
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

BRILLOUIN SAÇILMASI TABANLI FİBER OPTİK SENSÖR TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Murat YÜCEL

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞUBAT 2018

Murat YÜCEL tarafından hazırlanan "BRILLOUIN SAÇILMASI TABANLI FİBER OPTİK SENSÖR TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Murat YÜCEL

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……..

Başkan: Prof. Dr. Fatih V. ÇELEBİ

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ……

Üye: Prof. Dr. Ramazan BAYINDIR

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……...

Üye: Doç. Dr. İsa NAVRUZ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……

Üye: Doç. Dr. Mustafa BURUNKAYA

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……

Tez Savunma Tarihi: 01/02/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Murat YÜCEL

01/02/2018

BRILLOUIN SAÇILMASI TABANLI FİBER OPTİK SENSÖR TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

Murat YÜCEL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2018

ÖZET

Fiber optik kablolar iletişim sistemlerinin yanı sıra fiziksel ve kimyasal büyüklüklerin algılanması amacıyla da yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Bu değişimler, fiber optik kabloda ilerleyen ışığın fazı, dalga boyu ve yoğunluğu gibi özelliklerini etkilemektedir. Bu amaçla çeşitli algılama teknikleri geliştirilmiştir. Bu tekniklerden en önemlileri yoğunluk modülasyonlu, faz modülasyonlu, polarizasyon modülasyonlu ve dalga boyu modülasyonlu algılayıcılar olup, bunlardan dağıtık fiber optik algılayıcılar fiber kablonun her bir noktasında meydana gelen değişimleri algılama kapasitesiyle öne çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında, Brillouin tabanlı, hızlı ve çözünürlüğü yüksek bir algılama sistemi deneysel olarak analiz edilmiştir. Bu amaçla öncelikle, Brillouin saçılması tabanlı dağıtık algılayıcıya ait benzetimler OPTIWAVE OPTISYSTEM 7.0 programı ile yapılmıştır. Daha sonra uygun optik kablo seçimi için deneysel düzenek oluşturularak farklı türdeki fiberler için Brillouin frekans kayması ölçülmüştür. Test fiberi oluşturularak sıcaklık değiştirilmiş ve Brillouin frekans kaymasının değişimi incelenmiştir. Maksimum algılama uzunluğu için, sistemlerde 1550 nm bandındaki lazer sinyali tercih edilmiştir. Bu sinyal pals jeneratörü ve Mach-Zehnder modülatörü kullanılarak, sistemde farklı genişlikte darbeli optik sinyallere çevrilmiştir. Fiberden geri saçılan optik sinyaller bir veri işleme kartı ile toplanarak bilgisayara aktarılmıştır. Geliştirilen algoritma ve ara yüz ile optik kablodaki noktasal fiziksel değişimlerin izlenmesi ve kaydedilmesi sağlanmıştır. Deneysel Brillouin optik zaman bölgesi analizi düzeneği kurularak tek modlu fiber kablo üzerinde noktasal olarak ağırlık ölçümü gerçekleştirilmiş ve gerinim hesaplamaları yapılmıştır.

Bilim Kodu	:	90533
Anahtar Kelimeler	:	Dağıtık optik algılayıcı, Brillouin saçılması, BOTDA, optik sinyal işleme.
Sayfa Adedi	:	97
Danışman	:	Doç. Dr. Murat YÜCEL

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF BRILLOUIN SCATTERING BASED FIBER OPTIC SENSOR

(Ph. D. Thesis)

Murat YÜCEL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2018

ABSTRACT

Fiber optic cables are widely used to detect physical and chemical quantities as well as communication systems. These changes affect properties such as phase, wavelength, and intensity of the light traveling through the fiber optic cable. Various sensing techniques have been developed for this purpose. The most important of these techniques are intensity-modulated, phase-modulated, polarization-modulated, and wavelength-modulated sensors, from which distributed fiber optic sensors stand out for their ability to detect changes occurring at each point of the fiber cable. In this thesis study, a Brillouin based, fast and high resolution detection system was experimentally analyzed. For this purpose, simulations of a Brillouin scattering based distributed sensor were performed with OPTIWAVE OPTISYSTEM 7.0 program. The experimental setup for the selection of the appropriate optical cable was created and the Brillouin frequency shift for different types of fibers was measured. The temperature was changed by forming test fiber and the change of Brillouin frequency shift was investigated. For the maximum detection length, the 1550 nm band laser signal is preferred in systems. Using pulse generator and Mach-Zehnder modulator, this signal is converted into pulsed optical signals of different widths in the system. The optical signals scattered back from the fiber are collected by a data acquation card and transferred to the computer. With the developed algorithm and interface, it is possible to monitor and record the point physical changes on the optical cable. Experimental Brillouin optical time domain analysis method was established and point weight measurement was performed on single mode fiber cable and strain calculations were made.

Science Code : 90533

Key Words : Distributed optical sensor, Brillouin scattering, BOTDA, optical signal processing.

Page Number : 97

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Murat YÜCEL

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim sürecinde ve tezimin hazırlanmasında yardımını ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleriyle her zaman yol gösteren, yaptığım tüm çalışmalarda emeği geçen çok kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Murat YÜCEL'e,

Başta eğitim-öğretim hayatım olmak üzere, hayatımın her anında bana desteklerini esirgemeyen ve beni bu günlere kadar getiren sevgili annem, babam ve kardeşlerime,

Bana sağladıkları huzur ve mutluluğun yanında, gösterdikleri destek, hoşgörü ve sabırdan dolayı sevgili eşim ve oğluma,

İş hayatımda her daim beraber vakit geçirdiğimiz, bilgi paylaşımında bulunduğumuz ve bana destek olan tüm arkadaşlarıma ve değerli büyüklerime,

En içten ve kalbi duygularımla teşekkür eder, şükran ve minnetlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 3

3. FİBER OPTİK ALGILAYICILAR 19

3.1. Dıştan Etkileşimli Fiber Optik Algılayıcılar 20

3.2. İçten Etkileşimli Fiber Optik Algılayıcılar 20

3.3. Fiber Optik Girişimölçer Algılayıcılar 21

3.3.1. Sagnac girişimölçer 22

3.3.2. Mach-Zehnder girişimölçer 22

3.3.3. Michelson girişimölçer 23

3.3.4. Fabry-Perot girişimölçer 24

3.4. FBG Tabanlı Algılayıcılar 25

4. DAĞITIK ALGILAMA TABANLI FİBER ALGILAYICILAR 27

4.1. Dağıtık Algılama Tabanlı Fiber Algılayıcıların Çalışma Prensibi 29

Sayfa

4.2. Optik Fiberdeki Saçılmalar 31

4.2.1. Brillouin saçılması 33

4.2.2. Yükseltilmiş Brillouin saçılımı (YBS) 39

4.3. BOTDA Esaslı Algılama 42

4.3.1. BOTDA tabanlı algılayıcılarda yan bant oluşturma 42

4.3.2. BOTDA algılayıcılarda Brillouin kayıp ve Brillouin kazanç yöntemi 43

4.4. Yükseltilmiş Brillouin Saçılımı Tabanlı Ölçüm Tekniği 44

4.5. Algılayıcı Performansına SNR Etkisi 48

4.6. BOTDA Algılayıcıda Kullanılacak Ölçüm Tekniği 49

4.6.1. Dalgacık dönüşümü 50

5. DAĞITIK ALGILAYICININ TASARIMI 55

5.1. BOTDR Benzetimleri 55

5.2. BOTDA Benzetimleri 58

5.3. Farklı Kablolar ile Brillouin Saçılması Deneysel Kurulumu 60

5.4.Sıcaklık Değişimine Bağlı Brillouin Saçılımı Deneysel Analizi 63

5.5. Dağıtık Algılama Optik Algılayıcı Sisteminde Lazer Sinyalinin Darbeli Hale Getirilmesi 67

5.6. BOTDA Deneysel Kurulumu 71

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 83

KAYNAKLAR 87

ÖZGEÇMİŞ 96

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. Fourier dönüşümü hesaplamasında çarpım sayısı 51

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Fiber optik algılayıcı temel yapısı 19

Şekil 3.2. Dıştan etkileşimli fiber optik algılayıcılar 20

Şekil 3.3. İçten etkileşimli fiber optik algılayıcılar..... 21

Şekil 3.4. Sagnak girişimölçerin şematik gösterimi 22

Şekil 3.5. Serbest boşluk yapılı Mach-Zehnder girişimölçerin şeması 23

Şekil 3.6. Temel Michelson girişimölçer fiber optik algılayıcı yapısı..... 24

Şekil 3.7. Fabry-Perot girişimölçer algılayıcı yapısı 25

Şekil 3.8. Fiber Bragg ızgaranın iletim ve yansıma spektrumu..... 26

Şekil 4.1. BOTDR tabanlı algılama 28

Şekil 4.2. BOTDA tabanlı algılama..... 29

Şekil 4.3. Tek modlu fiberin dalga boyuna bağlı zayıflama eğrisi 30

Şekil 4.4. Fiber optik dağıtık algılayıcı ölçüm sistemi 31

Şekil 4.5. 1550 nm dalga boyunda fiberde oluşan saçılmalar..... 32

Şekil 4.6. Brillouin saçılması boyunca Stokes bileşenlerinin oluşumu 38

Şekil 4.7. BOTDA algılayıcıların temel yapılandırılması 42

Şekil 4.8. Tek lazer kaynağının modüle edilmesi ile oluşan yan bantlar..... 43

Şekil 4.9. Brillouin kayıp ve kazanç yapılandırmalarındaki lazerlerin frekansları..... 44

Şekil 4.10. Brillouin kayıp yapılandırmasında fiber kablodaki ışık etkileşimi..... 45

Şekil 4.11. İdeal bir Brillouin kazanç spektrumu 47

Şekil 4.12. N büyüklüğündeki bir gürültünün Lorentz eğrisinde gösterimi 48

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.13. Ayrık ve hızlı Fourier dönüşümlerinde işlem sayıları 51

Şekil 4.14. Dalgacık dönüşümü prensibi 52

Şekil 5.1. Brillouin saçılması benzetim devresi (BOTDR)..... 55

Şekil 5.2. Lazer kaynağın optik spektrumu (OSA_1)..... 56

Şekil 5.3. Modüle edilmiş giriş sinyali (OSA_2)..... 56

Şekil 5.4. Zaman domeninde modüle edilmiş giriş sinyali..... 57

Şekil 5.5. Saçılan ışık dalgaları..... 57

Şekil 5.6. Tek modlu fiberin çıkış sinyali (OSA_4) 58

Şekil 5.7. Farklı sıcaklığa sahip fiber benzetim devresi (BOTDA)..... 58

Şekil 5.8. 273 K sıcaklığa sahip fiber için Brillouin saçılması..... 59

Şekil 5.9. 283 K sıcaklığa sahip fiber için Brillouin saçılması..... 60

Şekil 5.10. 293 K sıcaklığa sahip fiber için Brillouin saçılması..... 60

Şekil 5.11. Brillouin saçılımı deney düzeneği 61

Şekil 5.12. Tek modlu fiber ve dispersiyonu kaydırılmış fiberin dalga boyu değişimine karşılık Brillouin kayması 62

Şekil 5.13. (a) Tek modlu fiber ve (b) Dispersiyonu kaydırılmış fiberin 1550 nm dalga boyu için Brillouin saçılması..... 62

Şekil 5.14. 95 m'lik tek modlu test fiberine ait Brillouin saçılımı deney düzeneği 63

Şekil 5.15. 95 m test fiberine ait 20 ve 30 °C sıcaklıktaki Brillouin saçılması 64

Şekil 5.16. 95 m test fiberinin optik spektrum çıktıları (a) 20 °C (b) 40 °C (c) 60 °C... 66

Şekil 5.17. 95 m tek modlu test fiberin sıcaklık değişimine karşılık Brillouin saçılması..... 67

Şekil 5.18. Lazer giriş sinyalini darbeli hale getirmek için kurulan deneysel düzenek.. 67

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.19. Farklı darbe süreleri için modüle elde edilen lazer sinyale ait optik spektrum çıktıları (a) 16 ns (b) 20 ns (c) 30 ns (d) 40 ns (e) 50 ns 68

Şekil 5.19. (devam) Farklı darbe süreleri için modüle elde edilen lazer sinyale ait optik spektrum çıktıları (a) 16 ns (b) 20 ns (c) 30 ns (d) 40 ns (e) 50 ns..... 69

Şekil 5.19. (devam) Farklı darbe süreleri için modüle elde edilen lazer sinyale ait optik spektrum çıktıları (a) 16 ns (b) 20 ns (c) 30 ns (d) 40 ns (e) 50 ns..... 70

Şekil 5.20. Sıcaklık ve gerginlik algılama için kurulan deneysel BOTDA düzeneği..... 71

Şekil 5.21. Modülatör ile 30 ns darbe süresi için elde edilen darbeli lazer sinyale ait optik spektrum çıktısı..... 72

Şekil 5.22. Sistem algoritmasına ait akış diyagramı..... 73

Şekil 5.23. Brillouin frekans kaymasının izlenmesi amacıyla hazırlanan kullanıcı ara yüzü..... 74

Şekil 5.24. 1100 m boyunda test fiberine ait konumlu gerginlik ölçüm sonuçları (a) gerilme yokken (b) ve (c) test kablosunun 700. metresine gerginlik uygulandığında..... 75

Şekil 5.24. (devam) 1100 m boyunda test fiberine ait konumlu gerginlik ölçüm sonuçları (a) gerilme yokken (b) ve (c) test kablosunun 700. metresine gerginlik uygulandığında 76

Şekil 5.25. Ağırlık algılama için kurulan deneysel BOTDA düzeneği..... 76

Şekil 5.26. Fibere uygulanan farklı ağırlıklara göre elde edilen Brillouin frekans değerleri (a) 150 gr (b) 200 gr (c) 250 gr..... 77

Şekil 5.26. (devam) Fibere uygulanan farklı ağırlıklara göre elde edilen Brillouin frekans değerleri (a) 150 gr (b) 200 gr (c) 250 gr 78

Şekil 5.27. 1100 m'lik tek modlu fiber için ağırlık değişimine karşılık Brillouin frekansı..... 79

Şekil 5.28. Deneysel BOTDA düzeneğinin farklı ağırlıklar kullanılarak gerinim ölçümü için kullanılan kısmı..... 81

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
mg	miligram
L	litre
nm	nanometre
m	metre
MHz	megahertz
cm	santimetre
KHz	kilohertz
Hz	hertz
km	kilometre
με	mikrostrain
°C	santigrat derece
ns	nanosaniye
ps	pikosaniye
pm	pikometre
nε	nanostrain
GHz	gigahertz
K	kelvin
dB	decibel
mm	milimetre
dBm	1 miliwatt karşılığı desibel değeri
KV	kilovolt
s	saniye
ʌ	Bragg periyodu
THz	terahertz
T	sıcaklık

Simgeler	Açıklamalar
d	mesafe
t	zaman
c	ışık hızı
n	kırılım indeksi
mW	miliwatt
mA	miliamper
Msa	megasample
gr	gram

Kısaltmalar	Açıklamalar
A/D	Analog Dijital
ADC	Analog Dijital Dönüştürücü
AFD	Ayrık Fourier Dönüşümü
AOM	Akusto Optik Modülatör
APD	Çığ Foto Diyod
ARM	Gelişmiş RISC Makinesi
BDG	Brillouin Dinamik Izgara
BEDS	Brillouin Yankılı Dağıtık Algılama
BFS	Brillouin Frekans Kayması
BGS	Brillouin Kazanç Spektrumu
BOCDA	Brillouin Optik Kod Bölgesi Analizi
BOFDA	Brillouin Optik Frekans Bölgesi Analizi
BOTDA	Brillouin Optik Zaman Bölgesi Analizi
BOTDR	Brillouin Optik Zaman Bölgesi Reflektometresi
CCD	Şarj Birleştirici Eleman Algılayıcı
CRN	Tek Evreli Rayleigh Gürültüsü
CW	Sürekli Dalga
DAQ	Veri İşleme Kartı
DAS	Dağıtık Akustik Algılama
DD	Dalgacık Dönüşümü
DFB	Dağıtık Geri Beslemeli Lazer

Kısaltmalar	Açıklamalar
DSP	Sayısal İşaret İşleme
EDF	Erbium Katkılı Fiber
EDFA	Erbium Katkılı Fiber Yükselteç
EKG	Elektrokardiyogram
EOM	Elektro Optik Modülatör
FBG	Fiber Bragg Izgara
FBGA	Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri
FC / APC	Frank Charlie / Açılı Parlatılmış Konnektör
FPI	Fabry-Perot Girişimölçer
FWHM	Yarı Maksimumda Tam Genişlik
FWM	Dört Dalgalı Karıştırma
GSM	Mobil İletişim için Küresel Sistem
HFD	Hızlı Fourier Dönüşümü
IC	Tümleşik Devre
LDR	Işık Bağımlı Direnç
$LiNbO_3$	Lithium Niobate
LNG	Sıvılaştırılmış Doğal Gazı
LPG	Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
MATLAB	Matrix Labaratuvarı
MI	Michelson Girişimölçer
MZI	Mach-Zehnder Girişimölçer
NRZ	Sıfıra Dönüşsüz
OFDR	Optik Frekans Bölgesi Reflektometrisi
OSA	Optik Spektrum Analizörü
OTDR	Optik Zaman Bölgesi Reflektometrisi
PD	Foto Diyod
PIN	Pozitif-Öz-Negatif
RF	Radyo Frekans
RFA	Radyo Frekans Yükselteci
RZ	Sıfıra Dönüşlü
SERS	Yüzey Destekli Raman Saçılması
SI	Sagnac Girişimölçer

Kısaltmalar	Açıklamalar
SNR	Sinyal Gürültü Oranı
STIM	Akıllı Dönüştürücü Arabirim Modülü
YBS	Yükseltilmiş Brillouin Saçılımı

1. GİRİŞ

Son yıllarda fiber optik endüstrisinde önemli gelişmeler yaşanmıştır. Bu gelişmeler, beraberinde optik haberleşmede önemli yenilikler getirmiştir. Performansı yüksek, çok daha güvenli ve yüksek bant genişliğine sahip haberleşme sistemleri üretilebilmiştir. Optik haberleşmedeki gelişmelerle birlikte fiber optik algılayıcı teknolojileri de gelişmektedir. Geleneksel algılayıcı sistemlerine göre pek çok avantajları olduğu için fiber optik algılayıcılar hızla geleneksel algılayıcıların yerini almaktadır [1].

Fiber optik algılayıcılar arasında dağıtık fiber algılayıcıları en ilgi çekenleridir. Düşük optik kayıpları nedeniyle uzun mesafelerde kullanılabilen bu sistemler, çok sayıdaki nokta algılayıcılarına göre daha düşük maliyetlidir. Dağıtık fiber optik algılayıcıda, fiber kablo içerisine ışık gönderilir ve yansıyan ışıktaki değişimler gerginlik ve sıcaklıkla ilgili bilgiyi taşır. İletilen ışık ile geri yansıyan ışığın arasındaki frekans farkı gerginlik ve sıcaklık değişimi ile ilgili bilgi verir. Bu tür algılayıcılar inşaat sektöründe, çevre güvenliğinde, uzay endüstrisinde, güç üretimi izlemede ve mühendislik gibi birçok uygulama alanında kullanılmaya başlanmıştır [2,3].

Geleneksel fiber optik algılayıcılarla karşılaştırıldığında, saçılım tabanlı dağıtık fiber optik algılayıcıların aşağıda örnekleri verilen pek çok üstünlüğü vardır.

- Fiber optik kablo boyunca her noktasından sinyal algılama,
- Eş zamanlı işlenebilen ölçüm noktaları,
- Alınan bilgilerin tek bir işlemci ile değerlendirilmesi,
- Uzun fiber optik kablolar boyunca gerginlik vb. ölçümlerle birlikte konumsal bilgilerin de bulunması,
- Otomatik ve hızlı veri toplama (sürekli izleme, uzaktan algılama),
- Dış ortamdaki düzensizliklerden etkilenmeme ve algılama yapılacak fiber optik kablo hattı boyunca elektrik (güç) gerektirmeme,
- Algılayıcı ünitenin, diğer algılama yöntemlerinde kullanılanlara kıyasla daha kompakt, işletimi kolay ve az bakım gerektiren bir yapıda olması,
- Algılayıcı ve ölçüm maliyetinin diğer algılama yöntemlerine kıyasla daha ucuza mal edilebilmesi.

Araştırmanın amacı

Bu tez çalışmasında çalışılan algılama sistemi ile amaç, fiber optik kablo içerisine laboratuvar ortamında tespit edilmiş uygun frekanslı lazer ışığının gönderilmesi ve geri dönen sinyallerin anlamlandırılması esasına dayanmaktadır. Algılama işlemi; fiber optik kablo içinden gönderilen taşıyıcı lazer darbeleri üzerine modüle edilmiş olan sinyalden, ölçümü yapılmak istenen fiziksel büyüklüğün değişiminin etkisi ile kablo boyunca geriye yansıyan saçılmaların analiz edilmesi ile gerçekleşecektir. Bu saçılmalar sayesinde gerilme, titreşim ve sıcaklık gibi fiziksel değişimler algılanabilecektir.

Araştırmanın önemi

Fiber optik algılayıcıların teknolojik gelişimi yeni bir alandır. Dünyada bilinen uygulamaları vardır ancak yapılan literatür ve piyasa araştırması sonucu, ülkemizde fiber optik kabloların algılayıcı olarak kullanılması konusunda sınırlı sayıda akademik çalışmanın bulunduğu görülmüş ve ürüne dönüştürülmüş ticari bir çalışmaya ise rastlanılmamıştır.

Tez konusu araştırma kapsamında incelenen dağıtık fiber optik algılayıcı sisteminin henüz dünya üzerinde yaygın olarak kullanımına başlanmamış, kullanılan teknolojinin yeni ve sistemin henüz birkaç ülkede üretiliyor olmasından kaynaklı yüksek tedarik maliyeti nedenleri, uygulama öncesi ürünün tanıtım gösterisi ve test çalışmasının yapılabilmesini dahi güçleştirmektedir. Bu sistemin geliştirilmesi için yapılmakta olan araştırma ve inceleme çalışmaları bir bütün olarak değerlendirilecek, farklı bilgiler sentezlenerek bugüne kadar varlığı bilinen lazer saçılmalarının anlamlandırılmasına yönelik bir çalışma yapılacaktır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Geleneksel algılayıcılara göre güvenilirlik, gürültülere karşı bağışıklık, uygun maliyet gibi üstünlüklerinden dolayı, fiber optik kablolar algılayıcı olarak çok sayıda algılama sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu tip algılayıcı sistemlere ait kaynak araştırması aşağıda örnekleriyle verilmiştir.

D. Hazarika ve D.S. Pegu'nun yaptıkları çalışma, fiber optik algılayıcılarını kullanarak hava basıncını izlemek için bir mikrodenetleyici tabanlı enstrümantasyon sistemini anlatmaktadır. Büyük ölçekli bükülme prensibi ile algılayıcı sistemi geliştirilmiştir. Enstrümantasyon sistemi bir lazer kaynağı, bir ışın dağıtıcı, iki adet çok modlu fiber optik kablo, iki ışığa bağımlı direnç (LDR) tabanlı zamanlayıcı devre ve AT89S8252 mikrodenetleyici içermektedir. Işın ayırıcı lazer ışınını iki optik yola ayırmak için kullanılmış ve daha sonra bu iki ışın, iki ayrı çok modlu fibere uygulanmıştır. Çok modlu fiberlerin birisi algılayıcı fiber diğeri ise referans fiber olarak kullanılmıştır. Referans fiber kullanılmasının amacı, hava basıncı büyüklüğü ölçümü sırasında çevresel etkileri ortadan kaldırmaktır. Algılayıcı ve referans fiberlerdeki iki lazer ışını iki eşdeğer LDR tabanlı zamanlayıcı devrelere uygulanır. LDR tabanlı zamanlayıcı devreleri mikrodenetleyiciye zamanlayıcı girişleri üzerinden bağlanmıştır. Mikrodenetleyici, kendisine ait sayıcı-0 ve sayıcı-1 devrelerini kullanarak zamanlayıcı devrelerinin frekanslarını örnekler. Sayıcı değerleri, hava basıncı büyüklüğünü ölçmek için kullanılmıştır [4].

P.B.Buchade'nin yaptığı çalışmada, fiber optik algılayıcı ile bir mobil platform dizayn edilip kurulmuş ve test edilmiştir. IC 89C51RD2 platform üzerine mikrodenetleyici olarak kullanılmıştır. Platform, arkasında iki motorlu tekerlek ve ön tarafında bir serbest dönüm tekerlek ile tasarlanmıştır. Ayrıca platform yaklaşım, ağırlık ve dokunmatik plastik fiber algılayıcılar ile donatılmıştır. Bulunulan pozisyon, dokunmatik algılayıcıyla; hedef, yaklaşım algılayıcıyla ve ağırlık da yük hücresi algılayıcıyla algılanmaktadır. Yazılım ile ağırlıklar yüklendikten sonra platform bulunduğu konumdan hedef konuma ulaşmaktadır [5].

Alberto J. Palma ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, atmosforik oksijen tespiti için, opto-kimyasal portatif bir elektronik cihaz ihtiva eden, yeni bir ölçüm sistemi içeren bir optik

algılayıcı sunulmuştur. Lüminesans söndürme dayalı optik algılayıcılar yeterli hassasiyet ve yüksek kararlılık için tasarlanmışlardır. Taşınabilir cihaz bir mikrodenetleyiciye dayanmaktadır. Başlıca özellikleri şunlardır: Tek bir optik algılayıcı kanallı, optik filtreli, tamamen dijital sinyal işleme kapasiteli, yeniden programlamalı, veri tasarruflu, düşük güç tüketimli, bilgisayar iletişim yeteneğine sahip olmasıdır. Dijital çıkışlı bir foto dedektörün kullanılması sonucu daha az elemana sahip devre yapısı ve daha iyi gürültü bağışıklığı ile analog işlemeye gerek kalmamıştır. İletim işleminde ölçülen parametre, lüminesans ömrüyle benzerdir. Tipik ölçüm aralığı 0 ile % 30 oksijen ve tepki süresi tam aralık için 30 saniye altındadır. Tipik ölçüm özellikleri; sıcaklık etkisi düzeltme, düşük sürüklenme ve oksijen konsantrasyonunda % 0,5 doğruluktadır [6].

Mahfoozur Rehman ve diğerleri yaptıkları çalışmada, fiber optik teknoloji tabanlı düşük maliyetli, akıllı bir sıvı akış ölçme sistemi geliştirilmiştir. Fiber optik algılamanın yanı sıra iletişim teknikleriyle, belirli bir mesafeden, bir türbin, akış ölçer olarak kullanılmıştır. Türbinin bıçakları, üzerine gelen ışığı modüle etmek için kullanılmıştır. Üretilen darbelerin frekansı bıçak sayısına bağlıdır ve mikrodenetleyici ile ölçülerek hiper terminalde görüntülenmiştir. Düzgün bir kalibrasyonla, çıkış frekansı ve akış hızı hemen hemen doğrusaldır ve doğruluğu +- % 4'dür [7].

A. F. Omar ve M. Z. Matjafri yaptıkları çalışmada, Spektroskopisi analizi yoluyla su kalitesini ölçen fiber algılayıcısı, fiber optik kablolar aracılığıyla gelen ışığın ve geri saçılmış ışığın algılama yöntemini kullanmaktadır. Sistem, ışık ve su içinde süspansiyon halindeki katılar arasında bir etkileşim olduğu zaman ışığın uzak gelen ışıktan 180° dağınık tespit etme yeteneğine sahiptir. Ampirik analiz (mg / lt), su içinde süspansiyon halindeki kil kapasitesinin ölçülmesi ile yapılmıştır. Sistem, mavi (470 nm) ve kırmızı (635 nm) tek renkli ışığa karşı duyarlı olan iki ayrı ışık detektör devresinden oluşmaktadır. Algılayıcı sisteminin kalbi olan, TSLB257 ve TSLR257, sırasıyla, 470 nm ve 635 nm dalga boyunda en yüksek tepki cevabına sahiptir. Algılamanın nihai sonucu işleme ve analiz için Basic Stamp 2 ile mikrodenetleyiciye gönderilir. Bulanıklık seviyesi, mikrodenetleyici tarafından tanımlanır ve görüntülenir [8].

N.C. Ryder'in yaptığı çalışmanın konusu, silikon foto çarpıcılar ile düşük ışık seviyelerini ölçebilen, kararlı, düşük gerilimli algılayıcılardır. Onlar, laboratuvar ve yüksek irtifada kozmik ışın deneyleri için tasarlanmış, dalga boyu değişen fiber gömülü ışın

paralelleştiricili kozmik ışın algılayıcı olarak kullanılmışlardır. ARM Cortex M3 mikroişlemci tabanlı veri toplama sistemi kullanılarak bir dedektör geliştirilmiştir [9].

Qiuhong Zhang ve Qian Liu'in yaptıkları çalışmanın konusu, akıllı ev kontrol sisteminin genel amacı yüksek teknolojili yaşam ortamının iyileştirilmesi amacıyla, etki alanı aile ve hatta bütün şehir ile entegre olan bir bilgi hizmet ve yönetim sistemi oluşturmak için bilgisayar, ağ, kontrol ve bütünleşme teknolojisi kullanımıdır. Fiber optik algılayıcıdan alınan saçılmalar ile ortam sıcaklığı ve gerinim değişimi algılanabilmektedir. Bu çalışmada mikrodenetleyici, GSM ve fiber optik algılayıcı ile akıllı ev kontrol sistemi anlatılmaktadır. Ayrıca bu çalışmada, kablosuz iletişim için GSM kullanılarak kablosuz veri iletim şebekesi inşa edilmiştir [10].

Jiahong Zhang ve diğerleri yaptıkları çalışmada, doğru bir şekilde yoğun elektrik-alan ölçümü için asimetrik Mach-Zehnder girişimölçer tabanlı $LiNbO_3$ fotonik algılayıcının kutuplama açısını kontrol etmek için yeni bir yöntem önermiş ve deneysel sonuçlar ortaya koymuştur. Ölçme altında elektrik-alan deforme değil ise bir mikrodenetleyici ünitesi kullanılarak ayarlanabilir bir lazer dalga boyu uygulanarak, algılayıcıların doğrusal bir çalışma noktasına sahip olması sağlanmıştır. Bu yöntem, optik çıkış dalga boyunu bozmadan başarıyla $LiNbO_3$ fotonik algılayıcıyı kontrol etmektedir. Önerilen kontrol sistemi ile bu algılama sisteminin doğrusal karakteristiği ölçülmüştür. Tüm bu dalga boyu ayarlama tekniği elektrik-alanının doğru tespiti için kullanılabilir [11].

Oleg Uzenkov ve diğerleri yaptıkları çalışmada, fiber Bragg ızgara (FBG) tabanlı bir gerginlik algılayıcı çıkışını ölçmek için kullanılan bir FPGA temelli ölçme sistemini sunmaktadır. Sistem, FBG algılayıcı tarafından oluşturulan en fazla 10 adet ışık kaynak çıkışını takip edebilir ve minyatüre edilmiş monokromatör kullanarak ayırabilmektedir. Işık kaynaklarının merkezi, Xilinx FPGA tarafından kontrol edilen bir 2048 pixel doğrusal CCD dizisi kullanılarak ölçülebilmektedir. Sistem 2 MHz bir frekansla doğrusal dizini tarar ve 1 mikro gerinim çözünürlüğe eşit olan bir alt pixel çözünürlüğü elde edebilmektedir. Kontrol devresi, bir XCS40 devresinde %58 daha az lojik kaynaklarla gerçekleştirilebilmektedir [12].

Graham Wild ve Steven Hinckley yaptıkları çalışmada, dağıtık optik fiber akıllı algılayıcılar için akıllı bir dönüştürücü arabirim modülü (STIM) sunmaktadırlar. STIM

intensiyometrik fiber optik algılayıcılar ile birlikte kullanılmak üzere tasarlanmış olan genel amaçlı bir arabirimdir. Ara yüz iki adet optik fiber pozitif - öz - negatif (PIN) alıcıları, bir farksal yükselteç ve bir dijital sinyal işlemcisinden oluşmaktadır. İki adet alınan sinyal, farksal olarak, hassasiyet ve sinyal-gürültü oranını artırmak için güçlendirilir. STIM'in akıllı olmasını sağlayan sayısal işaret işleme (DSP) kartı, üzerinde analog sayısal dönüştürücüye (ADC) sahiptir. STIM başarıyla sıcaklık ve gerginlik izlemede gömülü sistem olarak kullanılmıştır ve bu ölçümler, önceden belirlenmiş bir eşik değeri aşıldığında uyarı vermek için kullanılabilmektedir. Algılama sistemi, DSP olmadan da başarılı bir şekilde dinamik gerilme sinyallerini tespit etmek için kullanılabilmiştir [13].

Altuğ'un yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında, Fiber brag ızgara tabanlı bir algılayıcı ile hastaların elektro kardiyografi (EKG) sinyalini ölçtükten sonra fiber optik ortama aktaran, bu optik sinyali de bir optik haberleşme ağı üzerinden merkezi bir kontrol ünitesine (bilgisayar) gönderen sistemin tasarımı yapılmıştır. Kontrol ünitesi ise demodülatör yardımıyla elektrik sinyale dönüştürülen optik sinyali bir veri işleme kartı (DAQ) ile örnekleyip EKG sinyallerini ani olarak görüntüleyebilmekte, ayrıca bu bilgiler ile bir veri tabanı oluşturabilmektedir. Kontrol ünitesi de matris laboratuvarı (MATLAB) kullanılarak benzetim yapılmıştır. Bu çalışma yardımıyla EKG takip ağları oluşturulabilmekte, gerektiğinde yeni teknolojiyle senkronizasyonu sağlanabilmektedir. Ayrıca oluşturulabilecek merkezi bir veri tabanı ile bir insanın hayatı boyunca kalp sağlığı durumu takip edilebilmektedir [14].

Qin tarafından yapılan doktora tez çalışmasında, Rayleigh saçılmasına dayalı bir dağıtık optik fiber vibrasyon algılayıcı geliştirilmiştir. Vibrasyon kaynağı için kalem kırma olayı kullanılmış ve uzamsal çözünürlüğü 1 cm ve maksimum vibrasyon noktası ile algılama noktası arası maksimum mesafe 18 cm olarak ölçülmüştür. 20 cm uzunluğundaki tek modlu bir fiber üzerinden 1 KHz'e kadar dağıtık vibrasyon ölçümleri yapılmıştır [15].

Karaman ve Ünverdi'nin yaptığı çalışmada, fiber optik algılayıcı içinde yer alan FBG tabanlı algılayıcılar incelenmiştir. Izgaraların dalga boyu, geri yansıyan ve iletilen spektrumları incelenmiştir. Bu spektrumların, ızgara periyodu, uzunluğu ve kırılma indisi değerlerinin gerginlik ve sıcaklıkla değişimi gözlemlenmiştir [16].

Bao ve Chen'in yaptığı çalışmada saçılmalara dayalı fiber algılayıcıların son dönemdeki gelişimleri incelenmiştir. Fiberdeki Rayleigh, Brillouin ve Raman saçılmalarının yoğunluk, sıcaklık ve gerilme gibi nedenlerle fiber içindeki fotonların etkileşimleri sonucu meydana geldiği gözlenmiştir. Örneğin bir akustik/mekanik dalga bir dinamik yoğunluk çeşitliliği oluşturmaktadır. Bu ve benzeri çeşitliliklerin yerel sıcaklık, gerilme, vibrasyonlardaki değişikliklerden de kaynaklandığı gözlenmiştir. Birkaç metreden yüzlerce metre uzunlukta olan fiberden saçılan ışığın faz, frekans ve genliğindeki değişiklikler algılanarak, sıcaklık, gerilim, vibrasyon gibi ölçümler algılanabilmektedir. Bu ve benzeri ölçümlerde, zaman domeni veya frekans domeni kullanılarak lokasyon bilgisine ulaşmanın da mümkün olduğu görülmüştür [17].

Soto ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, Brillouin optik zaman bölgesi analizi (BOTDA) temeline dayanan uzun mesafeli dağıtılmış algılayıcılar için optik darbe kodlama tekniği incelenmiştir. Geleneksel BOTDA algılayıcılarla karşılaştırıldığında, optik kodlama daha iyi bir algılama aralığı sunmakta ve 50 km'lik tek modlu bir fiber boyunca 1 m'lik hata paylarıyla sıcaklık, gerilme ölçümlerine imkân tanımaktadır [18].

Hao ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, sıfıra dönüşlü / sıfıra dönüşsüz (RZ / NRZ) formatlar içinde kodlu optik prob darbeleri kullanılarak uzun mesafeli, hata payı düşük ölçümler gerçekleştirilmiştir. Sıfıra dönüşlü format kullanımı ile algılama aralığı arttırılmıştır. 512 bit sıfıra dönüşlü kodlama darbesi ile 50 km uzunluğundaki fiber bölgesi üzerinde 5 m doğruluk ve 12 με ile gerinim ölçümü gerçekleştirilmiştir [19].

Barrios ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, geniş yapılarda sıcaklık ve gerilme ölçümleri için yenilikçi çözümler sunan Brillouin algılayıcılar incelenmiştir. Tipik olarak bu algılayıcıların efektif ölçüm aralığı 20-30 km aralığındadır. Bu çalışmada ölçüm mesafesini uzatmak için BOTDA tabanlı algılayıcı sistemi kullanılmıştır. Test edilen bazı güçlendirme yöntemleriyle ölçüm mesafesi uzatılabilmiş, ölçüm kalitesi arttırılabilmiştir [20].

Soto ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, uzun mesafeli ve yüksek çözünürlükte ölçüm yapabilmek için Raman güçlendirmesi kullanılarak BOTDA algılayıcılarının optimizasyonu incelenmiştir. Raman güçlendirmesiyle 120 km uzunluğundaki tek modlu

bir fiberle, 2 metrelik hata payı ve 45με / 2,1°C'lik doğrulukla gerilme/sıcaklık ölçümleri yapılmıştır [21].

Jia ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, BOTDA içindeki algılama performansı Raman güçlendirmesiyle birleştirilerek yüksek doğrulukta sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarla teorik varsayımlar doğrulanmıştır. 75 km'lik fiber boyunca Raman güçlendirmesi ile 0,6 °C'lik hata payıyla ölçümler gerçekleştirilmiştir. Geniş Raman gücü ve Brillouin pompa gücü sinyal gürültü oranını iyileştirmek için yardımcı olmuştur. Raman güçlendirmesiyle birlikte BOTDA, uzun mesafelerde ve yüksek doğruluklarda yapısal sağlamlık görüntülemede ve yangın alarmlarının teşhisinde kullanım potansiyeline sahiptir [22].

Zornova ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, hibrit dağıtık ve birleştirilmiş Brillouin algılayıcılar için, uygun maliyetli yapıda ve Raman güçlendirmesiyle uzun mesafede ölçüm yapılabilen yeni bir konsept tasarlanmıştır. 46 km'lik bir ağ içinde FBG temelli noktasal vibrasyon algılayıcıları ve dağıtılmış sıcaklık algılayıcıları deneysel olarak gösterilmiştir. Bu ağda 13 m ve 0,7 °C'lik çözünürlükteki sıcaklık ölçümlerini tolere etmek için Raman güçlendirmesi kullanılmıştır. Uygun maliyetli yoğunluk algılayıcıları da 0,1'den 50 Hz'e kadar olan frekans aralığında vibrasyon ölçümü yapabilmektedir [23].

