



**OPTİK FİBERLİ DAĞINIK
ALGILAMALI SİSTEMLERDE ISIL ETKİLERİN
ANALİZİ VE MODELLENMESİ**

Abdurrahman GÜNDAY

T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OPTİK FİBERLİ DAĞINIK ALGILAMALI SİSTEMLERDE ISIL ETKİLERİN
ANALİZİ VE MODELLENMESİ**

Abdurrahman GÜNDAY

Prof. Dr. Güneş YILMAZ
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA 2016

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Abdurrahman GÜNDAY tarafından hazırlanan “Optik Fiberli Dağıtık Algılamalı Sistemlerde Isıl Etkilerin Analizi ve Modellenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Güneş YILMAZ

Başkan: Prof. Dr. Güneş YILMAZ
Uludağ Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD

İmza

Üye: Prof. Dr. Faruk ARAS
Kocaeli Üniversitesi
Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi
Uçak Elektrik-Elektronik Bölümü

İmza

Üye: Doç. Dr. Fahri VATANSEVER
Uludağ Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD

İmza

Üye: Prof. Dr. Erdoğan DİLAVEROĞLU
Uludağ Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD

İmza

Üye: Prof. Dr. Ahmet ALTUNCU
Dumlupınar Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım


Prof. Dr. Ali Osman DEMİR

Enstitüsü Müdürü

23.../06/2016

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

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

beyan ederim.

14/04/2016

Abdurrahman GÜNDAY

ÖZET

Doktora Tezi

OPTİK FİBERLİ DAĞINIK ALGILAMALI SİSTEMLERDE ISIL ETKİLERİN ANALİZİ VE MODELLENMESİ

Abdurrahman GÜNDAY

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Güneş YILMAZ

Sıcaklık ve gerginlik oluşumlarının eş zamanlı olarak algılandığı optik fiberli dağınık algılamalı sistemlerde, geriye saçılan optik sinyalin Brillouin frekans kayması ve Brillouin güç değişimi verilerinden yararlanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, ortamdaki ısıl efektlerin algılanmasında Brillouin saçılma mekanizması ile algılayıcı fiberin Young modülünün birleşik etkisini esas alan yeni bir dağınık algılama yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde algılayıcı fiber boyunca meydana gelen sıcaklık oluşumları Brillouin güç değişiminden, ısıl gerginlik oluşumları ise modülün hem sıcaklık hem de ısıl gerginlik bağımlılığı olması nedeniyle fiber çekirdeğinin Young modülü değişiminden elde edilmiştir.

Tez çalışmasında, analitik metotlar kullanılarak 313 °K - 320 °K sıcaklık aralığında Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kayması ile fiber çekirdeği Young modülü arasındaki lineer ilişki formüle edilmiştir. Algılayıcı fiber Young modülünün 73,205 GPa - 73,283 GPa aralığındaki değişimine karşılık Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kayması sırasıyla % 13,950 - % 16,273 ve 69,00 MHz - 85,72 MHz aralığında değişim göstermiştir. Ayrıca 320 °K - 332 °K aralığında Young ve Shear modülünün sıcaklık ve ısıl gerginlik duyarlılıklarına ait benzetimler gerçekleştirilmiştir. Bu sıcaklık aralığında, Young ve Shear modüllerinin sıcaklık duyarlılıkları sırasıyla $- 2,33 \times 10^{-6} \text{ \%}/^{\circ}\text{K}$ ve $- 6,67 \times 10^{-7} \text{ \%}/^{\circ}\text{K}$ olarak elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, her iki modülün ısıl gerginlik duyarlılıkları, sırasıyla $-3,25 \times 10^{-9} \text{ \%}/\mu\epsilon$ ve $-9,35 \times 10^{-10} \text{ \%}/\mu\epsilon$ olarak elde edilmiştir. Hem teorik hesaplamalar hem de benzetim sonuçları göstermiştir ki, dağınık algılamalı bir sistemin performansını belirlemek için Young modülünün sıcaklık ve ısıl gerginlik duyarlılıklarından yararlanmak, Shear modülüne kıyasla daha etkin bir yöntemdir.

Anahtar Kelimeler: Brillouin ve Young modülü esaslı optik fiberli dağınık algılama, Young ve Shear modülünün ısıl duyarlılıkları, sıcaklık, ısıl gerginlik.

2016, xv + 115 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

ANALYSIS AND MODELLING OF THE THERMAL EFFECTS IN OPTICAL FIBER DISTRIBUTED SENSING SYSTEMS

Abdurrahman GÜNDAY

Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electric Electronic Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Güneş YILMAZ

In the optical fiber distributed sensing systems where temperature and strain formations are detected and measured simultaneously, Brillouin frequency shift and Brillouin power change of the backscattered optical signal are utilized. In this thesis, for sensing thermal effects in the medium a novel distributed sensing method based on the combine effect of Brillouin scattering mechanism and Young modulus of sensing fiber has been proposed. In this method, temperature formations occurring along the sensing fiber are obtained from Brillouin power change and then thermal strain formations are derived from Young modulus change of the fiber core due to its temperature and thermal strain dependencies.

In this thesis using the analytical method, linear formula between Brillouin parameters, i.e. Brillouin power change and Brillouin frequency shift and the Young modulus of the fiber core have been derived in the temperature range of 313 °K - 320 °K. For the Young modulus variation of the sensing fiber in the range of 73,205 GPa to 73,283 GPa, Brillouin power change and Brillouin frequency shift changes in ranges of 13,950 % - 16,273 % and 69,00 MHz - 85,72 MHz, respectively. Furthermore, simulations of the temperature and thermal strain sensitivities of Young and Shear moduli along the sensing fiber in the temperature range of 320 °K - 332 °K have been performed. In this temperature range, temperature sensitivities of the Young and Shear moduli have been determined as $-2,33 \times 10^{-6} \text{ \%}/\text{°K}$ and $-6,67 \times 10^{-7} \text{ \%}/\text{°K}$, respectively. Moreover, thermal strain sensitivities of these moduli have been obtained as $-3,25 \times 10^{-9} \text{ \%}/\mu\epsilon$ and $-9,35 \times 10^{-10} \text{ \%}/\mu\epsilon$, respectively. Both theoretical computations and simulations result show that it is more efficient method to utilize temperature and thermal strain sensitivities of the Young modulus with respect to that of the Shear modulus to determine the performance of the distributed sensing system.

Key Words: Brillouin and Young modulus based optical fiber distributed sensing, thermal sensitivities of Young and Shear moduli, temperature, thermal strain.

2016, xv + 115 pages.

TEŞEKKÜR

Doktora tez alışmam esnasında bana her konuda yardımcı olan ve teze yaptığı destek ve sonsuz katkılarından dolayı danışman hocam sayın Prof. Dr. Guneş Yılmaz'a teőekkürü bir borç bilirim. Çalışmalarım süresince pek çok konuda yardımlarını esirgemeyen sayın Yrd. Doç. Dr. Sait Eser Karlık'a teőekkürlerimi sunarım.

Ayrıca gerek tezin yazımı gerekse yürütölen diğer çalışmalarım sırasında hiçbir zaman sabır ve desteğini esirgemeyen sevgili eşim Belgin Günday'a, bu günlere gelmemde çok büyük emekleri olan anneme, babama, ağabeyime ve tüm öğretmenlerime içtenlikle teşekkür ederim.

Abdurrahman GÜNDAY
14/04/2016

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı	2
1.2. Tezin Önemi ve Çalışmada İzlenen Yöntem.....	3
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	6
2.1. Giriş	7
2.2. Optik Fiberli Algılayıcılar	12
2.2.1. Rayleigh saçılması ve optik zaman domeni reflektometresi (OTDR)	14
2.2.2. Raman saçılması esaslı dağınık algılama	16
2.2.3. Brillouin saçılması esaslı dağınık algılama	18
2.3. Lineer Olmayan Optik Olaylar	19
2.4. Bir Ortamdan Işığın Spontane Saçılması	20
2.5. Akustik Dalga ve Spontane Brillouin Saçılması	22
2.5.1. Akustik dalganın bir ortamda yayılımı.....	22
2.5.2. Işık fotonlarının akustik dalgadan saçılması	24
2.6. Zorlanmış Brillouin Saçılması (SBS).....	26
2.6.1. Elektriksel büzülme ve zorlanmış Brillouin saçılması	26
2.6.2. Brillouin spektrumu.....	28
2.7. Brillouin Spektrum Analizi ile Sıcaklık ve Gerginlik Ölçümü	30
2.8. Brillouin Dağınık Algılama Teknikleri	31
2.8.1. Brillouin optik zaman domeni analizi (BOTDA).....	31
2.8.2. Brillouin optik korelasyon domeni analizi (BOCDA)	34

2.8.3. Brillouin optik zaman domeni reflektometresi (BOTDR)	35
2.8.4. Brillouin optik frekans domeni analizi (BOFDA).....	37
2.8.5. Spontane Brillouin esaslı dağınık algılamalı sistemler	38
2.8.6. Eşzamanlı sıcaklık ve gerginlik algılama tekniği.....	39
3. MATERYAL VE YÖNTEM	41
3.1. Giriş.....	41
3.2. Silika Optik Fiberde Young Modülü ve Shear Modülü	41
3.3. Young Modülünün Isıl Bağımlılıkları	44
3.4. Shear Modülü ve Poisson Oranı'nın Isıl Bağımlılıkları.....	47
3.5. Brillouin Güç Değişimi ve Young Modülünün Birleşik Etkisini Esas Alan Optik Fiberli Dağınık Algılama	50
3.6. Landau-Placzek Oranı Esaslı Optik Fiberli Dağınık Algılama	54
3.7. Brillouin Güç ve Frekans Kaymasının Young Modülü Bağımlılıkları	61
4. BULGULAR VE TARTIşMA (MODELLER VE BENZETİMLER).....	65
4.1. Giriş.....	65
4.2. Benzetimler	69
4.2.1. Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kaymasının Young modülü bağımlılıklarının elde edilmesi	69
4.2.2. 154 kV Yüksek gerilim yeraltı kablosuna entegre edilmiş algılayıcı fiber için Young ve Shear modüllerinin sıcaklık ve ısıl gerginlik duyarlılıklarının elde edilmesi.....	77
5. SONUÇ	88
KAYNAKLAR	91
EKLER.....	98
EK1	98
EK2	104
ÖZGEÇMİş	112

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A	Cisim üzerine uygulanan kuvvetin etki ettiği yüzey alanı
α	Isıl genleşme katsayısı
c	Işığın boşluktaki hızı
$C_{v\epsilon}$	Brillouin frekans kaymasının gerginlik katsayısı
C_{vT}	Brillouin frekans kaymasının sıcaklık katsayısı
dl	Fiber uzunluğundaki birim değişim miktarı
dT	Ortamın sıcaklık değerindeki birim artış
E	Elektrik alan, Young (elastisite) modülünün genel ifadesi
E_0	Young modülünün 293 °K ve sıfır gerginlikteki değeri
E_{ϵ}	Silika optik fiberin (silika malzemenin) Young modülünün ısı gerginlik bağımlılığı
$E_{(T)}$	Silika optik fiberin (silika malzemenin) Young modülünün sıcaklık bağımlılığı
ϵ	Algılayıcı fiber boyunca meydana gelen gerginlik veya ısı gerginlik oluşumu
ϵ_0	Algılayıcı fiber için deneysel olarak elde edilmiş gerginlik ilk değeri
$\epsilon_{(TK)}$	Sıcaklığın fonksiyonu olarak ısı gerginlik
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti (elektriksel geçirgenlik)
ϵ_x	Elastik malzemelerde küçük gerilmeler altında aksel şekil değiştirme

ϵ_y	Elastik malzemelerde küçük gerilmeler altında yanall şekill değiştirme
$\Delta\epsilon$	Silika optik fiberin dielektrik sabitindeki değişim
F	Cisim üzerine uygulanan kuvvet
G	Shear (kayma) modülü
g_{Bmax}	Brillouin maksimum kazanç katsayısı
G_0	Referans sıcaklık (293 °K) ve gerginlik altında Shear modülü
$G_{(\epsilon)}$	Silika optik fiberin (veya silika malzemenin) Shear modülünün ısıll gerginlik bağımlılığı
$G_{(T)}$	Silika optik fiberin (veya silika malzemenin) Shear modülünün sıcaklık bağımlılığı
h	Planck sabiti
k	Boltzmann sabiti
K	Silika optik fiberin Bulk modülü
k_B	Akustik dalga vektörü
K_{ϵ}^V	Brillouin frekans kaymasının ısıll gerginlik katsayısı
K_T^V	Brillouin frekans kaymasının sıcaklık katsayısı
K_{ϵ}^P	Brillouin güç değişiminin ısıll gerginlik katsayısı
K_{TC}^P	Brillouin güç değişiminin sıcaklık katsayısı
K_{TC1}^P	Brillouin güç değişimi için kombine etkili sıcaklık katsayısı
K_T^P	Raman gücünün sıcaklık duyarlılığı
k_S	Saçılan ışık dalga vektörü
k_P	Algılayıcı fibere pompalanan optik sinyale ait dalga vektörü
l ve L	Silindirik bir cismin uzunluğu veya ilk boyu
λ	Sinyal dalga boyu

λ_0 ve λ_p	Lazer kaynağın fibere pompaladığı sinyalin dalga boyu
λ_{AS}	Raman anti-Stokes dalga boyu
λ_g	Fiber Bragg grating yansıtma dalga boyu
λ_s	Raman Stokes dalga boyu
$\Delta\epsilon$	Algılayıcı fiber boyunca meydana gelen ısıl gerginlik değişimi
$\Delta\epsilon^2$	Dielektrik sabitinin ortalama karesel dalgalanması
ΔL	Cismin kuvvet sonucu uzama miktarı
$\Delta\lambda_g$	Fiber Bragg grating yansıtma dalga boyu çizgi genişliği
$\Delta\rho$	Silika optik fiberin yoğunluk değişimi
ΔP_B ve ΔP_{BC}	Algılayıcı fiber boyunca meydana gelen Brillouin güç değişimi
Δt	Pompa sinyalin saçılmanın olduğu noktaya ulaşması ile sinyalin foto dedektöre ulaşması için geçen toplam süre
ΔT_C	Algılayıcı fiber boyunca oluşan °C cinsinden sıcaklık değişimi
ΔT_K	Algılayıcı fiber boyunca oluşan °K cinsinden sıcaklık değişimi
$\Delta\chi$	Silika optik fiberin yoğunluk dalgalanması
Δx	Enlemesine yer değiştirme veya kayma miktarı
μ_0	Boşluğun manyetik geçirgenliği
$n_{(T)}$	Silika optik fiberin çekirdek kırılma indisinin sıcaklık bağımlılığı
p	Pockel katsayısı
P	Dielektrik bir ortamdaki elektrik dipollerin polarizasyonu
p_{12}	Silika optik fiberin boylamasına foto elastik katsayısı
p ve s	Basınç ve entropi bağımsız değişkenleri
P_0	Lazer kaynağın fibere pompaladığı sinyalin maksimum gücü
$P_B(z)$	Algılayıcı fiberin uzunluğu boyunca elde edilen Brillouin sinyal gücü
$P_B(E)$	Brillouin sinyal gücünün Young modülü bağımlılığı

P_{el}	Elektriksel büzülme etkisine bağlı olarak meydana gelen basınç etkisi
R_T	Raman sinyal gücü
σ	Poisson oranı
σ_g	Cisim üzerinde oluşan ısıl gerilme veya uzunlamasına gerilme
$\sigma_{(T)}$	Silika optik fiberin Poisson oranının sıcaklık bağımlılığı
ρ	Silika optik fiberin yoğunluğu
γ	Algılayıcı fiber zayıflama katsayısı
γ	Kayma Şekil değiştirmesi
γ_e	Elektriksel büzülme (elektrostriktif) sabiti
γ_B	Brillouin saılma katsayısı
γ_R	Rayleigh saılma katsayısı
β_T	Fiktif sıcaklıkta silika fiberin izotermal sıkıştırılabilirlik katsayısı
S	Yakalama katsayısı
T	Algılayıcı fiber boyunca meydana gelen sıcaklık oluşumu, Kelvin cinsinden ortam sıcaklığı
T_0	Algılayıcı fiber iēin deneysel olarak elde edilmiş sıcaklık ilk değeri
T_f	Kelvin cinsinden fiberin fiktif sıcaklığı
T_K	Kelvin cinsinden sıcaklık oluşumunun genel ifadesi
T_{K1}	Kelvin cinsinden sıcaklık oluşumu
T_{K2}	Kelvin cinsinden sıcaklık oluşumu
$T(z)$	Algılayıcı fiberin uzunluğu boyunca elde edilen sıcaklık oluşumu
U_R	Raman sinyali ile fibere pompalanan optik sinyalin dalga boyları arasındaki dalga sayısı

τ	Kayma gerilmesi ve algılayıcı fibere pompalanan sinyalin darbe süresi
V	Basınç uygulanmadan önce bir cismin ilk hacmi
v_a	Akustik dalga hızı
v_B	Akustik dalga frekansı
V_B	Brillouin frekansı
$\Delta E_{(T)}$	Algılayıcı fiberin Young modülü değişimi
ΔV_B	Brillouin frekans kayması
$V_B(E)$	Brillouin frekans kaymasının Young modülü bağımlılığı
ΔV_{LW}	Brillouin spektrumu çizgi genişliği
ΔV	Hacim değişimi
$\Delta \nu$	Raman anti - Stokes bileşeni ile pompa sinyali arasındaki frekans farkı
v_g	Silika optik fiberde ilerleyen ışığın grup hızı
ν_P	Algılayıcı fibere pompalanan ışığın frekansı
ν_S	Saçılan ışığın frekansı
ω_B	Akustik dalganın açısal hızı
ω_P	Algılayıcı fibere pompalanan ışığın açısal hızı
ω_S	Saçılan ışığın açısal hızı
$X^{(i)}$	J'nci dereceden duyarlılık (suseptibilite)
z	Algılayıcı fiberin uzunluğu veya fiber mesafesi

Kısaltmalar	Açıklama
ADC	Analog Dijital Dönüştürücü
AOM	Akusto-Optik Modülatör
ASE	Kuvvetlendirilmiş Spontane Emisyon
BAS	Brillouin Anti-Stokes Bileşeni
BGS	Brillouin Kazanç Spektrumu
BOCDA	Brillouin Optik Korelasyon Domeni Analizi
BOTDA	Brillouin Optik Zaman Domeni Analizi
BOTDR	Brillouin Optik Zaman Domeni Reflektometresi
BS	Brillouin Stokes Bileşeni
C _{1,2}	Sirkülatörler (C1 ve C2)
CIGRE	Uluslararası Büyük Elektrik Sistemleri Konseyi
CW	Sürekli Dalga
DB	Karanlık Darbe
DBG	Dinamik Brillouin Grating
DPBS	Karanlık Darbeli Brillouin Saçılması
DPP	Faz Kaydırmalı Diferansiyel Darbe - Genişlik Çiftleri
DTS	Dağınık Sıcaklık Algılama
DTSS	Dağınık Isıl Gerginlik Algılama
EDFA	Erbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendirici
FBG	Fiber Bragg Grating
FPI	Fabry - Perot İnterferometresi
HU	Isıtıcı Ünite
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Enstitüsü
LO	Lokal Osilatör

LPR	Landau - Placzek Oranı
NTT	Nippon Telegraph ve Telephone
OFDS	Optik Fiberli Dağılık Algılayıcı
OPGW	Optik Fiberli Topraklama Kablosu
OTDR	Optik Zaman Domeni Reflektometresi
PM	Darbe Monitörü
R	Rayleigh Sinyali
RES	Rüzgâr Enerji Santrali
RF	Radyo Frekansı
RTRM	Gerçek Zamanlı Sınıflandırma Metodu
SAW	Yüzey Akustik Dalga Teknolojisi
SBS	Zorlanmış Brillouin Saçılması
SNR	Sinyal Gürültü Oranı
SRS	Zorlanmış Raman Saçılması
XLPE	Çapraz Bağlantılı Polietilen

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. OTDR tekniğinin çalışma prensibi gösterimi	15
Şekil 2.2. Spontane saçılma mekanizmalarına ait spektrum gösterimi.....	22
Şekil 2.3. Brillouin saçılmasında foton-fonon etkileşimine ait momentum vektör gösterimi	25
Şekil 2.4. Prop ve pompa dalgaları ile oluşturulmuş Brillouin algılayıcıda SBS gösterimi	27
Şekil 2.5. Elektriksel büzülme etkisi ile akustik dalganın oluşturulmasına ait gösterim	28
Şekil 2.6. SBS prosesi ile Brillouin spektrumunun elde edilmesi.....	29
Şekil 2.7. Brillouin spektrumu ve Brillouin kazanç katsayısı.....	30
Şekil 2.8. OTDR tekniğinin çalışma prensibi gösterimi	32
Şekil 2.9. Brillouin kazancı esaslı BOTDA konfigürasyonu	36
Şekil 2.10. BOFDA algılamalı bir sistem konfigürasyonu	37
Şekil 3.1. LPR esaslı optik fiberli dağınk algılamalı bir sisteme ait genel görünüş	60
Şekil 4.1. Brillouin esaslı dağınk sıcaklık ve ısıl gerginlik algılamalı bir sistem modeli	66
Şekil 4.2. a) Algılayıcı fiber sıcaklık değişimi b) Geriye saçılan optik sinyalin Brillouin normalize güç değişimi	71
Şekil 4.3. Algılayıcı fiber çekirdeğinin Young modülünün sıcaklıkla değişimi.....	72
Şekil 4.4. Algılayıcı fiber boyunca a) Brillouin güç değişimi ve b) Brillouin frekans kayması.....	73
Şekil 4.5. a) Brillouin güç değişiminin ve b) Brillouin frekans kaymasının Young modülü bağımlılığı	74
Şekil 4.6. XLPE yalıtkanlı 89/154 kV yüksek gerilim kablosu gösterimi	80
Şekil 4.7. Algılayıcı fiber uzunluğu boyunca sıcaklık profili	80

Şekil 4.8. Yüksek gerilim kablosu boyunca kablo iletkeninin sıcaklık profili	81
Şekil 4.9. Algılayıcı fiber boyunca meydana gelen Young modülü değişimi	82
Şekil 4.10. Young modülünün a) sıcaklık bağımlılığı ve b) sıcaklık duyarlılığı (sıcaklıkla yüzdesel değişimi)	83
Şekil 4.11. Algılayıcı fiber boyunca sıcaklık kaynaklı gerginlik oluşumları.....	83
Şekil 4.12. Young modülünün gerginlik bağımlılığı	84
Şekil 4.13. a) Shear modülünün YG kablosu boyunca değişimi ve b) Shear modülünün gerginlik bağımlılığı	85
Şekil 4.14. Shear modülünün a) sıcaklık bağımlılığı ve b) sıcaklık duyarlılığı (sıcaklıkla yüzdesel değişimi)	86
Şekil 4.15. a) Young modülünün gerginlik duyarlılığı (gerginlikle yüzdesel değişimi) ve b) Shear modülünün gerginlik duyarlılığı (gerginlikle yüzdesel değişimi).....	87

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Bazı malzemelerin 293 °K sıcaklığındaki tipik malzeme özellikleri	47
Çizelge 3.2. G.652 tip SMF için sıcaklık ve gerginlik katsayıları	62
Çizelge 4.1. Isıtıcı üniteler ve algılayıcı fiber üzerindeki yerleri.....	69
Çizelge 4.2. Young modülü değişimine karşılık elde edilen ortalama Brillouin parametresi değerleri.....	75



1. GİRİŞ

Optik fiber ve optik fiberli sistemler, haberleşme endüstrisindeki kullanımlarının yanı sıra algılama sistemlerinde de geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Genel olarak köprü, tünel, su depoları gibi büyük yapılarla, güç jeneratörleri ve yüksek gerilim enerji nakil hatları gibi sistemlerin güvenilir olmalarının sağlanmasının yanında bu yapı ve/veya sistemlerin işlevselliklerinin ve sürekliliklerinin teminat altına alınması gerekmektedir. Bu sistem ve yapıların içerisinde zamanla ortaya çıkan sıcaklık ve gerginlik oluşumları, istenmeyen iş kayıplarına ve hasarlara neden olabileceğinden yüksek tasarım çeşitliliğine sahip olması ve kolay tasarlanabilir olması açısından, son dönemlerde Optik fiberli dağıtık algılayıcı (OFDS) sistemlerin kullanımı ve bu organizasyonlara entegrasyonu hız kazanmıştır.

Uygulama açısından değerlendirildiğinde, optik fiberin diğer algılayıcılara kıyasla bir takım avantajlara sahip olması Optik fiberli dağıtık algılayıcıların bir çok alanda tercih edilebilir olmasını sağlamıştır. Bu avantajlardan bazıları; elektromanyetik girişime bağımsızlık, aşınmalara karşı yüksek direnç gösterme, gerilim, manyetik alan ve sıcaklığın çok yüksek olduğu ortamlar ile nükleer radyasyon ve kimyasal açıdan riskli ortamlarda çalışabilme, küçük boyut ve esnek tasarım geometrisine sahip olmak, ekonomiklik ve yüksek duyarlılıkta ölçüm ve algılama kapasitesine sahip olmak olarak verilebilir.

Herhangi bir ortamda oluşan ısıl etkilerin tespiti ve ölçümü için, ısıl çift veya termistörlü ölçme yöntemi, ısıl görüntüleme yöntemi ve akustik veya mekanik prensipleri esas alan ölçüm tekniklerini kullanan çok sayıda metot ve bu metotları kullanan sistem olmasına rağmen, optik fiberli dağıtık algılama esaslı sistemlerin kullanımı bahsedilen avantajları nedeniyle sektör farketmeksizin öncelikli hale gelmiştir. Özellikle büyük binalarda köprü ve tünellerde beton yapılar içerisinde meydana gelen gerilme ve gerginlik oluşumlarının tespitinde, yüksek gerilim havai hat, yer altı ve deniz altı enerji kablolarında faz iletkeni veya yalıtkanı üzerinde meydana

gelen ısı oluşumlarının tespitinde ve ölçümünde optik fiberli dağınık algılamalı sistemlerden faydalanılmaktadır.

Sistem içinde ve dışında meydana gelen sıcaklık ile içsel veya harici gerginlik oluşumlarının tespit edilmesi, bu oluşumların çalışma sınırlarını aşarak sisteme vereceği zararların önceden bilinerek tedbir alınması açısından oldukça önemlidir. Beton ve karkas yapılarda sistem içerisinde meydana gelen gerilmeler ve gerginlikler, yapının hasar görmesine neden olabilir. Enerji kablolarında ise ısı etkilerinin varlığı hem kablonun operasyon süresini kısaltmakta hem de kablo iletkeninin akım taşıma kapasitesini sınırlandırarak kablonun düşük verimde çalışmasına neden olabilmektedir. Bu açılardan bakıldığında sıcaklık ve gerginlik oluşumlarının algılanma sürecinin ne denli önemli ve üzerinde ehemmiyetle durulması gerektiği anlaşılmaktadır.

1.1. Tezin Amacı ve Kapsamı

Optik fiberli dağınık algılamalı sistemler Rayleigh, Raman ve Brillouin saçılma mekanizmalarını esas alan algılama yöntemlerinden yararlanmaktadırlar. Bu sistemlerde algılayıcı olarak kullanılan optik fiber, silika yapıya sahiptir. Silikanın Young Modülü, Shear Modülü ve Poisson Oranı gibi malzeme karakteristikleri, ortamdaki sıcaklık ve sıcaklık kaynaklı gerginlik oluşumlarından etkilenmektedirler.

Bu tez çalışmasında Brillouin güç değişimi ile Young modülünün birleşik etkisini esas alan yeni bir dağınık algılama yöntemi önerilmektedir. Bu yöntemde göre algılayıcı fibere pompalanan ışığın geriye saçılan kısmından Rayleigh, Raman ve Brillouin Stokes ve anti-Stokes bileşenleri filtrelenerek Brillouin bileşenleri üzerinden ortama ilişkin sıcaklık bilgilerine ulaşılmakta ve sıcaklık verileri kullanılarak özellikle Young ve Shear modülleri üzerinden ortamdaki sıcaklık kaynaklı gerginlik oluşumları elde edilmektedir. Bir başka ifadeyle geriye saçılan optik sinyale ait bileşenlerin Brillouin gücündeki değişimlerden, sisteme ilişkin hem sıcaklık bilgilerinin elde edilmesi mümkün olmakta, hem de her iki modülün sıcaklık ve gerginlik bağımlılıklarından yararlanılarak, sıcaklık

kaynaklı gerginlik oluşumlarının algılayıcı fiber üzerinde lokasyon bilgileriyle tespit edilmesi, ölçülmesi veya analiz edilmesi mümkün olabilmektedir.

Optik fiber kablo preformunun fabrikasyonu esnasında fiber çekirdeğini katkılayarak indis değişimleriyle ya da benzer ilave üretim prosesleriyle silika yapılı algılayıcı fiber çekirdeğinin Young modülünü değiştirmek mümkündür. Brillouin güç değişiminin ve Brillouin frekans kaymasının silika yapılı algılayıcı fiber çekirdeğine ait Young modülüne bağımlılıklarının olması nedeniyle de fiber çekirdeğinin Young modülü değiştirilerek optik fiberli dağınk algılamalı bir sistemin algılama performansı iyileştirilebilir. Ayrıca matematiksel yöntem ve yaklaşımların kullanımıyla modüllere ilişkin sıcaklık ve ısıl gerginlik duyarlılıkları elde edilebilir ve Young ve Shear modüllerinin sıcaklık ve ısıl gerginlik duyarlılıklarını esas alan algılayıcıların geliştirilmesi ve alternatif olarak sunulması mümkün olabilir. Çalışma bu kapsamda sağladığı teorik analizler ve benzetimlerle yeni yaklaşımlar sunmaktadır.

Bu çalışmada her iki durum için dağınk sıcaklık algılama (DTS) ve dağınk ısıl gerginlik algılama (DTSS) model yapıları üzerinden benzetim koşulları altında analizler gerçekleştirilmiştir. Bu açıdan bakıldığında elde edilen veriler benzer nitelikteki dağınk algılamalı sistemlerin geliştirilmesini ve algılama performanslarının artırılmasını amaçlayan çalışmalar için kaynak olacaktır. Ayrıca tasarımcılara sözkonusu algılama sistemlerini farklı bir açıdan değerlendirme olanağı sunarak çalışmanın uygulanabilir olması sağlanabilecektir. Çünkü algılayıcı fiber çekirdeğine ait malzeme özelliklerinin geliştirilmesi veya iyileştirilmesi, optik fiberli dağınk algılamalı sistemlerin algılama performansı üzerinde direk olarak belirleyici olmaktadır.

1.2. Tezin Önemi ve Çalışmada İzlenen Yöntem

Yüksek gerilim havai hat ve yer altı enerji kabloları rejimde iken operasyon süresi boyunca iletkenden akan akıma ve dış ortam kaynaklı ısıl etkilere maruz kalırlar. Kablo iletkenin performansını sınırlandıran bu etkilere aşırı derecede maruz kalması veya bu etkilerin kontrol altına alınamaması durumunda sistemin işlevselliğini yitirmesi ya da

tamamen devre dışı kalması söz konusu olabilir. Köprü, tünel ve benzeri büyük yapılarda ise zamanla yapı içerisinde oluşan sıcaklık oluşumları ile içsel (veya sıcaklık kaynaklı) ve dışsal gerilme ve gerginlik oluşumları bu yapıların yaşlanmasına bazen de tahrip olarak zarar görmesine neden olabilmektedir.

Bu yapılarda, sıcaklık, gerilme ve/veya gerginlik oluşumlarının zamanında ve yüksek çözünürlüklü olarak tespit edilmesi önemlidir. Optik fiberin özellikleri nedeniyle algılayıcı olarak kullanılabilmesi, kablo yalıtkanının maruz kaldığı etkilerin tespiti açısından güvenilir bir biçimde kullanılmasında önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle optik fiberli dağıtık algılayıcıların kullanımı ile sistem içerisinde meydana gelen sıcaklık ve gerginlik oluşumları, eş zamanlı olarak ölçülebilmekte ve önceden tespit edilerek sistemde oluşması muhtemel istenmeyen durumların önüne geçilebilmektedir. Bu kapsamda değerlendirildiğinde bu tez çalışması, yeni bir dağıtık algılama yöntemi sunması nedeniyle bu alanda çalışan teorisyen ve uygulamacılara farklı bir bakış açısı sunarak yüksek duyarlılık ve çözünürlükte yeni algılama sistemlerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır.

Literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, optik fiberin malzeme karakteristiklerinin ortamın sıcaklık ve ısı gerginlik oluşumları arasındaki ilişkisi ile Brillouin gücündeki değişimin kombine etkisi dağıtık algılama prensibi esasına bağlı olarak değerlendirilmiş olup fiberin malzeme karakteristiklerinin sıcaklık ve ısı gerginlik duyarlılıkları farklı model yapıları üzerinden analiz edilmiştir.

Çalışmada yöntem olarak geriye saçılan optik sinyalin algılandığı BOTDR (Brillouin optik zaman domeni reflektometresi) ölçüm tekniğini kullanan dağıtık sıcaklık algılama ve dağıtık ısı gerginlik algılama model yapılarından yararlanılmıştır. Bu aşamada oluşturulan ve Brillouin ve Young modülünün kombine etkisini esas alan optik fiberli dağıtık algılama bir sistemde Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kaymasının Young modülü bağımlılıklarının değerlendirildiği, benzetim koşullarına bağlı olarak benzetimlerinin elde edildiği bir algılama sistem modeli çalışılmıştır. Bu modelde algılayıcı fiber üzerinde meydana gelen ısı etkileri, algılayıcı fiber üzerinde farklı lokasyonlara yerleştirilmiş olan Isıtıcı Ünitelerle sağlanmıştır.

Benzer biçimde bir yüksek gerilim yer altı enerji kablosu için (XLPE-çapraz bağlantılı polietilen-yalıtkanlı 154 kV yüksek gerilim kablosu) kablo rejimde iken operasyon süresi boyunca iletken ve çevresinde meydana gelen sıcaklık ve sıcaklık kaynaklı oluşumlar, algılayıcı fiber üzerine farklı lokasyonlara yerleştirilmiş olan Isıtıcı Üniteler aracılığıyla modellenmiştir. Bu yapı üzerinde algılayıcı fiber çekirdeğine ait Young modülü ve Shear modülünün sıcaklık ve sıcaklık kaynaklı gerginlik bağımlılıkları ile ısı duyarlılıkları çalışılmıştır.

Her iki modülün algılama performansı üzerindeki etkileri ısı duyarlılıkları üzerinden benzetimlerle elde edilmiştir. Ayrıca Brillouin güç değişimi ve Young modülünün kombine etkisini esas alan algılama sistemi için Landau-Placzek oranı (*LPR*), Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayıları ile Poisson oranının ortamdaki ısı oluşumlarla bağımlılıkları ve duyarlılıkları teorik olarak analiz edilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bir yer altı kablosu çalışma koşulları ne olursa olsun kablo yalıtkanına zarar veren elektriksel, ısı ve mekanik zorlanmalara maruz kalmaktadır. Kablo yalıtkanının görevi, iyi bir elektriksel yalıtkan olmasının yanında, iletkenin ürettiği ısıyı iyi bir şekilde dış ortama iletmektir. Birbirine zıt gibi görünen bu durum, kablonun yalıtkan kalınlığının doğru belirlenmesini gerektirmektedir. Kablo yalıtkanının performansı üzerinde belirleyici olan en önemli etkiler, maruz kaldığı maksimum operasyon sıcaklığı ve yapı içerisinde sıcaklık kaynaklı olarak meydana gelen ısı gerginliklerdir. Bu etkilerin göz ardı edilmesi ve doğru zamanda tespit edilememesi, kablo ömrünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Çünkü en sıcak noktalardaki ısı etkileşim yaşanmayı tetiklemekte ve kablonun daha kısa sürede devre dışı kalmasına neden olabilmektedir.

Literatürde Raman ve Brillouin saçılmalarını esas alan optik fiberli dağılık algılama alanında çok sayıda çalışma mevcut olmasına rağmen, ortamın ısı değişimlerinin ve ısı performansının algılayıcı olarak kullanılan silika fiberin özellikle Young modülü, Shear modülü ve Poisson oranı üzerindeki etkilerini inceleyen az sayıda çalışma bulunmaktadır. Young modülü, Shear modülü ve Poisson oranını da kapsayan bu çalışmalar genellikle optik fiberin silika yapısına dair çalışmaların odağında olup malzeme bilimi içerisinde yer almaktadır.

Dünyada genel olarak çok sayıda optik fiberli algılayıcı önerilmiş ve geliştirilmiştir (Hartog 1993, Tayama ve ark. 1995, Yoon ve ark. 2011, Zhou ve ark. 2010, Dong ve ark. 2012, Galindez ve ark. 2012). Bunlardan, dağılık optik fiberli algılayıcılar en etkili olanlarıdır. Bu algılayıcılar, düşük kayıplı optik fiberlerin kullanılması sebebiyle uzun mesafelerde çalışabilmektedir ve maliyetleri ise bilgi toplayan ağ mantığı ile çalışan çok sayıdaki nokta algılayıcı algılama sisteminin kullanıldığı yapılara kıyasla oldukça düşüktür. Ayrıca enerji nakil hatları, optik linkler, tünel ve köprü gibi yapılarda sıcaklık ve gerginlik ölçme ve/veya izleme açısından yüksek çözünürlükte veri elde edilmesine olanak sağladığından uzun mesafeli optik fiberli dağılık algılayıcılara olan ilgi ve tercih zamanla artış göstermiştir (Alahbabi ve ark. 2005, Yu 2006).

2.1. Giriş

Dünya genelinde enerji ihtiyacının giderek artması, hem yenilenebilir (RES, biyo yakıt ve güneş) enerji kaynaklarından hem de hidroelektrik, termik ya da diğer kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisinin güvenli bir biçimde tüketiciye ulaştırılmasını önemli hale getirmiştir. Özellikle yüksek gerilim havai hatlar ile yer altı ve denizaltı enerji nakil hatlarının kontrollü ve güvenli bir şekilde hizmet vermesi bu açıdan önemlidir. Algılayıcı sistem ve yapıların gerekliliği ise bu noktada ortaya çıkmaktadır. Ekonomik açıdan elektrik üretiminin ve temininin oldukça pahalı olması, enerji nakil hatlarına daha az maliyetli ve yüksek verimlilikli algılayıcıların entegrasyonunu zorunlu hale getirmiştir. Optik fiberli dağıtık algılamalı sistemler bu sorunu çözecek niteliklere sahip olmaları nedeniyle, son yıllarda geniş çalışma alanı bulmuşlardır.

Enerji nakil hatları için kablonun rejimde olduğu sürede ortaya çıkan ısı oluşumları hem kablo iletkeninin akım taşıma kapasitesini (ampasitesini) sınırlandırmakta hem de yalıtkanın yaşlanma sürecini hızlandırarak kablonun operasyon süresini kısaltmaktadır. Ayrıca yüksek gerilim havai hatları, yer altı veya deniz altı kablolarının bulunduğu ortamdaki sıcaklık ve sıcaklık kaynaklı ısıl gerginlik oluşumları, kablo faz iletkeninde ve kablo yalıtkanında deformasyonlara ve istenmeyen arızai durumlara neden olabildiğinden, operasyon süresi boyunca bu oluşumların tespit edilerek arıza öncesinde bertaraf edilmesi büyük önem arz etmektedir.

