



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ KABLOSUNDA OLUŞAN SICAKLIK VE
GERİLMELERİ OPTİK FİBERLİ ALGILAYICILARLA
ALGILAMA BENZETİMLERİ

Abdurrahman GÜNDAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2007



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ KABLOSUNDA OLUŞAN SICAKLIK VE GERİLMELERİ
OPTİK FİBERLİ ALGILAYICILARLA
ALGILAMA BENZETİMLERİ

Abdurrahman GÜNDAY

Doç.Dr. Güneş YILMAZ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2007

T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ KABLOSUNDA OLUŞAN SICAKLIK VE GERİLMELERİ
OPTİK FİBERLİ ALGILAYICILARLA
ALGILAMA BENZETİMLERİ

ABDURRAHMAN GÜNDAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oy çokluğu
ile kabul edilmiştir.

Doç.Dr. Güneş YILMAZ
(Danışman)

.....

.....

ÖZET

Haberleşme ve enerji dağıtım kablolarında, geleneksel izleme ve kontrolün zor ve pahalı olduğu, elektriksel açıdan tehlikeli çevre ortamlarında optik fiberli kablolardan sensör olarak faydalanılmaktadır.

Yer altı enerji dağıtım kabloları; çalışma esnasında, kablonun ömrünü kısaltmakla birlikte performansını da olumsuz etkileyen elektriksel, termal ve mekanik etkilere maruz kalmaktadır. Bu etkiler, kablo izolasyonuna zarar verebilir, kablo izolasyonun kalitesinde bozulmalara, kısmideşarjlara (akım boşalmaları) ve izolasyonun kopmasına neden olabilir. Bu sebeple, kablo çalışma kapasitesinin ve hizmet süresinin uzatılması açısından, kablo boyunca sıcaklık ve gerginlik bilgilerine ulaşmak zorunlu hal almıştır.

Enerji kablolarında; güç transfer kapasitesi, kablo boyunca ortaya çıkan yüksek-sıcaklıklı noktalar ile sınırlandırılmaktadır. Bu “sıcak noktaları” kontrol etmek ve belirlemek oldukça zordur. Yük iletimi sırasında ve iletim öncesinde enerji kablolarının sıcaklık profili kontrolünün sağlanması ve optimum kullanımı, sıcaklık verilerinin gerçek-zamanda işlenmesiyle gerçekleştirilebilmektedir.

Bu tez çalışmasında; kablo boyunca sıcaklık verilerine ulaşabilmek için, yaygın olarak bilinen ve her ölçüm noktası için bir termokupl veya bir platin rezistans probun kullanıldığı “noktasal sıcaklık ölçüm metodu” yerine, Raman saçılmasına dayalı dağınmık sıcaklık ölçüm metodu kullanılmıştır. Kablo boyunca gerginlik verilerinin elde edilmesi için ise, sıcaklık ve Brillouin frekans kayması bilgilerinin kullanıldığı spontane Raman ve Brillouin esaslı teknikten faydalanılmıştır. Deneysel veriler ışığında, 1550 nm dalga boyunda tek modlu fiber kullanılarak 380 kV 5 km uzunluğunda yüksek gerilim enerji kablosu için eş zamanlı dağınmık sıcaklık ve gerginlik ölçümleri elde edilmiş ve belirli kriterler altında simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon bulguları altında, 1.5 m uzamsal çözünürlükle ~ 1.25 °C sıcaklık çözünürlüğü ve ~ 50 $\mu\epsilon$ gerginlik çözünürlükleri elde edilmiştir.

Bu çalışma da ayrıca, Brillouin frekans kayması ve güç değişimleri üzerindeki RMS gürültü miktarları sırasıyla, ~ 1.20 MHz ve $\sim\%$ 0.45 olarak elde edilmiştir. Bunların yanı sıra, sıcaklık ve gerginliğe bağlı olarak kablo boyunca Brillouin frekans kayması ve Brillouin güç değişimleri hesaplanmış ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Son olarak ise, spontane Raman ve Brillouin esaslı sensörlerin performansını etkileyen faktörlerin araştırması raporlanmış ve optik fiber sensör sistemlerinde gürültü kaynakları üzerinde durulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Optik Fiberli Sensör, Raman ve Brillouin Saçılması, Dağınmık Sıcaklık ve Gerginlik Ölçümü.

ABSTRACT

Optical fibers are utilized as sensor in the environmental conditions in which conventional monitoring and controlling processes are difficult and expensive by means of electrical terms in telecommunication and power distribution cables. An underground power cable is expose to electrical, thermal and mechanical effects that either shorten the life of cable insulation and or affect the cable performance unfavorable during its operating time. These effects can damage the cable insulation, induce the degradations in the quality of insulation, partial current discharges and perforation or breakdown of the cable insulation. Therefore; being obtained temperature and strain informations along the cable have become imperative by means of working capacity of the cable and extending service time.

In power cables; power transmission capacity is limited by high temperature spots occurred along the cable. It is too difficult to detect and determine these “hot spots”. Temperature profile control and optimum use of power cables during and before load transmission may be carried out with real-time processing of temperature data.

In this thesis; in order to obtain temperature data along the cable, distributed temperature measurement method based on Raman scattering have been used instead of the conventional temperature detection method in which a thermocouple or a platinum resistance probe is used for every measurement point and called “point temperature measurement”. In order to achieve the strain informations along the cable, spontaneous Raman and Brillouin based technique using the temperature and Brillouin frequency shift informations has been utilized. According to the results from experiments, distributed temperature and strain measurements along the high voltage power cable with a length of 5 km by using single mode fiber at 1550 nm have been obtained and the simulations under various working conditions have also been achieved. As results taken from the simulations supported by experiments, ~ 1.25 °C temperature resolution and ~ 50 $\mu\epsilon$ strain resolution with 1.5 m spatial resolution have been obtained.

In this thesis, Brillouin frequency shift RMS noise and Brillouin power change RMS noise have also been achieved as ~ 1.20 MHz and ~ 0.45 % respectively. Additionally, Brillouin frequency shift and Brillouin power change regarding to the temperature and strain informations along the cable have been computed and their simulations have also been executed.

Finally, investigation of the factors limiting the performance of spontaneous Raman and Brillouin based sensors have been reported and underlined the noise sources in optical fiber sensor systems.

Key Words: Optical Fiber Sensor, Raman and Brillouin Scattering, Distributed Temperature and Strain Measurement.

TEZ ONAY SAYFASI	II
ÖZET	III
ABSTRACT	IV
İÇİNDEKİLER	V
KISALTMALAR DİZİNİ	IX
ÇİZELGELER DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
SİMGELER DİZİNİ	XIV
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Giriş	3
2.2. Optik Fiberli Sensörlere Genel Bakış	3
2.2.1. Fiber Optik Sensörler	5
2.2.2. Fiber Optik Dağınık Sensörler	7
2.2.3. Dağınık Optik Fiberli Sensörlerin Çalışma Prensibi	7
2.3. Optik Fiber Sensörlerde Saçılma Prensibi	9
2.3.1. Rayleigh Saçılması	9
2.3.2. Raman Saçılması	10
2.3.2.1. Giriş	10
2.3.2.2. Raman Stokes ve Anti-Stokes Frekansı	13
2.3.2.3. Raman Optik Frekans-Domeni Reflektometresinin Dağınık Sıcaklık için Mükemmelleştirilmesi ve Analizi	13
2.3.2.4. Raman Saçılma Modeli	14
2.3.2.5. Prob Işığı ile Modüle Edilmiş Optik Fiber Raman Saçılması	17
2.3.2.6. İşaret İşleme ve Analizi	19
2.3.3. Brillouin Saçılması	22
2.3.3.1. Giriş	22

2.3.3.2. Spontane Brillouin Saçılması	24
2.4. Raman Esaslı Sıcaklık Sensörleri ve Brillouin Sensörler	27
2.5. Dağınık Optik Fiberli Sensörlerde Brillouin ve Raman Saçılmalarının Karşılaştırılması	30
2.6. Sensör Performansı Değerlendirme Kriterleri	32
2.7. Geri Saçılma Prensipli Esaslı Optik Ölçüm Teknikleri	36
2.7.1. OTDR Prensipli	37
2.7.2. BOTDR Prensipli	39
2.8. Fiber Optik Dağınık Algılamada Landau-Placzek Oranı	39
3. MATERYAL VE YÖNTEM	42
3.1. Giriş	42
3.2. XLPE Yalıtkanının Performansını Etkileyen Faktörler	44
3.3. Yüksek Gerilim Kablolarının Sıcaklığının Optik Fiberli Sensörlerle Anlık Olarak İzlenmesi	49
3.4. Akım Taşıma Kapasitesini Etkileyen Faktörler	51
3.5. Brillouin Esaslı Dağınık Sıcaklık/ Gerginlik Sensörleri	53
3.5.1. Giriş	53
3.5.2. Brillouin Esaslı Sensör Uygulamaları	53
3.5.3. Brillouin Esaslı Algılama Teknikleri	54
3.5.4. Spontane Brillouin Esaslı Sensörler	56
3.5.5. Spontane Brillouin Saçılmasında Kullanılan Tespit Metotları	60
3.5.5.1. Direk Tespit Metodu	60
3.5.5.2. Koherent Tespit Metodu	61
3.6. Brillouin Esaslı Dağınık Sıcaklık ve Gerginlik Sensörlerindeki İlerlemeler	62
3.7. Brillouin Gücü ile Kabloya Uygulanan Gerginlik ve Sıcaklık Arasındaki İlişki	63
3.8. Brillouin Frekans Kayması ile Sıcaklık / Gerginlik Değişimleri Arasındaki İlişki	69
3.9. Eş zamanlı Sıcaklık ve Gerginlik Ölçümü Teknikleri	72

3.9.1. Giriş	72
3.9.2. Spontane Brillouin Frekans ve Güç Esaslı Teknik	72
3.9.2.1. Giriş	72
3.9.2.2. Spontane Brillouin Frekans ve Güç Esaslı Teknik Prensibi	72
3.9.3. Brillouin Çoklu-Frekans Tepeleri Esaslı Teknik	75
3.9.3.1. Giriş	75
3.9.3.2. Brillouin Çoklu-Frekans Tepeleri Esaslı Teknik Prensibi	75
3.9.4. Spontane Raman ve Brillouin Saçılması Esaslı Teknik	79
3.9.4.1. Giriş	79
3.9.4.2. Spontane Raman ve Brillouin Saçılması Esaslı Teknik Prensibi	79
3.10. Spontane Brillouin Esaslı Algılayıcıların Performansını Sınırlayan Faktörler	83
3.10.1. Giriş	83
3.10.2. Gürültü ve Fiber Kayıpları	83
3.10.3. Lineer Olmayan Etkiler	86
3.10.4. Eş Evreli (Koherent) Rayleigh Gürültüsü	86
3.10.5. İşaret Tespit Sisteminde Ortaya Çıkan Gürültü Kaynakları	89
3.10.6. EDFA /Transem pedans Gürültü Modeli	91
3.10.7. Elektriksel Bant Genişliğinin Fonksiyonu Olarak Gürültü	93
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	94
4.1. Simülasyon Koşullarının Belirlenmesi ve Modelinin Oluşturulması	94
4.1.1. Simülasyonlarda Kullanılan Fiber Parametreleri ve Hesaplanması	96
4.2. Tartışma Konuları	102
5. SONUÇLAR	104

KAYNAKLAR

108

EKLER

112

ÖZGEÇMİŞ

TEŞEKKÜR

KISALTMALAR DİZİNİ

AOM	: Akusto-optik modülatör
ASE	: Kuvvetlendirilmiş Spontane Emisyon
BPF	: Bant Geçiren Filtre
BG	: Bragg Grating
BOCDA	: Brillouin Optik Korelasyon Domeni Analizi
BOTDA	: Brillouin Optik Zaman Domeni Analizi
BOTDR	: Brillouin Optik Zaman Domeni Reflektometresi
CBS	: Coherent Brillouin Sensör
CD	: Coherent Tespit
CRN	: Coherent Rayleigh Gürültüsü
CW	: Sürekli Dalga
DD	: Direk Tespit
DOFS	: Dağınık Optik Fiber Sensör
DPMZ	: Çift geçirmeli Mach-Zehnder
DTS	: Dağınık Sıcaklık Sensörü
EDFA	: Erbium Katkılı Fiber Kuvvetlendirici
ELO	: Elektriksel Lokal Osilatör
EOM	: Elektro-optik Modülatör
ESA	: Elektriksel Spektrum Analizcisi
FUT	: Test Altında Fiber
FWM	: Dört Dalga Karıştırıcı
IF	: Orta Frekans
LEAF	: Geniş Etki Alanlı Fiber
LO	: Lokal Osilatör
LPR	: Landau Placzek Oranı
MCF	: Metro Çekirdekli Fiber
MDS	: Mikro Dalga Tespit Sistemi
MI	: Modülasyon Kararlılığı
NA	: Nümerik Açıklık
NZ-DSF	: Sıfır Harici Dispersiyon Kaymalı Fiber
OSA	: Optik Spektrum Analizcisi
OTDR	: Optik Zaman Domeni Reflektometresi
RF	: Radyo Frekans
RIN	: Relatif Güç Gürültüsü
RMS	: Karesel Ortalama Değer
ROFDR	: Raman optik frekans domeni reflektometresi
ROTDR	: Raman optik zaman domeni reflektometresi
SBS	: Zorlanmış Brillouin Saçılması
SPM	: Self-Phase Modülasyon
SMF	: Tek Modlu Fiber

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Farklı Stokes ve anti-Stokes dalga boyları için yakalama katsayıları.

Çizelge 2.2 Farklı dalga boylarında parabolik gradyen indisli çok-modlu ve basamak indisli tek-modlu fiberler için zayıflama katsayıları.

Çizelge 2.3 1550 nm’de spontane Brillouin ve Raman saçılmasına ait değerler.

Çizelge 3.1 Kütle, uzama, gerginlik ve Brillouin frekans kayma miktarı.

Çizelge 3.2 Tek modlu fiberlerde gerginlik ve sıcaklık katsayıları.

Çizelge 3.3 Sıcaklık ve gerginlik katsayıları.

Çizelge 3.4 Sıcaklık ve gerginlik çözünürlükleri açısından üç tekniğin karşılaştırılması.

Çizelge 3.5 Farklı bant genişliklerinde teorik yüzde CRN gürültüsü.

Çizelge 4.1 5 km 380 kV yüksek gerilim kablosu boyunca elde edilmiş sıcaklık ve gerginlik çözünürlükleri.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 1550 nm silika bazlı fiberde Rayleigh, Brillouin ve Raman spontane ışık saçılımı spektrumunu gösteren şematik diyagram.

Şekil 2.2 Moleküler titreşim enerji seviyeleri. (a) Rayleigh Saçılması (b) Raman Saçılması.

Şekil.2.3 Dağınık sıcaklık ölçümü için ROFDRR devre düzeneği.

Şekil 2.4 Akustik dalga ile fiber içerisine pompalanan ışığın etkileşmesi ve Brillouin saçılmasının oluşumu.

Şekil 2.5 Brillouin dağınık sıcaklık sensörü (BDTS) devre şeması.

Şekil 2.6 DTS sisteminin blok diyagramı basit gösterimi.

Şekil 3.1 Fiber optik dağınık gerginlik sensörü devre düzeneği.

Şekil 3.2 (a) Farklı gerginliklerde elde edilmiş Brillouin sinyalleri
 (b) FSR ve Stokes anti-Stokes frekans ayrımı arasındaki uyumsuzluk nedenli oluşan farklı gerginlikler için Brillouin sinyalleri
 (c) Sadece gerginliğe bağımlı Brillouin sinyali
 (d) Gerginliğe bağımlı teorik Brillouin sinyali.

Şekil 3.3 Brillouin güç gerginlik katsayısı $(-9.1 \pm 1.9) \times 10^{-4} \% / \mu\epsilon$.

Şekil 3.4 Brillouin güç sıcaklık katsayısı (% 0.36/°C).

Şekil 3.5 Brillouin frekans kayması sıcaklık katsayısı $(1.07 \pm 0.06 \text{ MHz}/^\circ\text{C})$.

Şekil 3.6 Brillouin frekans kayması gerginlik katsayısı $0.048 \pm 0.004 \text{ MHz}(\mu\epsilon)^{-1}$.

Şekil 3.7 Spontane Raman gücü ve Brillouin frekans kaymasını ölçmek için tasarlanmış devre düzeneği.

Şekil 3.8 Raman anti-Stokes normalize edilmiş güç değişimi örnek değerlendirme.

Şekil 3.9 Farklı uzamsal çözünürlüklerde hesaplanmış dar bantlı Rayleigh sinyali.

Şekil 4.1 5 km uzunluğunda 380 kV yüksek gerilim kablosunda ölçülen sıcaklık değişimi.

Şekil 4.2 Kablonun 500-1525 m arasında boru içerisine girmesi sonucu ölçülen sıcaklık değişimi.

Şekil 4.3 5 km 380 kV yüksek gerilim kablosunda 3000. metrede kablo mufu (ek yeri) sebebiyle ölçülen sıcaklık değişimi.

Şekil 4.4 5 km 380 kV yüksek gerilim kablosu 3700-3800 metreleri arasında boru içerisinden geçerken ölçülen sıcaklık değişimi.

Şekil 4.5 5 km 380 kV yüksek gerilim kablosunun boru içerisinden geçtiği ve başka bir kablo ile kesiştiği 4600-4700 metreleri arasında ölçülen sıcaklık değişimi.

Şekil 4.6 500 metrelik aralıklarla yerleştirilen bağlantı noktalarında (Muf) ölçülen sıcaklık değişimleri.

Şekil 4.7 5 km uzunluğunda 380 kV yüksek gerilim kablosu için 2650-2850 m arasında elde edilen sıcaklık değişimi.

Şekil 4.8 5 km 380 kV yüksek gerilim kablosu boyunca Brillouin frekans kayması.

Şekil 4.9 5 km uzunluğunda 380 kV yüksek gerilim kablosunun 1500-1525 m arasında ölçülen Brillouin frekans kayması değişimi.

Şekil 4.10 5 km uzunluğunda 380 kV yüksek gerilim kablosunda 2200-2300 metreleri arasında ölçülen Brillouin frekans kayması.

Şekil 4.11 5 km uzunluğunda 380 kV yüksek gerilim kablosunun 3763. metresinde ölçülen maksimum Brillouin frekans kayması değişimi.

Şekil 4.12 3700-3800 metreleri arasında kablonun boru içerisine girdiği aralıkta ölçülen (ortalama 55 MHz) Brillouin frekans kayması.

Şekil 4.13 5km uzunluğunda 380 kV yüksek gerilim kablosu için 500-1000 m arasında elde edilen Brillouin frekans kayması.

Şekil 4.14 5 km uzunluğunda 380 kV yüksek gerilim kablosunda ölçülen Brillouin sinyali güç değişimi (%).

Şekil 4.15 5km uzunluğunda 380 kV yüksek gerilim kablosu için 500-1000 m arasında elde edilen Brillouin güç değişimi.

Şekil 4.16 5 km uzunluğunda 380 kV yüksek gerilim kablosu için gerginlik değişimi.

Şekil 4.17 5 km uzunluğunda 380 kV yüksek gerilim kablosunda 2200-2300 metreleri arasında ölçülen gerginlik değişimi.

Şekil 4.18 5 km uzunluğunda 380 kV yüksek gerilim kablosunda 3700-3800 metreleri arasında ölçülen gerginlik değişimi.

Şekil 4.19 5 km uzunluğunda 380 kV yüksek gerilim kablosu için 0-1200 m arasında gerginlik değişimi.

Şekil 4.20 Optik fiber algılayıcıya ait basit gösterim.

Şekil 4.21 5 km yüksek gerilim kablosu boyunca Brillouin güç değişimi üzerinde oluşan RMS gürültüsü.

Şekil 4.22 5 km yüksek gerilim kablosu boyunca Brillouin frekans kayması üzerinde oluşan RMS gürültüsü.

SİMGELER DİZİNİ

A_{eff}	: Efektif çekirdek alanı
α_B	: Brillouin saçılma katsayısı
α_R	: Rayleigh saçılma katsayısı
c	: Işığın boşluktaki hızı
D	: Dispersiyon parametresi
h	: Planck sabiti
G	: Modülasyon kararsızlık kazanç sabiti
gb	: Brillouin kazanç sabiti
gr	: Raman kazanç sabiti
fa	: Akustik frekans
K_T^P	: Brillouin güç sıcaklık katsayısı
K_T^V	: Brillouin frekans sıcaklık katsayısı
K_ε^P	: Brillouin güç gerginlik katsayısı
K_ε^V	: Brillouin frekans gerginlik katsayısı
K_ε	: Gerginlik katsayısı ($(4.6 \times 10^{-6} / \mu\varepsilon)$)
K_T	: Sıcaklık katsayısı ($(9.4 \times 10^{-5} / ^\circ C)$)
K_{VT}^{P1}	: Brillouin birinci tepe frekansı sıcaklık katsayısı
K_{VT}^{P2}	: Brillouin ikinci tepe frekansı sıcaklık katsayısı
$K_{V\varepsilon}^{P1}$: Brillouin birinci tepe frekansı gerginlik katsayısı
$K_{V\varepsilon}^{P2}$: Brillouin ikinci tepe frekansı gerginlik katsayısı
K_{RT}^P	: Raman gücü sıcaklık katsayısı
Δv	: Ölçülmüş Brillouin frekans kayması
Δv_r	: Pompa ve Raman anti-Stokes frekans farkı
Δv^{P1}	: Birinci tepe frekans kayması
Δv^{P2}	: İkinci tepe frekans kayması
ΔT_R	: Raman ölçümü ile hesaplanan sıcaklık değişimi
ΔP_R	: Raman güç değişimi
ΔP	: Güç değişimi
ΔT	: Sıcaklık değişimi
$\Delta \varepsilon$: Gerginlik değişimi
K	: Polarizasyon katsayısı
k	: Boltzman sabiti
U_0	: Aktivasyon enerjisi
τ_0	: Malzeme moleküllerinin ters titreşim frekansı (XLPE için $(10^{-12} - 10^{-14})$ s)
χ	: Yapısal parametre

E	: Elektriksel alan
L	: Fiber uzunluğu
L_{eff}	: Efektif uzunluk
L_w	: Walk-off uzunluğu
P_s	: Prob sinyali
P_p	: Pompa sinyali
P_b	: Brillouin geri saçılmış güç
P_o	: Fiber içerisine enjekte edilmiş sinyalin gücü
α	: Zayıflama
p	: Foto elastik sabiti
λ	: Dalga boyu
λ_a	: Akustik dalga boyu
λ_{bs}	: Brillouin saçılan sinyalin dalga boyu
λ_g	: Grating sinyali dalga boyu
λ_p	: Pompa sinyali dalga boyu
λ_s veya λ_S	: Stokes sinyali dalga boyu
λ_{as} veya λ_{AS}	: Anti-Stokes sinyali dalga boyu
h_s ve h_{AS}	: Sırasıyla Stokes ve anti-Stokes işaretlerinin ayrık darbe cevapları
$\Delta\lambda$: Dalga boyu değişimi
S	: Yakalama kesri
n	: Kırılma indisi
n_2	: Lineer olmayan kırılma indisi
ρ	: Silika yoğunluğu
β_T	: Sıkıştırılabilir izotermal denge
ϕ_{NL}	: Lineer olmayan Faz kayması
ϕ_{max}	: Maksimum Faz kayması
κ	: Sınır faktörü
k_p	: Zayıf perturbasyon dalga boyu
γ	: n_2 'yi açıklayan lineer olmayan parametre
ν_o	: Pompa frekansı
ν_b	: Brillouin frekans kayması
ν_a	: Akustik hız
ν_s	: Stokes frekansı
ν_{as}	: Anti-Stokes frekansı
ν_p	: Pompa frekansı
ν_g	: Grup hızı
β_2	: Sınır parametresi
δP	: Güç hatası
$\delta \nu$: Frekans hatası
δT	: Sıcaklık çözünürlüğü
$\delta \nu^{P1}$: Birinci tepe frekans hatası
$\delta \nu^{P2}$: İkinci tepe frekans hatası
$\delta \varepsilon$: Gerginlik çözünürlüğü
w	: Frekans ($w = (2\pi f)$)
W	: Darbe genişliği

\wp	: Bose-Einstein katsayısı
$\hbar\omega_0$: Fotonun enerjisi
ω_{so}	: Stokes ışığının merkez açılmal frekansı
$\Gamma_{S, grad}$: Gradyen indisli fiberler için Raman Stokes yakalama katsayısı(m^{-1})
$\Gamma_{AS, grad}$: Gradyen indisli fiberler için Raman anti-Stokes yakalama katsayısı(m^{-1})
$\Gamma_{S, sin gle}$: Tek modlu fiberler için Raman Stokes yakalama katsayısı (m^{-1})
$\Gamma_{AS, sin gle}$: Tek modlu fiberler için Raman anti-Stokes yakalama katsayısı (m^{-1})
n_{gr}	: Fiber nüvesi grup kırıcılık indisi
α_{dB}	: Fiber zayıflama katsayısı
\overline{P}_{AS}	: Algılanan ortalama anti-Stokes gücü (Watt)
\overline{P}_S	: Algılanan ortalama Stokes gücü (Watt)
$\Delta\alpha_p$: Diferansiyel zayıflama katsayısı (Neper)
Δz	: Uzamsal aralık
T ve T_f	: Sırasıyla mutlak sıcaklık ($^{\circ}K$) ve fiktif sıcaklık
τ	: Lazerin darbe süresi
P_0	: Lazerin güç tepe değeri
U_0	: Aktivasyon enerjisi ($E=0$)
ν_R	: Raman ve pompa dalga boyu arasındaki dalga sayısı ayrımı
n_{core}	: nüve kırılma indisi
n_{clad}	: Kılıf kırılma indisi
λ	: Operasyon dalga boyu
λ_c	: Fiberin kesme dalga boyu
R_{cs}	: Kritik eğrilik yarıçapı
Δ	: İzafi kırılma indir farkı
C_s	: Gerginlik katsayısı
C_t	: Sıcaklık katsayısı
P_s	: EDFA'ya ait giriş sinyal gücü
B_{eq}	: Eşdeğer bant genişliği
R_f	: Termal gürültü akımı geri besleme direnci
F	: Optik gürültü figürü
N	: Ortalama sayısı veya veri üzerinde işlenmiş sinyal bileşenleri
j	: Darbe, termal kökenli ve FET kaynağı
SNR_0	: Optik sinyal-gürültü oranı
SNR_e	: Sinyal-gürültü güç oranı
n_{sp}	: Spontane emisyon faktörü
V_{sat}	: Saturasyon gerilimi
i_{Darbe}	: Darbe gürültüsü
i_{Termal}	: Termal gürültü
i_{Sinyal}	: Sinyal gürültüsü
$i_{Kuvvetlendirici}$: Kuvvetlendirici gürültüsü
I_{ASE}	: ASE gürültüsü.

1. GİRİŞ

Optik fiberler, ışık taşımadaki yüksek verimlilikleri ve büyük bant genişlikleri nedeniyle, son yıllarda haberleşme sistemlerinin önemli elemanlarından biri olmuştur. Bu özellikleri; optik fiber sensörleri, geleneksel sensörlere göre daha önemli yapmıştır. Özellikle, yüksek çözünürlüklü oluşları ve daha düşük hata oranlarına sahip olmaları dikkatlerin, dağıntık optik fiberli sensörler üzerinde yoğunlaşmasına neden olmuştur.

Bir yer altı kablosu çalışma koşulları ne olursa olsun; kablo yalıtkanına zarar veren elektriksel, ısı ve mekanik zorlanmalara maruz kalır. Kablo yalıtkanın görevi, iyi bir elektriksel yalıtkan olmanın yanında, iletkenin ürettiği ısıyı iyi bir şekilde iletmektir. Birbirine zıt görünen bu durum, kablo yalıtkan kalınlığının doğru belirlenmesini gerektirmektedir. Kablo yalıtkanının maruz kaldığı en önemli etkilerden biri maksimum işletme sıcaklığıdır. Bu etkinin göz ardı edilmesi ve doğru zamanda tespit edilememesi, kablo ömrünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Çünkü, en sıcak noktadaki ısı etkileşim yaşanmayı tetiklemekte ve kablonun daha kısa sürede devre dışı kalmasına neden olmaktadır.

Kablo ömrünü direk etkileyen faktörlerin başında yer alan sıcaklık ve gerginlik gibi etkilerin doğru zamanda tespit edilmesi çok önemlidir. Optik fiber kabloların kendilerinin, sensör gibi davranmaları ve bir takım karakteristik özelliklere sahip olmaları, kablo yalıtkanın maruz kaldığı bu etkilerin tespiti açısından kullanılmasında önemli rol oynamaktadır. Optik fiber sensörler, birçok izleme ve ölçüm uygulamasında yaygın olarak bilinen transduser'ların yerini almıştır. Bunun nedenleri olarak; daha güvenilir oluşları, daha uzun ömürlü ve algılama sistemlerinde fonksiyonel olarak daha uygun oluşları gösterilmektedir.

Dünyada genel olarak çok sayıda optik fiberli sensör önerilmiş ve geliştirilmiştir. Bunlardan, dağıntık optik fiberli sensörler en etkili olanlarıdır. Bu sensörler, düşük kayıplı optik fiberlerin kullanılması sebebiyle uzun mesafelerde çalışabilmektedir ve maliyetleri ise bilgi toplayan ağ mantığı ile çalışan çok sayıdaki nokta sensörünün kullanıldığı sisteme kıyasla daha düşük olmaktadır. Bunun yanı sıra; yer altı enerji

kablolarında, optik linklerde ve geniş ölçekli yapılarda sıcaklık ve gerginlik izleme için potansiyel kullanım olanakları nedeniyle, uzun mesafeli dağınmık optik fiberli sensörlere olan ilgi her geçen gün artmaktadır.

Araştırmalar göstermiştir ki; Brillouin frekans kayması ve güç değişimi fiber linklerde eş zamanlı sıcaklık ve gerginlik değişimlerini uzamsal olarak çözümlmek için kullanılabilir. Araştırmaların bir kısmı kısa mesafeli sensörlerde çok yüksek uzamsal çözünürlüklere ulaşmak amacı ile yürütülürken diğer bir kısmına ise, algılama mesafelerini arttırmak ve uzun mesafelerde sensörlerin mutlak doğru ölçümlere ulaşmalarını sağlamak için yön verilmektedir.

Sadece Brillouin frekans kayması ölçümü metodu ile, sıcaklık veya gerginlik parametrelerinden birinin bilinmesi durumunda bu iki parametrenin her ikisini de elde etmek mümkün olabilmektedir.

Bu çalışmada; Raman saçılması esasına dayanarak kablo yalıtkanı boyunca ortaya çıkan sıcaklık değişimlerinin ve sıcaklık bilgisi yardımıyla da Brillouin frekans kayması bilgisini kullanarak gerginlik değişimlerinin, optik fiberli sensörlerle ölçülebilirlikleri araştırılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Giriş

Frekans ve Brillouin işaretinin uzamsal olarak elde edildiği birleştirilmiş sıcaklık ve gerginlik algılamada, sıcaklık ve gerginlik ölçümlerindeki doğruluk büyük oranda güç ölçümü doğruluğu ile hesaplanmaktadır. Bu yüzden, Brillouin güç ölçümüne gerek kalmadan yapılan alternatif teknikler araştırmacılar tarafından deneysel olarak araştırılmakta ve sonuçları karşılaştırılmaktadır. Brillouin frekans ve güç esaslı teknik, en iyi sonuçları veren teknik olarak kabul görmektedir.

Algılama mesafesi, yüksek oranda giriş işaretinin darbe gücüne bağlıdır. Darbe genişliği, gerekli uzamsal çözünürlük ile belirlenmektedir. Dolayısıyla, darbe tepe gücü, ortaya çıkan lineer olmayan etkilerle sınırlandırılmaktadır. Lineer olmayan etkiler araştırılmış ve bu araştırmalar neticesinde, standart tek modlu fiber kullanımı ve anormal dispersiyon rejiminde çalışması durumunda, modülasyon kararsızlığının en düşük eşik değere sahip olduğu kabul görmüştür. Modülasyon kararsızlığından kaçınmak 1550 nm.'de negatif dispersiyonlu fiberler kullanarak mümkün olmaktadır.

2.2. Optik Fiberli Sensörlere Genel Bakış

Optik fiber sensörlerde (OFS) çalışma esası, ışın demetinin ölçümü yapılacak olgu ile değiştirilmesi ilkesine dayanmaktadır. Ölçülecek parametre (sıcaklık, basınç, mekanik stres, gerginlik gibi) fiziksel, kimyasal veya biyolojik bir parametre olabilir, ve optik fiber sensörler geniş bir ölçüm aralığında örneklerle kanıtlanmıştır.

Modüle edilen optik işaretin özellikleri; güç, frekans, faz ve kutuplanma durumuna göre farklılık göstermektedir. Silika esaslı OFS'lerin diğer algılama teknolojilerine kıyasla bir çok avantajı mevcuttur.

Bunlardan en önemlileri;

- Güçlü elektromanyetik alanlar, çok yüksek voltajlar, nükleer radyasyon, patlayıcı ortam ve yüksek sıcaklık gibi zor çevresel koşullara uygulanabilir olmaları,
- Büyük bant genişliğinde potansiyel olarak yüksek duyarlılığa sahip olmaları ve ayrık ve/veya dağınık biçimde ölçülecek parametreler için büyük mesafelerde girişim yeteneğine sahip olmaları,
- Esnek geometrileri oluşu, muazzam bilgi taşıma kapasiteli sensörlerin tasarlanmasına olanak sağlamaları olarak verilebilir (De Souza 1999).

Uygulamada birçok OFS türü bulunmaktadır ve her biri sensör teknolojileri ile rekabet edecek bilimsel potansiyele ve ekonomik rekabet yeteneğine sahiptir. Bunlardan ayrık ve dağınık optik fiber sensör uygulamaları başarılı bir biçimde gerçekleştirilmiştir. Ayrık ve yarı-dağınık algılama metodunda, çok sayıda algılama noktasına ihtiyaç vardır. Ama ölçümler sadece ayrık noktalarda gerçekleştirilebilmektedir. Başka bir deyişle, dağınık optik fiber sensörler, ölçülecek parametreyi mesafenin bir fonksiyonu olarak sürekli izleme olanağı sunmaktadır. Bu tezde, tamamen dağınık optik sensörler üzerine yoğunlaşmıştır.

Dağınık algılama teknikleri yaygın olarak optik zaman domeni reflektometresini (OTDR) baz almaktadır. Son yıllarda, optik zaman domeni reflektometresini (OTDR) esas alan dağınık optik fiberli sensör ve yarı-dağınık metot, bu konudaki araştırmaların merkezi olmuştur. OTDR metodunda, optik darbeler optik fiber içerisine gönderilmekte ve sıcaklık/gerginlik sebepli olarak geriye saçılmış işaretteki değişimler tespit edilmektedir. Dağınık sıcaklık algılamada, ilk olarak silika fiberler ve sıvı-çekirdekli fiberler boyunca sıcaklık nedenli olarak oluşan Rayleigh saçılma katsayısındaki değişimleri kullanan, Hartog ve Payne olmuştur. Sıvı-çekirdekli fiberler, silika fiberlerden daha büyük katsayılara sahiptir. Yinede, sıvı-çekirdekli (nüveli) fiberlerin bilinmeyen güvenilirliği kullanımlarını kısıtlamaktadır (Hartog 1985).

Daha sonraları ise, Raman saçılmasında elde edilen gelişmeler neticesinde Raman optik zaman domeni reflektometresini (ROTDR) esas alan Raman dağınık

sensörler üzerine çalışmalara ağırlık verilmiştir. Bu metotta, kısa bir lazer darbe işareti fiber boyunca ilerlemekte ve geri saçılmış Raman ışığı yüksek sıcaklık çözünürlüklü olarak tespit edilmektedir. Geri saçılmış ışık, ışık kayıp bilgisini ve fiber boyunca sıcaklık bilgisini içermektedir.

Diğer bir dağılık sıcaklık optik fiberli sensör ise, Raman optik frekans domeni reflektometresi (ROFDR) sensörüdür. Bu sensör, Raman optik frekans domeni reflektometresini esas almaktadır. İlk olarak 1999 yılında Farahani ve Gogolla tarafından geliştirilmiştir. Ancak bu modelde bazı kısıtlar ve sınırlamalar bulunmaktadır (Farahani ve Gogolla 1999).

Dağılık sıcaklık ve gerginliğin eş zamanlı ölçümünün Raman veya Rayleigh saçılmalarını baz alan tekniklerle ölçülmesi iyi sonuçlar vermediğinden Brillouin saçılması üzerine yoğunlaşmaya başlanılmıştır. Brillouin saçılmalı ışık işaretindeki önemli problemlerden biri, oluşan Brillouin frekans kaymasının sebebinin, sıcaklık mı yoksa gerginlik mi olduğunu ayırt edememektir. Bu sorunu çözmek için, Brillouin zaman domeni reflektometresi (BOTDR) tekniği geliştirilmiştir. Bu teknikte, öncelikle fiber kısımlara ayrılmakta, bu kısımlarından yansıyan ışık ise dedektörde algılanmaktadır. Yansıyan ışık dedektöre ulaşma sürelerine göre birbirinden ayrılabilir. Böylece, frekans kaymasının sıcaklık veya gerginlikten kaynaklı olduğu anlaşılmaktadır.

2.2.1. Fiber Optik Sensörler

Bir fiber optik sensör, sıcaklık/gerginlik parametrelerinin enerjisini algılayıcı olarak kullanılan fiber boyunca ilerleyen ışığın fiziksel özelliğine dönüştüren bir transduser olarak kabul edilmektedir. Fiber optik bir sensör (FOS); bir ışık kaynağı, ışığın iletimini sağlayan bir algılayıcı olarak çalışan bir optik fiber ve bir alıcıdan oluşmaktadır. Burada alıcı; optik işareti, elektriksel işarete dönüştürmektedir. Bu elektriksel işaret ise, işaret işleme yöntemleri vasıtasıyla algılanmış bilgiden elde edilmektedir. Sıcaklık ve/veya gerginlik gibi ölçüm parametreleri, ışığın fiziksel bir özelliğini modüle etmek suretiyle, ışığın doğasını değiştirmektedir.