Sperber ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, optik fiberdeki Brillouin frekansı ile santimetreler mertebesinde uzamsal çözünürlükte algılamalar yapabilen yeni bir BOTDA tekniği geliştirilmiştir. Bu teknik, akustik uyarı için sadece tekli uzun pompa darbesi gerektirmektedir ve basit bir modülasyon şemasına dayanmaktadır. Brillouin frekansındaki değişimlerin algılanmasının 2 cm'lik uzamsal çözünürlüğe sahip olduğu deneysel olarak görülmüştür [24].

Chen ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, Brillouin kazancında ve kaybındaki uyumlu etkileşime dayanan yeni bir dağıtık algılayıcı yapısı incelenmiştir. Sonuç olarak, 15 m uzunluğundaki polarizasyon korumalı fiberde 20 / 15 ns Stokes ve Anti-Stokes darbeler kullanılarak 0,5 m uzamsal çözünürlük ve 6 με gerinim deneysel olarak görülmüştür [25].

Mafang'ın tez çalışmasında Brillouin yankılı dağıtık algılama (BEDS- Brillouin Echoes Distributed Sensing) diye adlandırılan yeni bir teknik geliştirilmiştir. Birinci bölümde

klasik Brillouin algılayıcı konfigürasyonu güncellenmiştir. Daha sonra klasik Brillouin algılayıcılar ile uzun mesafelerde yapılan ölçümlerde karşılaşılan kısıtlamalar incelenmiştir. İkinci bölümde ise Brillouin dağıtık ölçümlerindeki uzamsal çözünürlükleri tanımlamak için BEDS yaklaşımı sunulmuştur. BEDS teknolojisi kullanılarak, hata oranını büyük doğrulukla laboratuvar ortamında teşhis etmek mümkün olmuştur. Buna ek olarak BEDS kullanılarak bir fotonik kristal fiber boyunca geometrik yapı dalgalanması modellenmiştir [26].

Foaleng ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, Brilloun algılamadaki yüksek uzamsal ve spektral çözünürlükler, sorgulama dalgası üzerindeki optik faz kontrolü ve ön aktivasyonlu akustik dalga kullanan, sinyal gürültü oranı ile gerçekleştirilmiştir. Akustik dalganın ön aktivasyonu Brillouin doğal dalga boyunu muhafaza etmektedir ve farklı kazanç tekniğini uzatmaktadır. 5 km fiber üzerinde 3 MHz çözünürlük, 500 ps faz kaydırma darbesi kullanılarak Brillouin frekans kaymalarının ölçümü deneysel olarak gerçekleştirilmiştir [27].

Adrew'in yaptığı tez çalışmasında, tek modlu fiberde uyarılmış Brillouin saçılmasındaki doğrusal olmayan değişim deneysel olarak gözlenmiştir. Yüksek lazer uyarımında, fiberdeki geleneksel Brillouin frekansının yarısına eşit Stoke kazancının, görünüme etkisi incelenmiştir [28].

Alahbabi'nin yaptığı tez çalışmasında, rastgele Brillouin saçılmasının uyumlu algılamasına dayalı dağıtık sıcaklık ve gerilim algılayıcılarındaki algılama performansını arttıracak çalışmalar yürütülmüştür. Algılama aralığını ve algılayıcının performansını arttırmak için, farklı Raman pompa konfigürasyonlarında Raman yükseltmesi incelenmiştir. Sadece frekans ölçümleri kullanılarak, 150 km'lik bir fiberde 50 m'lik uzamsal çözünürlük ve 5 °C'lik çözünürlükle sıcaklık ölçümleri Raman karşı yayılım pompası ile başarılmıştır. Birlikte yayılım Raman pompası ile 100 km'lik bir fiberde 20 m'lik uzamsal çözünürlükte ve 1,7 °C'lik çözünürlükte sıcaklık ölçümleri başarılmıştır. Brillouin sinyalinin güç ve frekansının birlikte kullanımı ile de, 50 km fiber boyunca 3,5 °C'lik sıcaklık ve 85 με'lik gerilim çözünürlüğü 5 m'lik hata payıyla teşhis edilmiştir [29].

Günday'ın yaptığı tez çalışmasında; kablo boyunca sıcaklık verilerine ulaşabilmek için, Raman saçılmasına dayalı dağıtık sıcaklık ölçüm metodu kullanılmıştır. Kablo boyunca

gerginlik verilerinin elde edilmesi için ise, sıcaklık ve Brillouin frekans kayması bilgilerinin kullanıldığı kendiliğinden Raman ve Brillouin saçılması esaslı teknikten faydalanılmıştır. Deneysel veriler ışığında, 1550 nm dalga boyunda tek modlu fiber kablo kullanılarak 5 km uzunluğunda yüksek gerilim enerji kablosu için eş zamanlı dağıtık sıcaklık ve gerginlik ölçümleri elde edilmiş ve belirli kriterler altında benzetimleri gerçekleştirilmiştir [30].

Günday ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, yüksek gerilim kablosunda sıcaklık ve gerginlik algılama benzetimleri, 1550 nm' de tek modlu fiber kablo kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada, Raman saçılması ile dağıtık sıcaklık algılama tekniği kullanılmıştır. Matlab 6.5 programı kullanılarak 5 km uzunluklu kablo boyunca sıcaklık ve gerginlik benzetimleri yapılmıştır. [31].

Frazao ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, gerilme ve sıcaklık ölçümleri için bir Raman FBG lazer algılayıcı sunulmuştur. Bir pompa lazer kullanarak, Raman Bragg ızgara algılayıcı elde etmek mümkün olmuştur. Bragg ızgaralar 10 km'lik bir mesafeye kurularak algılama sitemi çalıştırılmıştır [32].

Martins ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, Rayleigh saçılmayla birlikte Raman FBG lazer kullanan FWM (Four-Wave Mixing) temelli sıcaklığa duyarlı olmayan bir gerilim algılayıcı üzerinde çalışılmıştır. Raman ve Rayleigh saçılmalarının birlikte güçlendirdiği iki lineer boşluk lazer algılayıcısını biçimlendirmek için iki FBG kullanılmıştır. Fiberin düşük dağılma katsayısı nedeniyle, FWM kullanan iki lazer kullanmak mümkün olmuştur. Bu yapılandırmada iki algılayıcıdan sadece birisi gerilime duyarlıdır. Sinyal algılayıcının dalga boyu ile dönüştürülmüş sinyal arasındaki fark 2 pm / με hassasiyetinde bir gerinim katsayısı sunmaktadır [33].

Koyamada ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, dağıtık gerinim ve sıcaklık ölçümleri için optik zaman bölgesi yansımaölçeri (OTDR) kullanılmıştır. Bu teknik kullanılarak, 8 km uzunluğundaki bir fiberde 1 °C hassasiyetle sıcaklık ölçümleri yapılmıştır [34].

Alahbabi ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, Brillouin saçılmasının frekans kayması algılaması ile Raman kuvvetlendirmesine dayalı genişletilmiş aralıklı dağıtık sıcaklık algılayıcı üzerinde çalışılmıştır. Yayılımlı Raman pompası ile 100 km algılama

mesafesinde 0,8 °C'lik sıcaklık hassasiyeti başarılmıştır. Yayılımsız Raman pompası ile de 150 km algılama mesafesinde 5,2 °C'lik sıcaklık hassasiyeti 50 m'lik yerel hatayla tespit edilmiştir [35].

Yuelan Lu ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, faz OTDR kullanılarak bir dağıtık vibrasyon algılayıcı geliştirilmiştir. Geniş bant akustik frekans bileşenleri kalem kırma vibrasyonu ile oluşturulmuştur. Bu vibrasyon, dağıtık vibrasyon algılayıcılarıyla ölçülmüş ve tanımlanmıştır. Kalem kırma ölçümü çelik veya beton köprülerin kırıklarını önceden tanımlayan akustik benzetme için uygulanan standart bir tekniktir. Noktasal doğruluk 5 m ve en yüksek frekans cevabı 1 KHz'dir [36].

Gifford ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, fiber boyunca saçılan Rayleigh saçılma sinyalinin sıcaklığa bağımlı spektral kayması ölçümüne dayalı, dağıtık fiber optik sıcaklık algılama tekniği geliştirilmiştir. Rayleigh saçılmasını ölçmek için taranan dalga boyu girişimölçeri kullanılmıştır [37].

Posey ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, optik darbe ile zaman bölmeli çoğullama kullanan Rayleigh saçılımına dayalı bir fiber optik gerinim algılayıcı geliştirilmiştir. Bu algılayıcı 0,5 m'den küçük ayar aralığına ve 2 KHz'de 1 nε / Hz'den küçük gerinim hassasiyetine sahiptir [38].

Signorini ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, derece indisli çok modlu fiber ve standart tek modlu fibere dayalı yüksek performanslı Raman dağıtık sıcaklık algılama sistemi için geliştirilmiş teknikler sunulmuştur. Bu tekniklerle oluşturulan kodlamalar uzamsal çözünürlük için çok uzun ölçüm kapasitesine imkân sağlamaktadır [39].

Farahani ve Gogolla'nın yaptığı çalışmada uzun mesafeli fiber optik Raman algılayıcıları dağıtık sıcaklık ölçümleri için kullanılmıştır. Bu amaçla optik fiber frekans domen reflektometrisi uygulanmıştır. Raman yoğunluğu tek modlu ve çok modlu fiberler içinde teorik olarak oluşturulmuştur. Böylece fiber optik Raman algılama için uygun bir algılayıcı elemanı ve dalga boyu belirlenmiştir. Bunun yanında uzun algılayıcı fiberler için sıcaklıktaki hatalar teorik olarak analiz edilmiştir [40].

Bello ve Vo-Dinh tarafından yapılan çalışmada, uyarıcı ve toplayıcı yüzey destekli Raman saçılması (SERS) sinyali için bir fiber optik sistemi geliştirilmiştir. SERS fiber optik aygıtta uygun değerli şartların yerine getirilmesi için fiber tipi, fiber alt katman geometrisi ve diğer deneysel parametreler incelenmiştir. Ayrıca SERS fiber optik algılayıcının performansını ölçmek için, lineer dinamik aralık, tekrar üretile bilirlik, algılama limiti gibi çeşitli parametreler de incelenmiştir [41].

Hartog'un yaptığı çalışmada, bir fiber optik dağıtık sıcaklık algılayıcının tasarım, çalıştırılma ve performans prensipleri incelenmiştir. Geri saçılım gücü ile fiber üzerindeki birden fazla noktada sıcaklık değişimlerini algılamak için OTDR kullanılmıştır. 100 m uzunluğundaki bir fiber üzerinde yapılan çalışmada 1 m'lik uzamsal çözünürlük ve 1 °C'lik ölçüm doğruluğu ile sıcaklık algılamaları gerçekleştirilmiştir [42].

El-Taher ve diğerlerinin yaptığı çalışmada 22 km uzunluğundaki bir fiberden saçılan Rayleigh saçılması ve çok noktalı FBG reflektörleri üzerinde bir Raman fiber lazeri gerçekleştirilmiştir. 100 GHz aralıklı 22 adet lazer hattı oluşturulmuştur. Kurulan bu devre, yaklaşık 100 nm genişliğinde Raman kazancı oluşturmanın mümkün olduğunu göstermiştir [43].

Bolognini ve diğerlerinin yaptığı çalışmada rastgele Raman saçılması ve kodlu OTDR temelli dağıtık sıcaklık algılayıcılarının davranışları teorik ve deneysel olarak çalışılmıştır. Özellikle, simpleks kodlamaya uygun genlik modülasyonu kullanılarak yüksek performanslı bir tasarım uygulanmıştır. Parçalı Raman kuvvetlendirmesi ve direk algılama kullanılarak algılama aralığı genişletilmiştir. 17 m uzamsal çözünürlüğe ve 5 K sıcaklık çözünürlüğüne sahip 30 km'lik saçılımı kaydırılmış fiber boyunca, verimli ve ekonomik bir dağıtık sıcaklık algılayıcı teorik olarak kanıtlanmış ve deneysel olarak başarılmıştır [44].

Stokes ve Vo-Dinh'in yaptığı çalışmada uzak ve yerinde ölçümler için tekli fiber optik sisteminde SERS temelli fiber algılayıcı tanımlanmış ve değerlendirilmiştir. Algılayıcının kalbi özel bir tek mod optik fiberden tasarım yapılmıştır. Tek bir fibere dayalı bu özel tasarım yerinde ölçümler için pratiklik sunmaktadır. Tek fiberdeki lazer uyarımı ve SERS sinyal ışımasını birlikte taşındığı için, uzak tip algılayıcının optik parametreleri basit ve daha kararlıdır [45].

Palmieril ve Schenato'nun yaptığı çalışmada Rayleigh saçılmasına dayalı dağıtık fiber algılayıcıların sunduğu özellikler incelenmiştir. Bu dağıtık optik algılayıcılar, ışıkla cisim arasındaki etkileşimden meydana gelen saçılma aşamalarına dayanmaktadır. Bu çalışmada fiberde oluşabilecek Rayleigh, Raman ve Brillouin saçılmalarından Rayleigh saçılmasına dayanan fiber optik algılayıcılar incelenmiştir. Verilen optik bir frekans için, Rayleigh temelli algılayıcılarla ışığın üç temel özelliği olan yoğunluk, faz ve polarizasyonu kullanmaktadır. Bu çalışmada tüm bu algılama mekanizmaları temel prensipler, temel akış teknikleri ve uygulama alanları açısından incelenmiştir [46].

Froggat ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, bir Rayleigh saçılma tabanlı dağıtık ölçüm tekniği geliştirilmiştir. Standart polarizasyonlu fiber kullanılarak gerilim ve sıcaklık değişimlerinin tespiti incelenmiştir. Saçılmanın ölçümünde yüksek hassasiyetli optik frekans bölgesi reflektometrisi (OFDR) kullanılmıştır [47].

Wait ve Newson'un yaptığı çalışmada, Rayleigh ve Brillouin saçılmalarındaki yoğunluk oranlarının sıcaklığa bağımlı olduğu deneysel olarak görülmüştür. Bu sonuç sıcaklık ve gerilme sonucu oluşan Brillouin saçılmasında bilinen frekans bağımlılığı ile birleştirildiğinde rastgele Brillouin saçılması ile sıcaklık ve gerilme ölçen dağıtık fiber algılayıcının yapımına imkân tanımıştır [48].

Ju Han Lee ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, Raman kuvvetlendirme temelli kendiliğinden sıcaklık ve gerilim ölçümü incelenmiştir. Bunun için erbium katkılı fiber (EDF) ve FBG'nin birleşiminden oluşan bir algılama probu kullanılmıştır. Bu ölçümler için 50 km uzunluğunda fiber kullanılmış, 11 dB'lik sinyal gürültü oranında (SNR) yüksek kaliteli sinyal algılanabilmiştir [49].

Kazuo Hotate yaptığı çalışmada, Brillouin dinamik ızgara (BDG) ve Brillouin saçılmasını beraber kullanarak, 10 mm çözünürlükte Brillouin optik kod bölgesi analizi (BOCDA) tekniğiyle gerilmenin ve sıcaklığın ayırt edici dağıtık ölçümünü gerçekleştirmiştir [50].

A. Wosniok ve diğerleri yaptıkları çalışmada, tek modlu fiber boyunca gerilmenin ve sıcaklığın belirlenmesi için dağıtık fiber optik görüntüleme sistemi geliştirmişlerdir. Sistem temel olarak Brillouin optik frekans bölgesi analizi (BOFDA) tekniğine dayanmakta ve maliyetleri düşürmek için yan bant tekniği kullanılmaktadır. Ayrıca bir tek DFB lazer

kullanılarak frekans girişim etkileri yok edilmiş ve ayarlı lazer kaynağına gerek kalmamıştır [51].

Hyungwoo Kwon ve diğerleri yaptıkları çalışmada, 36 km uzunluktaki fiber hat boyunca tek evreli algılama sistemi kullanarak uzun mesafeli dağıtık ölçme sistemi geliştirmişlerdir. Akusto optik modülatör (AOM) kullanılarak optik darbenin sönüm oranı geliştirilmiştir. Sonuçta, optik fibere uygulanan sıcaklık ve gerilme hesaplanmış, Lorentzian algoritması da kullanılarak, Brillouin frekans kayması da başarılı bir şekilde ölçülmüştür [52].

A.H. Reshak ve diğerlerinin yaptıkları çalışmada, optik fiberde Brillouin ve Rayleigh saçılmalarının davranışları incelenmiştir. Benzetimler baskın gürültü kaynağı olan tek evreli Rayleigh gürültüsünün (CRN) hesaplanmasında kullanılmıştır. Analizler sıcaklık ve gerilme neticesinde oluşan geri saçılmaların karakteristiklerini incelemektedir. Yeni bir algoritma sayesinde, bilinen bir pompa gücü için, geri yansıyan Brillouin sinyalinin etkin bir şekilde belirlenmesi sağlanmıştır [53].

Yosuke Mizuno ve diğerleri yaptıkları çalışmada, BOCDA tekniği ile dağıtık gerilme ölçümü için yüksek Brillouin kazançlı bir tellürit cam fiber kullanmışlardır. İlk olarak, BOCDA'nın uzamsal çözünürlüğü tellürit fiber kullanılarak değerlendirilmiştir. Yüksek Brillouin kazançlı fiberin kullanılmasıyla, açıkça görülmüştür ki uzamsal çözünürlük Rayleigh saçılma uyarılma gürültüsü tarafından kısıtlanmaktadır. Tellürit fiber kullanılarak, BOCDA tekniği ile Brillouin frekans kayması 6 mm'lik uzamsal çözünürlükle 1 cm'lik gerilme uygulanan alanda başarılı bir şekilde ölçülmüştür [54].

Yunqi Hao ve diğerleri yaptıkları çalışmada, Brillouin optik zaman bölgesi reflektometresi (BOTDR) algılama sistemindeki kendiliğinden Brillouin saçılma spektrumu SNR'nin geliştirilme etkilerini teorik olarak incelemiş ve deneysel olarak modüleli darbe biçiminin değiştirilmesinin etkilerini göstermişlerdir. Aynı darbe genişliğinde veya aynı uzamsal çözünürlükte, SNR, üçgen şeklindeki darbede daha yüksektir. Meydana gelen spektral genişliklerin daralması ve algılama uzaklıkları, üçgen darbe yerine dikdörtgen darbe kullanımıyla yaklaşık iki kat arttırılmıştır [55].

Romeo Bernini ve diğerleri yaptıkları çalışmada, sıcaklık / gerilme ölçümleri için tam frekans tabanında fiber optik Brillouin algılama tekniği deneysel doğrulamasını

göstermişlerdir. Hem sinyal gürültü oranını geliştiren hem de uzun mesafelerde ölçüm yaparken meydana gelen bölgesel olmayan etkilerle başa çıkan, algılama fiberi boyunca Brillouin kazanç profili ve frekans tabanında ölçmelerle ilgili orijinal bir formül şekli sunmuşlardır [56].

Y.D. Gong yaptığı çalışmada, optik fiberdeki yükseltilmiş Brillouin etkisi tabanlı dağıtık sıcaklık ve gerilme algılayıcıyla ilgili analizlere yer vermiştir. Optimize başlatma gücü, optimize tasarım rehberi gibi kısa ve uzun mesafeli dağıtık sıcaklık ve gerilme algılayıcılarına ait bazı yeni kuralları sunmaktadır [57].

V. Lecoeuche ve diğerleri yaptıkları çalışmada, 25 km uzunluktaki algılayıcı fiberin herhangi bir 2 m'lik kısmına uygulanan sıcaklık veya gerilmenin yeterince hızlı algılanması hassasiyetinde, yükseltilmiş Brillouin saçılması tabanlı tek sonlu bir fiber algılayıcı için yeni bir çalışma sunmuşlardır. Bu çalışma aynı zamanda, faz modülasyon etkisini, prob dalga gücü için önemli bir sınırlama faktörü etkisini ortaya koymaktadır [58].

P.C. Wait ve diğerleri yaptıkları çalışmada, dar bant genişlikli darbeli lazer teknolojisindeki gelişmeler ve düşük kayıplı fiber filtreler sayesinde Brillouin sinyalinin Rayleigh sinyalden ayırılabileceğini belirtmişlerdir. Teorik analizleri, Brillouin saçılması tabanlı sıcaklık algılama tekniğinin kendiliğinden oluşan Raman tabanlı algılayıcı sistemlerinden daha uzun algılama sağlayacağını göstermektedir [59].

Himansu Shekhar Pradhan ve P.K. Sahu yaptıkları çalışmada, BOTDA tabanlı 150 km'lik dağıtık algılayıcı sisteminde performans artışını göstermişlerdir. Alıcı optimizasyonu için, faz modülasyonu ve küresel dönüşümsel hesaplama tabanlı optimizasyon tekniğinin Farksal dönüşüm algoritması birleşimiyle oluşan bir BOTDA sistemini sunmuşlardır. 150 km'lik algılama mesafesi için genlik modüleli prob dalgasıyla kıyaslandığında 3,3 dBm'lik bir SNR iyileştirmesi sağlamışlardır [60].

Haroldo T. Hattori ve diğerleri yaptıkları çalışmada, akıllı malzeme ve yapılar için dağıtık algılamada Raman ve Brillouin etkilerinin özel uygulamaları olduğunu belirtmişlerdir. Bu tür algılayıcılarda, fiberin dağıtık bir algılayıcı gibi davrandığını, kilometrelerce uzunluk boyunca gerilmenin ve sıcaklığın algılanabileceğini aynı zamanda bu bilgileri işleyecek verileri de fiberin taşıyabileceğini belirtmişleridir. Fiberin Brillouin ve Raman sisteminde

çalıştırılmasının optimizasyonu için, küçük etki alanlı özel bir eliptik fiber tasarlanmıştır. Böylece algılayıcıların uzun mesafeleri kapsaması ve düşük güçlü lazerlerin kullanılması amaçlanmıştır [61].

Xue-Feng Zhao ve diğerleri yaptıkları çalışmada, aktif termometre tabanlı dağıtık Brillouin optik algılayıcı kullanılan denizaltı boru hattı izleme sistemi sunmaktadırlar. Sistem, doğrudan ısı değişimi gösteren, ısınma ve soğuma sırasında optik algılayıcının frekans kaymasını sağlayan boru hattına paralel bir termal kabloyu içermektedir. Çökme senaryoları ve sudaki ısı transferlerinin farklı davranışlarından kaynaklı serbest gerilmeler algılanabilmiştir. Isıl kararlılık, uzamsal süreklilik ve büyüklüğü içeren üç özellik sıcaklık zaman geçmişlerinden çıkarılmıştır. Önerilen sistem ile deneysel testler yürütülmüştür. Sonuçlar, izleme sisteminin çalıştığını kanıtlamıştır [62].

Lijuan Zhao ve diğerleri yaptıkları çalışmada, 110 KV'lık fiber komposit denizaltı kablosunu 1 m'lik uzamsal çözünürlükle kurdukları BOTDR sistemiyle izleyebilmişlerdir. Bu sistem, şu anda Çin'de kullanılmaktadır. Yayında sunulan izleme sistemi deniz altı kablosunun güvenli çalışmasından emin olmak için uygun bir izleme sağlamaktadır [63].

V. Lecoeuche ve diğerleri yaptıkları çalışmada, yüksek dereceli Stokes ve anti-Stokes bileşenleri bastırmada ve çok yüksek dönüştürme verimliliği için Bragg ızgara kullanılan bir Brillouin fiber lazer konfigürasyonu önermişlerdir. Teorik bir çalışma sunulmuş ve deneysel olarak yapılabilirlik ispatlanmıştır. Bu çalışma sistemi lazer bant genişliğini azaltmada ve teknik gürültüyü düşürmede çözüm sağlamıştır [64].

A. Perez-Herrera ve M. Lopez-Amo yaptıkları çalışmada, optik yükseltme ve çoklama sistemlerini kullanan ağları içeren, fiber optik algılayıcılarda kullanılan farklı türdeki çoklama ağlarını tanımlamış ve karşılaştırmışlardır. Özellikle sağlıklı, uzak ve dağıtık Brillouin ağlarında yoğunlaşılan, çoğullamalı ve dağıtık algılayıcı ağları gösterilmiştir [65].

Bum Kwon ve diğerleri yaptıkları çalışmada, onlarca kilometrelik hat boyunca izinsiz girişleri algılama ve yerini gösterme yeteneğine sahip kompakt bir BOTDA algılama sistemini sunmuşlardır. Sistemde genel olarak bir lazer diyod ve iki adet elektro-optik modülatör kullanılmaktadır. Bir saldırı etkisi benzetimi, gerilme veren bir düzenekle elde

edilmiştir. 1,5 sn içinde 4,81 km uzunluğundaki optik fiberde 3 m'lik bir çözünürlük sağlanmıştır [66].

Nan Shiqing ve Gao Qian yaptıkları çalışmada, Si Jiaying şehrinin güney kısmında yer alan bir demir madeninin bir bölümünü, toprak yüzeyinin çökmesini incelemek amacıyla fiziksel ve mekaniksel bir test modeli olarak belirlemişlerdir. Modelin gerilme dağılımını izlemek için BOTDR tekniği kullanılmıştır. Test sonuçlarına göre BOTDR tabanlı dağıtık algılama yönteminin yüksek hassasiyet, kolay yerleşim, girişime karşı güçlü bağışıklık gibi avantajlarından dolayı iyi bir gerilme test tekniği olduğu belirtilmiştir [67].

Zhi Zhou ve diğerleri yaptıkları çalışmada, buz yapılarının zarar görme karakteristikleri ve gerilme durumlarını izlemek için bir erken uyarı sistemi sunmuşlardır. İlk olarak, bir buz bloğuna ve buz krişine yük altındaki eksenel ve eğilme davranışlarını anlamak için FBG ve BOTDA/R algılayıcıları yerleştirilmiştir. İkinci olarak, test koşulları altında buz yapılarının zarar görme ve hasar süreci analitik olarak elde edilmiştir. Son olarak da erken uyarı sisteminin doğruluğu ve buz yapılarının davranışları 34 saat boyunca sürekli izlenmiştir. Sonuçta optik algılayıcılı erken uyarı sisteminin buz yapılarının uzun süreli izlenmesinde etkili olduğu görülmüştür [68].

Femi Tanimola ve David Hill yaptıkları çalışmada, önceden yapılmış sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG) ve sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) boru hatlarında kullanılan kaçak tespit sistemlerinden örnekler vererek fiber optik dağıtık sıcaklık algılama kullanarak yapılan kaçak tespit ve üçüncü taraf soygun algılama sistemi prensiplerini açıklamışlardır. Çalışma sonucunda, çevrenin korunması yanında boru hattı verimliliğini ve bütünlüğünü sağlayan fiber optik dağıtık akustik algılama (DAS) hırsız izleme sistemi incelenmiştir [69].

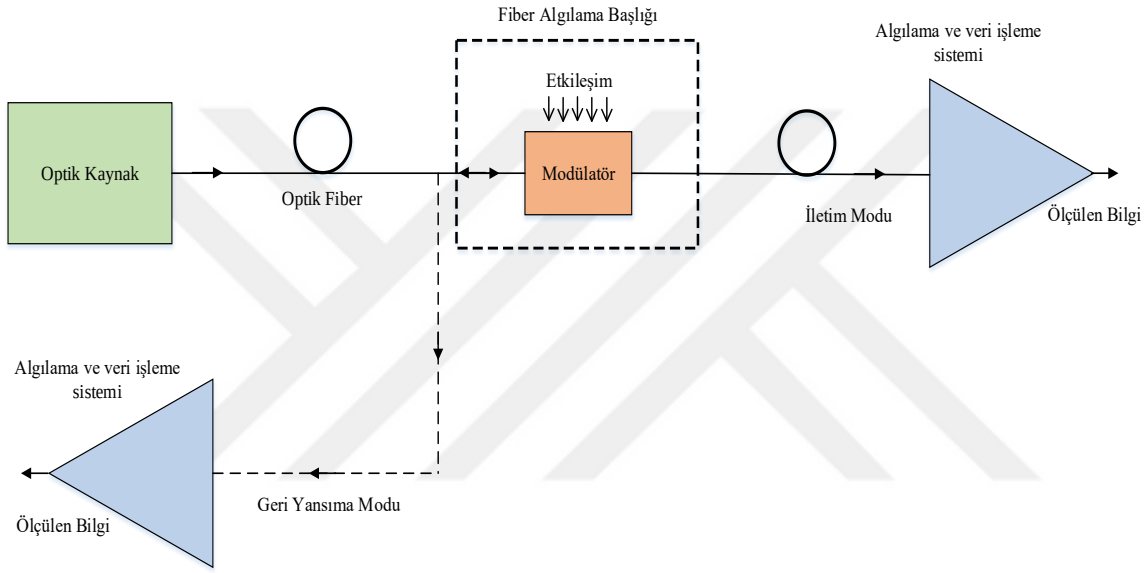
Si Zhi Yan ve Lee Sheng Chyan'ın yaptıkları çalışmada, yükseltilmiş Brillouin saçılması eşiği, algılama mesafesi, sinyal gürültü oranı ve uzamsal çözünürlük kavramlarının BOTDR sisteminin performansı için boru hatlarında kritik parametreler olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada, fiber optik doğrusalsızlığı, istatiksel yaklaşımlı yükseltilmiş Brillouin saçılma gibi kavramlarla beraber teorik yaklaşımlar kadar benzetimlerin de sonuçları sunulmuştur. Sonuçlara göre, SNR'yi 11 dB kadar bastırmak maksimum algılama mesafesini 110 km'ye kadar çıkarmıştır. Bunun yanında, alıcı tarafta

SNR'yi geliştirmek için lazer darbeleri çalışırken 3 bitlik simplex kodlama kullanılmıştır. Benzetim sonuçlarına göre SNR'de 1,38 kazanç görülmüştür [70].

Yingchun Ding ve diğerlerinin yaptıkları çalışmada, farklı frekanslı optik fiberlerdeki yükseltilmiş Brillouin saçılması ile oluşturulan iki adet sürekli dalga (CW) kullanılarak darbe sinyalinin kontrol şeklini deneysel olarak göstermişlerdir. Sinyal darbesinin dalga şekli toplam giriş gücüne bağlı olarak "tam optiksel" bir yolla modüle edilmiştir. Bu metot sadece nano saniye genişlikli ışık darbesi için uygundur. Işık ile ışığın kontrolü için yeni bir metot sunmuşlardır [71].

3. FİBER OPTİK ALGILAYICILAR

Özellikle gerginlik, sıcaklık, akustik, akışkan hızı, gaz seviyesi ve konum gibi değişimlerin yüksek hassasiyetle ölçümüne imkân sağlayan fiber optik algılayıcılar; günümüzde elektriksel olarak izlemenin zor, pahalı ya da tehlikeli olduğu ortamlarda kullanım için uygun bir donanım haline gelmiştir. Şekil 3.1, fiber optik bir algılayıcının temel yapısını göstermektedir.



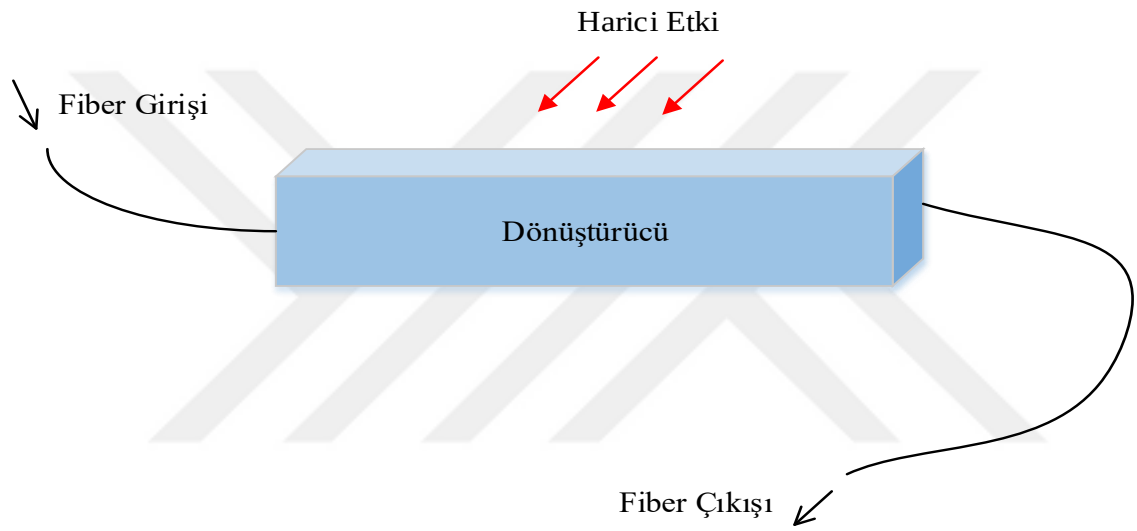
Şekil 3.1. Fiber optik algılayıcı temel yapısı [72]

Fiber optik bir algılayıcı, fiziksel bir parametreyi optik bir çıkışa çevirir. Her fiber optik algılayıcının en önemli bölümü, fiziksel değişim ile ilişkili bir enerjiyi başka bir enerji biçimine dönüştürücü birimidir. Dönüştürücü türüne bağlı olarak, tüm fiber optik algılayıcılar iki ana kategoriye ayrılır: dıştan etkileşimli (pasif) ve içten etkileşimli (aktif) algılayıcılar.

Fiber optik algılayıcıların yaygın kabul gören diğer bir sınıflandırması, ilgili fiziksel büyüklüklerin ölçümlerine bölgesel olarak izin verip vermediğine bağlıdır; bu durumda bunlar noktasal algılayıcılar olarak adlandırılır. Fiziksel büyüklüğün değişimi bir mesafeden ve bir konumun bir fonksiyonu olarak elde edilebiliyorsa bunlar da dağıtık algılayıcı olarak adlandırılır.

3.1. Dıştan Etkileşimli Fiber Optik Algılayıcılar

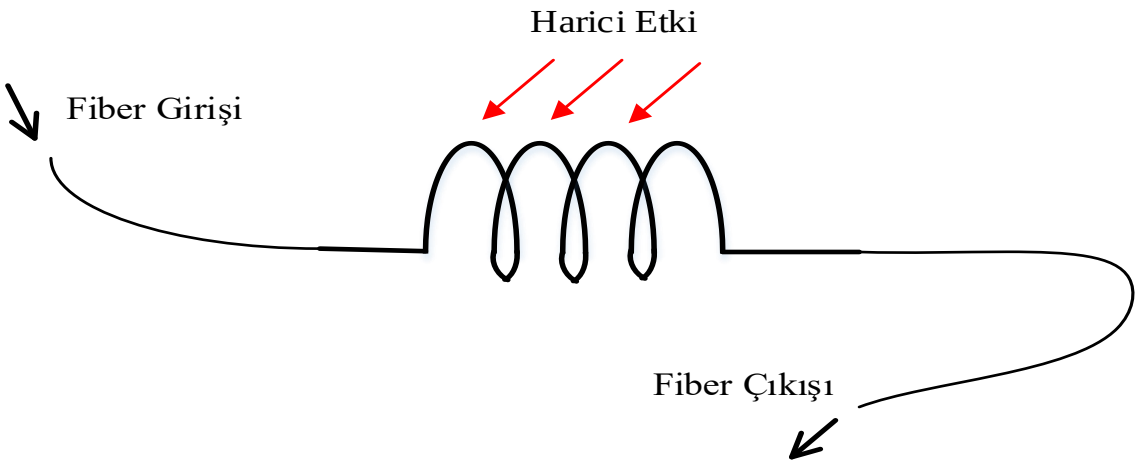
Dıştan etkileşimli algılayıcılarda optik fiber, optik sinyali, fiberin dışındaki algılama bölgesine yönlendiren bir iletim mekanizması olarak işlev görür ve burada, ilgili fiziksel parametreye yanıt olarak modüle edilir ve daha sonra aynı (veya farklı olarak) topluca işleme için bir dedektöre yönlendirilir. Şekil 3.2'de bu tip algılayıcıların genel şeması verilmektedir. Bu tip algılayıcılarda, ışık fiberden ayrıldığında istenmeyen çevresel gürültülerden etkilenebilir [72].



Şekil 3.2. Dıştan etkileşimli fiber optik algılayıcılar [72]

3.2. İçten Etkileşimli Fiber Optik Algılayıcılar

İçten etkileşimli algılayıcılarda, optik fiber, hem optik sinyali algılama bölgesine optik sinyali aktaran araç olarak hem de dönüştürücü olarak işlev görür. Şekil 3.3 bu tip algılayıcıların genel şemasını vermektedir.



Şekil 3.3. İçten etkileşimli fiber optik algılayıcılar [72]

İçten etkileşimli fiber optik algılayıcılar, algılanan parametreden etkilenen ışık karakteristiklerine göre sınıflandırılabilir. Bunlar da yoğunluk, dalga boyu, faz veya polarizasyon algılayıcı olarak adlandırılır.

Bunlar içerisinden özellikle faz modülasyonu, fiber temelli girişimölçer algılayıcıların geliştirilmesinde büyük katkı sağlamıştır. Aktif algılayıcıların büyük ve önemli bir alt sınıfı girişimölçer algılayıcılardır. Yüksek performansa sahip algılayıcıların çoğu bu grup içerisinde yer alır.

3.3. Fiber Optik Girişimölçer Algılayıcılar

Fiber optik girişimölçer algılayıcılar en hassas ve en yaygın olarak kullanılan noktasal algılayıcılardır. Girişimölçer teknik, ışığın fiber boyunca ilerledikçe, uyarılan optik faz değişiminin tespitine dayanır [73].

Genellikle, giriş ışığı iki yol arasında eşit olarak bölünür, biri referans ölçme aracı olarak kullanılırken diğer kol ilgili büyüklük tarafından etkilenir. İki fiber yolu, iki yol arasındaki optik faz farkına doğrudan bağlı olan ve ölçülen büyüklüğün değeriyle ilişkili olabilen bir girişim paterni oluşturan algılayıcının çıkışında bir araya gelir.

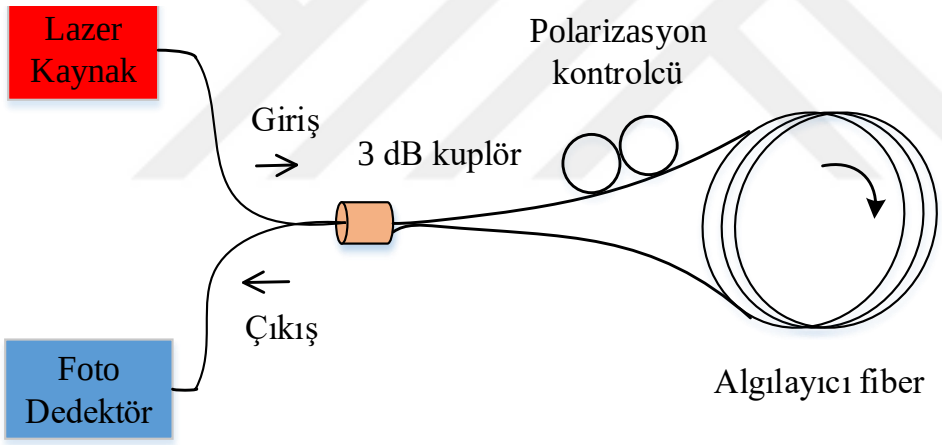
Girişimölçer algılama yöntemleri Sagnac, Michelson, Mach-Zehnder ve Fabry-Perot olarak dört gruba ayrılmaktadır.