Bu nedenle sıcaklık ve sıcaklık kaynaklı ısıl gerginlik oluşumlarının Brillouin esaslı optik fiberli dağıtık algılamalı sistemler aracılığıyla yüksek çözünürlükte ölçülebilmesi, bu tür algılamalı sistemlerin enerji nakil hatlarında yaygın bir biçimde kullanılmasını sağlamıştır.

Bu algılayıcılar sıcaklık ve gerginlik oluşumlarının yanı sıra fiber kayıpları, fiber ek yeri ve bükülme kayıpları ile fiber hattı boyunca kırılma kayıplarının ölçülmesi için de kullanılabilir (Alahbabi 2005). Brillouin esaslı dağıtık sıcaklık ve dağıtık gerginlik algılamalı sistemler üretimden sanayiye, haberleşmeden, enerji nakil hatlarına

ve inşaat sektörüne kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Alahbabi 2005). Brillouin esaslı optik fiberli dağınk algılamalı sistemlerin kullanıldığı alanlar aşağıda verilmiştir.

İnşaat ve İmalat Alanında Kullanımı

Tüneller, köprüler, maden ocakları ve büyük binalarda beton yapı içerisinde meydana gelen çatlaklar ve yarıkların tespitinde kullanılmaktadır. Bu tür yapılarda algılayıcı optik fiber, beton içerisine yüzeye yakın bir bölgeye entegre edilerek yapı üzerine uygulanan yükün miktarına bağlı olarak meydana gelen gerilme ve gerginlikler, fiber uzunluğu boyunca ölçülebilmekte ve meydana gelebilecek hasarlar önceden tespit edilebilmektedir.

Bu alanda gerçekleştirilmiş bir çalışmada, beton yapı bir köprü modeli kullanılmıştır. Çalışmada köprü boyunca uzunlamasına gerginlikler, Brillouin optik zaman domeni analizinden (BOTDA) yararlanılarak optik fiberli dağınk algılamalı sistem ile kablo boyunca 195 noktada ve 14,5 cm uzamsal çözünürlükte ölçülmüştür (Yoon ve ark. 2011). Algılayıcı fiber üzerindeki gerginlik oluşumları, 0 - 70 kN aralığında yükün 0,33 kN/s hızında yapı üzerine uygulanması ile elde edilmiştir (Galindez-Jamioy ve ark. 2012). Benzer bir çalışmada ise 4 ayaklı bir köprü modeli (ayaklar arasındaki mesafe 44,40 m) için BOTDA ve BOTDR ölçüm tekniklerinden yararlanılarak Brillouin esaslı optik fiberli dağınk algılama sistemiyle 3 m uzamsal ve 15 µε gerginlik çözünürlüklü olarak gerginlik oluşumları elde edilmiştir (Minardo ve ark. 2008).

Taşıma ve Ulaştırma Alanında Kullanımı

Hava araçlarında, gemilerde, yüksek hızlı trenlerde ve uzay araçlarında, araç içinde ya da aracın üzerinden geçtiği zeminde meydana gelebilecek gerilmeler ve gerginlikler Brillouin esaslı optik fiberli dağınk gerginlik algılama sistemleriyle tespit edilebilmekte ve algılayıcı olarak kullanılan optik fiber boyunca değişimleri ölçülebilmektedir. Algılayıcı olarak kullanılan optik fiber bu sistemlerde gerginlik oluşumuna neden olan kaynağa yakın bir biçimde sisteme entegre edilmektedir. Böylelikle yük ve/veya basınç

altında meydana gelen gerilmeler ve gerginlikler hassas olarak algılanarak yüksek doğrulukta ölçülebilmektedir. Bu kapsamda Yoon ve ark. (2011) tarafından gerçekleştirilen çalışma önemlidir. Yoon ve ark. (2011) çalışmalarında, BOCDA (Brillouin optik korelasyon domeni analizi) ölçüm tekniğini kullanarak Brillouin esaslı dağılık algılama ile raylı bir sistem modeli için algılayıcı fiber boyunca ray üzerindeki uzunlamasına gerginlik oluşumlarını ölçmüşlerdir (Yoon ve ark. 2011). Bu çalışmada, 250 µm çaplı tek modlu algılayıcı fiber epoksi yapıştırıcı ile modelde kullanılan raylı sistemin iki tarafından 250 mm mesafede olacak şekilde ray yüzeyine tutturulmuştur. Yoon ve ark. (2011) bu çalışmalarında raylı sistem üzerine 140 kN'luk düşey ekseninde bir yük uygulayarak 3,6 cm uzamsal çözünürlükte gerginlik ölçümü yapmışlar ve Brillouin frekans kayması gerginlik katsayısını ölçüm sonucunda 0,05 MHz/µε olarak elde etmişlerdir.

Enerji ve Üretim Alanında Kullanımı

Nükleer santrallerde, elektrik güç ünitelerinde, güç dönüştürücülerde, basınç kanallarında, büyük kazanlarda, yüksek gerilim enerji nakil hatlarında, petrol kuyularında ve petrol boru hatlarında kullanılmaktadır. Burada sistem içerisinde oluşan sıcaklık ve ısıl gerginlik oluşumları, yüksek çözünürlüklü ve uzun mesafeli Brillouin esaslı dağılık sıcaklık algılayıcılar aracılığıyla ölçülebilmekte ve/veya tespit edilebilmektedir.

Bu alanda örnek bir çalışma Daqing petrol kuyularında kullanılan yakıt borularının güvenliğini sağlamak için boruda oluşan gerilme ve gerginlik oluşumlarının tespiti ve ölçümünde BOTDR tekniğini kullanan Brillouin esaslı optik fiberli dağılık gerginlik algılamalı sistem olarak verilebilir (Zhou ve ark. 2010).

Boot ve ark. (2002) havai hat faz iletkenine entegre edilmiş algılayıcı fiber ile Raman OTDR tekniğinden yararlanılarak iletken uzunluğu boyunca sıcaklık değişimleri ölçülmüştür (Boot ve ark. 2002). Çalışmada 25 km algılayıcı fiber boyunca sıcaklık verileri 2 °C sıcaklık ve 4 m uzamsal çözünürlüklü olarak elde edilmiştir.

Brillouin ve Raman saçılmasını esas alan optik fiberli dağınk algılamalı sistemlerin kullanıldığı çok sayıda çalışmada yer altı enerji kablolarında da kablo hattı boyunca sıcaklık oluşumları ve sıcak noktaların ölçüm ve tespiti dağınk olarak elde edilmiştir (Wild ve ark. 2000, Grotenhuis ve ark. 2001).

Haberleşme Kabloları ve Linklerinde Kullanımı

Haberleşme amaçlı ve havai hat faz iletkenlerini ani akım değişimi, yıldırım çarpması gibi çevresel olaylardan korumak için kullanılan OPGW (optik fiberli topraklama kablosu) kablolarında kabloya entegre edilmiş olan algılayıcı fiber ile kablo boyunca meydana gelen sıcaklık ve gerginlik oluşumlarının ölçülmesinde ve kablo arızası ve fiber kayıplarının tespitinde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra deniz altı optik fiber haberleşme linklerinde toprak kayması, aşırı soğuk ve deniz tabanında çapa demirlerinin kablo yalıtkanı üzerinde meydana getirdiği gerilmeler ve gerginlikler Brillouin esaslı sıcaklık ve gerginlik algılamalı sistemlerle tespit edilebilmekte ve ölçülebilmektedir.

Tayama ve ark. (1995) 6,6 kV XLPE denizaltı kablosunda optik fiberli dağınk algılama ile kablo boyunca gerginlik oluşumları üzerinden kablo zırhında gemi çapaları veya farklı nedenlerle oluşması muhtemel yarı ve çatlaklar ile faz iletkeni boyunca sıcaklık oluşumlarını tespit etmişlerdir (Tayama ve ark. 1995).

Cirigliano ve ark. (2009) optik fiberli dağınk sıcaklık algılamalı bir sistem modeli ile 10 m uzunluklu bir havai hat faz iletkeni boyunca ve 12 mm çaplı 60 m uzunluklu bir OPGW kablosu boyunca sıcaklık verilerini elde etmişlerdir. Çalışmalarında her iki kablo hattı boyunca kablo üzerine yeterli sayıda ısı çift yerleştirmişler ve ısı çiftlerden elde edilen sıcaklıklarla algılayıcı fiber kullanılarak elde edilen sıcaklık verilerini doğrulamışlardır (Cirigliano ve ark. 2009).

Genellikle farklı tipte algılama sistemleri için farklı algılama mesafeleri, farklı ölçüm cevap süreleri, farklı uzamsal çözünürlük değerleri söz konusudur. Diğer bir ifadeyle algılayıcının entegre edildiği yapı ve sistemlere bağlı olarak, algılama performansı

açısından bu parametre ve değerler yeter düzeyde değişim göstermekte ve algılanacak parametreye göre belirlenmektedir.

Literatürde bu alanlarda gerçekleştirilmiş farklı teknoloji ve algılama tekniği kullanan çok sayıda çalışma yer almaktadır. Bernauer'in çalışmasında havai hat enerji nakil hatlarında faz iletkeni boyunca sıcaklık değişimlerinin sürekli olarak izlendiği ve başarılı bir biçimde uygulanan Yüzey Akustik Dalga teknolojisi (SAW - Surface acoustic wave) bunlardan biridir (Bernauer ve ark. 2007). Bu teknoloji prensip olarak algılayıcılar ve ölçüm birimleri arasına bir radyo link yerleştirmeyi ve böylelikle ölçüm sonuçlarına ulaşmayı esas almaktadır. Douglass ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada ise gerçek zamanlı sınıflandırma metodu (RTRM - Real time rating method) kullanılmış ve havai hat faz iletkeninde sehim oluşumları ile iletkenin ısıl durumu analiz edilmiştir (Douglass ve ark. 2000).

Literatürde ayrıca havai hat faz iletkenlerinde iletkendeki sıcaklık değişimlerinin, IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers - Elektrik ve elektronik mühendisliği enstitüsü) ve CIGRE (International Council on Large Electric Systems - Uluslararası büyük elektrik sistemleri konseyi) metotları kullanılarak hesaplandığı çalışmalar da mevcuttur. Bu metotlar iletkenler için yazılmış olan enerji denge denklemlerini çözme esasına dayalı metotlardır. İletkenlerin ısıl durumlarını belirlemek için kullanılan bu tarz matematiksel modeller, lumped-parametre modelleri olarak bilinmektedir. IEEE ve CIGRE metotlarında verilen hesaplama prosedürleri genel metodolojilerde benzerlik olmasına rağmen ortam sıcaklığı, etkin rüzgâr hızı ve solar radyasyon gibi çevresel etkilerden etkilenmesi nedeniyle bazı farklılıklar içermektedir (Makhkamova 2011). Isı transfer denklemlerini esas alan IEEE ve CIGRE metotları iletkendeki ısıl değişimleri hesaplamak için farklı yaklaşımları kullanmaktadır (Schmidt 1997). Diğer bir ifadeyle, IEEE standartına göre manyetik çekirdek kayıpları ısı transfer denklemlerinde ihmal edilirken, CIGRE metodunda manyetik çekirdek kayıpları ve skin etkisi dâhil edilmektedir.

Douglass ve ark. (2000) çalışmalarında rejimde iken havai hat enerji kablolarında çekirdek sıcaklığının kablonun yüzey sıcaklığından 10 °C - 15 °C daha sıcak olduğunu

bu nedenle kablo sehim hesaplamalarında yüzey sıcaklığı yerine kablonun kesit sıcaklığını esas almak gerektiğini raporlamışlardır (Douglass ve ark. 2000).

Fan ve ark. (2009) ise çalışmalarında Landau-Placzek oranını kullanan Brillouin esaslı dağınık sıcaklık algılamalı bir algılayıcı tasarlayarak ortamdaki sıcaklık ve gerginlik değişimlerini eş zamanlı olarak elde etmişlerdir (Fan ve ark. 2009). Fan ve ark. (2009) bu çalışmalarında, BOTDR (Brillouin optik zaman domeni reflektometresi) tekniğinden yararlanmışlar, fiber zayıflama, fiber ek yeri kayıpları ve mikro bükülme kayıplarını elimine ederek 0,1°C sıcaklık duyarlılığı olarak 2 m uzamsal çözünürlükte sıcaklık değişimi verilerine ulaşmışlardır.

Alahbabi (2005) ise çalışmasında Brillouin saçılma mekanizmasını esas alan optik fiberli dağınık algılamalı bir sistem ile eş zamanlı olarak 50 km uzunluklu bir hat boyunca eş zamanlı olarak sıcaklık ve gerginlik oluşumlarını elde etmiştir. Alahbabi bu çalışmasında 1550 nm dalga boyunda tek modlu fiber kullanmış ve fiber üzerinde meydana gelen harici gerginlikleri, makaralar aracılığıyla algılayıcı fiberi germek suretiyle sağlamıştır. Çalışmada algılayıcı fiber boyunca sıcaklık ve gerginlik çözünürlükleri sırasıyla ~ 3,5 °C ve ~ 85 µε olarak elde edilmiştir.

Yun - qi ve arkadaşları (2015) Brillouin esaslı optik fiberli dağınık algılamalı bir sistem ve BOTDR ölçüm tekniğinden yararlanarak 1 kV ve 3 fazlı enerji kablosunda on - line olarak sıcaklık değişimlerini elde etmişlerdir. Çalışmada enerji kablosunun iletkenleri arasına yerleştirilmiş olan 1000 m uzunluklu algılayıcı fiber ile kablo iletkenine bir kaynaktan verilen gerilimin neden olduğu sıcaklık oluşumları izlenmiştir. Bu aşamada, gerilim altında kablodan akan akıma ve uygulandığı süreye bağlı olarak lineer değişim gösteren iletken sıcaklığı ve sıcaklıklardaki artışlar algılayıcı fiber ile tespit edilmiştir.

2.2. Optik Fiberli Algılayıcılar

Optik fiberler genel olarak yüksek bant genişlikleri ve düşük sinyal zayıflama özellikleri nedeniyle haberleşme alanında veri transferi amacıyla geliştirilmişlerdir. Ortamdaki

sıcaklık, basınç ve titreşim gibi fiziksel değişimlere bağlı olarak fiber malzeme yapısında bir takım değişimlerin meydana gelmesi ise optik fiberlerin, algılayıcı eleman olarak kullanılabilir olmasını sağlamıştır.

Bir optik fiberli algılayıcı, ışığın fiber içinde ve dışında iletildiği ve sıcaklık, gerginlik, basınç gibi çevresel etkilerin optik sinyale dönüştürüldüğü bir algılama bölgesine ulaşmak için kullanılan bir cihazdır. Optik fiberli bir algılayıcı temel olarak bir ışık kaynağından, algılayıcı eleman olarak bir optik fiberden ve bir alıcıdan oluşmaktadır. Ölçülecek ve/veya tespit edilecek fiziksel büyüklüğün uzamsal dağılımına göre optik fiberli algılayıcılar, iki grupta incelenmektedir. Bunlar nokta algılayıcılar ve dağınık algılayıcılar olarak ifade edilmektedir (Yu 2006).

Çok sayıda nokta algılayıcı, yarı dağınık algılama yapabilen ve seri olarak dizilmiş algılayıcılardan oluşurken bir nokta algılayıcı, uzayda veya bir bölgede tek bir noktada ölçüm yapmaktadır. Literatürde çeşitli özelliklere sahip çok sayıda nokta algılayıcı bulunmaktadır. Bunlardan en önemlileri, interferometrik özellikli Fabry-Perot algılayıcıları (Udd 1991) ve Bragg grating algılayıcıları olarak verilmektedir (Othonos ve Kalli 1999). Bir dağınık algılayıcı ise optik fiber uzunluğu boyunca herhangi bir bölgedeki sıcaklık, gerginlik ve titreşim gibi fiziksel parametreleri uzamsal çözünürlüklü olarak ölçmek için kullanılmaktadır.

Araştırmalar ve son dönemlerde ulaşılan teknoloji düzeyi optik fiberli algılayıcıların performansını büyük ölçüde artırmıştır. Düşük zayıflamalı, yüksek performanslı fiberlerin ve optoelektronik cihazların ekonomik oluşları ile de hem akademik çalışmalarda hem de inşaat, biyomedikal ve diğer endüstriyel alanlardaki ticari kullanımlarda optik fiberli algılayıcılar tercih edilebilir olmuşlardır.

Optik fiberli algılayıcılar özellikle ortamdaki sıcaklık, gerginlik, titreşim, dönme, yer değiştirme, basınç, kuvvet, ses, akış, viskozite, ışık gücü, kimyasal, biyomedikal ve elektriksel büyüklük veya değişkenlerin algılanmasında yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Udd 1999, Kersey 1996, Krohn 2000).

Optik fiberli algılama sistemleri Rayleigh, Raman ve Brillouin saçılma mekanizmalarını esas alan yöntemleri kullanmakta olup ortamdaki fiziksel büyüklüklerin algılayıcı fiber boyunca çok sayıda noktadan ölçülmesini sağlarlar. Aşağıda bu saçılma mekanizmaları ile algılama yöntem ve tekniklerine değinilmektedir.

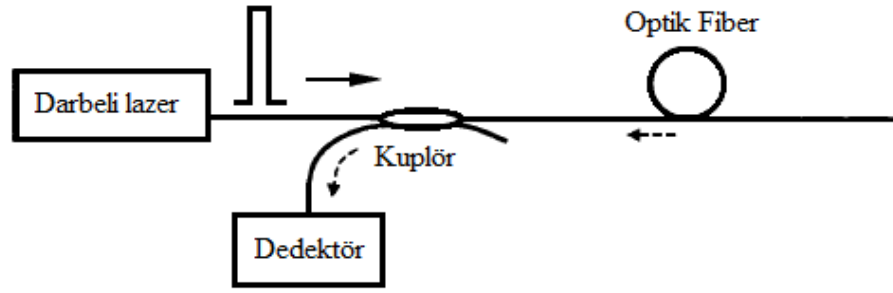
2.2.1. Rayleigh Saçılması ve Optik Zaman Domeni Reflektometresi (OTDR)

Rayleigh saçılması optik fiber çekirdeğinin kırılma indisi ve katkı konsantrasyonu dalgalanmalarında meydana gelen rastgele mikroskobik değişimlerin bir sonucu olarak ortaya çıkar (Lines 1984). Diğer bir ifadeyle fiberin üretimi esnasında yapı içerisinde meydana gelen düzensizlikler ve fiberin yoğunluğundaki rastgele homojensizliklerin bir sonucu olarak oluşmaktadır. Bu oluşumlar, fiber çekirdeğinin kırılma indisinde dalgalanmalara neden olurken, fiberin nümerik açıklığından saçılan ışığın bir kısmının fiber içerisinde ilerleme yönüne göre ters yönde kılavuzlanmasına neden olmaktadır (Alahbabi 2005).

Saçılma içte etkileşimli bir saçılma olup fiber uzunluğu boyunca var olmaktadır. Rayleigh saçılması, 1550 nm’de standart tek modlu fiberde λ^{-4} ile orantılı olan α zayıflama katsayısı ile karakterize edilmektedir (Alahbabi 2005).

Rayleigh saçılması dağınık algılamalı sistemlerde ilk olarak optik zaman domeni reflektometresinin (OTDR) keşfedilmesiyle kullanılmaya başlanmıştır (Barnowski ve ark. 1976, Barnowski ve ark. 1977). Böylelikle kavram olarak tüm dağınık algılamalı sistemlerde kullanılmıştır. OTDR tekniğinde lazer tarafından fiber içerisine pompalanan optik sinyalin (optik darbe) bir kısmı fiber içerisinde geriye doğru saçılarak bir dedektör aracılığıyla tespit edilir.

OTDR tekniğine ilişkin basit gösterim Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. OTDR tekniğinin çalışma prensibi gösterimi

OTDR tekniğiyle geriye saçılan optik sinyalin gücündeki değişim elde edilerek fiber saçılma katsayısı ve/veya fiber kesiti ya da fiber zayıflama bilgilerine ilişkin uzamsal değişimler tespit edilebilmektedir. Uzamsal enformasyon, fiber içerisinde ilerleyen optik sinyali oluşturan fotonların fiber içerisindeki hızına bağlı olarak değişim gösterdiğinden, dağınık algılamalı sistemlerde uzamsal çözünürlük, optik darbe süresi değişimlerinden direkt olarak etkilenmektedir. Diğer bir ifadeyle uzamsal çözünürlük, ışığın ortamdaki hızına, optik darbe süresine ve fiber çekirdeğinin kırılma indisine bağlıdır.

OTDR tekniği fiber içerisinde optik sinyaldeki zayıflama miktarının, fiber ek yeri kayıplarının ve fiber haberleşme uygulamalarında fiber üzerinde hata veya arıza yerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Optik sinyaldeki zayıflama miktarının bilinmesi ile 100 km-200 km uzunluğuna kadar, optik kablo uzunlukları kolaylıkla ölçülebilmektedir (Alahbabi 2005).

Literatürde Rayleigh saçılma mekanizmasını esas alan optik fiberli dağınık algılamalı sistemlerden yararlanılarak gerçekleştirilmiş olan ve ortamdaki sıcaklık değişimlerinin elde edildiği uygulamalar da mevcuttur. Hartog sıvı çekirdekli fiberlerde Rayleigh saçılmasının sıcaklık bağımlılığını kullanarak sıcaklık çözünürlüklü ve birkaç metre değerinde uzamsal çözünürlüklü olarak algılayıcı fiber boyunca sıcaklık verilerine ulaşmıştır (Hartog 1983).

Rayleigh saçılmalı dağınık algılamalı sistemler, basit yapıları olmalarının yanı sıra ekonomik sistemlerdir. Ancak Rayleigh saçılmasının sıcaklık bağımlılığı oldukça düşük olduğundan, sıcaklık oluşumlarının algılandığı optik fiberli dağınık algılamalı sistemlerdeki kullanımlarında algılama performansı açısından çok yeterli değildir. Optik fiberde geriye saçılan sinyalde Rayleigh gücünün sıcaklık katsayısı $0,015 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüş olup bu değer Brillouin gücünün sıcaklık katsayısından ($0,26 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$) oldukça küçük bir değere sahiptir (Li ve ark. 2003a).

2.2.2. Raman Saçılması Esaslı Dağınık Algılama

Raman saçılması optik fiber içerisinde ilerleyen ışığın moleküler titreşimlerle saçılması esasına dayanmakta olup elastik olmayan bir saçılma mekanizmasıdır. Fiber içerisinde saçılan ışık Stokes ve anti-Stokes olmak üzere sırasıyla enerji kaybeden ve enerji alan ışık fotonlarına ayrılmaktadır. Enerji kaybeden yani Stokes bileşenleri fibere pompalanan ışığın frekansından aşağı yönde, enerji alan anti-Stokes bileşenleri ise pompalanan ışığın frekansından yukarı yönde sapma gösterir.

Işık fotonlarının anti-Stokes bileşeninin gücü, optik fononların miktarına bağlıdır. Bu yüzden ortamdaki sıcaklık oluşumlarına bağımlı olup sıcaklıkla orantılı bir biçimde değişim gösterir. Dolayısıyla ışık fotonlarının anti-Stokes bileşeni gücünün, Stokes bileşeni gücüne oranı ölçülerek fiber uzunluğu boyunca sıcaklık oluşumları enformasyonuna kolaylıkla ulaşılabilmektedir (Yu 2006). Çünkü Raman saçılması sonucu meydana gelen Stokes ve anti-Stokes bileşenlerine ilişkin frekans kayması THz seviyelerinde iken Brillouin saçılması neticesinde meydana gelen Stokes ve anti-Stokes bileşenleri frekans kayması GHz seviyelerindedir.

Bu durum, Raman saçılmasının Brillouin saçılmasına kıyasla ayrı bir saçılma olması sonucunu doğurduğundan, Raman bileşenlerini Rayleigh bileşenlerinden algılayıcı sistemde yer alan bir optik filtre aracılığıyla süzmek kolaylıkla mümkün olmaktadır (Yu 2006).

Raman saçılmasında sinyalin anti-Stokes bileşeninin sıcaklık bağımlılığı, optik fononların enerji durumlarından veya fononların ısı yoğunluğundaki artıştan direkt olarak etkilenmektedir. Diğer bir ifadeyle optik fononların enerji miktarındaki artış veya fonon dağılımındaki yoğunlaşma ortamdaki sıcaklığın artması ve azalmasına bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu bağlamda, ortamın mutlak sıcaklığını belirlemek için Raman anti-Stokes ve Stokes bileşenlerin optik sinyal güçlerinin oranından yararlanılabilmektedir (Alahbabi 2005).

Ortamdaki sıcaklık oluşumlarının fonksiyonu olarak R_T Raman sinyal gücü (2.1) eşitlikleri ile verilmektedir.

$$R_T = \left(\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} \right)^4 \exp \left(- \frac{hcU_R}{kT} \right) \quad (2.1.a)$$

$$R_T = \left(\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} \right)^4 \exp \left(- \frac{h\Delta\nu}{kT} \right) \quad (2.1.b)$$

Eşitliklerde; λ_S ve λ_{AS} sırasıyla Raman Stokes ve anti-Stokes dalga boylarına, c ışığın boşluktaki hızına (3×10^8 m/s), h Planck sabitine ($6,62 \times 10^{-34}$ J/s), U_R Raman sinyali ile fibere pompalanan optik sinyalin dalgaboyları arasındaki dalga sayısına (45000 m^{-1}), $\Delta\nu$ Raman anti-Stokes bileşeni ile lazer pompa sinyali arasındaki frekans farkına, k Boltzmann sabitine ($1,38054 \times 10^{-23}$ J/°K), T ise Kelvin cinsinden ortam sıcaklığına karşılık gelmektedir (Farahani ve ark. 1999, De Souza 1999).

Raman gücünün sıcaklık duyarlılığı K_T^P , (2.1) eşitliğinden (2.2)'de verildiği gibi elde edilmektedir (Alahbabi 2005).

$$K_T^P = \frac{1}{R_T} \frac{\partial R_T}{\partial T} = \frac{h\Delta\nu}{kT} \quad (2.2)$$

Farries ve ark. (1984) tarafından Raman esaslı başarılı ilk optik fiberli dağınık sıcaklık algılamalı bir sistem tasarımı geliştirilmiştir. Kersey (1996) ise 10 km uzunluklu bir optik fiber hattı için 1 °C sıcaklık ve 1 m uzamsal çözünürlüklü dağınık sıcaklık

algılayıcı geliştirmiştir. Daha sonraki yıllarda Raman ve Brillouin saçılmasının birleşik etkisini kullanarak gerçekteşirilen sıcaklık ve gerginlik algılayıcı sistemler geliştirilmiştir. Bu kapsamda sıcaklık ve gerginlik oluşumlarının eş zamanlı olarak elde edildiği ve Alahbabi ve ark. (2005) tarafından gerçekteşirilen çalışmada, ~ 23 km uzunluklu bir fiber hattı için 6 °C sıcaklık ve 150 $\mu\epsilon$ gerginlik çözünlüğünde sıcaklık ve gerginlik varyasyonlarına ulaşılmıştır.

Raman saçılması sadece sıcaklık bağımlılığı olan ancak buna karşılık gerginlik bağımlılığı olmayan bir saçılmadır. Bu nedenle optik fiberli dağınık sıcaklık algılamalı sistemlerde yaygın olarak kullanılırken, sıcaklık ve gerginlik değişimlerinin her ikisine de bağımlı olan Brillouin saçılması her iki parametrenin de eş zamanlı olarak algılandığı sistemlerde yaygın kullanıma sahip bir saçılma mekanizmasıdır (Dakin ve ark. 1985, Horiguchi ve ark. 1995).

Bunun yanı sıra Raman saçılma katsayısı düşük değerli olması sebebiyle, geriye saçılan optik sinyalde Raman bileşenin gücü Rayleigh bileşeni gücünden 30 dB, Brillouin bileşenin gücünden 10 dB daha küçüktür. Bu durum algılayıcı performansı açısından daha yüksek güçlü lazer kaynağına ve geriye saçılan optik sinyalin algılandığı foto alıcı tarafta daha uzun yakalama süresine gereksinim duyulmasına neden olmaktadır (Yu 2006).

2.2.3. Brillouin Saçılması Esaslı Dağınık Algılama

Brillouin algılayıcılar Brillouin saçılma mekanizmasını esas almaktadır. Brillouin saçılmalı optik fiberli dağınık algılamalı sistemlerde, algılayıcı fiber içerisine pompalanan ışık fotonları, akustik fononlarla etkileşerek geri yönde saçılmaktadır. Diğer bir ifadeyle Brillouin saçılması, ısıl etkilerle ortamda meydana gelen akustik dalgalarla lazer kaynak tarafından fibere pompalanan ve ileri yönde kılavuzlanan ışık fotonlarının etkileşmesi ve fotonların kılavuzlanma yönüne göre ters yönde saçılması prensibine dayanmaktadır. Geriye saçılan ışık, ısıl etkilerle optik fiber içerisinde meydana gelen akustik dalgaların hızı ile orantılı olarak değişim gösteren Doppler

frekans kaymasına maruz kalmaktadır. Bu kayma Brillouin frekans kayması olarak ifade edilmektedir (Yu 2006). Brillouin frekans kayması ortamdaki sıcaklık ve gerginlik oluşumlarına lineer olarak bağımlı olduğundan, hem sıcaklık hem de gerginlik verileri optik fibere ait Brillouin kayıp ya da kazanç spektrumunun analiz edilmesiyle ölçülebilmektedir (Yu 2006).

Brillouin esaslı optik fiberli dağınık algılayıcılar, düşük giriş gücüne (~ mW) ve yüksek sıcaklık ve gerginlik duyarlılıklarına sahip olmalarının yanı sıra - 270 °C ile 800 °C aralığında sıcaklık ölçüm kabiliyetine (Fellay ve ark. 2001, Li ve ark. 2003b) ve birkaç $\mu\epsilon$ ile 20 000 $\mu\epsilon$ aralığında gerginlik ölçüm kabiliyetine (DeMerchant 2000) sahiptirler. Raman saçılmasının gerginlik duyarlılığının olmaması dolayısıyla ortamdaki sıcaklık ve gerginlik oluşumlarının eş zamanlı olarak tespit edilmesi mümkün olmadığından, son yıllardaki çalışmalarda bu anlamda Brillouin esaslı dağınık algılayıcılar, Raman esaslı dağınık algılayıcıların yerini almıştır.

2.3. Lineer Olmayan Optik Olaylar

Maxwell denklemleri kullanılarak elde edilen ve bir ortamda ilerleyen elektromanyetik dalganın yayılımını açıklayan ifade (2.3) ile verilmektedir (Agrawal 1995).

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (2.3)$$

Eşitlikte; E elektrik alanı, c ışığın boşluktaki hızına, μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliğine, P ise dielektrik bir ortamdaki elektrik dipollerin polarizasyonuna karşılık gelmektedir.

Polarizasyon, genel olarak eşitlik (2.4) ile verilmiş olan elektrik alanın güç serileri olarak ifade edilmektedir.

$$P = \epsilon_0 [X^{\{1\}} \cdot E + X^{\{2\}} : EE + X^{\{3\}} : EEE + \dots] \quad (2.4)$$

Eşitlikte; ϵ_0 boşluğun dielektrik sabitini (elektriksel geçirgenliğini), $X^{(j)}$ ($j = 1, 2, 3, \dots$) j 'nci dereceden duyarlılığı (suseptibilitesi) ve $j+1$ tensörün rankını ifade etmektedir.

Eşitlikte yer alan lineer duyarlılık $X^{(1)}$ ışığın kırılması ve çift kırılım gibi lineer optik olayları ifade etmektedir. Eşitlikteki ikinci dereceden duyarlılık $X^{(2)}$, ikinci dereceden harmoniklerden ve oluşan toplam frekanstan sorumludur. Silisyum dioksit'in simetrik moleküler yapısı nedeniyle silika optik fiberde $X^{(2)}$ yoktur. Üçüncü dereceden duyarlılık $X^{(3)}$ ise üçüncü dereceden harmoniklerle optik Kerr etkisi, Raman saçılması ve Brillouin saçılması gibi lineer olmayan olayların oluşmasından sorumludur (Agrawal 1995).

Gerginlik duyarlılığı olmaması nedeniyle Raman saçılması, genellikle sıcaklık algılamada, Brillouin saçılması ise sıcaklık ve gerginlik bağımlılığı nedeniyle her iki parametrenin eş zamanlı algılanmasında kullanılmaktadır.

2.4. Bir Ortamdan Işığın Spontane Saçılması

Bir ortamda ışık fotonlarının saçılması, ortamı oluşturan malzemenin optik özelliklerindeki dalgalanmaların bir sonucu olarak ortaya çıkar. Yapı itibariyle literatürde Rayleigh, Rayleigh-Wing, Raman ve Brillouin saçılması olmak üzere dört çeşit spontane saçılma mevcuttur.

Rayleigh saçılması ışık fotonlarının malzeme içerisinde ilerlerken homojen olmayan kırılma indis veya yoğunluk dalgalanmaları ile etkileşmesinin bir sonucu olarak meydana gelmektedir. Rayleigh saçılması elastik bir saçılmadır. Elastik saçılma optik fibere pompalanan ve fiber içerisinde ileri yönde kılavuzlanan ışık ile saçılan ışığın frekanslarının eşit olması durumu ile açıklanmaktadır. Rayleigh-Wing saçılması (Boyd 2003) ise ışık fotonlarının fiber malzemedeki meydana gelen izotropik olmayan (eş biçimli olmayan, yönden bağımsız, her yönde homojen özellikler göstermeyen) moleküler yapıdaki dalgalanmalardan saçılması sonucu oluşmaktadır.

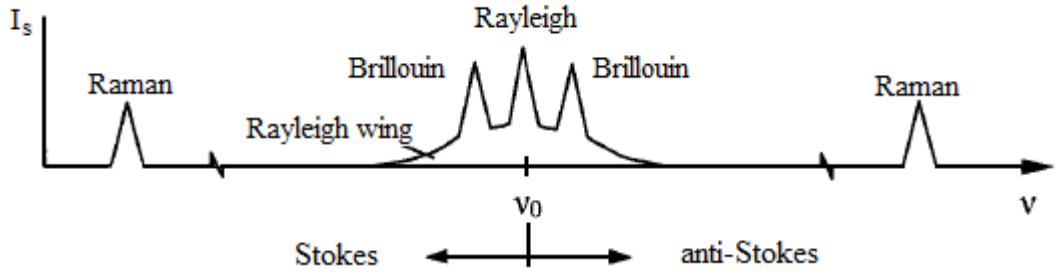
Raman saçılması fiber içerisinde ilerleyen ışık fotonlarının optik fononlarla diğer bir ifadeyle ortamda oluşan titreşimsel moleküler modlarla etkileşmesinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Raman saçılması elastik olmayan bir saçılma olup saçılan optik sinyalin frekans değeri geriye saçılan Brillouin sinyalin frekans değerinden $\sim 10^3$ kat daha büyüktür.

Brillouin saçılması ise Leon Brillouin tarafından açıklandığı üzere, ışık fotonlarının optik fiber içerisinde ısıl etkilere bağlı olarak meydana gelen akustik dalgalarla etkileşmesinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır (Brillouin 1922).

Akustik dalgalar optik fiber içerisinde yayılım gösteren basınç dalgalarıdır. Bu nedenle silika yapılu optik fiber içerisinde periyodik yoğunluk dalgaları yaratarak kırılma indis dalgalanmasına neden olurlar. Brillouin saçılması aynı zamanda ışık fotonlarının akustik fononlardan saçılması olarak değerlendirilebilir. Bu yüzden foton-fonon arasındaki elastik olmayan etkileşim, ortamdaki sıcaklık ve gerginlik oluşumlarının fonksiyonu olarak akustik dalgaların hızında bir değişime neden olduğundan, optik fiber içerisinde ilerleyen ışık ile saçılan ışık arasında Doppler etkisi ile açıklanan bir frekans kaymasına neden olmaktadır. Başka bir ifadeyle bu frekans kayması, akustik dalga hızında (ses dalgası hızı) hareket eden bir aynadan bir optik ışın demetinin Doppler etkisi sonucu kayması olarak ifade edilmektedir (Yariv 1996).

Brillouin saçılması spontane ve zorlanmış Brillouin saçılması olmak üzere iki alt prosese ayrılmaktadır. Optik fiber içerisinde ilerleyen ışığın saçılmasına neden olan kırılma indis dalgalanmaları, ortamda oluşan ısıl etkilerden kaynaklanıyorsa saçılma spontane Brillouin saçılmasıdır. Eğer fiber kırılma indis dalgalanmaları, ışığın oluşturduğu alandan kaynaklanıyorsa saçılma zorlanmış Brillouin saçılması (SBS) olarak adlandırılmaktadır (Boyd 2003).

Rayleigh, Rayleigh-Wing, Raman ve spontane Brillouin saçılmasına ait spektrum, Şekil 2.2'de verilmektedir.



Şekil 2.2. Spontane saçılma mekanizmalarına ait spektrum gösterimi (Boyd 2003)

2.5. Akustik Dalga ve Spontane Brillouin Saçılması

2.5.1. Akustik Dalganın Bir Ortamda Yayılımı

Akustik dalgalar ortamdaki basınç dalgalanmalarından diğer bir ifadeyle yoğunluk değişiminden kaynaklanmaktadır. Bir optik fiber izotropik yani eş yönlü, koyu kıvamlı-viskoz ve sıkıştırılabilir. Optik fiberin yoğunluk değişimine ($\Delta\rho$) bağlı olarak dielektrik sabiti veya elektriksel geçirgenlik değerindeki dalgalanmalar ($\Delta\varepsilon$), (2.5) ile verilmektedir.

$$\Delta\varepsilon = \frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho} \Delta\rho \quad (2.5)$$

Eşitlikte; ρ optik fiber yoğunluğuna karşılık gelmektedir.

Dielektrik sabitinin ortalama karesel dalgalanması eşitlik (2.6)'da verildiği gibi ifade edilmektedir (Yu 2006).

$$\langle \Delta\varepsilon^2 \rangle = \gamma_e^2 \frac{\langle \Delta\rho^2 \rangle}{\rho_0^2} \quad (2.6)$$

Eşitlikte; $\gamma_e = \rho \frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}$ elektriksel büzülme (elektrostriktif) sabitini ifade etmektedir.

Silika fiber için yoğunluk değişimi (2.7)'de verildiği gibi ifade edilmektedir (Yu 2006).

$$\Delta\rho = \left(\frac{\partial\rho}{\partial p}\right)\Delta p + \left(\frac{\partial\rho}{\partial s}\right)\Delta s \quad (2.7)$$

Eşitlikte; p ve s sırasıyla basınç ve entropi bağımsız değişkenlerine karşılık gelmektedir.

Eşitlikte ilk terim, algılayıcı fiber içerisinde Brillouin saçılmasına neden olan adiyabatik yoğunluk dalgalanmalarına yani akustik dalga oluşumlarına karşılık gelmektedir. İkinci terim ise Rayleigh saçılmasının kaynağı olan adiyabatik dalgalanmaları yani entropiyi ya da sıcaklık dalgalanmalarını ifade etmektedir (Boyd 2003).

