18), 4710–4719. doi:10.1109/JLT.2019.2917746

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mert BİLGEN
Doğum Yeri ve Tarihi : Göksun 1994
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Göksun Anadolu Lisesi
Lisans : Necmettin Erbakan Üniversitesi
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Milli Savunma Üniversitesi

İletişim (e-posta) : mbilgen@msu.edu.tr

Yayımları : Bilgen, M., Günday, A. (2021). Phase BOTDR based Distributed Acoustic Sensing. *13th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 345-349. doi:10.23919/ELECO54474.2021.9677862