3.3.1. Sagnac girişimölçer

Fiber optik Sagnac girişimölçeri (SI'ler) 1970'lerde Sagnac girişiminin bilinen ilkesine dayanılarak geliştirilmiştir. Fiber optik bir SI'de, giriş ışığı, 3 dB'lik bir fiber birleştirici ile zıt yönde ilerleyen iki parçaya bölünür ve bu iki karşı yayılma yapan ışın, aynı birleştiricide tekrar birleştirilir [74].

Böyle bir girişimölçerin üretimi, geleneksel bir 3 dB kuplörün uçlarını bağlayarak kolayca elde edilebilir. Giriş ışığı polarizasyonunu kontrol etmek için algılama fiberine bir polarizasyon denetleyicisi bağlanır.

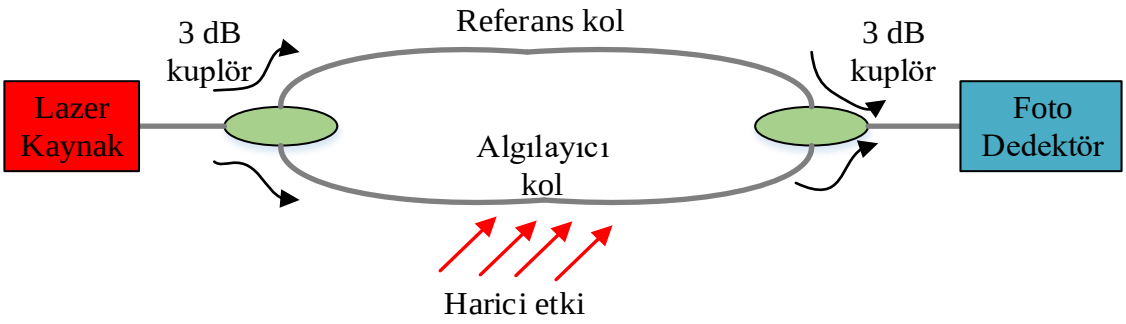
Şekil 3.4, bu girişimölçerin şematik gösterimini vermektedir. Sistemde oluşan faz farkları dönüş hızının bir ölçüsü olan frekans farklılıklarına dönüşür.



Şekil 3.4. Sagnak girişimölçerin şematik gösterimi [72]

3.3.2. Mach-Zehnder girişimölçer

Faz değişimlerinin tespit edilebildiği bir yol olan Mach-Zehnder konfigürasyonu algılayıcı yapılarında yaygın bir şekilde kullanılır [75]. Bu yapı fiber optik ve ekipmanları ile birlikte kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Şekil 3.5'de bir yarı iletken lazer kaynaklı tipik bir Mach-Zehnder girişimölçer algılayıcı yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Serbest boşluk yapılı Mach-Zehnder girişimölçerin şeması [72]

Bu düzenekte 3 dB kuplör, lazer kaynaktan gelen ışın demetini algılayıcı ve referans fiberlere 50/50 şeklinde böler. Fiberlerden geçen sinyaller çıkışta benzer bir 3 dB kuplör ile girişime uğrayarak bir fotodedektör üzerine düşürülür.

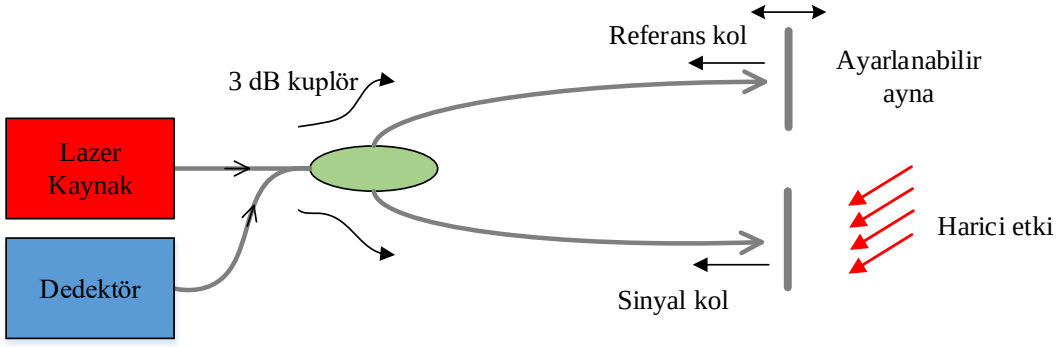
Bu yapıdaki girişimölçerin en büyük avantajı, çok küçük düzeydeki faz değişimlerini algılayabilmesidir. Algılayıcı fiber koluna yapılacak eklemeler veya değişiklikler ile kuvvet, basınç, sıcaklık ve manyetik alan gibi çeşitli çevresel parametreleri ölçmede kullanılabilir.

3.3.3. Michelson girişimölçer

Fiber tabanlı Michelson girişimölçer (MI) konfigürasyonu Mach-Zehnder konfigürasyonuna çok benzer ve bir MZI'nin yarısını temsil eder. MI çalışması, her kolun ucuna yerleştirilen aynalardan yansıyan ışınların her biri iki koldaki ışınlar arasındaki girişime dayanır [76]. Böyle bir yansıma tipi konfigürasyon, kompaktlık ve kurulum kolaylığı avantajlarına sahiptir, fakat kaynağın yansıma kaynaklı istikrarsızlıklarına ve girişim yolundaki sapma yansımalarına karşı daha savunmasızdır.

Şekil 3.6'da gösterilen MI konfigürasyonunda görülen özel ışık kaynağı kullanmak, girişimölçer ölçümün doğasında bulunan faz belirsizliğinin ve yansımalar ile ilgili problemlerin ortadan kaldırılmasına olanak tanır.

Temel Michelson girişimölçer fiber optik algılayıcı yapısı şekil 3.6'da gösterilmiştir.



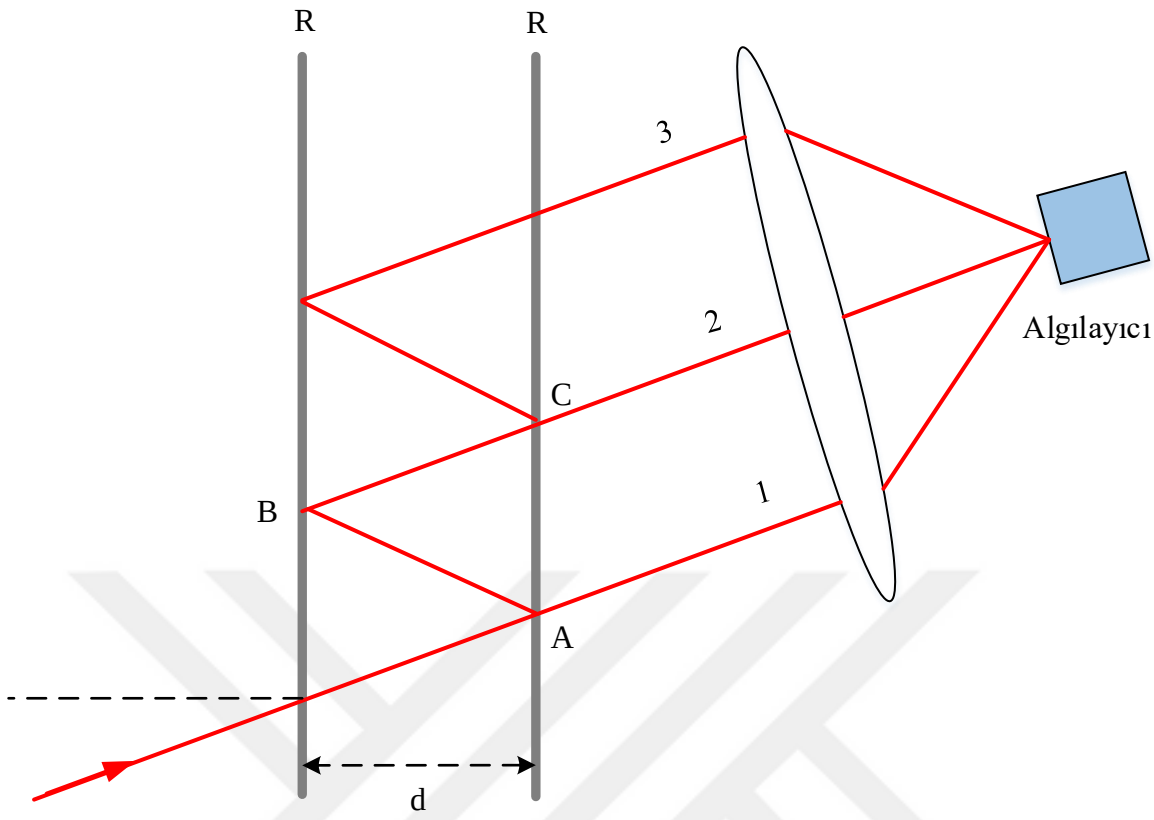
Şekil 3.6. Temel Michelson girişimölçer fiber optik algılayıcı yapısı [72]

Her iki fiberin ucunda bulunan yansıtıcılar aynı özellikte ve fiberlerin uzunlukları eşit ise yansıyan sinyallerin arasında faz farkı bulunmaz. Eğer algılayıcı koldaki fiberin yapısında, uzunluğunda, yansıtıcı yüzeyde veya yansıtıcı ile fiber arasındaki mesafe gibi parametrelerde farklılık varsa, referans ve algılayıcı fiberden yansıyan ışık demetleri arasında faz farkı meydana gelir.

3.3.4. Fabry-Perot girişimölçer

Bir Fabry-Perot girişimölçer (FPI) genellikle belli bir aralıkla ayrılmış iki paralel yansıtıcıdan oluşur. İki dielektrik arasındaki aynalar veya ara yüzeyler yansıtıcı olarak kullanılabilir. Girişim, iki paralel yansıtıcıda hem yansıyan hem de iletilen ışınların çoklu üst üste binmeleri nedeniyle oluşur [77].

Sonuç olarak, bu tür bir girişimölçerin yansıyan ve iletilen spektrumları, boşluk uzunluğu, ortamın kırılma indeksi ve aynaların yansıtma özelliklerinin bir fonksiyonudur. Şekil 3.7'de basit bir Fabry-Perot girişimölçer algılayıcı yapısı görülmektedir.



Şekil 3.7. Fabry-Perot girişimölçer algılayıcı yapısı [72]

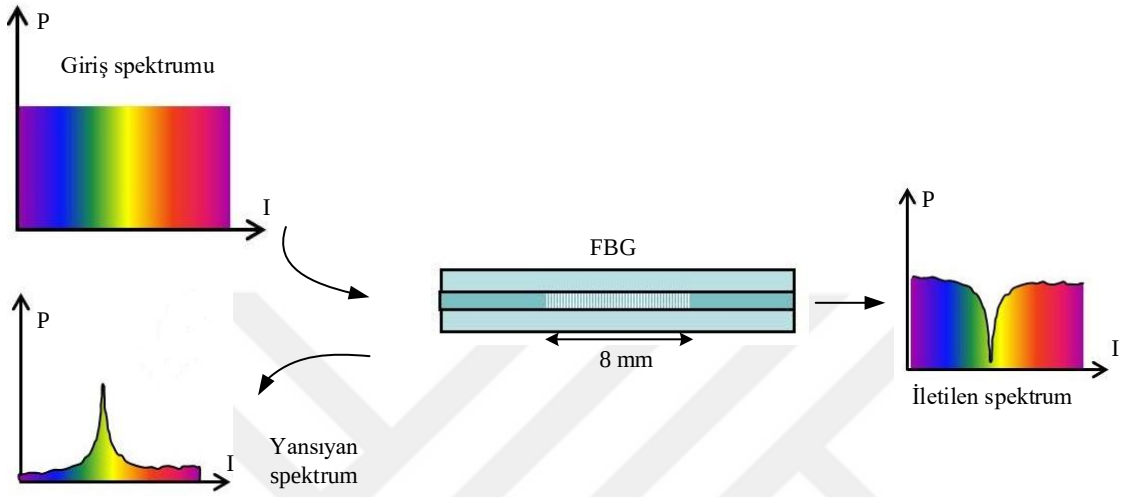
Paralel yüksek yansımaya sahip yüzeylerde, gelen ışın birçok kez yansıdıktan sonra dışarıya çıkmaktadır. Her yansıma sırasında faz kayması meydana gelmektedir. Böylelikle dışarıya çıkan ışığın şiddeti arttıkça daha küçük değişimler ölçülebilmektedir. Bu yapıdaki algılayıcılar sıcaklık, mesafe, akustik dalga ve manyetik alan gibi ölçümlerde kullanılmaktadır [1].

3.4. FBG Tabanlı Algılayıcılar

FBG sıcaklık, basınç, gerilme kuvveti gibi bazı parametrelere duyarlı, bir çeşit optik filtredir.

Optik fiber kablo üzerinde yaklaşık 1 cm uzunluğunda bir yer kaplayan FBG, kendisine gelen geniş bantlı ışığın spektrumunda, belli bir dalga boyunu yaklaşık 1 nm`lik genişlikte geri yansıtır. Gelen ışığın spektrumunun geri kalanını ise geçirir. Yansıyan dalga boyu ise yukarıda belirtildiği gibi sıcaklık, gerilme kuvveti gibi parametrelere bağlı olarak değişir [14].

Bir FBG, optik fiberdeki çekirdeğin içerisindeki periyodik kırılım indisinin yapısıyla dalga boyuna bağlı filtre/yansıtıcı olarak çalışabilir. Ne zaman geniş spektrum ışık hüzmesi ızgara içerisinde sınırı asarsa (çarparsa), enerjisinin bir kısmı iletilir ve bir kısmı da geri yansır. FBG'nin iletim ve yansıma spektrumu Şekil 3.8'de görülmektedir.



Şekil 3.8. Fiber Bragg ızgaranın iletim ve yansıma spektrumu [78]

Yansıyan ışık sinyali çok dar olacaktır ve iki ızgara saçağı arasındaki aralığı Λ'a karşılık gelen Bragg dalga boyunda merkezlenmiş olacaktır. Şekle ait indiste veya fiberin karakter sıklığında gerilim veya sıcaklıktan kaynaklanan değişmeler Bragg dalga boyunda kaymaya sebep olur [78-79].

Daha önce bahsedildiği gibi, FBG'in spektrum kaymalarının, dış etkenlerle ızgarada meydana gelen değişikliklerin bir fonksiyonu olmasından dolayı algılama uygulamalarında kullanılması caziptir.

Mekanik olarak uygulanacak bir gerilim kuvveti veya kırılım indeksinde gerilimin optik etkisinden dolayı oluşabilecek bir değişiklik fiziksel olarak ızgaranın aralıklarını arttıracak veya azaltacaktır, böylece germe Bragg dalga boyunu kaydırmış olur. Mikro gerilim başına dalga boyu değişimi tipik olarak 1,2 pm, veya 1% gerilme için 12 nm'dir.

4. DAĞITIK ALGILAMA TABANLI FİBER ALGILAYICILAR

"Dağıtık algılama", fiber optik kablonun her bir noktasından fiziksel değişimleri ölçebilen bir yöntemi tanımlar. Bu yöntemde, fiber kablo algılayıcı olarak kullanılır. Bu sebeple, geleneksel algılayıcıların yerine, fiberin karakteristik özelliklerinden faydalanılmaktadır. Algılayıcı sistemde kullanılan kablolar, genellikle haberleşme sistemlerinde kullanılan optik fiberlerin aynısıdır [30].

Fiber optik kablolu dağıtık algılamada, kablo içerisine gönderilen ve geri saçılan ışığın özelliklerinde, sıcaklık ve gerginliğe bağlı bir değişim meydana gelir. Saçılmada, Rayleigh saçılması aynı frekansta, Raman ve Brillouin saçılmaları ise gönderilen ışığa göre farklı frekanslarda meydana gelmektedir.

Dağıtık fiber optik algılayıcı sistemi ilk kez 1981 yılında Southampton Üniversitesi tarafından geliştirilmiştir [80]. Daha sonra dağınık fiber optikli sıcaklık algılama ilk olarak Hartog ve Payne tarafından gösterilmiştir [81]. Çalışmada, sıvı çekirdekli silika elyafın uzunluğu boyunca Rayleigh saçılması katsayısının sıcaklık ile indüklenen varyasyonu kullanmışlardır.

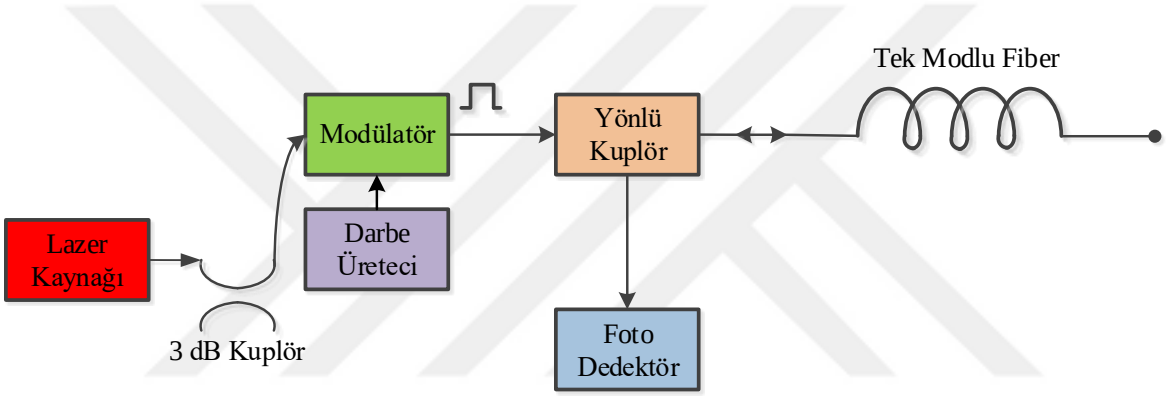
Dakin ve diğerleri, anti-Stokes ve Stokes Raman geri saçılımı katsayısı değişkenlerini kullanarak sıcaklık ölçümünü gösterdiler [82]. Hartog ve Dakin'in çalışmalarından sonra, bu tip algılayıcı sistemleri hızla gelişmeye başlamıştır [83,84].

Anti-Stokes Raman geri saçılmış ışık, Rayleigh geri saçılmış ışıktan yaklaşık 30 dB daha zayıftır. Ancak, sıcaklık duyarlılığı yüksektir. Bu nedenle, Raman saçılımı dayalı sistemler çeşitli üreticiler tarafından piyasaya sürülmüştür.

1989'da Brillouin saçılması frekans kaymasının gerilme ve sıcaklık ile değiştiği rapor edilmiştir [85]. O zamandan beri dağıtık algılama sistemleri için Brillouin saçılması çok fazla ilgi görmüştür. Çünkü gerilme, fiberlerin dayanıklılığı için çok önemli bir parametre olmasının yanında, büyük yapıların bütünlüğünün izlenmesi için de dağıtık algılama sistemlerinde sıklıkla kullanılır. Ayrıca, Brillouin tekniği uzun mesafe ölçümü için önemli bir potansiyel sunmaktadır. Çünkü Brillouin frekans kayması küçüktür (yaklaşık 11 GHz)

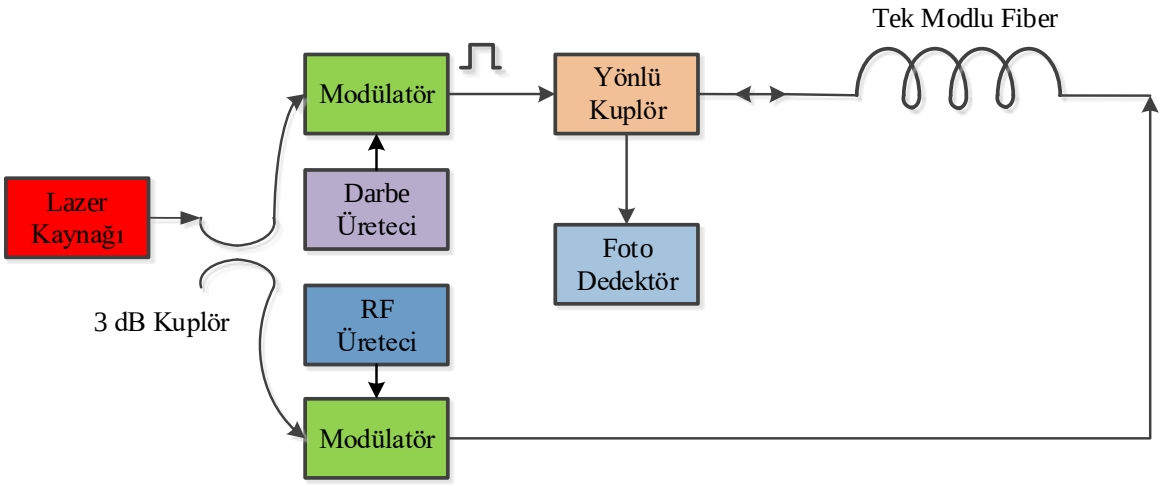
ve bu nedenle minimum kaybın olduğu 1550 nm bandında kullanılabilir [86]. Raman tekniğinde, bu dalga boyu bölgesinde pompa, Stokes ve anti-stoke ışık dalga boyları eş zamanlı oluşamaz.

Fiber kabloların sağlamlık ve mesafe ölçümünde sıklıkla kullanılan OTDR tekniğine benzer şekilde, BOTDR tekniğinde kendiliğinden oluşan Brillouin saçılması kullanılmaktadır. Fiber kabloda ölçülecek parametrenin (gerilme ve sıcaklık vb.) yeri, darbeli lazer ışığın gönderilerek geriye saçılan frekansın alıcıda alınması arasındaki zaman aralığı kullanılarak hesaplanmaktadır. BOTDR tabanlı algılamaya ait düzenek Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1. BOTDR tabanlı algılama

BOTDA tekniğinde ise, yükseltilmiş Brillouin saçılması yöntemi kullanılmaktadır ve genellikle fiber kablonun her iki ucundan sinyal uygulanmaktadır. Darbeli ışık ve sürekli dalga, her iki ucundan fiber kablo içerisine gönderilmektedir. Bu iki sinyal arasındaki frekans farkı Brillouin frekans kayması değerine ayarlanmaktadır. Darbeli sinyal kayıp oluştururken, sürekli dalga sinyali Brillouin saçılması boyunca kazanç oluşturmaktadır. Böylelikle BOTDA işareti zamanın bir fonksiyonu olarak elde edilmektedir. BOTDA tabanlı algılamaya ait düzenek Şekil 4.2'de görülmektedir.



Şekil 4.2. BOTDA tabanlı algılama

Dağıtık algılama algılayıcılarının uzun mesafeler boyunca sıcaklık ve gerilme algılama kapasitesini arttırmak için fiber tabanlı Brillouin lazerler [87] ve yükselteçler [88] tasarlanmıştır [89,90].

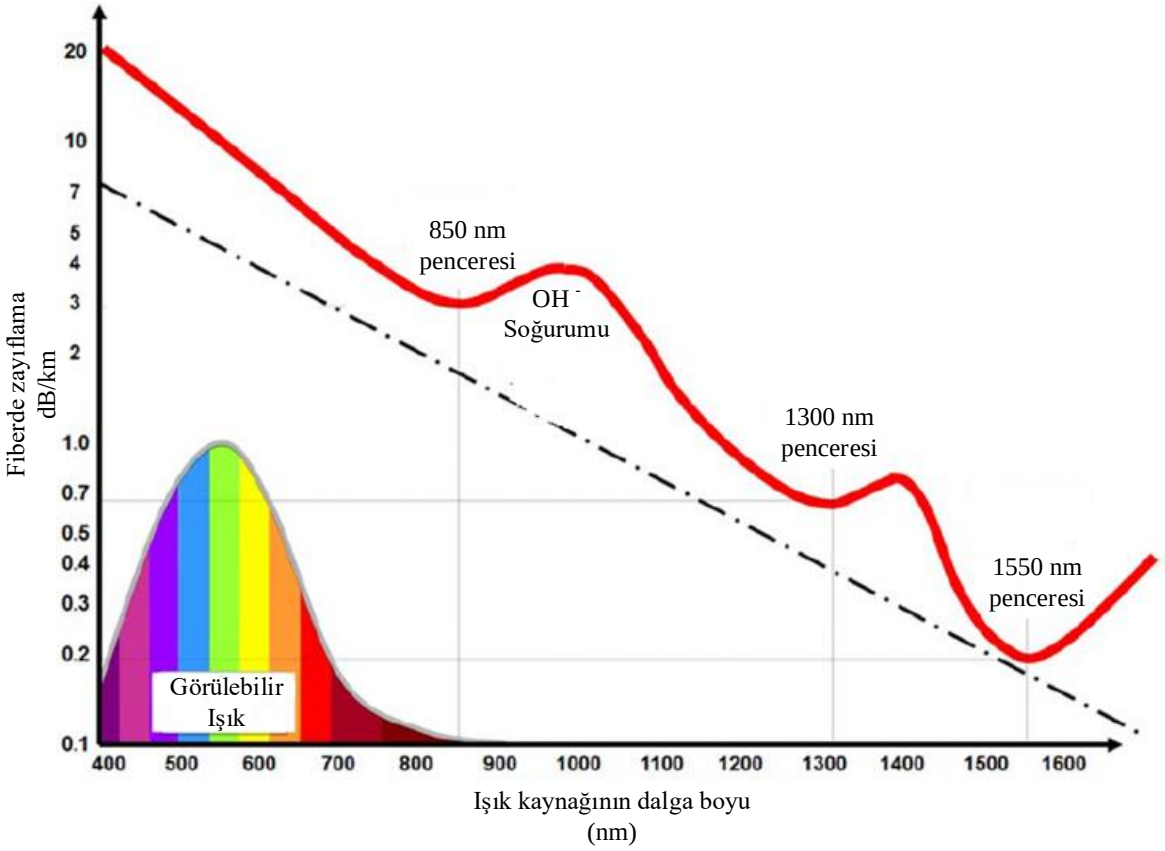
Dağıtık optik fiber sistemler üç aşamada geliştirilmiştir. Kısa mesafeli sistemler (2 km), orta mesafeli sistemler (10 km) ve uzun mesafeli sistemler (30 km ve üzeri) [91-92]. Bazı özel uygulamalar şu anda kullanılan dağıtık optik fiber sistemleri mesafe olarak hala yetersiz kılmaktadır ki, bu uygulamalardan bazıları enerji santralleri, şebeke yangın izleme sistemleri, kömür madenleri, petrol kuyuları patlama koruma sistemleri, yüksek hızlı tren hatları ve uzun demiryolu hatlarındaki deformasyon izleme sistemleridir [93].

4.1. Dağıtık Algılama Tabanlı Fiber Algılayıcıların Çalışma Prensibi

Dağıtık optik fiber algılayıcı sistemlerinin çoğu, OTDR prensibine benzer bir sistemle çalışmaktadır. OTDR tabanlı cihazlar kullanılarak, fiber kablo ek yeri kayıpları ölçülebilmekte veya kablo üzerindeki kırılma ve bozulmaların konumu bulunabilmektedir. Bu teknikte, bir ışık darbesi fiber kablo içerisine gönderilmekte ve geriye saçılan Rayleigh ışığı analiz edilmektedir. Işık darbesinin fiber içerisine gönderilmesi ile geriye saçılma süresi farkı hesaplatılarak, saçılmanın gerçekleştiği nokta bulunabilmektedir [30].

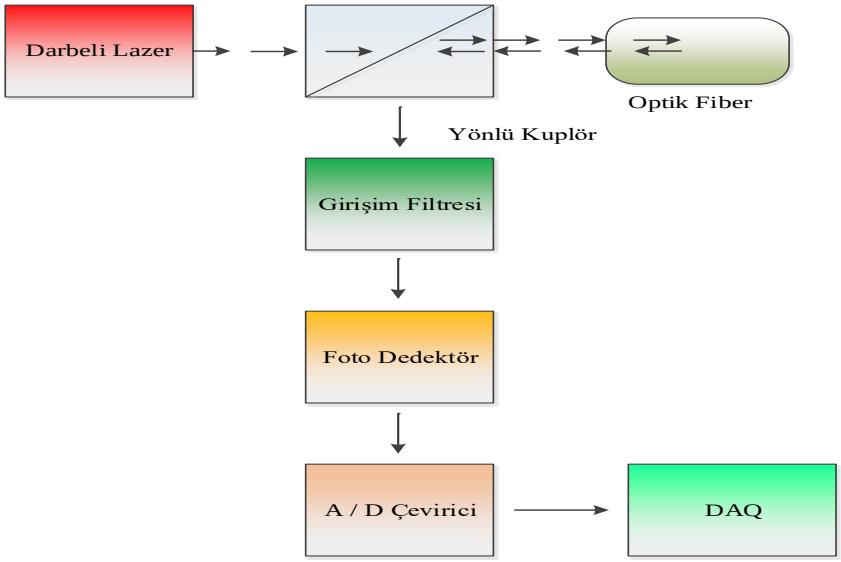
Bir lazer ışık kaynağı, fiber optik kablo ve bir sinyal işleme devresi kullanılarak OTDR sistemi oluşturulabilir. Dağıtık fiber optik algılayıcı sistemlerinde kullanılan tek modlu fiber kablolar kilometrelerce uzunluktadırlar. Dolayısıyla gönderilecek sinyalin

zayıflaması bu tür algılayıcılarda önemlidir. Zayıflama, sinyalin yeniden yükseltilmeden önce iletilebilecek maksimum büyüklüğü belirleyen temel etkendir. Genellikle zayıflama, "birim uzunluk başına desibel" cinsinden ifade edilir. Optik fiberde işaret zayıflamasına neden olan pek çok bileşen vardır. Bunlar; malzeme yapısı, üretim ve saflaştırma tekniği gibi bileşenlerdir. Tek modlu fiberin dalga boyuna bağlı zayıflama eğrisi Şekil 4.3'de görülmektedir. Optik haberleşme ve algılayıcı sistemlerinde kullanılan tek modlu fiberin üç iletim penceresi vardır. Bu tez çalışmasında fiber zayıflamasının en düşük olduğu üçüncü iletim penceresinde yer alan, 1550 nm dalga boylu (yaklaşık 193 THz) lazer kaynak seçilmiştir.



Şekil 4.3. Tek modlu fiberin dalga boyuna bağlı zayıflama eğrisi

Geri saçılan optik sinyal oldukça zayıfladığı için fazla miktarda gürültü içerir. Bu sebeple, sıcaklık veya gerginlik değişimlerini doğru bulabilmek amacıyla ortalama alma ve veri işleyici sistemler kullanılmalıdır. Şekil 4.4'de dağıtık algılayıcı ölçüm sisteminin genel bir yapısı görülmektedir.

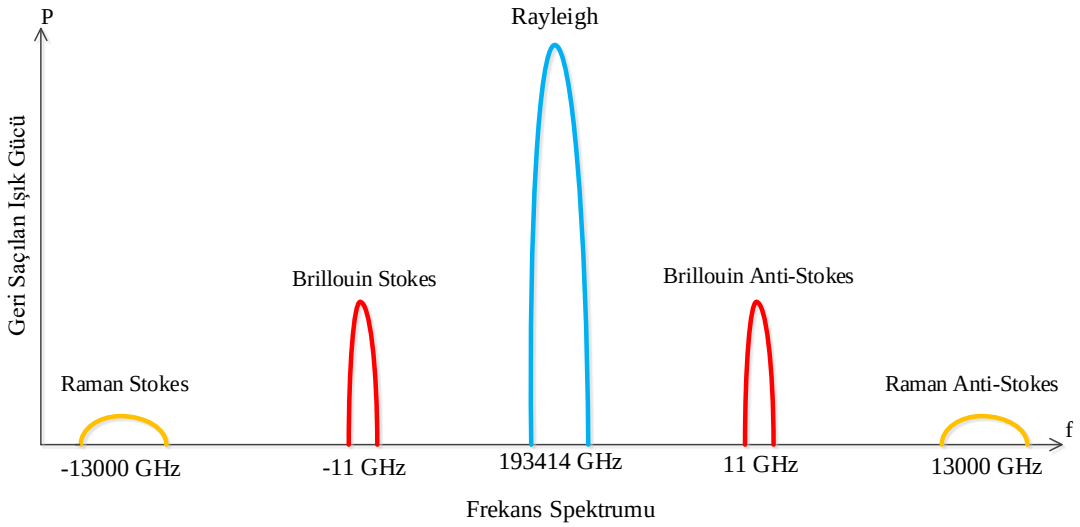


Şekil 4.4. Fiber optik dağıtık algılayıcı ölçüm sistemi

4.2. Optik Fiberdeki Saçılmalar

Saçılma; gelen ışının yabancı bir maddeye çarpmasıyla oluşan dağılma ve ışık kaybıdır. Işık sinyali, fiber kablo içinde herhangi bir sebeple düzensiz bir şekilde gelirse saçılmaya uğrar ve saçılıma uğramış sinyal o bölge tarafından emilerek ilerlemesi engellenebilir. Fiber içindeki ışık, fiberi oluşturan cam molekülleri ile etkileşir. Işık dalgaları, atomlar ile esnek çarpışma yapar ve ışık dalgası saçılıma uğrar. Eğer ışık saçılımından sonra, tam yansıma sağlayan açıdan daha büyük bir açı ile çepere çarparsa fiber kabloyu terk eder ve kaçar [94].

Dağıtık fiber optik algılayıcı sistemleri; Rayleigh, Raman ve Brillouin saçılmaları ölçümleri ile kullanılırlar. Rayleigh saçılmasında fiber kabloya gönderilen optik ışınla saçılan ışının frekansı aynı iken, Raman ve Brillouin saçılmalarında frekans farkı olmaktadır. Bu iki sinyal arasındaki fark, Raman saçılması için 13 THz, Brillouin saçılması için ise 11 GHz kadardır. 1550 nm dalga boyunda fiberde oluşan Rayleigh, Brillouin ve Raman kendiliğinden ışık saçılımı spektrumu Şekil 4.5'de görülmektedir.



Şekil 4.5. 1550 nm dalga boyunda fiberde oluşan saçılmalar

Oluşan saçılma olayında, fotonlar yüksek enerji seviyesine geçerek daha yüksek frekanslı anti-Stokes bileşenleri, enerji kaybedip daha düşük frekanslı olanlar ise Stokes bileşenleri meydana getirirler.

Rayleigh saçılması, ışığın dalga boyuna oranla küçük ölçekte oluşan, rastgele yapılı homojensizlikten kaynaklanır. Bu homojensizlikler kendilerini kırılma indisinde dalgalanmalar olarak gösterir ve soğuma sırasında cam örgüye yerleşen yoğunluktan kaynaklanır. Yoğunluk homojensizlikleri yüzünden oluşan indis dalgalanmaları yüzünden, hemen hemen bütün doğrultularda oluşan ardışık saçılmadır [26,94].

Raman saçılması, fiber içerisine gönderilen ışık ile ortamın moleküler yapısında ortaya çıkan titreşimsel moleküler modlar arasındaki etkileşimin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Saçılma, fotonların frekansında azalma ve artmaya neden olur. Frekansı azalan Raman saçılması bileşenleri Stokes çizgilerini, frekansı artan bileşenler ise anti-Stokes çizgilerini oluşturur [31,94].

Raman saçılması ileri yönde meydana gelir ve Brillouin saçılmasına göre üç kat kadar büyük bir optik güç seviyesine çıkabilir [26]. Rayleigh saçılması sıcaklık değişimlerine düşük, Raman saçılması ise sıcaklık değişimlerine yüksek tepki verir. Bu nedenle, dağıtık sıcaklık algılayıcı olarak Raman saçılması sıklıkla kullanılmaktadır [31].

4.2.1. Brillouin saçılması

Brillouin saçılması, akustik dalga boyunca pompa ve Stokes alanları arasında etkileşim olarak tanımlanabilir. Üretilen akustik dalga, ortamın kırılma oranını ayarlar. Brillouin saçılması, fiber içerisinde ilerleyen ışık dalgası ile ısıl olarak meydana gelen kendiliğinden akustik dalgaların etkileşiminin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır [95,96].

Optik fiberdeki ışık saçılması Eş. 4.1'de görülen Maxwell eşitliklerinden türetilmiştir.

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \tag{4.1}$$

P, dalga yayılması üzerine dielektrik etkisinin modellemesiyle elektrik dipollerinden indüklenen polarizasyon alanı, c boşluktaki ışık hızıdır. E, elektrik alanı ve μ_0 boşluktaki manyetik geçirgenliktir. İndüklenen polarizasyon alanı P, lineer olarak E elektrik alanına bağlıdır. Işık dalgası yayılması doğrusal bir rejim izler. Ayrıca, anlık dielektrik cevap varsayılırsa; [97]

$$P = \varepsilon_0 \chi^{(1)} E = P_0 \tag{4.2}$$

$\chi^{(1)}$ birinci dereceden lineer dielektrik duyarlılığı, ε_0 boşluktaki dielektrik geçirgenliğidir. P_0 indüklenmiş doğrusal polarizasyon alanıdır. Eksensiz ve homojen bir ortamda, $\chi^{(1)}$ skalar bir büyüklük haline indirgenir böylece dalga Eş. 4.2

$$\nabla^2 E - \frac{n^2}{c^2}\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \tag{4.3}$$

haline gelir.

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}} = \sqrt{1 + \chi^{(1)}} \tag{4.4}$$

n, dielektrik kırılma indeksidir ve ε dielektrik geçirgenliktir. Bu nedenle, lineer bir ortamda ışık yayılması sadece yayılma hızı açısından boşluktaki ışık yayılmasından farklıdır. Bununla birlikte, dielektrik duyarlılık değişikliklerden kaynaklanan saçılma olgusunu

açıklamak için, homojen ortam hipotezi kaldırılmalıdır. Homojen olmayan ortamda, dielektrik duyarlılığının zamansal ve mekansal dalgalanmaları aşağıdaki Eş. 4.5 ile ifade edilebilir [97].

$$P = \varepsilon_0 \chi^{(1)} E + \varepsilon_0 \Delta\chi^{(1)} E = P_0 + P_d, \qquad P_{d=} \Delta\varepsilon . E \tag{4.5}$$

Eş. 4.1, Eş. 4.6'ya dönüşür.

$$\nabla^2 \mathrm{E} - \frac{\mathrm{n}^2}{\mathrm{c}^2} \frac{\partial^2 \mathrm{E}}{\partial \mathrm{t}^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 \mathrm{P_d}}{\partial \mathrm{t}^2} \tag{4.6}$$

Sağ taraftaki bileşen, saçılan dalgaların kaynak terimini gösterir. Tensör elemanı $\Delta\varepsilon_{ij}$ iki farklı duruma ayrılabilir. Tensörler, vektör, skaler büyüklükler ve diğer tensörler arasındaki doğrusal ilişkileri tanımlayan geometrik nesnelerdir. Bir tensör sayısal değerlerin çok boyutlu bir dizisi olarak temsil edilebilir. Birincisi $\Delta\varepsilon$ skalardır, ikincisi $\Delta\varepsilon_{ij}^{t}$ tensöreldir. Yani,

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \Delta\varepsilon\delta_{ij} + \Delta\varepsilon_{ij}^{t} \tag{4.7}$$

Skalar terim $\Delta\varepsilon$, basınç, bir sistemdeki rastgelelik ve düzensizlik olarak tanımlanan entropi, yoğunluk ve sıcaklık gibi termodinamik büyüklüklerin dalgalanmalarıyla hesaplanır ve Rayleigh saçılması ile Brillouin saçılmasından sorumludur. Rayleigh saçılması entropi dalgalanmalarından kaynaklanırken, Brillouin saçılması, ortamdaki basınç dalgaları yayılımıyla indüklenen, materyal yoğunluğu değişimlerine bağlıdır.