Termal denge durumunda fiber içerisinde ısı kaynaklarının bir sonucu olarak ortaya çıkan fononlar, optik fiberde meydana gelen genelde küçük olan içsel basınç değişimlerinin ana kaynağıdır. Basınç değişimlerinin küçük oluşu, spontane Brillouin saçılması sonucu oluşan Brillouin sinyalinin zayıf bir sinyal olmasına neden olmaktadır.

Bir optik fiber, ince ve uzun bir silindir olarak değerlendirilebilir. Basınç dalgalanmaları, silika optik fiber boyunca birim hacimdeki küçük yer değiştirmelerinden oluşmaktadır. Silika optik fiber boyunca oluşan basınç değişimleri ile hacim değişimleri arasında (2.8) ile verilen bir ilişki bulunmaktadır (Yu 2006).

$$\Delta\rho = -K\frac{\Delta V}{V} \quad (2.8)$$

Eşitlikte; K Bulk modülüne, ΔV hacim değişimine, V ise basınç uygulanmadan önceki ilk hacme karşılık gelmektedir.

Silika optik fiber üzerinde her bir hacim elemanının, bitişiğindeki hacim elemanına iletmiş veya aktardığı basınç miktarı, (2.9)'da verildiği gibi d'Alembert dalga denkleminde göre yayılım göstermektedir.

$$\nabla^2 p - \frac{\rho}{K}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (2.9)$$

Eşitlikte; p basınç değişimlerini, ρ silika optik fiberin yoğunluğuna karşılık gelmektedir.

Bir silika optik fiber için oda sıcaklığında ve atmosferik basınç altında Bulk modülünün $K = 7,37 \times 10^{10}$ Pa ve $\rho = 2,21 \times 10^3$ kg/m³ değerleri için akustik dalga hızı $v_a = K/\rho$ eşitliğinden $v_a = 5775$ m/s olarak elde edilmektedir (Yu 2006).

Silika optik fiber içerisinde basınç oluşumlarının bir sonucu olarak meydana gelen yoğunluk dalgalanmaları (2.10) formunda ifade edilmektedir.

$$\Delta\rho = -\frac{1}{2}[\rho(z, t)e^{i(w_B t - k_B Z)} + c. c] \quad (2.10)$$

Eşitlikte; w_B açısal hızı, k_B ise akustik dalgaya ait dalga vektörünü ifade etmektedir.

2.5.2. Işık Fotonlarının Akustik Dalgadan Saçılması

Fiber içerisine gönderilen ve dalga vektörü k_P olan v_P frekanslı bir ışık dalgası, dalga vektörü k_B olan v_B frekanslı bir akustik dalgaya çarptığında, gönderilen ışık dalgası akustik dalgadan enerji ve momentumun korunumu yasasına uygun olarak ve Bragg koşulunu sağlayacak şekilde frekansını değiştirerek saçılmaktadır (Yu 2006).

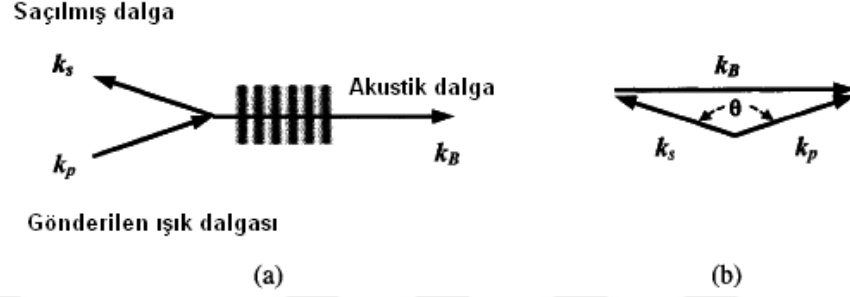
Başka bir ifadeyle fiber içerisinde ileri yönde kılavuzlanan ışık fotonları, frekansı v_S ve dalga vektörü k_S olacak şekilde saçılmaktadır. Işık fotonlarının saçılması (2.11.a) ve (2.11.b)'de verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$v_P - v_S = v_B \quad (2.11.a)$$

$$k_P - k_S = k_B \quad (2.11.b)$$

Eşitliklerde; $k_P = (w_P/c)n_P$, $k_S = (w_S/c)n_S$ ve $k_B = w_B/v_a$ olarak verilmekte olup v_a akustik dalga hızına, c ışığın boşluktaki hızına w_P ve w_S ise sırasıyla fibere pompalanan ışığın ve akustik dalgadan saçılan ışığın açısal hızına karşılık gelmektedir.

Brillouin saçılmasına neden olan ve fiber içerisinde genellikle ısı etkileriyle ortaya çıkan akustik dalga ile fibere pompalanan ve geriye saçılan ışık fotonlarına ait dalga vektörleri ve saçılma yönleri arasında Şekil 2.3'te gösterildiği gibi bir ilişki bulunmaktadır (Yu 2006).



Şekil 2.3. Brillouin saçılmasında foton-fonon etkileşimine ait momentum vektör gösterimi

Şekilde P , S ve B indisleri sırasıyla fibere pompalanan ışık fotonlarını, saçılan ışık fotonlarını ve akustik dalgayı belirtmektedir. Sinüs ve üçgen ilişkisinden yararlanılarak ω_B (2.12)'de verildiği gibi elde edilmektedir (Yu 2006).

$$\omega_B = v_a |k_B| \cong 2v_a |k_p| \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.12)$$

Eşitlikte; ω_B akustik dalganın açısal hızına, v_a akustik dalga hızına, θ ise fibere pompalanan ışığın yayılım vektörü ile Stokes dalga vektörleri arasındaki açığa karşılık gelmektedir. Bir optik fiber boylamasına eksenini boyunca ışığı kılavuzlayan bir dalga kılavuzudur. Eşitlik (2.12)'de $\theta = 0$ için Brillouin frekans kayması sıfır olup bu durum ileri yönde saçılmayı ifade etmektedir. Brillouin sinyalin geriye saçılması ancak $\theta = \pi$ iken gerçekleşmektedir. Brillouin frekans kayması ν_B (2.13)'de verilmektedir.

$$\nu_B = \frac{\omega_B}{2\pi} = \frac{2nv_a}{\lambda_p} \quad (2.13)$$

Eşitlikte; n fiberin çekirdek kırılma indisini ve λ_p fibere pompalanan ışığın dalga boyunu ifade etmektedir (Yu 2006).

2.6. Zorlanmış Brillouin Saçılması

Zorlanmış Brillouin saçılması (SBS) ilk olarak Chiao ve ark. (1964) tarafından gözlemlenmiştir. Chiao ve ark. (1964) çalışmalarında Brillouin saçılmasına neden olan akustik dalgaların fibere pompalanan ışık dalgaları tarafından üretildiğini ileri sürmüşlerdir (Chiao ve ark. 1964). Bu çalışma SBS üzerine yapılacak sonraki dönemlerdeki yoğun çalışmaların başlangıcı olmuştur (Yu 2006).

2.6.1. Elektriksel Büzülme ve Zorlanmış Brillouin Saçılması

Elektriksel büzülme yani elektrostriktif etki elektrik alan altında sıkışma eğiliminin bir ölçütü olarak değerlendirilmektedir (Boyd 2003). Dolayısıyla elektriksel büzülme etkisine bağlı olarak meydana gelen basınç etkisi, elektrik alanın bir fonksiyonu olarak (2.14)'te verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$P_{el} = -\gamma_e \frac{E^2}{8\pi} \quad (2.14)$$

Eşitlikte; γ_e elektrostriktif sabit olup (2.15)'de verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$\gamma_e = \rho_0 \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} = n^4 \epsilon_0 p_{12} \quad (2.15)$$

Eşitlikte; ρ_0 silika fiber malzemesinin ortalama yoğunluk değerine, n fiberin çekirdek kırılma indisine, ϵ_0 dielektrik sabitine ve p_{12} boylamasına foto elastik katsayıya karşılık gelmektedir.

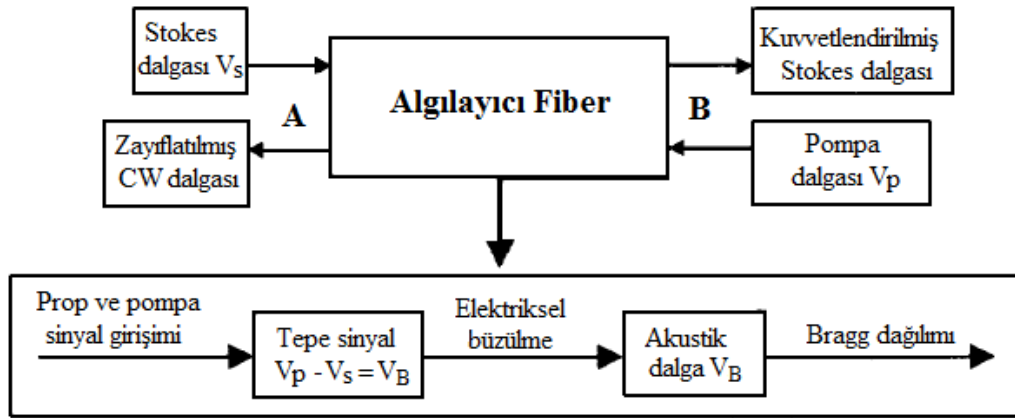
Homojen olmayan elektrik alanının bir optik fiber içerisinde meydana getirdiği basınç oluşumları, ortamda periyodik kırılma indis dalgalanmalarına neden olduğundan fiber boyunca periyodik yoğunluk dalgalanmaları oluşturmaktadır. Bu yoğunluk dalgalanmaları, (2.16) eşitliğinde verildiği gibi $\Delta p = K \Delta \rho / \rho$ ile verilen basınç

değişiminin ve dielektrik duyarlılık (ya da suseptibilite) değişiminin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır.

$$\Delta\chi = \frac{\gamma_e \Delta\rho}{\epsilon_0 \rho} \quad (2.16)$$

Zorlanmış Brillouin saçılması fibere pompalanan optik sinyale bağlı olarak optik fiberin yoğunluk değişimlerinden meydana gelmektedir. Şekil 2.4'te prop ve pompa dalgası ile figüre edilmiş Brillouin algılayıcıda SBS gösterimi verilmektedir (Yu 2006). Şekilde verilen bu algılayıcıda prop dalgası (Stokes dalgası) v_s algılayıcı optik fiberin A ucundan, pompa dalgası v_p ise fiberin ters taraftaki B ucundan gönderilmektedir.

Her iki dalga algılayıcı fiber içerisinde ters yönlerde yayılım göstermekte ve akustik dalga yayılımı oluşturmak için birbirleriyle girişim yapmaktadır. Prop ve pompa sinyallerinin birbirleriyle etkileşmesi ile fiberin A ucunda kuvvetlendirilmiş Stokes sinyali, B ucunda ise zayıflatılmış pompa sinyali elde edilmektedir.



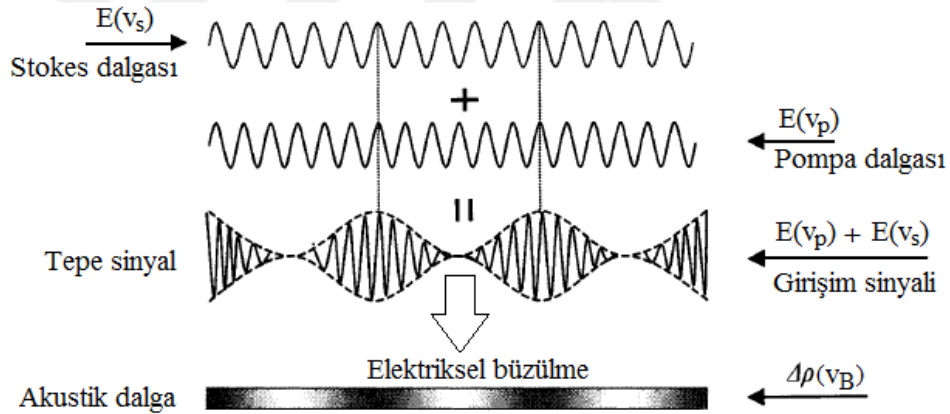
Şekil 2.4. Prop ve pompa dalgaları ile oluşturulmuş Brillouin algılayıcıda SBS gösterimi

Şekilde 2.4'te verilmiş olan algılayıcının arka kısmında, algılayıcı fiber içerisinde meydana gelen prosesler gösterilmektedir. Her iki dalganın girişimi, frekansları arasındaki $v_p - v_s$ fark değerine sahip bir frekans bileşeni içermektedir. Bu frekans bileşeni tepe frekans olarak adlandırılmaktadır (Yu 2006). Tepe frekans ($v_p - v_s$), akustik

dalga frekansı ile uyumludur. Bu nedenle akustik dalganın genlik değeri elektriksel büzülme etkisi ile artış gösterir.

Prop ve pompa dalgaları, fiber uzunluğu boyunca meydana gelen Bragg dağılımı (kırılımı) boyunca akustik dalga ile etkileşmektedir. Bu arada akustik ve pompa dalgalarının birleşik etkisi Brillouin Stokes bileşeninin kuvvetlenmesine neden olmaktadır. Böylelikle algılayıcıdaki pozitif geri besleme ile Stokes dalgası kuvvetlendirilirken, pompa dalgası zayıflatılmaktadır (Yu 2006).

Prop (Stokes) ve pompa dalgaları arasındaki etkileşimin bir sonucu olarak elektriksel büzülme boyunca bir akustik dalga meydana gelmektedir. Bu durum, Şekil 2.5’de gösterilmiştir (Yu 2006).

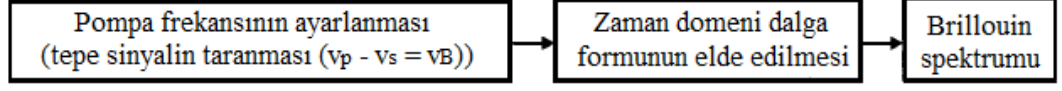


Şekil 2.5. Elektriksel büzülme etkisi ile akustik dalganın oluşturulmasına ait gösterim

2.6.2. Brillouin Spektrumu

Şekil 2.6’da Brillouin spektrumunun nasıl elde edildiği gösterilmektedir. Ölçüm sırasında prop frekansı sabit bir değere ayarlanarak pompa frekansı taranmakta ve tepe frekansının her bir değeri için, algılayıcı fiber boyunca zaman domeni dalga formu elde edilmektedir.

Brillouin frekans spektrumuna, bu şekilde algılayıcı fiber boyunca elde edilen tüm dalga formlarının birleştirilmesi ile ulaşılmaktadır.



Şekil 2.6. SBS prosesi ile Brillouin spektrumunun elde edilmesi

Brillouin saçılma prosesi birden bire ortaya çıkan bir proses değildir. Geriye saçılan sinyalin gücü, eşitlik (2.13)'te verildiği gibi Brillouin frekans kayması V_B ile orantılı bir biçimde değişim gösterir. Geriye saçılan sinyalin gücü, Brillouin frekansının V_B olduğu durumda maksimumdur (Bao ve ark. 1993a, Horiguchi ve ark. 1995).

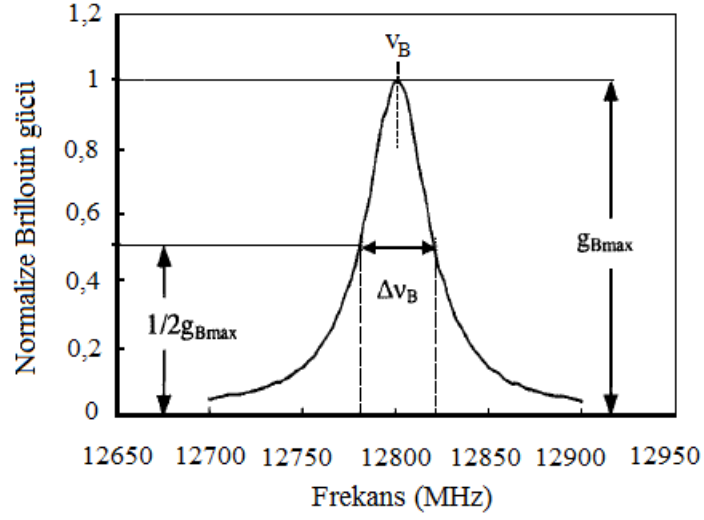
Düşük yoğunluklu sürekli dalga (CW) formundaki giriş sinyal dalgaları için Brillouin kazanç spektrumu (BGS) Lorentz dalga formunda olup (2.17)'de, maksimum kazanç katsayısı g_{Bmax} ise (2.18)'de verildiği gibi ifade edilmektedir (Agrawal 1995).

$$g_B(\nu) = \frac{g_{Bmax}}{1 + 4 \left[\frac{\nu - \nu_B}{\Delta\nu_{LW}} \right]^2} \quad (2.17)$$

$$g_{Bmax} = \frac{2\pi\gamma^2}{c\epsilon_0^2\lambda_p^2\rho_0\Delta\nu_{LW}v_a n} \quad (2.18)$$

Eşitliklerde; λ_p lazer kaynağın algılayıcı fiber içerisine pompaladığı optik sinyalin dalga boyuna, ρ_0 silika fiber malzeme yoğunluğuna, silika fiber içerisinde v_a akustik dalga hızına ve $\Delta\nu_{LW}$ Brillouin spektrumu çizgi genişliğine karşılık gelmektedir.

Brillouin spektrumu Şekil 2.7'de verilmektedir. Şekilde maksimum Brillouin kazanç katsayısı bir değerine normalize edilmiştir (Yu 2006).



Şekil 2.7. Brillouin spektrumu ve Brillouin kazanç katsayısı

2.7. Brillouin Spektrum Analizi ile Sıcaklık ve Gerginlik Ölçümü

Horiguchi ve ark. (1989a) Brillouin frekans kaymasının (v_B) gerginlikle, Kurashima ve ark. (1990a) ise sıcaklıkla lineer olarak arttığını çalışmalarında göstermişlerdir. Brillouin frekans kayması ile ortamdaki sıcaklık ve gerginlik değişimleri arasındaki ilişki sırasıyla (2.19.a) ve (2.19.b) eşitliklerinde aşağıdaki gibi verilmektedir (Horiguchi ve ark. 1995).

$$T = C_{vT}[v_B - v_{B0}] + T_0 \quad (2.19.a)$$

$$\epsilon = C_{v\epsilon}[v_B - v_{B0}] + \epsilon_0 \quad (2.19.b)$$

Eşitliklerde; T ve ϵ sırasıyla sıcaklık ve gerginlik oluşumlarına $C_{vT} = [\partial v_B / \partial T]_{\epsilon}$ ve $C_{v\epsilon} = [\partial v_B / \partial \epsilon]_T$ ise sırasıyla Brillouin frekans kaymasının sıcaklık ve gerginlik katsayılarına karşılık gelmektedir. Burada, ϵ_0 ve T_0 değerleri algılayıcı fiber için deneysel olarak elde edilmiş olan gerginlik ve sıcaklık ilk değerleridir.

Şekil 2.6’da verildiği gibi Brillouin saçılmasına ait spektrumdan yararlanılarak ölçülebilen parametreler Brillouin frekansı V_B , Brillouin spektrumu çizgi genişliği ΔV_{LW} , Brillouin gücü ve Brillouin kazanç katsayısı g_{Bmax} olarak verilebilir (Yu 2006).

Bu parametrelerin yanında algılayıcı fiber üzerinde sıcaklık ve/veya gerginlik artışlarının olduğu noktaların veya lokasyonların yani Brillouin saçılmasının olduğu bölgelere ilişkin z lokasyon bilgisine de ulaşılmaktadır. Fiber üzerinde lokasyon z , (2.20) eşitliğinde verildiği gibi lazer kaynağın fibere pompaladığı ışık darbesinin saçılmanın olduğu noktaya ulaşması ve geriye saçılan optik sinyalin foto dedektöre ulaşması için geçen toplam süreye (Δt), ışığın boşluktaki hızına (c) ve fiberin çekirdek kırılma indisine (n) bağlıdır.

$$z = \frac{\Delta t \cdot c}{2n} \quad (2.20)$$

Brillouin saçılmasını esas alan optik fiberli dağınık algılamalı sistemlerde eşitlikte verilen $\Delta t/2$ değeri, algılayıcı fiber üzerinde Brillouin saçılmasının gerçekleştiği nokta ve/veya lokasyona fiberin giriş ucundan gönderilen ışığın ulaşması için geçen süreye karşılık gelmektedir.

2.8. Brillouin Dağınık Algılama Teknikleri

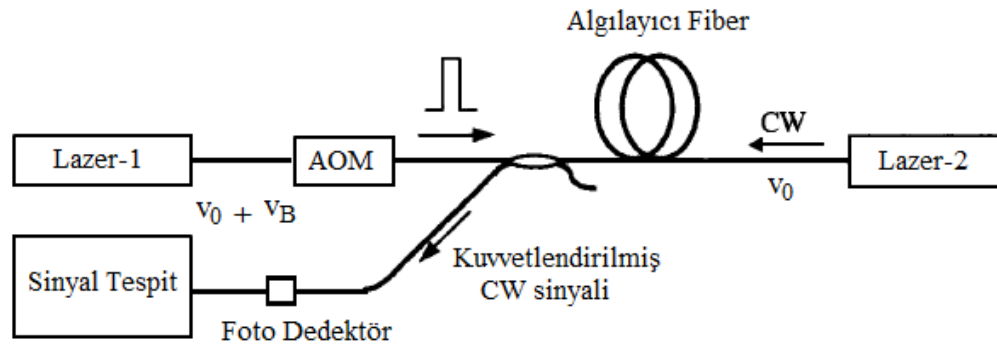
2.8.1. Brillouin Optik Zaman Domeni Analizi (BOTDA)

BOTDA tekniğinde uzamsal çözünürlük ışık fononlarının yaşam süresi nedeniyle 1 m ile sınırlanmaktadır (Agrawal 1995, Boyd 2003). Bu sorunun üstesinden gelmek için, prop sinyalinin gücünü değiştirmek amacıyla geliştirilmiş çok sayıda metot önerilmiştir. Zaman domeninde gerçekleştirilen bu metotlardan en önemlileri, faz kaydırmalı diferansiyel darbe-genişlik çiftleri (DPP) metodu (Thevenaz ve ark. 2008, Li ve ark. 2008, Foaleng ve ark. 2010, Galindez ve ark. 2011), karanlık darbeleri Brillouin saçılması metodu (DPBS-bu metotlarda cm veya mm seviyelerinde uzamsal çözünürlüklere

ulaşmaktadır) (Brown ve ark. 2005, Sperber ve ark. 2010, Dong ve ark. 2012) ve dinamik Brillouin grating (DBG) metodu olarak verilmektedir (Hotate 2000).

Horiguchi ve ark. (1989, 1989a) Brillouin saçılmasını esas alan dağınık algılayıcı sistemlere ilişkin ilk çalışmaları yapmışlardır. Aynı tarihte Nippon Telegraph ve Telephone (NTT) bu alanda gerçekleştirilmiş ilk patenti almıştır (Horiguchi ve ark. 1989b, US patent no: 4.997.227). Çalışmalarında Brillouin frekans kaymasının fibere uygulanan harici gerginlikle lineer olarak bağımlılığını göstermişlerdir. Horiguchi ve ark. (1989b) bu çalışmada Raman esaslı dağınık algılama yönteminden ve OTDR tekniğinden yararlanmış ve her iki tekniği zorlanmış Brillouin saçılmasına uygulamışlardır (Faries ve ark. 1984).

Yöntem Brillouin optik zaman domeni analizi olarak adlandırılmıştır. Algılama sistemi, 1319 nm dalga boyunda optik sinyal üreten iki adet Nd: YAG CW lazer kaynağından oluşmaktadır. Sistemde kullanılan Akusto-Optik Modülator (AOM) çıkışında kısa dalga boyunda pompa darbesi üretilerek algılayıcı fibere gönderilmektedir. Ölçüm esnasında pompa sinyali, algılayıcı fiberin bir ucuna gönderilirken CW (sürekli dalga) dalgası Şekil 2.8’de gösterildiği gibi fiberin diğer ucuna gönderilmektedir.



Şekil 2.8. Brillouin kazancı esaslı BOTDA konfigürasyonu

Pompa sinyali ile CW sinyali arasındaki frekans farkı birkaç GHz seviyesinde frekans aralığına akort edilmektedir. Sistemde fiber pozisyonunun bir fonksiyonu olarak kazanç, algılanan CW optik sinyaline bağlı olarak elde edilmektedir.

BOTDA yaklaşımıyla Kurashima ve ark. (1990b) NTT'nin BOTDA algılama sistemini kullanarak 1,2 km uzunluklu optik fiber üzerinde 100 m uzamsal çözünürlükte 3 °C sıcaklık çözünürlüklü olarak sıcaklık verilerini elde etmişlerdir.

Culverhouse ve ark. (1989), Fabry-Perot interferometresini (FPI) kullanarak tek modlu fiberlerde Brillouin frekans kaymasının ortamdaki sıcaklık değişimleri ile lineer olarak değişimini incelemiştir. Çalışmalarında fiber çekirdek kırılma indisleri farklı iki fiber için Brillouin frekans kayması sıcaklık katsayılarını 6,4 MHz/°C ve 2,67 MHz/°C olarak elde etmişlerdir (Culverhouse ve ark. 1989).

Bao ve ark. (1993a) 22 km uzunluğundaki algılayıcı fiber ile yapmış oldukları çalışmalarında algılayıcı performansını yükseltmeyi başarmışlar ve 10 m uzamsal çözünürlüklü ve 1 °C sıcaklık çözünürlüğü ile fiber boyunca sıcaklık profilini elde etmişlerdir (Bao ve ark. 1993a).

BOTDA analizinin gelişimindeki en önemli adım Brillouin esaslı optik fiberli dağınık algılamanın algılayıcı sistemlerde kullanılmaya başlanmasıdır (Bao ve ark. 1993b). Bao ve ark. (1993b) kayıp esaslı yaklaşımı kullanarak darbeli ışın demetini kuvvetlendirmek suretiyle CW sinyal gücünü azaltmayı başarmışlardır. Darbeli ışın demetinin kuvvetlendirilmesi, sinyal gürültü oranının (SNR) azalması ile daha uzun mesafelerde algılamaya imkân sağlamıştır (Bao ve ark. 1993b).

Brillouin kayıp tekniğini kullanmakarak Bao ve ark. (1994a) 32 km uzunluklu algılayıcı fiber ile 1 °C sıcaklık çözünürlüklü ve 5 m uzamsal çözünürlüklü olarak fiber uzunluğu boyunca sıcaklık profilini elde etmişlerdir. Kısa bir süre sonra da 5 m uzamsal çözünürlüklü ve 20 µε gerginlik çözünürlüklü olarak 22 km uzunluklu algılayıcı fiber boyunca sıcaklık ve gerginlik oluşumlarını gözlemiş ve ölçmüşlerdir (Bao ve ark. 1994a).

Bao ve ark. (1994a) bu çalışmalarında yan yana yerleştirilmiş iki algılayıcı fiber kullanarak ilk olarak Brillouin kayıp esaslı ve eş zamanlı sıcaklık ve gerginlik

oluşumlarının elde edildiği algılayıcı tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Algılayıcı tasarımında yer alan fiberlerden biri sadece ortamdaki sıcaklık oluşumlarına maruz kalırken diğer fiber hem sıcaklık hem de gerginlik oluşumuna maruz bırakılmıştır. Böylelikle eş zamanlı olarak 2 °C sıcaklık, 20 µε gerginlik ve 5 m uzamsal çözünürlüklü olarak algılayıcı fiber uzunluğu boyunca sıcaklık ve gerginlik profillerini elde etmişlerdir (Bao ve ark. 1994a).

Bao ve ark. (1995) daha sonraki çalışmalarında ise 51 km uzunluklu algılayıcı fiber boyunca 5 m uzamsal ve 1 °C sıcaklık çözünürlüklü olarak sıcaklık verilerine ulaşmışlardır (Bao ve ark. 1995).

2.8.2. Brillouin Optik Korelasyon Domeni Analizi (BOCDA)

BOCDA ölçüm tekniğini kullanan Brillouin esaslı algılama sistemleri, BOTDA tekniğini kullanan sistemlere benzer biçimde, zorlanmış Brillouin saçılmasını esas almaktadır. Dolayısıyla sıcaklık veya gerginlik algılama sürecinde algılayıcı fiberin her iki ucundan da optik sinyal girişi söz konusu olmaktadır. Bu tür algılama sistemleri hem Brillouin kazanç hem de Brillouin kayıp modunda çalışabilir. Kazanç modunda CW sinyali bir prop (Horiguchi ve ark. 1990) görevi görürken, Brillouin kayıp modunda ise CW sinyali pompa sinyali (Bao ve ark. 1993a) gibi yani CW lazeri pompa lazeri gibi çalışmaktadır. Brillouin kayıp modunda iken prop sinyali kuvvetlendirildiğinden algılama sistemi daha uzun fiber algılama mesafesine sahip olmaktadır (Alahbabi 2005).

BOTDA ve BOTDR tekniklerinde, darbe süresi genişliği 10 ns'den daha düşük olduğunda Brillouin kazanç spektrumu genişler ve Brillouin frekans kayması ölçümünün doğruluğu azalır (Fellay ve ark. 1997). Bu nedenle bu sorunun çözülmesi için BOCDA tekniği geliştirilmiştir. Prensip olarak BOCDA tekniği, algılayıcı fiber boyunca CW prop sinyali ve pompa sinyalinin etkileşmesini esas alan bir tekniktir. Bu etkileşim, CW lazeri ile pompa lazerinin ürettiği sinyallerin arasındaki frekans farkının uzamsal olarak kontrol edilmesi ilkesine dayanmaktadır (Alahbabi 2005).

Bu tekniği esas alan dağınık algılamada prop ve pompa sinyalleri aynı fazda olduğunda, Brillouin kazancı maksimum olmakta ve dağınık algılama, lazerin modülasyon frekansının değiştirilmesi ile sağlanmaktadır. Bu teknik sadece Brillouin frekans kaymasının onlarca metrelik kısa algılama mesafelerinde ölçülebilmesine olanak sağlar. Dolayısıyla uzun mesafeli algılamalarda, sıcaklık ve gerginlik oluşumlarının eş zamanlı algılandığı sistemlerde spontane Brillouin saçılmalı BOTDR tekniğini kullanan dağınık algılamalı sistemler çok daha uygundur (Alahbabi 2005).

BOTDA ve BOCDA teknikleri darbe kaynağı ile CW (sürekli dalga) kaynağı arasındaki etkileşimi kullanmaktadır. Optik sinyal gücü, bu iki dalga arasına transfer edilerek her iki kaynağın ürettiği sırasıyla pompa dalgası ve sürekli dalga arasındaki frekans farkının ($\Delta V = V - V_B$), yukarıda da anlatıldığı üzere Brillouin frekans kaymasına (~ 11 GHz) eşdeğer olması sağlanır. Bu iki lazer kaynak arasındaki frekans kayması ölçülerek, algılayıcı fiber boyunca ortaya çıkan sıcaklık ve gerginlik oluşumlarının bir fonksiyonu olarak Brillouin frekans kayması elde edilmektedir. Uzamsal çözünürlük bilgisi ise fibere pompalanan darbe sinyalinin CW lazerin gönderdiği optik sinyalle etkileşmesine kadar ki geçen zaman gecikmesinden hesaplanmaktadır (Alahbabi 2005).

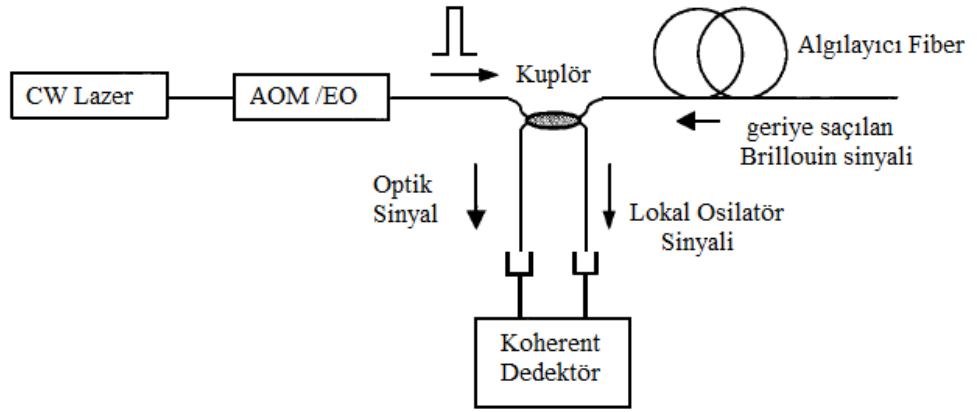
2.8.3. Brillouin Optik Zaman Domeni Reflektometresi (BOTDR)

Brillouin optik zaman domeni reflektometresi (BOTDR), prensip olarak OTDR ölçüm tekniği ile benzerlik göstermekle birlikte OTDR'dan farklı olarak Rayleigh saçılması yerine Brillouin saçılma mekanizmasını esas almaktadır. Bunun yanı sıra algılayıcı sistemde kullanımında algılayıcı fiberin sadece bir ucundan çalışılmaktadır diğer bir ifadeyle kaynaktan çıkan ışık fotonlarının fibere pompalandığı uç ile algılamanın yapıldığı uç aynı fiber ucudur (Alahbabi 2005).

BOTDR esaslı optik fiberli bir dağınık algılayıcı sistemde geriye saçılan optik sinyal, algılayıcı fiber içerisine pompalanan ışık gücü ile orantılıdır. Pompalanan optik sinyalin gücü, sinyalin darbe genişliğine ve tepe gücü değerine bağlı olarak değişim gösterir. BOTDR esaslı sistemlerde uzamsal çözünürlüğün arttırılması, darbe genişliğini

azaltacağından optik sinyalin gücünde azalmaya neden olabilir. Yüksek tepe gücüne sahip optik kaynaklar kullanılmasına rağmen maksimum tepe gücü, fiber içerisinde meydana gelen zorlanmış Raman saçılması (SRS), zorlanmış Brillouin saçılması (SBS), öz-faz modülasyonu (SPM), dört dalga karışımı (FWM) ve modülasyon kararsızlığı (MI) gibi lineer olmayan olayların varlığı ile sınırlanmaktadır (Alahbabi 2005).

Literatürde yer alan ve spontane Brillouin saçılmasının koherent tespiti yöntemini kullanan ve Brillouin optik zaman domeni reflektometresi (BOTDR) olarak bilinen ilk algılayıcı sistem konfigürasyonunu Kurashima ve ark. (1992) gerçekleştirmişlerdir. Bu konfigürasyon ile 3 °C sıcaklık ve 100 m uzamsal çözünürlükte sıcaklık verilerine ulaştıkları rapor edilmiştir (Kurashima ve ark. 1992, Horiguchi ve ark. 1992). Tasarladıkları algılayıcı sistem konfigürasyonunda, fibere pompalanan ışığın bir kısmı koherent yapılı dedektördeki bir lokal osilatör tarafından sağlanmaktadır. Burada geriye saçılan Brillouin sinyali lokal osilatör çıkışındaki optik sinyal ile çarpışmakta ve her iki sinyalin birleşmiş biçimi elektriksel bir spektrum analizör aracılığıyla gözlemlenmektedir. BOTDR konfigürasyonu Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.9. BOTDR koherent algılama sistemi

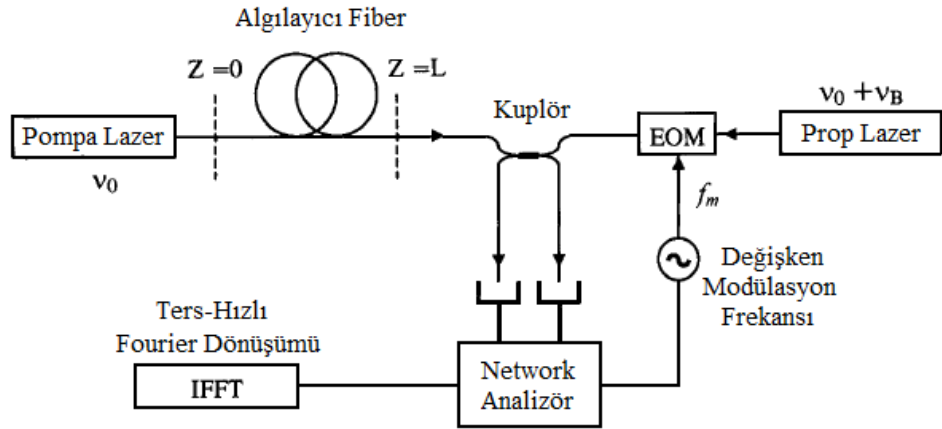
Bu sistemin en önemli avantajlarından biri, algılayıcı fiberin sadece bir ucundan girişin algılama için yeterli olmasıdır. Sistem açısından en önemli kısıt ise geriye saçılan Brillouin sinyalinin, BOTDA analizinde yararlanılan Brillouin sinyaline kıyasla daha zayıf bir sinyal olmasıdır.

Shimizu ve ark. (1993) BOTDA ve BOTDR'nın ilk konfigürasyonlarını, tasarıma bir frekans kaydırıcı ve ikinci bir akusto-optik modülatör ekleyerek modifiye etmişlerdir. Konfigürasyonda frekans kaydırıcı eleman kullanılarak, çalışılan frekans değeri Brillouin frekansına kaydırılmış ve böylelikle BOTDR sisteminde daha düşük band genişliğine sahip dedektör kullanımına olanak sağlanmıştır (Shimizu ark. 1993).

NTT tarafından önerilen BOTDR esaslı algılama sistemi ise AQ8602 Optik fiber gerginlik-kayıp analizörü olarak ticarileştirilmiştir (Horiguchi 1989b). Bu sistem, 40 μ e gerginlik ve 1 m uzamsal çözünürlüğe sahip bir sistemdir.

2.8.4. Brillouin Optik Frekans Domeni Analizi (BOFDA)

Şekil 2.10'da, Brillouin optik frekans domeni analizini (BOFDA) esas alan optik fiberli dağınık algılamalı sistem konfigürasyonu verilmektedir (Garus ve ark. 1997). BOFDA analizi, algılayıcı fiber boyunca geriye saçılan sinyalin Stokes bileşenlerinin ve pompa sinyalinin genliği ile ilişkili olarak kompleks yapıda temel band transfer fonksiyonunun ölçülmesini esas almaktadır.



Şekil 2.10. BOFDA algılamalı bir sistem konfigürasyonu

Şekilde verilen sistem konfigürasyonunda, prop lazerin çıkış sinyalini f_m değişken modülasyon frekansı ile modüle etmek için bir elektro-optik modülatör (EOM) kullanılmıştır. Çıkış sinyalleri sistemde yer alan bir network analizörünü beslemektedir.

Böylelikle algılayıcı fibere ait temel band transfer fonksiyonunun elde edilmesi sağlanmıştır. Analizörün çıkışı sayısal bir sinyal olduğundan sayısallaştırılmış çıkış sinyali, bir sinyal işlemci ile sürülerek sinyalin ters hızlı Fourier dönüşümü (IFFT) alınmıştır. Bu BOFDA sistemi kullanılarak 1 km uzunluklu algılayıcı fiber için sırasıyla 3 m uzamsal, 1,5 °C sıcaklık ve 40 µe gerginlik çözünürlüğü rapor edilmiştir (Garus ve ark. 1997).