Sensörler genel olarak, içte etkileşimli sensörler ve dışta etkileşimli sensörler olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar. İçte etkileşimli sensörlerde; fiber içerisinde kılavuzlanmış ışık, ölçülecek parametreye göre modüle edilmekte ve işaretin işlenmesi için değerlendirilmektedir. Dışta etkileşimli sensörlerde ise, ışığın fiberin dışına çıkmasına izin verilmekte ve işaretin işlenmesinden önce ayrı bölgelerde modüle edilmektedir.

Fiber optik sensörlerin doğasında olan avantajlar nedeniyle gün geçtikçe büyüyen popülaritesi, onları teknolojinin hızla ilerlediği çağımızda birçok durumda daha kullanışlı ve daha uygun yapmaktadır. Fiber optik sensörlerin bazı avantajları;

- Potansiyel olarak yüksek duyarlılık,
- Yüksek voltaj, elektriksel gürültü ve yüksek sıcaklık gibi çevresel şartlar altında dahi çalışmaya olanak sağlayan dielektrik yapı,
- Özel uygulama alanları için değişik konfigürasyonlarda imal edilme kolaylığına sahip olma,
- Çok sayıda fiziksel düzensizliklerde algılama sağlayan cihazların imalatlarına imkan sağlayan yaygın teknoloji tabanına sahip olma,
- Fiber kablo boyunca, ayrık veya dağınık pozisyonlarda sıcaklık/gerginlik gibi parametrelerin ölçülmesine olanak sağlama,
- Fiberin yapısı gereği küçük boyutlu ve hafif olması, olarak sayılabilir.

Fiber optik sensörler, yukarıda bahsedilen özellikleri gereği; akustik, manyetik, sıcaklık, basınç, yer değiştirme, tork, foto elastisite, ivme, akım, kimyevi değişim parametreleri ve gerginlik sensörlerinin gelişimini hızlandırmış ve bu alanlarda geniş uygulama alanı bulmuştur. Bu sensörlerin diğer bazı uygulama alanları ise; uzay çalışmaları, aviyonik, tıbbi ekipmanlar, güvenlik sistemleri, petrol sanayinde benzin ve/veya gaz algılama, endüstriyel sıcaklık ve gerginlik algılama olarak sayılabilir.

Fiber optik sensör uygulamaları sayısızdır ve teknolojik açıdan bilimselliği ve ekonomik oluşu ile ön plana çıkmıştır.

2.2.2. Fiber Optik Dağınmık Sensörler

Bir fiber optik algılayıcı, kablo ek (muf) yerlerinde, çapraz bağlantı noktalarında ve bağlantı elemanlarının kullanıldığı sürekli kesintisiz optik bir fiber boyunca, sıcaklık /gerginlik parametrelerinin değişimlerini izlemeye imkan sağlamaktadır. Bu tip algılayıcılar (sensörler), ölçülecek parametrenin (sıcaklık, gerginlik) ayrık noktalarda algılandığı yarı-dağınmık algılayıcıların aksine tam dağınmık algılayıcı olarak bilinmektedir. Bu çalışmada, sıcaklık ve gerginlik profillerinin çıkarılması için kullanılacak optik fiber algılayıcılar, tam dağınmık algılayıcılardır.

Dağınmık bir algılayıcının başarılı ölçüm yapabilmesi aşağıdaki kriterlerle mümkün olabilmektedir:

- Algılayıcının, ölçümü yapılacak parametre ile ışığın modüle edildiği fiber bölgesine yerleştirilmesi,
- Verilen bir algılama mesafesi için kabul edilebilir çözünürlük (sıcaklık, gerginlik ve uzamsal) ve termal cevap süresine sahip olması.

Fiber optik dağınmık algılayıcı tasarımları, hem ileri yönde saçılmış ışık işaretinin hem de geri yönde saçılmış ışık işaretinin tespiti ve analizini esas almaktadır. Bu çalışmada özellikle, Raman ve spontane Brillouin geri saçılmış işaret verileri analiz edilmiştir.

2.2.3. Dağınmık Optik Fiberli Sensörlerin Çalışma Prensipleri

Çoğu dağınmık optik fiber sensör, güçlü (OTDR) Optik Zaman Domeni Reflektometresi (yansıma ölçer) prensibi altında çalışmaktadır. OTDR'nin kendisi, fiber ek yeri kayıplarını ölçmek veya fiber boyunca oluşan kırılma ve çatlakların yerlerini tespit etmek için kullanılan hata bulma yaklaşımını esas almaktadır. Bu yaklaşımda, bir ışık darbesi fiber içerisine gönderilmekte ve geriye saçılan Rayleigh ışığı ölçülmektedir. Işık darbesinin fiber içerisine gönderilmesi ile geriye saçılan ışığın tespiti arasında geçen süre, saçılmanın olduğu noktayı tespit etmek için kullanılmaktadır.

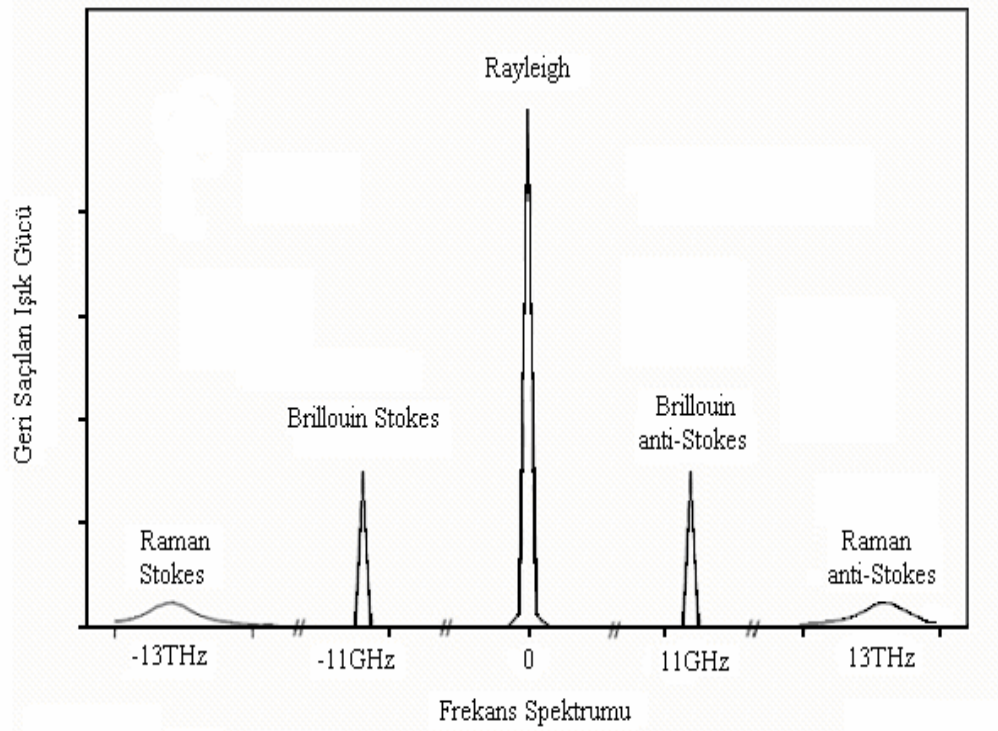
Bir ışık kaynağı; algılama elemanı olarak, bir optik fiber ve bir işaret işleme devre elemanından oluşur. Genellikle; darbe kaynaklarının karakteristikleri, istenen algılama mesafesine, uzamsal aralığa, uzamsal çözünürlüğe ve lineer olmayan eşik değerine bağlı olarak değişmektedir. Bant genişliği, duyarlılık, lineerlik ve tespit sistemine ait dinamik mesafe dikkatli bir biçimde seçilmektedir ve kullanılan darbe genişlikleri ve geri saçılan ışığın seviyeleri ile uyumlu olacak biçimde tasarlanmaktadır. Bilindiği gibi, geri saçılan ışık sinyali doğal olarak zayıf bir sinyaldir ve çok miktarda üzerine binmiş gürültü içermektedir. Bu yüzden, geri saçılan işaretten sıcaklık ve/veya gerginlik bilgilerini elde etmek için ortalama alma ve veri işleme proseslerine gerek duyulmaktadır.

Algılayıcı olarak kullanılan fiberin uzunluğu normal olarak, lazerin maksimum tekrarlama hızında bir kısıtlamaya neden olur. Çünkü ikinci ışık darbesi, birinci ışık darbesinden geriye saçılmış olan işaretin alınmasının ardından gönderilmektedir. Örneğin; 100 km uzunluğunda bir fiber maksimum tekrarlama hızını 1 kHz'e sınırlamaktadır ve bu çok sayıda çizginin ortalamasını almak için geçen süreyi etkilemektedir.

DOFS (dağınık optik fiber sensörler) için kullanılan ana saçılma mekanizmaları; Rayleigh, Raman ve Brillouin saçılma mekanizmalarıdır. Rayleigh saçılma mekanizmasının aksine, Raman ve Brillouin saçılmalarında fiber içerisine gönderilen ışığın frekansı ile saçılan ışığın frekans arasında fark olmaktadır. Bu fark, Raman saçılmasında 13 THz, Brillouin saçılmasında ise 11 GHz seviyelerindedir.

Saçılma prosesi içerisinde, fotonların enerji kazanarak üst enerji durumuna geçen ve daha yüksek frekansa sahip olan bileşenler anti-Stokes bileşenleri ve enerji kaybederek daha düşük frekansa sahip olan bileşenler ise Stokes bileşenleri olarak adlandırılmaktadır (De Souza ve Keith 1999).

Şekil 2.1'de, silika esaslı fiberde saçılan ışığın spektrumunda, Rayleigh, Raman ve Brillouin geri saçılan işaretler gösterilmektedir.



Şekil 2.1 1550 nm silika bazlı fiberde Rayleigh, Brillouin ve Raman spontane ışık saçılımı spektrumunu gösteren şematik diyagram.

Kaynak: De Souza, Fiber optic distributed sensing based on spontaneous Brillouin scattering 1999, s.13.

1550 nm’de Brillouin bileşenleri Rayleigh işaretinden yaklaşık olarak 15 dB daha düşüktür ve frekans spektrumunda ≈ 11 GHz’lik bir frekans farkı ile ayrılmaktadır. Raman bileşenleri, Brillouin bileşenlerden daha düşük büyüklüğe sahiptir ve Rayleigh işaretinden yaklaşık 13 THz’lik bir frekans farkı ile ayrılmaktadır.

2.3. Optik Fiber Sensörlerde Saçılma Prensibi

2.3.1. Rayleigh Saçılması

Rayleigh saçılması fiberin içerisinde meydana gelen içte etkileşimli bir saçılmadır ve fiberin bütünü boyunca var olmaktadır. Fiberin üretimi esnasında optik fiber içerisinde dondurulmuş bileşim varyasyonları ve yoğunluktaki rasgele

homojensizliklerden ve düzensizliklerden meydana gelmektedir. Bu varyasyonlar, kırılma indisi dalgalanmalarına neden olmakta ve fiber nümerik açıklığından saçılmış olan ışığın bir kısmının, fiber içerisinde ilerleyen ışığa zıt yönde kılavuzlanması ile sonuçlanmaktadır.

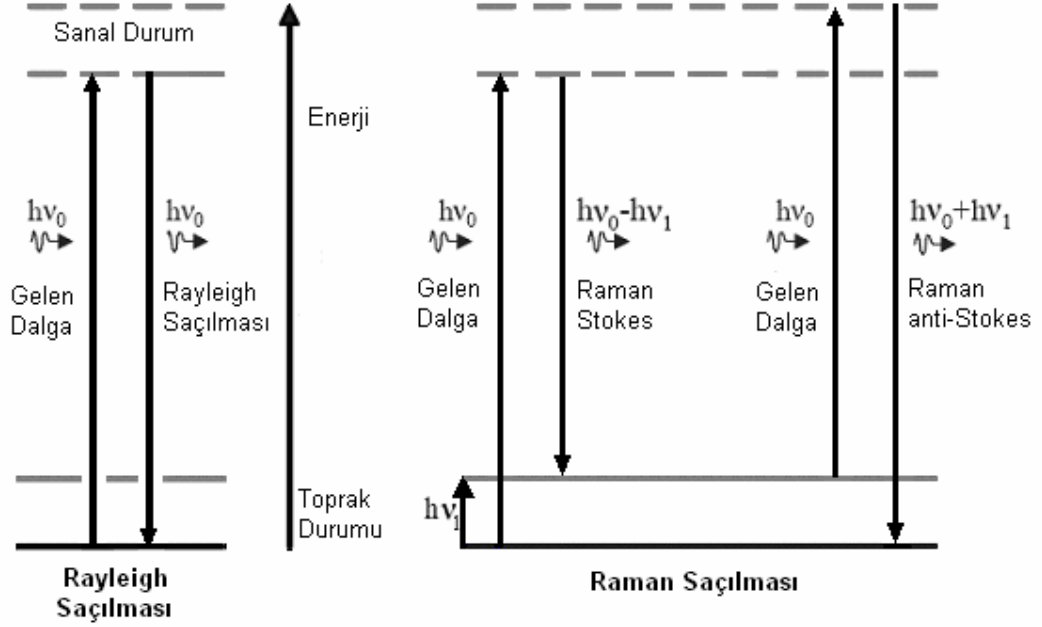
Rayleigh saçılması, α zayıflama katsayısı ile karakterize edilmektedir. Bu katsayı, 1550 nm'de standart tek modlu fiber için λ^{-4} ile orantılıdır. Burada $\alpha \approx 4.56 \times 10^{-5} m^{-1}$ değerine eşittir ve $\approx 0,20$ dB/km fiber zayıflamasına eşdeğerdir. Rayleigh saçılması OTDR sistemlerinde kullanılan bir mekanizma olmakla beraber, ticari açıdan fiberdeki hasarın ve fiber zayıflamasının tespiti için kullanılmaktadır. Standart silika esaslı fiberlerde ışığın bu şekilde saçılması, sıcaklık ve gerginlik değişimlerinden büyük ölçüde etkilenmemektedir.

2.3.2. Raman Saçılması

2.3.2.1. Giriş

Raman gibi elastik olmayan saçılma süreçleri, fiber içerisine gönderilen ışık ile ortamın moleküler yapısında ortaya çıkan titreşimsel moleküler modlar arasındaki etkileşimin bir sonucu oluşmaktadır. Saçılma, fotonlar ile açıklanabilen bir enerjiye sahiptir. Bu süreçte, gönderilen ışık fotonunun enerjisinde bir değişim olmaktadır, bu değişim hem enerji kaybı hem de enerji alma biçimindedir. Bu yüzden, sırasıyla Raman Stokes ve anti-Stokes işaretleri yaratılmaktadır.

Aşağıda, Şekil 2.2(a) bir silika fiber içerisinde bilinen Rayleigh saçılmasına ait şematik diyagramı gösterirken Şekil 2.2(b)'de silika fiberde Raman saçılması gösterilmektedir.



(a) Rayleigh Saçılması

(b) Raman Stokes ve anti-Stokes Saçılması

Şekil 2.2 Moleküler titreşim enerji seviyeleri. (a) Rayleigh Saçılması (b) Raman Saçılması. Şekilde; ν_0 ve ν_1 sırasıyla gelen ışık frekansı ve kaydırılmış ışık frekansı, h ise Planck sabitini ifade etmektedir.

Kaynak: M. Alahbabi, Distributed optical fiber sensors beased on the coherent detection of spontaneous Brillouin scattering, Doktora Tezi, 2005.

Silika fiberde Raman saçılması, cam kafesteki moleküllerin doğal yapısının kristalize olmaması nedeni ile geniş bir frekans aralığında ortaya çıkmaktadır ve cam yapı içerisinde farklı molekül grupları için farklı titreşimsel enerjileri kılavuzlamaktadır. Raman saçılmasının bu önemli özelliği Stokes ve anti-Stokes işaretlerin geniş bantlı olmasına olanak sağlamaktadır.

Rayleigh saçılmasının aksine, Raman saçılması dağınık algılama yönteminde sıcaklık ölçmek için kullanılabilir. Sıcaklık ölçümünde, sıcaklık duyarlılığı daha yüksek olduğu için anti-Stokes işaretin güç değişimleri esas alınmaktadır. Çünkü, anti-Stokes işareti oluşturan fotonların titreşimsel hızlarındaki artış Stokes işarete oranla

daha fazladır. Sıcaklık artışı nedeniyle saçılmanın olduğu noktada, fotonların dağılımında lineer olarak bir artış söz konusu olmaktadır. Saçılmanın olduğu noktadaki mutlak sıcaklığı ve anti-Stokes / Stokes oranını kullanarak, sıcaklık bağımlılığı veya sıcaklık katsayısını elde etmek mümkün olmaktadır. Raman gücü sıcaklık değişimi eşitlik (2.1) ile verilmektedir.

$$R(T) = \left[\frac{\lambda_s}{\lambda_{as}} \right]^4 e^{-\left(\frac{h\Delta\nu_r}{kT}\right)} \quad (2.1)$$

Burada λ_s ve λ_{as} sırasıyla Raman Stokes ve anti-Stokes dalga boyları, h Planck sabiti, $\Delta\nu_r$ Raman anti-Stokes ve pompa arasındaki frekans farkı, k Boltzman sabiti ve T ise Kelvin olarak sıcaklık değerleridir. Raman gücünün sıcaklığa duyarlılığı, yukarıda verilen eşitlikten ($R(T)$ ile verilen eşitlik) aşağıda verildiği gibi elde edilebilmektedir:

$$\frac{1}{R(T)} \frac{dR(T)}{dT} = \frac{h\Delta\nu_r}{kT^2} \quad (2.2)$$

2.2 formülünü kullanarak $\Delta\nu_r = 13.5$ THz ve $T = 293$ °K (oda sıcaklığı) değerlerini alarak, sıcaklık değişimine bağlı olarak Raman gücü yüzde değişimi, yaklaşık % 0.80/°K olarak bulunur.

Bu konuda; Huai Hoo Kee ve arkadaşları 1999 yılında 1650 nm lazer kaynak kullanarak bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarında, 10 km uzunluğunda tek modlu fiber kablo için anti-Stokes ve Stokes işaretlerin Raman geriye saçılma katsayılarındaki değişimleri kullanarak 10 m uzamsal çözünürlükte ve 4 °C sıcaklık çözünürlüğünde fiber kablosu boyunca sıcaklık profillerini elde etmişlerdir. Raman yaklaşımları, çok pratik yaklaşımlardır, çünkü, yaygın olarak bilinen silika esaslı optik fiberler, sensör olarak kullanılabilir. Bunun yanı sıra; anti-Stokes Raman geriye saçılmış işaret, Rayleigh geriye saçılmış işareten yaklaşık olarak 30 dB daha zayıf bir işarettir. Buna rağmen, sıcaklığa duyarlılığı Rayleigh işaretinden daha yüksektir. Bu yüzden, Raman saçılmasına dayalı sistemlerin çoğu, üretici tarafından ticarileştirilmiştir.

2.3.2.2. Raman Stokes ve Anti-Stokes Frekansı

Frekans domeninde, Raman saçılma fotonları Stokes saçılma fotonu ve anti-Stokes saçılma fotonundan oluşmaktadır. Bunların frekansları aşağıdaki biçimde ifade edilebilir.

Stokes saçılma frekansı:

$$f_s = f_o - \Delta f \quad (2.3)$$

Anti-Stokes saçılma frekansı:

$$f_{As} = f_o + \Delta f \quad (2.4)$$

Bu ifadede; f_o fibere giren ışığın (pompanan ışığın) frekansdır, Δf ise frekans kaymasıdır. $\Delta f = 1.32 \times 10^{22}$ Hz'dir.

Raman saçılması sırasında, foton başlangıç kararlı durumdan başka bir kararlı duruma geçer ve enerji farkı $\Delta E = h \cdot \Delta f$ 'dir.

2.3.2.3. Raman Optik Frekans-Domeni Reflektometresinin Dağılık Sıcaklık için Mükemmelleştirilmesi ve Analizi

Dağılık sıcaklık için Raman optik frekans-domeni reflektometresine (ROFDR) ait basit gösterim Şekil 2.3'te verilmektedir. Burada; f_o frekansının lazer güç probu fiber içerisinde $z = 0$ pozisyonunda çift oluşturur. Lazer ışığın, elektro optik modülatör (EOM) ile sinüzoidal olarak yoğunluğu modüle edilir. Burada, aynı mesafede (eşit uzaklıkta) modülasyon frekansı f_m kullanılmaktadır.

Modülatör bir işaret jeneratörü ile sürülmektedir. Stokes ve anti-Stokes hatlarına ait güçler, ışık detektörleri (APD) ile tespit edilmektedir. Giriş prob gücünün % 1'i bir pin (iğne) foto diyodu (PPD) ile alınır.

Foto diyotların çıkış işaretleri, ki bunlar modüle edilmiş optik güçlere orantılıdır ve bir işaret işleme sistemini beslemektedir.

2.3.2.4. Raman Saçılma Modeli

Tek modlu fiberlerde, fiber nüvesinin etki alanı A ve fiber çekirdeğin molekül yoğunluğu N_0 kabulü ile, $A.dz$ hacim içinde $N_0.A.dz$ molekülleri vardır ve toplam Raman saçılma gücü (2.5) ile ifade edilir. Bu ifade, çok-modlu basamak indisli fiberler içinde geçerlidir.

$$dP'_{s, \sin gle} = \rho_s \Gamma_{s, \sin gle} P_0 dz \quad (2.5)$$

Burada, Raman Stokes yakalama katsayısı $\Gamma_{s, \sin gle}$, (2.6) eşitliği ile verilmektedir.

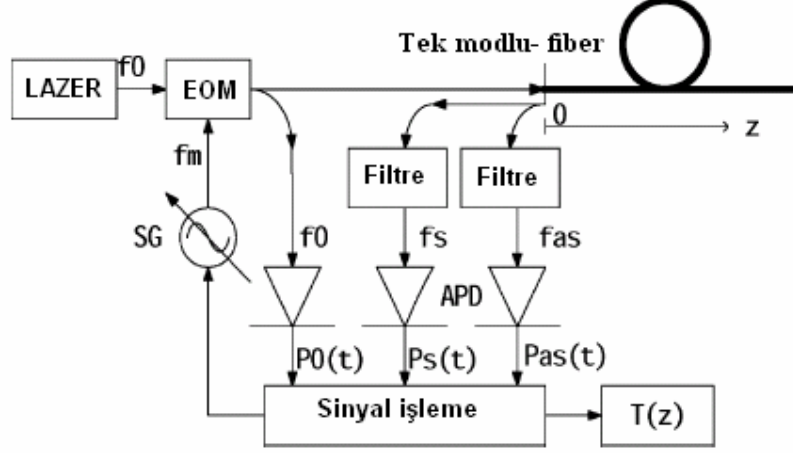
$$\Gamma_{s, \sin gle} = \pi \beta_c^2 N_0 \frac{d\sigma_{eff}}{d\Omega} \left(\frac{\pi}{2}, \omega_{so} \right) \quad (2.6)$$

Çizelge 2.1'de farklı Stokes ve anti-Stokes dalga boyları için yakalama katsayıları verilmektedir.

Çizelge 2.1 Farklı Stokes ve anti-Stokes dalga boyları için yakalama katsayıları.

$\lambda_0 (nm)$	840	1320	1550
$\lambda_S (nm)$	872	1401	1663
$\lambda_{AS} (nm)$	810	1248	1451
$\Gamma_{S, grad} (x10^{-10} m^{-1})$	87.7	13.2	6.63
$\Gamma_{AS, grad} (x10^{-10} m^{-1})$	118	20.9	11.4
$\Gamma_{S, \sin gle} (x10^{-10} m^{-1})$	-	4.28	3.04
$\Gamma_{AS, \sin gle} (x10^{-10} m^{-1})$	-	5.39	4.00

Eşitlik (2.6)'da verilen $\frac{d\sigma_{eff}}{d\Omega}(\frac{\pi}{2}, \omega s_0)$, diferansiyel Raman kesitidir ve sıcaklığa bağımlılığı bulunmamaktadır. βc ise saçılan ışığın dalga vektörü ile fiber eksenindeki maksimum açığa karşılık gelmektedir.



Şekil 2.3 Dağıntık sıcaklık ölçümü için ROFDR devre düzeneği.

Fotonların Bose-Einstein olasılık dağılımına göre, Raman Stokes çizgileri için Bose-Einstein faktörü (2.7) ile ifade edilmektedir.

$$\rho_s = \frac{1}{1 - \exp(-\Delta E / kT)} \quad (2.7)$$

Burada; k Boltzmann sabiti, T fiberin Kelvin cinsinden mutlak sıcaklığıdır.

T dağıntık sıcaklık, t zamanın ve z uzunluğun bir fonksiyonu olur. Sıcaklık, ölçme zamanına bağlı olarak kısa zamanda çok az değişiyor ise ρ_s ve T, z'nin bir fonksiyonu olur. ρ_s ifadesi (2.8) ile verilmektedir.

$$\rho_s(z) = \frac{1}{1 - \exp(-\Delta E / kT(z))} \quad (2.8)$$

Genel ifade ile, ρ_s ve ρ_{as} sırasıyla Stokes ve anti-Stokes bantları için Bose-Einstein faktörüdür.

Eşitlik (2.5), (2.9) formunda yazılabilir.

$$dP'_{s,\sin gle} = \rho_s(z) \Gamma_{s,\sin gle} Podz \quad (2.9)$$

Eşitlikte; Raman Stokes saçılma gücünün, dağınık sıcaklık ile bağlantılı olduğu görülmektedir. Anti-Stokes çizgisi Stokes çizgileri ifadesine çok benzer bir biçimde (2.10)'da olduğu gibi ifade edilmektedir.

$$dP'_{as,\sin gle} = \rho_{as} \Gamma_{as,\sin gle} Podz \quad (2.10)$$

$$\rho_{as} = \frac{\exp(-\Delta E / kT)}{1 - \exp(-\Delta E / kT)} \quad (2.10a)$$

$$dP'_{as,\sin gle} = \rho_{as} \Gamma_{as,\sin gle} Podz \quad (2.10b)$$

$$\Gamma_{as,\sin gle} = \pi \beta_c^2 N_0 \frac{d\sigma_{eff}}{d\Omega} \left(\frac{\pi}{2}, \omega_{ASO} \right) \quad (2.11)$$

$$\rho_{as}(z) = \frac{\exp(-\Delta E / kT(z))}{1 - \exp(-\Delta E / kT(z))} \quad (2.12)$$

Tek modlu fiberlerde, Stokes ve anti-Stokes dalgası için etkin güç zayıflama katsayıları aşağıdaki eşitlikler (2.13) ve (2.14) ile verilmektedir.

$$\alpha_{P,S} = \frac{\alpha_P(\lambda_0) + \alpha_P(\lambda_S)}{2} \quad (2.13)$$

$$\alpha_{P,AS} = \frac{\alpha_P(\lambda_0) + \alpha_P(\lambda_{AS})}{2} \quad (2.14)$$

2.10(b)'deki ifadeden de görüldüğü gibi, anti-Stokes Raman saçılma gücü de dağılık sıcaklığa bağlıdır. Çünkü, ρ_{as} ifadesi sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Parabolik gradyen indisli çok modlu fiber ve tek modlu fiberler için zayıflama katsayıları, farklı dalga boyları için Çizelge 2.2'de verilmektedir.

Çizelge 2.2 Farklı dalga boylarında parabolik gradyen indisli çok-modlu ve basamak indisli tek-modlu fiberler için zayıflama katsayıları.

$\lambda(\text{nm})$	Parabolik gradyen indisli çok modlu fiber, α (dB/km)	Tek modlu fiber, α (dB/km)
810	3.00	2.40
840	2.40	1.90
872	2.00	1.60
1248	0.60	0.40
1320	0.40	0.33
1401	0.90	0.40
1451	0.50	0.25
1550	0.35	0.20
1663	0.37	0.22

Stokes zayıflama katsayısı Neper cinsinden $\alpha_{p,s}(\text{neper}) = \alpha_{p,s}(\text{dB})x \frac{\ln(10)}{L}$ eşitliği ile ifade edilir. Anti-Stokes zayıflama katsayısı da benzer biçimde ifade edilmektedir. L fiber uzunluğunu ifade eder.

2.3.2.5. Prob IşığI ile Modüle Edilmiş Optik-Fiber Raman Saçılması

Optik-fiber eksen yönü z kabul edilerek, z = 0 pozisyonunda giriş lazer gücü, eşitlik (2.15) formunda sinüzoidal ve yoğunluk modülasyonlu olarak ifade edilmektedir.

$$Po(t, z = 0) = \hat{P} o[1 + \cos(\omega_m t)] \quad (2.15)$$

Bu ifadede genlik ve faz, açısız modülasyon frekansına (ω_m) zayıf bir biçimde bağımlıdır. Sonuç olarak, bu bağımlılık ihmal edilebilir. Modüle edilmiş prob lazer gücü fiber boyunca ilerlerken, fiber zayıflamasına ve faz kaymasına bağlı olarak, kayıplara maruz kalmaktadır.

Fiber dispersiyonu bir diğer önemli faktördür, prob ışığının ileri yönde alçak geçirilmesi ($L_{p,1}$) anlamına gelmektedir. Bu yüzden, prob gücü fiber pozisyonu z parametresinin (mesafenin) bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$P_o(t, z) = \hat{P}_o \exp[-\alpha_p(\lambda_o)z] [1 + L_{p,1} \cos(\omega_m t - k_m z)] \quad (2.16)$$

Raman Stokes saçılması, z lokasyonunda dz gibi küçük bir kısımda olursa, bu durumda fiberin giriş ucundaki Raman Stokes geri-saçılan ışık gücü tespit edilebilmektedir. Raman Stokes saçılma gücü, (2.17) eşitliği ile verilmektedir.

$$dP_{s, \sin gle}(0, z) = \hat{P}_o \rho_s(z) \Gamma_s \exp(-[\alpha_p(\lambda_o) + \alpha_p(\lambda_s)]z) \times [1 + \text{Re}\{L_{p,1} L_{p,2} \exp(j\omega_m t - 2jk_m z)\}] dz \quad (2.17)$$

Burada; $L_{p,1}$, prob ışık sinyaline ait ters yönde filtrelenmiş sinyal miktarına karşılık gelmektedir.

Çok modlu optik fiberin uzunluğunu L , modülasyon frekansı 100 MHz.'den küçük kabul edilerek, fiber için Raman Stokes geriye saçılma gücü aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P_{S, \sin gle}(0, \omega_m) = \hat{P}_o \Gamma_s \int_0^L \rho_s(z) \exp(-[\alpha_p(\lambda_o) + \alpha_p(\lambda_s)]z) dz + \hat{P}_o \Gamma_s \int_0^L \rho_s(z) \text{Re}\{\exp(j\omega_m t - 2jk_m z - [\alpha_p(\lambda_o) + \alpha_p(\lambda_s)]z)\} dz \quad (2.18)$$

Kaynak: Geng J. ve Wei G. The development of the model and arithmetic for the fully distributed fiber optic sensor based on Raman optical-fiber frequency-domain reflectometry, 2002.

2.3.2.6. İşaret İşleme ve Analizi

Eğer optik fiberi z yönünde N kısma bölersek, her sektörün uzunluğu ΔL , her düğümün z koordinatı $z(0) = 0, \dots, z(i) = i\Delta L, \dots, z(N) = L$ olur. Çünkü sıcaklık zaman içerisinde yavaş değişim göstermektedir, eğer fiberi yeterli yoğunluğa ayırabilir isek, fiberin $(z(i), z(i+1))$ sektörü'nün sıcaklığını $T(i)$, sabit kabul edebiliriz. Giriş ışığının dalga boyu λ_0 ve Raman Stokes saçılma dalga boyu λ_s cinsinden $A_s = \alpha_p(\lambda_0) + \alpha_p(\lambda_s)$ olarak ifade edilmektedir (Geng ve Wei 2002). Modüle edilmiş ω_m frekansı için Eşitlik (2.18) aşağıdaki formda ifade edilmektedir:

$$\begin{aligned} P_s(0, \omega_m) &= \hat{P}_0 \Gamma_s \int_0^L \rho_s(z) \exp(-[\alpha_p(\lambda_0) + \alpha_p(\lambda_s)]z) dz + \cos(\omega_m t) \hat{P}_0 \Gamma_s \int_0^L \rho_s(z) \exp(-[\alpha_p(\lambda_0) \\ &+ \alpha_p(\lambda_s)]z) \cos(2k_m z) dz + \sin(\omega_m t) \hat{P}_0 \Gamma_s \int_0^L \rho_s(z) \exp(-[\alpha_p(\lambda_0) + \alpha_p(\lambda_s)]z) \sin(2k_m z) dz \\ &= \hat{P}_0 \Gamma_s \int_0^L \rho_s(z) \exp(-[\alpha_p(\lambda_0) + \alpha_p(\lambda_s)]z) dz + \hat{P}_0 \Gamma_s \sqrt{A^2 + B^2} \cos(\omega_m t - \gamma) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Bu ifade, $P_s(0, \omega_m) = \bar{P}_s + \hat{P}_s \cos(\omega_m t - \gamma)$ anlamına gelmektedir.

Burada;

$$A = \int_0^L \rho_s(z) \exp(-[\alpha_p(\lambda_0) + \alpha_p(\lambda_s)]z) \cos(2k_m z) dz \quad (2.20)$$

$$B = \int_0^L \rho_s(z) \exp(-[\alpha_p(\lambda_0) + \alpha_p(\lambda_s)]z) \sin(2k_m z) dz \quad (2.21)$$

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}}\right) \quad (2.22)$$

$$\bar{P} = \hat{P}_0 \Gamma_S \int_0^L \rho_S(z) \exp(-[\alpha_p(\lambda_0) + \alpha_p(\lambda_s)]z) dz \quad (2.23)$$

$$\hat{P}_S = \hat{P}_0 \Gamma_S \sqrt{A^2 + B^2} \quad (2.24)$$

olarak elde edilmektedir (Geng ve Wei 2002).

Böylece, sistemin frekans domeninde cevap fonksiyonu;

$$\begin{aligned} H_S(j\omega_m) &= \frac{\hat{P}_S}{P_0} = \exp(-j\gamma) = \Gamma_S(A - jB) = \int_0^L \Gamma_S \rho_S(z) \exp(-[\alpha_p(\lambda_0) + \alpha_p(\lambda_s)]z) \\ & x[\cos(2k_m z) - j \sin(2k_m z)] dz \\ &= \int_0^L \Gamma_S \rho_S(z) x \exp(-[\alpha_p(\lambda_0) + \alpha_p(\lambda_s)]z) \exp(-j(2k_m z)) dz \end{aligned} \quad (2.25)$$

olarak elde edilmektedir (Geng ve Wei 2002).

(2.25) eşitliğinde, integral aralığı z den $(-\infty, +\infty)$ a kadar genişletilir ve $v = 2k_m(2n_{\infty/c})\omega_m$ kabulü yapılır ise $H_S(jv)$, eşitlik (2.26)'da verildiği gibi elde edilmektedir.

$$H_S(jv) = \int_{-\infty}^{+\infty} \{\Gamma_S \rho_S(z) \exp(-[\alpha_p(\lambda_0) + \alpha_p(\lambda_s)]z)\} x \exp(-jv) dz \quad (2.26)$$

Bu ifadeye, hızlı ters Fourier transformu (IFFT) uygulanarak $h_S(z)$ (2.27) eşitliğindeki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} h_S(z) &= \text{Re}\{IFFT(H_S(jv))\} \\ &= \Gamma_S \rho_S(z) \exp(-[\alpha_p(\lambda_0) + \alpha_p(\lambda_s)]z) \end{aligned} \quad (2.27)$$

(2.23)'ten (2.27) ifadesine kadar, $h(z)$ ile $H_S(jv)$ arasındaki bağlantı ifade edilmiştir. Eşitlik (2.27)'de; $\alpha_p(\lambda_0)$, λ_0 dalga boyunda fiberdeki lazer darbe zayıflaması, $\alpha_p(\lambda_s)$ $\alpha_p(\lambda_{AS})$ ise sırasıyla Stokes ve anti-Stokes dalga boyundaki güç zayıflama katsayısıdır.

Stokes darbe cevabında olduğu gibi, anti-Stokes darbe cevabının z domenindeki cevap fonksiyonu $h_{AS}(z)$ ve frekans domenindeki cevap fonksiyonu $H_{AS}(j\nu)$, eşitlikler (2.29) ve (2.28)'de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$H_{AS}(j\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} \{\Gamma_{AS}\rho_{AS}(z) \exp(-[\alpha_p(\lambda_0) + \alpha_p(\lambda_{AS})]z)\} x \exp(-j\nu z) dz \quad (2.28)$$

ve

$$h_{AS}(z) = \text{Re} \{IFFT (H_{AS}(j\nu))\} = \Gamma_{AS}\rho_{AS}(z) \exp(-[\alpha_p(\lambda_0) + \alpha_p(\lambda_{AS})]z) \quad (2.29)$$

(2.27) ifadesi (2.29) ifadesine oranlanarak (2.30) elde edilmiş olur.

$$\frac{h_S(z)}{h_{AS}(z)} = \frac{\Gamma_S \rho_S(z)}{\Gamma_{AS} \rho_{AS}(z)} \exp(-[\alpha_p(\lambda_S) - \alpha_p(\lambda_{AS})]z) \quad (2.30)$$

(2.8) ve (2.12) ifadeleri (2.30)'da yerine konularak $\frac{h_S(z)}{h_{AS}(z)}$, (2.31)'de verildiği gibi elde

edilmektedir (Geng ve Wei 2002).

$$\frac{h_S(z)}{h_{AS}(z)} = \frac{\Gamma_S}{\Gamma_{AS}} \exp\left(\frac{\Delta E}{kT(z)}\right) \exp(-[\alpha_p(\lambda_S) - \alpha_p(\lambda_{AS})]z) \quad (2.31)$$

(2.31) eşitliğinden $T(z)$ çekilerek, sıcaklık değişimi (2.32)'de verildiği gibi elde edilebilir.

$$T(z) = \frac{\Delta E}{k \ln\{(h_S(z)/h_{AS}(z))(\Gamma_{AS}/\Gamma_S) \exp([\alpha_p(\lambda_S) - \alpha_p(\lambda_{AS})]z)\}} \quad (2.32)$$

(2.32) eşitliğinde $(h_S(z)/h_{AS}(z))(\Gamma_{AS}/\Gamma_S) = (h_S(t)/h_{AS}(t))(\lambda_S/\lambda_{AS})^4$ ve

$\Delta\alpha_p = \alpha_p(\lambda_S) - \alpha_p(\lambda_{AS})$ ifadeleri yerine konularak $T(z)$, (2.33) formunu alır.

$$T(z) = \frac{\Delta E}{k \ln \left[\frac{h_S(t)}{h_{AS}(t)} x \left(\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} \right)^4 x \exp(\Delta \alpha_p x z) \right]} \quad (2.33)$$

Burada; $h_S(t)$ ve $h_{AS}(t)$ Stokes ve anti-Stokes darbe cevaplarıdır, $\Delta \alpha_p$ ise tek modlu fiberler için Neper cinsinden diferansiyel zayıflama katsayısıdır ve değeri 1.3×10^{-6} 'dır (Farahani ve Gogolla 1999).