Skalar terim $\Delta\varepsilon$, ortamın esneklik ve yalıtkanlık özelliklerindeki dalgalanmalara bağlıdır. Eş. 4.8 ile açıklanabilir [97].

$$\Delta\varepsilon = \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}\right)_{\mathrm{T}} \Delta\rho + \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\mathrm{T}}\right)_{\rho} \Delta\mathrm{T} \tag{4.8}$$

Eş. 4.8'de ρ, malzeme yoğunluğu ve T ise sıcaklıktır. Doğrusal düzende Eş. 4.8'in sağ tarafındaki ikinci kısım tamamen ihmal edilebilir, böylece skalar saçılma esas olarak yoğunluk dalgalanmalarına bağlı olur [90]. Bu bahsedilen durum iki bağımsız

termodinamik değişken olan p basıncı ve s entropisindeki değişimlerden meydana gelir.

$$\Delta\rho = \left(\frac{\partial\rho}{\partial p}\right)_s \Delta p + \left(\frac{\partial\rho}{\partial s}\right)_p \Delta s \tag{4.9}$$

Eş. 4.9'un sağ tarafındaki birinci terim kendiliğinden Brillouin saçılmasını oluşturan adiyabatik yoğunluk dalgalanmalarını gösterir. İkinci terim izobarik yoğunluk dalgalanmalarına (yani entropi dalgalanmaları) karşılık gelmektedir ve kendiliğinden Rayleigh saçılmasına yol açmaktadır. Entropi dalgalanmaları ortamda değişmez iken, Rayleigh saçılmasındaki fotonlar esnek olarak saçılırlar. Basınç dalgalanmaları temel olarak ortamda ilerleyen akustik dalgalardan oluşur. Böylece Brillouin saçılmasındaki saçılan fotonlar, gelen ışığa bağlı olarak optik frekans kaymasına sahiptirler. Kendiliğinden Brillouin saçılmasıyla ilgili frekans farkı, Brillouin frekans kayması olarak bilinir [97].

Eş. 4.8 ve Eş. 4.9 birleştirilerek, küçük sıcaklık değişiklikleri varsayımıyla, basınç değişiklikleri Δp ye bağlı, yalıtkanlık katsayısı değişimi $\Delta\varepsilon$:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}\left(\frac{\partial\rho}{\partial p}\right)_s \Delta p \tag{4.10}$$

olur. Quantum- mekanik tanımlamasında, akustik enerji, fonon olarak tanımlanan, bir enerji miktarı olarak kendini gösterir. Fonon popülasyonu termal çalkalanmadan kaynaklanır, yani Bose-Einstein kanununa bağlı olarak bu popülasyon ortam sıcaklığına bağlı olur. Bu nedenle $T > 0$ durumunda, belirli bir miktarda termal olarak üretilen akustik enerji fiberde yayılır. Eş 4.10, yalıtkanlık sabite dalgalarının genliği sonucu oluşan bu akustik dalgaların genliğine bağlıdır. Akustik (basınç) dalga yayılımı, d'Alember denkliği ile ifade edilir.

$$\nabla^2 p - \frac{\rho}{K}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \tag{4.11}$$

Burada ρ; malzeme yoğunluğu, K ise kütle sıkıştırılabilirlik modülüdür. Eş. 4.11'in çözümüyle, V_A hızında yayılan basınç dalgalarına ait eşitlik,

$$V_A = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \tag{4.12}$$

olur. Ses hızı havada 347 m/s'ye eşitken, erimiş silika fiber tipik değeri daha yüksektir. Örneğin, çevre sıcaklığında ve atmosferik basınçta ρ=2,21.10^3 kg/m^2 ve K= 7,37.10^{10} Pa için V_A=5775 m/s'dir. p dalgasındaki herhangi bir basınç, malzeme yoğunluk değişiklikleri $\Delta\rho$'de değişikliğe sebep olur ki, aşağıdaki dalga yayılması Eş. 4.13 ile bulunur [97].

$$V_A^2\nabla^2(\Delta\rho) - \frac{\partial^2(\Delta\rho)}{\partial t^2} - \Gamma_B\frac{\partial(\Delta\rho)}{\partial t} = 0 \tag{4.13}$$

Γ_B ; ortamdaki ses zayıflaması modellemesi olan akustik sönüm katsayısıdır. Eğer akustik dalga için tek renkli geçici bir davranış kabul edilirse, buna bağlı yoğunluk değişimi dalgaları aşağıdaki eşitlikle ifade edilir [97].

$$\Delta\rho = \frac{1}{2}\left[A(z,t)e^{i(\omega_B t - k_B r)} + A^*(z,t)e^{-i(\omega_B t - k_B r)}\right] \tag{4.14}$$

ω_B ve k_B sırasıyla açısal hız ve akustik dalganın dalga vektörüdür. Optik fiberin z ekseni boyunca yayılan tek renkli bir ışık dalgasına bağlı elektrik alanı:

$$E(r,t) = e_p\frac{1}{2}\left[E_0(z,t)e^{i(\omega_0 t - k_0 r)} + E_0^*(z,t)e^{-i(\omega_0 t - k_0 r)}\right] \tag{4.15}$$

ω_0 açısal frekans, k_0 dalga vektörü ve e_p polarizasyon durumunu belirleyen birimsel vektördür. Eş. 4.15'de optik fiber bölgesi boyunca dağılan elektrik alanı ihmal edilebilir, böylece düzlemsel dalga ifadesi olarak dikkate alınabilir. Eğer akustik bir dalga aynı anda fiber içinde olursa, elektrik alanı bir polarizasyon alanı indükler. Bu eşitlik,

$$P_d(r,t) = \Delta\varepsilon E(r,t) = \frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}\Delta\rho(z,t)E(r,t) \tag{4.16}$$

Ortam yoğunluğu ρ nin dielektrik sabitesi ε olan bağımlılığı elektrostiriftik katsayısı γ ile tanımlanır.

$$\gamma = \rho_0\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho} \tag{4.17}$$

ρ_0 ortamın ortalama yoğunluğudur. Elektrostiriftik katsayısı, boylamsal elasto-optik katsayı p_{12} ve kırılma indisi n gibi ortamın bazı yapısal parametrelerine bağlıdır.

$$\gamma = n^4 \varepsilon_0 p_{12} \tag{4.18}$$

Bu nedenle, dielektrik duyarlılık değişimi $\Delta\chi$ aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta\chi = \frac{\gamma}{\varepsilon_0}\frac{\Delta\rho}{\rho} \tag{4.19}$$

Eş. 4.15 ve 4.16 yı Eş. 4.17 içine koyarak ve Eş. 4.18'i kullanarak;

$$P_d = e_p \frac{\gamma}{4\rho_0}\left[(\omega_0 + \omega_B)^2 A E_0 e^{i((\omega_0+\omega_B)t-(k_0+k_B)r)} + (\omega_0 - \omega_B)^2 A^* E_0 e^{i((\omega_0-\omega_B)t-(k_0-k_B)r)}\right] + c.c \tag{4.20}$$

elde edilir. c.c kompleks eşleniktir. İndüklenen polarizasyon P_d tarafından oluşan karışma ile $(\omega_0 - \omega_B)$ $(\omega_0 + \omega_B)$ frekanslarında yeni spektral bileşenler meydana gelir. Bunlardan daha düşük frekanslı olan Stokes dalgası ve daha yüksek frekanslı olan anti-Stokes dalga olarak adlandırılır. Bu iki optik frekansın oluşumu kendiliğinden Brillouin saçılmasının ana oluşumudur [97].

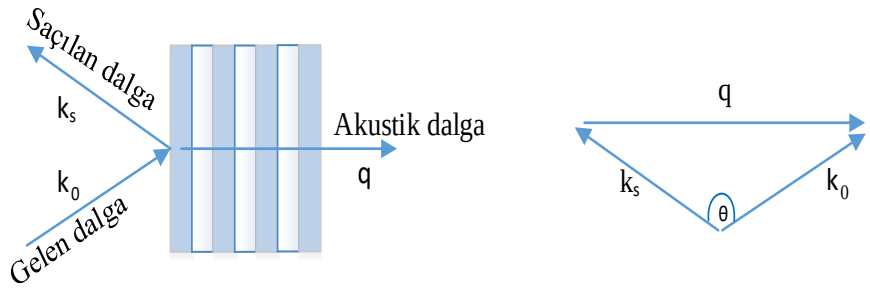
Faz eşleme durumunu değerlendirmek için, ışık dalgaları ve akustik dalga arasındaki etkileşimi Bragg kırınımı gibi kabul etmek yararlıdır. Akustik dalga ortam yoğunluğunu değiştirir bu da dielektrik geçirgenliğinin modülasyonuna sebep olur. Işık dalgası bu kırınım ızgarası sebebiyle saçılır ve Doppler etkisi yüzünden bir frekans kaymasına uğrar. Enerji ve momentum korunumu için Bragg koşulları kullanılır ve sadece Stokes dalgası dikkate alınırsa;

$$\omega_0 = \omega_s + \omega_B \tag{4.21}$$

$$k_0 = k_s + k_B \tag{4.22}$$

O,S,B harfleri sırasıyla gelen ışık dalgası, saçılan Stokes dalgası ve akustik dalgayı temsil eder. Frekans ve dalga numaraları, akustik dalgalar ve elektromanyetik dalgalar için dispersiyon ilişkisiyle bağlantılıdır.

$$|k_0| = \frac{n\omega_0}{c} \qquad |k_s| = \frac{n\omega_s}{c} \qquad |k_B| = \frac{\omega_B}{V_A} \tag{4.23}$$



Şekil 4.6. Brillouin saçılması boyunca Stokes bileşenlerinin oluşumu [89]

Kütlesel bir ortamda, saçılma her yönde oluşur. Eş. 4.21 ve 4.22 kullanılarak, akustik dalganın açısal frekansı şu eşitlikle hesaplanabilir:

$$\omega_B \approx 2V_A|k_0| \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \tag{4.24}$$

θ gelen ve Stokes dalgası arasındaki açıdır. Eş. 4.24 gösterir ki; Stokes dalgasının frekans kayması saçılma açısı, θ saçılma açısına bağlıdır. Bu frekans kayması da Brillouin frekans kayması olarak bilinir.

Optik fiberlerde gelen ışık dalgasına bağlı olarak saçılan ışık ileri ve geri yönlü olarak fiber ekseni yönünde kılavuzlanır. Eş. 4.24'e göre Brillouin frekans kayması ileri saçılma q=0 ° için kaybolur, geri saçılma q=180 ° için tepe değerine ulaşır. Brillouin geri saçılan Stokes dalgası frekans kayması gelen ışına bağlı olarak Eş. 4.25 ile ifade edilir. Akustik dalgaların gelen optik dalganın tersi yönünde yayıldığını dikkate alırsak, anti-Stokes dalgaların oluşumunun ortaya çıkışının sağlaması mümkündür. Optik fiberdeki anti-Stokes dalga, Eş. 4.25'de verilen değer kadar optik frekansı daha yükseğe kaymış bir saçılan ışınımdır.

$$\nu_B = \frac{\omega_B}{2\pi} = 2\frac{nV_A}{\lambda_0} \tag{4.25}$$

Eş. 4.25'de;

n: optik fiber kırılma indisi, ν_B: Brillouin frekans kayması, V_A: Akustik hız,

λ_0: Pompa ışığı dalga boyudur. Brillouin frekans kayması, fiber kırılma indeksi değişmesi nedeniyle sıcaklık değişimine duyarlıdır. Bu durum Eş. 4.26 ile açıklanabilir.

$$\frac{\partial \nu_B}{\partial T} = \frac{2}{\lambda_p}\left[V_A \frac{dn}{dT} + n\frac{dV_A}{dT}\right] \tag{4.26}$$

20 °C'den 1620 °C'ye kadarki sıcaklık değişimlerinde, akustik dalganın sıcaklığa bağlı hız değişimi, verilen sıcaklık aralığındaki kırılma indeksi değişimleriyle karşılaştırıldığında sadece % 7 kadardır. Yani ν_B'nin değişimi büyük ölçüde kırılma indeksinin değişimine bağlı olur. Yüksek sıcaklık durumlarında, Brillouin kazanç tepesi yüksek frekanslara giderken çizgi genişliği azalır, düşük sıcaklıklarda Brillouin kazanç tepesi düşük frekanslara kayarken çizgi genişliği artar [90]. Eş. 4.26 indirgendiğinde:

$$\mathrm{v_B}(T) = \mathrm{v_{B0}} + \frac{d\mathrm{v_B}}{dT}(T - T_0) \tag{4.27}$$

$\mathrm{v_{B0}}$; $\mathrm{T_0}$ referans sıcaklıktaki Brillouin frekans kaymasıdır. Yapılan çalışmalara göre, Brillouin frekans kayması sıcaklıkla doğrusal bir artış gösterir. Buna göre yukarıdaki Eş. 4.27 aşağıdaki gibi Eş. 4.28 gibi düzenlenebilir [94].

$$\mathrm{v_B(T)} = \mathrm{v_{B0}} + \mathrm{C_T(T - T_0)} \tag{4.28}$$

Burada $\mathrm{C_T}$ frekans sıcaklık katsayısıdır. Bu katsayıyı, fiber yapısı, lazer dalga boyu ve ek fiber kaplama ve ceketi belirler. Bu eşitlik Brillouin frekans kaymasının sıcaklık bağımlılığını gösterdiğinden temel sıcaklık ölçümü için kullanılabilir.

4.2.2. Yükseltilmiş Brillouin saçılımı (YBS)

Optik fiberlerdeki tüm ışık saçılma olayları arasında yükseltilmiş Brillouin saçılımı (YBS) düşük güç eşiğinden dolayı en önemli olaydır. Bu saçılmış enerji, fibere uygulanan sıcaklık ve gerilmeye orantılı olan bir frekans kaymasına sahiptir ve bu gerilimin ve sıcaklığın ölçülmesini sağlar. YBS, optik alanla optik fiberdeki akustik fononlar arasındaki bağlantı yoluyla geri dağılmış bir ışık üreten doğrusal olmayan bir işlemdir [98].

YBS, iki optik ışık dalgası kullanılarak elde edilebilir. Pompa olarak adlandırılan optik

darbeye ek olarak, fiberin Brillouin frekans kesitini ortaya çıkaran ve prob sinyali olarak adlandırılan sürekli dalga (CW) sinyali kullanılır [99]. Brillouin saçılması yükseltilmesi süreci, darbenin ve CW sinyalinin frekans farkı Brillouin kaymasına karşılık geldiğinde ve her iki optik sinyalin fiberde ters yönde yayılması şartıyla oluşur. Etkileşim, daha büyük bir saçılma etkisine yol açarak darbe sinyalinden prob sinyaline enerji aktarımı ve prob sinyalinin yükseltilmesi ile sonuçlanır.

Tek modlu fiberlerdeki yükseltilmiş Brillouin etkileşimi Eş. 4.29 ile modellenebilir: pompa (p), Stokes (s) dalgaları ile birlikte alan büyüklüğü $E_{p,s}(z,t)$ ve bu alan ile etkileşime giren akustik dalga $E_a(z,t)$(zaman t ve fiberdeki pozisyon z) [100].

$$\frac{\partial E_p}{\partial z} - \frac{n_f}{c}\frac{\partial E_p}{\partial t} = E_a E_s \tag{4.29}$$

$$\frac{\partial E_s}{\partial z} - \frac{n_f}{c}\frac{\partial E_s}{\partial t} = E_a E_p \tag{4.30}$$

$$\frac{\partial E_a}{\partial z} + \Gamma E_a = \frac{1}{2}\Gamma_1 g_B E_p E_a \tag{4.31}$$

$$\Gamma = \Gamma_1 + i\Gamma_2 \tag{4.32}$$

n_f, fiber kırılma indisi; c, boşluktaki ışık hızı; g_B, Brillouin kazanç çarpanı; Γ, akustik dalganın sönüm sabiti; Γ_1, fononun sönüm zamanı; $\Gamma_2, \Gamma_2 = 2\pi(\nu - \nu_B)$ ile verilen açısal frekans ve ν, prob dalgası ile pompa dalgası arasındaki titreşim frekansıdır. Algılayıcı sistemi, fiberin maruz kaldığı sıcaklık veya gerginlik değişiklikleri hakkında bilgi veren Brillouin geri yansıyan ışığı ölçmeye odaklanır. Pompa darbeleri, fonon ömründen daha geniş (zaman genişliği) ve pompa tükenmemesi göz önüne alındığında, alıcıda saptanan Brillouin geri yansıyan ışık gücü P_B (z, ν) aşağıdaki Eş. 4.34 ile bulunabilir [100].

$$P_s(z = 0, \nu, t) = |E_s|^2 \tag{4.33}$$

$$P_s = g_B(\nu, \nu_B)\left(\frac{c}{2n}\right)P(t)\exp(-2\alpha z) \tag{4.34}$$

$$g_B = g_0 \frac{\left(\frac{\Delta v_B}{2}\right)^2}{(v-v_B)^2+\left(\frac{\Delta v_B}{2}\right)^2} \tag{4.35}$$

$$g_0 = \frac{2\pi n^7 {p_{12}}^2}{{\lambda_p}^2 \rho_0 v c \Delta v_B} \tag{4.36}$$

$P(t)$, uygulanan darbeli ışığın toplam gücü; α, fiberin zayıflatma katsayısı; p_{12}, elektro optik katsayı; v, akustik hız; λ_p, pompa dalga boyu; ρ_0, malzeme yoğunluğu ve bu durumda Brillouin kazanç spektrumu g_B, Lorentz fonksiyonuyla verilir ve z'ye bağımlı olmadığı varsayılır. v_B parametresi, g_B'nin g_0 tepe değerine sahip olduğu frekanstır ve Δv, yarım maksimumda tam genişliktir (FWHM). Ayrıca, Brillouin güç kazancı ve Brillouin kazanç spektrumu arasında v_B değerinde maksimize edilmiş üstel bir ilişki olduğuna dikkat edilmelidir.

Eş. 4.36'da sunulan matematiksel tanıma göre, Brillouin saçılması, termodinamik değişkenlere bağlıdır. Dielektrik sabiti, ortam boyunca ilerleyen ve üretilen basınç dalgasına bağlı olarak değişir [101].

Brillouin kayma frekansı, akustik fononun yanı sıra ortam yapısı ve bileşenlerinin bir fonksiyonudur. Malzeme yapısı, çevre sıcaklığındaki değişiklikler veya uzunlamasına bir kuvvet veya bir stres uygulaması gibi yoğunluk dağılımındaki güçlü değişikliklerle farklılaşır. Enlemesine veya uzunlamasına kuvvetler, materyalin orijinal boyutunun küçülmesi veya genişlemesine sebep olur.

Optik fiberdeki bir gerilme ve sıcaklık değişimi, camdaki akustik yayılım hızında farklılaşmalara neden olur ve bu şekilde geri saçılan Stokes ışığının frekansında bir kayma meydana gelir. İşte bu, Brillouin saçılımının sıcaklığı ve gerilmeyi ölçmek için bir yöntem olarak kullanılmasını sağlayan Brillouin frekans kaymasıdır (BFS) [98].

BFS, fiber boyunca dağılan gerilim ve sıcaklık ile doğrusal olarak ilişkilidir.

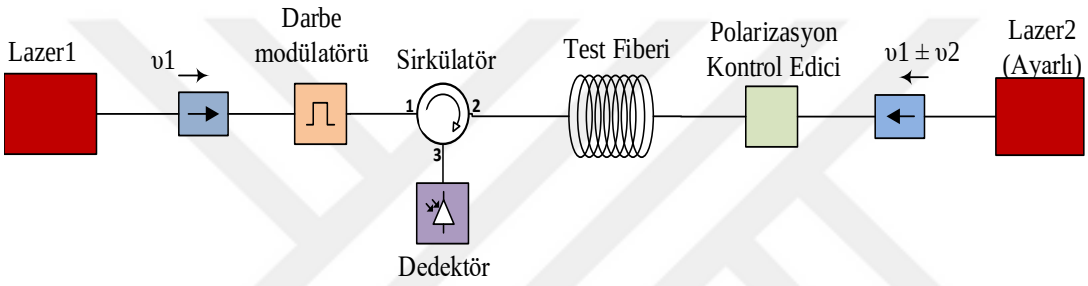
$$v_B(T, \varepsilon) = C_T \Delta T + C_\varepsilon \Delta\varepsilon + v_B(T_0, \varepsilon_0) \tag{4.37}$$

C_T, Sıcaklık katsayısı (MHz / °C); C_ε, gerinim katsayısı (MHz / με); ΔT, sıcaklık farkı; Δε,

gerinim farkı, T_0 ve ε_0 sırasıyla referans sıcaklık ve referans gerinimdir. Bu değerler, fiber yapısı, pompa dalga boyu ve fiber kaplamasıyla yakından ilişkilidir [102].

4.3. BOTDA Esaslı Algılama

Genel olarak, BOTDA yapılandırmaları, fiberin her bir ucunda birer tane olmak üzere iki lazer kullanır. Biri, lazer frekansı v_1 olan kısa ışık darbeleri üretir. Diğer lazer, v_2 frekansında CW ışınları üretir. Şekil 4.7'de BOTDA algılayıcılarının temel yapılandırılması görülmektedir [97].



Şekil 4.7. BOTDA algılayıcıların temel yapılandırılması

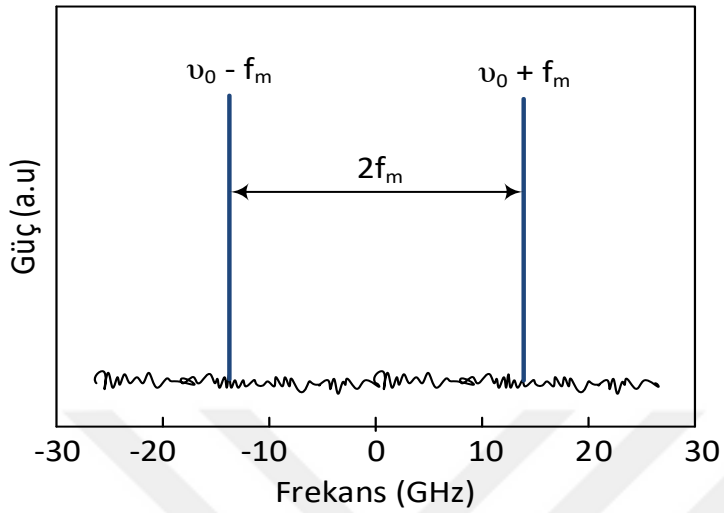
Daha sonradan yapılan çalışmalar ile iki lazer kaynak arasındaki optik frekans kaymalarını önlemek için tek bir lazer kaynağı kullanılarak, hem darbe sinyali hem de pompa sinyali elde edilmiştir. Böyle bir yapılandırma, sadece bir lazer kaynağından yararlanırken, harici bir yüksek bant genişlikli elektro-optik modülatörü (EOM) ($LiNbO_3$ yapılı) kullanılması, yan bant oluşturma tekniği yoluyla gerekli optik frekans kaymasını elde etmeyi sağlar [103].

4.3.1. BOTDA tabanlı algılayıcılarda yan bant oluşturma

Tek frekanslı bir ışık dalgası sabit bir frekansta f_m ile modüle edildiğinde, modülasyon optik spektrumda yeni frekans bileşenlerine yol açar, bunlara modülasyon yan bantları denir. Saf yoğunluk modülasyonu için, elde edilen spektrum, modüle edilen ışığın frekansı υ_0 etrafında simetrik olup, yeni bileşenler f_m frekansında eşit aralıklarla bulunur.

Modülasyon frekansı f_m, Brillouin frekans kaymasına υ_B eşit olduğunda, birinci dereceden yan bantlar YBS işlemi vasıtasıyla, zıt yönlerde yayılmaları şartıyla modüle edilen ışık

dalgasıyla etkileşime girebilir. EOM çıkışındaki frekansı υ_0 olan bileşen, modülatör elektrotlarında doğru akım ön gerilimleme ayarı yaparak bastırılabilir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Tek lazer kaynağının modüle edilmesi ile oluşan yan bantlar [97]

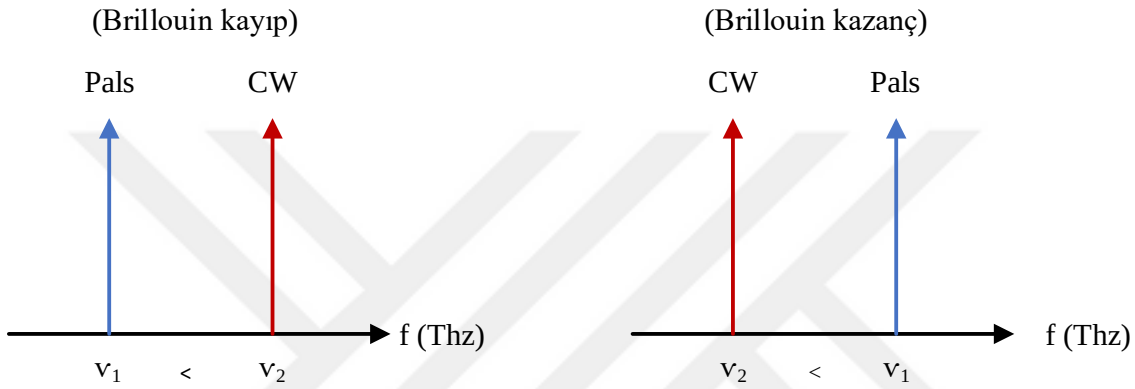
Şekil 4.8'deki optik spektrumdaki düşük yan-bandın, karşı yayılımlı ışık dalgası için Stokes dalgası olarak işlev görmesi nedeniyle, yayılım sırasında yükseldiği unutulmamalıdır. Aksine, üst yan bant, YBS tarafından ters ilerleyen ışık dalgasıyla etkileşime girer, çünkü frekansı yükseltilir.

Bu azalma, alt yan bandın yaşadığı yükselmeyi büyük ölçüde engelleyerek ölçüm doğruluğunda belirgin bir azalmaya neden olabilir. Sonuç olarak, bu yapılandırmada optik bir bant geçiren filtrenin ($v_0 + f_m$ veya $v_0 - f_m$)'den birinin filtrelenmesi için dedektörün önüne yerleştirilmesi gerekir [104]. Bu tür bir yapılandırmada bir bant geçiren optik filtrenin gerekliliğinden kurtulmanın etkili bir yolu, darbe üretimi için bir akusto-optik modülatör (AOM) kullanmaktır. Aslında, darbe ışını üzerinde, modülatör tarafından indüklenen ek frekans kayması, iki yan ve merkez taşıyıcı arasında frekans mesafelerinde bir dengesizlik oluşturabilir. Bu dengesizlik, iki yan banttan biri için YBS etkileşimini bastırmaya izin verir ve böylece bir optik bant geçiren filtre ihtiyacını ortadan kaldırır [105].

4.3.2. BOTDA algılayıcılarda Brillouin kayıp ve Brillouin kazanç yöntemi

BOTDA algılayıcı ölçümleri, gelen ışık ışınlarının frekansındaki değişikliklere

dayanmaktadır. Dağıtık sıcaklık veya gerilmenin belirlenmesinde, darbeli ışın CW ışınıyla etkileşime girer. Aslında, yüksek frekanslı ışının gücü, lazer ışınları arasındaki frekans farkı (v_d = $|v_1$ - $v_2|$) temel alınan fiberin beklenen Brillouin frekansı aralığı içerisinde olduğunda diğer ışına aktarılır. Gücün CW ışınına aktarılıp aktarılmadığına bağlı olarak, BOTDA algılayıcılarında Brillouin saçılımı, Brillouin kayıp ve Brillouin kazanç olmak üzere iki gruba ayrılır. Şekil 4.9, Brillouin kayıp ve kazanç yapılandırmalarındaki lazerlerin frekanslarını göstermektedir [98].



Şekil 4.9. Brillouin kayıp ve kazanç yapılandırmalarındaki lazerlerin frekansları [98]

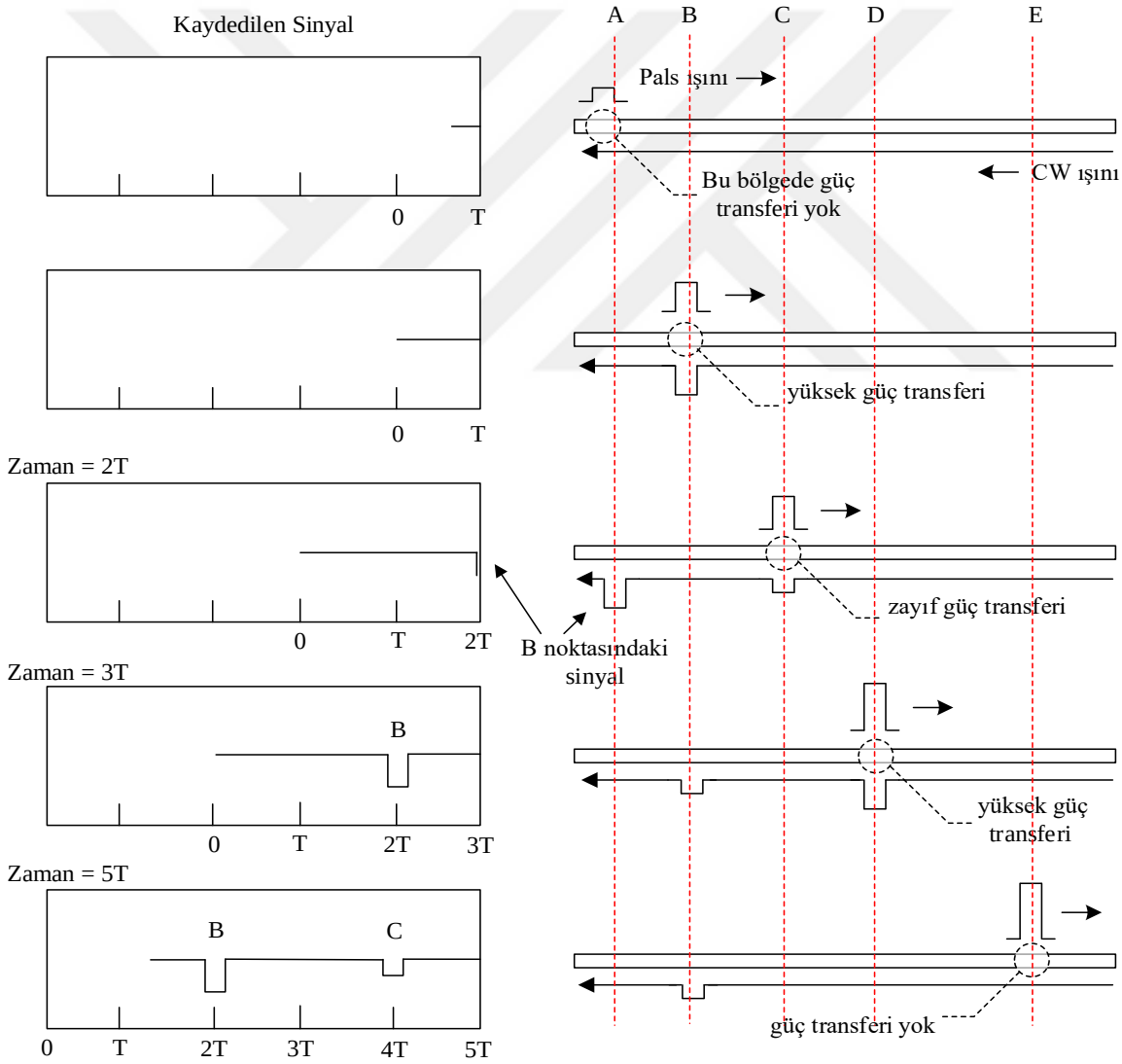
Brillouin kaybında, CW ışını, darbeli ışından daha yüksek bir frekansta çalışır ve fiberde sorgulamalar meydana geldiğinde enerjiyi darbeli ışına aktarır. Diğer taraftan, Brillouin kazancı, CW ışını darbeli ışından daha düşük bir frekansta çalışır ve CW ışını, darbeli ışından güç aldığında ortaya çıkar. Aslında, darbe, Brillouin kayıp sürecinde yükseltilirken Brillouin kazanç sürecinde aynı anda fiber kaybı ile zayıflatılır ve YBS tarafından tüketilir. Sonuç olarak, herhangi bir sabit dinamik aralık için Brillouin kayıp işlemi, daha uzun bir algılama fiber uzunluğu için daha uygundur. Öte yandan, güçlü darbe yükseltmesinin, darbe tepe gücünü kesin bir eşiğe ulaştırarak uyarılmış Raman saçılımı gibi diğer doğrusal olmayan etkilerin başlangıcına, en kısa sürede yol açabileceği düşünülmelidir. Raman saçlımı darbe enerjisinin daha uzun bir dalga boyuna dönüştürülmesine neden olur, böylece uyarılmış Brillouin saçlımı kalan fiber uzunluğu boyunca sonlanır [98].

4.4. Yükseltilmiş Brillouin Saçılımı Tabanlı Ölçüm Tekniği

BOTDA algılayıcıları ile tüm ölçüm sistemi, fiberin beklenen Brillouin frekansı farkı aralığında fiberin taranması ile oluşur. Her lazer frekans farkında, darbeli ışın, fiber içine gönderilir ve frekans farkı, fiberin Brillouin frekansı içerisinde bulunursa, CW ışınıyla

etkileşir. Işık titreşimleri 10 ns ile 50 ns arasında kısa sürelerde uygulanır ve bunlar fiberde 1 ile 5 m arasında fiziksel uzunluklara (çözünürlüklere) çevrilir.

Bunun anlamı, etkileşim, yalnızca darbeli ışın fiber boyunca ilerlediği zaman, herhangi bir zamanda, fiberin bir bölgesinde meydana gelir. Her lazer frekansı farkında, CW ışınının gücünü izleyerek, her zaman anında fiberin belirli bir bölgesine (noktaya) karşılık gelen bir zaman işareti üretilir. Şekil 4.10, darbeli ışın, Brillouin kaybı konfigürasyonunda fiber boyunca ilerlediğinde, CW ışınının gücüne karşılık gelen kaydedilmiş sinyalleri göstermektedir [98].



Şekil 4.10. Brillouin kayıp yapılandırmasında fiber kablodaki ışık etkileşimi [98]

Bu şekilde, darbeli ışın fiber boyunca soldan sağa doğru ilerledikçe CW ışını ile etkileşime girer. CW ışını enerjiyi, etkileşimin gerçekleştiği fiber bölgesinde darbeli ışına aktarır.

Fiberin ön ucundan d mesafedeki, etkileşimden dolayı meydana gelen sinyali almak için gerekli minimum t süresi, darbeli ışının gidiş-dönüş süresine eşit olmalıdır.

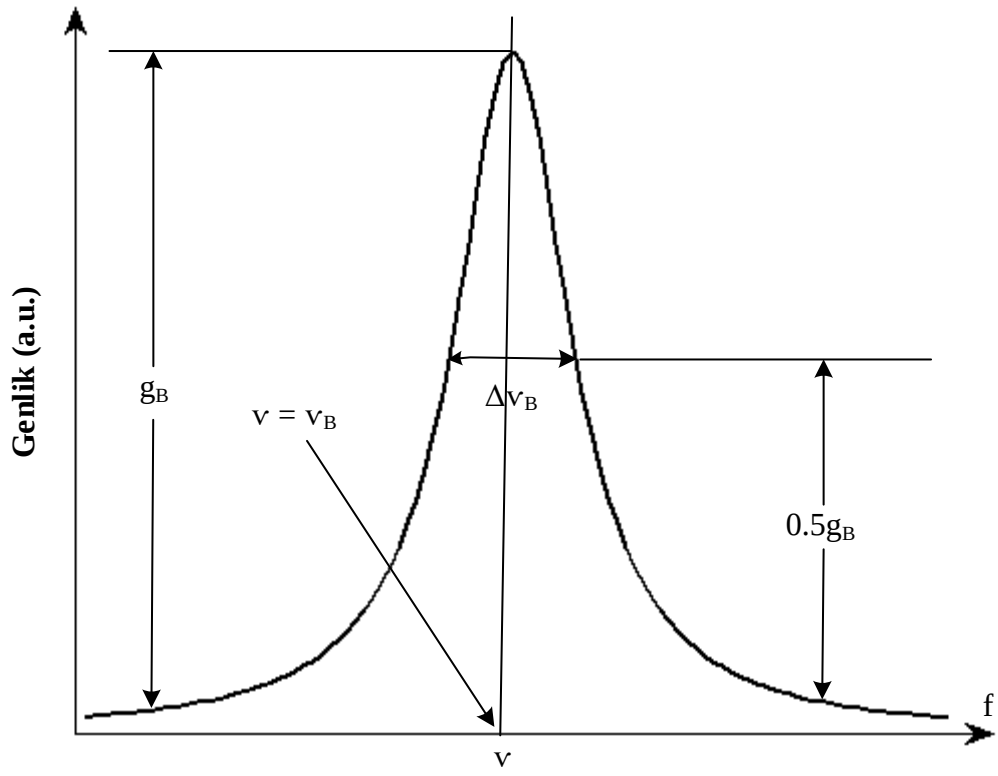
$$\mathrm{t} = \frac{2\mathrm{nd}}{\mathrm{c}} \tag{4.38}$$

Eş. 4.38'de c ışık hızı ve n ise fiberin kırılma indisidir. Brillouin saçılması prensibine göre, fiber kablo üzerindeki bir nokta için, ışınlar arasındaki maksimum güç aktarımı, lazer frekans farkı o noktanın BFS'ine eşit olduğunda ortaya çıkar. Bununla birlikte, BFS başlangıçta bilinmemektedir ve gerilme ve sıcaklıktaki değişikliklerle değişir. Bu nedenle fiber kablo, fiber boyunca noktaların BFS'sini bulmak için bir dizi lazer frekans farkıyla taranır. Lazer frekans farklarının aralığı, fiber türüne, uygulamaya ve test koşuluna bağlıdır. Bununla birlikte, BFS, genellikle 1550 nm için 10,5 GHz ve 11,5 GHz aralığındadır [98].

Bir dizi frekans farkı taraması, fiber boyunca her nokta için frekans domeninde dağıtık bir eğriye neden olur. Brillouin kazanç spektrumu (BGS) adı verilen bu eğri, fiberin bir noktasının gerilimi ve sıcaklığı hakkında bilgi içerir. Verilen bir noktada, BGS'deki maksimum genliği gösteren frekans, lazer frekans farkı BFS'ye eşit olduğunda maksimum güç aktarımı gerçekleştiğinden, noktanın BFS'sine eşittir. İdeal olarak BGS, frekans domeninde dağıtık Lorentz eğrisi ile modellenebilir [106].

$$g(v) = \frac{g_B}{1+4\left(\frac{v-v_B}{\Delta v_B}\right)^2} \tag{4.39}$$

Eş. 4.39'da v_B, BFS; Δv_B, çizgi genişliği ve g_B, tepe kazançtır. Şekil 4.11, Eş. 4.39'un her bir parametresinin nasıl belirlendiğini gösteren ideal bir spektrumu göstermektedir. Bir algılama sistemi açısından v_B, gerilim ve sıcaklığa doğrusal olarak bağlı olduğu için en önemli spektral parametredir.



Şekil 4.11. İdeal bir Brillouin kazanç spektrumu [98]

BFS'nin hesaplanması, gerçek ölçümlerde basit değildir. Gerçekte BOTDA algılayıcılardaki ölçümlerden elde edilen BGS'nin mükemmel Lorentzian dağılımları yoktur ve bazı koşullar altında şekilleri Lorentzian'dan Gauss dağılımına sapar [107]. Kusurlu bir Lorentzian dağılımının yanı sıra, BOTDA algılayıcılarında mevcut olan gürültü, spektrumları daha da deforme eder [108].