BOFDA tekniğini kullanan bir sistem, algılama mesafesi ve uzamsal çözünürlük açısından değerlendirildiğinde BOTDA tekniğini kullanan bir sistem ile benzerlik göstermektedir. Ancak sistemin toplam algılama süresi esas alındığında, BOFDA sisteminin gürültü seviyesinin BOTDA sistemi gürültü seviyesinden daha düşük olduğu görülmektedir. BOFDA sisteminin veya bu tekniği kullanan algılama sistemlerinin en önemli dezavantajı, uzun algılama sürelerinin olması ve algılama süresi boyunca algılanan sıcaklık ve gerginlik parametrelerinin her ikisinin de sabit olma zorunluluğudur ki sıcaklık ve gerginlik gibi fiziksel oluşumların uygulama çalışmalarında bu parametrelerin sabit olmalarının sağlanması genellikle mümkün olamamaktadır (Yu 2006).

2.8.5. Spontane Brillouin Esaslı Dağınık Algılamalı Sistemler

Kee ve ark. (2000b) 1500 nm dalga boyunda kısa darbe süresine sahip bir lazer kaynak kullanarak 35 cm uzamsal çözünürlüklü ve 4,3 °C sıcaklık çözünürlüklü olarak 1 km uzunluğunda bir algılayıcı fiber hattı için sıcaklık verilerine ulaşmışlardır. Bu çalışmalarında spontane Brillouin saçılmasını ve Landau-Placzek oranının sıcaklık bağımlılığından yararlanmışlardır (Kee ve ark. 2000b).

Maughan ve ark. (2001a) ise 27 km uzunluğunda algılayıcı fiberin entegre edildiği ve geriye saçılan spontane Brillouin gücün mikrodalga heterodin tespitini esas alan optik fiberli bir dağınık algılama sistemini kullanmışlardır. Çalışmalarında 27 km uzunluklu algılayıcı fiber boyunca 20 m uzamsal çözünürlükte 3,4 °C sıcaklık çözünürlüğünde sıcaklık verilerini elde etmişlerdir (Maughan ve ark. 2001a).

Bunun yanı sıra karanlık darbe Brillouin saçılmasını esas alan dağınık algılama tekniğini kullanarak çalışma yapan Brown ve ark. (2005), tasarladıkları algılama sisteminde iki adet CW lazer kaynak kullanmışlardır. Tasarımlarında kullandıkları CW lazerlerden birisi kısa süreli kapalı tutulmuş ve bu esnada prop sinyali üretilerek geriye saçılan Brillouin sinyalinin Stokes bileşeni kısa süreli durdurulmuştur. Bu durum karanlık darbe (DP) olarak adlandırılmaktadır.

Brown ve ark. (2005) bu çalışmalarında, 0,5 ns darbe süresi için 6 μ e gerginlik çözünürlüğü ve 100 m uzamsal çözünürlükte veriler elde ettiklerini raporlamışlardır (Brown ve ark. 2005). Bu yaklaşımdaki en önemli kısıt, yüksek çıkış gücüne sahip CW lazerlerin varlığının uzun mesafeli fiber kullanımında zorlanmış Brillouin saçılmasına neden olmasıdır. Birkaç yüz metre uzunluklu algılayıcı fiberlerin entegre edildiği dağınık algılamalı sistemler için, 80 mW çıkış gücüne sahip CW lazer kullanımı Brillouin eşik gücün aşılmasına dolayısıyla SBS oluşumuna neden olduğu rapor edilmiştir (Yu 2006).

2.8.6. Eşzamanlı Sıcaklık ve Gerginlik Algılama Tekniği

Brillouin frekans kaymasının hem sıcaklık hem de gerginlik duyarlılığının bulunması ve her iki parametrenin eş zamanlı olarak frekans kayması üzerinde etkin olması nedeniyle, ölçümü yapılmış Brillouin frekans kaymasının hangi parametreden kaynaklandığını kestirmek mümkün değildir. Bu problemin çözümüne ilişkin yapılan ilk çalışmalarda algılama sistemine, ortamdaki gerginlik oluşumlarından etkilenmeyen ve gerginlik algılayıcı fibere yakın pozisyonda ikinci bir algılayıcı fiber yerleştirilmesi önerilmiştir (Bao ve ark. 1994b).

Bu fiber ile ortamdaki sıcaklık oluşumlarını algılamak ve görüntülemek için kullanılmaktadır. Böylelikle sıcaklık efektlerinin neden olduğu Brillouin frekans kayması belirlenmekte ve toplam Brillouin frekans kayması miktarından sıcaklık kaynaklı Brillouin frekans kayması çıkartılarak, sistemdeki algılayıcı fiber üzerinde etken olan toplam gerginlik oluşumları tespit edilebilmektedir (Bao ve ark. 1994b).

Tek bir optik fiber kullanarak eşzamanlı sıcaklık ve gerginlik ölçümleri 1997'den beri aktif araştırma konularının odak noktası haline gelmiştir. Bu tarihlerde Parker ve ark. (1997) yaptıkları çalışmalarda, optik fiberde geriye saçılan optik sinyalin Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kayması verilerinden yararlanarak sıcaklık ve gerginlikleri eş zamanlı olarak ölçmeyi başarmışlardır (Parker ve ark. 1997a, Parker ve ark. 1997b, Parker ve ark. 1998).

Brillouin sinyalini normalize etmek için, matematiksel bir teknik önermişlerdir. Bu teknik, lineer etkin bir Brillouin gücü elde etmek için Brillouin Stokes ve Brillouin anti-Stokes bileşenlerini matematiksel olarak kombine etmeyi esas almaktadır. Diğer bir ifadeyle, sıcaklık ve gerginlik oluşumlarını ölçmek için her iki bileşenin kombine etkisinden yararlanılarak Brillouin gücü daha etkin hale getirilmiştir. Parker ve ark. (1998) çalışmalarında 1,2 km uzunluklu algılayıcı fiber boyunca 4 °C sıcaklık, 100 µε gerginlik ve 40 m uzamsal çözünürlükte eş zamanlı olarak sıcaklık ve gerginlik verilerine ulaştıklarını rapor etmişlerdir (Parker ve ark. 1998).

Smith (1999), Smith ve ark. (1999a) yaptıkları çalışmalarında, zorlanmış Brillouin saçılma mekanizmasını esas alan dağınık algılamalı sistem ile 50 m uzunluklu algılayıcı PM (polarization maintaining-kutuplanma sürdürme) fiberi ile 178 µε gerginlik, 3,9 °C sıcaklık ve 3,5 m uzamsal çözünürlüklü olarak eş zamanlı sıcaklık ve gerginlik profillerini elde etmişlerdir (Smith 1999, Smith ve ark. 1999a).

Optoelektronik Araştırma Merkezi (ORC) tarafından gerçekleştirilmiş olan bir çalışmada ise 15 km'lik algılayıcı fiber boyunca 290 µε gerginlik, 4 °C sıcaklık ve 10 m uzamsal çözünürlükte eş zamanlı sıcaklık ve gerginlik profilleri elde edilmiştir. Bu çalışmada Kee ve ark. (2000a), Landau - Placzek oranını esas alan dağınık algılama yönteminden yararlanmışlardır. Çalışmalarında Brillouin güç değişimi ve frekans kaymasını ölçmek için Mach-Zehnder interferometresini kullanmışlardır (Kee ve ark. 2000a).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Giriş

Genel olarak malzemeler içyapıları esas alındığında amorf ve kristal yapıları olmak üzere iki farklı türde değerlendirilmektedir. Her iki tür malzemenin şekil değiştirme süreçleri birbirinden oldukça farklıdır. Polimer ve seramik türevi malzemelerin bir kısmı ile metallerin çoğunluğu kristal yapıya iken diğer malzemeler amorf özellik göstermektedir (Onaran 2009). Algılama ve haberleşmede kullanılan silika yapıya optik fiber ise çekirdek yapısı itibarıyla seramikler sınıfına girdiğinden kısmen kristal yapıdadır.

Herhangi bir malzemeye veya cisme dışarıdan harici bir kuvvet uygulandığında malzemeyi oluşturan atomlar arasındaki bağlar, uygulanan kuvvete karşı bir direnç gösterir. Bu durumda dış etkilerle atomlar arası uzaklık değişir. Düşük gerilmeler altında malzemeler elastik özellik gösterdiğinden ve normal şartlarda malzemenin elastik şekil değiştirmesi kütle içerisinde homojen olarak dağıldığından, cisim üzerine etkiyen kuvvetin kalkmasıyla atomlar ilk konumlarına dönerek şekil değiştirme kaybolur (Onaran 2009).

Malzeme veya cisim üzerindeki gerilme veya gerginlik oluşumları belirli bir sınırı aşacak olursa bir kısım atom kalıcı olarak yer değiştireceğinden cisme etkiyen kuvvet kalksa da ilk konumlarına dönmeleri mümkün olmaz. Amorf yapıya malzeme veya cisimlerde de şekil değiştirme, kristal yapıya malzemelerde olduğu gibi malzemenin atomik yapısına büyük ölçüde bağlı bir süreçtir (Onaran 2009).

3.2. Silika Optik Fiberde Young Modülü ve Shear Modülü

Bir cisim çekme gerilmelerine maruz kaldığında, malzeme yapısı itibarıyla atomlar arası uzaklıklar gerilmeler doğrultusunda artarken, enine doğrultuda bağ kuvvetleri etkisi ile atomlar arası mesafede azalmalar olur. Meydana gelen bu değişimlere, atomlar arasındaki bağ kuvvetleri karşı koyarak cisimdeki elastik şekil değiştirme davranışlarını

belirler. Cismin şekil değiştirme ölçütünün ya da elastik şekil değiştirme direncinin bir karşılığı olan bu özellik Young (elastisite) modülü olarak değerlendirilmektedir. Başka bir deyişle Young modülü, cisim üzerinde bir noktada oluşan gerilmelerin o noktadaki gerginliklere oranı olup eşitlik (3.1)'de olduğu gibi verilmektedir (Onaran 2009).

$$E = \frac{\text{Gerilme}}{\text{Gerginlik}} = \frac{F/A}{\Delta L/L} = \frac{\sigma_g}{\epsilon} \quad (3.1)$$

Eşitlikte; F cisme uygulanan kuvvete, A kuvvetin etkidiği yüzeye, ΔL kuvvete bağlı olarak cisimdeki uzama miktarına, L ise kuvvet öncesi cismin ilk boyuna karşılık gelmektedir.

Genellikle bütün cisimler veya malzemeler buldukları ortam gereği ortamda meydana gelen sıcaklık değişimlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkan ısı gerilmelere maruz kalırlar. Diğer bir ifadeyle genleşmesi kısıtlanmış bir malzemede sıcaklık değişimi malzeme üzerinde ısı gerilmeler meydana getirir. Bu gerilmeler ısı genleşme katsayısı α ile orantılı olarak değişim gösterdiğinden sıcaklıkta meydana gelen dT değerli bir değişime karşılık, l uzunluğundaki silindirik bir cismin boyunda dl kadarlık bir artış olur. Silindirik cismin l uzunluğu için dl değişim miktarı $dl = \alpha \cdot l \cdot dT$ bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

Ortamdaki ısı değişimlere bağlı olarak bir cismin boyunda meydana gelen birim uzama ya da şekil değiştirme, elastik sınırlar içerisinde gerilmelerle doğru orantılı olarak değişim göstermektedir. Cisim üzerinde sıcaklık kaynaklı olarak ortaya çıkan ısı gerilmeler eşitlik (3.2)'de ifade edildiği gibi verilmektedir (Onaran 2009).

$$\sigma_g = E \cdot \epsilon = E \cdot \alpha \cdot dT \quad (3.2)$$

Eşitlikte; E malzemenin Young modülüne, σ_g cisimde meydana gelen ısı veya uzunlamasına gerilime, ϵ ise cisimde oluşan ısı gerginliğe ya da birim uzama miktarına karşılık gelmektedir. Young modülünün birimi GPa veya N/m²'dir.

Shear veya kayma modülü cisim üzerinde herhangi bir noktada meydana gelen kayma gerilmesinin o noktadaki kayma gerginliğine (kayma şekil değiştirmesi) oranı olarak ifade edilmektedir. Shear modülü, eşitlik (3.3) ile verilmekte olup birimi GPa'dır (Onaran 2009).

$$G = \frac{F/A}{\Delta x/L} = \frac{\tau}{\gamma} \quad (3.3)$$

Eşitlikte; G Shear modülünü, Δx enlemesine yer değiştirme miktarını veya kayma miktarını, τ kayma gerilmesini ve γ ise kayma şekil değiştirmesini ifade etmektedir.

Herhangi bir cisimde Shear modülünün oluşabilmesi için, cismin kristal yapısı boyunca kayma doğrultusunda meydana gelen kayma gerilmesinin, kayma sisteminin kayma direncine eşit bir değere sahip olması gereklidir. Dolayısıyla bir cisimde kayma olayının gerçekleşebilmesi için cismin kristal yapısında yer alan atomlar arasındaki bağ kuvvetlerinin aşılması gerekmektedir (Onaran 2009).

Moleküler düzeyde farklı hızlarda soğuma karakteristiğine sahip malzemeler, ortamdaki sıcaklık değişimlerine bağlı olarak ısıl gerilmelere maruz kalırlar. Yüksek sıcaklığa sahip bir malzeme hızla soğutulduğunda yüzeyi hemen soğuyup sertleşirken, malzemenin iç kısmı yumuşak ve sıcak kalmaktadır. Buna karşılık, malzemenin içi zamanla soğuyup büzülerek daha sert olan dış kısmın engellemesine rağmen dış katmanı gerer. Böylelikle, malzemenin dış yüzeyinde basınç gerilmeleri oluşurken iç kısmında aynı oranda çekme gerilmeleri oluşmaktadır (Onaran 2009).

Brillouin esaslı optik fiberli dağınık algılamalı sistemlerin yüksek gerilim kablolarındaki uygulamalarında XLPE yalıtkanlı alüminyum ve bakır iletkenli YG kabloları ile havai hat yüksek gerilim kablolarında kablo rejimde iken iletkenin akan akım, kablo iletkeninde ve kablonun diğer katmanlarında yüksek sıcaklık oluşumlarına neden olmaktadır. Sıcaklık oluşumlarının bir sonucu olarak ise kablo içerisinde içsel veya sıcaklık kaynaklı ısıl gerginlik oluşumları meydana gelmektedir (Lu 2011, Gunday ve ark. 2013).

Kabloda ortaya çıkan bu ısıl oluşumlar zamanla kablo yalıtkanının yaşlanmasına ve dolayısıyla kablonun çalışma süresinin kısalmasına neden olabilmektedir. Bu duruma kablonun yüksek maliyeti de eklendiğinde, iletken ve yalıtkanında meydana gelen ısıl efektlerin hızlı ve doğru bir biçimde tespit edilmesi veya ölçülmesi çok daha önemli hale gelmektedir (Gunday ve ark. 2013).

Yüksek gerilim kablolarında iletken malzemeleri ile kablonun alt katman (ekran telleri, iç ve dış yarıiletken tabakalar, PE-polietilen dış kılıf ve metal zırh) malzemelerinin ortamdaki ısıl etkilere bağlı olarak farklı hızlarda genleşme ve büzülme özellikleri göstermesi, yalıtkan üzerinde boşluklu yapıların vuku bulmasına neden olabilmektedir. Meydana gelen bu istenmeyen oluşumlar, dielektrik alan etkisi oluşturarak yalıtkan üzerinde kısmi boşalmalar meydana getirmektedir. Kabloda oluşan bu durum iletkenin akım taşıma kapasitesini yani ampasitesini büyük ölçüde sınırlandırmaktadır (Heinhold 1990). Bu yüzden söz konusu sınırlamalar kablonun iletken ve yalıtkanında ortaya çıkan sıcaklık ve ısıl gerginlik oluşumlarının kritik seviyeye ulaşılmadan önce tespit edilmesini gerektirmektedir.

Silika yapılı bir malzemenin Young ve Shear modülü ortamdaki ısıl değişimlere yani sıcaklık ve ısıl gerginlik oluşumlarına bağımlılık göstermektedir (De Souza 1999, Gunday ve ark. 2014). Bu nedenle optik fiberli dağıtık algılamalı sistemlerde algılayıcı fiberin Young ve Shear modüllerinden yararlanılarak ortamın ısıl davranışı hakkında bilgi edinmek mümkün olabilmektedir. Böylelikle sıcaklık ve ısıl gerginlik oluşumları üzerinden hem algılayıcı fiberin entegre edildiği kablo sisteminin operasyon süresi tayin edilebilmekte hem de kabloyu oluşturan malzemelerin ısıl karakteristikleri hakkında doğru bilgilere ulaşılabilmektedir.

3.3. Young Modülünün Isıl Bağımlılıkları

Bansal ve Doremus (1986) yapmış oldukları çalışmada, silika malzemesinin Young Modülü, Poisson oranı ve kırılma indis parametrelerinin ortamdaki sıcaklıkla lineer olarak değiştiğini göstermişlerdir. Çalışmalarında ortam sıcaklığı, 200 °K - 1000 °K aralığında değişim göstermektedir.

Bu bağlamda silika için Young modülü, Poisson oranı ve kırılma indisi (3.4) eşitliklerinde verildiği gibi ortamın sıcaklığı ile lineer olarak değişmektedir (De Souza 1999).

$$E_{(T)} = 69,68 + 1,126 \times 10^{-2}T \quad [\text{GPa}] \quad (3.4.a)$$

$$\sigma_{(T)} = 0,157 + 2,887 \times 10^{-5}T \quad (3.4.b)$$

$$n_{(T)} = 1,4389 + 1 \times 10^{-5}T \quad (3.4.c)$$

Eşitliklerde; T °K cinsinden ortam sıcaklığına karşılık gelmektedir. E GPa cinsinden silika Young modülüne, σ Poisson oranına ve n ise fiberin çekirdek kırılma indisine karşılık gelmektedir.

Optik fiberli dağıtık algılamalı sistemlerde algılayıcı olarak kullanılan optik fiberin çekirdeği silika yapılı olması nedeniyle, fiber çekirdeğine ait Young modülü, Poisson oranı ve kırılma indis parametrelerinin ortam sıcaklığına bağımlılıkları (3.4) eşitliklerinde verildiği gibi ifade edilebilmektedir (De Souza 1999).

Young modülünün sıcaklık duyarlılığı (3.4.a) eşitliği kullanılarak (3.5.a)'de verildiği gibi yazılabilir. Gerekli düzenlemeler yapıldığında duyarlılık (3.5.b)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\frac{1}{E_{(T)}} \frac{\partial E_{(T)}}{\partial T} = \frac{1,126 \times 10^{-2}}{69,68 + 1,126 \times 10^{-2}T} \quad (3.5.a)$$

$$\frac{1}{E_{(T)}} \frac{\partial E_{(T)}}{\partial T} = \frac{1}{6188,28 + T} \quad (3.5.b)$$

Eşitlik (3.5.b)'den açık bir biçimde görüldüğü gibi, Young modülünün sıcaklık duyarlılığı sıcaklıktaki artış ile azalmaktadır. Eşitlikten 293 °K ortam sıcaklığı için silika fiber Young modülünün sıcaklık duyarlılığı $\% 15,429 \times 10^{-3}$ olarak elde edilmektedir.

Silika yapılu bir malzemenin Young modülü ortamdaki gerginlik oluşumlarına lineer olarak bağımlıdır. Young modülü, gerginlik oluşumlarının fonksiyonu olarak eşitlik (3.6)'da verildiği gibi ifade edilmektedir (De Souza 1999).

$$E_{\epsilon} = E_0(1 + 5,75 \epsilon) \quad (3.6)$$

Eşitlik (3.6)'da $E_0 = 72,97918$ GPa olup sıfır gerginlik ve 293 °K sıcaklık altındaki Young modülü değerine, ϵ ise ortamdaki gerginlik oluşumlarına karşılık gelmektedir (De Souza 1999).

Young modülünün gerginlik duyarlılığı eşitlik (3.7.b)'deki gibi elde edilmektedir. Gerginlik oluşumunun algılayıcı fiber üzerinde en yüksek değerine ulaştığı noktada, modülün gerginlik duyarlılığının minimum değerini aldığı görülmektedir.

$$\frac{1}{E_{(\epsilon)}} \frac{\partial E_{(\epsilon)}}{\partial \epsilon} = \frac{5,75 \times E_0}{E_0(1+5,75\epsilon)} \quad (3.7.a)$$

$$\frac{1}{E_{(\epsilon)}} \frac{\partial E_{(\epsilon)}}{\partial \epsilon} = \frac{1}{0,174 + \epsilon} \quad (3.7.b)$$

Eşitlikler (3.4.a) ve (3.6) kullanılarak sıcaklığın $T > 293$ °K değeri için algılayıcı fiberin Young modülü değişimi (3.8) eşitliğinde verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$\Delta E_{(T)} = E_{(T)} - E_0 = 1,126 \times 10^{-2} \times T(z) - 3,3 \text{ GPa} \quad (3.8)$$

Eşitlikte; $T(z)$ optik fiberli dağınık algılamalı sistemlerde algılayıcı olarak kullanılan optik fiber boyunca elde edilen sıcaklık oluşumuna karşılık gelmektedir. Algılayıcı fiberde meydana gelen bu sıcaklık oluşumları fiberin çekirdeğinde içsel olarak sıcaklık kaynaklı gerginliklerin oluşmasına neden olmaktadır (Gunday ve ark. 2013).

Algılayıcı fiberin entegre edildiği yüksek gerilim kablosu rejimdeyken Young modülünün E_0 değeri (sıfır gerginlik ve 293 °K altında) referans alınarak, iletken

etrafında meydana gelen sıcaklık kaynaklı ısıl gerginlik oluşumları, (3.6) ve (3.8) eşitlikleri kullanılarak elde edilebilir.

Eşitlik (3.8), eşitlik (3.6)'da yazılarak algılayıcı fiberde oluşan içsel veya sıcaklık kaynaklı (ısıl) gerginlik oluşumları, eşitlik (3.9)'da verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\epsilon = \frac{E(T) - E_0}{E_0 \times 5,75} = \frac{1,126 \times 10^{-2} \times T(z) - 3,3}{419,635} \times 10^6 \mu\epsilon \quad (3.9.a)$$

$$\epsilon = 26,83 T - 7864 \quad (3.9.b)$$

Eşitliklerde; T °K cinsinden sıcaklığa, ϵ ise $\mu\epsilon$ cinsinden ısıl gerginliğe karşılık gelmektedir. Eşitlik (3.9.b)'de ifade edildiği gibi algılayıcı fiber kablo uzunluğu boyunca meydana gelen gerginlik oluşumları, sıcaklık oluşumlarına lineer olarak bağımlılık göstermektedir.

3.4. Shear Modülü ve Poisson Oranı'nın Isıl Bağımlılıkları

Bir malzemenin Shear modülü malzemenin sertliğinin ve esnemezliğinin ölçütü olarak değerlendirilmektedir. Modül değeri büyük malzemeler yapı itibariyle kırılğan malzemelerdir. Bazı malzemelerin 293 °K sıcaklığındaki tipik malzeme özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir (Heinhold 1990, Onaran 2009, Lu 2011, Wang 2012).

Çizelge 3.1. Bazı malzemelerin 293 °K sıcaklığındaki tipik malzeme özellikleri

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)	Kayma Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Isıl Genleşme Katsayısı (°K) ⁻¹	Elektriksel İletkenlik (Ωm) ⁻¹
Silika Fiber	72,98	32,10	0,165	$5,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-18}$
Cam	70	29,43	0,220	$9,0 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-12}$
XLPE Yalıtkan	0,50	0,18	0,370	150×10^{-6}	$1,0 \times 10^{-15}$
Bakır	115	42,5	0,350	$16,2 \times 10^{-6}$	$5,85 \times 10^7$
Alüminyum	70	26	0,340	$23,8 \times 10^{-6}$	$2,95 \times 10^7$

Shear modülü algılayıcı fiber boyunca meydana gelen gerginlik oluşumlarına bağlı olarak eşitlik (3.10)'da verildiği gibi formüle edilmektedir. Burada $G_0 = 32,1$ GPa olup modülün referans değerine karşılık gelmektedir (De Souza 1999).

$$G_{(\epsilon)} = G_0(1 + 3,06 \epsilon) \quad (3.10)$$

Shear modülünün gerginlik duyarlılığı veya diğer bir deyişle gerginlikle yüzdesel değişimi eşitlik (3.11)'de ifade edilmiştir.

$$\frac{1}{G_{(\epsilon)}} \frac{dG_{(\epsilon)}}{d\epsilon} = \frac{1}{0,327 + \epsilon} \quad (3.11)$$

Eşitlikten de açık bir biçimde görüldüğü gibi Shear modülünün gerginlik duyarlılığı veya yüzdesel değişimi, kablo boyunca gerginlik artışı ile lineer olarak azalma eğilimi göstermektedir.

Eşitlik (3.9) ve (3.10) kullanılarak Shear modülü ifadesi düzenlendiğinde modül, ortam sıcaklığına bağlı olarak eşitlik (3.12)'de verildiği gibi yazılabilmektedir.

$$G_{(T)} = 31,328 + 2,636 \times 10^{-3}T \quad [\text{GPa}] \quad (3.12)$$

Eşitlikten modülün sıcaklık duyarlılığı veya sıcaklıkla yüzdesel değişimi (3.13) eşitliğinde verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{1}{G_{(T)}} \frac{dG_{(T)}}{dT} = \frac{1}{11884,67 + T} \quad (3.13)$$

293 °K sıcaklık değeri için Shear modülünün sıcaklık duyarlılığı, $\% 8,212 \times 10^{-3}$ olarak hesaplanmaktadır. Eşitlikten açık bir şekilde görüldüğü gibi sıcaklık duyarlılığı, sıcaklık artışına bağlı olarak lineer bir biçimde azalma eğilimindedir.

Elastik malzemeler için küçük gerilmelerin neden olduğu yanal şekil değiştirmeler (ϵ_y), aksenal yönde meydana gelen şekil değiştirmelerle (ϵ_x) orantılıdır. Bu orantı katsayısı Poisson oranı olarak ifade edilmektedir (Onaran 2009). Poisson oranı malzeme karakteristiğini belirlemek amacıyla kullanılan önemli bir parametredir.

Poisson oranı σ , eşitlik (3.14) ile verilmektedir (Onaran 2009).

$$\sigma = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} \quad (3.14)$$

Poisson oranı, pozitif değerde bir malzeme sabitidir. Çekme halinde $\epsilon_x > 0$ ve $\epsilon_y < 0$ olduğundan (3.14) eşitliğine göre Poisson oranı $\sigma > 0$ olarak elde edilmektedir.

Bir malzemenin Young modülü ve Shear modülünden yararlanarak her iki parametrenin fonksiyonu olarak Poisson oranı (3.15) eşitliğinde verildiği gibi ifade edilmektedir (De Souza 1999, Wang 2012).

$$\sigma = \frac{E}{2G} - 1 \quad (3.15)$$

(3.6) ve (3.10) eşitlikleri kullanılıp gerekli düzenlemeler yapıldığında Poisson oranı σ , (3.16.b)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\sigma = \frac{0,1368 + 3,4764 \times \epsilon}{1 + 3,06\epsilon} \quad (3.16.a)$$

$$\sigma = 0,1368 + 3,058 \times \epsilon \quad (3.16.b)$$

(3.16.b) ifadesinden açık bir biçimde görüldüğü gibi ve Young ve Shear modüllerine benzer biçimde Poisson oranı σ , sıcaklık kaynaklı gerginlik oluşumları ile lineer olarak değişim göstermektedir.

Sıfır gerginlik ve 293 °K ortam sıcaklığı referans alınıp (3.4.a) ve (3.6) eşitliklerinden (De Souza 1999) yararlanılarak algılayıcı fiber uzunluğu boyunca ısıl gerginlik oluşumları, sıcaklığın fonksiyonu olarak (3.17)'de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$\epsilon_{(T_K)} = \frac{1,126 \times 10^{-2} T_K - 3,3}{419,64} \times 10^6 = 26,83 T_K - 7864 \quad (3.17)$$

Eşitlikte; T_K °K cinsinden sıcaklığa $\epsilon_{(T_K)}$ ise algılayıcı fiber boyunca $\mu\epsilon$ cinsinden ısıl gerginlik oluşumlarına karşılık gelmektedir.

3.5. Brillouin Güç Değişimi ve Young Modülünün Birleşik Etkisini Esas Alan Optik Fiberli Dağınık Algılama

Bu tez çalışmasında ortamdaki ısıl etkilerin bir sonucu olarak algılayıcı fiber boyunca meydana gelen sıcaklık ve sıcaklık kaynaklı ısıl gerginlik oluşumlarının eş zamanlı olarak algılandığı yeni bir dağınık algılama yöntemi önerilmiştir. Yöntem, Brillouin güç değişimi ve Young modülünün birleşik etkisini esas alan bir yöntem olup BOTDR ölçüm tekniğini kullanmaktadır. Diğer yöntemlerden farklı olarak bu yöntemde, Brillouin güç değişimlerinin sıcaklık ve ısıl gerginlik bağımlılığı bilgilerinin yanı sıra silika optik fiberin Young modülü ve Shear modülü gibi malzeme karakteristiklerinden yararlanılarak ortamın ısıl davranışı hakkında bilgilere ulaşılmaktadır. Ortamdaki ısıl değişimler algılayıcı fiberin Young ve Shear modülleri üzerinde etkin olduklarından her iki parametredeki değişimler, ortamda meydana gelen sıcaklık ve ısıl gerginlik oluşumlarının fonksiyonu olarak algılayıcı fiber boyunca elde edilmektedir. Yönteme göre algılayıcı fiber boyunca sıcaklık verileri, sıcaklık bağımlılığı nedeniyle öncelikle geriye saçılan optik sinyalin Brillouin güç değişiminden elde edilmekte ardından sıcaklık verileri kullanılıp Young ve/veya Shear modülüyle de sıcaklık kaynaklı ısıl gerginler elde edilmektedir.

Bu yöntemin literatürdeki benzer yöntemlere kıyasla en önemli avantajı kilometrelerle ifade edilen uzun mesafeli algılama sistemlerinde 1 m uzamsal çözünürlükte 1 °C'nin

altında sıcaklık çözünürlüklerinde ve 50 $\mu\epsilon$ seviyelerinin altında ısı gerginlik çözünürlüklerinde sıcaklık ve ısı gerginlik verilerinin elde edilebilir olmasıdır.

Dağınık algılamalı bir sistemde algılayıcı fiber üzerine etkiyen harici bir kuvvet yok ise geriye saçılan optik sinyalin Brillouin gücündeki değişimin kaynağı ortamdaki sıcaklık ve sıcaklık kaynaklı ısı gerginlik oluşumlarıdır (Günday ve ark. 2007, Lu 2011). Ancak sıcaklık oluşumlarının kaynağı, algılama sisteminin entegre edildiği yapıya bağlı olarak değişim gösterebilir. Yüksek gerilim kablolarında kablo iletkenlerinden akan akım ve iletkenin operasyon süresi, havai hatlarda ve OPGW kablolarında solar radyasyon, yıldırım düşmesine bağlı olarak ortaya çıkan yüksek deşarj akımları, kısa devre kaynaklı ani akım artışları ve rüzgâr hızı ve yönü gibi fenomenler sıcaklık oluşumlarına neden olabilmektedir.

Brillouin sinyalinin gücü $P_B(z)$, algılayıcı fiber boyunca mesafenin fonksiyonu olarak eşitlik (3.18)'de verildiği gibi yazılmaktadır (Alahbabi 2005).

$$P_B(z) = 0,5P_0\tau\gamma_B S v_g e^{(-2\gamma_R z)} \quad (3.18)$$

Burada; P_0 lazerin pompaladığı sinyalin maksimum gücünü, τ sinyalin darbe süresini, γ_B Brillouin saçılma katsayısını, S yakalama katsayısını, v_g fiberde ilerleyen ışığın grup hızını, z kablo uzunluğunu ve γ_R ise Rayleigh saçılma katsayısını ifade etmektedir.

Brillouin gücü ifadesindeki Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayıları sırasıyla (3.19.a) ve (3.19.b) ile verilmektedir (Bansal 1986, De Souza 1999, Lancry ve ark. 2012).

$$\gamma_R = \frac{8\pi^3 n^8 p^2 k T_f [\beta_T - (\rho v_a^2)^{-1}]}{3\lambda_0^4} \quad (3.19.a)$$

$$\gamma_B = \frac{8\pi^3 n^8 p^2 k T (\rho v_a^2)^{-1}}{3\lambda_0^4} \quad (3.19.b)$$

Eşitliklerde; n fiberin çekirdek kırılma indisine, p Pockel katsayısına ($\sim 0,286$), k Boltzman sabitine ($k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$), T $^\circ\text{K}$ cinsinden fiberin sıcaklığına, T_f $^\circ\text{K}$

cinsinden fiberin fiktif sıcaklığına ($T_f = 1950 \text{ }^\circ\text{K}$), β_T fiktif sıcaklıkta silika fiberin izotermal sıkıştırılabilirlik katsayısına ($\beta_T = 7 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{N}^{-1}$), ρ silika fiberin yoğunluğuna ($\rho = 2330 \text{ kg/m}^3$), v_a akustik dalga hızına ve λ_0 fiber içerisinde pompalanan ışığın dalga boyuna ($\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$) karşılık gelmektedir (De Souza 1999).

(3.19) eşitliklerinden görüldüğü üzere Rayleigh saçılma katsayısının ortam sıcaklığına direkt bir bağımlılığı bulunmamasına karşılık Brillouin saçılma katsayısı, ortam sıcaklığına doğrudan bağımlıdır. Rayleigh saçılma katsayısı saçılmanın meydana geldiği ortamın elastik özelliklerindeki değişimle ilgili olan fiktif sıcaklığa bağlı olduğundan katsayının ortam sıcaklığına bağımlılığı bu parametre üzerinden olmaktadır (De Souza 1999).

Algılayıcı fiber boyunca Brillouin güç değişimi (ΔP_B), ortamdaki sıcaklık ve sıcaklık kaynaklı ısıl gerginlik değişimlerinin fonksiyonu olarak eşitlik (3.20)'de verildiği gibi ifade edilmektedir (Alahbabi 2005).

$$\Delta P_B = K_{TC}^P \Delta T_C + K_\epsilon^P \Delta \epsilon \quad (3.20)$$

Eşitlikte; K_{TC}^P ve K_ϵ^P sırasıyla Brillouin güç değişiminin sıcaklık ve ısıl gerginlik katsayısına, ΔT_C algılayıcı fiber boyunca oluşan ve $^\circ\text{C}$ cinsinden sıcaklık değişimlerine, $\Delta \epsilon$ ise fiber boyunca meydana gelen sıcaklık kaynaklı ısıl gerginlik değişimlerine karşılık gelmektedir.

Eşitlik (3.20)'de verilmiş olan Brillouin güç değişimi ifadesinde güç değişimi üzerinde sıcaklık oluşumunun etkisi $\sim \% 93$ düzeyinde olmasına karşılık, sıcaklığa bağlı olarak meydana gelen ısıl gerginlik oluşumunun etkisi $\sim \% 7$ düzeyindedir. Bu sebeple Brillouin güç değişimi üzerindeki ısıl gerginlik oluşumlarının etkisi ($K_\epsilon^P \Delta \epsilon$) ihmal edilebilmektedir. Dolayısıyla, sıcaklık ve ısıl gerginlik oluşumlarının eş zamanlı olarak algılandığı ve ısıl gerginlik oluşumlarının Brillouin güç değişimi üzerindeki etkilerinin ihmal edildiği Brillouin ve Young modülü esaslı dağılık algılama modellerinde,

Brillouin güç değişimi ΔP_B , $K_{\epsilon}^P \Delta \epsilon$ katkısı ihmal edilerek sadece sıcaklık değişimlerine bağımlı olarak $\Delta P_B = K_{TC}^P \Delta T_C$ biçiminde yazılabilir (Gunday ve ark. 2014).

Eşitlik (3.17) kullanılarak algılayıcı fiber boyunca meydana gelen ısı gerginlik değişimleri $\Delta \epsilon$, (3.21)'de verildiği gibi ifade edilebilmektedir (Gunday ve ark. 2013).

$$\Delta \epsilon = 26,83(T_{K1} - T_{K2}) = 26,83\Delta T_K \quad (3.21)$$

Eşitlikte; T_{K1} ve T_{K2} sırasıyla °K cinsinden sıcaklıklara, ΔT_K ise algılayıcı fiber boyunca meydana gelen °K cinsinden sıcaklık değişimlerine karşılık gelmektedir. ΔT_K için °C eşdeğeri yazıldığında ΔT_K , (3.22) eşitliğinde verildiği gibi elde edilir.

$$\Delta T_K = 26,83(\Delta T_C + 273) \quad (3.22)$$

Bu durumda (3.20) ve (3.22) eşitlikleri kullanılarak ΔP_B , (3.23)'te verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\Delta P_B = K_{TC}^P \Delta T_C + K_{\epsilon}^P \times 26,83(\Delta T_C + 273) \quad (3.23)$$

Brillouin sıcaklık ve ısı gerginlik katsayıları sırasıyla $K_{TC}^P = 0,36 \mp 0,030 \%^{\circ}C^{-1}$ ve $K_{\epsilon}^P = -9 \times 10^{-4} \mp 1^{-5} \%/ \mu \epsilon$, ΔP_B ifadesinde yazılarak Brillouin güç değişimi (3.24.a)'da olduğu gibi elde edilir (Alahbabi 2005, Gunday ve ark. 2013).

$$\Delta P_B = 0,3359\Delta T_C - 6,5921 \quad (3.24.a)$$

(3.24.a) ifadesi düzenlendiğinde Brillouin güç değişimi (3.24.b)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\Delta P_{BC} = \Delta P_B + 6,5921 = 0,3359\Delta T_C \quad (3.24.b)$$

Bu durumda Brillouin güç değişimi sıcaklık katsayısı K_{TC1}^P , algılayıcı fiber boyunca oluşan sıcaklık ve ısıl gerginliklerin toplam etkisine bağlı olarak (3.25)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$K_{TC1}^P = \frac{\partial \Delta P_{BC}}{\partial T_C} = 0,3359 \text{ \%}/^\circ\text{C} \quad (3.25)$$

3.6. Landau - Placzek Oranı Esaslı Optik Fiberli Dağınık Algılama

Landau-Placzek oranı (LPR), geriye saçılan optik sinyali oluşturan Rayleigh ve Brillouin bileşenlerinin (Stokes ve anti-Stokes) güçlerinin oranı veya Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayılarının oranı olarak ifade edilmektedir (De Souza 1999).

Bu bağlamda LPR , eşitlik (3.26)'da verildiği gibi yazılabilir.

$$LPR = \frac{P_R}{P_S + P_{AS}} = \frac{\gamma_R}{\gamma_B} \quad (3.26.a)$$

Eşitlikte; P_R Rayleigh sinyal gücüne P_S ve P_{AS} sırasıyla Brillouin Stokes ve anti-Stokes sinyal gücüne γ_R ve γ_B ise sırasıyla Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayılarına karşılık gelmektedir.