2.3.3. Brillouin Saçılması

2.3.3.1. Giriş

Brillouin saçılması, genel olarak fiber içerisinde ilerleyen ışığın, spontane akustik dalga ile etkileşmesinin bir sonucu olarak ters yönde yansıdığı kuramsal bir etki olarak değerlendirilebilir. Akustik dalga fiber içerisinde ilerlediği için, yansıyan ışık farklı bir frekansa kayma gösterir. Dolayısıyla, ilerleyen ışığın frekansı ile saçılan ışığın frekansları, Brillouin frekans kayması adı verilen bir frekans aralığı kadar birbirinden ayrılır. Akustik dalganın hızı, yansıyan ışığın frekans kayma miktarından elde edilebilmektedir (Alahbabi ve ark. 2005). Akustik dalgasının hızı, fiberin sıcaklığına ve fiberin maruz kaldığı gerilmeye bağlı olduğu için, ölçülmüş olan frekans kayma bilgisi, her iki parametre (sıcaklık ve gerginlik) hakkında bilgi içermektedir.

Spontane Brillouin saçılması, bir diğer ifadeyle ortam içerisinde yayılmakta olan akustik dalgalardan ışığın saçılmasıdır. Uygulanan optik alan, ortamın malzeme özelliklerini değiştirmek için çok zayıftır. Işık ortamda ilerlerken akustik dalgalarla etkileşmektedir. Akustik dalgalar geniş frekans aralığında ortaya çıkar ancak pompa ışığının saçılmasına neden olan Bragg koşulunu sağlayan frekanslar önem kazanmaktadır. Stokes yayılımı, akustik dalgadan ışığın Bragg biçiminde kırılmasının (ışığın kırılarak yansması) bir sonucudur. Bu durumda saçılmış olan ışık aşağı yönde Doppler frekans kaymasına maruz kalır. Diğer bir deyişle, ışığın anti-Stokes yayılımı, akustik dalga yaklaşımından gelen benzer bir mekanizmadan oluşmaktadır.

Stokes ve anti-Stokes işlemlerini ifade eden frekans kaymaları sırasıyla aşağıda verilmektedir:

$$\nu_{s, as} - \nu_p = \mp \nu_a \quad (2.34)$$

Burada, ν_s Stokes frekansı ve ν_{as} anti-Stokes frekansı, ν_p pompa işaretin frekansı ve ν_a ise akustik frekanstır. Ayrıca, \mp işaretleri sırasıyla Stokes ve anti-Stokes bileşenlere uygulanmaktadır. Başka bir ifade ile, Brillouin frekans kaymasının büyüklüğü akustik frekansa eşdeğerdir.

Saçılma, fiber içerisinde tüm yönlerde gerçekleşmektedir ancak sadece eksnel olarak geri saçılan işaret, fiber girişine geri yönde kılavuzlanmaktadır. Frekans kayması, saçılma açısından bağımsızdır.

Bragg koşulu aşağıda verilmiştir:

$$2\lambda_a \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{\lambda_p}{n} \quad (2.35)$$

Yukarıdaki eşitlikte, n malzeme kırıcılık indisidir.

$$\lambda_a = \frac{v_a}{\nu_a} \quad (2.36)$$

Eşitlik 2.36'da, ν_a ve v_a sırasıyla akustik hız ve akustik frekansa karşılık gelmektedir. (2.36) ifadesini (2.35) ifadesinde yerine koyarak ve tekrar düzenleyerek aşağıdaki sonuca ulaşılmaktadır:

$$\nu_a = \frac{2n v_a}{\lambda_p} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.37)$$

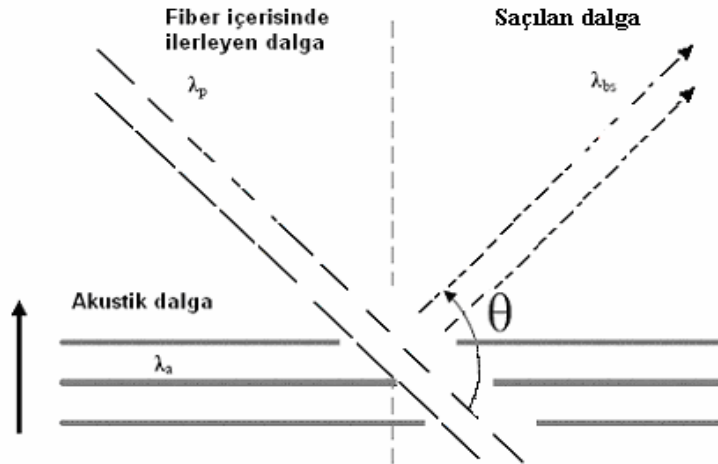
Yukarıdaki ifade, ileri yönde $\theta = 0^\circ$ durumunda saçılma esnasında frekans kayması olmadığını göstermektedir. Ters yönde yani $\theta = 180^\circ$ iken Brillouin frekans kaymasının

maksimum olduğunu göstermektedir. Saçılma, fiber boyunca her yönde gerçekleşir ancak sadece saçılan dalgalar fiber girişine ters yönde kılavuzlanmaktadır. Örnekte olduğu gibi; kırılma indisi $n = 1.46$ $V_a = 5960m/s$ ve $\lambda_p = 1550nm$ alınarak maksimum Brillouin frekans kayması $V_a = 11.2$ GHz olarak bulunur.

2.3.3.2. Spontane Brillouin Saçılması

Spontane Brillouin saçılması fibere giren ışık dalgası ile ortamda termal olarak meydana gelen akustik dalgaların etkileşmesi sonucu oluşmaktadır. Fiber içerisinde oluşan akustik dalgalar kırılma indisi farklılıklarına neden olarak ışığın kırılarak yansınması sonucunu doğurmaktadır. Termal etkiden kaynaklanan akustik dalgalar, ayrık foton enerjileri ile geniş bir aralıkta belirlenmiş olan frekanslar üzerinde ortaya çıkmaktadır. Optik fiberlerin bir boyutlu kılavuzlanması sebebi ile de, bu frekanslar sadece Bragg koşulunu sağlamakta ve Brillouin saçılmasına yol açmaktadır.

Şekil (2.4)'te, akustik bir dalga ile pompalanmış ışık dalgasının etkileşimi sonucu Brillouin saçılmasının oluşumu gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Akustik dalga ile fiber içerisine pompalanan ışığın etkileşmesi ve Brillouin saçılmasının oluşumu.

Kaynak: M. Alahbabi, distributed optical fiber sensors based on the coherent detection of spontaneous Brillouin scattering, Doktora Tezi, 2005.

Şekilde, λ_p pompa dalga boyu, λ_{bs} Stokes dalga boyu, λ_a akustik dalga boyu ve θ ise pompa ve Stokes dalga vektörleri arasındaki açıdır. Aslında, sadece gelen optik dalga, akustik dalga ile faz uyumlu olduğu (Bragg yansımalarının ortaya çıktığı) ve (2.35) ile verilen formülün geçerli olduğu durumda, saçılma açısına bağlı bir frekans kayması ile spontane Brillouin saçılması oluşur. Bu durum, Şekil(2.4)'te gösterilen üç tip dalgaya ait Bragg kırınım dalgaları vektörlerinin analiz edilmesiyle görülebilir.

$$2n\lambda_a \sin \frac{\theta}{2} = \lambda_p \quad (2.38)$$

Burada n fiber içindeki kırılma indisi, λ_a akustik dalga boyu, λ_p pompa dalga boyu, θ ilerleyen ışık ile Brillouin saçılmış ışık (λ_{bs}) arasındaki açıdır.

Akustik dalga λ_a , önceki bölümde olduğu gibi, (2.39) ile verilmektedir.

$$\lambda_a = \frac{v_a}{f_a} \quad (2.39)$$

Burada v_a akustik dalga hızıdır. Dikkat edilirse bu ifadeler önceki bölümdeki verilerle benzerlik göstermektedir. Bu denklemlerden akustik frekans f_a aşağıdaki gibi ifade elde edilebilir ve bu ifade Bragg koşulunu sağlamaktadır:

$$f_a = \frac{2n}{\lambda_p} v_a \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.40)$$

Eşitlik (2.40), akustik dalgalardan saçılan ışığın neden olduğu frekans kayması için nicel bir değeri vermektedir. Frekans kayması, akustik dalganın hızına bağlı olmakla birlikte, fiber içerisinde ilerleyen ışık ile yansıyan ışık arasındaki açıya ve fiber kırılma indisine bağlıdır. Optik fiberde saçılma sadece, hem ileri yönde hem de geri yönde kılavuzlanmaktadır. Sonuç olarak; pompalanan ışık, fiber içerisinde ilerleyen ışık

dalgasının ilerleme yönüne göre ters yönde saçıldığında, akustik frekans f_a maksimum değer ulaşır. θ açısı burada 180 derece olur.

Brillouin frekans kayması ν_b , akustik frekans f_a 'ya eşdeğerdir ve böylece, f_a ifadesi (2.41) formunu alır.

$$\nu_b = \frac{2n}{\lambda_p} \nu_a \quad (2.41)$$

$$g_B(\nu) = g_b \frac{(0.5\Delta\nu_b)^2}{(\nu - \nu_b)^2 + (0.5\Delta\nu_b)^2} \quad (2.42)$$

Burada, $\Delta\nu_b$ Brillouin kazancı hat genişliği, 1550 nm de silisli fiberde ≈ 35 MHz değerindedir, ν_b eşitlik (2.38) ile verilen Brillouin frekans kayması ve g_b ise $\nu = \nu_b$ için Brillouin kazanç katsayısıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$g_b = \frac{2\pi n^7 p^2}{c \lambda^2 \rho \nu_a \Delta\nu_b} \quad (2.43)$$

Denklemden p ortalama foto elastisite katsayısı ve ρ malzeme yoğunluğudur. (2.43)'te 1550 nm de silika fibere ait değerler yerine konarak, $g_b \approx 5 \times 10^{-11}$ m/W olarak elde edilebilir.

Brillouin kazanç spektrumunu karakterize eden üç parametre; Brillouin kazanç katsayısı, Brillouin hat genişliği ve Brillouin frekans kaymasıdır. Standart SMF de Brillouin spektrum tepesi vardır ve Lorentz fonksiyonu şeklindedir. Fiberlerde çoklu-yapısal nüveli yapıda Çoklu tepeler bulunmaktadır. Brillouin kazanç katsayısı, hat genişliği ve güç gibi parametreler, fiberin malzeme yapısına ve fiziksel etkilere bağlı olarak değişmektedir. Yinede, fiber uzunluğu boyunca dağınık sıcaklık / gerginlik ölçümleri için dikkate alınması gereken iki ana parametre mevcuttur, bunlar; Brillouin frekans kayması ve güç değişimidir. Brillouin hat genişliği gerginlik ile değişiklik göstermez, sadece yaklaşık $\approx 0,1 \text{MHz}/^\circ\text{C}$ seviyelerinde küçük sıcaklık bağımlılığı

göstermektedir. Bu sebeple, sıcaklık / gerginlik ölçümlerinde sınırlı bir kullanıma sahiptir.

2.4. Raman Esaslı Sıcaklık Sensörleri ve Brillouin Sensörler

Spontane Brillouin saçılma teknolojisinin Raman saçılma teknolojisine kıyasla birçok avantajı bulunmaktadır. 1550 nm dalga boyunda Brillouin bileşenleri yaklaşık olarak 11 GHz frekans fark ile Rayleigh bileşeninden ayrılmaktadır. Raman bileşenleri büyüklük olarak Brillouin bileşenlerinden iki kat daha büyük olmakla birlikte Rayleigh bileşeninden yaklaşık 13 THz frekans farkı ile ayrılmaktadır. Raman işaretlerin Rayleigh işaretten ayrılma kolaylığı, dağınık fiber optik sıcaklık algılamada tercih edilmesine neden olmaktadır.

Ancak, dar bantlı kaynakların ve düşük kayıplı dar bantlı optik filtrelerin üretim teknolojilerinin geliştirilmesi ile Brillouin saçılma yöntemleri dağınık algılamada başarılı bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır.

Raman esaslı bir sistemde, geri saçılan Stokes bileşenlerinin, anti-Stokes bileşenlere oranı, $R(T)$, mutlak sıcaklık ölçümünde kullanılmaktadır ve aşağıdaki gibi ifade edilmektedir. (Bknz. Eşitlik (2.1))

$$R(T) = \left[\frac{\lambda_S}{\lambda_{AS}} \right]^4 e^{\left(\frac{hc\nu_R}{kT} \right)} \quad (2.44)$$

(2.44) eşitliğinde; λ_S Stokes işareti dalga boyunu, λ_{AS} Anti-Stokes işareti dalga boyunu ν_R Raman işareti ile pompa işareti dalga boyları arasındaki dalga sayısı ayrımını ($\lambda = c/13$ THz ifadesinden elde edilen dalga boyunun tersi ($1/\lambda$) anlamına gelmektedir), c ışığın boşluktaki hızı, h Planck sabiti, k Boltzmann sabiti ve T ise °K cinsinden sıcaklığı ifade etmektedir.

Aşağıdaki şekilde; Rayleigh, Raman ve Brillouin işaretlerin Stokes ve anti-Stokes bileşenleri ve frekans ayrımları verilmektedir.

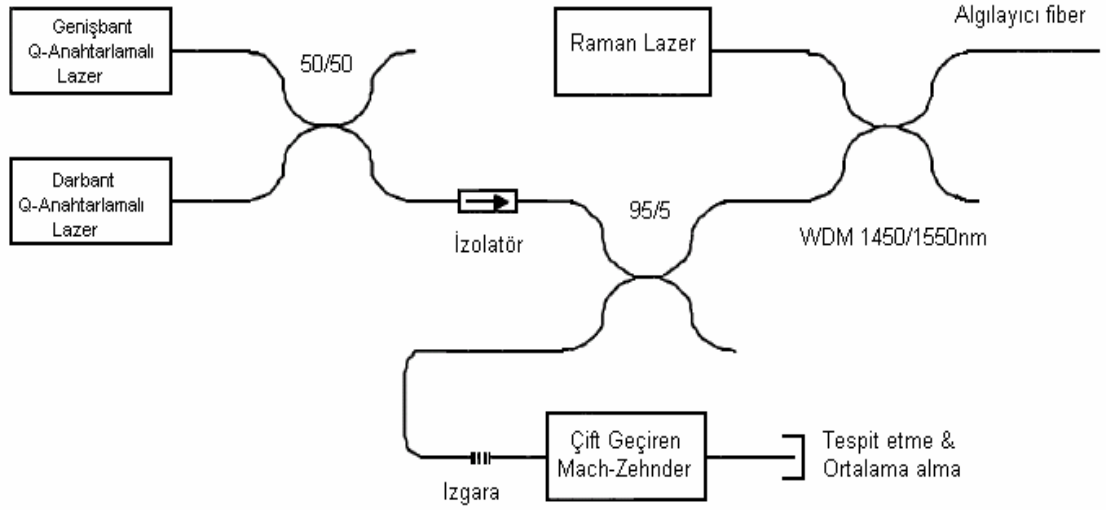
Raman gücün sıcaklığa bağımlılığı (K_{RT}^P) yukarıdaki R(T) ifadesinin düzenlenmesi ve türevini almak suretiyle aşağıdaki formda elde edilmektedir:

$$\frac{1}{R(T)} \frac{dR(T)}{dT} = \frac{hcv_R}{kT^2} \quad (2.45)$$

293Kelvinde Brillouin gücün sıcaklık duyarlılığı 0.30 %/°C olarak verilmektedir. (Bknz. Çizelge 2.3). Dolayısıyla Raman saçılması baz alınarak sıcaklık profilini elde etmek, Brillouin saçılmasını kullanarak elde etmekten daha optimum sonuç vermektedir. Ancak yine de, yapılan araştırmalardan elde edilmiştir ki, tek modlu fiber kullanan Brillouin esaslı bir dağınık sıcaklık sensörü (BDTS) ile de bir kablonun sıcaklık profilini çıkarmak mümkün olmaktadır. Bu aşamada, daha uzun mesafelerde çalışacak ve daha yüksek uzamsal çözünürlükte dağınık algılama yapabilecek sensörlere ihtiyaç olmaktadır.

Algılama mesafesi, dedektör hassasiyeti ve sistem içerisine gönderilen darbeli ışığın gücüne bağlıdır. Brillouin işaretin optik olarak ön kuvvetlendiricide kuvvetlendirilmesi ile BDTS'nin dinamik algılama mesafesini arttırmak mümkün olmaktadır. Brillouin geri saçılmış işaretin Raman kuvvetlendirilmesiyle algılama mesafesinin arttırıldığı sistemler mevcuttur (T.P. Newson ve ark.1997).

Bu sistemler, genel olarak prob darbe işaretinin fiber içerisine girmeden önce kuvvetlendirildiği ve sürekli dalga işareti üretici (CW) ile gücünün yükseltildiği sistemlerdir. Şekil (2.5)'te bir Brillouin Dağınık Sıcaklık algılama sistemi devre şeması gösterilmektedir.



Şekil 2.5 Brillouin Dağınık Sıcaklık algılama sistemi devre şeması. Geniş bantlı ve dar bantlı kaynak, veri toplamak için kullanılmaktadır.

Kaynak: De Souza, Fiber optic distributed sensing based on spontaneous Brillouin scattering, 1999.

Devrede, 1550 nm'de Brillouin geri saçılmış işaret oluşturmak için Q-anahtarlamalı dar bantlı bir fiber lazer kullanılmıştır. Koherent Rayleigh gürültüsünü minimize etmek için geniş bantlı Q-anahtarlamalı bir fiber lazer kullanılabilir. Böylece gürültüden arındırılmış bir Rayleigh işareti elde edilmiş olur.

Devre düzeneğinde kullanılan fiber ızgara (yansıtıcılığı = % 99, $\Delta\lambda = 0.12$ nm ve $\lambda_c = 1533$ nm olan), çift geçiren Mach-Zehnder interferometrenin (DPMZ) Rayleigh işareti Brillouin işaretinden ayırması için kullanılmıştır. Izgara ve DPMZ'nin uygun biçimde ayarlanması ile, hem Rayleigh hem de Brillouin işaretin ayrı ayrı tespit edilmesi mümkün olmuştur. DPMZ ve ızgara termal olarak ayarlanabilir ve bir sıcaklık kontrol elemanı kullanılarak kontrol edilebilmektedir. Brillouin işareti, DPMZ çıkışında InGaAs foto dedektör ile elde edilir. Bu bakımdan, Brillouin dağınık sıcaklık algılama sensörlerinde, Raman kuvvetlendirme prosesi çok önemlidir.

2.5. DOFS İçin Brillouin ve Raman Saçılmasının Karşılaştırılması

Brillouin işaretin 1550 nm'de pompa işareti ile arasındaki frekans farkının dūřuk olması, yani, Raman frekans kayması = 13 THz iken Brillouin frekans kaymasının 11 GHz olması nedeniyle, Brillouin saçılmasının Raman saçılmasına kıyasla bazı avantajlarının oluşmasını sağlamaktadır. Brillouin saçılmasının Raman saçılmasına gōre avantajları aşağıda verilmektedir:

- Erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiriciler (EDFA), zayıf Brillouin geri saçılmış işaretin kuvvetlendirilmesinde olduğu gibi, fiber sensōrūn giriş işaretini optik olarak kuvvetlendirmek için de kullanılabilirler.
- Pompa ve Brillouin iřaretleri arasındaki diferansiyel fiber zayıflaması ihmal edilebilecek kadar kūuktur, bu yūzden, LPR tekniėinin kullanılmasına olanak saėlamaktadır.
- Brillouin ve pompa işaretleri, kayıpların minimum olduğu 3.haberleşme penceresine yerleştirilebilirler.
- Raman bileşenleri arasındaki būyuk frekans farkı (≈ 26 THz) sebebiyle, mutlak sıcaklığın hesaplanmasında diferansiyel fiber zayıflaması açısından bazı dūzeltmeler yapılmak zorundadır. Sıcaklık algılama için sadece, Raman anti-Stokes bileşeni kullanılırsa, referans Rayleigh işareti ve Raman anti-Stokes işareti arasındaki diferansiyel fark dūzeltmesi gerekmektedir.
- Brillouin esaslı sensōrler, onlarca kilometre algılama mesafesinde eř zamanlı olarak sıcaklık ve gerginlik ölçūmlerine olanak sağlamaktadır.
- Brillouin geriye saçılmış işaret ile pompa işareti arasındaki yaklaşık 11 GHz değerinde kūuk frekans farkı, 1550 nm. civarında dūřuk pencere kaybı kullanımına ve optik kuvvetlendirme için EDFA'ların birleştirilmesine olanak sağlamaktadır.
- Kūuk frekans ayırımına ait diğer bir avantaj, Rayleigh ve Brillouin geriye saçılmış işığın birbirine oranının (Landau Plackzek oranı) fiber ek yerlerindeki bağlantı kayıplarının ve fiber kayıplarının iyi kompanzasyonunu sağlaması ve Raman esaslı sensōrlerde olduğu gibi hem pompa işaretindeki ve hem de

kaydırılmış frekanslardaki fiber kayıplarının ölçümündeki sorunlardan etkilenmemesidir.

- Brillouin geriye saçılmış işaret küçük bir kazanç bant genişliğine sahiptir, bu sebeple işaret işlemede çok yaygın olarak kullanılan bir yöntem olan optik heterodin tespit metodu ile iyileştirilmesine olanak sağlamaktadır.
- Brillouin frekans kayması hem sıcaklık, hem de gerginliğe duyarlıdır ancak, Raman saçılması gerginlik duyarlılığına sahip olmadığı için, eşzamanlı olarak dağıtık sıcaklık ve gerginlik ölçümünde kullanılamamaktadır.

Kaynak: Wait P.C., Souza K.D. ve Newson T.P. 1997. A Theoretical Comparison of Spontaneous Raman and Brillouin Based Fiber Optic Distributed Temperature Sensors. Optics Communications, No:1-3. 17 p.

Küçük frekans farkı nedeni ile (~ 11 GHz), Brillouin işareti Rayleigh işaretten ayrılmasına olanak sağlamak için dar hat genişlikli kaynak gerekmektedir. Bu iki işareti ayırmak için dar ve etkili optik filtreleme gerektirmektedir (T.P. Newson ve ark.1997).

Raman gücü sıcaklık duyarlılığı, Brillouin gücün duyarlılığından daha yüksektir. Yine de, Brillouin işaret gücü bu farkı telafi etmektedir. Genel olarak, Brillouin esaslı sensörler daha büyük algılama performansı sağlayabilirler ve Raman esaslı sensörlere kıyasla daha yaygın uygulama alanı bulabilmektedir.

Spontane Brillouin ve Raman saçılmasına ait yukarıda bahsedilen farkların bir özeti, Çizelge 2.3'te 1550 nm de silika fiberler için verilmiştir.

Çizelge 2.3 1550 nm’de spontane Brillouin ve Raman saçılmasına ait değerler.

PARAMETRELER	BRILLOUIN	RAMAN
Bantgenişliği Kazancı	~20-100MHz	~5THz
Kazanç Katsayısı	~5×10 ⁻¹¹ m/W	~7×10 ⁻¹⁴ m/W
Frekans Kayması	~11GHz	~13THz
Rayleigh sinyal gücü ile Saçılmış Güç arasındaki fark	~15dB	~30dB
Sıcaklığa bağlı güç değişimi	~0.30%/°C	~0.80%/°C
Sıcaklıkla Frekans değişimi	~1.1MHz/°C	-
Gerginlikle Güç değişimi	~ -9 × 10 ⁻⁴ %/με	-
Gerginlikle Frekans değişimi	~0.048MHz/με	-

Kaynak: Alahbabi M.N. Distributed optical fiber sensors based on the Coherent detection of Spontaneous Brillouin Scattering, Doktora Tezi. 2005, s.14.

2.6. Sensör Performansı Değerlendirme Kriterleri

OTDR, BOTDR ve Landau Placzek esaslı dağınık sensörler için performans kriterleri; uzamsal aralık (mesafe), ölçme süresi, uzamsal çözünürlük, güç ve frekans üzerinde meydana gelen RMS gürültüsü, sıcaklık ve gerginlik çözünürlükleridir.

Bir DTS sisteminin performansını etkileyen parametreler aşağıda açıklanmaktadır:

Fiber Uzunluğu (uzamsal aralık)

İstenilen performans kriterlerinin sağlandığı maksimum fiber uzunluğu şeklinde tanımlanmaktadır. Fiberin her iki yöndeki toplam kaybı ile belirlenir. Bu belirlemede, sistemdeki bağlantı elemanları ve problemler de dikkate alınmalıdır.

Buradan maksimum fiber uzunluğu;

$$L_{\max} = cT / 2n_{gr} \text{ olarak ifade edilmektedir.}$$

Formülde, c ışığın boşluktaki hızı, T darbe periyodu ve n_{gr} ise fiber nüvenin grup kırılma indisidir. Uzamsal aralık, T ve n_{gr} parametrelerindeki hatalardan dolayı $\pm \%1.14$ hata değeri ile yaklaşık olarak L_{\max} 'a eşdeğerdır (Karlık S.E. ve Yılmaz G. 2005).

Uzamsal Çözünürlük ve Örnekleme Aralığı

Uzamsal çözünürlük, sıcaklık-mesafe grafiğinde sıcaklık değışiminin $\% 10$ 'u ile $\% 90$ 'ı arasındaki uzaklıktır. DTS'in bölgesel sıcaklık değışimine verdiği cevap bu parametrenin yardımıyla belirlenmektedir. Sıcaklık değışimi DTS uzamsal çözünürlüğünden daha küçük bir bölgede oluşuyorsa, ölçülen sıcaklık gerçek sıcaklıktan, sıcaklık değışim aralığı/uzamsal çözünürlük oranı kadar daha düşük olacaktır.

Uzamsal çözünürlük; $\Delta z_{\min} = c\tau / 2n_{gr}$ denklemi ile ifade edilir. Burada; τ darbe süresidir.

Örnekleme aralığı, iki ölçüm noktası arasındaki mesafedir ve optik fiber algılayıcıdaki toplam ölçüm noktası sayısına karşılık gelmektedir. Ölçümlerimizde; örnekleme aralığı, simülasyonlarda kullanılan değere eşdeğer olacak biçimde uzamsal

çözünürlüğe eşdeğerdedir. Daha küçük örnekleme aralıkları ile, sıcaklık değişim noktaları hakkında daha doğru bilgi elde edilmektedir.

Sıcaklık Çözünürlüğü

İki sıcaklık değeri arasında ölçüm sisteminin yorumlayabildiği minimum fark edilebilir farktır. Ölçülen değerlerin tutarlılığının göstergesi olup ölçümün standart bir sapmasında tanımlanmaktadır. Aşağıdaki gibi formüle edilmektedir:

$$\delta T = \frac{|K_{\epsilon}^P \delta v| + |K_{\epsilon}^V \delta P|}{|K_{\epsilon}^V K_T^P - K_{\epsilon}^P K_T^V|} \quad (2.46)$$

Gerginlik Çözünürlüğü

Ölçüm sisteminin yorumlayabildiği, iki gerginlik değeri arasındaki minimum fark edilebilir farktır. Sıcaklık çözünürlüğünde olduğu gibi, Brillouin frekans kayması üzerindeki RMS gürültüsü (frekans çözünürlüğü) ve güç değişimleri üzerinde oluşan RMS gürültüsü (güç çözünürlüğü) ile değişmektedir.

Gerginlik çözünürlüğü, ölçülen değerlerin tutarlılığının göstergesi olup ölçümün standart bir sapmasında tanımlanmaktadır.

Aşağıdaki gibi formüle edilmektedir:

$$\delta \epsilon = \frac{|K_T^P \delta v| + |K_T^V \delta P|}{|K_{\epsilon}^V K_T^P - K_{\epsilon}^P K_T^V|} \quad (2.47)$$

Ölçüm Süresi

Bir fiber sensör çevriminin belirli bir çözünürlükteki sıcaklık profilini elde etmek için gereken zaman aralığına ölçüm süresi olarak ifade edilmektedir. Bu süre, geriye yansıyan işaretin tespit edilmesi ve işlenmesi süreçlerini kapsamaktadır.

RMS (karesel ortalama değer) Gürültü

Brillouin işareti frekans ve gç çizgileri üzerinde ortaya çıkan gürültünün her rneklemeye noktasındaki değerinin karesel ortalamalarının karekökü ile belirlenir. Algılama sisteminin performansını belirlemede kullanılır. (2.48) ile ifade edilmektedir.

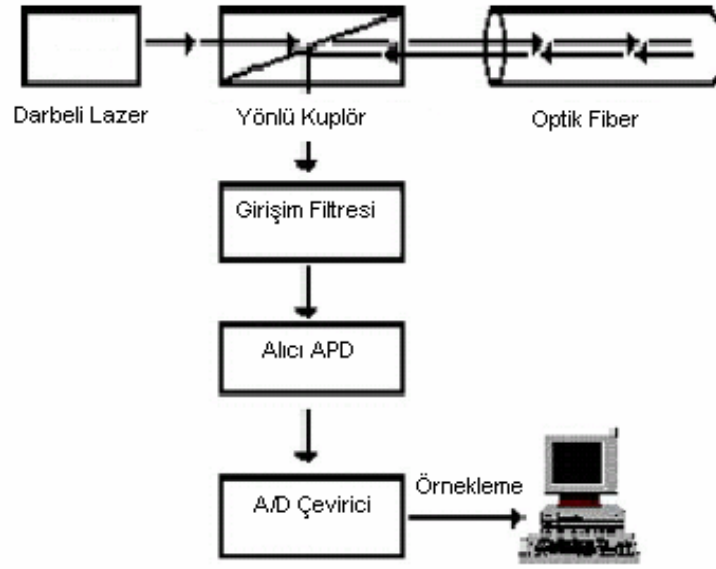
$$F_{RMS} = \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_m^2}{m}} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^m S_m^2}{m}} \quad (2.48)$$

Burada; S_1, S_2, \dots, S_m sırasıyla rneklemeye noktalarında tespit edilen gürültü miktarları, m ise rneklemeye sayısıdır.

Termal Cevap Süresi

Bir algılayıcı döngüsünün termal cevap süresi, fiberin kılıflama, kablolama yapısına ve sensör döngüsü ile sıcaklık profili çıkartılacak enerji kablosunun iletkeni arasındaki termal teması önemli ölçüde bağlıdır. Genel olarak, fiber için termal cevap süresi 0.5 saniyeden daha küçüktür. Dağınık sıcaklık algılama sistemlerinde termal cevap süresi, sistem performansı açısından çok önemlidir.

şekil (2.6)'da, basit bir Dağınık Sıcaklık Algılama (DTS) sisteminin blok diyagramı gösterilmiştir. Diyagramda; bir neodniyum katkılı darbe lazeri, 1550 nm. dalga boyunda 15 ns.'lik darbeler üretmektedir.



Şekil 2.6 DTS sisteminin blok diyagramı basit gösterimi.

Kaynak: Karlık S.E. ve Yılmaz G. Distributed optical fiber sensor for temperature detection in power cables 2005, s.3.

Diyagramda, yönlü kuplör, geri saçılan ışareti, darbe işaretlerinden ayırmak için kullanılmaktadır. Saçılan Raman ışareti, girişim filtresi ile filtrelenmekte ve bir foto diyot ile alınmaktadır. Foto diyot ile alınan işaret daha sonra kuvvetlendirilmekte ve yüksek hızlı bir analog /dijital çevirici ile sayısallaştırılmaktadır. Sayısal ortalama alma teknikleri, veri görüntü birimine gönderilmeden önce, işaret/gürültü oranını yüksek verimliliğe ulaştırmaktadır.

2.7. Geri Saçılma Prensipli Esaslı Optik Ölçüm Teknikleri

Optik zaman domeni reflektometresi (OTDR), iyi bilinen ve optik fiber boyunca oluşan fiber kayıplarını karakterize etmek için kullanılan bir tekniktir. Bir ışık darbesi optik fiber içerisine gönderilmekte ve geri-saçılan Rayleigh ışareti yakalanarak ölçülmektedir. Bu geçici enformasyon, fiber boyunca fiberin dışında oluşan kayıp mekanizmalarında (ek yeri kayıpları, bükülme kayıpları, konnektör kayıpları ve bükülmeler gibi) olduğu gibi içsel fiber kayıpları ile ilgili olarak, uzamsal enformasyona

dönüştürülebilmektedir. OTDR tekniği, ölçümlerin fiberin sadece bir ucundan yapılabilmesi açısından avantajlı bir tekniktir.

2.7.1. OTDR Prensibi

OTDR prensibi, optik bir fiber içerisinde yayılan bir kısa darbe süresinin (w) değerlendirilmesi olarak anlaşılabilir. Işık fiber içerisinde ilerledikçe, yoğunluğu Rayleigh saçılmasından kaynaklanan lineer saçılma kayıplarına maruz kalmaktadır. Bu saçılma, fiktif sıcaklıkta cam kafes içerisinde dondurulmuş olarak bulunan malzeme kompozisyonu dalgalanmaları ve malzeme homojensizliklerinden kaynaklanan bir saçılmadır.

Bu dalgalanmalar, ışığın dalga boyuna oranla küçük ölçekte ortaya çıkmaktadır. Saçılma tüm yönlerde meydana gelmekte ve sadece küçük bir kısmı fiberin nümerik açıklığından yakalanmakta ve fiberin giriş ucuna doğru geri yönde kılavuzlanmaktadır. Rayleigh saçılma yoğunluğu, dalga boyunun (λ) dördüncü kuvveti ile ters orantılı olmakla birlikte, mükemmel olarak elastik (esnek) bir saçılmadır. Bu sebeple, fiber içerisine gönderilen ışıkla aynı kutuplanma ve frekansta ortaya çıkar. Modern silika-esaslı optik fiberlerde, Rayleigh saçılması baskın kayıp mekanizmasıdır ve 1550 nm’de yaklaşık olarak 0,18 dB/km değerinde fiber zayıflamasının alt sınırını oluşturmaktadır.

Kablonun sıcaklık profili çıkarılırken sıcaklık ölçümünün yanı sıra, ölçüm bilgisini gönderen noktanın konumunun da bilinmesi gerekir. OTDR yönteminde, ışığın yansıma süresinin ölçülmesi ile saçılma noktasının belirlenmesi mümkündür. İleri ve geri yönde ışığın yayılma zamanı t ise, ışığın aldığı yol; $d = ct/2n$ formülü ile bulunabilir.

Burada c ışığın boşluktaki hızı ve n fiberin kırılma indisidir. Günümüzde, ticari sistemler 10 km. uzunluklu 50/125 μm çok modlu fiberin sıcaklığını 1 metrelik uzamsal çözünürlük ve 1 °C’lik sıcaklık çözünürlüğüyle ölçme yeteneğine sahiptir.

Geriyeye saçılmış Rayleigh işaret gücü $P_R(t)$ zamanın fonksiyonu olarak aşağıdaki formül ile verilmektedir:

$$P_R(t) = \frac{S}{2} P_i \gamma_R w v_g e^{-\gamma t} \quad (2.49)$$

Denklemdede; $P_R(z)$, (z) uzaklığın fonksiyonu olarak geriyeye saçılmış güç, $t = 2z/v_g$ eşitliği kullanılarak elde edilir. Geri saçılma yakalama katsayısı ise, eşitlik (2.51) ile verilmektedir.

$$P_R(z) = \frac{S}{2} P_i \gamma_R w v_g e^{-2\gamma z} ; \quad (2.50)$$

$$S = \frac{(NA)^2}{4n^2} \quad (2.51)$$

Burada;

- S = geri saçılma yakalama katsayısı,
- P_i = giriş işaret gücü,
- γ_R = Rayleigh saçılma katsayısı,
- γ = fiber zayıflama katsayısı,
- w = zamansal darbe genişliği,
- v_g = fiber içerisinde yayılan ışığın grup hızı,
- t = zaman,
- NA = fiber nümerik açıklığı ve
- n = nüve kırılma indisidir.

Bu yüzden, uygun bir alıcı sistem kullanmak suretiyle, giriş ucunda geriyeye saçılmış Rayleigh işareti alınarak, zamansal ve fiber boyunca uzamsal enformasyon elde edilebilmektedir. İki nokta uzamsal çözünürlük (Δz), alıcıdaki yükselme süresinin darbe genişliğinden küçük olması için eşitlik (2.52) ile verilmektedir.

$$\Delta z = \frac{wv_g}{2} \quad (2.52)$$

P_R ifadesinde, Rayleigh gücü üzerinde optik gücün logaritmik değişimi gösterilmektedir. Yansımalar işaret seviyesinde bir artış ve ardından bir düşüş oluştururken, fiber kayıpları da işaret seviyesinde bir azalma yaratmaktadır.

2.7.2. BOTDR Prensibi

OTDR prensibine benzer biçimde, Brillouin optik zaman domeni yansıma ölçeri (BOTDR), fiber içerisinde termal olarak yaratılmakta olan akustik dalgalar ile gönderilen ışığın etkileşerek saçılması esasına dayanmaktadır. Rayleigh saçılmasının aksine, yoğunluk dalgalanmalarından kaynaklanan bir saçılma değildir.