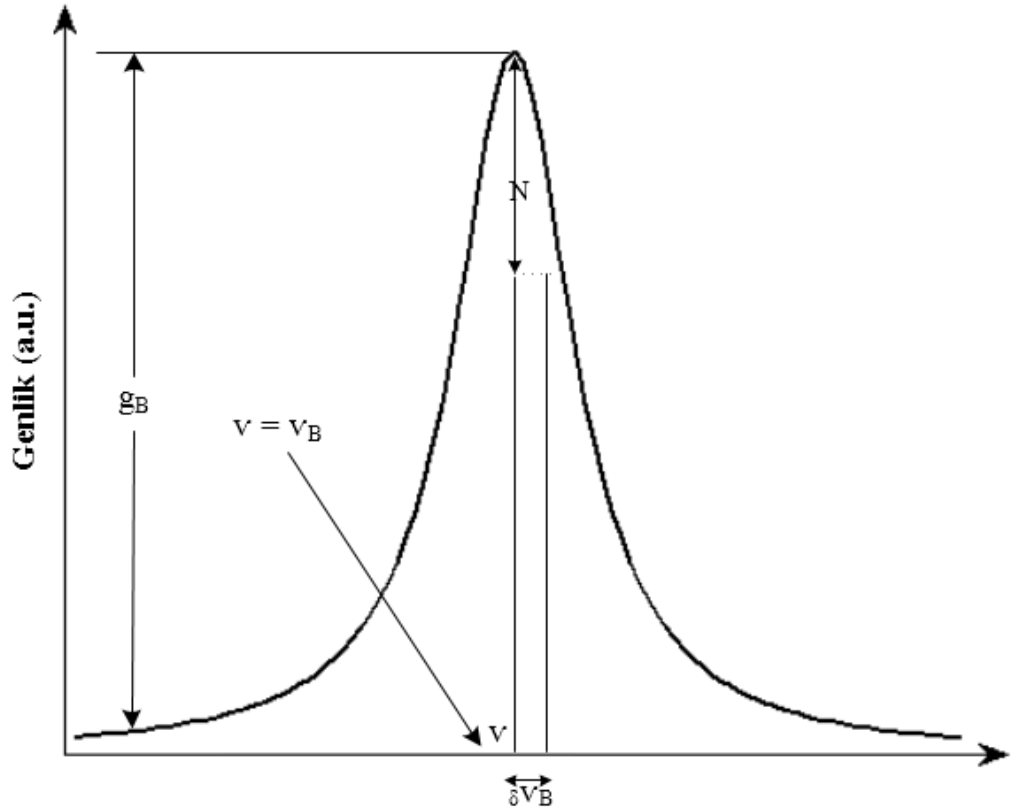
Her noktanın BFS'sini belirlerken, spektrum ideal bir Lorentz eğrisine dönüştürülür ve ideal eğride maksimum genlikteki frekans BFS olarak alınır. Hesaplanan BFS'ler, fiber boyunca dağıtık gerilimi ve sıcaklığı belirlemek için Eş. 4.37 'de yerine konur.

Belli bir lazer frekansı farkında lazer ışınları arasında aktarılan gücü görüntüleme, her zaman anlık olarak fiber boyunca fiziksel bir noktaya karşılık gelen bir zaman izi üretir. Bir zaman izindeki numune sayısı, fiber uzunluğuna, örnekleme hızı fs ve ışık hızı c'ye bağlı olarak değişir.

4.5. Algılayıcı Performansına SNR Etkisi

Genel olarak, BOTDA algılayıcılardaki ölçümler, lazer ışınının güç sınırlaması ve birden fazla gürültü kaynağının varlığı nedeniyle düşük bir SNR gösterir. Kaçınılmaz olarak, sıcaklık ve gerginlik hakkında güvenilir bilgi elde etmek için spektrumlar gürültüden arındırılmalıdır [109,110].

Şekil 4.12'de görüldüğü gibi frekans ölçümü sonucunda N büyüklüğü ile gösterilen, gürültünün sebep olduğu δv_B ile temsil edilen bir hatanın oluştuğunu düşünelim.



Şekil 4.12. N büyüklüğündeki bir gürültünün Lorentz eğrisinde gösterimi [108]

Bu değerler Eş. 4.35'de yerine yazıldığında;

$$g(v_B) - N = \frac{(\frac{\Delta v_B}{2})^2}{(\delta v_B)^2 + (\frac{\Delta v_B}{2})^2}\, g_B \tag{4.41}$$

eşitliği elde edilir. Spektrumun tepesinin $v = v_B$ de oluşan maksimum değeri S = g_B ile gösterilirse SNR oranı:

$$SNR = \frac{S^2}{N^2} \tag{4.42}$$

olur. SNR >> 1 kabul edilerek ve N eşitlikte yerine yazılırsa;

$$\delta v_B = \frac{\Delta v_B}{2[(SNR)^{1/2}-1]^{1/2}} \cong \frac{\Delta v_B}{2(SNR)^{1/4}} \tag{4.43}$$

elde edilir. Bu sonuca göre SNR değeri ne kadar arttırılırsa, oluşacak hatanın da o kadar azalacağı görülmektedir [108].

4.6. BOTDA Algılayıcıda Kullanılacak Ölçüm Tekniği

Önceki bölümlerde bahsedilen gürültü kaynaklarından dolayı, alınan sinyal çok gürültülüdür ve BFS'yi ölçüm verilerinden çıkarmak için bu sinyal iyileştirilmelidir. Toplu ortalama alma, BOTDA algılayıcılarında sinyalin gürültüden arındırılması için en yaygın yöntemdir. Bu yöntem, gürültülü örneklerin birbiriyle ilgisiz olduğunu ve sinyallerin deterministik olduğunu varsayarak, her frekansta bir dizi sinyal ortalaması alır.

Toplu ortalama alınması için gerekli zaman tabanlı verilerin sayısını, ham sinyalin SNR'si belirler. Ortalamalardan sonra SNR, sonuç olarak eğri oluşturma işlemi yoluyla BFS ölçümünün doğruluğunu belirler. Ölçüm süresini azaltmak ve algılayıcının performansını artırmak için, toplu ortalama almadan daha hızlı ve daha doğru gürültüden arındırma yöntemleri gereklidir.

Dalgacık analizi, BOTDA algılayıcıların performansını artırabilir. Dalgacık dönüşümü uygulandığında, sinyal orijinal sinyalden daha seyrek olan alt bantlara bölünür. Dalgacık tabanlı sinyaldeki seyreklikten yararlanarak, dalgacık tabanlı teknikler, gürültüden arındırma gibi zor bir problemle başa çıkabilmektedir. Çoğu dalgacık tabanlı gürültüden arındırma yöntemi, sinyali ayrıştırmak ve yeniden oluşturmak için benzer yaklaşımlar kullanır, ancak dalgacık katsayıları üzerinde farklı eşikleme algoritmaları uygularlar.

4.6.1. Dalgacık dönüşümü

Periyodik özellikli bir sinyal, farklı genliklere ve frekanslara sahip sinüs sinyallerinin toplamı olarak tanımlanabilir. Sinyalleri oluşturan frekans içeriği ilk kez Fourier dönüşümü ile ifade edilmiştir.

Periyodik özelliğe sahip olmayan sinyallerin analizinin gerçekleştirilebilmesi için, Ayrık Fourier Dönüşüm (AFD) analizi kullanılmaktadır. Bu yöntemin, çalışma algoritması sebebiyle, Fourier analizi gibi uzun bir işlem süresi vardır. Sonraları dönüşüm zamanını kısaltmak amacıyla AFD'nin başka bir şekli olan Hızlı Fourier Dönüşüm (HFD) analizi geliştirilmiştir. HFD çalışmasının hızlı olması, uygun veri sayısı (2^n) işlenmesi ile gerçekleştirilmiştir. AFD ve HFD analizleri periyodik özellikli veya periyodik olmayan sinyallerin işlenmesinde kullanılmaktadır [111].

Bir işaretin ayrık Fourier dönüşümü Eş. 4.44'deki gibi doğrudan

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-jwn} \qquad k = 0,1,\dots N-1 \tag{4.44}$$

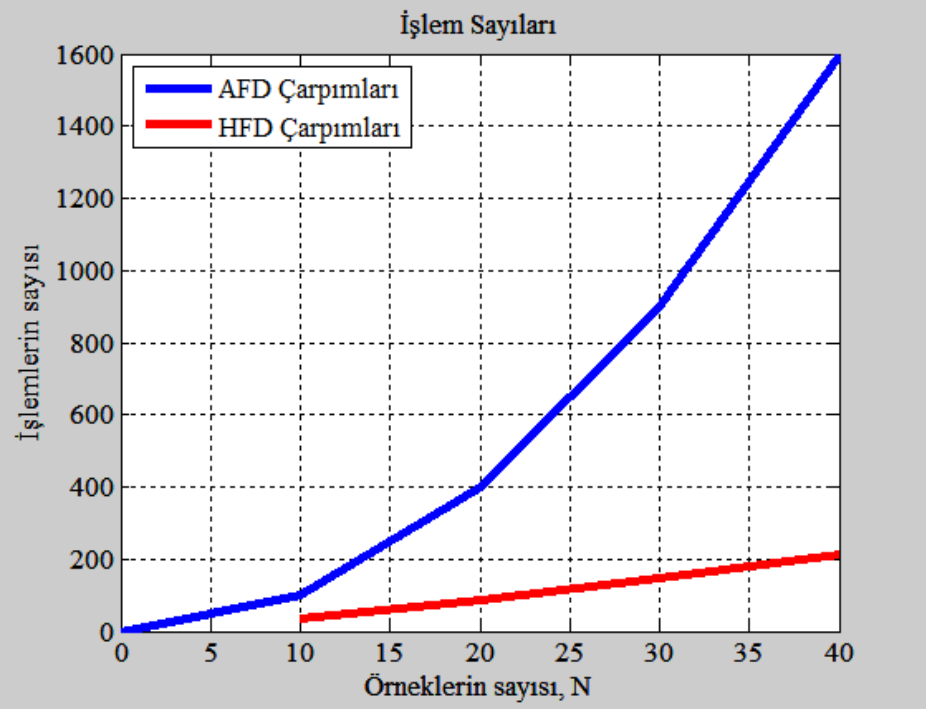
eşitliği ile hesaplanabilir. Bu durumda, dönüştürme işleminde her k değeri için N adet karmaşık çarpma ve N-1 adet karmaşık toplama işlemi yapılması gerekmektedir. N noktaya sahip bir AFD için N^2 ile orantılı bir işlem yoğunluğu meydana gelir. Ayrık Fourier dönüşümünün doğrudan hesaplanmasında N^2 ile orantılı hesap yükü, zamanda örnek seyreltme işlemi ile hızlı Fourier dönüşümünün kullanımı sayesinde N log N ile orantılı seviyede düşmektedir.

Çizelge 4.1'de örnek sayısına bağlı olarak ayrık Fourier dönüşümü ve hızlı Fourier dönüşümünde yapılacak işlem sayısı görülmektedir.

Çizelge 4.1. Fourier dönüşümü hesaplamasında çarpım sayısı

N	AFD Çarpımları	HFD Çarpımları
256	65536	1024
512	262144	2304
1024	1048576	5120
2048	4194304	11264
4096	16777216	24576

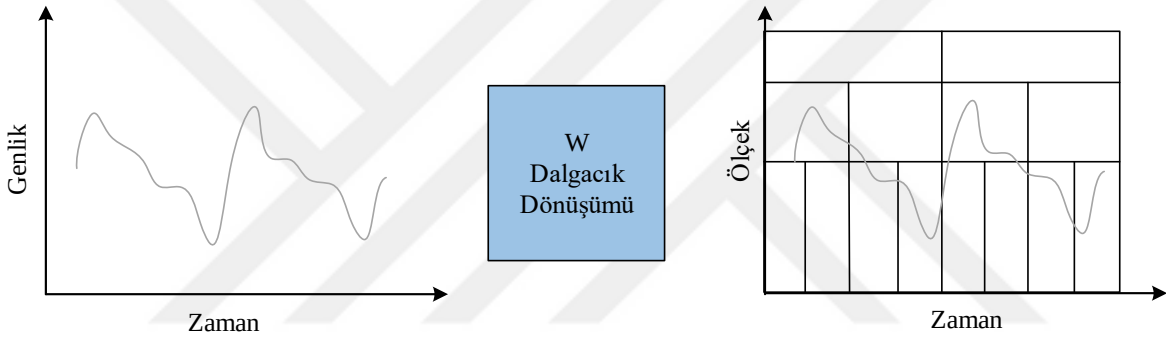
Şekil 4.13'de ayrık ve hızlı Fourier dönüşümlerindeki işlem sayıları görülmektedir.



Şekil 4.13. Ayrık ve hızlı Fourier dönüşümlerinde işlem sayıları [111]

Bu üstünlüğüne rağmen, HFD ile yalnızca sabit zaman-frekans çözünürlüğü kullanılabildiğinden, HFD' ye alternatif bir yaklaşım olarak, değişken zaman-frekans çözünürlüğünün kullanılabileceği Dalgacık Dönüşümü (DD) geliştirilmiştir [112].

Dalgacık dönüşümünün çalışma yöntemi, ölçeğe göre veriyi işlemektir. Dalgacık algoritmaları, sinyalleri farklı ölçek veya çözünürlüklerde analiz eder. Eğer geniş bir pencere aralığından bir işaret incelenirse, büyük özellikleri görülebilir. Aynı yöntemle, daha küçük bir pencere aralığından bir işaret incelenirse, küçük özellikleri görülebilir. Dalgacık analizi yönteminde amaç, "analiz eden dalgacık" veya "ana dalgacık" adıyla tanımlanan bir dalgacık örnek fonksiyonu oluşturmaktır. Eğer analiz edilecek veri için uygun dalgacıklar kullanılırsa veya bir referans değerin altında kalan katsayılar yok edilirse, veri kısmi olarak örneklenir. Bu kodlama yöntemi, veri sıkıştırma amacıyla dalgacıkları en iyi seçenek haline getirir. Şekil 4.14'de dalgacık dönüşümü prensibi görülmektedir [113].



Şekil 4.14. Dalgacık dönüşümü prensibi

Dalgacık analizi yönteminde işlenecek veri, zaman-frekans ortamı yerine zaman-ölçek ortamında analiz edilir. Böylelikle, bu yöntemin en büyük avantajlarından biri olan, sinyalin istenilen bir bölgesinin analizi yapılabilir.

Dalgacık dönüşümü kullanılarak bir işaretin ayrıştırılması ve tekrar oluşturulması üç aşamalı bir süreçtir. İlk aşamada dönüşüm kullanılarak işaret bileşenlerine ayrılır. Daha sonra, ortaya çıkan katsayılar eşik metotları kullanılarak yumuşatılır. Son olarak eşikleme yapılmış ayrık dalgacık katsayılarından yeniden orjinal işaret elde edilir [113].

Dalgacık dönüşümü yönteminde sinüs ve kosinüs fonksiyonları yerine dalgacık adlı fonksiyonlar kullanılmaktadır. Eş. 4.45 ve Eş. 4.46'da bir boyutlu x(t) ϵ L^2 (R) işareti için Morlet- Grosman dalgacık dönüşümü ve ana dalgacığın ölçeklenmesi ve ötelenmesi ile elde edilen dalgacıkların matematiksel ifadesi verilmiştir.

$$W(a,b) = \int x(t)\psi^{*}_{(a,b)}(t)dt \tag{4.45}$$

$$\psi^{*}_{(a,b)}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{4.46}$$

Bu eşitliklerde ψ(t) ana dalgacığı, ψ(t)* dalgacığın eşleniğini, a ölçek (frekans) ve b ise zaman (konum) bilgisidir. Ölçek parametresi kullanılarak bir fonksiyon sıkıştırılır ve açılır. Ölçeğin büyük değerleri düşük frekanslara, küçük değerleri ise yüksek frekanslara karşılık gelmektedir. Konum parametresi, dalgacığı zaman ekseninde ötelemek için kullanılır.

Dönüştürme işleminin sürekli veya ayrık zamanlı olması halinde, a ve b sürekli veya ayrık olabilir. Belirtilen parametrelerin ayrık seçilmesi durumunda, ana dalgacığa bağımlı dalgacıklar aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$W_{\psi}(m,n) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}}\sum_{-\infty}^{\infty} x(k)\left(\frac{k-a_0^m nb_0}{aa_0^m}\right) \tag{4.47}$$

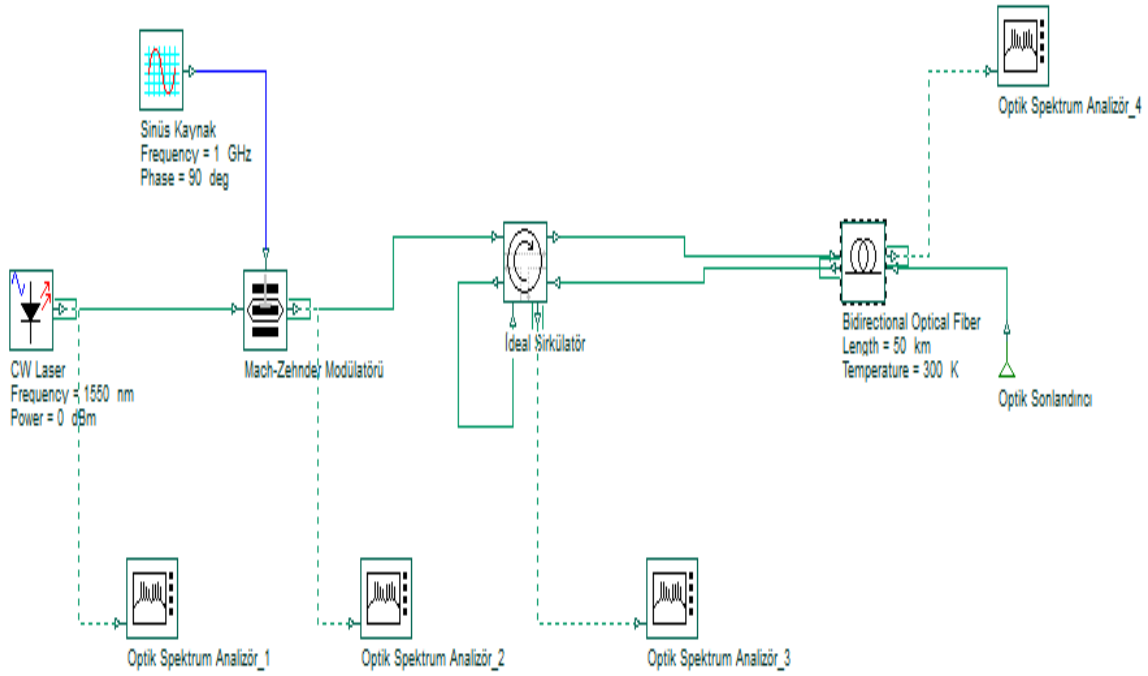
Eş. 4.47'de; $a_0^m = a;\ a_0^m nb_0 = b$, m ve n ise tam sayılardır. $a_0 > 1$ ve $b_0 \neq 0$'dır.

Ayrık dalgacık dönüşüm için $a_0 = 2$ ve $b_0 = 1$ seçilmesi durumunda, çoklu çözünürlük analizi elde edilir. Bu metot ile x(t) farklı ölçek ve çözünürlüklere ayrıştırılır [114].

5. DAĞITIK ALGILAYICININ TASARIMI

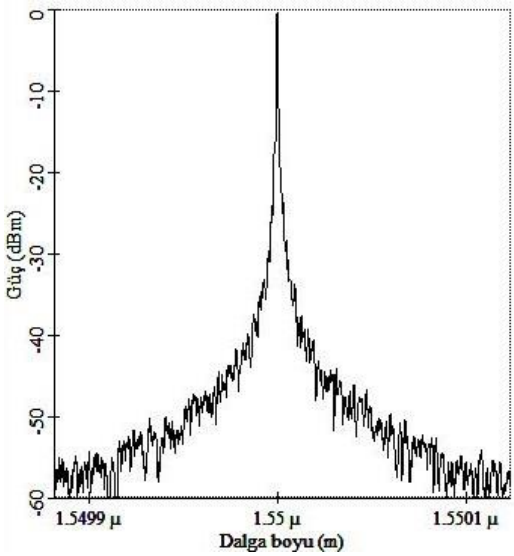
5.1. BOTDR Benzetimleri

Kendiliğinden Brillouin saçılması tabanlı dağıtık algılayıcı (BOTDR) benzetim devresi Şekil 5.1'de görülmektedir.

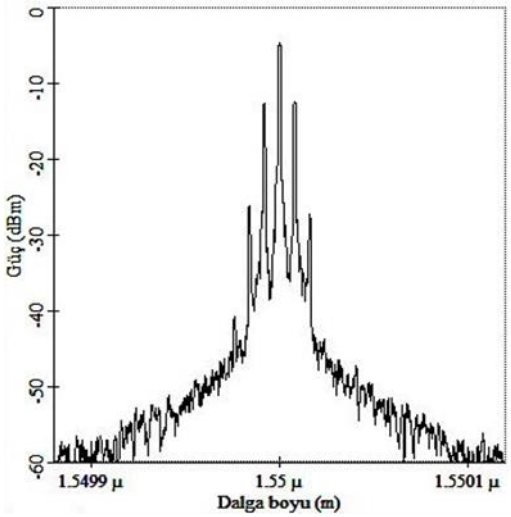


Şekil 5.1. Brillouin saçılması benzetim devresi (BOTDR)

Yaklaşık 193,414 THz frekanslı (1550 nm), 1 mW (0 dBm) güce sahip CW lazer, kaynak olarak seçilmiştir. Bu sinyale ait spektrum Şekil 5.2'de görülmektedir (Optik Spektrum Analizörü-OSA_1). Mach-Zehnder modülatörü CW lazer kaynağını darbeli hale getirmek için kullanılmıştır. Modülatörün gerektiği gibi çalışması için 1 GHz frekanslı, sinüs dalga üreteci, modüle edici olarak çalışmaktadır. Şekil 5.3'de darbeli hale getirilmiş giriş sinyali görülmektedir (OSA_2) [94].

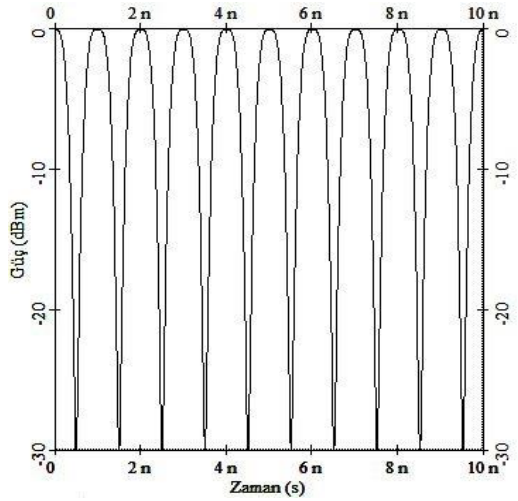


Şekil 5.2. Lazer kaynağın optik spektrumu (OSA_1)



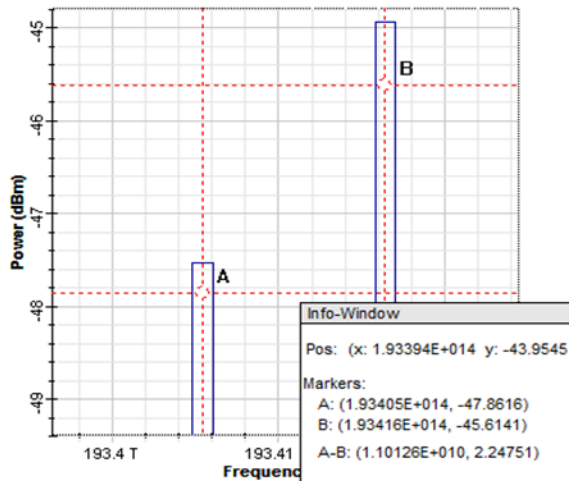
Şekil 5.3. Modüle edilmiş giriş sinyali (OSA_2)

Şekil 5.4'de ise zaman bölgesinde modüle edilmiş sinyal görülmektedir. Şekilden de görüleceği gibi sinyal 1 ns'lik darbeler haline getirilmiştir. Sinyal üretecinin frekansı değiştirilerek darbeler arasındaki mesafe değiştirilebilir. Bu darbe süreleri kullanılarak tek modlu fiber üzerindeki algılama çözünürlüğü belirlenmektedir.



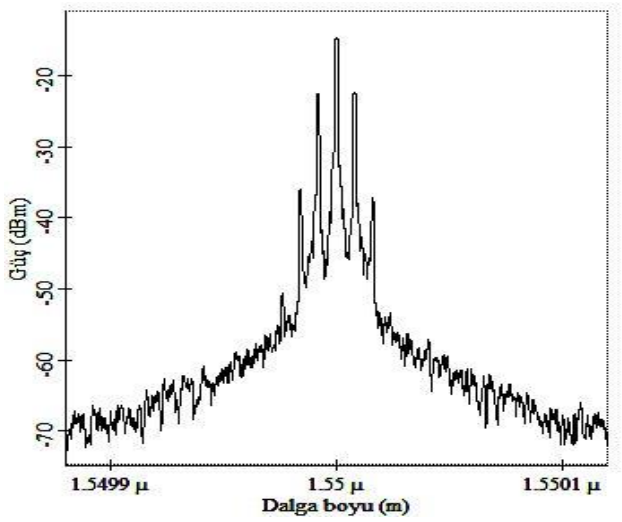
Şekil 5.4. Zaman domeninde modüle edilmiş giriş sinyali

Daha sonra darbeli hale getirilmiş ışık dalgası optik sirkülatöre uygulanmıştır. Sirkülatörler üç portlu optik malzemeler olup, 1 nolu porttan giren sinyaller 2 nolu porttan çıkmakta ve 50 km'lik tek modlu fibere girmektedir. Ucu açık olan tek modlu fiberden geriye yansıyan Rayleigh ve Brillouin saçılmaları optik sirkülatörün 2 nolu portundan girerek 3 nolu portundan çıkmakta ve 3 numaralı optik spektrum analizörüne (OSA_3) ulaşmaktadır. Şekil 5.5'ten de görülebileceği gibi Rayleigh ve Brillouin saçılmaları arasında 11,0126 Ghz'lik bir kayma elde edilmiştir [94].



Şekil 5.5.Saçılan ışık dalgaları

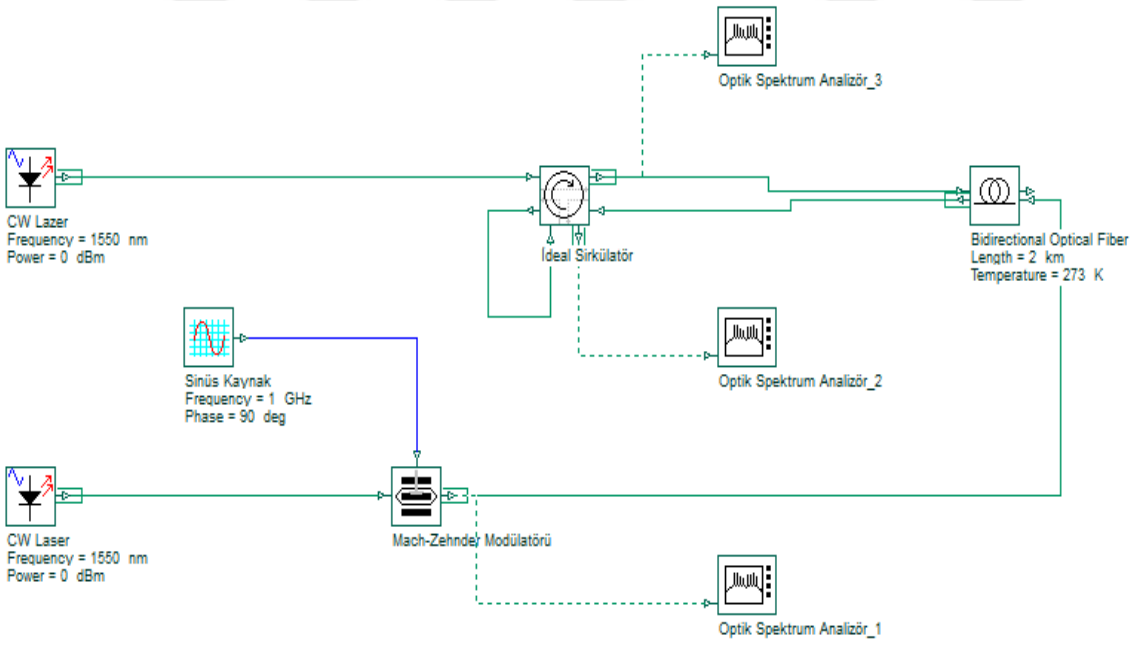
Şekil 5.6'da ise tek modlu fiberin boştaki çıkışından elde edilen çıkış sinyal spektrumu görülmektedir (OSA_4). Şekilden de görüleceği gibi bu çıkıştan alınan sinyal OSA_2'de görülen sinyalin zayıflamış halidir. 50 km'lik tek modlu fiber boyunca yaklaşık 10 dB'lik bir zayıflama oluşmuştur (0,2 dB / km).



Şekil 5.6. Tek modlu fiberin çıkış sinyali (OSA_4)

5.2. BOTDA Benzetimleri

Uyarılmış Brillouin saçılması tabanlı dağınık sensör (BOTDA) benzetim devresi Şekil 5.7'de görülmektedir. Buradaki benzetim devresinde fiber sıcaklığı 273 K'dir.



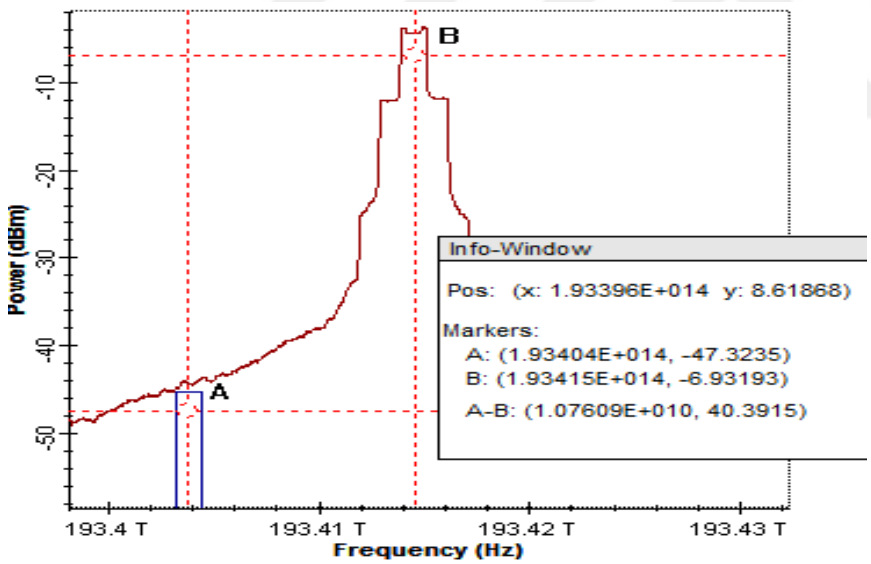
Şekil 5.7. Farklı sıcaklığa sahip fiber benzetim devresi (BOTDA)

Yaklaşık 193,414 THz frekanslı (1550 nm), 1 mW (0 dBm) güçlü iki adet CW lazer, optik kaynak olarak seçilmiştir. Bu sinyallere ait spektrum Şekil 5.2'deki ile aynıdır. Mach-Zehnder modülatörü CW lazer kaynağını darbeli hale getirmek için kullanılmıştır.

Modülatörün gerektiği gibi çalışması için 1 GHz frekanslı, sinüs dalga üreteci, modüle edici olarak çalışmaktadır. Şekil 5.3'deki darbeli hale getirilmiş giriş sinyali ile aynıdır.

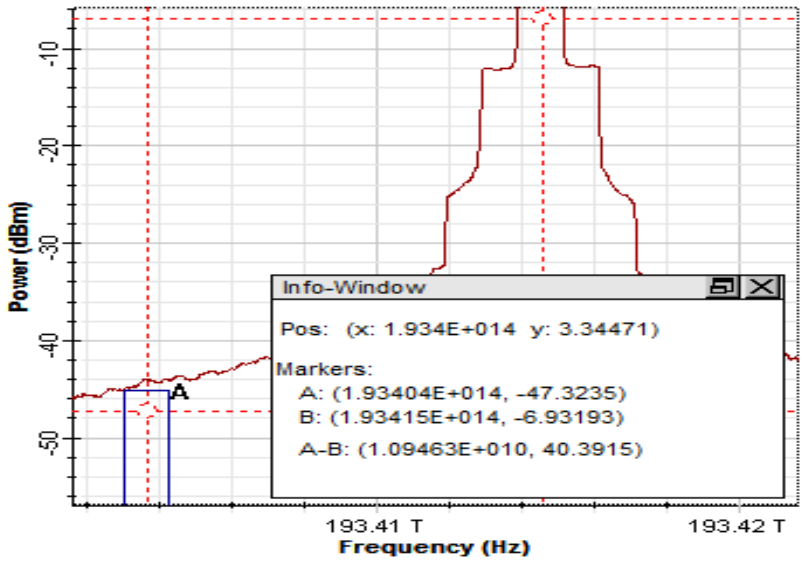
Sinyal üretecinin frekansı değiştirilerek darbeler arasındaki mesafe değiştirilebilir. Bu darbe süreleri kullanılarak tek modlu fiber üzerindeki algılama çözünürlüğü belirlenmektedir.

Daha sonra darbeli hale getirilmiş ışık dalgası optik sirkülatöre uygulanmıştır. 1 nolu porttan giren sinyaller 2 nolu porttan çıkmakta ve 2 km'lik tek modlu fibere girmektedir. Fiber kablo burada 273 K sıcaklıkta tanımlanmıştır. Tek modlu fiberden geriye yansıyan Rayleigh ve Brillouin saçılmaları optik sirkülatörün 2 nolu portundan girerek 3 nolu portundan çıkmakta ve 2 numaralı optik spektrum analizörüne (OSA_2) ulaşmaktadır. Şekil 5.8'den de görülebileceği gibi Rayleigh ve Brillouin saçılmaları arasında yaklaşık 10,76 Ghz'lik bir kayma elde edilmiştir [94].



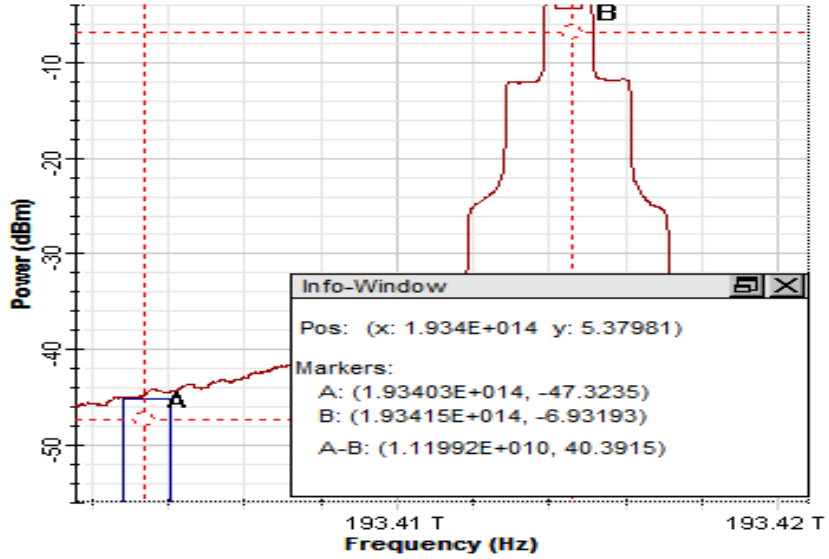
Şekil 5.8. 273 K sıcaklığa sahip fiber için Brillouin saçılması

Daha sonra fiber kablo 283 K sıcaklıkta tanımlanmıştır. Şekil 5.9'dan da görülebileceği gibi Rayleigh ve Brillouin saçılmaları arasında yaklaşık 10,94 Ghz'lik bir kayma elde edilmiştir.



Şekil 5.9. 283 K sıcaklığa sahip fiber için Brillouin saçılması

Son olarak fiber kablo 293 K sıcaklıkta tanımlanmıştır. Şekil 5.10'dan da görülebileceği gibi Rayleigh ve Brillouin saçılmaları arasında yaklaşık 11,20 Ghz'lik bir kayma elde edilmiştir.

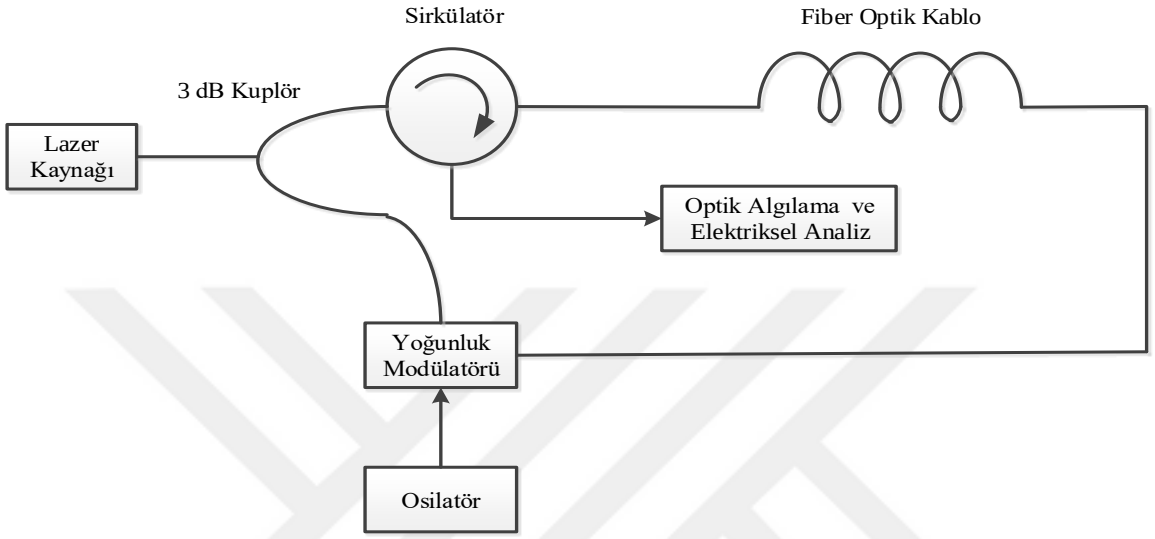


Şekil 5.10. 293 K sıcaklığa sahip fiber için Brillouin saçılması

5.3. Farklı Kablolar ile Brillouin Saçılması Deneysel Kurulumu

Şekil 5.11'de farklı tür fiber kablolar ile Brillouin saçılımını elde etmek için kurulan deneysel düzenek (BOTDA) şematik olarak görülmektedir. Lazer kaynağı olarak 1526 nm ile 1570 nm arasında ayarlanabilir bir lazer kaynağı kullanılmıştır. Darbeli ışık ve CW

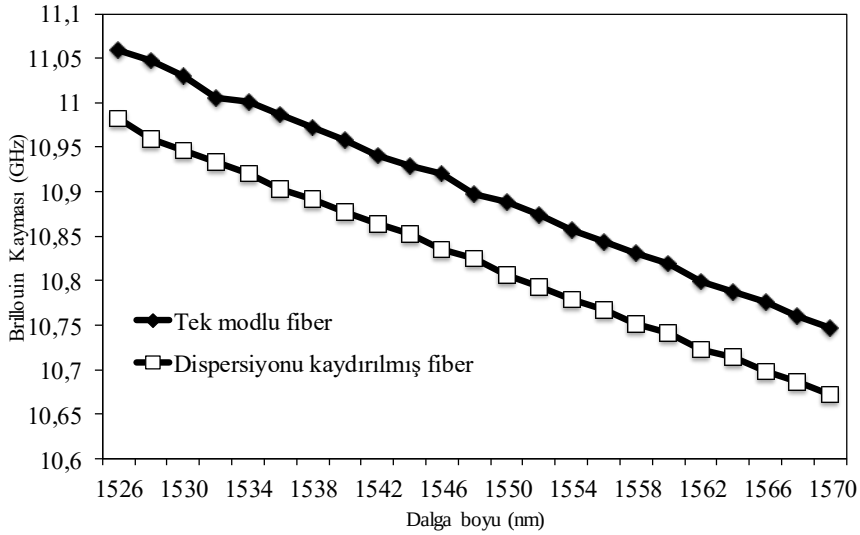
yayan lazerden çıkan dalga, fiber içerisine gönderilmektedir. Lazer kaynağından uygulanan sürekli dalga sinyaller 3 dB kuplör yardımıyla eşit olarak bölündükten sonra, sinyalin yarısı sirkülatöre ve oradan da test fiberine uygulanmıştır. Test fiberi olarak 13 km'lik tek modlu fiber ve yine aynı boyda dispersiyonu kaydırılmış fiber kullanılmıştır [115].