(3.26.a)'da verilmiş olan LPR , (3.19.a), (3.19.b) eşitlikleri kullanılarak (3.26.b)'de verildiği gibi yazılabilir (De Souza 1999).

$$LPR = \frac{T_f}{T} (\beta_T \rho v_a^2 - 1) \quad (3.26.b)$$

Algılayıcı fiberde Brillouin saçılmasına neden olan akustik dalganın fiber içerisinde ilerleme hızı v_a , E Young modülü ve σ Poisson oranına bağlı olarak (3.27.a)'daki gibi yazılabildiğinden (De Souza 1999), (3.26.b)'de verilen Landau-Placzek oranı, (3.27.b)'de verildiği gibi elde edilmektedir (De Souza 1999).

$$v_a^2 = \frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)} \quad (3.27.a)$$

$$LPR = \frac{T_f}{T} \left(\frac{E(1-\sigma)}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} \beta_T - 1 \right) \quad (3.27.b)$$

Eşitlik (3.27.b)'de görüldüğü gibi LPR 'nın algılayıcı fiber çekirdeğine ait Young modülü ve Poisson oranı gibi malzeme karakteristiklerine bağımlılığı bulunmaktadır. Young modülü ve Poisson oranının sıcaklık bağımlılığı olduğundan, LPR 'nin da sıcaklık bağımlılığı bulunmaktadır.

LPR esaslı dağınık algılamalı sistemlerde geriye saçılan sinyalde Rayleigh bileşenin gücü zamanın fonksiyonu olarak eşitlik (3.28.a)'da verilmektedir. Bu ifadede $t = 2z/v_g$ dönüşümü yapıldığında Rayleigh gücü, algılayıcı fiber boyunca uzunluğun fonksiyonu olarak (3.28.b)'de verildiği gibi elde edilebilir (De Souza 1999).

$$P_R(t) = \frac{S}{2} P_0 \gamma_R \tau v_g e^{-\gamma v_g t} \quad (3.28.a)$$

$$P_R(z) = \frac{S}{2} P_0 \gamma_R \tau v_g e^{-2\gamma z} \quad (3.28.b)$$

Eşitliklerde; S yakalama katsayısını, P_0 fibere giren optik sinyalin gücünü, γ_R Rayleigh saçılma katsayısını, τ darbe süresini, v_g fiberde ilerleyen ışığın grup hızını, γ fiber zayıflama katsayısını, z mesafeyi ifade etmektedir.

Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayılarının sıcaklık bağımlılıklarını kullanarak, LPR 'yi algılayıcı fiber sıcaklığına (T) bağlı olarak elde etmek mümkün olabilmektedir (De Souza 1999). Buradan (3.19) eşitlikleri düzenlendiğinde, Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayıları γ_R ve γ_B sırasıyla (3.29.a) ve (3.29.b)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\gamma_R = \frac{8\pi^3 n^8 p^2 k T_f}{3\lambda_0^4} \times \left[\beta_T - \frac{(1+\sigma)(1-2\sigma)}{E(1-\sigma)} \right] \quad (3.29.a)$$

$$\gamma_B = \frac{8\pi^3 n^8 p^2 k T}{3\lambda_0^4} \times \frac{(1+\sigma)(1-2\sigma)}{E(1-\sigma)} \quad (3.29.b)$$

(3.29.a)'daki eşitliğin sağındaki ilk çarpan A ve ikinci çarpan B ile ifade edilerek γ_R (3.29.c)'deki gibi yazıldığında $A = 5,83 \times 10^5$ olarak hesaplanmaktadır.

$$\gamma_R = \frac{8\pi^3 n^8 p^2 k T_f}{3\lambda_0^4} \times \left[\beta_T - \frac{(1+\sigma)(1-2\sigma)}{E(1-\sigma)} \right] = A \times B \quad (3.29.c)$$

(3.4.a) ve (3.4.b)'de verilmiş olan Young modülü ve Poisson oranı (3.29.c)'deki B ifadesinde yerine yazılırsa, B (3.30.a)'da verildiği gibi elde edilebilir.

$$B = \frac{3,32 + 5,71 \times 10^{-4}T - 2,11 \times 10^{-8}T^2}{(58,74 + 7,48 \times 10^{-3}T - 3,25 \times 10^{-7}T^2) \times 10^9} \quad (3.30.a)$$

Eşitlikte gerekli düzenlemeler yapıldığında B (3.30.b) biçimini almaktadır.

$$B = (0,0565 + 2,54 \times 10^{-6}T - 1,23 \times 10^{-9}T^2) \times 10^{-9} \quad (3.30.b)$$

$A = 5,83 \times 10^5$ değeri ve (3.30.b)'daki B eşitliği, (3.29.c)'de yazıldığında Rayleigh saçılma katsayısının γ_R , sıcaklık bağımlılığı (3.31.a)'da verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\gamma_R(T) = 3,3 \times 10^{-5} + 1,48 \times 10^{-9}T - 7,17 \times 10^{-13}T^2 \quad (3.31.a)$$

(3.31.a)'dan yararlanılarak Rayleigh saçılma katsayısının sıcaklık duyarlılığı (3.31.b)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\frac{d\gamma_R(T)}{dT} / \gamma_R(T) = \frac{1,48 \times 10^{-9} - 14,34 \times 10^{-13}T}{3,3 \times 10^{-5} + 1,48 \times 10^{-9}T - 7,17 \times 10^{-13}T^2} \quad (3.31.b)$$

Eşitliklerde; T °K cinsinden algılayıcı fiberin sıcaklığına karşılık gelmektedir.

Benzer biçimde (3.29.b) ile verilmiş olan γ_B Brillouin saçılma katsayısının algılayıcı fiber sıcaklığına bağımlılığı ya da sıcaklık bağımlılığı elde edilebilir. Bu ifade (3.32)'deki gibi yazılarak eşitliğin sağındaki C çarpanı, $C = 298,95$ olarak hesaplanır.

$$\gamma_B = \frac{8\pi^3 n^8 p^2 k}{3\lambda_0^4} \times \frac{T \cdot (1+\sigma)(1-2\sigma)}{E \cdot (1-\sigma)} = C \times D \quad (3.32.a)$$

Eşitlik (3.32)'deki D ifadesi, (3.4.a) ve (3.4.b) ile verilen Young modülü ve Poisson oranı eşitliklerini kullanarak, (3.32.b)'de verildiği gibi elde edilebilir.

$$D = \frac{T \times (0,794 - 4,7 \times 10^{-5}T - 16,67 \times 10^{-10}T^2)}{10^9 \times (58,74 + 7,48 \times 10^{-3}T - 3,25 \times 10^{-7}T^2)} \quad (3.32.b)$$

(3.32.b)'de gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra, C ve D eşdeğerleri (3.32.a)'da yerine konulursa, γ_B Brillouin saçılma katsayısının sıcaklık bağımlılığı (3.33.a)'da verildiği gibi elde edilebilir.

$$\gamma_B(T) = 4 \times 10^{-9}T - 7,5 \times 10^{-13}T^2 \quad (3.33.a)$$

Dolayısıyla Brillouin saçılma katsayısının sıcaklık duyarlılığı (3.33.b)'de verildiği gibi elde edilir.

$$\frac{d\gamma_B(T)}{dT} / \gamma_B(T) = \frac{4 \times 10^{-9} - 15 \times 10^{-13}T}{4 \times 10^{-9}T - 7,5 \times 10^{-13}T^2} \quad (3.33.b)$$

Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayılarının ısı gerginlik bağımlılıklarını elde etmek için benzer biçimde (3.29) eşitliklerinden yararlanılmaktadır. Rayleigh saçılma katsayısının verildiği (3.29.c) eşitliğinde A ifadesi sabit bir değere sahip olduğundan γ_R saçılma katsayısının sıcaklık bağımlılığına B ifadesi kullanılarak ulaşılabilmektedir.

Dolayısıyla (3.4.a) ve (3.4.b) eşitlikleri kullanılarak B ifadesi (3.34)'deki gibi elde edilir.

$$B = \frac{3,584 + 14,46 \epsilon - 71,12 \epsilon^2}{(63 + 139,06 \epsilon - 1283,2 \epsilon^2) \times 10^9} \quad (3.34)$$

Eşitlik düzenlendiğinde B, (3.35)'deki biçimi almaktadır.

$$B = (0,0568 + 0,104 \text{ €})10^{-9} \quad (3.35.b)$$

$A = 5.83 \times 10^5$ ve (3.35.b) eşitliği, (3.29.c)'de yerine yazıldığında, Rayleigh saçılma katsayısı γ_R , algılayıcı fiber boyunca oluşan ısıl gerginlik oluşumlarının fonksiyonu olarak (3.36.a)'da verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\gamma_R(\text{€}) = 3,31 \times 10^{-5} + 6,06 \times 10^{-5} \text{ €} \quad (3.36.a)$$

Buradan, Rayleigh saçılma katsayısının ısıl gerginlik duyarlılığı, (3.36.b)'deki gibi elde edilmektedir.

$$\frac{d\gamma_R(\text{€})}{d\text{€}} / \gamma_R(\text{€}) = \frac{6,06 \times 10^{-5}}{3,31 \times 10^{-5} + 6,06 \times 10^{-5} \text{ €}} \quad (3.36.b)$$

(3.31.a) ve (3.33.a) eşitlikleri kullanılarak LPR , algılayıcı fiberde meydana gelen sıcaklık (T) oluşumlarının fonksiyonu olarak (3.37)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$LPR(T) = \frac{\gamma_R(T)}{\gamma_B(T)} = \frac{3,3 \times 10^{-5} + 1,48 \times 10^{-9}T - 7,17 \times 10^{-13}T^2}{4 \times 10^{-9}T - 7,5 \times 10^{-13}T^2} \quad (3.37)$$

Buradan LPR 'nin sıcaklık duyarlılığı, eşitlik (3.38)'deki gibi elde edilmektedir.

$$\frac{dLPR(T)}{dT} / LPR(T) = -\frac{1}{T} \quad (3.38)$$

Dağınık algılamalı sistemlerde algılayıcı fiberin çalışma sıcaklığı aralığında (yaklaşık $320 \text{ °K} - 338 \text{ °K}$ aralığında) Brillouin saçılma katsayısının sıcaklık duyarlılığı, Rayleigh saçılma katsayısının sıcaklık duyarlılığına kıyasla ~ 95 kat daha büyük olduğundan, LPR profilinde asıl belirleyici olan etki Brillouin gücündeki değişimlerdir.

LPR 'nin ısıl gerginlik bağımlılığı ise (3.39)'da verildiği gibi elde edilmektedir.

$$LPR_{(\epsilon)} = \frac{\gamma_R}{\gamma_B} = \frac{3,31 \times 10^{-5} + 6,06 \times 10^{-5} \epsilon}{1,15 \times 10^{-6} - 9,12 \times 10^{-6} \epsilon} \quad (3.39)$$

Eşitlik (3.39)'da gerekli düzenlemeler yapıldığında LPR , algılayıcı fiberde meydana gelen ısı gerginlik (ϵ) oluşumlarının fonksiyonu olarak (3.40)'ta verildiği gibi elde edilmektedir.

$$LPR_{(\epsilon)} = 28,8 + 281,9 \times \epsilon + 418,9 \times \epsilon^2 \quad (3.40)$$

Buradan LPR 'nin ısı gerginlik duyarlılığı, (3.41)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

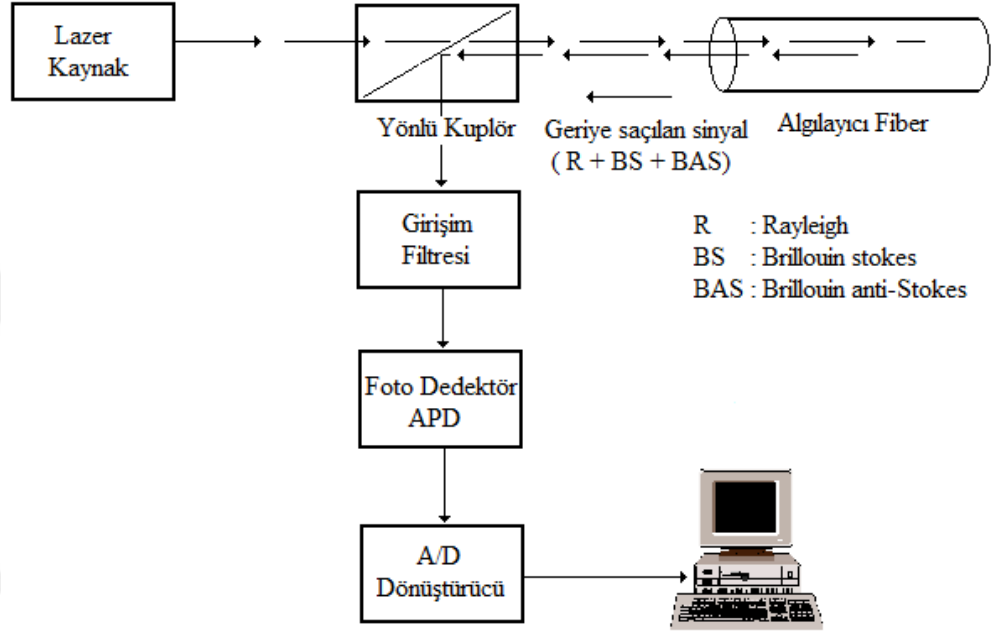
$$\frac{dLPR_{(\epsilon)}}{d\epsilon} / LPR_{(\epsilon)} = \frac{281,9 + 837,8 \times \epsilon}{28,8 + 281,9 \times \epsilon + 418,9 \times \epsilon^2} \quad (3.41)$$

Dağınık algılamalı sistemlerde optik fiberde meydana gelen ısı gerginlik değişimi aralığında (yaklaşık $720 \mu\epsilon$ - $1200 \mu\epsilon$ aralığında), Brillouin saçılma katsayısının gerginlik duyarlılığı Rayleigh saçılma katsayısının gerginlik duyarlılığından ~ 4,5 kat daha büyük olduğundan, kablo boyunca LPR profilinde esas belirleyici olan etki geriye saçılan sinyalin Brillouin gücündeki değişimlerdir.

Landau-Placzek oranını esas alan optik fiberli dağınık algılamalı sistemlerde algılayıcı fiber boyunca meydana gelen sıcaklık ve ısı gerginlik profillerine yukarıda verilmiş olan eşitlikler aracılığıyla ulaşılabildiği gibi geriye saçılan optik sinyalin Rayleigh ve Brillouin güçlerinin oranı üzerinden de ulaşmak mümkündür (De Souza 1999).

Landau-Placzek esaslı dağınık algılamalı sistemlerde, lazer kaynak tarafından fibere pompalanan ışığın bir kısmı, fibere etkileyen ısı etkilerden dolayı geriye doğru saçılmaktadır. Bu ısı etkilerin kaynağı, algılayıcı fiberin algılama sistemi içerisinde entegre edildiği lokasyona göre bir sıcaklık kaynağı olabileceği gibi solar radyasyon, rüzgar hızı ve rüzgar yönü gibi çevresel faktörler de olabilmektedir.

Landau-Placzek esaslı dağınık algılamalar sistemde fiberin giriş ucuna göre ters yönde kılavuzlanan yani geriye saçılan optik sinyalin Rayleigh ve Brillouin bileşenleri birbirinden ayrılarak elde edilen bileşenler üzerinden ortamdaki ısıl oluşumlar tayin edilmektedir. Landau-Placzek esaslı optik fiberli dağınık algılamalı örnek bir sistem gösterimi Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. LPR esaslı optik fiberli dağınık algılamalı bir sisteme ait genel görünüş

Şekil 3.1’de verilmiş olan algılama sisteminde yer alan yönlü kuplör ile algılayıcı fiber içerisinde geriye saçılan optik sinyal (Rayleigh ve Brillouin bileşenleri), fibere pompalanan lazer kaynak sinyalinden ayrılarak bir girişim filtresine gönderilmektedir. Filtre devresinde, geriye saçılan Rayleigh ve Brillouin sinyalleri birbirinden ayrılmaktadır. Ardından filtre çıkışında elde edilen optik sinyaller bir foto dedektör tarafından algılanarak elektriksel sinyale dönüştürülmektedir.

Elektriksel formattaki sinyal daha sonra kuvvetlendirilerek sinyal gürültü oranını (SNR) azaltmak için yüksek hızlı bir analog dijital dönüştürücü (ADC) gönderilmektedir. ADC çıkışındaki elektriksel sinyal bileşenleri bir bilgisayar veya program aracılığıyla analiz edilerek görüntülenmektedir.

3.7. Brillouin Güç ve Frekans Kaymasının Young Modülü Bağımlılıkları

Optik fiberli dağıtık algılamalı sistemlerde algılayıcı fibere pompalanan optik sinyal ileri ya da geri yönde kılavuzlandığından eğer optik sinyal, pompa sinyale göre ters yönde saçılırsa ($\theta = 180^\circ$), akustik dalga frekansı f_a maksimum değere ulaşır. Bu durumda Brillouin frekans kayması V_B , Bragg koşulunu sağlar ve akustik dalga frekansı f_a değerine eşit olur. Brillouin frekans kayması bu aşamada (3.42)'de verildiği gibi ifade edilir (Parker ve ark. 1998, Maughan ve ark. 2001, Alahbabi 2005, Pradhan ve ark. 2014).

$$V_B = \frac{2n}{\lambda_0} v_a \quad (3.42)$$

Brillouin gücü P_B ve Brillouin frekansı V_B , sıcaklık ve ısıl gerginlikle lineer olarak değişim göstermektedir. Benzer biçimde Brillouin güç değişimi ΔP_B , (3.20)'de verildiği gibi sıcaklık ve ısıl gerginliklere lineer bağımlıdır.

Brillouin frekans kaymasının ΔV_B , sıcaklık ve ısıl gerginlik değişimi bağımlılığı ise (3.43) ile verilmektedir (Maughan ve ark. 2001, Alahbabi 2005, Pradhan ve ark. 2014).

$$\Delta V_B = K_T^V \Delta T + K_\epsilon^V \Delta \epsilon \quad (3.43)$$

Eşitlikte; K_T^V Brillouin frekans kaymasının sıcaklık katsayısına, K_ϵ^V Brillouin frekans kaymasının gerginlik katsayısına ΔT ve $\Delta \epsilon$ ise sırasıyla algılayıcı fiber boyunca oluşan sıcaklık ve gerginlik değişimlerine karşılık gelmektedir.

G.652 tip tek modlu fiber için Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kaymasına ait sıcaklık ve gerginlik katsayıları Çizelge 3.2'de verilmiştir (Alahbabi 2005).

Bu katsayılar tek modlu fiberin farklı tipleri için çok küçük değişiklikler göstermektedir.

Çizelge 3.2. G.652 tip SMF için sıcaklık ve gerginlik katsayıları

Sıcaklık ve Gerginlik Katsayıları	Değerler
K_T^P	$0,36 \pm 0,030 \%/ (^{\circ}C)$
K_{ϵ}^P	$-9 \times 10^{-4} \pm 1 \times 10^{-5} \%/(\mu\epsilon)$
K_T^V	$1,07 \pm 0,06 \text{ MHz}/(^{\circ}C)$
K_{ϵ}^V	$0,048 \pm 0,004 \text{ MHz}/(\mu\epsilon)$

Ergitilmiş silikanın Young modülü ortamdaki sıcaklık ve ısıl gerginlik oluşumlarından direk olarak etkilenmektedir. Dolayısıyla algılayıcı fiber çekirdeğinin Young modülü ortamdaki sıcaklık ve ısıl gerginlik oluşumlarına bağlı olarak lineer bir değişim göstermektedir. Bu ilişki (3.4.a) ve (3.6) eşitliklerinde verilmiştir (De Souza 1999).

Bu nedenle algılayıcı fiber çekirdeğinin farklı Young modülü değerlerine karşılık farklı değerlerde Brillouin frekans kayması ve Brillouin güç değişimi verileri elde edilebilmektedir. Optik fiberli dağıtık algılamalı sistemlerde algılayıcı performansı açısından Brillouin frekans kayması ve Brillouin güç değişimi belirleyici parametreler olduğundan modüldeki değişimlerin tespiti veya elde edilmesi bu bakımdan önemlidir.

Eşitlikler (3.4.a) ve (3.6)'da verilen ve Young modülünün sıcaklık ve ısıl gerginlik bağımlılıklarından yararlanarak algılayıcı fiber boyunca oluşan T_K sıcaklık ve ϵ ısıl gerginlik oluşumları, Young modülüne bağımlı olarak (3.44) ve (3.45)'te verildiği gibi elde edilebilir.

$$T_K = \frac{E(T) - 69,68}{(1,126 \times 10^{-2})} = 88,81 \times E(T) - 6188,277 \quad (3.44)$$

$$\epsilon = \frac{E(\epsilon) - 72,97918}{(72,97918 \times 5,75)} = 2383,05 \times E(\epsilon) - 1,739 \times 10^5 \quad (3.45)$$

Kelvin ve Celcius arasındaki $T_K = T_C + 273$ bağıntısı kullanıldığında (3.44) eşitliği (3.46) biçimini almaktadır.

$$T_C = 88,81 \times E(T) - 6461,277 \quad (3.46)$$

Burada; T_C algılayıcı fiber uzunluğu boyunca $^{\circ}\text{C}$ cinsinden sıcaklık oluşumlarını ifade etmektedir.

(3.20) ve (3.43) eşitliklerinde verilen sırasıyla ΔP_B Brillouin güç değişimi ve ΔV_B Brillouin frekans kayması ifadeleri kullanılarak ΔP_B ve ΔV_B sırasıyla (3.47) ve (3.48)'de verildiği gibi yazılabilmektedir.

$$\Delta P_B = K_T^P \Delta T_C + K_{\epsilon}^P \Delta \epsilon \quad (3.47)$$

$$\Delta V_B = K_T^V \Delta T_C + K_{\epsilon}^V \Delta \epsilon \quad (3.48)$$

Eşitliklerde; ΔT_C ve $\Delta \epsilon$ sırasıyla algılayıcı fiber boyunca oluşan sıcaklık ve ısıl gerginlik değişimlerine karşılık gelmektedir.

Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kayması eşitlikleri geliştirildiğinde algılayıcı fiber uzunluğu boyunca $\Delta P_B(L)$ ve $\Delta V_B(L)$ sırasıyla, (3.49) ve (3.50)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\Delta P_B(L) = K_T^P T_C(L) + K_{\epsilon}^P \epsilon(L) \quad (3.49)$$

$$\Delta V_B(L) = K_T^V T_C(L) + K_{\epsilon}^V \epsilon(L) \quad (3.50)$$

Çizelge 3.2'deki sıcaklık ve gerginlik katsayıları ve (3.45) ve (3.46) ile verilmiş olan ϵ ve T_C ifadeleri, (3.49) ve (3.50) eşitliklerinde yerlerine yazılarak eşitliklerde gerekli düzenlemeler yapıldığında Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kayması, algılayıcı fiber çekirdeğinin Young modülüne (E) bağlı olarak sırasıyla eşitlikler (3.51) ve (3.52)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$\Delta P_B(E) = 29,827 \times E - 2169,550 \quad (3.51)$$

$$\Delta V_B(E) = 209,413 \times E - 15260,766 \quad (3.52)$$

Eşitliklerde; Young modülünün birimi GPa'dır.

Eşitliklerden açık bir biçimde görüldüğü gibi algılayıcı fiber çekirdeğine ait Young modülü ile algılayıcı fiber boyunca geriye saçılan optik sinyalin Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kayması arasında lineer bir ilişki bulunmaktadır.

Buradan Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kaymasının Young modülü duyarlılıkları (veya yüzdesel değişimleri) sırasıyla, eşitlikler (3.53) ve (3.54)'teki gibi elde edilmektedir.

$$\frac{d\Delta P_B(E)}{dE} / \Delta P_B(E) = \frac{29,827}{29,827 \times E - 2169,550} \quad (3.53)$$

$$\frac{d\Delta V_B(E)}{dE} / \Delta V_B(E) = \frac{209,413}{209,413 \times E - 15260,766} \quad (3.54)$$

Eşitlikler (3.53) ve (3.54)'te sıfır gerginlik ve 293 °K sıcaklık için Brillouin frekans kaymasının Young modülü duyarlılığının, Brillouin güç değişiminin Young modülü duyarlılığına oranı ~ 2,30 olarak elde edilmiştir. Bu durumda Young modülünün Brillouin frekans kayması üzerinde daha baskın karakter gösterdiği söylenebilir.

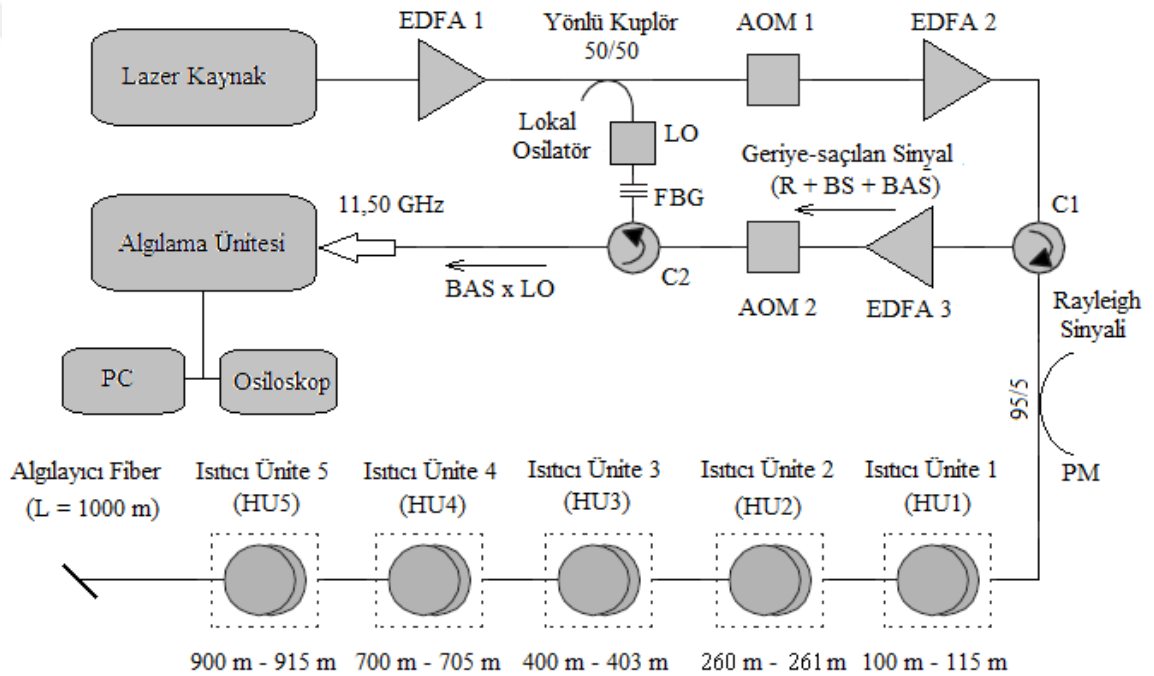
4. BULGULAR VE TARTIŞMA (MODELLER VE BENZETİMLER)

4.1. Giriş

Bu tez çalışması kapsamında Young modülü ve Shear modülünün ısı karakteristیکlerini analiz etmek amacıyla yüksek gerilim yer altı enerji kablosuna entegre edilmiş algılayıcı fiber modeli ile Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kaymasının Young modülü bağımlılıklarının analiz edildiği dağınık sıcaklık ve ısıl gerginliklerin algılandığı algılama sistemi için dağınık sıcaklık ve dağınık ısıl gerginlik algılama modeli çalışılmıştır. Çalışmada ayrıca Brillouin güç değişimi ve Young modülünün birleşik etkisinden yararlanarak Landau-Placzek oranını esas alan optik fiberli dağınık algılamalı bir sistem için Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayılarının ve LPR'nin sıcaklık ve ısıl gerginlik duyarlılıkları teorik olarak analiz edilmiştir. Tez kapsamında ayrıca algılayıcı fiber çekirdeğinin Young modülü değişimleri ile geriye saçılan optik sinyalin Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kayması arasındaki ilişki teorik olarak analiz edilerek Brillouin parametreleri, Young modülüne bağılı olarak formüle edilmiştir. Ardından Brillouin parametreleri ile fiber çekirdeğine ait Young modülü değişimleri arasındaki bağıntılar kullanılarak bir dağınık algılama modeli için belirlenen çalışma koşulları altında, Young modülünün Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kayması bağımlılıklarına ilişkin benzetimler elde edilmiştir. Böylelikle algılama sisteminin performansı üzerinde belirleyici olan Brillouin parametreleri ve fiber çekirdeğinin Young modülü değişimi, teorik verilere ve algılayıcı fiber uzunluğu boyunca elde edilen benzetim sonuçlarına göre değerlendirilmiştir.

Brillouin güç değişimi ve Young modülünün birleşik etkisini esas alan optik fiberli dağınık sıcaklık ve ısıl gerginlik oluşumlarının algılandığı sistem modeli Şekil 4.1'de verilmiştir. Bu modelde algılayıcı fibere pompalanan ışığın geriye saçılmasına neden olan ve fiber içerisinde meydana gelen akustik dalgaların kaynağı, kablo üzerinde farklı lokasyonlara yerleştirilmiş olan Isıtıcı Ünitelerin varlığıdır. Literatürdeki benzer çalışmalarda algılayıcı fiber üzerinde meydana gelen ısı oluşumları fırın, ısıtıcı (De Souza K.R.C.P. 1999, Alahbabi 2005) ve lamba (Cirigliano ve ark. 2009) gibi ısı kaynakları kullanılarak modellenmiştir.

Bu çalışmada ise algılayıcı fiber boyunca sıcaklık ve ısıl gerginlik profillerinin eş zamanlı olarak elde edilmesi ve benzetimlerinin gerçekleştirilmesinde Şekil 4.1’de verilmiş olan sistem modeli kullanılmıştır. Bu modelde ışık kaynağı olarak ~ 1533 nm dalga boyuna ayarlı ve ~ 1 MHz çizgi genişlikli bir lazer kaynak kullanılmaktadır. Erbium katkılı fiber kuvvetlendiriciler EDFA1 ve EDFA2 ile AOM1 Akusto-optik modülatörü algılayıcı fiber içerisine pompalanan kuvvetlendirilmiş bir prop darbe sinyali üretilmesini sağlamaktadır. Burada EDFA’lar ile kuvvetlendirilmiş olan optik sinyal AOM1 aracılığıyla akustik dalga etkisi kullanılarak modüle edilmekte ve algılayıcı fiber içerisine pompalanmaktadır.



Şekil 4.1. Brillouin esaslı dağılık sıcaklık ve ısıl gerginlik algılamalı bir sistem modeli

C1 ve C2 sirkülatörleri yönlü kuplöre benzer biçimde geriye saçılan optik sinyalin bileşenlerine ayrılmasını ve ilgili birimlere yönlendirilmesini sağlamaktadır. Modelde C1 sirkülatörü Lazer kaynağın pompaladığı ve EDFA2 ile kuvvetlendirilmiş olan optik sinyali ısıtıcı ünitelerin yer aldığı algılayıcı fiber bölgesine yönlendirmektedir. Bu bölgede ısıtıcı ünitelerden kaynaklanan ısıl oluşumlar optik sinyalin algılayıcı fiber boyunca ve C1 sirkülatörüne doğru, geri yönde saçılmasına neden olmaktadır. Geriye

saçılan optik sinyal Rayleigh (R), Brillouin Stokes (BS) ve Brillouin anti-Stokes (BAS) bileşenlerini içermektedir.

C1 sirkülatörüne gelen geriye saçılan zayıf optik sinyal, EDFA3 ile kuvvetlendirilerek sirkülatör aracılığıyla algılama sistemine doğru yönlendirilmektedir. Geriye saçılan Brillouin sinyali ~ mW seviyelerinde sinyal gücüne sahip zayıf bir sinyal olduğundan Lokal osilatör (LO) sinyali ile karıştırılmadan önce EDFA3 ile kuvvetlendirilmektedir. Kuvvetlendirilen optik sinyalde ASE gürültüsü (Amplified Spontaneous Emission noise) oluşabileceğinden gürültüyü bastırmak ve akusto-optik etkiyle sinyali modüle etmek için EDFA3 çıkışına AOM2 Akusto-optik modülatör eklenmiştir.

Modelde yer alan 95/5 yönlü kuplörün bir kolu PM (darbe monitörü-pulse monitor) ünitesine bağlanmaktadır. Optik sinyalin % 5'lik kısmı PM ünitesi aracılığıyla görüntülenerek sistemin çıkış gücü hakkında bilgi elde edilmektedir. Yönlü kuplörün diğer kolu ise geriye saçılan Brillouin sinyalinin normalize edilebilmesi için yararlanılan Rayleigh sinyalinin direk olarak tespiti için kullanılmaktadır (Alahbabi 2005).

Modelde yer alan C2 sirkülatörü, geriye saçılan sinyalin (Rayleigh, Brillouin Stokes ve Brillouin anti-Stokes) Fiber Bragg grating (FBG)'e doğru yönlendirilmesini sağlamaktadır. FBG belirli bir dalga boyundaki (λ_g) optik sinyalleri yansıtan ancak buna karşılık diğer dalga boylarındaki optik sinyalleri geçiren bir elemandır. Bu modelde lazer kaynağın ürettiği optik sinyalin dalga boyu civarında yansıtma dalga boyuna ($\lambda_g = 1533,2$ nm) sahip yansıtma oranı ~ % 99 ve dalga boyu çizgi genişliği $\Delta\lambda_g = \sim 1$ nm olan bir FBG seçilmiştir. FBG burada geriye saçılan optik sinyalin Rayleigh (R) ve Brillouin Stokes (BS) bileşenini geçirirken Brillouin anti-Stokes (BAS) bileşenini yansıtmaktadır. Yani FBG ~ 1533 nm dalga boyu bölgesinde Rayleigh ve Brillouin Stokes bileşenlerinin geçişine izin verirken $\lambda_g = 1533,2$ nm dalga boyunda Brillouin anti-Stokes bileşenini yansıtmaktadır. Geriye yansıyan Brillouin anti-Stokes bileşeni C2 sirkülatörüne yönlendirilmektedir.

Modelde yer alan Lokal osilatör, FBG'in geçişine izin verdiği ve FBG yansıtma dalga boyundan farklı dalga boyunda bir LO sinyali üretmektedir. Daha sonra LO sinyali ile aynı iletim hattı üzerinde ilerleyen Brillouin anti-Stokes sinyali karıştırılmakta ve toplam sinyal C2 sirkülatörüne geri gelerek sirkülatör aracılığıyla algılama ünitesine yönlendirilmektedir. Böylelikle ~ 11,50 GHz değerinde bir tepe frekansı üretilmekte ve algılama ünitesi içerisinde bu frekansa duyarlı bir foto dedektör ile tespit edilmektedir. Algılama ünitesi belirlenen bir RF (radyo frekansı) frekans bandında zaman-domeni çizgilerini elde etmek amacıyla kullanılmaktadır. Daha sonra ünite içerisinde yer alan foto dedektörün algıladığı bir frekans için zaman-domeni çizgilerinden algılayıcı fiber boyunca Brillouin spektrumu elde edilmektedir (Alahbabi 2005).

Sonuç olarak algılama ünitesinin çıkışına bağlı bir bilgisayar aracılığıyla ve matematiksel yöntemler kullanılarak Brillouin frekans kayması ve anti-Stokes Brillouin bileşenine ait Brillouin güç değişimi verilerine ulaşılmaktadır. Algılayıcı fiber boyunca sıcaklık ve ısıl gerginlik oluşumlarına ait bilgiler ise Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kayması verilerinden elde edilmektedir.

4.2. Benzetimler

4.2.1. Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kaymasının Young modülü bağımlılıklarının elde edilmesi

Algılayıcı fiber çekirdeğinin Young modülü değişimlerinin Brillouin güç değişimi ve frekans kayması üzerindeki etkilerinin analizi için oluşturulmuş olan modele ait benzetimler Matlab ortamında elde edilmiştir. Modelde fiber üzerindeki sıcaklık artışları, fiberin içerisinden geçirildiği ve ısıtma kapasiteleri farklı beş adet ısıtıcı ünitenin kullanımıyla sağlanmıştır. Isıtıcı üniteler ve algılayıcı fiber üzerindeki yerleri izelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Isıtıcı üniteler ve algılayıcı fiber üzerindeki yerleri

Isıtıcı Üniteler	Algılayıcı Fiber Üzerindeki Yerleri
HU1	100 m – 115 m
HU2	260 m – 261 m
HU3	400 m – 403 m
HU4	700 m – 705 m
HU5	900 m – 915 m

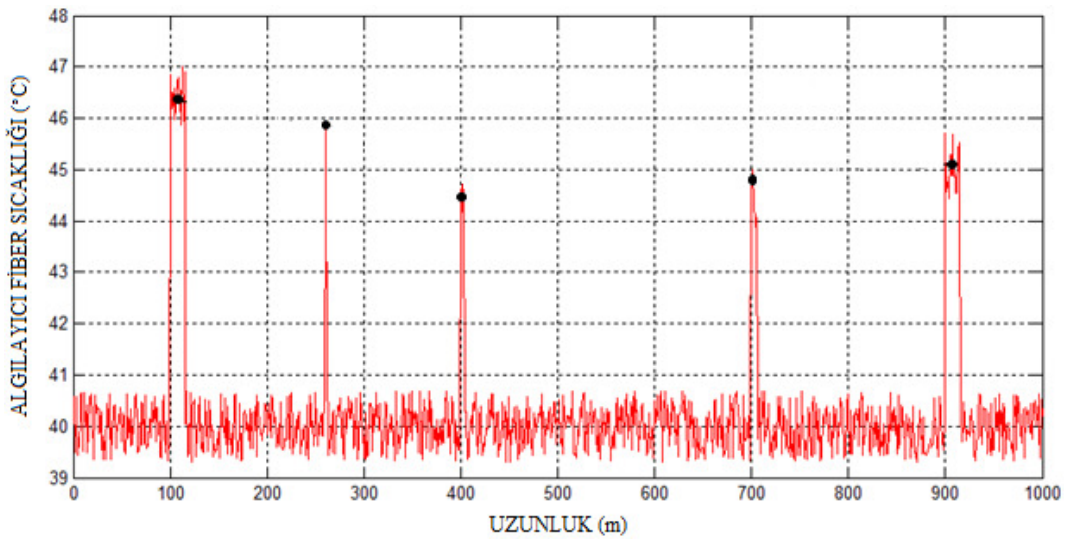
Algılayıcı fiber boyunca Brillouin parametrelerinin Young modülü bağımlılıklarına ilişkin benzetimlerde ısıtıcı bölgelerdeki sıcaklık artışları, Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayılarındaki sıcaklık parametresinin değiştirilmesi ve sıcaklık verilerinin Matlab’de gerçekleştirilmiş olan programa girilmesiyle sağlanmıştır. Benzetimlerin elde edildiği Matlab program kodları EK 1’de verilmiştir.

Modelde algılayıcı fiber olarak G.652 tip tek modlu optik fiber kullanımı esas alınmıştır. Elde edilen benzetimler için algılayıcı optik fibere ait özellikler ile fiber parametreleri ve değerleri aşağıda verilmiştir.