Geriye saçılan Rayleigh işareti gibi, Brillouin işareti de çalışılan ışığın dalga boyuna bağlı olarak zamanla aynı logaritmik zayıflamayı göstermektedir. Fiberdeki her türlü anormallikler, Brillouin işaretinde de benzerlikler göstermektedir. *Bunlara ilave olarak, spontane Brillouin geri-saçılan işaretin sıcaklığa duyarlı olduğu söylenebilir.*

2.8. Fiber Optik Dağınık Algılamada Landau-Placzek Oranı

Fiber-optik dağınık algılama için Landau-Placzek oranının kullanılması, hem OTDR hem de BODTR'nin bir bileşimini esas almaktadır. Bu tekniği kullanarak, bir çok araştırmacı kablo boyunca sıcaklık profillerini elde etmişlerdir. Bu teknikte, bir ışık darbesi, algılayıcı olarak kullanılan fiberin içerisine gönderilmektedir. Geriye saçılmış işaret, Rayleigh işaretini Brillouin işaretinden ayırt etmek için optik olarak filtrelenmektedir. Her bir işaret ayrı ayrı tutulup ortalamaları alınmakta ve bir bilgisayarda kayıt altına alınmaktadır. Rayleigh gücünün Brillouin Stokes ve anti-Stokes güçlerini toplamına oranı olarak bilinen Landau-Placzek oranı (LPR), (2.53) eşitliği ile ifade edilmektedir.

$$LPR = \frac{P_R}{P_S + P_{AS}} = \frac{T_f (\beta_T \rho v_a^2 - 1)}{T} \quad (2.53)$$

Burada;

- P_R : Rayleigh gücü,
 P_S ve P_{AS} : Sırasıyla Brillouin Stokes ve anti-Stokes güçleri,
 T : Kelvin cinsinden sıcaklığı,
 T_f : Kelvin cinsinden fiktif sıcaklığı,
 β_T : T_f sıcaklığında silikanın izotermal sıkıştırılabilirliği ve
 ρ : Silikanın yoğunluğu olarak verilmektedir.

Bu tekniğin asıl avantajı; giriş gücünde ortaya çıkan dalgalanmalar veya fiber zayıflamaları nedeniyle geriye saçılmış enerjideki ortaya çıkan herhangi bir değişimin otomatik olarak düzeltilebilmesi açısından, Rayleigh işaretine göre referans alınmış olan Brillouin işaretinde yatmaktadır (Wait P.C. ve Newson T.P 1996).

LPR tekniğinin diğer bir özelliği ise, direkt tespit esaslı bir teknik oluşudur. Böylece, optik ve elektronik tasarımı kolay olmakla birlikte, basit işaret işleme ve nispeten daha ucuz maliyet gibi avantajlara sahiptir. Diğer taraftan; bu teknik, alıcı tarafın gürültüsü, lineersizlikler, optik ön kuvvetlendirme kaynaklı oluşan ASE gürültüsü ve elektriksel lineersizlikler ile sınırlandırılabilir.

Bu tekniğin bir diğer avantajı ise, algılayıcı olarak kullanılan fiberin sadece bir ucuna giriş yapılmasının yeterli olmasıdır. Bu durum, tasarımın ve kontrol mekanizmasının daha kolay yapılmasına olanak sağlamaktadır ve Brillouin Optik Zaman Domeni Analizi (BOTDA) gibi Brillouin esaslı ve iki kaynak gerektiren tekniklere nazaran daha avantajlıdır.

BOTDA, Brillouin kazanç ve Brillouin kayıp metotları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Brillouin kazanç metodunda; darbeleri ışık ve sürekli dalga (CW) yayan bir

sayıcıdan çıkan dalga, fiber içerisine gönderilmektedir. Sayıcı çıkışındaki ışık dalgaları arasındaki frekans farkı, Brillouin frekans kayması (v_b) değerine ayarlanmaktadır. Bu durumda, darbeli ışık kayıp oluştururken, CW ışığı Brillouin saçılması boyunca kazanç oluşturmaktadır.

BOTDA işareti veya kuvvetlendirilmiş CW ışığı, zamanın bir fonksiyonu olarak elde edilir. Brillouin frekans kaymasında (v_b) herhangi bir kısmi değişim, CW ışık gücündeki değişimleri ölçmek suretiyle, v_b seviyesinde çeşitli frekans farkları için elde edilebilir. Brillouin işaret kaybında, darbeli ışık frekansını CW ışık frekansından daha düşük bir frekansa ayarlamak suretiyle; darbeli ışık kazanç, CW ışık ise kayıp oluşumuna neden olur. Bu iki durum içinde sayıcının yaydığı dalgalar, maksimum Brillouin etkileşimi için, aynı kutuplanma durumuna (SOP) sahip olmak zorundadır.

Bu yüzden, son yıllarda, algılama elemanı olarak optik fiberli dağıtık sıcaklık sensörü gerçekleştirmek için çok sayıda tasarım yapılmıştır. Araştırmalar, sıvı çekirdekli fiberlerde Rayleigh saçılma katsayısının sıcaklık bağımlılığı, anti-Stokes yoğunluğu ve Raman saçılmasında Stokes / anti-Stokes oranı, Brillouin optik zaman domeni yansıma ölçme (BOTDR) sistemleri ve Brillouin optik zaman domeni analizleri gibi çalışmalar üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bunlardan, Raman esaslı sıcaklık sensörü ticari anlamda en çok başarıyı gösteren sensör tipidir.

Sıvı çekirdekli fiber sensörler, uzamsal çözünürlük ve sıcaklık çözünürlüğü açısından gelişmiş sensörlerdir ancak, çalışma mesafeleri 100m. ile sınırlıdır.

Raman esaslı algılayıcıların sıcaklık çözünürlükleri iyi olmasına karşılık, uzamsal çözünürlükleri düşüktür. BOTDR ise, uzun mesafelerde sensör olarak çalışma imkanı sağlamasına rağmen, sıcaklık ve uzamsal çözünürlükleri sınırlıdır.

BOTDA iyi performansla sahip olmasına rağmen, 5m. uzamsal çözünürlükle ölçüme olanak sağlamaktadır. Düşük uzamsal çözünürlük algılama performansını direk olarak etkileyen önemli bir faktördür.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Giriş

Yüksek gerilim enerji iletim ve dağıtım sistemlerinin kurulması büyük yatırımlar gerektirdiği için kablo sistemlerinin en azından 25-30 yıllık bir zaman dilimi boyunca ekonomik ve güvenilir olarak çalışması istenmektedir. Kablonun belirtilen süre içerisinde planlanan elektrik gücünü iletmesi ve problemsiz hizmet verebilmesi, kablo sıcaklığı ile yakından ilgilidir. İletken sıcaklığının yüksek olması, kablo yalıtkanında büyük hasarlara yol açabilmektedir. Ayrıca, belirli bir gerilim seviyesinde iletilebilecek maksimum yük, kablo yaşlanmasından dolayı yalıtıkanda oluşan kayıplar, maksimum akım ve buna bağlı olarak çalışma sıcaklığıyla sınırlandırılmaktadır. Metal iletkenin yüzeyi kablodaki en sıcak bölge olacağından, yalıtkanı korumak için iletkenin yüzey sıcaklığının sınırlandırılması gerekmektedir. (Karlık S.E. ve Yılmaz G. 2001).

Rus bilim adamı Zhurkov 1965 yılında yaptığı çalışmada, elektrik ve mekanik gerilmelerin sıcaklık ile birlikte uygulandığında yalıtıkanda daha düşük serbest enerji bariyerlerine neden olduğunu ve ısıl gerilmelerin reaksiyon sürecinin daha hızlı gelişmesine neden olduğunu, yani bu gerilmelerin yaşlanmayı hızlandırdığını ortaya koymuştur.

XLPE yalıtkan malzemesinin yaşlanma süresinin en iyi ifade edildiği Zhurkov'un termo dalgalanma modeli eşitlik (3.1)'de verilmiştir. Eşitlikten açıkça görüldüğü gibi, kabloda oluşan ısı miktarının ve ısı dağılımının bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Zhurkov eşitliği aşağıda verilmiştir.

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \chi E}{kT}\right) \quad (3.1)$$

Denklemden; U_0 aktivasyon enerjisi, τ_0 malzeme moleküllerinin ters titreşim frekansı, χ yapısal parametre, k Boltzman sabiti, T sıcaklık ve E uygulanan elektriksel alanı ifade etmektedir.

Kablonun tümleşik ısı davranışı, kablo boyunca belirli noktalarda termoküpler aracılığıyla yapılan ölçümler dikkate alınarak, farklı yük büyüklükleri ve mevsim şartları için ancak bazı varsayımlar altında tahmin edilebilmektedir. Kesin bir ısı davranışı belirlemek oldukça zordur.

Sonlu elemanlar yöntemi gibi matematiksel modellerle elde edilen sıcaklık değerleri gerçek değerlere en fazla % 80-90 civarında yaklaşmaktadır. Hesaplamalarda iyimser varsayımlar kullanıldığında, öngörülen yükte çalışan kablonun ısı nedenlerden dolayı zamanla arızalanma riski yüksektir. Kötümser varsayımlar ise, var olan kapasiteyi sınırladığından, ekonomik açıdan optimum yararlanmayı engellemektedir. Teorik hesaplamaların ve simülasyonların pratikte karşılaşılan çevresel değişimleri tam olarak öngörmesi zordur.

Noktasal ısı ölçüm yöntemi adı verilen geleneksel algılama sisteminde, her bir ölçüm noktası için bir termoküpler yada platin direnç probu gerekmektedir. Bu nedenle, kablo uzunluğu boyunca sağlıklı bir sıcaklık profili çıkarabilmek için çok sayıda sensöre ve fiber bağlantısına ihtiyaç duyulmaktadır. “Dağınık Algılama” ifadesi, sadece bir sensörün kablo boyunca binlerce bağımsız ölçüm noktasından veri toplayabildiği bir tekniği tanımlamaktadır. Dağınık sıcaklık algılama (DTS) yönteminde, kuvars fiberin kendisi sensör görevini üstlenmiştir. Bu nedenle geleneksel yöntemdeki veri toplama elemanlarına gerek kalmamakta, fiberin karakteristik özelliklerinden faydalanmaktadır. Ölçümde kullanılan kuvars fiberler, genellikle haberleşme uygulamalarında kullanılan fiberlerin aynısıdır. DTS’in geleneksel algılamaya göre bazı avantajları mevcuttur (Anonim 1999):

- Düşük maliyet
- Eş zamanlı çalışan çok sayıda ölçüm noktası
- Verilerin sadece bir işlemci tarafından toplanması
- Büyük kablo uzunluklarında ve değişen coğrafik özelliklere sahip geniş alanlarda, sıcaklık ölçümlerinin yanı sıra konum bilgisinin de sağlanması
- Kurulum ve bakımın kolay olması

Optik fiberin algılama elemanı olarak kullanılması, elektriksel ve kimyasal açıdan risk taşıyan ortamlarda güvenilirlik, elektromanyetik girişime bağımsızlık, aşınmalara karşı yüksek direnç göstermesi ve fiberin doğasından gelen düşük fiyat gibi avantajlar yaratmaktadır.

XLPE yalıtkanlı yüksek gerilim kablosu üzerinde oluşan gerginlikler veya mekanik streslerin algılanması konusunda literatürde çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bunun en önemli nedenlerinden biri, kablo üzerindeki tüm nokta gerginliklerin algılanması için fiber ile kablonun temas halinde bulunma zorunluluğudur.

Dağınık sıcaklık algılama uygulamalarında, Brillouin saçılmasına dayanan optik fiberli sensörler, sıcaklık ve gerginliklere eş zamanlı duyarlılık göstermektedir. Bu nedenle, XLPE yalıtkanlı kablolarda tümleşik olarak sıcaklık ve gerginliklerin eş zamanlı olarak profillerinin çıkartılması için Brillouin saçılmasını esas alan optik fiber sensörler önerilmektedir.

3.2. XLPE Yalıtkanının Performansını Etkileyen Faktörler

Kablo yalıtkanı olarak, alçak gerilimlerde PVC, orta gerilimlerde PE (poli etilen) veya EPR (etilen propilen kauçuk) ve yüksek gerilimlerde ise XLPE ve EPR polimerleri kullanılmaktadır. Polietilenin elektriksel özellikleri çok iyidir. Düşük dielektrik kayıp faktörüne, düşük iletkenliğe ve yüksek elektriksel dayanıma sahip olması nedeniyle sanayide yaygın olarak kullanılmaktadır.

Katı bir polietilen, normal sıcaklıklarda kırılmaz, esnek ve oldukça yumuşak bir yüzeyi vardır. Sıcaklık artışı ile yumuşar ve 125 °C de erimeye başlar. Eğer sıcaklık normal değerlerin altına indirilirse, sertleşir ve bükülmez hale gelir. Çok düşük sıcaklıklarda ise, malzeme büküldüğü zaman kırılır. Yüksek gerilim kablosu üretiminde yalıtkan olarak çoğunlukla XLPE tercih edilmektedir. XLPE, normal polietilene göre yüksek sıcaklıklarda daha kararlı ve daha esnektir. Normal çalışma durumunda

125°C'ye kadar ve kısa devre rejiminde ise 250 °C sıcaklığa kadar dayandığından, yüksek akımların taşınmasına olanak sağlamaktadır (Malik ve ark.1998).

Kuru ortamda çalışan bir XLPE yalıtkanının yaşlanmasına neden olan etkiler; esas olarak elektriksel , termal ve mekanik gerilmeler olarak sayılabilir. Elektriksel stresler, sistemin çektiği güce, frekansına ve akan akıma bağlıdır. Termal streslerin oluşma nedeni, en yüksek çalışma sıcaklığına ves hızlı sıcaklık artışlarına bağlıdır. Ayrıca, çevre sıcaklığının aşırı olması da yaşlanma hızını arttırmaktadır. Mekanik stresler olarak sayılan; bükülme, gerilme, basınca maruz kalma, sıkışma ve burulma, kablonun yaşlanmasına neden olmaktadır. Çevredeki gazların (oksijen, nitrojen, hidrokarbonlar) oluşturdukları bileşikler, yağsı maddeler, su veya nem, aşındırıcı kimyasal maddeler, iyonlaştırıcı ve mor ötesi ışınlar da yaşlanma sürecini hızlandıran etkenlerdir (Densley ve ark.1994).

i) Dış Faktörler

Yalıtkan içindeki gaz ile dolu boşluklar, kirletici maddeler ve elektriksel stresin artışı yalıtkanın yaşlanmasına neden olan ve performansını etkileyen dış faktörler olarak sayılabilir. Yalıtkan içinde oluşan boşluklar nedeniyle, elektriksel stres değeri kritik değerin üzerine çıktığında, boşluk üzerinde kısmi boşalmalara neden olacaktır. Voltaj AC olduğundan her bir alternansta düzgün bir şekilde tekrarlanan boşalmalar, yeterli derecede şiddetliyse, yalıtkanı fiziksel ve kimyasal olarak zamanla aşındırarak sonunda elektriksel ağaçlanmaya neden olarak, yalıtkanın yapısını bozacaktır.

Kirletici madde, o noktada kısmi boşalmalara neden olabilir ve bulunduğu yerde elektriksel stresi arttırarak yük enjeksiyonunun başlamasına ve sonunda yalıtkanın bozulmasına neden olmaktadır (Densley ve ark.1994).

ii) Yalıtkanın Kimyasal Yapısından Kaynaklanan Faktörler

Yalıtkanı oluşturan polimerin fiziksel ve kimyasal sebepli olarak kristalleşmesi oksidasyona ve hidrolize neden olmaktadır. Polimerlerin kristalleşmesi aynı zamanda,

yalıtkan içinde boşlukların oluşmasına veya yoğunluğu yüksek bozucu maddelerin artmasına ve farklı yapıda bölgelerin oluşmasına neden olur. Elektrik alanı altında polimerde serbest yük taşıyıcılarının bulunması, yükün yer değiştirmesine neden olarak yükü üzerinde tutsak eden bazı bölgelerde yükün birikmesine neden olur.

Yükün biriktiği bölgelerin derinliği ve potansiyel farkı, kablo rejimde iken XLPE yalıtkanının zayıflamasına neden olur. XLPE'nin doğru gerilimlerde (dc) zayıflamasının nedeni, belirli bir değerdeki elektrik alan ile bu yüklerin oluşturduğu kuvvetli elektrik alanının üst üste binerek çok yüksek değerde bir stres oluşturmasıdır. Stres oluşumu, yalıtkanın bozulmasına ve performansının düşmesine neden olmaktadır (Densley ve ark.1994).

iii) Yalıtıkanda Meydana Gelen Ağaçlanmaların Yalıtıkana Etkileri

Yalıtkanın çapraz bağlanması prosesi sonrasında kalan nem ile elektriksel alanın etkileşimi neticesinde yalıtkan içerisinde papyon görünümünde içi su dolu ağaçlanmalar oluşmaktadır. Yalıtkan içinde oluştukları bölgeye göre iki farklı tipte ağaçlanma oluşmaktadır (Anonim 1990). Bunlar; iç kısımda oluşan papyon görünümündeki ağaçlanma ve dış kısımda oluşan hava temaslı ağaçlanmadır. İç kısımda oluşan ağaçlanmaların alternatif gerilimlere karşı yalıtkanın mukavemetini % 10 düşürmesi dışında ciddi bir etkisi bulunmamaktadır (Deschamps 1990). Ancak, su ağaçlanmasının elektriksel ağaçlanmaya dönüşmesi daha kötü sonuçlar doğurabilir.

Hava temaslı ağaçlanma, papyon görünümündeki ağaçlanmaya göre daha kötü etkilere neden olabilir. Yalıtkan üzerinde yeterince su bulunduğunda ağaçlanma yalıtkan içerisine doğru ilerler ve bu durum yalıtkanın elektriksel mukavemetini zamanla azaltır ve hava temaslı ağaçlanma elektriksel ağaçlanmaya dönüşerek yalıtkanın performansının düşmesine ve nihayetinde deformasyonla birlikte yırtılmasına neden olmaktadır.

iv) Sıcaklık Değişiminin Yalıtkan Üzerindeki Etkisi

Sıcaklığın artışı kablo için, kimyasal reaksiyon oranını artırmakla kalmaz, sıcaklıkla aktive olan reaksiyonların hızlarını da artırır. Difüzyon olayı, yalıtkan içerisindeki kirletici maddelerin su oluşturması, organik maddelerin çözünürlüğü, sıcaklıkla hız kazanan reaksiyonlardır. Oksijenin XLPE'ye geçişi oksijenin difüzyon hızı ile sınırlanmasına rağmen, oksitlenme olayı hava ile temasa girmiş polietilen için temel bir reaksiyondur.

Enerji kabloları için sürekli çalışma esnasında izin verilen maksimum sıcaklık AEIC standartlarına göre 90 °C ve kısa süreli çalışma için ise 130 °C'dir. Yalıtkanın kristalleşen kısımları 60-110 °C arasında erimektedir. Normal şartlarda 90°C altında erimiş olarak bulunan kristalitler, amorf yapıdaki yalıtkan bölgelerinde oksitlenme tepkimeleri başlatır. Bu işlem, ortamdaki anti oksidant (AO) maddeler tüketilene kadar yavaş biçimde seyretmektedir. Sıcaklık değerleri 90 °C'yi geçtiğinde, oksitlenme tepkimeleri hızlanmakta ve sıcaklık 105 °C'ye ulaştığında ise, anti oksidant maddelerin amorf bölgelerden daha düşük yoğunluklu bölgelere artan difüzyonu oksitlenme reaksiyonunu tamamıyla tehlikeli hale getirmektedir (Andres ve ark.1984).

XLPE yalıtkanının darbe gerilimlerine karşı gösterdiği mukavemet değeri, sıcaklık artışı ile azalmaktadır. Bu sebeple kritik çalışma sıcaklığı kısa süreli olarak 130°C kadar olmaktadır. Sıcaklık değişimi esnasında XLPE yalıtkanının sürekli olarak kristalleştiği kanıtlanmıştır (Melton ve ark.1981, Densley ve ark.1994). Bunun sonucu olarak, sıcaklık değişimine bağlı olarak yalıtkan içerisinde boşluklar oluşmakta ve boşluklar maksimum stres seviyelerinde (haberleşme kabloları için $\approx 10-20\text{kV/mm}$) çalışma riskini artırmaktadır.

Sonuç olarak; sıcaklık artışı, yalıtkan kılıflarının mukavemetinin azalmasına, kılıfın çatlamasına, kısmi boşalmalara, iletkenliğinin artmasına ve darbe gerilimlerine karşı mukavemetinin önemli ölçüde düşmesine neden olmaktadır. Dolayısıyla, sıcaklığın kablo yalıtkanı üzerindeki yaşlandırıcı ve/veya performans etkileri yadsınamaz ve tespitinin kritik sınırlar altında iken yapılması çok önemlidir.

v) **Gerginlik Değişiminin Yalıtkan Üzerindeki Etkisi**

Kablo yalıtkanı, üretim esnasında oluşan gerginlik ve dışarıdan uygulanan gerginlik olmak üzere iki tip gerilmeye maruz kalmaktadır. Dış kaynaklı gerginlik, yalıtkanın yüksek sıcaklıklarda ısıl genişmesi sonucunda ortaya çıkan termo-mekanik etkidir. Üretim sırasından oluşan gerginlik ise, yalıtkanın üretimi esnasında püskürtme işleminden sonra iç-dış katmanlarının merkeze oranla daha hızlı soğuması sonucu merkez kısımda ortaya çıkan gerginliktir.

Yüksek gerilim kabloları serildikten sonra esas olarak iki tip gerginliğe maruz kalmaktadır. Bunlar; kablonun yüksek sıcaklıkta çalışması sonucu ortaya çıkan gerginlik ve kabloya direk olarak etkiyen basınç sonucu ortaya çıkan yanlamasına ve/veya uzunlamasına gerginlik oluşumlarıdır. Simülasyonda ikinci tip gerginlik oluşumu hesaplanmaktadır.

Sıcaklık sonucu oluşan gerginliğe, kablo iletkeninin kablo kılıfına göre daha yüksek genişleme katsayısına sahip olması neden olmaktadır. Kablo yalıtkanı yüksek sıcaklıklara ulaştığında genişmekte ve bu genişleme miktarı iletkenin genişmesi ile de birleşerek, yalıtkan-nüve doğrultusunda bir basınç meydana getirmektedir. Oluşan basınç ile yalıtkan, dış yarı iletkene, ekran amaçlı kullanılan bakır tellere ve bakır bant üzerine etki etmektedir. Bakır tellere uyguladığı basınç kuvveti yeterinde büyüdüğünde, bu teller yalıtkanın içine girmekte ve yalıtkanında ciddi tahribatlar yapmaktadır (Orton ve ark.1987). Söz konusu basıncın tahribatını önlemek için bakır teller ile ve dış yarı iletken ile yalıtkan arasına koruyucu bir örtü (yarı iletken bir katmanla yastıklama yaparak) ile kaplanması önerilmiştir (Ishibashi ve ark.1987).

Basınç sonucu ortaya çıkan yanlamasına ve uzunlamasına gerginlikler, kablo yalıtkanı üzerine sürtünme kaynaklı, toprak ağırlığı veya herhangi bir kuvvetin etkimesi sonucunda bükülmeler, kıvrılmalar şeklinde ortaya çıkan gerginliklerdir. Kablo büküldüğünde veya dikey etkiyen kuvvetler sonucunda, iletken, yalıtkan üzerine baskı yapmaktadır. Bu etki yüksek sıcaklıklarla birleştiğinde ise, sıcaklıkla yalıtkanın sıkışma

modülü azaldığı için, yanlamasına basınç kuvveti kablo iletkeninin yalıtkanın içerisine girmesine ve yalıtkanın yırtılmasına neden olmaktadır.

Gerginlik ölçüm birimi $\mu\epsilon$ olarak verilmektedir. Kablo yalıtkanı üzerinde 1000 $\mu\epsilon$ 'lik gerginlik oluşumu, Brillouin geri saçılmış işaretin frekansını yaklaşık olarak 50 MHz kaydırırken, işaretin Brillouin gücünde % 0.90 oranında değişime neden olmaktadır.

3.3. Yüksek Gerilim Kablolarında Sıcaklığın Optik Fiberli Sensörler ile Anlık Olarak İzlenmesi

Optik fiberli DTS, haberleşme alanında da yaygın olarak kullanılan optik zaman domeni yansıma ölçme (OTDR) yöntemine dayanır. OTDR, fiberde geriye yansıyan ışığın şiddetindeki değişimi, ışığın kat ettiği mesafenin fonksiyonu olarak belirler.

Işık fiber içerisinde yayılırken, bir kısmı saçılır ve geriye doğru yansır. Bu saçılma, yoğunluk ve malzeme yapısının neden olduğu elastik bir saçılma olan Rayleigh saçılması ile moleküler ve hacimsel titreşimlerin oluşturduğu Raman ve termal olarak oluşan akustik dalgaların neden olduğu Brillouin saçılmalarının bileşimidir. Rayleigh saçılması, sıcaklık değişimlerine çok az duyarlı olup daha çok kayıpların, kırılmaların ve homojensizliklerin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Raman saçılması sıcaklığa, Brillouin saçılması ise hem sıcaklığa hem de gerginliğe duyarlıdır.

Raman saçılması DTS'de kullanılabilir kadar güçlü ve ayırık bir saçılmadır (Anonim 1999). Geniş sıcaklık bağımlılığı olmasına rağmen, Brillouin saçılmasını Rayleigh saçılmasından ayırmak kolay olmamaktadır. Bu durum algılayıcının maliyetini arttırmaktadır. Ancak son birkaç yılda Brillouin saçılmasının ölçümüne dayanan devre düzenekleri oldukça geliştirilmiştir. Bunun nedeni ise, Brillouin saçılma şiddetinin ölçüldüğü fiber sensörde, sıcaklık ile eş zamanlı olarak gerginliğin de ölçülebilmesidir.

Brillouin ve Raman saçılmaları, Stokes (düşük foton enerjisi) ve anti-Stokes (yüksek foton enerjisi) yayınımlarından oluşan bileşenler üretmektedir. Geriye saçılan

ışığın anti Stokes yoğunluğunun Stokes yoğunluğuna oranı R_r , Eşitlik 2.1’de verilen $R(T)$ ’ye benzer biçimde aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$R_r = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{AS}} \right)^4 \exp\left(\frac{hc\Delta\nu}{kT} \right) \quad (3.2)$$

Bu oran, oda sıcaklığında ~ 0.15 değerinde olup 0-100 °C aralığında ise ~ % 0.8/°C’lik değere karşılık gelmektedir. Kablonun sıcaklık profili çıkarılırken sıcaklık ölçümünün yanı sıra, ölçüm bilgisini gönderen noktanın konumunun da bilinmesi gerekir. OTDR yönteminde, ışığın yansıma süresinin ölçülmesi ile saçılma noktasının belirlenmesi mümkündür. İleri ve geri yönde ışığın yayılma zamanı t ise, ışığın aldığı yol aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir:

$$d = \frac{ct}{2n} \quad (3.3)$$

Burada c ışığın boşluktaki hızı ve n fiberin kırılma indisidir. Günümüzde, ticari sistemler 10 km. uzunluklu 50/125 μm çok modlu fiberin sıcaklığını 1 metrelik uzamsal çözünürlük ve 1C°’lik sıcaklık çözünürlüğüyle ölçme yeteneğine sahiptir.

Sıcaklık çözünürlüğü; ölçüm sisteminin, minimum sıcaklık değişimine verdiği cevabın bir göstergesidir. Uzamsal çözünürlük, DTS’nin yeteneğini yansıtmakta ve spesifik özelliklerin doğrulukla ölçülmesi açısından çok önemlidir. Uzamsal çözünürlük, kablo üzerindeki potansiyel sıcak noktaları doğru biçimde değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Fiber üzerinde oluşan bir sıcak nokta eğer DTS sisteminin uzamsal çözünürlüğünden küçük ise, gerçek büyüklüğünü yansıtmayacaktır.

Çok modlu basamak indisli fiberlerin, kısa uzamsal aralıklar ve düşük uzamsal çözünürlükler için seçilmelerine karşılık; çok modlu gradyen indisli fiberler ve tek modlu fiberler, daha yüksek uzamsal aralık ve yüksek uzamsal çözünürlükler için seçilmektedirler.

Dalga boyu ne seçilirse seçilsin, kaynağa ait en önemli tasarım kriterleri, darbe genişliği ve lazerin ürettiği ışığın tepe gücüdür.

$$\Delta z_{\min} = \frac{c\tau}{2n_{gr}} \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.4'ten açıkça görülmektedir ki; darbe genişliği ve fiberin kırılma indisi uzamsal çözünürlüğün hesaplanmasında önemlidir. Sensör performansını etkileyen mesafe, ölçme süresi, uzamsal çözünürlük, sıcaklık ve gerginlik çözünürlükleri gibi performans kriterlerine önceki bölümlerde değinilmiştir.

DTS ile sıcaklık ölçme yönteminde yüksek gerilim kablolarına fiberin en uygun şekilde yerleştirilmesi büyük önem taşımaktadır. İdealde fiber, sıcaklık/gerginlik ölçümleri için kablo iletkenine mümkün olduğu kadar yakın olmalıdır. Ancak iletkene erişebilmek için kablo yalıtkanını yarmak gerektiğinden bu yaklaşım pratik olmamaktadır.

Karar verilmesi gereken önemli bir nokta, fiberin yüksek gerilim kablo imalatına dahil edilip edilmemesidir. Bu durumda fiberin, çeşitli bükme ve yüksek sıcaklık işlemlerini de kapsayan yüksek gerilim kablosu üretim süreçlerine dayanması gerekliliği ortaya çıkabilir. Pratikte, optik fiberlerin enerji kablolarına entegrasyonu, fiberlerin yüksek gerilim kablolarında *ekran tellerinin* arasına konulan özel manyetik olmayan tüpler içerisine, orta gerilim kablolarında da dolgu malzemesi içerisindeki plastik tüplerin bünyesine yerleştirilmesi ile gerçekleştirilmektedir.

3.4. Akım Taşıma Kapasitesini Etkileyen Faktörler

Yeraltına döşenmiş kabloların özellikle şehirlerdeki değişik çevresel koşullara bağlı olarak serilmelerinden dolayı, sıcaklığı diğer kablo bölgelerine göre daha yüksek olan yerel bölgelerin sayılarının artma riski yüksektir. Bu bölgeler, daha çok kabloların kıvrım noktalarında oluşmaktadır. Bunun sonucunda ise, çalışma şartlarının tehlikeye atılmaması için kablolar, IEC-287 standardında belirtilen % 100 yüklenme değerinden

genellikle daha düşük yüklenme ile çalıştırılmaktadırlar. Kablo çalıştırılırken, Optik Fiberli Dağınmık Sıcaklık Sensörü ile sıcaklık profilinin izlenmesi bu kusurların erken algılanması ve tespitini sağladığı için, sonradan oluşabilecek büyük problemleri ortadan kaldırmaktadır.

Kabloda akım taşıma kapasitesinin hesaplanmasında uluslararası IEC-287 standardından yararlanılmaktadır. Bu standart, akım taşıma kapasitesinin kablodaki %100 yüklenme faktörü ile hesaplanabilmesine olanak sağlamaktadır.

Kablodaki olası yerel sıcak bölgelerin durumuna göre, sistemdeki akım taşıma kapasitesi azalmaktadır. Sistemden akan akım kapasitesi, iletkende oluşmasına izin verilen en yüksek sıcaklık ile sınırlandırılmaktadır. Ayrıca bu akım, kablo içerisinde kullanılan malzemelere, kablo yapısına, kablonun serilme geometrisine ve kablonun serildiği yerin çevresel faktörlerine de bağlıdır. Bu koşulların hepsi IEC-287 standardında belirtilen akım taşıma hesabında kullanılmaktadır. % 100 yüklenme durumunda kablonun taşıyabileceği en yüksek akım değeri I_{\max} aşağıdaki tanımlama ile ifade edilmektedir:

$$I_{\max} \approx D_q q - T_4 \quad (3.5)$$

Burada D_q , qC iletken sıcaklığı ve qA ortam sıcaklığı olmak üzere iletkenin ortam sıcaklığına göre izin verilebilen sıcaklık artışıdır ($D_q = qC - qA$). T_4 değeri ise, kablonun serildiği yerin ısıl özdirencidir.

Aşağıdaki gibi formüle edilmektedir:

$$T_4 = (1.5 / n \cdot \rho t \cdot (\ln(2U) - 0.63)) \quad (3.6)$$

Burada U ifadesinin değeri; $U = 2.L/De$ kablo damar çapı, ρt ise toprağın ısıl özdirencidir.

100 metre çapında (D_e)  damarlı kablo, yere göre 1 m(L) derinliğe serilmiş olsun. Bu durumda, % 100 yüklenme durumunda kablonun taşıyabileceği en yüksek akım değeri (3.7) eşitliğinde olduğu şekli ile ifade edilmektedir:

$$I_{\max} \approx (qC - qA) - 1.46 \cdot \rho t \quad (3.7)$$

Eşitlikten de grldğ gibi, kablonun taşıyabileceği maksimum akım değeri, kablonun serildiği toprağın ısıl direncine bağlıdır.

3.5. Brillouin Esaslı Dağınık Sıcaklık/ Gerginlik Sensörleri

Brillouin esaslı optik sensörler, Raman esaslı sensörlere kıyasla sahip olduğu avantajlardan dolayı kayda değer bir biçimde araştırmaların odak noktası olmuştur. Bu bölümde, sıcaklık / gerginlik Brillouin sensörleri, spontane Brillouin saçılma esaslı sensörlere vurgu yapılarak detaylı bir şekilde değerlendirilmektedir.

3.5.1. Giriş

Son zamanlarda, sıcaklık / gerginlik parametrelerinin Brillouin g ve frekans bağımlılığı, dağınık sıcaklık ve gerginlik optik sensörler için temel olarak kullanılmıştır. Bu bağımlılıklar, sıcaklık ve gerginliğe bağlı olarak fitilli silikanın akustik hızındaki ve kırılma indisindeki değişimlerin bir sonucudur.

Bilindiği üzere, kırılma indisinde, sıcaklık ve gerginlik /mekanik stres ile lineer bir artış söz konusudur. Yine de; bu durum, Brillouin saçılmasına neden olan akustik hız değişimlerinin bir desteğidir. Bu lineer bağımlılık, geniş bir mesafede gerçeklenen algılama uygulamalarında sıcaklık ve gerginliğin izlenmesine olanak sağlamaktadır.

3.5.2. Brillouin Esaslı Sensör Uygulamaları

Brillouin saçılma esaslı dağınık optik fiber sensörler büyük alanlarda dağınık yöntem ile değişkenleri ölçebilmektedir. Sensörler, sıcaklık, gerginlik fiber kayıpları, ek

yeri / bükülme kayıpları ve fiber bağlantı boyunca fiber kırılmalarının ölçülmesi için kullanılabilir. Yine de, sıcaklık ve gerginlik en önemli ölçüm parametresidir. Bu nitel ölçümler çok sayıda uygulamada kullanılabilir:

- Yapısal izleme: Binalarda, barajlarda, köprülerde, maden ocaklarında ve tünellerdeki yapısal çatlakların tespitinde kullanılabilir. Bu tür yapılar; uçaklar, aircraftlar, gemiler, yüksek hızlı trenler veya uzay mekikleri makine ve araçların yaptığı gibi bu türden izleme yöntemlerini gerektirir. Bu tür ölçümler, uzun mesafelerde yüksek uzamsal çözünürlüktedir.
- Kimyasal/İşleme İşaretleri: Nükleer enerji fabrikalarında, elektrik jeneratörlerinde, güç dönüştürücülerinde, basınç kanallarında ve su kaynaklarında izleme amaçlı kullanılmaktadır. Güç hatları, petrol kuyuları ve boru hatları gibi uygulamalar, bu uzun mesafeli sensörleri kullanılır yapmaktadır.
- Haberleşme Ağları: Aktif iletim fiber kablolarda ani sıcaklık / gerginlik (mekanik stres) yükselmeleri, fiber kayıpları ve fiber kusurlarının izlenmesi ile denizaltı optik fiberlerde gerginlik değişimleri (mekanik stres), depremin yaratmış olduğu hasarlar ve donmuş kablolardaki gerginlik profillerinin izlenmesidir.

Genel olarak; farklı algılama uygulamaları, algılama mesafesinde ölçüm cevap süresi ve sıcaklık / gerginlik uzamsal çözünürlük gibi farklı toleranslar gerektirebilir.

Sonuç olarak, algılama uygulamalarındaki çeşitlilik, farklı uygulama ihtiyaçlarını karşılamak için Brillouin algılama tekniklerinin kullanılmasını gerekli kılmıştır.

3.5.3. Brillouin Esaslı Algılama Teknikleri

Dağınık sıcaklık ve gerginlik ölçümlerinde kullanılmakta olan ana rejimler, spontane Brillouin saçılma ve zorlanmış Brillouin saçılmadır. Brillouin Zaman Domeni Reflektometresi (BOTDR), prensipte bilinen Rayleigh OTDR ile benzerdir. Ve spontane Brillouin saçılmayı kullanmaktadır, burada algılayan fiberin sadece bir ucuna

giriş gerektirir. Fiber içerisinde ölçülecek parametrenin (sıcaklık ve gerginlik) pozisyonu, fiber içerisine darbeli ışığın gönderilmesi ile geriye saçılmış ışığın dedektörde alınması arasındaki zaman aralığı kullanılarak hesaplanmaktadır.

Brillouin Optik Zaman Domeni Analizi (BOTDA) ve Brillouin Optik Korelasyon Domeni Analizi (BOCDA) gibi teknikler, zorlanmış Brillouin saçılmasını kullanmaktadır ve genel olarak algılayan fiberin iki ucundan girmek gerekmektedir. BOTDA esaslı dağıtık sensörler 1990 yılında Horiguchi tarafından açıklanmıştır. Bu tür teknikler, bir darbe kaynağı ile sayıcı-ışık yayıcı CW kaynağı arasındaki etkileşimi açıklamaktadır. İki dalga arasında, frekans farkı Brillouin kayma miktarına ($\approx 11\text{GHz}$) eşit olacak biçimde güç transferi gerçekleşmektedir. İki lazer arasındaki frekans farkını ölçerek, Brillouin frekans kaymasını fiber boyunca hem sıcaklığın hem de gerginliğin fonksiyonu olarak hesaplamak mümkün olmaktadır.