Şekil 5.11. Brillouin saçılımı deney düzeneği

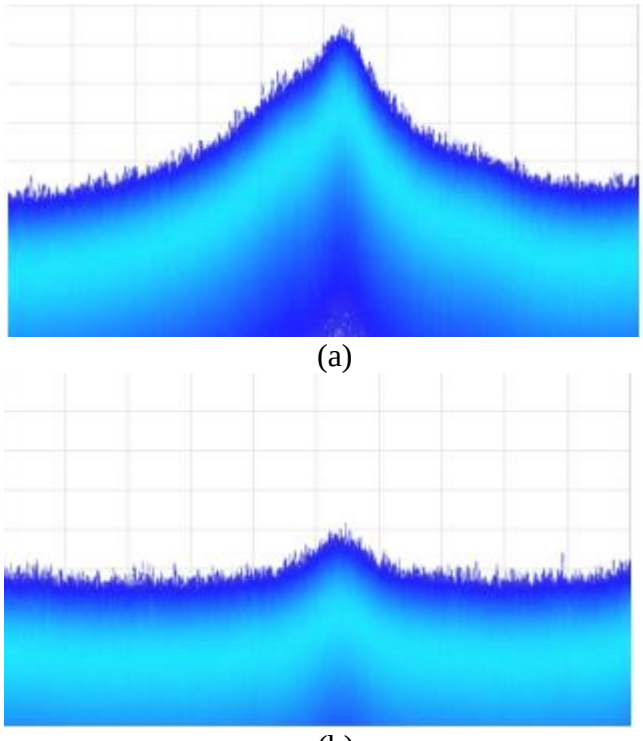
Sinyalin diğer yarısı ise optik modülatöre uygulanmıştır. Burada yüksek frekanslı bir osilatör ile modüle edilen lazer sinyali darbeli hale getirildikten sonra yine test fiberine uygulanmıştır. Test fiberinde meydana gelen Brillouin saçılması sirkülatör yardımıyla alınarak optik algılama ve elektriksel analiz birimine ulaşmıştır. Bu birimde kullanılan 12 GHz'lik optik alıcı ile algılanan optik sinyaller elektriksel sinyallere dönüştürülmüştür. Elektriksel sinyaller yüksek frekans sinyal analizörü kullanılarak incelenmiştir.

Şekil 5.12'de tek modlu fiber ve dispersiyonu kaydırılmış fiberin dalga boyu değişimine karşılık Brillouin kayması görülmektedir. Her iki fiber türünde de dalga boyu ile Brillouin kayması arasında ters orantılı bir ilişki, ancak doğrusal bir azalma oluşmaktadır.



Şekil 5.12. Tek modlu fiber ve dispersiyonu kaydırılmış fiberin dalga boyu değişimine karşılık Brillouin kayması

Fiberler ayrı ayrı incelendiğinde ise Şekil 5.13'de görüleceği gibi tek modlu fiberde Brillouin kayması gücü dispersiyonu kaydırılmış fiberle kıyaslandığında daha yüksek olduğu için tek modlu fiber dağıtık tabanlı optik algılama sistemleri için daha uygundur [115].



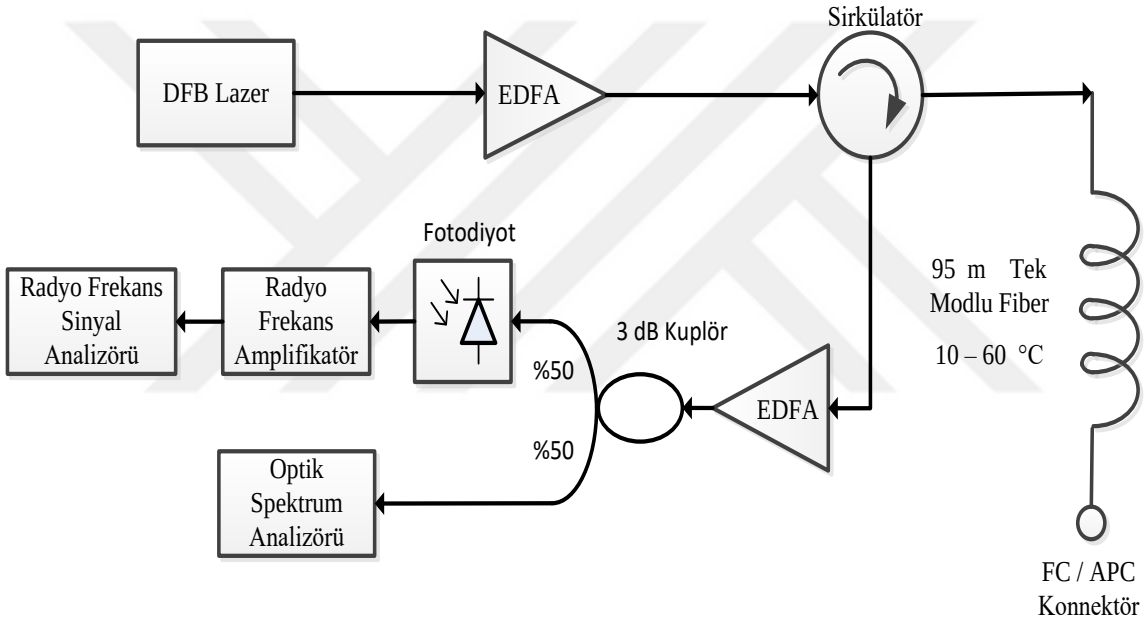
(a)

(b)

Şekil 5.13. (a) Tek modlu fiber ve (b) Dispersiyonu kaydırılmış fiberin 1550 nm dalga boyu için Brillouin saçılması

5.4.Sıcaklık Değişimine Bağlı Brillouin Saçılımı Deneysel Analizi

Şekil 5.14'de sıcaklık değişimine bağlı Brillouin saçılımını elde etmek için kurulan deneysel düzenek (BOTDR) şematik olarak görülmektedir. Lazer kaynağı olarak 1553 nm dalga boyu ve 8,52 dBm güce sahip ayarlanabilir bir DFB lazer kaynağı kullanılmıştır. Lazer kaynaktan çıkan ışık öncelikle yaklaşık 8 dBm kazanca sahip bir erbium katkılı fiber yükselteç (EDFA) tarafından yükseltilerek, sirkülatör üzerinden, 95 m uzunluğa sahip tek modlu test fiber kablo içerisine gönderilmektedir. Test fiberin diğer ucu FC/APC konektör bağlı bir şekilde boşta bırakılmıştır [86].

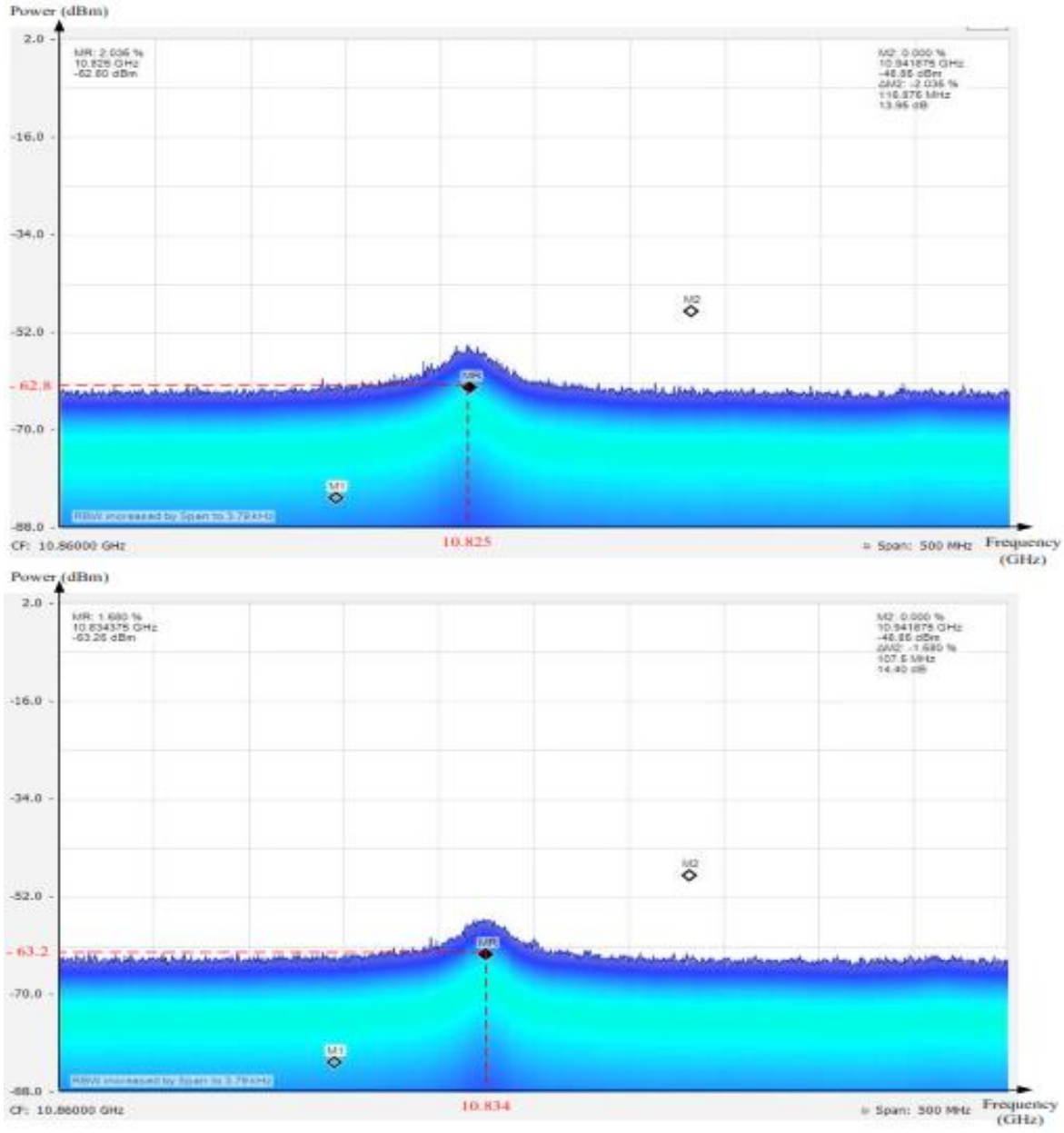


Şekil 5.14. 95 m'lik tek modlu test fiberine ait Brillouin saçılımı deney düzeneği

Test fiberinde meydana gelen Brillouin saçılması sirkülatör yardımıyla alınarak, yine yaklaşık 80 mW pompa lazer güçlü ikinci EDFA ile yükseltilmiş, 3 dB kuplör vasıtasıyla bölünerek, yüksek çözünürlüklü optik spektrum analizörüne (OSA) ve fotodiyoda (PD) gönderilmiştir. Bu fotodiyodun çıkışındaki elektriksel sinyal ise, radyo frekans yükselteci (RFA) tarafından yükseltilmiş ve radyo frekans spektrum analizörü tarafından analiz edilmiştir.

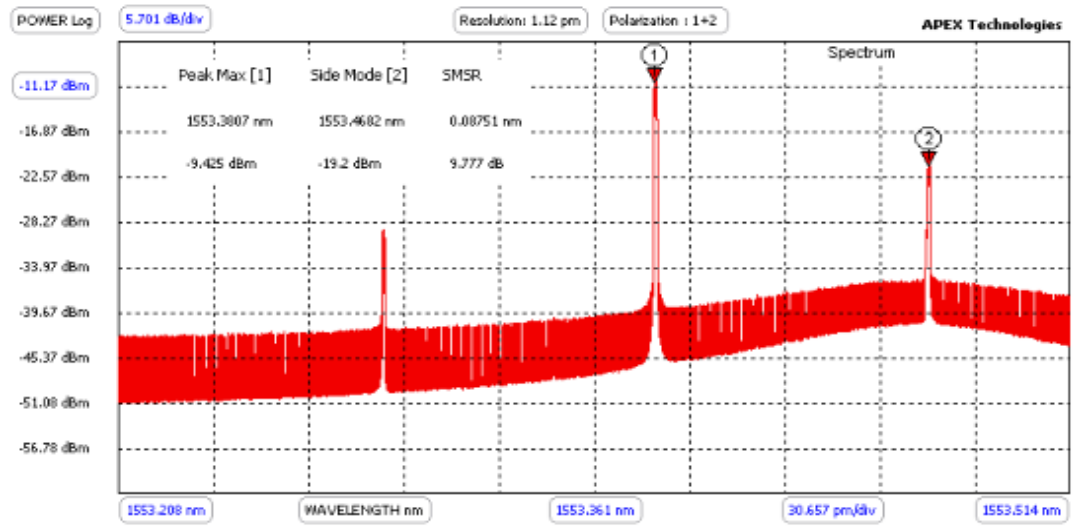
İlk aşamada 95 m uzunluğa sahip test fiberi, ısıtıcının içine yerleştirilerek 60 °C sıcaklığa ulaşması sağlanmıştır. Bu sıcaklıkta belirli bir süre bekletildikten sonra yüksek frekans sinyal analizörü yardımıyla, optik sirkülatörün 3 nolu ucundan yükseltilerek algılanan

Brillouin saçılması frekans değeri ölçülmüştür. Daha sonra ısıtıcı sıcaklık değeri sırasıyla 50,40,30,20,10 °C ayarlanarak ve her bir sıcaklık değeri için belirli bir süre beklenerek Brillouin saçılması frekans değerleri ölçülmüştür Test fiberi üzerindeki ortam sıcaklığının kararlı olması için, ısıtıcı en az 30 dakika boyunca aynı sıcaklıkta bırakılmış ve Brillouin frekansı okunmuştur. Deneyler, 10 ° C ile 60 ° C arasındaki sıcaklık değerleri arttırılarak da tekrarlanmış ve aynı sonuçlar elde edilmiştir. 95 metrelik tek modlu test fiberinin 30 °C ve 20 °C sıcaklıkta elde edilen Brillouin saçılmasına ait radyo frekans spektrum şekilleri Şekil 5.15'de görülmektedir.

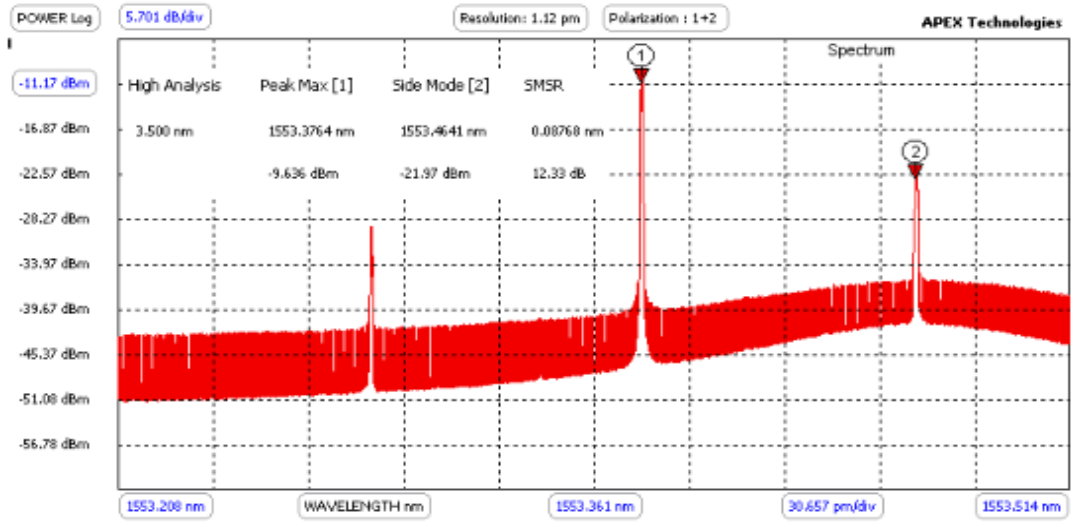


Şekil 5.15. 95 m test fiberine ait 20 ve 30 °C sıcaklıktaki Brillouin saçılması

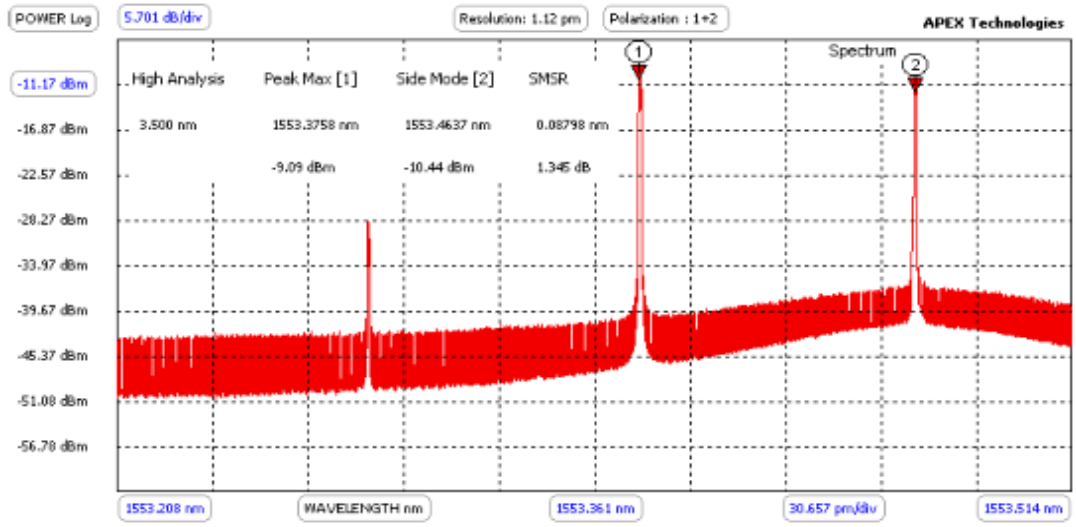
Şekil 5.16, 95 m'lik bir test fiberinin optik spektrumu çıktısını göstermektedir. Birinci şekil, 20 ° C'de optik spektrum çıkışını ve diğerleri sırasıyla 40 ° C ve 60 ° C sıcaklıktaki optik spektrum çıktılarını göstermektedir. Şekilde, sinyal 1, Rayleigh saçılmasını ve sinyal 2, Stokes Brillouin saçılımını göstermektedir. Diğer sinyal anti-Stokes Brillouin saçılmasını göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi, sıcaklık değerleri arttıkça, Brillouin kayması da artmıştır [116].



(a)



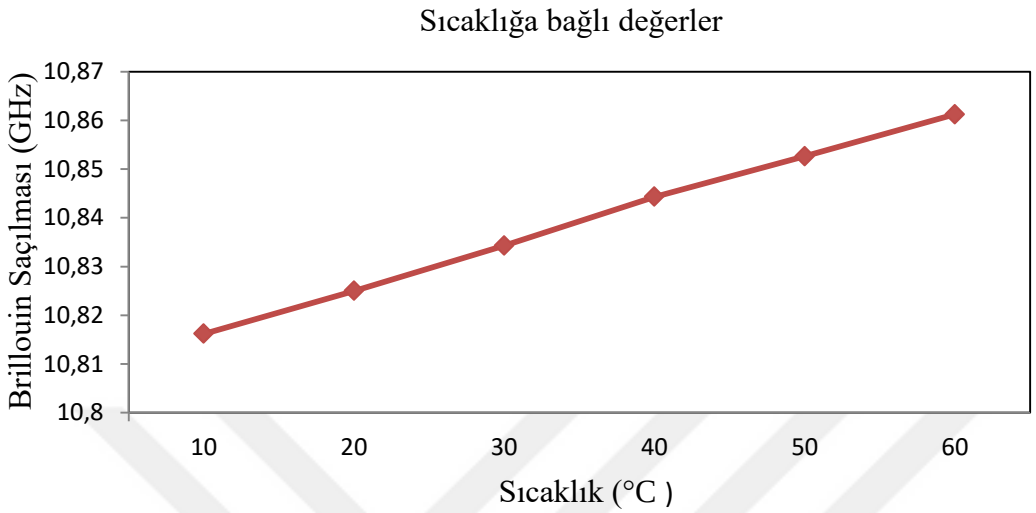
(b)



(c)

Şekil 5.16. 95 m test fiberinin optik spektrum çıktıları (a) 20 °C (b) 40 °C (c) 60 °C

Her bir sıcaklık değeri için elde edilen Brillouin saçılması frekans değerlerine ait grafik Şekil 5.17'de görülmektedir.

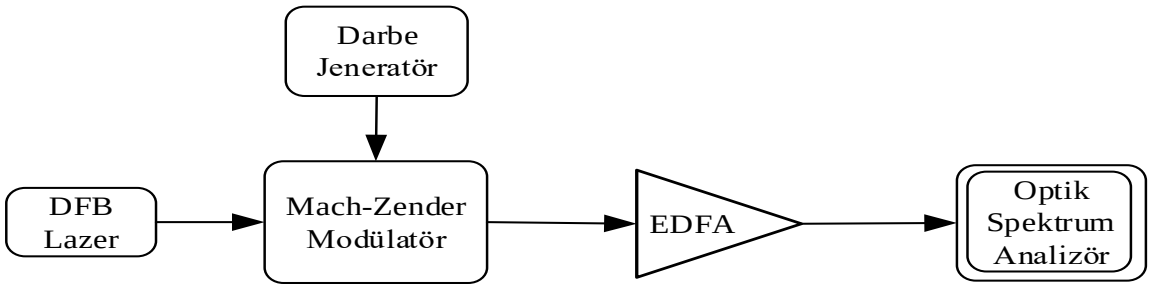


Şekil 5.17. 95 m tek modlu test fiberin sıcaklık değişimine karşılık Brillouin saçılması

Grafikten de anlaşılacağı gibi sıcaklık değişimine karşı Brillouin frekans kayması değişiminin doğrusal bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Veriler incelendiğinde Brillouin fark frekansının sıcaklığa bağlı olarak 0,93 MHz / °C'lik bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu doğrusal değişim Brillouin şaçılmasının sıcaklık algılayıcısı olarak kullanımına uygunluğunu göstermiştir [86].

5.5. Dağıtık Algılama Optik Algılayıcı Sisteminde Lazer Sinyalinin Darbeli Hale Getirilmesi

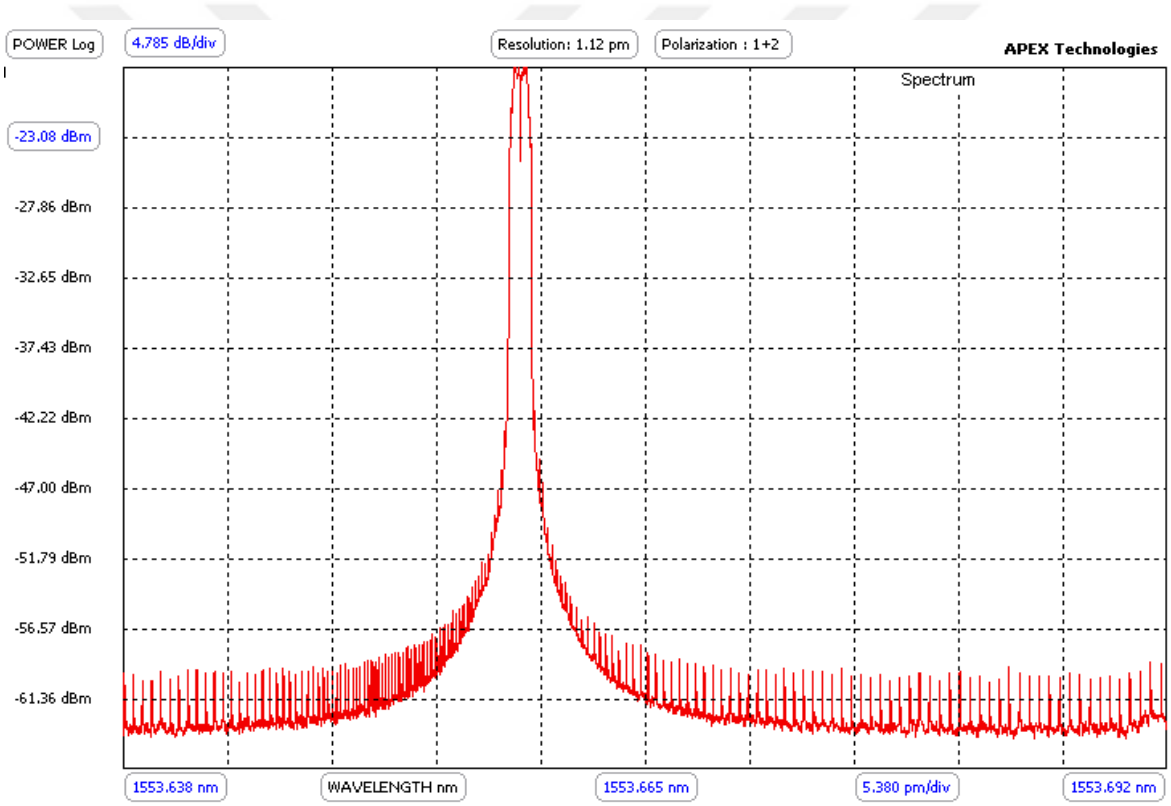
Şekil 5.18'de lazer giriş sinyalini darbeli hale getirmek için kurulan deneysel düzenek şematik olarak görülmektedir.



Şekil 5.18. Lazer giriş sinyalini darbeli hale getirmek için kurulan deneysel düzenek

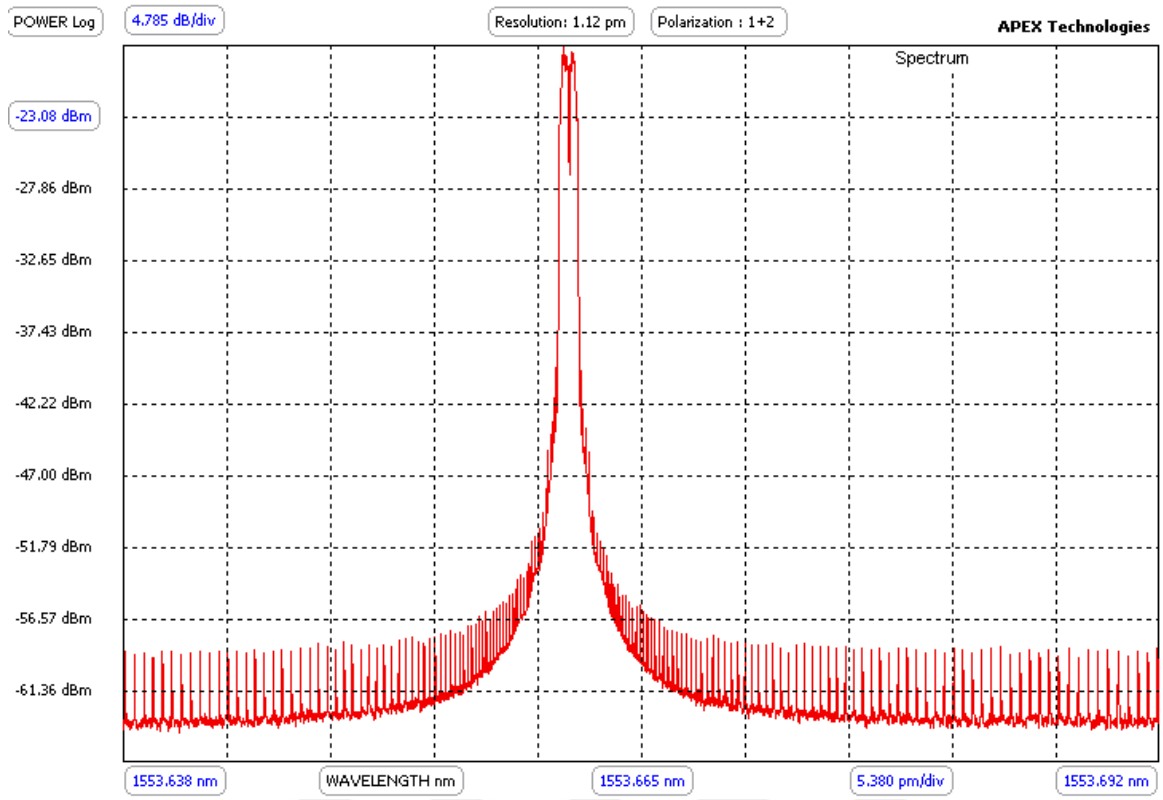
Lazer kaynağı olarak 1553 nm dalga boyu ve 10 dBm güce sahip ayarlanabilir bir lazer kaynağı kullanılmıştır. Lazer kaynaktan çıkan dalga darbe jeneratörü ile modüle edilen bir Mach Zehnder modülatöre gönderilmektedir. Darbe jeneratörü 5 KHz'lik frekansa ve sırasıyla 16 ns, 20 ns, 30 ns, 40 ns ve 50 ns genişliğinde bir elektriksel darbe oluşturmak için ayarlanmıştır. Modüle edilen sinyal EDFA'ya gönderilmektedir. EDFA'nın çıkışından alınan yükseltilmiş darbe sinyalleri analiz edilmek üzere yüksek çözünürlüklü optik spektrum analizörüne gönderilmektedir.

Her bir darbe sinyali için elde edilmiş optik spektrum analizör çıktıları Şekil 5.19'da görülmektedir.

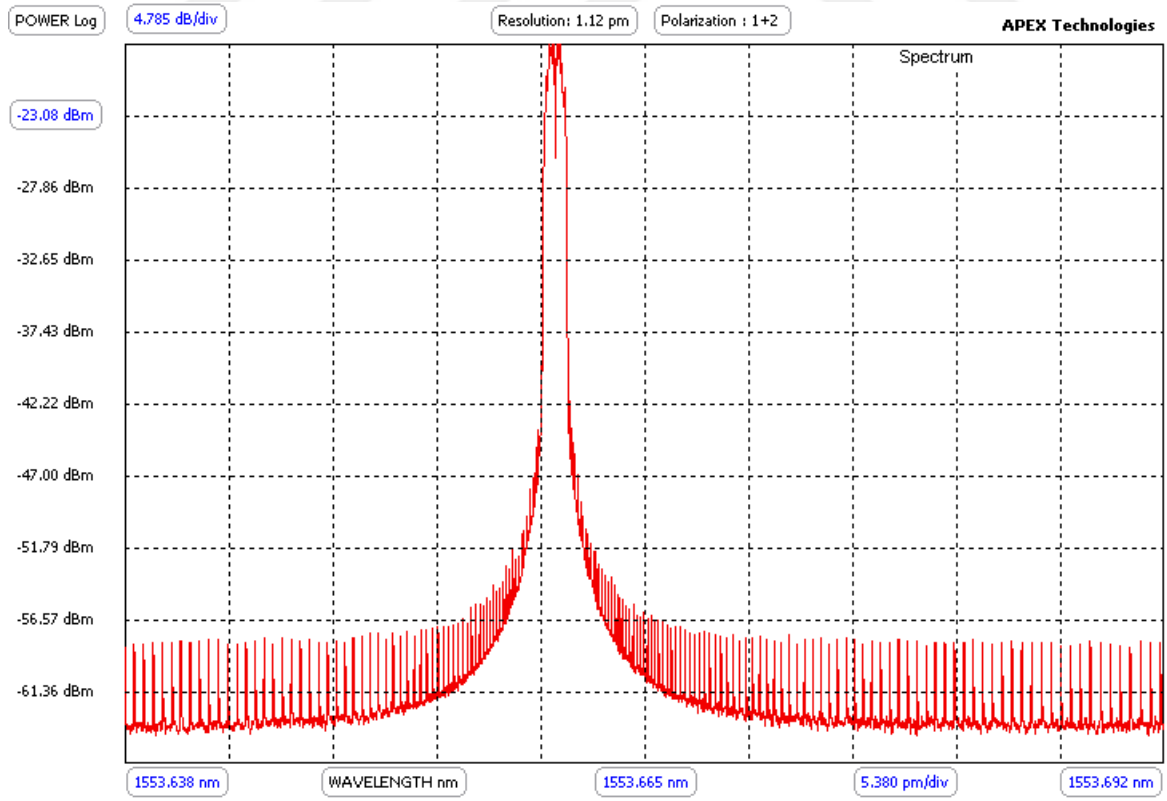


(a)

Şekil 5.19. Farklı darbe süreleri için modüle elde edilen lazer sinyale ait optik spektrum çıktıları (a) 16 ns (b) 20 ns (c) 30 ns (d) 40 ns (e) 50 ns

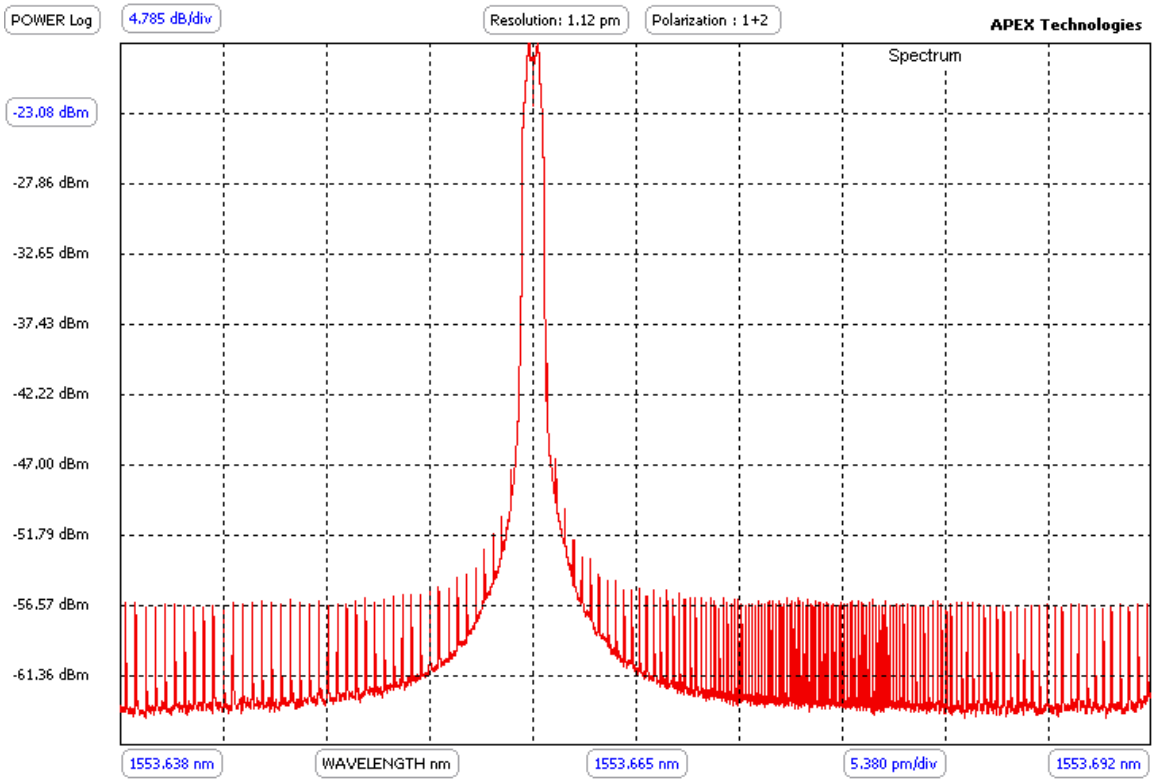


(b)

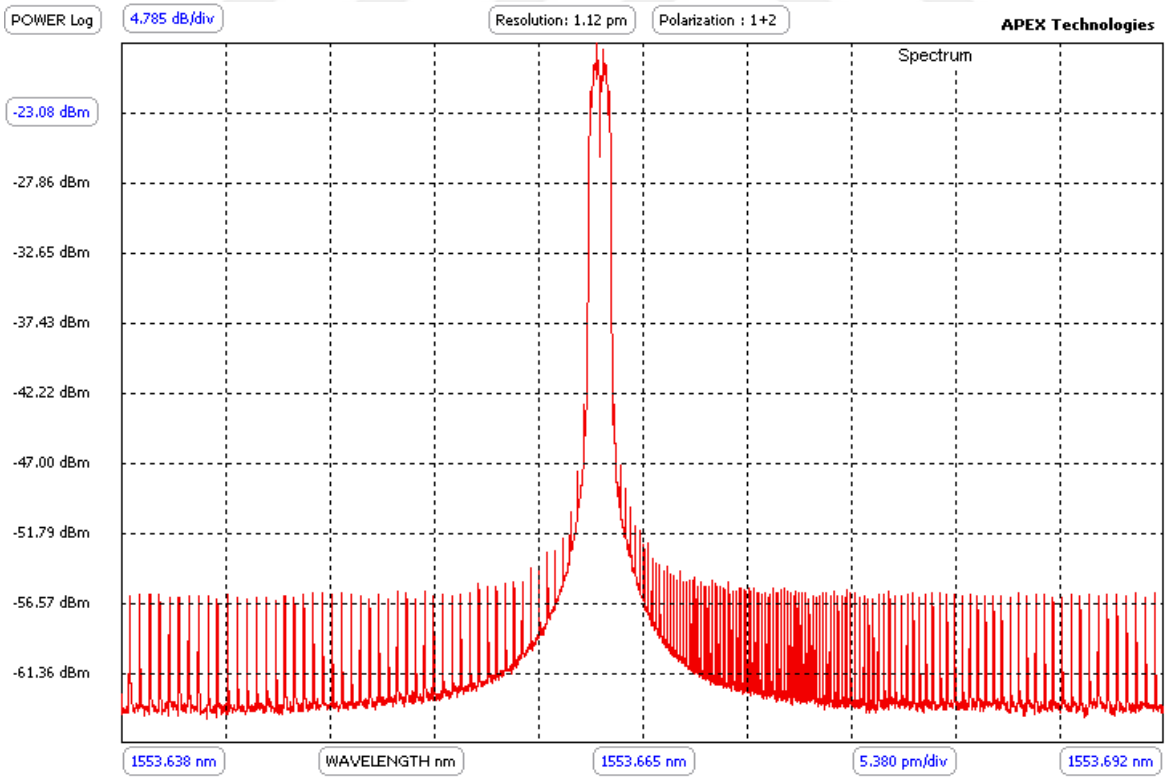


(c)

Şekil 5.19. (devam) Farklı darbe süreleri için modüle elde edilen lazer sinyale ait optik spektrum çıktıları (a) 16 ns (b) 20 ns (c) 30 ns (d) 40 ns (e) 50 ns



(d)



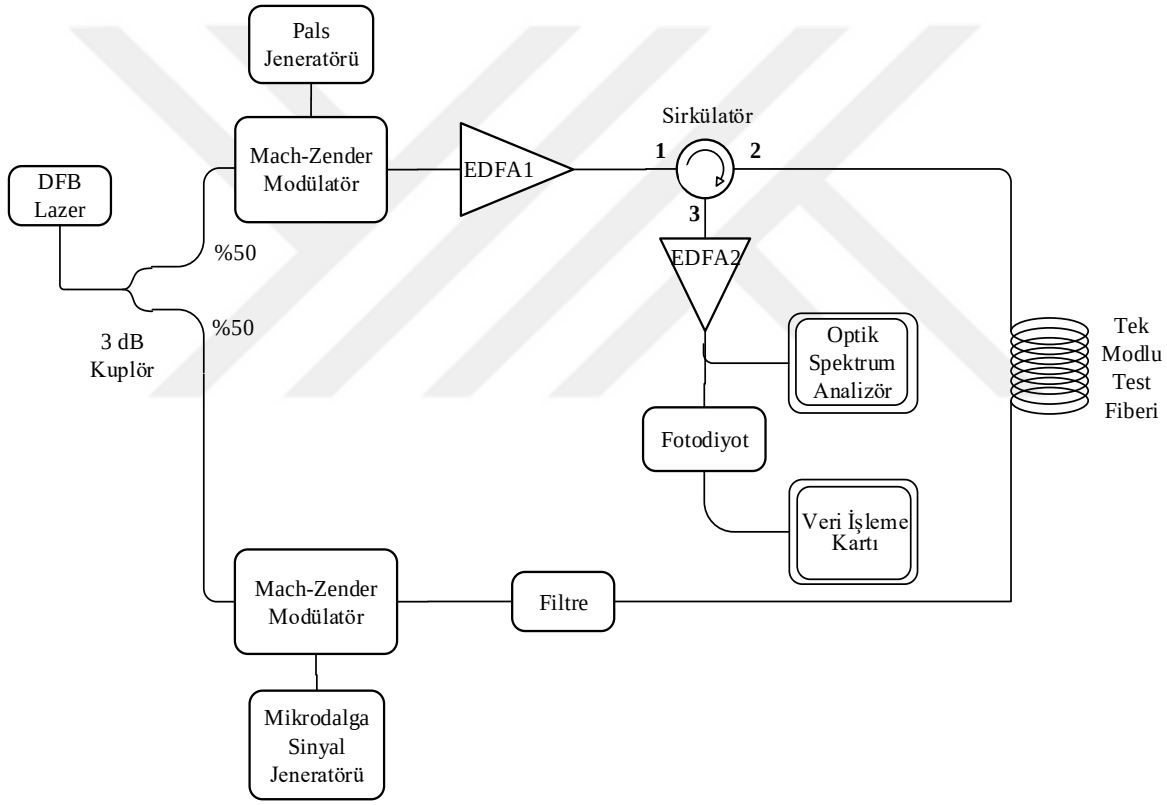
(e)

Şekil 5.19. (devam) Farklı darbe süreleri için modüle elde edilen lazer sinyale ait optik spektrum çıktıları (a) 16 ns (b) 20 ns (c) 30 ns (d) 40 ns (e) 50 ns

Sonuçta, şekillerden de anlaşılacağı gibi pals süresi arttıkça oluşan darbelerin gücünde artma görülmektedir. 16 ns darbe genişliği için -59 dBm, 20 ns darbe genişliği için -58 dBm, 30 ns darbe genişliği için -57 dBm, 40 ns darbe genişliği için -56 dBm ve 50 ns darbe genişliği için -55 dBm güç değerleri ölçülmüştür.