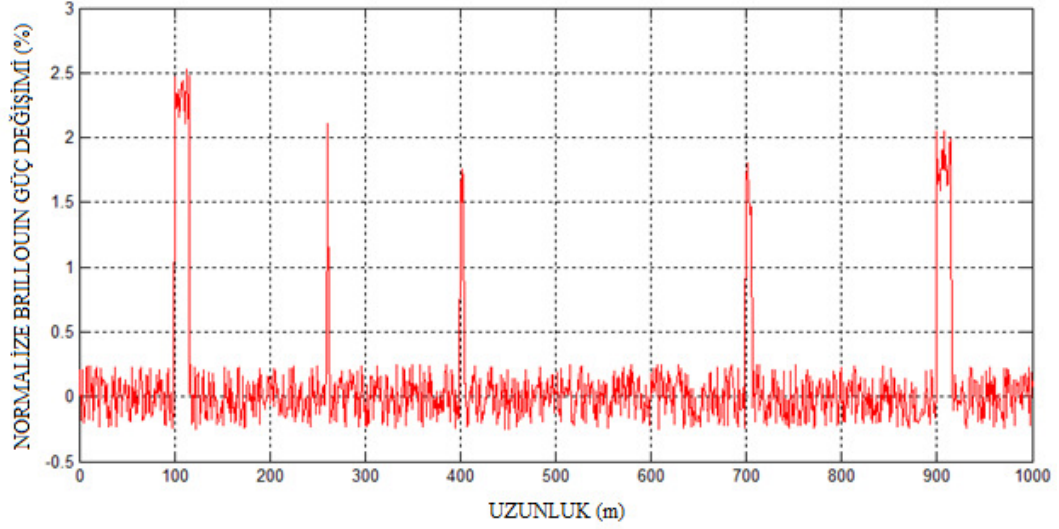
- Şekil 4.1’de verilen modeldeki lazer kaynağının algılayıcı fibere pompaladığı sinyalin darbe süresi: $\tau = 10$ ns

- Pompalanan sinyalin dalga boyu: $\lambda = 1550 \text{ nm}$
- 1550 nm'de fiber zayıflama katsayısı: $\gamma = 4,56 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$
- Lazerin pompaladığı sinyalin maksimum gücü: $P_0 = 1,5 \text{ W}$
- Algılayıcı fiberin çekirdek kırılma indisi: $n_1 = 1,50$
- Algılayıcı fiberin kılıf kırılma indisi: $n_2 = 1,45$
- Işığın boşluktaki hızı: $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$
- Fiberde ilerleyen ışığın grup hızı: $v_g = c/n_1$
- Uzamsal çözünürlük: $l = c\tau/2n_1 = 1,0 \text{ m}$
- Fiber kablo uzunluğu: $L = 1000 \text{ m}$
- Algılayıcı fiber üzerinde ölçüm alınan nokta sayısı: $R = L/l = 1000 \text{ nokta}$
- Silika fiberin yoğunluğu: $\rho = 2330 \text{ kg/m}^3$
- Brillouin gücünün sıcaklıkla değişim katsayısı: $K_T^P = 0,36 \pm 0,030 \text{ \%}^\circ\text{K}^{-1}$
- Yakalama katsayısı: $S = (n_1^2 - n_2^2)/4n_1^2 = 16,389 \times 10^{-3}$.

Şekil 4.2'de algılayıcı fiber boyunca ortalama sıcaklık değişimleri ve geriye saçılan optik sinyalin Brillouin normalize güç değişimi gösterilmektedir. Optik sinyalin Brillouin normalize güç değişimleri (3.18) ve (3.20) eşitliklerinden yararlanılmak suretiyle elde edilmiştir.



a)



b)

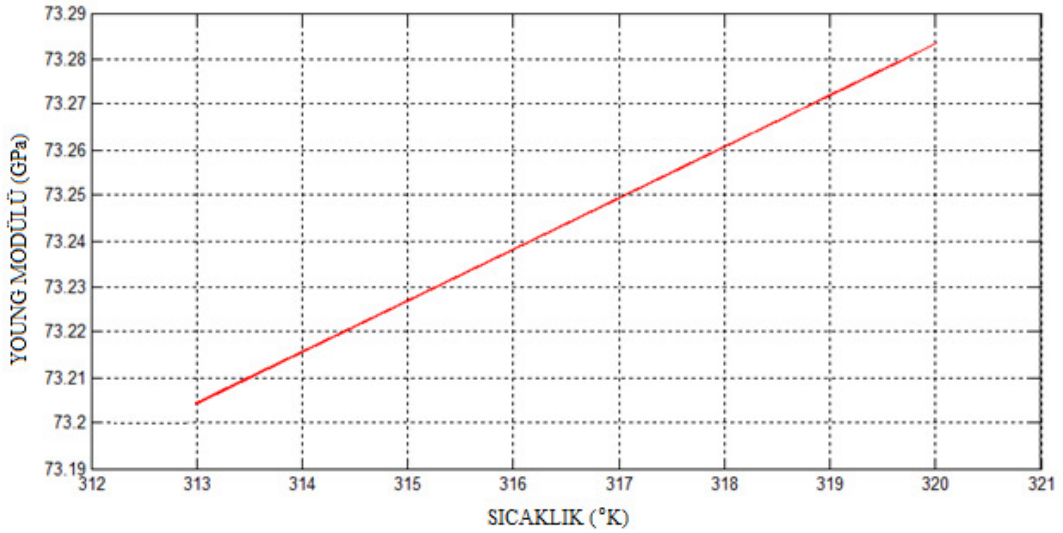
Şekil 4.2. a) Algılayıcı fiber sıcaklık değişimi **b)** Geriye saçılan optik sinyalin Brillouin normalize güç değişimi

Şekil 4.2.a)'da görüldüğü üzere modelde yararlanılan ısıtıcı ünitelerin varlığı nedeniyle ısıtma kapasitelerine bağlı olarak algılayıcı fiber üzerinde sıcaklık tepeleri oluşmuştur. Algılayıcı fiber boyunca ısıtıcı ünitelerin aktif olduğu bu bölgelerde ısıl etkiler arttığından, geriye saçılan optik sinyalin Brillouin gücü değişimlerinde de artışlar elde edilmiştir. Şekil 4.2.b)'de görüldüğü gibi algılayıcı fiberin ısıtıcı ünitelerden geçirildiği bölgelerde elde edilen Brillouin güç değişimleri, algılayıcı fiberin sıcaklık değişimlerine lineer olarak bağlıdır.

Algılayıcı fiber üzerinde 100 m - 115 m aralığında HU1 ısıtıcı ünitesinin yüksek kapasiteli ısıtma etkisine sahip olması nedeniyle en yüksek sıcaklık verilerine bu bölgede ulaşılmıştır. Algılayıcı fiberin bu bölgesinde 113. metrede ısıl etkilere bağlı olarak maksimum 47 °C, ortalamada ise ~ 46,50 °C sıcaklık değeri algılanmıştır. Algılayıcı fiberin HU5 ısıtıcı ünitesinden geçirildiği bölgede (900 m - 915 m aralığında) ünitenin ısıtma kapasitesine bağlı olarak ortalama ~ 45,10 °C sıcaklık tespit edilmiştir. Algılayıcı fiber üzerinde HU2, HU3 ve HU4 ısıtıcı bölgelerinde ortalama sıcaklık değerleri ise sırasıyla, ~ 45,90 °C, ~ 44,50 °C ve ~ 44,80 °C olarak elde edilmiştir.

Şekil 4.2’de verildiği gibi algılayıcı fiberin en yüksek sıcaklık değerine ulaştığı kablo üzerinde 113. metrede Brillouin normalize güç değişimi % 2,525 olarak elde edilmiştir. Normalize güç değişimi algılayıcı fiber boyunca maksimum sıcaklık tepeleri dışındaki bölgelerin sıcaklık verileri (~ 40 °C) referans alınarak elde edilmiştir. Brillouin gücün normalize edilebilmesi için modelde yer alan 95/5 yönlü kuplör çıkışında elde edilen Rayleigh sinyali kullanılmaktadır.

Optik fiber çekirdeğinin Young modülünün sıcaklıkla değişimi Şekil 4.3’te gösterilmiştir. Algılayıcı fiberde maksimumu sıcaklık düzeyine ulaşılan beş bölge dışında ortalama sıcaklık ~ 40 °C (~ 313 °K) olduğundan fiber çekirdeğinin Young modülü bu bölgelerde ~ 73,205 GPa değerine ulaşmıştır.



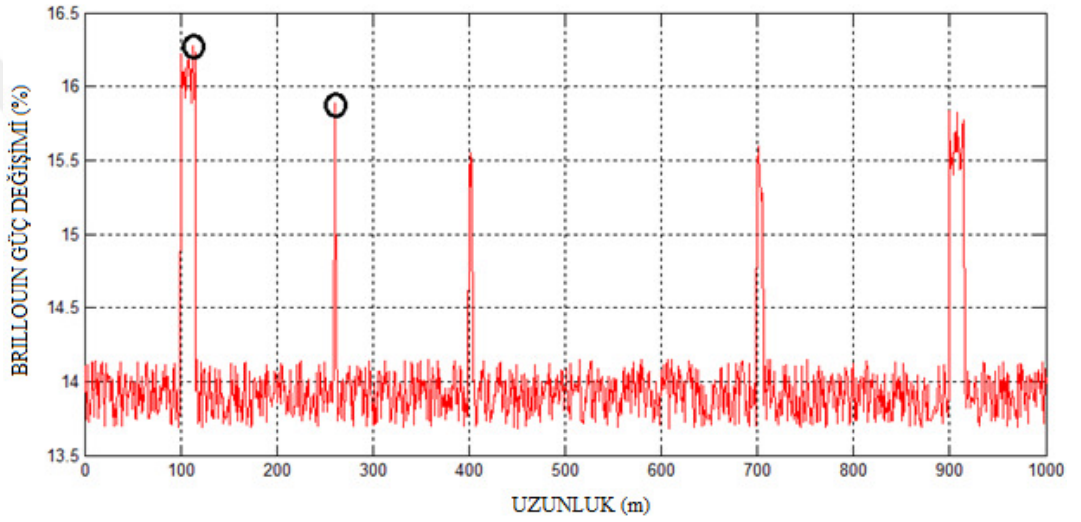
Şekil 4.3. Algılayıcı fiber çekirdeğinin Young modülünün sıcaklıkla değişimi

Algılayıcı fiber boyunca en yüksek Young modülü değeri, modülün ısıl etkilere doğrusal bağımlılığı nedeniyle 113. metrede 73,283 GPa olarak elde edilmiştir. Şekil 4.3’ten açık bir biçimde görüldüğü gibi algılayıcı fiberin 1 °C sıcaklık değişimine karşılık, çekirdeğin Young modülünde ~ 11 MPa değerinde değişim olmaktadır.

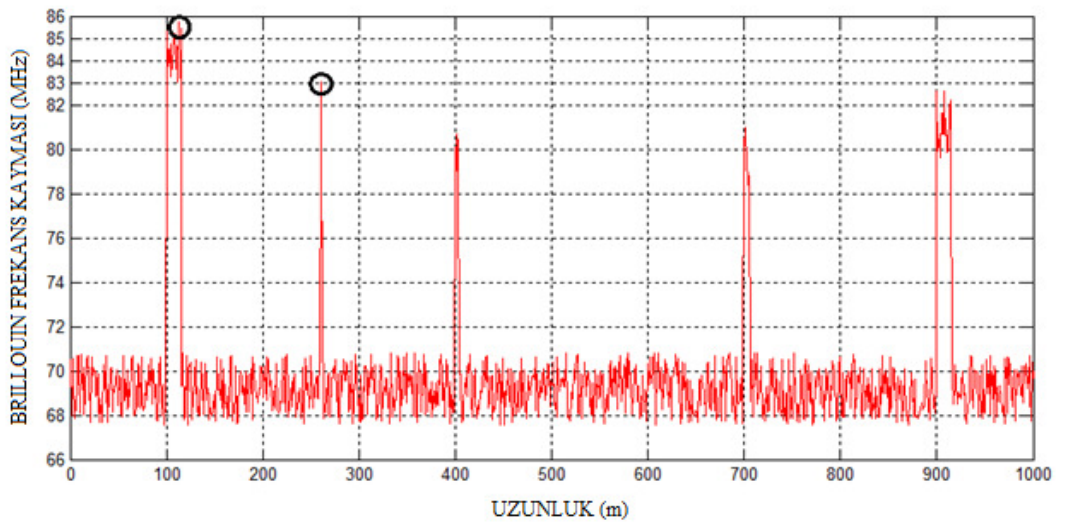
Şekil 4.4’te fiber boyunca Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kaymasına ilişkin Matlab benzetimleri verilmiştir. Her iki benzetimden Brillouin güç değişimi ile frekans kayması arasında şekilsel olarak bir benzerlik olduğu açık bir biçimde görülmektedir.

Bunun nedeni her iki değişimin ısı etkilerinin meydana getirdiği Young modülü değişimlerinden lineer olarak etkilenmesidir. Şekil 4.4.a'da verilmiş olan benzetimde Brillouin güç değişimi maksimum değerini 113. metrede Young modülünün en yüksek değerini aldığı noktada % 16,273 değeri ile almıştır.

Kablo üzerinde en yüksek ikinci değer ise 2. bölgede 261. metrede % 15,887 ile elde edilmiştir. Her iki noktada Brillouin frekans kayması sırasıyla 85,720 MHz ve 83,012 MHz olarak elde edilmiştir.



a)

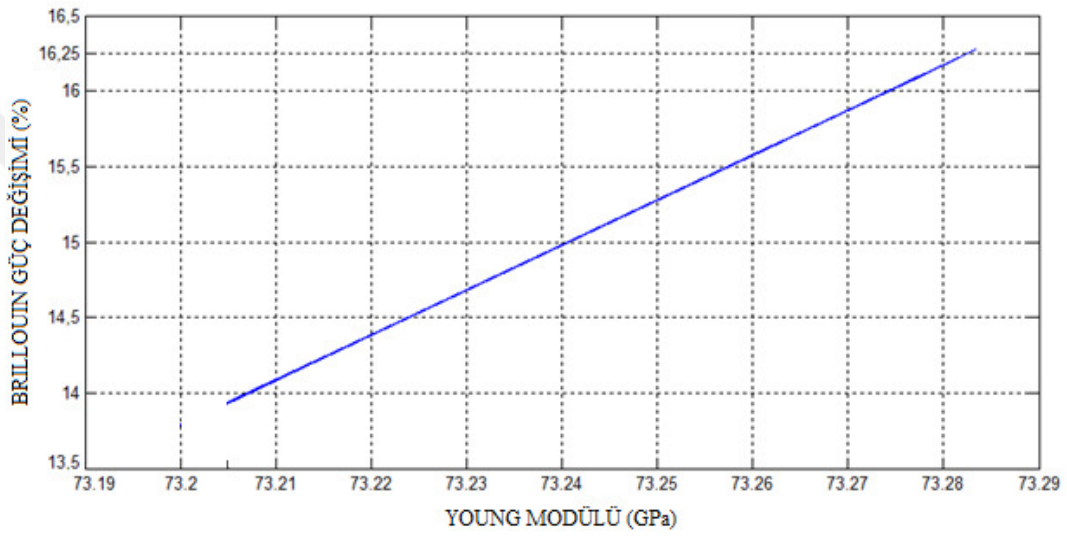


b)

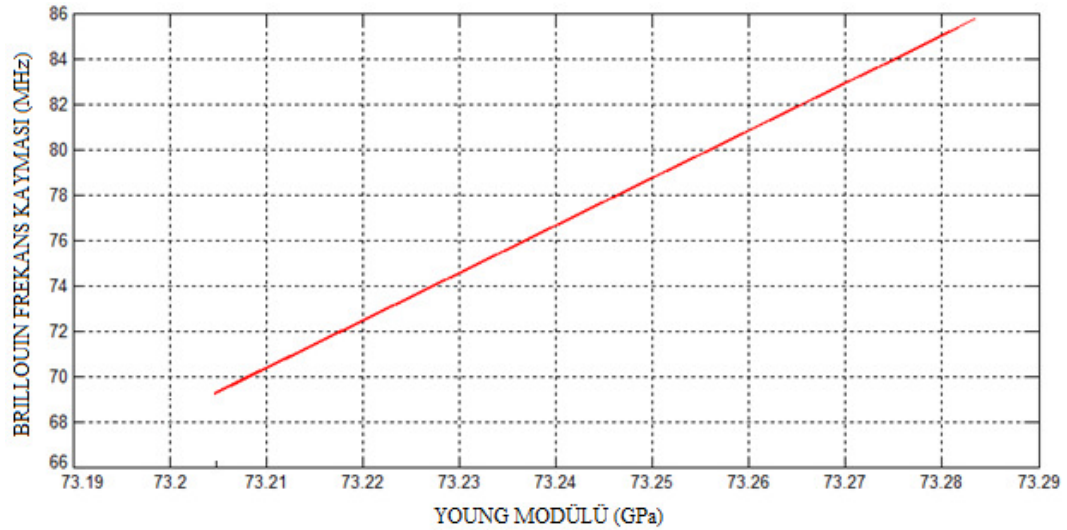
Şekil 4.4. Algılayıcı fiber boyunca a) Brillouin güç değişimi ve b) Brillouin frekans kayması

Eşitlikler (3.51) ve (3.52)'de verildiği gibi Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kayması değişimleri, fiber çekirdeğinin Young modülü değişimlerinden lineer olarak etkilenmektedir. Bu yüzden, algılayıcı fiber çekirdeğinin Young modülü yükseldiğinde Brillouin güç ve frekans kayması artmakta, düştüğünde ise Brillouin parametrelerinde azalma olmaktadır.

Algılayıcı fiber çekirdeğinin Young modülü değişimlerine bağlı olarak Brillouin parametrelerindeki değişim Şekil 4.5'te verilmiştir.



a)



b)

Şekil 4.5. a) Brillouin güç değişiminin ve b) Brillouin frekans kaymasının Young modülü bağımlılığı

Şekilden de açık bir biçimde görüldüğü gibi algılayıcı fiber çekirdeğinin Young modülündeki 1 GPa değişime karşılık, Brillouin güç değişiminde ~ % 30 değerinde, Brillouin frekans kaymasında ise 210 MHz değerinde değişim elde edilmiştir. Diğer bir ifadeyle Brillouin güç değişiminin ve Brillouin frekans kaymasının Young modülü bağımlılıkları sırasıyla, 30 %/GPa and 210 MHz/GPa olarak elde edilmiştir.

Algılayıcı optik fiberin ısıtıcı ünitelerden geçirildiği bölgelerde elde edilen Young modülü ile karşılık gelen Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kayması ortalama parametre değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Young modülü değişimine karşılık elde edilen ortalama Brillouin parametresi değerleri

Algılayıcı Fiber Bölgeleri	Young Modülü (GPa)	Brillouin Güç Değişimi (%)	Brillouin Frekans Kayması (MHz)
100 m – 115 m	73,277	16,08	84,60
260 m – 261 m	73,270	15,87	82,92
400 m – 403 m	73,255	15,43	79,78
700 m – 705 m	73,260	15,58	80,83
900 m – 915 m	73,262	15,64	81,25

Çizelge 4.2’den açık bir biçimde görüldüğü gibi Brillouin parametreleri ile Young modülü arasında lineer bir ilişki bulunmaktadır. Algılayıcı fiberin ısıtıcı ünitelerden geçirildiği bu bölgelerde eşitlikler (3.53) ve (3.54) kullanılarak Brillouin frekans kayması Young modülü duyarlılığının, Brillouin güç değişimi Young modülü duyarlılığından ~ 1,35 kat daha büyük olduğu tespit edilmiştir.

Algılama sisteminin performansı açısından bakıldığında, algılayıcı fiber boyunca sıcaklık ve ısıl gerginlik çözünürlüklerini belirlemek çok önemlidir. Yüksek çözünürlüklü olarak ısıl verilerin elde edilmesi sistemin algılama performansının o derece yüksek olduğu anlamına gelmektedir.

Algılayıcı fiber boyunca elde edilen sıcaklık ve ısıl gerginlik oluşumları için sıcaklık ve ısıl gerginlik çözünürlükleri sırasıyla $\delta_T = [|K_{\epsilon}^P \delta V| + |K_{\epsilon}^V \delta P|] / [|K_{\epsilon}^V K_T^P - K_{\epsilon}^P K_T^V|]$ ve

$\delta_\epsilon = [|K_T^P \delta V| + |K_T^V \delta P|] / [|K_\epsilon^V K_T^P - K_\epsilon^P K_T^V|]$ eşiklikleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada; δ_T ve δ_ϵ sırasıyla, algılama sisteminin sıcaklık ve ısıl gerginlik çözünürlüğünü δP ve δV ise Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kayması üzerinde meydana gelen RMS gürültüsünü ifade etmektedir (Alahbabi 2005).

Şekil 4.4'te verilmiş olan Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kaymasına ait benzetimlerden Brillouin güç değişimi ve frekans kayması üzerinde meydana gelen RMS gürültüsü ortalama değerleri sırasıyla, $\delta P = \% 0,225$ ve $\delta V = 1,40 \text{ MHz}$ olarak elde edilmiştir. δP ve δV ile Çizelge 3.2'de verilmiş olan Brillouin parametreleri sıcaklık ve ısıl gerginlik katsayıları kullanılarak algılayıcı fiber boyunca Brillouin güç değişimi ve Young modülünün birleşik etkisini esas alan dağıntık algılama sisteminin sıcaklık ve ısıl gerginlik çözünürlükleri sırasıyla, $\sim 0,7 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $\sim 40 \text{ }\mu\epsilon$ olarak hesaplanmıştır.

4.2.2. 154 kV Yüksek gerilim yeraltı kablosuna entegre edilmiş algılayıcı fiber için Young ve Shear modüllerinin sıcaklık ve ısıl gerginlik duyarlılıklarının elde edilmesi

Yüksek gerilim havai hat faz iletkenleri ile özellikle XLPE yalıtkanlı bakır ve alüminyum iletkenli yüksek gerilim kabloları çalışmaları sırasında iletken üzerinden akan yük akımındaki değişimlere bağlı olarak yüksek ısıl oluşumlara maruz kalırlar. Bu kablolarda kablo alt katmanlarında meydana gelen sıcaklık ve sıcaklık kaynaklı ısıl gerginlik oluşumları, kablo yalıtkanında yaşlanma sürecinin hızlanmasına ve dolayısıyla kablo ömrünün kısalmasına neden olabilmektedir.

Farklı özellikteki malzemelerin ortamdaki ısıl değişimlere gösterdiği davranışlar birbirinden farklı olduğundan yüksek gerilim kablolarını oluşturan kablo iletkeni, ekran telleri ve metal zırh malzemesi gibi kablo alt katmanları ortamdaki ısıl oluşumlara bağlı olarak farklı hızlarda büzülme ve genişleme özellikleri gösterirler. Bu durum yalıtkan üzerinde boşluklar oluşturarak dielektrik alan etkisi ile meydana gelen kısmi boşalmalara neden olmakta ve kablonun akım taşıma kapasitesini önemli oranda sınırlandırmaktadır (Heinhold 1999). Bu yönüyle değerlendirildiğinde ısıl oluşumların neden olduğu olumsuz durumların ve oluşması muhtemel istenmeyen sınırlılıkların önceden tespit edilerek çözülmesi önemli bir husustur.

Silika fiberin Young ve Shear modülü gibi karakteristik malzeme özellikleri ortamın ısıl davranışından direk olarak etkilendiğinden (De Souza 1999) modüllerin ısıl bağımlılıklarından yararlanılarak yüksek gerilim kablolarının çalışma süreleri ve kablonun verimliliği için belirleyici olan sıcaklık ve ısıl gerginlik oluşumlarını ölçmek ve kontrol altında tutmak mümkün olabilmektedir. Ayrıca ısıl etkilerin analizi ve doğru değerlendirilmesiyle malzemeye ait sertlik ve kırılma gibi spesifik özellikler belirlenebilmektedir.

Literatürde saçılma mekanizmalarını esas alan çok sayıda optik fiberli dağınık algılamalı sistem bulunmaktadır. Brillouin saçılmasını esas alan algılama sistemlerine ilişkin olarak ise kullanılan lazer kaynağın çalışma dalga boyuna göre farklı frekans ve

dalga boyunda optik sinyallerin kullanıldığı çalışmalar mevcuttur (Culverhouse ve ark. 1989, Parker ve ark. 1998, Lecoeuche ve ark. 2000).

Son yıllarda gerçekleştirilen optik fiberli dağınık algılamalı sistemlerde optik verici olarak 1550 nm dalgaboyuna sahip lazerler kullanılmaktadır. Algılamanın kilometrelerle ifade edildiği uzun mesafelerde yapıldığı uygulamalar için sinyal sayıflamasının en düşük seviyede olması nedeniyle 1550 nm dalgaboyu tercih edilmektedir. Böylelikle sinyal zayıflamasının minimum olması ve geriye saçılan optik sinyalin Brillouin Stokes ve anti-Stokes bileşenlerinin güç seviyelerinin maksimum olması sağlanarak sistemin ısı algılama performansı yükseltilebilmektedir.

Bu çalışmada algılamaya ilişkin benzetimlerin elde edilmesinde Şekil 4.1’de verilmiş olan dağınık sıcaklık ve ısı gerginlik algılamalı sistem modelinden yararlanılmıştır. Bu modelde, önceki bölümlerde anlatıldığı gibi geriye saçılan sinyalin algılayıcı fiber uzunluğu boyunca Brillouin güç değişimi profilinden ortamın sıcaklık bilgilerine ulaşılmış, fiber çekirdeğine ait Young modülü değişimlerinden ise ortamdaki ısı gerginlik oluşumları elde edilmiştir. Bu verilere bağlı olarak da Young ve Shear modüllerinin ısı bağımlılıkları ve ısı duyarlılıkları teorik olarak elde edilerek benzetim koşulları altında kablo uzunluğu boyunca simüle edilmiştir.

Benzetimlerde kullanılan yüksek gerilim kablosu XLPE yalıtkanlı, 89/154 kV değerinde ve iletken kesiti 630 mm² olan 2 km uzunluğunda bir kablodur. Algılama amaçlı olarak kullanılan algılayıcı fiber ise manyetik olmayan metalik tüpler içerisinde kabloya entegre edilmiştir. Yüksek gerilim kablosu ortalama sıcaklık değeri 20 °C olan ve 1,5 m derinliğindeki kumlu toprak altına serilmiş olarak kabul edilmiştir. Young ve Shear modüllerinin ısı duyarlılıklarının elde edildiği benzetimler, Matlab program kodları kullanılarak aşağıda verilmiş olan koşullar esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Matlab program kodları EK 2’de verilmiştir.

Algılayıcı fiber boyunca Young ve Shear modüllerine ilişkin profillerin elde edilmesinde yüksek gerilim kablosu ve fiber parametreleri için aşağıda verilmiş olan benzetim koşulları esas alınmıştır.

➤ Algılayıcı fiberin entegre edildiği 89/154 kV XLPE yalıtkanlı yüksek gerilim kablosu aşağıda verildiği gibi farklı boy ve ölçülerde PVC borulardan geçirilmektedir.

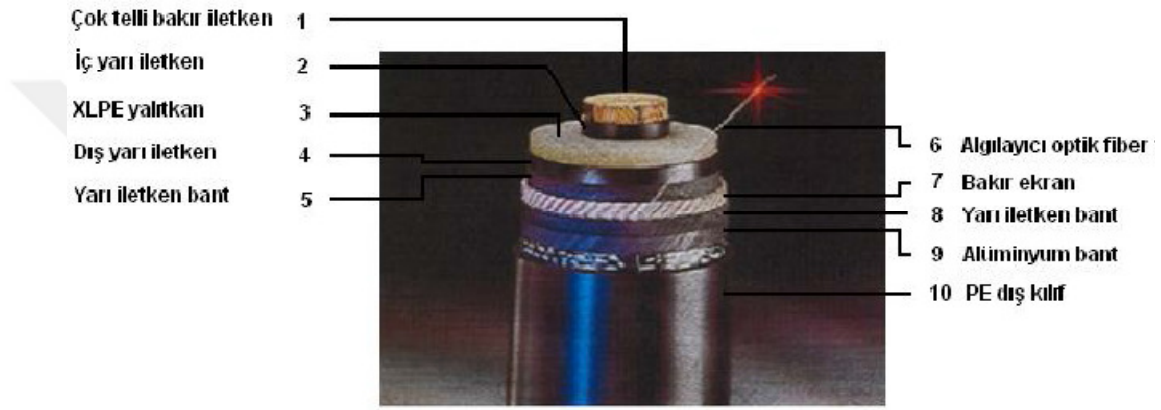
- Yüksek gerilim kablosu 300 m - 400 m aralığında 100 m uzunluklu ve 145 mm x 5 mm (dış çap x et kalınlığı) ölçüsünde PVC boru içerisinden,
- 700 m - 735 m arasında ise 35 m uzunluğunda 145 mm x 5 mm ölçüsünde PVC boru içerisinden geçirilmektedir.
- Kablo 1200 m - 1320 m aralığında 120 m uzunluklu ve 155 mm x 5 mm ölçüsünde PVC boru içerisinden geçirilmektedir. Kablonun 1240 m - 1280 m bölgesi 180 mm x 7 mm ebatlı ve aynı özellikteki başka bir PVC boru içerisinden geçirilmektedir.
- Kablo aynı özellikteki başka bir yüksek gerilim kablosuna 1700. metrede ek yapılarak 2000. metrede enerji dağıtım istasyonuna ulaşmaktadır.
- Hat boyunca kablo üzerine etki eden harici dış gerginlikler ihmal edilmektedir.

➤ Algılayıcı fiber parametreleri aşağıda verilmiştir.

- Algılayıcı optik fiberin uzunluğu: $L = 2000$ m
- Lazer kaynağının fibere pompaladığı sinyalin maksimum gücü: $P_0 = 2,2$ W
- Sinyalin dalga boyu: $\lambda_0 = 1550$ nm
- Sinyalin darbe süresi: $\tau = 20$ ns
- Algılayıcı optik fiberin çekirdek kırılma indisi: $n_1 = 1,50$
- Algılayıcı optik fiberin kılıf kırılma indisi: $n_2 = 1,48$
- Algılayıcı optik fiberin yakalama katsayısı: $S = 0,0066$
- Işığın boşluktaki hızı: $c = 3 \times 10^8$ m/s
- Uzamsal çözünürlük: $l = c\tau/2n_1 = 2$ m
- Algılayıcı fiber üzerinde ölçüm alınan nokta sayısı: $R = L/l = 1000$ nokta
- Brillouin güç değişiminin sıcaklık katsayısı: $K_T^P = 0,36 \pm 0,030$ %/°K
- Işığın algılayıcı fiber içerisinde ilerleme hızı: $v_g = c/n_1 = 2 \times 10^8$ m/s
- Fiber içerisinde meydana gelen akustik dalga hızı: $v_a = 5960$ m/s
- Foto elastik (Pockel) katsayı: $p = 0,286$
- Silika fiberin yoğunluğu: $\rho = 2330$ kg/m³

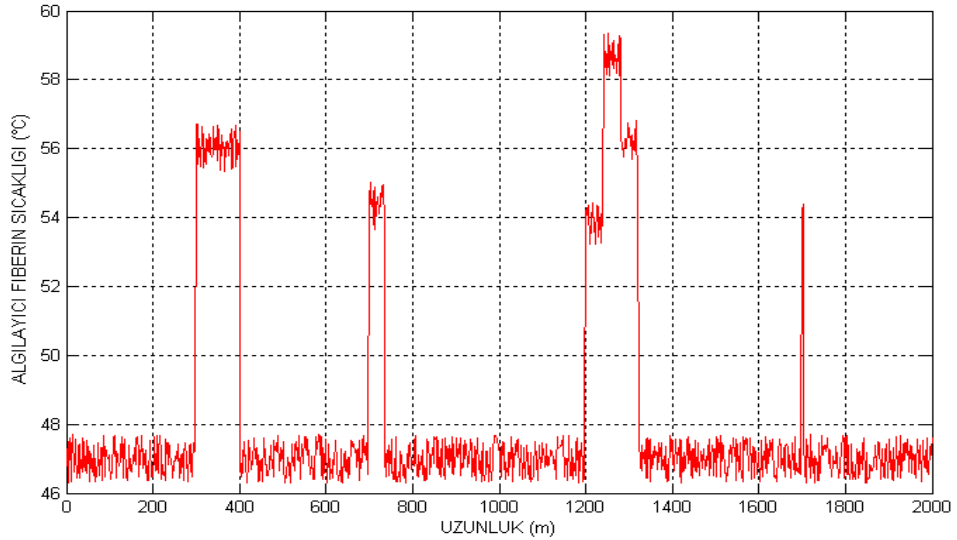
- Fiberin fiktif (denge) sıcaklığı: $T_f = 1950 \text{ }^\circ\text{K}$
- Silika fiberin fiktif sıcaklıkta izotermal sıkıştırılabilirlik katsayısı:
 $\beta_T = 7 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$
- Algılayıcı fiber ile iletken arasındaki sıcaklık farkı için sıcaklık düzeltme faktörü:
 $\Delta T = 32^\circ\text{C}$.

Algılayıcı fiberin entegre edildiği XLPE yalıtımlı 89/154 kV yüksek gerilim kablosu Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6. XLPE yalıtımlı 89/154 kV yüksek gerilim kablosu gösterimi

Yüksek gerilim kablo uzunluğu boyunca algılayıcı fiber üzerinde meydana gelen sıcaklık oluşumlarına ilişkin profil Şekil 4.7’de verilmiştir.

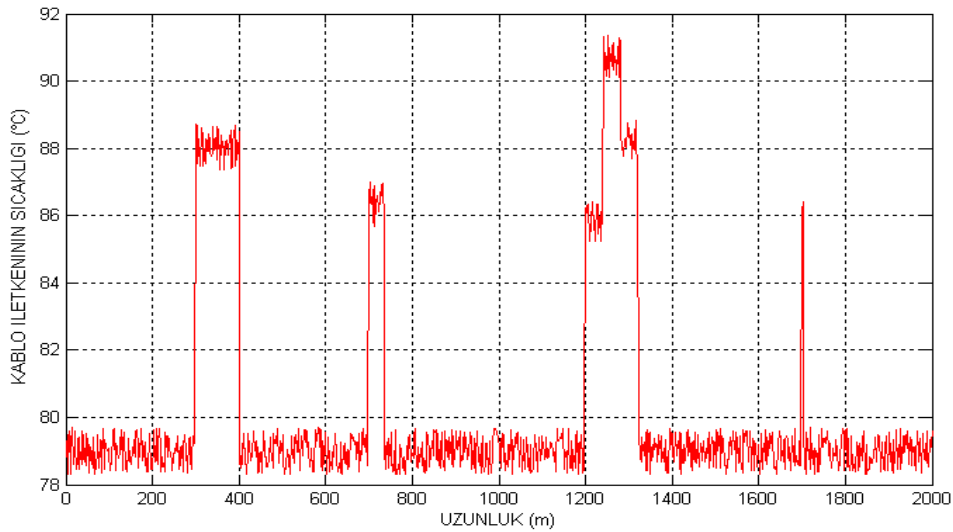


Şekil 4.7. Algılayıcı fiber uzunluğu boyunca sıcaklık profili

Şekil 4.7’den de görüldüğü gibi algılayıcı fiberin sıcaklığı 47 °C - 59 °C aralığında değişmektedir. Yüksek gerilim kablosunun 180 mm x 7 mm ebatlı PVC boru içerisinden geçirildiği bölgede maksimum sıcaklık değerine 59,34 °C ile ulaşılmıştır.

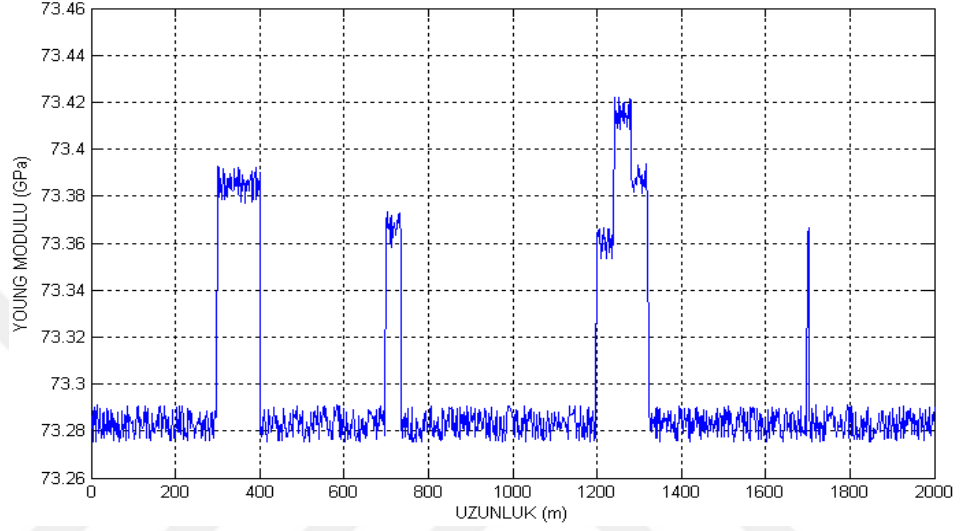
Şekil 4.6’da gösterildiği gibi algılayıcı optik fiber, bakır ekran telleri arasında yer alan ve manyetik olmayan metalik özellikli tüp içerisine yerleştirilmek suretiyle yüksek gerilim kablosuna entegre edilmiştir. Deneysel uygulamalara göre bakır iletkeni ile algılayıcı fiber arasında yaklaşık olarak 30 °C - 35 °C sıcaklık farkı bulunmaktadır. Bu fark kablo yalıtkanının, koruyucu kılıfın, metal tüpün ve iletkenin üretildiği malzemelerin ısıl geçirgenliklerine, iletkenden akan akıma ve kablonun rejimde kalma süresine, kablonun serildiği toprak sıcaklığına ve toprağın ısıl geçirgenliğine, toprak nem durumuna ve dış ortam sıcaklığı gibi faktörlere bağlıdır (Ichino ve ark. 1996).

Yüksek gerilim kablosu boyunca sıcaklık artışları en yüksek değerlerine ~ 88 °C ile kablonun 300 m - 400 m aralığında ve ~ 90,6 °C ile kablonun 1240 m - 1280 m aralığında PVC boruların içerisinden geçirildiği bölgelerde ulaşmıştır. Kablo üzerinde 300 m - 400 m aralığında 300. metrede ulaşılan sıcaklık değeri 88,72 °C iken kablonun 700 m - 735 m aralığında ve aynı özellikli başka bir kablo ile kesiştiği 1700. metrede ulaşılan sıcaklıklar sırasıyla, 86,9 °C ve 86,4 °C olarak elde edilmiştir. Yüksek gerilim kablo iletkeninin sıcaklık profili Şekil 4.8’de verilmiştir.