Uzamsal bilgi, darbenin CW ışığı ile etkileşimden önceki zaman gecikmesi ile hesaplanmaktadır. Sistem, hem CW işaretinin bir prop gibi davrandığı Brillouin kazanç modunda ve hem de CW işaretinin pompa gibi davrandığı (prop darbesini kuvvetlendirdiği) Brillouin kayıp modunda çalıştırılabilir. İkincisi, prop darbesinin kuvvetlendirilmesinden dolayı daha uzun bir mesafede algılama sağlayabilir. Bu tekniğin birkaç dezavantajı vardır. Fiberin iki ucuna giriş yapmak gerekmektedir, bu durum çoğu algılama uygulamalarında apaçık bir dezavantajdır. Fakat Brillouin frekans kaymasını ölçebilmek daha önemli olmakla birlikte Brillouin gücü ile ilgili küçük faydalı bir bilgi sağlamaktadır. Bu yüzden, uzun algılama mesafelerinde, eş zamanlı sıcaklık ve gerginlik ölçümlerinin zorluğu kanıtlanmıştır. Bundan başka, ölçüm entegre edilmiş bir Brillouin kazancına bağlı olmakta ve böylece, mutlak ölçümler tekil “*sıcak nokta ölçümlerinde*” olduğu gibi makul ve mantıklı olmaktadır.

BOTDR ve BOTDA tekniklerinde, darbe genişliği 10 ns.’den daha düşük bir değere düşürüldüğünde, Brillouin spektrumu daha geniş olmaktadır ve Brillouin frekans kayması ölçümünün doğruluğunu azaltmaktadır. BOCDA tekniği bu tür problemlerin üstesinden gelmek ve yüksek uzamsal çözünürlükte Brillouin frekans kaymasını ölçmek amacıyla geliştirilmiştir. BOCDA prensibi, CW prob işareti ile pompa işaretinin fiber

boyunca etkileşimini esas almaktadır. Bu durum, iki ışık kaynağı arasındaki frekans farkının uzamsal olarak kontrol edilmesi ile gerçekleştirilmektedir.

SBS etkileşimi fiber içerisinde belirli bir pozisyona sınırlandırılmaktadır ve bu pozisyon korelasyon tepesinin izlenmesi ile hesaplanmaktadır. Brillouin kazancı, pompa ve prob ışığı aynı fazda olduğunda ve lazer diyotun modülasyon frekansını değiştirmek suretiyle gerçekleştirildiği durumda maksimum olmaktadır. Bu teknik daha kısa algılama aralığında (onlarca metre civarında) sadece Brillouin frekans kaymasını ölçmek için uygundur. Çünkü, bu teknikte sadece frekans ölçümü esas alınmaktadır ve sıcaklık ile gerginliği ayrı ayrı çözümlenmek mümkün olamamaktadır. Bu yüzden, fiberin tek ucunun kullanıldığı uzun mesafeli eş zamanlı sıcaklık ve gerginlik ölçümlerinde Brillouin saçılmasını esas alan BOTDR tekniği, dağınık algılamaya en uygun tekniklerden biridir.

3.5.4. Spontane Brillouin Esaslı Sensörler

Spontane Brillouin esaslı sensörlerde, mesafe ve sıcaklık / gerginlik çözünürlüğü darbeli kaynağın tepe gücüne ve alıcıdaki Brillouin SNR değerine bağlı olarak değişmektedir. Her nasılsa, fiber içerisine gönderilmiş maksimum darbe gücü, fiber içerisinde ortaya çıkan lineer olmayan etkiler ile sınırlanmaktadır. Bu sensörlerde uzamsal çözünürlük darbe genişliği ve alıcı bant genişliğine bağlıdır. Brillouin işaretin uzaklığa bağlı güç profili, fiber içerisine gönderilen prob darbesi işareti ile geriye saçılan işaretin alınması arasında geçen süre ile belirlenmektedir. Geri saçılan işareten kaynaklanan fiber kaybı ile ileri yönde ilerleyen işaretin güçlerinin birbirine eşit olduğu kabul edilerek, fiber boyunca Brillouin güç profili aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$P_B(L) = 0.5P_0W\alpha_B S v_g e^{(-2\alpha_R L)} \quad (3.8)$$

Eşitlik (3.8)'de, P_0 fibere gönderilen ışığın prob gücü, W prob darbe genişliği, v_g grup hızı, α_B ve α_R sırasıyla Brillouin ve Rayleigh saçılma katsayılarıdır. S , optik fiberin

nümerik açıklığından yakalanan saçılmış ışığın miktarını ifade eden *yakalama oranı*'nı ifade etmektedir ve aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$S = \frac{(NA)^2}{4n^2} \quad (3.9)$$

Burada, NA fiber nümerik açıklığı ve n ise fiber nüvesinin kırılma indisidir. Brillouin saçılma katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\alpha_B = \frac{8\pi^3 n^8 p^2 kT}{3\lambda_0^4 \rho v_a^2} \quad (3.10)$$

Eşitlik (3.10)'da, n kırılma indisi, p foto elastik katsayı ≈ 0.286 , k Boltzmann sabiti ($1.38 \times 10^{-23} J/K$), T fiberin sıcaklığı (298 Kelvin), ρ silikanın yoğunluğu ($2330 kg/m^3$), v_a akustik hız ve λ_0 ise gönderilen ışık dalga boyudur (1550 nm). (3.10) eşitliği kullanılarak silika esaslı fiberlerde Brillouin saçılma katsayısı, $\alpha_B \cong 1.17 \times 10^{-6} m^{-1}$ olarak hesaplanmaktadır.

Brillouin gücün logaritmik eğrisi, 1550 nm'de çift geçirme kayıp katsayısına ($\approx 0.40 dB/km$) eşdeğerdir ve örnekleme çözünürlüğünü simgeleyen iki saçılma noktası arasındaki en küçük mesafedir. Giriş gücündeki dalgalanmalardan yada fiber zayıflamalarından kaynaklanan Brillouin güç değişimlerini ve algılayıcı fiber boyunca bükülme /ek yeri kayıplarını kompanze etmek için, elde edilen Brillouin gücü çizgilerini normalize etmek gerekmektedir. Bu işlem için öncelikle Rayleigh işaretinin gücünün Brillouin işaretinin gücüne oranı olarak bilinen Landau-Placzek oranını hesaplamak gerekmektedir.

Landau-Placzek Oranı olarak bilinen bu oran (LPR);

$$LPR = \frac{P_R}{P_B} = \frac{T_f (\beta_T \rho v_a^2 - 1)}{T} \quad (3.11)$$

Eşitlik (3.11)'de, P_R ve P_B sırasıyla Rayleigh ve Brillouin güçleridir. T_f fiktif sıcaklık (camın termal denge durumuna ulaştığı sıcaklık), ve β_T fiktif sıcaklıkta eriyiğin izotermal denge sıkıştırılabilirliğidir.

Sıcaklık ve/veya gerginliğin mutlak ölçümü için, Brillouin frekans kayması ölçümleri genel olarak oda sıcaklığına (bazen de sıfır sıcaklık değerine) ve sıfır gerginliğe göre referans alınarak gerçekleştirilmektedir. Brillouin gücünün ve frekansının sıcaklığa ve gerginliğe bağımlılığı deney verileri ışığında kabul görmüş ve frekans kaymasına bağlı olarak sıcaklık ve gerginlik katsayıları sırasıyla $K_T^V = 1.07 \text{MHz}/^\circ\text{C}$ ile $K_\epsilon^V = 0.050 \text{MHz}/\mu\epsilon$ olarak hesaplanmıştır. $K_T^P = 0.36\%/^\circ\text{C}$ ve $K_\epsilon^P = -9 \times 10^{-4}\%/\mu\epsilon$ katsayıları ise Brillouin gücünün sıcaklık ve gerginlik bağımlılıklarını ifade etmektedir.

Bu katsayılar, Çizelge 3.2'de verilmiştir. Brillouin frekansı ν ve P gücünün sırasıyla sıcaklık T ve gerginlik ϵ ile lineer olarak değişimi nedeniyle, Brillouin frekans kayması ve güç değişimi miktarı sırasıyla aşağıdaki ifadelerle verilmiştir.

$$\Delta\nu = K_\epsilon^V \Delta\epsilon + K_T^V \Delta T \quad (3.12)$$

$$\Delta P = K_\epsilon^P \Delta\epsilon + K_T^P \Delta T \quad (3.13)$$

Bu eşitlikler matris formda ifade edilebilir ve bu matrisin determinanı $(K_\epsilon^V K_T^P - K_\epsilon^P K_T^V)$ sıfır değil ise, hem sıcaklık hem de gerginlik ters matristen elde edilebilmektedir. Böylece Brillouin frekans kayması ve güç değişimi doğru biçimde hesaplanabilmektedir.

Sıcaklık ve gerginlik değişim miktarları sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\Delta T = \frac{K_{\varepsilon}^v \Delta P - K_{\varepsilon}^P \Delta v}{K_{\varepsilon}^v K_T^P - K_{\varepsilon}^P K_T^v} \quad (3.14)$$

$$\Delta \mathcal{E} = \frac{K_T^P \Delta v - K_T^v \Delta P}{K_{\varepsilon}^v K_T^P - K_{\varepsilon}^P K_T^v} \quad (3.15)$$

Sıcaklık ve gerginlik ölçümlerinde ortaya çıkan hatalar veya diğer bir ifade ile sıcaklık/gerginlik çözünürlükleri ise sırasıyla (3.16) ve (3.17) eşitlikleri ile verilmektedir.

Sıcaklık çözünürlüğü ifadesi;

$$\delta T = \frac{|K_{\varepsilon}^P \delta v| + |K_{\varepsilon}^v \delta P|}{|K_{\varepsilon}^v K_T^P - K_{\varepsilon}^P K_T^v|} \quad (3.16)$$

Gerginlik çözünürlüğü ifadesi;

$$\delta \mathcal{E} = \frac{|K_T^P \delta v| + |K_T^v \delta P|}{|K_{\varepsilon}^v K_T^P - K_{\varepsilon}^P K_T^v|} \quad (3.17)$$

Eşitliklerde, δv ve δP parametreleri sırasıyla Brillouin frekans ve gücüne ilişkin RMS hatalarına karşılık gelmektedir. $(K_{\varepsilon}^v K_T^P - K_{\varepsilon}^P K_T^v)$ determinantın değeri çok önemlidir. Çünkü, determinanta bağlı olarak Brillouin frekans ve güç için oluşacak hatalardan dolayı sıcaklık ve gerginlik hataları hesaplanmaktadır. Determinantın mutlak değeri ne kadar büyük olursa, hesaplanan hata değeri de o kadar küçük olmaktadır. Yinede, determinantın değeri farklı algılayıcı fiberlerde değişiklik gösterebilir, çünkü sıcaklık/gerginlik katsayıları fiberlerin karakteristiklerine bağlıdır.

Brillouin güç katsayılarının (sıcaklık ve gerginlik katsayıları) zayıf Brillouin işareti boyunca (nW'lar seviyesinde) oldukça küçük değerlerde olması ve fiber çift

geçirme kayıplarının oluşması nedeniyle, Brillouin frekans kayması ve güç değişimlerinin kesin doğrulukta ölçülmesi gerekmektedir. Bu yüzden, yüksek doğrulukta tespit sistemi, pratik olarak uzun mesafelerde eş zamanlı sıcaklık ve gerginlik ölçümleri için çok önemlidir.

3.5.5. Spontane Brillouin Saçılmasında Kullanılan Tespit Metotları

Spontane Brillouin saçılmalı işaretten sıcaklık ve/veya gerginlik bilgisini elde etmek için iki farklı tespit metodu kullanılmaktadır. Bunlar, Direk Tespit (DD) ve Koherent Tespit (CD) metotlarıdır.

3.5.5.1. Direk Tespit Metodu

Spontane Brillouin saçılmasının direk tespiti metodunda (DD), gerginliğin Brillouin gücü üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir düzeyde oluşu nedeniyle, Brillouin gücü sıcaklık ölçümünde bir baz olarak kullanılmaktadır. Bu yüzden, Brillouin frekans kayması bilgisi gerekli olmamaktadır. Bu tür tespit metodunda, bilindiği üzere optik filtreleme yöntemi, Brillouin geri saçılan işareti, Rayleigh geri saçılan işaretten ayırmak için kullanılmaktadır. Bu işlem için; Fabry-Perot, Mach-Zehnder veya fiber Bragg grating gibi kararlı bir yansıma ölçer kullanılabilir. Brillouin işareti, Rayleigh işaretten ayrılmasının ardından, Landau-Placzek Oranı kullanılarak fiber boyunca mutlak sıcaklık profilini elde etmek mümkün olabilmektedir.

Brillouin bileşenlerin, interferometre transfer fonksiyonu eğrisi ile ifade edildiği bir Mach-Zehnder yansıma ölçer kullanmak suretiyle DD (direk tespit) metodu ile eş zamanlı olarak sıcaklık ve gerginlik ölçümü yapmak mümkündür. Ancak, bu teknik algılama mesafesinin uzun olması durumunda bazı kısıtlar içermektedir. Eş zamanlı sıcaklık ve gerginlik ölçümlerini yürütmedeki zorluk, bir dezavantaj olarak değerlendirilmektedir. Başka bir deyişle CD metodu, eş zamanlı olarak sıcaklık ve gerginlik ölçümüne olanak verdiği gibi daha uzun mesafede daha üst düzey algılama performansı sağlamaktadır.

3.5.5.2. Koherent Tespit Metodu

Koherent tespit metodunda, eş zamanlı olarak Brillouin frekans kayması ve güç değişimini ölçebilmek için spontane Brillouin saçılmanın heterodin tespiti yöntemine başvurulmaktadır. Bu yüzden, sıcaklık ve gerginlik açık bir biçimde çözümlenebilir. Bu metot, geri saçılan işaret ile bir optik Lokal Osilatör (LO) sinyalinin karıştırılması işlemini kapsamaktadır. Burada Lokal Osilatör; darbe frekansını yaygın olarak bilinen heterodin bir alıcının bant genişliğinin içerisine getirmektedir. Yani bant genişliği o frekansı kapsayacak durumda ayarlanır. Bu prensibi gerçekleştirmek için farklı teknikler rapor edilmiştir. Bu tekniklerde; darbelerin Stokes frekansında yayılma gösterdiği Brillouin lazeri, 11 GHz yan bantlar yaratmak için kullanılan mekanik bir jeneratör ile sürülen yüksek frekans Elektro-Optik Faz Modülatörü, yaklaşık 11 GHz aralığında ayarlanabilir frekans oluşturacak Akusto-Optik Modülatör (AOM) frekans çevirici ring kullanılmaktadır. Yüksek performansta algılama, Brillouin işareti yaratmak için kullanılan kaynak ile Brillouin işaretin karıştırılması (mixing prosesi) ile elde edilmektedir. Bu durum, 11 GHz seviyelerinde bir darbe frekansı yaratmaktadır. Hızlı bir optik dedektör ve mikrodalga elektroniği kullanılarak işaret tespit edilmekte ve analizi gerçekleştirilmektedir. Algılayıcı fiber boyunca Brillouin spektrumu, bilindiği üzere istenen frekansta zaman-domeni çizgilerinin yoğunluğundan çıkartılmaktadır. Her bir spektrumu Lorentz fonksiyonuna uydurarak, sensör olarak kullanılan fiber boyunca her bir noktada Brillouin frekans kaymasının ve güç değişimlerinin, hesaplanması mümkün olmaktadır. Bu yüzden; fiber boyunca, dağınık sıcaklık ve/veya gerginlik varyasyonu elde edilebilmektedir.

CD metodu kutuplanma gürültüsünden etkilenmeye yatkın olmakla birlikte, DD direk tespit metoduna nazaran daha çok elektronik bileşen içermektedir. Bu yüzden, asıl gürültü kaynağının dedektör gürültüsü olduğu durumda SNR (işaret /gürültü oranı) oranında bir artma sağlamaktadır. Daha da fazlası ≈ 11 GHz darbe işareti, optik filtrelerle sağlanandan daha etkili bir biçimde elektronik olarak filtrelenebilmektedir. Bu faktörler, algılama mesafesinde ve sıcaklık /gerginlik çözünürlüğü açısından önemli bir gelişmeyi ifade etmektedir. Bu da, algılama sistemlerinin performanslarını büyük ölçüde etkilemektedir.

3.6. Brillouin Esaslı Dağılık Sıcaklık ve Gerginlik Sensörlerindeki İlerlemeler

Brillouin esaslı sıcaklık ve gerginlik sensörlerinin performansını artırma ve basitleştirme ilkeleri üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır. Son 15 yıl ve devamında, farklı teknikler ve metotlar kullanılarak algılama mesafesinde, uzamsal çözünürlük ve sıcaklık ve gerginlik çözünürlüğü üzerinde önemli gelişmelere ulaşılmıştır. Bu teknikler ve ilgili gelişmelerin bazı detayları daha önce Maughan ve Cho tarafından belgelenmiştir.

Çok uzun sıcaklık mesafesinde çalışma, Brillouin frekans kayma ölçümlerini esas alan BOTDR tekniğini kullanarak gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ve gerginliğin eş zamanlı olarak ölçümünde, en iyi ve gerçekçi sonuç, spontane Brillouin frekans kaymasını ve Brillouin güç değişimini eş zamanlı olarak ölçmek suretiyle elde edilmiştir. Sadece Brillouin frekans kayma ölçümünü esas alan ve algılayıcı olarak kullanılan fiberin her iki ucuna da girmeyi gerektiren BOTDA tekniğinde, >30 km mesafelerde sıcaklık çözünürlüğü 1 °C, uzamsal çözünürlük 5 m olarak gerçekleştirilmiştir. Ancak; bu sonuç sadece fiberin bir kısmının ısıtıldığı durum için geçerlidir. Yüksek uzamsal çözünürlüklü kısa mesafeler için, en iyi sonuç ise BOCDA tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. BODCA tekniğinde; araştırmalar, inşaat yapılarının veya kimyasal fabrikaların izlendiği uygulamalarda Brillouin frekans kaymasının kesin doğrulukta ölçülmesi ve bu yöndeki gelişmeler üzerin odaklanmıştır. Burada kısa algılama mesafeleri ve yüksek uzamsal çözünürlük (<1m) söz konusu olmaktadır. Bu konu üzerine son gelişmeler 2002 yılında Hotate tarafından elde edilmiştir.

BOTDA tekniği, sınırlı bir algılama aralığını göstermiştir ve bu teknikle tek seferde sadece bir parametre (sıcaklık veya gerginlik) ölçülebilmektedir. Ayrıca, şu anki BOCDA tekniği çok kısa algılama mesafelerinde tek ölçüm parametresini (sıcaklık veya gerginlik) ile sınırlandırılmaktadır. Yani sadece bir tanesi ölçülebilmektedir. Sonuç olarak, BOTDA ve BOCDA tekniklerini kullanarak uzun mesafelerde eş zamanlı sıcaklık ve gerginlik ölçümleri gerçekleştirmek oldukça zordur.

BOTDR tekniği kullanımı ile algılama sistemlerinin performansını sınırlandıran faktörlerin yarattığı etkileri azaltıcı çalışmalarda artışlar olmuştur. Bunu yaparken, bütün sistemin algılama performansı, algılama mesafesi, ölçüm parametreleri çözünürlükleri ve uzamsal çözünürlük kavramlarının üzerinde durulmaktadır. OFS'ler sahip oldukları avantajlar nedeni ile, diğer algılama teknolojilerine kıyasla popülaritesi artan bir seçim olmuştur.

Optik fiberlerdeki saçılma mekanizmaları, DOFS'lerin bir çok algılama uygulamasında etkili bir biçimde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Brillouin işaretinin güçlü oluşu ve hem sıcaklığa hem de gerginliğe duyarlı olması sebebi ile, Brillouin esaslı sensörler, Raman esaslı sensörlerin üzerinde popülerlik kazanmışlardır.

Spontane Brillouin saçılmasının koherent (eş evreli) olarak tespiti, daha yüksek dinamik mesafe sağlamakla birlikte sıcaklık ve gerginlik parametrelerinin eş zamanlı ölçümlerine ve direk tespit metoduna kıyasla daha iyi algılama performansına olanak sağlamaktadır. Gürültü, fiber kayıpları ve lineer olmayan etkiler gibi algılama sistemlerinin performansını sınırlandıran faktörler azaltılarak algılayıcıların performansını arttırmak mümkün olmaktadır ve bu konudaki çalışmalar son zamanlarda artış göstermiştir.

3.7. Brillouin Gücü ile Kabloya Uygulanan Gerginlik ve Sıcaklık Arasındaki İlişki

Brillouin frekans kayması sıcaklık ve gerginlik katsayıları ile Brillouin gücü sıcaklık katsayısı bilinirken, son katsayı olan Brillouin gücü gerginlik katsayısının da, gerçek bir FODTS veya birleştirilmiş sıcaklık ve gerginlik sensörü tasarlayabilmek için bilinmesi gerekmektedir.

Optik fiber sensörlerde dağınmık gerginlik ölçümünü gösterir devre düzeneği Şekil 3.1'de verilmektedir. Görüldüğü gibi, kaynak Q-Anahtarlamalı erbiyum katkılı bir fiber lazerdir.

Düzenekte sadece fiberin orta kısmı üniform bir gerginlik elde edilecek biçimde makara sistemi ile gerilmektedir. Fiberi germek için bir makara sisteminin kullanıldığı bu tekniğe karşılık, fiberin mandreller veya merdane vasıtasıyla büküldüğü bir başka teknik Horiguchi ve arkadaşları tarafından denenmiştir.

Makaraların çapı ve yüzey mükemmelliği, makro bükülme ve mikro bükülme kayıplarının minimize edilmesi açısından çok önemlidir.

Tek modlu bir fiber için, kritik eğrilik yarıçapı R_{cs} aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$R_{cs} = \frac{20\lambda}{(n_{core} - n_{clad})} \left[2.748 - 0.996 \frac{\lambda}{\lambda_c} \right]^{-3} \quad (3.18)$$

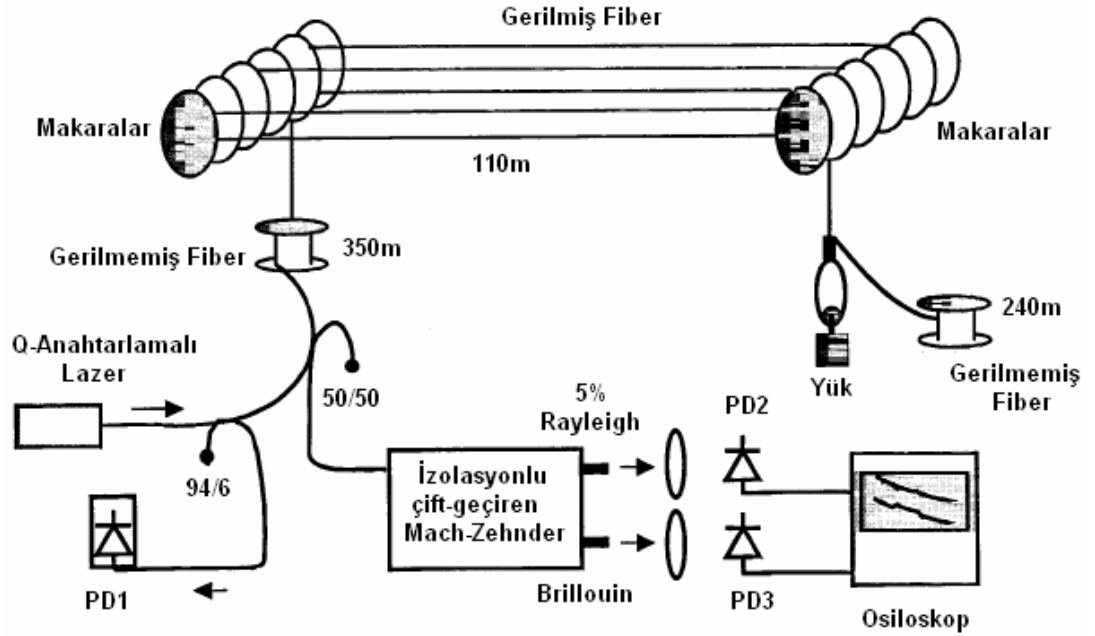
Eşitlik (3.18)'de kullanılan parametreler aşağıda verilmiştir:

- n_{core} = nüve kırılma indisi
- n_{clad} = kılıf kırılma indisi
- λ = operasyon dalga boyu
- λ_c = fiberin kesme dalga boyu
- Δ = izafi kırılma indis farkı

λ_c ise, aşağıdaki formül ile ifade edilmektedir.

$$\lambda_c = \frac{2\pi n_{core}(2\Delta)^{1/2}}{2.405} \quad (3.19)$$

$$\Delta = \frac{n_{core}^2 - n_{clad}^2}{2n_{core}^2} \quad (3.20)$$



Şekil 3.1 Fiber optik dağınmık gerginlik sensörü devre düzeneği.

Kaynak: De Souza, Fiber optic distributed sensing based on spontaneous Brillouin scattering, Doktora Tezi, 1999.103p.

Devre düzeneğinde, Rayleigh ve Brillouin işaretleri, tamamı fiber çift geçiren Mach-Zehnder yansıma ölçer (DPMZ)'in termal olarak ayarlanması ve FSR (serbest spektral aralık) değerinin 22.3 GHz'e getirilmesi suretiyle birbirinden ayrılmaktadır. Bu işaretler, transepedans kazançları 10 MΩ olan ve 1 MHz bant genişlikli alçak geçiren filtre ile bağlantılı PD2 ve PD3 foto dedektörlerine gönderilmiştir. Her dedektör, sayısal bir osiloskopa bağlantılıdır ve osiloskopa gelen işaretlerin 2^{11} defa ortalamalarını almaktadır.

Düzenekte, düğüm noktasından yük asılmak suretiyle fiber gerilmekte ve boyca uzamaktadır. Bu durum dört farklı kütle için tekrarlanmış ve farklı gerginlik değerleri elde edilmiş (De Souza ve ark.1999).

DPMZ'nin Brillouin çıkışından gelen işaretin analiz edilmesiyle, gerilmenin olmadığı fiber kısmındaki Stokes kayması hesaplanabilmektedir. Hem Stokes hem de anti-Stokes bileşeni DPMZ'nin aynı çıkışından elde edilmekte ve aralarında yaklaşık olarak 22 GHz frekans farkı bulunmaktadır. Gerginlikle frekans kayma katsayısı (K_{ϵ}^V), Fabry-Perot yansıma ölçer kullanılarak hesaplamak mümkündür.

FP interferometresini ayarlamak suretiyle, gerilmenin olmadığı fiber bölgelerinde anti-Stokes Brillouin işaretinin maksimuma çıkartıldığında ve gerilmenin olduğu fiber bölgenin Brillouin işaretinin maksimuma çıkartıldığında, voltaj değişimleri yaklaşık olarak sabittir. Yapılan çalışmalarda bu değer 1 mV olarak ölçülmüş ve $\approx 9635 \mu\epsilon$ değerinde kablo üzerine gerilme uygulayıp, Fabry-Perot 30 GHz FSR değerine ayarlandıktan sonra, voltaj değeri $58\text{mv} \pm 1$ bulunmuştur. (De Souza ve ark.1999)

Dolayısıyla, bu değerlere göre Brillouin frekans kaymasının gerginlik katsayısı deneysel olarak $0,054\text{MHz}/\mu\epsilon$ olarak elde edilmiştir (De Souza ve ark.1999).

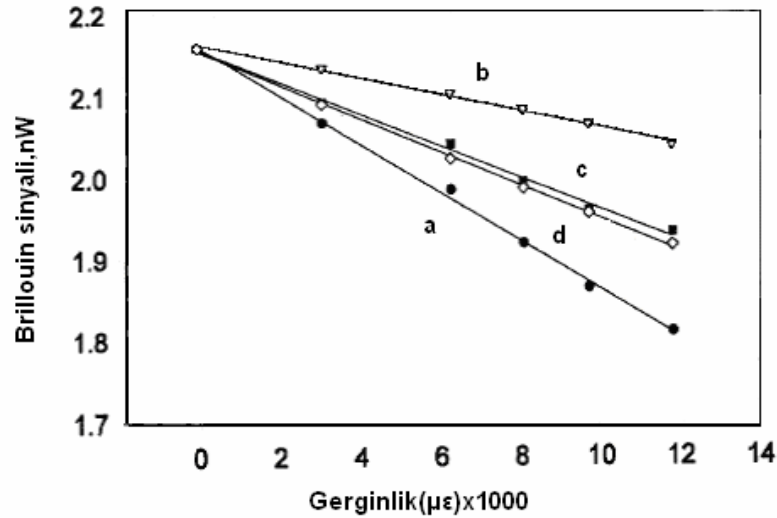
$$K_{\epsilon}^V = \frac{1[mV]}{58[mV]} \times \frac{30[HHz]}{9640[\mu\epsilon]} \approx 54\text{kHz} \pm 3 / \mu\epsilon \quad (3.21)$$

Şekil (3.1)'de verilmiş olan dağıtık gerginlik sensörü düzeneğinde; farklı yüklere karşılık gelen fiber kablo uzaması (mm cinsinden), gerginlik miktarı ve Brillouin frekans kayma miktarı Çizelge 3.1'de verilmektedir. Çizelge 3.1'deki değerler gerçek ölçüm değerleridir, ancak fibere direk olarak yükleme yapılmaktadır. Fiberin boyca uzama miktarlarındaki yükseklik bundan kaynaklanmaktadır. Buradan da görüldüğü gibi; gerginlik değişimi ile Brillouin frekans kayması arasında $54 \text{ kHz}/\mu\epsilon$ gibi bir oran vardır. Uygulanan yük miktarında artış olduğunda, fiberin boyunda uzama olmakta, gerginlik artmakta ve frekans kaymaktadır.

Çizelge 3.1 Kütle, uzama, gerginlik ve Brillouin frekans kayma miktarı.

Kütle (g) ± 0.1	Uzama (mm) ± 0.1	Gerginlik ($\mu\epsilon$) ± 10	Gerginlik sonucu oluşan Brillouin Frekans Kayması(MHz)
0	0	0	0
266	340	3090	167
582	690	6270	339
780	890	8090	437
979	1070	9730	525
1177	1300	11818	638

Kaynak: De Souza, Fiber optic distributed sensing based on spontaneous Brillouin scattering, Doktora Tezi, 1999.108p.

Şekil 3.2 (a) Farklı gerginliklerde elde edilmiş Brillouin işaretleri ¹

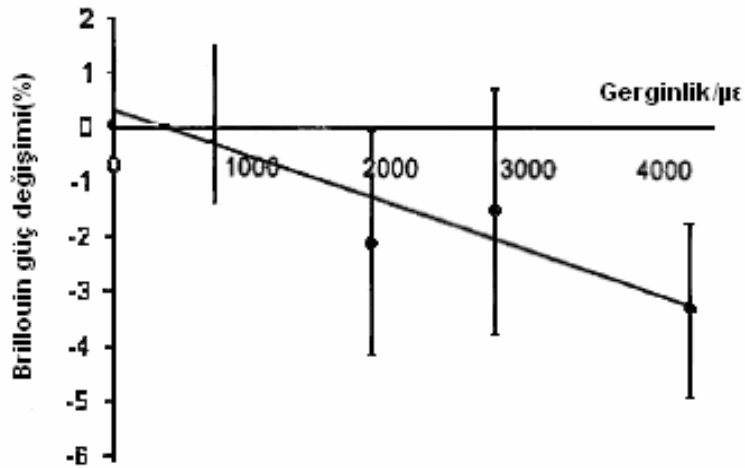
- (b) FSR ve Stokes anti-Stokes frekans ayrımı arasındaki uyumsuzluk nedeniyle oluşan farklı gerginlikler için Brillouin işaretleri
- (c) Sadece gerginliğe bağlı Brillouin işareti
- (d) Gerginliğe bağlı teorik Brillouin işareti.

¹ De Souza, Fibre-Optic Distributed Sensing Based on Spontaneous Brillouin Scattering, s.110.

Gerginlik değişimine bağlı olarak Rayleigh işaretinde herhangi bir değişim olmamasına karşılık, Şekil (3.2)'de de gürüldüğü üzere, artan gerginlikle birlikte Brillouin işaretinde düşme olmaktadır. Şekil 3.2'de farklı gerginliklere karşılık oluşan Brillouin işaret güçleri gösterilmiştir.

Sally M. Maughan ve ark. 1999'da, Brillouin işaretde gerginliğin etkisi ile oluşan yüzdesel değişimi, 1550 nm için, normalize edilmiş Brillouin işaretinin gradyeninden Şekil3.3'de verildiği gibi $(-9.1 \pm 1.9) \times 10^{-4} \% / \mu\epsilon$ olarak hesaplamışlardır.²

Benzer bir çalışmayı 1997 yılında Parker ve ark. 1320 nm için gerçekteştirmişler ve Brillouin gücün gerginliğe bağlı yüzdesel değişimini $(-7.7 \pm 1.4) \times 10^{-4} \% / \mu\epsilon$ olarak bulmuşlardır.

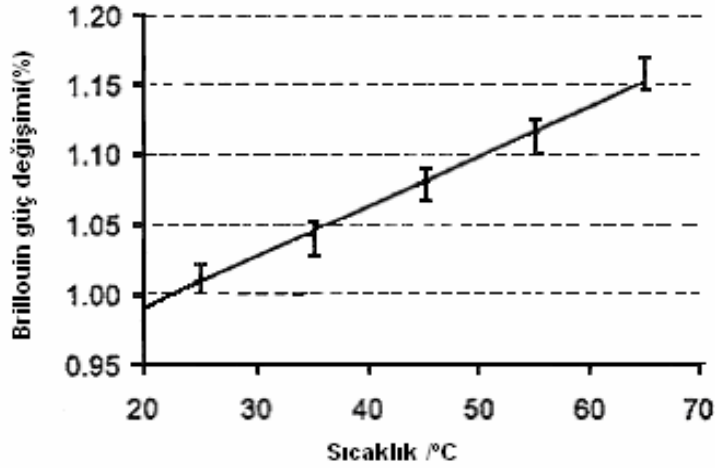


Şekil 3.3 Brillouin güç gerginlik katsayısı $(-9.1 \pm 1.9) \times 10^{-4} \% / \mu\epsilon$.

Şekil (3.4) ile, Brillouin gücün sıcaklığa bağlı olarak değişimi verilmektedir.³ Görüldüğü gibi, Brillouin güç ile sıcaklık lineer olarak artış göstermektedir.

² Sally M Maughan, Huai H Kee and Trevor P Newson. Simultaneous distributed fibre temperature and strain sensor using microwave coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter,2001.

³ Sally M Maughan, Huai H Kee and Trevor P Newson. Simultaneous distributed fibre temperature and strain sensor using microwave coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter,2001.



Şekil 3.4 Brillouin güç sıcaklık katsayısı (%0.36/°C).

3.8. Brillouin Frekans Kayması ile Sıcaklık /Gerginlik Değişimleri Arasındaki İlişki

Brillouin frekans kayması, hem sıcaklığa hem de gerginliğe duyarlıdır. Araştırmalar sonucunda ise, frekansın sıcaklık ve gerginlik ile lineer olarak değiştiği gösterilmiştir. Gerginlik nedeniyle oluşan frekans kayması ifadesi $v_B(\epsilon)$ ve sıcaklık nedeniyle oluşan frekans kayması ifadesi $v_B(T)$, aşağıda verilmiştir;

$$v_B(\epsilon) = v_B(0)[1 + K_\epsilon \epsilon] \quad (3.22)$$

$$v_B(T) = v_B(T_r)[1 + K_T(T - T_r)] \quad (3.23)$$

Burada; $v_B(0)$ = Sıfır gerginlikte Brillouin frekans kayması,

$v_B(T)$ = T sıcaklıkta Brillouin frekans kayması,

T = algılayıcı fiberin sıcaklığı,

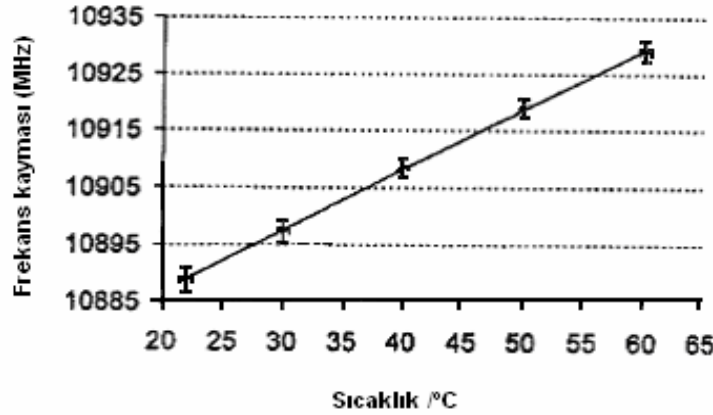
T_r = referans sıcaklık ve $K_{\epsilon, T}$ = literatürde verilen, sırasıyla gerginlik ($4.6\mu\epsilon$) ve sıcaklık ($9.4 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}$) katsayılarıdır.

Bölüm ikide bahsedildiği gibi; $v_a = \frac{2nv_a}{\lambda_p} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$ ifadesinden faydalanılarak,

Brillouin frekans kaymasını maksimum yapan $\theta = 180^\circ$ değeri ve $n = 1.46$
 $V_a = 5960 \text{ m/s}$ ve $\lambda_p = 1550 \text{ nm}$ için $V_a = 11.2 \text{ GHz}$ olarak bulunmuştur.

Maksimum Brillouin frekans kayması aynı şekilde 1320 nm. için 13.2 GHz olarak
 bulunmaktadır. $v_B(0) = v_B(T_r) = 11.2 \text{ GHz}$, $K_\varepsilon^V = K_\varepsilon \cdot x v_B(0)$ ve $K_T^V = K_T \cdot x v_B(T_r)$
 ifadelerinden, $K_\varepsilon^V = 52 \text{ kHz}/\mu\varepsilon$ bu değer bir önceki kısımda verilen ve De Souza ve
 arkadaşlarının ulaştığı deneysel sonuç olan $54 \text{ kHz}/\mu\varepsilon$ ile de benzerlik göstermektedir.