5.6. BOTDA Deneysel Kurulumu

Şekil 5.20'de dağıtık sıcaklık ve gerginlik algılama için kurulan deneysel BOTDA düzeneği şematik olarak görülmektedir.

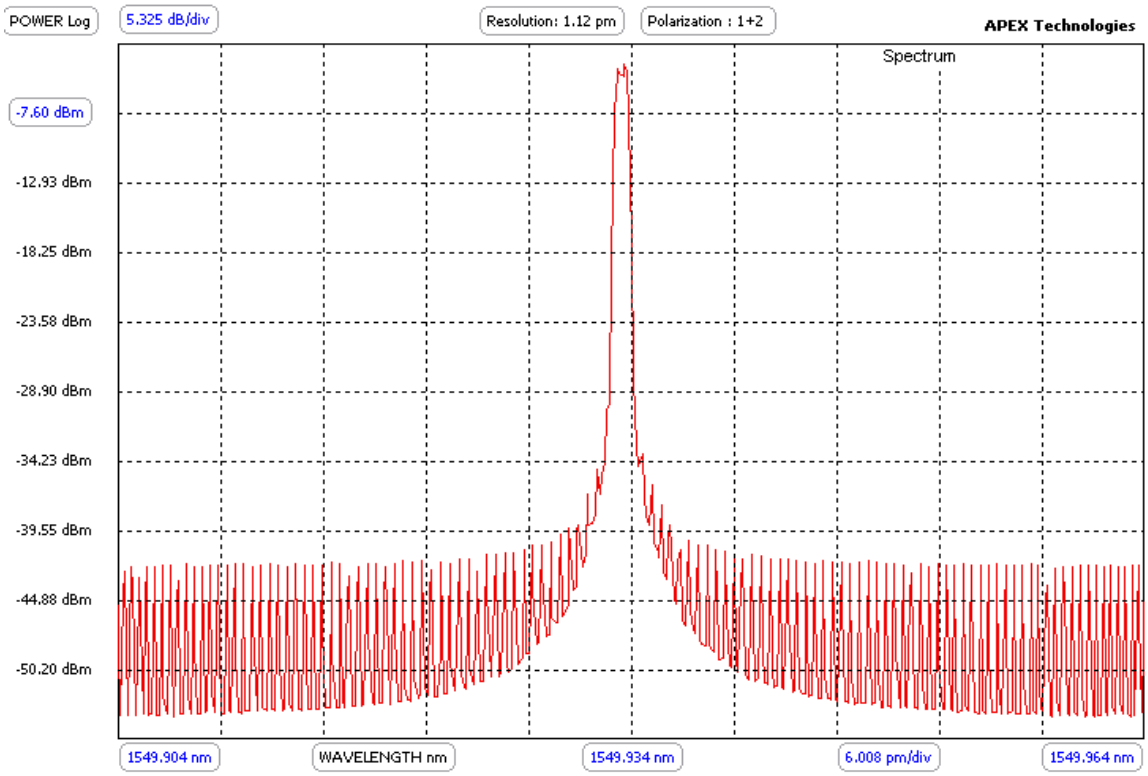


Şekil 5.20. Sıcaklık ve gerginlik algılama için kurulan deneysel BOTDA düzeneği

Lazer kaynağı olarak 1550 nm dalga boyu ve 10 dBm güce sahip ayarlanabilir bir lazer kaynağı kullanılmıştır. Lazer kaynaktan çıkan dalga, darbe ve pompa lazer sinyallerini oluşturmak için öncelikle 3 dB'lik 1x2 kuplör yardımıyla iki kola ayrılmaktadır. Aynı tek bir lazer kaynağının hem darbe hem de pompa lazer sinyallerini oluşturmak için kullanılmasının sebebi, iki farklı lazer kaynağı kullanıldığında oluşabilecek optik frekans kaymalarını önlemek içindir. Ayrılan dalgalardan biri, darbe jeneratörü ile modüle edilen bir yoğunluk Mach Zehnder modülatöre gönderilmektedir. Darbe jeneratörü 5 KHz'lik

frekansa ve fiber üzerinde 3 metre çözünürlük sağlayacak 30 ns darbe genişliğinde bir elektriksel darbe oluşturmak için ayarlanmıştır. Modüle edilen sinyal birinci EDFA'ya gönderilmektedir.

EDFA1 çıkışında elde edilen darbeli sinyale ait optik spektrum çıktısı Şekil 5.21'de görülmektedir.

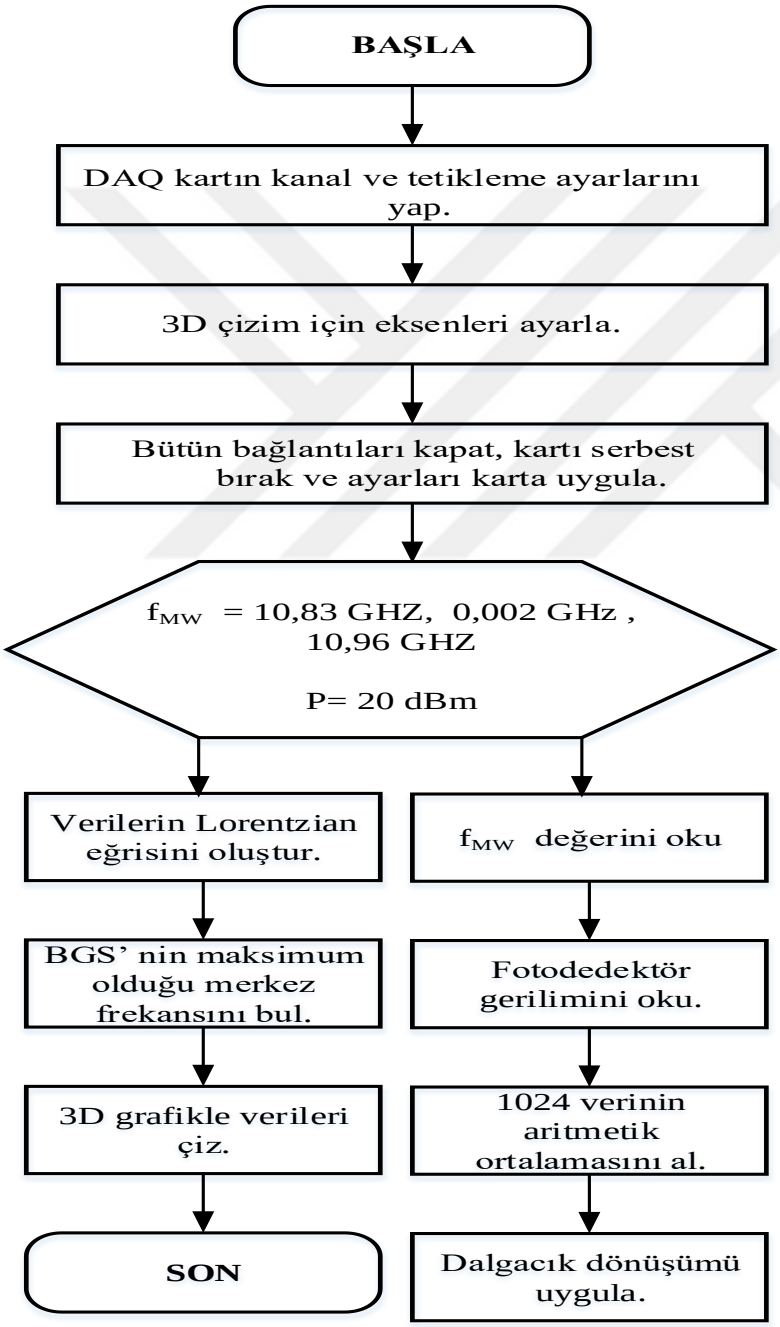


Şekil 5.21. Modülatör ile 30 ns darbe süresi için elde edilen darbeli lazer sinyale ait optik spektrum çıktısı

Şekil 5.21'de görüleceği gibi uygulanan lazer gücü yaklaşık - 2 dBm ölçülmüş, darbeli sinyalin gücü ise - 42 dBm olarak ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerde darbe süresi arttıkça darbeli sinyalin gücünün arttığı görülmüştür. Yükseltilen darbe sinyali sirkülatör yardımıyla yaklaşık 1100 m'lik tek modlu test fiberine uygulanmıştır. Diğer koldan ayrılan sinyal, mikrodalga sinyal jeneratörü tarafından modüle edilen diğer bir Mach Zehnder modülatöre gönderilmiştir. Darbe sinyali ve saçılan sinyal arasındaki güç geçişini yükseltmek amacıyla pompa ve darbe sinyalleri birbirlerine ters yönlerden uygulanmıştır. Saçılan darbe sinyali, ikinci bir EDFA'ya sirkülatörün 3 numaralı ucundan uygulanarak yükseltilmiştir. Yükseltilen saçılma sinyali veri işleme kartına gönderilmiştir.

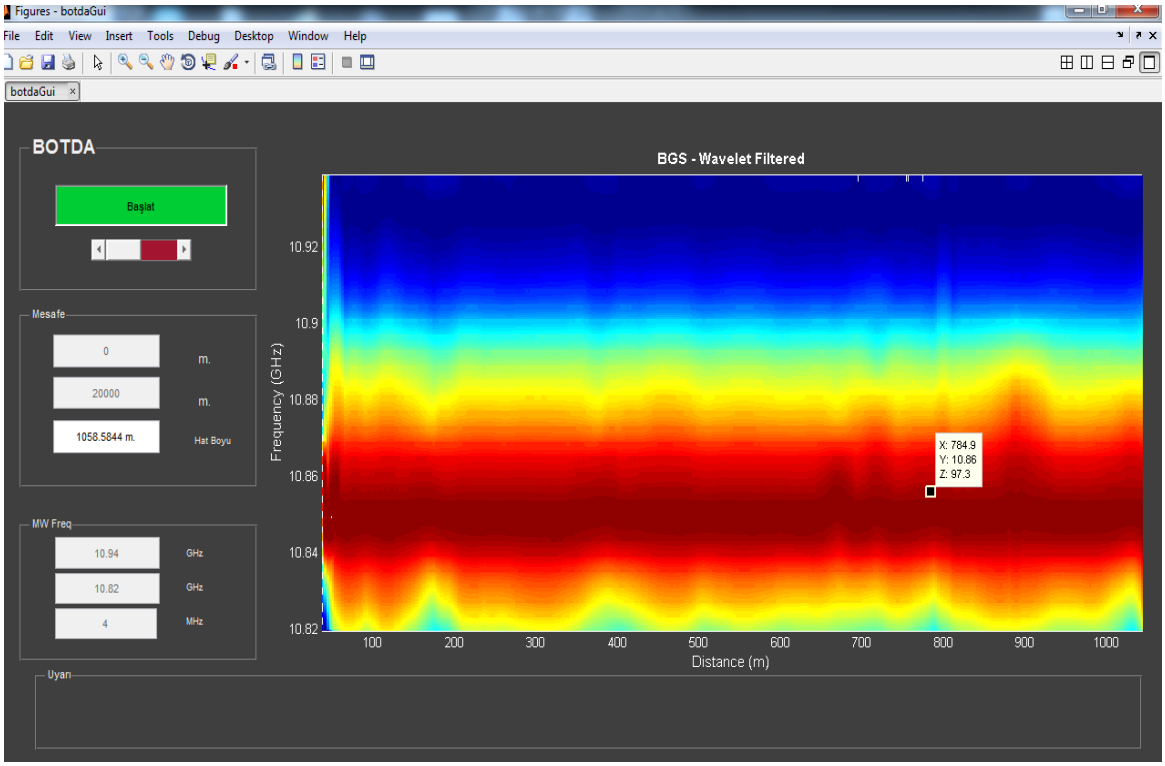
Brillouin geri saçılması ile yansıyan ışık sinyali, maksimum 200 Msa / s alabilen Compuscope DAQ kartı ile işlenebilecek RF frekans düzeyine getirilmiştir.

Alınan bu işaretler, MATLAB yazılımı kullanılarak, ortalama alma işleminden sonra bu çalışmaya özgü bir dalgacık algoritması kullanılarak gürültüden arındırılarak BGS Lorentz eğrisi oluşturulmuştur. Bu algoritmaya ait akış diyagramı Şekil 5.22'de görülmektedir.



Şekil 5.22. Sistem algoritmasına ait akış diyagramı

Veri işleme kartı aracılığıyla bilgisayara aktarılan veriler sinyal işleme algoritmaları kullanılarak işlenmiş, kullanıcı dostu bir ara yüz vasıtasıyla da Brillouin frekans kaymasının izlenmesi sağlanmıştır. Bu kullanıcı ara yüzü Şekil 5.23'de görülmektedir.

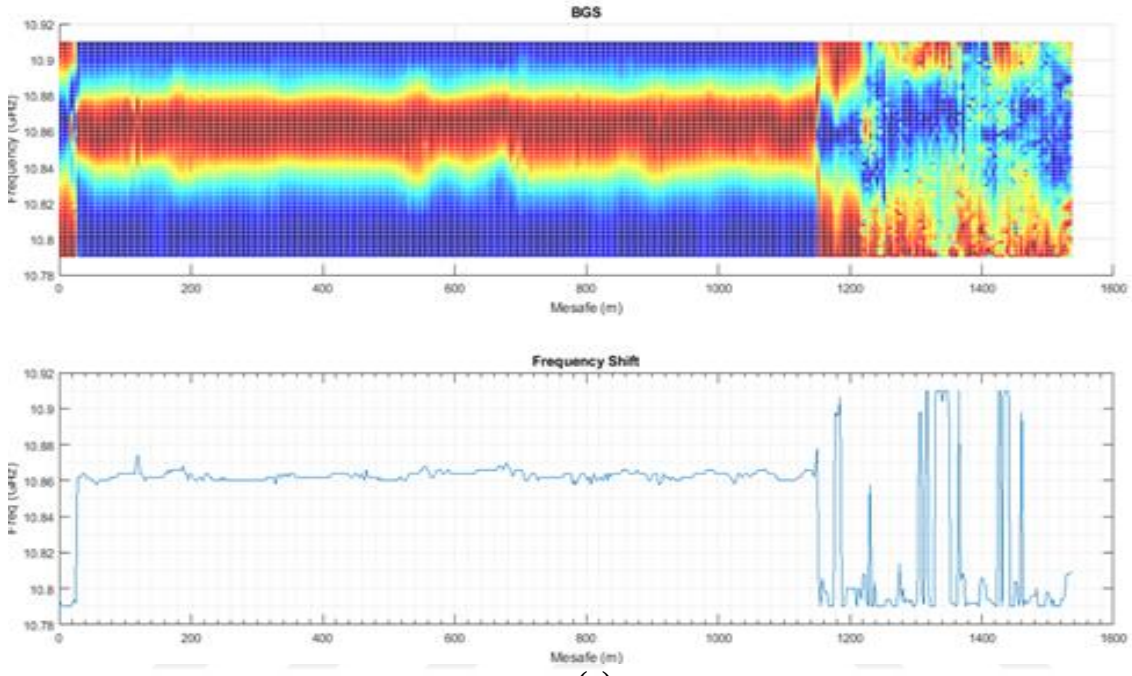


Şekil 5.23. Brillouin frekans kaymasının izlenmesi amacıyla hazırlanan kullanıcı ara yüzü

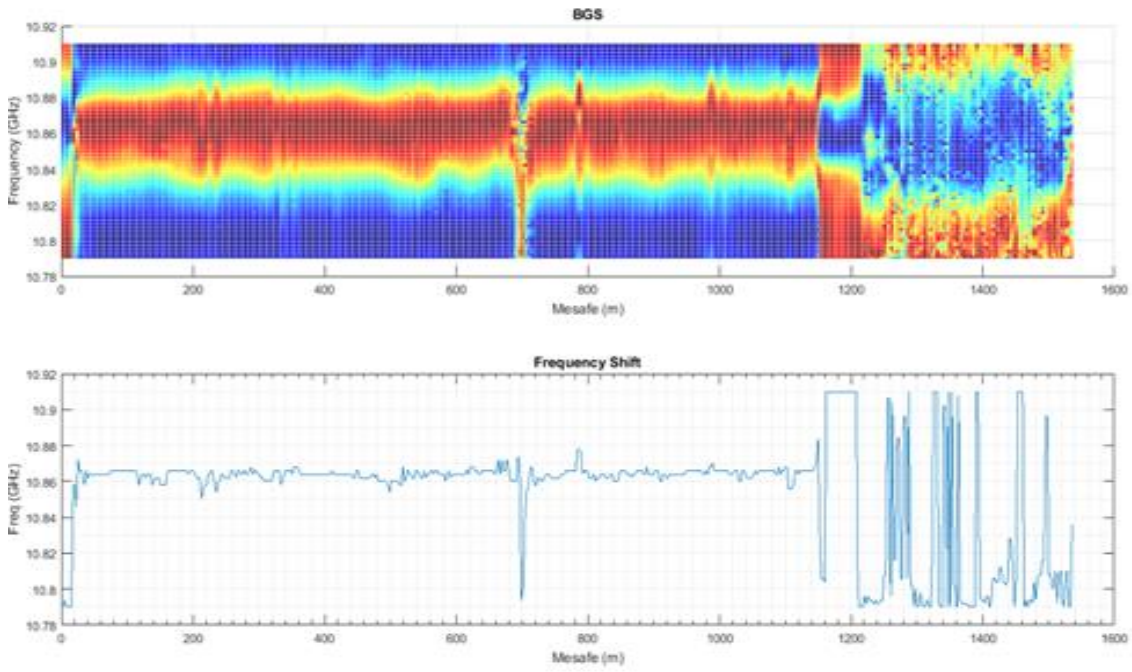
Şekil 5.23'de görülen ara yüzün sol tarafında, hat boyunun otomatik olarak ölçülmesini sağlayan veri bilgi ekranı oluşturulmuştur. Yine mikro dalga sinyal jeneratörü otomatik kontrol edilerek, beklenen Brillouin frekans kaymasının alt ve üst sınırları girilebilmekte, aynı zamanda hangi frekans adımlarıyla fiber kablo üzerinde tarama yapılacağı ayarlanabilmektedir. Yukarıda görülen ara yüz ile 4 Mhz'lik adımlarla 10,82 GHz ve 10,94 Ghz aralığında yaklaşık 1100 m'lik tek modlu fiber kablo üzerinde tarama yapılmıştır. Herhangi bir sıcaklık veya gerinim değişimi yokken BFS değeri, 10,86 GHz olarak ölçülmüştür.

Tüm lazer frekans farklarındaki zaman izlerini görüntüleme ile 3 boyutlu bir tek şekil elde edilmiştir. Bu elde edilen şekilde x ekseni fiber boyunca nokta sayısını (fiber uzunluğu),Y ekseni tarama için kullanılan lazer frekansı farkını ve z ekseni, CW ışının gücünü temsil etmektedir.

Şekil 5.24'de yaklaşık 1100 m boyunda test fiberine ait konumlu gerginlik ölçüm sonuçları görülmektedir. Şekil a'da herhangi bir gerilme yokken elde edilen mesafe Brillouin frekans kayması grafiği görülmektedir. Şekil b ve Şekil c'de ise yaklaşık 700. metreye uygulanan farklı gerilmelere göre elde edilen Brillouin frekans kayması grafiği görülmektedir.

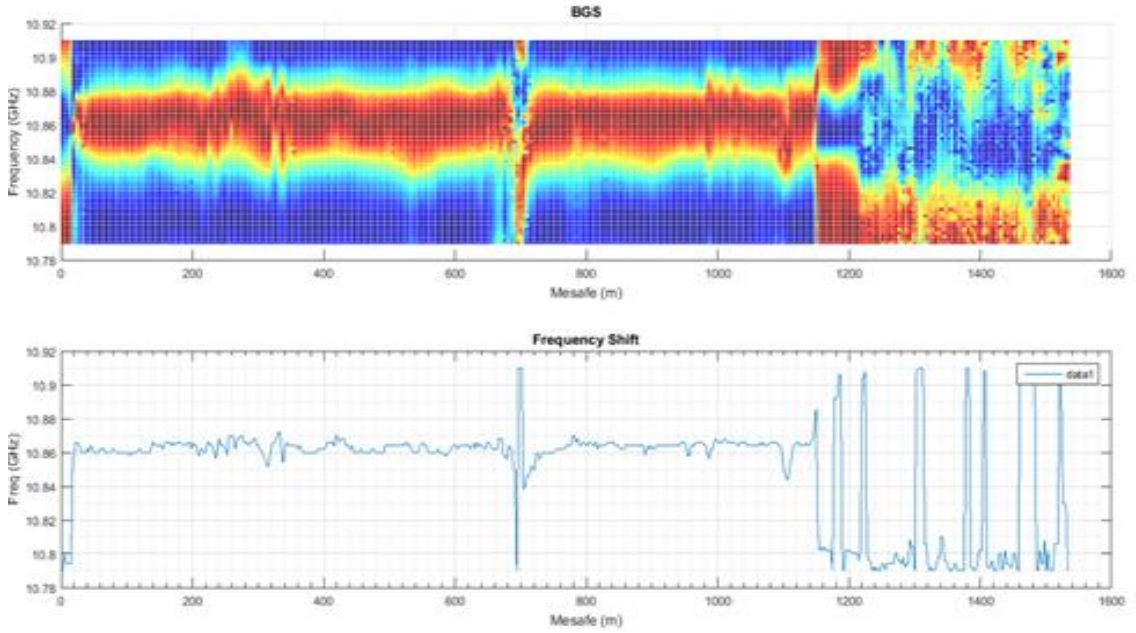


(a)



(b)

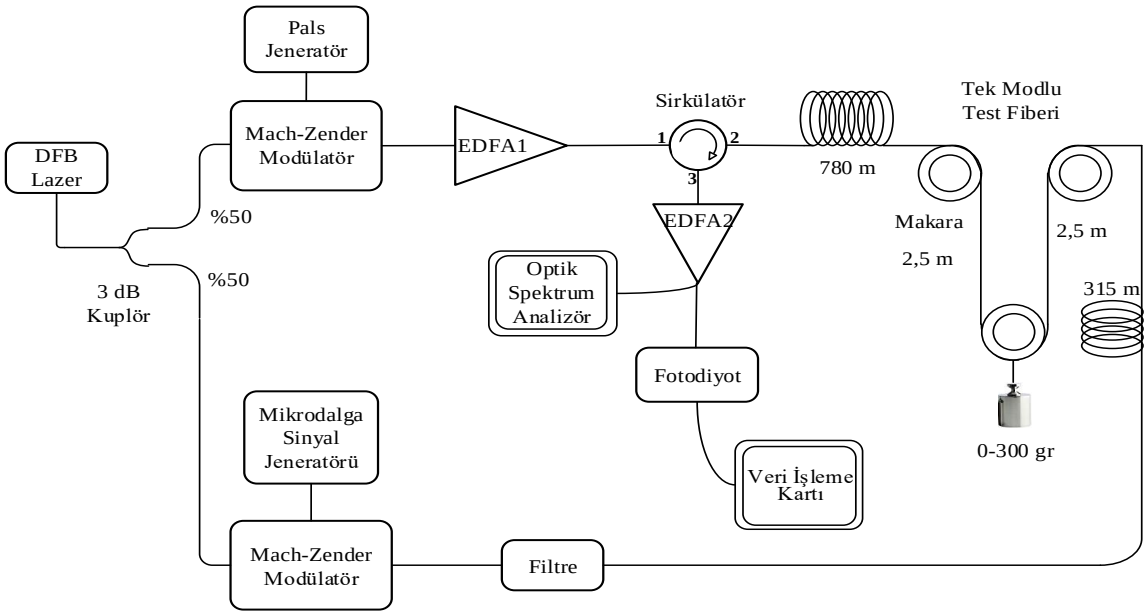
Şekil 5.24. 1100 m boyunda test fiberine ait konumlu gerginlik ölçüm sonuçları (a) gerilme yokken (b) ve (c) test kablosunun 700. metresine gerginlik uygulandığında



(c)

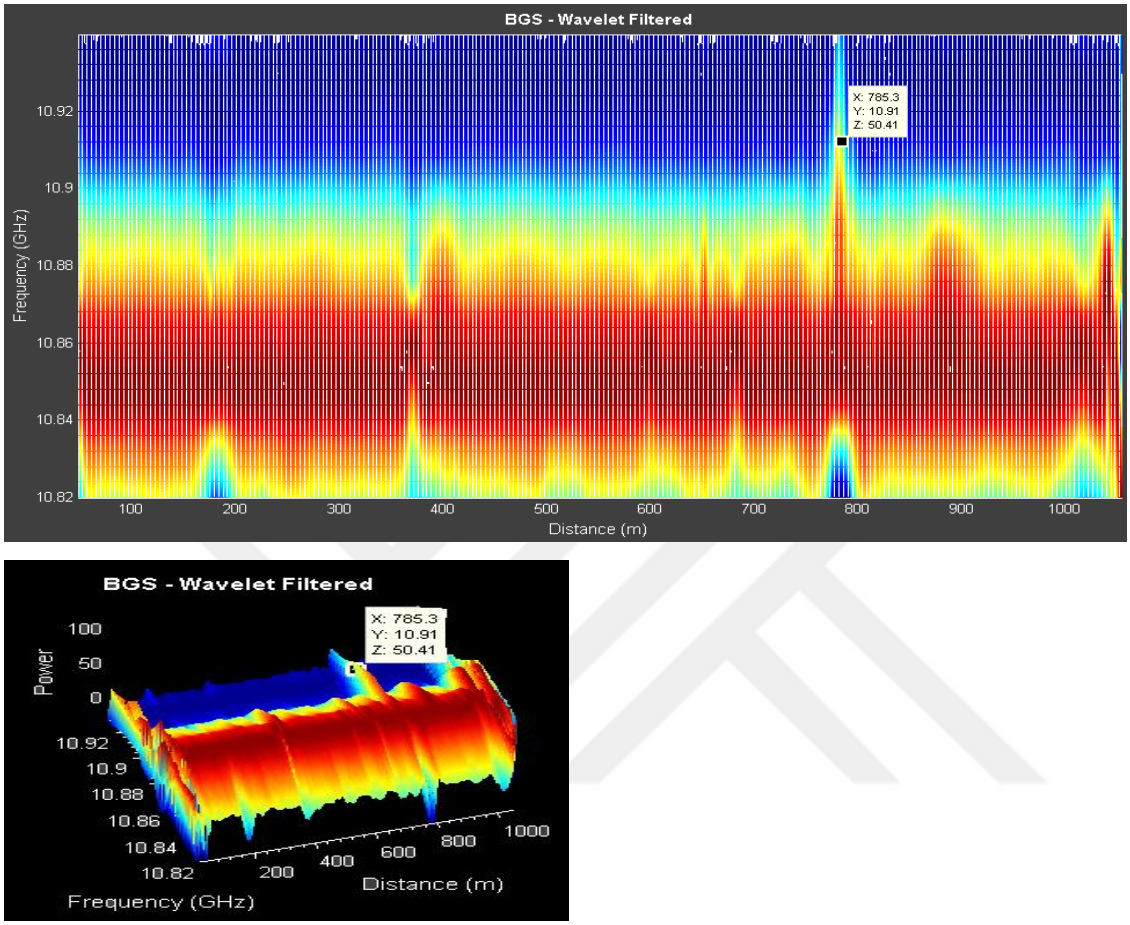
Şekil 5.24. (devam) 1100 m boyunda test fiberine ait konumlu gerginlik ölçüm sonuçları (a) gerilme yokken (b) ve (c) test kablosunun 700. metresine gerginlik uygulandığında

Dağıtık gerinim algılama için kurulan deneysel BOTDA düzeneği ile ağırlık algılama amacıyla tek modlu fiber kablonun 785. metresine üç adet makaradan oluşan bir düzenek eklenmiştir. Şekil 5.25'de dağıtık ağırlık algılama için kurulan deneysel BOTDA düzeneği şematik olarak görülmektedir.



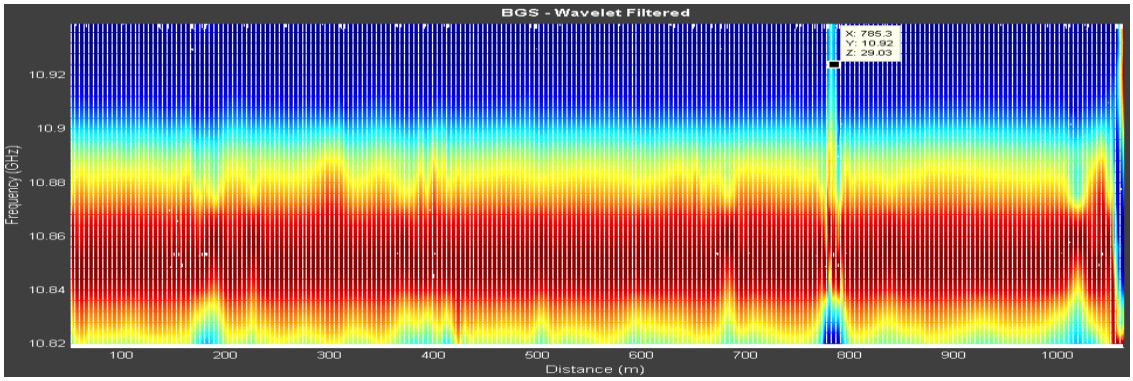
Şekil 5.25. Ağırlık algılama için kurulan deneysel BOTDA düzeneği

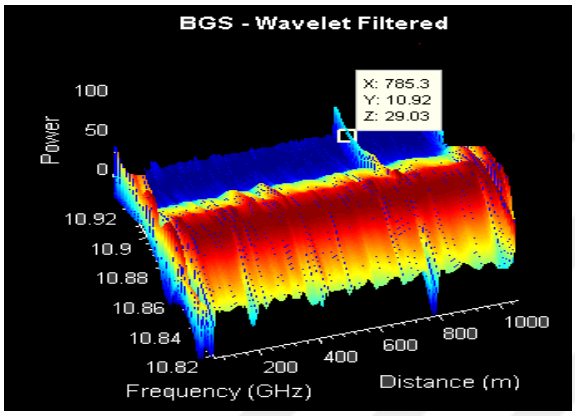
Şekil 5.26, test fiberinin yaklaşık 785. metresine uygulanan farklı ağırlıklara ait mesafe, güç ve Brillouin frekans kayması değerlerini göstermektedir [117].



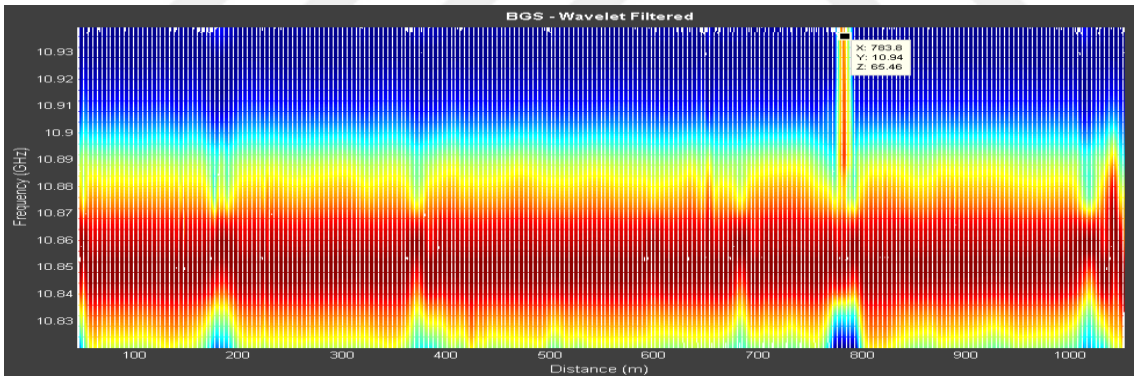
(a)

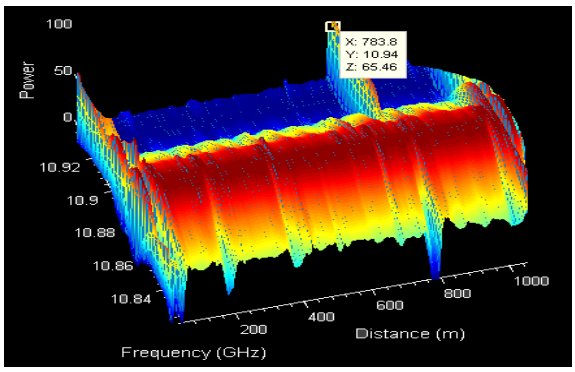
Şekil 5.26. Fibere uygulanan farklı ağırlıklara göre elde edilen Brillouin frekans değerleri (a) 150 gr (b) 200 gr (c) 250 gr





(b)



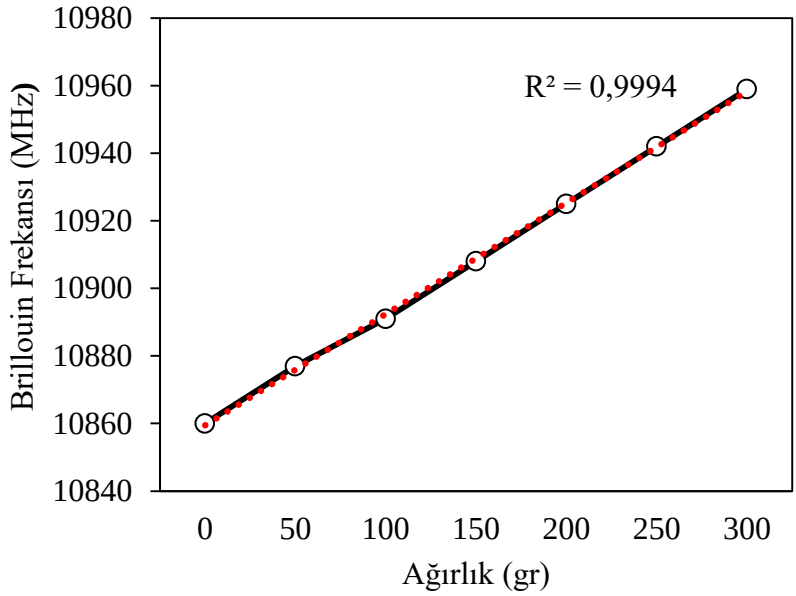


(c)

Şekil 5.26. (devam) Fibere uygulanan farklı ağırlıklara göre elde edilen Brillouin frekans değerleri (a) 150 gr (b) 200 gr (c) 250 gr

Şekil 5.26 incelendiğinde, fiberin yaklaşık 785. metresine uygulanan 150 gr ağırlığın yaklaşık 10,910 GHz'lik bir Brillouin kaymasına, 200 gr ağırlığın yaklaşık 10,926 GHz'lik bir Brillouin kaymasına ve 250 gr ağırlığın yaklaşık 10,943 GHz'lik bir Brillouin kaymasına sebep olduğu görülmektedir.

Gerinim ve Brillouin fark frekansı arasındaki doğrusal orantı göz önüne alındığında, bu deneyde gözlemlenen uygulanan farklı ağırlıklara göre elde edilen Brillouin frekansına ait grafik Şekil 5.27'de görülmektedir.



Şekil 5.27. 1100 m'lik tek modlu fiber için ağırlık değişimine karşılık Brillouin frekansı

Şekil 5.27 incelendiğinde, test fiber kablosunun 785. metresine uygulanan 0 ile 300 gr arasındaki ağırlıklara bağlı olarak oluşan, gerinime bağlı Brillouin frekans kaymasının doğrusal bir artış gösterdiği görülmektedir.

Veriler incelendiğinde Brillouin frekans kaymasının ağırlığa bağlı olarak yaklaşık 1 MHz / 3 gr bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu doğrusal değişim Brillouin saçılmasının ağırlık ve gerinim algılayıcı olarak kullanımına uygunluğunu göstermiştir.