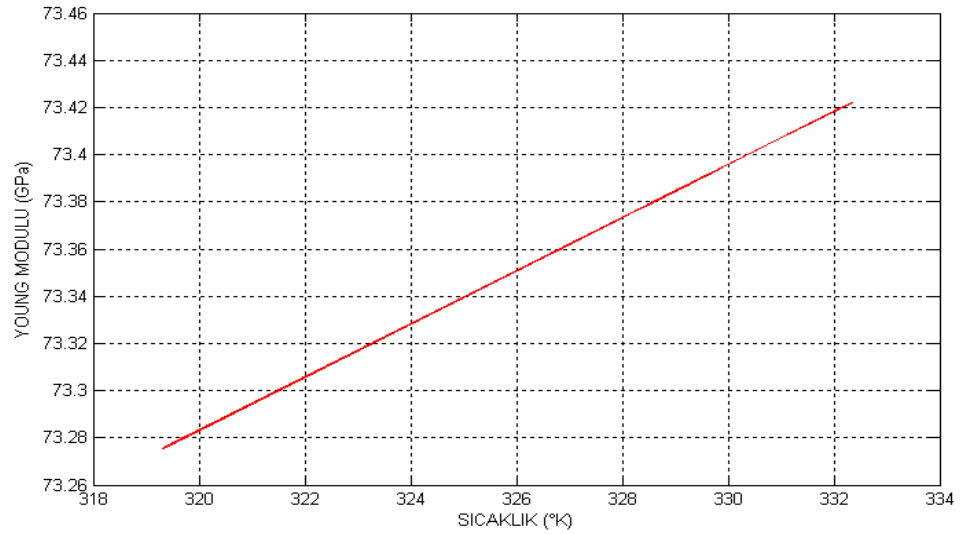
Şekil 4.8. Yüksek gerilim kablosu boyunca kablo iletkeninin sıcaklık profili

Kablo uzunluğu boyunca meydana gelen sıcaklık oluşumlarına bağlı olarak algılayıcı fiber çekirdeğinin Young modülündeki değişimler Şekil 4.9'da gösterildiği gibi elde edilmiştir. Young modülü en yüksek değerini 73,42 GPa değerıyla XLPE yalıtkanlı yüksek gerilim kablosu için maksimum çalışma sıcaklığının (90 °C) aşıldığı 1240 m - 1280 m aralığında almıştır.

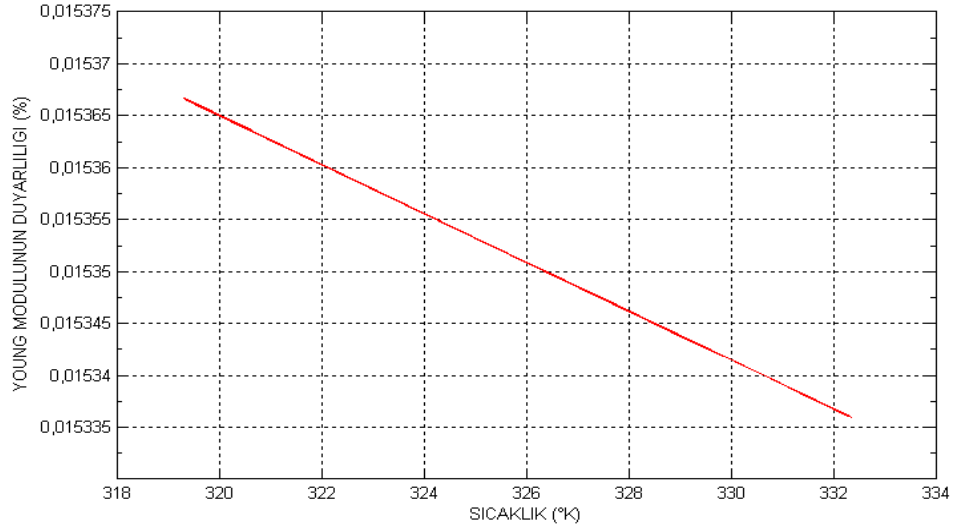


Şekil 4.9. Algılayıcı fiber boyunca meydana gelen Young modülü değişimi

Algılayıcı fiber çekirdeği Young modülünün sıcaklık bağımlılığı ve sıcaklık duyarlılığı (sıcaklıkla yüzdesel değişimi) sırasıyla, Şekil 4.10.a ve Şekil 4.10.b'de verilmiştir.



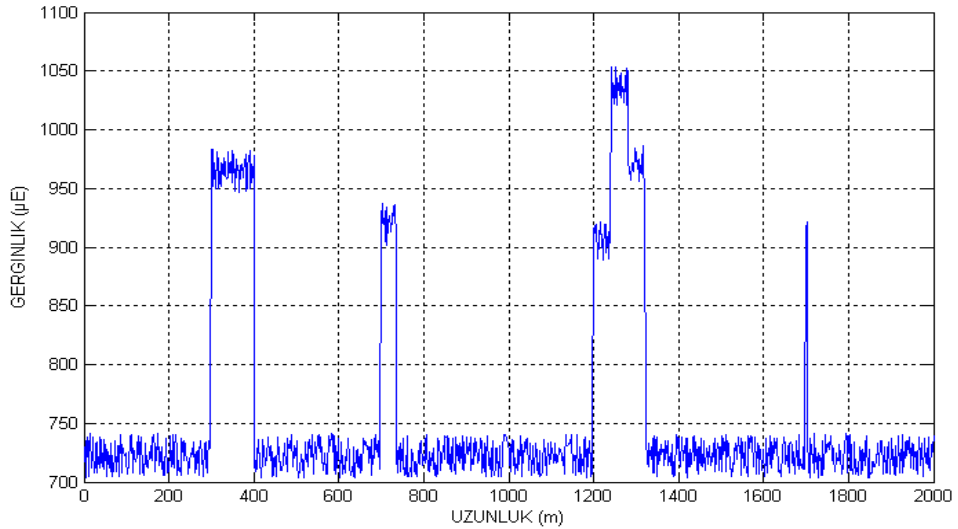
(a)



(b)

Şekil 4.10. Young modülünün a) sıcaklık bağımlılığı ve b) sıcaklık duyarlılığı (sıcaklıkla yüzdesel değişimi)

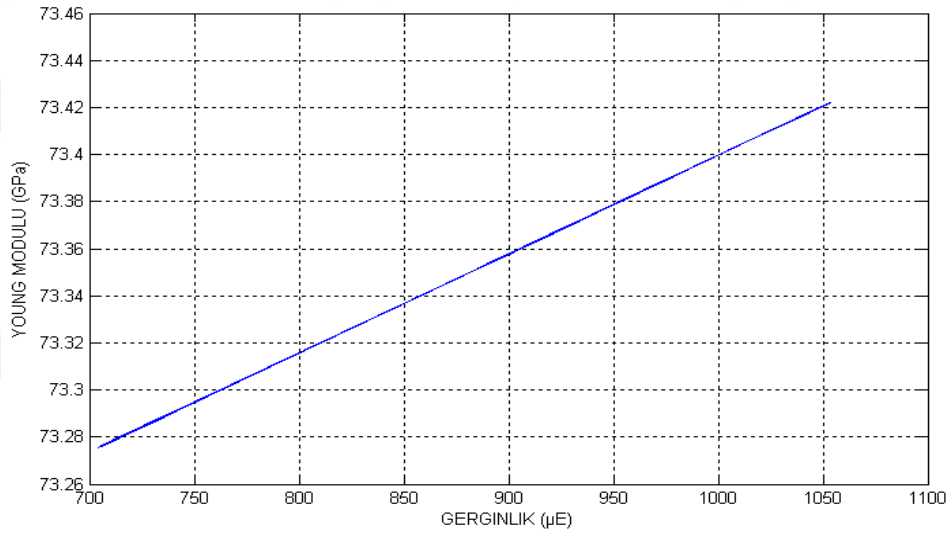
Young modülü maksimum değerine sıcaklığın en yüksek olduğu noktada ulaşırken aynı noktada sıcaklık duyarlılığı veya sıcaklıkla yüzdesel değişimi minimum değerini almıştır. Modülün sıcaklık duyarlılıkları 320 °K, 326 °K ve 332 °K sıcaklık değerleri için sırasıyla, $15,365 \times 10^{-3}$, $15,351 \times 10^{-3}$ ve $15,337 \times 10^{-3}$ olarak elde edilmiştir. Algılayıcı fiberin 320 °K- 332 °K aralığında Young modülünün sıcaklıkla değişimi $1,126 \times 10^{-2}$ GPa/°K, sıcaklık duyarlılığı ise $-2,33 \times 10^{-6}$ %/°K değerini almıştır. Şekil 4.11’de kablo boyunca meydana gelen ısı gerginlik oluşumları gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Algılayıcı fiber boyunca sıcaklık kaynaklı gerginlik oluşumları

Algılayıcı fiber uzunluğu boyunca meydana gelen gerginlik oluşumları en yüksek değerini 1054 $\mu\epsilon$ ile 1240 m - 1280 m aralığında almıştır. Bu aralıkta kablo 180 mm x 7 mm ölçüsünde bir PVC boru içerisinde geçirilmektedir. Aynı özellikli iki yüksek gerilim kablosunun kesiştiği 1700. metredeyse sıcaklık kaynaklı gerginlik değeri 921 $\mu\epsilon$ olarak elde edilmiştir.

Young modülü ısıl oluşumlara bağlı olarak algılayıcı fiberde meydana gelen ve fiberin algıladığı gerginlik oluşumları ile lineer olarak değişim göstermektedir. Young modülünün gerginlik bağımlılığı Şekil 4.12’de verilmiştir.

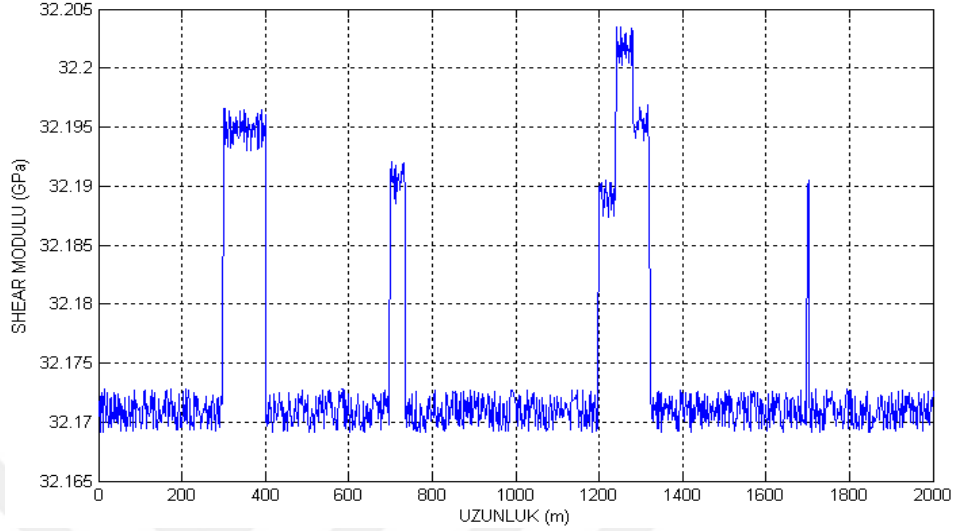


Şekil 4.12. Young modülünün gerginlik bağımlılığı

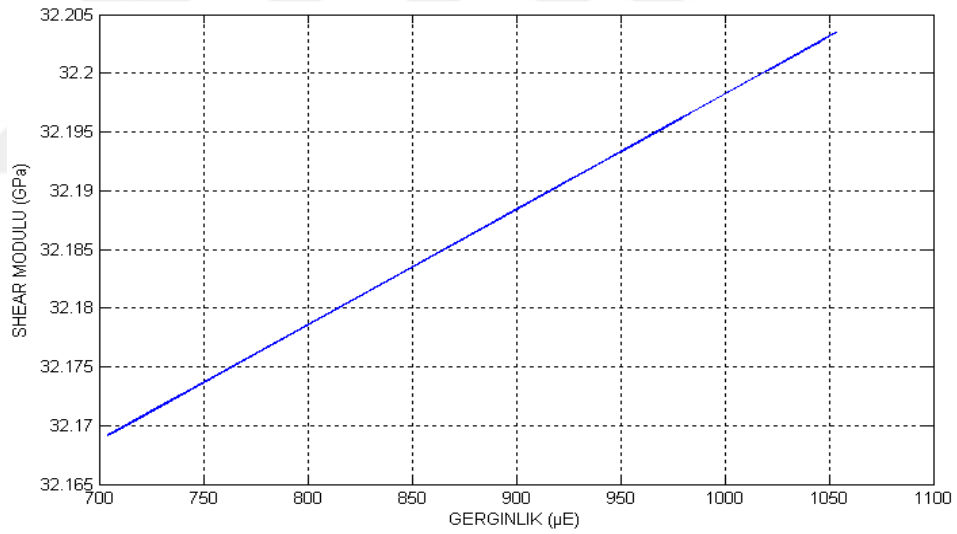
Şekil 4.12’den görüldüğü gibi Young modülünde 1 GPa değerinde bir değişim elde etmek için gerginlikte 2382 $\mu\epsilon$ değerinde bir değişim gerekmektedir. Başka bir deyişle Young modülünün gerginlik bağımlılığı veya gerginlikle değişimi $4,20 \times 10^{-4}$ GPa/ $\mu\epsilon$ olarak ifade edilebilir.

Şekil 4.13’te 2 km uzunluğundaki yüksek gerilim kablosu boyunca Shear modülü değişimi ve modülün gerginlik bağımlılığı verilmiştir. Modül gerginlikle lineer olarak değişim göstermekte olup en yüksek değerine kablo üzerinde 1250. metrede 32,203 GPa ile ulaşmıştır. Gerginlik ise bu noktada 1054 $\mu\epsilon$ olarak elde edilmiştir.

Şekil 4.13.b kullanılarak Shear modülünün gerginlik bağımlılığı, $9,82 \times 10^{-5} \text{ GPa}/\mu\epsilon$ olarak hesaplanmaktadır.



(a)



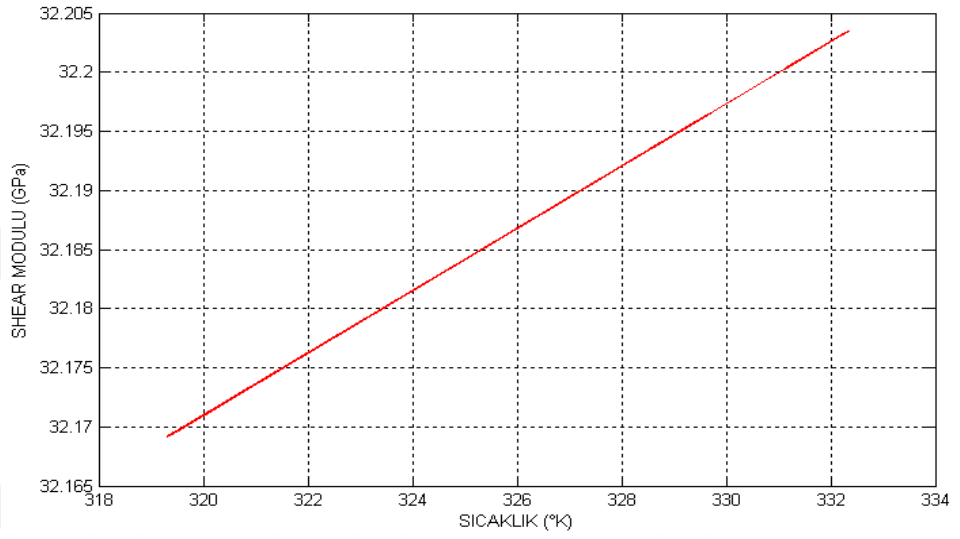
(b)

Şekil 4.13. a) Shear modülünün yüksek gerilim kablosu boyunca değişimi ve **b)** Shear modülünün gerginlik bağımlılığı

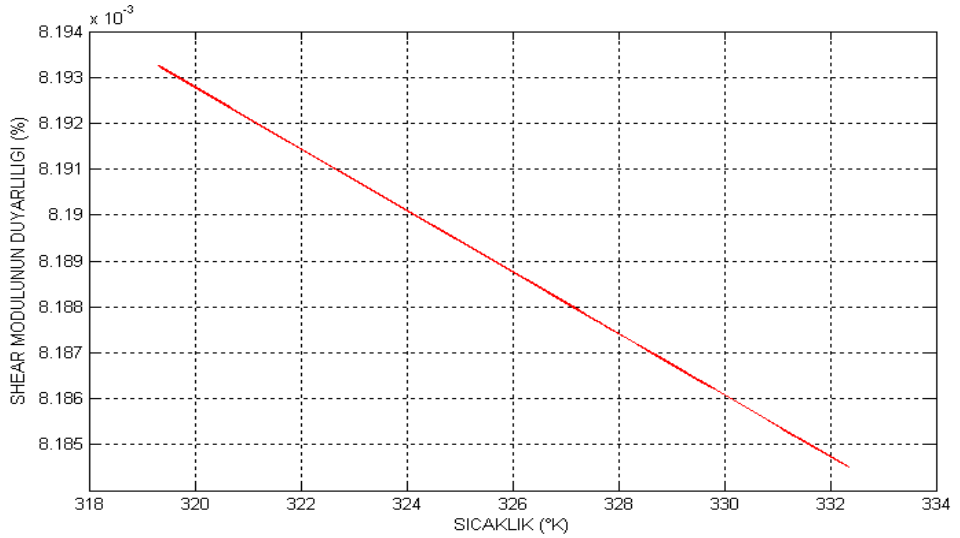
Shear modülünün sıcaklık bağımlılığı ve sıcaklık duyarlılığı (sıcaklıkla yüzdesel değişimi) Şekil 4.14'te verilmiştir. Modülün sıcaklık bağımlılığı sıcaklık artışı ile lineer olarak artarken, sıcaklık duyarlılığı azalma eğilimindedir. Sıcaklık duyarlılıkları $320 \text{ }^\circ\text{K}$,

326 °K ve 332 °K değerleri için sırasıyla, $8,193 \times 10^{-3}$, $8,189 \times 10^{-3}$ ve $8,185 \times 10^{-3}$ olarak elde edilmiştir.

Şekil 4.14'te verilen doğrular için doğru denklemleri yazılarak Shear modülünün sıcaklık bağımlılığı ve sıcaklık duyarlılığı (sıcaklıkla yüzdesel değişimi) sırasıyla, $2,636 \times 10^{-3}$ GPa/°K ve $- 6,67 \times 10^{-7}$ %/°K olarak elde edilmiştir.



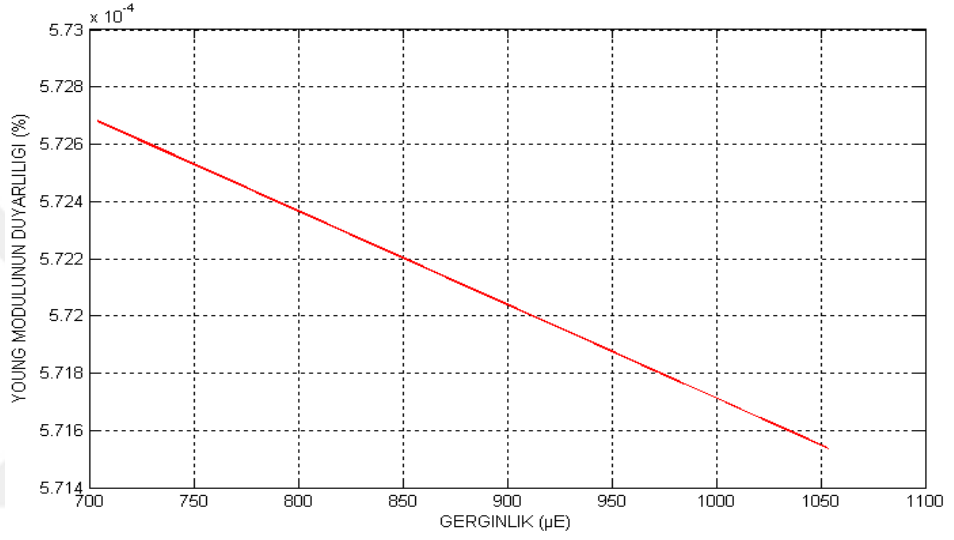
(a)



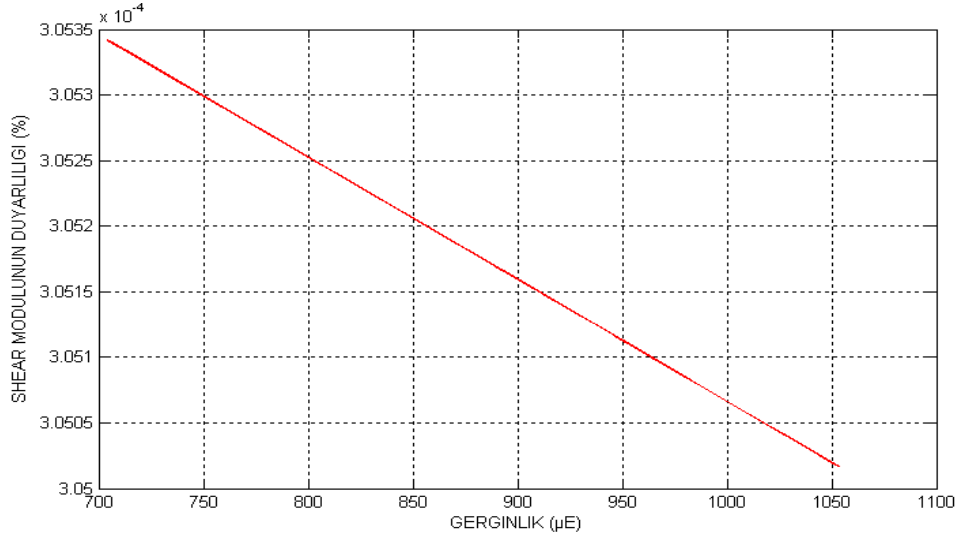
(b)

Şekil 4.14. Shear modülünün a) sıcaklık bağımlılığı ve b) sıcaklık duyarlılığı (sıcaklıkla yüzdesel değişimi)

Young ve Shear modülünün gerginlik duyarlılıkları (gerginlikle yüzdesel değişimleri) Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Her iki modülün gerginlik duyarlılıkları algılayıcı fiberin $722 \mu\epsilon - 1044 \mu\epsilon$ aralığındaki gerginlik değişimlerine karşılık sırasıyla, $- 3,25 \times 10^{-9} \%/ \mu\epsilon$ ve $- 9,35 \times 10^{-10} \%/ \mu\epsilon$ olarak bulunmuştur. XLPE yalıtkanlı yüksek gerilim yer altı kabloları için maksimum çalışma sıcaklığının aşıldığı aralıkta modüllerin gerginlik duyarlılıkları sırasıyla, $\% 5,7154 \times 10^{-4}$ ve $\% 3,0502 \times 10^{-4}$ olarak elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.15. a) Young modülünün gerginlik duyarlılığı (gerginlikle yüzdesel değişimi) ve **b)** Shear modülünün gerginlik duyarlılığı (gerginlikle yüzdesel değişimi)

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, optik fiberli dağınk algılamalı sistemlerde kullanılan ve çoğunlukla Raman ve Brillouin saçılma mekanizmalarını esas alan yöntemlerden farklı olarak, Brillouin saçılma mekanizması ile algılayıcı fiber çekirdeğinin özellikle Young modülünün birleşik etkisini esas alan yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem temelde BOTDR ölçüm tekniğini esas almakta olup ortamdaki sıcaklık ve sıcaklık kaynaklı gerginlik oluşumlarının eş zamanlı olarak tespitinde fiber malzeme özelliklerinden Young modülünün kullanılması prensibine dayanmaktadır.

Brillouin güç değişimi, Brillouin frekans kayması ve algılayıcı fiber çekirdeğinin Young modülü, Shear modülü ve Poisson oranının sıcaklık ve gerginlik bağımlılıkları bulunmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda bu parametrelerin ısı bağımlılıklarına ilişkin bağımsız çalışmalar olmasına karşılık bu tez çalışması kapsamında verilen dağınk algılama yöntemiyle, bu parametrelerin birbirleriyle olan ilişkileri üzerinden ortamın ısı performansı yorumlanmıştır. Bu bağlamda, oluşturulan kablo modelleri için belirlenen benzetim koşulları altında algılayıcı performansı açısından belirleyici olan Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kaymasının Young modülü bağımlılıkları elde edilerek her iki Brillouin parametresi, Young modülünün fonksiyonu olarak formüle edilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında oluşturulan algılama modeli için algılayıcı fiber çekirdeğinin 40 °C - 47 °C (313 °K - 320 °K) çalışma sıcaklığı aralığında Young modülünün 73,205 GPa - 73,283 GPa aralığında değişimine karşılık, 1 m uzamsal çözünürlükte Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kayması sırasıyla % 13,950 - % 16,273 ve 69,00 MHz - 85,72 MHz aralığında değişmiştir. Algılama sisteminin sıcaklık ve ısı gerginlik çözünürlükleri ise sırasıyla, ~ 0,7 °C ve ~ 40 µε olarak hesaplanmıştır.

Benzetim ve analiz sonuçları esas alındığında 293 °K ve sıfır referans gerginlik altında Brillouin frekans kaymasının Young modülü duyarlılığının, Brillouin güç değişiminin Young modülü duyarlılığından ~ 1,35 kat daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, Young modülü değişimini esas alan dağınk algılamalı sistemlerde Brillouin güç

değişimine kıyasla Brillouin frekans kaymasının daha baskın karakter gösterdiğini ve sistem performansı üzerinde daha belirleyici rol oynadığını ifade etmektedir. Burada Young modülündeki 1 GPa değişim, Brillouin güç değişimi üzerinde ~ % 30 Brillouin frekans kayması üzerinde ise 210 MHz değerinde bir değişim meydana getirmiştir. Başka bir ifadeyle Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kaymasının Young modülü bağımlılıkları sırasıyla, 30 %/GPa ve 210 MHz/GPa olarak elde edilmiştir.

Bu veriler ışığında algılayıcı fiber çekirdeğinin Young modülündeki değişimlerin Brillouin parametreleri üzerinde belirleyici olduğu görülmüştür. Bu bağlamda algılayıcı fiber çekirdeğinin üretimi esnasında çekirdeğin katkılanması, kırılma indisinin ve/veya yoğunluğunun değiştirilmesi gibi ilave proseslerle Young modülünün isteğe göre değiştirilmesi sağlanarak, sıcaklık ve ısıl gerginliklerin dağılık olarak algılandığı sistemlerde algılama performansını değiştirmek ve iyileştirmek mümkün olabilmektedir. Çalışma bu yönüyle ısıl etkilerin meydana geldiği her türlü çevresel ortama uyarlanabilir. Bu açıdan bakıldığında bu çalışma hem Young modülü değişimlerinin algılandığı uygulamalı çalışmalara veri kaynağı olabilmesi hem de bahsedilen ortamlara ilişkin ısıl verilerin eş zamanlı olarak elde edilebilmesiyle algılayıcı performansını belirlemede ve değerlendirmede yararlı bilgiler sunacaktır.

Tez kapsamında ayrıca, algılayıcı fiber çekirdeğinin Young modülü ve Shear modülünün sıcaklık ve ısıl gerginlik duyarlılıkları çalışılmış ve bu bağlamda algılama performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmada algılayıcı fiberin entegre edildiği 154 kV XLPE yalıtkanlı 2 km uzunluklu bir yüksek gerilim kablosu modeli kullanılmıştır. Kablonun rejimde olmasına ve PVC boruların içerisinde geçirildiği benzetim durumları için elde edilen sonuçlara göre, algılayıcı fiberin 320 °K - 332 °K aralığında Young modülü sıcaklık duyarlılığının ($-2,33 \times 10^{-6}\%/^{\circ}\text{K}$) Shear modülü sıcaklık duyarlılığından ($-6,67 \times 10^{-7}\%/^{\circ}\text{K}$) ~ 3,5 kat daha büyük olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra ısıl gerginlik duyarlılıkları sırasıyla Young modülü için $-3,25 \times 10^{-9}\%/ \mu\epsilon$ ve Shear modülü için $-9,35 \times 10^{-10}\%/ \mu\epsilon$ seviyelerinde elde edilmiştir.

Bu sonuçlara göre uzun mesafeli yer altı, denizaltı ve havai hat yüksek gerilim ve orta gerilim enerji nakil hatlarında, hat boyunca sıcaklık ve ısıl gerginlik oluşumlarının eş zamanlı dağılık algılanmasında, algılayıcı fiber çekirdeğinin Young ve Shear modüllerinden yararlanılabilir. Modüllerin ısıl performansları üzerinden algılama sistemi hakkında yorum yapılabilir ve algılama sisteminin entegre edildiği yapılar için yüksek sıcaklık ve gerginlik çözünürlüklerinde ısıl profiller çıkartılabilir. Böylelikle yüksek gerilim kablolarında zamanla ortaya çıkacak olan fiziksel deformasyon, elektriksel kayıplar, ampasite sınırlılıkları ve termo-mekanik oluşumların neden olduğu yalıtkan bozulmaları tespit edilebilecektir.

Bunların yanı sıra oluşturulan modeller için fiber parametrelerinin girildiği bir arayüz üzerinden otomatik olarak simülasyonların kolaylıkla elde edilebildiği Matlab GUI tabanlı bir paket simülasyon programı veya bir simülatör geliştirilebilir. Bu paket program veya simülatör ile tasarlanan ara yüz üzerinden algılayıcı optik fiberin karakteristik özellikleri (fiber kablo boyu, çekirdek ve kılıf kırılma indisleri, yakalama katsayısı, uzamsal çözünürlük, akustik dalga hızı, fiberde ilerleyen ışığın grup hızı), lazer kaynağının algılayıcı fibere pompaladığı sinyalin darbe süresi, sinyalin maksimum gücü, Rayleigh ve Brillouin saçılma katsayıları ve diğer Brillouin güç parametreleri gibi parametrelerin girilmesi ile belirlenen bir model yapısı için simülasyonlar ve analizler otomatik olarak elde edilebilir.

Ayrıca Young ve Shear modüllerinin ısıl duyarlılıklarından yararlanılarak karakteristikleri bilinen uygulama ve deneysel çalışmalar için özellikle köprü, tünel, raylı sistemlerde dahi sistem içerisinde meydana gelen ısıl efektler analiz edilebilir. Dolayısıyla dağılık algılamalı sistemlerin ısıl performanslarını doğru bir biçimde değerlendirmek ve analiz etmek açısından önemli katkılar sağlayacak olan sıcaklık ve ısıl gerginlik verileri, dağılık algılamalı sistem uygulamalarının çalışma alanını genişleterek araştırmacılara daha geniş bir çalışma olanağı sunacaktır.

KAYNAKLAR

- Agrawal, G.P. 1995.** Nonlinear Fiber Optics. 2nd Edition, Academic Press, Boston, USA, 592 pp.
- Alahbabi, M. 2005.** Distributed optical fiber sensors based on the coherent detection of spontaneous Brillouin scattering, *Ph.D. Dissertation*, University of Southampton, UK.
- Alahbabi, M.N., Cho Y.T., Newson T.P. 2005.** Simultaneous temperature and strain measurement with combined spontaneous Raman and Brillouin scattering. *Optics Letters*, 30: 1276 - 1278.
- Bansal, P. N., Doremus, R. H. 1986.** Handbook of glass properties. Academic Press, Orlando, Florida, USA, Chapter 2, pp: 7 - 22.
- Bao, X., Webb, D.J., Jackson, D.A. 1993a.** 22-km distributed temperature sensor using Brillouin gain in an optical fiber. *Optics Letters*, 18(7): 552 - 554.
- Bao, X., Webb, D.J., Jackson, D.A. 1993b.** 32-km distributed temperature sensor based on Brillouin loss in an optical fiber. *Optics Letters*, 18: 1561 - 1563.
- Bao, X., Webb, D.J., Jackson, D.A. 1994a.** 22 km distributed strain sensor using Brillouin loss in an optical fiber. *Optics Communications*, 104: 298 - 302.
- Bao, X., Webb, D.J., Jackson, D.A. 1994b.** Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber. *Optics Letters*, 19: 141 - 143.
- Bao, X., Dhliwayo, J., Heron, N., Webb, D.J., Jackson, D.A. 1995.** Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering. *Journal of Lightwave Technology*, 13: 1340 - 1348.
- Barnowski, M.K., Jensen, S.M. 1976.** Fiber waveguides: a novel technique for investigation attenuation characteristics. *Applied Optics*, 15: 2112 - 2115.
- Barnowski, M.K., Jensen, S.M. 1977.** Optical time domain reflectometer. *Applied Optics*, 16: 2375 - 2379.
- Bernaur, C., Bohme, H., Grossmann, S., Hinrichen, V., Markalous, S., Muhr, M., Strehl, T., Teminova, R. 2007.** Temperature measurement on Overhead Transmission Lines (OHLT), utilizing Surface Acoustic Wave sensors. CIRED, 19th International Conference on Electricity Distribution, 21- 24 May 2007, Vienna, Austria.
- Boot, H.L.M., Wild, F.H., Van der Wey, A.H. 2002.** Overhead line local and distributed conductor temperature measurement techniques, models and experience at TZh. Cigre, 2002, Paris, France.
- Boyd, R.W. 2003.** Nonlinear Optics. 2nd Edition, Academic Press, Rochester, New York, USA, Chapter 8 - 9, pp: 371 - 450.
- Brillouin, L. 1922.** Diffusion de la lumiere et des rayons par un corps transparent homogene. *Annale de Physique*, 17: 88.

- Brown, A.W., Colpitts, B.G., Brown, K. 2005.** Distributed sensor based on dark-pulse Brillouin scattering. *IEEE Photonics Technology Letters*, 17(7): 1501 - 1503.
- Chiao, R.Y., Townes, C.H., Stoicheff, B.P. 1964.** Stimulated Brillouin scattering and coherent generation of intense hypersonic waves. *Physical Review Letter*, 12(21): 592 - 595.
- Cirigliano, M., Cattaneo, Boffi, P., Barberis, A., Perini, A., Pirovano, G., Martinelli, M. 2009.** Overhead power lines temperature measurements by a fiber optic Raman sensor. 20th Int. Conference on Optical Fibre Sensors, 05 October 2009, Edinburgh, UK.
- Culverhouse, D., Farahi, F., Pannell, C.N., Jackson, D.A. 1989.** Potential of stimulated Brillouin scattering as sensing mechanism for distributed temperature sensors. *Electronics Letters*, 25(14): 913 - 915.
- Dakin, J.P., Pratt, J., Bibby, G.W., Ross, J.N. 1985.** Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector. *Electronics Letters*, 21(13): 569 - 570.
- DeMerchant, M. 2000.** Distributed strain sensing for civil engineering applications. *Ph.D. Thesis*, University of New Brunswick, Canada.
- De Souza, K.R.C.P. 1999.** Fiber optic distributed sensing based on spontaneous Brillouin scattering. *Ph.D. Thesis*, University of Southampton, UK.
- Dong, Y., Zhang, H., Chen, L., Bao, X. 2012.** 2-cm spatial resolution and 2 km range Brillouin optical fiber sensor using a transient differential pulse pair. *Applied Optics*, 51(9): 1229 - 1235.
- Douglass, D.A., Motlis, Y., Seppa, T.O. 2000.** IEEE's approach for increasing transmission line ratings in North America. CIGRE 2000: The 38th Session of the International Conference on Large High-Voltage Electric Systems, 27 August - 01 September 2000, Paris, France.
- Fan, H., Huang, C., Li, Y. 2009.** Brillouin-based distributed temperature and strain sensor using Landau-Placzek Ratio. International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging: Material and Device Technology for Sensors, 24 August 2009, Beijing, China.
- 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.
- Farries, M.C. ve ark. 1984.** Distributed sensing using stimulated Raman interaction in a monomode optical fiber. 2nd International Conference on Optical Fiber Sensors, 05 September 1984, Stuttgart, Germany.
- Fellay, A., Thevenaz, L., Facchini M., Nikles, M., Robert, P. 1997.** Distributed sensing stimulated Brillouin scattering: towards ultimate resolution. 12th International Conference on Optical Fiber Sensors, October 28 1997, Williamsburg, Virginia, USA.

- Fellay, A., Floch, S. Le, Facchini M., Thevenaz, L., Scandala, W., Robert, P. 2001.** Brillouin gain curve measurements in fibers at cryogenic temperatures (3 °K - 140 °K). Proceeding of the 6th Optical Fiber Measurement Conference, January 2001, Cambridge UK.
- Foaleng, S.M., Tur, M., Beugnot, J.C., Th'evenaz, L. 2010.** High spatial and spectral resolution long-range sensing using Brillouin echoes. *Journal of Lightwave Technology*, 28(20): 2993 - 3003.
- Galindez, C.A., Quintela, A., Quintela, M.A., Lopez-Higuera, J.M. 2011.** 30 cm of spatial resolution using pre-excitation pulse BOTDA technique. 21th International Conference on Optical Fiber Sensors, 15 May 2011, Ottawa, Canada.
- Galindez - Jamiouy, C.A., Lopez - Higuera, J.M. 2012.** Brillouin distributed fiber sensors: an overview and application. *Journal of Sensors*, 2012: 1 - 17.
- Garus, D., Gogolla, T., Krebber, K., Schliep, F. 1997.** Brillouin optical frequency-domain analysis for distributed temperature and strain measurements. *Journal of Lightwave Technology*, 15: 654 - 662.
- Grotenhuis, B.J., Jaspers, J.E., Kerstens, A., Van der Wey, A.H., Wild, F.H. 2001.** Increasing the capacity of cable systems using cable asset management based on thermal and mechanical properties. 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 18 June - 21 June 2001, Amsterdam, Netherlands.
- Gunday, A., Karlik, S.E., Yilmaz, G. 2013.** Analysis of variation of Brillouin and Rayleigh scattering coefficients with thermal strain in Landau-Placzek ratio based optical fiber distributed sensing for XLPE insulated power cables. *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 8(2): 920 - 929.
- Günday, A., Yılmaz, G., Karlık, S.E. 2007.** Optik fiberli dağınık algılama yöntemiyle enerji kablosunda sıcaklık ve gerginliğin algılanması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 12(2): 43 - 52.
- Hartog, A.H. 1993.** A distributed temperature sensor based on a liquid-core optical fibre. *Journal of Lightwave Technology*, 1: 498 - 551.
- Heinhold, L. 1990.** Power Cables, Power cables and their application. 3rd Edition, Part 1, Editor: Heinhold, L., Siemens Aktiengesellschaft, Berlin, Germany, pp: 134 - 139.
- Horiguchi, T., Tateda, M. 1989.** Optical-fiber-attenuation investigation using stimulated Brillouin scattering between a pulse and a continuous wave. *Optics Letters*, 14: 408 - 410.
- Horiguchi, T., Kurashima, T., Tateda, M. 1989a.** Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1: 107 - 108.
- Horiguchi, T., Tateda, M. 1989b.** Optical fiber evaluation method and system. Nippon Telegraph and Telephone Corporation, US patent no: 4.997.227.A, 21 June 1989.