$K_T^V = K_T \cdot x v_B(T_r)$ ifadesini kullanarak $K_T^V = 1.05 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ olarak elde edilir. (Bknz.
 Şekil 3.5)

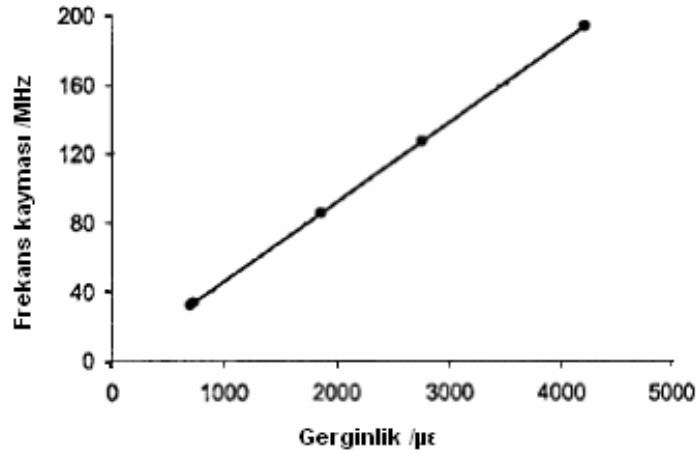


Şekil 3.5 Brillouin frekans kayması sıcaklık katsayısı ($1.07 \pm 0.06 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$).⁴

Brillouin frekans kaymasının gerginliğe bağlı olarak değişimine dair bir diğer çalışma
 da Southampton üniversitesinde yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda da Şekil 3.6'da
 gösterildiği gibi, toleranslar içerisinde aynı değerde Brillouin frekansı gerginlik
 katsayısı elde edilmiştir.⁵

⁴ K.De Souza, T.P. Newson, A double-pass configured Mach-Zehnder interferometric optical filter for distributed sensing, Electronics letters, 1997, s.2150.

⁵ M.Alahbabi, Distributed optical fibre sensors based on the coherent detection of spontaneous Brillouin scattering, 2005.



Şekil 3.6 Brillouin frekans kayması gerginlik katsayısı $0.048 \pm 0.004 \text{ MHz} (\mu\epsilon)^{-1}$.

3.9. Eş Zamanlı Sıcaklık ve Gerginlik Ölçümü Teknikleri

3.9.1. Giriş

Spontane Brillouin gücün, frekans bilgisi ile sıcaklık ve gerginliğe bağımlılığını kullanan lineer bir fiber boyunca sıcaklık ve gerginlik çözünürlüğünü ayrı ayrı elde etmek olası olsa bile; güç ölçümü uzun mesafeli algılama sistemlerinde performansı etkilemektedir. Bu nedenle, Brillouin güç ölçümünün kullanılmadığı alternatif ölçüm tekniklerine gereksinim duyulmaktadır.

Farklı algılama mesafelerinde eş zamanlı olarak sıcaklık ve gerginlik ölçümleri incelenerek yaygın olarak kullanılan Raman ve Brillouin esaslı teknik ile Brillouin frekans ve güç esaslı teknik arasında mukayese yolu ile algılama performansı açısından hangi tekniğin üstün olduğu sonucuna ulaşmak mümkün olabilmektedir.

3.9.2. Spontane Brillouin Frekans ve Güç Esaslı Teknik

3.9.2.1. Giriş

Spontane Brillouin frekans kayması ve güç değişimini esas alan teknik, spontane olarak Brillouin frekans ölçümleri ile Brillouin güç ölçümlerinin sıcaklık ve gerginlik bilgisine ulaşabilmek için eş zamanlı olarak kullanıldığı bir ölçüm tekniğidir. Bu teknikte, sıcaklık ve gerginlik gibi parametrelerin ölçümü için frekans ve güç değerlerinden yola çıkılarak, kablo boyunca sıcaklık ve gerginlik profilleri elde edilmektedir.

3.9.2.2. Spontane Brillouin Frekans ve Güç Esaslı Teknik Prensibi

Brillouin tepelerin sayısı ve frekans kayma miktarları, fiber kırılma indisine, fiberin yapısına ve dopant malzemelerine bağlı olarak değişmektedir. Standart tek modlu fiberlerde, Brillouin saçılması 11 GHz'de bir adet ana spektral tepesi göstermektedir. Standart SMF'de, kırılma indis profili, fiberin kılıfı ve nüve boyunca üniformdur. Bu yüzden, sadece 11 GHz'de bir Brillouin tepesi gözlenmektedir

(M.Alahbabi ve ark. 2005). Mutlak Brillouin tepe frekansının ve Brillouin güç değişiminin eş zamanlı olarak ölçümünü yaparak, fiber boyunca sıcaklık ve gerginlik profilleri (3.24) ve (3.25) denklemlerini kullanarak elde edilebilir.

$$\Delta T = \frac{K_{\epsilon}^V \Delta P - K_{\epsilon}^P \Delta v}{K_{\epsilon}^V K_T^P - K_{\epsilon}^P K_T^V} \quad (3.24)$$

$$\Delta \epsilon = \frac{K_T^P \Delta v - K_T^V \Delta P}{K_{\epsilon}^V K_T^P - K_{\epsilon}^P K_T^V} \quad (3.25)$$

Brillouin frekans ve Brillouin gücün sıcaklık ve gerginlik ile lineer olarak değişmesi sebebiyle, Brillouin frekans kayması ve Brillouin güç değişimi aşağıdaki eşitliklerle ifade edilmektedir:

$$\Delta v = K_{\epsilon}^V \Delta \epsilon + K_T^V \Delta T \quad (3.26)$$

$$\Delta P = K_{\epsilon}^P \Delta \epsilon + K_T^P \Delta T \quad (3.27)$$

Sıcaklık ve gerginlik ölçümleri ile ilgili hata miktarları ise (3.28) ve (3.29) eşitlikleri elde edilebilir. Eşitliklerde verilen Brillouin frekans ve Brillouin gücün sıcaklık ve gerginlik katsayıları Çizelge (3.2)'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Tek modlu fiberlerde gerginlik ve sıcaklık katsayıları.

Katsayılar	Karşılık gelen değerler
K_T^V	$1.07 \pm 0.06 \text{ MHz } /(^{\circ}\text{C})$
K_{ϵ}^V	$0.048 \pm 0.004 \text{ MHz } (\mu\epsilon)^{-1}$
K_T^P	$0.36 \pm 0.003 \text{ \% } /(^{\circ}\text{C})$
K_{ϵ}^P	$-9 \times 10^{-4} \pm 1 \times 10^{-5} \text{ \% } (\mu\epsilon)^{-1}$

Bu katsayılar, simülasyonlarda kullanılmıştır. Brillouin frekans kayması $\Delta\nu$ ve Brillouin güç değişimi ΔP , Brillouin frekans kayması ve güç katsayılarını ve sıcaklık ve gerginlik profilleri (3.24) ve (3.25) eşitlikleri ile hesaplanabilir. Brillouin frekans ve güç RMS hataları ($\delta\nu$ ve δP) kullanılarak, sıcaklık ve gerginlik çözünürlüklerini aşağıdaki eşitlikler ile hesaplamak mümkündür.

Sıcaklık ve gerginlik çözünürlükleri sırasıyla;

$$\delta T = \frac{|K_\varepsilon^P \delta\nu| + |K_\varepsilon^V \delta P|}{|K_\varepsilon^V K_T^P - K_\varepsilon^P K_T^V|} \quad (3.28)$$

$$\delta\varepsilon = \frac{|K_T^P \delta\nu| + |K_T^V \delta P|}{|K_\varepsilon^V K_T^P - K_\varepsilon^P K_T^V|} \quad (3.29)$$

Bu değerler, farklı ölçüm tekniklerini kullanarak elde edilen sıcaklık /gerginlik çözünürlükleri ile karşılaştırılabilir. Bu şekilde, hangi tekniğin daha kullanılabilir ve güvenilir olduğu anlaşılabilen yada algılama sisteminin performansları açısından bir değerlendirme yapmak mümkün olabilmektedir.

Brillouin gücün gerginliğe bağımlılığı (gerginlikle değişimi) nispeten zayıftır. Yaklaşık olarak 1 °C sıcaklık değişimi veya 400 $\mu\varepsilon$ gerginlik değişimi aynı miktarda Brillouin güçte değişime neden olurken yine aynı yaklaşıklıkla 1 °C veya 20 $\mu\varepsilon$ aynı miktarda Brillouin frekans kaymasına neden olmaktadır.

Brillouin güç hatasının sıcaklık ve gerginlik çözünürlükleri üzerindeki etkisi, elde edilmiş olan frekans ve güç hatalarını kullanmak suretiyle görülebilmektedir. Yani, güç hatasının (δP) belli bir oranda değişiminin, sıcaklık ve gerginlik hataları üzerindeki etkisini hesaplamak mümkün olabilmektedir.

3.9.3. Brillouin Çoklu-Frekans Tepeleri Esaslı Teknik

3.9.3.1. Giriş

Sıcaklık ve gerginlik hatalarının esas olarak, Brillouin güç çizgileri üzerindeki gürültü sebebi olarak yükseldiği sonucuna varılmıştı. Bu yüzden, Brillouin güç ölçümünün gerek duyulmadığı ve ilk olarak Lee tarafından bir çözüm önerilmiştir. Bu çözümde, Geniş Etki Alanlı Fiber'de (LEAF) Brillouin frekans kayması kullanılmıştır. Bu tür fiber, 1550 nm dalga boyunda pozitif dispersiyona (≈ 4.3 ps/nm.km) ve çoğul kompozisyonlu fiber nüvesine sahiptir. Bu sebeple, çoklu Brillouin tepeleri meydana gelmektedir.

3.9.3.2. Brillouin Çoklu-Frekans Tepeleri Esaslı Teknik Prensipleri

Silika fiberin Brillouin spektrumu, fiber çekirdeğin katkı malzemesine ve yapısına bağlıdır. Bu yüzden, tek modlu fiberlerde sadece bir tepe gözlemlenmektedir. Buna karşılık Geniş Etki Alanlı Fiber'de (LEAF), çoğul tepeler gözlemlenmektedir. Bu tepeler, esas olarak çekirdeğin kırılma indis profiline ve fiberin diğer faktörlerine bağlı olarak değişmektedir.

İki tepe, çekirdek profilleri için kırılma indisinde merkezci bir eğime sahiptir. Ancak tepelerin merkezi frekansları, (P^1 ve P^2), oda sıcaklığında ≈ 10.97 ve ≈ 11.4 GHz olarak hesaplanmıştır (Lee ve ark. 2002). Buna karşılık, ≈ 11.24 GHz'deki üçüncü tepe nispeten daha küçük olduğundan ihmal edilmektedir.

Lee ve grubu 2002 yılında, Brillouin 1. ve 2. tepelerin frekans kaymasına olan bağımlılıklarının dikkate değer biçimde sıcaklık için farklı olduğunu, ancak gerginlik için benzer olduğunu ispat etmişlerdir.

Brillouin frekans kayması ve güç değişim matris denklemini kullanarak ve güç değişimini, LEAF 2'nin frekans kaymasının yerine koyarak, 1.tepenin ve 2. tepenin

Brillouin frekans kayma miktarları (Δv^{P1} ve Δv^{P2}), sıcaklık(ΔT) ve gerginliğe($\Delta \mathcal{E}$) bağlı olarak aşağıdaki gibi elde edilmektedir:

$$\Delta v^{Pi} = K_{vT}^{Pi} \Delta T + K_{v\mathcal{E}}^{Pi} \Delta \mathcal{E} \quad (3.30)$$

Eşitlikte, $i = 1$ ve 2 , K_{vT}^{Pi} ve $K_{v\mathcal{E}}^{Pi}$ ise i.tepenin sırasıyla sıcaklık ve gerginlikle ilgili olarak frekansındaki değişim miktarlarıdır. LEAF tepeleri P^1 ve P^2 için gerginlik katsayıları eşit olduğu için, sıcaklık ve gerginlikteki değişim miktarları aşağıdaki eşitliklerle de ifade edilebilir.

$$\Delta T = \frac{\Delta v^{P1} - \Delta v^{P2}}{K_{vT}^{P1} - K_{vT}^{P2}} \quad (3.31)$$

$$\Delta \mathcal{E} = \frac{\Delta v^{P2} K_{vT}^{P1} - \Delta v^{P1} K_{vT}^{P2}}{K_{vT}^{P1} K_{v\mathcal{E}}^{P1} - K_{vT}^{P2} K_{v\mathcal{E}}^{P1}} \quad (3.32)$$

Brillouin tepeleri (her iki tepe için) frekansları RMS hatasını hesaplayarak, sıcaklık ve gerginlikten elde edilmiş hata aşağıdaki eşitlikler kullanılarak elde edilebilir.

$$\delta T = \frac{|K_{v\mathcal{E}}^{P2}| \delta v^{P1} + |K_{v\mathcal{E}}^{P1}| \delta v^{P2}}{|K_{vT}^{P2} K_{v\mathcal{E}}^{P1} - K_{v\mathcal{E}}^{P2} K_{vT}^{P1}|} \quad (3.33)$$

$$\delta \mathcal{E} = \frac{|K_{vT}^{P2}| \delta v^{P1} + |K_{vT}^{P1}| \delta v^{P2}}{|K_{vT}^{P2} K_{v\mathcal{E}}^{P1} - K_{v\mathcal{E}}^{P2} K_{vT}^{P1}|} \quad (3.34)$$

Burada, δv^{P1} ve δv^{P2} , sırasıyla 1. ve 2. tepelere ait Brillouin frekans kayması üzerindeki RMS hatası (veya gürültüsü)dür. LEAF, tek modlu NZ-DSF fiber karakteristiğine sahiptir. (NZ-DSF fiber: 1550 nm penceresi yakınında sıfır dispersiyon

dalga boyuna sahip dispersiyon kaymalı tek modlu fiber anlamına gelir) ve aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- ≈ 0.199 dB/km değerinde fiber kaybı,
- $\approx 72 \mu m^2$ değerinde efektif alan,
- 1550 nm'de 4.3 ps/nm.km değerinde dispersiyon.

Sıcaklık ve gerginliğin farklı kombinasyonlarını LEAF fibere uygulamak ve her iki tepeye ait Brillouin frekans kaymalarını ölçmek suretiyle, sıcaklık ve gerginlik katsayıları Çizelge 3.3'de verildiği gibi elde edilmiştir (Lee ve ark.).

Lee ve grubu yapmış oldukları deney düzeneğinde, LEAF fiberi 60 °C'ye kadar ısıtmış ve fibere 1500 değerinde de gerginlik uygulamışlardır. Çift Lorentz eğrisini verilere uygulamak suretiyle her noktada Brillouin spektrumunu elde etmişlerdir.

Çizelge 3.3 Sıcaklık ve gerginlik katsayıları.

Ölçüm Parametresi	Birinci Tepe (i=1)	İkinci Tepe (i=2)
$K_{vT}^{P_i}$ MHz (°C) ⁻¹	1.03 ± 0.081	1.19 ± 0.083
$K_{v\epsilon}^{P_i}$ MHz (με) ⁻¹	0.051 ± 0.001	0.050 ± 0.002

P^1 ve P^2 tepelerine ait Brillouin frekans kaymalarını kullanarak, sıcaklık ve gerginlik aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmaktadır:

$$\Delta T = \frac{\Delta v^{P1} - \Delta v^{P2}}{K_{vT}^{P1} - K_{vT}^{P2}} \quad (3.35)$$

$$\Delta \epsilon = \frac{\Delta v^{P2} K_{vT}^{P1} - \Delta v^{P1} K_{vT}^{P2}}{K_{vT}^{P1} K_{v\epsilon}^{P1} - K_{vT}^{P2} K_{v\epsilon}^{P1}} \quad (3.36)$$

Sıcaklık ve gerginlik çözünürlükleri arasında aşağıdaki eşitliklerle verildiği gibi bir ilişki bulunmaktadır:

$$\delta T = \frac{\left| K_{v\varepsilon}^{P2} \right| \delta v^{P1} + \left| K_{v\varepsilon}^{P1} \right| \delta v^{P2}}{\left| K_{vT}^{P2} K_{v\varepsilon}^{P1} - K_{v\varepsilon}^{P2} K_{vT}^{P1} \right|} \quad (3.37)$$

$$\delta \varepsilon = \frac{\left| K_{vT}^{P2} \right| \delta v^{P1} + \left| K_{vT}^{P1} \right| \delta v^{P2}}{\left| K_{vT}^{P2} K_{v\varepsilon}^{P1} - K_{v\varepsilon}^{P2} K_{vT}^{P1} \right|} \quad (3.38)$$

Sıcaklık ve gerginliklerin ölçümü için LEAF (iki frekans tepesi) tepelerini kullanan teknikte, tek modlu fiberlerde tekil frekans tepesine ait frekans ve güç analizine kıyasla farklı olan nokta, yüksek hata değerleridir. CBS metodunda, tepe frekansını tespitini birkaç MHz'den daha düşük çözünürlükte elde ederken, bu yeni teknik ile frekans ölçüm çözünürlüğünde daha zorlayıcı sebeplerle karşılaşılmaktadır.

Sıcaklık bilgisinin çıkarıldığı diferansiyel frekans değişimi tek modlu fiberde, $\approx 1\text{MHz}/^\circ\text{C}$ yerine $\approx 190\text{kHz}/^\circ\text{C}$ olmaktadır. 1°C değerden daha iyi bir sıcaklık çözünürlüğü, yaklaşık olarak $\approx 135\text{kHz}$ 'lik (veya $190/\sqrt{2}$) çözünürlük elde edecek özel frekans değerine gerek duyacaktır.

Spontane Brillouin hat genişliği yaklaşık olarak 35 MHz'dir ve gürültünün varlığı, frekans çözünürlük ölçümünü sınırlamaktadır. Bazı araştırmacılarca, sıcaklık ve gerginlik parametrelerindeki hatanın 2. tepe ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Buna gerekçe olarak ise, 2. tepenin büyüklüğünün 1. tepeye göre % 40 daha küçük olması gösterilmektedir.

Araştırmalardan elde edilen sonuçlar doğrultusunda diferansiyel frekansı istenen doğrulukta ölçmek çok zor olmaktadır. Brillouin frekans ve güç tekniğinin önemi bu noktada ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, Raman güç ve Brillouin frekans kaymasını esas alan teknik üzerine araştırmalara hız verilmiştir.

3.9.4. Spontane Raman ve Brillouin Saçılması Esaslı Teknik

3.9.4.1. Giriş

Bu teknik ile sıcaklık ve gerginlik eş zamanlı olarak ölçülebilmektedir. Önceki tekniklerden farkı, Brillouin güç ölçümüne gereksinim duyulmamasıdır. Burada esas olan, spontane Raman güç ve Brillouin frekans kayması değişimlerinden faydalanılarak öncelikle sıcaklık bilgisine ulaşmak ardında da gerginlik profilini çıkartmaktır. Öncelikle ikinci bölümde değinildiği gibi Raman işaretinden kablo boyunca sıcaklık bilgisine ulaşılır. Daha sonra da, sıcaklık bilgisi ve Brillouin frekans kayması bilgisi ile gerginlik değişimlerine ulaşılmaktadır.

3.9.4.2. Birleştirilmiş Raman ve Brillouin Saçılması Esaslı Teknik Prensipleri

Bu teknikte kullanılan prensip, optik zaman domenli reflektometresi (OTDR) tekniğine dayanmaktadır. 1550 nm dalga boyunda işaret üreten tek darbeleri ışık kaynağı kullanılarak, Brillouin anti-Stokes frekans kayması ve Raman anti-Stokes gücü 1450 nm de uzamsal olarak çözümlenmektedir. Raman işareti sıcaklığa duyarlı olmasına rağmen gerginliğe duyarlı değildir. Bu yüzden, Raman dağınık sıcaklık algılayıcıları esasında olduğu gibi, Raman işaretinden, kablo boyunca sıcaklık bilgisine ulaşılabilir. Fiberin sıcaklık bilgisiyle ve Brillouin frekans kayma bilgisi ile fiber boyunca gerginlik bilgisi hesaplanabilir. Anti-Stokes Raman işaret gücünün sıcaklığa duyarlılığı yüksektir ($\%0.80/^\circ\text{C}$)⁶. Brillouin anti-Stokes işareti için bu değer $\% 0.36/^\circ\text{C}$ idi.

Sıcaklık değişimlerini tam doğrulukta kestirmek için, Raman işareti, aynı uzamsal çözünürlükte ölçülmüş sıcaklıktan bağımsız bir işarete göre, referans olarak alınmalıdır. Ticari Raman esaslı dağınık sıcaklık sensörlerinde, Raman kaydırmalı dalga boyunda Rayleigh işareti oluşturabilmek için genellikle ikinci bir kaynak kullanılmaktadır.

⁶ A.H. Hartog, A.P.Leach, and M.P.Gold, Distributed temperature sensing in solid-core fibers, Electronics Letters, vol.21, no.23, p.1061, 1995.

Raman güç değişimlerini kullanarak, fiber boyunca sıcaklık profilleri, Eşitlik (3.39) ile elde edilmektedir:

$$\Delta T_R(L) = \frac{\Delta P_R(L)}{K_{RT}^P} \quad (3.39)$$

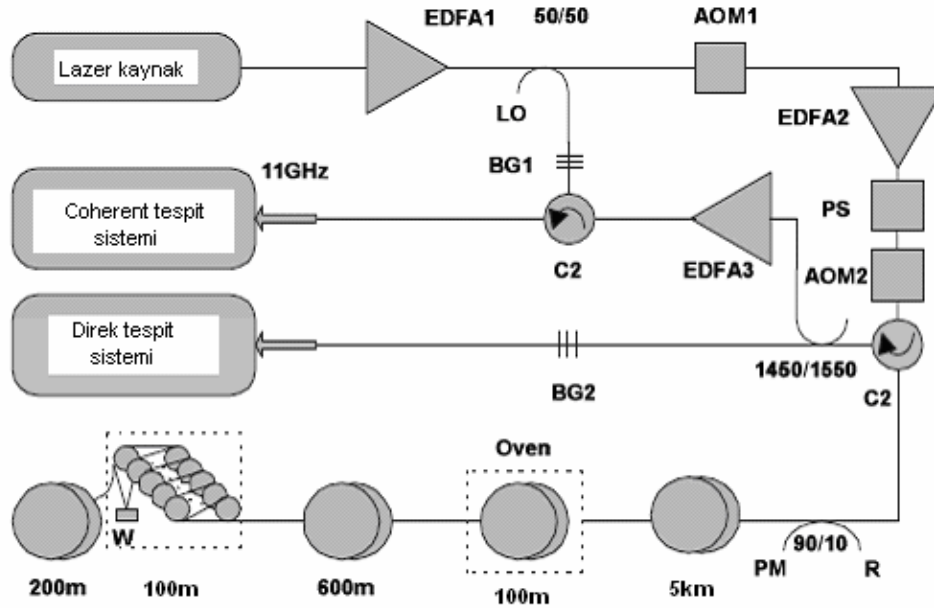
Burada L fiberin boyu, $\Delta P_R(L)$ normalize edilmiş Raman gücü, K_{RT}^P Raman gücü sıcaklık katsayısı ($\%0.80/^\circ C$)'dır. Brillouin frekans kayması hem sıcaklığa hem de gerginliğe duyarlıdır. Bu yüzden, Brillouin frekans kaymasını ölçmek ve Raman işaretinden elde edilen sıcaklık bilgisini de kullanmak suretiyle fiber boyunca gerginlik bilgisine ulaşılabilir. Fiber boyunca gerginlik bilgisi aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir:

$$\Delta \varepsilon(L) = \frac{\Delta v_B(L) - K_T^V \Delta T_R(L)}{K_\varepsilon^V} \quad (3.40)$$

Burada; $\Delta v_B(L)$ oda sıcaklığı ve sıfır gerginlik referans alınarak fiber boyunca elde edilmiş Brillouin frekans kayması, K_T^V ve K_ε^V Brillouin frekans kayması için sırasıyla sıcaklık ve gerginlik katsayılarıdır. Bu katsayılar önceki bölümlerde verildiği gibi literatürde, tek modlu fiberler için; sıcaklık için $1.07 \text{ MHz}/^\circ C$ ve gerginlik için $0.05 \text{ MHz}/\mu\varepsilon$ olarak alınmaktadır.

Spontane Brillouin ve Raman saçılma kullanılarak eş zamanlı sıcaklık ve gerginlik ölçümü için kullanılan devre düzeneği Şekil 3.7'de gösterilmektedir. Devre düzeneğinde, iki farklı tespit sistemi görülmektedir. "Direk tespit sistemi", Raman anti-Stokes gücü uzamsal olarak özümlemek için, "Koherent tespit sistemi" ise Brillouin frekans kayması değerlerini uzamsal olarak elde etmek için kullanılmıştır. Raman işaretin direk frekans tepesi ölçümünde, anti-Stokes Raman işaretinden 1533 nm 'de Rayleigh işaretini filtrelemek için bir $1550/1450 \text{ WDM}$ kullanılmıştır (M.Alahbabi ve ark. 2005).

Rayleigh ışareti Raman ışaretinden ~ 30 dB daha büyük bir ışaret olduğundan, dedektörden önce yansıtıcılığı % 99, $\Delta\lambda_g = 1nm$ ve $\lambda_g = 1550nm$ olan bir fiber Bragg grating (BG2) yerleştirilmiştir. Bragg grating burada, geri saçılmış Rayleigh ışığın filtrenmesi için kullanılmaktadır. Öncelikle, gücü 1 Watt olan prob ışareti kullanılarak fiber boyunca Raman gücü ölçülmekte ve ardından da Raman anti-Stokes ışaretin 2^{15} defa ortalaması alınarak ışaret normalize edilmektedir.



Şekil 3.7 Spontane Raman gücü ve Brillouin frekans kaymasını ölçmek için tasarlanmış devre düzeneği.

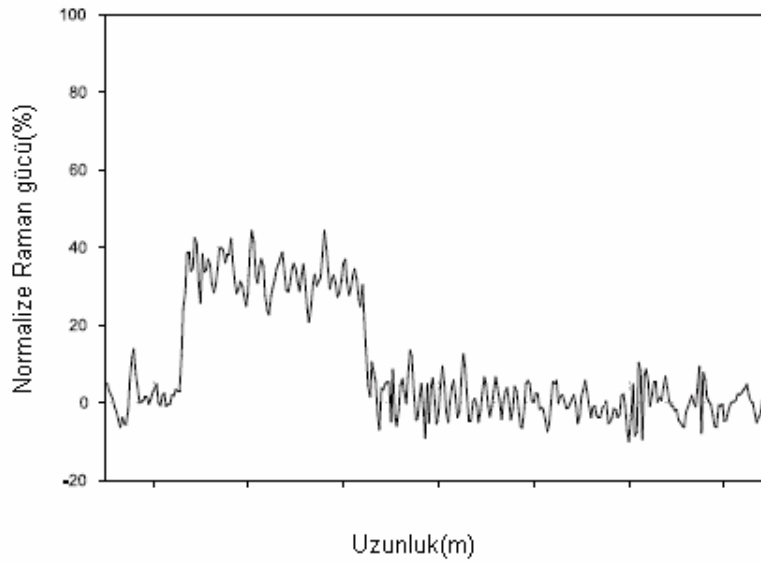
Kaynak: Alahbabi M. Distributed optical fiber sensors beased on the coherent detection of spontaneous Brillouin scattering, Doktora Tezi, 2005.

Brillouin ışareti üzerinde oluşabilecek lineer olmayan etkilere maruz kalmamak için, uygun güçte prob (~ 80 mW) kullanılarak sıcaklık ve gerginliğin eş zamanlı olarak neden olduğu Brillouin frekans kayması ölçülebilmektedir (Alahbabi ve ark.2005).

Normalize edilmiş Raman çizgilerinden elde edilen Raman güç değişimini ve Raman anti-Stokes sıcaklık katsayısını % $0.80/^\circ C$ kullanarak, yukarıda verilmiş olan

$\Delta T_R(L)$ ifadesinden sıcaklık profiline ulaşmak mümkün olmaktadır. Raman anti-Stokes normalize edilmiş güç değişimi Şekil 3.8’de örnek bir gösterim olarak verilmektedir.

Daha sonra, Brillouin frekans kayma miktarı, sıcaklık değişimi, Brillouin frekans kayma sıcaklık katsayısı ve Brillouin frekans kayma gerginlik katsayıları $\Delta \varepsilon(L)$ eşitliğinde yerine konmak suretiyle kablo boyunca gerginlik profiline ulaşılabilir.



Şekil 3.8 Raman anti-Stokes normalize edilmiş güç değişimi örnek değerlendirme.

Çizelge 3.4 Sıcaklık ve gerginlik çözünürlükleri açısından üç tekniğin karşılaştırılması.

Ölçüm Parametresi	Brillouin Frekans&Güç Ölçümleri Tekniği	LEAF 1.&2. Tepelerin Esas Alındığı Teknik	Spontane Raman&Brillouin Tekniği
Sıcaklık Çözünürlüğü (°C)	4	29	6
Gerginlik Çözünürlüğü ($\mu\varepsilon$)	120	630	150

Ticari Raman dağınık sıcaklık algılama sistemlerinde uzun mesafelerde (>30km) 1 °C sıcaklık çözünürlüğe ulaşılabilir. Ancak hem sıcaklığı hem de gerginliği eş zamanlı olarak ölçmek istiyorsak, bu durumda yukarıdaki tablodan da görüleceği gibi en iyi metot, Brillouin frekans ve güç değişimlerini esas alan metottur (Alahbabi ve ark.2005).

3.10. Spontane Brillouin Bazlı Algılayıcıların Performansını Sınırlayan Faktörler

3.10.1. Giriş

Optik fiberlerin ve Brillouin saçılmasının doğası sebebi ile, spontane Brillouin bazlı algılayıcılar (sensörler); Brillouin işaret zayıflaması, fiber kayıplar ve lineer olmayan etkiler ve gürültü gibi bazı temel sınırlayıcılara maruz kalmaktadırlar. Bir Brillouin işareti bilindiği gibi zayıf bir işarettir ve fiberin çift geçirme kayıp işareti, uzun mesafeli algılamalarda bu işareti daha fazla zayıflatmaktadır. Bu yüzden, gürültü majör sınırlayıcı bir faktördür.

Geri saçılmış olan işareti kuvvetlendirmek için, fiber içerisine yüksek güçte bir işaretin gönderilmesi gerekmektedir. Yine de, gücün lineer olmaması gücün sınırlanmasına neden olmaktadır.

3.10.2. Gürültü ve Fiber Kayıpları

Gürültü, alınan işareti maskeleyen ve istenmeyen bir bozukluktur, bu sebeple algılama sisteminin performansını düşürmektedir. Spontane Brillouin saçılması esasına dayanan dağınık optik fiber algılayıcılarda, gürültü kaynağı, elektriksel ve optik gürültünün bir birleşimidir. Termal gürültü (ısı ile oluşan gürültü), darbe gürültüsü ve kuantum gürültü, elektriksel gürültü formlarıdır ve genel olarak sensör tespit sistemlerinde ortaya çıkmaktadır. Genellikle; elektriksel gürültü miktarı, işaretin ortalamasının alınması ile azaltılabilir. Optik gürültü kaynakları; Koherent Rayleigh Gürültüsü (CRN), Kutuplanma Gürültüsü, Rasgele Relatif Güç Gürültüsü (RIN) ve Kuvvetlendirilmiş Spontane Emisyon (ASE) Gürültüsü olarak

sınıflandırılmaktadır. RIN gürültüsü dışında; diğer optik gürültüler işaretin ortalamasını almak sureti ile azaltılamazlar. ASE gürültü, algılama sisteminde optik kuvvetlendiricilerin kullanılması durumunda oluşmaktadır.

Koherent Rayleigh gürültü, Rayleigh geriye saçılmış işaret gücüne ait çizgilerdeki dalgalanmalar olarak kendini gösterir. Gürültünün ana kaynağı olup dar hat genişliğine sahip bir kaynak kullanıldığında oluşur. Bu gürültünün varlığı, Brillouin gücünü normalize edilmesi sırasında ve/veya LPR işlemi boyunca Brillouin işareti üzerinde geniş bantlı Rayleigh işaretinin neden olduğu lineer olmayan bir bozunma, diğer bir ifade ile elektronik kirlilik etkisi oluşturduğundan, sıcaklık /gerginlik gibi parametrelerin çözünürlüğünü azaltmaktadır.

Yaygın olarak kullanılan işaret ortalama alma teknikleri, CRN'yi azaltmak maksadı ile efektif olarak kullanılamazlar. Yinede; geniş bantlı bir darbe kaynağı kullanımı, yada farklı frekanslarda çok sayıda ortalama alarak, gürültü önemli ölçüde minimize edilebilmektedir. Bu tekniğe Frekans Kaydırmalı Ortalama (FSAV) tekniği adı verilmektedir.

Polarizasyon gürültüsü, başka bir deyişle, sistemi oluşturan bileşenlerin kutuplanmaya bağımlı kayıpları olması durumunda, Brillouin güç çizgilerinde dalgalanmalar olarak ortaya çıkar. Bu gürültü Koherent Tespit metodunda ortaya çıkmaktadır. Çünkü, standart tek modlu fiber düşük çift-kırılıma sahiptir. Sonuç olarak, Brillouin işaretin ve bu tip gürültüye neden olan lokal osilatörün kutuplanma durumunda diferansiyel değişiklikler mevcuttur.

Polarizasyon gürültüsünün CD esaslı sensörlerde ölçüm doğruluğu açısından önemli bir etkisi mevcuttur. Ve bu etki basit işaret ortalamasını alma işlemi ile azaltılamaz. Yine de; gürültü, ışığın kutuplanma durumunun rasgele seçilmesi (prob ve referans kaynakların ya her ikisinde birden yada herhangi birinde) ile önemli ölçüde azaltılabilmektedir. FSAV tekniğini kullanılarak, ayrıca gürültüyü azaltmakta mümkün olmaktadır. RIN gürültüsü, yarı iletken enjeksiyon lazerlerinin çıkış gücündeki rasgele

dalgalanmalar olarak ortaya çıkmaktadır. Bu tür dalgalanmalar, optik güç gürültüsüne dönüşmektedir.

CD esaslı bir sensörde, RIN gürültüsünün, geri saçılan ışık seviyesine kıyasla yüksek güce sahip oluşu nedeniyle çoğunlukla optik Lokal Osilatörden yayıldığı zannedilmektedir. ASE gürültüsü ise, EDFA (erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiriciler) veya Raman kuvvetlendiricilerin kullanıldığı algılama sistemlerinde ortaya çıkmaktadır.

Brillouin esaslı sensörler için çok dar hat genişlikli işaret kaynakları gerekliliği gerçeğinden hareketle, EDFA'lerin gerekliliği birkaç ~ mW veya daha küçük çıkış gücüne sahip olmalarıdır. Raman kuvvetlendiriciler uzun mesafeli DOFS'lerde zayıf geriye saçılmış işaretlerin kuvvetlendirilmesi maksadı ile kullanılabilir.

Bilindiği gibi, EDFA'nın ve Raman ASE'nin bant genişlikleri sırasıyla ~ 50 nm ve ≈ 100 nm'dir. Yüksek bant genişlikli işaretler, sinyal karıştırma işlemleri boyunca darbe frekansında gürültü işaretleri yaratmak suretiyle, Brillouin işaretini bozmaktadır. Bu karıştırma prosesleri; ASE (ASE-ASE) darbeleri, lokal osilatör ile (ASE-LO) ve prob ve Rayleigh işaretleriyle (ASE-İşaret) isimleri ile adlandırılırlar. Genel olarak, ASE-ASE de olduğu gibi ASE gürültü bileşenleri, Bragg ızgaraları (Bragg grating) dar bantlı optik filtreler kullanılarak azaltılabilmektedir. ASE-prob darbe gürültüsü ise, dar bantlı filtreleme yöntemi ile azaltılamamaktadır.

Toplam ölçüm süresi, tekil Brillouin çizgilerini toplamak veya işlemek için harcanan süreye ve gerekli SNR oranını yakalamak için ortalama sayısı ile çarpma süreçlerine bağlı olarak değişir. Bilindiği üzere, veri ortalaması alma süresi ile sensör performansı arasında, tamamıyla algılama uygulaması tipine bağlı olarak değişen bir ilişki bulunmaktadır. Yinede, yüksek tekrarlama hızı ve hızlı veri edinme sistemleri ölçme süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır. Hem iletim hem de fiber sensörün alıcı ucunda, optik kuvvetlendirimin gerekliliği nedeniyle, düşük kayıplı pencere kullanılmasını sağlama maksadıyla, seçilmiş olan dalga boyu üçüncü pencereye (1550 nm penceresi) uygun olacak biçimde optimize edilmektedir. Ancak, 1550 nm dalga boyunda çalışırken bile yaklaşık 0,40 dB/km seviyesinde fiber kayıpları kaçınılmazdır.

Örneğin, 100 km uzunluğunda algılayıcı fiber için, Brillouin işareti 40 dB seviyesine azaltılmaktadır. Bu nedenle fiber kayıpları, algılama mesafesini etkileyen önemli bir faktördür.

3.10.3. Lineer Olmayan Etkiler

Bir BOTDR esaslı dağılık fiber algılayıcıda, geri saçılan işaret, algılayıcı fiber içerisindeki darbe enerjisi ile orantılıdır. Darbe enerjisi, darbe genişliğine ve tepe gücü değerine bağlı olarak değişmektedir. Yinede, istenen uzamsal çözünürlük darbe genişliğini sınırlamaktadır. Yüksek tepe güçlü kaynakların varlığına (elde edilebilirliklerine) rağmen, fiber içerisine uygulanan maksimum tepe gücü, lineer olmayan etkilerden kaçınma gereksinimi ile sınırlandırılmaktadır.

Güç eşik değerinin üzerine çıktığında; lineer olmayan etkiler, ya direk olarak yada pompa azaltma ve/veya prob spektral genişletmede meydana gelen değişmeler ile geri saçılmış işaret çizgilerinin biçimini bozmaktadır. Bu tür bozulmalar, ölçümlerde hatalara sebebiyet verir. Değerlendirilmesi gerekli asıl lineer olmayan etkiler; Zorlanmış Raman Saçılması (SRS), Zorlanmış Brillouin Saçılması (SBS), Özel-faz Modülasyonu (SPM), Dört Dalga Karıştırma (FWM) ve Modülasyon Kararsızlığı (MI) olarak sayılabilir.