Gerilme, birim alana etki eden kuvvet miktarını temsil eder.

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{5.1}$$

eşitliği ile ifade edilir. Eş. 5.1'de F, kuvveti, A ise birim alanı temsil etmektedir. Bir cisim üzerine etki eden kuvvetler; çekme, baskı ve kesme gerilmesi olmak üzere üç türde gerilme meydana getirirler.

Gerinim ise, yük altındaki bir malzemenin, yük uygulanmadan önceki duruma kıyasla şeklini ne oranda değiştirdiğini ifade eder. Dolayısıyla gerinim, bir malzemedeki şekil değişiminin matematiksel olarak ifade edilebilmesini sağlar. Bir cisme uygulanan kuvvet neticesinde oluşan gerinim, cismin uzunluğundaki değişimin ilk uzunluğuna oranı olarak ifade edilmektedir [118].

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \tag{5.2}$$

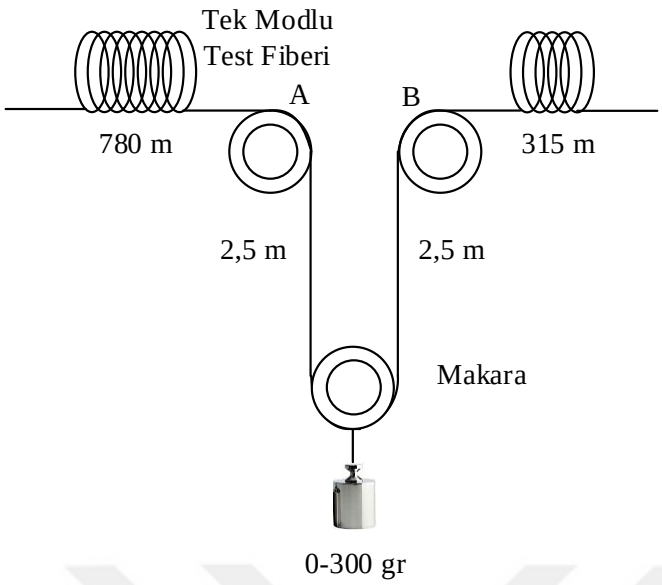
Burada ε gerinimi, L uzunluğu ve ΔL uzunluktaki değişimi ifade etmektedir. Ölçülen gerinimin büyüklüğü çok küçüktür, dolayısıyla genellikle microstrain (με) ile tanımlanmaktadır [118].

Eş. 5.3'de verilen, gerilme ve gerinim arasındaki ilişkinin doğrusallığını gösteren eşitliğe, Hooke kanunu adı verilir.

$$\sigma = E \,.\, \varepsilon \tag{5.3}$$

E ile gösterilen, malzemede oluşan gerilme ve gerinim arasındaki oranı veren bu sabite Young modülü ya da elastik modülü adı verilir.

Şekil 5.28'de deneysel BOTDA düzeneğinin, farklı ağırlıklar kullanılarak gerinim ölçümü için kullanılan kısmı görülmektedir. Bu kısımda toplamda 1100 metrelik tek modlu fiber kablo 785 m ve 315 m olmak üzere iki bölüme ayrılmış ve ikisinin arasında kalan 5 m'lik kısma farklı ağırlıklar uygulanarak BFS ölçülmüştür.



Şekil 5.28. Deneysel BOTDA düzeneğinin farklı ağırlıklar kullanılarak gerinim ölçümü için kullanılan kısmı

Eş. 4.37 kullanılarak, sabit sıcaklıkta alınan ölçümler sonucunda A ve B noktasında oluşan toplam gerinim hesaplanabilir. Standart tek modlu fiberler için, 1550 nm bandında, C_ε değeri ~50 KHz / με kabul edilebilir [72]. Uygulanan 150 gr ağırlık için;

$$\nu_B(\varepsilon) = C_\varepsilon \Delta\varepsilon + \nu_B(\varepsilon_0) \tag{5.4}$$

$$10{,}91\ \text{GHz} = 50\ \text{KHz}.\,\Delta\varepsilon + 10{,}86\ \text{GHz}$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{10{,}91\ \text{GHz} - 10{,}86\ \text{GHz}}{50\ \text{KHz}} = \frac{50000\ \text{KHz}}{50\ \text{KHz}} = 1000\ \mu\varepsilon$$

olarak hesaplanır. Aynı işlemler test fiberine uygulanan 200 gr ve 250 gr ağırlıklar için de yapılırsa sırasıyla 1320 με ve 1660 με gerinim değerleri elde edilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Saçılıma dayalı dağıtık optik algılayıcı sistemlerinde günümüzde ölçüm süresini azaltma, mesafe artışı, ölçüm aralığı, sinyal gürültü oranını arttırma ve algılayıcı duyarlılığı gibi konularda performans geliştirmek amacıyla çalışmalar devam etmektedir. Tez konusu olan Brillouin saçılması tabanlı dağıtık optik algılayıcı tasarımının yüksek performanslı olması amacıyla çeşitli benzetimler oluşturulmuş ve sıcaklık, gerginlik ve ağırlık ölçümleri ile ilgili deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Tezin üçüncü bölümünde günümüzde pek çok kullanım alanı olan Sagnac girişimölçer, Mach-Zehnder girişimölçer, Michelson girişimölçer, Fabry-Perot girişimölçer ve Fiber Bragg ızgara tabanlı optik algılayıcılar incelenmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde ise diğer optik algılayıcılara göre çeşitli üstün özellikleri yüzünden araştırmalara konu olan dağıtık algılama tabanlı sitemlere ait Rayleigh, Raman ve Brillouin saçılmaları incelenmiştir. Brillouin saçılmasına ait numerik analiz yapılmıştır. Tasarımda tercih edilen yükseltilmiş Brillouin saçılması tabanlı BOTDA algılayıcıların çalışması ve kullanılacak ölçüm tekniği irdelenmiştir. SNR yükseltmek amacıyla kullanılacak dalgacık dönüşümü analizi yapılmıştır.

Tezin beşinci bölümünde, BOTDR ve BOTDA tabanlı benzetimler OPTISYSTEM yazılımı ile oluşturulmuştur. Bu benzetimlerde zayıflamanın en düşük olduğu pencerede yer alan 1550 nm dalga boylu lazer kaynak kullanılmıştır. BOTDR benzetiminde 50 km'lik tek modlu fiber kablo kullanılmış, Rayleigh ve Brillouin saçılmaları arasında 11,0126 GHz'lik bir frekans kayması elde edilmiştir. BOTDA tabanlı benzetimde ise, 2 km'lik tek modlu fiberin farklı sıcaklıklarda elde edilen Brillouin frekans kayması incelenmiştir. 273 K sıcaklıktaki algılama fiberinde 10,76 GHz, 283 K sıcaklık için 10,94 GHz ve 293 K sıcaklık için ise 11,20 GHz Brillouin frekans kayması bulunmuştur. Bu kapsamda hazırlanan çalışmanın bir bölümü 2014 yılında 22. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayında bildiri olarak yer almıştır [94].

Tasarlanan sistemde kullanılacak optik fiber kablo türünün belirlenmesi amaçlı BOTDA tabanlı bir deney düzeneği yapılmıştır. Bu düzenekte ayarlanabilir bir lazer kaynağı ile

1526 nm ile 1570 nm dalga boylu sinyal kullanılmıştır. Test fiberleri olarak 13 km'lik tek modlu fiber ve yine aynı boyda dispersiyonu kaydırılmış fiber kullanılmıştır. Tek modlu fiberde uygulanan dalga boyu ile ters orantılı 11,05 GHz ile 10,74 GHz arasında, dispersiyonu kaydırılmış fiberde ise 10,98 GHZ ile 10,67 GHz Brillouin frekans kayması ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda tek modlu fiberdeki Brillouin frekans kaymasının daha yüksek güçlü olması nedeniyle optik algılama için daha uygun olduğu görülmüştür. Bu çalışma 2015 yılında 23. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayında bildiri olarak yer almıştır [115].

Diğer bir deneysel çalışmada, 95 m uzunluğa sahip test fiber kablosuna farklı sıcaklıklar uygulanarak BOTDR tabanlı bir sıcaklık algılama düzeneği oluşturulmuştur. Çalışmada, 10 ile 60 °C arasındaki sıcaklıklar için Brillouin kayma frekansının sıcaklığa bağlı olarak 0,93 MHz / °C'lik bir doğrusal artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışma o güne kadar literatürde yapılmış en kısa uzunluğa sahip kabloya ait çalışmadır. Sonuçlar TÜBİTAK Elektrik ve Bilgisayar bilimleri dergisinde yayımlanmış ve çalışmaya ait bazı veriler 2016 yılında 24. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayında bildiri olarak yer almıştır [86,116].

Dağıtık optik algılama sistemlerinde sürekli dalga lazer işaretini darbeli hale getirmek, güçteki düşüşten dolayı önem arz eder. Bu sebeple Mach- Zender modülatör ve darbe jeneratörü kullanılarak sistem için gerekli 16 ns, 20 ns, 30 ns, 40 ns ve 50 ns genişliğinde darbeli sinyaller elde edilmiştir. Elde edilen sinyaller optik spektrum analizörü ile incelenmiş ve pals süresi arttıkça oluşan darbe sinyallerin gücünde artma görülmüştür. Bu çalışmaların bir bölümü 2016 yılında Singapur'da Dünya Bilim, Mühendislik ve Teknoloji Akademisi'nde sunulmuş ve Uluslararası Elektrik, Bilgisayar, Enerji, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Dergisi'nde yayımlanmıştır. Ayrıca çalışmanın bir kısmı 2017 4.Uluslararası Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Konferansı'nda da sunulmuştur [95-96].

Diğer bir çalışmada, tek modlu test fiberinin belirli bir noktasında meydana gelen, gerginlik ve ağırlık algılama için deneysel BOTDA tabanlı bir düzenek kurulmuştur. Optik kablonun belirli bir noktasına farklı gerginlik ve ağırlıklar uygulanarak Brillouin frekans kayması ile saçılan ışık sinyali maksimum 200 Msa / s veri alabilen Compuscope DAQ kartı ile işlenerek, MATLAB yazılımı kullanılarak ortalama alma işleminden sonra bu

çalışmaya özgü bir dalgacık dönüşümü algoritması kullanılarak 3 boyutlu grafiksel sonuçlar elde edilmiştir. 1100 m'lik tek modlu test fiberinde gerilme yokken ve 700. metresine gerginlik uygulandığında elde edilen Brillouin frekans kayması grafikleri elde edilmiştir. Test fiberinin 785. Metresine uygulanan farklı ağırlıklara bağlı Brillouin saçılmasına ait mesafe, güç ve frekans değeri algılanmıştır. 785. metresine uygulanan 150 gr ağırlığın yaklaşık 10,91 GHz'lik bir Brillouin kaymasına, 200 gr ağırlığın yaklaşık 10,92 GHz'lik bir Brillouin kaymasına ve 250 gr ağırlığın yaklaşık 10,94 GHz'lik bir Brillouin kaymasına sebep olduğu incelenmiştir. Elde edilen grafiksel sonuçlara göre Brillouin frekans kaymasının ağırlığa bağlı olarak yaklaşık 1 MHz / 3 gr bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın bir kısmı da 2017 yılında 25. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayında bildiri olarak yer almıştır [117].

Gelecek çalışmalarda, bu tezde gerçekleştirilen BOTDA tabanlı fiber optik algılayıcı kullanılarak uzun mesafeli tek modlu fiber kablolar kullanılarak sıcaklık, gerginlik ve ağırlık ölçümleri konumsal olarak çok hızlı ve yüksek çözünürlüklü olarak elde edilebilir. Uygun malzeme seçimi ile tez kapsamında elde edilen verilerle milli bir ürün tasarımı yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Coşkun S. (2009). *Sıcaklık ve EKG takibi için fiber optik ızgara sensör ağı tasarımı*, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

2. Sifta, R., Munster, P., Sysel, P., Horvath, T., Novotny, V., Krajsa, O., & Filka, M. (2015). Distributed fiber-optic sensor for detection and localization of acoustic vibrations. *Metrology and Measurement Systems*, 22(1), 111-118.

3. Kobyakov, A., Sauer, M., & Chowdhury, D. (2010). Stimulated Brillouin scattering in optical fibers. *Advances in Optics and Photonics*, 2(1), 1-59.

4. Hazarika, D.and Pegu, D. S. (2013). Micro-Controller based air pressure monitoring instrumentation system using optical fibers as sensor. *Optical Fiber Technology*, 19(2), 83-87.

5. Buchade, P. B. (2013). Microcontroller based mobile platform with fiber optic sensors. *International Journal of Soft Computing and Engineering*, 3(1), 2231-2307.

6. Palma, A. J., López-González, J., Asensio, L. J., Fernández-Ramos, M. D., and Capitán-Vallvey, L. F. (2007). Microcontroller-based portable instrument for stabilised optical oxygen sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 121(2), 629-638.

7. Rehman, M., Loon, C. E., Abu_Al_Aish, A., & Arshad, M. R. (2011). Remote measurement of liquid flow using turbine and fiber optic techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(5), 1661-1666.

8. Omar, A. F., and MatJafri, M. Z. (2008). *Development of optical fiber sensor for water quality measurement*. In AIP Conference Proceedings, Malaysia, (Vol. 1017, No. 1, pp. 398-402).

9. Ryder, N. C. (2013). Microcontroller based data acquisition system for silicon photomultiplier detectors. *Journal of Instrumentation*, 8(02), C02019.

10. Qiuhong Zhang and Qian Liu (2014). Build intelligent home furnishing control system by microcontroller GSM and optical fiber sensor. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 6(7), 1689-1696.

11. Zhang, J., Chen, F., Sun, B., and Li, C. (2013). Wavelength Tuning for LiNbO3 Photonic Sensor to Have Linear Operation Point. *Microwave and Optical Technology Letters*, 55(10), 2326-2329.

12. Uzenkov, O., Lee, P., and Webb, D. (2006). *An FPGA based Measurement System for a Fibre Bragg Grating (FBG) Strain Sensor*. In Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC 2006. Proceedings of the IEEE, Sorrento,2364-2367.

13. Wild, G., and Hinckley, S. (2009). *Distributed optical fibre smart sensors for structural health monitoring: A smart transducer interface module*. In Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), 2009 5th International Conference, Melbourne, 373-378.

14. Altuğ, G. (2007). *Fiber Optik Grating Sensörler*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

15. Qin, Z. (2013). *Distributed optical fiber vibration sensor based on Rayleigh backscattering*. University of Ottawa, Ph.D. Thesis, Ottawa University, Canada.

16. Karaman, L., & Ünverdi, N. O. (1997). *Fiber Bragg Izgara Tabanli Optik Sensörün Analizi*. IV. Ulusal Iletisim Teknolojileri Sempozyumu, İstanbul.

17. Bao, X. and Chen, L. (2012). Recent progress in distributed fiber optic sensors. *Sensors*, 12(7), 8601-8639.

18. Soto, M. A., Bolognini, G., Di Pasquale, F., and Thévenaz, L. (2010). Simplex-coded BOTDA fiber sensor with 1 m spatial resolution over a 50 km range. *Optics Letters*, 35(2), 259-261.

19. Liang, H., Li, W., Linze, N., Chen, L., and Bao, X. (2010). High-resolution DPP-BOTDA over 50 km LEAF using return-to-zero coded pulses. *Optics Letters*, 35(10), 1503-1505.

20. Rodríguez-Barrios, F., Martín-López, S., Carrasco-Sanz, A., Corredera, P., Ania-Castañón, J. D., Thévenaz, L., & González-Herráez, M. (2010). Distributed Brillouin fiber sensor assisted by first-order Raman amplification. *Journal of Lightwave Technology*, 28(15), 2162-2172.

21. Soto, M. A., Bolognini, G., & Di Pasquale, F. (2011). Optimization of long-range BOTDA sensors with high resolution using first-order bi-directional Raman amplification. *Optics Express*, 19(5), 4444-4457.

22. Jia, X. H., Rao, Y. J., Chang, L., Zhang, C., & Ran, Z. L. (2010). Enhanced sensing performance in long distance Brillouin optical time-domain analyzer based on Raman amplification: theoretical and experimental investigation. *Journal of Lightwave Technology*, 28(11), 1624-1630.

23. Zornoza, A., Pérez-Herrera, R. A., Elosúa, C., Diaz, S., Bariain, C., Loayssa, A., & Lopez-Amo, M. (2010). Long-range hybrid network with point and distributed Brillouin sensors using Raman amplification. *Optics Express*, 18(9), 9531-9541.

24. Sperber, T., Eyal, A., Tur, M., & Thévenaz, L. (2010). High spatial resolution distributed sensing in optical fibers by Brillouin gain-profile tracing. *Optics Express*, 18(8), 8671-8679.

25. Li, Y., Bao, X., Dong, Y., & Chen, L. (2010). A novel distributed Brillouin sensor based on optical differential parametric amplification. *Journal of Lightwave Technology*, 28(18), 2621-2626.

26. Mafang, S. F. (2011). *Brillouin echoes for advanced distributed sensing in optical fibres*, Ph. D. Thesis, École Polytechnique Fédérale De Lausanne, Switzerland.

27. Foaleng, S. M., Tur, M., Beugnot, J. C., & Thévenaz, L. (2010). High spatial and spectral resolution long-range sensing using Brillouin echoes. *Journal of Lightwave Technology*, 28(20), 2993-3003.

28. Andrew, M. (1997). *Stimulated Brillouin Scattering in Single-Mode Optical Fiber*, Ph. D. Thesis, University of Virginia, USA.

29. Alahbabi, M. N. (2005). *Distributed optical fibre sensors based on the coherent detection of spontaneous Brillouin scattering*, Ph. D. Thesis, University of Southampton, UK.

30. Günday, A. (2007). *Enerji Kablosunda Oluşan Sıcaklık ve Gerilmeleri Optik Fiberli Algılayıcılarla Algılama Benzetimleri*. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

31. Günday A., Yılmaz G., Karlık S.E. (2007). Optik Fiberli Dağınık Algılama Yöntemiyle Enerji Kablosunda Sıcaklık ve Gerginliğin Azalması, *Uludağ Üniversitesi Journal of The Faculty of Engineering*, 12 (2), 43-52.

32. Frazão, O., Correia, C., Santos, J. L., & Baptista, J. M. (2009). Raman fibre Bragg-grating laser sensor with cooperative Rayleigh scattering for strain–temperature measurement. *Measurement Science and Technology*, 20(4), 045203.

33. Martins, H. F., Marques, M. B., & Frazão, O. (2011). Temperature-insensitive strain sensor based on four-wave mixing using Raman fiber Bragg grating laser sensor with cooperative Rayleigh scattering. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 104(4), 957-960.

34. Koyamada, Y., Imahama, M., Kubota, K., & Hogari, K. (2009). Fiber-optic distributed strain and temperature sensing with very high measurand resolution over long range using coherent OTDR. *Journal of Lightwave Technology*, 27(9), 1142-1146.

35. Alahbabi, M. N., Cho, Y. T., & Newson, T. P. (2005). 150-km-range distributed temperature sensor based on coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter and in-line Raman amplification. *Journal of the Optical Society of America B*, 22(6), 1321-1324.

36. Lu, Y., Zhu, T., Chen, L., & Bao, X. (2010). Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR. *Journal of Lightwave Technology*, 28(22), 3243-3249.

37. Gifford, D. K., Soller, B. J., Wolfe, M. S., & Froggatt, M. E. (2005). *Distributed fiber-optic temperature sensing using Rayleigh backscatter*. In Optical Communication, 2005. ECOC 2005. 31st European Conference, Glasgow, (Vol. 3, pp. 511-512).

38. Posey, R., Johnson, G. A., & Vohra, S. T. (2000). Strain sensing based on coherent Rayleigh scattering in an optical fibre. *Electronics Letters*, 36(20), 1688-1689.

39. Signorini, A., Nannipieri, T., & Di Pasquale, F. (2012). High performance distributed optical fiber sensors based on Raman scattering. *In Frontiers in Optics* (pp. FM4H-4). Optical Society of America.

40. Farahani, M. A., & Gogolla, T. (1999). Spontaneous Raman scattering in optical fibers with modulated probe light for distributed temperature Raman remote sensing. *Journal of Lightwave Technology*, 17(8), 1379-1391.

41. Bello, J. M., & Vo-Dinh, T. (1990). Surface-enhanced Raman scattering fiber-optic sensor. *Applied Spectroscopy*, 44(1), 63-69.

42. Hartog, A. (1983). A distributed temperature sensor based on liquid-core optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 1(3), 498-509.

43. El-Taher, A. E., Harper, P., Babin, S. A., Churkin, D. V., Podivilov, E. V., Ania-Castanon, J. D., & Turitsyn, S. K. (2011). Effect of Rayleigh-scattering distributed feedback on multiwavelength Raman fiber laser generation. *Optics Letters*, 36(2), 130-132.

44. Bolognini, G., Park, J., Soto, M. A., Park, N., & Di Pasquale, F. (2007). Analysis of distributed temperature sensing based on Raman scattering using OTDR coding and discrete Raman amplification. *Measurement Science and Technology*, 18(10), 3211.

45. Stokes, D. L. and Vo-Dinh, T. (2000). Development of an integrated single-fiber SERS sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 69(1), 28-36.

46. Palmieri, L. and Schenato, L. (2013). Distributed optical fiber sensing based on Rayleigh scattering. *The Open Optics Journal*, 7(1), 104-127.

47. Froggatt, M. E., Gifford, D. K., Kreger, S. T., Wolfe, M. S., & Soller, B. J. (2006). Distributed strain and temperature discrimination in unaltered polarization maintaining fiber. *In Optical Fiber Sensors (p. ThC5).* Optical Society of America.

48. Wait, P. C., & Newson, T. P. (1996). Landau Placzek ratio applied to distributed fibre sensing. *Optics Communications*, 122(4-6), 141-146.

49. Lee, J. H., Chang, Y. M., Han, Y. G., Chung, H., Kim, S. H., & Lee, S. B. (2004). Raman amplifier-based long-distance remote, strain and temperature sensing system using an erbium-doped fiber and a fiber Bragg grating. *Optics Express*, 12(15), 3515-3520.

50. Hotate, K. (2013). Fiber distributed Brillouin sensing with optical correlation domain techniques. *Optical Fiber Technology*, 19(6), 700-719.

51. Wosniok, A., Nöther, N., & Krebber, K. (2009). Distributed fibre optic sensor system for temperature and strain monitoring based on Brillouin optical-fibre frequency-domain analysis. *Procedia Chemistry*, 1(1), 397-400.

52. Kwon, H., Kim, S., Yeom, S., Kang, B., Kim, K., Kim, T., & Kang, S. (2013). Analysis of nonlinear fitting methods for distributed measurement of temperature and strain over 36km optical fiber based on spontaneous Brillouin backscattering. *Optics Communications*, 294, 59-63.

53. Reshak, A. H., Shahimin, M. M., Murad, S. A. Z., & Azizan, S. (2013). Simulation of Brillouin and Rayleigh scattering in distributed fibre optic for temperature and strain sensing application. *Sensors and Actuators A*: Physical, 190, 191-196.

54. Mizuno, Y., He, Z., & Hotate, K. (2010). Distributed strain measurement using a tellurite glass fiber with Brillouin optical correlation-domain reflectometry. *Optics Communications*, 283(11), 2438-2441.

55. Hao, Y., Ye, Q., Pan, Z., Cai, H., Qu, R., & Yang, Z. (2013). Effects of modulated pulse format on spontaneous Brillouin scattering spectrum and BOTDR sensing system. *Optics & Laser Technology*, 46, 37-41.

56. Bernini, R., Minardo, A., & Zeni, L. (2005). Distributed fiber-optic frequency-domain Brillouin sensing. *Sensors and Actuators A*: *Physical*, 123, 337-342.

57. Gong, Y. D. (2007). Guideline for the design of a fiber optic distributed temperature and strain sensor. *Optics Communications*, 272(1), 227-237.

58. Lecoeuche, V., Webb, D. J., Pannell, C. N., & Jackson, D. A. (1999). 25 km Brillouin based single-ended distributed fibre sensor for threshold detection of temperature or strain. *Optics Communications*, 168(1), 95-102.

59. Wait, P. C., De Souza, K., & Newson, T. P. (1997). A theoretical comparison of spontaneous Raman and Brillouin based fibre optic distributed temperature sensors. *Optics Communications*, 144(1-3), 17-23.

60. Pradhan, H. S., & Sahu, P. K. (2014). 150km long distributed temperature sensor using phase modulated probe wave and optimization technique. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 125(1), 441-445.

61. Hattori, H. T., Schneider, V. M., Lisbôa, O., & Cazo, R. M. (2001). A high nonlinearity elliptical fiber for applications in Raman and Brillouin sensors. *Optics & Laser Technology*, 33(5), 293-298.

62. Zhao, X. F., Li, L., Ba, Q., & Ou, J. P. (2012). Scour monitoring system of subsea pipeline using distributed Brillouin optical sensors based on active thermometry. *Optics & Laser Technology*, 44(7), 2125-2129.

63. Zhao, L., Li, Y., Xu, Z., Yang, Z., & Lü, A. (2014). On-line monitoring system of 110kV submarine cable based on BOTDR. *Sensors and Actuators A: Physical*, 216, 28-35.

64. Lecoeuche, V., Niay, P., Douay, M., Bernage, P., Randoux, S., & Zemmouri, J. (2000). Bragg grating based Brillouin fibre laser. *Optics Communications*, 177(1), 303-306.

65. Perez-Herrera, R. A., & Lopez-Amo, M. (2013). Fiber optic sensor networks. *Optical Fiber Technology*, 19(6), 689-699.

66. Kwon, I. B., Baik, S. J., Im, K., & Yu, J. W. (2002). Development of fiber optic BOTDA sensor for intrusion detection. *Sensors and Actuators A: Physical*, 101(1), 77-84.

67. Nan, S., Gao, Q. (2011). Application of distributed optical fiber sensor technology based on BOTDR in similar model test of backfill mining. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2, 34-39.

68. Zhou, Z., Huang, M., He, J., Chen, G., & Ou, J. (2010). Ice structure monitoring with an optical fiber sensing system. *Cold Regions Science and Technology*, 61(1), 1-5.

69. Tanimola, F., & Hill, D. (2009). Distributed fibre optic sensors for pipeline protection. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 1(4), 134-143.

70. Yan, S. Z., & Chyan, L. S. (2010). Performance enhancement of BOTDR fiber optic sensor for oil and gas pipeline monitoring. *Optical Fiber Technology*, 16(2), 100-109.

71. Ding, Y., Gao, J., & Shen, S. (2014). Controlling waveform of light pulse with light in optical fibers. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 125(16), 4505-4507.

72. Rajan, G. (Ed.). (2015). *Optical fiber sensors: advanced techniques and applications* (Vol. 36). Boca Raton: CRC Press, 2-33.

73. Nascimento, I. M., Baptista, J. M., Jorge, P. A. S., Cruz, J. L., & Andrés, M. V. (2015). Passive interferometric interrogation of a magnetic field sensor using an erbium doped fiber optic laser with magnetostrictive transducer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 235, 227-233.

74. Sun, L. P., Li, J., Jin, L., Ran, Y., & Guan, B. O. (2016). High-birefringence microfiber Sagnac interferometer based humidity sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 231, 696-700.

75. Ahmed, F., Ahsani, V., Melo, L., Wild, P., & Jun, M. B. (2016). Miniaturized Tapered Photonic Crystal Fiber Mach–Zehnder Interferometer for Enhanced Refractive Index Sensing. *IEEE Sensors Journal*, 16(24), 8761-8766.

76. Xu, X., Yan, M., Song, N., Wu, C., Teng, F., & Jin, J. (2016). Measurement of Backscattering in Hollow Core Photonic Bandgap Fiber Based on Mach–Zehnder and Michelson Hybrid Interferometer. *IEEE Photonics Technology Letters*, 28(24), 2858-2861.

77. Zhang, B., Tong, X., Hu, P., Guo, Q., Zheng, Z., & Zhou, C. (2016). Wavelet phase extracting demodulation algorithm based on scale factor for optical fiber Fabry-Perot sensing. *Optics Express*, 24(26), 29506-29511.

78. Yücel, M., Yücel, M., Öztürk, N. F., Göktaş, H. H., & Gündüz, A. E. (2016, May). *Design of a Fiber Bragg Grating based temperature sensor*. In Signal Processing and Communication Application Conference (SIU), Zonguldak, (pp. 669-672).

79. Yücel, M., Öztürk, N. F., Yücel, M., & Torun, M. (2017). Fiber bragg ızgara sensor dizisi tabanlı sıcaklık ölçüm sistemi tasarımı ve uygulaması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3), 957-964.

80. Juarez, J. C., Maier, E. W., Choi, K. N., & Taylor, H. F. (2005). Distributed fiber-optic intrusion sensor system. *Journal of Lightwave Technology*, 23(6), 2081-2087.

81. Hartog, A. H., & Payne, D. N. (1982). *Remote measurement of temperature distribution using an optical fibre*. Proc. ECOC ’82, France, 215-220.

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

83. Saxena, M. K., Raju, S. D. V. S. J., Arya, R., Ravindranath, S. V. G., Kher, S., & Oak, S. M. (2014). Optical fiber distributed temperature sensor using short term Fourier transform based simplified signal processing of Raman signals. *Measurement*, 47, 345-355.

84. Challener, W. A. (2014). *Multiparameter fiber optic sensing system for monitoring enhanced geothermal systems* (No. DOE/EE0002787). General Electric Global Research.

85. Horiguchi, T., Kurashima, T., Tateda, M. (1989). Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1(5), 107-108.

86. Yücel, M., Yücel, M., Gündüz, A. E., Göktaş, H. H., Öztürk, N. F. (2016). *Using single-mode fiber as temperature sensor.* In Signal Processing and Communication Application Conference (SIU), Zonguldak, (pp. 461-464).

87. Huang, S., Thévenaz, L., Toyama, K., Kim, B. Y., Shaw, H. J. (1993). Optical Kerr-effect in fiber-optic Brillouin ring laser gyroscopes. *IEEE Photonics Technology Letters*, 5(3), 365-367.

88. Siddiqui, A. S., Vienne, G. G. (1992). The effect of pump and signal laser fluctuations on the output signal from Raman and Brillouin optical fiber amplifiers. *Journal of Optical Communications*, 13(1), 33-36.

89. Bao, X., Webb, D. J., Jackson, D. A. (1993). 22-km distributed temperature sensor using Brillouin gain in an optical fiber. *Optics Letters*, 18(7), 552-554.

90. Thévenaz, L., Niklès, M., Fellay, A., Facchini, M., Robert, P. A. (1998). *Applications of distributed Brillouin fiber sensing*. In International Conference on Applied Optical Metrology, Balatonfured, (Vol. 3407, No. THEVE-CONF-1998-003, pp. 374-381).

91. Kersey, A. D. (1996). A review of recent developments in fiber optic sensor technology. *Optical Fiber Technology*, 2(3), 291-317.

92. He, J., Zhou, Z., Ou, J. (2014). Simultaneous measurement of strain and temperature using a hybrid local and distributed optical fiber sensing system. *Measurement*, 47, 698-706.

93. Wang, Y., Wang, C., & Liang, L. (2014). Measurement and analysis of high temperature using distributed fiber optic sensor. *BioTechnology: An Indian Journal*, 10(24), 1595-1612.

94. Yücel, M., Yücel, M., Göktaş, H. H., Öztürk, N. F. (2014, April). *The fiber optical sensing based on Brillouin scattering.* In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Trabzon, 838-841.

95. Yücel, M., Yücel, M., Özturk, N. F., Göktaş, H. H., Gemci, C., Çelebi, F. V. (2015). The Effects of Signal Level of the Microwave Generator on the Brillouin Gain Spectrum in BOTDA and BOTDR. World Academy of Science, Engineering and Technology, *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 10(1), 23-27.

96. Yücel, M., Yücel, M., Gündüz, A. E., Torun, M., Öztürk, N. F., Göktaş, H. H. (2017). *Effect of EDFA power on Brillouin power spectrum.* In Electrical and Electronic Engineering (ICEEE), 2017 4th International Conference, Ankara 18-22.

97. Minardo, A. (2012). *Fiber-optic distributed strain/temperature sensors based on stimulated Brillouin scattering,* Ph. D. Thesis, Seconda Universita'degli Studi di Napoli, Italy.

98. Farahani, Mohsen Amiri. (2012). *Performance Enhancement of Distributed Optical Fibre Sensors*. Ph. D. Thesis, University of New Brunswick, Canada.

99. Nikles, M., Thevenaz, L., Robert, P. A. (1997). Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 15(10), 1842-1851.

100. Boyd, R. W. (2003). *Nonlinear optics* (Second Edition). San Diego: Academic Press, 409-416.

101. Galindez, C., Madruga, F. J., Lopez-Higuera, J. M. (2010). Brillouin frequency shift of standard optical fibers set in water vapor medium. *Optics Letters*, 35(1), 28-30.

102. Wang, G., Zheng, S., Wang, T., Chang, D., Lu, Q., Liu, C. (1996). Fiber optic displacement sensor and its signal processing. *In Fiber Optic Sensors V* (2895), 401-408.

103. Thévenaz, L., Niklès, M., Fellay, A., Facchini, M. and Robert, P. A. (1998). *Truly distributed strain and temperature sensing using embedded optical fibers.* Smart Structures and Materials 1998: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials, San Diego, (THEVE-CONF-1998-002), 301-314.

104. Nikles, M., Thévenaz, L., Robert, P. A. (1996). Simple distributed fiber sensor based on Brillouin gain spectrum analysis. *Optics Letters*, 21(10), 758-760.

105. Minardo, A., Bernini, R., Zeni, L. (2003). *Accurate distributed temperature measurements by Brillouin Scattering fiber-optic sensor*. In Sensors, 2003. Proceedings of IEEE, Toronto (1), 1348-35.

106. Nikles, M., Thevenaz, L., Robert, P. A. (1997). Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 15(10), 1842-1851.

107. Gaeta, A. L., Boyd, R. W. (1991). Stochastic dynamics of stimulated Brillouin scattering in an optical fiber. *Physical Review A*, 44(5), 3205-3209.

108. Dhliwayo, J., Webb, D. J., Pannell, C. N. (1996). *Statistical analysis of temperature measurement errors in a Brillouin scattering-based distributed temperature sensor*. In Proceedings of SPIE, Denver, (Vol. 2838), 276-286.

109. K. A. Brown. (2006). *Improvement o f a Brillouin scattering-based distributed fiber optic sensor.* Ph. D. Thesis, University of. New Brunswick, Fredericton, NB, Canada.

110. A. Brown.(2000). *Development of a Brillouin scattering based distributed fibre optic strain sensor*. Ph. D. Thesis, University of New Brunswick, Fredericton, NB, Canada.

111. Şenyurt, Ö. (2006). *Elektrik tesislerinde hızlı Fourier dönüşümü ile harmonik analizinin yapılması*. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, Türkiye.

112. Akıncı, T. Ç. (2005). *Dalgacık (Wavelet) tabanlı dağıtım sistemleri koruma algoritması.* Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Türkiye.

113. Polikar, R. (1999). The story of wavelets. *Physics and Modern Topics in Mechanical and Electrical Engineering*. 192-197.

114. Brito, N. S. D., Souza, B. A., Pires, F. A. C. (1998). *Daubechies wavelets in quality of electrical power*. In Harmonics and Quality of Power Proceedings, 1998. Proceedings. 8th International Conference, Athens, (1), 511-515.

115. Yücel, M., Yücel, M., Öztürk, N. F., & Göktaş, H. H. (2015). *The analyzes of the Brillouin scattering for the different fiber types.* In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Malatya, 632-635.

116. Yücel, M., Yücel, M., Göktaş, H. H., Öztürk, N. F., & Gündüz, A. E. (2017). Experimental analysis of the temperature dependence of the Brillouin gain spectrum in short-length single-mode fiber. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25(5), 3881-3891.

117. Yücel, M., Yücel, M., Torun, M., Öztürk, N. F., & Göktaş, H. H. (2017). *Brillouin scattering based fiber optic strain sensor.* In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Antalya, 1-4.

118. Yücel, M. and Özturk, N. F. (2017). Real-time monitoring of railroad track tension using a fiber Bragg grating-based strain sensor. *Instrumentation Science & Technology*, 45(1), 1-15.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YÜCEL, Murat
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 06.05.1977, Ankara
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (312) 315 62 74
Faks : 0 (312) 315 63 36
e-mail : ymurat77@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Elek.-Elektr. Müh. (T.F)	Devam ediyor
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Elektr. Bilgisayar Eğt.	2006
Lisans	Gazi Üniversitesi / Elektronik Öğretmenliği	2000
Lise	Yenimahalle Ana. Tek. L. Elektronik	1995

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2009-Halen	Yenimahalle Mes. Tek. A.L.	Elektronik Öğretmenliği
2007-2009	Çorum İskilip Mes. Tek. A.L	Elektronik Öğretmenliği
2006-2007	Ulus Mes. Tek. A. L.	Elektronik Öğretmenliği
2005-2006	Hadımköy İbrahim. Öz. Ç.P.L.	Elektronik Öğretmenliği
2000-2005	Yenimahalle Mes. Tek. A.L.	Elektronik Öğretmenliği

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Yücel, M., Yücel, M., Gündüz, A. E., Torun, M., Öztürk, N. F. and Göktaş, H. H. (2017). *Effect of EDFA power on Brillouin power spectrum*. In Electrical and Electronic Engineering (ICEEE), 2017 4th International Conference, Ankara, 18-22.

2. Yücel, M., Yücel, M., Torun, M., Öztürk, N. F. and Göktaş, H. H. (2017). *Brillouin scattering based fiber optic strain sensor*. In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Antalya, 1-4.

3. Yücel, M., Yücel, M., Göktaş, H. H., Öztürk, N. F. and Gündüz, A. E. (2017). Experimental analysis of the temperature dependence of the Brillouin gain spectrum in short-length single-mode fiber. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 25(5), 3881-3891.

4. Yücel, M., Öztürk, N. F., Yücel, M., Göktaş, H. H. and Gündüz, A. E. (2016). *Design of a Fiber Bragg Grating based temperature sensor*. In Signal Processing and Communication Application Conference (SIU), Zonguldak, 669-672.

5. Yücel, M., Yücel, M., Gündüz, A. E., Göktaş, H. H. and Öztürk, N. F. (2016). *Using single-mode fiber as temperature sensor.* In Signal Processing and Communication Application Conference (SIU), Zonguldak, 461-464.

6. Yücel, M., Yücel, M., Özturk, N. F., Göktaş, H. H., Gemci, C. and Çelebi, F. V. (2015). The Effects of Signal Level of the Microwave Generator on the Brillouin Gain Spectrum in BOTDA and BOTDR. World Academy of Science, Engineering and Technology, *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 10(1), 23-27.

7. Yücel, M., Yücel, M., Öztürk, N. F. and Göktaş, H. H. (2015). *The analyzes of the Brillouin scattering for the different fiber types*. In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Malatya, 632-635.

8. Yücel, M., Yücel, M., Göktaş, H. H. and Öztürk, N. F. (2014). *The fiber optical sensing based on Brillouin scattering*. In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Trabzon, 838-841.

9. Yücel, M., Öztürk, N. F., Yücel, M. and Torun, M. (2017). Fiber bragg ızgara sensor dizisi tabanlı sıcaklık ölçüm sistemi tasarımı ve uygulaması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3), 957-964.

Hobiler

Kitap okumak, Seyahat etmek.



GAZİ GELECEKTİR..