- Horiguchi, T., Kurashima, T., Tateda, M. 1990.** A Technique to measure distributed strain in optical fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2(5): 352 - 354.
- Horiguchi, T., Kurashima, T., Izumita, H., Furukawa, S., Koyamada, Y. 1992.** Brillouin optical-fiber time domain reflectometry. Proceedings of the International Quantum Electronics Conference, 42 - 44, June 1992, Vienna, Austria.
- Horiguchi, T., Shimizu, K., Kurashima, T., Tateda, M., Koyamada, Y. 1995.** Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering. *Journal of Lightwave Technology*, 13: 1296 - 1302.
- Hotate, K. 2000.** Measurement of Brillouin gain spectrum distribution along an optical fiber using a correlation-based technique-proposal, experiment and simulation. *IEICE Transactions on Electronics*, 3: 405 - 411.
- Ichino, T., Suzuki, T., Wada, T., Sadahiro, T. 1996.** Measurement of conductor temperature of power cable by optical fiber sensor. 7th International Conference on Dielectric Materials Measurements & Applications, 23 - 26 September 1996, Bath, UK.
- Kee, H.H., Lees, G.P., Newson, T.P. 2000a.** All-fiber system for simultaneous interrogation of distributed strain and temperature sensing by spontaneous Brillouin scattering. *Optics Letters*, 25: 695 - 697.
- Kee, H.H., Lees, G.P., Newson, T.P. 2000b.** Technique for measuring distributed temperature with 35-cm spatial resolution utilizing the Landau-Placzek Ratio. *IEEE Photonics Technology Letters*, 12: 873 - 875.
- Kersey, A.D. 1996.** A review of recent developments in fiber optic sensor technology. *Optical Fiber Technology*, 2: 291 - 317.
- Krohn, D.A. 2000.** Fiber optic sensors: Fundamentals and applications. 3rd Edition, Research Triangle Park, NC: ISA, c2000, USA, 288 pp.
- Kurashima, T., Horiguchi, T., Tateda, M. 1990a.** Thermal effects on the Brillouin frequency shift in jacketed optical silica fibers. *Applied Optics*, 29: 2219 - 2220.
- Kurashima, T., Horiguchi, T., Tateda, M. 1990b.** Distributed temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers. *Optics Letters*, 15: 1038 - 1040.
- Kurashima, T., Horiguchi, T., Tateda, M. 1992.** Thermal effects of Brillouin gain spectra in single-mode fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 10: 718 - 720.
- Lancry, M., Régnier, E., Poumellec, B. 2012.** Fictive temperature in silica-based glasses and its application to optical fiber manufacturing. *Progress in Materials Science*, 57: 63 - 94.
- Lecoeuche, V., Hathaway, M.W., Webb, D.J., Pannell, C.N., Jackson, D.A. 2000.** 20-km distributed temperature sensor based on spontaneous Brillouin scattering. *IEEE Photonics Technology Letters*, 12(10): 1367 - 1369.

- Li, Y., Zhang, F., Yoshino, T. 2003a.** Wide temperature-range Brillouin and Rayleigh optical time-domain reflectometry in a dispersion-shifted fiber. *Applied Optics*, 42: 3772 - 3775.
- Li, Y., Zhang, F., Yoshino, T. 2003b.** Wide-range temperature dependence of Brillouin shift in a dispersion-shifted fiber and its annealing effect. *Journal Lightwave Technologies*, 21: 1663 - 1667.
- Li, W., Bao, X., Li, Y. Chen, L. 2008.** Differential pulse-width pair BOTDA for high spatial resolution sensing. *Optics Express*, (16)26: 21616 - 21625.
- Lu, Y., Li, C., Zhang, X., Yam, S. 2011.** Determination of thermal residual strain in cabled optical fiber with high spatial resolution by Brillouin optical time-domain reflectometry. *Optics and Lasers in Engineering*, 49: 1111 - 1117.
- Makhkamova, I. 2011.** Numerical investigations of the thermal state of overhead lines and underground cables in distribution Networks. *Ph.D. Thesis*, Durham University, UK.
- Maughan, S.M., Kee, H.H., Newson, T.P. 2001.** Simultaneous distributed fiber temperature and strain sensor using microwave coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter. *Measurement Science and Technology*, 12: 834 - 842.
- Maughan, S.M., Kee, H.H., Newson, T.P., 2001a.** A calibrated 27-km distributed fiber temperature sensor based on microwave heterodyne detection of spontaneous Brillouin backscattered power. *IEEE Photonics Technology Letters*, 13: 511 - 513.
- Minardo, A., Bernini, R., Zeni, L. 2008.** Vectorial dislocation monitoring of pipelines by use of Brillouin-based fiber-optics sensors. *Smart Materials and Structures*, 17(1): 1 - 8.
- Onaran, K. 2009.** Malzeme Bilimi. Bilim Teknik Yayınevi, 11. Baskı, İstanbul, 383 s.
- Othonos, A., Kalli, K. 1999.** Fiber Bragg Grating Sensor: Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and application in telecommunications and sensing, Artech House Publishers Inc., Boston, USA, pp: 301 - 389.
- Parker, T.R., Farhadiroushan, M., Faceed, R., Handerek, V.A., Rogers, A.J. 1997a.** Temperature and strain dependence of the power level and frequency for spontaneous Brillouin scattering in optical fibers. *Optics Letters*, 22: 787 - 789.
- Parker, T.R., Farhadiroushan, Handerek, V.A., Rogers, A.J. 1997b.** A fully distributed simultaneous strain and temperature sensor using spontaneous Brillouin backscattering. *Photonic Technology Letter*, 9: 979 - 981.
- Parker, T.R., Farhadiroushan, M., Faceed, R., Handerek, V.A., Rogers, A.J. 1998.** Simultaneous distributed measurement of strain and temperature from noise-initiated Brillouin scattering in optical fibers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 34(4): 654 - 659.
- Pradhan, H. S., Sahu, P.K. 2014.** 150 km long distributed temperature sensor using phase modulated probe wave and optimization technique. *Optik*, 125: 441 - 445.

- Schmidt, N. 1997.** Comparison between IEEE and CIGRE Ampacity Standards. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14(4): 1555 - 1562.
- Smith, J. 1999.** Characterization of the Brillouin loss spectrum for simultaneous distributed sensing of strain and temperature. *M.Sc. Thesis*, University of New Brunswick, Canada.
- Smith, J., Brown, A., DeMerchant, M., Bao, X. 1999a.** Simultaneous distributed strain and temperature measurement. *Applied Optics*, 38: 5372 - 5378.
- Sperber, T., Eyal, A., Tur, M., Th´evenaz, L. 2010.** High spatial resolution distributed sensing in optical fibers by Brillouin gain-profile tracing. *Optics Express*, 18(8): 8671 - 8679.
- Tayama, H., Fukuda, O., Yamamoto, K., Inoue, Y., Koike, Y. 1995.** 6,6 kV XLPE submarine cable with optical fiber sensors to detect anchor damage and defacement of wire armor. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10(4): 1718 - 1723.
- Thevenaz, L., Mafang, S.F. 2009.** Distributed fiber sensing using Brillouin echoes. 19th International Conference on Optical Fibre Sensors (SPIE'08), 14 - 18 April 2008, Perth, WA, Australia.
- Udd, E. 1991.** Fiber Optic Sensors, An Introduction for Engineers and Scientists. Editör: Udd, E., Wiley, J. and Sons Inc., USA, 498 pp.
- Wang, W.H. 2012.** The elastic properties, elastic models and elastic perspectives of metallic glasses. *Progress in Materials Science*, 57(3): 487 - 656.
- Wild, F.H., Schmetz, P. 2000.** The application of optical sensors for temperature, mechanical stress and moisture in energy cables in Netherlands. 14th International Conference on Optical Fiber Sensors, 11 - 13 October 2000, Venice, Italy.
- Yariv, A. 1996.** Optical Electronics in Modern Communications. 5th Edition, Oxford University Press Inc., New York, USA, 478 pp.
- Yoon, H.J., Song, K.Y., Kim, H.M., Kim, J.S. 2011.** Strain monitoring of composite steel girder bridge using distributed optical fiber sensor system. *Procedia Engineering, Elsevier*, 10: 2544 - 2547.
- Yoon, H.J., Song, K.Y., Kim, J.S., Kim, D.S. 2011.** Longitudinal strain monitoring of rail using a distributed fiber sensor based on Brillouin optical correlation domain analysis. *NDT and E International*, 44(7): 637 - 644.
- Yu, Q. 2006.** Distributed Brillouin sensing using polarization-maintaining fibers with high measurement accuracy. *Ph.D. Dissertation*, Ottawa - Carleton Institute for Physics, University of Ottawa, Canada.
- Yun - qi, H., Yu - long, C., Qing, Y., Hai - wen, C., Rong - hui, Q. 2015.** On-line temperature monitoring in power transmission lines based on Brillouin optical time domain reflectometry. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 126(19): 2180 - 2183.

Zhou, Z., He, J., Huang, M., Qu, J., Chen, G. 2010. Casing pipe damage detection with optical fiber sensors: a case study in oil well constructions. *Advances in Civil Engineering*, 2010: 1 - 9.



EKLER

EK 1

Brillouin Güç Değişimi ve Brillouin Frekans Kaymasının Fiber Young Modülü Bağımlılıklarının Elde Edildiği Benzetimlere İlişkin Matlab Kodları

% Program Başlangıcı %

```
clear

p = 0.286; % Pockel katsayısı
Ro = 2330; % 2330 silikanın yoğunluğu kg/m3
Va = 5960; % 5960 m/s

Lamda_0 = 1550e-9; %  $\lambda$  = çalışma dalga boyu

P0 = 1.50; % Lazer kaynağın maksimum darbe gücü, 1,50 W
 $\tau$  = 10e-9; % Probe darbe süresi  $\tau$  = - 10 ns

L = 1000; % Fiber Kablonun Uzunluğu (metre)
Delta_z = 1; % Uzamsal çözünürlük  $\Delta z = c\tau/2n_1 = 1$  m.

R = 1001; % R: Ölçüm alınan nokta sayısı +1 = L/ $\Delta z$  +1 = 1001 nokta

d=rand(R,1)-0.5; % Matris formunda değişken parametreler
cc1=rand(R,1)-0.5; % Matris formunda değişken parametreler

E0 = 72.98; %Sıfır Strain ve 293 Kelvin sıcaklıkta Young Modülü değeri = 72.98 GPa.

for m=1:R;

z(m)=(m-1)*1.0;

S = (1.5^2-1.45^2)/(4*(1.5^2)); % NA yakalama katsayısı, kırılma indisleri n1 = 1.5 ve n2 = 1.45'e göre hesaplanmıştır.

Va = 5960; % Akustik dalga hızı 5960 m/s'dir.
Vg = (3e8)/1.50; % Grup hızı, fiber içerisinde ışığın hızı.

if z(m) >= 400 && z(m) <= 403

S = (1.5^2-1.48^2)/(4*(1.5^2));
```

```

alpha_B = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*260)/
(3*(Lamda_0)^4*Ro*(Va)^2); % Brillouin saçılma katsayısı

alpha_R = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*1950)*(7e-
11-1/(Ro*(Va)^2))/(3*(Lamda_0)^4); % Rayleigh saçılma katsayısı

PB(m)= 0.5*P0*tau*alpha_B*S*Vg*exp(-2*alpha_R*z(m)+1.7)*1e8/4+
d(m)*0.5;

T(m)= 70 + PB(m)/0.36;
X(m)= 40 + PB(m)/0.36;

E(m)= 69.68 + 1.126e-2 * (X(m) + 273);

S1(m)= ((E(m)-E0) / (E0*5.75)) * 1e6; % Algılayıcı Fiber
boyunca meydana gelen uε cinsinden gerginlik profili

Delta_PB(m) = 29.827*E(m) - 2169.550; % Algılayıcı Fiber
boyunca Brillouin Güç değişimi

Delta_VB(m) = 209.413*E(m) - 15260.766; % Algılayıcı Fiber
boyunca Brillouin Frekans kayması

elseif z(m) >= 700 && z(m) <= 705

S = (1.5^2-1.48^2)/(4*(1.5^2));

alpha_B = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-
23*255)/(3*(Lamda_0)^4*Ro*(Va)^2);

alpha_R = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*1950)*(7e-
11-1/(Ro*(Va)^2))/(3*(Lamda_0)^4);

PB(m)= 0.5*P0*tau*alpha_B*S*Vg*exp(-2*alpha_R*z(m)+1.7)*
1e8/4+d(m)*0.5;

T(m)= 70 + PB(m)/0.36;
X(m)= 40 + PB(m)/0.36;

E(m)= 69.68 + 1.126e-2 * (X(m) + 273);
S1(m)= ((E(m)-E0) / (E0*5.75)) * 1e6;

Delta_PB(m) = 29.827*E(m) - 2169.550;
Delta_VB(m) = 209.413*E(m) - 15260.766;

elseif z(m) >= 100 && z(m) <= 115

S = (1.5^2-1.48^2)/(4*(1.5^2));

```

```

alpha_B = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*255)/
(3*(Lamda_0)^4*Ro*(Va)^2);

alpha_R = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*1950)*(7e-
11-1/(Ro*(Va)^2))/(3*(Lamda_0)^4);

PB(m)= 0.5*P0*tau*alpha_B*S*Vg*exp(-2*alpha_R*z(m)+2)*
1e8/4+d(m)*0.5;

T(m)= 70 + PB(m)/0.36;
X(m)= 40 + PB(m)/0.36;

E(m)= 69.68 + 1.126e-2 * (X(m) + 273);
S1(m)= ((E(m)-E0) / (E0*5.75)) * 1e6;

Delta_PB(m) = 29.827*E(m) - 2169.550;
Delta_VB(m) = 209.413*E(m) - 15260.766;

elseif z(m) >= 900 && z(m) <= 915

S = (1.5^2-1.48^2)/(4*(1.5^2));

alpha_B = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*214)/
(3*(Lamda_0)^4*Ro*(Va)^2);

alpha_R = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*1950)*(7e-
11-1/(Ro*(Va)^2))/(3*(Lamda_0)^4);

PB(m)= 0.5*P0*tau*alpha_B*S*Vg*exp(-2*alpha_R*z(m)+2)*
1e8/4+d(m)*0.5;

T(m)= 70 + PB(m)/0.36;
X(m)= 40 + PB(m)/0.36;

E(m)= 69.68 + 1.126e-2 * (X(m) + 273);
S1(m)= ((E(m)-E0) / (E0*5.75)) * 1e6;

Delta_PB(m) = 29.827*E(m) - 2169.550;
Delta_VB(m) = 209.413*E(m) - 15260.766;

elseif (z(m) >= 250 && z(m) <= 275) && (z(m) >= 260 && z(m) <=
261)

S = (1.5^2-1.48^2)/(4*(1.5^2));

alpha_B = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*214)/
(3*(Lamda_0)^4*Ro*(Va)^2);

alpha_R = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*1950)*(7e-
11-1/(Ro*(Va)^2))/(3*(Lamda_0)^4);

```

```
PB(m)= 0.5*P0*tau*alpha_B*S*Vg*exp(-2*alpha_R*z(m)+2) *
1e8/4+d(m)*0.5;
```

```
T(m)= 70 + PB(m)/0.36;
X(m)= 40 + PB(m)/0.36;
```

```
E(m)= 69.68 + 1.126e-2 * (X(m) + 273);
S1(m)= ((E(m)-E0) / (E0*5.75)) * 1e6;
```

```
Delta_PB(m) = 29.827*E(m) - 2169.550;
Delta_VB(m) = 209.413*E(m) - 15260.766;
```

```
else
```

```
S = (1.5^2-1.48^2)/(4*(1.5^2));
```

```
alpha_B = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*200)/
(3*(Lamda_0)^4*Ro*(Va)^2)*exp(0);
```

```
alpha_R = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*1950)*(7e-
11-1/(Ro*(Va)^2))/(3*(Lamda_0)^4)*exp(0);
```

```
PB(m)= 0.5*P0*tau*alpha_B*S*Vg*exp(-2*alpha_R*z(m)-10) *
1e8/4+d(m)*0.5; % -10.0 değeri belirtilen elseif şartları
dışında
```

```
T(m)= 70 + PB(m)/0.36;
X(m)= 40 + PB(m)/0.36;
```

```
E(m)= 69.68 + 1.126e-2 * (X(m) + 273);
S1(m)= ((E(m)-E0) / (E0*5.75)) * 1e6;
```

```
Delta_PB(m) = 29.827*E(m) - 2169.550;
Delta_VB(m) = 209.413*E(m) - 15260.766;
```

```
end%
```

```
end%
```

```
subplot(221)
plot(X,PB,'r-')
grid on
xlabel('SICAKLIK (°C)'); ylabel('BRILLOUIN NORMALIZE GUC
DEGISIMI (%)')
title('1 km UZUNLUKLU ALGILAYICI OPTIK FIBER BOYUNCA BRILLOUIN
GUC DEGISIMI')
```



```

subplot(222)
plot (z,T, 'r-')
grid on
xlabel('UZUNLUK (m)'); ylabel('ALGILAYICI FIBER SICAKLIGI (°C)')
title('1 km UZUNLUKLU ALGILAYICI FIBER BOYUNCA SICAKLIK
PROFILI')

subplot(223)
plot(X+273,E, 'r-')
grid on
xlabel('SICAKLIK (°K)'); ylabel('YOUNG MODULU (GPa)')

subplot(224)
plot(z,S1, 'b-')
grid on
xlabel('UZUNLUK (m)'); ylabel('ISIL GERGINLIK (µE)')

figure(2)
plot(z,PB, 'r-')
grid on
xlabel('UZUNLUK (m)'); ylabel('BRILLOUIN NORMALIZE GUC DEGISIMI
(%)')

figure(3)
plot (z,T, 'r-')
grid on
xlabel('UZUNLUK (m)'); ylabel('KABLO ILETKENININ SICAKLIGI
(°C)')

figure(4)
plot (z,X, 'r-')
grid on
xlabel('UZUNLUK (m)'); ylabel('ALGILAYICI FIBERIN SICAKLIGI
(°C)')

figure(5)
plot(z,E, 'b-')
grid on
xlabel('UZUNLUK (m)'); ylabel('YOUNG MODULU (GPa)')

figure(6)
plot(X+273,E, 'r-')
grid on
xlabel('SICAKLIK (°K)'); ylabel('YOUNG MODULU (GPa)')

figure(7)
plot(z,Delta_PB, 'r-')
grid on
xlabel('UZUNLUK (m)'); ylabel('BRILLOUIN GUC DEGISIMI (%)')

```

```
figure(8)
plot(E,Delta_PB,'b-')
grid on
xlabel('YOUNG MODULU (GPa)'); ylabel('BRILLOUIN GUC DEGISIMI (%)')

figure(9)
plot(z,Delta_VB,'r-')
grid on
xlabel('UZUNLUK (m)'); ylabel('BRILLOUIN FREKANS KAYMASI (MHz)')

figure(10)
plot(E,Delta_VB,'r-')
grid on
xlabel('YOUNG MODULU (GPa)'); ylabel('BRILLOUIN FREKANS KAYMASI (MHz)')
```



EK 2

Yüksek Gerilim Kablolarında Oluşan Isıl Etkilerin Algılayıcı Fiberin Young ve Shear Modülleri Üzerindeki Etkilerinin Analiz Edildiği Benzetimlere İlişkin Matlab Kodları

% Program Başlangıcı

```
clear
```

```
% Model alınan yüksek gerilim kablosu, 300 m - 400 m arasında ve  
700 m - 735 m arasında 145 x 5 mm. ölçülerinde sırasıyla 100 m  
ve 35 m uzunluğunda PVC borular içerisinden geçirilmektedir.
```

```
% 1200 m - 1300 m arasında ilerlerken 180 x 7 mm. ölçüsünde bir  
PVC boru içerisinden geçmekte ve 1240 m - 1280 m aralığında ise  
145 x 5 mm. ölçüsünde bir başka PVC boru içerisinden  
geçirilmektedir.
```

```
% 1700.metrede ise başka bir kablo ile kesişmekte ve hedefe  
ulaşmaktadır.
```

```
% P0: Lazer kaynağının gücü  
% PB: Kablo boyunca Brillouin güç  
% W: Probe darbe genişliği  
% Vg: Grup hız  
% alpha_B: Brillouin saçılma katsayısı  
%1.49e-6; çekirdek kırılma indisi 1.5, fiber sıcaklığı 298 K  
derece olarak alınmıştır.  
% alpha_R: Rayleigh saçılma katsayısı  
% S: Capture fraction (optik fiberin nümerik açıklığında  
yakalanan saçılmış ışık miktarı)  
% NA: Fiberin nümerik açıklığı  
% n: Fiber çekirdek-nüve kırılma indisi  
% p: Foto elastike (Pockel) katsayısı (0.286)  
% Va: Termal olarak meydana gelen Akustik Dalga hızı
```

```
p = 0.286; % Pockel katsayısı
```

```
Ro = 2330; % 2330 silikanın yoğunluğu kg/m3  
Va = 5960; % Akustik dalga hızı 5960 m/s
```

```
Lamda_0 = 1550e-9; %  $\lambda$  = 1550 nm dalga boyu  
P0 = 1.2; % Lazer kaynağın maksimum darbe gücü, 1.2 Watt
```

```
 $\tau$  = 20e-9; % Probe darbe süresi - 20 ns.
```

```
% 154 kV yüksek gerilim kablosunun çeşitli ebatlardaki PVC  
boruların içinden geçtiği kablo bölgeleri
```

```

ab = 300;
bc = 700;
de = 1200;
ef = 1700;

L = 2000;
Delta_z = 2; % Uzamsal çözünürlük

% R: Kablo üzerinde ölçüm alınan nokta sayısı = 2000/2 = 1000
adet nokta.

R=1001;

d=rand(R,1)-0.5;
ccl=rand(R,1)-0.5;

G = 32.1;
E0 = 72.98;

% E0, Sıfır Strain ve 293 Kelvin sıcaklıkta Young Modülü değeri
olup, E0 = 72.98 GPa olarak hesaplanmıştır.

for m = 1:R;

z(m)=(m-1)*2;

S = (1.5^2-1.48^2)/(4*(1.5^2));

% NA parametresi,n1 = 1.5 ve n2 = 1.48 değerlerine bağlı olarak
hesaplanmıştır.

Va = 5960;
Vg = (3e8)/1.50; % Grup hızı, fiber içerisinde ışığın hızı.

if z(m) >= ab & z(m) <= ab+100

S = (1.5^2-1.48^2)/(4*(1.5^2));

alpha_B = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-
23*207)/(3*(Lamda_0)^4*Ro*(Va)^2);

alpha_R = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*1950)*(7e-
11-1/(Ro*(Va)^2))/(3*(Lamda_0)^4);

PB(m)= 0.5*P0*tau*alpha_B*S*Vg*exp(-2*alpha_R*z(m)+2.1)*
1e8/4+d(m)*0.5;

T(m)= 79 + PB(m)/0.36;
X(m)= 47 + PB(m)/0.36;

```

```

E(m) = 69.68 + 1.126e-2*(X(m)+273);
S1(m) = ((E(m)-E0)/(E0*5.75))*1e6;

EG(m) = 72.98*(1+5.75*S1(m)*1e-6);
G(m) = 32.1*(1 + 3.06*S1(m)*1e-6);

G1(m) = 31.32755 + 2.6357*1e-3*(X(m)+273);
dE(m) = ((1.126e-2)/(69.68 + 1.126e-2*(X(m)+273)))*100;

dG1(m) = ((2.6357*1e-3)/(31.32755 + 2.6357*1e-3*(X(m)+273)))*100;

dEG(m) = ((1/((1/5.75) + S1(m)*1e-6))*100)/1e6;

dGG(m) = ((1/((1/3.06) + S1(m)*1e-6))*100)/1e6;

elseif z(m) >= bc & z(m) <= bc+35

S = (1.5^2-1.48^2)/(4*(1.5^2));

alpha_B = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*260)/
(3*(Lamda_0)^4*Ro*(Va)^2);

alpha_R = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*1950)*(7e-
11-1/(Ro*(Va)^2))/(3*(Lamda_0)^4);

PB(m) = 0.5*P0*tau*alpha_B*S*Vg*exp(-2*alpha_R*z(m)+1.7)*
1e8/4+d(m)*0.5;

T(m) = 79 + PB(m)/0.36;
X(m) = 47 + PB(m)/0.36;

E(m) = 69.68 + 1.126e-2*(X(m)+273);
S1(m) = ((E(m)-E0)/(E0*5.75))*1e6;

EG(m) = 72.98*(1+5.75*S1(m)*1e-6);
G(m) = 32.1*(1 + 3.06*S1(m)*1e-6);

G1(m) = 31.32755 + 2.6357*1e-3*(X(m)+273);

dE(m) = ((1.126e-2)/(69.68 + 1.126e-2*(X(m)+273)))*100;
dG1(m) = ((2.6357*1e-3)/(31.32755 + 2.6357*1e-3*(X(m)+273)))*100;

dEG(m) = ((1/((1/5.75) + S1(m)*1e-6))*100)/1e6;
dGG(m) = ((1/((1/3.06) + S1(m)*1e-6))*100)/1e6;

elseif z(m) >= de & z(m) <= de+40

S = (1.5^2-1.48^2)/(4*(1.5^2));

```

```

alpha_B = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*255)/
(3*(Lamda_0)^4*Ro*(Va)^2);

alpha_R = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*1950)*(7e-
11-1/(Ro*(Va)^2))/(3*(Lamda_0)^4);

PB(m)= 0.5*P0*tau*alpha_B*S*Vg*exp(-2*alpha_R*z(m)+1.7)*
1e8/4+d(m)*0.5;

T(m)= 79 + PB(m)/0.36;
X(m)= 47 + PB(m)/0.36;

E(m)= 69.68 + 1.126e-2*(X(m)+273);
S1(m)= ((E(m)-E0)/(E0*5.75))*1e6;

EG(m)=72.98*(1+5.75*S1(m)*1e-6);
G(m)= 32.1*(1 + 3.06*S1(m)*1e-6);

G1(m)=31.32755 + 2.6357*1e-3*(X(m)+273);

dE(m)=((1.126e-2)/(69.68 + 1.126e-2*(X(m)+273)))*100;
dG1(m)=((2.6357*1e-3)/(31.32755 + 2.6357*1e-3*(X(m)+273)))*100;

dEG(m)=((1/((1/5.75) + S1(m)*1e-6))*100)/1e6;
dGG(m)=((1/((1/3.06) + S1(m)*1e-6))*100)/1e6;

elseif z(m) >= 1240 & z(m) <= 1280

S = (1.5^2-1.48^2)/(4*(1.5^2));

alpha_B=(8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*322)/
(3*(Lamda_0)^4*Ro*(Va)^2);

alpha_R = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*1950)*(7e-
11-1/(Ro*(Va)^2))/(3*(Lamda_0)^4);

PB(m)= 0.5*P0*tau*alpha_B*S*Vg*exp(-2*alpha_R*z(m)+2)*
1e8/4+d(m)*0.5;

T(m)= 79 + PB(m)/0.36;
X(m)= 47 + PB(m)/0.36;

E(m)= 69.68 + 1.126e-2*(X(m)+273);
S1(m)= ((E(m)-E0)/(E0*5.75))*1e6;

EG(m)=72.98*(1+5.75*S1(m)*1e-6);
G(m)= 32.1*(1 + 3.06*S1(m)*1e-6);

G1(m)=31.32755 + 2.6357*1e-3*(X(m)+273);

```

```

dE(m)=(1.126e-2)/(69.68 + 1.126e-2*(X(m)+273))*100;
dG1(m)=(2.6357*1e-3)/(31.32755 + 2.6357*1e-3*(X(m)+273))*100;

dEG(m)=(1/((1/5.75) + S1(m)*1e-6))*100/1e6;
dGG(m)=(1/((1/3.06) + S1(m)*1e-6))*100/1e6;

elseif z(m) >= de+80 & z(m) <= de+120

S = (1.5^2-1.48^2)/(4*(1.5^2));

alpha_B = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*255)/
(3*(Lamda_0)^4*Ro*(Va)^2);

alpha_R = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*1950)*(7e-
11-1/(Ro*(Va)^2))/(3*(Lamda_0)^4);

PB(m)= 0.5*P0*tau*alpha_B*S*Vg*exp(-2*alpha_R*z(m)+2)*
1e8/4+d(m)*0.5;

T(m)= 79 + PB(m)/0.36;
X(m)= 47 + PB(m)/0.36;

E(m)= 69.68 + 1.126e-2*(X(m)+273);
S1(m)= ((E(m)-E0)/(E0*5.75))*1e6;

EG(m)=72.98*(1+5.75*S1(m)*1e-6);
G(m)= 32.1*(1 + 3.06*S1(m)*1e-6);

G1(m)=31.32755 + 2.6357*1e-3*(X(m)+273);

dE(m)=(1.126e-2)/(69.68 + 1.126e-2*(X(m)+273))*100;
dG1(m)=(2.6357*1e-3)/(31.32755 + 2.6357*1e-3*(X(m)+273))*100;

dEG(m)=(1/((1/5.75) + S1(m)*1e-6))*100/1e6;
dGG(m)=(1/((1/3.06) + S1(m)*1e-6))*100/1e6;

elseif z(m) >= ef & z(m) <= ef+3

S = (1.5^2-1.48^2)/(4*(1.5^2));

alpha_B = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*214)/
(3*(Lamda_0)^4*Ro*(Va)^2);

alpha_R = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*1950)*(7e-
11-1/(Ro*(Va)^2))/(3*(Lamda_0)^4);

PB(m)= 0.5*P0*tau*alpha_B*S*Vg*exp(-2*alpha_R*z(m)+2)*
1e8/4+d(m)*0.5;

```

```

T(m) = 79 + PB(m)/0.36;
X(m) = 47 + PB(m)/0.36;

E(m) = 69.68 + 1.126e-2*(X(m)+273);
S1(m) = ((E(m)-E0)/(E0*5.75))*1e6;

EG(m)=72.98*(1+5.75*S1(m)*1e-6);
G(m) = 32.1*(1 + 3.06*S1(m)*1e-6);

G1(m)=31.32755 + 2.6357*1e-3*(X(m)+273);

dE(m) = ((1.126e-2)/(69.68 + 1.126e-2*(X(m)+273)))*100;
dG1(m) = ((2.6357*1e-3)/(31.32755 + 2.6357*1e-3*(X(m)+273)))*100;

dEG(m) = ((1/((1/5.75) + S1(m)*1e-6))*100)/1e6;
dGG(m) = ((1/((1/3.06) + S1(m)*1e-6))*100)/1e6;

else

S = (1.5^2-1.48^2)/(4*(1.5^2));

alpha_B = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*200)/(3*(Lamda_0)^4*Ro*(Va)^2)*exp(0);

alpha_R = (8*(3.1415926)^3*(1.5)^8*(0.286)^2*1.38e-23*1950)*(7e-11-1/(Ro*(Va)^2))/(3*(Lamda_0)^4)*exp(0);

PB(m) = 0.5*P0*tau*alpha_B*S*Vg*exp(-2*alpha_R*z(m)-10)*1e8/4+d(m)*0.5;

T(m) = 79 + PB(m)/0.36;
X(m) = 47 + PB(m)/0.36;

E(m) = 69.68 + 1.126e-2*(X(m)+273);
S1(m) = ((E(m)-E0)/(E0*5.75))*1e6;

EG(m)=72.98*(1+5.75*S1(m)*1e-6);
G(m) = 32.1*(1 + 3.06*S1(m)*1e-6);

G1(m)=31.32755 + 2.6357*1e-3*(X(m)+273);

dE(m) = ((1.126e-2)/(69.68 + 1.126e-2*(X(m)+273)))*100;
dG1(m) = ((2.6357*1e-3)/(31.32755 + 2.6357*1e-3*(X(m)+273)))*100;

dEG(m) = ((1/((1/5.75) + S1(m)*1e-6))*100)/1e6;
dGG(m) = ((1/((1/3.06) + S1(m)*1e-6))*100)/1e6;

end%-----
end%-----

```



```

subplot(221)
plot(X,PB,'r-')
grid on
xlabel('SICAKLIK (°C)'); ylabel('BRILLOUIN NORMALIZE GUC (%)')

subplot(222)
plot (z,T,'r-')
grid on
xlabel('UZUNLUK (m)'); ylabel('KABLO ILETKENININ SICAKLIGI(°C)')

subplot(223)
plot(z,G,'b-')
grid on
xlabel('UZUNLUK (m)'); ylabel('SHEAR MODULU (GPa)')

subplot(224)
plot(X+273,E,'r-')
grid on
xlabel('SICAKLIK (°K)'); ylabel('YOUNG MODULU (GPa)')

figure(2)
plot(z,S1,'b-')
grid on
xlabel('UZUNLUK (m)'); ylabel('GERGINLIK (µE)')

figure(3)
plot(S1,G,'b-')
grid on
xlabel('GERGINLIK (µE)'); ylabel('SHEAR MODULU (GPa)')

figure(4)
plot(X+273,dE,'r-')
grid on
xlabel('SICAKLIK (°K)'); ylabel('YOUNG MODULUNUN DUYARLILIGI (%)')

figure(5)
plot(z,PB,'r-')
grid on
xlabel('UZUNLUK (m)'); ylabel('BRILLOUIN NORMALIZE GUC (%)')

figure(6)
plot(X+273,G1,'r-')
grid on
xlabel('SICAKLIK (°K)'); ylabel('SHEAR MODULU (GPa)')

figure(7)
plot(X+273,dG1,'r-')
grid on
xlabel('SICAKLIK (°K)'); ylabel('SHEAR MODULUNUN DUYARLILIGI (%)')

```

```

figure(8)
plot (z,X, 'r-')
grid on
xlabel('UZUNLUK (m)'); ylabel('ALGILAYICI FIBERIN SICAKLIGI
(°C)')

figure(9)
plot (S1,dEG, 'r-')
grid on
xlabel('GERGINLIK ( $\mu$ E)'); ylabel('YOUNG MODULUNUN DUYARLILIGI
(%)')

figure(10)
plot (S1,dGG, 'r-')
grid on
xlabel('GERGINLIK ( $\mu$ E)'); ylabel('SHEAR MODULUNUN DUYARLILIGI
(%)')

figure(11)
plot (S1,EG, 'b-')
grid on
xlabel('GERGINLIK ( $\mu$ E)'); ylabel('YOUNG MODULU (GPa)')

figure(12)
plot (z,G1, 'b-')
grid on
xlabel('UZUNLUK (m)'); ylabel('SHEAR MODULU (GPa)')

figure(13)
plot (z,T, 'r-')
grid on
xlabel('UZUNLUK (m)'); ylabel('KABLO ILETKENININ SICAKLIGI
(°C)')

figure(14)
plot (z,E, 'b-')
grid on
xlabel('UZUNLUK (m)'); ylabel('YOUNG MODULU (GPa)')

figure(15)
plot (X+273,E, 'r-')
grid on
xlabel('SICAKLIK (°K)'); ylabel('YOUNG MODULU (GPa)')

figure(16)
plot (X+273,S1, 'b-')
grid on
xlabel('SICAKLIK (°K)'); ylabel('SICAKLIK KAYNAKLI GERGINLIK
( $\mu$ E)')

```

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Abdurrahman Günday
Doğum Yeri ve Tarihi : Kırşehir, 1 Mart 1975
Yabancı Dili : İngilizce, Almanca (Orta), İtalyanca (Orta)

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Kayseri Fen Lisesi, 1989 - 1992

Lisans : Uludağ Üniversitesi, 1992 - 1998

Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi, 2004 - 2007

Doktora : Uludağ Üniversitesi, 2010 - 2016

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Türk Pirelli Kablo ve Sistemleri A.Ş., Satınalma Departmanı, Teknik Satınalma Mühendisi, 2001 - 2003.

Yazaki Otomotiv A.Ş., Mühendislik Departmanı, Proje ve Metot Mühendisi, 2003 - 2005.

Isı Şah A.Ş., Lojistik Departmanı, Lojistik ve Planlama Müdürü, 2005 - 2007.

Ficosa Otomotiv A.Ş., İleri Lojistik Departmanı, Proje Yöneticisi, 2007 - 2011.

Venes Elektrik Ltd. Şti. Fabrika Müdürü, 2011 - 2012.

Uludağ Üniversitesi Orhangazi Meslek Yüksek Okulu, Elektronik Teknolojisi Programı, Öğretim Görevlisi, 2012 - Halen.

İletişim (e-posta) : agunday@uludag.edu.tr, asgunday@yahoo.com

Tez Kapsamında Tamamlanan Yayınları

Gunday, A., Karlik, S.E., Yilmaz, G. 2014. The impact of temperature and strain formations on Young and Shear moduli in usage of optical fiber distributed sensing for power cables. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(3): 517 - 525. *Science Citation Index Expanded (SCI-E), Engineering Index, EBSCO, SCOPUS, TÜBİTAK-ULAKBİM Mühendislik ve Temel Bilimler Veri Tabanı (MTBVT).*

Gunday, A., Karlik, S.E., Yilmaz, G. 2013. Analysis of variation of Brillouin and Rayleigh scattering coefficients with thermal strain in Landau-Placzek ratio based optical fiber distributed sensing for XLPE insulated power cables. *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 8(2): 920 - 929. *Elsevier Bibliographic Database - SCOPUS, Cambridge Scientific Abstracts (CSA/CIG), Academic Search Complete (EBSCO Information Services).*

Gunday, A., Karlik, S. E. 2013. Optical fiber distributed sensing of temperature, thermal strain and thermo-mechanical force formations on OPGW cables under wind effects. *ELECO 2013 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 28 - 30 November 2013, Bursa.

Tez Kapsamında Devam Eden Yayınları

Gunday, A., Karlik, S.E., Yilmaz, G. Analysis of effects of Young modulus variations on Brillouin power and Brillouin frequency shift changes in optical fibers. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* (basım aşamasında). *Science Citation Index Expanded (SCI-E).*

Tez Dışındaki Yayınları

Gunday, A. 2015. *Electronics Workbench ve Devre Uygulamaları.* Ekin Yayınevi, Bursa, ISBN: 978-605-327-255-7, Ders Kitabı, 383 s.

Gunday, A., Yilmaz, G. ve Karlik, S.E. 2012. Landau-Placzek oranını temel alan optik fiberli dağılık algılamada Brillouin ve Rayleigh saçılma katsayılarının sıcaklıkla değişiminin analizi. *ELECO 2012 7. Ulusal Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, 29 Kasım - 01 Aralık 2012, Bursa.

Gunday, A., Yilmaz, G. ve Karlik, S.E. 2012. Landau-Placzek oranını temel alan optik fiberli dağılık algılamada Brillouin ve Rayleigh saçılma katsayılarının gerginlikle değişiminin analizi. *ELECO 2012 7. Ulusal Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, 29 Kasım - 01 Aralık 2012, Bursa.

Gunday, A., Yilmaz, G. ve Karlık, S.E. 2007. Optik fiberli dağınık algılama yöntemiyle enerji kablosunda sıcaklık ve gerginliğin algılanması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 12 (2): 43 - 52.

Gunday, A., Yilmaz, G., Karlık, S.E. 2007. Spontaneous Raman power and Brillouin frequency shift method based distributed temperature and strain detection in power cables. ELECO 2007 5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 5 - 9 December 2007, Bursa.

Gunday, A., Karlık, S.E., Yilmaz, G., Ergun, T. 2016. Matlab GUI tabanlı dağınık algılama simülatörü. Uludağ Üniversitesi V. Bilgilendirme ve AR-GE Günleri, 15-16 Mart 2016, Bursa.

Gunday, A., Karlık, S.E., Yilmaz, G., Ergun, T. 2014. OPGW kablolarının hava sıcaklığı tespitinde kullanımı. Uludağ Üniversitesi IV. Bilgilendirme ve AR-GE Günleri, 11-13 Kasım 2014, Bursa.

Gunday, A., Karlık, S.E., Yilmaz, G., Ergun, T. 2013. Enerji kablolarında optik fiberin sensörel kullanımı. Uludağ Üniversitesi III. Bilgilendirme ve AR-GE Günleri, 12-14 Kasım 2013, Bursa.