3.10.4. Eş Evreli (Koherent) Rayleigh Gürültüsü

CRN gürültüsü, alıcı gürültüsü ile sınırlandırılmayan bir FODTS ait işaret/gürültü oranını azaltmaktadır. CRN bu yüzden, sensör hassasiyeti ve ulaşılabilir sıcaklık /gerginlik çözünürlüğü üzerinde ciddi bir sınırlama sağlamaktadır. Burada, CRN gürültüsünü ortadan kaldırmanın yolları incelenmektedir. CRN gürültü miktarını belirlemek için, frekans-kaymalı ortalama alma prosesi ile, bir fiberde geriye saçılmış Rayleigh işareti üzerindeki gürültüyü azaltma konusunda Horiguchi'nin gerçekleştirmiş olduğu bir analiz yöntemi kullanılmaktadır.

Bir FODTS’de RMS CRN (f_{CRN}) Rayleigh işaretinin bir parçası olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$f_{CRN} = \sqrt{\frac{v_g}{4\Delta z\Delta\nu}} \quad (3.41)$$

Denklemden, v_g fiber içerisinde ışığın grup hızı, Δz uzamsal çözünürlük ve $\Delta\nu$ ise kaynağın frekans-kaydırılmış bant genişliğidir. Burada uzamsal çözünürlük ikinci bölümde verildiği gibi yada eşitlik (3.42)’deki gibi ifade edilebilmektedir.

$$\Delta z = \frac{wv_g}{2} \quad (3.42)$$

Burada, w zamansal darbe genişliğidir.

Eşitlik (3.41)’de Rayleigh geri saçılmış ışın üzerindeki CRN gürültü yüzdesini veren denklem; grup hızı, uzamsal çözünürlük ve kaynağın bant genişliğinin ifadesi olarak çıkartılmıştır.

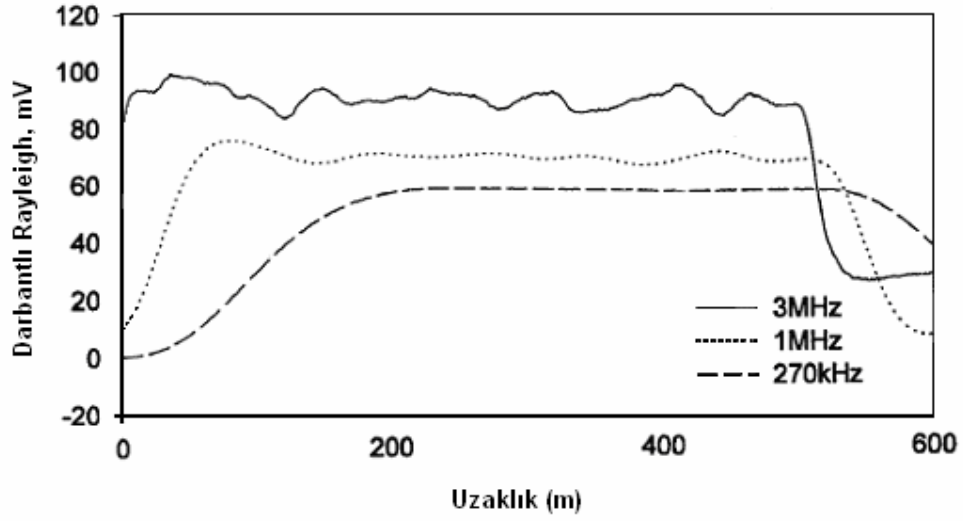
Koherent Rayleigh Gürültüsünün Analizi

Koherent Rayleigh gürültüsü (CRN), elektronik gürültü ile herhangi bir sınırlamaya maruz kalmamış bir FODTS’nin işaret-gürültü oranını sınırlamaktadır. Ancak, CRN bant genişliğinin bir fonksiyonu olarak incelendiğinde CRN gürültüsünde bant genişliğindeki artmaya bağlı olarak bir azalma gözlemlenmektedir. Ayrıca bu sonuçlar, teorik yaklaşımlarla deney sonuçları arasında uyum olduğunu göstermektedir.

Bunun yanı sıra, farklı lazer bant genişlikleri ve uzamsal çözünürlüğe sahip FODTS üzerinde de araştırmalar yapılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, kaynak bant genişliği ve/veya uzamsal çözünürlükteki yükselme ile CRN gürültüsünde bir azalma olmaktadır ve bu durum teorik kestirim ile özdeşleşmektedir.

Şekil (3.9)’da net gösterim için düşey olarak görüntülenmiş üç Rayleigh çizgisi gösterilmektedir. En üstten en alta kadar sırasıyla, 3 MHz, 1 MHz ve 270 kHz

demodülasyon bant genişliği verilmektedir. Çizimde, nokta demodülasyon bant genişliğini düşürerek CRN gürültüsünün azaltıldığı açık bir biçimde gözükmemektedir. 500 metreden daha uzun fiberlerde Rayleigh işaretindeki zayıflama ihmal edilebilir düzeyde olup yaklaşık olarak ~ 0.2 dB'dir ve yüzde gürültü miktarı, uygun ortam işaretinin üzerinde yer alan tamamen yatay çizgiler üzerinde RMS voltajının oranı ile hesaplanabilir. Çizelge 3.5'in ikinci sütunu, teorik olarak hesaplanmış yüzde CRN gürültüsünü vermektedir.



Şekil 3.9 Farklı uzamsal çözünürlüklerde hesaplanmış dar bantlı Rayleigh işareti. Çizgiler net görünebilmesi için düşey olarak görüntülenmektedir.

Uzamsal çözünürlük değerleri, 1.5 metre (15ns), 3m ve 5m için $v_g = 2 \times 10^8$ ve $\Delta v = 2GHz$ alınarak f_{CRN} Koherent Rayleigh gürültüsü aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$f_{CRN} = \sqrt{\frac{v_g}{4\Delta z\Delta v}} = \sqrt{\frac{2 \times 10^8}{4 \times 1.5 \times 2 \cdot 10^9}} = 0.129 \quad (3.43)$$

Eşitlik (3.43)'te hesaplandığı gibi, Koherent Rayleigh gürültüsü 12.9% olarak elde edilmektedir. Benzer biçimde; uzamsal çözünürlük 3m ve 5m için ise sırasıyla

Rayleigh gürültü değerleri Çizelge (3.5)'de verilmiştir. Koherent Rayleigh gürültüsü, eşitlikten de görüldüğü gibi uzamsal çözünürlüğü yükseltmek suretiyle azaltılabilmektedir.

Çizelge 3.5 Farklı bant genişliklerinde teorik yüzde CRN gürültüsü.

Bant Genişliği	Teorik %CRN
3MHz	12.9
1MHz	9.1
270kHz	7.0

Landau-Placzek oranını esas alan fiber-optik bir dağınık sıcaklık algılayıcısında durum daha farklıdır. Bu tür bir algılayıcıda, dar bantlı ve zorlanmış geniş bant kapasitesine sahip Q-anahtarlamalı bir erbiyum- katkılı fiber lazer kullanılarak ve <1dB den küçük kayıplı bir SPMZ ile entegre edilerek, daha yüksek performansa ulaşmak mümkün olabilmektedir. Çünkü, SPMZ kullanımı ile geri saçılmış işaretlerde çok düşük kayıplar sağlanabilir ve böylece işaret-gürültü kapasiteleri de Rayleigh işaretinde olduğu gibi arttırılabilmektedir.

3.10.5. İşaret Tespit Sisteminde Ortaya Çıkan Gürültü Kaynakları

Erbiyum katkılı fiber bir kuvvetlendiricili direk tespit sisteminde, tanımlanabilir majör gürültü kaynakları aşağıda verilmektedir:

(i) Fotodiyot Gürültüsü

Fotodiyot gürültüsü aşağıdakilerden oluşmaktadır:

- Foto akım ve karanlık akım darbe gürültüsü,
- Diyot rezistansına ait termal gürültü.

Yarı iletken foto diyotlarda, serbest elektronlar ve delikler rasgele oluşmakta ve birleşmektedir. Bu durum, darbe gürültü akımı ile sonuçlanmaktadır. Darbe gürültüsü

iki bileşenden oluşmaktadır; bunlardan biri foto diyota giren optik işaret ile yaratılmış olup diğeri ise elektron-delik çiftlerinin termal olarak yaratılması sonucu ortaya çıkan ve doğal olarak oluşan karanlık akım sebebiyle oluşmaktadır. Bu gürültü, deteksiyon (tespit) bant genişliği üzerinde yer alan beyaz bir gürültüdür. Bunun yanı sıra, ölçülebilir ve küçük foto diyot rezistansı, nispeten küçük ve ihmal edilebilir termal bir gürültü yaratmaktadır.

(ii) Transempedans Kuvvetlendirici Gürültüsü

Transempedans kuvvetlendirici tasarımı, ön-ucu SiFET olan bir elektronik kuvvetlendirici ve giriş-çıkış terminalleri boyunca geri besleme direncinden oluşmaktadır. Transempedans kuvvetlendiriciye dayandırılabilen toplam gürültü:

- Geri besleme rezistansına ait termal gürültü, bu aşamada termal gürültü olarak değerlendirilecektir,
- FET kanal direncine ait termal gürültü bu aşamada, FET gürültüsü olarak değerlendirilecektir,
- FET kapı kaçak akım darbe gürültüsü ise bu aşamada, FET-darbe gürültüsü olarak değerlendirilecektir.

Isı etkisi ile oluşan gürültü ve Johnson gürültüsü, bir elektrik direncinden kaynaklanmaktadır, ki burada termal enerji, herhangi bir gerilim uygulanmadan bile rasgele elektron akışına sebep olmaktadır. Termal gürültü, kuvvetlendirici terminalleri boyunca geri besleme direnci ile birleştirilmektedir. Direnç ne kadar büyük olursa buna karşılık, termal gürültü akımı da o kadar küçük olur.

OTDR ile ilgili olarak gerçekleştirilen yüksek bant genişliği uygulamaları için, büyük termal gürültü akımları oluşturan nispeten küçük geri besleme dirençlerine gereksinim olmaktadır. Bu gürültü, tespit bant genişliği üzerinde beyaz gürültü olarak değerlendirilebilir. Termal gürültü ayrıca, transempedans kuvvetlendiricinin ön-ucundaki FET'e ait kanal direnci ile birleştirilmektedir. Geri besleme direncinin beyaz

termal gürültüsünün aksine, kanal direncinin termal gürültü güç spektrumu, frekansın karesi ile orantılı olarak değişmektedir.

(iii) EDFA Gürültüsü

Kuvvetlendirilmiş işaret ve ileri yönde kuvvetlendirilmiş spontane yayılım (emisyon), alıcı tarafında aşağıdaki gürültü türlerine sebep olmaktadır:

- ASE-darbe gürültüsü,
- İşaret-ASE darbe gürültüsü,
- ASE-ASE darbe gürültüsü.

İşaret darbe gürültüsüne benzer biçimde, ASE-darbe gürültüsü, foto diyotta EDFA'nın çıkışında beliren ileri yönde rasgele olarak ASE yaratmış olan Foto Diyotta meydana gelmektedir. Başka bir ifadeyle, işaret-ASE gürültüsü, kuvvetlendirilmiş işaret spektrumu ile birleştirilmiş ASE fotonlarından türemektedir. Klasik olarak, işaretin frekans bileşenleri ile optik işaret bant genişliği içerisindeki ASE bileşenleri arasında "darbe" olarak değerlendirilebilir. Başka bir deyişle, işaret-ASE darbe gürültüsü spektral güç yoğunluğu RF domeninde üniformdur.

ASE işareti darbe gürültüsü bu yüzden dar bant filtreleme yöntemiyle azaltılamaz. Dolayısıyla, bu gürültü optik kuvvetlendiricilerin doğasında vardır. Başka bir ifade ile, ASE-ASE darbe gürültüsü, ASE spektrumunun kazanç bant genişliğindeki frekans bileşenleri darbe işaretinden kaynaklanmaktadır. Ve bu gürültü, kuvvetlendirici çıkışı ile foto alıcı arasında bir dar bantlı optik filtre kullanılarak etkili bir biçimde azaltılabilir. Gürültünün güç spektral yoğunluğu ise, optik bant genişliği seviyesinde frekans değerine lineer olarak azalmaktadır.

3.10.6. EDFA / Transempedans Gürültü Modeli

Bu modelde, gürültüsüz bir foto diyot ve kuvvetlendirici, kuvvetlendirici terminalleri boyunca akım kaynakları olarak modellenmiş gürültü kaynakları olarak

kabul edilmektedir. Burada, termal gürültü akımı geri besleme direncine (R_f) paraleldir ve transempedans kuvvetlendirici terminallerinin girişini referans alan elektriksel işaret, optik bant genişliği \gg elektriksel bant genişliği olarak kabul edilmektedir.

Bir EDFA'ya ait optik gürültü figürü F aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$F = \frac{1 + 2n_{sp}(G - 1)}{G} \quad (3.44)$$

Elektriksel işaret-gürültü güç oranı, SNR_e aşağıdaki eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$SNR_e [dB] = 10 \log \left[\frac{i_{Sinyal}^2}{(\sum i_j^2) / N} \right] \quad (3.45)$$

Eşitlikte; N ortalama sayısı veya veri üzerinde işlenmiş işaret bileşenleri, j darbe, termal kökenli ve FET v.s. gibi çeşitli kaynaklara karşılık gelmektedir. Ayrıca, optik işaret-gürültü oranı SNR_0 , ölçümü yapılmış olan "V" gerilimine bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir:

$$SNR_0 [dB] = 20 \log \left[\frac{V_{Sinyal}}{(\sum V_j^{RMS}) / \sqrt{N}} \right] \quad (3.46)$$

RMS akımlarının ve geri besleme direncinin bir çarpanıyla hesap edilen gerilim değerleri eşitlik (3.47) ile hesaplanmaktadır:

$$V_j = \sqrt{i_j^2 R_f} \quad (3.47)$$

Optik kuvvetlendirme yaparken ortaya çıkan diğer bir başka önemli konu; hem kuvvetlendirilmiş işaret ile hem de ASE veya diğer gürültü kaynakları ile alıcının doygunluğu (saturasyonu) olasılığıdır. Bir diğer önemli konu ise, istenen işaretin

kırılmasına neden olacak biçimde alıcıya ait saturasyon geriliminin V_{sat} aşılmamasını sağlamaktır.

$$V_{sat} \geq R_f \left(\sqrt{i_{Darbe}^2} + \sqrt{i_{Termal}^2} + \sqrt{i_{Kuvvetlendirici}^2} + \dots + \sqrt{i_{Sinyal}^2} + I_{ASE} \right) \quad (3.48)$$

ASE, alıcının doygunluğa ulaşmasına sebep olan büyük bir problemdir ve uygun optik filtreleme metodu seçimi ile minimize edilebilmektedir.

3.10.7. Elektriksel Bant Genişliğinin Fonksiyonu Olarak Gürültü

Bir FODTS sisteminde, SNR oranını yükseltmek için giriş darbe genişliğine uygun olacak bir alıcı bant genişliği seçilmesi gerekmektedir. Geri saçılmış işaret enerjisi, alıcı bant genişliği ile ters orantılı biçimde değişir. Bu durum, kuvvetlendirilmemiş ve kuvvetlendirilmiş işaretteki düşüşü açıklamaktadır. Dağınık sıcaklık algılama sistemlerinde, gürültünün asıl kaynağı, ASE-ASE darbe gürültüsü formundaki EDFA'dır. Diğer gürültü kaynakları ihmal edilebilir.

İşaret-ASE gürültüsü, $P_s B_{eq}$ çarpanı alıcı bant genişliği ile değişmediği için sabittir. Aynı sebepten dolayı, darbe gürültüsü de karanlık akım gürültüsünden kaynaklanan çok küçük bir artış gösterdiği için sabit kabul edilebilmektedir. FET, FET-darbe, ASE-darbe ve termal gürültü dağılımları, işareten bağımsız olduklarından alıcı bant genişliği ile artış göstermektedir. Kuvvetlendirilmiş işaret, tüm bant genişlikleri üzerindeki toplam gürültü miktarını aşmaktadır. Kuvvetlendirilmemiş işarete ise, en büyük gürültü FET gürültüsüdür. Gürültünün, optik bant genişliğinin fonksiyonu olarak ifade edildiği çalışmalar halen araştırmacıların odak noktası olmaya devam etmektedir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Genel olarak, enerji kablolarının ömrü yaklaşık 20-30 yıl olarak kabul görmektedir. Ancak, kablo bu süreden daha kısa sürelerde devre dışı kalabilmektedir. Kablo yalıtkanının yaşlanmasına ve ömrünün kısalmasına neden olan ve kabul gören en önemli iki etken; kablo iletkeninin aşırı ısınması ile XLPE yalıtkanının yaşlanmasına neden olan sıcaklık ve yalıtkan üzerinde yük ve/veya basınç etkisi ile meydana gelen gerginliktir. Bu yüzden, sıcaklık ve gerginlik ölçümleri kablo yalıtkanı ve dolayısıyla kablonun yaşam süresi açısından çok önemlidir.

Bu çalışmada, 5 km uzunluğunda ve 380 kV yüksek gerilim kablosu üzerine uygun üretim koşulları altında yerleştirilmiş optik fiber kablonun sensör gibi davrandığı bir algılama sistemi için, kriterler belirlenerek dağınık sıcaklık ve gerginliğin izlenmesine ilişkin sıcaklık /gerginlik modeli oluşturulmuş ve kablo boyunca sıcaklık /gerginlik profillerine ait simülasyonlar (benzetimler) gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sıcaklık ve gerginlik bilgileri ışığında, Brillouin frekans kayması ve Brillouin yüzdesel güç değişimlerine ulaşılmış, benzer biçimde simülasyonları yapılmıştır. Gerçekleştirilen simülasyonlar ile, sıcak noktaların tespiti yapılarak, bu noktalardaki sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Yine bu noktalardaki sıcaklık bilgileri kullanılmak suretiyle kablo boyunca gerginlik profili çıkartılmıştır. Ayrıca, eş zamanlı sıcaklık ve/veya gerginlik bilgileri kullanılarak Brillouin frekans kayması ve Brillouin güç değişimleri hesaplanmış ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

4.1. Simülasyon Koşullarının Belirlenmesi ve Modelinin Oluşturulması

380 kV 5 km uzunluğunda XLPE izolasyonlu yüksek gerilim kablosu boyunca sıcaklık ve gerginlik profilini algılamak için, kabloya entegre edilmiş tek modlu optik fiber algılayıcı modelini temel alan simülasyonlar (benzetimler) Matlab 6.5 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyon koşulları aşağıda verilmiştir.

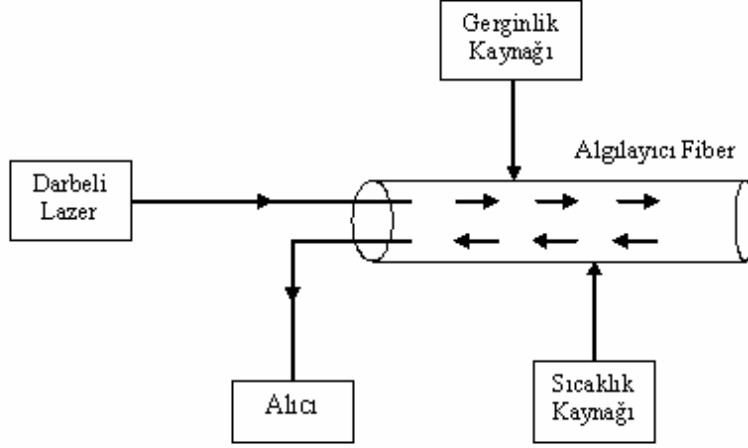
- Kablo boyunca her 500 m'de bir tekrarlanan kablo bağlantı noktası vardır.

- Kablo, 1500-1525 m arasında 145x5 mm (iç çap x kalınlık) PVC boru içerisinde geçmektedir.
- Kablo, 2200-2300 m arasında 145x5 mm PVC boru içerisinde ilerlerken, toprak kaymasından kaynaklanan uzunlamasına gerilmeler sonucunda kablo üzerinde gerginlik oluşmaktadır.
- Kablo, 3700-3800 m arasında 145x5 mm PVC boru içerisinde geçmekte ve yine bu aralıkta toprak kayması nedeniyle kablo üzerinde gerginlik oluşmaktadır.
- Kablo, 4600-4625 m ve 4675-4700 m arasında 145x5 mm ebatlı PVC boru içerisinde, 4625-4675 m arasında ise 180x7 mm ebatlı başka bir PVC boru içerisinde geçmekte ve 4650. metrede başka bir kablo ile kesişmektedir.

Şekil 4.20'de, benzetimlerde kullanılan ve yüksek gerilim kablosu üzerine yerleştirilmiş bir algılayıcı fiber gösterimi verilmiştir. Gösterimde verilmiş olan sıcaklık kaynakları, kablonun boru içerisinde geçişlerini, kablo ek yerlerini ve kablo bağlantı noktalarını ifade etmektedir. Kablo üzerinde ortaya çıkan sıcaklık oluşumlarının asıl nedenleri, iletkenin geçen akım ve yalıtkanın oluşan dielektrik kayıplardır. Gösterimde verilmiş olan gerginlik kaynakları ise, toprak kayması sonucu toprağın ağırlığının, kablo yalıtkanı üzerinde oluşturduğu basınç ve neden olduğu gerginlik oluşumlarını ifade etmektedir.

Yalıtkan üzerinde meydana gelen gerginliklerin temelinde üç nedeni vardır. Bunlar; üretim aşamasında, püskürtme prosesi sonrasında, yalıtkanın iç ve dış katmanlarının yalıtkanın merkez kısmına göre daha hızlı soğuması ve bu nedenle merkez kısımda oluşan gerilmeler, iletkenin ısıl genişleme katsayısının, yalıtkanın ısıl genişleme katsayısına göre daha yüksek olması nedeniyle, yüksek sıcaklıklarda iletkenin yalıtkana göre daha fazla genişleyerek iletkenin yalıtkana doğru basınç yapması ve yalıtkanın içerisine girmesine neden olan termo-mekanik gerilmeler ve son olarak ta, yalıtkan üzerinde dış etkenler (toprak kayması, basınç- kuvvet etkisi) sonucunda oluşan

kıvrılmalar, bükülmeler şeklinde ortaya çıkan yanlamasına ve uzunlamasına gerilmelerdir.



Şekil 4.20 Optik fiber algılayıcıya ait basit gösterim.

Gerginlik oluşumunun en büyük nedeni, yalıtkan üzerindeki dış etkenler kaynaklı gerilmelerdir. Bu çalışmada, benzetim ve hesaplamalarda bu tip gerginlik oluşumu esas alınmıştır.

4.1.1. Simülasyonlarda Kullanılan Fiber Parametreleri ve Hesaplanması

XLPE yalıtkanlı yüksek gerilim kablosu boyunca sıcaklık bilgilerine ulaşmak için ikinci bölümde anlatılmış olan Raman saçılması esas alınmış ve Raman güç değişimlerinden faydalanılmıştır. Tüm simülasyonlarda 1550 nm dalga boyunda tek modlu fiber kullanılmış ve 1550 nm dalga boyu için sensör parametrelerinden yararlanılmıştır.

Sıcaklık bilgileri ışığında, üçüncü bölümde bahsedilen Raman ve Brillouin saçılmalarını esas alan teknikten yararlanılarak kablo boyunca gerginlik profiline ulaşılmıştır. Burada; K_T^V Brillouin frekans sıcaklık katsayısı, K_e^V Brillouin frekansı gerginlik katsayısı, K_e^P Brillouin güç gerginlik katsayısı ve K_T^P Brillouin gücü

sıcaklık katsayılarından faydalanılmıştır. Simülasyonda kullanılan diğer parametreler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Yüksek gerilim kablosuna entegre edilmiş fiberin uzunluğu: $L = 5.000m$.

Fiber içerisine gönderilen ışığın darbe süresi: $\tau = 15ns$.

Uzamsal aralık ifadesinden faydalanılarak $\Delta z = \frac{c \cdot \tau}{2ngr} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 15}{2 \cdot 1.5} = 1.5m$ olarak bulunur.

1.5 metrelik uzamsal aralıklarla kablo boyunca ölçüm alınan nokta sayısı;

$$\frac{\text{Fiber_uzunlugu}}{\text{Uzamsal_aralik}} = \frac{5.000}{1.5} = 3333 \text{ adet olarak bulunur.}$$

Fotonların Bose-Einstein olasılık dağılımına göre; Stokes çizgileri için Bose-Einstein faktörü aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır.

$$\rho_s = \frac{1}{1 - \exp(-\Delta E/kT)} = \frac{1}{1 - \exp(-50 \cdot 10^{-3} \cdot 1.60218 \cdot 10^{-19} / (1.38054 \cdot 10^{-23} J/K \cdot K(T)))} \quad (4.1)$$

Benzer biçimde, anti-Stokes çizgileri aşağıdaki formülden hesaplanmıştır.

$$\rho_{AS} = \frac{\exp(-\Delta E/kT)}{1 - \exp(-\Delta E/kT)} = \frac{\exp(-50 \cdot 10^{-3} \cdot 1.60218 \cdot 10^{-19} / (1.38054 \cdot 10^{-23} J/K \cdot K(T)))}{1 - \exp(-50 \cdot 10^{-3} \cdot 1.60218 \cdot 10^{-19} / (1.38054 \cdot 10^{-23} J/K \cdot K(T)))} \quad (4.2)$$

ρ_s ve ρ_{AS} katsayıları yukarıdaki eşitliklerden de görüldüğü gibi, ışığın fiber içerisinde saçıldığı noktanın Kelvin cinsinden sıcaklığına bağlıdır. Simülasyonda, tek modlu fiberde 1550 nm dalga boyu için Raman-Stokes yakalama katsayısı $\Gamma_{s, \sin gle}(1550nm) = 3.04 \cdot 10^{-10}$ ve $\Gamma_{as, \sin gle}(1550nm) = 4.0 \cdot 10^{-10}$ olarak alındı (Bknz. Çizelge 2.1).

Çizelge (2.2), eşitlikler (2.13) ve (2.14) kullanılarak tek modlu fiber sensör için 1550 nm’de Stokes ve anti-Stokes dalgalarında etkin güç zayıflama katsayıları;

$$\alpha_{p,s}(dB) = \frac{\alpha_p(\lambda_0) + \alpha_p(\lambda_s)}{2} = \frac{\alpha_p(1550) + \alpha_p(1663)}{2} = \frac{0.20 + 0.22}{2} = 0.21 \quad (4.3)$$

$$\alpha_{p,AS}(dB) = \frac{\alpha_p(\lambda_0) + \alpha_p(\lambda_{AS})}{2} = \frac{\alpha_p(1550) + \alpha_p(1451)}{2} = \frac{0.20 + 0.25}{2} = 0.225 \quad (4.4)$$

olarak hesaplanmıştır. Stokes ve anti-Stokes zayıflama katsayıları (4.3) ve (4.4) eşitliklerinden ve $\alpha_{p,s}(neper) = \alpha_{p,s}(dB)x\frac{\ln(10)}{L}$ eşitliğinden faydalanılarak (4.5) ve (4.6)’da verildiği gibi hesaplanmıştır.

$$\alpha_{p,s}(neper) = \alpha_{p,s}(dB)x\frac{\ln(10)}{L} = 0.21x\frac{\ln(10)}{5000} = 9.67x10^{-5} \quad (4.5)$$

$$\alpha_{p,AS}(neper) = \alpha_{p,AS}(dB)x\frac{\ln(10)}{L} = 0.225x\frac{\ln(10)}{5000} = 10.36x10^{-5} \quad (4.6)$$

5 km uzunluğundaki yüksek gerilim kablosu üzerinde dağınık sıcaklık hesaplatılırken (2.33) eşitliği kullanılmıştır.

$$T(z) = \frac{\Delta E}{k \ln \left[\frac{h_s(t)}{h_{AS}(t)} x \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{AS}} \right)^4 x \exp(\Delta\alpha_p x z) \right]} \quad (4.7)$$

(4.7) eşitliğinde $h_s(t)$ ve $h_{AS}(t)$ sırasıyla t anında algılanan Stokes ve anti-Stokes darbe cevaplarıdır. 1550 nm dalga boyunda Stokes işareti 1663 nm’de, anti-Stokes işareti 1451 nm’de geri saçılmaktadır.

Kablo boyunca Brillouin frekans kayması (4.8) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\Delta v = K_{\varepsilon}^v \Delta \varepsilon + K_T^v \Delta T \quad (4.8)$$

(4.8) eşitliğindeki Brillouin frekansı sıcaklık ve gerginlik katsayıları, Çizelge (3.2)'de verilmektedir.

Kablo boyunca Brillouin güç değişimi (%) (4.9) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\Delta P = K_{\varepsilon}^P \Delta \varepsilon + K_T^P \Delta T \quad (4.9)$$

(4.9) eşitliğindeki Brillouin gücü sıcaklık ve gerginlik katsayıları, Çizelge (3.2)'de verilmektedir.

Kablo boyunca gerginlik profili (3.40) eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\Delta \varepsilon(L) = \frac{\Delta v_B(L) - K_T^V \Delta T_R(L)}{K_{\varepsilon}^V} \quad (4.10)$$

2200-2300. metreler arasında ve 3700-3800. metreler arasında kablo üzerinde gerginlik etkisi oluşmakta iken, diğer noktalarda sıfır gerginlik referans alınmıştır. 2200-2300 m ve 3700-3800 m arasında frekans kayma miktarları, simülasyona 35 MHz ve 55 MHz olarak tanıtılmıştır. Program komutları ve detay program EK1'de verilmiştir. Yukarıda verilmiş olan simülasyon kriterleri doğrultusunda, kablonun geçtiği noktaların sıcaklıkları Kelvin cinsinden programa manuel olarak tanıtılmıştır.

Kablonun 500-1000 m arasında Brillouin güç değişimi ve Brillouin frekans kayması incelenmiş ve 600-700 m arasında, Brillouin gücü üzerindeki RMS gürültüsü ~% 0.46 ve Brillouin frekans kayması üzerindeki RMS gürültüsü ~ 1.22 MHz olarak elde edilmiştir. Eşitlikler (3.16) ve (3.17) kullanılarak, sırasıyla sıcaklık ve gerginlik çözünürlükleri ~ 1.27 °C ve ~ 51 µε olarak hesaplanmıştır. Benzer biçimde 800-900 m arası için, güç değişimi ve frekans kayması RMS gürültüsü sırasıyla ~ % 0.45 ve

~1.19MHz olarak elde edilmiş ve sıcaklık /gerginlik çözünürlükleri sırasıyla ~ 1.24 °C sıcaklık ve ~ 49.8 µε olarak hesaplanmıştır. Frekans kayması ve güç değişimi üzerinde oluşan RMS gürültü miktarlarına bağlı olarak hesaplanmış sıcaklık ve gerginlik çözünürlükleri çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 5 km 380 kV yüksek gerilim kablosu için boyunca elde edilmiş sıcaklık ve gerginlik çözünürlükleri.

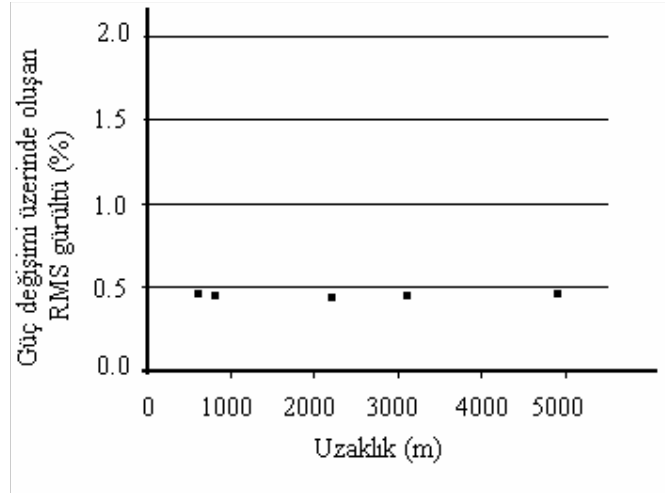
Uzunluk (m)	Frekans kayması üzerinde oluşan RMS gürültü (MHz)	Güç değişimi üzerinde oluşan RMS gürültü (%)	Sıcaklık Çözünürlüğü (°C)	Gerginlik Çözünürlüğü (µε)
600	1.22	0.46	1.27	51
800	1.19	0.45	1.24	49.8
2200	1.24	0.44	1.22	50
3100	1.18	0.45	1.25	49
4900	1.17	0.47	1.29	51

Sonuç olarak; Brillouin gücü RMS gürültüsü ~ % 0.45 ve frekans kayması RMS gürültüsü ~ 1.20 MHz alınarak, 5 km yüksek gerilim kablosu boyunca sıcaklık ve gerginlik çözünürlükleri sırasıyla, ~1.25 °C ve ~50 µε olarak (4.11) ve (4.12)’de hesaplanmıştır.

$$\delta T = \frac{|K_{\epsilon}^P \delta v| + |K_{\epsilon}^V \delta P|}{|K_{\epsilon}^V K_T^P - K_{\epsilon}^P K_T^V|} = \frac{|9.10^{-4} \times 1.20| + |0.048 \times 0.45|}{|0.048 \times 0.36 + 9.10^{-4} \times 1.07|} = \frac{0.02268}{0.018243} = 1.25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.11)$$

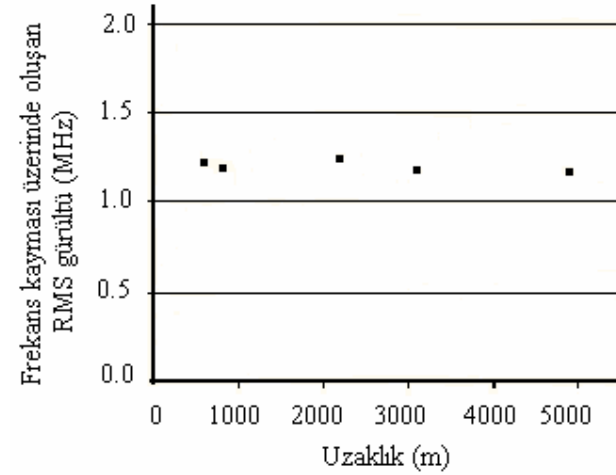
$$\delta \epsilon = \frac{|K_T^P \delta v| + |K_T^V \delta P|}{|K_{\epsilon}^V K_T^P - K_{\epsilon}^P K_T^V|} = \frac{|0.36 \times 1.20| + |1.07 \times 0.45|}{|0.048 \times 0.36 + 9.10^{-4} \times 1.07|} = \frac{0.9135}{0.018243} = 50 \text{ } \mu\epsilon \quad (4.12)$$

Kablo boyunca Brillouin güç değişimi ve frekans kayması üzerinde meydana gelen RMS gürültü miktarları sırasıyla şekil (4.21) ve (4.22)'de verilmiştir.



Şekil 4.21 5 km yüksek gerilim kablosu boyunca Brillouin güç değişimi üzerinde oluşan RMS gürültüsü.

Güç üzerinde oluşan RMS gürültüsü, kablo boyunca ~ % 0.5 seviyesinin altında yer almıştır.



Şekil 4.22 5 km yüksek gerilim kablosu boyunca Brillouin frekans kayması üzerinde oluşan RMS gürültüsü.

Sıcaklık çözünürlüğü üzerinde Brillouin gücü RMS gürültüsünün etkisi ~ % 95 ve frekans üzerinde oluşan RMS gürültüsünün etkisi ~ % 5 olarak hesaplanmıştır. Brillouin güç değişimi üzerinde oluşan RMS gürültüsünün gerginlik çözünürlüğü üzerindeki etkisi ~ % 53 olarak elde edilmiştir. Buradan; sıcaklık ve gerginlik

çözünürlükleri üzerinde Brillouin gücü üzerinde oluşan gürültü etkisinin, Brillouin frekans kayması üzerinde oluşan gürültü etkisine kıyasla, daha baskın olduğu sonucuna varılmıştır.

4.2. Tartışma Konuları

Optik Brillouin esaslı dağınmık sıcaklık ve gerginlik sensörlerine ilişkin yapılan araştırma ve çalışmalar bundan sonraki süreçte; algılama mesafesi, uzamsal çözünürlük, sıcaklık ve gerginlik çözünürlüğü, ölçüm süresi, sensör sistemi güvenilirliği ve maliyeti gibi konularda yapılacak optimizasyonlar üzerinde odaklanmaktadır.

Bu aşamada araştırmacılar aşağıdaki konular üzerinde durmaktadırlar:

- Uzun mesafeli dağınmık algılayıcılar için negatif dispersiyonlu fiberlerin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Bilindiği gibi en büyük sensör gürültü kaynağı olan EDFA ön kuvvetlendiricilerdir. Gelecekte optik olarak filtreleme önem kazanacaktır. Örneğin; ~ 2 GHz'lik bant genişliğe sahip dar bir optik filtre, Bragg Grating filtresine (~ 15 GHz bant genişlikli) kıyasla gürültü seviyesini yaklaşık olarak 9dB kadar azaltacaktır. Raman ASE gürültü seviyesini azaltmak için de dar optik filtreler kullanılabilir. Şu anda LO (lokal osilatör) gürültü seviyesi, ön kuvvetlendirici gürültü seviyesinin altındadır. Bu yüzden, önceliği ön kuvvetlendirici gürültü seviyesini azaltmaya vermek gerekmektedir.
- Eğer yüksek güçlü bir Raman pompa kaynağı kullanılırsa, algılama performansını arttırmak mümkün olmaktadır. Raman pompa kaynağına ilaveten, Raman pompa gücü 1W'tan yüksek olan yardımcı pompa konfigürasyonu ve prob gücü <10mW olan algılama sistemleri ile daha uzun algılama mesafelerinde çalışmak ve daha yüksek performanslara ulaşmak mümkün olabilecektir. Araştırmalar bu nokta üzerinde yoğunlaştırılmalıdır.

- Şu anki veri işleme ve veri ölçme prosesleri gerekenden çok zaman almaktadır. Teorik olarak, >100 km den daha uzun fiber kablolarında veri ölçüm ve analizi işlemleri daha hızlı tespit sistemleri ile daha kısa sürede yapılabilecektir.
- Mikro dalga tespit sistemi ile, darbe genişliği 10 ns (uzamsal çözünürlüğü 1m) işaretler elde etmek mümkün olabilmektedir. Ancak daha yüksek uzamsal çözünürlüklü ölçümler yapabilmek için daha hızlı cevap süreli doğrultucular (redresörler) kullanılmalıdır.

Tek modlu fiberler kullanan sıcaklık /gerginlik algılama sistemlerinin performanslarını arttırmak için Raman kuvvetlendirici kullanmak çözüm olabilir. Farklı optik Raman pompa konfigürasyonları kullanmak suretiyle, pompa gücü azaltılarak ortaya çıkabilecek, üçüncü bölümde bahsedildiği gibi gürültü benzeri lineer olmayan etkilerden korunmak mümkün olmaktadır.

5. SONUÇLAR

Daha önce, Brillouin saçılmasına dayanan teknikler kullanılarak XLPE yalıtkanlı kablolarda eş zamanlı olarak sıcaklık ve gerginlik ölçümlerine ilişkin uygulamalar gerçekleştirilmemiştir. Bu tezde, eş zamanlı olarak sıcaklık ve gerginlik ölçümleri, spontane Raman gücü ve Brillouin frekans kaymasını esas alan bu tekniğin kullanılması ile elde edilmiştir. Farklı kablo sistemleri için elde edilmiş olan deneysel veriler ışığında 5 km 380 kV yüksek gerilim enerji nakil kablosu modelinde sıcaklık /gerginlik simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Spontane Raman ve Brillouin saçılmaları baz alınarak gerçekleştirilen eş zamanlı sıcaklık ve gerginlik ölçümleri ile bunlara bağlı olarak elde edilmiş olan Brillouin frekans kayması ve güç değişimlerine ilişkin simülasyon sonuçları aşağıda verilmiştir.

- Kablo boyunca sıcaklık ölçümlerinde, anti-Stokes işaretinin Stokes işaretinden sıcaklığa daha duyarlı olması nedeniyle Raman anti-Stokes işaretinin güç değişimleri kullanılmıştır.
- Simülasyon sonuçlarından görüleceği gibi, Brillouin frekans kayması üzerinde sıcaklığın etkisi gerginliğin etkisinden daha yüksektir. Yaklaşık olarak 21 $\mu\epsilon$ gerginlik ile 1 °C sıcaklık değişimi aynı miktarda frekans kaymasına neden olmaktadır (Bknz. Şekil 4.8).
- Brillouin yüzdesel güç değişimleri üzerinde sıcaklığın etkisinin gerginliğin etkisine göre daha yüksek olduğu çizimlerden görülmektedir. Yaklaşık olarak 400 birimlik gerginlik değişiminin Brillouin güç değişimi üzerinde yarattığı etkiyi, 1 birimlik sıcaklık değişimi meydana getirmektedir (Bknz. Şekil 4.14).
- Uzamsal çözünürlüğü arttırmak için ya darbe süresi daha düşük lazer kaynak kullanılmalı yada kırıcılık indisi daha yüksek fiber kullanılmalıdır (Bknz. Eşitlik 2.51).
- Borunun uzunluğu, boyu ve iletkenliğine belli oranda bağlı olan ancak, enerji kablolarının bağlantı yerlerinde termal etkileşimleri sonucunda

sıcaklık değeri kritik sıcaklık değeri olan 90 °C'yi aşmış ve 97.75 °C'ye ulaşmıştır. Kablo üzerinde maksimum sıcaklık değerine 4650. metrede ulaşılmıştır (Bkz. Şekil 4.5).

- Programa manuel olarak Kelvin cinsinden girilmiş olan sıcaklık değerindeki 1.25 °K artışa karşılık simülasyon modellemesinde ~ 1 °C'lik bir artış olmuştur. Sonuç olarak kablonun sıcaklık artışı ile simülasyondaki sıcaklık değişimi arasında artma yönünde bir lineerlik vardır. Örneğin muf noktalarında 12 °K sıcaklık artışına karşılık simülasyonda ~ 9.5 °C artışı olmuştur. Simülasyon verilerinden uygulamada, sıcaklık çözünürlüğünün yaklaşık olarak 1.25 °C olduğu görülmüştür (Bknz. Şekil 4.3 ve Şekil 4.6).
- Sıcaklık çözünürlüğü teorik hesaplamalardan 1.25 °C olarak elde edilmiştir.
- Kablonun ek-muf yerlerinde oluşan aşırı ısınmalar nedeniyle, bu noktaların sıcaklık değerlerinin arttığı görülmüştür (Bknz. Şekil 4.6).
- Kablo 1500-1525 metreleri arasında 25 m.'lik boru içerisine girdikten sonra, sıcaklığının ~ 11-12 °C arttığı görülmektedir (Bknz. Şekil 4.2). Sıcaklık artışı 3700-3800 metreleri arasında kablo boru içerisine girdiğinde de meydana gelmiştir (Bknz. Şekil 4.4).
- Kabloların kesiştikleri noktalarda da açık bir biçimde sıcaklık artışları gözlenmiştir. Sıcaklık artışı; kesişme açısına, kesişen kablolar üzerinden akan anlık akıma ve kesişen kabloların merkezleri arasındaki uzaklığa direk olarak bağlıdır. 4650. metrede kablolar kesişmektedir (Bknz. Şekil 4.5).
- Kabloların basınç altında kalmaları ve toprağın neden olduğu sürtünmeden dolayı mekanik stresler oluşmuştur. 3700-3800 metreleri arasında maksimum ~ 950 $\mu\epsilon$ gerginlik değerine ulaşılmıştır. Bu değer 3760. metrede ortaya çıkmıştır. Gerginliğin yüksek olması, frekans kaymasının büyüklüğü ile doğru, sıcaklık değişimi ile ters orantılıdır (Bknz. Şekil 4.18).
- Sıcaklık ve gerginliğin neden olduğu Brillouin frekans kayması 2200-2300 metreleri arasında ortalama olarak 35 MHz ve 3700-3800 metreleri arasında ise 55 MHz olarak tespit edilmiştir (Bknz. Şekil 4.10 ve Şekil 4.12).
- Sadece sıcaklık artışının neden olduğu Brillouin frekans kayması açık biçimde 1500-1525 metreleri arasında görülmektedir (Bknz. Şekil 4.9).

Simülasyonda da görüldüğü gibi, frekans kayması ile sıcaklık değişimi arasındaki oran Brillouin frekans kayması sıcaklık katsayısını vermektedir.

- Maksimum Brillouin frekans kayması ~ 58 MHz olarak 3763. metrede elde edilmiştir (Bknz. Şekil 4.11).
- Geri saçılmış Brillouin işaretinin yüzde değişim oranının maksimum değeri ~ % 5.79 olarak 4650. metrede elde edilmiştir. Çizimlerden de anlaşılacağı gibi, güç değişimi üzerinde sıcaklığın etkisi gerginliğin etkisine (~ 400/1 oranında) göre daha yüksektir (Bknz. Şekil 4.14).
- Brillouin frekans kayması üzerindeki RMS gürültüsü (hatası), ~ 1.20 MHz ve Brillouin güç değişimi üzerindeki RMS gürültüsü ~ % 0.45 olarak elde edilmiştir.
- 5 km yüksek gerilim enerji kablosu için sıcaklık çözünürlüğü yaklaşık $\delta T = 1.25$ °C ve gerginlik çözünürlüğü yaklaşık $\delta \epsilon = 50$ $\mu\epsilon$ olarak $\Delta z = 1.5$ m. uzamsal çözünürlükte hesaplanmıştır.
- Daha yüksek sıcaklık ve gerginlik çözünürlükleri, uygulanan tekniğin gücünün bir göstergesi olacağı gibi, mevcut sistemlerde kullanılan yüksek gerilim kablolarının yalıtkan ömrünü belirlemedeki süreçte o oranda kısaltmış olacaktır.
- Hesaplamalardan açık bir biçimde görüldüğü gibi, sıcaklık çözünürlüğü üzerinde Brillouin güç değişimi hata etkisi % 94.72 olur iken, Brillouin güç değişimi gürültü (RMS gürültü) etkisinin gerginlik çözünürlüğü üzerindeki etkisi % 52.78 olarak bulunmuştur. Buradan; sıcaklık ve gerginlik çözünürlükleri üzerinde Brillouin gücü üzerinde oluşan gürültü etkisinin Brillouin frekans kayması üzerinde oluşan gürültü etkisine göre, daha baskın olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- Raman gücü ve Brillouin frekans kaymasını esas alan tekniğin kullanımı ile, 5 km uzunluğunda 380 kV yüksek gerilim kablosu boyunca 1550 nm'de tek modlu fiber kullanılmak suretiyle sıcaklık ve gerginlik simülasyonları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, yüksek gerilim kablolarında da sıcaklığın yanı sıra kablo boyunca gerginlik değişimlerine ulaşılabileceği gösterilmiş ve gerçekten çok maliyetli olan diğer ölçüm yöntemlerine kıyasla güvenilir bir yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Kablo üzerinde 3763. metrede frekans kayması ~ 58 MHz iken, maksimum gerginlik değeri 3760. metrede ~ 950 $\mu\epsilon$ olarak elde edilmişti. Şekil 4.11 ve Şekil 4.18'de bu durum açık bir biçimde görülmektedir. Sıcaklık ve gerginliğin Brillouin frekans kayması üzerindeki etkisi eşit olsa idi, gerginliğin maksimum olduğu 3760. metrede frekans kayması da maksimum olmalıydı. Dolayısıyla; bu durum ancak, frekans kayması üzerinde sıcaklığın etkisinin, gerginliğin etkisinden daha yüksek olması ile açıklanabilmektedir. Simülasyon sonuçları teorik değerleri desteklemektedir (Bknz. Çizelge 3.2).

Bu çalışmada, 5 km uzunluğunda 380 kV XLPE izolasyonlu yüksek gerilim yer altı kablosu için eş zamanlı olarak sıcaklık ve gerginlik ölçümleri, spontane Raman gücü ve Brillouin frekans kaymasını esas alan tekniğin kullanılması ile elde edilmiştir. Sıcaklık ve gerginlik ölçümlerinde yüksek gerilim kablosu üzerine entegre edilmiş tek modlu fiber kullanılmıştır. Geri-saçılan Raman sinyali gücünden sıcaklık bilgisine, sıcaklık bilgisi ve saçılmanın olduğu noktadaki Brillouin frekans kayması bilgisi kullanılarak ta gerginlik bilgisine ulaşılmıştır. Matlab 6.5 programı yardımıyla ve belirli koşullar belirlenmek suretiyle benzetimleri gerçekleştirilmiş ve kablo boyunca sıcaklık ve gerginlik profilleri 1.5 m uzamsal çözünürlükte, ~1.25 °C sıcaklık çözünürlüğü ve ~50 $\mu\epsilon$ gerginlik çözünürlüğü ile elde edilmiştir.

Ayrıca, kablo boyunca Brillouin frekans kayması ve güç değişimi profilleri elde edilmiş ve benzetimleri gerçekleştirilmiştir. 600-700 m ve 800-900 m arasında frekans ve güç üzerinde oluşan RMS gürültüleri analiz edilerek, kablo boyunca RMS gürültü değerleri sırasıyla ~1.20 MHz ve ~% 0.45 olarak elde edilmiştir. Uygulamada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, Brillouin frekans kayması ve güç değişimleri üzerinde oluşan RMS gürültü miktarlarıdır. Frekans kayması ve güç değişimi üzerindeki RMS gürültü miktarları, sıcaklık ve gerginlik çözünürlüklerini belirlemede ve dolayısıyla algılama sisteminin performansını ölçmede önemli etkenlerdir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, yüksek gerilim kablolarında kablo boyunca sıcaklığın yanı sıra eş zamanlı gerginlik bilgilerine yüksek çözünürlüklerde ulaşılabileceği gösterilmiş ve gerçekten maliyetli yüksek olan diğer ölçüm yöntemlerine kıyasla dağınık sıcaklık ve gerginlik ölçüm yönteminin güvenilir bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

ALAHBABİ, M.N., CHO, Y.T., NEWSON T.P. 2005. Simultaneous Temperature and strain measurement using combined spontaneous Raman and Brillouin Scattering. Optics letters, No:11, 1276 p.

ALAHBABİ, M.N., CHO, Y.T., NEWSON, T.P. 2004. 100km distributed temperature sensor based on coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter. Measurement Science & Technology, No:15. 1544-1547 p.

ALAHBABİ, M.N. 2004. High spatial resolution Microwave detection system for long range Brillouin-based distributed sensors. Measurement Science & Technology, No:15. 1539-1543 p.

ALAHBABİ, M.N. 2005. Distributed optical fiber sensors based on the Coherent detection of Spontaneous Brillouin Scattering, Doktora Tezi.

CHO, Y.T. and NEWSON, T.P. 2002. Brillouin-Based Distributed Fiber Temperature Sensor at 1530nm using Raman Amplification. 15th OFS Conference Technical Digest, No:1. 305-308p.

CULVERHOUSE, D., FARAHI, F., PANNEL C.N., JACKSON D.A. 1989. Potential of stimulated Brillouin scattering as sensing mechanism for distributed temperature sensors. Electronics letters, No:14, 913-915 p.

DENSLEY J., KABİR. F., BRAUN J-M. 1994. Light Emission from Highly-Stressed Polymeric Cable Insulation and. Ontario Hydro Technologies, Toronto, Ontario.

DESCHAMPS, L., LACOSTE, R., HOANG, T.G., PERRET, J. 1990. Experimental apparatus for breakdown phenomena study in dielectric material under high hydrostatic pressure. Proc. 1st Int. Conference on conduction and breakdown in Solid Dielectrics, Toulouse, France. 390-394 p.

FARAHANI, M.A., GOGOLLA, T. 1999. Spontaneous Raman Scattering in Optical Fibers with Modulated Probe Light for Distributed Temperature Raman Remote Sensing. *J. Lightwave Technologies*. 1379-1391 p.

GENG J., WEI G. 2002. The development of the model and arithmetic for the fully distributed fiber optic sensor based on Raman optical-fiber frequency-domain reflectometry. 135-136 p.

HARTOG, A.H., LEACH, A.P., GOLD, M.P. 1985. Distributed temperature sensing in solid-core fibers. *Electronics letters*, No:23. 1061 p.

HORIGUCHI, T., KURASHIMA, T., TATEDA, M. 1989. Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers. *IEEE Photon. Technology Letters*, No:5, 107-108 p.

HORIGUCHI, T., TATEDA, M. 1989. Optical loss evaluation using Brillouin spectroscopy. *CLEO '89 paper WE5*, Baltimore. 172-175 p.

HORIGUCHI, T., TATEDA, M. 1990. Optical-fiber attenuation investigation using stimulated Brillouin Scattering between a pulse and a continuous wave. *Optics Letters*, No:8. 408-410 p.

HOTATE, K. 2002. Recent Progress in Brillouin based Fiber Sensor Technology. *Correlation-based Continuous wave Technique*, OFS Proceeding, No:1. 297-300 p.

<http://www.orc.soton.ac.uk>, Erişim tarihi: 20.06.2006. Konu: Photonics research publications.

<http://www.sensa.org>, Erişim tarihi: 15.06.2006. Konu: Distributed temperature sensing.

ISHIBASHI, A., KAWAI, T., NAKAGAWA, S., MUTO, H., KATAKAI, S. 1987. Factors influencing electrical treeing in XLPE insulation.

KEE, H.H., LEES, G.P. and NEWSON, T. 1999. A novel $1.65\mu\text{m}$ Raman based Distributed Temperature Sensor, Optoelectronics research center, University of Southampton, UK.

KURASHIMA, T., HORIGUCHI, T., TATEDA, M. 1990. Thermal Effects of Brillouin Gain Spectra in Single Mode Fibers. IEEE Photonics Technology Letters, No:10. 718 p.

LEES, G.P., DE SOUZA, K., NEWSON T.P. 1997. Novel optical fiber distributed temperature sensor based on the Landau-Placzek ratio.

MALIK, N.H., AL-ARAINY, A.A., QUERESHI, M.I. 1998. Electrical insulation in power systems. Markel Dekker Inc., New York. 462-463 p.

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, No: 12. 834 p.

MELTON, C.W., MANGARAJ, D., EPSTEIN, M. 1981. Water treeing in polyethylen cables insulations made of LPDE or XLPE. IEEE issues.

ORTON, H.E. 1987. Elevated temperature operation of XLPE distribution cable systems.

PARKER, T.R., FARHADIROUSHAN, M., HANDEREK V.A., ROGERS, A.J. 1997. A Fully Distributed Simultaneous Strain and Temperature Sensor using Spontaneous Brillouin Backscatter. IEEE Photonics Technology Letters, No:7. 979 p.

SENIOR, JOHN.M. 1992. Optical Fiber Communications, Principles and Practice. Second Edition, Prentice Hall International, UK.

SOUZA, P.D. 1999. Fiber Optic Distributed Sensing Based on Spontaneous Brillouin Scattering. University of Southampton, Doktora Tezi.

SOUZA, P.D., WAIT, P.C., NEWSON, T.P. 1997. A double-pass configured Mach-Zehnder interferometric optical filter for distributed sensing. Electronics letters, No:25, 2148-2150 p.

SOUZA, P.D., LEES, G.P., WAIT, P.C., NEWSON, T.P. 1996. A diode-pumped Landau-Placzek based distributed temperature sensor utilising an all-fiber Mach-Zehnder interferometer. Electronics letters, No:23. 23 p.

SOUZA, P.D., WAIT, P.C., NEWSON, T.P. 1997. Characterisation of Strain Dependence of Landau-Placzek Ratio for Distributed Sensing. Electronics Letters, No:7. 15 p.

WAIT, P.C., SOUZA, P.D., NEWSON, T.P. 1997. A Theoretical Comparison of Spontaneous Raman and Brillouin Based Fiber Optic Distributed Temperature Sensors. Optics Communications, No:1-3. 17 p.

WAIT, P.C., NEWSON, T.P. 1996. Landau Placzek Ratio Applied to Distributed Fiber Sensing. Optics Communications, No:122. 141 p.

YILMAZ, G., KARLIK, S.E. 2001. A real-time temperature monitoring application on high voltage cables with optical fiber sensors. Proceedings of the Ninth National Congress of Electrical-Electronics and Computer Engineering, İzmit, Turkey. 30-34 p.

EKLER

EK-1 Simülasyon Programı /Matlab 6.5

clear

% Figure(1)

% Set(1,'Name','5km uzunluğundaki 380 kV Yüksek Gerilim Kablosu Üzerinde

% Dağınmık % Sıcaklık ve Gerginliğin İzlenmesi')

% 1550 nm dalga boyunda Basamak indisli Tek modlu Fiber Sensör üzerinde Dağınmık

% Sıcaklığın Ölçülmesi.

% tt :500 metre tekrarlanan kablo bağlantı noktası (muf noktası) vardır.

% pp :1500-1525 metreleri arasında kablo 25 m'lik 145x5 mm ölçüsünde PVC boru

% içerisinde geçiyor.

% nn :2200. metreden başlayarak kablo 2200-2300 metreleri arasında 145x5 mm

% ölçüsünde PVC boru içerisinde ilerlerken 100 m mesafede kablo üzerine yük

% binmekte ve bu sebeple gerginlik meydana gelmektedir.

% kk :Kablo 3700. metreden başlayarak 3700-3800 metreleri arasında başka bir kablo

% ile kesişmekte ve yine bu aralıkta toprak kayması sonucu basınca maruz kalarak

% üzerinde gerginlik oluşmaktadır.

% zz :Kablo 4600-4625 ve 4675-4700 metreleri arasında 145x5 mm ölçüsünde bir boru

% içerisinde geçirilmektedir. 4625-4675 metreleri arasında ise 180x7 mm ölçüsünde

% 50 m uzunluğunda başka bir boru içerisinde geçirilmektedir. Çap daha büyük

% olduğu için (havanın ısı transferi zayıf olması sebebiyle) kablo yalıtkanı daha çok

% ısınmaktadır. Ayrıca, kablo 4650. metrede başka bir kablo ile kesişmektedir.

aa = 500;

pp = 1500;

nn = 2200;

kk = 3700;

zz = 4600;

zz1 = zz+50;

% Uzamsal Aralık (iki nokta çözünürlüğü)

% R : Ölçüm alınan nokta sayısı = 5 km /1.50 = 3333 adet

% Darbe süresi:15 ns.

L = 5000; % Fiber Kablo Uzunluğu

Delta_z=1.5 ; % Metre cinsinden uzamsal aralık Delta_z=15*e-9*3*e8/(2*1.5)

% Formülünden çıkartılmıştır.

Kappa_s = 3.04e-10; %Çizelge 2.1 (1550nm dalga boyunda tek modlu fiber için)

Kappa_as = 4.0e-10; %Çizelge 2.1 (1550nm dalga boyunda tek modlu fiber için)

Alpha_ps = 9.67e-5; %Çizelge 2.2 den faydalanılarak ve eşitlik (4.5) kullanılarak
% Alpha_ps=(adb*1n(10)/5000)= 9.67e-5 olarak bulunur.

Alpha_pas=10.36e-5; % Çizelge 2.2 den faydalanılarak ve eşitlik (4.6) kullanılarak
% Alpha_pas=10.36e-5 olarak bulunur.

```
c=(10.3e-5/9.7e-5);
R=3335;
d=rand(R,1)-0.5;
cc1=rand(R,1)-0.5;
for m=2:R-1;
```

% ro_s ve ro_as % Tez içerisinde eşitlik (4.1) ve (4.2) kullanılarak hesaplanmıştır.

```
z(m)=(m-1)*1.5;
```

% 5 km uzunluğundaki Yüksek Gerilim Kablosu üzerinde Raman ve Brillouin
% saçılmaları baz alınarak Dağılık Sıcaklığın hesaplatılması

```
if z(m) >= floor(z(m)/500)*aa & z(m) <= floor(z(m)/500)*aa+3
```

%Sıcaklık 312 Kelvin Derece

```
ro_s=1/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*312))); %Delta_E=Ramanda
% (E2-% E1) moleküler enerji düzeyleri arasındaki farktır.
```

% Delta_E=hV(6.62e-34*13e12GHz) formülünden bulunmaktadır.

```
ro_as=exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*312))/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/
(1.38054e-23*312)));
```

```
s=((ro_s*Kappa_s+d(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_ps*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)))
/((ro_as*Kappa_as+cc1(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_pas*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)));
T(m)=50e-3*1.60218e-19/(1.38054e-23*log(s*(1663/1451)^4*exp(1.3e-6*1.22*(m-
1))))-(190);
```

```
elseif z(m) >= nn & z(m) <= nn+100
```

%Sıcaklık 310 Kelvin Derece

```
ro_s=1/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*310)));
ro_as=exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*310))/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/
(1.38054e-23*310)));
```

```
s=((ro_s*Kappa_s+d(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_ps*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)))/
((ro_as*Kappa_as+cc1(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_pas*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)));
```

```
T(m)=50e-3*1.60218e-19/(1.38054e-23*log(s*(1663/1451)^4*exp(1.3e-6*1.22*(m-1)))-190);
elseif z(m) >= 1500 & z(m) <= 1525
```

```
%Sıcaklık 316 Kelvin Derece
```

```
ro_s=1/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*316)));
ro_as=exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*316))/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*316)));
```

```
s=((ro_s*Kappa_s+d(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_ps*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)))/
((ro_as*Kappa_as+cc1(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_pas*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)));
```

```
T(m)=50e-3*1.60218e-19/(1.38054e-23*log(s*(1663/1451)^4*exp(1.3e-6*1.22*(m-1)))-190);
```

```
elseif z(m) >= kk & z(m) <= kk+100
```

```
%Sıcaklık 317 Kelvin Derece
```

```
ro_s=1/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*317)));
ro_as=exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*317))/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*317)));
```

```
s=((ro_s*Kappa_s+d(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_ps*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)))/
((ro_as*Kappa_as+cc1(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_pas*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)));
```

```
T(m)=50e-3*1.60218e-19/(1.38054e-23*log(s*(1663/1451)^4*exp(1.3e-6*1.22*(m-1)))-190);
```

```
elseif z(m) >= 4600 & z(m) <= 4625
```

```
%Sıcaklık 308 Kelvin Derece
```

```
ro_s=1/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*308)));
ro_as=exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*308))/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*308)));
```

```
s=((ro_s*Kappa_s+d(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_ps*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)))/
((ro_as*Kappa_as+cc1(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_pas*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)));
```

```
T(m)=50e-3*1.60218e-19/(1.38054e-23*log(s*(1663/1451)^4*exp(1.3e-6*1.22*(m-1)))-190);
```

```
elseif z(m) >= 4625 & z(m) <= 4675
```

```
%Sıcaklık 314 Kelvin Derece
```

```
ro_s=1/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*314)));
```

```

ro_as=exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*314))/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/
(1.38054e-23*314)));
s=((ro_s*Kappa_s+d(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_ps*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)))/
((ro_as*Kappa_as+cc1(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_pas*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)));

T(m)=50e-3*1.60218e-19/(1.38054e-23*log(s*(1663/1451)^4*exp(1.3e-6*1.22*(m-
1))))-(190);

elseif (z(m) >= 4600 & z(m) <= 4700) & (z(m) >= 4650 & z(m) <= 4651)

%Sıcaklık 324 Kelvin Derece

ro_s=1/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*324)));
ro_as=exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*324))/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/
(1.38054e-23*324)));

s=((ro_s*Kappa_s+d(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_ps*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)))/
((ro_as*Kappa_as+cc1(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_pas*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)));

T(m)=50e-3*1.60218e-19/(1.38054e-23*log(s*(1663/1451)^4*exp(1.3e-6*1.22*(m-
1))))-(190);

elseif z(m) >= 4675 & z(m) <= 4700

%Sıcaklık 308 Kelvin Derece

ro_s=1/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*308)));
ro_as=exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*308))/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/
(1.38054e-23*308)));

s=((ro_s*Kappa_s+d(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_ps*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)))/
((ro_as*Kappa_as+cc1(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_pas*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)));

T(m)=50e-3*1.60218e-19/(1.38054e-23*log(s*(1663/1451)^4*exp(1.3e-6*1.22*(m-
1))))-(190);

else

ro_s=1/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*300)));
ro_as=exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*300))/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/
(1.38054e-23*300)));

s=((ro_s*Kappa_s+d(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_ps*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)))/
((ro_as*Kappa_as+cc1(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_pas*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)));

T(m)=50e-3*1.60218e-19/(1.38054e-23*log(s*(1663/1451)^4*exp(1.3e-6*1.22*(m-
1))))-(183);
end

```

% 5 km uzunluğundaki Yüksek Gerilim Kablosu üzerinde Dağılık Gerginliğin
% hesaplanması ve Brillouin frekans kayması ile Güç değişimlerine ulaşılması

if z(m) >= floor(z(m)/500)*aa & z(m) <= floor(z(m)/500)*aa+3

% Sıcaklık 312 Kelvin Derece

% Brillouin frekans kayması VB ile hesaplanmaktadır.

% Raman Ölçümünden Muf sonucu sıcaklık T(m) olarak hesaplanıyor. Gerginlik sıfır.

% (Delta_T)=T(m)-80 alınmıştır.

ro_s=1/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*312)));

ro_as=exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*312))/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/
(1.38054e-23*312)));

s=((ro_s*Kappa_s+d(m-1)*1e-11)*(1-exp(-2*Alpha_ps*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)))/
((ro_as*Kappa_as+cc1(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_pas*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)));

T(m)=50e-3*1.60218e-19/(1.38054e-23*log(s*(1663/1451)^4*exp(1.3e-6*1.22*(m-
1))))-(190);

VB(m)=1.07*(T(m)-80); % Brillouin Frekans Kayması/Her 500 metrede 10°C sıcaklık

% artışı 11GHz Frekansı kaydırmıştır. Eşitlik 4.8 kullanılarak hesaplanmıştır.

S(m)=(VB(m)-1.07*(T(m)-80))/0.048; % Gerginlik Ölçümü/Gerginlik sıfır.

% Eşitlik 4.10 kullanılarak hesaplanmıştır.

PB(m)=(-9/10^4)*S(m)+0.36*(T(m)-80); % Brillouin Güç Değişimi(% olarak

% değişim-sıcaklık ve gerginliğe bağlı). Eşitlik 4.9 kullanılarak hesaplanmıştır.

elseif z(m) >= nn & z(m) <= nn+100

% Sıcaklık 309 Kelvin Derece

% Brillouin frekans kayması 35 MHz olarak tespit edilmiştir. Ancak, kablo üzerinde

% yük nedeniyle gerginlik oluşmaktadır.

% Raman işareti güç değişimlerinden boru içerisinde ilerlerken oluşan sıcaklık T(m)

% olarak hesaplanıyor. Gerginlik S(m) formülü ile hesaplanmaktadır.

ro_s=1/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*309)));

ro_as=exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*309))/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/
(1.38054e-23*309)));

s=((ro_s*Kappa_s+d(m-1)*1e-11)*(1-exp(-2*Alpha_ps*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)))/
((ro_as*Kappa_as+cc1(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_pas*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)));

T(m)=50e-3*1.60218e-19/(1.38054e-23*log(s*(1663/1451)^4*exp(1.3e-6*1.22*(m-
1))))-(190);

$S(m)=(35-1.07*(T(m)-80))/0.048$; % $\lambda = 1550\text{nm}$. için sıcaklığa bağlı Brillouin frekans
% kayma katsayısı hesaplanmaktadır.

$VB(m)=1.07*(T(m)-80)+28.50$; %28.50 MHz kablo üzerindeki gerginlik ve 6.50
% MHz. ise sıcaklık nedeniyle ile oluşan Brillouin frekans kayması miktarıdır.

$PB(m)=(-9/10^4)*S(m)+0.36*(T(m)-80)$;

elseif $z(m) \geq 1500$ & $z(m) \leq 1525$

%Sıcaklık 316 Kelvin Derece

$ro_s=1/(1-\exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*316)))$;

$ro_as=\exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*316))/(1-\exp((-0.05*1.60218e-19)/$
 $(1.38054e-23*316)))$;

$s=((ro_s*Kappa_s+d(m-1)*1e-11)*(1-\exp(-2*Alpha_ps*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)))/$
 $((ro_as*Kappa_as+cc1(m-1)*1e-12)*(1-\exp(-2*Alpha_pas*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)))$;

$T(m)=50e-3*1.60218e-19/(1.38054e-23*\log(s*(1663/1451)^4*\exp(1.3e-6*1.22*(m-1))))-(190)$;

$VB(m)=1.07*(T(m)-80)$;

$S(m)=(VB(m)-13)/0.048$; %13 MHz.bu aralıktaki sıcaklık nedenli Brillouin frekans
% kayması (sıfır gerginlik referans alınmıştır).

$PB(m)=(-9/10^4)*S(m)+0.36*(T(m)-80)$;

elseif $z(m) \geq kk$ & $z(m) \leq kk+100$

%Sıcaklık 317 Kelvin Derece

%Brillouin Frekans Kayması 55 MHz olarak tespit edilmiştir.

$ro_s=1/(1-\exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*317)))$;

$ro_as=\exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*317))/(1-\exp((-0.05*1.60218e-19)/$
 $(1.38054e-23*317)))$;

$s=((ro_s*Kappa_s+d(m-1)*1e-11)*(1-\exp(-2*Alpha_ps*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)))/$
 $((ro_as*Kappa_as+cc1(m-1)*1e-12)*(1-\exp(-2*Alpha_pas*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)))$;

$T(m)=50e-3*1.60218e-19/(1.38054e-23*\log(s*(1663/1451)^4*\exp(1.3e-6*1.22*(m-1))))-(190)$;

$S(m)=(55-1.07*(T(m)-80))/0.048$;

VB(m)=1.07*(T(m)-80)+43.20; %43.20 MHz kabloya uygulanan basınç sonucunda
% oluşan Brillouin Frekans Kaymasıdır.
% 11.80 MHz ise kablunun sıcaklığının neden olduğu Brillouin frekans kaymasıdır.

$$PB(m)=(-9/10^4)*S(m)+0.36*(T(m)-80);$$

elseif (z(m) >= zz & z(m) <= zz+100) & (z(m) >= zz1 & z(m) <= zz1+1)

%Sıcaklık 324 Kelvin Derece

$$ro_s=1/(1-\exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*324)));$$

$$ro_as=\exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*324))/(1-\exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*324)));$$

$$s=((ro_s*Kappa_s+d(m-1)*1e-11)*(1-\exp(-2*Alpha_ps*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)))/$$

$$((ro_as*Kappa_as+cc1(m-1)*1e-12)*(1-\exp(-2*Alpha_pas*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)));$$

$$T(m)=50e-3*1.60218e-19/(1.38054e-23*\log(s*(1663/1451)^4*\exp(1.3e-6*1.22*(m-1))))-(190);$$

$$VB(m)=1.07*(T(m)-80);$$

S(m)=(VB(m)-18)/0.048; %Yaklaşık 19 MHz.bu aralıktaki sıcaklık nedenli Brillouin
% frekans kayması (sıfır gerginlik referans alınmıştır).

$$PB(m)=(-9/10^4)*S(m)+0.36*(T(m)-80);$$

elseif z(m) >= zz & z(m) <= zz+25

%Sıcaklık 308 Kelvin Derece

$$ro_s=1/(1-\exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*308)));$$

$$ro_as=\exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*308))/(1-\exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*308)));$$

$$s=((ro_s*Kappa_s+d(m-1)*1e-11)*(1-\exp(-2*Alpha_ps*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)))/$$

$$((ro_as*Kappa_as+cc1(m-1)*1e-12)*(1-\exp(-2*Alpha_pas*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)));$$

$$T(m)=50e-3*1.60218e-19/(1.38054e-23*\log(s*(1663/1451)^4*\exp(1.3e-6*1.22*(m-1))))-(190);$$

$$VB(m)=1.07*(T(m)-80);$$

S(m)=(VB(m)-4)/0.048; %Yaklaşık 4 MHz.bu aralıktaki sıcaklık nedenli Brillouin
% frekans kayması (sıfır gerginlik referans alınmıştır).

$$PB(m)=(-9/10^4)*S(m)+0.36*(T(m)-80);$$

```
elseif z(m) >= zz+25 & z(m) <= zz+75
```

```
%Sıcaklık 314 Kelvin Derece
```

```
ro_s=1/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*314)));
ro_as=exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*314))/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/
(1.38054e-23*314)));
```

```
s=((ro_s*Kappa_s+d(m-1)*1e-11)*(1-exp(-2*Alpha_ps*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)))/
((ro_as*Kappa_as+cc1(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_pas*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)));
```

```
T(m)=50e-3*1.60218e-19/(1.38054e-23*log(s*(1663/1451)^4*exp(1.3e-6*1.22*(m-
1))))-(190);
```

```
VB(m)=1.07*(T(m)-80);
```

```
S(m)=(VB(m)-9.2)/0.048; %Yaklaşık 8.5 MHz.bu aralıktaki sıcaklığın nedenli
% Brillouin frekans kayması (sıfır gerginlik).
```

```
PB(m)=(-9/10^4)*S(m)+0.36*(T(m)-80);
```

```
elseif z(m) >= zz+75 & z(m) <= zz+100
```

```
%Sıcaklık 308 Kelvin Derece
```

```
ro_s=1/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*308)));
ro_as=exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*308))/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/
(1.38054e-23*308)));
```

```
s=((ro_s*Kappa_s+d(m-1)*1e-11)*(1-exp(-2*Alpha_ps*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)))/
((ro_as*Kappa_as+cc1(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_pas*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)));
```

```
T(m)=50e-3*1.60218e-19/(1.38054e-23*log(s*(1663/1451)^4*exp(1.3e-6*1.22*(m-
1))))-(190);
```

```
VB(m)=1.07*(T(m)-80);
```

```
S(m)=(VB(m)-4)/0.048; %Yaklaşık 4 MHz.bu aralıktaki sıcaklık nedenli Brillouin
% frekans kayması (sıfır gerginlik).
```

```
PB(m)=(-9/10^4)*S(m)+0.36*(T(m)-80);
```

```
else
```

```
ro_s=1/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*300)));
ro_as=exp((-0.05*1.60218e-19)/(1.38054e-23*300))/(1-exp((-0.05*1.60218e-19)/
(1.38054e-23*300)));
```



```
s=((ro_s*Kappa_s+d(m-1)*1e-11)*(1-exp(-2*Alpha_ps*c*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)))/
((ro_as*Kappa_as+cc1(m-1)*1e-12)*(1-exp(-2*Alpha_pas*3e8*12.2e-9*(m-1)/3)));
```

```
T(m)=50e-3*1.60218e-19/(1.38054e-23*log(s*(1663/1451)^4*exp(1.3e-6*1.22*(m-
1))))-(183);
```

```
VB(m)=1.07*(T(m)-80);
```

```
S(m)=(VB(m)-0)/0.048;
```

```
PB(m)=(-9/10^4)*S(m)+0.36*(T(m)-80);
```

```
end
```

```
%-----
```

ÖZGEÇMİŞ

Uludağ üniversitesi Elektronik mühendisliği bölümünden 1998 yılında mezun olarak lisans derecesi almıştır. 2004 yılı bahar döneminde başlamış olduğu yüksek lisans eğitimine halen devam etmekte olup tez aşamasındadır. İlgilendiği konular arasında optik fiberli haberleşme sistemleri, optik fiberli sensörler ve optik fiberli sistemlerde gürültü kaynakları yer almaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, makale ve yayınların incelenmesi doğrultusunda hiçbir fedakarlığı esirgemeyen Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakóltesi Elektronik Mühendisliği bölümü hocalarından danışman hocam Doç.Dr.Güneş Yılmaz'a, tez doğrultusunda yönlendirici fikirlerinden dolayı Dr.S.Eser Karlık hoca'ya, her zaman için yanımda olduğunu bildiğim ve tez aőamasındaki zorlu yolda desteğini esirgemeyen eőime ve çok sevgili aileme teşekkür ederim.